

ROZWÓJ METEOROLOGII RADAROWEJ W POLSCE



IRENA TUSZYŃSKA

SERIA PUBLIKACJI NAUKOWO-BADAWCZYCH IMGW-PIB
2015



ROZWÓJ METEOROLOGII RADAROWEJ W POLSCE

Irena Tuszyńska

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
Państwowy Instytut Badawczy
Warszawa 2015



SERIA PUBLIKACJI NAUKOWO-BADAWCZYCH IMGW-PIB

ROZWÓJ METEOROLOGII RADAROWEJ W POLSCE

Autor

mgr inż. Irena Tuszyńska

Recenzenci

dr inż. Sławomir Pietrek

mgr Zdzisław Dziewit

Opracowanie redakcyjne

Karolina Rac

Opracowanie graficzne i techniczne

Rafał Stepnowski

ISBN: 978-83-61102-92-2

Wydawca

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy
01-673 Warszawa, ul. Podleśna 61, E. content@imgw.pl

Komitet Redakcyjny Wydawnictw IMGW-PIB

prof. dr hab. inż. Janusz Zaleski – przewodniczący,

mgr Karolina Racka – sekretarz,

dr Rafał Bąkowski, dr inż. Ryszard Kosierb, dr Danuta Limanówka,

dr hab. Elżbieta Łysiak-Pastuszek, prof. dr hab. inż. Maciej Maciejewski,

prof. dr hab. inż. Wojciech Majewski, dr hab. inż. Mieczysław S. Ostojki, prof. nadzw.

prof. dr hab. inż. Laura Radczuk, prof. dr hab. inż. Kazimierz Rózdżyński,

mgr inż. Edmund Sieński, mgr Rafał Stepnowski, dr inż. Wiwiana Szalińska,

dr hab. Jan Szturc, dr hab. inż. Tamara Tokarczyk, prof. nadzw.,

dr inż. Tomasz Walczykiewicz, prof. nadzw.

Spis treści

Wstęp	7
1. Historia radaru	10
1.1. Początki radiolokacji	10
1.2. Radary meteorologiczne	13
1.2.1. Specyfika badania atmosfery radarem meteorologicznym	13
1.2.2. Pierwsze radary meteorologiczne	15
2. Początki meteorologii radarowej w Polsce	19
2.1. DECCA – pierwszy radar meteorologiczny w Polsce	19
2.2. Zakres prowadzonych badań z wykorzystaniem danych radaru DECCA	22
3. System radarowy na bazie MRL-2	24
3.1. Miejsce Radarowego Systemu Meteorologicznego w gospodarce kraju	24
3.2. Radar typu MRL-2	25
3.3. Praca operacyjna – od pomiaru do gotowego produktu	28
3.4. Prawdopodobieństwo wykrywania chmur radarami typu MRL	34
3.5. Radarowy System Meteorologiczny – Zestaw Przetwarzania Informacji	36
3.5.1. Radarowy System Meteorologiczny	36
3.5.2. Specjalizowany Procesor Meteorologiczny – SPM-1	37
3.5.3. Elektroniczna maszyna cyfrowa – MERA-400	39
3.6. Półautomatyczny System Radarowy (PSR)	43
3.6.1. Główne założenia dla PSR	43
3.6.2. PSR w służbie operacyjnej	45
3.6.3. Zobrazowanie informacji na terminalu użytkownika	47
3.7. Prace badawcze prowadzone w latach 1977-1990 z wykorzystaniem danych z radaru MRL-2 ..	48
4. Metody pozyskiwania danych radarowych	53
4.1. Radarowy pomiar parametrów meteorologicznych atmosfery	53
4.1.1. Zasady pomiaru	53
4.1.2. Rozpraszanie i pochłanianie fal elektromagnetycznych przez hydrometeory	56
4.2. Podstawowe wielkości mierzone radarem meteorologicznym	59
4.2.1. Równanie radarowe	59
4.2.2. Odbiciowość radarowa	61
4.2.3. Radarowy pomiar wiatru	64
4.3. Metodyka skanowania przestrzeni	68
5. System na bazie radaru MRL-5	70
5.1. Automatyczny System Radarowy	70
5.2. Automatyczny Meteorologiczny System Radarowy – architektura systemu	74
5.3. Oprogramowanie AMSR	77

5.3.1. MENU główne systemu	77
5.3.2. Obsługa przestrzeni	79
5.3.3. Główne programy AMSR do przetwarzania danych	80
5.4. Produkty systemu	84
5.5. Dystrybucja informacji radarowej	91
5.6. Prace badawcze i wdrożeniowe	92
5.6.1. Echa anomalnej propagacji i ich eliminacja w AMSR	92
5.6.2. Kalibracja radaru MRL-5	94
5.6.3. Weryfikacja prognoz opadu z modeli numerycznych za pomocą danych radarowych	96
5.7. Znaczenie informacji radarowej	97
6. Ewolucja koncepcji systemu radarowego	101
6.1. Koncepcja z okresu 1974-1975	101
6.2. Metodyka utworzenia sieci radarowej z 1980 r.	104
6.3. Weryfikacja dotychczasowych koncepcji sieci radarowej	105
6.4. Zmiany w podejściu do zagadnienia tworzenia sieci radarowej	108
7. Pierwsze radary dopplerowskie w służbie IMGW	111
7.1. RAM – radar meteorologiczny – Meteor 360 AC	111
7.2. PAS – radar meteorologiczny – Meteor 360 AC	114
7.3. Analiza lokalizacji pod nowe radary	118
8. Początki współpracy międzynarodowej	120
9. Sieć radarów meteorologicznych – POLRAD	125
9.1. Perspektywy pozyskania nowych radarów	125
9.2. Budowa i modernizacja sieci radarowej POLRAD	127
9.2.1. Radar meteorologiczny Meteor 1500C w Legionowie – LEG	127
9.2.2. Radar meteorologiczny Meteor 1500 C w Rzeszowie – RZE	130
9.2.3. Radar meteorologiczny Meteor 500C w Poznaniu – POZ	133
9.2.4. Radar meteorologiczny Meteor 500C w Świdwinie –SWI	136
9.2.5. Modernizacja radarów na stacji RAM i PAS	138
9.2.6. Radar meteorologiczny Meteor 1500C w Gdańsku – GDA	141
9.2.7. Radar meteorologiczny Meteor 500C w Brzuchani – BRZ	143
9.3. Usprawnianie systemu radarowego	146
9.3.1. System NIMROD i jego rola	146
9.3.2. Rekonfiguracja i kolejne ulepszenia systemu radarowego	148
9.4. Transmisja danych radarowych za pomocą łączy satelitarnych	151
9.5. Obieg i wykorzystanie informacji radarowej	154
9.6. Podstawowe produkty radarowe generowane w ramach systemu POLRAD	159
9.7. Badania prowadzone w latach 2004-2012	164
9.7.1. Prace i krajowe projekty badawcze	164
9.7.2. Projekty międzynarodowe po 2005 r.	167

10. Rozpoznawanie zjawisk i procesów meteorologicznych w systemie radarowym	171
10.1. Podstawowe zjawiska i procesy, a produkty radarowe	171
10.2. Istota klasyfikacji ech radarowych w procesie automatycznego rozpoznawania zjawisk ekstremalnych	177
11. Radary z podwójną polaryzacją fali elektromagnetycznej	180
11.1. Instalacja nowych radarów na stacjach PAS i RAM	180
11.2. Specyfika pomiaru falą podwójnie spolaryzowaną	183
11.3. Wskaźniki pozyskiwane z pomiarów polarymetrycznych	185
11.4. Wykorzystanie wskaźników polarymetrycznych w procesie rozpoznawania zjawisk	190
11.5. Zalety pomiaru radarem o podwójnej polaryzacji	194
12. Problemy związane z eksploatacją systemu POLRAD	196
12.1. Zakłócenia – „walka” z nadajnikami	196
12.2. Serwis radarowy	199
12.3. Perspektywy rozwoju sieci POLRAD na lata 2013-2015	201
Ważne daty w skrócie – zestawienie	205
Bibliografia	208

Wstęp

Opracowanie przedstawia drogę polskiej meteorologii radarowej, podążającej za światowymi osiągnięciami w tej dziedzinie zgodnie z możliwościami, jakie nam oferowano w ciągu ostatnich pięćdziesięciu lat, w warunkach realiów życia społeczno-gospodarczego w Polsce.

W celu przybliżenia zagadnień związanych z meteorologią radarową nakreślono okoliczności, w których pojawił się radar meteorologiczny. Przedstawiono (w skrócie) istotne kwestie, które należało rozwiązać, aby budować coraz doskonalsze urządzenia, z których jedno w pewnym momencie pojawiło się w Polsce i zapoczątkowało rozwój naszej rodzimej meteorologii radarowej. Skutkiem tego w Państwowym Instytucie Hydrologiczno Meteorologicznym (PIHM) wyłoniła się grupa ludzi – pasjonatów próbujących poznać „tajniki” tego urządzenia i zgłębić zasady interpretacji pozyskanej informacji, rozpoczynając w ten sposób rozwijanie w Polsce, od podstaw, nowej dyscypliny naukowej, jaką była wówczas meteorologia radarowa.

Pierwsze doświadczenia zebrane podczas pracy z radarami (DECCA, MRŁ-2) wykazały, że przy stosowaniu (możliwej wówczas do pozyskania) rozdzielczości 30 km i pomiarze odbiciowości na trzech wysokościach, potrzeba („w trudnych”, czyli interesujących sytuacjach meteorologicznych) ok. 30-40 min na wykonanie pomiaru (radar MRŁ-2). Jednocześnie rozdzielczość 30 km była dalece niewystarczająca, skoro możliwe stawało się pozyskanie rozdzielczości 1 km. W ciągu 30 min w przypadku komórek konwekcyjnych sytuacja ulega tak szybkim zmianom, że w zasadzie pomiar dotyczył czego innego na początku, a czego innego na końcu obserwacji.

Celem, jaki przyświecał specjalistom zgłębiającym zagadnienia meteorologii radarowej, było dostarczenie w jak najszybszym czasie służbie meteorologicznej gotowej, zinterpretowanej informacji. Naukowcy z PIHM, a potem Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, zafascynowani możliwościami pomiaru realizowanego za pomocą radaru, tworzyli coraz nowsze, bardziej „dojrzałe” koncepcje systemów zmierzających do automatyzacji pomiarów realizowanych z wykorzystaniem radaru meteorologicznego.

Z chwilą pojawienia się pierwszych komputerów możliwych do zastosowania w procesach automatyzacji pracy radaru i wdrożenia zalgorytmizowanych procesów interpretacji zebranych przez radar informacji, przystąpiono do zbudowania pierwszego w Polsce półautomatycznego Radarowego Systemu Meteorologicznego (RSM, 1981-1987), w kolejnej wersji – Półautomatycznego Systemu Radarowego (PSR, 1988-1990). Był to duży krok naprzód, jeśli chodzi o stworzenie podwalin automatyzacji procesów pomiaru i analiz pozyskanego sygnału radarowego.

Pozwoliło to na zdobycie doświadczeń umożliwiających utworzenie systemu automatycznego sterowania pracą radaru i przetwarzania danych radarowych w informację „przyjazną” nie tylko dla specjalisty z dziedziny meteorologii. Zbudowanie od podstaw Automatycznego Meteorologicznego Systemu Radarowego (AMSR, 1991-2002) na miarę środków technicznych możliwych do pozyskania wówczas na polskim rynku było dużym osiągnięciem polskich „radarowców”.

Niestety wymienione systemy opracowane były tylko dla jednej, autonomicznie pracującej stacji radarowej (radar Legionowo).

Otwarcie polskich granic na zachodnie technologie (1998 r.), a dzięki temu na zaawansowane techniki analiz danych radarowych, umożliwiło wcielenie w życie marzeń o budowaniu systemu osłony radarowej dla całego obszaru Polski. Środki pozyskane przez IMGW w latach 90. pozwoliły na uruchomienie dwóch kolejnych stacji radarowych, a w następnych latach – sieci radarów, której koncepcja opracowywana była już od 1974 r.

W 2002 r. wcielono w życie kontrakt na budowę sieci radarowej POLRAD, złożonej z wielu nowoczesnych stacji radarowych, środków telekomunikacyjnych oraz komputerowego systemu zbierania i przetwarzania danych. Przez kolejne lata sieć modernizowano i szkolono specjalistów z meteorologii radarowej, których grono stawało się coraz większe. Aktualnie zmierza się do jej rozbudowy, doskonalą się metody analizy danych radarowych w ścisłej współpracy z europejskimi ekspertami w tej dziedzinie, korzystając przy tym ze światowych osiągnięć i doświadczeń specjalistów z meteorologii radarowej.

W niniejszym opracowaniu znajdują Państwo rozwinięcie zawartych wyżej myśli i zapoznają się z procesami przemian, a także kierunkami badań prowadzonych w zakresie meteorologii radarowej przez okres 50 lat, tj. od momentu jej powstania jako dziedziny badawczej w polskiej meteorologii, zmierzającej do zgłębienia wiedzy na temat zjawisk zachodzących w atmosferze, do czasów obecnych.

W związku z tym, że przedstawienie szczegółowo wszystkich zagadnień, problemów do rozwiązania, jakie pojawiały się w ciągu tych lat wymagałoby kilkutomowego dzieła, do opracowania dołączono (w miarę szczegółowy) spis wykorzystanych opracowań. Z chwilą, kiedy czytelnik będzie miał „niedosyt” wiedzy na któryś z tematów, zapraszam do lektury cytowanych opracowań. Warto to zrobić, choćby ze względu na to, że obecnie radary meteorologiczne są jedynymi (oprócz satelitów) urządzeniami, za pomocą których można zdalnie badać stan atmosfery i zachodzące w niej zjawiska pogodotwórcze z dużą rozdzielczością przestrzenną i czasową. W przeciwieństwie do metod klasycznych radary dają możliwość ciągłego śledzenia zjawisk/procesów zachodzących w atmosferze. Ma to szczególne znaczenie w wykrywaniu i śledzeniu stref intensywnych opadów oraz zjawisk, a także określaniu zgodności ich rzeczywistego rozwoju z prognozami. Szczególnie

w przypadku interpretacji dynamicznie zmieniających się w czasie zdarzeń typu ekstremalnego informacja radarowa stała się bezcenna. Wiele systemów stosowanych na całym świecie do obserwacji stref burzowych i opracowywania prognoz pogody na najbliższy okres wykorzystuje dane z radarów meteorologicznych.

1. Historia radaru

1.1. Początki radiolokacji

Za początek rozwoju radiolokacji można uznać okres, w którym opracowano teorie pola elektromagnetycznego. Prekursorem w tej dziedzinie był James Clerk Maxwell (ur. 1831, zm. 1879), który udowodnił, że elektryczność i magnetyzm są dwoma rodzajami tego samego zjawiska – elektromagnetyzmu. Z kolei niemiecki fizyk Heinrich Hertz (ur. 1857, zm. 1894) wykazał, że fale elektromagnetyczne są odbijane przez metalowe przedmioty oraz ulegają refrakcji podczas przejścia przez wykonany z dielektryka pryzmat. Hertz używał urządzenia, o konstrukcji podobnej do współczesnego radaru impulsowego, tworząc podstawy rozwoju radiolokacji.

Wyniki eksperymentów Hertza wykorzystał inny naukowiec, niemiecki inżynier Christian Hülsmeier. Na początku XX w. zbudował urządzenie, które było monostatycznym radarem impulsowym (nadajnik i odbiornik radaru umieszczone w jednym urządzeniu) i udoskonaloną wersją urządzenia Hertza. W 1904 r. zostało ono opatentowane. Nie spotkało się jednak z zainteresowaniem i wkrótce o nim zapomniano. Powszechnie Hülsmeier jest uznawany za konstruktora pierwszego radaru (zasięg 3 km) [Woliński 2006-2015].

Na przełomie lat 20. i 30. XX w. coraz większe znaczenie w działaniach wojennych zaczęto przypisywać lotnictwu. Ówczesne sposoby ostrzegania przed nalo-tem (sieć posterunków obserwacyjnych oraz akustyczne aparaty nasłuchowe) miały mały zasięg i dokładność. Skutkiem tego samoloty były wykrywane zbyt późno. Wczesne ostrzeganie o ich zbliżaniu się, ze znacznym wyprzedzeniem w czasie, stało się pilną potrzebą wojsk [Sztarski 1981].

W latach 30. przypomniano sobie o radarze Hülsmeiera. Prace nad opracowaniem nowych sposobów wykrywania samolotów rozpoczęto (prawie jednocześnie i niezależnie) w kilku państwach: USA, Wielkiej Brytanii, Niemczech, Związku Radzieckim, Francji, Włoszech, Japonii i Holandii. W każdym z tych krajów radar-ry były inaczej nazywane, a wszelkie prace nad opracowaniem i wprowadzeniem nowej techniki były utajnione.

W latach 1930-1943 tysiące techników, inżynierów i uczonych pracowało nad koncepcjami budowy i wykorzystania radarów oraz nad udoskonalaniem poszczegól-nych elementów. W Anglii na podstawie projektu R. Watsona-Watta, zbudowano (1935 r.) układ pięciu radarów dalekiego zasięgu typu CH (*Chain Home*). Był to pierwszy na świecie radiolokacyjny system taktycznego dowodzenia lotnictwem myśliwskim ochraniający, po wybuchu wojny w 1939 r., wschodnie wybrzeża Anglii. Później system został uzupełniony radarami wykrywania celów nisko leca-cych, typu CHL (*Chain Home Low*) [Tomczak-Janowski 1998].

W 1939 r., bez zastosowania lamp o dużej mocy, możliwe było generowanie fal elektromagnetycznych o długościach nie mniejszych niż 50 cm. Radary emitowały fale o częstotliwościach o wiele niższych niż obecnie, nie znano jeszcze technik generowania fal elektromagnetycznych o bardzo wysokich częstotliwościach; ani Niemcy, ani Brytyjcy naukowcy nie byli w stanie skonstruować radaru pracującego na krótszych falach.

Powołana w 1939 r. grupa naukowców z uniwersytetu w Birmingham zajęła się budową specjalnej lampy, nazwanej klistronem, generującej fale o długości ok. 10 cm. Jej moc okazała się jednak zbyt mała, by można było stosować ją do efektywnej transmisji radarowej. Zwrócono uwagę na magnetron, który stanowił wówczas tylko laboratoryjną ciekawostkę. Podstawy teoretyczne rezonatora oparte zostały na wynikach prac Heinricha Hertza. Pętla Hertza przeliczono metodą ekstrapolacji na miedziany cylinder, który był sercem nowego magnetronu. Wykonano prototyp magnetronu wnekowego – lampę mikrofalową zdolną generować falę elektromagnetyczną o bardzo dużej częstotliwości i mocy. Pierwsze fale wytworzone za ich pomocą miały długość ok. 10 cm. Przeniosło to radar z elektronicznej ery „kamienia łupanego” do współczesności.

Trzeba było jeszcze wiele pracy, aby magnetron mógł być wprowadzony do użytku. Jego udoskonalona wersja z Birmingham została wyprodukowana w maju 1940 r. Ten zbyt duży magnetron (chłodzony wodą) zastąpiono modelem, który był chłodzony powietrzem. Pierwsze urządzenie tego typu uruchomiono 29 czerwca 1940 r.

Anglia, wspierana przez USA, zmuszona była bronić swych miast, fabryk i lotnisk, a także płynących z Ameryki konwojów. W sierpniu 1940 r. „udoskonalony magnetron” popłynął do ciągle jeszcze neutralnych Stanów Zjednoczonych i został określony przez Amerykanów jako: „najbardziej wartościowy ładunek, jaki kiedykolwiek przybił do ich wybrzeży”.

Magnetron dotarł (z Anglii) do powstałego w listopadzie 1940 r. Laboratorium Promieniowania przy MIT – Massachusetts Institute of Technology (USA). Pozwoliło to budować coraz doskonalsze radary. Zastosowanie magnetronu w radiolokacji spowodowało znaczne zredukowanie rozmiarów radarów, a zwłaszcza ich anten, co pozwoliło na umieszczanie ich na pokładach samolotów – powstał lotniczy radar pokładowy.

Magnetron okazał się jednym z najistotniejszych wynalazków brytyjskich w okresie II wojny światowej, pozwalającym konstruować radary zdolne śledzić nie tylko ogromne statki powietrzne, ale także pojedyncze myśliwce. Po raz pierwszy w powietrzu zastosowano go w nowych radarach, pracujących na falach centymetrowych, jako zmodernizowane wyposażenie nocnych myśliwców. Zestaw typu AI MkVII wszedł do służby z końcem 1941 r. Jego zastosowanie przyniosło natychmiast sukces. Operatorzy pracujący z radarem typu AI stwierdzili, że choć odbicia

od ziemi nie są teraz widoczne, to na ekranie można zaobserwować dyskretne odbicia od linii brzegowych i terenów zabudowanych. Przedyskutowano, czy otrzymane sygnały mogłyby być definitywnie połączone ze specyficznymi obiektami na ziemi. Rezultaty kolejnych lotów okazały się bardzo obiecujące. Prace początkowo opatrzone były kryptonimem BN, od *Blind Navigation* (ślepa nawigacja). Wkrótce radar AI zmieniono na H2S. Radar H2S wyposażony był w magnetron generujący fale 10-centymetrowe. Obrotowa antena wysyłała wąską wiązkę przeszukującą teren pod samolotem. Z końcem 1942 r. zestawy H2S zainstalowano na 12 samolotach Halifax z 38 Dywizjonu Bombowego i 12 samolotach Stirling (brytyjski ciężki czterosilnikowy bombowiec dalekiego zasięgu – 4000 km). Woda i otwarte płaskie przestrzenie nie odbijały fal, czyniły to jednak budynki w terenie zabudowanym. W rezultacie nawigator otrzymywał obraz nieco przypominający mapę. Aktualny obraz prezentowany na ekranie kineskopu nazywany był PPI (*Plan Position Indicator*); skanująca wiązka „malowała” na nim coraz to nowe szczegóły w miarę przemieszczania się samolotu. Dzięki kineskopowi o fosforyzującej poświacie linie oznaczające nierówności terenowe znikwały dopiero wraz z pojawieniem się nowego obrazu. Postępy w konstrukcji 3-centymetrowego H2S były tak wielkie, że atakujące w ciemności i chmurach bombowce osiągały dokładność podobną do uzyskiwanej przy dobrej pogodzie w południe [<http://www.eduteka.pl/doc/h2s-radar>]. Radary pracujące w paśmie 3 cm służyły do naprowadzania bombowców na cel. Brytyjskie radary pracujące na falach centymetrowych montowano na pokładach samolotów od wiosny 1943 r. [Tomczak-Janowski 2000].

Nie zaprzestano jednak prac nad modernizacją urządzenia. Wspólnie z pokrewnymi instytucjami zajmowano się radarem w Stanach Zjednoczonych i Wielkiej Brytanii. Laboratorium Promieniowania przy MIT (USA) stało się wylęgarnią osiągnięć nauki i techniki na bezprecedensową skalę w historii. Do sierpnia 1945 r., w czasie największego rozkwitu, zwiększyło swoją kadrę z początkowych dwustu do blisko czterech tysięcy pracowników. W czasie wojny amerykański przemysł wyprodukował ponad 150 modeli radarów w łącznej liczbie prawie miliona sztuk. Większość była przeznaczona do wykrywania „twardych” obiektów punktowych [Buderi 2005].

Nazwę „radar” utworzyli oficerowie marynarki USA F.R. Furth i S.M. Tucker; pochodzi ona od pierwszych liter słów angielskich, określających zadania radiolokacji: *Radio Detection And Ranging* – wykrywanie i określanie odległości za pomocą radia. Angielska wersja tego skrótu to *Radio Aids for Defence And Reconnaissance* – radiowe środki dla obrony i rozpoznania. Obie wersje nie oddawały w pełni istoty tego wynalazku (np. pierwsza dotyczy tylko zastosowań niektórych typów radarów), a po 1945 r. definiowano ją jako *Radio Direction And Range* lub *Radio-Angle Direction And Range* [Sztarski 1981].

Po wojnie udoskonalanie radarów zmierzało w stronę rosnącej specjalizacji poszczególnych rodzajów i zapewnienia im jak najlepszych własności do realizacji określonych zadań. W pierwszych latach powojennych wojskowa kontrola lotów zapewniała bezpieczeństwo samolotom zarówno wojskowym, jak i cywilnym.

Przywieziony w 1940 r. z Wielkiej Brytanii do Ameryki nadajnik radarowy stanowił istotny początek rozwoju zastosowań fal elektromagnetycznych w różnych dziedzinach życia.

Prace nad budową radarów podczas drugiej wojny światowej miały wpływ nie tylko na jej przebieg, ale także na powojenną naukę i technikę. Wynik wojennych prac nad radarem mikrofalowym jest wspaniałym przykładem wzajemnych związków między nauką a techniką. Naukowcy, korzystając z wielu osiągnięć fizyki, stworzyli nową dziedzinę, aby później zastosować jej wynalazki w badaniach naukowych oraz wielu innych gałęziach techniki i dziedzinach życia [Buderi 2005].

Wzrastająca liczba przewozów lotniczych bardzo szybko osiągnęła poziom wymagający wyposażenia w radary cywilnej kontroli ruchu lotniczego. Pierwsze konstrukcje przeznaczone specjalnie na potrzeby cywilne pojawiły się ok. roku 1956. Dużym skokiem jakościowym w konstrukcji radarów cywilnych i wojskowych było zastosowanie układów cyfrowych, co pozwoliło na znaczne polepszenie dokładności i niezawodności urządzeń. Następnym krokiem było zastosowanie komputerów w systemach zobrazowania i obróbki danych radiolokacyjnych. Jak zwykle zaczęło się od konstrukcji wojskowych, potem przyszła kolej na systemy cywilne [Tomczak-Janowski 1998].

1.2. Radary meteorologiczne

1.2.1. Specyfika badania atmosfery radarem meteorologicznym

Już w pierwszym okresie stosowania radarów w lotnictwie zauważono, że oprócz takich obiektów, jak samoloty, radar wykrywa niekiedy obiekty meteorologiczne, np. silne burze. Oczywiście były to w tym wypadku zakłócenia, przeszkadzające w wykrywaniu samolotów.

Rozpoczęto walkę z takimi zakłóceniami. Starano się tak odebrać sygnał odbity, żeby wyeliminować obiekty meteorologiczne, a pozostawić militarne. Wymagało to zbadania różnic między odbiciami od różnego rodzaju obiektów. Rozpoczęto badania radarowe chmur i opadów. To właśnie był początek meteorologii radarowej.

Po zakończeniu wojny, gdy były ujawniane ściśle tajne techniki radarowe, meteorolodzy zaczęli wykorzystywać radary do swoich celów, tj. do wykrywania i śledzenia burz oraz opadów. Teraz to odbicia od samolotów i innych obiektów stały się niepożądanymi zakłóceniami. Należało usunąć obiekty inne niż meteorologiczne.

Odbicie fali elektromagnetycznej od samolotu jest jak odbicie od ściany; gdyby dokładnie za samolotem był drugi samolot, to nie mógłby zostać wykryty, bo nie dotarłaby do niego żadna fala. Inaczej jest jednak w przypadku zastosowania radiolokacji w meteorologii; opiera się ona głównie na efekcie rozpraszania fal elektromagnetycznych przez cząstki (hydrometeory) zawarte w obiektach meteorologicznych.

W meteorologii radarowej przez obiekt meteorologiczny, dający się wykryć, należy rozumieć taką koncentrację hydrometeorów w jego objętości (w atmosferze), która powoduje, że moc sygnału rozproszonego wstecznie i odebranego przez radar jest większa od mocy szumów i czułości odbiornika danego urządzenia radarowego. Z definicji tej wynika, że wykrywalność obiektu meteorologicznego zależy, między innymi, od technicznych parametrów urządzenia radarowego. Przy przechodzeniu fal elektromagnetycznych przez objekty w każdej cząstce wzbudzone jest promieniowanie wtórne. Część energii jest pochłaniana i przechodzi w ciepło. Pozostała energia jest rozpraszana we wszystkich kierunkach, także w kierunku urządzenia radarowego (rozpraszanie wsteczne). Częstotliwość fali rozproszonej jest taka sama, jak częstotliwość fali padającej [Samol 1981].

Podstawową cechą, wyróżniającą radar meteorologiczny spośród radarów artyleryjskich czy ostrzegawczych, jest charakterystyka kierunkowości promieniowania anteny, czyli kształt emitowanej wiązki fal elektromagnetycznych i sposób przeszukiwania przestrzeni. Zazwyczaj radary meteorologiczne emitują wiązkę „ołówkową”, o rozbieżności mniejszej od 1° w pionie i w poziomie. Wiązka radarowa porusza się po linii podobnej do linii śrubowej: obroty zaczynają od kąta elewacji tuż nad horyzontem, a każdy następny odbywa się przy coraz większym kącie podniesienia anteny. Przyrost kąta elewacji wiązki jest tak dobrany, aby zapewnić obserwację jak największej części górnej półsfery.

Należy zaznaczyć, że tylko bardzo niewielka część wysłanej energii po przejściu przez strukturę opadową jest rozpraszana wstecz. Prawie cała przechodzi dalej i dzięki temu możemy obserwować chmury położone jedna za drugą nawet do odległości 300 km.

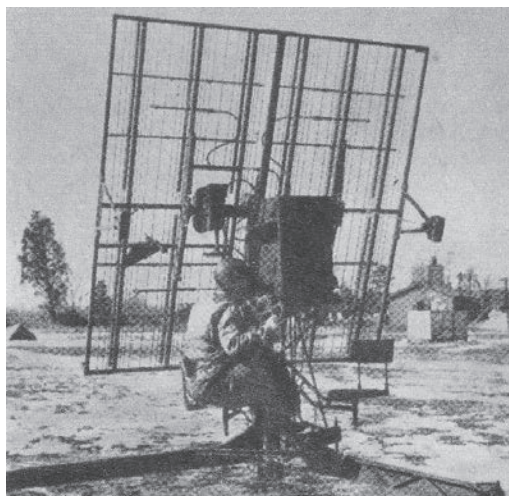
O ile odbicie od samolotu może być traktowane jak odbicie od lustra, to rozpraszanie fali przez chmury i opady można porównywać do prześwietlenia rentgenowskiego, które przenika przez obserwowany obiekt.

Obiekty meteorologiczne, które mogą być obserwowane za pomocą radaru to: opady i chmury w stadium bliskim do opadowego. Różnią się one tym od obiektów obserwowanych za pomocą pozostałych radarów, że mają charakter przestrzenny, a nie punktowy. Rozproszenie wsteczne powodowane jest przez cząstki chmurowe, tj. kropelki wody lub kryształki lodu, tworzące obiekt meteorologiczny. Efektywna powierzchnia rozpraszania wstecznego jednostkowej objętości obiektu meteorologicznego równa jest sumie efektywnych powierzchni poszczególnych cząstek roz-

praszających. Radar jest najbardziej efektywny przy wykrywaniu i określaniu parametrów obiektu meteorologicznego składającego się z dużej liczby cząstek o znacznych rozmiarach. Im krótszy czas trwania impulsu sondującego i im węższa wiązka radarowa, tym mniejsza jest objętościowa rozdzielczość sondowanej przestrzeni, a tym samym lepsza rozdzielczość pozyskiwanej informacji i jakość generowanych danych. Możliwość wykrywania stref opadowych przy zastosowaniu metod radiolokacyjnych okazała się dla meteorologii niezmiernie cenna.

1.2.2. Pierwsze radary meteorologiczne

Pierwsze wzmianki o radarach pojawiły się w USA w 1946 r., kiedy opisano meteorologiczne zastosowanie radarów artyleryjskich (zaadaptowanych na potrzeby meteorologii) z okresu II wojny światowej (typu SCR-658; rys. 1.1).

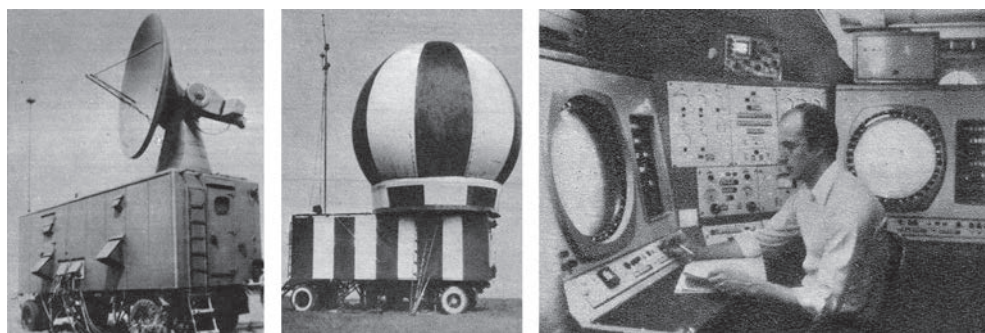


Rys. 1.1. Radar meteorologiczny produkcji USA; antena i odbiornik radaru meteorologicznego typu SCR-658 – zaadaptowany radar artyleryjski z okresu II wojny światowej, używany do śledzenia sondy w celu określenia prędkości i kierunku wiatru [źródło rysunków w tym rozdziale: Sztarski 1981]

Następnymi konstrukcjami były już wyspecjalizowane radary typu AN/GMD-1A do pomiaru prędkości wiatru na dużych wysokościach lub pionowego sondowania atmosfery, do badania pionowych ruchów kropeł wody i kryształków lodu wewnątrz chmur.

W 1965 r. pojawił się pierwszy półautomatyczny system meteorologiczny na potrzeby wojsk lądowych, lotnictwa i marynarki oparty na radarach typu AN/TPQ-11. Radary te sondowały troposferę w płaszczyźnie poziomej. W kolejnych latach w USA opracowano system meteorologiczny oparty już na radarach pracujących: w paśmie X (z falą 3 cm) i paśmie S (z falą 10 cm).

Pod koniec lat 50. w ZSRR skonstruowano pierwszy radar meteorologiczny (typu RMS-1) będący częścią artyleryjskiej stacji meteorologicznej typu PARMs.



a) b) c)

Rys. 1.2. Radary meteorologiczne produkcji ZSRR typu MRŁ: a) MRŁ-1 pracujący z falą 0,8 i 3,2 cm w wersji przewoźnej, b) uniwersalny radar meteorologiczny MRŁ-5 (1976 r.) w wersji mobilnej, c) konsola wskaźnikowo-operacyjna radaru meteorologicznego MRŁ-4 (MRŁ-6), ekrany umożliwiały obserwację stanu atmosfery na wskaźniku typu P i RH, a tablica świetlna umieszczona obok ekranu wskazywała 9 parametrów celu wybranego wskaźnika

Następnymi radarami były urządzenia typu MRŁ pierwszej generacji: MRŁ-1, MRŁ-2, oparte na lampach elektronowych. Po 1977 r. pojawiła się druga generacja tych radarów: MRŁ-4, MRŁ-5, MRŁ-6, które realizowały cyfrowe przetwarzanie danych. Radary te produkowane były zarówno w wersji mobilnej, jak i stacjonarnej. I tak radary typu:

- MRŁ-4 pracowały na fali 3,2 cm – miały największe zastosowanie na obszarach odpowiadających średnim i dużym szerokościom geograficznym
- MRŁ-5 pracowały z falą 10 lub 3,2 cm – mogły pracować w dowolnym punkcie kuli ziemskiej.

Tab. 1.1. Podstawowe parametry i cechy konstrukcyjne radarów serii MRŁ

Parametry i cechy konstrukcyjne	Radary pierwszej generacji		Radary drugiej generacji		
	MRŁ-1	MRŁ-2	MRŁ-4	MRŁ-5	MRŁ-6
Długość fali [cm]	0,8 – 3,2	3,2	3,2	3,2 – 10	10
Moc szczytowa [kW]	500 – 210	210	250	250 – 800	800
Czas trwania impulsów [μs]	0,5; 0,8; 1; 2	1; 2	1; 2	1 – 2	1; 2
Czułość [dB/W]	115 – 132	132	136	136 – 139	139
Średnica anteny [m]	3	3	4,5	4,5	4,5
Dokładność azymutu [°]	0,25	0,25	0,1	0,1	0,1
Możliwość sprzężenia z komputerem	-	-	+	+	+
Klimatyzacja	-	-	+	+	+
Dielektryczna osłona anteny przed opadami	-	+	+	+	+

źródło: [Sztarski 1981]

Konstrukcją radarów meteorologicznych zajmowano się oczywiście również w Anglii. Pierwsze radary typu DECCA (seria typu WF) miały zasięg tylko do 100 km. Osiągnięciem angielskim był produkowany od 1962 r. radar typu DECCA 41 oraz radar WF-44S (połączone firmy Decca i Plessey) [Kariko i in. 2010]. W Anglii konstrukcją radarów zajmowały się także firmy: Cossor i Marconi.

Szczególnie narażony na niszczące wpływy czynników atmosferycznych (tajfuny) kraj, jakim jest Japonia, w czasie wojny praktycznie „przespał” technologię radarową. Od 1955 r. radarami meteorologicznymi zaczęła zajmować się firma Mitsubishi, która skonstruowała ich kilkadziesiąt różnych typów.

Od 1977 r. budową radarów meteorologicznych zajmowała się także Francja [Sztarski 1981].

Radary meteorologiczne stawały się coraz bardziej cenionymi narzędziami do sondowania atmosfery. Dostarczały zawsze dużej ilości danych będących podstawą do diagnozowania aktualnego stanu troposfery i opracowania prognozy pogody na najbliższy czas. Duża ilość pozyskiwanych danych wymuszała opracowanie coraz szybszych metod ich przetwarzania. Z kolei specyfika pozyskiwanych informacji, nie zawsze zrozumiałych dla przeciętnego użytkownika, wymuszała na wszystkich



a)

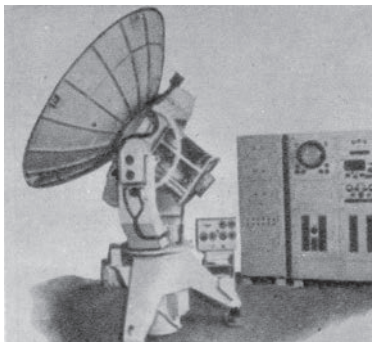


b)

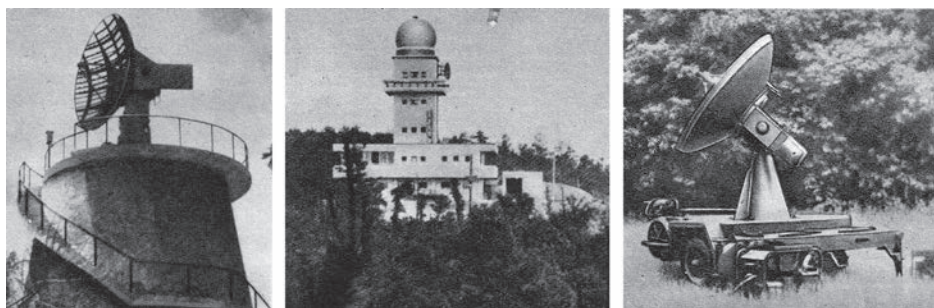


c)

Rys. 1.3. Angielskie radary meteorologiczne: a) typu DECCA 41, (DECCA, 1957 r., b) typu WF-44 (DECCA, 1964 r.) [źródło: www.harvey.edwards.net/radar/methistory/radartype/WF44.htm], c) radar dla otrzymywania danych o burzach i opadach (MARCONI, 1968 r.)



Rys. 1.4. Radar meteorologiczny produkcji NRD (1958 r.) do pomiaru prędkości wiatru na dużych wysokościach: długości fali $\lambda = 3,2$ cm, średnica anteny $D = 2$ m, czas trwania impulsu $\tau = 0,5 \mu\text{s}$



a)

b)

c)

Rys. 1.5. Radary meteorologiczne: a) typu RC-32 B, Japonia, (MITSUBISHI, 1970 r.) o mocy $P_i = 500$ kW i pracujący z falą $\lambda = 10$ cm, b) typu RC-51C J (MITSUBISHI, 1972 r.) o mocy $P_i = 250$ kW, pracujący z falą $\lambda = 5$ cm (5,3 GHz), zasięg $R = 400$ km, okres powtarzania impulsu $\tau = 2$ μ s, c) SIROCCO, (Francja, 1073 r.) do śledzenia balonu sondy; radar impulsowy: $P_i = 80$ kW, pasmo X (9375 MHz), $\tau = 0,66$ μ s

badaczach z dziedziny meteorologii radarowej działania zmierzające do podania ich w jak najbardziej komunikatywnej formie.

W rejonach często nawiedzanych przez zjawiska pogodowe o charakterze katastrofalnym informacje te stały się niezbędne. Obserwacje radarowe połączone z danymi z satelity geostacjonarnego stały się bezkonkurencyjne w prognozowaniu na kilka do kilkunastu godzin oraz ostrzeganiu przed groźnymi zjawiskami atmosferycznymi.

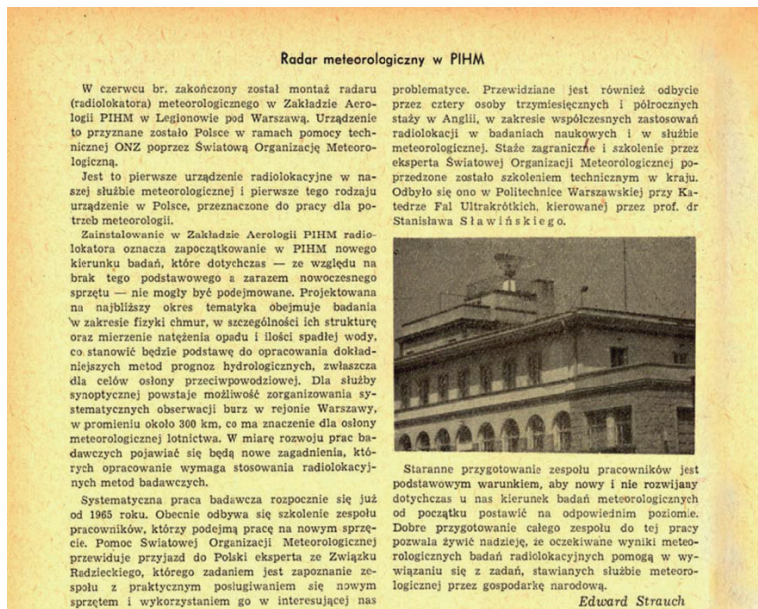
2. Początki meteorologii radarowej w Polsce

2.1. DECCA – pierwszy radar meteorologiczny w Polsce

W Polsce pierwszy radar meteorologiczny zamontowano w czerwcu 1964 r. w Ośrodku Aerologii w Legionowie przy Państwowym Instytucie Hydrologiczno-Meteorologicznym. Był to angielski radar firmy DECCA typ 41 (wywodzący się z serii radarów angielskich, będących następcami radarów typu WF-1, WF-2), podarowany nam przez Światową Organizację Meteorologiczną WMO (World Meteorological Organization).



Rys. 2.1. Budynek Ośrodka Aerologii PIHM w Legionowie – miejsce lokalizacji radaru DECCA (na dachu budynku);
źródło: zdjęcie ze zbiorów Zakładu Aerologii



Rys. 2.2. Wycinek z Gazety Obserwatora IMGW 1964 r.



Rys. 2.3. Antena nadawczo-odbiorcza radaru DECCA 41. Źródło: zdjęcie ze zbiorów Ośrodka Aerologii

Radar DECCA41 był konstrukcją:

- o niedużej mocy (poniżej 20 kW),
- o szerokiej asymetrycznej wiązce fal elektromagnetycznych; $2,8^\circ$ w płaszczyźnie pionowej i $0,6^\circ$ w płaszczyźnie poziomej,
- bez urządzenia izo-echo i bez wskaźnika odległość-wysokość,
- o niedużym zakresie kątów elewacji: od -2° do 28°
- tylko z ekranem panoramicznym, bez możliwości badania obiektów meteorologicznych w pionie.

Pracował na fali 3 cm i umożliwiał kontrolowanie dużego obszaru, np. zaobserwowano na nim chmurę burzową w odległości 350 km.

Antena radaru nie była osłonięta kopułą, więc każdy mógł widzieć, czy się obraca. Okoliczna ludność nauczyła się, że gdy antena się kręci, to znak, że będzie deszcz. Miało to uzasadnienie – gdy opadów nie było, radar był wyłączany.

Najpierw używano go tylko do celów badawczych i szkoleniowych, ale od roku 1969 zaczęto regularne przekazywanie informacji radarowych do Biura Prognoz PIHM na lotnisku Warszawa-Okęcie.

Rozpoznanie obiektów przeprowadzane przez ten radar miało jednak bardzo zgrubny charakter. Pozwalało na:

- określenie rozmiarów ech opadowych,
- śledzenie czasu życia ech radarowych,
- szacowanie natężenia opadów,
- określenie maksymalnej wysokości wierzchołków chmur opadowych,
- określanie azymutu i prędkości przemieszczania się ech,
- analizę błędów w pomiarach opadów i przyczyny ich powstawania,
- wydzielenie zjawisk superrefrakcji (wystąpienie „fałszywych” radioech).

Pomiary realizowane z wykorzystaniem tego urządzenia polegały na analizie zdjęć ekranu panoramicznego (rys. 2.4.), które wykonywano w odstępach 15-minu-



a) b)
 Rys. 2.4. Pracownicy Ośrodka Aerologii w trakcie wykonywania obserwacji przy pulpicie wskaźnika typu *P* radaru DECCA 41: a) Szypulska [strona tytułowa Gazety Obserwatora nr 3 z 1970 r.], b) Szybowska-Rudnicka [Sztarski 1981]

POLSKA RZECZPOSPOLITA LUDOWA  URZĄD PATENTOWY PRL	OPIS PATENTOWY	53743
	Patent dodatkowy do patentu	Kl. 21 a ^o , 32/92
	Zgłoszono: 18.III.1965 (P 114 962)	MKP H 04 n
	Pierwzrostwo: _____	
Opublikowano: 15.IX.1967		
Współtwórcy wynalazku: inż. Zbigniew Wojnarowicz, mgr inż. Ignacy Grządziel, mgr inż. Józef Abram, Henryk Krasnowski Właściciel patentu: Spółdzielnia Pracy „Radiotechnika”, Wrocław (Polska)		

Układ fazowania w urządzeniu odbiorczym faksymile dla potrzeb meteorologii

a) Przedmiotem wynalazku jest układ fazowania w urządzeniu odbiorczym faksymile dla potrzeb meteorologii.

Zadaniem układu fazowania w urządzeniach odbiorczych faksymile jest synchronizowanie momentu rozpoczęcia nadawania obrazu z momentem rozpoczęcia odbiorania tego obrazu. W tym celu urządzenie nadawcze wysyła na początek transmisji specjalne sygnały w postaci pojedynczych impulsów fall i rise, wygenerowanych na jednym obrócie bębna synchronizacji w układzie sterowno-pobierającym tego bębna.

Sygnały te znowo są sygnałami fazującymi. W urządzeniu odbiorczym faksymile, w momencie pojawienia się jednego z impulsów fazujących we wskazanym czasie, następuje natychmiastowe uruchomienie impulsatora sterującego zmianami druktajkrami. Od tego momentu sygnały fazujące nie oddziaływają już na układ fazowania, lecz za skuteczną stabilizację obrótów silników napędzających, a którymi sterowany jest impulsator, służy sonda druktajkramowa dochodząca w tych samych odstępach czasowych, w jakich pojawiają się impulsy fazujące, do jest po odebraniu każdej jednej analizowanej linii obrazu.

Przedmiotowe powtórki synchronizowania, czyli fazowanie winno nastąpić z odpowiednio dużym opóźnieniem względem momentu uruchomienia silników napędzających, ponieważ silniki te oszczędzają swoje obroty synchronizując w ciągu kilku sekund

b) W ramach rozwiniętego urządzenia odbiorczego faksymile dla potrzeb meteorologii umożliwiający wyrażony jest przez przebiegi programowy, który wyraża opóźnienie momentu fazowania względem momentu odłączenia silników napędzających. Przebiegiem ten znajduje się w układzie automatyki programowej i jest następujący przez różnicę programową. Ten sam przebiegiem służy również danej sekcji urządzenia według określonego programu.

Wadą takiego rozwiązania jest to, że czas w którym fazowanie może nastąpić, wynosiący w zależności od warunków odbioru od 9 sek. do 27 sek., jest wyznaczony przez układ mechaniczny, którego działanie nie można przyspieszyć, opóźnić, zatrzymać lub powstrzymać podczas trwania transmisji. Wskutek tego nie ma więc możliwości natychmiastowego powrotu fazowania, jeżeli z różnych przyczyn, na przykład z powodu zakłóceń w odbiorze radiowym, lub opóźnionego załączenia urządzenia przez obsługę, przewidziane fazowanie nie nastąpiło w czasie wyznaczonym przez przebiegi programowy. Komplicacje te obciążają urządzenie i przyczyniają się często do zmieszkania z praktycznym obrazem.

Dałszy wadę takiego rozwiązania jest też to, że wymaga ono stosowania skomplikowanego przebiegiem programowego napędzanego silnikiem, które to połączenie są kosztowne, niewygodne w montażu i wymagające ciągłej konserwacji.

Zadaniem układu automatyki selektywnej w urządzeniach odbiorczych faksymile jest samoczynne uruchamianie i zatrzymywanie urządzenia jak również wybór właściwego modułu kooperacji. Następuje to pod wpływem specjalnych sygnałów, tak zwanych sygnałów selektywnych wysyłanych przez stację nadawczą.

Zalecenia Światowej Organizacji Meteorologicznej przewidują wybieranie modułu kooperacji 576 sygnałem selektywnym o częstotliwości 300 Hz oraz modułu kooperacji 288 sygnałem selektywnym o częstotliwości 675 Hz. Zatrzymanie urządzenia następuje przy wysyłaniu sygnału selektywnego o częstotliwości 450 Hz.

a) b)
 Rys. 2.5. Opisy patentowe urządzenia faksymile na potrzeby meteorologii: a) „Układ fazowania w urządzeniu odbiorczym faksymile dla potrzeb meteorologii”, b) „Układ aktywny do urządzenia odbiorczego faksymile dla potrzeb meteorologii” (fragment), [http://pubserv.uprp.pl/publicationserver/, patent nr 114 959 z 10.08.1967 r.]

towych. Co godzinę określano lokalizację ech opadowych, ze szczególnym uwzględnieniem obszaru Warszawy. Poza natężeniem opadu określano czas jego wystąpienia oraz azymut i prędkość przesuwania się wykrytego echa.

Wykreślane mapy radarowe przekazywane były do Ośrodka Głównego PIHM i dalej do terenowych służb synoptycznych za pomocą nadajnika faksymile – urządzenia do przekazywania obrazu na odległość.

Od czerwca 1969 r. rozpoczęto systematyczne obserwacje radarowe na potrzeby Działu Osłony Lotnictwa i Centralnego Biura Prognoz. Prowadzono je od maja do października w godzinach 7:00-20:00 oraz od listopada do grudnia w godzinach 7:00-17:00.

Zauważono przydatność obserwacji radarowych do osłony meteorologicznej obiektów naziemnych. Przez pewien okres prowadzono osłonę budowy wieży radiowo-telewizyjnej nadajnika długofalowego Programu I Polskiego Radia w Konstancynie (znany również, jako *Maszt w Gąbinie*).

Systematyczne pomiary dla osłony lotnictwa trwały do końca czerwca 1975 r., czyli do czasu pełnego wyeksploatowania radaru.

Na początku stosowano przekaz telefoniczny (słowny), a potem faksymilowy (graficzny). Do przekazywania wyników pomiarów radarowych wykorzystywano kod RADOB. Po zakodowaniu mapy przesyłano ją dalekopisem do meteorologicznych służb wojskowych.

Ogólna postać depezy RADOB składała się z dwóch części: część A odnosiła się do przypadków występowania cyklonów zwrotnikowych, a w części B (rys. 2.6), poza opisem położenia stacji i podaniem terminu obserwacji, podawało się: układ ech ($e_t WeIea_e He$) i jego charakterystyki; natężenie najsilniejszego echa, ewolucję układu, maksymalną wysokość w układzie, typ echa i jego rozmiary poziome, ruch układu ech ($t_e dsdsfsfs$). Grupa ta mogła być powtarzana kilkakrotnie.

Rozdział 1

MiMiMjMj YYGGg Iliii $e_t WeIea_e He$ bbbrr ... bbbrr $t_e dsdsfsfs$ (999)

Rozdział 2

51515

$n_e REEE (/heheHEHe)$ $n_e REEE (/heheHeHe)$... $n_e REEE (/heheHeHe)$.

Rys. 2.6. Ogólna postać części B depezy RADOB

2.2. Zakres prowadzonych badań z wykorzystaniem danych radaru DECCA

Pierwsze lata obserwacji poświęcone były badaniom: natężenia opadów, czasu życia i rozmiarów komórek opadowych, analizie błędów w pomiarach opadów i przyczyn ich powstawania oraz zjawisk superrefrakcji.

Wykorzystując zebrane dane opracowano następujący zakres zagadnień dla obszaru centralnej Polski [Fortini-Iwanowska 1977]:

- próby określenia wpływu podłoża na występowanie przelotnych opadów,
- badania występowania liniowych stref intensywnych opadów przelotnych i burz w różnych sytuacjach synoptycznych,
- badania zależności opadu zarejestrowanego na stacji synoptycznej, a potwierdzonego obserwacjami radarowymi,
- oceny sprawdzalności radiolokacyjnej prognozy opadu na dany obszar,
- próby opracowania prognozy ilościowej opadu dla określonego obszaru,
- próby oszacowania sumy opadu za określony okres nad wybranym obszarem.

3. System radarowy na bazie MRŁ-2

3.1. Miejsce Radarowego Systemu Meteorologicznego w gospodarce kraju

Przystępując do budowy nowego systemu radarowego, należało wykazać, na ile powstający system informacyjny RSM (Radarowy System Meteorologiczny) powiązany będzie z organizacjami gospodarczymi, których funkcjonowanie jest uzależnione od takich zjawisk atmosferycznych, jak opady i burze. Zadanie było na tyle ułatwione, że ówczesny sposób zbierania informacji o opadach, oparty na sieci deszczomierzy i pluwiografów (średnio 2 urządzenia na 1000 km²), nie był zadowalający, a rozwój gospodarki w zakresie zbiorników wodnych, przepompowni, kanałów zmuszał do monitorowania opadów ze zwiększoną rozdzielczością czasowo-przestrzenną. Jednocześnie średnia prędkość przekazywania do punktów centralnych informacji o opadach prowadziła do dezaktualizacji informacji o kilka godzin.

Zakładano¹, że powstający system radarowy będzie mierzył godzinne sumy opadów na obszarze do 100 km od radaru i szacował natężenia opadów nawet do 200-300 km, a jeśli chodzi o chmury burzowe – nawet do 350 km [Kawecki 1977].

Duże nadzieje wiązano także z osłoną ruchu lotniczego i zmniejszeniem zagrożenia lotów przez niebezpieczne zjawiska zarówno w transporcie cywilnym, jak i wojskowym.

Poszukiwanie optymalnej struktury i organizacji systemu wymagało zbadania wszystkich dopuszczalnych rozwiązań i jego wariantów przy kompletnej znajomości *a priori* stanu środowiska i możliwości technicznych w celu osiągnięcia właściwych efektów. Zadanie było szczególnie trudne w przypadku określenia warunków oddziaływania zjawisk atmosferycznych na procesy gospodarcze i ze względu na optymalizację systemu, która zakładała maksymalizację efektów ekonomicznych, przy ograniczonych nakładach.

Zagadnienia syntezy informacji z radarowych systemów informacyjnych należały wówczas do najslabiej zbadanych. Podejście do rozwiązania problemu w IMGW² oparto na rozprawie habilitacyjnej dra Janickiego (1971), traktującej o adaptacyjnej syntezie radiolokacyjnych systemów informacyjnych. Wynikało z niej, że „synteza struktury RSM musiała być dokonywana w warunkach niepełnej znajomości zachowania się otoczenia, braku formalnego opisu celu działania systemu i braku miar

¹ Przy ówczesnym stanie wiedzy z meteorologii radarowej

² W roku 1973 uchwałą Rady Ministrów nastąpiło połączenie Państwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego (1945-1972) z Instytutem Gospodarki Wodnej (1960-1972). Instytucji nadano nazwę Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej

jego użyteczności. Opracowane rozwiązanie mogło być niejednoznaczne, pomimo wyboru najlepszego rozwiązania, przy określaniu dodatkowych warunków. Nawet ostateczna faza systemu (faza adaptacyjna) pozwalająca na ocenę efektów Radarowego Systemu Meteorologicznego już na etapie jego funkcjonowania była też bardzo trudna do określenia z powodu ówczesnego stanu wiedzy i braku doświadczenia” [Kawecki 1977].

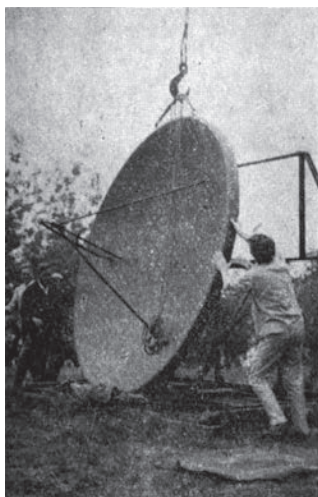
3.2. Radar typu MRŁ-2

System powstający w Ośrodku Aerologii w Legionowie zdecydowano się budować na bazie radiolokatora produkcji radzieckiej typu MRŁ-2. Został on uruchomiony i przekazany do eksploatacji 22 października 1976 r. Był to klasyczny radar meteorologiczny, zaprojektowany specjalnie do wykonywania pomiarów i badań obiektów meteorologicznych.

Antena radaru MRŁ-2 zainstalowana została na pomoście, na dachu budynku głównego Ośrodka Aerologii, i osłonięta specjalną kulistą kopułą (rys. 3.1). W pomieszczeniach budynku umieszczono konsolę radaru (rys. 3.2) i stąd sterowano ruchem anteny.

Paraboliczna antena o średnicy 3 m:

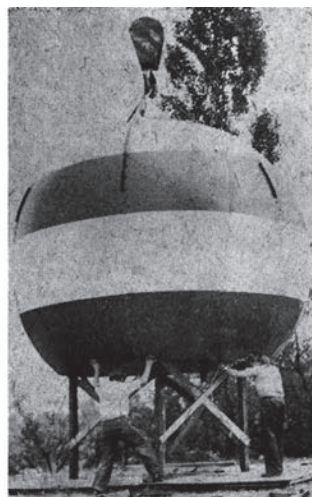
- kształtowała symetryczną wiązkę fal o szerokości $0,75^\circ$,
- posiadała zakres kątów elewacji, który zawierał się w przedziale od -1° do 105° , z szybkością 30 s na cały zakres,



a)



b)



c)

Rys. 3.1. Montaż radaru MRŁ-2: a) anteny, b) i c) kopuły (osłony anteny) na budynku Ośrodka Aerologii

- dolna krawędź anteny znajdowała się na wysokości 1,5 m nad pomostem,
- wysokość zawieszenia (środek anteny) nad powierzchnią ziemi to ok. 18 m (112 m n.p.m.).

Moc emitowanego impulsu fali była dziesięciokrotnie większa niż w radarze DECCA, co zwiększało dokładność pomiarów opadów o słabszym natężeniu. Radar miał znacznie lepszą czułość (najmniejsza moc sygnału odbitego przekraczająca poziom szumów) w stosunku do radaru DECCA.

Radar wyposażony był w dwa wskaźniki fluorescencyjne (DECCA w jeden) do zobrazowania zbieranych informacji:

- przeglądu dookrężnego – typu *P* – dla strefy dalekiej (maksymalny pomiar do 300 km od radaru) to tzw. wskaźnik panoramiczny, na którym obrazowane były echa radarowe dla określonego, stałego kąta elewacji w pełnym zakresie azymutów,



Rys. 3.2. Konsola operatorska radaru MRL-2: po lewej stronie konsoli wskaźnik typu *P*, a po prawej wskaźnik typu *RH*, pośrodku wskaźniki stanu technicznego radaru

Tab. 3.1. Charakterystyka techniczna radaru MRL-2

Radar meteorologiczny typu MRL-2		
Parametr	Jednostka	Wartość
Długość fali	[cm]	$l = 3,2$
Czas trwania impulsu	[μs]	$t = 1$ lub 2
Częstotliwość powtarzania	[Hz]	$F = 600$ lub 300
Moc w impulsie	[kW]	$P_t = 100 - 150$
Czułość	[W]	$\min = 1,6 \times 10^{-13}$
Szerokość pasma odbiornika	[MHz]	$B = 1,5$
Szerokość wiązki	[°]	$\Theta = 0,75^\circ$
Zysk anteny	[dB]	$G = 46$
Sterowanie anteną	[obr/min]	6 sterowanie ręczne w azymucie i elewacji

źródło: [Moszkowicz, Woronow 1977]

- przeglądu pionowego – typu *RH* – dla strefy bliskiej (maksymalny pomiar do 40 km); pokazywał przekrój pionowy obiektu meteorologicznego, przy zadanym azymucie we współrzędnych odległość-wysokość.

Stacja mogła być wykorzystywana w następujących rodzajach pracy (programach):

- w wariancie przeszukiwania dookrężnego – antena wykonywała obroty w zakresie azymutów od 0 do 360° z szybkością 6 obr/min,
- w wariancie przeszukiwania pionowego – antena wykonywała ruch wahadłowy w płaszczyźnie pionowej w granicach kątów elewacji od -1° do $+103^\circ$.

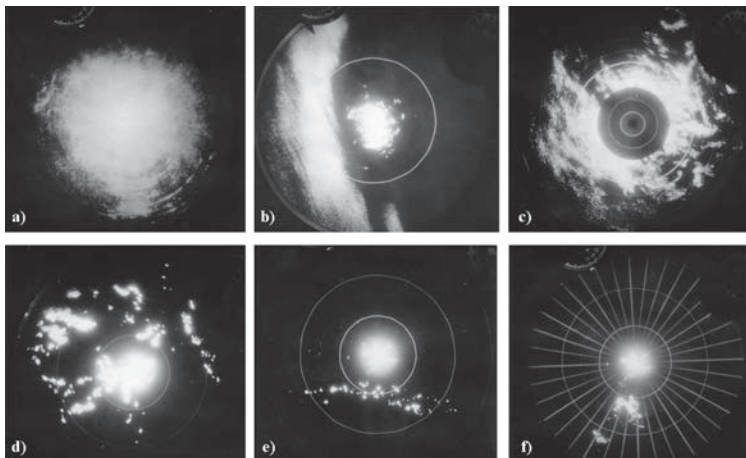
Sterowanie ruchem anteny (przez operatora) odbywało się za pomocą gałek umieszczonych na pulpicie sterowania napędami z dokładnością $0,25^\circ$ w elewacji i $0,5^\circ$ w azymucie.

Od 1 listopada 1976 r. do 1 stycznia 1977 r. urządzenie było w fazie próbnej eksploatacji. Jednocześnie prowadzono na nim szkolenie załogi operacyjnej.

Zarówno na wskaźniku *P*, jak i *RH* obiekty meteorologiczne widoczne były w postaci świecących punktów lub plam pochodzących od zlokalizowanego obiektu.

Obserwacje echa radarowego na wskaźniku panoramicznym (w płaszczyźnie bliskiej do płaszczyzny poziomej) pozwalało klasyfikować je wg wyglądu (układu na ekranie wskaźnika panoramicznego) na trzy grupy: warstwowe, konwekcyjne, mieszane.

Według tej klasyfikacji strefa echa warstwowego (rys. 3.3a i 3.3b) powinna zajmować obszar do ok. 60% strefy o jednorodnej jasności świecenia (strefa ciągła). Bardzo często strefa echa warstwowego stawała się nieciągła na dalszych odległościach.



Rys. 3.3. Wygląd zlokalizowanych ech na wskaźniku panoramicznym (typu *P*) charakterystycznych dla typu: a) warstwowego centralnie nad radarem, b) warstwowego na zachód od radaru, c) mieszanego, d) konwekcyjnego, e) linia ech konwekcyjnych, f) rozbudowana komórka konwekcyjna [Moszkowicz, Woronow 1977]



Rys. 3.4. Zobrazowanie przekrojów pionowych na wskaźniku RH: a) echa od chmur konwekcyjnych typu *cumulonimbus*, b) echa od chmur konwekcyjnych typu *cumulonimbus capillatus*, c) echa warstwowe (przyziemne i podniesione) [Moszkowicz, Woronow 1977]

Strefa ech konwekcyjnych (rys. 3.3d) to najczęściej układ chaotycznie rozrzuconych, okrągłych lub eliptycznych komórek, z wyraźnie zaznaczonymi granicami, o stosunkowo dużej jasności świecenia.

Wygląd ech mieszanych (rys. 3.3c) w zasadzie był podobny do ech warstwowych z powodu częstego zamaskowania chmur konwekcyjnych przez warstwowe. Często zdarzało się, że w pobliżu środka ekranu miały wygląd jakby echa warstwowego, a w większych odległościach – echa konwekcyjnego [Moszkowicz 1978].

3.3. Praca operacyjna – od pomiaru do gotowego produktu

Do 17 października 1987 r., z powodu braku pełnej załogi, operacyjna praca w służbie trwała 7 godzin w dni robocze. Po tym terminie rozpoczęto wykorzystywanie radaru w służbie meteorologicznej do standardowych cegodzinnych obserwacji. Praca trwała od godziny 7:00 do 20:00 czasu lokalnego (obserwacje wykonywano raz na godzinę) we wszystkie dni miesiąca.

Obszar obserwacji podzielony był na dwie strefy:

- bliską – do 40 km,
- daleką – od 30 do 300 km. W strefie bliskiej wykonywano przekroje pionowe na wybranych przez operatora azymutach.

Pomiar ech radarowych w strefie dalekiej wykonywano w następujący sposób [Ciach, Tuszyńska 1987]:

- podnoszono antenę do góry (zwiększano kąt elewacji) do momentu, aż zniknęły wszystkie echa z ekranu wskaźnika P ,
- zmniejszano kąt elewacji, aż echo zaczęło pojawiać się ponownie i od tego momentu (od góry do dołu) zmieniano kąt elewacji co jeden stopień, a przy kącie 2° – co $0,5^\circ$,
- w obszarach występowania ech odnotowywano wartości sygnału odbitego; wykorzystywano w tym celu pomiar mocy sygnału za pomocą tzw. tłumika izo-echo, który tłumił echo w zadanym stosunku,
- w celu określenia wartości odbiciowości na ustalonych wysokościach (dla

określonego kąta elewacji) zapisywano wartość tłumienia na szablonach (krążkach podzielonych na kwadraty o boku 30×30 km) wykonanych z przezroczystego pleksiglasu, które przykładano do wskaźnika P ,

- znając tłumienie i odległość, wyznaczano odbiciowość wg tabeli z rys. 3.6, opracowanej na podstawie równania radarowego.

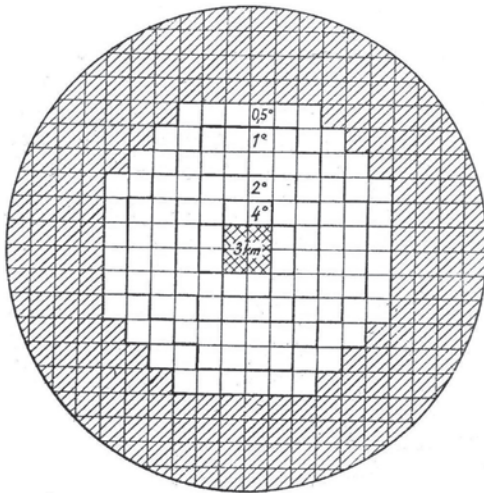
W strefie dalekiej wykonano następujące pomiary:

- prędkość i kierunek ruchu ech,
- wysokość wierzchołków ech,
- odbiciowość nisko nad ziemią – $Z1$ (do 100 km od radaru i do wysokości 1 km) na podstawie pomiaru $\log Z1$,
- odbiciowość na poziomie izotermy $0^\circ C$ – $Z2$ (na podstawie pomiaru $\log Z2$),
- odbiciowość na poziomie 2-2,5 km powyżej poziomu izotermy 0° – $Z3$ (na podstawie pomiaru $\log Z3$),
- obrys konturów układu zachmurzenia i klasyfikacja typów echa.

Pola odbiciowości $Z1$, $Z2$, $Z3$ zaznaczano i opisywano na przezroczystych szablonach w kwadratach 30×30 km.

Odbiciowość Z obliczano z podstawowego równania radiolokacji (znając odległość i mierząc moc echa metodą tłumienia sygnału (tzw. izo-echo), aż do jego zaniku.

Do pomiaru odbiciowości na ustalonym poziomie ($Z2$, $Z3$) stosowano tzw. metodę CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator). Polegała ona na ręcznym nakładaniu na ekran wskaźnika panoramicznego specjalnych przezroczystych szablonów, na których w odpowiednich pierścieniach podawany był kąt pionowy, który trzeba było ustawić tak, by wiązka radarowa przecinała wyznaczony poziom na danej odległości. Na rys. 3.5 przedstawiono taki szablon dla wysokości 3 km.



Rys. 3.5. Szablon tzw. CAPPI dla wysokości 3 km [Moszkowicz i in. 1984]

Na szablonach rysowano też kontury stref zachmurzenia oraz wyznaczano kierunek ruchu i prędkość ruchu obiektów. Zapisywano na nich także wartości maksymalnych kątów elewacji echa (w celu wyznaczenia wysokości) i wartości maksymalnego tłumienia (w celu określenia odbiciowości). Dane te przeliczane były wg odpowiednich tabel (rys. 3.6) na wysokość i odbiciowość (rys. 3.7) oraz wpisywane potem w odpowiednie kwadraty blankietu roboczego.

TŁUMIENIE dB	ODLEGŁOŚĆ Km								
	45	60	90	105	120	135	165	195	
-3	-2,1	-1,9	-1,5	-1,4	-1,3	-1,1	-1,0	-0,8	
6	-1,2	-1,0	-0,6	-0,5	-0,4	-0,2	-0,1	0,1	
12	-0,6	-0,4	0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7	
18	0,0	0,2	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	
24	0,6	0,8	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	
30	1,2	1,4	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,5	
36	1,8	2,0	2,4	2,5	2,6	2,8	2,9	3,1	
42	2,4	2,6	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	3,7	
48	3,0	3,2	3,6	3,7	3,8	4,0	4,1	4,3	
54	3,6	3,8	4,2	4,3	4,4	4,6	4,7	4,9	
60	4,2	4,4	4,8	4,9	5,0	5,2	5,3	5,5	
66	4,8	5,0	5,4	5,5	5,6	5,8	5,9	6,1	
72	5,4	5,6	6,0	6,1	6,2	6,4	6,5	6,7	

Rys. 3.6. Arkusz do przeliczania tłumienia na odbiciowość radarową dla strefy dalekiej; pierwsza kolumna po lewej to wartość odbiciowości radarowej, tabela danych (kolejne kolumny dla określonych odległości) to wartości tłumienia (izo-echa)

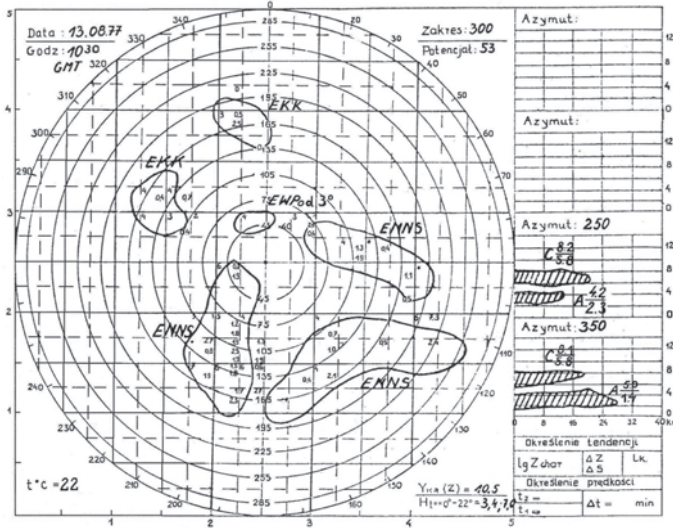
R	kąt elewacji w stopniach																								
	0,0	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0
30	0,2	0,2	0,4	0,7	0,9	1,2	1,5	1,7	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,3	3,5	3,8	4,3	4,8	5,4	5,9	6,4	6,9	7,4	7,9	8,4
45	0,2	0,4	0,6	1,0	1,4	1,8	2,2	2,6	3,0	3,4	3,7	4,1	4,5	4,9	5,3	5,7	6,5	7,3	8,0	8,8	9,6	10,3	11,1	11,9	12,6
60	0,3	0,5	0,8	1,4	1,9	2,4	2,9	3,4	4,0	4,5	5,0	5,5	6,1	6,6	7,1	7,6	8,7	9,7	10,7	11,8	12,8	13,8	14,8	15,9	16,9
75	0,4	0,7	1,1	1,7	2,4	3,0	3,7	4,4	5,0	5,7	6,3	7,0	7,6	8,3	8,9	9,6	10,9	12,2	13,5	14,7	16,0	17,3	18,6		
90	0,6	0,9	1,4	2,1	2,9	3,7	4,5	5,3	6,1	6,9	7,6	8,4	9,2	10,0	10,8	11,5	13,1	14,7	16,2	17,8	19,3				
105	0,8	1,1	1,7	2,6	3,5	4,4	5,3	6,2	7,2	8,1	9,0	9,9	10,8	11,7	12,6	13,5	15,4	17,2	19,0						
135	1,2	1,5	2,4	3,5	4,7	5,9	7,1	8,2	9,4	10,6	11,8	12,9	14,1	15,3	16,5	17,6	20,0								
165	1,7	2,3	3,0	4,6	6,0	7,5	8,9	10,3	11,8	13,2	14,7	16,1	17,5	19,0											
195	2,3	3,0	4,0	5,7	7,4	9,2	10,9	12,6	14,3	16,0	17,7	19,3													

R	kąt elewacji w stopniach													
	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0	25,0	26,0	27,0	28,0	29,0	30,0
30	8,9	9,4	9,9	10,4	10,9	11,4	11,9	12,4	12,8	13,3	13,8	14,2	14,7	15,1
45	13,4	14,1	14,9	15,6	16,3	17,1	17,8	18,5						
60	17,9	18,9												

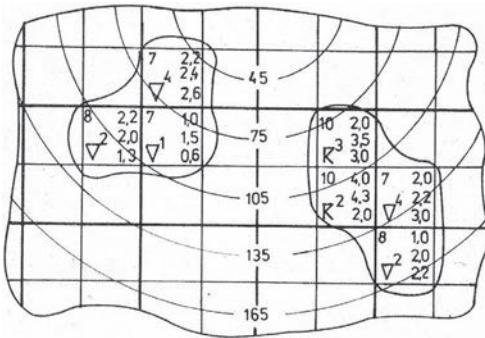
Rys. 3.7. Arkusz do wyznaczania wysokości wierzchołków echa radarowego w zależności od kąta elewacji i odległości od radaru

Koło całego blankietu (rys. 3.8) odpowiada powierzchni ekranu wskaźnika panoramicznego typu P. Na blankiecie w każdym kwadracie, w którym pomiar był

możliwy lub dopuszczalny zapisywano wartości: H_{max} w lewym górnym narożniku, $\log Z1$ w prawym dolnym, $\log Z2$ po prawej stronie na środku, $\log Z3$ w prawym górnym narożniku kwadratu. Na blankiet roboczy przenoszone były ze wskaźnika panoramicznego, poza konturami stref zachmurzenia, także radarowe charakterystyki wyglądu stref.



Rys. 3.8. Blankiet roboczy z wynikami pomiarów. Oznaczenia na rysunku: EKK – echo konwekcyjne, EWPod 3° – echo warstwowe podniesione, obserwowane przy pomiarze na kącie elewacji 3° [Moszkowicz 1978]



Rys. 3.9. Przykładowy wycinek blankietu roboczego z wynikami pomiarów [Samol 1981]

Dla ech warstwowych wyznaczano tylko odbiciowość na poziomie Z1 ($\log Z1$) i Z2 ($\log Z2$), a zimą tylko na poziomie Z1.

Na podstawie prowadzonych obserwacji i pozyskanych z nich wyników pomiarów, a następnie prac analitycznych, w oparciu o zdefiniowane kryteria, określano typy zjawisk dla każdego kwadratu o wielkości 60×60 km w obszarze zlokalizo-

Oznaczenia	Prawdopodobieństwo prawidłowej klasyfikacji	Zjawiska wg obserwacji wizualnej
▲	≥ 90 %	△ - grad ⊠ - burza z gradem Cb - chmura w stadium przed-gradowym
⊠ (⊠)	≥ 90 % 75 - 90 % 50 - 75 %	⊠ - burza bez opadu ⊠∇ - burza z opadem ⊠* - burza ze śniegiem ⊠⊠ - burza z krupą Cb - chmura w stadium przed lub poburzowym
∇ (∇)	≥ 90 % 70 - 90 %	• * ⊠ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ Cb ∇, ∇, ∇, ∇, ∇, ∇, ∇ - opad przelotny deszczu, śniegu, śniegu z deszczem, krupy śnieżnej i lodowej lub Cb bez wyładowań i bez opadu
: * *	≥ 90 % 70 - 90 %	• * ⊠ ∇ * ∇ - jednostajny opad deszczu, śniegu, śniegu z deszczem, ziaren lodowych, mżawki z deszczem

Tab. 3.2. Zjawiska możliwe do rozpoznania w systemie radarowym i ich symbole do kodowania na mapach faksymilowych źródło: Wytyczne do korzystania z map faksymilowych z wynikami obserwacji radiolokacyjnych [Moszkowicz 1977]

wanej struktury meteorologicznej. Mapy przesyłano drogą faksymilową do Biura Prognoz Krótkoterminowych IMGW

Lokalizację systemów chmurowych na „blankiecie faksymilowym” przedstawiano w postaci konturu o linii ciągłej. Obok konturu podawano jego charakterystyki w postaci liter opisujących typ chmur, wysokości charakterystyczne oraz tendencję rozwoju odbiciowości (Z) i powierzchni układu (S). Na przykład opis C-A-Q – 8 km Z₊ S₋ oznacza, że w układzie wykryto chmury C, A, Q (tab. 3.3), wysokość charakterystyczna wynosi 8 km, odbiciowość w ciągu ostatniej godziny wzrosła, a powierzchnia zmalała.

W związku z tym, że wyniki pomiarów radarowych musiały dotrzeć do użytkowników informacji radarowych w jak najkrótszym czasie, opracowane mapy przekazywano także w postaci zakodowanych meldunków. Polegało to na zakodowaniu zinterpretowanych, na mapie faksymilowej, danych radarowych za pomocą klucza RADOB i przesłaniu ich dalekopisem do wojskowego biura METEO lub przekazem telefonicznym na lotnisko Okęcie.

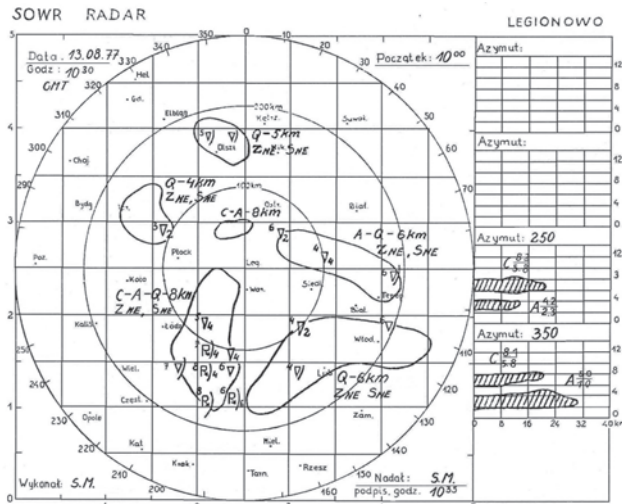
KOD	OKREŚLENIE	Lg Z _R	I _m mm/godz.	KOD	OKREŚLENIE	Lg Z _R	I _m mm/godz.
2	SŁABE	-0,5 ÷ 1,1	0,5 ÷ 2,9	3	SŁABE	-1,5 ÷ -0,4	0,02 ÷ 0,1
4	UMIARKOWANE	1,2 ÷ 2,7	3,0 ÷ 2,5	5	UMIARKOWANE	-0,3 ÷ 1,2	0,11 ÷ 1,0
6	SILNE	2,8 ÷ 3,9	25,1 ÷ 140	7	SILNE	≥ 1,3	> 1,0
8	BARDZO SILNE	> 3,9	> 140				

Rys. 3.10. Arkusze do kodowania natężenia opadów: a) typu ciekłego, b) typu stałego, np. śnieg³

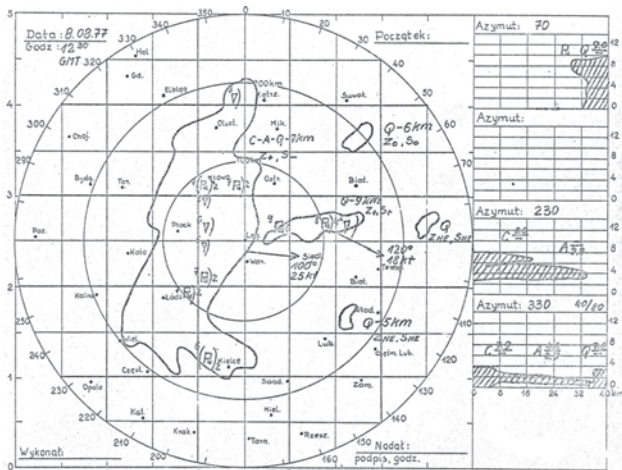
³ Prezentowane arkusze są skanami oryginalnych materiałów wykorzystywanych w bieżącej pracy operacyjnej

Tab. 3.3. Kody do określania typów chmur na blankiecie faksymilowym

Typ	Nazwa	Rodzaj wg obserwacji wizualnej
C	Górne	Ci, Co, Cs
A	Średnie	Ac, As
S	Dolne	Sc, St
N	Deszczowe	Ns
Q	Konwekcyjne	Cu cong. Cb



Rys. 3.11. Blankiet mapy faksymilowej z naniesionymi wynikami obserwacji po opracowaniu i interpretacji danych z blankietu roboczego – przykład 1 z 13.08.1977 r., godz. 10:30 GMT



Rys. 3.12. Blankiet mapy faksymilowej z naniesionymi wynikami obserwacji, po opracowaniu i interpretacji danych z blankietu roboczego – przykład 2 z 8.08.1977 r., godz. 12:30 GMT

KOD	OKREŚLENIE	$L_9 ZR$	NATEŻENIE OPADU mm/godz.
0	BARDZO SŁABE	$< 0,52$	< 1
1	BARDZO SŁABE	OSZACOWANE	
2	SŁABE	$0,52 \div < 1,13$	$1 \div 2,5$
3	SŁABE	OSZACOWANE	
4	UMIARKOWANE	$1,13 \div < 2,73$	$2,5 \div 15$
5	UMIARKOWANE	OSZACOWANE	
6	SILNE	$2,73 \div < 3,86$	$15 \div 150$
7	SILNE	OSZACOWANE	
8	BARDZO SILNE	$\geq 3,86$	≥ 150
9	BARDZO SILNE	OSZACOWANE	
1	NIEOKREŚLONE		

Rys. 3.13. Arkusz z kluczami do określania kodu natężenia opadów na potrzeby sporządzenia depeszy RADOB (patrz rozdz. 2.1)

3.4. Prawdopodobieństwo wykrywania chmur radarami typu MRŁ

Ograniczenie zasięgu wykrywania obiektów meteorologicznych radarami typu MRŁ uzależniano od trzech głównych czynników: odbiciowości obiektu, horyzontu radarowego, tłumienia fali elektromagnetycznej.

W przypadku, gdy odbiciowość chmury była zbyt mała, to echo od tej chmury było tak słabe, że nie osiągało progu czułości odbiornika i wówczas nie zostawało wykryte (wyświetlone na ekranie). Dotyczyło to głównie chmur bezopadowych o małej odbiciowości.

Z kolei silny opad w niedużej odległości od radaru w wyniku dużego tłumienia fali przez opad powodował, że dalej położone echo nie zostawało wykryte. Zasięg wykrywania chmur (prawdopodobieństwo wykrywania) tego samego rodzaju może być także różny, w zależności od pory roku. Dane takie, uzyskane dla radarów typu MRŁ pierwszej generacji (dla europejskiej części ZSRR; centralnej i północno-zachodniej), przedstawiono w tab. 3.4 i 3.5.

Wykorzystaniem danych radarowych zajmował się dalej zespół pracowników Ośrodka Aerologii w Legionowie. Już w latach 70. zdawano sobie sprawę z zalet radaru meteorologicznego, takich jak: zdolność przeglądu sytuacji opadowej w ciągu sekund w promieniu do 200-300 km od radaru, a w przypadku możliwości szybkiego jej przekazania do odbiorcy – również z jej dużego znaczenia dla osłony hydrologicznej.

Bazując na doświadczeniu w służbie osłony radiolokacyjnej oraz na literaturze radzieckiej, wykonano opracowanie dotyczące obiektów meteorologicznych i możli-

Tab. 3.4. Prawdopodobieństwo [%] wykrywania chmur radarami typu MRŁ-1 w odległości do 30 km

Chmury	Lato	Zima
Piętra górnego (Ci, Cc, Cs)	30-70	50-60
Piętra średniego (As, Ac)	50-70 As do 90	80-90
Piętra dolnego (Sc)		
- bez opadów	40-80	50-80
- z opadami	70-90	70-90
Ns	90-100	80-100
Cb		
- z opadem	100	80-100
- z burzą	100	-

źródło: [Samol 1981]

Tab. 3.5. Prawdopodobieństwo [%] wykrywania chmur opadowych radarem typu MRŁ-1 w odległości do 30-300 km

Chmury i zjawiska	Odległość [km]	Lato	Zima
Sc z opadami	30-100	70	50
Ns z opadami	50-100	90	70
	100-150	70	40
	150-200	30	5
Cb	30-100	100	70
	100-150	95	20
	150-200	70	5
	250-300	20	-
- z burzą	50-100	100	-
	100-150	95-100	-
	150-200	80	-
	250-300	30	-

źródło: [Samol 1981]

wości ich rozpoznania. Wnioski z analiz przedstawiono w pracy dra Moszkowicza pt. „Dane o obiektach meteorologicznych rozpoznawanych radiolokacyjnie” z 1978 r. Materiał ten był źródłem wykorzystywanym w kolejnych latach pracy operacyjnej, w późniejszym okresie do opracowania wstępnych algorytmów rozpoznania zjawisk dla systemu PSR (patrz rozdz. 3.6).

W roku 1978 próbowano także uzasadnić ekonomiczną efektywność płynącą z pozyskanej informacji radarowej. Przytaczano wówczas z literatury światowej (z powodu braku doświadczenia z obszaru Polski) przypadki zmniejszenia strat powodziowych poprzez ratowanie mienia, w zależności od tego, z jakim wyprzedzeniem wydawano ostrzeżenia o powodzi [Kawecki 1978].

Ze względu na wysoki koszt budowy stacji radarowych i potrzebę skutecznej osłony lotnictwa sąsiadujące państwa dążyły do wymiany informacji radarowych. Podjęto próby dwustronnej wymiany danych ze służbą NRD [1979] za pomocą klucza RADOB [patrz rozdz. 5.2].

3.5. Radarowy System Meteorologiczny – Zestaw Przetwarzania Informacji

W wyniku prowadzonych pomiarów technicznych ustalono, że radiolokator MRŁ-2 z racji jego poprawnie pracujących elementów będzie nadawał się do współpracy z urządzeniami automatycznego przetwarzania informacji [Woronow 1977].

Jedynymi wówczas dostępnymi na rynku polskim komputerami (przewidywanymi do współpracy z radarem meteorologicznym) były mikrokomputery firmy MERA z Warszawy. W związku z powyższym w 1980 r. zestaw radarowy uzupełniono o komputer MERA 400 oraz oprogramowanie użytkowe. Przeszkolono 6 osób do obsługi technicznej i operatorskiej z myślą o automatyzacji pracy operacyjnej.

3.5.1. Radarowy System Meteorologiczny

Danymi radarowymi z radaru MRŁ-2 bardzo zainteresowane były służby osłony lotnictwa. Jednak „zdejmowanie ręczne” przez operatora danych ze wskaźników *P* i *RH*, a następnie ich interpretacja i przekazywanie na lotnisko drogą telefoniczną lub telegraficzną kodem RADOB trwało ok. 40-60 min (zależnie od warunków atmosferycznych). Ponieważ czas trwania obiektów i zjawisk meteorologicznych niebezpiecznych dla lotnictwa wynosi od kilku do kilkudziesięciu minut, to analiza i przekazywanie danych za pomocą wyżej wymienionej metody nie zdawało w praktyce egzaminu. Również dokładność określania położenia obiektów i zjawisk meteorologicznych była niewystarczająca (ich przemieszczanie się w trakcie obserwacji). Automatyzacja przetwarzania informacji radiolokacyjnych była koniecznością.

Rozwiązanie problemu znaleziono przy współudziale Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych (ITWL) (po uzgodnieniu z Szefostwem Badań i Rozwoju Techniki Wojskowej). W myśl porozumienia zawartego 3 stycznia 1977 r. przystąpiono do opracowania i wdrożenia Zestawu Przetwarzania Informacji Radiolokacyjnych.

W latach 1977-81 ITWL, zgodnie z planem, miał wykonać:

- projekt wstępny i techniczny oraz model i prototyp urządzenia do tzw. pierwotnego przetwarzania sygnału radiolokacyjnego (1979-80),
- oprogramowanie techniczno-technologiczne całego zestawu (1980),
- prototyp urządzenia w wersji do pracy operacyjnej: Specjalizowany Procesor Meteorologiczny, tzw. SPM-1 (1980-1981),

- dostosowanie zestawu do pracy z MRŁ-2 – instalacja zestawu na radarze i przeprowadzenie badań na stacji radarowej (1981).

IMGW, w ramach współpracy, miał za zadanie wykonanie pomiarów parametrów radaru MRŁ-2, przeprowadzenie badania charakterystyk obiektów i zjawisk meteorologicznych oraz wysokości wierzchołków chmur, z uwzględnieniem współczynnika refrakcji, i opracowanie metodyki pomiaru intensywności opadu.

Celem prowadzonych prac było skrócenie czasu pozyskiwania i interpretacji informacji radiolokacyjnych z radarowych stacji meteorologicznych. Miało to umożliwić automatyczny pomiar odbiciowości, rozpoznanie rodzaju obiektów i zjawisk meteorologicznych, a także krótkoterminowe (1-3 godz.) prognozowanie ich ruchu i ewolucji.

Podstawowy zestaw dla opracowanego systemu składał się z następujących elementów:

- radar meteorologiczny MRŁ-2,
- urządzenie wstępnego przetwarzania sygnału radarowego SPM-1, które miało zamieniać sygnał wizyjny radaru w informacje cyfrowe, przetwarzać je wstępnie i zarejestrować, a następnie transmitować do minikomputera,
- układy sprzężenia sygnałowego SPM-1 z radarem: przetworniki analogowo-cyfrowe kąta PKC-20 (przetworniki analogowo-cyfrowe kątów anteny radaru podawały informacje o kątach azymutu i elewacji) oraz przetworniki sygnału ADC6-1B,
- minikomputer MERA-400 (z urządzeniami peryferyjnymi) do przetwarzania informacji podawanych z SPM-1 i automatycznej analizy na wyniki końcowe,
- oprogramowanie użytkowe: rozpoznanie obiektów meteorologicznych, prognozowanie ich ruchu i ewolucji, prezentacja wyników,
- nadajnik faksymile.

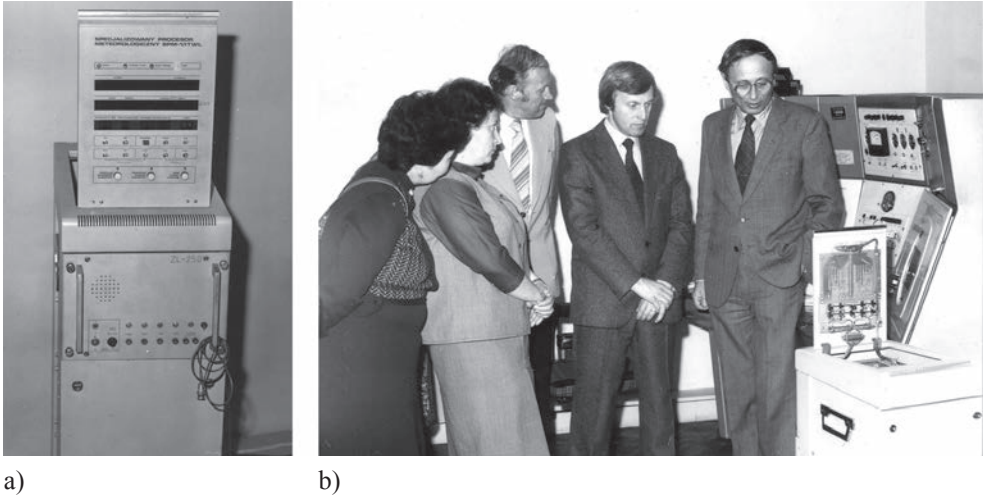
3.5.2. Specjalizowany Procesor Meteorologiczny – SPM-1

SPM-1 to wyspecjalizowane urządzenie cyfrowe, które na podstawie zmierzonych automatycznie intensywności sygnałów wizyjnych oraz wprowadzanych ręcznie przez operatora parametrów radaru obliczało odbiciowość radiolokacyjną w tzw. „bramkach pierwotnych” o wymiarach $\Delta D = 1 \text{ km}$ i $\Delta\beta = 0,96^\circ$ (w odległości i elewacji).

SPM-1 realizował następujące funkcje pierwotnego przetwarzania sygnału:

- przekształcenie współrzędnych biegunowych na prostokątne,
- określenie maksymalnych wartości odbiciowości w „bramkach wtórnych” o wymiarach $10 \times 10 \times 2 \text{ km}$ na siedmiu dwukilometrowych poziomach (łącznie 14 km w pionie),

- obliczenie maksymalnych i minimalnych wysokości obiektów meteorologicznych w każdym słupie,
- obliczenie średnich wartości $\log Z$ w elementarnych obszarach przestrzeni dla dowolnej warstwy (przy ustalonym kącie elewacji).



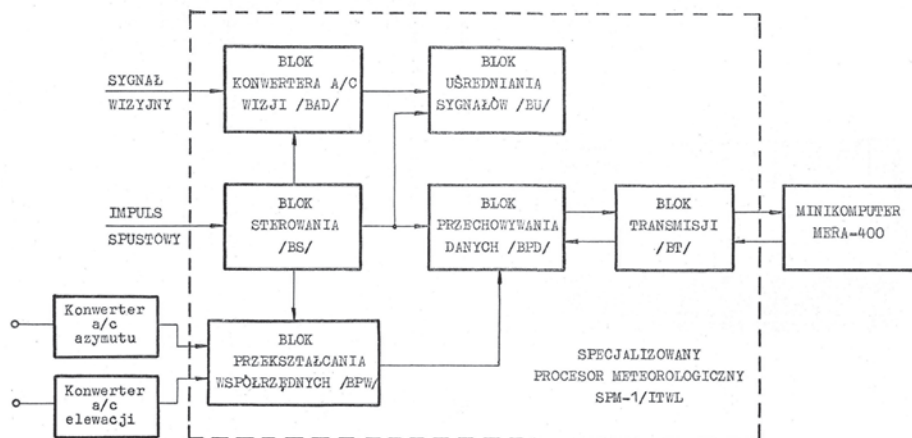
Rys. 3.14. Specjalizowany Procesor Meteorologiczny SPM-1 (a), dr Stanisław Moszkowicz (pierwszy z prawej) prezentuje SPM-1 (b)

Jako kryterium występowania obiektów i zjawisk meteorologicznych przyjęto wartość $\log Z_{min}$. O rodzaju realizowanej pracy, tj. przeglądzie dookreślonym atmosfery lub przekroju pionowym, decydował operator poprzez wciśnięcie w SPM-1 odpowiedniego przycisku.

Projekt SPM-1 był przez pracowników ITWL referowany na konferencjach ekspertów z meteorologii radarowej w kraju i za granicą (Budapeszt 1977, Berlin 1978, Bratysława 1978), wzbudzając zainteresowanie specjalistów z krajów Rady Wzajemnej Pomocy Gospodarczej (RWPG). Pod względem nowoczesności i zastosowanych rozwiązań przewyższał analogiczne urządzenia opracowane w Związku Socjalistycznych Republik Radzieckich (ZSRR), typu „Cyklon” i Czechosłowackiej Republice Socjalistycznej (CSRS), typu JPS. Z wymienionych urządzeń tylko SPM-1 był wówczas przystosowany do pracy z komputerem.

Realizacja tak skomplikowanego urządzenia, jakim był SPM-1, i bardzo złożonych procesów rozpoznania, przy ciągle jeszcze niedostatecznie zbadanych własnościach obiektów meteorologicznych, wymagała kontaktów roboczych z placówkami naukowo-badawczymi i przemysłem krajów przodujących wówczas w tej dziedzinie, takich jak: USA, Wielka Brytania, Japonia, RFN. Jednakże pomimo wystąpień ITWL i pośrednictwa IMGW w sprawie nawiązania kontaktów z podobnymi służ-

bami w wymienionych krajach, żaden z postulowanych kontaktów nie doszedł do skutku. Powodowało to konieczność rozwiązywania problemów przez innych już rozwiązanych [Maliszewski, Marcinek 1979]. Straty z tego tytułu dla polskiej meteorologii radarowej były niewątpliwie duże i niewątpliwie większe od pozornych oszczędności wynikających z ograniczania kontaktów międzynarodowych.



Rys. 3.15. Schemat funkcjonalny Specjalizowanego Procesora Meteorologicznego SPM-1/ITWL [Maliszewski, Marcinek 1979]⁴

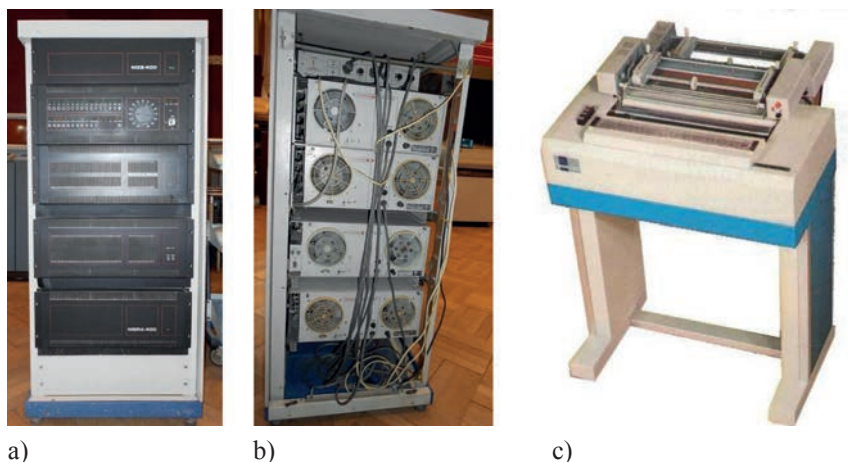
W pierwszej wersji automatyzacji systemu radarowego sprzężono SPM-1 z komputerem MERA-400, w którym po przesłaniu przez SPM-1 danych w postaci cyfrowej do pamięci operacyjnej komputera wykonywana była procedura automatycznego rozpoznawania obiektów meteorologicznych.

3.5.3. Elektroniczna maszyna cyfrowa – MERA-400

Elektroniczna Maszyna Cyfrowa MERA-400 była polskim minikomputerem produkowanym w latach 1976-1987 w Zakładach Systemów Minikomputerowych MERA w Warszawie. Była uniwersalną 16-bitową maszyną cyfrową o architekturze logicznej odpowiadającej wymaganiom stawianym ówczesnym systemom cyfrowym zarówno pod względem struktury logicznej, jak i rozwiązań technicznych.

Oprogramowanie komputera, w tym jego wielofunkcyjny system operacyjny SOM-3, oraz języki programowania wyższego rzędu FORTRAN IV i BASIC

⁴ zachowano oryginalną postać diagramu, jednak w pracy pomiędzy blokami BLOK UŚREDNIANIA SYGNAŁU EU a BLOK PRZECHOWYWANIA DANYCH BPD powinno być przekierowanie sygnału (strzałka)



Rys. 3.16. Komputer MERA-400: a) pulpit operatorski, b) widok od tyłu (Muzeum Techniki w Warszawie), c) drukarka mozaikowa typ DZM-180

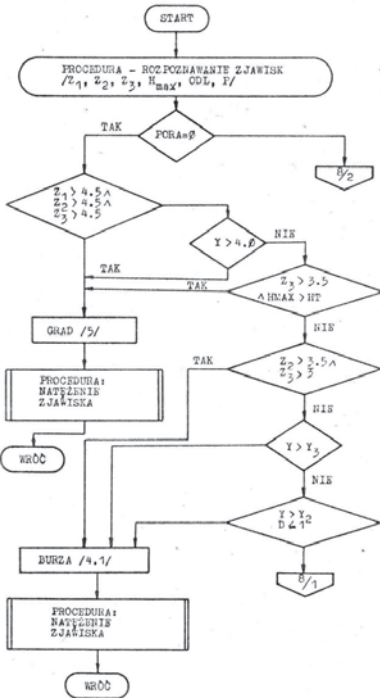
wsparte były obszerną biblioteką programów. System operacyjny SOM-3 występował w trzech wersjach; w tym wersja EXTENDED – wielozadaniowy, z dynamicznym przydziałem pamięci, i CROOK – oparty na ideach systemu UNIX. Miał dwie jednostki centralne oraz 17 bloków pamięci operacyjnej, z czego każda – 32 k słów 16-bitowych [MERA 1978].

Wszystko to sprawiało, że MERA-400 była bardzo szybką, jak na ówczesne czasy, maszyną, która potrafiła uporać się z trudnymi zadaniami. Komputer ten cieszył się bardzo dużym uznaniem [http://mera400.pl/index.php/System_MERA-400].

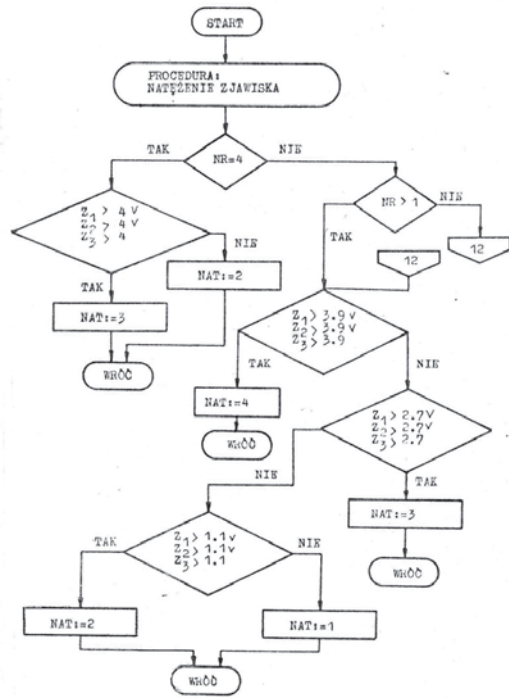
Podstawowe funkcje realizowane przez zaadaptowane algorytmy na minikomputer MERA-400 obejmowały:

- rozpoznanie obiektów meteorologicznych, którego wynikiem były charakterystyki Obiektów Zjawisk Meteorologicznych (OZM), zawierające rodzaj zachmurzenia i osiem klas zjawisk: grad, burza, deszcz przelotny, przelotny śnieg z deszczem, śnieg przelotny, deszcz jednostajny, jednostajny śnieg z deszczem, śnieg jednostajny,
- maksymalna i minimalna wysokość (H_{max} , H_{min}) ech radarowych,
- natężenie zjawisk meteorologicznych w pięciostopniowej skali dla strefy dalekiej ($R = 256$ km) i dla strefy bliskiej ($R = 70$ km) na podstawie algorytmów opracowanych w oparciu o kryteria stosowane przez operatora,
- ultrakrótkoterminowe prognozowanie położenia obiektów i zjawisk meteorologicznych metodą ekstrapolacji liniowej,
- zobrazowanie wyników przetworzonej informacji na monitorze (w postaci cyfr o określonym znaczeniu) i drukarce znakowo-mozaikowej DZM-180 w postaci wydruku.

Opracowane algorytmy (rys. 3.17) i programy były weryfikowane i rozwijane w ciągu całego czasu funkcjonowania systemu. Językiem adaptacji algorytmów i oprogramowania użytkowego w utworzonym radiolokacyjnym systemie przetwarzania informacji był FORTRAN oraz ASSEMBLER pod nadzorem systemu operacyjnego SOM-3.



a)



b)

Rys. 3.17. Przykładowe schematy szczegółowego przetwarzania informacji radarowej dla procesu: a) rozpoznanie zjawiska typu burza, b) natężenie zjawiska [Maliszewski i in. 1979]⁵

Dane w postaci zgromadzonych informacji (np. pomiarów, wyników badań) mogły być przechowywane na nośnikach zewnętrznych (dyskach) o pojemności 5 MB.

Cały proces adaptacji RSM trwał od 1981 do 1985 r., kiedy eksperymentalny zestaw komputerowego przetwarzania sygnału radaru meteorologicznego MRŁ-2 (wiosną 1985 r.) przeszedł pierwszą próbę nadzorowanej pracy w służbie osłony meteorologicznej. Na podstawie zebranych danych miała być opracowana nowa generacja algorytmów rozpoznawania zjawisk. W kolejnych latach (1986-87) prowadzono dalsze obserwacje z wykorzystaniem RSM.

⁵ w oryginalnym opracowaniu zawarte są algorytmy dla całego systemu

3.6. Półautomatyczny System Radarowy (PSR)

System radarowy w konfiguracji z EMC MERA-400 nie mógł być stosowany operacyjnie w służbie osłony meteorologicznej ze względu na: stosunkowo dużą zawodność EMC MERA-400, brak możliwości podglądu rozpoznania zjawiska (dopiero po wydrukowaniu), małą pojemność dysku (2 MB), która ograniczała możliwości archiwizacji danych.

Postępujący w szybkim tempie rozwój technik cyfrowych na świecie oferował lepsze komputery zarówno jeśli chodzi o szybkość przetwarzania, jak i coraz większe możliwości w zakresie archiwizacji danych. Na rynku pojawiły się komputery IBM typu PC/XT286 (ang. Personal Computer/XTended) wykorzystujące 16-bitowy mikroprocesor Intel 80286. Model ten został wprowadzony na rynek amerykański 8 marca 1983 r.

3.6.1. Główne założenia dla PSR

Wobec wymienionych ograniczeń MERA-400 kontynuowano prace nad usprawnieniem systemu z myślą o zaadaptowaniu komputerów klasy IBM PC.

W roku 1986 rozpoczęto prace związane z opracowaniem podstaw systemu automatycznego przetwarzania informacji radarowej przez komputer IBM PC/XT.

Założenia do nowego systemu poczyniono już w roku 1987. Według nich system składałaby się z następujących elementów:

- radaru meteorologicznego typu MRL-2 lub MRL-5,
- urządzenia pierwotnego przetwarzania sygnału typu SPM i komunikacji z komputerem,
- minikomputera IBM-PC/XT lub IBM-PC/AT, wyposażonych w kartę graficzną CGA lub EGA, które umożliwiałyby graficzne zobrazowanie produktów systemu,
- kompletu dwóch modemów telefonicznych.

Nowe oprogramowanie oparte na algorytmach pracujących na MERA-400 opracowane było już w językach nowszej generacji: FORTRAN do prac obliczeniowych i PASCAL do zobrazowania funkcji systemu na monitorze i prezentacji graficznej wyników.

Usprawnione algorytmy rozpoznania wykorzystywały cztery parametry pozyskane z urządzenia pierwotnego przetwarzania: wysokość chmur (Hm), logarytmy odbiciowości w warstwach: 0-2 km (Z1), 2-4 km (Z2) i 4-6 km (Z3).

Niestety, z racji starzejącej się już technologii MRL-2 nie można było pominąć ustawiania kątów elewacji przez operatora w trakcie zbierania informacji oraz problemu klasyfikacji echa radarowego przez operatora na podstawie jego wyglądu na

wskaźniku typu P (patrz rozdz. 3.2). Operator dokonywał klasyfikacji typu radioech na: warstwowe, konwekcyjne, mieszane [Ciach, Tuszyńska 1987a].

Poza pomiarami radarowymi wykorzystywane były trzy parametry uzyskiwane z ostatniego sondażu aerologicznego: wysokość izotermy zero (H_0), wysokość tropopauzy (HT) i temperatura powierzchniowa (T_0).

Algorytmy obliczeniowe realizowały następujące czynności:

- określenie radarowej pory roku (na podstawie H_0 i T_0),
- podział zjawisk na konwekcyjne i warstwowe, a w przypadku podania przez operatora identyfikatora oznaczającego echa mieszane algorytm uwzględniał H_m i Z_3 w danym kwadracie,
- wydzielenie gradu na podstawie kryteriów opracowanych przez radzieckich badaczy,
- wydzielenie burz za pomocą funkcji dyskryminacyjnej, opracowanej na podstawie analizy wieloletniej próbki danych pochodzących z wcześniejszych obserwacji radarowych (algorytm uwzględniał H_m i Z_3),
- wydzielenie opadów przelotnych i jednostajnych według kryteriów opracowanych przez radzieckich badaczy,
- określenie stanu skupienia opadów dla przejściowej pory roku (wiosna, jesień); uwzględniano funkcję dyskryminacyjną pobierającą do analizy H_0 i T_0 (opracowaną w Legionowie na podstawie danych klimatycznych),
- określenie klasy natężenia opadu (słaby, umiarkowany, silny) na podstawie wartości Z_1 ,



Rys. 3.19. Odnowiona kopuła anteny radaru MRL-2 (istotne z powodu tłumienia sygnału radarowego przez kopułę) na budynku Zakładu Aerologii

- podział nierozpoznanych ech na opadowe i bez opadu (poza pomiarem Z_1), dla obszaru występowania ech stałych (w odległości mniejszej od 40 km) i powyżej 100 km od radaru (dla warstwy poniżej horyzontu radarowego – 2 km); algorytm polegał na kalibracji Z_2 i H_m za pomocą Z_1 w rejonie pomiaru Z_1 [Ciach, Tuszyńska 1987b].

W celu połączenia SPM-1 z komputerem należało wykonać sprzężenie od strony technicznej i programowej. Sprzężenie SPM-1 z mikrokomputerem IBM-PC/XT realizowane było poprzez specjalistyczne bloki transmisji asynchronicznej wbudowane w urządzeniu SPM-1 i w mikrokomputerze.

Układy transmisji urządzenia SPM-1 przekazywały informacje z pamięci wewnętrznej urządzenia do minikomputera IBM-PC/XT po każdym cyklu obserwacji w zadanym rodzaju pracy.

Mikrokomputer miał z kolei za zadanie:

- nawiązać współpracę z urządzeniem SPM-1,
- odebrać informacje w postaci bloków danych,
- wykonać kontrolę poprawności przesłanej informacji oraz wysłać potwierdzenie,
- przetworzyć otrzymane informacje w gotowe produkty [Zakład... 1978].

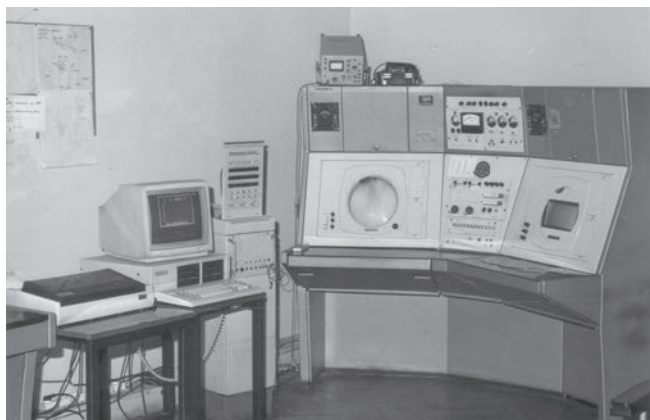
Program startowy i zarządzający dla systemu (typu *batch*) był zbiorem komend systemu operacyjnego DOS.

3.6.2. PSR w służbie operacyjnej

Rok 1988 to okres intensywnych prac związanych z przeniesieniem systemu z mikrokomputera MERA-400 na IBM/PC XT. W tym czasie nowy system PSR (Półautomatyczny System Radarowy) wdrożono do służby operacyjnej i rozpoczęto systematyczną archiwizację danych.

Półautomatyczny System Radarowy w nowej technologii umożliwił:

- odbiór cyfrowych danych radiolokacyjnych z SPM-1 za pośrednictwem łącza szeregowego RS 232,
- graficzne zaprezentowanie na ekranie komputera PC/IBM/XT obrazów kontrolnych (obraz rastrowy) systemu i zinterpretowanej informacji radarowej (dzięki wykorzystaniu karty graficznej CGA; cztery kolory w pierwszej wersji systemu),
- archiwizację zebranych danych na nośnikach zewnętrznych (dyskietkach 360KB),
- wydruk map rozpoznanych zjawisk na drukarce igłowej,
- automatyczne tworzenie wydruku depeszy RADOB.

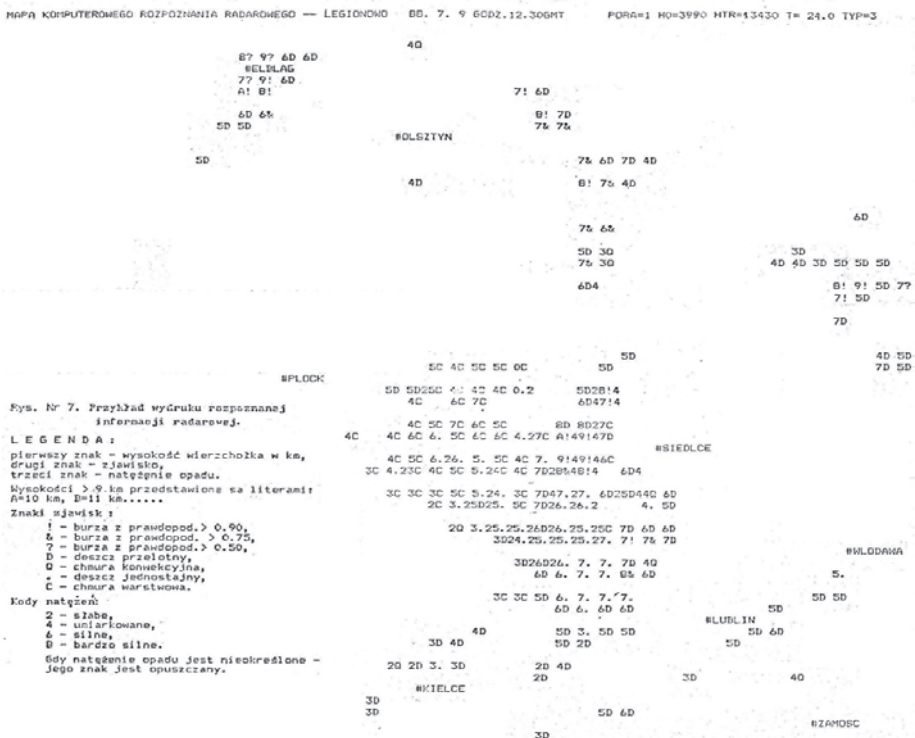


Rys. 3.20. Zestaw PSR (od prawej): konsola radaru MRŁ-2, SPM, 1, komputer XT/PC, drukarka igłowa

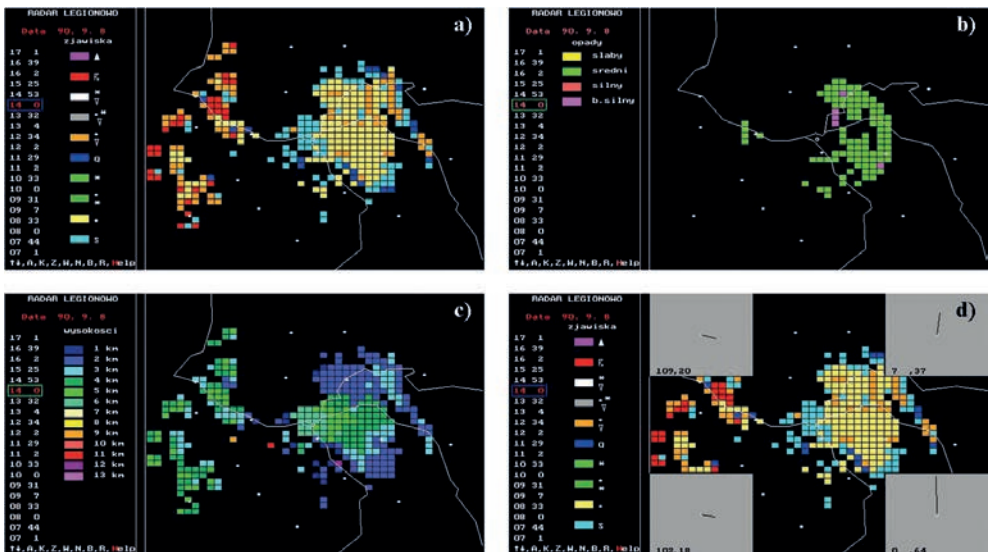
System w konfiguracji z IBM-PC/XT okazał się niezawodny i bardzo wygodny w użyciu. Miał dobrze zorganizowaną obsługę archiwum danych, które gromadzono na nośnikach zewnętrznych (dyskietkach o pojemności 360 KB) w podziale na obserwacje typu: DALEKA – dane z przeglądu dookrężnego, BLISKA – dane z przeglądów pionowych atmosfery na wybranym azymucie.

Niestety z powodu braku możliwości przeniesienia informacji graficznej z monitora na wydruk (kolorowy czy nawet czarno-biały) nie zachowały się przykłady prezentowanych na monitorze graficznych map radarowych: wysokości wierzchołków ech radarowych, natężenia opadu, mapy zjawisk i przekrojów pionowych (obrazów danych ze wskaźnika RH) możliwych do wyświetlenia.

Bazując na danych archiwalnych z lat 1987-1991, kontynuowano prace nad udoskonaleniem nowych funkcji dyskryminacyjnych burz na bazie porównania danych radarowych z danymi z sieci naziemnych stacji synoptycznych. Zmieniono również algorytmy rozpoznawania opadu, których błędy były nadal znaczne z powodu zbyt dużych rozmiarów elementów przestrzeni $10 \times 10 \times 2$ km i pozyskiwanych wartości odbiciowości z SPM-1.



Rys. 3.21. Przykładowy wydruk mapy faksymilowej – systemu PSR z 4.07.1988 r. godz. 12:30 GMT [Moszkowicz 1989]



Rys. 3.23. Produkty Automatycznego Systemu Radarowego w wersji dla użytkownika zewnętrznego informacji radarowych: a) mapa zjawisk, b) mapa opadów, c) mapa wysokości wierzchołków, d) mapa obrazująca ruch ech

ległości (100 i 200 km) oraz wyświetlane informacje pomocnicze typu HELP, zawierające: opis symboli, prawdopodobieństwo wykrywania obiektów zależnie od odległości i inne. Odpowiednie operacje były łatwo wybierane za pomocą prostego MENU.

3.7. Prace badawcze prowadzone w latach 1977-1990 z wykorzystaniem danych z radaru MRL-2

Bazując na informacjach radarowych pozyskanych z badania stanu atmosfery radarem MRL-2 zarówno w postaci obrazów analogowych, jak i zapisów cyfrowych, wykonano szereg analiz i prac zmierzających do opracowania metod ich interpretacji i form przekazywania użytkownikom.

W 1977 r. wykonano radarowe charakterystyki frontów atmosferycznych na podstawie pomiarów radarem MRL-2 [Fortini- Iwanowska 1977].

Prowadzono prace związane z wykonaniem radiolokacyjnych charakterystyk chmur, systemów chmurowych i groźnych zjawisk w celu rozróżniania systemów chmurowych groźnych zjawisk na podstawie pomiaru radiolokacyjnego z uwzględnieniem parametrów aerologicznych i synoptycznych [Moszkowicz 1977]:

- metodą fotografowania ekranu wskaźnika *P* radaru MRL-2 do odległości 100 km i przetwarzania przez operatora obrazów na dane cyfrowe (niektóre z wykorzystaniem urządzenia do cyfrowego przetwarzania obrazu),

- zakodowano dane z map faksymilowych i naniesiono je na taśmę magnetyczną,
- przetworzono wymienione dane w celu uzyskania rozkładów empirycznych odbiciowości na różnych poziomach, oszacowania wysokości dla poszczególnych typów chmur, układów chmur i zjawisk,
- opracowano algorytmy wstępnej analizy danych pod kątem rozpoznawania zjawisk,
- opracowano algorytmy usuwania ech stałych i eliminacji zakłóceń.

Opracowano metodykę korekcji tłumienia fali dla radaru meteorologicznego i wykonano przykładową analizę danych rzeczywistych, jako uzasadnienie dla metody szacowania opadu z wykorzystaniem danych radarowych [Kawecki 1979].

Przez całą dobę prowadzono radiolokacyjne pomiary opadów dla zlewni Wilgi (obszar stacji Jarczew – IMGW) przy kącie podniesienia anteny 0,5°. Pojawiające się w tym obszarze echa fotografowano. Serie zdjęć poddano cyfrowemu przetwarzaniu. Z chwilą zainstalowania komputera dane zapisano na taśmie magnetycznej w celu dalszych analiz [Kilim 1980].

Na podstawie danych radarowych (pozyskanej próbki uczącej) opracowano końcowe algorytmy przetwarzania informacji radarowych przeznaczone do automatycznego rozpoznawania obiektów i zjawisk meteorologicznych. Wyniki prac przekazano do ITWL w celu opracowania programów automatycznej klasyfikacji ech radarowych [Moszkowicz 1980].

Przy współpracy z ITWL opracowano założenia do badania zestawu przetwarzania informacji z radiolokacyjnej stacji meteorologicznej (ZPI RSM) odnośnie do:

- wymagań technicznych (sprzężenia radaru z komputerem MERA-400),
- badania oprogramowania ZPI RSM, tj. poprawności działania algorytmów rozpoznania i prognozy obiektów oraz zjawisk meteorologicznych [Moszkowicz 1980].

Dla oceny sprawdzalności algorytmów (pierwszej generacji) rozpoznawania zjawisk meteorologicznych oraz opracowania założeń do drugiej ich generacji, opartej na cyfrowych danych radarowych, przeprowadzono porównanie wyników rozpoznania przez operatora i automatycznego. Wykorzystano do tego próbkę danych zebranych w sierpniu 1987 r., kiedy oprócz pomiarów zautomatyzowanych wykonano bezpośrednio po nich pomiary operatora. Porównano zebrane informacje i wykazano m.in. tendencje systemu PSR do rozpoznawania większej liczby groźnych zjawisk niż przez operatora. Mogło to być traktowane, jako zaleta PSR, który rozpoznaje groźne zjawiska z większą pewnością niż operator, lub jako jego wada, gdyż generuje za dużo fałszywych alarmów o groźnych zjawiskach, mimo że one nie występują.

Następnym krokiem było porównanie wyników automatycznego rozpoznania z obserwacjami sieci synoptycznych dla analogicznych terminów obserwacji (sierpień 1987 r.) [Moszkowicz, Tuszyńska 1988].

Tab. 3.6. Przykładowy wydruk danych z zakodowanymi informacjami radarowymi z pomiaru wykonanego przez operatora (przygotowane do automatycznego przetwarzania)

1980 8 31 12	1980 9 1 10	1980 9 1 11	236 3 10 99
233 4 99 16	424 6 99 16	335 3 99 4	137 5 11 99
333 4 99 16	325 6 99 16	243 3 99 4	143 3 13 99
433 5 99 12	326 6 99 7	443 3 99 4	243 3 10 18
235 4 99 7	426 6 99 7	244 6 99 6	443 3 99 16
143 4 99 7	233 5 99 7	1980 9 1 12	144 5 99 14
243 5 99 12	333 5 99 7	433 4 7 99	245 4 99 8
1980 8 31 14	433 4 99 7	134 4 7 99	253 3 99 10
232 8 99 10	134 6 99 7	135 4 7 99	154 3 99 6
233 5 99 10	434 6 99 4	235 4 7 99	1980 9 1 14
234 5 99 13	344 5 99 6	244 6 99 6	136 3 10 99
1980 9 1 9	454 2 99 6	1980 9 1 13	336 3 7 99
334 3 99 4	434 6 99 4	433 4 7 99	436 3 10 99
344 3 99 2	344 5 99 6	134 4 10 16	253 3 99 10
	454 2 99 6	234 6 10 99	154 3 99 12
		335 4 16 16	354 3 99 8

Uwaga: pogrubiono kolejne terminy obserwacji

Z chwilą pojawienia się możliwości przeniesienia opracowanych przez operatora map: blankietów roboczych i faksymilowych z okresu 1978-1984 na nośniki cyfrowe przystąpiono do ich zakodowania na potrzeby badań i komputerowych analiz informacji radarowych. Opracowaniu poddano ręczne obserwacje radarowe wykonane przez operatora od kwietnia do września od godziny 09:00 do 17:00 GMT dla dni ze zjawiskami konwekcyjnymi.

Dla kolejnych terminów (tab. 3.6) w układzie: rok, miesiąc, dzień, godzina (pole zaznaczone na żółto) określano:

- położenie zjawiska – numery kwadratów (jak dla depeszy RADOB), gdzie zanotowano pomiar w arkuszu roboczym,
- dane pomiarowe, z których odnotowywano:
 - wysokość chmury [km] w obszarze 30×30 km,
 - odbiciowość na poziomie „burzowym” $Z_3 \cdot 10$ (w przypadku braku Z_3 brano Z_2 , a przy braku obu zapisywano 99),
 - odbiciowość $Z_1 \cdot 10$ w zakresie jej pomiarów (do około 120 km) przy kącie elewacji $0,5^\circ$,
 - 99 – oznacza brak pomiaru.

Dane nanoszono na komputerze PC DTC-8 DIALOG (polski mikrokomputer modułowy) pracującym pod systemem operacyjnym zgodnym funkcjonalnie z systemem IBM, co umożliwiało przenoszenie danych pomiędzy DTC-8 a IBM/PC. Nośnikami danych były dyskietki 5,25 cala o pojemności 360 KB [Moszkowicz, Tuszyńska 1988].

a)													
			462	497	485	444							
		472	563	490	503	497	447	468	395				
		585	532	489	500	473	448	475	459				
	453	517	503	508	475	461	495	443	423	421			
	423	492	525	490	473	481	460	429	430	435			
	396	474	490	475	475	476	464	430	442	490			
	409	437	438	478	463	462	481	440	437	454			
		463	429	417	439	469	458	489	518				
		395	441	383	420	440	451	536	462				
			374	413	447	441							

b)													
			155	173	170	131							
		164	182	162	176	164	133	137	128				
		203	181	169	182	167	140	141	146				
	166	179	172	191	188	170	168	135	126	136			
	147	176	187	186	186	170	152	139	141	147			
	151	175	175	163	155	144	141	143	143	159			
	154	151	150	159	148	146	157	137	137	139			
		159	159	148	156	168	152	160	159				
		144	159	144	165	166	162	171	151				
			167	165	176	157							

c)													
			32	44	48	37							
		63	54	47	44	45	40	38	35				
		59	51	47	50	45	40	39	38				
	35	44	51	53	54	45	40	32	30	41			
	39	50	55	56	53	42	34	32	36	38			
	30	43	47	41	34	35	33	36	45	54			
	29	30	33	34	35	39	42	42	44	53			
		34	36	34	40	44	42	46	47				
		42	41	36	37	40	40	41	33				
			38	31	39	41							

Rys. 3.24. Przykładowy wydruk analizy częstości występowania: a) ech konwekcyjnych w pełnym zbiorze obserwacji, b) „silnych” ech konwekcyjnych, c) „silnych” ech konwekcyjnych w sytuacjach niefrontalnych [Moszkowicz i in. 1989]

Dane (tab. 3.6) posłużyły do weryfikacji systemu algorytmów rozpoznawania w systemie PSR w porównaniu z rozpoznawaniem przez operatora oraz do opracowania nowych procedur dyskryminacyjnych dla drugiej generacji algorytmów rozpoznawania zjawisk meteorologicznych.

Wykorzystano je także do wykonania statystycznych charakterystyk zjawisk meteorologicznych, szczególnie o charakterze konwekcyjnym (rys. 3.24). Badania ograniczono tu do odległości 150 km od radaru, zdając sobie sprawę z tego, że prawdopodobieństwo wykrycia radarowych obiektów meteorologicznych szybko maleje wraz z odległością. Uzyskane częstości występowania zjawisk konwekcyjnych zobrazowano na mapkach, na których spodziewano się znaleźć wpływ ukształtowania terenu na częstość występowania zjawisk konwekcyjnych i wysokość wierzchołków echa radarowego [Moszkowicz i in. 1980a].

Lata od 1986 do 1990 to także okres szeregu prac wdrożeniowych związanych z przeniesieniem systemu radarowego z minikomputera MERA-400 na komputer IBM/PC XT oraz podniesieniem standardu służby operacyjnej, takich jak:

- oprogramowanie i wdrożenie do służby operacyjnej unowocześnionego PSR (1986-88),
- wdrożenie algorytmów drugiej generacji rozpoznawania zjawisk meteorologicznych, umożliwiających zmniejszenie błędów rozpoznania burz i opadów o kilkanaście procent oraz nowy model prognozy ruchu z wyprzedzeniem 1-godzinnym (1988-89),
- opracowanie i wdrożenie przekazywania informacji radarowej telefaksem (1990),
- opracowanie i przygotowanie do wdrożenia programu zobrazowania informacji radarowej na terminalu graficznym u użytkownika (1989-90),
- opracowanie koncepcji oraz roboczej wersji oprogramowania dla nowego systemu ASR (patrz rozdz. 5), a następnie wersji gotowej do wdrożenia (1989-90).

W celu objęcia osłoną radarową całego kraju postulowano utworzenie sieci radarów meteorologicznych według koncepcji opracowanej w IMGW.

4. Metody pozyskiwania danych radarowych

Zastosowanie teledetekcji w meteorologii opiera się głównie na pomiarze rozpraszania wstecznego fal elektromagnetycznych przez cząstki zawarte w obiektach meteorologicznych. Dane pozyskane jako wynik tego procesu są specyficzną charakterystyką radiometeorologiczną mikrostruktury zlokalizowanych obiektów meteorologicznych. W meteorologii okazało się to niezmiernie cenne, ponieważ zarejestrowany sygnał od obiektów meteorologicznych jest pomiarem realizowanym jednocześnie od ogromnej liczby różnego typu hydrometeorów znajdujących się w przestrzeni.

Przez przestrzeń w tym wypadku należy rozumieć: najmniejszą próbkę danych sferycznych (bramkę) możliwą technicznie do pozyskania pomiarem radarowym lub przestrzeń wokół radaru określoną przez odległość (w poziomie) i wysokość (w pionie).

Kiedy połączymy kilka radarów w jeden system, to przestrzeń tę określają miliony próbek danych, których interpretacja wymaga coraz to doskonalszych systemów automatycznej analizy w celu pozyskania informacji użytecznej dla meteorologii. Pomiar radarowy staje się wówczas także wypadkową zależną od funkcji czasu; im szybciej pozyskamy końcową przetworzoną informację, tym szybciej będzie ona wykorzystana i bardziej przydatna.

W związku z powyższym (z punktu widzenia technicznego) pomiar radarowy to pogoń za coraz to doskonalszymi metodami analiz danych radarowych i środkami technicznymi umożliwiającymi ich realizację. Coraz większe ilości informacji dostarczanych przez radar (w krótkim czasie), złożone algorytmy przetwarzania i interpretacji powodują, że wykorzystanie pomiarów radarowych stało się możliwe wyłącznie przy pełnej automatyzacji tych procesów. Dlatego też od ok. 25 lat na całym świecie wdraża się wyłącznie zautomatyzowane systemy radarowych obserwacji meteorologicznych, które są ustawicznie rozwijane.

4.1. Radarowy pomiar parametrów meteorologicznych atmosfery

4.1.1. Zasady pomiaru

Fale elektromagnetyczne wykorzystywane w urządzeniach radarowych do pomiaru parametrów atmosfery wytwarzane są w nadajniku przez magnetron lub klitron (generatory mikrofal dużej mocy). Przesyłane są do anteny przewodem zwanym falowodem. Anteny powszechnie stosowanych radarów meteorologicznych są używane zarówno przy nadawaniu, jak i przy odbiorze fal. O tym, czy antena jest w trybie nadawania czy odbioru decyduje specjalistyczne (bardzo precyzyjne) urządzenie zwane przełącznikiem sygnału.

W celu optymalnego wykorzystania pomiarów zdalnych zrealizowanych za pomocą fal elektromagnetycznych niezbędna jest znajomość zagadnień związanych z ich propagacją w atmosferze.

W ośrodkach wypełnionych materią, jak również w ośrodkach niejednorodnych, między innymi w troposferze, prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych v jest nieznacznie mniejsza od prędkości, z jaką poruszają się one w próżni (jest to prędkość światła równa ok. $3 \cdot 10^8$ m/s). Troposferę charakteryzuje pewien współczynnik refrakcji (załamania) n , będący stosunkiem prędkości światła c w próżni do prędkości fali w rozważanym ośrodku:

$$n = \frac{c}{v} \quad (4.1)$$

Częściej jednak stosowany jest wskaźnik refrakcji N , wyrażający zależność współczynnika załamania n od parametrów atmosfery: temperatury, ciśnienia i wilgotności powietrza. Wówczas podstawiając za $N = (n-1) \cdot 10^6$ (wyrażenie prowadzące małe wartości różnicy między współczynnikiem załamania a jednością do wartości bardziej praktycznych) otrzymujemy [Szóstka 2001]:

$$N = (n-1) \cdot 10^6 = 77,6 \frac{p}{T} - 5,6 \frac{e}{T} + 3,75 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (4.2)$$

Składnik $(5.6 e/T)$ jest znacznie mniejszy od dwóch pozostałych i jest zwykle zaniedbywany, wówczas wzór (4.2) możemy zapisać w postaci (4.3):

$$N = \frac{77,6}{T} \left(p + \frac{4810e}{T} \right) \quad (4.3)$$

gdzie:

T – temperatura powietrza [K],

p – ciśnienie suchego powietrza [hPa],

e – ciśnienie cząstkowe pary wodnej [hPa].

Wówczas prędkość rozchodzenia się fal możemy wyrazić jako:

$$V = \frac{c}{N} \quad (4.4)$$

Dla troposfery standardowej na wysokości h [km] nad powierzchnią morza $N(h)$ wynosi:

$$N(h) = 289e^{-0,136h} \quad (4.5)$$

W troposferze pionowy gradient tego wskaźnika powoduje zakrzywienie toru fali wskutek jej przechodzenia przez ośrodki o różnej gęstości, co jest uwzględniane w wynikach pomiaru radarowego.

Podstawową cechą wyróżniającą radar meteorologiczny od pozostałych radarów jest kształt emitowanej wiązki fal elektromagnetycznych i sposób przeszukiwania przestrzeni. Radary meteorologiczne emitują wiązkę „stożkową”, o rozbieżności mniejszej lub równej 1° w pionie i w poziomie. Wiązka taka charakteryzuje się dużą koncentracją energii. Jej przekrój ma kształt kołowy, który jest tym większy, im większa jest odległość od radaru. Dla danego ustawienia kąтового wiązki radarowej oświetlane są kolejne „próbki obiektu meteorologicznego”.

Wysłana w przestrzeń wiązka fali elektromagnetycznej w momencie zetknięcia się z cząstkami chmurowymi wzbudza w nich elektryczne i magnetyczne dipole. Dipole te wypromieniowują w przestrzeń falę, która powraca do anteny radaru, tworząc sygnał użyteczny, tzw. echo radarowe (echo zwrotne). Należy zaznaczyć, że tylko niewielka część energii przechodzącej przez chmurę opadową jest przez nią wstecznie rozpraszana. Większa część energii przechodzi dalej. Impuls ten, przenikając przez atmosferę, ulega odbiciu od chmur opadowych, ujawniając ich wewnętrzną strukturę (podobnie jak rentgen czy USG) w zasięgu działania radaru. Dzięki temu możemy obserwować chmury położone jedna za drugą. Jest to wielką zaletą radarów meteorologicznych.

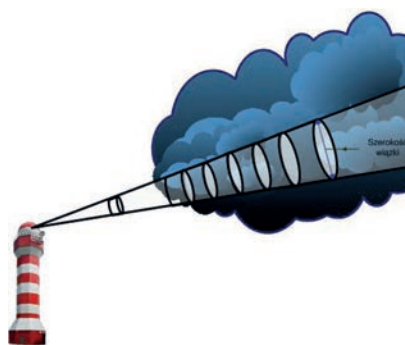
Rozmiary próbek (danych) zwrotnych zależą od rozbieżności wiązki radarowej. Przykładowo, w odległości 1 km od radaru wiązka ma średnicę ok. 15 m, a w odległości 100 km – już 1500 m. Objętość oświetlanej próbki ograniczona jest przez boczną powierzchnię wiązki i długość impulsu oraz rośnie z kwadratem odległości (rys. 4.1).

Wielkość próbki danych zależy od szerokości wiązki radarowej i czasu trwania impulsu t , np. dla czasu trwania impulsu równego 2 ms rozdzielczość próbki w odległości wynosi 300 m. Jest to wynikiem następującego rozumowania:

$$\text{dla } \tau = 2 \text{ ms, } h = 600 \text{ m, gdyż } h = c\tau = 300000000 * 0,000002 = 600 \text{ [m]}$$

i jeśli wyrazimy c (prędkość światła) w [m/s], a τ w sekundach [s], to h (długość impulsu) będzie w [m]. W przypadku radaru mamy przebieg fali do celu i z powrotem dlatego faktyczna rozdzielczość sygnału w odległości wynosi $h/2$.

Czas trwania impulsu (długość impulsu) określa minimalną zdolność rozdzielczą w odległości [Moszkowicz, Tuszyńska 2003].



Rys. 4.1. Pomiar radarowy

4.1.2. Rozpraszanie i pochłanianie fal elektromagnetycznych przez hydrometeory

Przy przechodzeniu fal elektromagnetycznych przez obiekty meteorologiczne w każdej oddzielnej ich cząsteczce wzbudzone jest promieniowanie wtórne, część energii jest tłumiona, a część zamienia się w ciepło. Pozostała energia fal jest rozproszona we wszystkich kierunkach, w tym także w kierunku urządzenia radarowego (echo zwrotne), przy czym częstotliwość fali rozproszonej (odbitej) jest taka sama, jak częstotliwość fali padającej.

Nawet w przypadku dielektryka (izolatora), jakim jest kropla wody lub kryształek lodu może płynąć prąd, ponieważ molekuly dielektryka mogą zostać spolaryzowane przez padające pole elektryczne i magnetyczne (falę elektromagnetyczną). Polaryzacja molekuly oznacza, że chociaż cząsteczka jako całość jest obojętna (nie ma ładunku elektrycznego), to jednak środek ładunku dodatniego nie przypada w tym samym miejscu, co środek ładunku ujemnego, cząsteczka tworzy wówczas dipol elektryczny.

Molekuła wody jest z natury spolaryzowana. Padająca fala zwiększa tę polaryzację (powoduje oddalanie się ładunków od siebie). W związku z tym, że pole elektromagnetyczne (magnetyczne i elektryczne) zmienia się z określoną częstotliwością, to i polaryzacja cząsteczki zmienia się tak samo; w ciągu jednego okresu dwa razy zmienia się orientacja dipola. Takie reorientowanie dipola to nic innego, jak elektryczne drgania, które powodują generowanie fali elektromagnetycznej o tej samej częstotliwości, co fala padająca. Chociaż pojedynczy dipol (molekuła) rozprasza falę izotropowo (równomiernie we wszystkie strony), to kropelka wody ze względu na wzajemne oddziaływanie pól rozproszonych ma pewną przestrzenną charakterystykę rozpraszania; najwięcej energii propagowane jest w tym samym kierunku, co fala padająca, pewna (dość duża) część propagowana jest w kierunku źródła (powstaje fala rozproszona wstecznie), a mniejsze ilości w pozostałych kierunkach [Moszkowicz, Tuszyńska 2003].

Z punktu widzenia meteorologii radarowej ważnym zagadnieniem jest ocena natężenia promieniowania od cząsteczki rozpraszającej w kierunku urządzenia radarowego, która powraca do źródła, tworząc sygnał „echa użytecznego” w antenie radaru.

Zagadnienie to można rozwiązać, wprowadzając pojęcie efektywnej powierzchni rozpraszania cząstki [Samol 1981].

Teorię rozpraszania światła (fal elektromagnetycznych) na małych cząstkach opracował w 1908 r. niemiecki fizyk Gustav Mie [1908]. Teoria Mie to zastosowanie równań Maxwella do przypadku rozpraszania fali płaskiej w jednorodnym środowisku, nieabsorbującym promieniowania.

Przy założeniu, że cząstki obiektu są kulami idealnie sferycznymi, równanie opisujące efektywną powierzchnię rozpraszania wstecznego σ [m²] dla cząstek kulistych można na podstawie teorii Mie zapisać następująco:

$$\sigma = \frac{\pi a^2}{\alpha^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1)(a_n - b_n) \right|^2 \quad (4.6)$$

gdzie:

a – promień rozpraszającej cząstki,

α – liczba falowa opisująca rozpraszaną falę $\alpha = 2\pi a/\lambda$ (λ – długość fali),

a_n, b_n – współczynniki Mie rozpraszania przez elektryczne (a) i magnetyczne (b) momenty rzędu n (n – liczba niemianowana).

Współczynniki a_n i b_n są kombinacją sferycznych funkcji Bessela i Hankla od α oraz m – zespolonego współczynnika refrakcji materiału cząstki, który możemy wyrazić jako:

$$m = n - ik \quad (4.7)$$

gdzie:

n jest zwykłym współczynnikiem refrakcji,

$i = \sqrt{-1}$, k – współczynnikiem pochłaniania [Rinehart 2004].

Teoria Mie jest trudna do stosowania w praktyce. Dla każdej cząstki trzeba by prowadzić skomplikowane obliczenia. Przy pomiarze opadu radarem z odległości kilkudziesięciu (lub kilkuset) kilometrów nie znamy wielkości kropeł i ich liczby. W zasadzie średnice kropeł rozpraszających są dużo mniejsze od długości fali elektromagnetycznej. Dla przypadku, gdy cząsteczki rozpraszające są małe (w porównaniu z długością fali elektromagnetycznej) zakłada się, że współczynnik rozpraszania jest odwrotnie proporcjonalny do czwartej potęgi długości fali (przy założeniu, że częstotliwość fali rozproszonej jest identyczna z częstotliwością fali padającej). Wówczas w sumach na przekroje czynne istotną rolę odgrywają tylko niektóre elementy.

Uprozczone podejście do rozpraszania promieniowania zostało sformułowane pod koniec XIX w. przez Rayleigha [Rayleigh 1899] i opisywane w wielu późniejszych podręcznikach w odniesieniu do zagadnień meteorologii radarowej.

Według tej teorii, jeśli parametr α przyjmuje wartość wielokrotnie mniejszą od 1, a cząstki rozpraszające promieniowanie są małe w porównaniu z długością rozpraszanej fali, możemy zaniedbać wyraz a_n, b_n w funkcji (4.6). Otrzymujemy wówczas tzw. przybliżenie Rayleigha.

W zależności od relacji: długości stosowanej fali i rozmiarów obserwowanych cząstek, przekrój czynny można opisać za pomocą teorii Rayleigha lub Mie.

W radarach meteorologicznych stosowane są fale o długości około: 3 cm – pasmo X, 5 cm – pasmo C lub 10 cm – pasmo S. Dla większości radarów meteorologicz-

nych prawie wszystkie krople deszczu mogą być uznane za małe w porównaniu do długości fali. Dlatego też w celu określenia rozpraszania i pochłaniania najczęściej korzysta się z przybliżenia Rayleigha [Rinehart 2004].

Ponadto przybliżenie Rayleigha odpowiada przypadkowi, gdy fala rozproszona jest generowana wyłącznie przez dipole elektryczne, a wszystkie momenty elektryczne i magnetyczne wyższych rzędów mogą być zaniedbane [Moszkowicz, Tuszynska 2003].

Dla przybliżenia Rayleigha powierzchnie skuteczne określają wyrażenia:

- powierzchnia skuteczna pełnego rozpraszania Q_s :

$$Q_s = \frac{2}{3} \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D^6 \quad (4.8)$$

- powierzchnia na przekrój czynny rozpraszania wstecznego (do radaru) σ :

$$\sigma = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D^6 \quad (4.9)$$

- powierzchnia skuteczna pochłaniania Q_a

$$Q_a = \frac{\pi^2}{\lambda} D^3 \operatorname{Im}(-K) \quad (4.10)$$

gdzie:

D – średnica cząstki rozpraszającej,

λ – długość fali,

Im – część urojona wyrażenia w nawiasie, K jest niemianowaną funkcją zespolonego współczynnika załamania materiału cząstki (wody, lodu lub mieszaniny):

$$K = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \quad (4.11)$$

gdzie:

m – współczynnik refrakcji $m = n - i k$,

n – zwykły współczynnik załamania fali,

i – jednostka urojona,

k – współczynnik absorpcyjny.

Eksperymentalnie zmierzono, że w typowych warunkach $|K|^2 \in (0.91 \dots 0.93)$ dla wody i $(0.18 \dots 0.197)$ dla lodu [Moszkowicz 2003, dokumentacja systemowa RAINBOW]. Wynika z tego, że dla cząsteczki wody o danej średnicy efektywna powierzchnia rozpraszania jest ok. pięć razy większa niż dla identycznej cząsteczki lodowej.

Suche cząstki lodu, których wymiary są równe długości fali elektromagnetycznej lub większe od niej rozpraszają o rząd wielkości więcej niż cząsteczki wody o identycznej średnicy. Fakt ten tłumaczy się tym, że kula lodowa, o małym współczynniku załamania fal elektromagnetycznych oraz o małym wewnętrznym tłumieniu, zachowuje się jak soczewka dielektryczna. Mały współczynnik odbicia przedniej powierzchni cząstki pozwala dużej części padającej energii przeniknąć do wnętrza cząstki, gdzie jest ogniskowana na jej wewnętrznej tylnej części, co powoduje, że częściowo odbija się z powrotem.

Z kolei pokrycie cienką warstewką wody dużych gradzin powoduje zmniejszenie ich efektywnej powierzchni rozpraszania. Pozwala to na interpretacje odbicia sygnału od dużych gradzin i określenie poziomu izotermy 0°C na przekroju pionowym w okresie letnim.

W przypadku kropeł wody, z powodu dużego współczynnika załamania, odbicie podobne jest do odbicia od metalowej kuli; tylko niewielka część energii przenika do wnętrza kropli, gdzie jest znacznie osłabiana ze względu na duży współczynnik pochłaniania fal elektromagnetycznych przez wodę [Samol 1981].

4.2. Podstawowe wielkości mierzone radarem meteorologicznym

4.2.1. Równanie radarowe

Antena radaru promieniuje podczas trwania impulsu moc P_t . Gdyby promieniowała izotropowo (równomiernie we wszystkich kierunkach), to w odległości R [m] gęstość mocy d na 1 m² należałoby podzielić przez powierzchnię sfery $4\pi R^2$:

$$d = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (4.12)$$

Jednak antena ma zysk G , który wskazuje, ile razy jest większa gęstość mocy d [W/m²] na osi anteny kierunkowej w stosunku do gęstości mocy, jaka byłaby, gdyby antena promieniowała izotropowo. Gęstość mocy na osi wiązki wynosi:

$$d = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \quad (4.13)$$

W przypadku, gdy na drodze wiązki znajdzie się obiekt punktowy (znacznie mniejszy od szerokości wiązki) o powierzchni skutecznej rozpraszania σ [m²], to odbierze on energię ($d\sigma$) i rozproszy ją izotropowo. Gęstość mocy d_1 wyniesie:

$$d_1 = \frac{P_t G \sigma}{(4\pi R^2)^2} \quad (4.14)$$

Całą moc dzielimy ponownie przez powierzchnię sfery $4\pi R^2$. Otrzymujemy w ten sposób gęstość mocy $[W/m^2]$ w miejscu położenia anteny.

Z definicji powierzchni skutecznych wynika, że:

- powierzchnia skuteczna rozpraszania σ to taka powierzchnia zastępcza, która przyjmuje całą padającą na nią energię, rozprasza ją izotropowo i generuje w miejscu ustawienia anteny taką moc sygnału, jaką daje obiekt rzeczywisty,
- powierzchnia skuteczna anteny A_e , czyli moc całkowita odebrana przez antenę, to gęstość mocy rozproszonej w miejscu ustawienia anteny pomnożona przez powierzchnię skuteczną anteny; wtedy moc odebraną P_r można określić następująco:

$$P_r = \frac{P_t G A_e L_r \sigma}{(4\pi R^2)^2} \quad (4.15)$$

gdzie:

P_r – moc odebrana [W],

P_t – moc nadajnika w impulsie [W],

R – odległość od obiektu [m],

σ – powierzchnia skuteczna rozpraszania wstecznego przez hydrometeory $[m^2]$,

G – zysk kierunkowy anteny [liczba niemianowana]

A_e – powierzchnia skuteczna anteny $[m^2]$,

L_r – współczynnik strat mocy w falowodzie (między nadajnikiem-anteną oraz anteną-odbiornikiem) [liczba niemianowana]; (zwykle mniejszy od 1).

Wzór (4.15) jest podstawowym równaniem radiolokacji dla obiektu punktowego, znajdującego się na osi wiązki anteny.

Można przyjąć, że moc sygnału docierającego do anteny jest sumą sygnałów od poszczególnych cząstek z pewnej objętości w tym samym momencie czasu. Objętość, z której sygnały docierają, to objętość cylindra (zamiast stożka) o promieniu $R \theta/2$, ograniczonego skrajami wiązki oraz połową szerokości impulsu $h/2$.

Natężenie fali elektromagnetycznej w wiązce nie jest jednakowe. Największe jest na osi wiązki, a moc promieniowana przez antenę maleje od środka do skrajów. Rozwiązanie eliminujące wymienione efekty zaproponował w 1962 r. Probert-Jones, wprowadzając współczynnik korekcji $F = (2 \ln 2)^{-1}$ [Battan 1973; Moszkowicz, Tuszyńska 2003].

Wówczas objętość V , z której docierają do nas sygnały, można wyrazić następująco:

$$V = \pi \left(\frac{R\theta}{2}\right)^2 \frac{h}{2} F = \frac{\pi R^2 \theta^2 h F}{8} = \frac{\pi R^2 \theta^2 h}{16 \ln 2} \quad (4.16)$$

gdzie:

θ – szerokość wiązki (symetrycznej) [radiany],

h – szerokość impulsu nadajnika [s];

Przyjmując, że jednostka objętości [1 m³] opadu ma skuteczną powierzchnię rozpraszania $\sigma_{jedn. obj.}$, to całkowita powierzchnia skuteczna rozpraszania obiektu odbijającego wynosi:

$$\sigma = V \cdot \sigma_{jedn. obj.} = \frac{\pi R^2 \theta^2 h}{16 \ln 2} \sigma_{jedn. obj.} \quad (4.17)$$

Podstawiając tę wielkość do podstawowego równania radiolokacji dla obiektów punktowych (18), zamieniając jednocześnie moc odbieraną na średnią moc odbieraną oraz wyrażając powierzchnię skuteczną anteny A_e za pomocą wzoru $A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi}$; po uproszczeniu przez R^2 i π oraz uporządkowaniu otrzymano:

$$\bar{P}_r = \frac{P_t G^2 L_r \lambda^2 \theta^2 h \sigma_{jedn. obj.}}{1024 \ln 2 \pi^2 R^2} \text{ [W]} \quad (4.18)$$

Wyprowadzony wzór (4.18) to moc średnia ze względu na kształtowanie się sygnału odbieranego od dużej ilości cząstek rozpraszających.

4.2.2. Odbiciowość radarowa

Meteorologia radarowa nie zajmuje się echo sygnałami wywoływanymi przez pojedyncze impulsy, zawsze sumuje się echo sygnały powodowane przez kilka, kilkanaście lub nawet kilkadziesiąt impulsów. Wskutek silnego mieszania cząsteczek (turbulencji) w chmurach (od impulsu do impulsu echo sygnały są słabo skorelowane) można je traktować jako niespójne (niekoherentne) i sumować ich natężenia (moce). Wówczas mamy do czynienia z mocą średnią pochodzącą od serii impulsów.

W przypadku radarów meteorologicznych wykrywane struktury meteorologiczne, rozciągając się w przestrzeni, wypełniają kolejne komórki (próbki) rozdzielności w kolejnych wiązках skanowania radarowego. Nie są one jednorodne, tj. nie składają się tylko z kropli wody, lecz są najczęściej mieszaniną hydrometeorów (kropli deszczu, płatków śniegu, kryształków lodu, grad, itp.). Wartość odbiciowości uzależniona jest także od typu hydrometeorów, ich rozmiarów i rozkładu w jednostce objętości.

W celu uzyskania powierzchni skutecznego rozpraszania dla jednostki objętości (zmierzonej próbki) należy zsumować powierzchnie skuteczne wszystkich zawartych w niej cząstek.

Biorąc pod uwagę, że dla pojedynczej cząstki kulistej o średnicy D_i , wg przybliżenia Rayleigha, powierzchnia skutecznego rozpraszania wstecznego (do radaru) wyraża się wzorem (4.9) i przyjmując, że mamy jednorodną chmurę (tylko krople albo tylko kryształki lodu) i $|K|^2$ jest stałe, to wówczas:

$$\sigma_{jedn. obj.} = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \sum_{i, jedn. obj.} D_i^6 \quad (4.19)$$

Ostatni mnożnik powyższego równania – suma szóstych potęg średnic kropeł w jednostce objętości – nazywamy odbiciowością radarową, oznaczamy ją przez Z i wyrażamy w $[\text{mm}^6/\text{m}^3]$.

$$Z = \sum_{i, \text{jedn. obj.}} D_i^6 \quad (4.20)$$

Odbiciowość radarowa jest specyficzną cechą mikrostruktury wykrytych obiektów meteorologicznych. W pierwszych radarach meteorologicznych był to jedyny parametr pozyskiwany do diagnozowania stanu atmosfery.

Wartość odbiciowości radarowej Z zmienia się w bardzo szerokim zakresie, przy tym błędy jej pomiaru są znaczne, dlatego do jej wyrażenia zastosowano skalę logarytmiczną:

$$Z[\text{dBZ}] = 10 \log Z \quad (4.21)$$

Jednostkę odbiciowości oznaczono symbolem $[\text{dBZ}]$ (dB w stosunku do Z); czyli $1 \text{ dBZ} = 10 \log Z$.

$$\sigma_{\text{jedn. obj.}} = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z \quad (4.22)$$

Wzór na powierzchnię skutecznego rozpraszania dla jednostki objętości z wykorzystaniem parametru Z przedstawia się następująco:

Po podstawieniu wzoru (4.22) za $\sigma_{\text{jedn. obj.}}$ do wzoru (4.18) i jego uporządkowaniu otrzymujemy:

$$\bar{P}_r = \frac{\pi^3}{1024 \ln 2} \cdot \frac{P_t G^2 L_r \theta^2 h}{\lambda^2} \cdot \frac{|K|^2}{R^2} \cdot Z \quad (4.23)$$

Na ogół nie wiemy, czy obserwowany obiekt składa się z kryształków lodu, kropelek wody czy ich mieszaniny, dlatego zwykle przyjmujemy stałą wartość $|K|^2$ równą 0,93 (dla wody), a zamiast odbiciowości Z bierzemy odbiciowość skuteczną Z_e – tj. odbiciowość takiej zastępczej chmury, złożonej z kropelek wody, która daje taką samą moc sygnału P_r , jaką otrzymujemy od chmury rzeczywistej. Wtedy przy ustalonych parametrach radaru pierwszy i drugi mnożnik to stała radarowa C_r (zwana inaczej potencjałem meteorologicznym radaru), zależna od parametrów radaru i użytych jednostek. Wówczas równanie radarowe dla obiektów meteorologicznych przyjmuje bardzo prostą i zwykle stosowaną postać [Battan 1973]:

$$\bar{P}_r = C_r \frac{|K|^2 Z_e}{R^2} \quad (4.24)$$

gdzie moc odbierana P_r jest wyrażona w $[\text{dB}]$ względem 1 $[\text{W}]$.

Potencjał radaru obliczamy zwykle na podstawie nominalnych parametrów radaru, podawanych przez producenta. W celu możliwie dokładnego określenia rzeczy-

wistego potencjału meteorologicznego wskazane jest wykonywanie (przynajmniej co jakiś czas) kalibracji radaru.

Zastosowanie równania (4.24) wymaga spełnienia wielu warunków [Sauvageot 1982]:

- wiązka i cel obserwacji w pełni się pokrywają,
- obiekt mierzony składa się z cząstek sferycznych lub zbliżonych,
- spełnione są warunki, aby można było zastosować przybliżenie Rayleigha (średnice cząstek odbijających w odniesieniu do długości fali są wystarczająco małe),
- liniowa polaryzacja promieniowania wiązki radarowej,
- stała dielektryczna oraz przestrzenne rozłożenie cząstek, w jednostce mierzonej objętości, są jednorodne,
- zaniedbane zostaną efekty wielokrotnego rozpraszania.

Gdy powyższe warunki są niespełnione, współczynnik odbiciowości radarowej zastępuje się ekwiwalentnym współczynnikiem odbiciowości.

Podążając za równaniem (4.24), odbiciowość skuteczną Z_e – w przypadku obiektów meteorologicznych o mieszanej strukturze lub chmury z kulistymi kropelkami wody, znacznie mniejszymi od długości fali i uwzględniając wzór (4.23) – można wyrazić zależnością:

$$Z_e = \frac{1024 \ln 2 \lambda^2 P_r R^2}{\pi^3 c P_t G^2 L_r \theta^2 \tau |K|^2} = C P_r R^2 \quad (4.25)$$

gdzie:

Z_e – odbiciowość skuteczna [m^6/m^3];

λ – długość fali [m];

P_r – moc odbierana [W];

R – odległość do obiektu [m];

c – prędkość fal radiowych = 3×10^8 [m/s];

P_t – moc nadajnika w impulsie [W];

G – zysk anteny [liczba niemianowana];

L_r – współczynnik strat w falowodzie [0;1], na ogół przyjmowany za 1;

θ – szerokość wiązki (symetrycznej) [radiany];

τ – czas trwania impulsu [s];

$|K|^2$ – współczynnik uwzględniający stan skupienia, dla wody $\sim 0,93$;

C – stała radarowa.

W meteorologii radarowej przyjęło się wyrażać Z_e w [mm^6/m^3], λ w [cm], θ w [$^\circ$], τ w [μs], a R w [km], zatem zachodzi potrzeba wprowadzenia odpowiednich współczynników liczbowych. Po zamianie otrzymujemy:

$$Z_e = \frac{3,28 \cdot 10^{29} 1024 \ln 2 \lambda^2 P_r R^2}{\pi^3 c P_t G^2 L_r \theta^2 \tau |K|^2} = C_1 P_r R^2 \quad (4.26)$$

gdzie: Z_e wyrażono w [mm^6/m^3], λ w [cm], θ w [$^\circ$], τ w [μs], a R w [km], więc inna jest wartość stałej C_1 :

$$C_1 = \frac{3,28 \cdot 1024 \ln 2 \cdot 10^{29} \lambda^2}{\pi^3 c P_t G^2 L_r \theta^2 \tau |K|^2} = \frac{2.5 \cdot 10^{22} \lambda^2}{P_t G^2 L_r \theta^2 \tau |K|^2} \quad (4.27)$$

Przekształcając wzór (4.26) otrzymujemy zależność określającą najprostszą postać stałej radarowej. Do jej wyrażenia zwykle jednak stosuje się skalę logarytmiczną i odbiciowość wyrażaną w [dBZ]. Podając współczynnik odbiciowości radarowej w decybelach [dBZ] i stosując przeliczenie: $Z(\text{dBZ}) = 10 \log Z$, równanie (4.26) po zlogarytmowaniu i przemnożeniu przez 10 przyjmuje postać:

$$10 \log Z_e = 10 \log C_1 + 10 \log P_r + 20 \log R = C_2 + 10 \log P_r + 20 \log R \quad (4.28)$$

gdzie stała radarowa C_2 jest w [dB], a wówczas możemy je zapisać jako:

$$10 \log Z_e = C_2 + 10 \log P_r + 20 \log R \quad (4.29)$$

Otrzymany wzór (4.29) określa odbiciowość efektywną [Rinehart 2004].

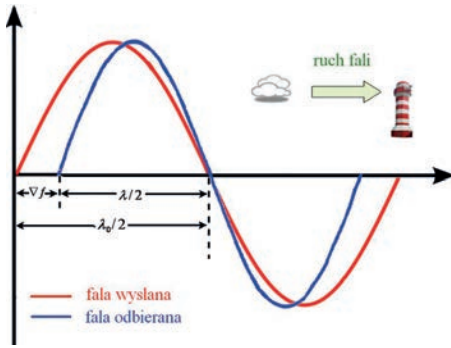
4.2.3. Radarowy pomiar wiatru

Atmosfera jest w nieustannym ruchu zarówno pionowym, jak i poziomym. Poziomy ruch powietrza to wiatr. Znajomość kierunku i prędkości wiatru to jedna z fundamentalnych informacji meteorologicznych. Standardowe pomiary kierunku i prędkość wiatru, jak wszystkie standardowe pomiary w meteorologii, są ograniczone do miejsca, w którym się je wykonuje. Dokonując pomiaru stanu atmosfery z wykorzystaniem radarów dopplerowskich, pozyskujemy dodatkowe dane o obiektach meteorologicznych.

W przypadku radarowego pomiaru wiatru określa się zmiany położenia hydrometeorów, będących w ciągłym ruchu, w stosunku do obserwatora (radaru) i względem siebie.

Teledetekcyjne metody wyznaczania parametrów pola *wiatr* bazują głównie na wyznaczeniu dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości emitowanego sygnału (rys. 4.2) powodowanego ruchem cząstek chmurowych.

Z technicznego punktu widzenia pomiar prędkości dokonywany jest na podstawie analizy częstotliwości sygnału wysłanego i odebranego (od tego samego obiektu). Wykorzystuje się fakt, że częstotliwość odbieranego sygnału od poruszających się struktur jest większa niż częstotliwość sygnału wysyłanego w przypadku, gdy



Rys. 4.2. Zmiana częstotliwości fali elektromagnetycznej wywołanej zjawiskiem Dopplera

obiekt zbliża się do radaru i mniejsza, gdy oddala się (rys. 4.2). Jest to typowy przykład występowania tzw. efektu Dopplera w odniesieniu do fal elektromagnetycznych.

Zmianę częstotliwości fali elektromagnetycznej powracającej w stosunku do fali pierwotnej (wyemitowanej) nazywamy przesunięciem dopplerowskim; częstotliwością dopplerowską lub częstotliwością Dopplera (Δf). Jest ona wyrażana zależnością:

$$\Delta f = \frac{2V_r}{\lambda} f_o \quad (4.30)$$

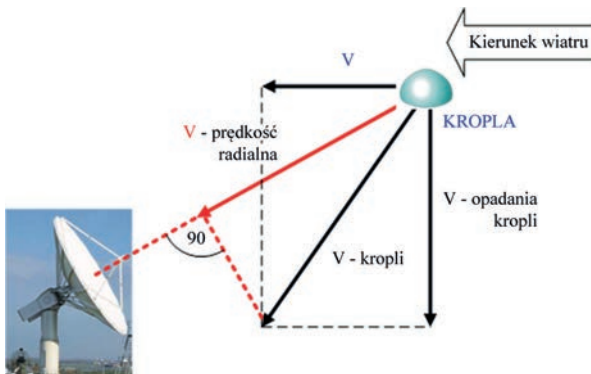
gdzie:

f_o – częstotliwość emitowanego impulsu w [Hz],

λ – długość fali w [m],

V_r – składowa prędkości wiatru wzdłuż osi wiązki wyemitowanej fali w [m/s].

Rejestrowana przez radar zmiana częstotliwości sygnału powracającego spowodowana efektem Dopplera ma wartość rzędu kilkaset Hz, co oznacza, że trzeba wykrywać bardzo małe zmiany częstotliwości (rzędu 10^{-7}) w stosunku do częstotliwości fali wyemitowanej ($\nabla f/f$).



Rys. 4.3. Zobrazowanie składowych prędkości radialnej (hydrometeorów) mierzonej przez radar

Zmierzona przez radar dopplerowski prędkość przemieszczania się cząstek hydrometeorów (w całym obiekcie) jest prędkością rzeczywistą, gdyż są one unoszone bez opóźnień. Przy określaniu częstotliwości dopplerowskiej dla całego obiektu pojawia się problem maksymalnego przesunięcia dopplerowskiego, jakie jest

w stanie zmierzyć radar oraz zasięgu jego wykrywania. Istotną rolę odgrywa w tym przypadku częstotliwość powtarzania impulsów, która wynosi nawet 1000 na sekundę.

Powiązanie częstotliwości dopplerowskiej z maksymalnie możliwym do wyznaczenia przesunięciem Δf_{max} określa zależność [Rinehart 2004]:

$$\Delta f_{max} = \frac{PRF}{2} \quad (4.31)$$

gdzie PRF (*Pulse Repetition Frequency*) to częstotliwość powtarzania impulsu (przebywającego drogę od radaru do celu i z powrotem). Z kolei maksymalna, jednoznacznie określana prędkość radialna (możliwa do wyznaczenia) dla danej długości fali i PRF powiązana jest z ograniczeniem na maksymalnie możliwą do zmierzenia prędkość ruchu obiektu:

$$V_{max} = \pm \frac{\lambda \cdot PRF}{4} \quad (4.32)$$

Chcąc zwiększyć maksymalnie możliwą do zmierzenia prędkość obiektu poprzez częste wysyłanie impulsów radarowych (zwiększenie PRF), należy pamiętać o tym, że związane jest to ze zmniejszeniem zasięgu radaru, ponieważ:

$$PRF = \frac{c}{2 \cdot R_{max}} \quad (4.33)$$

Ogólny maksymalny jednoznaczny zasięg dla danej wartości PRF (na podstawie równania 4.33) opisuje się równaniem:

$$R_{max} = \frac{c}{2 \cdot PRF} \quad (4.34)$$

z którego wynika, że zwiększenie częstotliwości powtarzania powoduje zmniejszenie maksymalnego jednoznacznego zasięgu.

Gdyby odbiornik radarowy odbierał sygnały z odległości R_1 większej niż R_{max} , to przybywałyby one do radaru już po wysłaniu następnego impulsu przez nadajnik i zostałyby zobrazowane jako znajdujące się w bardzo bliskiej odległości $R_1 - R_{max}$. Byłyby to echa tzw. drugiego omiatania (*second sweep echo*, *second trip echo*). Dlatego w radarach klasycznych dobiera się takie PRF , aby z odległości większej niż R_{max} nie przychodziły żadne echa pozwalające jednocześnie określać wszystkie możliwe do wystąpienia wartości częstotliwości dopplerowskiej (ruchu cząstek w obiekcie).

Czas powtarzania impulsów pojawia się w obu wzorach (4.32 i 4.34), ale we wzorze (4.32) jako czynnik istotny dla pozyskania maksymalnej zmierzonej prędkości radialnej, a we wzorze (4.34) na maksymalnie możliwy zasięg pomiaru, jako dzielnik ograniczający go (w momencie zwiększania PRF).

Po niezbędnych przekształceniach otrzymujemy wyrażenie na maksymalną prędkość V_{max} i maksymalny jednoznaczny zasięg R_{max} w postaci:

$$V_{max} \cdot R_{max} = \pm \frac{\lambda \cdot PRF}{4} \cdot \frac{c}{2 \cdot PRF} = \pm \frac{\lambda \cdot c}{8} \quad (4.35)$$

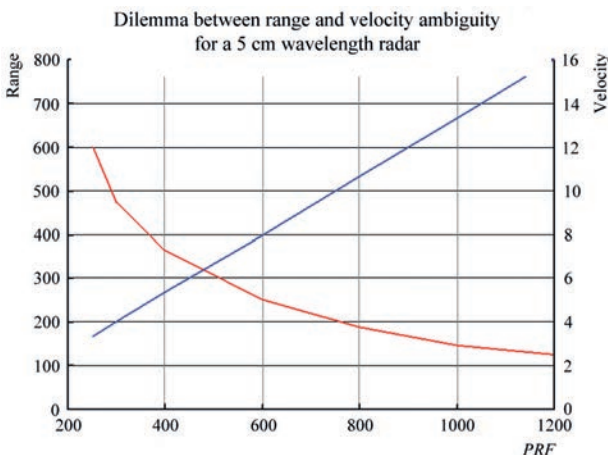
W ostatecznej wersji:

$$V_{max} \cdot R_{max} = \pm \frac{\lambda \cdot c}{8} = const. \quad (4.36)$$

Im większy zakres częstotliwości dopplerowskich (zakres prędkości cząstek rozpraszających) chcemy mierzyć, tym trzeba stosować wyższą częstotliwość powtarzania. Zwiększenie częstotliwości powtarzania oznacza jednak zmniejszenie maksymalnego jednoznacznego zasięgu, grożącego pojawieniem się ech drugiego omiata. Kompromis nie jest łatwy do znalezienia, zwykle wybiera się częstotliwość powtarzania dostatecznie niską, a niejednoznaczność częstotliwości dopplerowskiej rozwiązuje się pewnymi operacjami matematycznymi (tzw. *dealiasing*, *unfolding*), np. zakładając ciągłość przestrzenną pola prędkości wiatru.

Cheąc uzyskać możliwie duże wartości V_{max} i R_{max} , powinno się używać możliwie długich fal, co jest sprzeczne z uzyskaniem dobrej kierunkowości anteny (na dłuższych falach trudno jest uzyskać dobrą kierunkowość). W literaturze problem ten określany jest jako tzw. „dylemat Dopplera”.

Fizyczne ograniczenia oraz kompromis pomiędzy maksymalnym zasięgiem R_{max} , prędkością V_{max} a częstotliwością powtarzania impulsów PRF dla radarów pracujących z falą długości 5 cm prezentuje rys. 4.4.



Rys. 4.4. Interpretacja graficzna dylematu Dopplera [http://en.wikipedia.org/wiki/Weather_radar#Doppler_dilemma]

W praktyce często postępuje się tak, że wykonuje się oddzielnie pomiary klasyczne (tzw. skan opadowy po odbiciowości radarowej) ze stosunkowo niską częstotliwością powtarzania, a w trakcie odrębnego skanowania – pomiary dopplerowskie z wysoką częstotliwością powtarzania. Wtedy zasięg pomiarów dopplerowskich jest (np. 2 razy) mniejszy niż pomiarów klasycznych. Ponadto pomiary

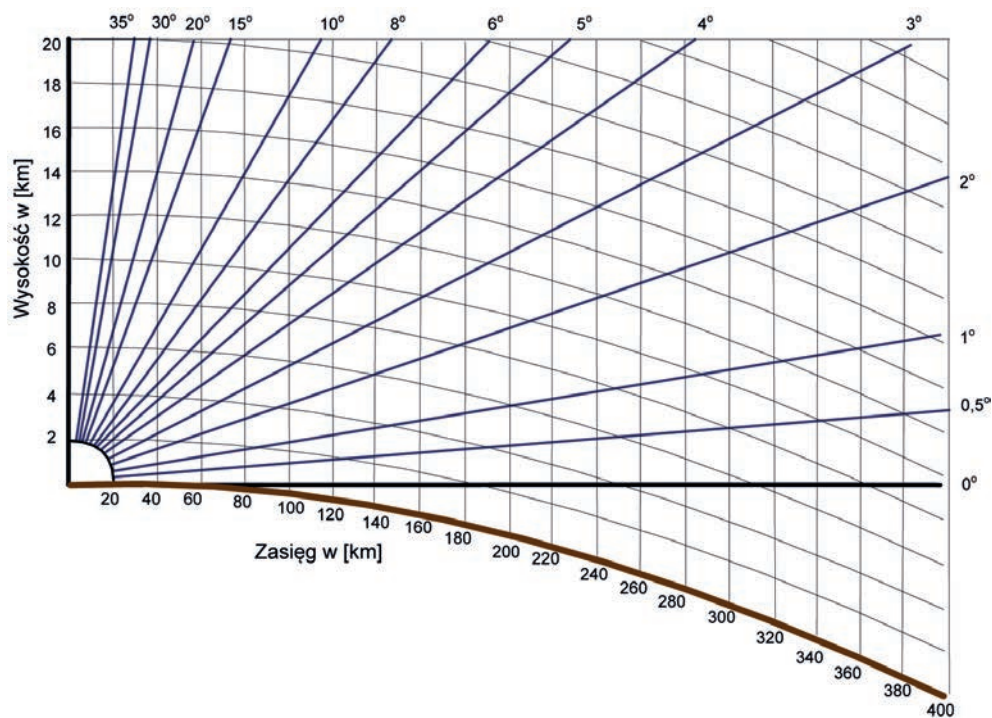
dopplerowskie wykonujemy ze zmienną częstotliwością powtarzania (np. w stosunku 3:4), aby uzyskać podwojenie zakresu jednoznacznie mierzonej prędkości. Jest to bardzo istotne w przypadku pomiaru prędkości w wyższych warstwach atmosfery [Moszkowicz, Tuszyńska 2003].

Dla każdego z tych skanowań ustawiane są inne parametry skanowania atmosfery, przy czym dla skanowania dopplerowskiego stosuje się wysoką i zmienną częstotliwość powtarzania, co umożliwia (techniką *dealiasingu*) podwojenie zakresu mierzonej prędkości.

4.3. Metodyka skanowania przestrzeni

Podstawowym zadaniem radaru w trakcie automatycznej pracy jest zbieranie danych oraz ich przetworzenie przez specjalistyczne oprogramowanie.

W trakcie skanowania poziomego atmosfery anteną radarową ustawia się na określonym kącie elewacji (kącie określonym w stosunku do stycznej do powierzchni Ziemi) i wykonuje obrót dla całego zakresu azymutów. Pozyskiwanie danych nastę-



Rys. 4.5. Geometria skanowania; rozkład wiązek radarowych (względem krzywizny Ziemi) w zakresie kątów elewacji od 0° do 35° dla przestrzeni; 20 km w pionie, 400 km w odległości [Battan 1973]

puje wówczas poprzez powolne przeszukiwanie atmosfery „raz przy razie” wzdłuż linii pochylej (prosta poprowadzona wzdłuż powierzchni odwróconego stożka). Przekrój ten nazywany jest także przekrojem stożkowym. Proces ten jest powtarzany dla ściśle określonych kątów elewacji. W ciągu jednego cyklu obserwacji radary wykonują (średnio) skanowania dla ok. 10 kątów podniesienia anteny dla określonego typu skanowania (opadowego lub wiatrowego). Proces ten reguluje odpowiednio skonstruowany harmonogram, który uruchamia kolejne procesy zachodzące w systemie podczas zbierania i przetwarzania danych. Wynikiem procesu zbierania danych są tzw. „surowe” (źródłowe) dane zapisane we współrzędnych sferycznych.

Najniższy rozsądny kąt elewacji uwzględniający szerokość wiązki radarowej to $0,5^\circ$. Wszystkie pozostałe kąty dobrane są tak, aby zapewnić optymalne pokrycie skanowanej przestrzeni (ok. 90% jej objętości). Prezentowany na rys. 4.5 diagram ilustruje zasięg pomiaru radarowego w zależności od odległości i wysokości względem krzywizny Ziemi (brązowa linia).

Zbrane dane zostają zapisane w układzie sferycznym, a następnie poddane procesom przetwarzania do układu dwuwymiarowego (kartezjańskiego) na produkty systemu.

5. System na bazie radaru MRŁ-5

5.1. Automatyczny System Radarowy

Po dziesięciu latach operacyjnej pracy radaru MRŁ-2 zaczęto myśleć o nowocześniejszym sprzęcie. Pod koniec eksploatacji podstawowy problem stanowił brak części zamiennych oraz trudności w pozyskiwaniu ich od dostawcy. Prawdopodobnie powodem było to, że urządzenie nie było produktem seryjnym, lecz budowanym na konkretne zamówienie.

W istniejącej wówczas sytuacji gospodarczej podjęto decyzję o zakupie radzieckiego radaru, ale o nowszej generacji, dla którego istniała możliwość pełnego zautomatyzowania. Wieża na budynku Zakładu Aerologii nie nadawała się już do zamontowania radaru z pełnym wyposażeniem. Na terenie zakładu rozpoczęto budowę nowej wieży radarowej (rys. 5.1b, 5.2) i prace programowe nad nowym systemem.



a)

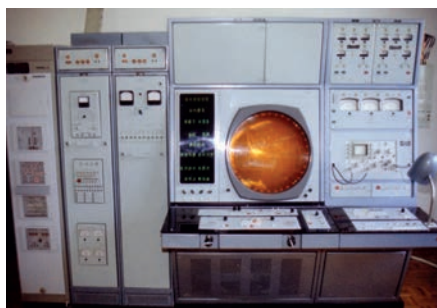
b)

Rys. 5.1. Budowa radaru MRŁ-5: a) radar MRŁ-5 oczekuje na zainstalowanie, b) fundamenty pod wieżę radarową

Spośród wielu koncepcji automatyzacji radarów typu MRŁ zdecydowanie najlepszą był system ASCOPRI (skrót pochodzi od nazwy w języku rosyjskim, co po przetłumaczeniu na język polski oznacza Automatyczny Kompleks Zbierania, Obróbki i Prezentacji Radarowej Informacji) opracowany w CAO w Moskwie, przystosowany do pracy z radarem MRŁ-5 (rys. 5.3). Jediną wadą tego systemu było oparcie jego automatyzacji na niepopularnych u nas minikomputerach serii SM (Systemy SM produkowane w Zakładach ERA jako klony amerykańskiego minikomputera PDP-11, eksportowane między innymi do ZSRR). Wykorzystując zainteresowanie strony radzieckiej zwiększaniem uniwersalności ASCOPRI oraz dużą popularność i dostępność w Polsce mikrokomputerów typu PC, postanowiono wspólnymi siłami Zakładu Radiometeorologii CAO i Zakładu Aerologii IMGW opracować nową wersję systemu.



Rys. 5.2.
Stacja radarowa
w Legionowie
wybudowana na
terenie Zakładu
Aerologii IMGW
(widok na wieżę
radarową)



Rys. 5.3. Urządzenie APOS (od lewej)
i konsola operatorska radaru MRŁ-5
(okrągły ekran to wskaźnik typu P),
po prawej stronie: wskaźniki stanu
technicznego radaru

Tworzony system informatyczny o nazwie Automatyczny System Radarowy (ASR) budowano na bazie radzieckiego systemu ASCOPRI, wykorzystując następujący sprzęt:

- dwukanałowy (kanał I – fala 3 cm, kanał II – 10 cm) radar meteorologiczny MRŁ-5, z przerobionymi blokami sterowania w celu zapewnienia bezkonfliktowej współpracy z systemem automatyzacji, umożliwiającym programowe sterowanie anteną radaru i kontrolę wszystkich istotnych parametrów pracy radaru,
- urządzenie pierwotnego przetwarzania sygnałów, czyli mikroprocesor meteorologiczny typu APOS (Aparatura Pierwotnej Obróbki Sygnału), próbujący sygnał echa co 250 m z kwantowaniem na 255 poziomów (zaferowany w zestawie z radarem przez producenta radaru), tj. blok sprzężenia sterującego radarem oraz równoległego interfejsu do sprzężenia z mikrokomputerem,
- komputer IBM/PC AT – mikrokomputer klasy PC z procesorem 80286, zegarem 12 MHz, koprocesorem arytmetycznym 80287, podstawową pamięcią RAM 640 KB rozszerzoną do 3,5 MB [sic], dwoma stacjami dysków twardej po 40 MB.

System, w wersji roboczej, przyjął początkowo nazwę SPIR (System Przetwarzania Informacji Radarowej) [Moszkowicz i in. 1989].

Podstawę systemu stanowiło oprogramowanie opracowane w latach 1989-1990. Wymagało jednak ono przeprogramowania. Praktycznie od nowa napisano moduły o charakterze technicznym: transmisja informacji, przetwarzania współrzędnych sferycznych do prostokątnych, zobrazowanie i archiwizacja. Natomiast program rozpoznawania obiektów meteorologicznych, przeniesiony ze starego systemu PSR, wymagał istotnych zmian jakościowych, ponieważ zmienił się charakter danych

wejściowych. W poprzednim systemie znajdowano odbiciowość maksymalną w elementach $10 \times 10 \times 2$ km, a nowy system wyliczał odbiciowość średnią w elementach 4×4 km, pobierając dane z określonej warstwy, której grubość mogła być ustalona. Projektując system, wykorzystano doświadczenia zebrane przez zespół Pracowni Radarowej Zakładu Aerologii IMGW, pozyskane w latach 80. podczas uruchamiania, wdrażania i eksploatacji PSR.

Przy współpracy Zakładu Aerologii IMGW z Centralnym Obserwatorium Aerologicznym (CAO) w Dołgoprudnym pod Moskwą opracowano oprogramowanie mikroprocesora meteorologicznego APOS do przetwarzania sygnału pierwotnego oraz jego podłączenie do komputera IBM/PC i radaru.

W 1991 r. uzupełniono system o opracowane programy techniczne:

- redukcji ech stałych i eliminacji zakłóceń (program PE_DEL),
- organizację roboczej kolejki map (program QUEUE),
- kontroli i aktualizacji danych meteorologicznych (program METEO).

Zmodyfikowano i dostosowano do nowych potrzeb programy:

- zarządzający pracą systemu (program MASTER),
- zarządzający pracą radaru i kontroli jego parametrów (program OBSERV),
- transformacji danych ze współrzędnych sferycznych do prostokątnych i uśredniania odbiciowości oraz zobrazowania wyników na ekranie monitora (program IMAGE),
- zapisu danych do archiwum i ich odczytu (program ARCHIV),
- rozpoznawania zjawisk meteorologicznych (program RECOGN),
- określania ruchu ech radarowych (program MOVEMENT),
- wydruku map rozpoznania (program MAPFAX5).

Powstałe oprogramowanie realizowało następujące zadania⁶:

- automatyczne sterowanie radarem i kontrolę pomiaru,
- przetwarzanie wstępne sygnału trójwymiarowego z układu sferycznego na dane w układzie kartezjańskim,
- przetwarzanie pośrednie – interpretacja odebranych sygnałów radarowych,
- przetwarzanie końcowe do postaci map i ich rozpowszechnianie.

W momencie zainstalowania radaru MRL-5 w Ośrodku Aerologii IMGW w Legionowie w czerwcu 1991 r. stało się możliwe prawie natychmiastowe uruchomienie i wdrożenie systemu do służby. Nowo opracowane lub poprawione programy wymagały obserwacji ich działania w służbie operacyjnej oraz wprowadzania ewentualnych dalszych poprawek, uzgodnień i uzupełnień [Moszkowicz i in. 1991].

W pierwszym okresie pracy systemu, pomimo że generował on mapy graficzne na ekranie monitora, do transmisji wyników pomiaru wykorzystywano telefaks.

⁶ Całą strukturę systemu opisano w sprawozdaniu z tematu CPBR 11.10.39 [Moszkowicz 1990]

Także tą drogą do Lotniskowego Biura Prognoz Warszawa-Okęcie przesyłano wydrukowane mapy. W związku z ograniczoną powierzchnią papieru (format A4), na której drukowano mapę faksową, należało tę rozdzielczość „pogorszyć” do takiej, jaka daje się przedstawić we wskazanym formacie. Dlatego też wydruk mapy ograniczono do rozdzielczości elementów 8×8 km, a zasięg – do 352×352 km (zamiast 400×400 km obrazowanych na ekranie).

Informacje na mapie zawierały niewiele szczegółów (rys. 5.4 i rys. 5.5), były mało czytelne. Przesyłanie mapek faksem na Okęcie standardowo wykonywano co 30 min w dzień, a w nocy – co godzinę.

Nowo powstały system otrzymał nazwę Automatyczny Meteorologiczny System Radarowy (AMSR). Był w pełni zautomatyzowany, tylko dane aerologiczne wymagały wprowadzania przez operatora dwa razy na dobę (zgodnie z cyklem pomiarów aerologicznych) na potrzeby programu rozpoznawania zjawisk.



Rys. 5.4. Wydruk rozpoznania radarowego z dnia 21.08.1992 r. – na potrzeby transmisji faksem

I N S T R U K C J A

do radarowych map pogody odbieranych faksem

Mapa obejmuje obszar ok. 300x300 km. Lokalizację przestrzenną (położenie geograficzne) wyznaczają drukowane położenia miast, w których zlokalizowane są stacje synoptyczne. W miejscu położenia miasta drukowany jest znak #, a po prawej stronie trzyliterowy skrót nazwy miejscowości (por. wydruk wzorcowy). Uwaga: jeżeli w danym miejscu występują zjawiska to położenie miasta nie jest drukowane. Dokładniejszą lokalizację umożliwia załączona folia z naniesionymi położeniami większych miast i głównych dróg.

Rozpoznane zjawiska podawane są dla kwadracików o wymiarach 8x8 km i drukowane są w postaci 3 znaków. Pierwszy od lewej jest wysokością wierzchołka chmur podaną w kilometrach - cyfry od 0 do 9 oraz A=10km, B=11km, C=12km itd. Drugi jest znakiem zjawiska. Trzeci zawiera kod intensywności opadu na powierzchni ziemi, odpowiednio: znak pusty - brak opadu, 1 - bardzo słaby, 2 - słaby, 3 - umiarkowany, 4 - silny, 5 - bardzo silny, 6 - ekstra silny, 7 - super ekstra

a	grad	
7	burza	
6	śnieg przelotny	Tabela
5	śnieg z deszczem przelotny	
4	deszcz przelotny	znaków
3	chmura konwekcyjna	
2	śnieg jednostajny	zjawisk
1	śnieg z deszczem jednostajny	
=	deszcz jednostajny	
=	chmura warstwowa	

Uwagi:

* drukowany czas obserwacji podawany jest w GMT, należy zatem przeliczyć go na czas urzędowy tj. dodać do niego 1 godzinę (przy obowiązującym czasie letnim - 2 godziny)

* kierunek ruchu ech radarowych liczony jest od kierunku północnego zgodnie z ruchem wskazówek zegara

Rys. 5.5. Instrukcja dla użytkownika informacji radarowych pozyskiwanych drogą faksową

5.2. Automatyczny Meteorologiczny System Radarowy – architektura systemu

System AMSR nie ograniczał się do automatyzacji standardowej, ale rozwiązywał również kwestie udostępniania wyników użytkownikom zarówno lokalnym, jak i odległym. Docelowy schemat blokowy systemu AMSR przedstawiono na rys. 5.6. Po stronie stacji radarowej (powyżej przerywanej linii poziomej) system składał się z następujących elementów [Ciach i in. 1991; Dziewit 1993]:

- (1) radaru MRŁ-5,
- (2) urządzenia APOS sterowania radarem i wstępnego przetwarzania sygnału,
- (3) komputera PC do obsługi radaru, wyposażonego w specjalną kartę interfejsową, i włączonego do sieci NOVELL,
- (4) składnicy plików (serwera) sieci NOVELL,

- (5) lokalnego terminala użytkownika (PC w sieci),
- (6) komputera komunikacyjnego (w sieci),
- (7) modemu połączenia sieci w Legionowie z siecią w Lotniskowym Biurze Prognoz Warszawa-Okęcie,
- (8) modemu transmisji do telegazety,
- (9) telefaksu,
- (10) węzła łączności X-25.

Po stronie użytkowników oddalonych od stacji radarowej do systemu były dołączone:

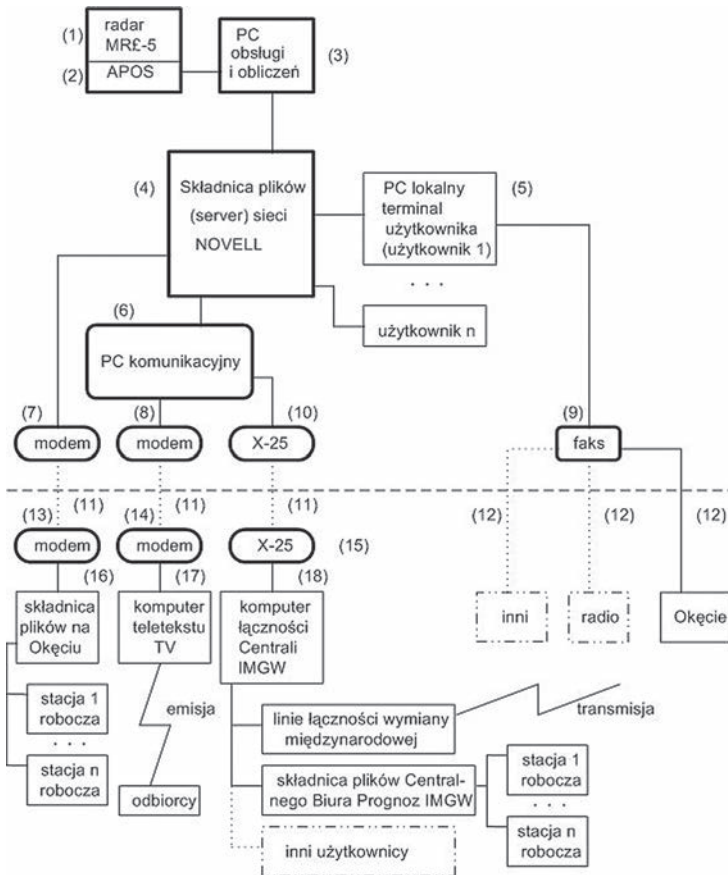
- (11) dzierżawione linie telefoniczne,
- (12) komutowane linie telefoniczne,
- (13) modem w Lotniskowym Biurze Prognoz Warszawa-Okęcie,
- (14) modem telegazety,
- (15) węzeł sieci X-25 w Centrali IMGW Warszawa-Bielany,
- (16) sieć komputerowa w Lotniskowym Biurze Prognoz zawierająca składnicę plików i terminale,
- (17) komputer telegazety,
- (18) komputer łączności w Centrali IMGW (po połączeniu sieci X-25).

Urządzenie pośredniczące między radarem meteorologicznym MRŁ-5 (1) a siecią komputerów to urządzenie pierwotnego przetwarzania sygnałów radaru APOS (2). Za jego pośrednictwem program komputerowy zadawał określony harmonogram i parametry pracy dla radaru. W trakcie obserwacji próbował i uśredniał sygnały odebrane przez radar. Uśredniony sygnał odbiornika radaru w postaci cyfrowej transmitowano do komputera obsługi i obliczeń (3). Z tego komputera, włączonego do sieci komputerowej NOVELL, zarządzano całością pracy systemu oraz sprzężonego z nim radaru za pomocą specjalnej karty komputerowej (interfejsu) i kabla urządzenia APOS.

W systemie AMSR w Legionowie zastosowano następującą strategię skanowania:

- obserwacje wykonywano co 10 min przez całą dobę,
- skan zawierał 13 kątów elewacji (0,3; 0,5; 0,8; 1,3; 2,0; 2,9; 4,0; 5,5; 7,5; 10,2; 15,0; 24,0; 37,5 stopnia) – w pierwszej wersji,
- czas pojedynczego obrotu anteny dla pełnego zakresu azymutów trwał ok. 15 s, a cały skan (uwzględniając czas potrzebny na ustawienie poszczególnych kątów elewacji) ok. 4,5 min,
- bramki uśredniania sygnału (tzw. bramki pierwotne) to: 1 km w odległości i 1° w azymucie.

Dla każdej bramki pobierano 4 próbki w odległości i 8 w azymucie. Łącznie dawało to 32 praktycznie niezależnych próbek. Informacje pozyskiwano do 240 km od radaru.



Rys. 5.6. Architektura Automatyycznego Meteorologicznego Systemu Radarowego

W efekcie dla jednego pełnego obrotu anteny otrzymywano $360 \times 240 = 86\,400$ elementów (bramek pierwotnych) ze zmierzonym sygnałem (odbiciowością). Łącznie dla 13 kątów elewacji było to $13 \times 86\,400 = 1\,123\,200$ elementów. W wyniku ograniczenia informacji w pionie do wysokości 20 km efektywna ilość próbek była zmniejszona do ok. 760 000 elementów.

Po zakończeniu procesu skanowania z zebranych informacji tworzone tzw. „volume” (plik objętościowy) – wartości odbiciowości zapisane w układzie współrzędnych sferycznych (odległość, azymut, kąt podniesienia). Plik ten podlegał procedurze korekcyjnej – eliminacji ech stałych według danych zarejestrowanych przy bezchmurnej pogodzie.

Pod koniec 1991 r. uruchomiono transmisję danych przez modem telefoniczny; dzięki zestawieniu połączenia telefonicznego (łącza dzierżawionego z Lotniskowym Biurem Prognoz Warszawa-Okęcie), co spowodowało, że nareszcie informacje docierały do użytkowników prawie bez opóźnienia.

Dane i podstawowe programy systemu były przechowywane na dysku, składnicy plików (4), którą poprzez modem (7) i linię telefoniczną (o szybkości 9600 b/s) połączono ze składnicą plików komputerowej sieci NOVELL w Lotniskowym Biurze Prognoz Warszawa-Okęcie. Pojawienie się nowej porcji danych uruchamiało program transmisji danych ze składnicy plików (4) za pośrednictwem modemu (7) i dzierżawionej linii telefonicznej do sieci komputerowej NOVELL w Lotniskowym Biurze Prognoz Warszawa-Okęcie, gdzie były rejestrowane w miejscowej składnicy plików. Lotniskowe Biuro Prognoz Warszawa-Okęcie miało specjalistyczne oprogramowanie do zobrazowania informacji radarowej na własnym komputerze, który był włączony do sieci lokalnej.

Na stacji radarowej w Legionowie dane radarowe mogły być zobrazowywane na każdym komputerze podłączonym do sieci lokalnej.

Oddzielny komputer telekomunikacyjny (6), włączony do sieci, transmitował dane modemem i inną dzierżawioną linią telefoniczną do komputera telegazety (Warszawa, ul. Woronicza), skąd transmitowano je jako strony telegazety na cały kraj (I i II Program TVP). Specjalny sposób kodowania tych danych zabezpieczał je przed odczytem przez osoby niepowołane (patrz rozdz. 4.5).

Nadal pozostawiono możliwość transmisji map drukowanych za pomocą telefaksu (9) do użytkowników potrzebujących tylko sporadycznie uogólnionej informacji radarowej. Docelowo Centralę IMGW połączono z systemem za pomocą protokołu X-25 (10).

5.3. Oprogramowanie AMSR

Wymienione w rozdz. 4.1 programy systemu zostały napisane głównie w języku C.

5.3.1. MENU główne systemu

Zarządzaniem i czuwaniem nad całością oprogramowania, sterowaniem systemem obserwacji i przetwarzania w trybie pracy operacyjnej lub terminala użytkownika zajmował się program MASTER. Główne MENU systemu w trybie pracy operacyjnej (obsługi) prezentuje rys. 5.7, a rys. 5.8 – menu wyświetlane na terminalu użytkownika.

W przypadku, gdy system znajdował się w trybie wykonywania obserwacji, to plik konfiguracyjny podawał programowi dane dotyczące harmonogramu obserwacji, archiwizacji, zobrazowania i transmisji, takie jak:

- moment startu obserwacji,
- interwał powtarzania obserwacji (standardowo przyjęto 10 min, operator mógł zmienić ten przedział na 30 lub 60 min),

aktualny czas: 1994.01.21 11:57:25 FUNKCJE SYSTEMU: A = ZALACZENIE automatycznej pracy programu ^F 1 = JEDEN cykl obserwacji i pełnej archiwizacji F 2 = WYBOR z archiwum pełnych OBSERWACJI F 3 = WYBOR z archiwum podstawowych MAP F 4 = WYSWIETLENIE aktualnych map na ekranie F 5 = WYDRUK mapki rozpoznawania F 6 = ZMIANA częstości automatycznego powtarzania F 7 = ZMIANA parametrów METEO F 8 = Wydruk mapki sum opadów F 9 = Wyświetlenie komunikatów systemu F10 = Funkcje Specjalne Alt X = Koniec pracy systemu	PARAMETRY SYSTEMU: Konfiguracja: C:\MRL\CONFIG Rezim pracy OBSLUGA RADARU kanal 1 (3cm) Automatyczna praca: Obserwacje co 10 min Archiw MAP co 10 min Archiw VOL co 60 min Obszar roboczy: C:\WRK Archiwum VOLumow: H:\mrl5\V1211\VOL 156.9 MB miejsca
--	---

Rys. 5.7. MENU główne systemu AMSR wyświetlane na monitorze w trybie obsługi funkcji dostępnych dla operatora

- interwał archiwizowania map (minuty),
- interwał aktualizacji parametrów meteorologicznych (godziny),
- rodzaj mapy wyświetlanej jako pierwszej po wejściu do programu zobrazowania.

W momencie, gdy czas odpowiadał momentowi startu lub powtarzania obserwacji, przerywał działanie programów podrzędnych i przechodził do wykonania cyklu obserwacyjnego. Na cykl obserwacyjny składały się:

- przegląd przestrzeni (program OBSERV),
- eliminacja ech stałych (PE_DEL),
- transformacja współrzędnych (TRANZ),
- eliminacja ech anomalnych (ELISUP),
- rozpoznawanie zjawisk (RECOGN),
- obliczanie ruchu ech (MOVEMENT),
- tworzenie kolejki map (QUEUE),

Cykl obserwacyjny kończył się zobrazowaniem wyników (IMAGE).

W trybie „terminal użytkownika” (rys. 5.8) włączenie pracy automatycznej oznacza, że w momencie pojawienia się nowych danych, na dysku składnicy plików lub na dysku użytkownika, program przerwie aktualną pracę, zapisze na ścieżkę roboczą następną porcję danych i powróci do stanu poprzedniego, ale z nowymi danymi.

aktualny czas: 1994.01.21 11:57:25	PARAMETRY SYSTEMU:
FUNKCJE SYSTEMU:	Konfiguracja: \\mrl-uz\CONFIG
A = ZALACZENIE automatycznej pracy programu	Rezim pracy TERMINAL UZYTKOWNIKA
F 1 = Pobranie AKTUALNYCH danych radarowych	
F 2 = WYBOR z archiwum pełnych OBSERWACJI	
F 3 = WYBOR z archiwum podstawowych MAP	
F 4 = WYSWIETLENIE aktualnych map na ekranie	
F 5 = WYDRUK mapki rozpoznawania	Obszar roboczy: C:\WRK
Alt X = Koniec pracy systemu	Archiwum VOLUMow: H:\mrl5\Z1211\VOL 156.9 MB miejsca

Rys. 5.8. Główne MENU systemu AMSR w trybie „terminal użytkownika”

Zarówno w TRYBIE OBSŁUGI, jak i w trybie TERMINAL UŻYTKOWNIKA możliwe było pobieranie danych z archiwum: w postaci zarchiwizowanych plików pełnych (VOLUME.WRK) lub zarchiwizowanych map.

5.3.2. Obsługa przestrzeni

Program „obsługi przestrzeni” (pomiaru stanu atmosfery – program OBSERV) realizowano za pośrednictwem urządzenia APOS w cyklu 10-minutowym, przy zakończonej automatycznej pracy systemu. Dane wykorzystywane do sterowania pracą urządzenia APOS, a więc pośrednio pracą radaru, zawierały następujące informacje:

- numer kanału radaru (1 – fala 3 cm, 2 – fala 10 cm),
- czas trwania impulsu sondującego (1 lub 2 μ s),
- radialna rozdzielczość uśredniania sygnału w km (standardowo – 1 km),
- odległość standaryzowania odbiciowości w [km],
- potencjał radaru w [dB],
- liczba uśrednianych elementów wzdłuż promienia,
- liczba uśrednianych podbloków (kątów azymutu),
- minimalna wysokość obliczania odbiciowości w [km],
- maksymalna wysokość obliczania odbiciowości w [km],
- próg odcięcia małych sygnałów w [dB],
- maksymalna odległość obserwacji ech stałych w [km],
- poprawka na potencjał przy obserwacji ech stałych

oraz liczbę kątów elewacji i ich wartości, które antena musiała wykonać, by zrealizować całość skanowania przestrzeni. Standardowo wykonywano sekwencję 14 kątów elewacji, co pozwalało zrealizować program skanowania przestrzeni w ciągu ok. 4 min. Był to pewien kompromis między dokładnością a czasem skanowania przestrzeni.

Zebrane dane typu 3D zapisywano w pliku VOLUME.WRK, a dane opisowe (stacja, data i godzina, kanał radaru i in.) w pliku HEADER.WRK.

5.3.3. Główne programy AMSR do przetwarzania danych

Transformacja współrzędnych (program TRANZ)

Standardowe mapy tworzone z rozdzielczością 4×4 km (dla obszaru 400×400 km) i 2 km (200×200 km). Był to proces bardzo czasochłonny, gdyż przy standardowej konfiguracji obserwacji należało przekształcić 360 (kątowność azymutu) $\times 14$ (kątowność elewacji) $\times 240$ (komórek uśredniania po odległości) = $12\,009\,600$ elementów na 7 (map) $\times 100 \times 100$ (elementów prostokątnych) = $70\,000$ elementów. Program realizujący ten proces wymagał znacznej pamięci, dlatego poświęcono maksimum uwagi optymalizacji jego działania.

Służył do przekształcania danych ze współrzędnych sferycznych (odległość, azymut, kąt elewacji) w celu utworzenia map radarowych w układzie kartezjańskim.

Rozpoznawanie zjawisk (program RECOGN)

Pomimo że jedynym parametrem mierzonym wówczas przez klasyczny (nie doplerowski) radar meteorologiczny była odbiciowość opadu (chmury), istotne zawsze było, aby podawana informacja była we właściwy sposób odebrana nie tylko przez meteorologów, lecz także użytkowników niebędących specjalistami w tej dziedzinie.

Biorąc pod uwagę, że pomiary radarowe są trójwymiarowe w przestrzeni i często powtarzane w czasie, jednym z zadań meteorologii radarowej była i jest możliwość rozpoznawania zjawisk meteorologicznych związanych z opadami, takich jak: burze, ulewy, szkwały i in.

Zadanie to w różny sposób realizowano w różnych systemach i służbach. Rozpoznawanie zjawisk za pomocą radaru MRL-5 w Legionowie wykorzystywało oryginalne algorytmy statystycznego rozpoznawania obiektów, opracowane w Ośrodku Aerologii w latach 1984-1990. Już w 1982 r. znaleziono funkcję dyskryminacyjną burz i stanu skupienia opadów [Moszkowicz 1982]. Do utworzenia nowych procedur dyskryminacyjnych wykorzystano archiwum danych radarowych zgromadzonych w trakcie regularnie wykonywanych obserwacji w służbie. Nowe funkcje opracowano na podstawie danych historycznych, sklasyfikowanych np. ręcznie, lub danych ze stacji synoptycznych. Na podstawie tzw. próbki uczącej dobierano parametry funkcji tak, by uzyskać jak najlepsze rozdzielenie (np. dwóch) klas, a następnie sprawdzano na próbce niezależnej (tzw. weryfikacyjnej), czy rozdzielenie to zachodzi i z jakimi błędami.

Funkcja dyskryminacji stanu skupienia pozostała w AMSR niezmieniona, jako że bazowała na meteorologicznych danych poza radarowych. Wykorzystywano do

tego celu temperaturę powietrza (mierzoną w klatce meteo) oraz wysokość izotermi 0°C z sondażu aerologicznego.

Wprowadzanie do pliku konfiguracyjnego (2 razy na dobę) pozaradarowych danych meteorologicznych, potrzebnych do programu rozpoznawania zjawisk, było jedynym, nieautomatyzowanym elementem systemu.

Funkcja dyskryminacji burz była poprawiana w PSR, a następnie w roku 1991, po zebraniu nowych danych w systemie AMSR [Moszkowicz 1991]. Umożliwiła ona rozdzielenie burz od opadów z prawdopodobieństwem ok. 92%.

Funkcję dyskryminacji gradu zaczerpnięto z radzieckich i szwajcarskich danych literaturowych, bowiem ze względu na małą częstość występowania zjawiska nie udało się zebrać reprezentatywnej próbki uczącej. Należy wspomnieć, że grad i burza były wydzielane na podstawie analizy pionowego profilu odbiciowości – ogólnie im wyższy jest wierzchołek chmury konwekcyjnej i większa w niej odbiciowość oraz wyżej położone maksimum tej odbiciowości, tym groźniejsze jest zjawisko związane z tą chmurą. Można przyjąć w przybliżeniu, że gdy odbiciowość maksymalna w danym pikselu przekracza 40 dBZ, a wierzchołek chmury wysokość 5 km, jest duża szansa, że mamy do czynienia z burzą (a przynajmniej z silną konwekcją).

Funkcję dyskryminacji ech na konwekcyjne i warstwowe uzyskano drogą kolejnych przybliżeń, stosując podział „bez nauczyciela”, korygowany następnie przez „nauczyciela”, i starając się otrzymać obraz ech możliwie zgodny z tym, co mógłby uzyskać doświadczony operator. W celu pozyskania wzorca (zbioru uczącego) wykonano bardzo pracochłonny podział, piksel po pikselu, 112 wybranych sytuacji na echa warstwowe i konwekcyjne [Moszkowicz i in. 1991]. W tym wypadku zdano się na operatora, chociaż nie zawsze łatwo było zdecydować, gdzie kończy się chmura warstwowa, a zaczyna konwekcyjna (dla sytuacji mieszanych ech).

Celem tego podziału było wyznaczenie, przynajmniej w przybliżeniu, rejonów komórek konwekcyjnych (również takich, które są wbudowane w rozległe strefy chmur warstwowych), ponieważ z komórkami konwekcyjnymi są związane bardziej intensywne procesy, mogące stwarzać zagrożenia meteorologiczne.

W systemie AMSR w Legionowie rozpoznawanie zjawisk zachodziło w następujących kolejnych krokach:

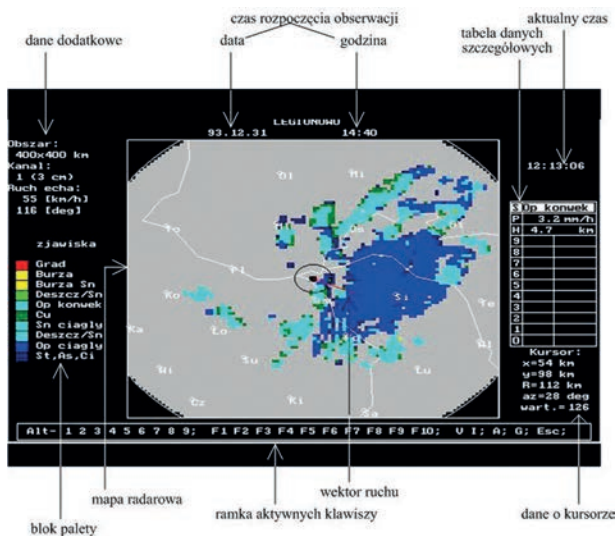
- podział ech powstałych od obiektów na: konwekcyjne i warstwowe,
- oddzielenie burz od wszystkich innych zjawisk,
- wydzielenie gradu z klasy burz,
- wygładzenie pola ech konwekcyjnych,
- podział ech konwekcyjnych na opadowe i bezopadowe,
- podział ech warstwowych na opadowe i bezopadowe,
- rozpoznanie stanu skupienia opadów (śnieg, śnieg z deszczem, deszcz) i wyliczenie natężeń opadów.

Wizualizacja wyników AMSR – map radarowych

Program prezentacji danych (program IMAGE) na ekranie komputera umożliwiał zobrazowanie: map odbiciowości na różnych wysokościach (CAPPI), mapy wysokości wierzchołków, mapy zjawisk, mapy natężeń opadów (rys. 5.4).

Główna część mapy, prezentująca dane radarowe (rys. 5.9), obejmuje:

- mapę danych radarowych wybraną do wyświetlenia,
- wektor „ruchu godzinny”, tj. czerwony odcinek odpowiadający przesunięciu układu opadowego w ciągu godziny,
- podkład geograficzny,
- czarny okrąg o średnicy 20 km, odpowiadający obszarowi ograniczonej wiarygodności danych ze względu na konieczność eliminacji ech stałych,
- w prawym dolnym rogu informacje odnoszące się do położenia kursora na mapie; zawierają jego położenie liczone względem radaru w Legionowie, we współrzędnych prostokątnych – X i Y oraz biegunowych – odległość i azymut oraz zawartość bajtową danego punktu mapy.



Rys. 5.9. Przykładowa mapa radarowa wraz z opisem pól

W obrębie mapy czarne obszary to miejsca, z których nie ma danych, a obszary szare – brak zjawisk. W tabeli obok mapy (po prawej stronie) wyświetlano wartości parametrów określających pozycje kursora.

Pole „bloku palety” to opis zawartości mapy oraz palety kolorów z przypisanymi zjawiskami. Jest to wykaz wszystkich rozróżnianych typów zjawisk. W przypadku opadów podawano granice przedziałów natężeń opadów w [mm/h], rozróżniane kolorami, dla wysokości wierzchołków – granice przedziałów to wysokości w [km]. Zestaw kolorów do prezentacji mapy mógł być dowolnie dobierany. Jednak

doświadczenie pokazało, że na potrzeby interpretacji danych najwygodniej i najlepiej jest posługiwać się stałą paletą barw.

Pole nad mapą to czas rozpoczęcia obserwacji – data i godzina oraz nazwa miejscowości stacji radarowej.

Symbole literowe po prawej stronie tabeli umożliwiały prezentowanie (na życzenie użytkownika) następujących map: S – zjawisk, P – natężenia opadów, H – wysokości wierzchołków ech radarowych. Natomiast symbole w dolnej belce pozwalały na wyświetlenie odbiciowości na wysokości n kilometrów ($n = 1 \dots 9$), A – animację serii map, V – przekrój pionowy na kierunku kursora.

Do obliczania ruchu i wykonania animacji obrazów na ekranie wykorzystywany był program tworzenia kolejki map (QUEUE) na dysku. Pozwalał on na wyświetlanie sekwencji map z obserwacji poprzedzających aktualną, a zapisanych na ścieżce kolejki.

W polu danych w lewym górnym rogu podawano: wielkość obszaru obejmowanego przez mapę, numer kanału pracy radaru (długość fali radarowej) oraz dane o ruchu echa – prędkość i azymut liczony od północy geograficznej zgodnie z ruchem wskazówek zegara.

Ramka „aktywnych klawiszy” przypominała, które klawisze są dostępne w programie:

- <Fn> służyły do zmiany podkładu geograficznego,
- <A> do uruchamiania animacji mapy aktualnie wyświetlanej,
- <G> podaje techniczne i meteorologiczne informacje o wyświetlanej obserwacji,
- <J> powoduje zmianę języka wyświetlanych komentarzy: polski lub angielski,
- <Esc> to zakończenie działania programu.

Program wizualizacji danych był uniwersalny dla wszystkich systemów prezentacji danych radarowych.

Eliminacja ech stałych i anomalnej propagacji (programy: PE_DEL i ELISUP)

Radary typu MRŁ nie miały możliwości automatycznego usuwania ech stałych. W związku z tym były one usuwane w podobny sposób, jak w systemie PSR.

W systemie AMSR realizował to program PE_DEL. W trakcie eliminacji ech stałych od aktualnych wartości danych przestrzennych odejmowano wartości z pliku przestrzennego ech stałych. Praktyka wykazała, że program działa bardzo skutecznie na kanale 1 (fala 3 cm), źle zaś na kanale 2 (10 cm). Był to jeden z powodów tego, że praca operacyjna prowadzona była z wykorzystaniem tylko kanału 1.

Program eliminacji pasożytniczych ech superrefrakcyjnych (ELISUP) dla okresu letniego oparto na oryginalnym algorytmie opracowanym w Ośrodku Aerologii [Moszkowicz 1992; Moszkowicz i in. 1993]. Opracowano go na podstawie proce-

dury statystycznej, rozróżniającej echa anomalnej propagacji od ech meteorologicznych, opracowanej jako wynik przeprowadzonych badań.

Obsługa archiwum danych (ARCHIV)

System umożliwiał archiwizowanie zarówno danych podstawowych we współrzędnych sferycznych (plik VOLUME.WRK), jak i różnych rodzajów map.

Do grudnia 1993 r. archiwizowano standardowo pliki z obserwacji typu VOLUME.WRK z pełnych godzin, a w pozostałych terminach – mapę wysokości wierzchołków i mapę odbiciowości na najniższym poziomie z rozdzielczością 4 km. Od grudnia 1993 r. rozpoczęto ich archiwizację ze wszystkich terminów obserwacji (rys. 5.10).

111111111122222222233	Kursor w dacie
1234567890123456789012345678901	93-07-11
.....	styczeń
.....	luty
.....	marzec
.....	kwiecień
.....	maj
#####	czerwiec
#####	lipiec
#####	sierpień
#####	wrzesień
#####	październik
#####	listopad
#####	grudzień

Rys. 5.10. Główne MENU okna do wyboru katalogu danych (# oznacza obecność danych w aktualnym archiwum). Do obsługi archiwum wykorzystywano klawisze: strzałkowe, <PgUp> to poprzedni rok, <PgDn> to następny rok, <Esc> – koniec programu

5.4. Produkty systemu

Pozyskane w procesie skanowania dane o odbiciowości, zbierane były ze wszystkich kątów elewacji (w pełnym zakresie azymutu). Generowano z nich przekroje poziome na ustalonych wysokościach, tzw. CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator, a w praktyce pseudo-CAPPI – na ustalonych wysokościach). Dane do wyliczenia tych map były pobierane z uśrednionych odbiciowości, a nie logarytmów odbiciowości. Było to bardziej czasochłonne, lecz zostało wprowadzone ze względu na fizykę zjawiska. Zestaw wygenerowanych map podlegał dalszemu przetworzeniu/interpretacji.

W kolejnych fazach analiz wykonywane były:

- procedura eliminacji ech anomalnych,
- procedura rozpoznawania zjawisk,
- przeliczanie mapy odbiciowości z najniższego poziomu wysokości według zależności Z-R na natężenie opadu,
- specjalna procedura wzajemnej korelacji pól, obliczająca wektory przesunięć pola opadowego,
- obliczenia sumy opadu za ostatnią godzinę na podstawie sześciu ostatnich obserwacji,
- mapa prognozy ekstrapolacyjnej na wyprzedzenie 1 i 2 godzin, na podstawie obliczonego ruchu i mapy rozpoznanych zjawisk.

W rezultacie system AMSR umożliwił wygenerowanie następujących map:

- odbiciowości (pseudo-CAPPI) na następujących poziomach: 0,7; 1; 2; 3; 4 i 5 km (rys. 5.11a i 5.11b),
- wysokości wierzchołków ech radarowych (rys. 5.11e),
- natężenia opadu (rys. 5.11c),
- zjawisk (rys. 5.11f),
- godzinnych sum opadów (rys. 5.11d),
- prognozy zjawisk z wyprzedzeniem na 1-, 2-godzinny (rys. 5.11g i 5.11h)

oraz określenie:

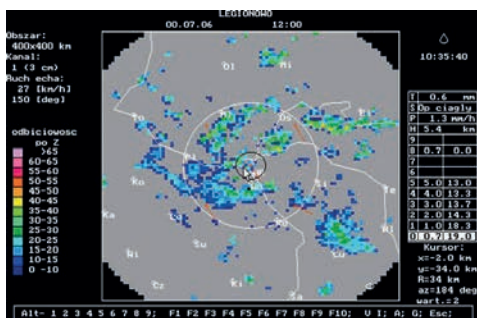
- wektorów ruchu opadów nanoszonych na mapy poszczególnych produktów,
- przekrojów pionowych przez wybrany punkt.

Każda zapisana cyfrowo mapa składała się z nagłówka (terminu i rodzaju mapy) oraz tablicy danych. Rozmiar każdej tablicy danych do wygenerowania informacji na mapie wynosił 100×100 elementów.

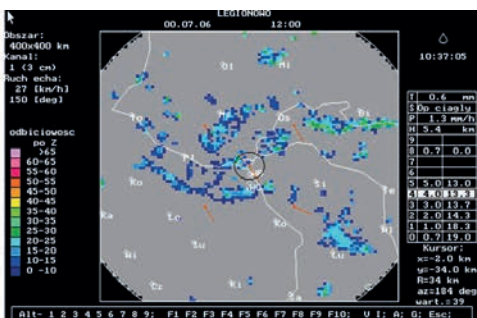
W przypadku map odbiciowości radarowej (rys. 5.12) program systemowy wyliczał odbiciowość średnią dla określonego poziomu wysokości.

Mapy wysokości wierzchołków ech (rys. 5.13) radarowych opracowano na podstawie danych o odbiciowości określonej w elementach sferycznego układu współrzędnych (odległość, azymut, kąt elewacji). Wyznaczano z nich maksymalne wysokości, na których zarejestrowano jakiegokolwiek echo radarowe. Pojedyncze komórki oraz dane wokół stacji radarowej w obszarze, w którym wysokość mogłaby być zafałszowana, były usuwane.

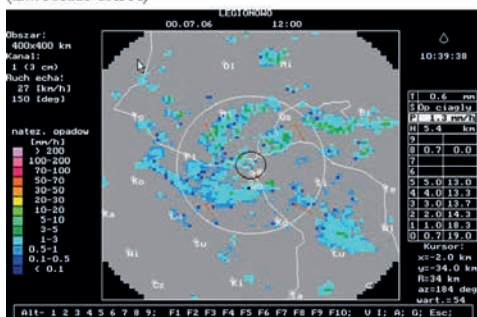
Jedyny parametr mierzony przez klasyczny (nie dopplerowski) radar meteorologiczny to odbiciowość (chmury opadowej). Parametr niezbyt pogładowy, na ogół niezrozumiały dla szerokiej publiczności i dla meteorologów niebędących specjalistami w dziedzinie meteorologii radarowej. Przeliczano go na natężenie oraz sumę opadu za ostatnią godzinę. Natężenia opadów (rys. 5.14a) liczono według klasycznej zależności Marshalla-Palmera dla deszczu i deszczu ze śniegiem oraz zależności Gunna dla śniegu [Atlas 1963].



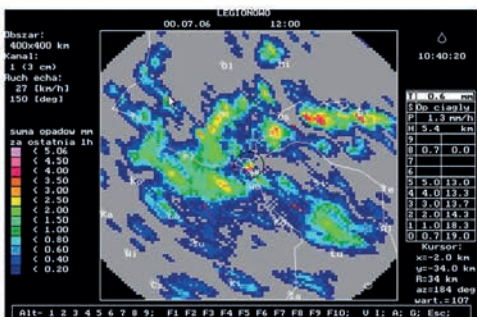
a) Odbiornosc z wysokości 0,7 km, tj. nisko nad ziemią (tzw. Pseudo CAPPi)



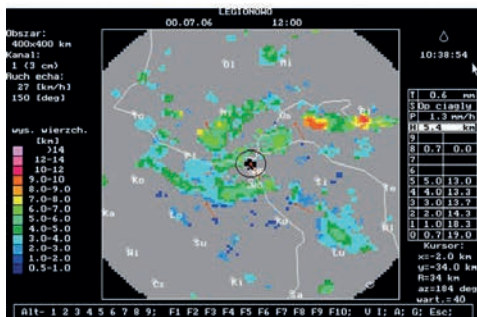
b) Odbiornosc na poziomie 4 km (tzw. Pseudo CAPPi)



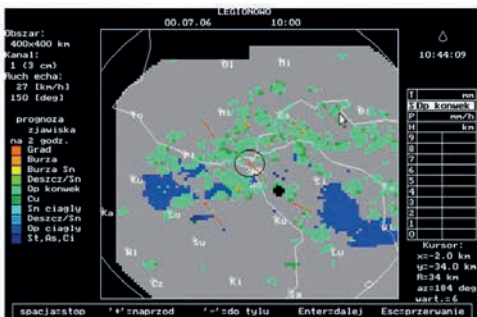
c) Mapa natężenia opadów



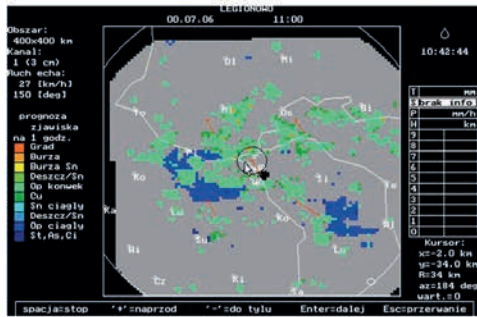
d) Mapa godzinnych sum opadów



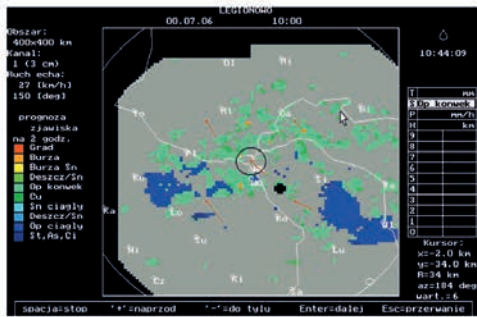
e) Wysokości wierzchołków ech radarowych



f) Mapa zjawisk

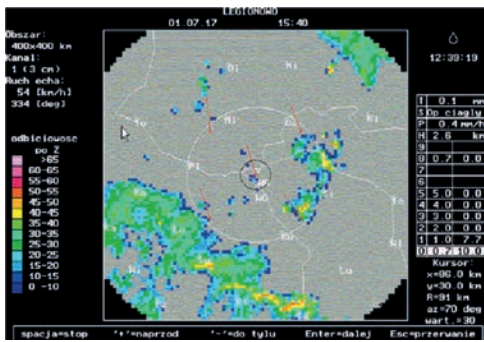


g) Prognoza zjawisk z wyprzedzeniem na 1 godzinę

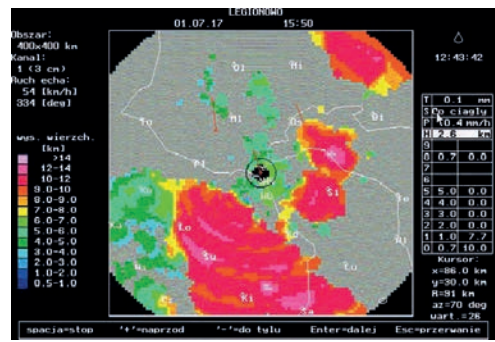


h) Prognoza zjawisk z wyprzedzeniem na 2 godziny

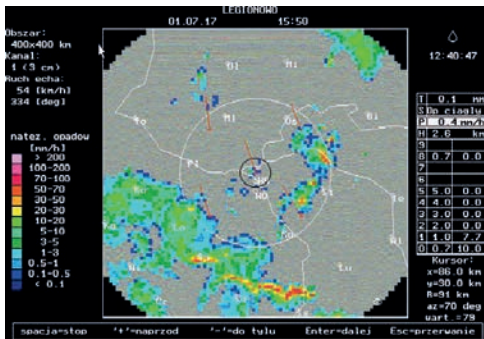
Rys. 5.11. Przykładowy zestaw generowanych map radarowych z 6.07.2000 r. godz. 12:00 UTC



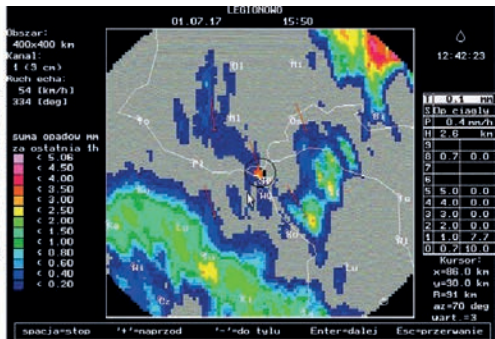
Rys. 5.12. Mapa odbiciowości dla wysokości 0,7 km (poziom nr „0” – podświetlony) z 17.07.2001 r. godz. 15:40 UTC



Rys. 5.13. Mapa wysokości wierzchołków chmur (ech radarowych) z 17.07.2001 r. godz. 15:50 UTC



a)



b)

Rys. 5.14. Mapy a) natężenie opadów, b) suma opadów za ostatnią godzinę (liczona na podstawie sześciu map typu natężenie opadu) z 17.07.2001 r. godz. 15:50 UTC

Jednym z zadań meteorologii radarowej (wówczas nie przez wszystkich docenianym) jest możliwość rozpoznawania zjawisk meteorologicznych związanych z opadami, takich jak: burze, ulewy, szkwały i in.

Rozpoznawane w systemie AMSR klasy zjawisk, uszeregowane od najbardziej do najmniej groźnych, zawarto w tab. 8.

Rozpoznawanie wykonywano za pomocą opracowanych funkcji dyskryminacyjnych, zależnych od kilku parametrów mierzonych radarem oraz wielkości meteorologicznych, takich jak temperatura, wysokość izotermy 0°C. Danymi radarowymi do rozpoznania zjawisk były wartości ze wszystkich map generowanych z odbiciowości: M0, M1, M2, M3, M4 i M5 (kolejne wysokości wyrażone w km) oraz mapy wysokości wierzchołków H.

Wykorzystywane funkcje dyskryminacyjne zależne były także od pory roku, dlatego też opracowano je dla różnych pór.

Tab. 5.1. Klasy zjawisk rozpoznawanych przez system AMSR (MRŁ-5) w Legionowie

Numer klasy	Zjawisko
10	grad
9	burza
8	przelotny śnieg (śnieżyca)
7	przelotny śnieg z deszczem
6	przelotny deszcz (ulewa)
5	chmura konwekcyjna Cu cong – Cb bez opadu
4	śnieg jednostajny
3	jednostajny deszcz ze śniegiem
2	jednostajny deszcz
1	chmura warstwowa bez opadu (As, St, Sc, Cs)

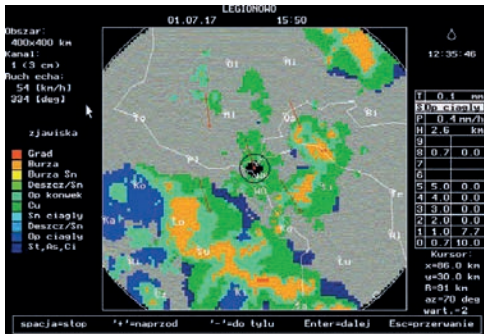
Przykładowo grad i burza były wydzielane na podstawie pionowego profilu odbiciowości; ogólnie rzecz biorąc im wyżej jest wierzchołek chmury konwekcyjnej, im większa w niej odbiciowość i wyżej położone maksimum tej odbiciowości, tym groźniejsze jest zjawisko związane z chmurą.

Podział ech na konwekcyjne i warstwowe zachodził na podstawie poziomych i pionowych gradientów odbiciowości (ogólnie rzecz biorąc opady jednostajne związane są z mało zróżnicowanymi polami, a konwekcyjne – przeciwnie) oraz najdalszej odległości do piksela bez odbiciowości (komórki konwekcyjne są zwykle mniejsze przestrzennie niż systemy chmur warstwowych).

Opad od chmur bezopadowych (tzw. ech podniesionych) rozróżniano na podstawie obecności echa na poziomie najbliższym ziemi. Brak echa radarowego był jednoznaczny z brakiem opadu. Rozpoznawanie stanu skupienia (śnieg, deszcz) nie może być wykonywane na podstawie samych danych radarowych, wykorzystywano do tego także informacje o temperaturze (w klatce meteorologicznej) oraz wysokości izotermy 0°C z sondażu aerologicznego.

Mapa rozpoznania zjawisk (rys. 5.15) tworzona była tylko dla rozdzielczości 4 km.

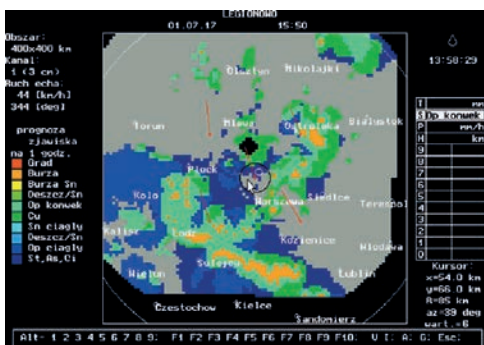
Na podstawie animacji obrazów radarowych można łatwo zauważyć przemieszczanie się komórek i systemów opadowych. Wydawałoby się, że automatyczne obliczenie ruchu obiektów nie powinno więc być trudne. Jednak praktyka pokazała, że jest inaczej. Wypróbowano różne metody: wydzielenia i śledzenia tzw. centroidów komórek: metodę półnizmienników, metodę konturów i śledzenie ich środków ciężkości, metodę gradientów odbiciowości, metodę korelacji wzajemnej pól odbiciowości. Miały one zarówno swoje zalety, jak i wady. Główny problem stanowiła duża zmienność czasowa pól odbiciowości. Mianowicie komórki zanikają, powstają nowe, dzielą się i łączą, wynurzają się zza horyzontu, a w systemach warstwowych trudno jest wyróżnić ich zdecydowane centra, itd.



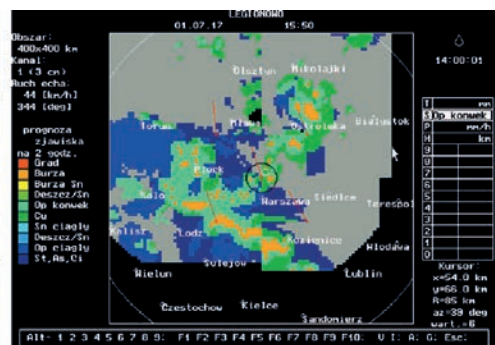
Rys. 5.15. Mapa zjawisk prezentowana dla 10 klas z 17.07.2001 r. godz. 15:50 UTC (wersja angielska)

W systemie AMSR w Legionowie zastosowano metodę poszukiwania maksymalnej korelacji wzajemnej pól odbiciowości najbardziej odległych o 20 min, przy przemieszczaniu jednego pola względem drugiego w obu kierunkach N-S i E-W. Przesunięcie umożliwiające maksymalną korelację przyjmowano za przesunięcie całego pola i wyznaczano wektor przemieszczania się pola w ciągu 20 min. Ekran (pole obserwacji) dzielono na 5 sektorów: cztery kwadranty: NE, NW, SW i SE oraz obszar środka ekranu. Określając przesunięcia dla tych sektorów, uzyskiwano jakby pole 5 przesunięć. Ponieważ zastosowana metoda nie zawsze działała poprawnie (np. pojawienie się nowego echa mogło spowodować zmianę wektora ruchu na prawie przeciwny do poprzedniego), to wprowadzono kontrolę logiczną zgodności wektorów we wszystkich sektorach. W przypadku, gdy w kolejnych przedziałach czasu wektory różniły się w kierunku o ponad 45° lub w długości o ponad 50%, ostatni wektor zostawał wyrzucony i deklarowano brak ruchu tak długo, dopóki dwa kolejne wektory nie były zgodne.

Mając pole ruchu systemów opadowych, można było przygotować prognozę ekstrapolacyjną zjawisk (ewentualnie natężeń lub sum opadów). Zakładano, że sytuacja



a)



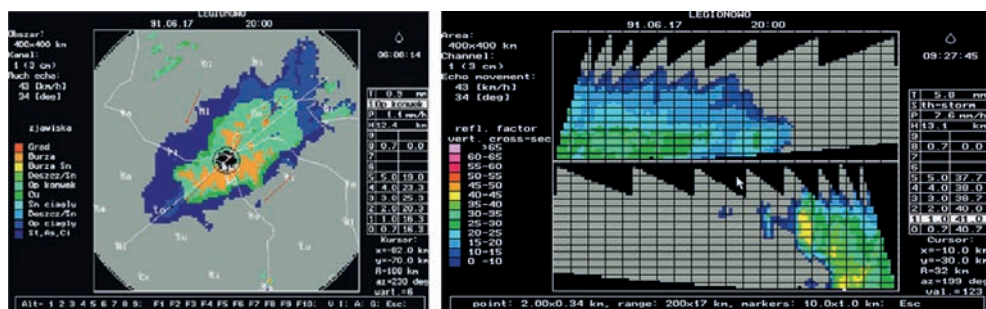
b)

Rys. 5.16. Mapy prognozy z wyprzedzeniem do: a) 1 godziny, b) 2 godzin z 17.07.2001 r. godz. 15:50 UTC

pozostanie niezmieniona przez najbliższą godzinę lub dwie, a będzie następowało tylko przesuwanie się systemów opadowych. Tak opracowane mapy dawały ekstrapolacyjną prognozę „natychmiastową”. Nawiasem mówiąc, dyskutowano wówczas, jak powinno brzmieć polskie tłumaczenie terminu angielskiego *nowcasting*. Najwłaściwsze byłoby „prognoza ultrakrótkoterminowa”, co jednak nie przyjęło się do powszechnego użycia. Przez jakiś czas stosowano nazwę „prognoza natychmiastowa”.

Wektory ruchu pola opadów, w formie strzałki (rys. 5.16), odpowiadające prędkości przesuwania się układu chmurowego, nanoszono na mapy poszczególnych produktów. Na podstawie obliczonego ruchu i mapy rozpoznanych zjawisk tworząno mapę prognozy eksploatacyjnej na wyprzedzenie do 1 i 2 godzin.

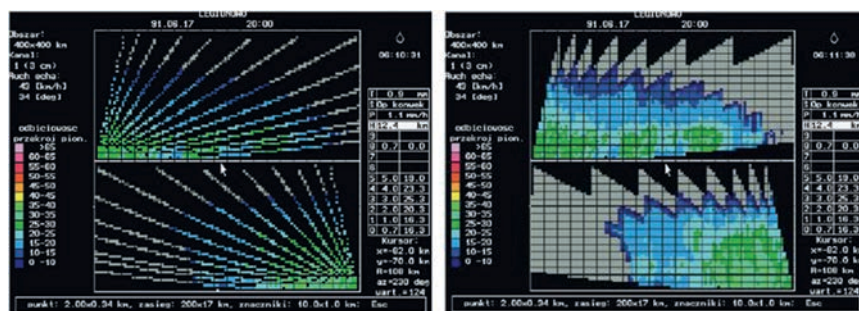
Dane cyfrowe zapisane w układzie sferycznym pozwalały na wyznaczanie przekrojów pionowych przez zadany punkt (tj. od radaru w kierunku określonego azymutu). Maksymalna wysokość przekroju przez strukturę ograniczona była przez maksymalny kąt elewacji, z którego zbierano dane.



a)

b)

Rys. 5.17. Mapy z 17 czerwca 1991 r. godz. 20:00 GMT: a) rozpoznania zjawisk, b) przekroju pionowego wykonanego wzdłuż zaznaczonego na mapie zjawisk odcinka



a)

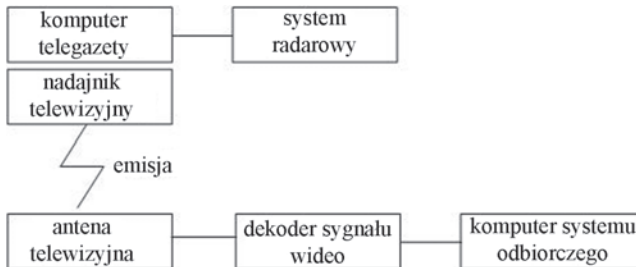
b)

Rys. 5.18. Przekrój pionowy wzdłuż wskazanego odcinka; obraz: a) przed interpolacją b) po interpolacji z 17 czerwca 1991 r. godz. 20:00 GMT, górna część zobrazowania pokazuje sytuację na północ od radaru, a dolna – na południe od radaru

W przypadku przekrojów pionowych wyświetlany mógł być obraz po interpolacji pionowej (rys. 5.18b) lub przed (rys. 5.18a).

5.5. Dystrybucja informacji radarowej

Do transmisji map radarowych wykorzystywano telewizyjny kanał telegazety korzystający z czasu „antenowego” między jedną klatką obrazu TV a kolejną. Te „wolne miejsca” wypełniano informacją radarową. W tym celu należało zapewnić po obu stronach (na stacji radarowej i u odbiorcy danych) dobrej jakości antenę TV oraz dekodery sygnału wideo: tuner TV z wyjściem wizyjnym, tuner komputerowy lub telewizor z wyjściem sygnału video (u użytkownika), komputerową kartę telegazety, komputer IBM PC z kartą EGA lub o większej rozdzielczości (rys. 5.19).



Rys. 5.19. Schemat przepływu informacji z wykorzystaniem kanału telegazety

Warunkiem powodzenia transmisji danych było, aby antena umożliwiała odbiór pierwszego lub drugiego programu Telewizji Polskiej bez zakłóceń. W komputerze systemu odbiorczego musiała być zainstalowana karta TVT umożliwiająca odczyt i zdekodowanie sygnału telegazety. Ważne było, aby sygnał wideo dochodzący do komputera nie miał żadnych zniekształceń – w przeciwnym razie nie było możliwe wykonanie procesów odwrotnych, tj. dekodowania i rozpakowywania.

Na potrzeby kodowania i przesyłania przez modem i linię telefoniczną plików danych radarowych do komputera telegazety, tj. po stronie emisji sygnału, pliki map były kompresowane i przekształcane na format stron telegazety. Operacja transmisji do telegazety, zmiany treści stron i włączenie do emisji zajmowało ok. 4 min (w kolejnych latach szybkość transmisji zwiększono do 2400 bit/s, a czas został skrócony do ok. 2 min).

Po stronie użytkownika danych z telegazety do ich dekodowania i dekompresji do postaci standardowych plików danych radarowych musiała być zainstalowana specjalistyczne oprogramowanie i rezydentny sterownik karty telegazety. To kompleksowe oprogramowanie sprzętowe i do wizualizacji danych na terminalu użytkownika było dostarczane przez IMGW podczas instalacji. Była ona wykonywana

wyłącznie przez pracowników IMGW na określonym komputerze. Dane o użytkowniku i jego komputerze przechowywano w bazie danych Instytutu. Na ich podstawie generowane były hasła-klucze potrzebne do prawidłowej pracy systemu.

Ze względu na ograniczoną przepustowość kanału telegazety do emisji kierowane były jedynie podstawowe dane radarowe, tj. mapy obszaru 400×400 km wokół Legionowa (z rozdzielczością 4×4 km) przedstawiające:

- zjawiska,
- natężenia opadów,
- wysokości wierzchołków.

Częstość aktualizacji danych wynosiła 10 min. Strony telegazety były transmitowane natychmiast po pojawieniu się nowej obserwacji w systemie AMSR. Czas dostępności odbioru pokrywał się z czasem nadawania programu telewizyjnego (wystarczył obraz kontrolny w TVP).

Opracowana metoda transmisji danych umożliwiła też (dodatkowo) przesyłanie map w postaci graficznej na lotnisko Okęcie. W tym celu na komputerze pracującym w sieci Novell na Okęciu zainstalowano specjalistyczne oprogramowanie, którego zadaniem było czuwanie nad terminowym przesyłaniem danych radarowych z Legionowa.

Zastosowany w AMSR sposób transmisji miał tę zaletę, że dane mogły być dostępne praktycznie na terytorium całego kraju. Nie było potrzeby korzystania z zawodnych, obciążonych i kosztownych linii telefonicznych. Wadą zaś było ograniczenie terminów transmisji do czasu nadawania sygnału telewizyjnego.

5.6. Prace badawcze i wdrożeniowe

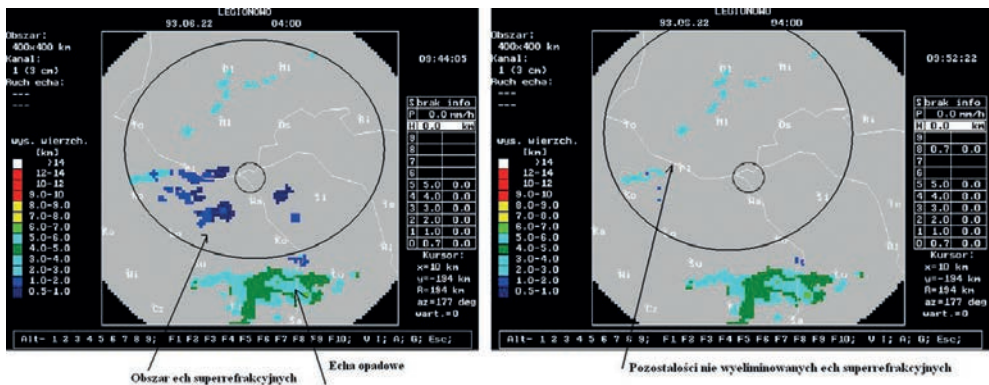
W pierwszych latach prace koncentrowały się na usprawnieniu systemu, a prowadzone prace badawcze zmierzały do podniesienia jakości i doskonalenia metod eliminacji błędnych danych w prezentowanej informacji.

5.6.1. Echa anomalnej propagacji i ich eliminacja w AMSR

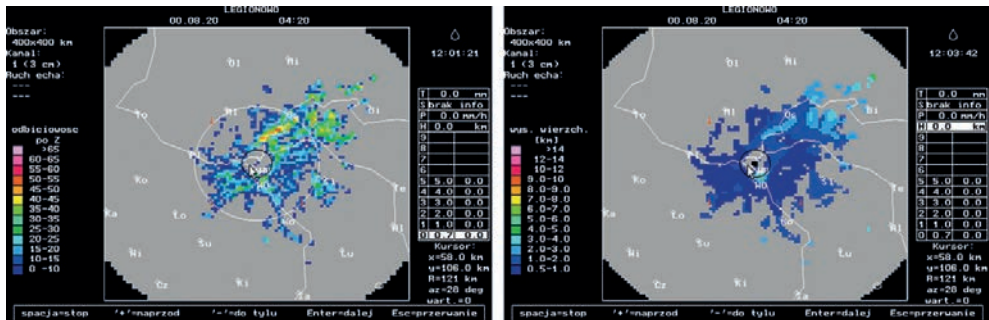
Echa anomalnej propagacji (brytyjska nazwa *anaprop*, amerykańska *AP*) stwarzały problem szczególnie, gdy pojawiały się w dalszych odległościach od radaru.

Na rys. 5.20a przedstawiono przykładową mapę wysokości wierzchołków echa radarowego bez stosowania procedury eliminacji, a na rys. 5.20b tę samą mapę po jej zastosowaniu. [Moszkowicz i in. 1993].

Źródłem tych ech była superrefrakcja, która pojawia się, gdy w pewnej warstwie atmosfery (zwykle przyziemnej) następuje wzrost temperatury wraz z wysokością (inwersja) i silny spadek wilgotności bezwzględnej (ilości pary wodnej).



a) b)
Rys. 5.20. Mapa wysokości wierzchołków; a) bez stosowania procedury eliminacji echa anormalnych, b) po zastosowaniu procedury eliminacji



a) b)
Rys. 5.21. Echa anormalne na mapach: a) odbiciowości radarowej na poziomie 700 m, b) wysokości wierzchołków echa radarowych 20.08.2000 r. godz. 04:20 UTC

Odbiciowość echa anormalnych typu superrefrakcja jest zazwyczaj duża i silnie zróżnicowana (bardzo zmienna), a wysokość ogólnie biorąc niska, ale wzrastająca wraz z odległością. Te i inne bardziej szczegółowe cechy dwóch parametrów (odbiciowości i wysokości) radioecha mogą być użyte do rozróżniania tych kategorii, a w konsekwencji do usuwania echa anormalnej propagacji.

Wyniki zastosowania procedury eliminacji wykazały, że było to postępowanie nie do końca idealne – czasami część echa AP pozostawała niewyeliminowana, a z drugiej strony – część opadów mogła zostać usunięta.

Eliminacja AP na radarze MRŁ-5 w Legionowie była realizowana następująco. Obliczano funkcję $R(\bar{X})$:

$$R(\bar{X}) = -0,17972x_1 + 0,37753x_2 - 0,05806x_3 + 0,26506x_4 - 0,9081$$

gdzie: $x_1 = 200 \sin \alpha_1$, gdzie α_1 – kąt do najniższego poziomu (1, 2, 3, 4, 5 km) niezawierającego echa,

$x_2 = 200 \sin \alpha_2$, gdzie α_2 – kąt do poziomu maksymalnej odbiciowości w pionie,
 x_3 – „gradient” odbiciowości⁷,
 x_4 – wysokość wierzchołka.

Gdy wartość funkcji $R(\mathbf{X}) > 0$ – mamy echo meteorologiczne, w przeciwnym razie AP . Funkcję tę uzyskano na podstawie analizy historycznych, ręcznie przetworzonych danych dotyczących sytuacji meteorologicznych i anomalnych [Moszkowicz i in.1992].

5.6.2. Kalibracja radaru MRŁ-5

Zasadniczo pojęcie kalibracji radaru jest identyczne, jak kalibracji każdego innego przyrządu pomiarowego. Jednakże w przypadku radaru często ogranicza się je do możliwie jak najściślejszego określenia parametrów pracy radaru w postaci tzw. „potencjału radarowego” lub „stałej radarowej”. Znając dokładnie ten parametr, można być pewnym, że mierzymy prawidłowo moc średnią sygnału. Przy przeliczaniu jej na odbiciowość pozostają nieokreślone tylko niepewności związane z parametrami przestrzeni (tłumienie, zapełnienie wiązki) i obiektu (profil odbiciowości i inne).

Pod pojęciem kalibracji radaru często również rozumiano jak najdokładniejsze powiązanie wielkości zmierzonych przez radar z wielkością opadu na powierzchni ziemi.

System AMSR umożliwiał częste pomiary z dostatecznie dużą rozdzielczością (2 km w zasięgu do 100 km i 4 km w zasięgu do 200 km), co pozwalało na określenie wielkości opadu; w tym wypadku – obliczenia opadów średnich dla określonej zlewni. Aby pomiar ten był dokładny, należało porównać go w czasie rzeczywistym z danymi bezpośrednimi z deszczomierzy (kalibracja za pomocą przyrządów).

Przy współpracy z Witoldem Krajewskim z Uniwersytetu Iowa (USA) opracowano projekt pt. „Radarowe szacowanie opadu w czasie rzeczywistym i prognoza opadu”, który był zrealizowany, między innymi, na podstawie danych cyfrowych z radaru MRŁ-5.

Złożony do amerykańskiej organizacji rządowej U.S. Agency for International Development (U.S. A.I.D.) projekt został wysoko oceniony i zaakceptowany do realizacji. Finansowanie ze strony amerykańskiej wynosiło ok. 150 tys. USD [Moszkowicz 1991].

Po dyskusji z Zakładem Pomiarów Meteorologicznych i Hydrologii wybrano do badań zlewnię Wilgi (w rejonie stacji badawczej IMGW Jarczew) o powierzchni 231 km², w odległości 75-102 km od radaru, jako najbardziej odpowiadającą

⁷ „gradient” odbiciowości to maksymalna absolutna różnica między maksymalną odbiciowością w słupie a odbiciowościami niezerowymi w najbliższym sąsiedztwie (w sześciacie otaczającym odbiciowość maksymalną)

potrzebom tematu. Do oprzyrządowania zlewni zakupiono odpowiedni sprzęt, w tym automatyczne pluwiografy firmy Campbell USA.

Po oprzyrządowaniu stacji: 7 pluwiografów analogowych, 6 pluwiografów cyfrowych w obszarze zlewni przystąpiono do zbierania danych. Tak przygotowana zlewnia umożliwia obliczanie opadu średniego na danym obszarze i porównanie go z wartościami pozyskiwanymi z danych radarowych.

Porównanie wstępne wykonano na podstawie danych za okres: lipiec 1992 r. oraz czerwiec i lipiec 1993 r. W wyniku prowadzonych prac stwierdzono systematyczne zaniżanie sum opadu przez radar, jako skutek niedokładnej znajomości parametrów radaru. Wyniki opisano w pracy pt. *Wstępne porównanie godzinnych sum opadu na zlewnie zmierzonych pluwiografem i radarem meteorologicznym* [Moszkowicz i in. 1995]. Rozwiązanie problemu miała przynieść kalibracja radaru na niezależnych przyrządach.

W latach 1997-1998 do kalibracji próbowano zastosować metodę tarczy wzorcowej (czyli obiektu o odbiciowości dającej się dokładnie obliczyć) dla radaru w Legionowie. Wyniki nie były zachęcające ze względu na trudność ustawienia tarczy wzorcowej (balonu z materiału metalizowanego, na uwięzi z linką ok. 400 m, jak na rys. 5.22) na osi anteny oraz braku możliwości zbierania danych przy zatrzymanej antenie radaru [Moszkowicz 1999].

Trzeba było więc wrócić do metody porównania danych z pluwiografów z danymi radarowymi. Jednakże wymagała ona dalszej analizy – szczególnie pod kątem zależności czasowych – zmiany krzywej kalibracji z miesiąca na miesiąc oraz uzyskiwania różnych krzywych kalibracyjnych dla różnych odległości od radaru i różnych wartości natężenia opadu [Moszkowicz 1999].

Kolejne prace wykonywano z wykorzystaniem danych pozyskanych z cyfrowych pluwiografów na tej samej zlewni, ale skonfigurowanych po dwa urządzenia na jed-



Rys. 5.22. Kalibracja radaru w Legionowie za pomocą tarczy wzorcowej w kształcie balonu: a) przygotowywanie balonu (napełnianie gazem), b) mocowanie balonu do linki, c) balon wznosi się na uwięzi

nym stanowisku (oddalone od siebie o ok. 10 m), aby zwiększyć wiarygodność danych pomiarowych z deszczomierzy. Na podstawie zebranych danych za okres od lipca 1998 r. do czerwca 1999 r. (z pominięciem okresu zimowego listopad-kwiecień) prowadzono analizy natężenia i sum opadów w porównaniu z danymi radarowymi.

Określono 3 rodzaje krzywych regresji (kalibracyjnych) uwzględniające poprawkę na tłumienie fali radarowej przez opad i znajdowano odpowiednie współczynniki korelacji i wariancje resztkowe.

Porównania radarowego natężenia opadu R_{radar} z natężeniem z pluwiografów R_{pluw} wykazały, że z prawdopodobieństwem 75% zachodzi relacja:

$$0.5 R_{pluw} \leq R_{radar} \leq 2 R_{pluw}$$

Nie wyglądało to zbyt zachęcająco, ale trzeba wziąć pod uwagę, że oba pomiary miały zdecydowanie różną charakterystykę pomiaru i związane z tym błędy pomiarowe. Natężenie odczytywane na pluwiometrze dotyczy powierzchni 200 cm², a według radaru powierzchni 1 km², czyli 50 000 000 razy większej – nie jest to pomiar punktowy. Sytuacja poprawiała się nieco, gdy sumowano opad za okres 1 lub kilku godzin. Różnica między radarowymi sumami opadu za 3 godziny a pomiarem deszczomierzowym spada do ok. 30%. Przy tym błąd niekoniecznie musi być związany z radarem, deszczomierze też mogą być obciążone błędami [Moszkowicz 2003].

Jako przyszłościowe rozwiązanie zaproponowano optymalne łączenie informacji z różnych źródeł tak, by maksymalnie wykorzystać zalety różnych systemów pomiarowych. Wymagało to jednak dalszych badań i analiz.

Porównaniem opadów zmierzonych radarem i deszczomierzem oraz optymalizacją obliczeń średniego opadu na zlewnię zajmował się także zespół pracowników Radarowego Centrum Operacyjnego Oddziału Katowice, który w ramach działalności statutowej IMGW i prac prowadzonych w ramach KBN realizował następujące zadania:

- porównanie opadów zmierzonych radarem meteorologicznym i deszczomierzami [Jurczyk i in. 2002],
- kombinacja danych opadowych z deszczomierzy i radarów meteorologicznych [Jurczyk i in. 2003],
- wykorzystanie danych opadowych z deszczomierzy i radarów meteorologicznych do estymacji pola opadów [Jurczyk i in. 2004]

5.6.3. Weryfikacja prognoz opadu z modeli numerycznych za pomocą danych radarowych

W kolejnych latach, wykorzystując dane pozyskane z pomiaru radarem MRŁ-5, prowadzono następujące prace badawcze:

- porównanie prognoz opadu z modeli numerycznych z wynikami radarowego pomiaru opadu, skorygowanego danymi synoptycznymi – zrealizowane w ramach COST 717 [Moszkowicz 2001],
- weryfikacja ewolucji systemów opadowych według modeli numerycznych i ulepszanie radarowej natychmiastowej prognozy opadu (*nowcasting*) [Moszkowicz 2002],
- weryfikacja prognoz opadu z modeli numerycznych (w tym Lokal Modell o rozdzielczości 7 km) za pomocą danych radarowych korygowanych deszczomierzami oraz możliwości poprawy radarowej natychmiastowej prognozy opadu (*nowcasting*) w ramach tematu KBN-2.4 [Moszkowicz 2003].

Opracowano oprogramowanie przetwarzające dane radarowe i wyniki modeli do wspólnego układu współrzędnych – rzutu gnomonicznego dla obszaru Polski z rozdzielczością 8 km – i oprogramowanie dopasowania przestrzennego danych radarowych do wyników modeli (przesuwanie obrazu i poszukiwanie najlepszej zgodności).

Porównywano prognozy z modeli z radarowymi sumami opadu za 6 godzin pod względem wykrywania opadu przez modele (jest opad/brak opadu), porównania ilościowe opadu pozostawiono na późniejszy okres.

Prowadzone prace badawcze były częścią składową europejskiego programu badawczego COST 717 *Use of radar observations in hydrological and NWP models*. Dzięki pracom przetarto drogi współpracy z operatorami 3 modeli: UMPL (ICM UW), Aladin (Okr IMGW), HMR/DWD (Centrala IMGW) – zebrano podstawową próbkę danych z radaru i trzech modeli za sierpień 2000 r.

Sformułowano wstępny wniosek z analizy: modele prognozują większy opad niż jest w rzeczywistości, przy tym wydaje się, że cecha ta jest najwyraźniejsza w modelu ALADIN, a najsłabiej w modelu HRM/DWD.

Określono zamierzenia na przyszłość: uzyskać korektę sum radarowych danych opadowych przez dane synoptyczne i porównywać także wartości liczbowe opadów oraz zbadać możliwości prognozy natychmiastowej opadu i zjawisk, bazując na połączonych danych radarowych i z modeli.

5.7. Znaczenie informacji radarowej

Za opracowanie i wdrożenie systemu AMSR do pracy operacyjnej w służbie osłony hydrologiczno-meteorologicznej zespół pracowników Pracowni Radarowej wraz z kierownikiem Zakładu Aerologii doc. Zenobią Lityńską otrzymał 8 czerwca 1994 r. nagrodę Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa (rys. 5.23).

Praca operacyjna z radarem i prace badawcze potwierdziły, że w porównaniu do klasycznych pomiarów opadu deszczomierzami radarowy pomiar opadu wykazuje

NAGRODA

MINISTRA
OCHRONY ŚRODOWISKA, ZASOBÓW NATURALNYCH
I LEŚNICTWA

ZA WYBITNE OSIĄGNIĘCIA TWÓRCZE
W DZIEDZINIE OCHRONY ŚRODOWISKA,
GOSPODARKI WODNEJ, GEOLOGII,
LEŚNICTWA I OCHRONY PRZYRODY

PRZYZNAJĘ

NAGRODĘ I STOPNIA

za pracę pt:

AUTOMATYCZNY METEOROLOGICZNY SYSTEM RADAROWY I SYSTEM
ROZPOWSZECHNIANIA RADAROWYCH INFORMACJI METEOROLOGICZNYCH
PRZEZNACZONYCH DO OCHRONY ŚRODOWISKA I OSŁONY GOSPODARKI NARODOWEJ

Dla zespołu autorskiego w składzie :

Doc. dr ZENOBIJA LITYŃSKA
Dr STANISŁAW MOSZKOWICZ
Mgr GRZEGORZ CIACH
Mgr ZDZISŁAW DZIEWIT
Mgr PIOTR DEWISZEK
Mgr inż. IRENA TUSZYŃSKA

MINISTER
OCHRONY ŚRODOWISKA,
ZASOBÓW NATURALNYCH
I LEŚNICTWA

Stanisław Żelichowski



WARSZAWA, 8 czerwca 1994 r.

Rys. 5.23.

Dokument Ministra
Ochrony Środowiska,
Zasobów Naturalnych
i Leśnictwa przyznający
nagrodę dla zespołu
Pracowni Radarowej
przy zakładzie Aerologii
IMGW w Legionowie

następujące zalety: ciągłość przestrzenną obserwacji i lepszy dostęp do zmienności opadu w czasie, możliwość obserwacji w czasie rzeczywistym dużych obszarów, łatwość automatycznego uzyskiwania, przetwarzania, przechowywania, rozpozszechniania i wizualizacji danych opadowych w określonym obszarze.

W całym okresie funkcjonowania system AMSR był doskonalony i rozszerzany przez ulepszanie istniejących modułów oraz wprowadzanie nowych (np. poprawa sposobu uśredniania sygnałów, algorytmów i programów rozpoznawania zjawisk, dodanie eliminacji ech superrefrakcyjnych), a przede wszystkim przez opracowanie, uruchomienie i wdrożenie systemu rozpozszechniania danych.

Za pośrednictwem kanału telegazety dane docierały do kilku (potem kilkunastu) użytkowników wewnętrznych:

- Centrali IMGW w Warszawie,

- Oddziału Krakowskiego IMGW,
- stacji meteo w Wieluniu (1996)

i zewnętrznych, takich jak:

- Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych w Warszawie (1993),
- Zarząd Rejonu Dróg w: Siedlcach (1993), Gostyninie (1994), Garwolinie (1994), Mińsku Mazowieckim (1995), Łukowie (1995),
- Zarząd Oczyszczania Miasta – Warszawa (1994),
- Instytut Badawczy Leśnictwa w Warszawie (1994),
- Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie (1994),
- Instytut Astronomii Uniwersytetu im. M. Kopernika w Toruniu (1994),
- Instytut Geofizyki w Świdrze (1995),
- Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie (1994), Regionalne Biuro Meteo w Dęblinie (1995),
- biura meteorologiczne jednostek wojskowych w: Warszawie, Pyrach, Poznaniu,
- firmy prywatne, np. Import Eksport Electronics (1994),
- Muzeum Techniki w Warszawie (1994), itp.

Dział Nadzoru Operacyjnego PLL LOT odbierał pełny zestaw danych poprzez połączenie z siecią komputerową NOVELL w Lotniskowym Biurze Prognoz Warszawa-Okęcie.

Prowadzona kampania promocyjna, nakierowana na szerokie rozpowszechnianie wśród użytkowników, zaowocowała zamówieniami ze strony stacji radiowych: Wa-Ma w Olsztynie, „Radio dla Ciebie” i ESKA w Warszawie.

Do roku 1997 (włącznie) promocją systemu radarowego, jego instalacją u użytkowników i szkoleniami dotyczącymi obsługi systemu transmisji danych i interpretacji informacji zajmowali się pracownicy Zakładu Aerologii (dwie osoby z pracowni radarowej: Zdzisław Dziewit i Irena Tuszyńska). Brak personelu spowodował, że w 1998 r. IMGW zawarło umowę z Przedsiębiorstwem Usługowo-Produkcyjno-Handlowym RAFOT Sp. z o.o. na emisję i redystrybucję danych przetworzonych przez Teletekstowy System Transmisji Kodowanych Danych Numerycznych (system TELESEND). Opracowano go jako komercyjny system rozsyłania informacji na bazie sygnału telegazety (patrz rozdz. 4.5).

Informacja radarowa prezentowana przez system AMSR mogła być już użytkowana (choć do regularnej współpracy nie doszło) w innych dziedzinach gospodarki narodowej, takich jak: gospodarka komunalna (osłona pracy kanałów miejskich, zarządzanie zbiornikami ścieków), prace spedytorskie (ochrona ładunków wrażliwych na opady), budowy specjalne np. wysokościowe (ostrzeżenia przed wyładowaniami i możliwymi porywami wiatru), rekreacja (osłona imprez sportowych), itp.

Dane radarowe, zapisywane regularnie do archiwum cyfrowego na dysku magnetycznym przy ciągłej całodobowej pracy, stanowiły cenny materiał do wykonywania

szczegółowych (w czasie i w przestrzeni) ekspertyz o opadach i zjawiskach z nimi związanych, co było wykorzystywane przez: firmy ubezpieczeniowe, sądownictwo, komisje badania katastrof (np. lotniczych) i in.

Przez kolejne lata system rozwijano także w kierunku szerszego upowszechnienia danych. Po zainstalowaniu w IMGW sieci łączności X-25, obejmującej Legionowo, możliwe było połączenie z komputerem łączności w Centrali IMGW Warszawa-Bielany, skąd poprzez krajowe i międzynarodowe linie łączności przekazywano dane do ośrodków regionalnych IMGW oraz do wymiany międzynarodowej.

Po zainstalowaniu następnych radarów meteorologicznych planowano utworzenie, na bazie Ośrodka Aerologii w Legionowie, Krajowego Centrum Meteorologicznej Informacji Radarowej, gdzie w przyszłości miała być tworzona zbiorcza mapa radarowa oraz wymiana danych w ramach współpracy międzynarodowej.

6. Ewolucja koncepcji systemu radarowego

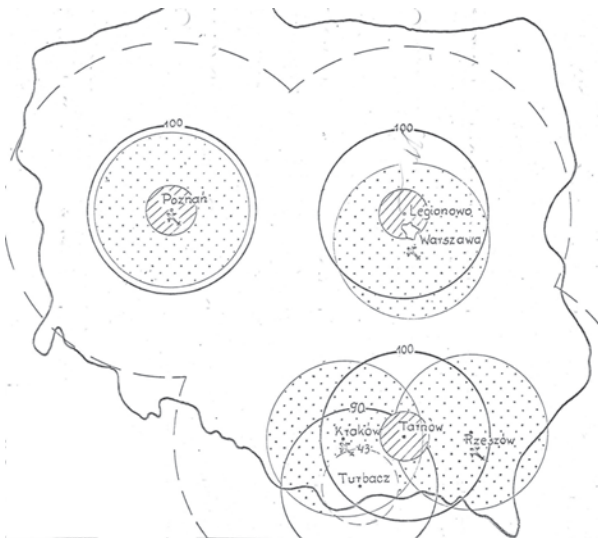
6.1. Koncepcja z okresu 1974-1975

Myśl o polskiej sieci radarowej pojawiła się już w latach 70. Zdawano sobie sprawę z tego, że pokrycie całego obszaru kraju siecią radarów umożliwi wykrywanie i obserwowanie rozwoju ognisk burzowych i intensywnych opadów. Pierwsza koncepcja systemu radarowej osłony meteorologiczno-hydrologicznej kraju zrodziła się w IMGW już w roku 1974. Po raz pierwszy została opisana w opracowaniu pt. „Projekt koncepcyjny radarowego systemu osłony hydrologicznej południowych rejonów kraju” jako Radarowy System Osłony Hydrologicznej (RSOH). Projekt ten uwzględniał ówczesne wymagania Zakładu Prognoz Hydrologicznych i powiązanie ich z wykorzystaniem radaru do pomiaru opadu na wielkich obszarach, dyskretyzację obszarów kontrolowanych przez radar, możliwości przetwarzania informacji radarowej w informację użytkową oraz efektywność ekonomiczną RSOH [Kawecki 1975].

Na przełomie lat 1974/1975 skryształizowała się koncepcja systemu (rys. 6.1). Miał być oparty na dwóch typach radarów przeznaczonych do różnych zadań:

- radary radzieckie typu MRŁ-2 (długość fal 3,2 cm) wraz ze specjalistycznym sprzętem przetwarzającym dane radarowe, miały wykonywać przede wszystkim zadania osłony lotnictwa (RSMOL),
- radary zachodnie, pracujące na fali 5,6 cm, wykorzystywane do pomiaru opadów w południowych regionach kraju (RSOH).

Zakładano, że wraz z postępowaniem w zakresie automatyzacji przetwarzania danych radarowych i rozpoznania zjawisk meteorologicznych system będzie udoskonalany.



Rys. 6.1. Pokrycie kraju przez Radarowe Systemy Meteorologicznej Osłony Lotnictwa (RSMOL – wykropkowane obszary) i Radarowe Systemy Osłony Hydrologicznej (RSOH) wg pierwotnej koncepcji (z 1974 r.) [Kawecki 1975]. Północne rejonny kraju miał pokryć system MON

Tab. 6.1. Charakterystyki czterech typów radarów: MRL-2 i MRL-5 produkcji radzieckiej, WSR-74 produkcji USA i 45-C produkcji Wielkiej Brytanii

Typ	MRL-2	MRL-5	WSR-74	45C
Produkcja	ZSRR	ZSRR	f. Enterprise	f. Plessey
Cena	195 tys. rb		120 tys. dol.	150 tys. £
Dł. fali	3,2 cm	3,2 cm + 10 cm	5,3 cm	5,3 cm
Szerokość wiązki	0,73°	0,5° i 1,5°	1°	1°
Średnica anteny	3 m	ok. 6 m	ok. 3,8 m	3,65 m
Ciężar anteny z napędem	3 t		600 kg	1000 kg
Ciężar osłony	1 t			2 t
Technika	lampowa	półprzewodniki i obw. scalone.	ob. scalone	obw. scalone
Pobór mocy z sieci	18 kW 3-fazy przetwornica		2,5 kW 1-faza	5 kW 1-faza
Perspektywność	technika lat 60-tych, produkuje się tylko na zamówienie; Służba ZSRR jest wyposażona w ten typ radaru; większość krajów RWPG posiada 1-2 radary tego typu.	w trakcie opracowania wg planu do 1978r, kiedy rozpoczęcie prod. seryjnej nie wiadomo; w okresie sprzedaży nie będzie radarem nowoczesnym	wprowadzony w 1974r do sieci radarowej Służby Met. USA, najnowsza technika.	w trakcie opracowania dostępny do sprzedaży ok. 1976-77r
Wyjście cyfrowe i uśredniacz danych.	nie posiada	nie posiada	jest	raczej będzie /brak informacji/

źródło: [Kawecki 1975]

Jako pierwsze miały powstać Punkty Informacji Radarowej (PIR) w Legionowie, Poznaniu i Tarnowie, wyposażone w radary MRL-2 z analogowymi urządzeniami zobrazowania informacji radarowej. W Gorcach ze względu na trudności pomiaru opadów w górach niezbędne było zakupienie radaru z falą 5,6 cm, o szerokość wiązki 1°. Tutaj miał powstać eksperymentalny ośrodek RSOH wyposażony w radar zachodni i krajowy sprzęt do przetwarzania i transmisji danych. Wówczas tym wymaganiom odpowiadały radary firmy ENTERPRISE – typu WSR-74 (USA) oraz firmy PLESSEY – typu 45-C (W. Brytania). Perspektywa powstania takiego ośrodka wydawała się jednak odległa ze względu na trudności budowy i brak dewiz na zakup radaru.



Rys. 6.2.
 Pokrycie kraju przez radary WSR-74 w ramach zadań osłony meteorologicznej i osłony lotnictwa; obszary wykropkowane o promieniu długości 90 km – rejony potrzeb osłony lotniczej [Kawecki 1975]



Rys. 6.3. Pokrycie kraju przez radary MRŁ-5 w ramach zadań osłony meteorologicznej i osłony lotnictwa; koła zakreskowane to zasięg o promieniu 30 km – strefa rozpoznania chmur bez opadów; obszary wykropkowane, o promieniu długości 90 km – rejony potrzeb osłony lotniczej [Kawecki 1975]

Radary: MRŁ-2 i MRŁ-5 miały dobre parametry do prowadzenia osłony meteorologicznej, lecz oparte były na technice z lat 60. (wówczas 10 lat opóźnienia w stosunku do zachodnich) [Kawecki 1975].

W pierwszej połowie 1975 r. okazało się, że będą budowane lotniska w Krakowie i Katowicach, a w ZSRR opracowywany był nowy radar pracujący z falą 3,2 cm i 10 cm o większym zasięgu, który mógłby dobrze spełniać zadania w ramach RSMOL. Dzięki pojawieniu się tego nowego typu radaru mogło nastąpić scalenie

systemów osłony hydrologicznej i lotnictwa. Problemem w dłuższej perspektywie okazało się także automatyczne przetwarzanie danych radarowych; w ZSRR nie wprowadzono do produkcji seryjnej urządzenia do automatycznej obróbki danych „Cyklon”.

Położono nacisk na realizację RSOH na bazie radarów firmy ENTERPRISE, posiadających automatyczne procedury przetwarzania na istniejącym sprzęcie elektronicznym; tanich, łatwych w montażu i eksploatacji.

Analiza parametrów technicznych, możliwości pomiarowych, kosztów zakupu i eksploatacji dawała przewagę radarom WSR-74 (rys. 6.2). Utrudnieniem byłaby jednak współpraca w systemie krajowym radarów MRŁ-1 (MON) z WSR-74. Należało rozważyć także to, że przez najbliższe 7-10 lat wszystkie radary będą pracowały autonomicznie; bez centrum zbiorczego.

Mając na względzie możliwości importowe, współbieżność działań w tworzeniu systemów radarowych w krajach RWPG (w szczególności w ZSRR) oraz ze względu na przewidywaną współpracę w trakcie realizacji systemu (przyszłą wymianę danych do osłony lotnictwa), w rozważaniach o budowie sieci radarowej należało brać pod uwagę radary typu MRŁ-2 i MRŁ-5. Zdawano sobie sprawę, że zakup radarów MRŁ-2 zablokuje lokalizację i ustawi naszą sieć radarową na ostatnim miejscu pod względem technicznym [Kawecki 1975]. W przypadku konieczności zakupu radarów produkcji ZSRR lepszym rozwiązaniem byłaby jednak sieć zbudowana na bazie MRŁ-5 (rys. 6.3)

Przez cały okres tworzenia koncepcji centrów radarowych uświadamiano sobie, że dopiero objęcie całego obszaru kraju wykrywaniem radiolokacyjnym pozwoli analizować zjawiska mezoskalowe na tle wielkoskalowych, co znacznie ułatwi ich rozpoznawanie i prognozowanie [Fortini-Iwanowska 1977].

6.2. Metodyka utworzenia sieci radarowej z 1980 r.

Potrzebę tworzenia mapy zbiorczej informacji radarowej, z możliwie jak największego obszaru, wielokrotnie dyskutowano na seminariach w Zakładzie Aerologii przy udziale przedstawicieli wojskowych służb meteorologicznych (luty 1980 r.).

Brano pod uwagę meteorologiczne radary wojskowe oraz wymianę informacji z NRD – przekazywane kodem RADOB. Opracowanie w 1981 r. eksperymentalnego systemu łączenia tych danych miało przynieść nowe doświadczenie, które wykorzystano w następnym podejściu do problemu.

Do utworzenia mapy (rys. 6.4) wykorzystano algorytm Fiodorowa, przekształcający współrzędne prostokątne na uniwersalne współrzędne geograficzne. Należy zaznaczyć, że dane przesyłane kodem RADOB na potrzeby jej utworzenia zawierały tylko informacje o położeniu echa radarowego, jego ewolucji, ruchu, maksymalnych



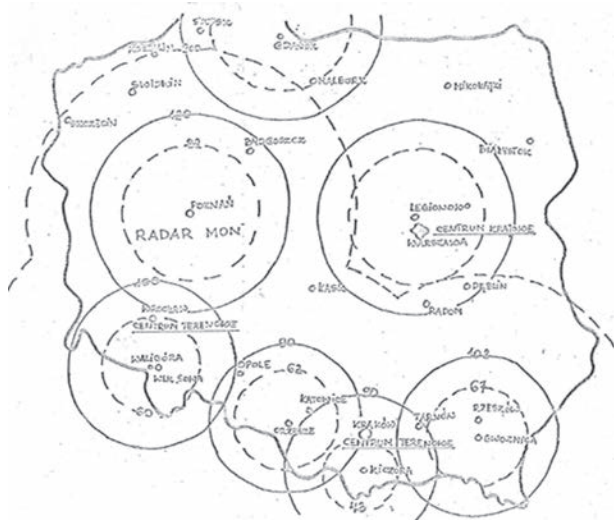
Rys. 6.4. Zobrazowanie mapy zbiorczej utworzonej z danych radarowych (Polska, NRD, CSRR, ZSRR) i synoptycznych – wykonane na MERA400 i wydrukowane na drukarce DZM – 180 (X – echo bez zjawisk, R – burza, D – opad przelotny, z lewej strony zjawiska – wysokość wierzchołka echa) [Moszkowicz 1981]

wartościach wysokości odbiciowości w całym obszarze echa. Nie umożliwiwały kodowania zlokalizowanych zjawisk [Moszkowicz 1981].

6.3. Weryfikacja dotychczasowych koncepcji sieci radarowej

W roku 1988 podjęto usilne działania na rzecz utworzenia systemu radarowej hydrometeorologicznej osłony gospodarki narodowej. Powrócono do projektów koncepcyjnych opracowanych przez IMGW w latach 1974-1975. Polska była wówczas jedynym krajem europejskim niewykorzystującym radarów meteorologicznych w osłonie gospodarki narodowej (poza jedynym, przestarzałym już radarem w Legionowie).

Prowadzone od 1987 r. rozmowy pomiędzy premierami PRL i ZSRR oraz specjalistów polskich z radzieckimi doprowadziły do podpisania 27 lutego 1987 r. w Leningradzie protokołu na dostawę do Polski urządzeń i wyposażenia do kontroli obszaru powietrznego. Do końca 1987 r. udało się też uzyskać ofertę na radiolokator typu MRŁ-5, którego termin dostawy przewidziano na II kwartał 1989 r. (docelowo miały to być 4 obiekty).



Rys. 6.5. Proponowany układ terytorialny sieci radarowej w obszarze Polski z roku 1987 – koncepcja sieci radarowej IMGW dla osłony gospodarki wodnej i lotnictwa [Moszkowicz 1989]

Pojawiła się wówczas także opcja zakupu chińskiego radaru meteorologicznego typu MRT-B typ 714, szczególnie interesująca ze względu na możliwość wymiany barterowej (dającej możliwość złotówkowego zakupu radaru). IMGW uzyskało akceptację Ministerstwa Ochrony Środowiska i Zasobów Naturalnych i zgodę na pokrycie kosztów zakupu dwóch radarów, które miały być dostarczone do Polski na przełomie 1990-1991 r.

Radar MRT-B 714 był radarem znanym tylko z pobieżnych opisów, dlatego ostateczna decyzja o zakupie tego sprzętu miała zapaść dopiero po zapoznaniu się specjalistów z jego pracą w warunkach rzeczywistych. Niestety wizyta polskich specjalistów w ChRL nie przyniosła pozytywnych efektów.

Tworząc nową koncepcję sieci w roku 1989 r., przeprowadzono szeroką dyskusję na temat potrzeb służb hydrologiczno-meteorologicznych IMGW i od strony osłony lotnictwa. Zdawano sobie sprawę z tego, że wobec ograniczonej liczby radarów i możliwych lokalizacji nie wszystkie rejony obszarów ważnych dla gospodarki wodnej mogą być pokryte pomiarem z dużą rozdzielczością. Z kolei w przypadku osłony lotnictwa nie zawsze informacja pozyskana radarem jest kompletna, jeśli chodzi o pomiar chmur niskich stref lub chmur, np. typu Ci, Cc, Cs, które rzadko są wykrywane radarem. Wieloletnie doświadczenie wykazało, że planując budowę sieci radarowej należało rozważyć:

- niezawodność rozumianą jako: dobrą jakość techniczną systemu, dokładność pomiaru,
- wysoką rozdzielczość przestrzenną pomiaru, a więc i pozyskanych danych,
- możliwość dostarczania przetworzonych danych do użytkownika z niewielkim opóźnieniem.



Rys. 6.6. Zasięg sieci radarowej, dla strefy bliskiej i dalekiej, utworzonej z siedmiu lokalizacji opartych na założeniach z roku 1989

Rozważając różne czynniki wpływające na pomiar radarowy od strony zasad ich realizacji i dynamicznych czynników meteorologicznych oraz metodyki wykorzystania informacji radarowych, stwierdzono, że pomiar opadu jest bardzo wrażliwy na rodzaj przyrządu i lokalizację radaru. Wynikało z tego, że nowo budowana sieć powinna uwzględniać dodatkowo dwie kwestie:

- sprzęt – najlepiej, aby był to radar pracujący w paśmie C lub S, o znacznym potencjale, z wiązką o szerokości rzędu $1-1,5^\circ$ oraz z eliminacją ech stałych w radarze lub urządzeniu przetwarzającym,
- lokalizacje powinny uwzględniać obszary, na których pomiary są istotne, np. rejony źródłowe rzek górskich.

Aby w budowanym systemie uwzględnić wymienione założenia, konieczna była znaczna automatyzacja systemu, poczynając od przetwarzania wstępnego sygnału radarowego, poprzez wszystkie stadia przetwarzania i przekazywania zobrazowania, archiwizację i dokumentację, przy jak najmniejszym udziale człowieka [Moszkowicz 1989]. Równocześnie, po zapoznaniu się z możliwościami sprzętowymi na świecie (sieć FRONTIERS w Wielkiej Brytanii, sieć Japonii, sieć zachodnio-europejska, sieć NEXRAD w USA) okazało się, że radar pracujący w paśmie C byłby najlepszym kompromisem, gdyż pozwala na bezproblemowe uzyskanie wiązki o szerokości 1° , a tłumienie sygnału wzdłuż drogi propagacji przy tym paśmie jest możliwe do skorygowania.

Już Battan⁸ na konferencji WMO w Londynie w 1971 r. (poświęconej technice radiolokacyjnej w meteorologii) wystąpił z twierdzeniem, że dla Europy Środkowej

⁸Louis Joseph Battan (ur. 1923 r.), fizyk (USA), autor wielu publikacji z dziedziny meteorologii radarowej

optymalnym urządzeniem do pomiaru opadów jest radar emitujący fale o długości 5,7 cm (pasmo C) z wiązką fal o szerokości 1°. „Niskie położenie izotermi zero stopni w krajach znacznie oddalonych na północ i południe od równika uniemożliwia wykorzystanie walorów radaru w paśmie 10 cm. Ogranicza bowiem jego zasięg do odległości znacznie mniejszej niż pozwala na to potencjał radaru lub efekt tłumienia fali” [Kawecki 1976].

Niestety radary w tym paśmie nie były dostępne na rynku krajów socjalistycznych. W związku z brakiem możliwości zakupu radarów meteorologicznych w krajach zachodnich, np. PLESSY (Anglia), ERICSSON (Szwecja), ENTERPRISE (USA), THOMPSON (Francja), projektując sieć w kolejnych latach, ograniczono się do sprzętu dostępnego na rynku krajów socjalistycznych [Moszkowicz 1989].

Koncepcje kolejnych sieci potwierdzały, że „rzeczywiste potrzeby użytkowników będą się zmieniać w miarę oswojania się z informacją radarową wraz z rozwojem przetwarzania, przesyłania i wykorzystania tej informacji”, dlatego też projektując sieć, można tylko powierzchownie określić jej użytkowników i produkty finalne, które zawsze będą powiązane z możliwościami i ograniczeniami systemu radarowego w danym momencie [Moszkowicz 1989].

6.4. Zmiany w podejściu do zagadnienia tworzenia sieci radarowej

Do konsekwentnych działań na rzecz utworzenia systemu radarów meteorologicznych, jako istotnego narzędzia dla służby hydrologiczno-meteorologicznej przystąpiono w latach 1991-2000. Chodziło również o nadrobienie wieloletnich opóźnień w tym zakresie w porównaniu z innymi służbami europejskimi.

W roku 1991 ponownie problematyka budowy sieci radarowej stała się wyzwaniem dla Pracowni Radiometeorologii przy Zakładzie Aerologii IMGW.

Zmiany polityczne i ekonomiczne, które zaszły po 1989 r. w naszym kraju pozwoliły na bliższe kontakty z krajami zachodnimi i zapoznanie się z istniejącymi i tworzonymi na świecie sieciami radarowymi. Otwartość naszego rynku na nowe technologie pozwoliła brać pod uwagę wszystkie dostępne na świecie systemy, co nie ograniczało wyboru tylko do rynków krajów socjalistycznych. Wymusiło jednak potrzebę następnej aktualizacji koncepcji tworzenia sieci radarowej IMGW. Pomocne w tym okazały się doświadczenia przy wdrażaniu kolejnych wersji systemu radarowego, szczególnie AMSR, które ułatwiło uściślenie i sprecyzowanie wymagań dotyczących informacji radarowych przesyłanych do różnych użytkowników.

W latach 1990-1991 pracownicy IMGW mogli zapoznać się z pracą operacyjną (na miejscu) sieci: austriackiej, francuskiej i fińskiej lub korespondencyjnie – niemieckiej. Analizując sieci pracujące w Europie, zauważono, że różniły się one co do koncepcji i realizacji. Według dra Moszkowicza można je było podzielić na dwie grupy:

- brytyjsko-francuską, którą można scharakteryzować, jako „opad i tylko opad”, gdyż nie nastawiała się na przegląd całej trójwymiarowej przestrzeni, lecz na mierzenie opadu jak najbliższej powierzchni ziemi, z jak największą rozdzielczością czasową i przestrzenną, z pełną automatyzacją pracy w służbie,
- krajów germańskich (Austria, Niemcy, Szwajcaria) czy Finlandii, to sieci bardziej uniwersalne, oparte na trójwymiarowym przeglądzie przestrzeni i mniej dokładnym uśrednianiu sygnału (wzorujące się na systemie szwajcarskim), co prawdopodobnie wynikało z konieczności eliminacji elementów z echami nad górami, gdzie pomiar nad ziemią nie był możliwy [Moszkowicz 1991].

Kraje zachodnio-europejskie przez ok. 10 lat prowadziły badania nad możliwością i potrzebami ogólnoeuropejskiej sieci radarów meteorologicznych (projekt COST-73). W 1990 r. Austriacka Służba Meteorologiczna opracowała studium takiej sieci, o rozdzielczości 2,5 km i docelowej powtarzalności co 10 min tylko danych o odbiciowości maksymalnej.

Przy uwzględnieniu doświadczenia nabytego w kontaktach zagranicznych nic nie wskazywało na to, aby nasza służba mogła sobie pozwolić na tworzenie sieci radarowej tylko do pomiaru opadu, nie biorąc pod uwagę potrzeb innych użytkowników, a w szczególności lotnictwa, tym bardziej, że na rynku pojawiły się radary typu dopplerowskiego. Mając na względzie własne doświadczenia, przyjęto zasadę uniwersalności sieci radarowej, podobnie jak w systemie niemieckim czy austriackim.

Główne założenia to: przegląd całej przestrzeni co 10 min (lub co 5 min niepełny), rozdzielczość 2×2 km, a jeśli będzie możliwe to 1×1 km, analizy danych z wyższych warstw (odpowiednio przetworzone, powinny informować o groźnych zjawiskach pogody).

Planując rozwój sieci radarowej w roku 1991 (operacyjnie pracował system AMSR), należało także rozważyć możliwość jej budowy w oparciu na radarach MRŁ kolejnej generacji. Główną zaletą systemu budowanego na podstawie tych radarów byłoby to, że system automatyzacji został stworzony przy dużym udziale pracowników IMGW (praktycznie całość oprogramowania była autorstwa: Grzegorza Ciacha, Zdzisława Dziewita, i Piotra Dewiszka), stąd był doskonale znany, co z kolei umożliwiało jego modyfikację, jeśli zaszłaby potrzeba realizacji dodatkowych wymagań.

Niestety radar ten był bardzo starej konstrukcji, o dużej zawodności sprzętowej, ciężki i energochłonny. Nie wydawało się także, aby mógł pracować bez obsługi operatorskiej. Należało nastawić się na radary zachodnie, bardziej nowoczesne i niezawodne.

W związku z tym zapoznano się z ofertami rynku amerykańskiego (firmy EEC, Raytheon, UNISYS), szwedzkiego (ERICSSON), niemieckiego (GEMATRONIK GmbH) i niemiecko-angielskiego (Simens-Plessy). Wszystkie te firmy oferowa-

ły gotowe, w pełni zautomatyzowane systemy wraz z oprogramowaniem. Niestety oprogramowanie to nie zawsze odpowiadało potrzebom naszego użytkownika, a systemy były zazwyczaj zamknięte, bez możliwości ingerencji. Najlepszym rozwiązaniem dla budowanej w Polsce sieci radarowej byłby otwarty system oprogramowania, aby istniała możliwość wprowadzania własnych programów użytkowych. Takie możliwości istniały, np. służba francuska zamówiła w firmie GEMATRONIK GmbH radary bez systemu automatyzacji, a nawet skłoniła firmę do modyfikacji systemu sterowania anteną tak, by pasował do francuskiego systemu automatyzacji [Moszkowicz 1991].

Przygotowując się do zweryfikowania koncepcji sieci, wysłano pisma do oddziałów terenowych IMGW z zapytaniem o potrzeby osłony i opinię o wskazanych lokalizacjach. Z prowadzonych uzgodnień wynikało, że decyzje lokalizacyjne wymagają wielu dalszych ustaleń i rozważań. Priorytetem była jednak lokalizacja w rejonie Katowic oraz Gdyni. Problem rozbudowy sieci pozostał dalej otwarty.

W 1993 r. udało się pozyskać środki na zakup jednego radaru dopplerowskiego. W planach rozwoju służby hydrologiczno-meteorologicznej opracowanych w roku 1994 na lata 1996-2005 uwzględniono utworzenie krajowego systemu radarów meteorologicznych do osłony meteorologicznej, hydrologicznej, przeciwpowodziowej oraz racjonalizacji gospodarki wodnej. Zaczęto zdawać sobie sprawę z tego, że radar jest jedynym środkiem technicznym pozwalającym na zdalną diagnozę stanu atmosfery i zachodzących w niej zjawisk w czasie rzeczywistym. Opracowany projekt został zaakceptowany na Radzie Naukowej IMGW 5 lipca 1994 r. Projekt zakładał budowę systemu radarowego opartego na 7-8 radarach meteorologicznych, połączonych w sieć ogólnokrajową, współpracującą z sieciami radarowymi Europy Zachodniej (COST-73), Północnej (NORDRAD), Czech, Słowacji, Ukrainy i Białorusi.⁹

Program nie mógł wejść od razu w życie z uwagi na brak środków w budżecie państwa.

⁹ Dokument Rady Naukowej IMGW, Kierunki rozwoju służby hydrologiczno-meteorologicznej IMGW w latach 1996-2005, Warszawa, IMGW, 1994

7. Pierwsze radary dopplerowskie w służbie IMGW

7.1. RAM – radar meteorologiczny – Meteor 360AC

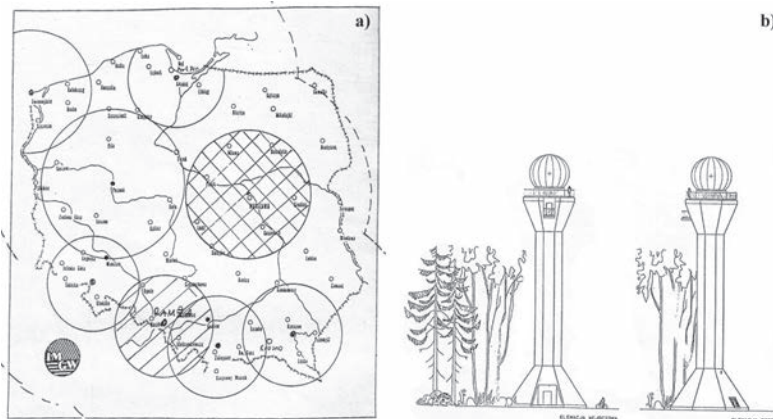
Prace instalacyjne pierwszego dopplerowskiego radaru meteorologicznego rozpoczęto w 1993 r. Był to radar typu Meteor 360AC produkcji niemieckiej firmy GEMATRONIK GmbH, Neuss (Niemcy).

Zakupiono go z dotacji: Komitetu Badań Naukowych, Ministerstwa Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa, Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej oraz środków własnych IMGW.

Po rozpatrzeniu szeregu lokalizacji dla nowej stacji radarowej na południu Polski zdecydowano się na rejon Katowic – na wzgórzu Ramża (ok. 30 km od Katowic). Decyzję o budowie tam radaru podjęto jeszcze ze względu na ważne uzgodnienia lokalizacyjne i zgody władz lokalnych. Uzyskanie takowych dla innych miejsc w krótkim terminie było praktycznie niemożliwe. Od nazwy wzgórza, na którym zbudowano radar, stacja przyjęła nazwę RAM. Zadaniem stacji miała być praca na potrzeby osłony lotniska w Katowicach i osłony przeciwpowodziowej. Lokalizacja ta umożliwia badanie regionów górnej Odry i Wisły.



Rys. 7.1. Rozpoczęcie budowy wieży radarowej na wzgórzu Ramża – rok 1994, fot. Ryszard Klejnowski



Rys. 7.2. Projekt sieci radarowej IMGW: a) zakresowany obszar to obiekty zrealizowane (radar Legionowo) i będące w trakcie realizacji (radar Ramża) – rok 1994, b) projekt architektoniczny obiektu radarowego na wzgórzu Ramża [Kierunki rozwoju... 1994]



Rys. 7.3. Budowa stacji radarowej na wzgórzu Ramża – 21 lipca 1995 r.: a) wieża przygotowana do zamontowania urządzeń radarowych, b) montaż elementów radaru, c) montaż anteny, d) montaż kopuły radarowej, fot. Ryszard Klejnowski

W związku z trudnościami związanymi z finansowaniem budowy wieży radar uruchomiono latem 1995 r. Wraz z urządzeniem dostarczone zostało kompletne oprogramowanie dla radaru w postaci systemu RAINBOW – wersja 3.1, które zostało wykonane przez firmę Gamic z Aachen (Niemcy).



Rys. 7.4. Stacja radarowa RAM na wzgórzu Ramża

Charakterystyka techniczna radaru Meteor 360AC

Pobierana moc	- 2 kW
Średnica anteny	- paraboliczna 4,2 m
Pasma częstotliwości	- od 5,450 do 5,825 GHz (5,66 GHz)
Szerokość wiązki	- 1°
Zakres azymutów	- pełny obrót = 360°
Zakres elewacji	- -2 do 90°
Zasięg maksymalny	- 400 km

Od strony formalnej nadzorem nad pracą radaru zajmował się powołany w 1994 r. zespół radarowy działający przy Oddziale IMGW w Katowicach.

Umieszczony w Oddziale Katowice komputer (rys. 7.5) z systemem RAINBOW był miejscem zdalnego sterowania pracą radaru. Poza standardowymi obserwacjami w czasie rzeczywistym system pozwalał zbierać dane i przetwarzać je programowo w dowolny sposób.

Niestety zebrane dane, zapisywane w układzie sferycznym (pełne wolumy), były przechowywane na komputerze umieszczonym na wieży radarowej tylko przez ok. 12 godzin. Ze względu na małą przepustowość łączności między wieżą radarową a Katowicami dane te nie zawsze mogły być zdalnie przesyłane z jednego kompute-

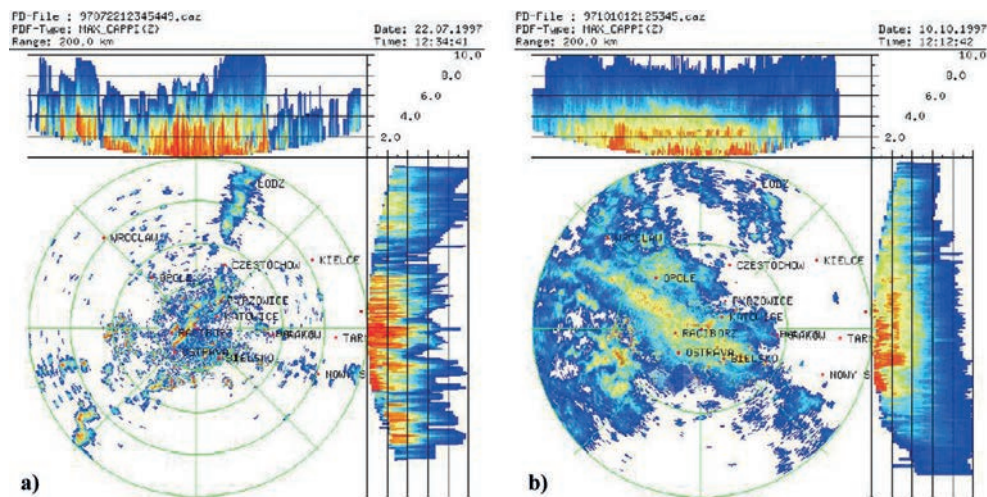


Rys. 7.5. Stanowisko sterowania pierwszym radarem dopplerowskim (lata 1995-1999) w Oddziale Katowickim, fot. Ryszard Klejnowski

ra (wieża) na drugi (do Katowic). Zachodziła konieczność zainstalowania systemu archiwizacji po stronie radaru lub poprawienia parametrów łączy (szczególnie na odcinku Leszczyny-Rybnik), tak by przepustowość łączy zwiększona do 64 kB/s umożliwiała ciągłą archiwizację danych na serwerach w Katowicach.

W 2000 r. rozwiązanie (częściowe) przyniosło wykorzystanie łączności satelitarnej. Komunikację pomiędzy obsługą systemu w Katowicach a stacją radarową nawiązywano przez łącze satelitarne typu VSAT. Możliwe było zdalne programowanie i kontrolowanie pracy radaru. Tą samą drogą przekazywano wszystkie gotowe produkty do wizualizacji na ekranie katowickiego monitora.

Głównym zadaniem radaru przez cały okres jego pracy była osłona przeciwpowodziowa. Duże nadzieje wiązano z jego wykorzystaniem w zlewniach górskich, gdzie prognozy hydrologiczne wykonywano za pomocą modeli typu opad-odpływ. Podstawowym problemem tych modeli było uzyskanie dokładnej informacji wejściowej, którą jest dla nich opad, a radar umożliwia przede wszystkim estymację



Rys. 7.6. Zobrazowania radarowe maksymalnych wartości odbiciowości z dnia: a) 22 lipca 1997 r. – echa konwekcyjne, b) 10 października 1997 r. – echo warstwowe – radar RAM [Szturc i in. 1998]

przestrzenną pola opadowego. Jego duża rozdzielczość przestrzenna (ok. 0,5-1 km) umożliwia ominięcie podstawowej trudności, jaką stanowi w zlewniach górskich duże orograficzne zróżnicowanie wysokości opadów. Istotna jest także, w tym przypadku, natychmiastowość uzyskiwanej informacji. Duże nadzieje pokładano w obserwacji i analizie obrazu radarowego (rys. 7.6) oraz pozyskiwaniu w miarę dokładnych prognoz o przemieszczaniu się pola opadowego w przedziale czasowym ok. 2-3 godzin. Jego wydłużenie wymagało połączenia sąsiadujących ze sobą radarów w jedną sieć, co pozwoliłoby uzyskać obraz radarowy o większym zasięgu [Szturc i in. 1998].

W 1998 r. powstało w Oddziale Katowickim Biuro Hydrologiczno-Meteorologiczne, którego jednym z zadań była obsługa radaru RAM. Tego też roku dane z radaru Ramża zostały włączone do wymiany międzynarodowej w ramach programów CERAD i BALTEX (patrz rozdz. 8) jako dane wejściowe do europejskiej zbiorczej mapy radarowej.

7.2. PAS – radar meteorologiczny – Meteor 360AC

Pierwsze działania związane z budową radaru meteorologicznego na dolnym Śląsku rozpoczęły się w 1994 r. Ówczesne Ministerstwo Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa podjęło decyzje o przeznaczeniu części „pożyczki ekologicznej” Banku Światowego na rozwój infrastruktury służby hydrologiczno-meteorologicznej IMGW, w tym osłony południowych dorzeczy Odry i Wisły.

Optymalna lokalizacja dla radaru na Ślęży (w okolicy Wrocławia) została jednak przekreślona decyzjami administracyjnymi, jako sprzeczna z ideami ochrony środowiska, krajobrazu i dziedzictwa kulturowego Ślęży. Jednocześnie rozmowy podjęte z Dowództwem Wojsk Lotniczych i Obrony Powietrznej zaowocowały zgodą na rozpoczęcie budowy radaru na terenie jednostki wojskowej w Pastewniku. Zgodę na budowę wyraził także ówczesny wójt gminy Marciszów.

Wiosną 1996 r. producent (niemiecka firma GEMATRONIK GmbH) dostarczył radar meteorologiczny typu METEOR 360. Ze względu na przedłużające się procedury formalne radar zmagazynowano (rys. 7.7) na terenie stacji aerologicznej we Wrocławiu, skąd w czasie tragicznej powodzi w 1997 r. pracownicy ewakuowali jego elementy, ocalając je przed zalaniem.

Przeprowadzona po kolejnej powodzi w 1998 r. kontrola NIK i interwencja Ministra OŚZNiL spowodowały przyznanie przez NFOŚiGW pożyczki na instalację radaru.

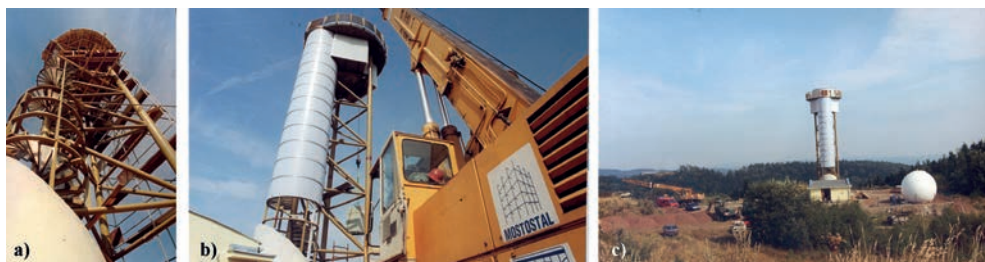
Po tej powodzi opracowano także koncepcję i projekt Systemu Monitoringu Osłony Kraju (SMOK), w którym ujęto zadanie budowy infrastruktury dla tego radaru [Klejnowska, ulotka informacyjna IMGW].



Rys. 7.7. Skrzynie z elementami radaru przeznaczonymi do instalacji w Pastewniku, *fot. Ryszard Klejnowski*

Rozpoczęte w grudniu 1998 r. prace projektowe, a wiosną 1999 r. prace budowlane (rys. 7.8 i 7.9), dzięki przychylności władz administracyjnych i samorządowych Kamiennej Góry zostały zakończone we wrześniu 1999 r. uruchomieniem radaru.

Dnia 4 września 2000 r. miało miejsce uroczyste oddanie trzeciego radaru meteorologicznego (rys. 7.10). W obecności licznie zgromadzonych gości uroczystego rozruchu dokonali: przedstawiciel Ministerstwa Środowiska, wicewojewoda dolnośląski, dyrektor BKPBS oraz dyrektor IMGW.



Rys. 7.8. Budowa wieży radarowej w Pastewniku, a) konstrukcja wieży, b) montaż wieży radarowej, c) teren budowy, *fot. Ryszard Klejnowski*



Rys. 7.9. Montaż anteny radarowej i jej osłony na stacji Pastewnik, *fot. Ryszard Klejnowski*



Rys. 7.10. Stacja radarowa Pastewnik

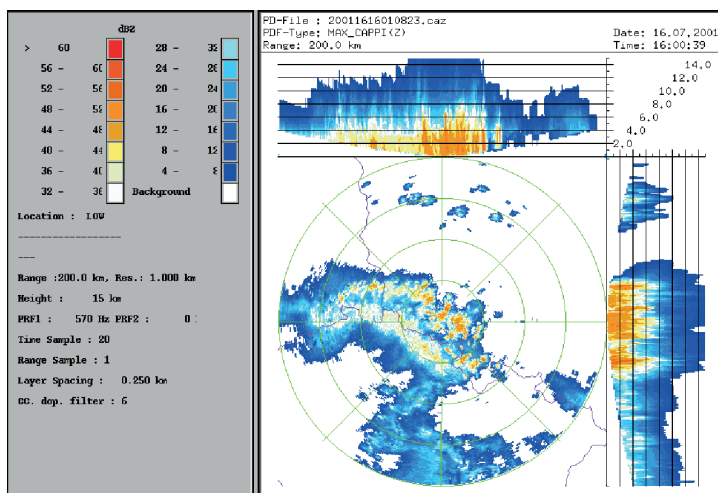
Charakterystyka techniczna radaru Meteor 360AC

- Pobierana moc - 2 kW
- Średnica anteny - paraboliczna 4,2 m
- Pasma częstotliwości - od 5,450 do 5,825 GHz (5,66 GHz)
- Szerokość wiązki - 1°
- Zakres azymutów - pełny obrót = 360°
- Zakres elewacji - -2 do 90°
- Zasięg maksymalny - 400 km

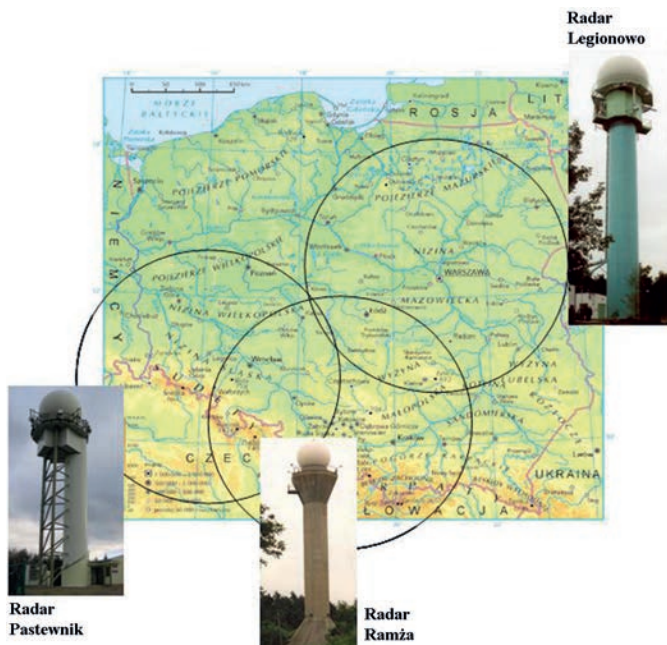
Po zainstalowaniu na stacji anteny do łączności satelitarnej (typu VSAT) uruchomiono (2000 r.) system satelitarnej transmisji danych i rutynową eksploatację radaru. Obsługą zdalnie sterowanego radaru do 2002 r. zajmowało się Biuro Prognoz we Wrocławiu [Klejnowski 2000].

Zadaniem radaru usytuowanego w Pastewniku, koło Bolkowa, na szczycie góry Poręba o wysokości 652 m n.p.m., było/jest skanowanie przestrzeni o promieniu 200-250 km, rozpostartej pomiędzy miastami: Poznaniem, Częstochową, niemieckim Dreznem i czeskim Brnem.

W 2000 r. działały w Polsce już trzy radary (rys. 7.12). Za pomocą kodu BUFR dane przesyłano łącznie GTS do Wiednia, gdzie była tworzona zbiorcza środkowo-europejska mapa radarowa (patrz rozdz. 8).



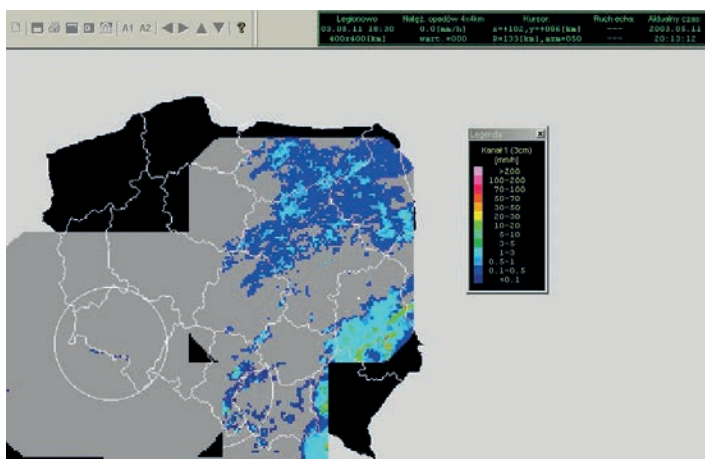
Rys. 7.11. Jedno z pierwszych zobrazowań maksymalnych wartości odbiciowości – radar PAS



Rys. 7.12. Pokrycie obszaru Polski przez radary: LEG, RAM i PAS – zobrazowany zasięg to 200 km od radaru

W 2000 r. dane z radarów włączono do sieci wymiany danych intranet. Stały się dostępne dla wszystkich użytkowników sieci komputerowej IMGW.

Dane z Legionowa rozpowszechniano także za pomocą sygnału telewizyjnego (patrz rozdz. 5.5 i 5.7) do ok. 30 użytkowników zewnętrznych (drogowcy, leśnicy, lotnictwo wojskowe). Eksperymentalnie rozpoczęto rozpowszechnianie tą metodą danych z radaru RAM i PAS.



Rys. 7.13. Przykładowa mapa zbiorcza składana w systemie TELESEND z 11.05.2003 r. godz. 18:30 UTC; radary: LEG, RAM i PAS

W kolejnych latach system TELESEND (rozdz. 5.5) wykorzystywany był do transmisji danych do użytkowników zarówno map z pojedynczych radarów, jak i mapy zbiorczej (rys. 7.13) tworzonej od 2003 r. pozyskanej z trzech radarów pracujących w sieci: LEG, RAM i PAS. Umożliwiał transmisję danych przetworzonych za pomocą mechanizmu zastępowania nadmiarowych wierszy nagłówkowych stron teletekstowych wierszami pakietu X/31 w tekście emitowanym przez TVP S.A. za pośrednictwem nadajnika Programu 1 TVP.

7.3. Analiza lokalizacji pod nowe radary

Wybór lokalizacji radaru meteorologicznego jest złożonym przedsięwzięciem nie tylko organizacyjnym, lecz także technicznym.

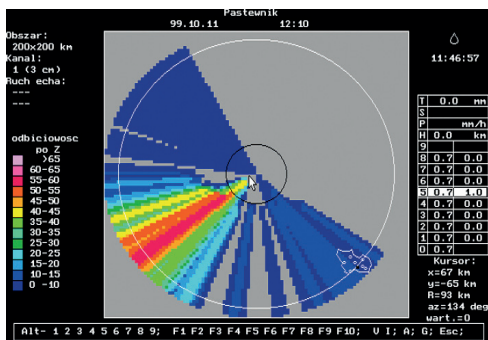
Każdy typ radaru charakteryzuje się określonym zasięgiem wykrywania zjawisk meteorologicznych. Ponieważ wiązka radarowa ma w zasadzie przebieg prostoliniowy, to wszystkie przeszkody terenowe, takie jak wzniesienia, góry, obszary silnie zurbanizowane powodują jej zakłócenia i przesłanianie wiązki (powstanie tzw. cienia radiolokacyjnego). Z tego też względu korzystniejsze jest lokowanie radarów na wzniesieniach, tak by efektywny zasięg wiązki był największy. Dla zapewnienia bezpiecznych warunków przebywania ludzi w otoczeniu radaru antenę montuje się zwykle na wieży o wysokości 20-35 m [Klejnowski, Królikowski 1995].

W 1999 r., w związku z planami rozbudowy sieci radarowej w najbliższej przyszłości, w pracowni radarowej Zakładu Aerologii opracowano, uruchomiono i przetestowano zestaw programów do analizy zakrycia horyzontu i występowania głównych ech stałych dla dowolnej lokalizacji radaru na podstawie numerycznego modelu terenu. Dzięki temu można było szybko (w ciągu 2-3 dni) przeanalizować wstępnie dowolną lokalizację radaru; wystarczyło podać jej dokładne współrzędne geograficzne.

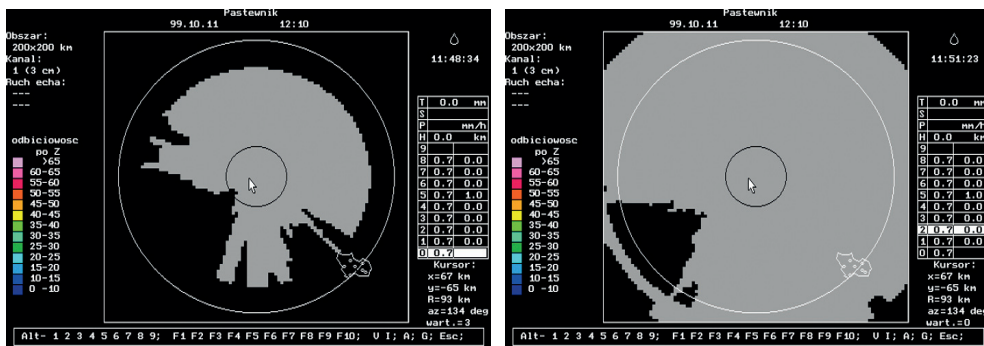
Za pomocą tych programów wykonano analizę lokalizacji istniejących radarów, tj. Legionowa, Ramży, Pastewnika (rys. 7.14), a także kilku (w tym alternatywnych) lokalizacji dla przyszłej sieci radarowej. Na podstawie pozyskanych danych z radaru Ramża pokazano, że program określania ech stałych dla dowolnej lokalizacji działa poprawnie.

Analiza lokalizacji dla lotniska w Rzeszowie-Jasionce wykazała, że miejsce to jest merytorycznie nienajlepsze. Przeanalizowano cztery alternatywne lokalizacje: Góra Chełm, Węglówka, Gwoźnica, Mosiny i okazało się, że są one korzystniejsze od lotniska w Rzeszowie.

Jednocześnie lokalizacje na lotniskach w Poznaniu-Ławicy i Gdańsku-Rębiechowie mogą być w pełni dopuszczone do budowania stacji radarowej [Moszkowicz 1999].



Rys. 7.14. Mapa symulacji kątów zakrycia horyzontu dla stacji Pastewnik



a)

b)

Rys. 7.15. Dostęp do danych (szare pole) z poziomu: a) wysokości 1000 m, b) wysokości 2000 m n.p.m. – dla stacji Pastewnik

W związku z planowaną rozbudową sieci radarowej programy mogły zostać praktycznie wykorzystane do analiz konkretnych lokalizacji radarów lub planowania ich w ramach programu rozbudowy sieci (SMOK).

Uwarunkowania terenowe (brak dróg dojazdowych, zasilania energetycznego, topologia terenu) oraz trudne do określenia możliwości uzyskania niezbędnych zgód organów samorządowych i państwowych utrudniały niejednokrotnie planowaną lokalizację radarów. W przypadku lokalizacji w okolicach Rzeszowa-Jasionki udało się te trudności pokonać. Podobnie było w przypadku: Poznania, Gdańska-Rębiechowa i Świdwina (lotnisko wojskowe).

8. Początki współpracy międzynarodowej

Postępujący rozwój meteorologii radarowej w Polsce oraz konstruowanie coraz lepszego sprzętu radarowego i opracowywanie oprogramowania obsługującego sieć radarową spowodowało, że zaczęto doceniać operacyjny dostęp do informacji radarowych.

W wielu krajach rosło ich znaczenie zarówno dla pracy operacyjnej, jak i badawczej. W początkowych latach pracy systemów radarowych nie było operacyjnej wymiany danych radarowych w skali międzynarodowej (ani nawet europejskiej). Zaczęto myśleć o tworzeniu europejskiej radarowej mapy zbiorczej, a im więcej krajów uczestniczyłoby w tym procesie, tym mniej znaczące stają się granice narodowych sieci radarowych i tym dokładniejsze mogłyby być prognozy. Zaowocowało to powstaniem wielu programów badawczych nakierowanych na współpracę międzynarodową dotyczącą wymiany danych radarowych. Koordynacja wymiany danych radarowych na skalę międzynarodową nie była łatwa. W różnych służbach stosowano nie tylko różne typy radarów, ale także tworzone różne produkty, różne były rozdzielczości przestrzenne i czasowe obserwacji. W Europie zawiązało się kilka grup koordynujących proces wymiany danych radarowych.

Do międzynarodowej wymiany danych radarowych Polska przyłączyła się w 1998 r., kiedy to dane z radaru LEG, a następnie RAM i PAS włączono do programów CERAD i BALTEX.

• CERAD (1990 - ...)

W roku 1990 Austrian Meteorological Institute (Austriacki Instytut Meteorologiczny) zlecił opracowanie Central European Weather Radar Network (Politechnice w Graz w Austrii).

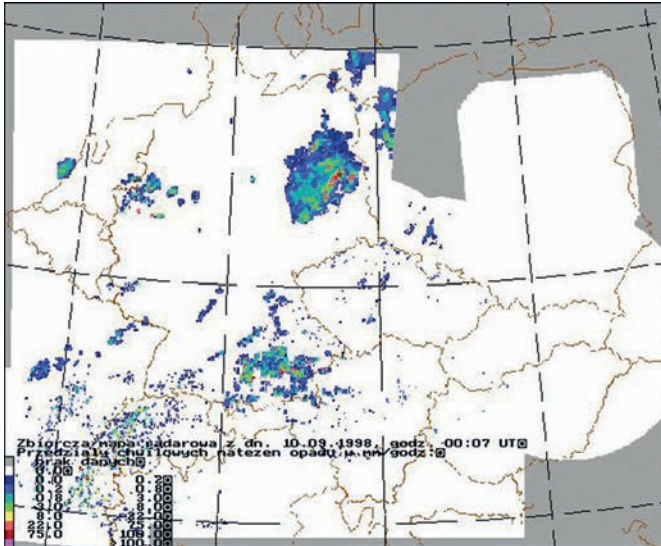
Pierwszym problemem projektu był format wymiany danych. Każdy producent radarów i niemalże każda narodowa sieć radarowa posługiwali się innym formatem. W celu umożliwienia wymiany niezbędne okazało się opracowanie nowego formatu, pozwalającego zakodować informacje radarowe tak, aby nie zajmowały one dużo miejsca (w tamtych latach prędkość transferu danych była poważnym ograniczeniem). Efektem było opracowanie oprogramowania do kodowania i dekodowania danych radarowych według kodu WMO FM-94 BUFR (wciąż udoskonalany, jest jednym ze standardów w operacyjnej wymianie danych).

Za pomocą programu opracowanego przez Konrada Koecka z Austrii kodowano dane i przesyłano do Wiednia, gdzie tworzone mapę zbiorczą Europy Środkowej. Już na początku (1995 r.) mapa swoim zasięgiem obejmowała znaczną część Europy. Zakodowane kodem BUFR dane do jej utworzenia przekazywano przez linie łączności GTS z: Austrii, Niemiec, Szwajcarii, Węgier, Czech, Słowacji, Polski, pół-

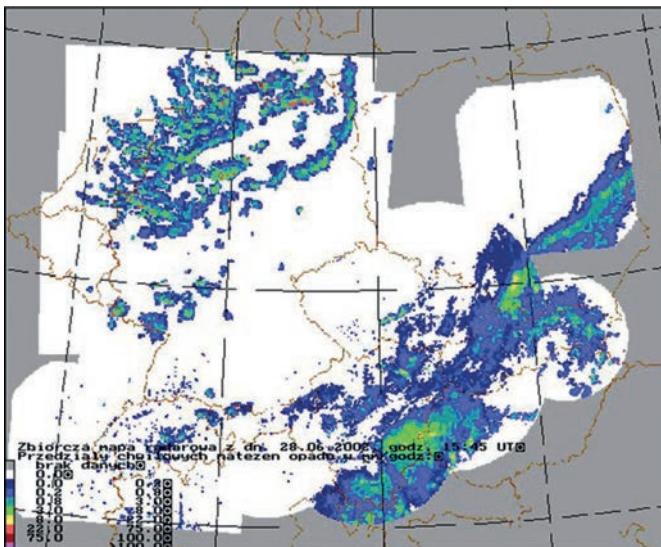
nocnych Włoch, Chorwacji i Słowenii, dostarczając ilość danych nieosiągalną przez nawet najbardziej rozwiniętą sieć narodową.

Pierwsze mapy rozpowszechniano wówczas z krokiem czasowym 30 min. Możliwe było tworzenie map natężeń opadów i odbiciowości. Na rys. 8.1 pokazano przykład środkowo-europejskiej mapy zbiorczej z 1998 r., kiedy Polska została włączona do wymiany danych.

Mapy zbiorcze (rys. 8.1 i 8.2), drogą zrotną, retransmitowane były (też za pomocą kodu BUFR) do krajów uczestników projektu [Moszkowicz, Tuszyńska 2003].



Rys. 8.1.
Zbiorcza mapa radarowa
CERAD z Europy
Środkowej z 10.04.1998 r.
godz. 00:07 UTC
(na mapie widać obszar
danych z radaru LEG)



Rys. 8.2.
Zbiorcza mapa radarowa
CERAD z Europy
Środkowej z 26.06.2002 r.,
godz. 15:45 UTC

- **GORN (1992-1998), OPERA (1999-...)**

W ramach EUMETNET w 1992 r. powołano projekt GORN (Liaison Group for Operational European Weather Radar Networking). Ośrodek Aerologii uczestniczył we współpracy międzynarodowej w ramach grupy GORN, zajmującej się tworzeniem podstaw do ogólnoeuropejskiej wymiany danych radarowych i komponowania zbiorczych map radarowych.

Na spotkaniu grupy łącznikowej operacyjnej sieci radarów meteorologicznych w październiku 1998 r. grupa GORN została przekształcona w bardziej sformalizowany program OPERA (Operational Programme for Exchanging Radar Information) organizacji EUMETNET, ustanowiony do operacyjnej wymiany danych radarowych. Pierwsza edycja programu OPERA działała w latach 1999-2003 (został przedłużony; początkowo do 2006 r.).

W ramach współpracy służb meteorologicznych krajów europejskich projekt zajmował się przede wszystkim uzgadnianiem standardów wymiany danych radarowych w Europie, przy wykorzystaniu meteorologicznej sieci telekomunikacyjnej GTS.

W ramach projektu OPERA uzyskano uzgodniony standard do korzystania z kodu BUFR – zasady i programy kodowania i dekodowania depesz do przekazywania danych o natężeniu opadu i odbiciowości. Zostały one przyjęte, jako standard dla Europy. Do podstawowych celów projektu należało:

- uzgodnienie wspólnych specyfikacji dotyczących zarówno sprzętu, jak i oprogramowania radarowego, stanowiących pomocne opracowania,
- ustanowienie wspólnych standardów dla metod wymiany danych – uzgodnienie danych i formatu plików do wymiany międzynarodowej; opracowany na początku lat 90. format BUFR był dalej udoskonalany w celu dostosowania istniejących już formatów do możliwości kodowania danych radarowych (nowych produktów) i ewentualnego stworzenia nowego formatu, następcy BUFR,
- tworzenie i wdrażanie metod kontroli jakościowej danych,
- uzgodnienie strategii archiwizacji dla wymiany międzynarodowej, np. do celów badawczych, aby zawsze i wszędzie naukowiec był w stanie bez problemów połączyć je w całość i dokonywać analiz danych.

Od 2004 r. rozpoczyna działalność program OPERA II. Jednym z najważniejszych celów i zalet programu jest możliwość nawiązywania dwustronnych, sformalizowanych umów odnośnie do międzynarodowej wymiany danych [Lewandowski, Szewczykowski 2005].

- **BALTEX (Baltic Sea Experiment) – 1996**

Od 1996 r. funkcjonowała radarowa grupa robocza WGR (Working Group on Radar), której przewodniczył Jarmo Koistinen z Finlandii.

W wyniku prac WGR utworzona została sieć radarowa BALTRAD, obejmująca wszystkie radary w obrębie zlewni Bałtyku, na terenie krajów członkowskich BAL-TEX-u. W ramach prac WGR w 1999 r. utworzono bazę danych radarowych BRDC (BALTEX Radar Data Centre). Dane te archiwizowano i udostępniano innym krajom do celów badawczych. Do programu w 2000 r. przyłączyła się również Polska.

- **NORDRAD – 2002**

Projekt NORDRAD został zainicjowany przez służby hydrologiczne i meteorologiczne krajów skandynawskich w 2002 r.

W tym samym roku w Helsinkach odbyła się pierwsza konferencja projektu, w której udział wzięli również przedstawiciele IMGW. W oryginalnym założeniu program powstał w celu kontroli jakości danych z radarów meteorologicznych oraz wymiany danych pomiędzy sieciami krajów skandynawskich: Norwegii, Szwecji i Finlandii. Jednak zarówno zakres programowy, jak i liczba krajów zaangażowanych w projekt uległy szybkiemu poszerzeniu. Z programem NORDRAD, oprócz krajów skandynawskich, współpracują przedstawiciele krajów bałtyckich: Niemiec, Estonii, Polski, przedstawiciele Wielkiej Brytanii i Holandii (program jest otwarty).

Państwowa Służba Hydrologiczno-Meteorologiczna od początku brała czynny udział w projekcie. W warsztatach NORDRAD-u w 2004 r. (Dania) wziął udział przedstawiciel IMGW. Do jego zadań należało m.in. zaprezentowanie aktualnego (na 2004 r.) statusu Polskiej Sieci Radarów Meteorologicznych.

Warsztaty NORDRAD stanowiły również doskonałą bazę do nawiązania i rozwoju współpracy bilateralnej z krajami nadbałtyckimi w zakresie wymiany danych oraz nowoczesnych rozwiązań informatycznych związanych z utrzymaniem sieci radarowej.[Lewandowski, Szewczykowski 2005]

- Programy badawczo-rozwojowe serii **COST** (1999-...)

COST (European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research) to organizacja europejska (związana z UE, ale nie podlegająca jej) zajmująca się współpracą naukowo-techniczną w wielu dziedzinach.

W jej ramach było już kilka programów odnoszących się do meteorologii radarowej: COST 75 (Tworzenie sieci radarowych), COST 78 (Prognozy natychmiastowe), od 2002 r. trwała akcja COST 717 (Zastosowanie danych radarowych w modelach hydrologicznych i numerycznych modelach prognoz pogody). Prace polskiego zespołu w ramach COST były dofinansowane przez KBN.

- Projekt **MUSIC** (2001-2004)

MUSIC (Multi-sensor precipitation measurements integration, calibration and flood forecasting), który był finansowany z 5. Programu Ramowego Unii Europejskiej.

Do zadań IMGW (od 2002 r.) należało między innymi gromadzenie i testowanie danych wejściowych, testowanie oprogramowania do łączenia danych opadowych naziemnych i radarowych, testowanie modelu hydrologicznego opad-odpływ oraz modułu przestrzennej wizualizacji danych hydrometeorologicznych.

9. Sieć radarów meteorologicznych – POLRAD

9.1. Perspektywy pozyskania nowych radarów

Punktem zwrotnym w historii polskiej sieci radarów meteorologicznych była powódź w lipcu 1997 r. w południowym dorzeczu Odry i Wisły. Pokazała, jak duże znaczenie dla sprawnego prowadzenia osłony hydrologiczno-meteorologicznej i wczesnego ostrzegania ma wiedza o zasięgu i intensywności opadów oraz występowaniu groźnych zjawisk atmosferycznych.

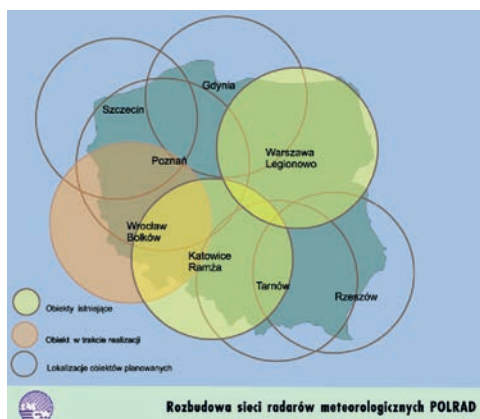
Podążając za programem modernizacji Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej, zaakceptowanym w 1994 r. przez Radę Naukową IMGW i Ministra Środowiska, i po powodzi w 1997 r. Rząd Rzeczypospolitej Polskiej wystąpił z inicjatywą zaciągnięcia w Banku Światowym pożyczki na likwidację skutków powodzi oraz na przygotowanie systemów osłony i ochrony przed następnymi.

Jednocześnie dotychczasowe doświadczenie pokazało, że pojedyncze autonomicznie pracujące radary meteorologiczne zapewniają osłonę hydrologiczną i meteorologiczną tylko w obszarze ich zasięgu (w promieniu 200-250 km od radaru). Efektywna osłona przed zdarzeniami meteorologicznymi w skali makro możliwa jest jedynie w przypadku połączenia radarów w jedną całość, w taki sposób, aby powstały produkt był wypadkową zebranych przez nie informacji. Wówczas dodatkową korzyścią z funkcjonowania sieci radarowej jest możliwość śledzenia tych samych struktur meteorologicznych równocześnie przez dwa lub nawet trzy radary, co wielokrotnie zwiększa prawdopodobieństwo wykrycia groźnych zjawisk i opracowania właściwego systemu ostrzegania.

Umowa kredytowa na *Projekt likwidacji skutków powodzi* została podpisana 23 grudnia 1997 r., a 19 maja 1999 r. Rząd RP powierzył realizację jednego z komponentów (B.2) Instytutowi Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Realizowany był on pod nazwą „System Monitoringu i Osłony Kraju” (SMOK).

Jednym z podkomponentów projektu SMOK był rozwój i modernizacja systemu POLRAD, składającego się wówczas z trzech radarów meteorologicznych – dostarczających danych o intensywności opadów atmosferycznych oraz prędkości i kierunku przemieszczania się stref opadów na potrzeby bieżącej pracy operacyjnej IMGW.

W pierwszej fazie projekt przewidywał wdrożenie do służby operacyjnej nowych urządzeń wyposażonych w nowoczesne dopplerowskie radary meteorologiczne, modernizację już istniejących oraz ich wzajemną integrację. Docelowo miało to być osiem obiektów radarowych. W następnych etapach zakładano sprzężenie funkcjonalne systemu radarowego z innymi systemami automatycznych pomiarów i prognoz meteorologicznych oraz hydrologicznych.



Rys. 9.1. Projekt sieci POLRAD
 źródło: [Klejnowski 2000]

środków Banku Światowego. Przetarg międzynarodowy wygrał niemiecki producent radarów meteorologicznych – GEMATRONIK GmbH. W związku z powyższym cała sieć radarowa oparta została na sprzęcie i oprogramowaniu jednej firmy [Klejnowski 2000].

Dnia 29 grudnia 2000 r. podpisano kontrakt z firmą GEMATRONIK GmbH na rozbudowę i modernizację sieci radarów meteorologicznych POLRAD. Po wpłaceniu przez IMGW zaliczki (3 lipca 2001 r.) kontrakt wszedł w życie. Przyjęty został (formalnie) harmonogram realizacji prac. Podwykonawcą GEMATRONIK GmbH od strony realizacji inwestycji było Przedsiębiorstwo Komplektacji i Dostaw Elektroniki Profesjonalnej RADWAR.

Rozbudowa sieci radarów meteorologicznych w ramach systemu POLRAD była jednym z ważniejszych zadań SMOK.

W celu realizacji zadań związanych z koordynacją prac przy tworzeniu sieci 1 marca 2002 r. powołano Zespół do spraw Organizacji Centrum Sieci Radarów

Rys. 9.2. Podpisanie kontraktu (od lewej):
 Ryszard Klejnowski (z-ca Dyrektora, Główny Synoptyk Meteorologiczny IMGW),
 Christell Niewoehner (przedstawicielka firmy GEMATRONIK GmbH),
 Jan Zieliński (Dyrektor IMGW),
 Roman Skąpski (z-ca Dyrektora ds. Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej, IMGW),
 fot. Elżbieta Klejnowska





Rys. 9.3. Centrum radarowe przy IMGW: a) wbudowanie aktu erekcyjnego w pomieszczeniu przeznaczonym na Centrum Radarowe – 2000 r.; wmurowania dokonuje Jan Zieliński (Dyrektor IMGW), b) uroczyste otwarcie Radarowego Centrum Operacyjnego – 2005 r.; przecięcia wstęgi dokonuje Patric Obasi (sekretarz WMO), c) sala szkoleniowa przy RCO – 2005 r.; prezentacji dokonuje Ryszard Klejnowski (z-ca Dyrektora, Główny Synoptyk Meteorologiczny – IMGW), fot. *Elżbieta Klejnowska*

Meteorologicznych POLRAD. W czerwcu 2002 r. zespół powiększono o nowych pracowników. W dniach 3-14 czerwca 2002 r. zespół (6 osób) przebywał w Neuss (Niemcy) w celu przeszkolenia z zakresu oprogramowania RAINBOW funkcjonującego na nowych radarach. Szkolenie obejmowało swym zakresem następujące bloki tematyczne: podstawy meteorologii radarowej, zarządzanie pracą radaru, interpretacja danych i produktów skanowania dopplerowskiego, optymalizacja strategii skanowania. W tym czasie służbę w Pracowni Radarowej pełnili nowo przyjęci pracownicy.

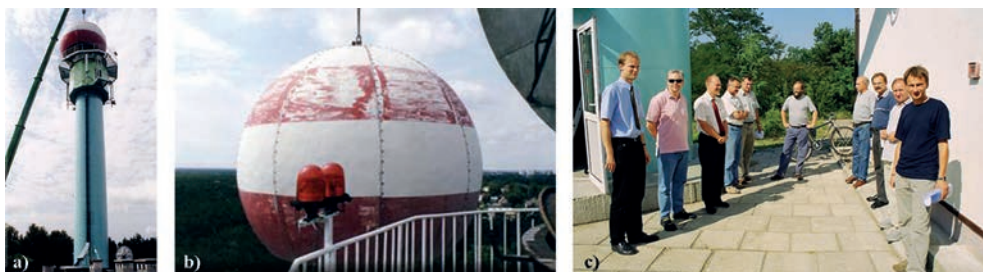
W lipcu nastąpiło otwarcie Radarowego Centrum Operacyjnego, zlokalizowanego w budynku głównym IMGW. Na początku lipca 2002 r. zespół przeniósł się do zmodernizowanego skrzydła budynku IMGW, w którym w ramach projektu powstał również ośrodek szkoleniowy wraz z zapleczem pokoi gościnnych dla uczestników kursów.

9.2. Budowa i modernizacja sieci radarowej POLRAD

Rozbudowę i modernizację sieci radarów rozpoczęto od radaru Legionowo, gdzie na starej konstrukcji wieży radarowej (po modernizacji jej pomieszczeń) zainstalowano zupełnie nowe urządzenia. Następnie zaplanowano budowę od podstaw stacji radarowych w Rzeszowie, Poznaniu, Świdwinie, Gdańsku i Brzuchani. Do modernizacji przewidziano radary na Ramży i w Pastewniku.

9.2.1. Radar meteorologiczny Meteor 1500C w Legionowie – LEG

Począwszy od 2.07.2002 r. przestał operacyjnie pracować radar MRŁ-5. Rozpoczęto wymianę starego urządzenia na nowe: dopplerowski radar meteorologiczny z nadajnikiem klistronowym – Meteor 1500C.



Rys. 9.4. Demontaż kopuły radaru MRŁ-5 (a i b), c) (od lewej) Harcus Hille, przedstawiciel firmy GEMATRONIK, Krzysztof Świtalski i Asko Huskonen, przedstawiciel firmy SOGRE-AH, przedstawiciele firmy RADWAR oraz pracownicy Pracowni Radarowej (od prawej) Rafał Lewandowski i Zdzisław Wiktorowicz oraz pracownicy obsługi technicznej Zakładu Aerologii przed budynkami stacji radarowej w Legionowie

Już w dniach 21-23 sierpnia 2002 r. został przeprowadzony test SAT (Site Acceptance Test) sprzętu radarowego i oprogramowania RAINBOW. Od 24.08.2002 r. nowy radar w Legionowie rozpoczął pracę w trybie testowym pod nadzorem „starego” zespołu Pracowni Radarowej Zakładu Aerologii. Natomiast 25 września 2002 r. nastąpiło uroczyste otwarcie stacji radarowej w Legionowie przez ministra Stanisława Żelichowskiego.

Po raz pierwszy produkty z dopplerowskiego radaru w Legionowie zostały zaprezentowane szerszemu gronu społeczeństwa podczas VI Festiwalu Nauki w 2002 r. Pracownicy Instytutu omówili wówczas aktualny stan sieci radarowej w IMGW, plany jej rozbudowy w ramach SMOK i zapoznali uczestników z zasadami interpretacji danych radarowych oraz możliwościami ich wykorzystania w innych dziedzinach życia społecznego (nie tylko do osłony hydrologiczno-meteorologicznej).



Rys. 9.5. Montaż elementów anteny nowego radaru na wieży w Legionowie

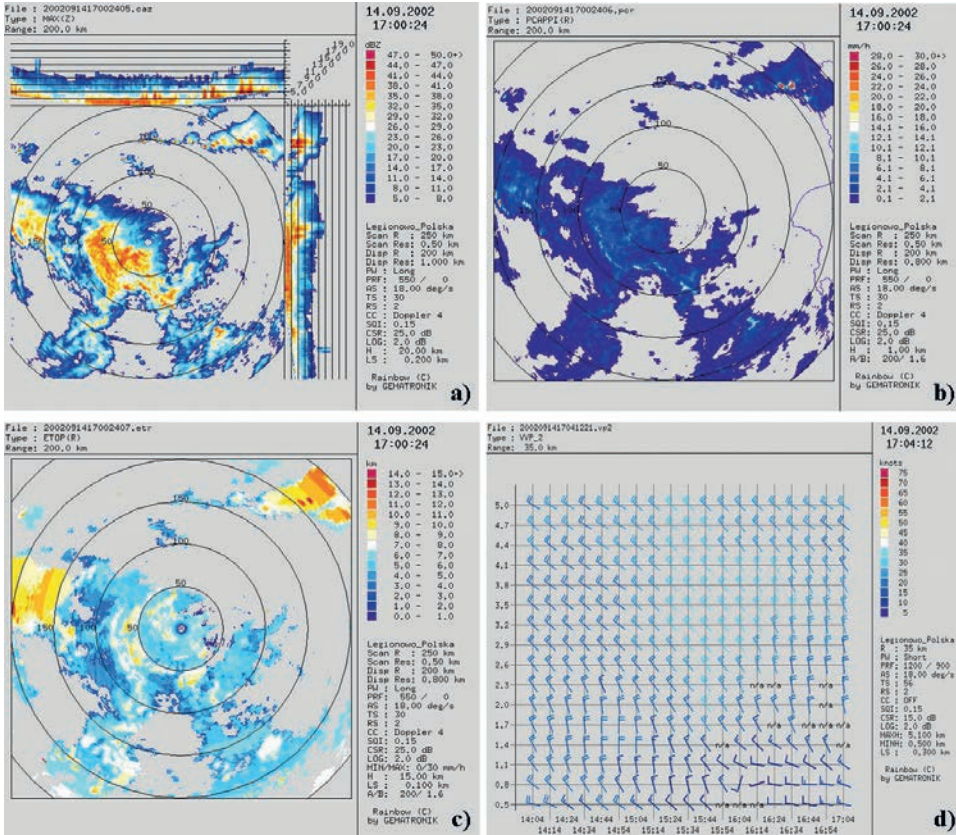


Rys. 9.6. VI Festiwal Nauki w IMGW, wrzesień 2002 r. (prezentacji dokonuje Zdzisław Dziewit – kierownik RCO)

Redystrybucją danych z radaru: LEG, RAM i PAS do użytkowników końcowych, poza IMGW, zajmowała się wówczas firma RAFOT (patrz rozdz. 5.5), wykorzystując opracowany przez nią system TELESEND (patrz rozdz. 5, rys. 5.19).

Tab. 9.1. Charakterystyka techniczna radaru w Legionowie

Radar meteorologiczny typu METEOR 1500 C		
Parametry	Jednostka	Wartość
Współrzędne geograficzne	stopnie	52°24'19" 20°57'39"
	dziesiętne	52,40528 20,96083
Wysokość posadowienia	[m] n.p.m.	90
Wysokość wieży radarowej (do środka elektrycznego anteny)	[m] n.p.t.	29,34
Zasięg instrumentalny	[km]	250
Dane techniczne nadajnika		
Częstotliwość pracy	[MHz]	5650
Moc w impulsie	[kW]	$P_{imp} = 250$
Częstotliwość powtarzania	[Hz]	$f_{powt.} = 250-1200$
Czas trwania impulsu	[μ s]	$t_{imp} = 0,8-2$
Typ nadajnika	–	klistronowy
Dane techniczne anteny		
Rodzaj i typ anteny	–	paraboliczna
Typ polaryzacji	–	liniowa pozioma
Średnica anteny	[m]	$d = 4,2$
Szerokość wiązki	[°]	1
Kąt elewacji anteny	[°]	0-180
Kąt azymutu anteny	[°]	0-360
Tłumienie listków bocznych	[dB]	30



Rys. 9.7. Jedne z pierwszych map opracowanych na podstawie danych radaru dopplerowskiego zainstalowanego w Legionowie (14.04.2002 r., godz. 17:00 GMT): a) maksymalne wartości wartości odbiowości radarowej, b) natężenie opadu, c) wysokości wierzchołków echa radarowego, d) profile pionowe wiatru nad stacją radarową w godzinach od 14:04 do 17:04 GMT

Po uruchomieniu radaru Meteor 1500C w Legionowie, dnia 1 października 2002 r., w miejsce Zespołu ds. Organizacji Centrum Radarów Meteorologicznych POLRAD powołano Radarowe Centrum Operacyjne IMGW. Jednocześnie przeniesiono zarządzanie radarami z Legionowa do Warszawy, do zmodernizowanego skrzydła budynku IMGW.

Od grudnia 2002 r. w RCO rozpoczęto całodobowy nadzór nad funkcjonowaniem radarów.

9.2.2. Radar meteorologiczny Meteor 1500C w Rzeszowie – RZE

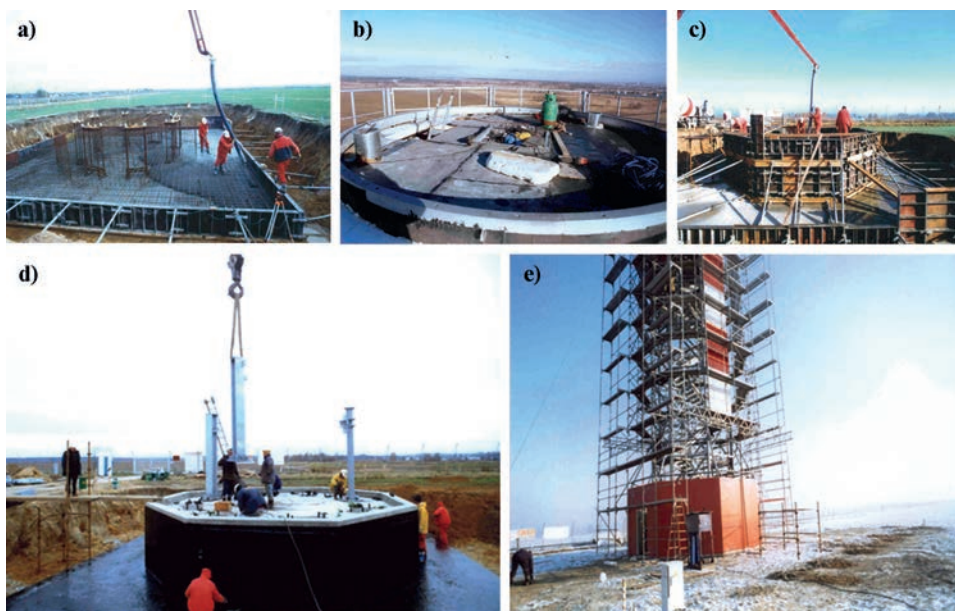
Po wyborze lokalizacji, dzięki współpracy i przychylnemu stanowisku Przedsiębiorstwa Państwowego „Porty Lotnicze”, Agencji Ruchu Lotniczego, dyrekcji Portu

Lotniczego Rzeszów-Jasionka, marszałka województwa podkarpackiego i władz lokalnych, jesienią 2002 r. ruszyła budowa obiektu przeznaczonego na radar meteorologiczny [Klejnowska 2003, folder IMGW; radar Rzeszów]. Roboty na placu budowy nowego radaru (rys. 9.8) rozpoczęto od wykonania zbrojonego fundamentu i cokołu wieży. Dostarczone wyposażenie radarowe rozładowano i zmagazynowano na terenie lotniska. W październiku miał miejsce montaż konstrukcji stalowej, rusztowań wokół wieży. Następnie rozpoczęto montaż obudowy i dalszych elementów wieży radarowej. Był to pierwszy radar w ramach sieci POLRAD budowany od podstaw.

Zakończenie budowy wieży i zamontowanie urządzenia radarowego nie oznaczało jeszcze rozpoczęcia badań atmosfery. Na realizatorów czekało jeszcze szereg formalnych kroków.

Powiadomienie o zakończeniu budowy i zamiarze przystąpienia do użytkowania wysłano do:

- Inspekcji Ochrony Środowiska,
- Komendy Straży Pożarnej,
- Państwowej Inspekcji Pracy (opinia bez sprzeciwu z 24.04.03 r.),

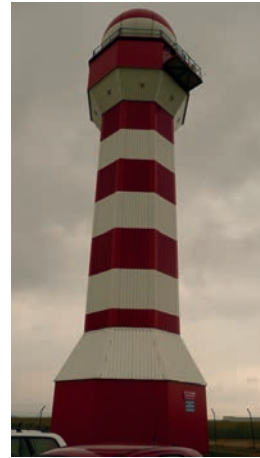


Rys. 9.8. Budowanie fundamentu pod wieżę radarową w Rzeszowie-Jasionce: a) zbrojenie płyty fundamentowej; początek betonowania, b) strop nad pomieszczeniem dla urządzeń radaru; widoczny pierścień stalowy pod konstrukcją nośną radaru, c) deskowanie korpusu fundamentu w trakcie betonowania, d) montaż pierwszych słupów, e) widok zmontowanej na fundamencie konstrukcji wieży radarowej i wykonywanie jej obudowy, fot. *Raport z postępu prac Nr 3, Nr 4 i Nr 5 Nr 6, SMOK*

- Inspektora Sanitarnego (załączono kopię protokołu pomiarów pola elektromagnetycznego).

W kwietniu 2003 r. wystąpiono do Wydziału Ochrony Środowiska Urzędu Wojewódzkiego o pozwolenie na emisję promieniowania elektromagnetycznego; załączono kopię protokołu pomiarów pola elektromagnetycznego (podobne procedury obowiązywały także dla kolejno oddawanych do użytku stacji radarowych).

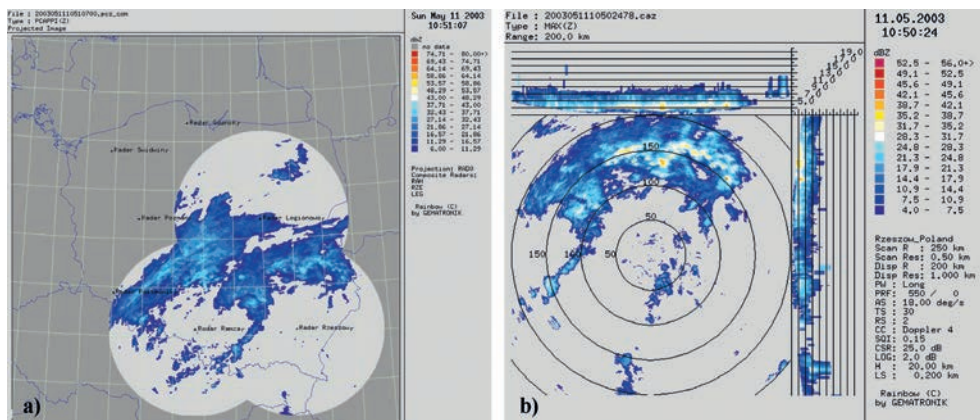
Wreszcie pod koniec kwietnia 2003 r. radar (rys. 9.9) przeszedł testy akceptacyjne i zaczął pracować operacyjnie, dostarczając danych meteorologicznych, które za pomocą łączny satelitarnych przesyłano do Radarowego Centrum Operacyjnego. W dniach 23-24 kwietnia 2003 r. zostały pomyślnie przeprowadzone testy SAT dla tego radaru.



Rys. 9.9. Stacja radarowa Rzeszów

Tab. 9.2. Charakterystyka techniczna radaru METEOR 1500C w Rzeszowie

Radar meteorologiczny typu METEOR 1500C		
Parametry	Jednostka	Wartość
Współrzędne geograficzne	[°]	50°06'51'' 22°00'09''
	dziesiętne	50,11417 22,00250
Wysokość posadowienia	[m] n.p.m.	211
Wysokość wieży radarowej (do środka elektrycznego anteny)	[m] n.p.t.	30
Zasięg instrumentalny	[km]	250
Dane techniczne nadajnika		
Częstotliwość pracy	[MHz]	5650
Moc w impulsie	[kW]	$P_{imp} = 250$
Częstotliwość powtarzania	[Hz]	$f_{powt.} = 250-1200$
Czas trwania impulsu	[μ s]	$t_{imp} = 0,8-2$
Typ nadajnika	–	klistronowy
Dane techniczne anteny		
Rodzaj i typ anteny	–	paraboliczna
Typ polaryzacji	–	liniowa pozioma
Średnica anteny	[m]	$d = 4,2$
Szerokość wiązki	[°]	1
Kąt elewacji anteny	[°]	0-180
Kąt azymutu anteny	[°]	0-360
Tłumienie listków bocznych	[dB]	30



Rys. 9.10. Radarowa mapa zbiorcza odbiciowości (dla wysokości 700 m) z trzech radarów: RAM, LEG, RZE i mapa maksymalnych wartości odbiciowości dla stacji RZE z 11 maja 2003 r., godz. 10:50 UTC¹⁰

W dniach 24-27 czerwca 2003 r. zainstalowane zostało w RCO nowe oprogramowanie systemu RAINBOW (wersja 5.0) służące do: sterowania siecią radarową, kontrolowania jej pracy oraz przetwarzania i wizualizacji danych radarowych.

9.2.3. Radar meteorologiczny Meteor 500C w Poznaniu – POZ

W wyniku długotrwałego procesu wyboru i optymalizacji miejsca budowy radaru, dzięki współpracy i przychylnemu stanowisku Przedsiębiorstwa Państwowego „Porty Lotnicze”, Agencji Ruchu Lotniczego, dyrekcji Portu Lotniczego w Poznaniu, starosty poznańskiego, wójta gminy Tarnowo Podgórne i Nadleśnictwa Konstantynowo – jesienią 2002 r. rozpoczęto budowę obiektu w Poznaniu (rys. 9.11 i 9.12) [Klejnowska 2003, folder IMGW, radar Poznań].

Poznański radar meteorologiczny jest zlokalizowany w południowo-wschodniej części Wysogotowa, tuż przy granicy Poznania (w pobliżu lotniska Ławica); gmina Tarnowo Podgórne; w pobliżu radaru kontroli ruchu lotniczego „AVIA”.

W dniach 4-5 czerwca 2003 r. zostały pomyślnie przeprowadzone testy SAT dla poznańskiego radaru, a 3 lipca 2003 r. miała miejsce uroczysta inauguracja (rys. 9.13). Dane z radaru POZ dołączono do radarowej mapy zbiorczej, która składała się już z danych pozyskanych z 5 radarów (rys. 9.14).

¹⁰ Mapy zbiorcze i mapy maksymalnych odbiciowości prezentowane są w tej samej paletce barw, z tym że mapy zbiorcze wyświetlane są w zakresie wartości od 6-5 dBZ do 80 dBZ, a mapy maksymalnych wartości z pojedynczych radarów w skali od 4 dBZ do 56 dBZ.



Rys. 9.11. Rozpoczęcie budowy radaru w Poznaniu: a) i b) tablice informacyjne na obiekcie: inwestor i główni wykonawcy, c) plac budowy – widok dolnej konstrukcji wieży, fot. *Raport z postępu prac Nr 4, SMOK*

Tab. 9.3. Charakterystyka techniczna radaru METEOR 500C w Poznaniu

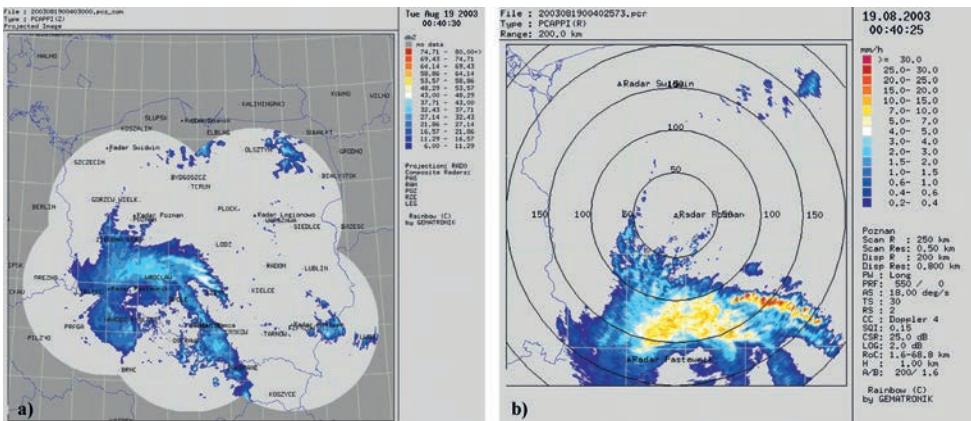
Radar meteorologiczny typu METEOR 500C		
Parametry	Jednostka	Wartość
Współrzędne geograficzne	[°]	52°24'47,73" 16°47'49,4"
	dziesiętne	52,41326 16,79706
Wysokość posadowienia	[m] n.p.m.	88
Wysokość wieży radarowej (do środka elektrycznego anteny)	[m] n.p.t.	35
Zasięg instrumentalny	[km]	250
Dane techniczne nadajnika		
Częstotliwość pracy	[MHz]	5660
Moc w impulsie	[kW]	$P_{imp} = 250,4$
Częstotliwość powtarzania	[Hz]	$f_{powt.} = 250-1200$
Czas trwania impulsu	[μ s]	$t_{imp} = 0,8-2$
Typ nadajnika	–	magnetron typu SFD 34G
Dane techniczne anteny		
Rodzaj i typ anteny	–	paraboliczna
Typ polaryzacji	–	liniowa pozioma
Średnica anteny	[m]	$d = 4,2$
Szerokość wiązki	[°]	1
Kąt elewacji anteny	[°]	0-180
Kąt azymutu anteny	[°]	0-360
Tłumienie listków bocznych	[dB]	<30



Rys. 9.12. Montaż wieży radarowej: a) początek operacji podnoszenia części górnej wieży, b) i c) moment przed ustawieniem części górnej na części dolne, d) zakończenie ustawienia, fot. Raport z postępy prac Nr 7, SMOK



Rys. 9.13. Uroczysta inauguracja stacji radarowej w Poznaniu: a) Krzysztof Szamałek (Główny Geolog Kraju), Roman Skąpski (z-ca Dyrektora IMGW ds. Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej), b) wieża radarowa POZ



Rys. 9.14. Radarowa mapa zbiorcza odbiciowości (dla wysokości 700 m) z pięciu radarów: RAM, PAS, LEG, RZE, POZ oraz mapa maksymalnych wartości odbiciowości dla stacji POZ z 19 sierpnia 2003 r., godz. 00:40 UTC

9.2.4. Radar meteorologiczny Meteor 500C w Świdwinie – SWI

Po długotrwałym procesie wyboru miejsca lokalizacji i budowy radaru, dzięki współpracy i przychylnemu stanowisku Ministra Obrony Narodowej, Dowództwa Wojsk Lotniczych i Obrony Powietrznej, 21 Bazy Lotniczej w Świdwinie, Oddziału Służby Meteorologicznej WLOP i władz lokalnych w Świdwinie – na początku 2003 r. rozpoczęto prace budowlane [Klejnowska 2003, folder IMGW, radar Świdwin]. Ostatecznie zdecydowano się na lokalizację radaru w miejscowości Niemierzyno (powiat Świdwin, 6 km na północny wschód od Świdwina), na obszarze lotniska 21 Bazy Lotniczej w Świdwinie. Proces inwestycyjny, instalację urządzeń, kopuły radarowej (rys. 9.16), kalibrację i dopuszczenia do eksploatacji radaru zakończono w sierpniu 2003 r.

W dniach 6-7 sierpnia 2003 r. zostały pomyślnie przeprowadzone testy SAT. Radar (rys. 9.17) rozpoczął pracę operacyjną, przysyłając zebrane dane do RCO w Warszawie. Dnia 3 września nastąpiła uroczysta inauguracja stacji w Świdwinie. Dane radarowe włączono do mapy zbiorczej w systemie POLRAD (rys. 9.16).

Od września 2003 r. udostępniano w SOK wybrane produkty z 6 radarów, a w Internecie pojawiła się nowa zbiorcza mapa radarowa (rys. 9.18).



Rys. 9.15. Zwieńczenie części górnej wieży, na której zainstalowane będą urządzenia radarowe: radar i antena osłonięta kopułą.

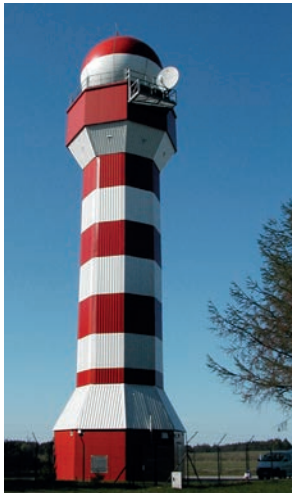
fol. Raport z postępu prac Nr 9, SMOK



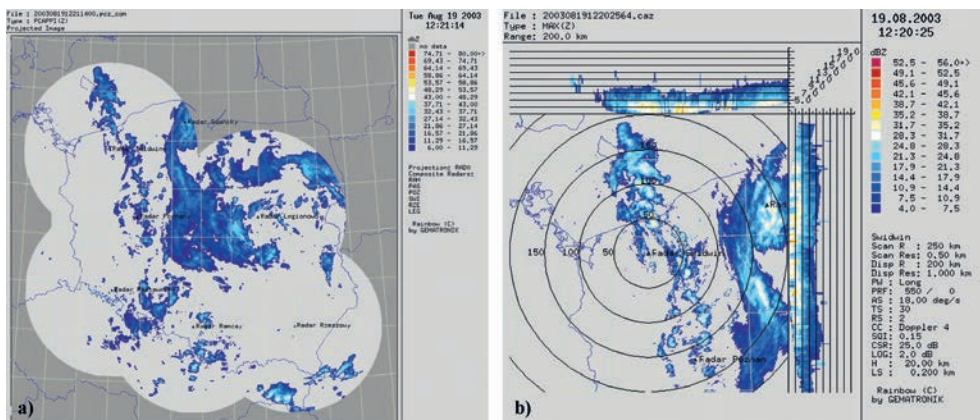
Rys. 9.16 . Montaż kopuły osłaniającej antenę radaru – stacja Świdwin

Tab. 9.4. Charakterystyka techniczna radaru METEOR 500C w Świdwinie

Radar meteorologiczny typu METEOR 500C		
Parametry	Jednostka	Wartość
Współrzędne geograficzne	[°]	53°47'25" 15°49'51,9"
	dziesiętne	53,79028 15,83111
Wysokość posadowienia	[m] n.p.m.	116
Wysokość wieży radarowej (do środka elektrycznego anteny)	[m] n.p.t.	30
Zasięg instrumentalny	[km]	250
Dane techniczne nadajnika		
Częstotliwość pracy	[MHz]	5660
Moc w impulsie	[kW]	$P_{imp} = 250$
Częstotliwość powtarzania	[Hz]	$f_{powt.} = 250-1200$
Czas trwania impulsu	[μ s]	$t_{imp} = 0,8-2$
Typ nadajnika	–	magnetron typu SFD 341G
Dane techniczne anteny		
Rodzaj i typ anteny	–	paraboliczna
Typ polaryzacji	–	liniowa pozioma
Średnica anteny	[m]	$d = 4,2$
Szerokość wiązki	[°]	1
Kąt elewacji anteny	[°]	0-180
Kąt azymutu anteny	[°]	0-360
Tłumienie listków bocznych	[dB]	<30



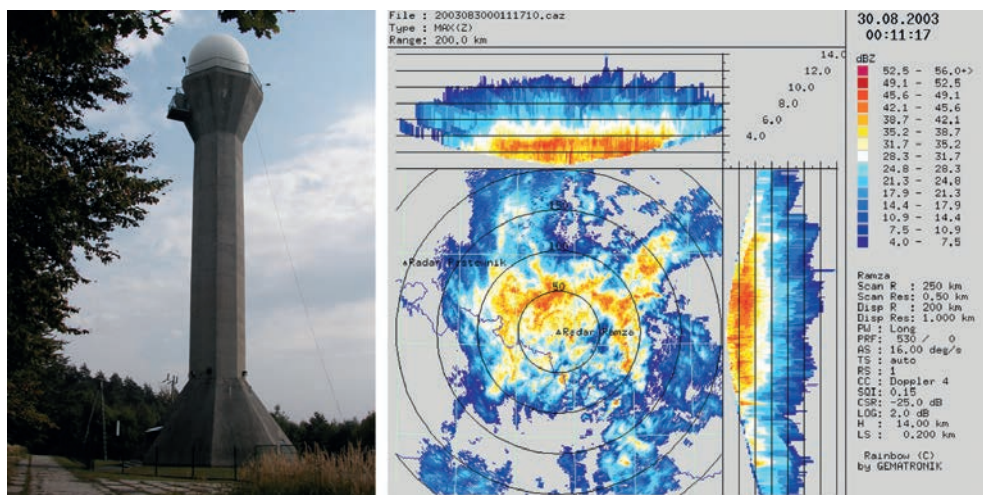
Rys. 9.17. Stacja radarowa w Świdwinie



Rys. 9.18. Radarowa mapa zbiorcza odbiciowości (dla wysokości 700 m) z sześciu radarów: RAM, PAS, LEG, RZE, POZ, SWI oraz mapa maksymalnych wartości odbiciowości dla stacji SWI z 19 sierpnia 2003 r., godz. 12:20

9.2.5. Modernizacja radarów na stacji RAM i PAS

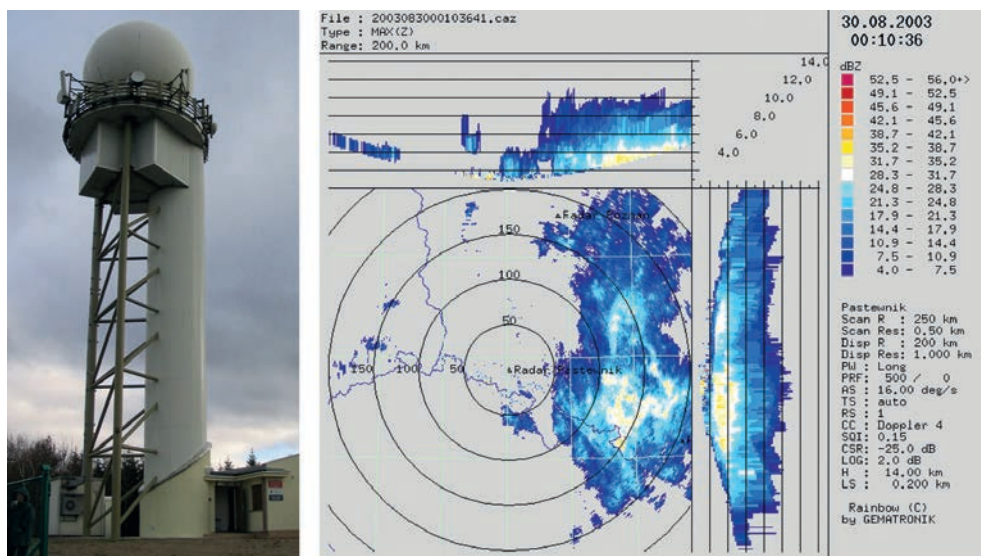
Prace modernizacyjne na stacjach Pastewnik i Ramża związane były z adaptacją obiektów i pracujących na nich radarów dopplerowskich do nowego systemu (także do pracy z nowym oprogramowaniem). Główne prace techniczne na istniejących obiektach to między innymi: adaptacja instalacji elektrycznej w związku z montażem zespołu agregatu prądotwórczego i UPS (instalacja bezprzewodowego



Rys. 9.19. Wieża radarowa po modernizacji i mapa maksymalnych wartości odbiciowości z 30 sierpnia 2003 r., pozyskana po uruchomieniu nowego oprogramowania (RAINBOW) sytemu na stacji RAM

Tab. 9.5. Charakterystyka techniczna radaru METEOR 360AC na Ramży

Radar meteorologiczny typu METEOR 360AC		
Parametry	Jednostka	Wartość
Współrzędne geograficzne	[°]	50°09'06" 18°43'36"
	dziesiętne	50,15167 18,72667
Wysokość posadowienia	[m] n.p.m.	322
Wysokość wieży radarowej (do środka anteny)	[m] n.p.t.	36,4
Zasięg instrumentalny	[km]	250
Częstotliwość pracy	[MHz]	5660
Maksymalna moc wysokiej częstotliwości	[kW]	250
Częstotliwość powtarzania	[Hz]	250-1200
Czas trwania impulsu	[μs]	0,8-2
Kąt elewacji anteny	[°]	0-90
Kąt azymutu anteny	[°]	0-360
Tłumienie listków bocznych	[dB]	<30
Typ polaryzacji	-	liniowa-pozioma
Typ generatora fali	-	magnetron



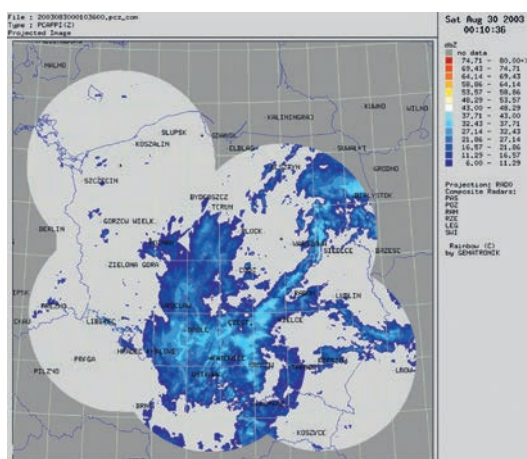
Rys. 9.20. Zdjęcie wieży radarowej po modernizacji i mapa maksymalnych wartości odbiciowości z 30 sierpnia 2003 r., pozyskana po uruchomieniu nowego oprogramowania (RAINBOW) sytemu na stacji PAS

Tab. 9.6. Charakterystyka techniczna radaru METEOR 360AC w Pastewniku

Radar meteorologiczny typu METEOR 360AC		
Parametry	Jednostka	Wartość
Współrzędne geograficzne	[°]	50°52'58" 16°02'22,9"
	dziesiętne	50,88278 16,03972
Wysokość posadowienia	[m] n.p.m.	668
Wysokość wieży radarowej (do środka anteny)	[m] n.p.t.	23,4
Zasięg instrumentalny	[km]	250
Częstotliwość pracy	[MHz]	5660
Maksymalna moc wysokiej częstotliwości	[kW]	250
Częstotliwość powtarzania	[Hz]	250-1200
Czas trwania impulsu	[μs]	0,8-2
Kąt elewacji anteny	[°]	0-90
Kąt azymutu anteny	[°]	0-360
Tłumienie listków bocznych	[dB]	<30
Typ polaryzacji	-	liniowa-pozioma
Typ generatora fali	-	magnetron

układu zasilania UPS), wykonanie nowej instalacji antywlamaniowej, przebudowa wewnętrznych instalacji ppoż. i czujników alarmowych, przygotowanie obiektów do instalacji systemu transmisji satelitarnej.

W związku z tym, że były to radary pracujące już kilka lat, wykonano szereg działań naprawczych typu technicznego; uszkodzenie procesora sygnałowego RVP-6



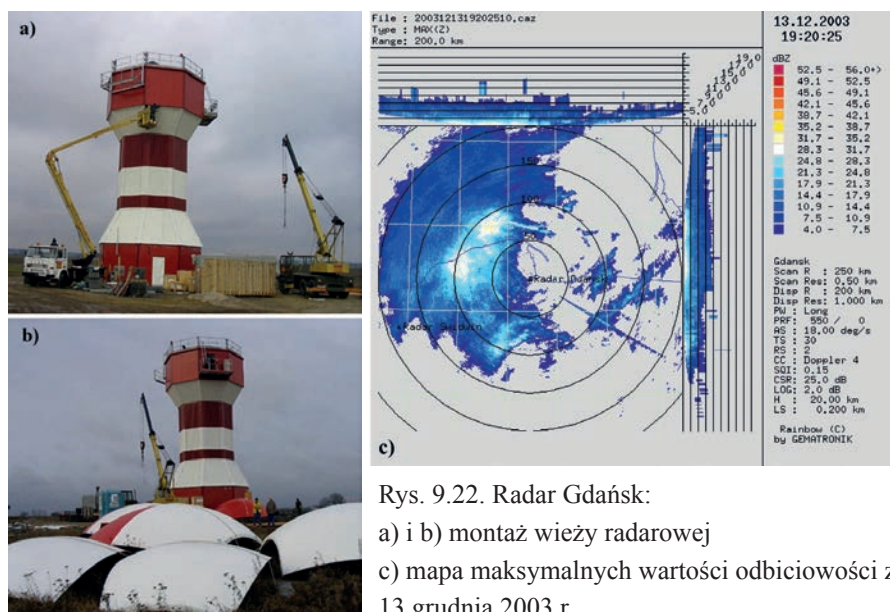
Rys. 9.21. Radarowa mapa zbiorcza odbiciowości (dla wysokości 700 m) 30 sierpnia 2003 r., godz. 00:10 UTC – utworzona z wykorzystaniem nowych danych z radaru RAM i PAS

na Pastewniku wymagało naprawy u producenta w USA, a na stacji RAM naprawy wymagał uszkodzony silnik napędu anteny i zużyty magnetron. W związku z powyższym planowany wcześniejszy odbiór techniczny radarów (na kwiecień 2003 r.) przesunął się w czasie.

Testy SAT dla zmodernizowanych radarów na Ramży i w Pastewniku przeprowadzono pomyślnie w dniach 2-3 września 2003 r. W tym samym miesiącu ekipa informatyków z firmy GEMATRONIK GmbH wymieniła oprogramowanie RAINBOW; w miejsce wersji 3.4 zainstalowano wersję 5.0.

9.2.6. Radar meteorologiczny Meteor 1500C w Gdańsku – GDA

W wyniku wyboru i optymalizacji miejsca budowy radaru, dzięki współpracy i przychylnemu stanowisku Przedsiębiorstwa Państwowego „Porty Lotnicze”, Agencji Ruchu Lotniczego, Zarządu Spółki Port Lotniczy Gdańsk – Trójmiasto, władz lokalnych, jesienią 2003 r. rozpoczęto budowę obiektu koło Gdańska [Klejnowska 2004, folder IMGW, radar Gdańsk].



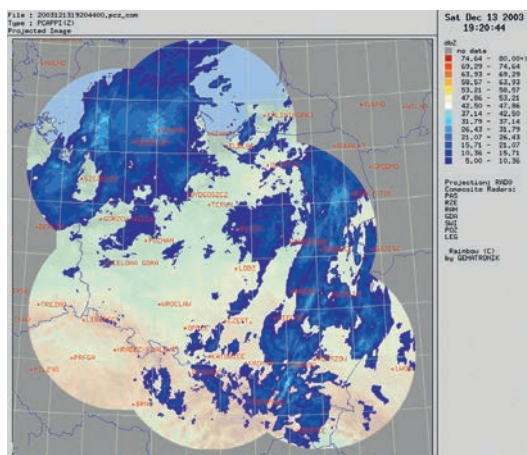
Rys. 9.22. Radar Gdańsk:
 a) i b) montaż wieży radarowej
 c) mapa maksymalnych wartości odbiciowości z dnia 13 grudnia 2003 r.

W dniach 16-17 grudnia 2003 r. radar w Gdańsku (rys. 9.22) przeszedł pomyślnie testy akceptacyjne i 18 grudnia stacja rozpoczęła pracę operacyjną.

Dnia 22 grudnia 2003 r. nastąpiło uroczyste otwarcie i przekazanie do użytku kolejnego radaru meteorologicznego w systemie POLRAD (na terenie lotniska w Rębiechowie). Zbiorcza mapa zawierała już siedem radarów (rys. 9.22).

Tab. 9.7. Charakterystyka techniczna radaru METEOR 1500C w Gdańsku

Radar meteorologiczny typu METEOR 1500C		
Parametry	Jednostka	Wartość
Współrzędne geograficzne	[°]	54°23'03" 18°27'21,9"
	dziesiętne	54,38417 18,45611
Wysokość posadowienia	[m] n.p.m.	138
Wysokość wieży radarowej (do środka elektrycznego anteny)	[m] n.p.t.	20
Zasięg instrumentalny	[km]	250
Dane techniczne nadajnika		
Częstotliwość pracy	[MHz]	5660
Moc w impulsie	[kW]	$P_{imp} = 250$
Częstotliwość powtarzania	[Hz]	$f_{powt.} = 250-1200$
Czas trwania impulsu	[μ s]	$t_{imp} = 0,8-2$
Typ nadajnika	–	klistron
Dane techniczne anteny		
Rodzaj i typ anteny	–	paraboliczna
Typ polaryzacji	–	liniowa pozioma
Średnica anteny	[m]	$d = 4,2$
Szerokość wiązki	[°]	1
Kąt elewacji anteny	[°]	0-180
Kąt azymutu anteny	[°]	0-360
Tłumienie listków bocznych	[dB]	<30



Rys. 9.23. Radarowa mapa zbiorcza złożona z siedmiu radarów: RAM, PAS, LEG, RZE, POZ, SWI, GDA z dnia 3 grudnia 2003 r.

Radar jest w pełni zautomatyzowany, dane były przekazywane łączem satelitar-nym do Radarowego Centrum Operacyjnego w Warszawie, gdzie były przetwarzane do postaci gotowych produktów, a następnie udostępniane poszczególnym użytkownikom oraz w postaci mapy zbiorczej na stronie internetowej www.imgw.pl

Dzięki wybudowaniu i uruchomieniu kolejnego radaru rozszerzony został obszary monitoring groźnych zjawisk meteorologicznych, szczególnie istotny w tym przypadku dla osłony lotnictwa cywilnego, żeglugi i rybołówstwa na Bałtyku.

9.2.7. Radar meteorologiczny Meteor 500C w Brzuchani – BRZ

Prace związane z wyborem lokalizacji pod kolejną (ostatnią budowaną w ramach kontraktu) stację radarową rozpoczęto już w czerwcu 2002 r. Rozważano wówczas kilka miejsc, między innymi teren wojskowej stacji radarowej k. Krakowa oraz miejscowości Brzuchania, Koszyce, Miłkowa.

W wyniku długotrwałego procesu wyboru i optymalizacji miejsca budowy radaru, dzięki współpracy i przychylnemu stanowisku władz lokalnych Miechowa oraz województwa małopolskiego rozpoczęto budowę obiektu w Brzuchani. Dzień 24 listopada 2003 r. był jednym z ostatnich i ważniejszych dni kończącego się projektu „Rozbudowa sieci radarów meteorologicznych POLRAD”. W tym dniu, przy drodze krajowej nr 7 z Krakowa do Warszawy, parę kilometrów za Miechowem, przed miejscowością Antolka zaczęto składać ostatni radar meteorologiczny przewidziany do pracy w sieci POLRAD.

Architektonicznie obiekt (rys. 9.24) zaprojektowała Maria Janinowska-Gulbińska, projekt techniczny wykonał Ryszard Klimas, którego firma była także generalnym wykonawcą stacji.

W połowie lutego dokończone zostały testy akceptacyjne radaru. Dnia 20 lutego 2004 r. miało miejsce uroczyste otwarcie stacji. Od tego czasu radar rozpoczął pracę i przekazywanie operacyjne danych do RCO. Włączenie ostatniej stacji do sieci zbiegło się z 85-leciem działalności Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej.

W uroczystości uruchomienia radaru w Brzuchani uczestniczyli m.in.: wiceminister ochrony środowiska Krzysztof Szamałek, dyrektor IMGW Jan Zieliński, prezes GEMATRONIK GmbH Ulrich Nellen.

Dyrektor IMGW przypomniał historię Instytutu i budowy radaru oraz odczytał list prezydenta RP Aleksandra Kwaśniewskiego skierowany do uczestników uroczystości:
»Dwudziesty lutego 2004 r. to ważny dzień nie tylko dla



Rys. 9.24. Stacja radarowa w Brzuchani

Brzuchani, lecz dla całej Rzeczypospolitej. Oddanie do użytku postawionej tu stacji radarowej oznacza bowiem finał rozbudowy Polskiej Sieci Radarów Meteorologicznych POLRAD. Nowy obiekt stanowi wspaniały symbol jej nieustannego rozwoju, jest świadectwem umiejętnej nadążania za wyzwaniem czasów, dowodem bardzo wysokich kwalifikacji pracowników. Jestem przekonany, że wymiana danych meteorologicznych z sieciami radarów w Czechach, Słowacji, Niemczech i innych krajach europejskich podniesie poziom naszego wspólnego bezpieczeństwa. Wszystkim pracownikom służby hydrologiczno-meteorologicznej z całego serca życzę wielu kolejnych zawodowych sukcesów i satysfakcji w życiu osobistym. Niech Państwa staraniom, codziennej pracy, towarzyszy życzliwość i zaufanie ludzi, którzy korzystają z jej rezultatów. Wszystkiego dobrego!«.

Zerwania wstęgi, zwisającej z kopuły radaru aż do ziemi, dokonał wiceminister Krzysztof Szamałek. W przemówieniu przypomniał o swoich staraniach w zdoby-

Tab. 9.8. Charakterystyka techniczna radaru METEOR 500C w Brzuchani

Radar meteorologiczny typu METEOR 1500C		
Parametry	Jednostka	Wartość
Współrzędne geograficzne	[°]	50°23'39" 20°04'46,9"
	dziesiętne	50,39417 20,07972
Wysokość posadowienia	[m] n.p.m.	383
Wysokość wieży radarowej (do środka elektrycznej anteny)	[m] n.p.t.	35
Zasięg instrumentalny	[km]	250
Dane techniczne nadajnika		
Częstotliwość pracy	[MHz]	5660
Moc w impulsie	[kW]	$P_{imp} = 250$
Częstotliwość powtarzania	[Hz]	$f_{powt.} = 250-1200$
Czas trwania impulsu	[μ s]	$t_{imp} = 0,8-2$
Typ nadajnika	–	magnetron typu SFD 34 G
Dane techniczne anteny		
Rodzaj i typ anteny	–	paraboliczna
Typ polaryzacji	–	liniowa pozioma
Średnica anteny	[m]	$d = 4,2$
Szerokość wiązki	[°]	1
Kąt elewacji anteny	[°]	0-180
Kąt azymutu anteny	[°]	0-360
Tłumienie listków bocznych	[dB]	<30



a)

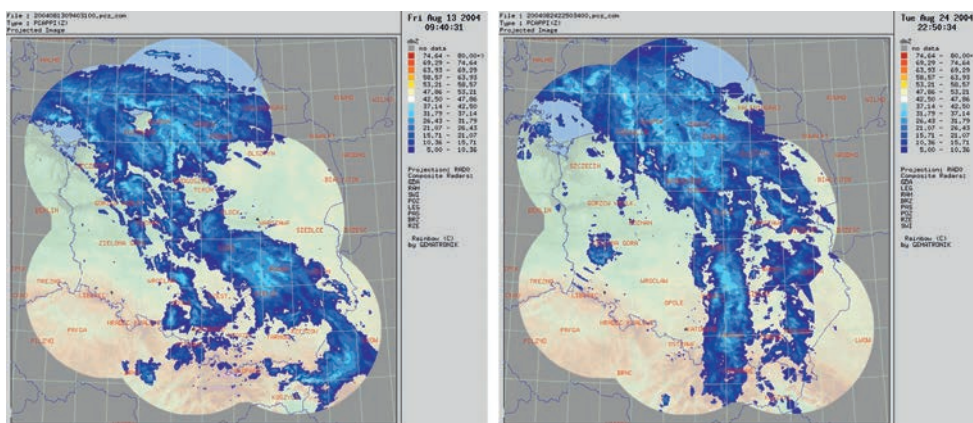
b)

Rys. 9.25. Uroczyste otwarcie stacji radarowej w Brzuchani: a) uczestnicy uroczystości, b) radar BRZ z przewieszoną wstęgą

waniu funduszy na tę inwestycję i o tym, jak w 1997 r. obiecał zbudować system radarów. Jego obietnice stały się rzeczywistością 20 lutego 2004 r. Do budowy sieci radarów wykorzystano najnowocześniejsze urządzenia na świecie, jak poinformował szef firmy GEMATRONIK – Ulrich Nellen.

Uruchomienie w lutym radaru meteorologicznego Brzuchania k. Krakowa sfinalizowało projekt budowy sieci POLRAD, składającej się z ośmiu radarów (rys. 9.26).

Ze względu na ograniczenia finansowe nie zaplanowano wówczas osłony rejonu Suwalszczyzny i Podlasia.



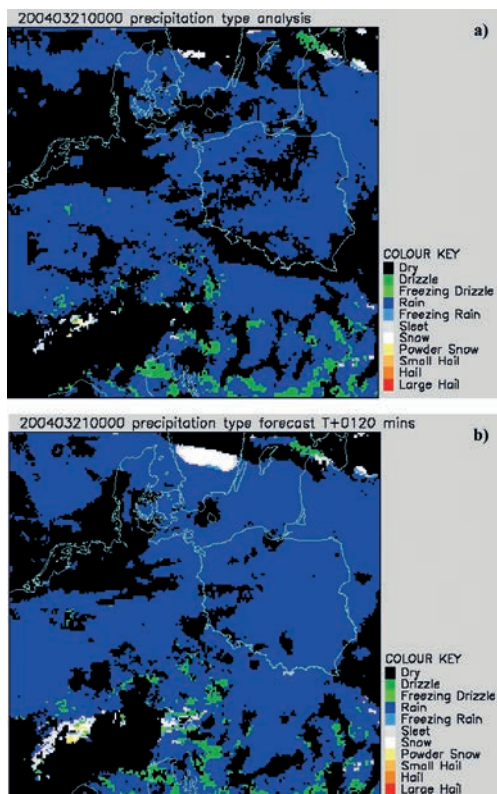
Rys. 9.26. Jedne z pierwszych „kompletnych” zbiorczych map radarowych po odbiciowości (dla wysokości 700 m) zawierające dane pochodzące z ośmiu radarów: RAM, PAS, LEG, RZE, POZ, SWI, GDA i BRZ z 13 i 24 sierpnia 2004 r.

9.3. Usprawnianie systemu radarowego

9.3.1. System NIMROD i jego rola

Informacja pozyskiwana w procesie pomiaru radarowego atmosfery (odbiciwość) jest pomiarem pośrednim; na bazie fali elektromagnetycznej odbitej od obiektu (na trasie propagacji fali) obliczamy jego charakterystyki meteorologiczne. Jak wynika z poprzednich rozdziałów, obliczenia te nie są pozbawione błędów. Są to błędy wynikające z samego pomiaru radarowego oraz mające inne źródła, takie jak np.: echa stałe i anomalnej propagacji, przesłanianie wiązki radarowej przez przeszkody, niecałkowite wypełnienie wiązki przez opad czy pomiar nad górami. Celem, do którego dąży meteorologia radarowa, jest eliminacja lub właściwa interpretacja „błędnej informacji”. Zawsze było to założeniem tworzonego systemu radarowego.

W ramach systemu POLRAD producent zaoferował (kontrakt IMGW modernizacji polskiej służby hydrologicznej i meteorologicznej) dodatkowe oprogramowanie pod nazwą NIMROD, gdzie można było śledzić (między innymi) eliminację wymienionych błędów.



Rys. 9.27. Przykładowe mapy:
a) rozpoznania typu opadu z 20.03.2004 r.
godz. 21:00 UTC,
b) prognozy z wyprzedzeniem do
2 godzin – system NIMROD

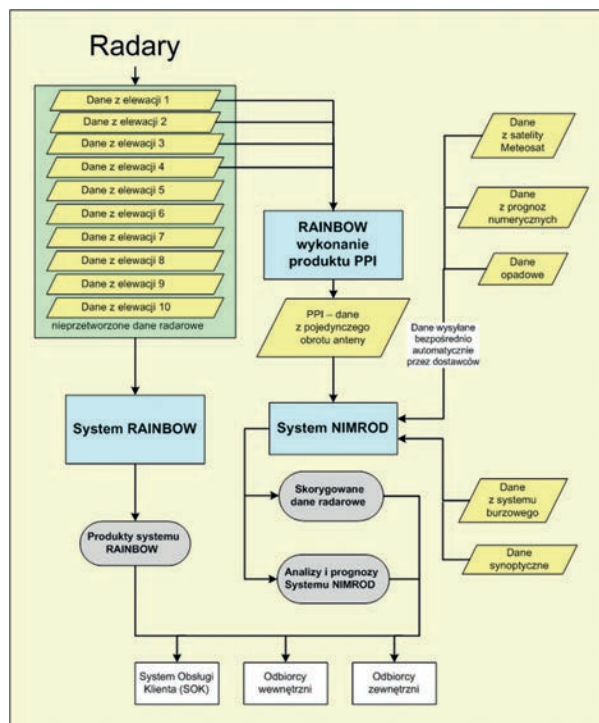


Rys. 9.28 Stanowisko operatorskie do obsługi systemu radarowego i NIMROD

NIMROD wdrożono i zainstalowano w dniach 4-17 czerwca 2003 r. Był to system opracowany przez Służbę Meteorologiczną MetOffice z Wielkiej Brytanii, wykorzystywany już od 1995 r. Instalację poprzedziły szkolenia pracowników RCO w dniach 8-15.12.2002 r. Wówczas pięcioosobowa delegacja RCO brała udział w szkoleniu dotyczącym podstaw oprogramowania NIMROD.

NIMROD był w pełni zautomatyzowanym systemem, służącym także

do generowania analiz oraz tworzenia krótkookresowych prognoz opadów i związanych z nimi zjawisk pogodowych na podstawie danych radarowych oraz pozyskiwanych z innych źródeł informacji meteorologicznych, takich jak dane z satelity meteorologicznego METEOSAT, systemu sieci deszczomierzy na stacjach synoptycznych, systemu lokalizacji wyładowań burzowych SAFIR, mezoskalowego numerycznego modelu prognostycznego.



Rys. 9.29. System NIMROD – schemat powiązań z innymi systemami IMGW [źródło: dokumentacja WTN]

Po przekształceniu powyższych danych do określonego formatu i po pobraniu danych ze wszystkich radarów podlegały one wzajemnej analizie porównawczej, mającej na celu wyeliminowanie: błędnych danych radarowych, ech anomalnej propagacji, oraz wprowadzeniu poprawki na przesłanianie wiązki. Następnie liczone jest natężenie opadu, rozpoznawany typ opadu (grad, suchy i mokry śnieg, deszcz, śnieg z deszczem) i liczony *nowcasting* – natychmiastowa prognoza opadów i zjawisk z maksymalnym wyprzedzeniem do 6 godzin.

Oprogramowanie systemu NIMROD zainstalowano na dwóch serwerach. Obie maszyny, operacyjna oraz back-up, zostały podłączone do sieci i uruchomione. System przetwarzał dane: satelitarne, radarowe (wówczas sieć radarową tworzyły 4 radary), depesze synoptyczne oraz dane z systemu SAFIR (o wyładowaniach atmosferycznych). W momencie pojawiania się nowych danych, były one włączane do systemu.

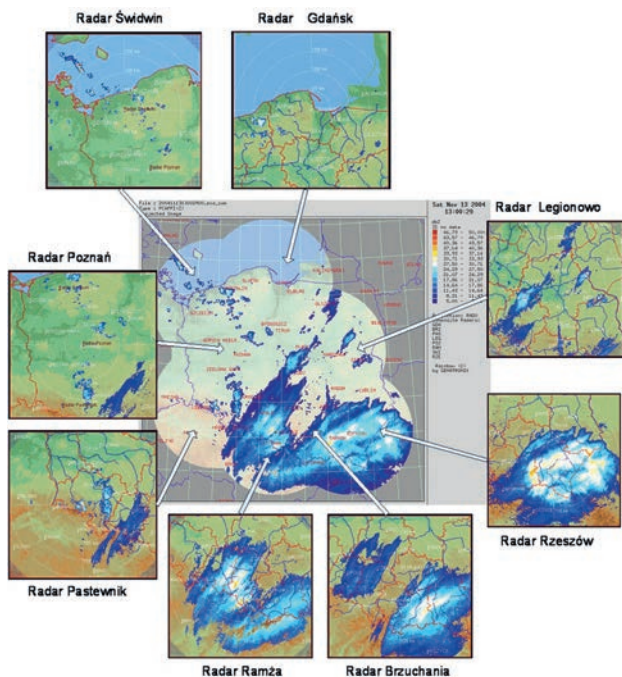
Testy SAT systemu diagnostyczno-prognostycznego NIMROD dla obu systemów (operacyjny i back-up) zostały przeprowadzone w dniach 22-24 września 2003 r.

9.3.2. Rekonfiguracja i kolejne ulepszenia systemu radarowego

W trakcie kolejnych lat eksploatacji systemu radarowego był on doskonalony zarówno od strony technicznej, jak i informatycznej. Powstawały coraz lepsze wersje pod względem funkcjonalnym od strony operatora systemu, a także użytkownika informacji końcowej.

W dniach 9-13 lutego 2004 r. pracownicy firmy GEMATRONIK GmbH dokonali ważnych zmian w konfiguracji sieci radarowej. Polegały one na przeniesieniu serwerów sterujących pracą radarów z lokalnych stacji radarowych do RCO-IMGW w Warszawie. Związane to było z zaprzestaniem zbierania danych w układzie sferycznym (*volumów*) na stacjach radarowych i przekierowaniem tego procesu na serwery w RCO. Zmianę tę przeprowadzono ze względu na ograniczoną przepustowość linii satelitarnych oraz rosnącą liczbę produktów generowanych przez oprogramowanie RAINBOW. W ten sposób próbowano zabezpieczyć się przed opóźnieniami transmisji lub redukcją liczby dostępnych produktów. Wskutek tej zmiany zapoczątkowano generowanie wszystkich produktów radarowych w RCO w Warszawie, oczywiście po skompletowaniu pełnego *volumu* danych dla każdego z radarów. Testy SAT dla Radarowego Centrum Operacyjnego, obejmujące Zintegrowany System POLRAD i system NIMROD, przeprowadzono w dniach 26-27 lutego 2004 r.

W lutym 2004 r. oficjalnie ukończono prace nad zintegrowanym systemem POLRAD w ramach zadania B.2.4.2 kontraktu pod nazwą „Rozwój i modernizacja sieci radarów meteorologicznych POLRAD”, a pełną sprawność operacyjną system uzyskał w październiku 2004 r., co potwierdził tzw. ostateczny test gwarancyjny.



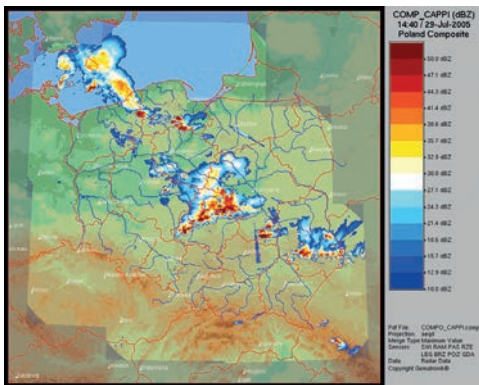
Rys. 9.30. Składanie radarowej mapy zbiorczej; dane radarowe do utworzenia mapy pochodzą z 13 listopada 2004 r.

Pod koniec 2004 r. system radarów meteorologicznych POLRAD składał się z ośmiu radarów dopplerowskich trzech typów (wszystkich produkcji niemieckiej firmy Gematronik GmbH). W procesie skanowania klasycznego system rejestruje dane radarowe prawie nad całą Polską z rozdzielczością obszarową do 1×1 km oraz dane o prędkości i kierunku wiatru (w strefach opadów) do odległości 125 km od każdego radaru z rozdzielczością obszarową 500×500 m.

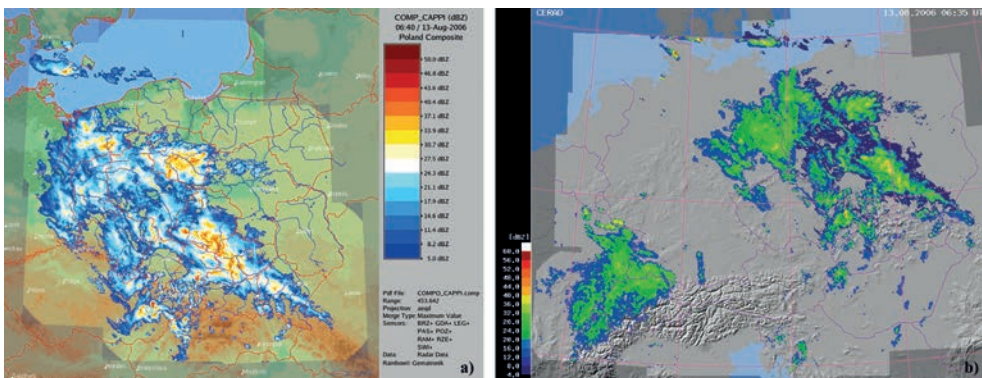
Wszystkie zebrane przez radary dane były przesyłane drogą satelitarną (z wyjątkiem radaru w Legionowie, który dostarczał dane linią naziemną) do Radarowego Centrum Operacyjnego.

W grudniu 2004 r. zainstalowano kolejną, nową wersję oprogramowania RAINBOW Composite, służącego do tworzenia mapy zbiorczej oraz zaktualizowano system RAINBOW dla pojedynczych stacji do najnowszej wersji. W dniach 6-17.12.2004 r. odbyło się szkolenie dotyczące nowego systemu RAINBOW (w RCO) oraz sprzętu radarowego (na stacjach w Legionowie i Poznaniu). Szkolenia organizowano dla pracowników Radarowego Centrum Operacyjnego i prowadzone były przez przedstawiciela firmy GEMATRONIK GmbH.

Ostatecznie w dniach 23-27.02.2005 r. odbyły się tygodniowe testy gwarancyjne, mające na celu potwierdzenie, że po modernizacji oprogramowania na wszystkich radarach system nadal dobrze funkcjonuje. Test zakończył się sukcesem. Świadczenia odbioru operacyjnego zintegrowanego systemu podpisano z datą 8.03.2005 r.



Rys. 9.31. Radarowa mapa zbiorcza COMPO_CAPPI(dBZ) odbiciowości dla wysokości 700 m n.p.m. w wersji systemu z podkładem orograficznym terenu



Rys. 9.32. Zbiorcze mapy radarowe: a) obszar Polski – składana z PCAPPI [dBZ] – 700 m, b) środkowoeuropejska CERAD (patrz rozdz. 8) z 13 sierpnia 2006 r., godz. 06:40 (35) UTC

Od 2006 r. mapa zbiorcza była dostępna dla każdego użytkownika Internetu, natomiast pozostałe, bardziej szczegółowe produkty, udostępniane były statutowym użytkownikom danych radarowych.

W dniach 22-24 maja 2007 r. przedstawiciel firmy Selex Sistemi Integrati¹¹ zainstalował kolejną, nową wersję oprogramowania RAINBOW. Rozwiązała ona kilka problemów istniejących w starszej wersji. W dniach 2-7.08.2005 r. dokonano rekonfiguracji sieci komputerowej nadzorującej pracę wszystkich radarów meteorologicznych. W miejsce sześciu stacji roboczych obsługujących system RAINBOW (rys. 9.35) zainstalowano dwa nowe komputery (rys. 9.36) o większych możliwościach obliczeniowych. Tym samym usprawniony i uproszczony został bezpośredni dostęp do wszystkich procesów związanych z nadzorem sieci radarowej w CROO.

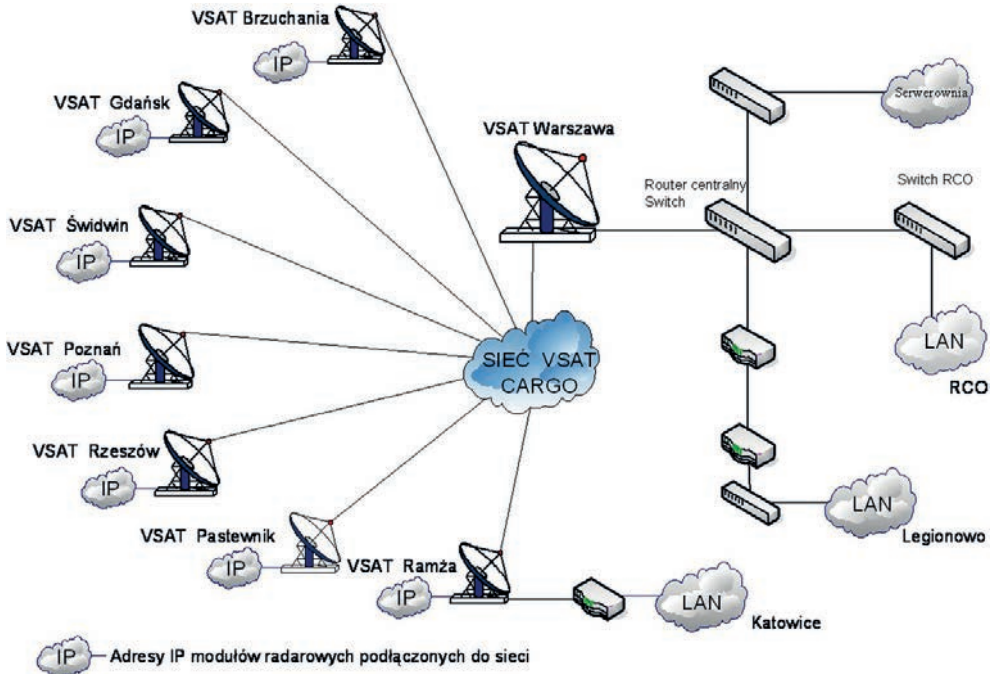
¹¹ Firma GEMATRONIK GmbH została sprzedana. Ostatecznie stała się własnością włoskiej firmy SELEX i przyjęła nazwę Selex Sistemi Intergati, a w kolejnych latach – Selex Systems Integration

9.4. Transmisja danych radarowych za pomocą łącz satelitarnych

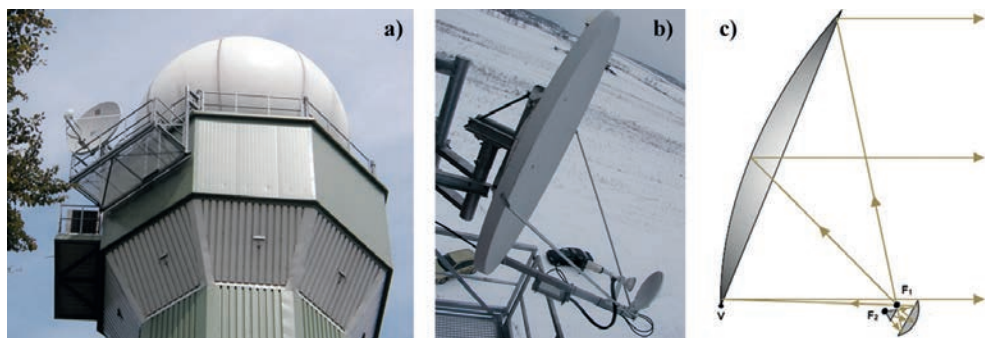
W latach 2000-2010 do łączności z odległymi stacjami radarowymi, w ramach systemu POLRAD, wykorzystywano usługi satelitarne (poza stacją LEG) świadczone przez operatora sieci transmisji danych o nazwie SkyWAN. Realizowane były one za pośrednictwem satelity geostacjonarnego TELSTAR-12 (usługa SkyWAN©. Cargo). Od strony formalnej łączność zabezpieczała firma DataTrans.

Satelitarna sieć (rys. 9.33) zbudowana w ramach systemu POLRAD składała się z 7 zestawów anten satelitarnych typu VSAT (Very Small Aperture Terminal) – segmentów naziemnych, zainstalowanych na wieżach radarowych (rys. 9.34a). Dawało to możliwość dokładnego skierowania czaszy anteny w kierunku satelity.

Terminale VSAT tworzące radarową sieć satelitarną pracowały w trybie pracy interaktywnej z antenami offsetowymi *chanel master* z podwójną optyką (rys. 9.34b), o średnicy 1,8 m. W antenach tych punkt ogniskowy czaszy przesunięty jest w dół w stosunku do jej osi geometrycznej o określony kąt. Niższy kąt nachylenia czaszy miał zminimalizować podatność anteny na gromadzenie się w niej śniegu i lodu. Miało to ułatwiać działanie anteny w zimie. Zastosowanie anten offsetowych miało jednocześnie na celu eliminację przerw w połączeniach powodowanych oblodzeniem anteny.

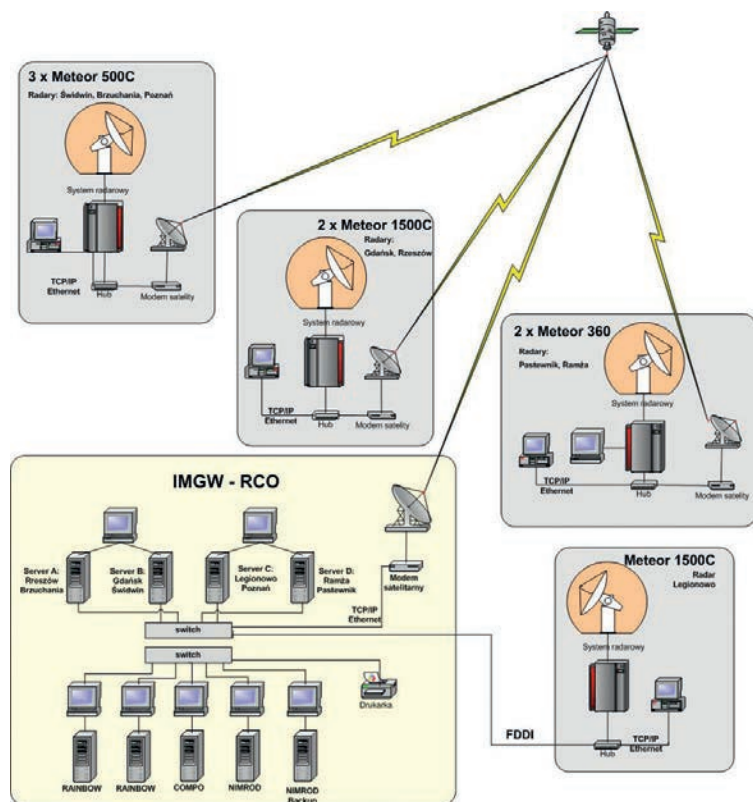


Rys. 9.33. Sieć terminali VSAT dla POLRAD



Rys. 9.34. Antena offsetowa (*channel master*) z podwójną optyką na wieży radarowej w a) Brzuchani, b) Gdańsku, c) schemat anteny VSAT

W IMGW w Warszawie, gdzie zbierane były dane ze wszystkich stacji radarowych, zainstalowano stację nadawczo-odbiorczą z anteną o większej średnicy (2,4 m) w celu zwiększenia niezawodności odbioru danych ze stacji VSAT pracujących w terenie.



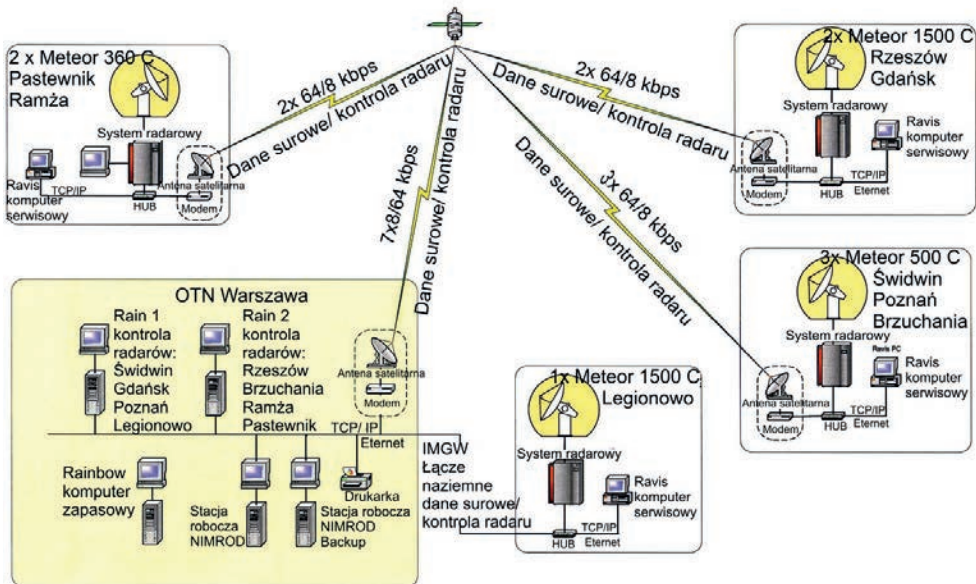
Rys. 9.35. Topologia sieci POLRAD – konfiguracja z 2003 r.

Pliki danych ze stacji radarowych przesyłano sekwencyjnie; transmisja kolejnego pliku zaczynała się po zakończeniu transmisji poprzedniego, a odbierano je przez serwer w RCO. Komplet danych pomiarowych musiał dotrzeć do RCO w ciągu 10 min od chwili rozpoczęcia cyklu pomiarowego. Pojawienie się nowych plików nie przerywało transmisji tych aktualnie transmitowanych – nowe pliki były buforowane i czekały na zakończenie transmisji. Pliki podlegały kompresji, której „efektywność” uzależniona była od ilości danych zgromadzonych podczas przeglądania atmosfery. Im więcej w atmosferze chmur opadowych, tym większa była objętość plików do transmisji.

Od 2004 r. w centrum radarowym archiwizowany był pełny zestaw surowych (zapisanych w układzie sferycznym) danych z poszczególnych radarów. Z nich też wyliczane były produkty radarowe, które do użytkowników transmitowano siecią naziemną z wykorzystaniem protokołu FTP i sieci Internet [Tuszyńska 2005].

Od momentu uruchomienia łączności satelitarnej borykano się jednak z problemami związanym z: poprawnym działaniem łączności na trasie pomiędzy radarem a RCO bądź ze zbyt małą prędkością przesyłu danych radarowych. Rozwiązaniem problemu wydawał się być podpisany w marcu 2004 r. aneks do umowy z firmą DataTrans na wykupienie przez IMGW tzw. drugiej nośnej linii satelitarnej, obsługującej transmisję danych radarowych. Zmiana ta zaowocowała znacznym podniesieniem przepustowości łączności satelitarnych.

Topologia sieci radarów meteorologicznych POLRAD



Rys. 9.36. Topologia sieci POLRAD z 2007 r.

Jednak w okresie zimowym (2005-2006) dalej występowały zaniki łączności satelitarnej powodowane przez silne opady śniegu lub zgromadzony śnieg na czaszy anteny satelitarnej.

W związku z powyższym zaczęto zastanawiać się nad stworzeniem zapasowych linii dla każdej ze stacji bądź zmianą systemu transmisji z satelitarnej na naziemną. W maju 2006 r. przez 30 dni testowana była (pod kątem przydatności do pracy operacyjnej) łączność radiowa ze stacją radarową w Pastewniku. Testy zakończyły się niejednoznacznym wynikiem.

Wspólne prace Ośrodka Teledetekcji Naziemnej (zmiana nazwy CROO na OTN) prowadzone w 2007 r. z firmami Selex Sistemi Integrati i DataTrans doprowadziły do znacznej poprawy transmisji satelitarnej. Dodatkowo firma Data Trans założyła na wszystkich antenach satelitarnych, należących do systemu transmisji danych radarowych, maty grzewcze, które miały zminimalizować problemy związane ze zmianą charakterystyki anteny przez mokry śnieg. Po okresie zimowym 2008 r. stwierdzono, że takie rozwiązanie w dużej mierze eliminuje problemy transmisji. Jednak duży koszt łączy satelitarnych spowodował, że pod koniec roku 2009 rozpoczął się proces „przechodzenia” na łączność kablową IP VPN (*Virtual Private Network*) Telekomunikacji Polskiej, zestawianą na bazie specjalnie dzierżawionych w tym celu łączy. W okresie przejściowym łączność na niektórych stacjach utrzymywano poprzez radiolinie.

W 2010 r. system łączności ze stacjami radarowymi był już wymieniony. Zakładano, że poprawa parametrów transmisji umożliwi zoptymalizowanie sposobu skanowania atmosfery w sposób dotychczas niemożliwy do realizacji ze względu na ograniczoną przepustowość łączy satelitarnych. Dodatkowo w ramach umowy z TP. S.A. przewidziano łączy awaryjne (backupowe), zapewniające większą niezawodność transmisji danych.

Od 2011 r. wszystkie dane zbierane przez radary są przesyłane łączy IP VPN do Ośrodka Teledetekcji Naziemnej (rys. 9.35).

9.5. Obieg i wykorzystanie informacji radarowej

W celu nadania systemowi automatycznego reżimu pracy, polegającego na powtarzaniu zadań, które ma wykonać radar, ustalany jest w systemie odpowiedni harmonogram pracy. Definiowane są w nim zadania, które mają być zrealizowane w pewnych odstępach czasu (proces jednorazowy do momentu podjęcia decyzji o jego rekonfiguracji). Zdalne sterowanie radarami, transmisja zebranych informacji i przetwarzanie danych jest wykonywane automatycznie przez pakiet programowy RAINBOW. Głównymi jego zadaniami są:

- automatyczne uruchomienie radaru,

- zbieranie danych źródłowych przychodzących z radaru,
- obliczanie zadanych produktów,
- zobrazowanie wyników obliczeń na monitorze w postaci map produktów,
- zapisanie wyników w postaci volumów i produktów w odpowiednich katalogach systemu,
- przesłanie gotowych produktów w postaci graficznej na serwery IMGW w celu przekazania ich do Systemu Obsługi Klienta (SOK) i w odpowiednich formatach do innych użytkowników.

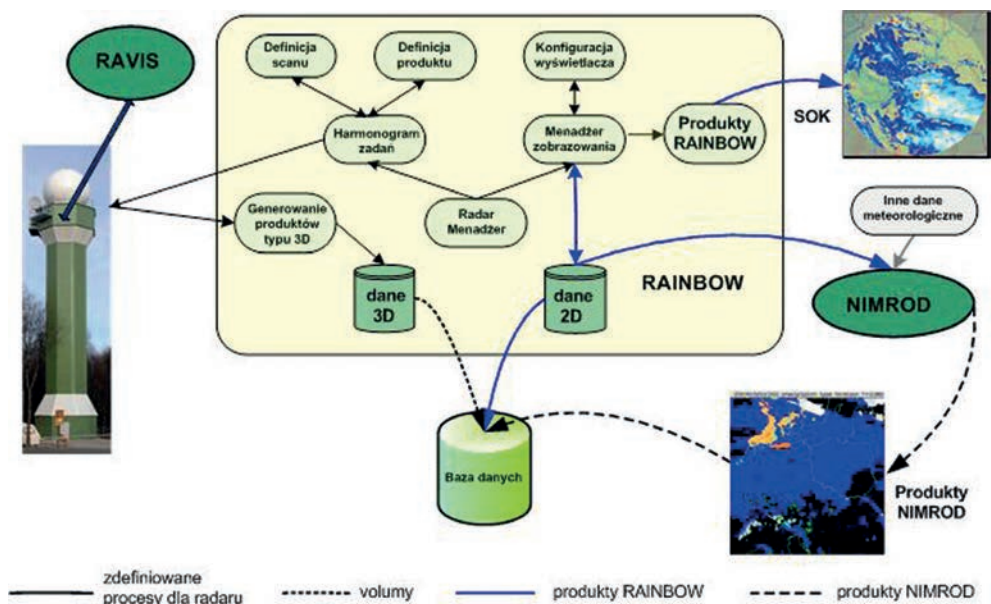
Nad poprawnością pracy wszystkich elementów technicznych każdego radaru, w trakcie zbierania informacji, czuwa system RAVIS. Umożliwia on operatorowi zobrazowanie procesu skanowania przestrzeni (przeglądanej przez radar) w czasie rzeczywistym i daje, w razie konieczności, możliwość sterowania procesem: przetwarzania sygnału, pracy anteny, nadajnika i odbiornika. Umożliwia jednocześnie kontrolę procesu przetwarzania sygnału oraz środowiska w najbliższym otoczeniu radaru. Graficzne interfejsy RAVIS pozwalają jednocześnie obserwować i kontrolować pracę poszczególnych modułów (elementów) radaru, a w razie awarii któregoś z jego elementów – zdiagnozować ją lub usunąć zdalnie, o ile jest to możliwe.

System RAINBOW pracował kolejno na platformie systemu operacyjnego: UNIX, LINUX, aż w 2009 r. doczekał się możliwości instalowania jego aplikacji na bazie systemu WINDOWS. Szczególnie istotne znaczenie ma to dla użytkowników pracujących na danych typu 3D (danych w układzie sferycznym).

Zebrałe podczas przeglądu przestrzeni informacje o odbiciowości i dane dopplerowskie podlegają filtrowaniu ech stałych i zostają przekonwertowane na odpowiedni format oraz zarchiwizowane, jako dane typu 3D. Te trójwymiarowe informacje są trudne do zobrazowania i zachodzi potrzeba ich przekształcenia do postaci bardziej przyjaznych dla użytkownika. Po ich przetworzeniu na dane dwuwymiarowe (dane 2D) mogą być zobrazowane i zapisane w bazie w postaci plików poszczególnych produktów, a następnie prezentowane w formie map.

Proces archiwizacji (rys. 9.37) zbieranych przez system danych zachodzi automatycznie i realizowany jest przez skrypty działające w ramach systemu operacyjnego. Tworzą one skompresowane pakiety w formacie zip, które zawierają dane surowe (volumy) i produkty (produkty w wersji XML i graficznej) [Lewandowski, Szewczykowski 2005].

W Radarowym Centrum Operacyjnym (obecnie OTN) gromadzone były (i są do dziś) dane z całej sieci radarowej. W związku z ogromną ilością otrzymywanych danych powstał problem z ich efektywnym katalogowaniem oraz przechowywaniem. W celu rozwiązania problemu opracowano i wdrożono bazę danych zawierającą informacje o danych zbieranych w Radarowym Centrum Operacyjnym [Dziewit 2003]. W czasie archiwizacji produktów radarowych na nośniki CD lub DVD two-



Rys. 9.37. Schemat generowania i archiwizacji produktów w sieci POLRAD (lata 2004-2013)

rzona była baza, która je katalogowała. Trzeba jednak zaznaczyć, że były to wyłącznie informacje o produktach, a nie właściwe produkty. Pozwalało to użytkownikom na swobodny dostęp do zgromadzonych w bazie informacji poprzez łatwy i wygodny sposób wyszukania określonych produktów zgromadzonych na nośnikach zewnętrznych (płytkach CD i DVD) [Rychlewski, Gajda 2005]. Umożliwiało także szybkie zlokalizowanie i wybranie groźnych lub ciekawych przypadków zjawisk meteorologicznych, dla których można np. wykonać ekspertyzę lub prowadzić prace naukowo-badawcze.

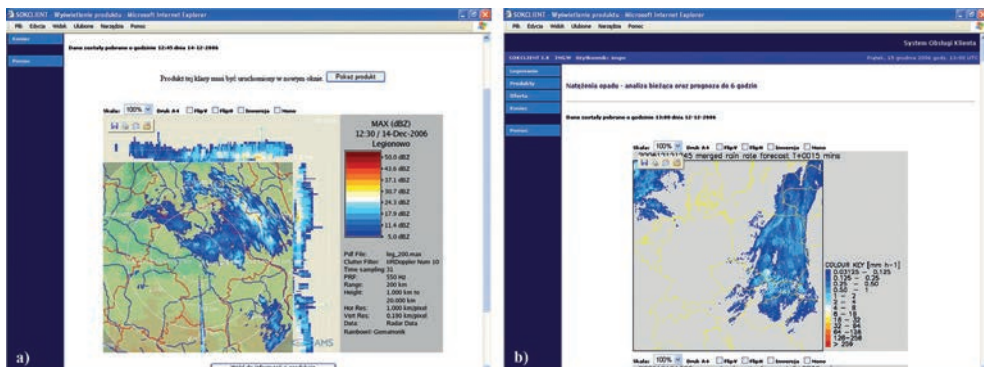
Archiwizacja danych w systemie daje także możliwość optymalizacji sieci radarowej POLRAD. Można prześledzić, jaki wpływ na pracę radarów oraz jakość danych mają zmiany konfiguracyjne lub optymalizacyjne w systemie. Zgromadzone w bazie dane z kilku lat pozwolą na prowadzenie szeregu ciekawych prac badawczych i praktycznych prac wdrożeniowych.

Wygenerowane przez system radarowy produkty przesyłane są do:

- Systemu SOK (rys. 9.37),
- Serwera Wafise IMGW – przeznaczonego do składowania danych w celu transmisji do odbiorców wewnętrznych i zewnętrznych.

Część produktów systemów radarowych wytwarzano tylko na potrzeby Centrum Radarowego (aktualnie także) i nigdzie ich nie dystrybuowano.

Od początku 2005 r. w Systemie Obsługi Klienta dostępne były dane z 8 radarów meteorologicznych, mapa zbiorcza (obszar Polski, rys. 9.38b) oraz cztery produkty



Rys. 9.38. Obraz produktów systemu POLRAD z poziomu systemu SOK (2006 r.): a) produkt systemu radarowego – MAX – maksymalne wartości odbiciowości, b) systemu NIM-ROD – zbiorcza mapa prognozy natężenia opadu z wyprzedzeniem na 15 min



Rys. 9.39. Zobrazowanie danych radarowych: a) www.pogodynka.pl – strona główna, b) zbiorcza mapa radarowa z dnia 25 lutego 2008 r.

z systemu NIMROD: rozpoznawanie zjawisk, godzinna suma opadu, natężenie opadu i prawdopodobieństwo wystąpienia śniegu (każdy z produktów jest w postaci analizy i prognozy z wyprzedzeniem do 6 godzin).

Dostęp do bazy SOK umożliwiły:

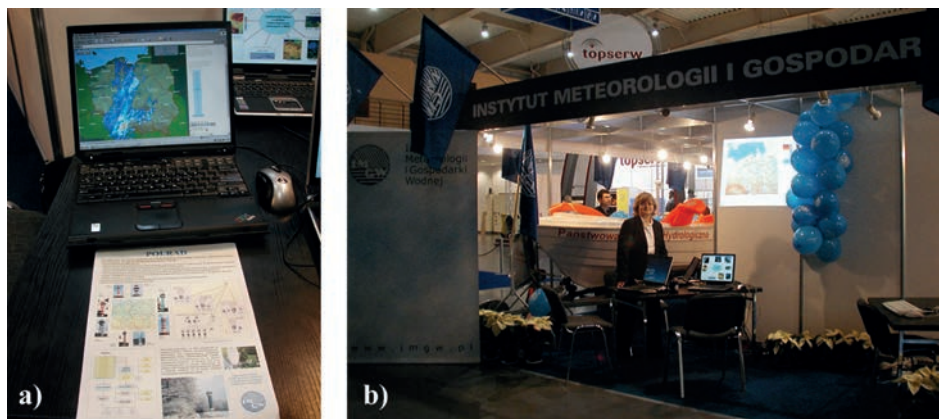
- komutowane łącza telefoniczne,
- dzierżawione łącza telekomunikacyjne,
- publiczna sieć Internet za pomocą protokołów: FTP, http.

Na stronach internetowych na www.pogodynka.pl, pod ikoną MAPY POGODOWE radary, udostępniana była zbiorcza mapa radarowa uaktualniana początkowo co 10 min (przez jeden rok), a następnie – co godzinę.

Z chwilą oddania zintegrowanego systemu radarowego rozpoczęto szkolenia. Pierwsze na większą skalę szkolenia (rys. 9.40) dla zewnętrznych użytkowników danych radarowych, dotyczące produktów systemów RAINBOW oraz NIMROD, odbyły się w dniach 17-20 stycznia 2005 r. Prowadzone były przez przedstawiciela firmy GEMATRONIK GmbH i pracownika RCO. W sumie w szkoleniach uczestniczyło ponad 130 osób z całego kraju. Był to pierwszy tak masowy, bezpośredni kontakt użytkowników z informacją bazującą na danych radarowych. Wynikiem było rozpoznanie potrzeb i oczekiwań użytkowników (z całej Polski) odnośnie do interpretacji danych radarowych i możliwości ich wykorzystania w różnych dziedzinach życia społecznego i gospodarczego.



Rys. 9.40. Szkolenie dla zewnętrznych użytkowników danych radarowych – 2005 r.; a) szkolenie otwiera Roman Skąpski (z-ca dyrektora ds. Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej – IMGW), b) kierownik RCO Zdzisław Dziewit – prezentacja systemu radarowego



Rys. 9.41. Targi POLEKO – 21-24 listopada 2006 r.: a) prezentacja na monitorze zbiorczej mapy radarowej, b) stanowisko „radarowe” – Irena Tuszyńska RCO

System prezentowano na różnego rodzaju wystawach naukowych czy targach. Przykładowo na Międzynarodowych Targach Ekologicznych POLEKO (od 2005 r.) w Poznaniu (rys. 9.41) zapewniono, na cały okres trwania targów, odbiór:

- - radarowych map zbiorczych odbiciowości,
- - produktów pochodzących z radaru w Poznaniu: mapy opadów – SRI i mapy wysokości wierzchołków chmur – EHT.

Mapy aktualnego stanu atmosfery dla obszaru całej Polski oraz mapy z poszczególnych radarów pozyskiwano dzięki połączeniu przez Internet z siecią IMGW (protokołem FTP z Systemem Obsługi Klienta).

9.6. Podstawowe produkty radarowe generowane w ramach systemu POLRAD

System zobrazowania produktów radarowych, począwszy od radaru MRŁ-2, ulegał wielu zmianom; od zobrazowania danych radarowych na wskaźnikach analogowych, poprzez prezentację tekstową na arkuszach papierowych, aż do prezentacji na monitorach komputerowych o coraz to większej rozdzielczości. Zwiększała się także liczba możliwych do wytworzenia produktów obrazujących różne dane o stanie atmosfery.

Razem z formą produktu doskonalone były metody przesyłania wygenerowanej, gotowej informacji do odbiorcy finalnego.

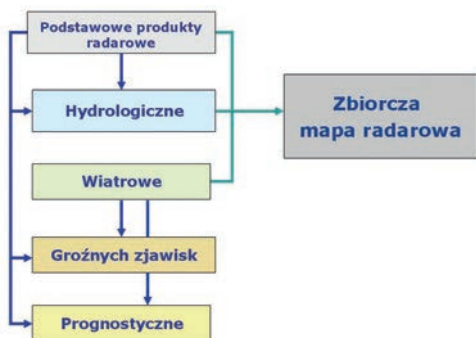
W systemie POLRAD wyróżnić możemy pięć podstawowych grup produktów:

- podstawowe produkty radarowe – wyliczane na podstawie odbiciowości radarowej, obrazują różnorodne techniki i metody wyliczania oraz prezentacji stanu atmosfery na określonych wysokościach wyznaczonych względem średniego poziomu morza,
- produkty hydrologiczne – obrazujące odbiciowość radarową na określonej wysokości, przeliczoną na opad wyrażony w [mm] lub w [mm/h], którego wartości podawane są w skali logarytmicznej,
- produkty wiatrowe – różnego rodzaju mapy graficzne, prezentujące rozkład prędkości radialnej wiatru w postaci tradycyjnych strzałek lub wykresów, gradientu prędkości wiatru w pionie i poziomie oraz ruchów turbulencyjnych w obiektach meteorologicznych, generowane z rozkładu prędkości radialnej (składowej radialnej wiatru) pozyskanej w procesie skanowania dopplerowskiego,
- produkty prognostyczne – pozwalające na prognozowanie opadu czy przemieszczania komórek burzowych, ale z niewielkim wyprzedzeniem,
- produkty groźnych zjawisk – gdzie na szczególną uwagę zasługuje wskaźnik groźnych zjawisk meteorologicznych, jako wynik analiz danych

o odbiciowości i wietrze radialnym w całym zakresie pomiaru dopplerowskiego (w pionie – maksymalnie do 20 km i poziomie – do odległości równej 125 km od radaru).

Prawie wszystkie generowane w systemie produkty groźnych zjawisk mogą tworzyć z produktami meteorologicznymi, hydrologicznymi i wiatrowymi różne kombinacje (tzw. nakładkowe, tj. dwa, trzy produkty na jednym zobrazowaniu). Produkty te w połączeniu np. z potencjalną wodnością, gradem, turbulencją oraz strefami gradientu prędkości wiatru mogą znacznie wzbogacić informację na temat genezy i tendencji rozwoju zjawisk meteorologicznych. Natomiast w połączeniu z produktami obrazującymi odbiciowość lub opad mogą być narzędziem analizy relacji między ostrzeżeniem i aktualnym stanem parametrów meteorologicznych atmosfery.

Wszystkie produkty są dostępne dla pojedynczego radaru, a część pozwala na składanie map zbiorczych z wybranych stacji radarowych (aktualnie maksymalnie z ośmiu radarów).



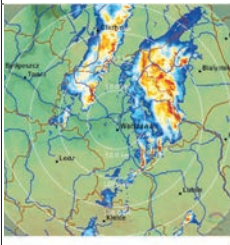

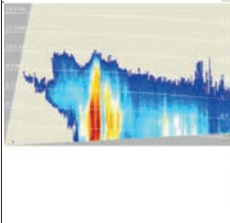
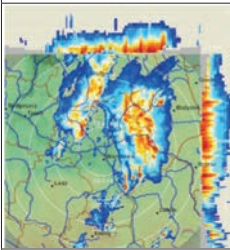
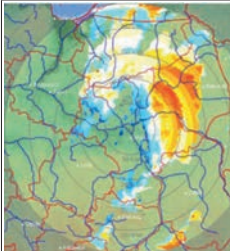
Rys. 9.42. Schemat zależności pomiędzy poszczególnymi grupami produktów radarowych

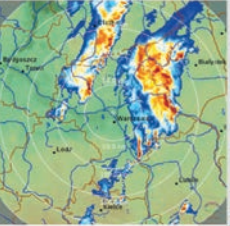

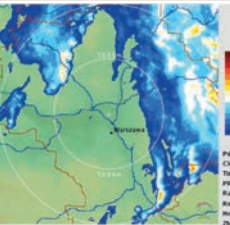
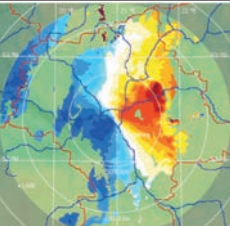
Ostateczna postać graficzna i informacje, jakie chcemy pozyskać z danych radarowych określana jest w momencie definicji produktu. Wynikowe informacje radarowe prezentowane są na podkładach mapy fizycznej, opisane przez legendę zawierającą skalę kolorów z przypisanymi jej przedziałami wartości i podstawowymi informacjami dotyczącymi zasięgu oraz rozdzielczości prezentowanego obszaru.¹²



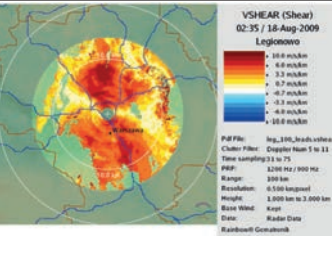
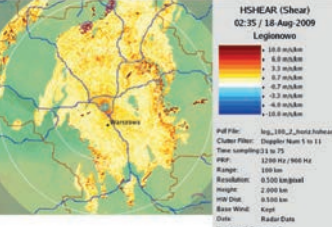
Podstawowy format wyjściowy produktów radarowych bazuje na XML (Extensible Markup Language), powszechnie uznanym standardzie umożliwiającym wymianę danych między różnymi systemami. Możliwe są także inne formaty, np. HDF5 (format przyjęty obecnie za standard wymiany danych w Europie). Wyświetlane na ekranie monitora produkty wykonane są w grafice rastrowej 8-bitowej (na 1 piksel przypada 256 kolorów), a w pliku zapisywane są najczęściej w formacie PNG (*Portable Network Graphics*), choć dostępne są też inne formaty [*Instruction...* 2007].

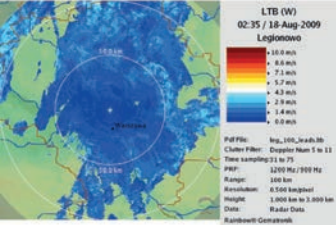

¹² więcej na temat generowanych produktów można przeczytać w [Tuszyńska 2011].

Tab. 9.9. Przykładowe produkty radarowe generowane w służbie operacyjnej IMGW

Graficzna postać produktu	Skrócona angielska/ polska nazwa produktu	Definicja produktu
1	2	3
Podstawowe produkty radarowe (Standard Products)		
	<p>PPI(dBZ) <i>Plan Position Indicator</i></p> <p>Przekrój szoskowy</p>	<p>Odwzorowanie rozkładu odbiciowości radarowej w zlokalizowanej strukturze meteorologicznej pozyskanej z jednego obrotu anteny, wyrażonej w jednostkach odbiciowości radarowej [dBZ].</p>
	<p>PCAPPI(dBZ) <i>Pseudo Constant Altitude PPI</i></p> <p>Przekrój poziomy</p>	<p>Rozkład odbiciowości radarowej w zlokalizowanej strukturze meteorologicznej, wyliczonej dla określonej wysokości n.p.m.</p>
	<p>RHI(dBZ) <i>Range Height Indicator</i></p> <p>Przekrój pionowy</p>	<p>Rozkład pionowy odbiciowości radarowej pozyskanej w procesie skanowania pionowego na zadanym azymucie.</p>
	<p>MAX(dBZ) <i>Maximum Display</i></p> <p>Maksymalna odbiciowość w rzucie na trzy płaszczyzny</p>	<p>Maksymalne wartości odbiciowości radarowej pochodzące z obszaru zlokalizowanej struktury meteorologicznej, zobrazowane w postaci rzutu na trzy płaszczyzny.</p>
	<p>EHT(Height) <i>Echo Top</i></p> <p>Wierzchołki echa radarowego</p>	<p>Obraz wysokości wierzchołków echa radarowych w obrębie zlokalizowanej struktury meteorologicznej, wyrażonych w [km].</p>

Graficzna postać produktu	Skrócona angielska/ polska nazwa produktu	Definicja produktu
1	2	3
Produkty hydrologiczne (Hydrological Products)		
 <p>SRI (dBR) 03:20 / 18-Aug-2009 Legionowo</p> <p>30.00 mm/h 8.33 mm/h 5.54 mm/h 3.32 mm/h 2.28 mm/h 1.12 mm/h 0.65 mm/h</p> <p>PRF: 550 Hz Range: 200 km Resolution: 1.000 km/pixel Alt type: PseudoSRI ZM: Jan2010, Jan1810 SRI: 1.6 km Data: Radar Data Rainbow@Gomex.pl</p>	<p>SRI (dBR) <i>Surface Rainfall Intensity</i></p> <p>Natężenie opadu</p>	<p>Obraz rozkładu natężenia opadu w [mm/h] na zdefiniowanej przez użytkownika wysokości nad powierzchnią gruntu. Wysokość powierzchni ziemi obliczana jest z map orograficznych, które są także wykorzystywane do określania regionów, gdzie ustawiona przez użytkownika warstwa jest niedostępna dla radaru.</p>
 <p>PAC (dBA) 03:20 / 18-Aug-2009 Legionowo</p> <p>20.00 mm 12.75 mm 8.45 mm 5.54 mm 3.32 mm 2.28 mm 1.12 mm 0.65 mm</p> <p>PRF: 550 Hz Range: 200 km Resolution: 1.000 km/pixel Alt type: LocalBased Start: 02.20.20.2009 Interval: 0.4, 1.0, 0.6 Name Prod: 7 Max Time: 0.4, 0.9, 0.6 m Data: Radar Data Rainbow@Gomex.pl</p>	<p>PAC (dBA) <i>Precipitation Accumulation</i></p> <p>Suma opadów</p>	<p>Produkt PAC jest zsumowanym natężeniem opadu w zdefiniowanym okresie, podany w [mm]. Najczęściej generowanym produktem w oparciu na pozyskanych danych radarowych jest godzinna suma opadu odświeżana co 10 min. Produkt bazujący na SRI (dBR).</p>
 <p>VIL (dBA) 03:20 / 18-Aug-2009 Legionowo</p> <p>20.00 mm 12.75 mm 8.45 mm 5.54 mm 3.32 mm 2.28 mm 1.12 mm 0.65 mm</p> <p>PRF: 550 Hz Range: 200 km Resolution: 0.500 km/pixel Height: 0.500 km do 30.000 km ZM-C: 24000.0 ZM-D: 1.62 Data: Radar Data Rainbow@Gomex.pl</p>	<p>VIL (dBA) <i>Vertically Integrated Liquid Water</i></p> <p>Wodność scałkowana w pionie</p>	<p>Chwilowa, oszacowana zawartość wody w zdefiniowanej przez użytkownika warstwie atmosfery, wyrażona w jednostkach sum opadu [mm].</p>
Produkty wiatrowe (Wind Products)		
 <p>CAPPI (V) 02:35 / 18-sie-2009 Legionowo</p> <p>30.0 m/s 10.0 m/s 8.0 m/s 6.0 m/s 4.0 m/s 2.0 m/s 0.0 m/s</p> <p>PRF: 550 Hz Range: 125 km Resolution: 0.250 km/pixel Height: 2.000 km Alt type: CAPPI CAPPI Range: 4 km to 125 km Data: Radar Data Rainbow@SRE.pl</p>	<p>CAPPI (V) <i>Pseudo Constant Altitude Plan Position Indicator</i></p> <p>Rozkład prędkości radialnej na określonej wysokości</p>	<p>Odwzorowanie rozkładu prędkości radialnych na określonej wysokości n.p.m., wyliczonego z danych pozyskanych ze skanu dopplerowskiego. Rozkład prędkości radialnych prezentowany jest w [m/s].</p>

Graficzna postać produktu	Skrócona angielska/ polska nazwa produktu	Definicja produktu
<p style="text-align: center;">1</p> 	<p style="text-align: center;">2</p> <p>VVP(V) <i>Volum Velocity Procesing</i></p> <p>Profil pionowy wiatru</p>	<p style="text-align: center;">3</p> <p>Obraz rozkładu wektorów wiatru wyliczonych do określonej wysokości nad stacją radarową. Prędkość i kierunek wiatru liczone są dla jednakowo odległych poziomów wysokości. Uzyskujemy w ten sposób przybliżony profil pionowy wiatru dla momentu obserwacji, który może być wyświetlony w postaci tradycyjnych wektorów wiatru lub wykresu.</p> <p>Dane o wietrze pochodzą jedynie ze stref, w których występują opady.</p>
	<p>HWIND(V) <i>Horizontal Wind Technique</i></p> <p>Wiatr poziomy na określonej wysokości</p>	<p>Rozkład wiatru horyzontalnego na określonej wysokości: jego kierunek oraz prędkość. Pole wiatru horyzontalnego na produkcie wyświetlane jest jako obraz poziomych wektorów wiatru, na stałej wysokości, w punktach regularnej siatki.</p>
	<p>VSHEAR(Shear) <i>Vertical Shear</i></p> <p>Pionowy gradient prędkości wiatru</p>	<p>Obraz zmiany radialnej prędkości wiatru między dwoma ściśle określonymi warstwami atmosfery.</p> <p>Wartości produktu to absolutna różnica prędkości radialnych między sąsiadującymi w pionie komórkami z dwu warstw, podzielona przez odległość tych komórek.</p>
	<p>HSHEAR(Shear) <i>Horizontal Shear</i></p> <p>Poziomy gradient prędkości wiatru</p>	<p>Obraz zmiany prędkości radialnej na płaszczyźnie poziomej w zlokalizowanej strukturze meteorologicznej, na zadanej wysokości.</p>

Graficzna postać produktu	Skrócona angielska/ polska nazwa produktu	Definicja produktu
<p style="text-align: center;">1</p> 	<p style="text-align: center;">2</p> <p>LTB(W) <i>Layer Turbulence</i></p> <p>Turbulencje</p>	<p style="text-align: center;">3</p> <p>Obraz wskaźnika turbulencji pomiędzy dwoma określonymi warstwami atmosfery. Jego wartości wyrażone są w [m/s].</p>
Produkty prognoz i groźnych zjawisk (Forecasting & Phenomena Detection Products)		
	<p>SWI <i>Severe Weather Indicator</i></p> <p>Wskaźnik groźnych zjawisk</p>	<p>Produkt analityczny; analizie poddawane są trójwymiarowe dane radarowe skanowania dopplerowskiego. Produkt wyznacza:</p> <ul style="list-style-type: none"> - obszary intensywnych opadów i rdzeni struktur burzowych, - obszary, w których możliwe jest zlokalizowanie mezocyklonów i mezoantycyklonów, - obszary dywergencji i konwergencji, - obszary zjawisk typu <i>microburst</i>. <p>Zobrazowane na produkcie w postaci specjalnych znaczników (ikon).</p>

9.7. Badania prowadzone w latach 2004-2012

9.7.1. Prace i krajowe projekty badawcze

W ramach prac badawczo-rozwojowych na potrzeby systemu radarowego POLRAD, na podstawie danych pozyskiwanych z niego w latach 2004-2006, stworzono i rozwijano oprogramowanie służące do:

- archiwizacji i nagrywania danych radarowych oraz dodawania do bazy danych informacji o produktach radarowych – program **ANADV** (2004-2009),
- wizualizacji danych RAINBOW i NIMROD – program **RAPOK** (w latach 2004-2007 powstał główny jego trzon), rozwijany do dzisiaj,
- przygotowywania danych dla firmy RAFOT – danych w kodzie BUFR na potrzeby retransmisji danych do użytkowników poprzez system TELSEND (2004-2006),
- kodowania danych radarowych w formacie HDF5 na potrzeby innych systemów (2004-2009),

- utworzenia radarowej mapy zbiorczej asymilującej dane z innych radarów (czeskich) – program **KOMPOST** (2007),
- wizualizacji danych RAINBOW, NIMROD i Perun oraz na potrzeby służb drogowych w ramach programu RAPOK (2008-2009),
- monitorowania groźnych zjawisk atmosferycznych – system **MeteoGIS** (2005-2007), który początkowo wykonano dla Śląskiego Urzędu Wojewódzkiego, a następnie który został w 2009 r. zaadaptowany i zainstalowany w Opolskim Urzędzie Wojewódzkim,
- syntezy i wizualizacji zagrożeń meteorologicznych dla służb ruchu lotniczego – system **MeteoFlight** (2009-...). System przeznaczony dla Polskiej Agencji Żeglugi Powietrznej (PAŻP) korzysta z danych radarowych oraz danych systemu detekcji wyładowań burzowych. W OTN powstała koncepcja informatyczna i merytoryczna systemu oraz schemat wyznaczania wskaźnika zagrożeń meteorologicznych. Dane w formacie ASTERIX transmitowane są do systemu PEGASUS 21 – podstawowego narzędzia wykorzystywanego w pracy operacyjnej ruchu lotniczego. Rozszerzony zestaw danych przekazywany jest do pomocniczego systemu PANDORA, z wykorzystaniem technologii stron www. Do wyliczenia wskaźnika zagrożenia wykorzystano udoskonalone algorytmy (2012) korekt volumów danych radarowych o odbiciowości. Prowadzone są prace nad kolejnymi modułami systemu, uwzględniającymi: zjawisko oblodzenia, wykrywanie stad ptaków.

W ramach działalności statutowej IMGW-PIB wykonano następujące prace:

- TEMAT DS-MS – „Pozyskiwanie, przetwarzanie i wykorzystywanie informacji radarowej dla potrzeb prognoz meteorologicznych, badań oraz osłony społeczeństwa i gospodarki narodowej”, w ramach którego wykonywano niżej wymienione zadania składowe.
 - Ocena jakości prognoz opadów generowanych przez system NIMROD pod kątem wymagań użytkowników wewnętrznych i zewnętrznych (2005-2006).
 - Dobór metod kalibracji radaru meteorologicznego w celu ograniczenia niepewności pomiarów elementów meteorologicznych (2007-2009).
 - Radarowe charakterystyki występowania groźnych zjawisk atmosferycznych na obszarze Polski. Obraz groźnych zjawisk na produktach radarowych (2007).
 - Opracowanie schematu wskaźnika jakości danych opadowych z systemu POLRAD/NIMROD (2008).
 - Opracowanie algorytmów i modułów korekty danych radarowych (2010-2011).
 - Wykonano system RADVOL-QC służący do korekt 3D danych (volumów) radarowych oraz oceny ich jakości. Model został wdrożony do pracy operacyjnej. Opracowano algorytmy korekty tłumienia oraz wykrywania ech nie-

meteorologicznych oraz założenia do metodyki prac nad algorytmami łączenia informacji deszczomierzowej, radarowej i satelitarnej (2011- ...).

- TEMAT DS-P – Zadanie 2.2 - „Rozwój metod przetwarzania danych teledetekcyjnych, w tym metod ich automatycznej analizy i eliminacji zakłóceń, sposobów prezentacji graficznej i numerycznej oraz metod transmisji”

- Rozwój algorytmów rozpoznawania typu opadu (2012 ...)

Prace prowadzone są na danych radarowych pochodzących z radarów o podwójnej polaryzacji. Zaoferowane przez producenta systemu algorytmy do rozpoznania typu opadu wykorzystują odmienne techniki analizy danych polarymetrycznych oraz oferują różne klasy rozpoznawanych typów opadu (algorytmy: australijski – BMRC, francuski – MeteoFrance, sieci NEXRAD – USA). Każdy z algorytmów posiada także dużą liczbę parametrów (ustawień) wpływających na wyniki końcowe. Aktualnie (2013 r.) prace zmierzają do weryfikacji danych radarowych rozpoznania typu opadu, wygenerowanych według ustawień standardowych (producenta), na podstawie danych ze stacji synoptycznych w zasięgu radarów Pastewnik i Ramża.

W ramach pozyskanych grantów zewnętrznych prowadzono następujące prace badawcze:

- Grant badawczy rozwojowy MNiSzW pt. „Opracowanie prognostycznego modelu przebiegu zjawisk burzowych na podstawie modelu życia komórki burzowej” (2010-2011). Prace polegały na wyznaczeniu obszarów konwekcji na podstawie danych radarowych, systemu detekcji wyładowań burzowych, modelu COSMO i satelitarnych. Opracowano algorytm dzielenia obszaru konwekcji na poszczególne komórki burzowe (*klastering*) oraz konceptualny model życia komórki burzowej. Model jest przeznaczony do współpracy z modelem *nowcastingu* pól meteorologicznych dla kolejnego projektu (INCA).

- Grant badawczy własny MNiSzW pt. „Rozwój metod przetwarzania trójwymiarowych danych radarowych dla zastosowań w numerycznych prognozach pogody” (2010-2012). Przygotowano oprogramowanie przeznaczone do asymilacji danych: skorygowanych volumów danych radarowych odbiciowości wraz z informacją o jakości w każdym punkcie. We współpracy z ICM UW opracowano założenia do schematu asymilacji tych danych do modelu COAMPS. We współpracy z ICM UW opracowano metodę asymilacji radarowych danych do modelu meteorologicznego COAMPS oraz przeprowadzono analizę jakości prognoz. Temat wymaga dalszych badań.

- Projekt europejski (CENTRAL EUROPE): INCA-CE pt. „Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis Central Europe” (2011-...). Projekt, koordynowany przez austriacką służbę meteorologiczną ZAMG, miał na celu stworzenie środkowoeuropejskiego systemu INCA, przeznaczonego do *nowcastingu* danych

meteorologicznych, w tym opadów. Na potrzeby projektu INCA-CE wykorzystano opracowane w OTN (grantu MNiSzW z 2009-2011 r.) algorytmy *nowcastingu* uwzględniającego opady konwekcyjne, w tym ich ewolucję. Algorytmy te zostały włączone do modułu SCENE w celu współpracy z modelem INCA-PL. W 2012 r. uruchomiono testową wersję tego modułu na serwerze wirtualnym, pracującą w czasie rzeczywistym.

W latach 2009-2012 pracownicy Ośrodka Teledetekcji Naziemnej uczestniczyli w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka w pracach projektu KLIMAT – „Wpływ zmian klimatu na społeczeństwo, środowisko, gospodarkę i społeczeństwo” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Realizowano podzadanie „System analizy danych radarowych i danych detekcji wyładowań” (zadanie „Rozwój metod prognozowania i systemów ostrzegania przed groźnymi zjawiskami hydrologicznymi i meteorologicznymi oraz wykorzystanie ich do osłony kraju”), w ramach którego utworzono system ekspercki do automatycznej analizy danych z systemów nadzorowanych przez Ośrodek Teledetekcji Naziemnej IMGW-PIB. Na podstawie opracowanych metod oraz algorytmów system generuje ostrzeżenia/komunikaty o wykrytych sygnaturach niebezpiecznych zjawisk atmosferycznych.

9.7.2. Współpraca międzynarodowa po 2005 r.

Coraz powszechniejsze stawało się zrozumienie, że wymiana danych radarowych, jeśli nawet nie dla całego kontynentu, to przynajmniej w skali subkontynentalnej, staje się konieczna. Łączenie danych musi zachodzić automatycznie w systemach komputerowych, ale ostateczna decyzja dotycząca diagnozy czy prognozy może być wydana tylko przez wysoko wykwalifikowanego specjalistę (meteorologa, hydrologa) mającego dostęp do danych z innych systemów, a przyszłość meteorologii to optymalne łączenie danych z różnych źródeł (radary, lidary, sodary, satelity stacjonarne i orbitujące, naziemne pomiary ręczne i automatyczne).

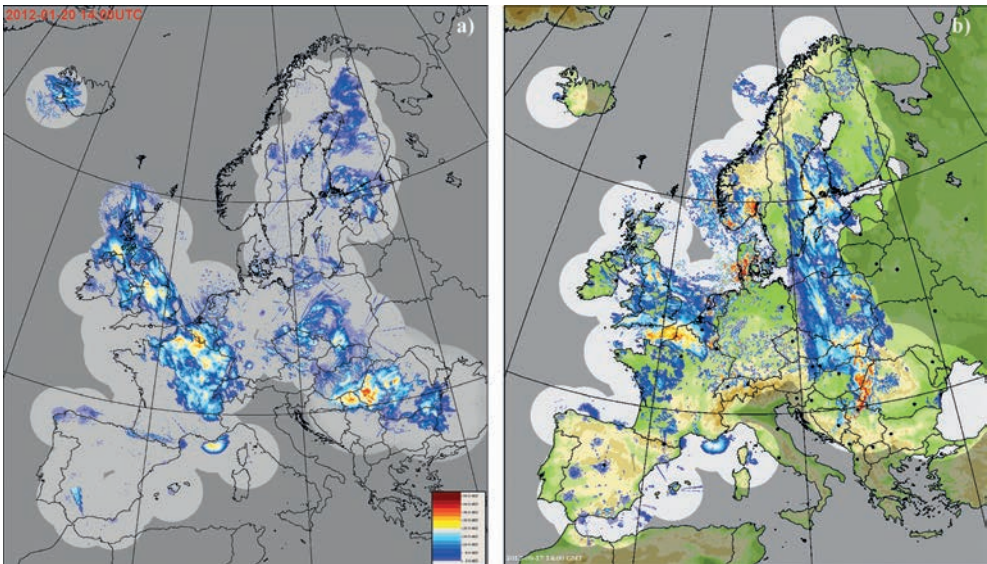
Rozwój meteorologii radarowej w Polsce podąża w tym kierunku, a pracownicy Ośrodka Teledetekcji Naziemnej uczestniczą w międzynarodowej wymianie danych radarowych i nabywają doświadczeń w kolejnych latach pracy. W latach 2006-2012 brali udział w szeregu projektów zagranicznych:

- Projekt RISK-AWARE (Risk – advanced weather forecast system to advise on risk events and management) był realizowany w latach 2004-2006 (w ramach programu INTERREG IIIB CADSES). Głównymi zadaniami było przeanalizowanie zagrożeń naturalnymi katastrofami hydrologicznymi i geologicznymi powodowanymi czynnikami meteorologicznymi, zachodzącymi w skali regionalnej, krajowej i międzynarodowej. Prace w ramach RCO IMGW były prowadzone (od 2004 r.)

w dwóch zespołach zajmujących się aspektami meteorologicznymi oraz hydrologicznymi projektu.

- OPERA, (2007-...). Projekt kontynuowano pod nazwą OPERA 3. Kierowanie programem zostało powierzone Królewskiemu Holenderskiemu Instytutowi Meteorologii – Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), a potem program przejął Fiński Instytut Meteorologii (FMI).

Zasadniczym celem programu OPERA było stworzenie wspólnej europejskiej platformy wymiany doświadczeń w zakresie rozwoju i zarządzania siecią radarów meteorologicznych. W trakcie trwania projektu został utworzony system wymiany danych radarowych Data Hub, z czasem zastąpiony systemem ODC (OPRA Data Center), który oprócz gromadzenia danych radarowych, generuje mapę zbiorczą całego kontynentu (rys. 9.43).



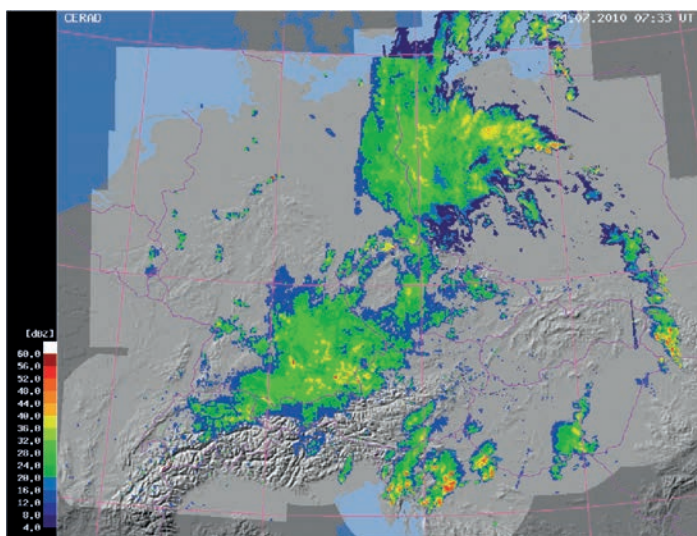
Rys. 9.43. Radarowa mapa zbiorcza tworzona w ramach programu OPERA 3 z 20.01.2012, godz. 14:00 UTC i 17.04.2013 r. godz.14:00 UTC

- COST-731 (2005-2010), tytuł projektu: „Propagacja niepewności pomiarów w zaawansowanych systemach meteorologicznych i hydrologicznych”.

Działania w ramach akcji COST-731, dofinansowane przez MNiSzW, były pracami badawczymi ukierunkowanymi na ilościowy opis jakości danych radarowych, uwzględnienie niepewności tych danych w technice tworzenia pakietów danych, oraz zagadnienia propagacji niepewności przez modele hydrologiczne opad-odpływ. Zaproponowano nowe rozwiązania, które były prezentowane na międzynarodowych

konferencjach tematycznych oraz publikowane w czasopismach naukowych. Projekt został zakończony w 2010 r.

- CERAD (Central European Weather Radar Network). Sieć środkowoeuropejska CERAD działała (od 1990 r.) jako eksperymentalna i mogła być w każdej chwili zawieszona lub zlikwidowana. Sieć działała do 2013 r.



Rys. 9.44. Europejska mapa zbiorcza tworzona w ramach programu CERAD, dane z 24.07.2010 r., godz. 07:33 UTC

- BALTRAD (2009-2011) i BALTRAD (2012-2013) pod hasłem: „Zaawansowana technologicznie sieć radarów meteorologicznych dla regionu Morza Bałtyckiego”.

Międzynarodowy projekt BALTRAD (An Advanced Weather Radar Network for the Baltic Sea Region) poświęcony był opracowaniu i wdrożeniu nowych rozwiązań technologicznych umożliwiających operacyjną wymianę danych w regionie Morza Bałtyckiego. Był finansowany ze środków europejskich w ramach programu Baltic Sea Region, a jego realizacja trwała do końca 2011 r. Celem projektu było opracowanie kompleksowego systemu informatycznego pozwalającego na udostępnienie w sieci aktualnych danych radarowych oraz narzędzi służących do generowania produktów radarowych, ze szczególnym uwzględnieniem informacji o jakości danych.

W ramach projektu Instytut był odpowiedzialny za realizację pakietu roboczego mającego na celu opracowanie oprogramowania do komunikacji i transferu danych. Ukończona aplikacja została wdrożona na serwerach pracujących w instytucjach zaangażowanych w realizację projektu. W ten sposób powstał system węzłów sieci BALTRAD, w której wymiana danych odbywa się w trybie *peer-to-peer*.

W ramach projektu budowany był system informatyczny składający się z kilku komponentów opracowywanych przez zespoły wykonujące poszczególne pakiety robocze.

W 2010 r. opracowano i wdrożono operacyjnie wersję oprogramowania BALTRAD Data Exchange System (BALTRADDEX). W ośrodku głównym IMGW-PIB został uruchomiony i skonfigurowany serwer sieci BALTRAD zakupiony ze środków projektu. Na serwerze uruchomiono pełną wersję oprogramowania BALTRAD Node (oprogramowanie integrujące wszystkie dostępne pakiety, tj. moduł wymiany danych, moduł wizualizacji oraz moduł przetwarzania danych, generowania produktów radarowych i map zbiorczych).

Pod koniec 2011 r. opublikowano pierwszą oficjalną wersję, przeznaczoną dla użytkowników końcowych. Wersja „beta” oprogramowania osiągnęła pełną funkcjonalność założoną w planie prac projektu, która charakteryzowała się dostateczną stabilnością i efektywnością działania.

Prace koncentrowały się również na integracji komponentu przeznaczonego do wymiany danych z innymi modułami oprogramowania. Rozwijano moduł odpowiedzialny za dostarczanie danych z lokalnego systemu produkcyjnego (RAINBOW) do systemu BALTRAD.

W 2011 r. przedstawiciele programu Baltic Sea Region podjęli decyzję o przedłużeniu projektu o kolejne dwa lata i przyznaniu dodatkowego dofinansowania. Nowy projekt otrzymał nazwę „BALTRAD+”

W ramach WP3 pracowano nad rozwojem algorytmów wchodzących w skład pakietu RADVOL-QC. W ramach prac WP4 koordynowano współpracę w ramach projektu BALTRAD+ z końcowymi użytkownikami danych radarowych. Opracowano raport „Draft of catalogue of radar-based products which end-users are interested in”. Zorganizowano forum użytkowników danych radarowych (User Forum 1) w maju 2012 r. w Krakowie, składające się z części technicznej oraz części dotyczącej wymiany i zastosowań danych radarowych.

Pełne oprogramowanie tworzone w ramach projektu udostępniane jest na zasadach *Open Source*, co oznacza, że jest dostępne bezpłatnie dla wszystkich zainteresowanych.

10. Rozpoznawanie zjawisk i procesów meteorologicznych w systemie radarowym

W przypadku radarów wcześniej pracujących (MRŁ-2 i MRŁ-5) opracowane systemy automatycznego rozpoznania zjawisk (PSR i AMSR) oparte były na funkcjach dyskryminacyjnych opracowanych przez pracowników IMGW [Moszkowicz 1982]. Funkcje te były przekształcane, weryfikowane i udoskonalane w kolejnych latach prac badawczych, prowadzonych z wykorzystaniem danych radarowych.

System radarowy zbudowany na bazie radarów dopplerowskich w latach 2002-2004 (pracujących z falą o polaryzacji poziomej) nie posiadał produktów (procedur) klasyfikujących typ opadów. Jednak analiza szerokiego zakresu generowanych produktów umożliwiła wydanie ostrzeżeń o niebezpiecznych zjawiskach meteorologicznych typu: opad, burze, grad, a także o silnym wietrze i jego gradiencie w pionie czy poziomie.

10.1. Podstawowe zjawiska i procesy, a produkty radarowe

Opad

Obecnie produkty radarowe umożliwiają bardzo dokładny monitoring opadu. Pozwalają na określanie w czasie rzeczywistym momentu jego pojawienia się oraz tendencji zmian zarówno w przypadku gwałtownych, nawalnych, jak i słabych opadów występujących w różnych porach roku.

Podstawowym produktem obrazującym natężenie opadu jest SRI. W oparciu na tym produkcie tworzona jest mapa PAC godzinnych sum opadów, kilkugodzinnych sum opadów i dobowej sumy opadów. Natomiast ilość opadu potencjalnego można ocenić za pomocą produktu VIL (wodność w pionie). Cały obszar zagrożony wystąpieniem opadu odzwierciedlają produkty maksymalnych wartości odbiciowości typu MAX(dBZ) lub CMAX(dBZ).

W zależności od potrzeb informacja o obszarach intensywnych opadów (w zasięgu do 125 km od radaru) może być wydzielona na produkcie typu SWI wraz z wyróżnieniem rdzenia opadowego (obszaru o najintensywniejszym opadzie – *core*) w przypadku szczególnie niebezpiecznych struktur opadowych. Dodatkową zaletą tego produktu jest możliwość przybliżonego oszacowania objętości struktury opadowej w [m³] i ilości wody w niej zawartej wyrażonej w [t], czyli tego, co w najbliższym czasie może, pod postacią opadu, pojawić się na powierzchni ziemi.

Burze

Radar nie jest w stanie wykryć wyładowania atmosferycznego, które jest podstawowym zjawiskiem towarzyszącym burzy. Jednakże istnieje możliwość pośred-

niego rozpoznawania burz poprzez monitoring rozwoju struktur meteorologicznych w całym obszarze pomiaru radarowego, monitoring intensywności opadów czy maksymalnych wartości odbiciowości z produktów typu: CAPPI(dBZ), MAX(dBZ) i EHT. Wydzielenie rdzeni struktur burzowych, w momencie ich najintensywniejszego rozwoju [Evans, Weber 2000], dla sytuacji rozwiniętej konwekcji, można wykonać, wykorzystując do tego celu produkt SWI (wskaźnik groźnych zjawisk), a do wyznaczenia obszarów narażonych na wystąpienie gradu – produkt ZHAIL, który określa prawdopodobieństwo wystąpienia gradu w obszarze zlokalizowanej struktury.

Analizę szczególnie niebezpiecznych struktur burzowych (opadowych) można wzbogacić poprzez obserwacje ich rozwoju na produktach dodatkowych, takich jak:

- przekroje pionowe: VCUT i MLVCUT dla obszarów szczególnie zagrożonych wyładowaniami,
- obrazy odbiciowości radarowej CAPPI(dBZ) na dodatkowych (różnych) wysokościach,
- CMAX(dBZ), za pomocą którego możemy określić obszar o najintensywniejszej skali zjawiska.

W przypadku burz szczególnie przydatne mogą okazać się dane na produktach obrazujących wysokości ech radarowych typu EHT.

Do śledzenia i określania kierunku przemieszczania się struktur burzowych i ich prędkości można wykorzystać produkt umożliwiający monitorowanie komórek burzowych CTR.

Grad

Zjawisko to najczęściej towarzyszy obszarom występowania burz. Ze względu na jego dużą szkodliwość dla różnych gałęzi gospodarki i społeczeństwa bardzo cenna jest jakakolwiek możliwość monitorowania obszarów narażonych na jego wystąpienie. Służy do tego produkt ZHAIL (prawdopodobieństwo wystąpienia gradu). Informacje w nim zawarte można wspomóc łączoną analizą produktów typu: MAX(dBZ) i EHT.

Wiatr

Pomimo poważnego ograniczenia, jakim jest pomiar wiatru tylko w obszarach stref opadowych, w przypadku radarów dopplerowskich pracujących w sieci POLRAD tkwią duże możliwości, co do określania obszarów silnych wiatrów (o prędkościach przekraczających 17 m/s) oraz porywów wiatru (prędkości większej o co najmniej 5 m/s od prędkości średniej w ciągu 10 minut). Poza określaniem prędkości wiatru istnieje możliwość określania jego kierunku w formie tradycyjnych meteorologicznych strzałek wiatru. Podstawowym produktem obrazującym rozkład wiatru

na określonej wysokości n.p.m. jest produkt HWIND. Jest wykorzystywany praktycznie do monitorowania wszystkich zjawisk typu wiatrowego.

Dywergencja, konwergencja

Z rozwojem struktur konwekcyjnych związane są najczęściej dynamiczne procesy meteorologiczne. Do oceny ich intensywności można wykorzystać (poza innymi produktami) produkt SWI. Umożliwia on pozyskanie informacji o aktywności tych procesów. Pozwala na identyfikację obszarów: intensywnych opadów, procesów lokalnej dywergencji i konwergencji, wystąpienia mikroburst oraz zwiastunów mikroburst, struktur anty- i mezocyklonalnych. Produkt ten, poza możliwością identyfikacji wymienionych zjawisk, generuje ich charakterystyki z podaniem wartości wielu parametrów meteorologicznych, określa ich lokalizację, oszacowuje wysokości, na których mogły wystąpić. Należy jednak zaznaczyć, że analizy prowadzone są tylko w obszarze struktury opadowej zidentyfikowanej w procesie skanowania dopplerowskiego.

Wiry i trąby powietrzne

Poza produktem SWI dla szczególnie ekstremalnych sytuacji, kiedy możliwe jest pojawienie się wirów powietrznych, analizę zjawisk/procesów można uzupełnić, wykorzystując produkty dopplerowskie bazujące na rozkładzie prędkości radialnych typu PCAPPI(V) i CMAX(V).

W przypadku wygenerowania przez produkt SWI symboli struktur cyklonalnych połączenie tych informacji z produktami skanowania klasycznego może ustrzec przed ewentualnymi błędami wynikającymi z zakłóceń (ech anomalnej propagacji) lub błędnej pracy algorytmów zastosowanych w systemie.

Zaadaptowany w sieci POLRAD algorytm detekcji mezocyklonów opracowany został w 1985 r. dla sieci radarowej NEXRAD [*Instruction Manual...* 2007].

Gradienty prędkości wiatru

Do analizy obszarów, w których występują zmiany prędkości wiatru wykorzystywane mogą być produkty typu SHEAR. Do określenia obszarów występowania poziomego gradientu prędkości radialnych wykorzystywany jest produkt HSHEAR, a pionowego – VSHEAR.

W przypadku oceny gradientu prędkości wiatru problemem jest mały zasięg pomiarowy (125 km od radaru). Dodatkowe ograniczenia wynikają z:

- tzw. horyzontu radarowego (im dalej od radaru, tym wiązka biegnie wyżej),
- pomiaru jedynie w obrębie stref opadowych,
- lokalizacji stacji radarowej (jej wysokość n.p.m.).

Jedynym rozwiązaniem wymienionych problemów jest zagęszczenie stacji radarowych w ramach sieci POLRAD.

Turbulencje

Dane o turbulencji pozyskiwane są z radarowego pomiaru wartości szerokości widma prędkości radialnych. Produkt LTB, generowany na podstawie tego pomiaru, identyfikuje obszary turbulencji w określonej warstwie zidentyfikowanej struktury opadowej. Obecnie nie ma innej możliwości analizy wymienionego zjawiska na podstawie danych z systemów teledetekcyjnego badania atmosfery.

Marznący opad, przymrozki

Możliwości monitorowania przymrozków w oparciu na danych radarowych praktycznie nie ma. Natomiast w przypadku występowania opadów marznięcych, szczególnie w przejściowych porach roku: zima-wiosna, jesień-zima, można do ich identyfikacji posłużyć się produktami radarowymi. Wymaga to jednak dużego doświadczenia i wiedzy z dziedziny meteorologii radarowej. Jest to zagadnienie wybiegające poza zakres niniejszego opracowania. Najprostszą metodą, w tym wypadku, jest analiza produktu SRI i temperatury przy gruncie (ok. 0°C) w obszarze występowania opadów.

Upały – susze

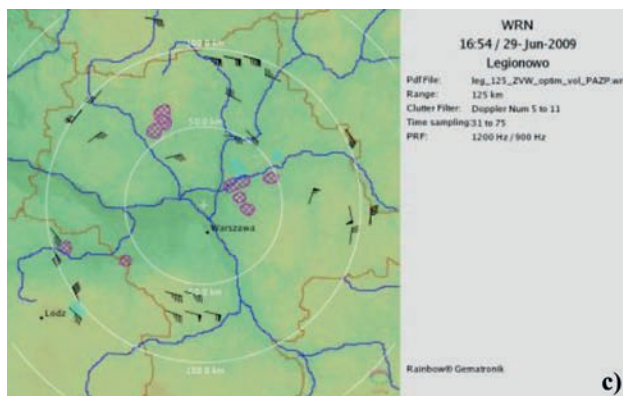
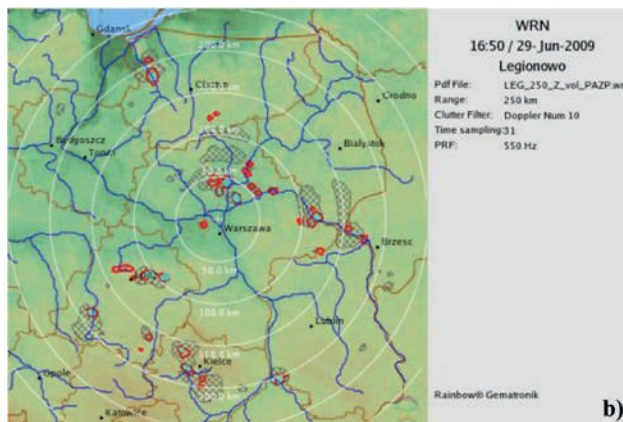
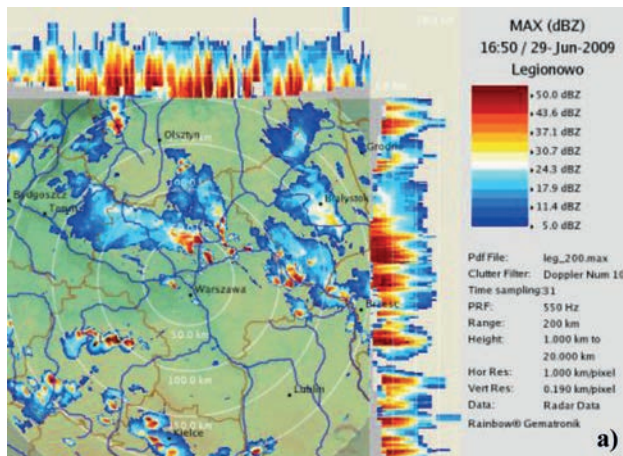
Wprawdzie pomiar temperatury nie leży w zakresie możliwości radaru, jednak brak ech radarowych (opadów) w tym wypadku jest bardzo istotną informacją.

Dla takich zjawisk, jak np. susza długofalowa i towarzyszące jej upały, trudno jest określić termin, kiedy się skończą. W przypadku danych radarowych pojawienie się jakichkolwiek struktur opadowych świadczyć może o ich zakończeniu lub złagodzeniu skutków. Radar w tym wypadku jest narzędziem, które najszybciej dostarcza dane o opadach (produkt SRI). Natomiast produkty typu MAX(dBZ) i CMAX(dBZ) są w stanie dać informacje o wszelkich strukturach, jeszcze nie opadowych, w atmosferze (tzw. echa podniesione). Przewagą informacji radarowej, w tym wypadku, jest fakt, że produkty te mogą być wyliczane z dużą rozdzielczością czasową (co 10 minut) i przestrzenną (z obszarów 1x1km lub 500x500m, do wysokości maksymalnej 20 km).

Ostrzeżenia

Na podstawie informacji zawartych w produktach systemu POLRAD możliwe jest wydzielenie obszarów potencjalnie zagrożonych niebezpieczeństwem pojawienia się zdarzeń ekstremalnych. Umożliwia to specjalistyczny moduł systemu FD&WARN, którego efektem pracy, po odpowiednim zdefiniowaniu scenariusza

ostrzeżeń, są produkty (typu WRN) obrazujące wymienione obszary. Są one wynikiem analiz danych skanowania klasycznego (rys 10.1b) i dopplerowskiego (rys. 10.1c).



Rys. 10.1. Produkty z dnia 24.06.2009 r., godz. 16:50 UTC – radar Legionowo:
a) MAX(dBZ) – maksymalne wartości odbiowości radarowej,
b) WRN – z danych skanowania klasycznego,
c) WRN – z danych skanowania dopplerowskiego, wskazujące obszary zagrożone wystąpieniem zdarzeń ekstremalnych

Tab. 10.1. Zbiornice zestawienie zjawisk/procesów meteorologicznych możliwych do powiązania z produktami systemu POLRAD

Zjawiska, o których powinien informować synoptyk	PPi(DBZ)	PPi(V)	PPi(W)	CAPPI(DBZ)	MAX(DBZ)	MAX(V)	CMAX(DBZ)	CMAX(V)	CMAX(W)	EHT	RHI(DBZ)	SRI(DBR)	PAC	VIL	VVP	HWIND	CAPPI(V)	RHI(V)	HSHEAR	VSHEAR	CAPPI(W)	MAX(W)	LTB	SWI	ZHAIL	RTR	CTR	WRN-200	WRN-100
Wiatr		2	2			2		2	2						1	1	2	3	1	2	2	2	2	2					1
Upały					1																							1	
Opady deszczu				2	1					1	3	1	1	1									2	2		1		1	
Śnieg					1					1		1	1	1												2			
Opady marznące	1				1		2	2			3	1	1	2															1
Zawieje śnieżne						2	1	2			3	1			1	1	2	3								1			
Burze	2			2	1	2	1	2	2	1	3	1			1	1								1	1	1			
Grad					1		1			1	3													1	1				
Wiry, trąby		2	2			2		1	2						1	2	2	3	2	2	2	1	2	1					1
Uskoki wiatru															2	2			1	1									1
Turbulencje																					2	2	1						1
Konwergencja								1	1							2								1					
Dywergencja								1	1						2	2								1					

1 – produkty, które powinno się brać do analizy danego zjawiska

2 – produkty, które mogą być dodatkowo wykorzystane do określenia zjawiska

3 – analiza zdarzenia możliwa tylko na wybranym azymucie

10.2. Istota klasyfikacji ech radarowych w procesie automatycznego rozpoznawania zjawisk ekstremalnych

Jednym ze wstępnych (głównych) procesów rozpoznawania zjawisk na podstawie wartości odbiciowości radarowej jest ich podział na echa:

- warstwowe – właściwe dla okresu późnej jesieni, zimy i wczesnej wiosny,
- konwekcyjne – charakterystyczne dla okresu późnej wiosny i lata,
- niesklasyfikowane – najczęściej to echa anomalnej propagacji.

Podział ten stosowany był już w przypadku analizy obrazów radarowych na pierwszych radarach, a także w procesie automatycznej klasyfikacji w systemach rozpoznania zjawisk opartych na radarach MRL-2 (PSR) i MRL-5 (AMSR). Z typem ech radarowych ściśle związane są zjawiska meteorologiczne im towarzyszące. Zastosowanie tego podziału, pozwala na ukierunkowanie procesu generowania ostrzeżeń o niebezpiecznych zjawiskach. W przypadku systemów automatycznej klasyfikacji decyduje on o dalszym przebiegu obliczeń z wykorzystaniem właściwych produktów pobieranych do generowania ostrzeżenia określonego typu.

Celem wymienionego podziału jest jednocześnie wyznaczenie, przynajmniej w przybliżeniu, regionów komórek konwekcyjnych (również takich, które są wbudowane w rozległe strefy chmur warstwowych). Z komórkami konwekcyjnymi są związane bardziej intensywne procesy, mogące stwarzać zagrożenia.

Opracowane już w 1982 r. [Moszkowicz 1982] procedury wymienionej klasyfikacji ech radarowych, a następnie automatyzacja tego procesu [Moszkowicz, Tuszynska 1988] wykazały ich bardzo dużą przydatność w konstruowaniu kolejnych systemów.

W latach 2009-2012 w IMGW-PIB w trakcie realizacji projektu KLIMAT pt. „Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo”, w ramach zadania „Rozwój metod prognozowania i systemów ostrzegania przed groźnymi zjawiskami hydrologicznymi i meteorologicznymi oraz wykorzystanie ich do osłony kraju” prowadzono prace związane z generowaniem ostrzeżeń o niebezpiecznych zjawiskach z wykorzystaniem danych radarowych i danych detekcji wyładowań w powiązaniu z innymi systemami działającymi w służbie operacyjnej.

Zastosowany w ramach projektu KLIMAT algorytm automatycznego wyznaczania obszarów zagrożonych zdarzeniami ekstremalnymi określonego typu opierał się na założeniach opracowanych przez dra Stanisława Moszkowicza, gdzie punktem wyjścia był wariogram – funkcja struktury (10.1) klasyfikacji odbiciowości radarowej pozyskanej z mapy zbiorczej utworzonej z maksymalnych wartości odbiciowości. Proces zmierzał do automatycznej klasyfikacji ech radarowych.

$$D(r) = \frac{\sum_{i=1}^N (Z_0 - Z_i)^2}{Z_0 (\sum_{i=1}^N Z_i + 1)} \quad (10.1)$$

gdzie:

Z_0 – odbiciowość w punkcie analizowanym,

Z_i – odbiciowość w punkcie i w odległości r ,

N – liczba punktów dostępnych w odległości r :

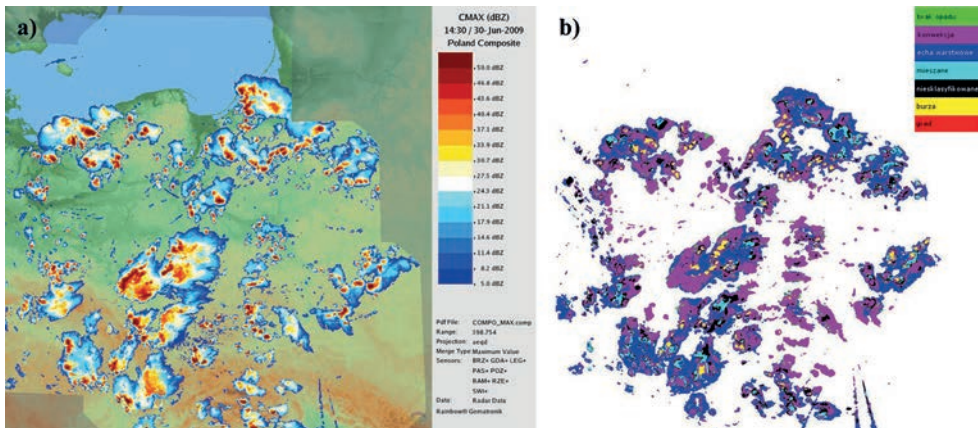
Tab. 10.2. Kolejne kroki postępowania w ramach algorytmu rozpoznania typu ech radarowych

Kolejne kroki	Działanie	Efekt	Rozpoznawany obiekt
Krok 1	Obliczanie $D(r)$ dla wszystkich punktów z odbiciowością niezerową w odległości: - 10 km, - 20 km.	Wyszukanie ech radarowych	
Krok 2	Przebieg po punktach z odbiciowością niezerową.	Wydzielenie ech bezopadowych: jeśli $D(10) > 10$	Echo bezopadowe
Krok 3	Przebieg po echach niesklasyfikowanych jako bezopadowe.	Wydzielenie ech konwekcyjnych: jeśli $D(20) > 1$ lub $C_{MAX_{dBZ}} > 35$ dBZ	Opad przelotny z chmury konwekcyjnej
Krok 4	Przebieg po echach niesklasyfikowanych jako bezopadowe lub konwekcyjne.	Wydzielenie ech warstwowych: jeśli $D(20) \leq 0.5$	Opad jednostajny z chmury warstwowej
Krok 5	Przeszukiwanie tylko po echach konwekcyjnych.	Jeśli $C_{MAX_{dBZ}} > 40$ dBZ i $EHT > 5$ km	Silna konwekcja (prawdopodobna burza)
Krok 6	Przeszukiwanie ech tylko z silną konwekcją.	Jeśli $C_{MAX_{dBZ}} > 60$ dBZ i $EHT > 9$ km	Prawdopodobny grad

Dla ech warstwowych w rozpoznawaniu uwzględniano przede wszystkim wysokość występowania ech radarowych (produkt EHT dla pojedynczego radaru lub mapy zbiorcze utworzone w oparciu na tym produkcie).

W przypadku konieczności wydzielenia ech konwekcyjnych w układzie chmur mieszanych dr Moszkowicz zalecał:

- po analizie wysokości struktur opadowych uzupełnić ją analizą odbiciowości radarowej w oparciu o produkty:
 - odbiciowości radarowej na wysokości 1 km,



Rys. 10.2. Przykładowa sytuacja z cechami silnej konwekcji: a) mapa zbiorcza utworzona z maksymalnych wartości odbiciowości, b) wynik działania algorytmu rozdziału echa dla prezentowanej na mapie sytuacji

- maksymalnej wartości odbiciowości w słupie o podstawie 1×1 km do 15-18 km – co pozwoliłoby wydzielić echa konwekcyjne bardzo silne
- porównanie:
 - odbiciowość typu $\log Z_{CAPPI}$ z $\log Z_{MAX}$, gdzie: $\log Z_{MAX}$ – odbiciowość maksymalna w słupie $1 \times 1 \times 16-20$ km
 - przyrost wysokości D_{EHT} dla obszarów (punktów) o maksymalnej odbiciowości, gdzie: D_{EHT} – to różnica wysokości w punktach sąsiadujących z punktem o maksymalnej wysokości lub wysokości maksymalnej odbiciowości pozyskiwanej z produktu EHT_{MAX} [Moszkowicz 1982].

Według Moszkowicza ok. 1/3 echa konwekcyjnych o małej odbiciowości i małym zróżnicowaniu przestrzennym może zostać zaliczona do echa warstwowych, a 1/3 echa konwekcyjnych o dużej odbiciowości i dużych gradientach poziomych zostanie uznana za echa konwekcyjne.

Błędy te nie wydawały się być istotne, gdyż słabe chmury konwekcyjne nie powinny być niebezpieczne, natomiast chmury warstwowe zaliczane do konwekcyjnych podlegały dalszemu rozpoznawaniu, co skutkowało brakiem fałszywego alarmu o burzy czy ulewie z tych chmur [Moszkowicz 1982].

11. Radary z podwójną polaryzacją fali elektromagnetycznej

11.1. Instalacja nowych radarów na stacjach PAS i RAM

Dzięki środkom pozyskanym przez IMGW-PIB na odtworzenie majątku PSHM możliwa była wymiana wyeksploatowanego radaru, typu METEOR 360 AC, pracującego od 2000 r. w Pastewniku, na najnowszej generacji radar METEOR 1600 CD firmy Selex Sistemi Integrati, z funkcją podwójnej polaryzacji fali.

Pod koniec prac instalacyjnych nowego radaru (trzy miesiące wyłączenia z pracy operacyjnej) pracownicy Ośrodka Teledetekcji Naziemnej uczestniczyli w szkoleniach (w dniach 30.11-11.12.2009 r.) dotyczących: obsługi i serwisu nowego urządzenia radarowego, funkcjonalności dostarczonego oprogramowania oraz wykorzystania podwójnej polaryzacji fali w meteorologii radarowej (szkolenie było otwarte dla wszystkich pracowników IMGW). Prowadzili je specjaliści z firmy Selex Sistemi Integrati.

Prace instalacyjne radaru zakończono 11 grudnia 2009 r. testami akceptacyjnymi oprogramowania do: pozyskiwania, przetwarzania i prezentacji danych radarowych. Testy funkcjonalne i integracyjne nowego systemu zakończyły się powodzeniem 15 grudnia 2009 r. Radar rozpoczął pracę w trybie operacyjnym.

W ramach umowy przeprowadzono również remont stacji oraz wymieniono kopułę osłaniającą antenę radarową (jakość kopuły jest bardzo istotna, jeśli chodzi o tłumienie fali elektromagnetycznej w trakcie intensywnych opadów).



Rys. 11.1. Odbiór zrealizowanej inwestycji na stacji radarowej w Pastewniku – testy SAT (od lewej): Rafał Lewandowski (Kierownik OTN od 2014r.), Dorota Senatorska – przedstawiciel OTN, Kamal Ait-Harma – przedstawiciel firmy Selex

W związku z tym, że wykonawca prac był również dostawcą oprogramowania używanego w Ośrodku Teledetekcji Naziemnej, dostarczona została aktualizacja systemu (w dniach 30 listopada – 1 grudnia 2009 r.) do najnowszej wersji, która współpracuje do dziś również z pozostałymi radarami wchodzącymi w skład sieci POLRAD.

Ze względu na to, że były trudności z pozyskiwaniem części zamiennych do niektórych radarów starszego typu (Ramża i Pastewnik), a także z powodu



Rys. 11.2. Radary PAS i RAM:
 a) montaż urządzeń radaru o podwójnej polaryzacji na wieży stacji radarowej w Pastewniku,
 b) wieża radaru RAM po wymianie urządzeń i kopuły

Tab. 11.1. Charakterystyka techniczna radaru METEOR 1600C

Radar meteorologiczny typu METEOR 1600 C		
Dane techniczne nadajnika		
Częstotliwość fali (pasmo C)	[MHz]	5620
Moc w impulsie	[kW]	$P_{imp} = 250$
Częstotliwość powtarzania impulsów (PRF)	[Hz]	$f_{powt.} = 250-2000$
Czas trwania impulsu	[μ s]	$t_{imp} = 0,5-2$
Typ nadajnika	–	klistron
Dane techniczne anteny		
Rodzaj i typ anteny	–	paraboliczna
Typ polaryzacji	–	liniowa: pozioma i pionowa
Średnica anteny	[m]	$d = 4,2$
Szerokość wiązki	[°]	1
Kąt elewacji anteny	[°]	-2-182
Kąt azymutu anteny	[°]	0-360
Maksymalna prędkość obrotu anteny	[°/s]	36
Zysk anteny	[dBi]	44,5

starzenia się całego urządzenia, występowały dłuższe przestoje (2008 r.) i gorsza jakość pozyskiwanych danych (radar RAM pracował od 1999 r.).

W roku 2010 (także dzięki środkom pozyskanym przez IMGW-PIB na odtworzenie majątku PSHM) udało się w krótkim czasie wymienić wyeksploatowane urządzenie na Ramży, typu METEOR 360 AC, na najnowszej generacji radar o podwój-

nej polaryzacji METEOR 1600 CD. Prace poprzedzone wielomiesięcznymi przygotowaniem zostały zakończone w połowie grudnia 2010 r. Wykonano jednocześnie remont pomieszczeń radaru oraz instalacji elektrycznych i teleinformatycznych. W trakcie wymiany urządzeń (w okresie 7.10-14.12.2010 r.) dane radarowe dla obszaru Śląska pozyskiwane były z wypożyczonego radaru mobilnego Meteor 50DX, dostarczonego przez firmę Selex Systems Integration. Ocena tego urządzenia (funkcjonującego jako wypełnienie luki w dostępie do danych radarowych) była bardzo pozytywna. Radar okazał się prosty w obsłudze (instalacja, podłączanie do mediów, transmisja danych), bezawaryjny, a przede wszystkim doskonale spełniał swoją rolę. Dostarczał danych radarowych wraz z rozróżnieniem typu opadu (podwójna polaryzacja) w promieniu 100 km od miejsca instalacji (lotnisko Pyrzowice koło Katowic), które w znacznym zakresie zastępowały dane z radaru na Ramży. Dostarczane dane były poprawne i bez zastrzeżeń wpisywały się w radarową mapę zbiorczą. Nie zawierały dużej ilości ech stałych czy innych zakłóceń.

Rozważano także zastosowanie w IMGW radaru mobilnego. Byłoby to urządzenie zastępcze w razie awarii radarów wchodzących w skład sieci radarów meteorologicznych POLRAD, a także:

- służyłoby do monitorowania obszarów położonych na terenach trudno dostępnych, ze względu na ukształtowanie terenu, i do skuteczniejszej obserwacji przez istniejące urządzenia radarowe – np. Kotlina Kłodzka,
- umożliwiałoby monitorowanie obszarów, w których brak pokrycia radarowego (północno-wschodnia Polska),



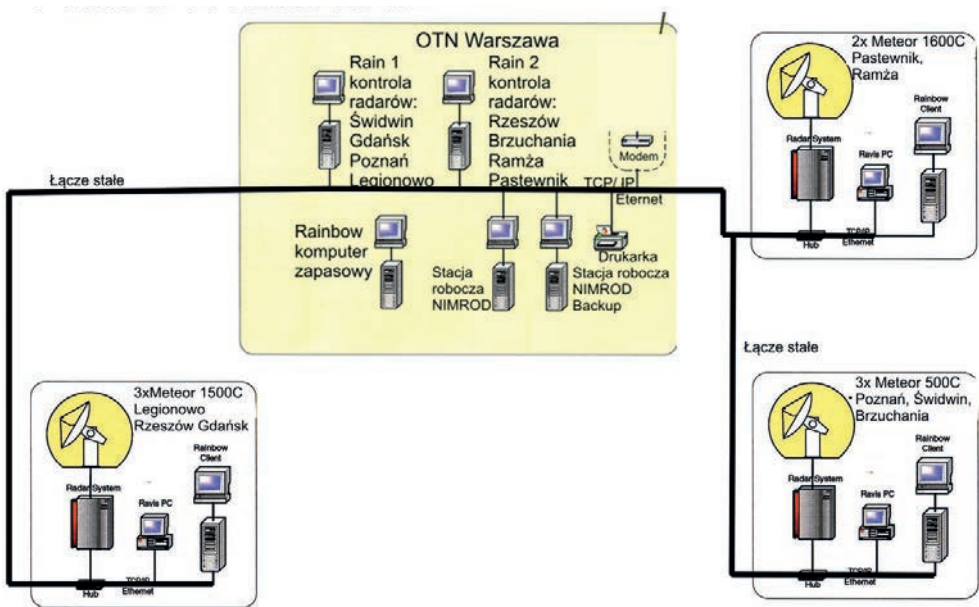
Rys. 11.3. Radar mobilny typu Meteor 50DX

Tab. 11.2. Charakterystyka techniczna radaru mobilnego Meteor 50DX

Parametry	Radar mobilny typu Meteor 50DX
Częstotliwość fali	9375 +/- 30 MHz
Długość fali	3,2 cm
PRF	250-2500 Hz
Moc w impulsie	75 kW
Liniowy zakres dynamiczny	90 dB
Współczynnik szumów	3 dB
MDS LP	-113 dBm
Czułość	12 dBZ przy 60 km
Zysk anteny	42,5 dBi
Szerokość wiązki	1,3°
Typowy zasięg	100 km

- byłyby wykorzystywane jako dodatkowe źródło danych dla obszarów zagrożonych powodzią,
- z uwagi na stosowaną podwójną polaryzację fali (obecnie w tę funkcję wyposażone są jedynie radary Ramża i Pastewnik) pozwalałyby na rozróżnianie typu opadu (w uproszczeniu deszcz czy śnieg), co umożliwiłoby wspieranie służb drogowych w okresach zimowych.

Radar mobilny w pewnych okolicznościach znacząco lub nawet zasadniczo polepszyłby możliwości osłony kraju przed groźnymi zjawiskami hydrometeorologicznymi.



Rys. 11.4. Topologia sieci POLRAD w 2010 r. po wymianie radarów w PAS i RAM na radary z podwójną polaryzacją w konfiguracji połączeń metodą naziemną

W ramach kontraktu realizowanego na dostawę drugiego radaru o podwójnej polaryzacji fali dokonano kolejnej aktualizacji oprogramowania: generującego produkty radarowe (RAINBOW) i serwisowego (RAVIS).

11.2. Specyfika pomiaru falą podwójnie spolaryzowaną

Klasyczne radary meteorologiczne wysyłają wiązkę mikrofal o polaryzacji liniowej poziomej. Oznacza to, że wektor elektryczny fali elektromagnetycznej oscyluje w płaszczyźnie poziomej [Moszkowicz, Tuszyńska 2003]. Natomiast w przypadku radarów z podwójną polaryzacją fali, jeden z emitowanych sygnałów

jest spolaryzowany w płaszczyźnie poziomej, a drugi w płaszczyźnie pionowej. W praktyce sprowadza się to do emisji sygnału radarowego, spolaryzowanego poziomo i pionowo, jednocześnie z dwu kanałów nadawczych, a następnie odbioru sygnału odbitego, przez kanały, z których każdy dostosowany jest do swojej polaryzacji. Dzięki temu pozyskujemy (jednocześnie) dwa rodzaje pomiarów tych samych obiektów meteorologicznych: odbiciowość pochodzącą od fali spolaryzowanej poziomo Z_H i pionowo Z_V .

W przypadku radarów pracujących z podwójną polaryzacją fali przy uwzględnieniu szerokości wiązki:

- poziomo spolaryzowanej θ ,
- pionowo spolaryzowanej ϕ

oraz przy założeniu, że współczynnik strat mocy L_r , między nadajnikiem a anteną oraz anteną a odbiornikiem jest bardzo niski (nieistotny), równanie (4.23) na moc odebraną P_r , można przedstawić następująco:

$$P_r = \frac{\pi^3}{1024 \cdot \ln 2} \cdot \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \theta \cdot \phi \cdot h}{\lambda^2} \cdot \frac{|K|^2}{R^2} \cdot Z \quad (11.1)$$

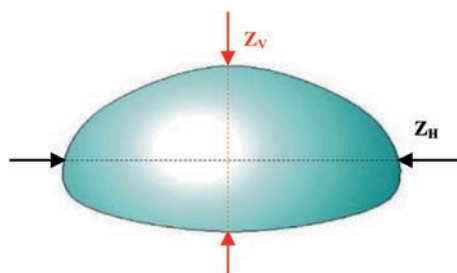
Kolejne mnożniki równania (11.1) zawierają:

- pierwszy – stałe geometryczne wynikające z techniki pomiaru radarowego,
- drugi – parametry techniczne radaru (stała sprzętowa),
- trzeci – charakterystykę zlokalizowanego obiektu meteorologicznego uzależnioną od parametrów dielektrycznych cząstek – wynikającą z typu hydrometeorów i pozyskiwanej od nich odbiciowości radarowej.

Przy pomiarze odbiciowości radarowej porównuje się *amplitudy* wysyłanego i odebranego sygnału, a przy pomiarach prędkości cząsteczek rozpraszających porównuje się *częstotliwości* wysyłanego i odebranego sygnału. W przypadku radarów polarymetrycznych obiekty meteorologiczne generują odmienne relacje pomiędzy amplitudami oraz fazami odebranego sygnału echa rejestrowanego w obu kanałach. Daje to w efekcie możliwość analizowania, w układach przetwarzania radarowego, ech radarowych poprzez porównanie sygnału odebranego przez kanał odbiorczy z sygnałem wysyłanym przez kanał nadawczy. Pozwala to na pozyskanie zróżnicowanej informacji odnośnie do charakterystyk zlokalizowanego obiektu ze względu na polaryzację sygnału sondującego.

Możliwości te są bezpośrednio powiązane ze specyficznymi właściwościami hydrometeorów w atmosferze. Jak wiadomo kształt swobodnie spadającej kropli zależy od jej wielkości, przy czym najmniejsze kropelki są prawie idealnie okrągłe, natomiast duże spadając, mają tendencję do „spłaszczania się”. Zmniejszenie „pionowej średnicy” kropli jest tym większe, im większa jest jej objętość i prędkość spadania. W przypadku omiatania wiązką radarową takich spłaszczonych kropli,

powracający sygnał zależy od płaszczyzny polaryzacji fali. Wykonując pomiary radarem o podwójnej polaryzacji fali, to tak jakbyśmy dokonywali pomiaru średnic kropeł wzdłuż dwóch płaszczyzn – pionowej i poziomej – wynikających z opromieniowania hydrometeorów jednocześnie falą o pionowej i poziomej polaryzacji. Skutkiem tego pozyskuje się dwie różne wartości sygnału odbitego od tych samych kropli.



Rys. 11.5 Średnice kropli mierzone w procesie skanowania falą podwójnie spolaryzowaną

W przypadku kropeł, których średnice są większe od 1 mm, pomiar falą spolaryzowaną poziomo daje większą wartość odbiciowości niż falą spolaryzowaną pionowo (odbiciowość Z jest sumą szóstych potęg średnic kropeł) w opromieniowywanej objętości przestrzeni. Porównując sygnały odbierane w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach, możemy ocenić wielkości kropełek dominujących. Pozyskanie takiej informacji skutkuje, między innymi, dokładniejszym przeliczeniem odbiciowości na natężenie opadu.

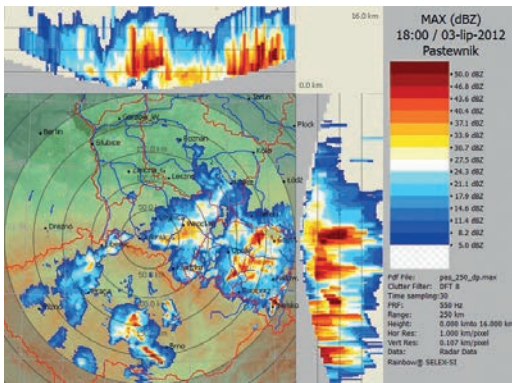
11.3. Wskaźniki pozyskiwane z pomiarów polarymetrycznych

Na podstawie wartości wysłanego i odebranego sygnału podwójnie spolaryzowanego konstruuje się różnego rodzaju wskaźniki:

- ZDR – Differential Reflectivity ZDR w [dB],
- $PhiDP$ – Differential Propagation Phase w [$^{\circ}$],
- $uPhiDP$ – uncorrected Differential Propagation Phase w [$^{\circ}$], (nie jest standardem),
- KDP – Specific Differential Phase w [stopnie/km],
- $uKDP$ – uncorrected Specific Differential Phase w [$^{\circ}$ /km], (nie jest standardem),
- $RhoHV$ – Co-Polar Correlation Coefficient [-] – ρ_{HV} ,
- LDR – Linear Depolarization Ratio in [dB] – nie liczone w sieci POLRAD, które wykorzystuje się operacyjnie do przeprowadzenia analiz zebranych informacji.

W przypadku radarów pracujących z podwójną polaryzacją fali pierwotne, wstępnie przetworzone przez RSP (Radar Signal Procesor) dane, zebrane podczas przeglądu przestrzeni, są zapisywane w plikach w układzie współrzędnych sferycznych. Dodatkowo (dla skanowania klasycznego i pionowego) zawierają one informacje o wartościach i rozkładzie: ZDR , $PhiDP$, $RhoHV$, KDP w obszarze pomiaru radarowego.

W systemie RAINBOW istnieje możliwość zobrazowania ich wartości z wykorzystaniem dostępnych w systemie algorytmów.



Rys. 11.6. Przykładowa mapa „tradycyjnego” rozkładu maksymalnych odbiciowości (Z_H) w rzucie na trzy płaszczyzny dla sytuacji z 3 lipca 2012 r., godz. 18:00 UTC – radar Ramża

ZDR (Differential Reflectivity) *odbiciowość różnicowa* (rys. 11.7) jest podstawową i najprostszą w realizacji pomiaru wartością.

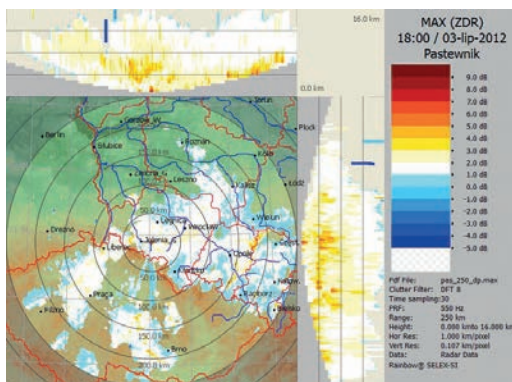
$$ZDR = 10 \log_{10} \left(\frac{Z_H}{Z_V} \right) [\text{dB}] \quad (11.2)$$

gdzie:

Z_H – odbiciowość zmierzona za pomocą fali spolaryzowanej poziomo,

Z_V – odbiciowość zmierzona za pomocą fali spolaryzowanej pionowo.

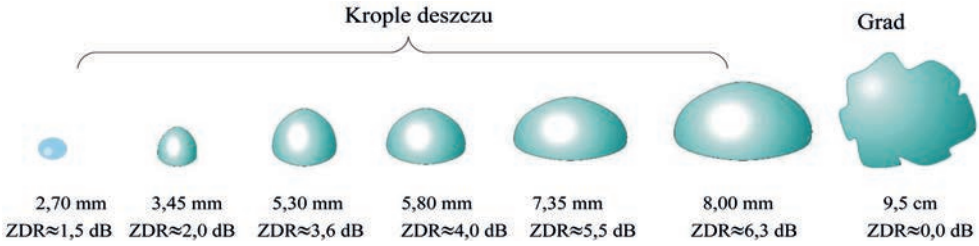
Wskaźnik ten jest miarą proporcji średnic (poziomych w stosunku do pionowych) cząstek, zawartych w objętości wiązki pomiarowej; określa pośrednio kształt kropli i jej wielkość. Umożliwia dokładniejsze szacowanie opadu i jego typu. ZDR wyrażone jest w [dB].



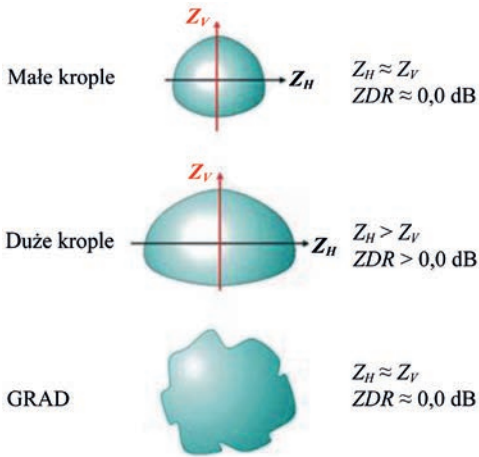
Rys. 11.7. Rozkład maksymalnych wartości odbiciowości różnicowej dla sytuacji z 3 lipca 2012 r., godz. 18:00 UTC – radar Pastewnik

Na rys. 11.8 podano wartości odbiciowości różnicowej dla kilku kropel o różnej średnicy poziomej [Bringi, Chandrasekar 2001].

Szczególny przypadek stanowi opad gradu. Mimo dużych średnic w obu polaryzacjach i związanej z tym dużej odbiciowości (zarówno Z_H , jak i Z_V), jego od-



Rys. 11.8. Zależność pomiędzy średnicą poziomą kropli a wartością odbiciowości różnicowej ZDR [Bringi, Chandrasekar 2001]



Rys. 11.9. Zależność pomiędzy wartością ZDR a średnicą poziomą i pionową kropli

biciowość różnicowa jest zerowa (rys. 11.9). Fakt ten stanowi podstawę działania algorytmów wykrywania obszarów występowania gradu przez radary pracujące z podwójną polaryzacją fal.

Faza różnicowa $PHiDP$ (Differential Propagation Phase – Φ_{DP}) to przesunięcie fazowe określające różnicę faz sygnału odbitego, spolaryzowanego poziomo i pionowo. Wartości Φ_{DP} wyrażamy w $[\circ]$ (rys. 11.11).

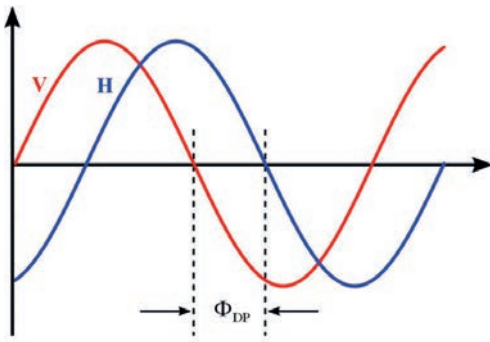
$$\Phi_{DP} = \Phi_{HH} - \Phi_{VV} \quad (11.3)$$

gdzie:

Φ_{HH} – różnica przesunięcia fazowego na drodze propagacji dla fali spolaryzowanej poziomo,

Φ_{VV} – różnica przesunięcia dla fali spolaryzowanej pionowo.

Różnica faz (przesunięcie fazowe) fali powracającej (rys. 11.10) jest powodowane przejściem fali przez obiekty meteorologiczne napotkane na drodze propagacji. Jest to bardzo dobry estymator deszczu, niepodatny na tłumienie. Przy tym przesunięcie fazowe nie powinno być tu mylone z przesunięciem Dopplera (patrz rozdz. 4, rys. 4.2).



Rys. 11.10. Przesunięcie fazowe Φ_{DP}

Właściwe przesunięcie fazowe KDP (Specific Differential Phase Shift – K_{DP}) sygnału powracającego (rys. 11.12) jest pochodną Φ_{DP} względem odległości (zmiana różnicy faz na danym odcinku). Wyrażamy je w $[\text{°/km}]$.

$$K_{DP} = \frac{\Phi_{DP}(r_2) - \Phi_{DP}(r_1)}{2(r_2 - r_1)} \quad (11.4)$$

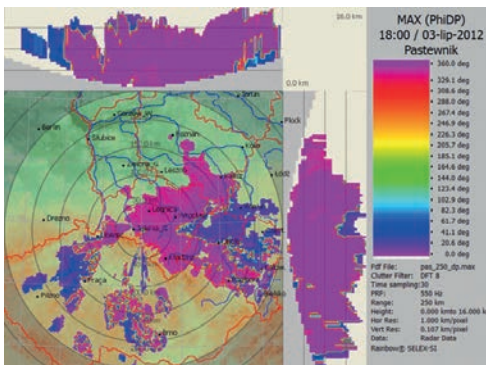
lub wyrażone jako pochodna:

$$K_{dp} = \frac{1}{2} \frac{d}{dr} \Phi_{dp} \quad (11.5)$$

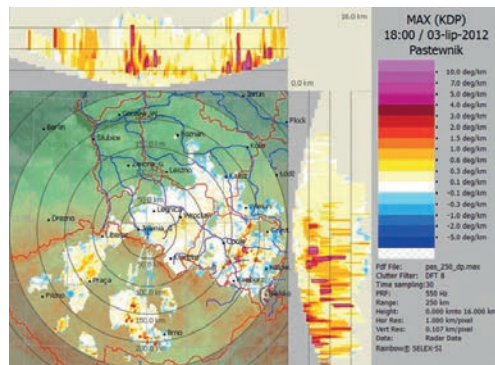
gdzie:

$$\Phi_{DP} = \Phi_{HH} - \Phi_{VV}, \Phi_{VV} i \Phi_{HH} \geq 0,$$

Φ_{VV} – jest fazą od impulsu spolaryzowanego pionowo w tym samym miejscu na drodze propagacji,



Rys. 11.11. Rozkład maksymalnych wartości przesunięcia fazowego Φ_{DP} dla sytuacji z 3 lipca 2012 r., godz. 18:00 UTC – radar Pastewnik



Rys. 11.12. Rozkład maksymalnych wartości przesunięcia fazowego K_{DP} dla sytuacji z 3 lipca 2012 r., godz. 18:00 UTC – radar Pastewnik

Φ_{HH} – jest fazą od impulsu spolaryzowanego poziomo w tym samym miejscu na drodze propagacji,

$r_2 - r_1$ – odnoszą się do pomiarów w zakresie 1 i 2 [km] od radaru, gdzie $r_1 < r_2$.

Wartość „2” w mianowniku dotyczy przesunięcia fazowego na trasie fali tam i z powrotem [Instruktion manual RAINBOW 2010; Rinehard 2004].

Współczynnik korelacji wzajemnej Rho_{HV} (Correlation Coefficient – ρ_{hv}) pomiędzy sygnałem odbitym (zwrotnym), spolaryzowanym poziomo i pionowo (rys. 11.13), opisuje podobieństwa oraz cechy sygnałów poziomo i pionowo spolaryzowanych pochodzących od przekrojów różnego typu hydrometeorów w zidentyfikowanym obiekcie [Sachidananda, Zrnica 1985]. Jest wielkością niemianowaną.

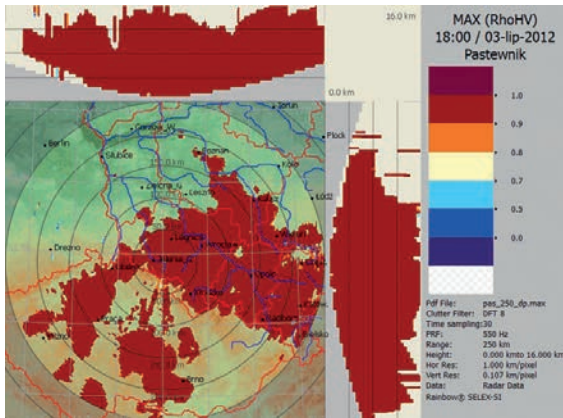
Zależy on od kształtu kropeł, drgań cząstek odbijających; jest wrażliwy na odbicia od mieszaniny hydrometeorów (np. deszcz/grad) o nieregularnych kształtach (np. grad, krupa śnieżna), przydatny do identyfikacji „bezdeszczowych” hydrometeorów. Według Doviaka wyrazić go można jako [Bringi, Chandrasekar 2001; Doviak 2003]:

$$\rho_{hv} = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{\sigma_{hi} \sigma_{vi}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_{hi} \sum_{i=1}^N \sigma_{vi}}} \quad (11.6)$$

gdzie:

σ_{hi} i σ_{vi} – są radarowymi przekrojami hydrometeorów, odpowiednio w polaryzacji poziomej i pionowej,

N – oznacza liczbę cząstek w objętości próbki radarowej o określonej rozdzielczości.



Rys. 11.13. Rozkład maksymalnych wartości współczynnika korelacji wzajemnej ρ_{hv} dla sytuacji z 3 lipca 2012 r., godz. 18:00 UTC – radar Pastewnik

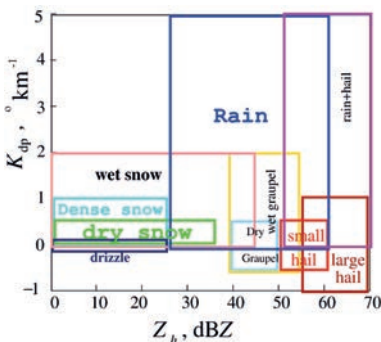
11.4. Wykorzystanie wskaźników polarymetrycznych w procesie rozpoznawania zjawisk

Zastosowanie do pomiaru techniki o podwójnej polaryzacji fali elektromagnetycznej otworzyło nowe możliwości dla meteorologii radarowej w zakresie identyfikacji i klasyfikacji obiektów meteorologicznych. Poszerzenie wachlarza rodzajów pozyskanych danych pomiarowych pozwala na bardziej szczegółową klasyfikację ilościową i jakościową zlokalizowanych obiektów. Korzyści wynikające z posiadania radarów dopplerowskich pracujących z falą podwójnie spolaryzowaną nie ograniczają się już do pomiarów związanych tylko z wielkością opadów R (skan klasyczny), lecz poprzez analizę danych z obu kanałów, możliwe staje się określanie właściwości mikrofizycznych zlokalizowanych obiektów. Technika polaryzacyjna daje podstawy do opracowania metod, za pomocą których można odróżnić deszcz od innych form opadów. Opracowano algorytmy klasyfikacji typu opadu na podstawie wyników pomiarów falą podwójnie spolaryzowaną.

Dzięki nowym radarom: w Pastewniku i na Ramży otworzyły się w IMGW-PIB możliwości prowadzenia badań zmierzających do klasyfikacji echa radarowego pozyskanego z obszaru południowo-zachodniej Polski w oparciu na następujących algorytmach opracowanych przez inne światowe służby meteorologiczne:

- Nexrad Warm-Season (USA),
- Nexrad Cold-Season (USA),
- BMRC C-band (Australia).

Wymienione algorytmy stosują odmienne techniki analizy danych polarymetrycznych oraz oferują różne klasy rozpoznawanych typów opadu. Dla przykładu algorytm australijski (rys. 11.16a) umożliwia rozpoznanie dużej liczby typów hydrometeorów. Nie ma jednak jednoznacznego przypisania wartości wskaźników polarymetrycznych do typu opadu. Do rozwiązania tego problemu stosuje się metodę logiki rozmytej (fuzzy logic), gdyż proste podejście w procesie podejmowania decyzji, oparte na użyciu ostro zdefiniowanych granic, byłoby niejednoznaczne lub wręcz niemożliwe, chyba że ograniczono by się do zaledwie kilku dominująco-oczekiwanych typów hydrometeorów (np. deszcz, grad, śnieg).

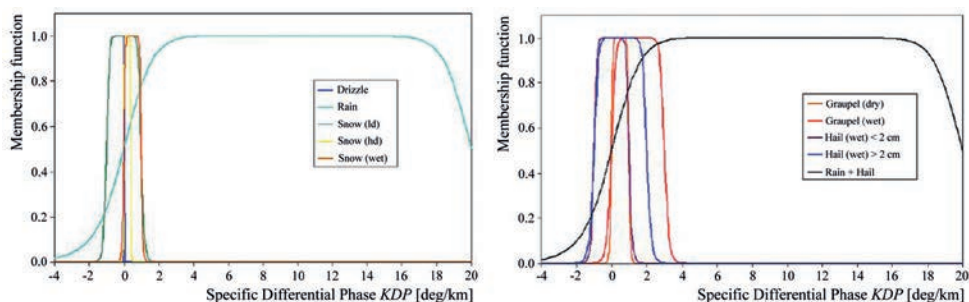


Rys. 11.14. Przykładowa klasyfikacja hydrometeorów; zależność $K_{dp} - Z_h$ dla pasma - S [Straka, Zrnica 1993]

W przypadku algorytmu amerykańskiego głównymi autorami badań logiki rozmytej w zakresie pasma - S (rys. 11.14) są zespoły radarowe: National Severe Storms Laboratory

(NSSL), National Center for Atmospheric Research (NCAR) i Colorado State University (CSU). Aktualnie tylko NSSL opracował operacyjnie działającą wersję systemu dla swojego prototypu radaru, wykorzystującego podwójnie spolaryzowane fale (radary typu WSR-88D) [Doviak, Zrnić 1993; Rinehart 2004; Park i in. 2008].

Wersja dla radarów pracujących w paśmie C (rys. 11.15) została opracowana (między innymi) w Australijskim Biurze Meteorologii Centrum Badawczego (Australian Bureau of Meteorology Research Centre) dla radarów pracujących w sieci C-POL [Keenan 2003].



Rys. 11.15. Przykładowy rozkład K_{DP} dla poszczególnych klas hydrometeorów, pozyskany dla radarów pracujących w paśmie C [Bringi i in. 2007]

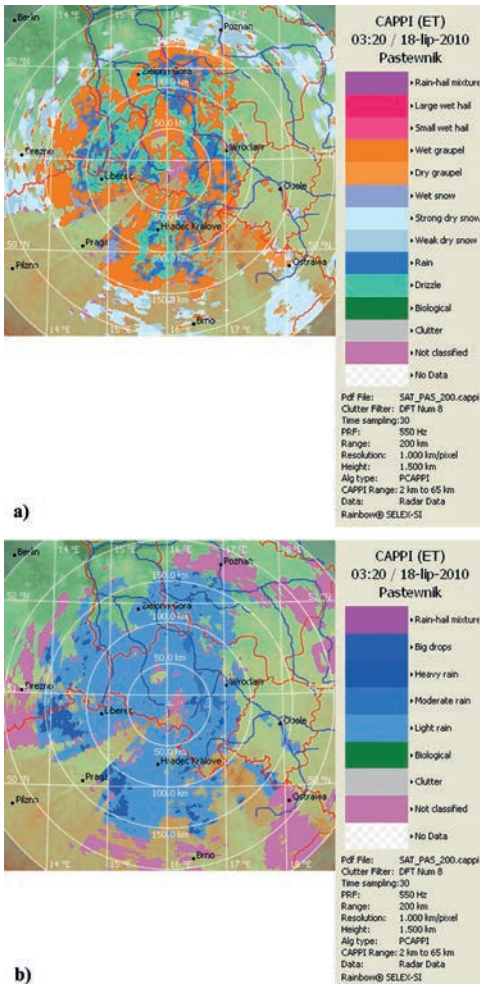
Tab. 11.3. Przedziały wartości wskaźników polarymetrycznych do klasyfikacji hydrometeorów dla radarów pracujących w paśmie C

	Z_{HH} [dBZ]	Z_{DR} [JB]	ρ_{HV} [0]	K_{DP} [deg km ⁻¹]	Temperatura [°C]
Mżawka	10 do 25	0,2 do 0,7	>0,97	0 do 0,06	> -10
Opad	25 do 60	0,5 do 4,0	>0,95	0 do 20	> -10
Śnieg (suchy, mała gęstość)	-10 do 35	-0,5 do 0,5	>0,95	1 do 1	<0
Śnieg (suchy, duża gęstość)	-10 do 35	0,0 do 1,0	>0,95	0 do 0,4	<0
Śnieg (mokry, topniejący)	20 do 45	0,5 do 3,0	0,5 do 0,9	0 do 1	0 do 5
Krupa lodowa, sucha	20 do 35	-0,5 do 1,0	>0,95	0 do 1	<0
Krupa śnieżna, mokra	30 do 50	-0,5 do 2,0	>0,95	0 do 3	-15 do 5
Grad, mały <2 cm mokry	50 do 60	-0,5 do 0,5	0,92 do 0,95	-1 do 1	-15 do 20
Grad, duży >2 cm, mokry	55 do 65	-1,0 do 0,5	0,90 do 0,92	-1 do 2	-25 do 20
Opad i grad	45 do 80	-1,0 do 6,0	>0,9	0 do 20	-10 do 25

źródło: Przedziały wartości użyte do klasyfikacji hydrometeorów wg [Keenan, 2003; Tuszyńska, Rychlewski 2013]

W związku z tym, że australijskie Bureau of Meteorology Research Center (BMRC) korzysta z radarów pracujących w paśmie C (podobnie jak sieć POLRAD) i z racji tego, że algorytm ten pozwala na rozpoznawanie wielu klas hydrometeorów (tab. 11.3), najkorzystniejsze wydawałoby się dopasowanie jego parametrów do strefy klimatycznej Polski. Nie jest to jednak proste zadanie ze względu na bardzo płynne granice wartości wskaźników polarymetrycznych decydujących o przynależności określonych hydrometeorów do konkretnego rodzaju (typu).

W momencie zainstalowania w Polsce pierwszego radaru o podwójnej polaryzacji (Pastewnik i Ramża) uruchomiono liczenie produktów rozpoznawania typu opadu w oparciu na danych polarymetrycznych. Takim produktem w przypadku sieci radarów meteorologicznych w systemie RAINBOW [Instruction Manual... 2010] jest CAPPI(ET) (rys. 11.16 a i b).



Rys. 11.16. Mapy prezentujące typy hydrometeorów możliwe do rozpoznania dzięki wykorzystaniu danych radarowych pozyskanych z pomiaru falą podwójnie spolaryzowaną, w procesie skanowania klasycznego, wg zaadaptowanych w systemie algorytmów rozpoznania typu opadu:

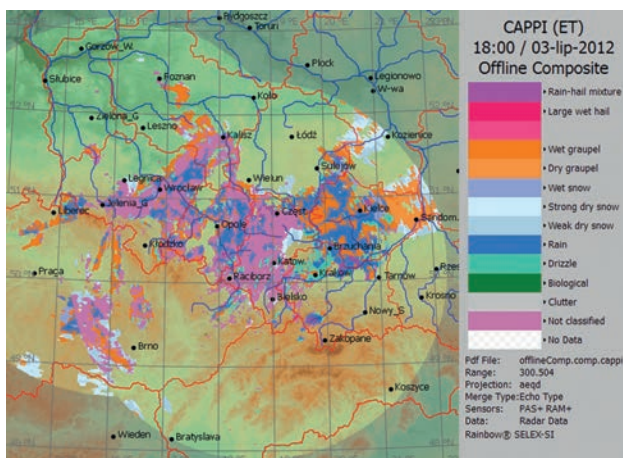
a) australijskiego – BMRC, legenda:

- mieszanina gradu z deszczem
- duży mokry grad
- mały mokry grad
- mokra krupa śnieżna
- sucha krupa śnieżna
- mokry śnieg
- silny suchy śnieg
- słaby suchy śnieg
- deszcz
- mżawka

- insekty biologiczne
- zakłócenia
- echa niesklasyfikowane
- brak danych

b) amerykańskiego – NEXRAD_warm, legenda:

- mieszanina gradu z deszczem
- duże krople opadowe
- silny opad
- średni opad
- słaby opad
- zakłócenia
- obiekty biologiczne
- echa niesklasyfikowane
- brak danych



Rys. 11.17 Przykładowa mapa zbiorcza COMPO_CAPPI(ET) rozpoznawania typu opadu wygenerowana z danych radaru PAS i RAM wg algorytmu BMRC z dnia 3 czerwca 2013 r., godz. 06:30 UTC (bez procesu preprocessingu)

Można założyć, że technika polaryzacyjna pozwala na stworzenie metody, za pomocą której można odróżnić deszcz od innych form opadów.

Jest to zadanie bardzo istotne z punktu widzenia rozwoju sieci radarowej, gdyż kolejne radary dołączane do sieci POLRAD (opolski, mazurski) i wymieniane zużyte urządzenia będą radarami dopplerowskimi o podwójnej polaryzacji. Rozważane są możliwości zastosowania wymienionych klasyfikacji ech radarowych (rys. 11.16a i 11.16b) w służbie operacyjnej (w przypadku otrzymania pozytywnych wyników testów algorytmów udostępnionych przez producenta systemu).

Optymalizacja udostępnionych w systemie RAINBOW algorytmów produktów rozpoznawania typu opadu dla naszej strefy klimatycznej nie jest jednak zadaniem łatwym. Wymaga doświadczenia, przeprowadzenia analizy dużej ilości danych oraz zapoznania się z obszerną literaturą światową. Prace nad tym zagadnieniem realizowane są już od ponad dziesięciu lat.

Prowadzone dotychczas badania w ramach innych sieci radarowych wykazały, że bezpośrednia walidacja metod klasyfikacji jest bardzo trudna z powodu braku odpowiednich zbiorów danych referencyjnych, szczególnie, jeśli chodzi o górne warstwy atmosfery. Dla przykładu, prowadzone badania (głównie przez Ryzhkov i in. 2005) wykazały, że radary o podwójnej polaryzacji mogą „przewyższyć” konwencjonalne, ale przy zasięgu do 125 km od radaru.

Ograniczenia walidacyjne zostały opisane przez Lim [Lim i in. 2005] przy użyciu sondowania i zobrazowania hydrometeorów przez samoloty penetracji deszczowej. Bardziej rozległa walidacja była możliwa dla wykrywania gradu i separacji deszczu od granic deszczu ze śniegiem [Ryzhkov, Zrníc 2003]. Pośrednia weryfikacja, na

podstawie znajomości fizyki, opadów dla niektórych rodzajów burz (np. supercells, linie szkwału, MCS – Mesoscale Convective System, itp.) wraz z zachowaniem ciągłości w czasie i przestrzeni jest wykorzystywana przez wielu badaczy z dziedziny meteorologii radarowej do wnioskowania o „zasadności” tych systemów klasyfikacyjnych [Bringi i in. 2007].

11.5. Zalety pomiaru radarem o podwójnej polaryzacji

Zastosowanie do pomiaru techniki o podwójnej polaryzacji fali elektromagnetycznej otworzyło nowe możliwości dla meteorologii radarowej, które powinny przynieść pewne korzyści odnośnie rozpoznawania stanu skupienia opadu i przyczynić się do dokładniejszego wyznaczania jego natężenia.

Przetwarzanie nieskorygowanych danych (pochodzących z bezpośredniego pomiaru) daje często błędne wyniki, które są rezultatem różnego rodzaju czynników wpływających na pomiar radarowy. Dzięki zastosowaniu podwójnej polaryzacji fali zebrane przez radar informacje mogą być poddawane procesom wstępnego przetwarzania (*preprocessing*), który zmierza do korekcji niedostatków pomiaru radarowego. Jest to ważny krok w procesie eksploracji danych w odniesieniu do informacji pochodzących z bezpośredniego pomiaru.

Wstępne przetwarzanie danych (*preprocessing*) obejmuje ich „czyszczenie”, ekstrakcję i selekcję wyników pomiarów znacznie różniących się od wartości pro-

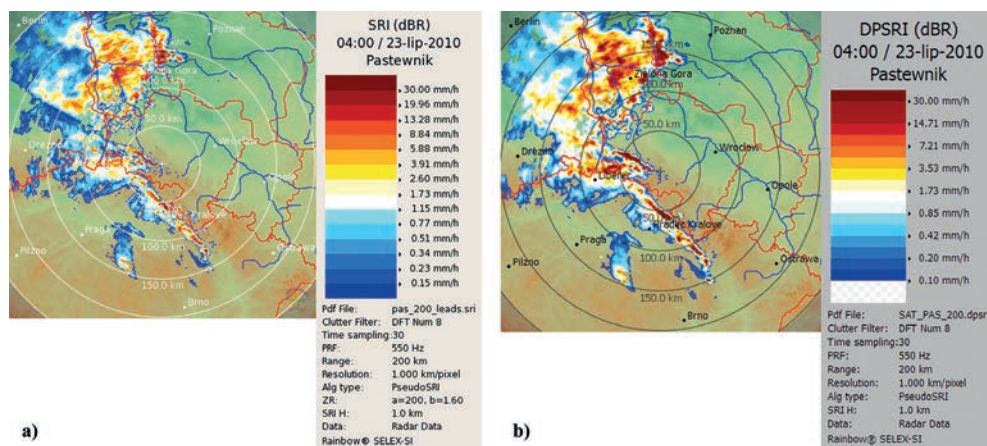
Tab. 11.4. Korzyści wynikające z analiz danych pozyskanych z pomiaru falą o podwójnej polaryzacji

Parametr/korzyści z zastosowania pomiarów radarem polarymetrycznym	Z_h	Z_{dr}	K_{dp}/Φ_{dp}	ρ_{co}
Poprawa radarowego natężenia opadu	×	×	×	
Klasyfikacja typów hydrometeorów	×	×	×	×
Wyznaczanie wysokości warstwy topnienia		×		×
Korygowanie tłumienia powodowanego przez opad wzdłuż trasy propagacji sygnału oraz tłumienia powodowanego przez kopułę radarową	×	×	×	
Kalibracja radaru	×	×	×	
Identyfikacja zakłóceń stałych i ech anomalnych		×	×	×
Korekcja na przesłanianie wiązki radarowej			×	
Korekcja odbicia od fal morskich			×	×
Identyfikacja ech od biologicznych rozpraszaczy		×	×	
Do pokonania problemów blokowania wiązki			×	
Do identyfikacji kryształków lodu w chmurach			×	

źródło: [Bringi i in. 2007]

gowych według ściśle zadanych algorytmów. Bazując na danych surowych: poszukiwane jest jasne pasmo i wykonywana korekta na pionowy profil odbiciowości, korekta na tłumienie przez komórki o silnej odbiciowości na trasie sygnału, usuwane są wartości znacząco różne od zadanych, itp.

Przykładowo na rys. 11.18b przedstawiono efekt działania *preprocessingu* możliwego do przeprowadzenia na danych polarymetrycznych.



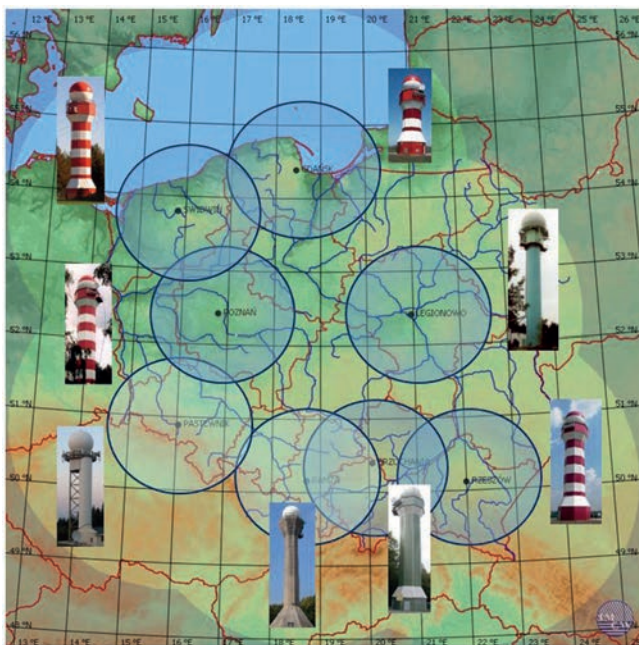
Rys. 11.18. Mapa natężenia opadu SRI policzona: a) tradycyjną metodą, b) z wykorzystaniem preprocessingu – radar PAS 23 lipca 2010 r., godz. 04:00 UTC

Na produkcie wykonanym „tradycyjną metodą” (rys. 11.18a) na azymucie ok. 280° występuje tłumienie (pochłanianie) sygnału wywołane „przesłanianiem” wiązki radarowej przez komórki o silnej odbiciowości (rozbudowane w pionie) na wyjściu wiązki radarowej z anteny (blisko radaru). Analiza danych pozyskanych z radarów o podwójnej polaryzacji pozwala między innymi na korygowanie tłumienia sygnału radarowego wzdłuż trasy propagacji sygnału. W niektórych przypadkach może to znacząco wpływać na wartości opadu wyliczanego przez produkty hydrologiczne: SRI, PAC, VIL.

»Znaczące poszerzenie zakresu informacji uzyskanych w technikach polarymetrycznych pozwala na realizację zobrazowań umożliwiających dokładniejsze rozróżnianie oraz klasyfikację ilościową i jakościową obserwowanych obiektów. Kluczem do uzyskania efektywnej klasyfikacji i identyfikacji obiektów w oparciu o dane polarymetryczne, jest dysponowanie szeroką bazą danych zawierającą charakteryzowane wzorce sygnałów odbitych« [Kawalec, Pietrasiński 2009], które należałoby utworzyć na podstawie wzorców pozyskanych z radarów polarymetrycznych pracujących w sieci POLRAD.

12. Problemy związane z eksploatacją systemu POLRAD

Sieć radarów POLRAD została wykonana w konfiguracji zapewniającej maksymalne korzyści dla systemów ostrzegania przeciwpowodziowego, ale przy założeniu mocno ograniczonych funduszy możliwych do jednorazowego wydatkowania, co przełożyło się na ograniczenie liczby stacji radarowych w Polsce do ośmiu. Korzyści wynikające z posiadania nowoczesnych radarów dopplerowskich nie ograniczają się do pomiarów związanych tylko z wielkością opadów, lecz dotyczą też pomiarów związanych z prędkością wiatru i parametrów atmosfery istotnych dla komunikacji lotniczej (możliwość identyfikacji niebezpiecznych zjawisk meteorologicznych). Jednakże do rzeczywistego wykorzystania tej drugiej informacji na obszarze całej Polski niezbędne jest uzupełnienie sieci POLRAD o dodatkowe stacje.



Rys. 12.1. Aktualny stan sieci POLRAD – zasięg pomiarów radarowych wiatru to okręgi, o promieniu ok. 100 km od radaru, a jaśniejsze pola wokół nich to maksymalny zasięg pomiaru opadu, o promieniu 250 km od radaru

12.1. Zakłócenia – „walka z nadajnikami”

Ze względu na coraz powszechniejszy z roku na rok dostęp nadajników słabej mocy (pracujących na częstotliwości radarowej) do bezprzewodowej transmisji danych (Internet), problemem stały się zakłócenia fałszujące dane radarowe. Objawiają się one nietypowym układem ech radarowych, świadczących o ich niemeteorologicznym pochodzeniu. Obecnie problem ten staje się coraz większy i groźniejszy. Urządzenia często nie mają wymaganych prawem zabezpieczeń chroniących innych

Tab. 12.1. Zestawienie stacji radarowych pracujących w sieci POLRAD

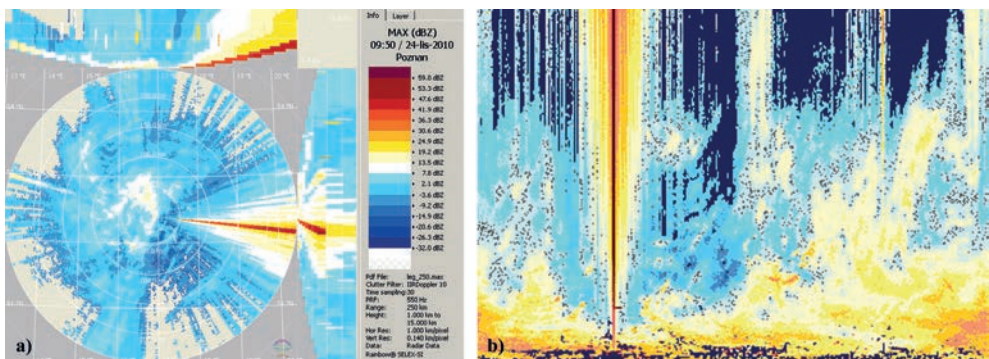
Stacja	Dane techniczne			Lokalizacja		
	Typ radaru	Typ polaryzacji	Rodzaj generatora fali	Współrzędne geograficzne [dziesiątne]	Wysokość posadowienia [m n.p.m.]	Wysokość do środka anteny [m n.p.t.]
Legionowo	Meteor 1500C	pozioma	klistron	52,40528 20,96083	90	29,32
Rzeszów	Meteor 1500C	pozioma	klistron	50,11417 22,00250	211	30
Brzuchania	Meteor 500C	pozioma	magnetron	50,39417 20,07972	383	35
Ramża	METEOR 1600 CDP	pozioma pionowa	klistron	50,15167 18,72667	322	36,4
Pastewnik	METEOR 1600 CDP	pozioma pionowa	klistron	50,88278 16,03972	668	23,4
Poznań	Meteor 500C	pozioma	magnetron	52,41326 16,79706	88	35
Świdwin	Meteor 500C	pozioma	magnetron	53,79028 15,83111	116	30
Gdańsk	Meteor 1500C	pozioma	klistron	54,38417 18,45611	138	20

użytkowników pasma przed zakłócaniem. Ilustracje zamieszczone poniżej pokazują rzeczywistą skalę problemu, który stracił swój lokalny charakter. Czasami pomimo odnalezienia źródła zakłóceń, pracownikom Urzędu Regulacji Telekomunikacji i Poczty (oraz Urzędu Komunikacji Elektronicznej) nie udaje się doprowadzić do całkowitego wyeliminowania zakłóceń lub wyegzekwowania stosowania obowiązujących przepisów przez firmę obsługującą zakłócający nadajnik.

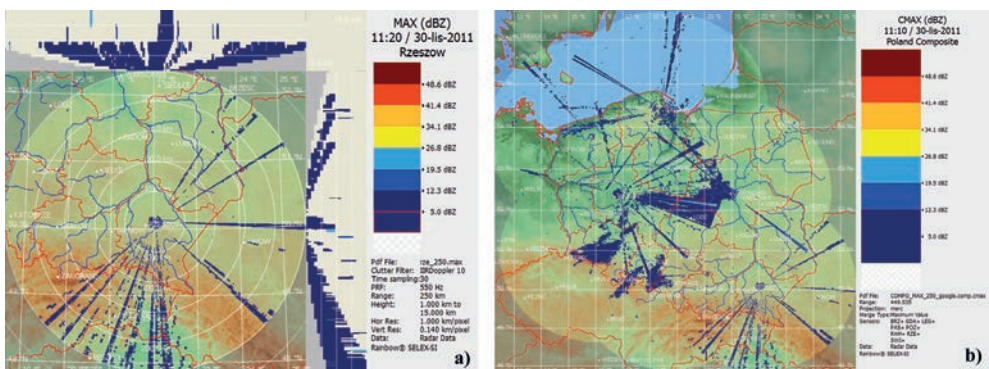
Dla przykładu we wrześniu 2009 r. pracownicy gdyńskiej delegatury UKE zlokalizowali i zmusili do zmiany używanej częstotliwości nadajnik RLAN zakłócający obraz z radaru w Gdańsku, ale już w 2010 r. pojawiły się nowe linie zakłóceń na obrazie radarowym ze stacji w Legionowie, Poznaniu i Rzeszowie.

Długoletnia walka z zakłóceniami zobrazowanymi na rys. 12.2 i 12.3 spowodowała, że w ramach umowy podpisanej z firmą Selex Systems Integration wymieniony został odbiornik cyfrowy, procesor sygnału oraz procesor sterujący pracą radaru meteorologicznego w Legionowie (2011) i Poznaniu (2012). Dzięki temu możliwe stało się znaczne ograniczenie wpływu zakłóceń spowodowanych przez sieci internetowe typu Wi-Fi, a tym samym – polepszenie jakości gromadzonych danych.

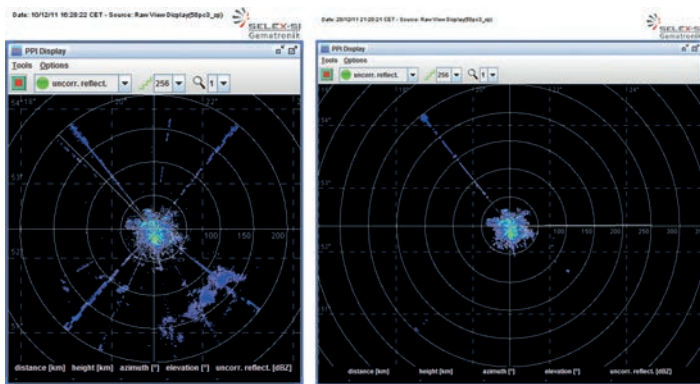
Wstępne wyniki testów pokazują ogromną poprawę w filtrowaniu zakłóceń Wi-Fi (rys. 12.4b i rys. 12.5b). Przed wymianą odbiornika odnotowywano ok. 5500



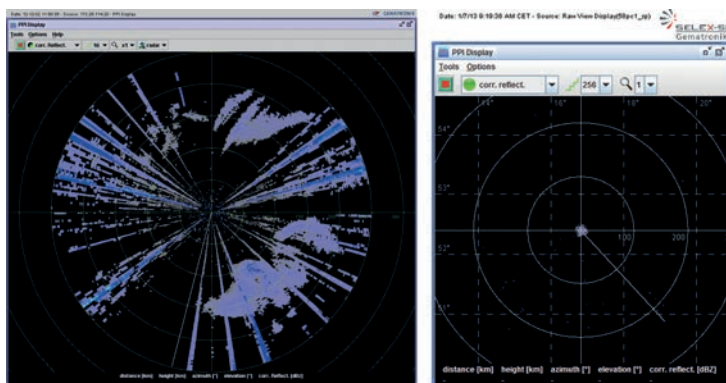
Rys. 12.2. Przykładowe zakłócenia zebranej informacji radarowej: a) na produkcie MAX, b) obraz wartości w funkcji kolejnych azymutów – radar Poznań z 24.11.2010 r.



Rys. 12.3. Zobrazowanie zakłóceń na mapie: a) maksymalnych wartości odbiciowości – radar Rzeszów, b) zbiorczej typu MAX – dane z 30.11.2011 r., godz. 11:30 UTC



Rys. 12.4. Zobrazowanie procesu zbieranych danych (skanowania) w systemie RAVIS dla radaru Legionowo: a) przed, b) po wymianie odbiornika



a)

b)

Rys. 12.5. Zobrazowanie procesu zbierania danych (skanowania) w systemie RAVIS dla stacji Poznań: a) przed, b) po modernizacji odbiornika

zakłóceń obrazu radarowego dziennie. Obecnie liczba ta spadła do 300, co znacznie poprawia jednoznaczność interpretacji obrazów radarowych.

Wykonane zmiany procesorów w Legionowie i Poznaniu były również pierwszym krokiem w stronę doposażenia tych radarów w funkcję podwójnej polaryzacji – prace planowane są w ramach odtworzenia majątku PSHM na następne lata.

12.2. Serwis radarowy

Od 2006 r. obowiązywała, podpisana z firmą Selex Sistemi Integrati, umowa na serwis sieci radarów meteorologicznych. Firma SSI była zobowiązana do przeglądania wszystkich radarów dwa razy do roku, wykonywania zdalnych diagnoz systemu radarowego oraz rozpoczęcia naprawy radaru w terminie nie dłuższym niż 24 godziny od wysłania zgłoszenia. Problem stanowiło długie, aczkolwiek zgodne z kontraktem, oczekiwanie na dostawę części zamiennych. Częściowym rozwiązaniem problemu od roku 2009 było wykorzystanie zakupionego (w 2008 r.) zestawu części zapasowych oraz zmiana warunków umowy serwisowej.

W marcu 2009 r. umowa skończyła się. Prace mające wyłonić wykonawcę, który zapewni obsługę serwisową radarów przez kolejne 4 lata zostały bezterminowo wstrzymane. Brak umowy serwisowej z firmą Selex Sistemi Integrati wydłużał czas oczekiwania na diagnozowanie i naprawę systemu radarowego oraz powodował wzrost jednostkowych kosztów z tym związanych. Część uszkodzeń urządzeń radarowych została usunięta przez zespół pracowników OTN. W celu zapewnienia stabilnej pracy całego systemu rozpoczęto tworzenie własnego zespołu serwisowego.

Od października 2011 r. nadzór serwisowy nad siecią radarów meteorologicznych POLRAD przejął, stworzony w tym celu, zespół serwisowy Ośrodka Tele-

detekcji Naziemnej. Do obowiązków serwisu należą regularne prace serwisowe i kalibracyjne urządzeń radarowych oraz interwencje naprawcze uszkodzonych części (elementów) radaru na stacjach. W ramach przygotowań do przejęcia obowiązków serwisowych zespół prowadził naprawy radarów od początku 2011 r. W roku 2012 rozpoczęto prace naprawcze części do radarów meteorologicznych w stworzonym w OTN laboratorium elektronicznym. Samodzielne naprawianie części pozwala na znaczne oszczędności funduszy przeznaczonych na naprawy.

W 2012 r. ze względu na awarie radary wyłączone były z pracy operacyjnej w sumie przez 20 dni (43 dni w roku 2011, 227 dni w roku 2010). Dużo lepsze wskaźniki pracy radarów są spowodowane z jednej strony przejściem zadań serwisowych przez IMGW-PIB (znacznie krótsze czasy reakcji na sytuację awaryjną oraz skuteczne działania zapobiegawcze), a z drugiej – korzystaniem z zapasów części zamiennych do radarów. W celu minimalizacji czasu oczekiwania na naprawę konieczne jest systematyczne gromadzenie zapasowych części zamiennych w magazynie IMGW-PIB tak, aby w razie awarii były one od razu dostępne.



Rys. 12.6. Opiekunowie stacji radarowych: a) RAM – Pani Wioletta Kubik (druga od lewej), b) PAS – Pan Kazimierz Nowakowski (pierwszy od lewej) i pracownicy RCO w czasie wizytacji stacji w 2006 r.

Przez cały czas funkcjonowania sieci radarowej nad bezpieczeństwem pracy radarów w miejscu ich lokalizacji czuwają opiekunowie (zatrudnieni przez IMGW od momentu wybudowania i uruchomienia stacji). Do ich zadań należy dbanie o stację radarową oraz pomoc w przypadku konieczności reakcji na miejscu z powodu nieprzewidzianych zdarzeń np. wyłączenia zasilania lub prostych technicznych awarii. Wielu z nich związało się z Instytutem na lata, na przykład Kazimierz Nowakowski miał 12 lat stażu pracy (od września 1999 r. do lipca 2011 r.), gdy został uhonorowany Srebrną Odznaką Za Zasługi dla IMGW, a Wioletta Kubik (synowa Władysława Kubika, który opiekował się radarem od jego wybudowania) jest przedstawicielką już drugiego pokolenia w rodzinie czuwającej nad radarem na wzgórzu Ramża.

12.3. Perspektywy rozwoju sieci POLRAD na lata 2013-2015

Po uzyskaniu odpowiednich środków planowane jest wykonanie pierwszego etapu rozbudowy sieci o:

- radar dopplerowski o podwójnej polaryzacji na Opolszczyźnie – lata 2014-2015,
- radar dopplerowski o podwójnej polaryzacji w Polsce północno-wschodniej.

Radar na Opolszczyźnie zagęści sieć radarową, osłaniając górne odcinki rzek Polski południowo-zachodniej, a radar na Mazurach będzie jedynym osłaniającym obszar jezior w tym rejonie.

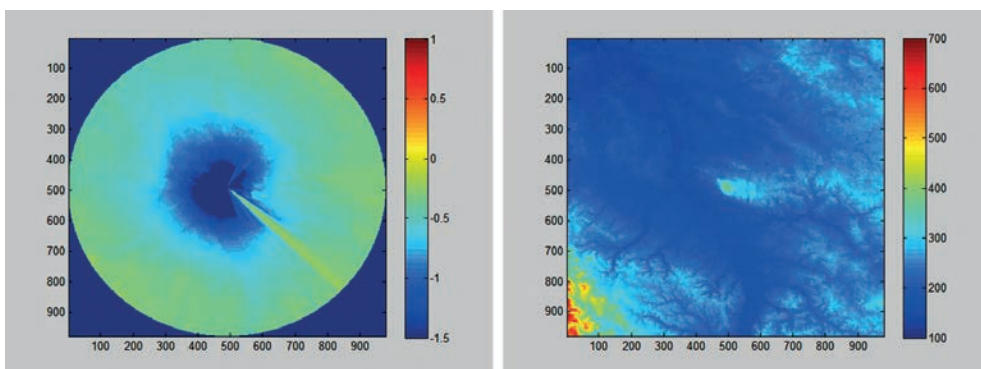
Pozytywy wynikające z umiejscowienia stacji dopplerowskich radarów meteorologicznych z funkcją podwójnej polaryzacji to:

- na Opolszczyźnie – osłona hydrologiczna górnych odcinków biegu rzek Odry: Opawy, Ostrawicy (na Morawach) i Nysy Kłodzkiej wraz z obszarami źródłowymi,
- w północno-wschodnich rejonach Polski monitoring hydrologiczno-meteorologiczny jezior i rzek mazurskich, a w szczególności zasilenie danymi systemu ostrzeżeń dla żeglarzy w rejonie Wielkich Jezior Mazurskich.

Dodatkowymi korzyściami dla wymienionych obszarów będą (podobnie jak w przypadku pozostałych radarów):

- pozyskiwanie danych radarowych w zasięgu 200-250 km z rozdzielczością czasową 10, a nawet 5 min umożliwi dokładniejsze prognozowanie oraz szybsze ostrzeżenie ludności przed potencjalnymi zagrożeniami,
- system podwójnej polaryzacji umożliwi dokładniejszą analizę wielkości opadu oraz pozwoli na rozróżnianie stanu skupienia hydrometeorów (deszcz, śnieg), co umożliwi wydawanie ostrzeżeń o nadciągających opadach śniegu,
- pozyskiwanie małoskalowej informacji o kierunku i prędkości wiatru w zasięgu do 120 km i groźnych zjawiskach meteorologicznych związanych z wiatrem,
- dokładniejsze prognozowanie zjawisk atmosferycznych na najbliższe godziny,
- dokładne szacowanie wielkości potencjalnej fali powodziowej, co jest szczególnie ważne dla obszarów położonych w bezpośrednim sąsiedztwie obszarów górskich, narażonych na tzw. powodzie błyskawiczne,
- pozyskanie bieżącej informacji meteorologicznej dla lotnisk cywilnych w Suwałkach, Białousach, Kętrzynie, Szczytnie, Elblągu, Olsztynie, Sławce i Białymstoku oraz Polskiej Nowej Wsi, Brzegu, Kamieniu Śląskim, a także wojskowych – w Stanowicach i Oleśnicy.

Po przeprowadzeniu przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (dr Stanisław Moszkowicz, mgr inż. Piotr Kozak) dokładnej analizy województwa opolskiego pod kątem lokalizacji stacji radaru meteorologicznego jako odpowiednie miejsce wybrano Górę Świętej Anny (50°28'12"N, 18°9'18"E).



Rys. 12.7. Mapa przesłoneń wiązki radarowej i cyfrowy model terenu okolic Góry Św. Anny

Góra Świętej Anny idealnie spełnia kryteria i wymagania od strony meteorologii radarowej. Znajduje się w odległości ok. 90 km od obszarów źródłowych Odry i Ostrawicy, ok. 60 km od źródeł Opawy, przy czym na kierunku tych obszarów nie ma żadnych przesłoneń (Brama Morawska). Do granicy państwa w rejonie Głubczyc jest niewiele ponad 30 km, a do największej przeszkody – masywu Praded (po stronie Czech) – ok. 80 km. Sam obszar Góry Świętej Anny ma szczytową wysokość ok. 400 m, a otaczająca okolica tylko 150-250 m, a więc w sąsiedztwie nie ma żadnych przesłoneń. Dobry dostęp do infrastruktury oraz znaczna odległość od zabudowań są dodatkowymi atutami przemawiającymi za wyborem tej lokalizacji [Lewandowski 2009].

Kluczowe znaczenie dla realizacji takich inwestycji, jak budowa stacji radarowej, ma uznanie jej za inwestycję celu publicznego. W chwili obecnej taka interpretacja wynika z ustawy Prawo lotnicze.

W związku z zakupem przez Siły Zbrojne RP dopplerowskich radarów meteorologicznych typu E700XD nawiązano współpracę w celu prowadzenia wspólnej osłony meteorologicznej kraju. Porozumienie w sprawie zasad współpracy i integracji sieci POLRAD z systemem radarów



Rys. 12.8. Radar firmy EWR – USA, źródło: dokumentacja firmy EWR – USA

pracujących w Siłach Zbrojnych RP pod nadzorem Szefostwa Służby Hydrometeorologicznej Sił Zbrojnych RP (SSH SZ RP) zawarto 16.11.2012 r. W myśl tego porozumienia przewiduje się integrację obu systemów radarowych. Rozszerzy to możliwości prowadzenia pomiarów radarowych, zwłaszcza jeśli chodzi o obszary północno-wschodniej (Giżycko, Dęblin) oraz środkowej Polski (Łask).

Tab. 12.2. Przykładowy harmonogram prac związanych z budową stacji radarowej

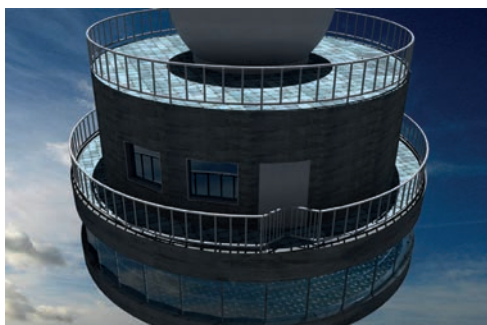
Lp.	Etap	Czas trwania [tygodnie]	Uwagi
1	Specyfikacja techniczna	2	Zakładając, że opracowanie wstępne jest już gotowe.
2	Realizacja procedury zamówienia publicznego	10	W tym projekt umowy, przeprowadzenie postępowania przetargowego, wybór wykonawcy
3	Zawarcie umowy	4	W tym negocjacje z wykonawcą, podpisanie umowy
4	Realizacja umowy	58	Czas łączny liczony do zakończenia umowy
4.1	Projektowanie	12	
4.2	Uzyskiwanie pozwoleń, uzgodnienia	24	Zakładając priorytetowy cel inwestycji, czas może być krótszy o 4 tygodnie
4.3	Produkcja nowego systemu radarowego. Odbiór systemu u producenta.	0	Produkcja systemu odbywa się równoległe z pozyskiwaniem pozwoleń
4.4	Prace budowlane	12	Liczone od momentu wejścia na plac budowy do stanu umożliwiającego montaż urządzeń radarowych.
4.5	Montaż i uruchomienie systemu radarowego. Testy akceptacyjne na obiekcie.	4	
4.6	Integracja z istniejącym systemem radarów meteorologicznych POLRAD	2	Prace mające na celu zapewnienie integracji z istniejącym systemem radarowym
4.7	Miesięczne testy integracyjne	4	
5	Włączenie radaru do pracy operacyjnej		Uroczyste oddanie do użytku
Czas całkowity			74 tygodnie

źródło: materiały OTN – IMGW-PIB

W przypadku powodzenia tego przedsięwzięcia dane meteorologiczne wygenerowane przez systemy radarowe w ramach niniejszej współpracy byłyby wykorzystywane do realizacji zadań IMGW-PIB oraz SSH SZ RP.

Zakupione radary E700XD (rys. 12.8) są urządzeniami mobilnymi i ich lokalizacje nie są stałe, mogą się zmieniać w zależności od aktualnie wykonywanych zadań, jednakże przez większość czasu będą ustalone na stałe.

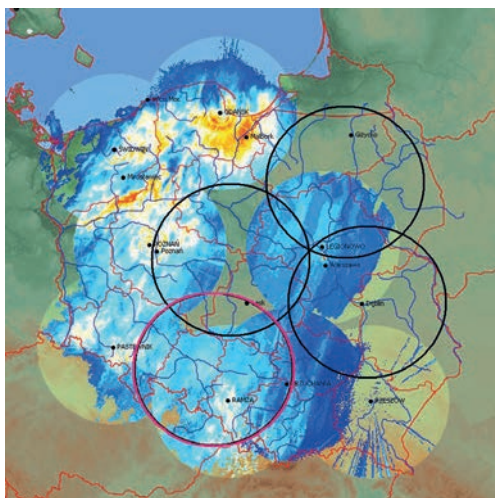
Rok 2014 to poważny krok w kierunku rozbudowy sieci POLRAD. Podjęte zostały decyzje oraz wyłoniony producent i wykonawca dziewiętej stacji radarowej; radar dopplerowski o podwójnej polaryzacji na Opolszczyźnie (okres inwestycji to lata 2015-2016), który zagęści sieć radarową, osłaniając górne odcinki rzek Polski południowo-zachodniej. W planach uwzględniono także budowę radaru w Polsce pół-



Rys. 12.9. Projekt radaru na Górze Św. Anny

zjawisk meteorologicznych w zasięgu radaru. Pozwoli to na wcześniejsze alarmowanie odpowiednich służb kryzysowych i lepszą ochronę ludzi i ich mienia w przypadku ekstremalnych zdarzeń meteorologicznych.

Na terenie stacji powstaną także strefy edukacyjne poświęcone meteorologii radarowej oraz lokalnej społeczności. Obiekt ma być otwarty dla zwiedzających [Czyżewski 2014].



Rys. 12.10. Zobrazowanie przykładowego pomiaru radarowego realizowanego w sieci POLRAD w zasięgu do 125 km od radaru; na czerwono zaznaczono obszar pomiaru (do 125 km) dla radaru na Górze Św. Anny, a na czarno obszary wskazane do zagęszczenia sieci

Ważne daty – zestawienie

Daty „historyczne”

Radar	Stacja	System	Praca operacyjna	
			Data rozpoczęcia	Data zakończenia/uwagi
DECCA	LEG	DECCA typ 41 – przetwarzanie obrazów przez operatora	06.1964	1975
MRŁ-2	LEG	Przetwarzanie obrazów przez operatora	22.10.1976	1987
		RSM – system na bazie mikrokomputera MERA-400	1981-1984	Proces adaptacji
			1985	Praca eksperymentalna w systemie RSM i praca ręczna
			1986-1988	Praca półautomatyczna w systemie RSM
		PSR – system na bazie IBM PC/XT	1988	05.1991
PSR – wykonanie zobrazowania dla użytkownika w wersji na komputer IBM PC/AT	1989-1990			
MRŁ-5	LEG	Okres pracy radaru	06.1991	2.07.2002
		ASR/AMSR – system na bazie IBM PC/AT	1991	Zmiana nazwy systemu ASR na AMSR
		Nagroda państwowa MOŚZNiL za system AMSR	8.06.1994	Dla pracowników Pracowni Radarowej
		Dystrybucja danych radarowych za pośrednictwem kanału telegazety	1993	1997 Realizacja IMGW
		Podpisanie przez IMGW umowy na retransmisję danych poprzez system TELESEND z firmą RAFOT	1998	08.2007
METEOR 360AC	RAM	Radar dopplerowski firmy GEMATRONIK GmbH	1995	Instalacja pierwszego radaru na wzgórzu Ramża
METEOR 360AC	PAS	Radar dopplerowski firmy GEMATRONIK GmbH	4.04.2000	Instalacja pierwszego radaru w Pastewniku

Sieć POLRAD

Radar	Stacja	Data		Uwagi
		SAT	Oddania	
Meteor 1500C	LEG	21-23.08.2002	25.08.2002	Nowy radar dopplerowski na miejscu radaru MRL-5
Meteor 360 C	RAM	2-3.04.2003		Zmodernizowano
Meteor 360 C	PAS	2.04.2003		Zmodernizowano
Meteor 1500C	RZE	23-24.04.2003	1.07.2003	Nowa stacja z radarem dopplerowskim
Meteor 1500C	POZ	4-5.06.2003	3.07.2003	Nowa stacja z radarem dopplerowskim
Meteor 500C	ŚWI	6-7.08.2003	3.04.2003	Nowa stacja z radarem dopplerowskim
Meteor 1500C	GDA	16-17.12.2003	22.12.2003	Nowa stacja z radarem dopplerowskim
Meteor 500C	BRZ	10-12.02.2004	20.02.2004	Nowa stacja z radarem dopplerowskim
System NIMROD		22-24.04.2003	4-17.06.2003	Instalacja i uruchomienie
Zakończenie projektu POLRAD			02.2004	Oficjalne zakończenie rozbudowy sieci
Zintegrowany system POLRAD		26-27.02.2004		Test zintegrowanego systemu POLRAD i NIMROD
Ostateczny test gwarancyjny POLRAD		10.2004		
Świadectwa odbioru ostatecznego POLRAD		8.03.2005		Wystawienie świadectw odbioru ostatecznego
METEOR 1500DP	PAS	15.12.2009		Wymiana radaru na typ dual-pol
METEOR 1500DP	RAM	14.12.2010		Wymiana radaru na typ dual-pol

Ważniejsze wydarzenia

Opis	Data	Uwagi
Podpisanie kontraktu na rozbudowę sieci POLRAD	14.05.1999	W ramach SMOK
Wejście w życie kontraktu na rozbudowę sieci POLRAD	3.07.2001	
Powołanie Zespołu ds. Organizacji Centrum Sieci Radarów Meteorologicznych POLRAD	07.2002	
Powołanie Radarowego Centrum Operacyjnego	1.10.2002	Przeniesienie zarządzania radarami z Legionowa do Warszawy
Rozpoczęcie 24-godzinnego nadzoru nad pracą radarów	12.2002	
Rozpoczęcie przekazywania danych do SOK	02.2003	
Zainstalowanie w RCO oprogramowania RAINBOW w wersji 5.0	24-27.06.2003	
Rekonfiguracja systemu RAINBOW	9-13.02.2004	W związku z przeniesieniem zbierania danych ze stacji radarowych do RCO w Warszawie
Powołanie zespołu badawczego RCO w Katowicach	01.2004	
Zmiana nazwy RCO na Centralny Radarowy Ośrodek Operacyjny (CROO)	6.06.2006	
Zmiana nazwy CROO na Ośrodek Teledetekcji Naziemnej	1.10.2007	
Zmiana nazwy OTN na Wydział Teledetekcji Naziemnej	1.06.2014	

Bibliografia

Opracowania IMGW¹³

- Maliszewski T., Kowalska J., Małycha E., Marcinek M., Żolnowska H., Żuchowicz P., 1974, Zestaw przetwarzania informacji z radiolokacyjnych stacji meteorologicznych SKORA-2, projekt wstępny, ITWL, Warszawa
- Kawecki A., 1975, Projekt koncepcyjny Zintegrowanego Systemu Radarowego IMGW, IMGW, Zakład Aerologii, praca wykonana jako zad. 11, temat 252.4.02
- Moszkowicz S., 1975, Pomiary radiolokacyjnych parametrów zachmurzenia i ich przetworzenie jako podstawa automatycznej klasyfikacji chmur i zjawisk (na podstawie danych z MRŁ-1), IMGW, Zakład Aerologii, Legionowo
- Fortini-Iwanowska J., 1977, Zasady analizy informacji radiolokacyjnej o frontach atmosferycznych, IMGW, Zakład Aerologii, praca wykonana jako etap 5 tematu 418.02.05.02
- Kawecki A., 1977, Radarowy system meteorologiczny jako źródło informacji o opadach i burzach dla potrzeb gospodarki kraju, IMGW, Zakład Aerologii, praca wykonana w ramach zad. 2, temat 418.02.05.01, marzec 1977
- Moszkowicz S., 1977, Algorytmy przetwarzania danych radarowych ich modyfikacja i algorytmy końcowego przetwarzania danych radarowych, IMGW, Zakład Aerologii, praca wykonana w ramach zad. 2, temat 418.02.05.02
- Moszkowicz S., 1977, Wytyczne do korzystania z map faksymilowych, materiały IMGW, Zakład Aerologii
- Moszkowicz S., Woronow A., 1977, Instrukcja wykonywania obserwacji obiektów meteorologicznych przy pomocy radaru MRŁ-2, opracowania i przekazywania informacji do użytkowników, Zakład Aerologii, IMGW
- Woronow A., 1977, Charakterystyka stabilności podstawowych parametrów radiolokatora osłony meteorologicznej MRŁ-2 na podstawie rocznej eksploatacji, IMGW, Zakład Aerologii, praca wykonana jako zad. 3, temat 418.02.05.02
- Kawecki A., 1978, Ocena efektywności ekonomicznej radiolokacyjnej informacji o opadach dla gospodarki górnej Wisły, IMGW, Zakład Aerologii, praca wykonana w ramach zad. 1, temat 418.02.05.01
- Moszkowicz S., 1978, Dane o obiektach meteorologicznych rozpoznawanych radiolokacyjnie, IMGW, Zakład Aerologii, praca wykonana w temacie 418.02.05.01 w ramach współpracy z ITWL
- Zakład Usługowo Wytwórczy MECH, 1978, Sprzężenie urządzenia SPM-1 z mikrokomputerem IBM-PC/XT oraz minikomputera MERA-400 z mikrokomputerem IBM-PC/XT, opis techniczny, Warszawa
- Kawecki A., 1979, Opracowanie metody korekcji tłumienia fali dla radaru meteorologicznego, Falenica, opracowanie wykonane w ramach tematu 418.02.05.02

¹³ Spis opracowań wykonano wg dat realizacji poszczególnych tematów. Dzięki temu pozyskujemy informację o kolejnych uczestnikach w procesie rozwoju polskiej meteorologii radarowej

- Maliszewski T., Marcinek M., 1979, Aktualny stan prac nad zestawem przetwarzania informacji z radiolokacyjnych stacji meteorologicznych, referat na radę tematyczną, ITWL, Warszawa
- Kilim Z., 1980, Radiolokacyjny pomiar opadów w dorzeczu Wilgi, IMGW, Zakład Aerologii
- Moszkowicz S., 1980a, Algorytmy operacyjnego przetwarzania meteorologicznej informacji radiolokacyjnej, IMGW, Zakład Aerologii, sprawozdanie końcowe z zad. 418.02.05.03
- Moszkowicz S., 1980b, Założenia do badania zestawu przetwarzania informacji z radiolokacyjnej stacji meteorologicznej, praca wykonana jako zad. 3, temat 418.02.05.02
- Moszkowicz S., 1981, Propozycja zasad tworzenia zbiorczej mapy informacji radarowej, przy ręcznej pracy na stacjach, IMGW, Zakład Aerologii, praca wykonana w ramach zad. RB-121.3.5
- Kilim Z., 1983, Algorytmy pomiaru natężenia opadu, IMGW, Zakład Aerologii
- Lityńska Z., Ciach G., 1984, Zasady łączenia danych radarowych i satelitarnych, IMGW, Zakład Aerologii
- Moszkowicz S., Ciach G., Nejman J., Tuszyńska I., Dewiszek P., Dziewit Z., 1984, Metody rozpoznawania i natychmiastowego prognozowania lokalnych zjawisk meteorologicznych, Etap II, Diagnostyka i wstępna weryfikacja metod, raport z realizacji celu 11.10.39, IMGW, Warszawa
- Moszkowicz S., 1985a, Instrukcja wykonywania pomiarów na zautomatyzowanej stacji radarowej, IMGW, Zakład Aerologii
- Moszkowicz S., Ciach G., 1985b, Natychmiastowa prognoza meteorologiczna wykonywana na podstawie pomiaru ręcznego i jej sprawdzalność, IMGW, Zakład Aerologii
- Lityńska Z., Ciach G., 1986, Koncepcja łączonego wykorzystania obrazów radarowych i satelitarnych w meteorologii, IMGW, Kraków
- Ciach G., Tuszyńska I., 1987a, Meteorologiczna osłona radarowa w Legionowie, materiały Zakładu Aerologii, IMGW
- Ciach G., Tuszyńska I., 1987b, System rozpoznania i prognozy natychmiastowej oparty na cyfrowych danych radarowych i innych synoptycznych, zad. wdrożeniowe nr 11.10.34.1, raport z realizacji celu nr 34, Metody rozpoznawania i natychmiastowego prognozowania lokalnych zjawisk meteorologicznych, maszynopis Zakład Aerologii, IMGW, Warszawa
- Moszkowicz S., Ciach G., Nejman J., 1988, Opracowanie dokumentacji i wprowadzenie do użytkowania operacyjnego systemu PSR opartego o mikrokomputer IBM PC/XT, raport z realizacji celu nr 34., pt. „Metody rozpoznawania i natychmiastowego prognozowania lokalnych zjawisk meteorologicznych”, maszynopis IMGW, Warszawa
- Moszkowicz S., Tuszyńska I., 1988, Ocena sprawdzalności pierwszej generacji algorytmów rozpoznawania zjawisk meteorologicznych oraz opracowanie założeń do drugiej generacji algorytmów rozpoznawania opartych na cyfrowych danych radarowych, w: Metody rozpoznawania i natychmiastowego prognozowania lokalnych zjawisk meteorologicznych, Etap II, Diagnostyka i wstępna weryfikacja metod, raport z realizacji celu 11.10.39, punkt kontrolny nr 3, IMGW, Warszawa
- Lityńska Z., Ciach G., 1989, Opracowanie metody łączonego wykorzystania cyfrowych danych radarowych i satelitarnych prognozowaniu natychmiastowym, IMGW, Zakład Aerologii

- Moszkowicz S., 1989, Koncepcja sieci radarowej IMGW dla osłony gospodarki wodnej i lotnictwa, IMGW, Zakład Aerologii
- Moszkowicz S., Ciach G., Tuszyńska I., Dewiszek P., Dziewit Z., 1990, Metody rozpoznawania i natychmiastowego prognozowania lokalnych zjawisk meteorologicznych. Instrukcje wdrożeniowe, IMGW, Zakład Aerologii, zad. wdrożeniowe 11.10.34.1
- Moszkowicz S., Ciach G., Tuszyńska I., Dewiszek P., Dziewit Z., 1991, Szacowanie opadów powierzchniowych na podstawie danych z sieci radarowej, telepluviografów i danych satelitarnych, IMGW, Zakład Aerologii, projekt badawczy A-15
- Kierunki rozwoju służby hydrologiczno-meteorologicznej IMGW w latach 1996-2005, 1994, założenia ogólne przyjęte przez Rade naukową IMGW w dniu 5 lipca 1994 roku do realizacji, materiały IMGW, Wawrszawa
- Moszkowicz S., 1999, Analiza kątów zakrycia horyzontu i przewidywanych ech stałych dla proponowanych lokalizacji radarów meteorologicznych w Polsce, IMGW, Zakład Aerologii, Warszawa, opracowanie w ramach zad. 3/7/1999
- Moszkowicz S., 1999, Kalibracja radaru meteorologicznego w Katowicach przy pomocy tarczy wzorcowej, Radarowe Centrum Operacyjne, IMGW, Warszawa, opracowanie w ramach zad. 3/6/1999
- Moszkowicz S., 2000, Przestrzenna i czasowa struktura opadów, (PB0794/PO4/98/14) kierownik projektu dr S. Moszkowicz – projekt indywidualny finansowany przez KBN w latach 1998-2000
- Moszkowicz S., 2001, Porównanie prognoz opadu z modeli numerycznych z wynikami radarowego pomiaru opadu, skorygowanego danymi synoptycznymi, Zakład Aerologii, IMGW, Warszawa, Zadanie nr HM-24.5, zrealizowane w ramach COST 717,
- Moszkowicz S., 2002, Weryfikacja ewolucji systemów opadowych według modeli numerycznych i ulepszanie radarowej natychmiastowej prognozy opadu (nowcasting), IMGW, Zakład Aerologii, Warszawa, zad. KBN-2.5
- Dziewit Z., 2003, Konstrukcja bazy danych z sieci radarów meteorologicznych, sprawozdanie syntetyczne; temat KBN-2.14, RCO IMGW, Warszawa
- Jurczyk A., Szturc J., Ośrodka K., 2003, Kombinacja danych opadowych z deszczomierzy i radarów meteorologicznych: raport z zad. 2.13, temat KBN-2.12, IMGW – Oddział w Katowicach
- Moszkowicz S., 2003, Weryfikacja prognoz opadu z modeli numerycznych (w tym Lokal Modell o rozdzielczości 7 km) przy pomocy danych radarowych korygowanych deszczomierzami oraz możliwości poprawy radarowej natychmiastowej prognozy opadu (nowcasting), temat KBN-2.4, RCO IMGW, Warszawa
- Jurczyk A., Szturc J., Ośrodka K., 2004, Wykorzystanie danych opadowych z deszczomierzy i radarów meteorologicznych do estymacji pola opadów, raport z zad. 2.8, temat KBN-2;: Doskonalenie operacyjnych systemów prognoz meteorologicznych i hydrologicznych dla łagodzenia skutków klęsk żywiołowych, nadzwyczajnych zagrożeń ludności, gospodarki i środowiska (w tym wykorzystanie informacji satelitarnych i radarowych), cz.1. Wykorzystanie danych, IMGW-Oddział w Katowicach, Radarowe Centrum Operacyjne IMGW
- Skąpski R., 2004, Notatka prasowa, materiały IMGW

- Moszkowicz S., 2005, Analiza ewolucji prognozowanego pola opadu z modeli numerycznych w porównaniu z danymi sieci radarowej POLRAD oraz możliwości poprawy radarowej natychmiastowej prognozy opadu (nowcasting), opracowanie w ramach tematu KBN-2; Doskonalenie operacyjnych systemów prognoz meteorologicznych i hydrologicznych dla łagodzenia skutków klęsk żywiołowych, nadzwyczajnych zagrożeń ludności, gospodarki i środowiska (w tym wykorzystanie informacji satelitarnych i radarowych), Radarowe Centrum Operacyjne IMGW, Warszawa
- Lewandowski R., 2009, Radar meteorologiczny na Opolszczyźnie. Koncepcja, materiały RCO, IMGW

Opracowania zwarte i ciągłe

- Atlas D., 1963, Radar Analysis of Severe Storms, Meteorological Monographs, 5 (27), 177-220
- Battan L.J., 1973, Radar observation of the atmosphere, University of Chicago Press, Chicago Illinois U.S.A., 324 s.
- Battan L.J., 1979, Pogoda, PWN, Warszawa, 182 s.
- Bringi V.N., Chandrasekar V., 2001, Polarimetric Doppler Weather Radar. Principles and applications, Cambridge University Press, Cambridge, Wlk. Brytania, 636 s.
- Bringi V.N., Thurai M., Hanesen R., 2007, Dual Polarization. Weather radar Handbook, dok. Gematronik, Neuss Germany, 15-25
- Buderi R., 2005, Radar. Wynalazek, który zmienił świat, Prószyński i S-ka, Warszawa, 536 s.
- Campbell S.D., 1989, Use of features aloft in the TWDR microburst recognition algorithm, [w:] Proceedings of 24th Conference on Radar Meteorology, Tallahassee, USA, 167-170
- Ciach C.G., Dewiszek P.M., Dziewit Z.W., 1991, Automatic meteorological radar system based on MRL-5 radar and network of IBM-PC computers, [w:] Proceedings of 25th International Conference on Radar Meteorology, Paris, France, AMS
- Czekała Z., 1999, Parada radarów, Dom Wydawniczy Bellona, Warszawa, 408 s.
- Czyżewski M., 2014, Prawie 5 mln zł na radar meteorologiczny, Gazeta Wyborcza, 21 listopada 2014
- Doviyak D., 2003, Workshop on the "Fundamentals of Polarimetric-Doppler Radar for Weather Observations and Analysis", materiały IMGW, Warszawa
- Doviyak R.J., Zmric D.S., 1993, Doppler radar and weather observations, 2nd edition, Academic Press, San Diego California, 562 s.
- Douglas R.H., 1964, Hail size distribution, [w:] Proceedings of 11th Weather Radar Conference, 146-149
- Dziewit Z.W., 1993, System of weather radar data dissemination, First European Conference on Application of Meteorology, 27 września – 1 października 1993, Oxford, Zoology Department, University of Oxford
- Dziewit Z., 1998, Spotkanie Grupy Łącznikowej Operacyjnej Sieci Radarów Meteorologicznych, Gazeta Obserwatora IMGW, 1 (99), 17-19
- Evans J.E., Weber M.E., 2000, Weather radar development and application programs, Lincoln Laboratory Journal, 12 (2), 367-382
- Groszyk T., Tober Z., 1976, Analiza zagrożenia mikrofalowego w otoczeniu anteny radaru MRL-2, Przemysłowy Instytut Telekomunikacji, Warszawa

- Jurczyk A., Szturc J., Ośródką K., 2002, Porównanie opadów zmierzonych radarem meteorologicznym i deszczomierzami: część 2: obliczenia, *Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej*, 1, 43-57
- Kariko A., Lockett D., Atkinson R., 2010, Australian bureau of meteorology upper wind and radar profiler network, dostęp online: <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/123538.pdf> (1.04.2014)
- Kawecki A., 1976, Racjonalne podstawy wyboru długości fali radaru dla służby hydrologicznej, *Przeгляд Geofizyczny*, 21
- Kawalec A., Pietrusiński J., Witczak A., 2009, Tendencje rozwojowe w technologii radarowej, [w:] *Urządzenia i systemy radioelektroniczne. Wybrane problemy*, A. Kawalec (red.), WAT, Warszawa, 239-246
- Keenan T. D., 2003, Hydrometeor classification with a C-band polarimetric radar, *Australian Meteorology Magazine*, 52 (1), 23-31
- Klejnowska E., 1999, 80 lat państwowej służby hydrologicznej i meteorologicznej w Polsce, materiały promocyjne IMGW, Warszawa
- Klejnowska E., 2003, Oddanie do eksploatacji radarów meteorologicznych, *Gazeta Obserwatora IMGW*, 5, 18-20
- Klejnowska E., 2005, System radarów meteorologicznych POLRAD, *Gazeta Obserwatora IMGW*, 5, 17-19
- Klejnowska E., Klejnowski R., 2004, Radar meteorologiczny w Brzuchani, *Gazeta Obserwatora IMGW*, 2, 10-10
- Klejnowski R., 2000, Program rozbudowy sieci radarów meteorologicznych POLRAD w ramach Systemu Monitoringu i Osłony Kraju, *Gazeta Obserwatora IMGW*, 5, 4-6
- Klejnowski R., 2000, Uroczyste oddanie do eksploatacji radaru meteorologicznego w Pastewniku, *Gazeta Obserwatora IMGW*, 5, 3-4
- Klejnowski R., Królikowski S., 1995, POLRAD sieć radarów meteorologicznych IMGW, *Pytania i odpowiedzi*, IMGW/RADWAR, Warszawa
- Lewandowski R., Szewczykowski M., 2005, OPERA i NORDRAD, *Gazeta Obserwatora IMGW*, 4, 26-28
- Lewandowski R., Szewczykowski M., 2005, System archiwizacji danych w Radarowym Centrum Operacyjnym, *Gazeta Obserwatora IMGW*, 1-2, 30-32
- Lim, S., Chandrasekar V., Bringi V.N., 2005, Hydrometeor classification system using dual-polarization radar measurements: Model improvements and in situ verification, *Geoscience and Remote Sensing*, 43 (4), 792-801, DOI: 10.1109/TGRS.2004.843077
- Mech, 1987, Sprzężenie urządzenia SPM-1 z mikrokomputerem Mera-400 oraz z mikrokomputerem IBM-PC/XT, Zakład Usługowo-Wytwórczy MECH, Warszawa
- Mera Błonie, 1978, Dokumentacja techniczno-ruchowa – Mera 400, t. I, cz. III. Opis funkcjonalny komputera MERA-400, MERA, Warszawa
- Mie G, 1908, Beitrage zur optik truber medien, speziell kolloidaler metallosungen, *Annalen der Physik*, 330 (3), 377-445, DOI: 10.1002/andp.19083300302

- Moszkowicz, S., 1978, Radiolokacyjna metoda obserwacji chmur i opadów, *Gazeta Obserwatora IMGW*, 2, 3-9
- Moszkowicz, S., 1978, Zastosowanie radaru w meteorologicznej osłonie lotnictwa, *Gazeta Obserwatora IMGW*, 3, 3-9
- Moszkowicz S., 1982, Automatyzacja rozpoznawania wybranych zjawisk meteorologicznych obserwowanych radarem i zastosowanie w prognozie meteorologicznej, rozprawa doktorska, maszynopis IMGW, Warszawa
- Moszkowicz S., 1991, Algorithms for recognition of meteorological phenomena and extrapolation nowcasting on automated radar system PSR, [w:] *Proceedings of the 25th International Conference on Radar Meteorology*, 24-18 czerwca, Paryż, Francja, AMS
- Moszkowicz S., 1992, Procedures of Statistical Recognition of Anomalous Propagation and Meteorological Echoes for New Automated Radar System ASR, [w:] *Proceedings of the 2nd International Symposium on Hydrological Application of Weather Radar*, G.W. Shepherd, H.-R. Verworn (red.), University of Hannover, Hannover, Niemcy, 172-179
- Moszkowicz S., 2000, Radar meteorologiczny – jak działa i po co?, *Świat Radio*, 32-34
- Moszkowicz S., 2008, Meteorologia radarowa w IMGW – pół wieku osvajania „diabła na dachu”, *Gazeta Obserwatora IMGW*, 3-4, 29-33
- Moszkowicz S., Ciach G.J., Krajewski W.F., 1993, Evaluation of statistical method for recognition of anomalous propagation in radar reflectivity fields, [w:] *Preprints of 26th International Conference on Radar Meteorology*, 24-28 maja, Norman, Oklahoma, USA
- Moszkowicz S., Dziewit Z., Tuszyńska I., 2000, Drobnoskalowa struktura pola deszczu – wstępne wyniki na podstawie sieci deszczomierzy cyfrowych w rejonie stacji Jarczew oraz radaru w Legionowie, *Materiały Badawcze IMGW*
- Moszkowicz S., Krajewski W.F. Tuszyńska I., 1995, Wstępne porównanie godzinnych sum opadów na zlewnię zmierzonych pluwiografami i radarem meteorologicznym, *Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej*, 18 (2), 57-72
- Moszkowicz S., Tuszyńska I., 2003, *Meteorologia radarowa: podręcznik użytkownika informacji radarowej IMGW*, IMGW, Warszawa, 104 s.
- Park H.S., Ryzhov A.V., Zrnicek D.S., Kim K.E., 2008, The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D description and application to an MCS, *Weather and Forecasting*, 24, 730-748
- Probert-Jones J. R., 1962, The radar equation in meteorology, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 88 (378), 485-495, DOI: 10.1002/qj.49708837810
- Pietrak S., Jasiński J., Kroszczyński K., 2008, Badanie pola wiatru dla obszarów morskich na podstawie danych teledetekcyjnych i modeli numerycznych, *Zeszyty Naukowe AM*, 13, 59-64
- Rayleigh J.W., 1899, *Scientific papers*, tom 1, Cambridge University Press, Cambridge, 597 s.
- Rinehart R.E., 2004, *Radar for Meteorologists*, 4th edition, Rinehart Publications, Columbia, USA
- Rychlewski P., Gajda W., 2005, Baza danych informacji o produktach radarowych, *Gazeta Obserwatora IMGW*, 1-2, 32-33

- Ryzhkov A., Znić D.S., 2003, Discrimination between rain and snow with a polarimetric NEXRAD radar, Preprints of the 31st Conference on Radar Meteorology, Seattle, Washington, USA, 635-638
- Samol E., 1981, Wykrywanie i identyfikacja obiektów i zjawisk meteorologicznych za pomocą radiolokacyjnej stacji meteorologicznej MRŁ-1, Dowództwo Wojsk Obrony Powietrznej Kraju, Warszawa, 120 s.
- Sauvageot H., 1982, Radarmeteorologie. Teledetection active de l'atmosphère, Eyrolles, Paryż, Francja, 292 s.
- Sachidananda M., Znić D.S., 1985, ZDR measurement considerations for a fast scan capability radar, Radio Science, 20 (4), 907-922, DOI: 10.1029/RS020i004p00907
- Straka, J.M. Znić D.S., 1993, An algorithm to deduce hydrometeor types and contents from multi-parameter radar data, Preprints of the 2nd Conference on Radar Meteorology, Norman, Oklahoma, 513-515
- System analizy danych radarowych i danych detekcji wyładowań, 2012, raport końcowy z proj. KLIMAT: Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo, zad. Rozwój metod prognozowania i systemów ostrzegania przed groźnymi zjawiskami hydrologicznymi i meteorologicznymi oraz wykorzystanie ich do osłony kraju, materiały IMGW-PIB, Warszawa
- Szewczykowski M., Dziewit Z., 2004, Sieć radarów meteorologicznych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – POLRAD, Gazeta Obserwatora IMGW, 5, 7-10
- Sztarski M., 1981, Radary, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa, 508 s.
- Sztrauch E., 1964, Radar meteorologiczny w PIHM, Gazeta Obserwatora IMGW
- Szturc J., 2004, Teledetekcja satelitarna i radarowa w meteorologii i hydrologii, Wydawnictwo ATH, Bielsko-Biała, 141 s.
- Szturc J., Jurczyk A., Jawor J., Wójcik B., 1998, O możliwościach radaru meteorologicznego w Katowicach, Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 21 (2), 65-80
- Szóstka J., 2001, Fale i anteny, Wyd. Komunikacji i Łączności Sp. Z o.o., Warszawa, 376 s.
- Tomczak-Janowski J., 1998, Historia radaru, dostęp online: <http://heading.pata.pl/radar2.htm> (1.04.2014)
- Tomczak-Janowski, 2012, Lotnicze systemy nawigacyjne, dostęp online: <http://heading.pata.pl/>, (15.10.2015)
- Tomczak-Janowski J., 2000, Radary pokładowe, dostęp online: <http://www.heading.pata.pl/radar7.htm>, (14.10.2015)
- Tuszyńska I., 2005, Wykorzystanie technologii VSAT w sieci radarów meteorologicznych, IMGW, Warszawa, 108 s.
- Tuszyńska I., 2008, Określanie obszarów zagrożeń w oparciu o dane z systemu radarów meteorologicznych, [w:] Ekstremna pogoda w Polsce: obserwacje, pomiary, prognozy, M. Maciejewski, M.S. Ostojki, IMGW, Warszawa, 177-193
- Tuszyńska I., 2011, Charakterystyka produktów radarowych, IMGW, Warszawa, dostęp online: http://www.imgw.pl/extcont/wiedza/otn/produkty_radarowe.pdf (1.04.2014)
- Tuszyńska I., Rychlewski P., Dziewit Z., 2013, System automatycznej analizy danych teledetekcji naziemnej, Gazeta Obserwatora IMGW, 1-3, 6-9

- Tuszyńska I., Rychlewski P., 2013, Co nowego w sieci POLRAD?, Gazeta Obserwatora IMGW, 4, 3-9
- Woliński K., 2006-2015, Krótka historia powstania i rozwoju radiolokacji, dostęp online: <http://www.radary.az.pl/historia.php> (14.10.2015)
- Zieliński J., 2001, Raport Dyrektora Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej za lata 1991-2000, IMGW, Warszawa
- Zieliński J., 2006, Raport Dyrektora Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej za lata 2001-2006, IMGW, Warszawa
- Zrnić D.S., Ryzhkov A., Straka J., Yidi Liu, Vivekanandan J., 2001, Testing a procedure for automatic classification of hydrometeor types, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 18 (6), 892-913, DOI: 10.1175/1520-0426(2001)018<0892:TAPFAC>2.0.CO;2

Dokumentacja specjalistyczna

- Doppler Weather Radar System 500C – Documentation – File 01-07, 2002, GEMATRONIK
- Doppler Weather Radar System 360AC – Ext. Vendor Manuals – RCP1, RCP2, T/R1, 1996
- Doppler Weather Radar System 1500C – Documentation, 2002, GEMATRONIK
- Instrukcja skrócona RAVIS 1.3, wydanie dokumentu 1.8, 2001, GEMATRONIK
- Instruction Manual –RAINBOW® 5, Part 1 i 2, Release 5.18.0, SELEX Sistemi Integrati: Quick Guide, User Guide, Configuration Guide, Products & Algorithms, File Format, 2007
- Instruction Manual –RAINBOW® 5, Part 1 i 2, Release 5.31.0, SELEX Sistemi Integrati: Quick Guide, User Guide, Configuration Guide, Products & Algorithms, File Format, 2010
- RAINBOW. Krótki przewodnik, 2005, AMS Gematronic, Neuss-Rosellen, Niemcy
- RAINBOW. Podręcznik użytkownika, 2005, AMS Gematronic, Neuss-Rosellen, Niemcy
- RAINBOW. Produkty i algorytmy, 2005, AMS Gematronic, Neuss-Rosellen, Niemcy
- RAINBOW. Format plików, 2005, AMS Gematronic, Neuss-Rosellen, Niemcy

ISBN 978-83-61102-92-2
www.imgw.pl