

Systemy rejestracji i przetwarzania danych radiometeorologicznych do badań propagacji mikrofal

Ewa Wielowieyska

Wojciech Skonieczny

Opracowane w Instytucie Łączności systemy rejestracji i przetwarzania danych radiometeorologicznych stanowiły wyposażenie poligonów doświadczalnych w rejonie Warszawy oraz Dubnej. Zaprezentowano jeden z systemów do badań propagacyjnych i wpływu warunków meteorologicznych na tę propagację. System umożliwiał pomiar tłumienia fal radiowych na trasach horyzontowych i satelitarnych oraz pomiar intensywności opadów atmosferycznych: deszczu, śniegu i gradu. Przedstawiono również koncepcję i sposób opracowania wyników pomiarowych: obliczanie rozkładów intensywności deszczu i tłumień sygnału radiowego, normalizację rozkładów zgodnie z wymaganiami ITU-R, prognozowanie oraz konwersję tłumień dla różnych częstotliwości i konwersję intensywności opadu dla różnych okresów uśredniania. Prowadzenie badań propagacyjnych, w szczególności prognozowanie tłumień, stanowi podstawę do projektowania systemów radiokomunikacyjnych.

system pomiaru danych radiometeorologicznych, propagacja fal radiowych, radioklimat Polski, intensywność deszczu, prognozowanie tłumień fal radiowych

Wprowadzenie

Niezawodność działania linii radiowych zależy od parametrów urządzeń technicznych oraz od warunków propagacji fal w atmosferze.

Na propagację fal radiowych, szczególnie fal centymetrowych, w znacznym stopniu ma wpływ rodzaj opadów atmosferycznych i ich intensywność. Krople deszczu osiągają rozmiary 0,4 cm, a w przypadku burz gradowych zdarza się, że kawałki lodu przekraczają kilka centymetrów. Charakterystyki opadów należy zatem badać w okresach występowania intensywnych, choć krótkotrwałych opadów, w czasie których mogą powstać zaniki sygnału. Spośród wszystkich opadów właśnie deszcz powoduje największe tłumienie fal radiowych.

Innym niesprzyjającym czynnikiem, wpływającym na propagację fal, jest ich depolaryzacja zależna między innymi od pionowego gradientu prędkości wiatru.

Propagacja fali zależy też od gradientu wskaźnika refrakcji powietrza, który jest funkcją temperatury i wilgotności powietrza. Standardowy gradient wskaźnika refrakcji w klimacie umiarkowanym określa się następująco: $N = 40 \text{ N/1 km}$ [19]. Jeśli w warstwach atmosfery od 0 do 50 m gradient wskaźnika refrakcji znacznie różni się od standardowego, może on być przyczyną powstawania wielodrogowości fali radiowej i interferencji jej składowych, a w konsekwencji przyczyną osłabienia lub wzmocnienia sygnału radiowego w punkcie odbioru.

Badając linie satelitarne należy również uwzględnić wysokości izotermy 0°C [21], poniżej której opady, jeśli występują, mają na ogół postać deszczu. W przypadku opadów z chmur konwekcyjnych powyżej wysokości, na której znajduje się izoterma 0°C (ok. 2,5 km nad Ziemią), maleje liczba nie zamrożonych kropli deszczu. Wtedy uwzględniając obszary pod i nad izotermą 0°C , wzrasta całkowity obszar występowania deszczu nawet do 5 km nad Ziemią.

Wszystkie te czynniki powinny być wzięte pod uwagę przy projektowaniu systemów radiokomunikacyjnych i stąd wynika zapotrzebowanie na określenie charakterystyk opisujących omawiane zjawiska. Charakterystyki te są wykorzystywane do prognozowania tłumień fali na trasach horyzontowych linii radiowych i trasach satelitarnych.

W artykule przedstawiono system do pomiaru, rejestracji i przetwarzania danych radiometeorologicznych, opracowany i uruchomiony w Instytucie Łączności w Warszawie. Rejestrował on intensywność opadów atmosferycznych oraz tłumienie fal radiowych na horyzontowych liniach radiowych i linii satelitarnej w zakresie częstotliwości powyżej 10 GHz, w którym intensywność deszczu odgrywa istotną rolę [7].

W systemie przyjęto, że pomiary intensywności deszczu mają być prowadzone w kilku punktach na trasie linii radiowych. Wprawdzie ITU-R zaleca wykonywanie pomiarów w jednym punkcie na skraju trasy, jednak wyniki uzyskane w Instytucie Łączności wykazały, że korelacja tłumienia fali radiowej z intensywnością deszczu mierzonego na trasie była znacząco większa niż korelacja z intensywnością deszczu z jednego punktu pomiarowego [20]. Zarejestrowane dane umożliwiały określenie statystycznego profilu intensywności opadu wzdłuż trasy, tj. charakterystyk przestrzenno-czasowych opadów, które są wykorzystywane do prognozowania tłumień fal w badanych zakresach częstotliwości.

Inną ważną cechą systemu pomiarowego była możliwość jednoczesnego pomiaru tłumienia fal na trasie horyzontowej i satelitarnej. Znajomość profilu intensywności deszczu wzdłuż trasy horyzontowej umożliwiała porównanie tłumień powodowanych przez te same kolumny deszczowe na obu typach tras i wykorzystanie wyników do badania korelacji tych tłumień, jak również do weryfikacji wyników pomiarowych.

System rejestracji danych radiometeorologicznych

Prace badawcze w dziedzinie propagacji fal radiowych prowadzono początkowo w Zakładzie Propagacji Fal Radiowych, a potem w Zakładzie Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji Instytutu Łączności. Myśl zbudowania poligonu doświadczalnego do badań eksperymentalnych pojawiła się w końcu lat siedemdziesiątych.

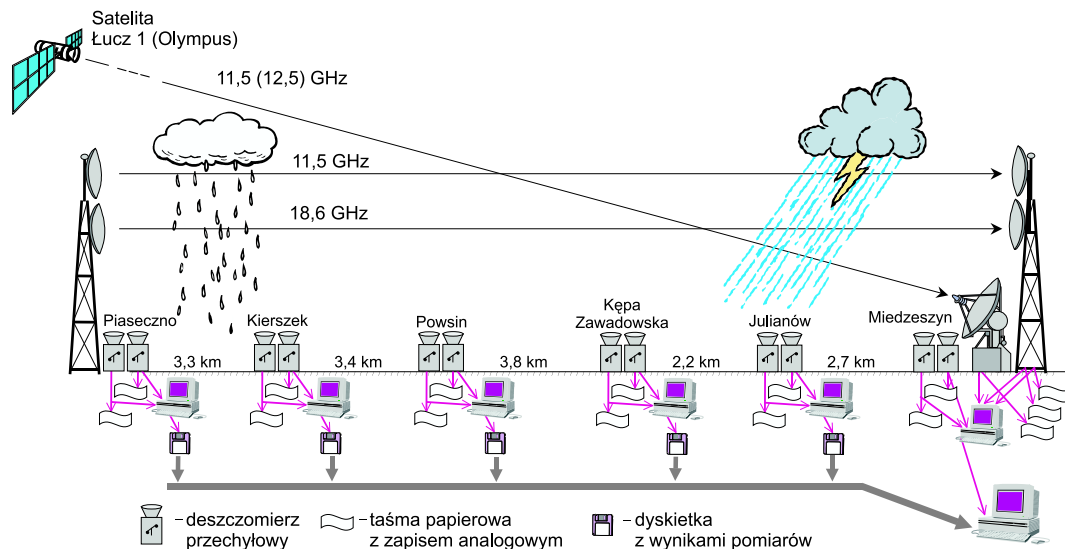
Równocześnie z budową poligonu w Polsce powstawały poligony w ZSRR, w NRD, na Węgrzech i innych krajach Europy Wschodniej. Działały już wówczas poligony w krajach zachodnich (jak np. w Fucino we Włoszech), których doświadczenia wykorzystano w Polsce. Nie wszystkie stosowane tam rozwiązania przyjęto u nas, np. po przebadaniu dwóch rodzajów deszczomierzy, czyli pojemnościowego (eksploatowanego w Fucino) i przechyłowego, ten ostatni uznano za doskonalszy pod względem skalowania, niezawodności oraz powtarzalności wyników pomiarowych i dlatego zdecydowano o jego zastosowaniu w Instytucie Łączności. Przy pomiarach średnich 1-minutowych intensywności opadu, zalecanych przez ITU-R [11], pomiar liczby przechyłów w ciągu minuty za pomocą tego typu deszczomierza do celów badań propagacyjnych jest wystarczająco dokładny.

Z udziałem Instytutu Łączności powstał również poligon w Międzynarodowym Ośrodku Doświadczalnym Łączności Satelitarnej w Dubnej, w którym pracownik Instytutu Łączności pełnił funkcję kierownika jednego z eksperymentów.

Przebieg badań, modyfikacje systemu pomiarowego

W 1986 roku została uruchomiona doświadczalna trasa horyzontowych linii radiowych Miedzeszyn – Piaseczno długości 15,4 km, która przebiegała pod trasą linii satelitarnej skierowanej na

satelitę Łucz 1, emitującego falę spolaryzowaną kołowo na częstotliwości 11,5 GHz [31]. Po zakończeniu pracy tego satelity rozpoczęto odbiór sygnałów o częstotliwości 12,5 GHz z satelity Olympus (rys. 1). Na początku pracowała tylko jedna horyzontalna linia radiowa na częstotliwości 18,6 GHz, a w 1989 r. została dołączona do systemu pomiarowego druga linia radiowa, pracująca na częstotliwości 11,5 GHz.



Rys. 1. System rejestracji danych radiometeorologicznych, działający w Instytucie Łączności od 1992 r. do 1993 r.

Anteny odbiorcze linii radiowych horyzontowych i linii satelitarnej zamontowano na tarasie Instytutu Łączności w Miedzeszynie. Dla linii radiowej 11,5 GHz został zainstalowany 2-kanałowy system odbiorczy z selektorem polaryzacji fali, umożliwiającą odbiór ortogonalnych składowych sygnału. Zestaw do pomiarów satelitarnych zawierał następujące elementy: oświetlaną centralnie antenę paraboliczną średnicy 3 m, konwerter 11,5 GHz/1 GHz, konwerter 1 GHz/80 MHz wraz ze wzmacniaczem oraz odbiornik wąskopasmowy typu SLE.

W pięciu punktach trasy horyzontowej rozstawiono stanowiska pomiarowe, każde wyposażone w dwa czujniki intensywności deszczu typu przechyłowego i autonomiczny system rejestrujący na taśmie magnetycznej liczbę przechyłów czujnika oraz znaczniki czasu. W Miedzeszynie, poza czujnikami intensywności opadu, zainstalowano i wykorzystywano w ciągu dwóch pierwszych lat czujniki temperatury, wilgotności oraz kierunku i prędkości wiatru. Wszystkie czujniki zamontowane w Miedzeszynie połączono z komputerem MERA 400. Odbiorczy sygnał radiowy był próbkowany do zapisu co 2 lub 10 s, natomiast co minutę rejestrowano liczbę przechyłów czujników deszczomierzy. Dane pomiarowe z punktów autonomicznych wprowadzano do komputera za pomocą skonstruowanego w IŁ analizatora taśm magnetycznych, a następnie wpisywano do bazy danych na dysku. Dane z czujników poziomu sygnałów radiowych i intensywności deszczu dodatkowo zapisywano na taśmie papierowej.

Wyniki pomiarów rejestrowano i przetwarzano w komputerowym systemie, początkowo MERA 400, a później w komputerze typu IBM PC.

W latach 1986–91 badania propagacji mikrofal na terenie Europy Wschodniej prowadzono w ramach programu INTERKOSMOS, związanego z wykorzystaniem satelity Łucz 1. Ośrodek koordynujący

te badania znajdował się w Dubnej koło Moskwy. Ten okres pracy charakteryzował się intensywną współpracą międzynarodową. W czerwcu 1991 r. odbyła się w Kolbergu ostatnia narada koordynacyjna grupy INTERKOSMOS, a w listopadzie tego roku, w Pradze, doszło do spotkania tej grupy z przedstawicielami organizacji OPEX (*Olympus Propagation Experiment*), działającej w ESA (*European Space Agency*). Spotkanie to otworzyło możliwość działania w eksperymencie OPEX uczestnikom programu INTERKOSMOS oraz zespołowi badawczemu Instytutu Łączności, który w 1992 r. włączył się do realizacji tego programu. Zakończono wtedy rejestrowanie sygnału z satelity Łucz 1 i rozpoczęto rejestrację sygnału z satelity Olympus. Satelita Olympus został jednak zdjęty z orbity w 1993 r. W Miedzeszynie podjęto więc próby rejestrowania sygnału z satelity Eutelsat, ale ponieważ trasa satelitarna nie przebiegała nad horyzontową trasą doświadczalną, rejestrację w krótkim czasie zakończono.

W 1991 r. minikomputer MERA 400 zastąpiono komputerem typu IBM PC z kartą AD/DA, stanowiącą interfejs wejściowy dla wszystkich czujników. Sygnał radiowy próbkowano co 4 s, intensywność deszczu zaś była odczytywana, tak jak poprzednio, jako średnia 1-minutowa. Początkowo zainstalowano system radiowy przesyłania danych pomiarowych z punktów na trasie do IŁ w Miedzeszynie. Zaletą tego systemu była pełna synchronizacja czasu zarejestrowanych opadów na poszczególnych stanowiskach z czasem pomiaru sygnałów radiowych, wadą – sporadyczne przekłamania przesyłanych danych, co wynikało z niedoskonałości systemu.

W 1992 r. na każdym stanowisku na trasie Miedzeszyn – Piaseczno umieszczono komputer typu IBM PC i dwa deszczomierze. Wyniki pomiarów uzyskane z deszczomierzy były rejestrowane przez komputer oraz na taśmach papierowych (rys. 1). Raz w miesiącu dane na dyskietkach przewożono do IŁ. Pomiary intensywności deszczu wzdłuż całej trasy prowadzono od maja do września, a w punkcie odbioru sygnałów w Miedzeszynie – cały rok. Tu w miesiącach zimowych włączano podgrzewanie czujnika, które umożliwiało – poza pomiarem intensywności deszczu – również pomiar intensywności śniegu i gradu.

Na przełomie lat 1993/94 utworzono nową trasę horyzontową Miedzeszyn – Józefów długości 6,3 km, na której rozmieszczono cztery stanowiska pomiarowe, każde wyposażone w dwa czujniki deszczu i komputer do rejestracji danych pomiarowych. Trasa horyzontowa przebiegała pod trasą satelitarną, skierowaną na satelitę Kopernikus II. Poza liniami radiowymi na częstotliwościach 11,5 i 18,6 GHz zainstalowano też linię w pasmie 37 GHz.

Zmniejszenie funduszy na prace badawcze spowodowało stopniowe ograniczanie badań, a potem ich zakończenie (w 1998 r.). Rozpoczęte w 1994 r. pomiary tłumienia fal na nowej trasie przy końcu roku przerwano, a pomiary intensywności deszczu na tej trasie zakończono w 1996 r. Jedynie pomiary intensywności deszczu w Miedzeszynie prowadzono do 1998 r.

W listopadzie 1992 r. przedstawiciel Instytutu Łączności został zaproszony do Brukseli do udziału w naradzie koordynacyjnej europejskiego programu COST 235 (*Cooperation in Science and Technology*), obejmującego badania propagacji mikrofal na trasach horyzontowych w pasmach powyżej 10 GHz. Wyniki uzyskane w IŁ dołączono do *Końcowego sprawozdania projektu COST 235* [3].

Specyfikacja urządzeń zainstalowanych na poligonie doświadczalnym w Miedzeszynie

W latach 1986–94 system rejestracji danych radiometeorologicznych na trasie Piaseczno – Miedzeszyn zawierał:

- 1) linie radiowe 11,5 i 18,6 GHz, umieszczone na trasie Piaseczno – Miedzeszyn długości 15,4 km;
- 2) linie satelitarne:
 - satelita Łucz 1 – Miedzeszyn (w latach 1986–91),
 - satelita Olympus – Miedzeszyn (w latach 1991–92);
- 3) deszczomierze przechyłowe, umieszczone po 2 szt. na każdym stanowisku na trasie linii radiowych: w Piasecznie, Kierszku, Powsinie, Kępie Zawadowskiej, Julianowie i Miedzeszynie; odległości między sąsiednimi stanowiskami wynosiły odpowiednio: 3,3; 3,4; 3,8; 2,2; 2,7 km;
- 4) urządzenia rejestrujące intensywność opadu na trasie^①:
 - rejestratory i analizator danych z czujników, pracujące z taśmami magnetycznymi,
 - system przesyłania danych drogą radiową do komputera w Miedzeszynie,
 - komputery PC (rys. 1);
- 5) urządzenia rejestrujące w Miedzeszynie^①:
 - minikomputer MERA 400 wraz z interfejsem sygnałów F/D INTEL DIGIT,
 - komputery PC do rejestracji danych z czujników znajdujących się na stanowisku centralnym w Miedzeszynie (rys. 1),
 - komputer PC do przetwarzania wszystkich danych pomiarowych i do ich archiwizacji (rys. 1);
- 6) urządzenia bezprzewodowego zasilania.

W latach 1994–96 system rejestracji danych radiometeorologicznych na trasie Józefów – Miedzeszyn zawierał:

- 1) linie radiowe 11,5 i 18,6 GHz, umieszczone na trasie Józefów – Miedzeszyn długości 6,3 km;
- 2) linię satelitarną: satelita Kopernikus II – Miedzeszyn;
- 3) deszczomierze przechyłowe, po 2 szt. na każdym stanowisku: w Józefowie, Michalinie, Falenicy i Miedzeszynie; odległości między sąsiednimi stanowiskami wynosiły odpowiednio: 2,6; 2,1; 1,6 km;
- 4) komputery PC na stanowiskach pomiarowych i na stanowisku centralnym w Miedzeszynie, wykorzystywane do zbierania oraz przetwarzania danych;
- 5) urządzenia bezprzewodowego zasilania.

Skalowanie czujników

Czujniki deszczomierzy były okresowo skalowane i w razie konieczności regulowane w ten sposób, aby przy intensywności deszczu $R = 2,8$ mm/h występował jeden przechył na minutę. Do przeliczenia liczby przechyłów n w jednostce czasu na intensywność deszczu wykorzystywano wzór: $R = 2,8 \cdot n$ [mm/h]. Skalowanie przeprowadzano w całym zakresie pomiarowym czujnika, używając do tego specjalnie skonstruowanego generatora o kontrolowanym strumieniu wody.

Skalowanie odbiorników sygnałów radiowych polegało na podaniu sygnałów wielkiej częstotliwości z generatora na wejście odbiornika i zdjęciu charakterystyki $U_{wyj} = f(P_{w.cz.})$. Za punkt odniesienia przyjmowano napięcie wyjściowe charakterystyki równe napięciu wywołanemu przez sygnał rzeczywisty występujący w standardowych warunkach, tj. w okresach bezdeszczowych i kiedy nie stwierdzono wielodrogowości sygnału radiowego.

^① Urządzenia uszeregowano według daty ich zainstalowania.

Opracowanie wyników pomiarowych

Wyniki pomiarów natężenia sygnału radiowego i intensywności deszczu zapisane na dysku komputera podlegały obróbce, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 2. Kolejność podstawowych przekształceń wyników pomiarowych była następująca:

- 1) weryfikacja poprawności danych pomiarowych;
- 2) uzupełnianie danych z alternatywnych źródeł, np. odczyt pomiaru z taśmy papierowej w przypadku niezarejestrowania danych w komputerze;
- 3) wyznaczanie rozkładów tłumienia sygnału radiowego i intensywności deszczu dla każdego punktu pomiarowego oraz rozkładów średniej intensywności deszczu z trasy;
- 4) przekształcanie uzyskanych rozkładów do postaci zalecanej przez ITU-R [9, 11], które były wykorzystywane do dalszych analiz, a także do porównywania wyników z innymi ośrodków badawczych, m.in. uczestniczących w programie INTERKOSMOS, np. z Dubnej, Neu Golm, Budapesztu i Pragi;
- 5) wyznaczanie współczynników Q_1 , β konwersji rozkładu średniorocznego na rozkład dla średniego najgorszego miesiąca.

Rozkłady empiryczne tłumienia fali i intensywności opadu mają postać procentów czasu przekroczenia ustalonych progów. Wartości progów zależą od rodzaju czujników wykorzystanych do mierzenia wybranego zjawiska. W celu porównania rozkładów otrzymanych z innych czujników, należy najpierw wyznaczyć odpowiednie kwantyle otrzymanych rozkładów. Wymaga to określenia progów tłumienia fali [dB] i intensywności deszczu [mm/h] dla wartości procentów:

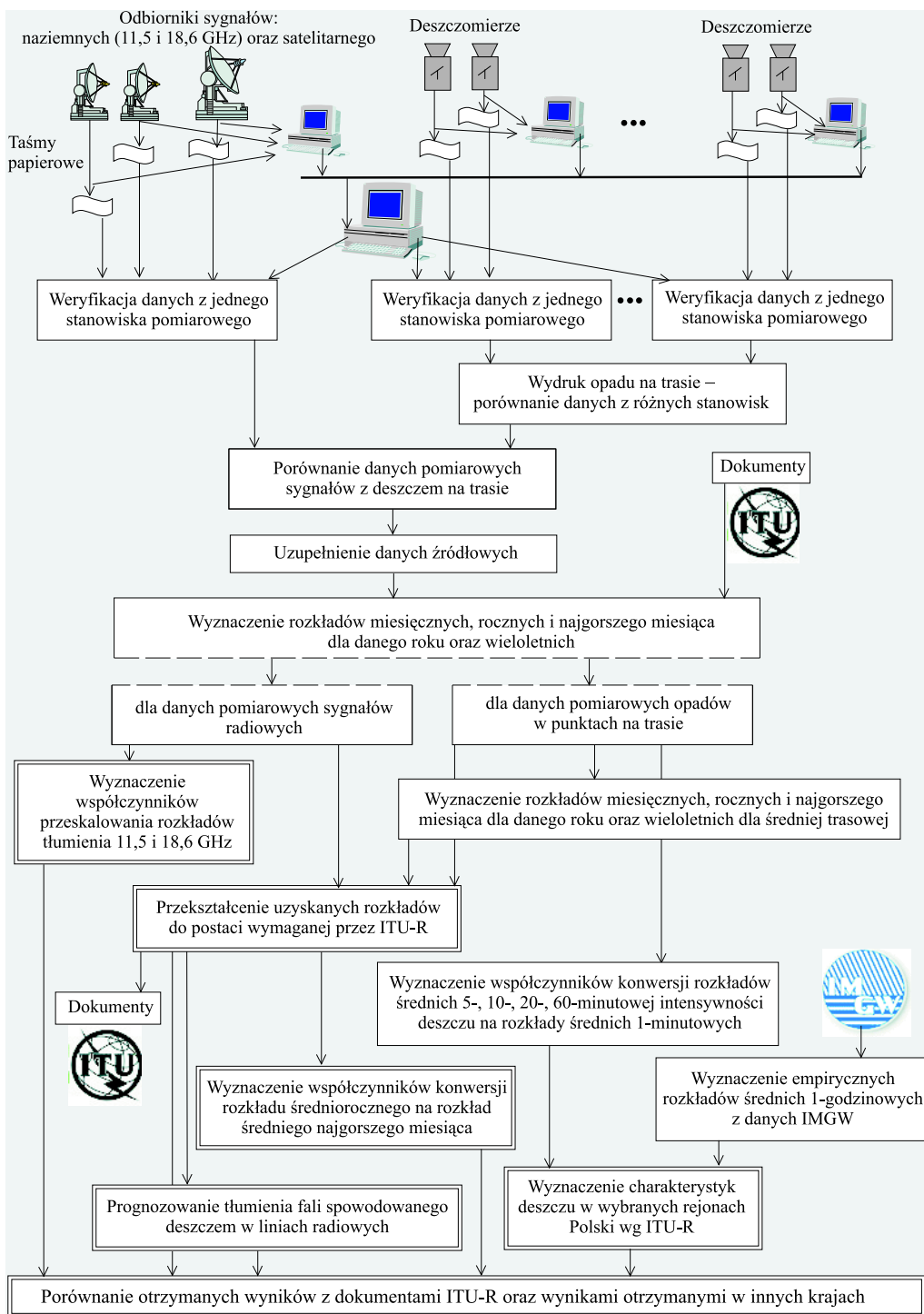
$$p = \dots; 2; 1; 0,5; 0,3; 0,1; \dots [\%].$$

Weryfikacja poprawności danych pomiarowych

Weryfikacja poprawności danych pomiarowych polegała na odrzuceniu niepewnych wyników pomiarów. Procedura weryfikacji składała się z następujących etapów:

- 1) porównywanie danych zebranych na dysku komputera:
 - z zapisem na taśmie papierowej z danego stanowiska pomiarowego,
 - z danymi z drugiego czujnika na danym stanowisku pomiarowym, np. w przypadku deszczomierza,
 - z danymi czujników z innych stanowisk na trasie, zarówno czujników sygnałów radiowych, jak i deszczomierzy;
- 2) sprawdzanie zgodności tłumienia sygnałów z intensywnością deszczu zarówno w poszczególnych przypadkach opadów, jak i przy porównaniach wyznaczonych rozkładów.

Jeśli wystąpiły niezgodności, analizowano szczegółowo dany przypadek i albo zatwierdzano dane jako prawidłowe, albo je odrzucano. Dane pomiarowe zebrane z punktów pomiarowych na trasie przedstawiono graficznie w postaci przebiegów intensywności deszczu w czasie i przestrzeni (rys. 3). Umożliwiały one dogodne sprawdzenie i weryfikację wyników pomiarowych.

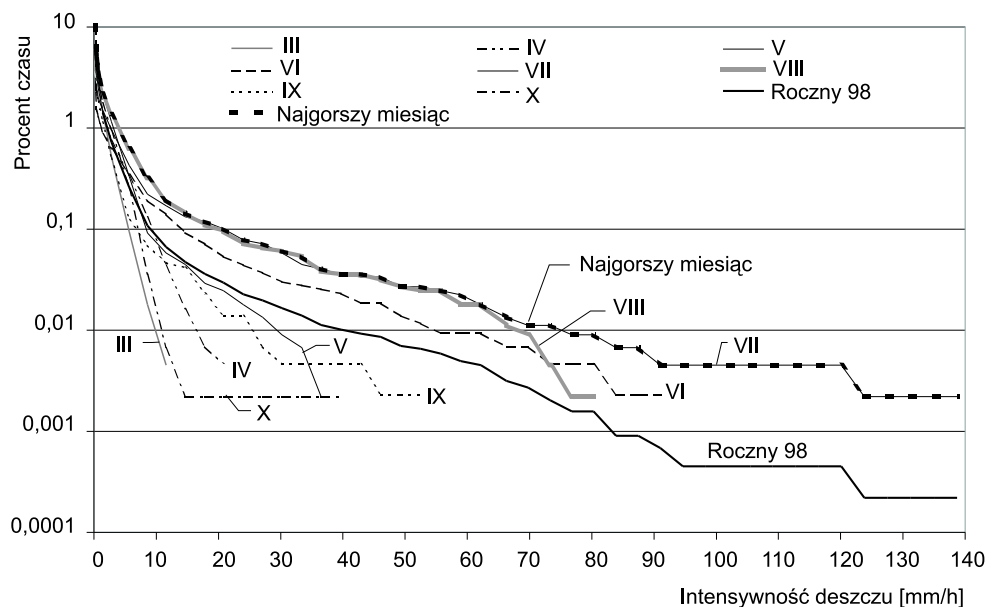


Rys. 2. Schemat przetwarzania danych pomiarowych intensywności deszczu oraz tłumienia sygnału radiowego

$$P_k = \max(p_{k,1}, p_{k,2}, \dots, p_{k,12}), \quad (3)$$

gdzie: $p_{k,i}$ – procent czasu przekroczenia proggu intensywności R_k , w i -tym miesiącu roku.

Zestawienie kolejnych progów i tak wybranych procentów nazwano rozkładem najgorszego miesiąca w roku. Jako przykład, na rys. 4 przedstawiono rozkłady intensywności deszczu w Miedzeszynie dla poszczególnych miesięcy, całego roku i najgorszego miesiąca.



Rys. 4. Rozkłady intensywności deszczu: miesięczne (marzec – październik), roczny i najgorszego miesiąca w Miedzeszynie w 1998 r.

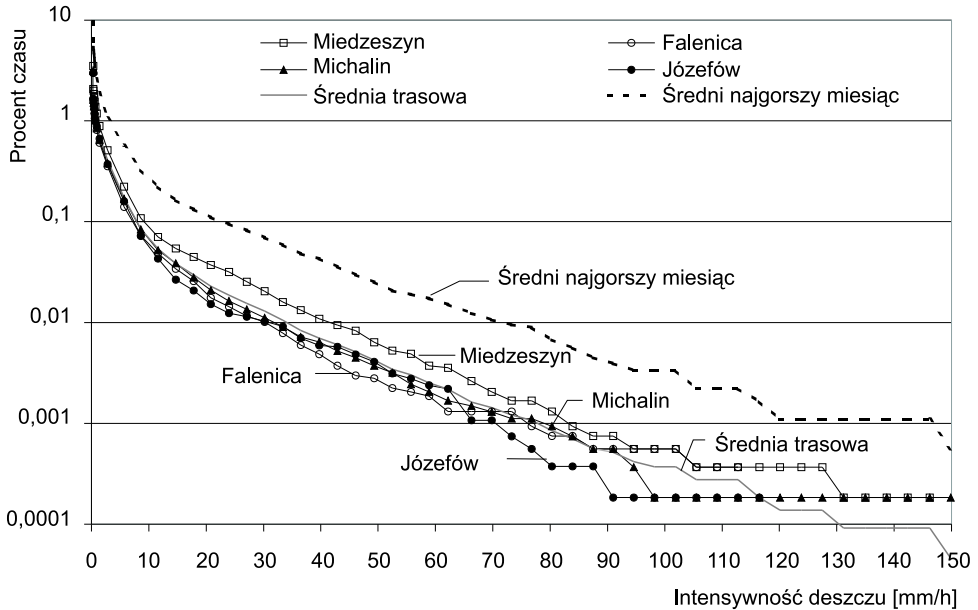
Rozkład średnioroczny oraz średni najgorszy miesiąc dla danego przedziału lat oblicza się, wykorzystując rozkłady roczne i dla najgorszego miesiąca w kolejnych latach.

Rozkłady intensywności deszczu charakteryzujące trasę powstają przez uśrednianie rozkładów otrzymanych w poszczególnych punktach z uwzględnieniem ich wag (rys. 5). Operacja ta jest ekwiwalentna tworzeniu rozkładu intensywności deszczu uśrednionej wzdłuż trasy. Tak więc trasowe roczne rozkłady intensywności deszczu i rozkłady dla najgorszego miesiąca w roku zostały obliczone – przez uśrednienie bądź rocznych rozkładów w punktach, bądź rozkładów dla najgorszego miesiąca w tych punktach – według wzoru:

$$P(R \geq R_k) = \sum_{l=1}^L P_l(R \geq R_k) * w_l, \quad [\%] \quad k = 1, \dots, K, \quad (4)$$

gdzie: w_l – waga dla l -tego punktu pomiarowego,
 L – liczba punktów.

Intensywność zmierzona w punkcie pomiarowym trasy była przyjmowana jako intensywność na odcinku trasy do połowy odległości do najbliższego czujnika z jednej i drugiej strony. Waga tych pomiarów była zatem proporcjonalna do długości tych odcinków. Dla czujników skrajnych waga



Rys. 5. Roczne rozkłady intensywności deszczu w punktach na trasie, rozkład średniej trasowej ważonej, rozkład średniego najgorszego miesiąca dla trasy Miedzeszyn – Józefów sporządzone dla 1996 r.

pomiarów była mniejsza, gdyż reprezentowały one intensywności jedynie na odcinku z jednej strony, równym połowie odległości do najbliższego czujnika.

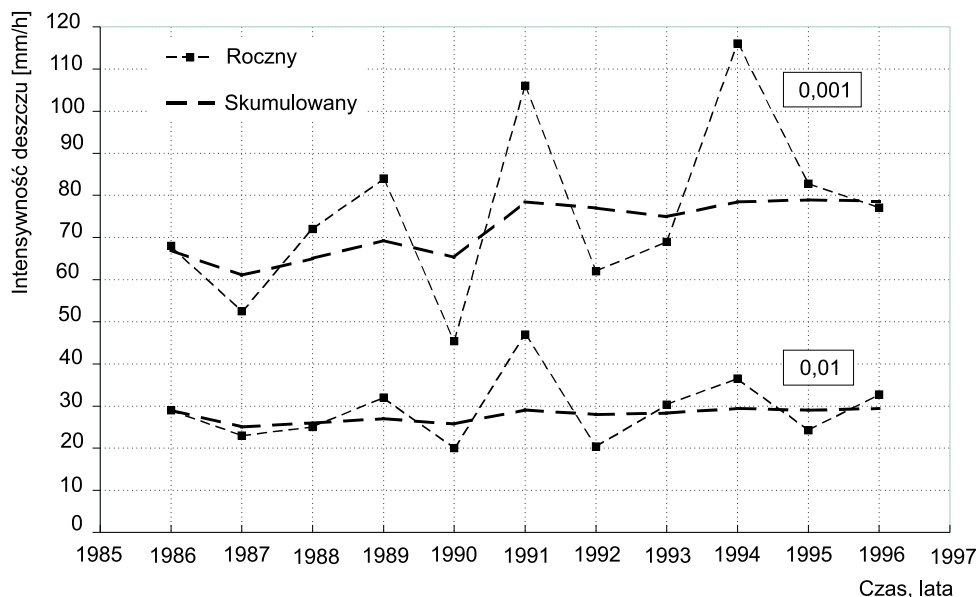
Uwzględniając wymagania ITU-R, rozkłady przekształcano do postaci tabelek odpowiednich kwantyli R_{p_i} . Wyznaczano wartości intensywności deszczu R_{p_i} [mm/h], odpowiadające ustalonym wartościom procentów $p_i = 10; 5; 3; 2; 1; 0,5; 0,3; 0,2; 0,1; 0,05; 0,03; 0,02; 0,01; 0,005; 0,003; 0,002; 0,001$ [%], spełniających równość:

$$p_i = P(R > R_{p_i}), [\%] \quad i = 1, 2, \dots, 17. \quad (5)$$

W procedurze projektowania systemów radiokomunikacyjnych wykorzystuje się wartości intensywności deszczu, które są przekraczane z zadaniem prawdopodobieństwem, np. $p = 0,01$ lub $p = 0,001$.

Zmienność rozkładu intensywności deszczu na przestrzeni lat, w których były prowadzone pomiary, jest dobrze charakteryzowana przez zmienność kwantyli $R_{0,01}$ i $R_{0,001}$ tego rozkładu. Zostało to zobrazowane na rys. 6, na którym przedstawiono intensywności przekraczane w kolejnych latach przy procentach $p = 0,01$ i $p = 0,001$. Stopniową stabilizację rozkładu wieloletniego pokazuje przebieg tych kwantyli dla rozkładów kumulowanych, poczynając od rocznego w 1986 r., dwuletniego z lat 1986 i 1987, aż do rozkładu skumulowanego w ciągu 11 lat w okresie 1986–96.

Dysponując rozkładem średniorocznym i średnim rozkładem dla najgorszego miesiąca w roku, wyznaczano regresyjne współczynniki Q_1, β konwersji rozkładu średniorocznego na rozkład dla średniego najgorszego miesiąca, według zależności przedstawionej w zaleceniu ITU-R [9]:



Rys. 6. Przebiegi kwantyli $R_{0,01}$ i $R_{0,001}$ rocznych rozkładów intensywności deszczu uśrednionych trasowo oraz kwantyli rozkładów skumulowanych od 1986 r. do 1996 r.

$$Q(p) = \begin{cases} Q_1 p^{-\beta} & \text{dla } \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{\frac{1}{\beta}} < p < 3\% \\ 12 & \text{dla } p < \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{\frac{1}{\beta}} \end{cases} \quad (6)$$

gdzie: p – procent roku,
 p_{nm} – procent najgorszego miesiąca,
 $Q(p) = p_{nm}/p$.

Współczynniki konwersji Q_1 , β obliczano stosując nieliniową analizę regresji [16].

Według standardu ITU-R do prognozy tłumienia fali korzysta się z rozkładu średniej 1-minutowej intensywności deszczu [7]. Z graficznych zapisów opadów deszczu IMGW, otrzymanych z pluwiografów Hellmana, rozmieszczonych na terenie całego kraju, można uzyskać jedynie średnie 5-minutowe wartości intensywności deszczu lub średnie z większych przedziałów czasu. Dlatego w Instytucie Łączności opracowano metodę przekształcenia rozkładów wartości średnich intensywności deszczu 5-, 10-, 20-, 60-minutowych na rozkłady wartości średnich intensywności deszczu 1-minutowych. Stosując tę metodę postępowano kolejno w następujący sposób:

- 1) przetworzono dane 1-minutowe zebrane w IŁ na średnie 5-, 10-, 20-, 60-minutowe;
- 2) dla tak przetworzonych danych policzono rozkłady;
- 3) wyznaczono współczynniki konwersji tych rozkładów na rozkłady danych 1-minutowych [11, 14, 17, 26].

Znając współczynniki konwersji rozkładów wartości średnich intensywności deszczu 5-, 10-, 20-, 60-minutowych na rozkłady wartości 1-minutowych, można korzystać z danych IMGW do prognoz tłumienia na terenie całego kraju [25].

W badaniach wykorzystywano niektóre modele prognostyczne, takie jak Misme-Fimbela i Misme-Waldteufla, które wymagają przedstawienia empirycznego rozkładu intensywności deszczu w postaci funkcji. Dogodną reprezentacją takiego rozkładu jest rozkład logarymiczno-normalny w postaci:

$$P(R > R_i) = P_0 \frac{1}{2} \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{t_{R_i}} \exp(-u^2) du \right], \quad (7)$$

gdzie: $P_0 = P(R > 0)$ jest prawdopodobieństwem wystąpienia deszczu,
 u – standaryzowana zmienna całkowita,
 górna granica całki:

$$t_{R_i} = \frac{\ln R - \mu}{\sqrt{2\sigma}}. \quad (8)$$

Parametry P_0 , μ , σ , tj. średnia i odchylenie standardowe zmiennej $\ln(R)$ są wyznaczone z rozkładu empirycznego [16].

Jak wspomniano, do pomiarów intensywności deszczu wykorzystywano czujnik typu przechyłowego. W uzyskanych rozkładach najniższa wartość $R = 2,8$ mm/h odpowiadała jednemu przechyłowi czujnika na minutę. Ze względu na analizę propagacji fal milimetrowych, gdzie wykorzystuje się procenty występowania niskich intensywności deszczu, opracowano algorytm obliczający rozkład intensywności deszczu poniżej progu $R = 2,8$ mm/h. Algorytm umożliwia wyznaczanie średniej 1-minutowej intensywności, gdy występuje jeden przechył na 2, 3, ... lub 10 min. Jeśli przechył nie wystąpił w okresie dłuższym niż 10 min, przyjmuje się, że nastąpiła przerwa w opadzie. Uzyskano w ten sposób skalę intensywności deszczu o najniższym progu równym 0,28 mm/h, odpowiadającym występowaniu mżawki.

Porównywano uzyskane wieloletnie rozkłady 1-minutowej intensywności deszczu z modelowymi rozkładami dla deszczowych stref klimatycznych E, H i K przedstawionymi w zaleceniu ITU-R [9]. Analiza wyników IMGW oraz własnych obserwacji intensywności deszczu z rejonu Polski południowej wykazała, że osiągnięte tam intensywności są swoiste dla strefy klimatycznej K, a nie H, jak podano w materiałach ITU-R [9]. Należy dodać, że prowadzono również pomiary intensywności deszczu poza rejonem Warszawy, a mianowicie w Gdańsku, Wrocławiu i Zamościu.

Charakterystyki tłumienia fali wywołanego przez zjawiska atmosferyczne na trasie horyzontowej 11,5 GHz i 18,6 GHz

Za podstawową charakterystykę tłumienia fali przyjęto rozkład miesięczny wartości wyników pomiarów sygnału w postaci:

$$p_k = P(A \geq A_k), [\%] \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (9)$$

gdzie: p_k – procent czasu, w ciągu którego tłumienie fali [dB] przewyższa lub jest równe wybranemu progowi tłumienia A_k w stosunku do całego miesiąca,

k – numer progu,

A_K – próg maksymalny.

Wyznaczano miesięczne rozkłady tłumienia sygnału radiowego dla wszystkich miesięcy w kolejnych latach. Ponadto tworzone rozkłady tłumienia w okresach, gdy padał deszcz w danym miesiącu. Wyróżnienie tłumień spowodowanych przez deszcz wynika z analizy modeli prognostycznych, wśród nich modelu ITU-R [7], stosowanych do projektowania linii radiowych na falach centymetrowych.

Do dalszego wykorzystania otrzymanych rozkładów jest konieczne wyznaczenie zerowego poziomu sygnału. W rozkładach miesięcznych poziom zerowy tłumienia ustala się jako poziom, który w ciągu miesiąca jest przekraczany w 50% czasu, tzn. jest równy medianie rozkładu. W każdym miesiącu poziom zerowy może być różny na skali odbiornika. W przypadku rozkładów tłumienia w czasie występowania propagacji wielodrogowej za poziom zerowy przyjmuje się medianę z rozkładu tłumienia sygnału wyznaczonego dla godzin nocnych z wyłączeniem nocy, w ciągu której występuje propagacja wielodrogowa. W przypadku tłumień wywołanych przez deszcz wyznaczanie poziomu zerowego przebiega odmiennie. Przyjmuje się go jako poziom sygnału pojawiającego się przed każdym deszczem.

Rozkład roczny, zdefiniowany analogicznie do rozkładu miesięcznego wg wzoru (9), obliczano ze średnich arytmetycznych z 12 miesięcy według wzoru:

$$P(A \geq A_k) = \left(\sum_{i=1}^{12} P_i(A \geq A_k) \right) / 12, [\%] \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (10)$$

Natomiast rozkład dla najgorszego miesiąca jest obliczany, według zalecenia ITU-R [8], z rozkładów miesięcznych tłumienia sygnałów wywołanego łącznie przez deszcze i wielodrogowość fal radiowych. Za procent czasu przekraczania określonego poziomu przyjmuje się wartości procentu z tego miesiąca, w którym był on najwyższy:

$$P_k = \max(p_{k,1}, p_{k,2}, \dots, p_{k,12}), \quad (11)$$

gdzie: $p_{k,i}$ – procent czasu przekroczenia progu tłumienia A_k w i -tym miesiącu roku.

Wykorzystując rozkłady roczne i dla najgorszego miesiąca w kolejnych latach obliczano rozkład średnioroczny oraz średni najgorszy miesiąc dla danego przedziału lat.

W procedurze projektowania systemu radiokomunikacyjnego poszukuje się progu tłumienia fali dla wybranego procentu czasu. Aby móc porównywać rozkłady empiryczne z prognozowanymi, a także uwzględnić wymagania ITU-R, rozkłady zostały wyznaczone w postaci tabelki dla wybranych wartości procentów: 100; 80; 50; 30; 20; 10; 5; 3; 2; 1; 0,5; 0,3; 0,2; 0,1; 0,05; 0,03; 0,02; 0,01; 0,005; 0,003; 0,002; 0,001 i odpowiadającym im kwantylom w decybelach.

Dla zobrazowania zmienności rozkładów tłumienia w kolejnych latach porównywano kwantyle $A_{0,01}$ w rocznych rozkładach i skumulowanych w danym okresie.

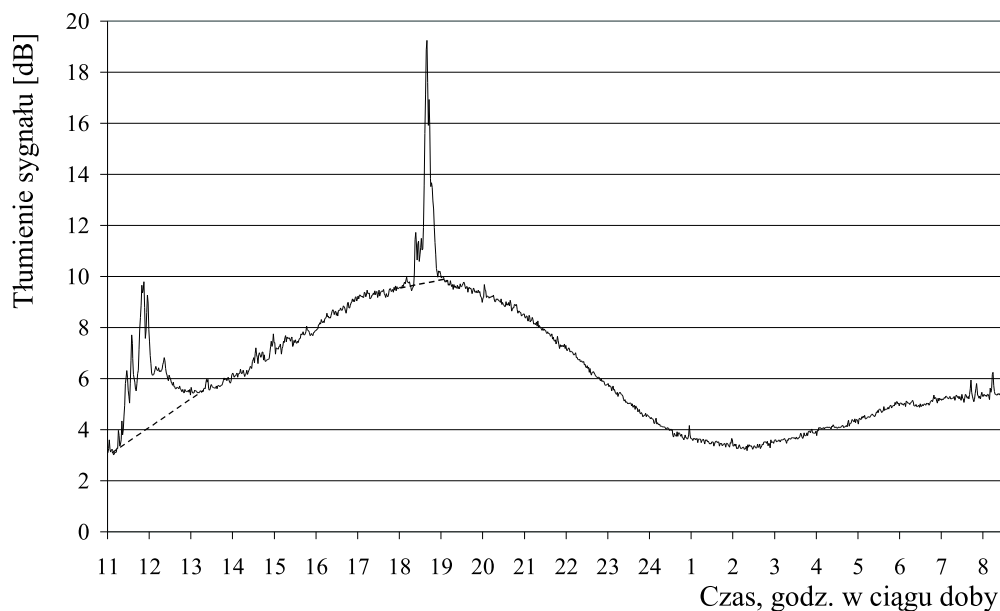
Regresyjne współczynniki Q_1 , β konwersji rozkładu średniorocznego na rozkład dla średniego najgorszego miesiąca wyznaczono wg wzoru (6), tak samo jak dla intensywności deszczu.

Dysponując rozkładami tłumienia na dwóch różniących się od siebie częstotliwościach wyznaczono współczynniki przeskalowania rozkładów tłumienia 11,5 GHz i 18,6 GHz [13, 24]. Rozpatrywano przeskalowanie wartości chwilowych tłumienia fali oraz wartości przekraczanych z jednakowym prawdopodobieństwem. Okazało się, że model ITU-R [7] jest odpowiedni do częstotliwościowego przeskalowywania rozkładów tłumienia w warunkach radioklimatu Polski [22].

Charakterystyki tłumienia fali wywołanego przez zjawiska atmosferyczne na trasie satelitarnej

Analogiczne charakterystyki wyznaczano dla sygnału satelitarnego dla tłumień spowodowanych przez deszcz. Z powodu niestabilności satelity na orbicie i braku dobrze działającego systemu automatycznego naprowadzania anteny odbiornika zmiany tłumienia odbieranego sygnału miały

charakter sinusoidalny (rys. 7). Najwięcej kłopotu sprawiało wyznaczenie poziomu zerowego tłumienia w okresach deszczowych. W tym celu określono średnie wartości próbek tłumienia przed i po wystąpieniu deszczu. Odcinki łączące wyliczone wartości tworzyły poziom zerowy dla badanego okresu.

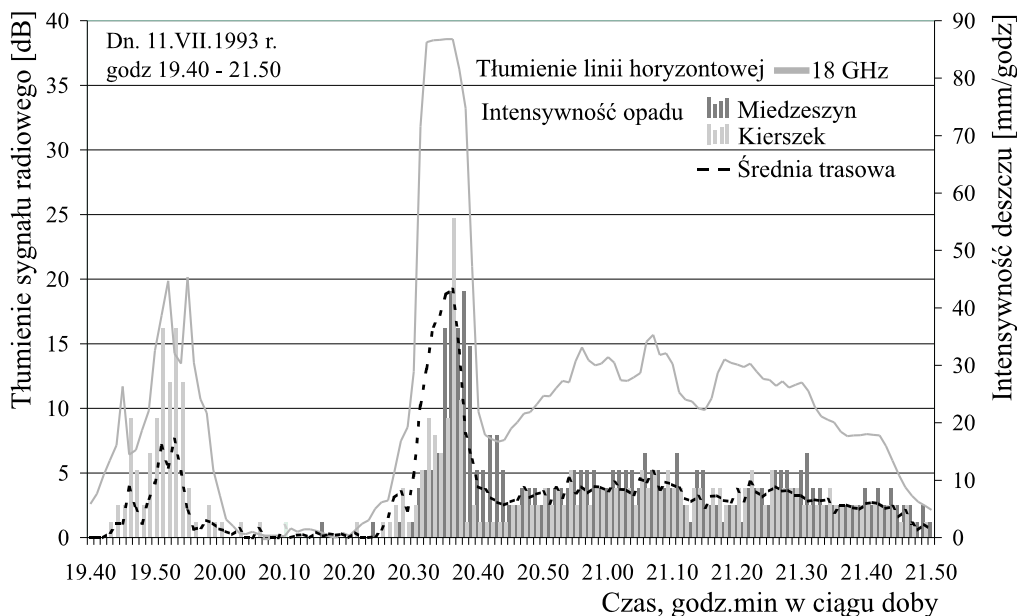


Rys. 7. Zmiany tłumienia sygnału radiowego 12,5 GHz odbieranego z satelity Olympus w dn. 26 i 27 lipca 1992 r. Przerywaną linią zaznaczono przyjęty poziom zerowy dla tłumienia powodowanego przez deszcz

Prognozowanie tłumienia fali w liniach radiowych

Przeprowadzono analizę tłumień fali na trasie horyzontowej powstałych w wyniku propagacji wielodrogowej i wywołanych przez opady deszczu. Przyczynę tłumień określano na podstawie badań charakteru przebiegu czasowego sygnału i aktualnych warunków meteorologicznych, a także porównań wyników pomiarowych tłumień i deszczów. W przypadku występowania oscylacyjnego charakteru sygnału radiowego i braku opadów w tym czasie, stwierdzono, że tłumienie było wywołane wielodrogowością sygnału. Jeśli wystąpiła korelacja przebiegów tłumień i deszczów, przesądzano, że tłumienie jest spowodowane przez deszcze. Na rys. 8 przedstawiono przebiegi tłumienia i intensywności deszczu w wybranym okresie, w którym zachodzi dość duża korelacja tych przebiegów. Z badań wynika, że wielodrogowość ma nieznaczny udział w rozkładzie tłumień w przypadku wystąpienia dużych tłumień wywołanych przez deszcze.

Sprawdzono przydatność niektórych formuł prognostycznych do warunków klimatycznych występujących w Polsce, korzystając z uzyskanych empirycznych charakterystyk: średniorocznego rozkładu tłumienia intensywności opadu oraz średniorocznego rozkładu tłumienia fali w linii radiowej 18,6 GHz, 11,5 GHz i linii satelitarnej. W przypadku linii horyzontowych wykorzystano formuły: ITU-R, Crane'a, Stutzmana-Dishmana i Misme-Fimbela [4, 7, 27, 29]. Rozkład doświadczalny tłumienia w linii sate-



Rys. 8. Tłumienie sygnału 18 GHz linii horyzontowej Piaseczno – Miedzeszyn w czasie deszczu. Uwidoczniono korelację przebiegu tłumienia z przebiegiem średniej trasowej intensywności deszczu i przebiegami intensywności w dwóch wybranych punktach trasy

litarnej był porównywany z rozkładami prognostycznymi, obliczonymi wg formuł: ITU-R, Crane'a, Stutzmana-Dishmana, Misme-Waldteuffla i Swiatogora [4, 7, 28, 29, 30]. Do określenia dokładności prognozowania wykorzystano statystyczną miarę odchylenia rozkładu prognozowanego od rozkładu empirycznego dla wybranych procentów czasu [6]. Wyniki uzyskane w IŁ [12] zaprezentowano w opracowaniu [3].

Archiwizacja danych

Dane źródłowe z pomiarów przeprowadzonych w latach 1986–90 są przechowywane jedynie w postaci zapisu analogowego na taśmach papierowych, a z lat 1991–96 dodatkowo w zarchiwizowanych plikach tekstowych na dyskietkach. Wszystkie wyliczone charakterystyki w postaci danych liczbowych i wykresów są gromadzone na dyskietkach w zarchiwizowanych plikach arkuszy kalkulacyjnych typu „wq1” (Quatro Pro). Niektóre dane, jak również wyniki obliczeń i analiz, zamieszczano w sprawozdaniach rocznych, w *Pracach IŁ* [12–14, 16–18, 20, 22, 24, 26], a od 1992 r. w publikacjach europejskiego programu COST 235 [3]. Natomiast informacje dotyczące prac prowadzonych podczas programu INREKOSMOS opublikowano w artykułach [1, 2, 15, 23, 30].

Wnioski

Prowadzone na poligonie doświadczalnym w Instytucie Łączności 15-letnie badania propagacyjne dostarczyły materiału pomiarowego, umożliwiającego przedstawienie wiarygodnych charakterystyk radioklimatycznych rejonu Polski centralnej. Dane te zostały zarchiwizowane i mogą być udostępniane innym ośrodkom badawczym jako forma wymiany doświadczeń naukowo-eksperymentalnych.

Przykładem może być współpraca Instytutu Łączności z Politechniką Wrocławską przy realizacji grantu.

Zgromadzony materiał pomiarowy, np. wyniki pomiarów sygnałów radiowych, może być wykorzystywany do sporządzania innych charakterystyk, choćby charakterystyki szybkości narastania tłumienia [5], która może być użyteczna przy projektowaniu systemów radiowych z adaptacyjną regulacją poziomu mocy.

W wyniku prowadzonych eksperymentów opracowano i sprawdzono następujące metody badawcze:

- konwersji średnich 1-minutowych intensywności deszczu na średnie 5-, 10-, 20- i 60-minutowe, dzięki czemu można było wyznaczyć współczynniki konwersji rozkładów wartości średnich wielominutowych (5–60) na rozkłady wartości średnich 1-minutowych;
- konwersji rozkładów tłumienia z jednej na inne częstotliwości;
- algorytm obliczenia rozkładu intensywności deszczu poniżej progu $R = 2,8$ mm/h.

Wykorzystano ok. 30-letni materiał pomiarowy, uzyskany przez IMGW z deszczomierzy Hellmana, do konwersji na znormalizowane rozkłady wartości średnich 1-minutowych. Rozkłady te służą następnie do prognozowania tłumień na terenie całego kraju, z zastosowaniem wypracowanych procedur [25].

Udział Instytutu Łączności w pracach Międzynarodowego Ośrodka Łączności Satelitarnej w Dubnej w czasie programu INTERKOSMOS i przydzielone na tę działalność fundusze umożliwiły opracowanie oraz uruchomienie w IŁ, a następnie zainstalowanie w Dubnej, polskiej aparatury do pomiaru intensywności deszczu. W ten sposób zdobyto doświadczenia dotyczące zarówno budowy tego systemu, jak i innych systemów eksperymentalnych, działających na terenie tamtego poligonu. Ponadto naukowcy z IŁ, pracujący w Dubnej, mieli dostęp do wszystkich wyników badań oraz nawiązali kontakty z pracownikami innych krajów, co zaowocowało późniejszą współpracą, już poza programem INTERKOSMOS.

Prowadzenie badań w dziedzinie propagacji fal radiowych w Polsce i na terenie innych krajów przyczyniło się do zaproszenia przedstawicieli IŁ do udziału w pracach organizacji OPEX, działającej w ESA, a następnie do udziału w programie COST 235. Wyniki prac propagacyjnych, dotyczące między innymi porównania formuł prognostycznych ITU-R, Crane'a, Stutzmana-Dishmana i innych z rozkładami doświadczalnymi otrzymanymi w IŁ, zostały zamieszczone w dokumencie COST 235 [3].

Wyniki badań radioklimatycznych prowadzonych w Instytucie Łączności wskazują, że należy zmienić przyjętą przez ITU-R strefę klimatyczną H na strefę K w rejonie Polski południowej. Dlatego też obecnie przy projektowaniu linii radiowych w tym rejonie trzeba liczyć się z wyższymi opadami właściwymi dla strefy K.

Bibliografia

- [1] Berta S., Kawecki A., Swiatogor W.: *System pomiaru opadów atmosferycznych w Międzynarodowym Ośrodku Doświadczalnym Łączności Satelitarnej – Dubna*. Przegląd Telekom., 1986, nr 12, s. 351–355
- [2] Bykow W.L., Kawecki A., Skonieczny W.: *Międzynarodowy opytny uczestok eksperymentalnej sieci sputnikowej swiazi „Dubna”*. Elektroswiaz, 1983, no. 10
- [3] COST 235: *Radiowave propagation effects on next generation fixed-services terrestrial tele-communications systems*. Final Report. Part 3.3: *The effects of hydrometeors*. Management Committee, 1996

- [4] Crane R.K.: *Prediction of attenuation by rain*. IEEE Trans. Com., vol. 28, no. 9, 1980
- [5] Feil J., Ippolito L., Helmecken H., Mayer C., Horaan S., Henning R.: *Fade slope analysis for Alaska, Florida and New Mexico ACTS propagation data at 20 and 27.5 GHz*. Proc. IEEE, June 1997
- [6] ITU-R Rec. 311-9: *Acquisition, presentation and analysis of data in studies of tropospheric propagation*. 1999
- [7] ITU-R Rec. 530-8: *Propagation data and prediction methods required for design of terrestrial line-of-sight systems*. 1999
- [8] ITU-R Rec. 581-2: *The concept of „Worst month”*. 1990
- [9] ITU-R Rec. 837-1: *Characteristics of precipitation for propagation modelling*. 1994
- [10] ITU-R Rec. 841-1: *Conversion of annual statistics to worst - month statistics*. 1999
- [11] ITU-R Rep. 563-3: *Radiometeorological Data*. 1986
- [12] Kawecki A.: *Correlation of rain rate with microwaves attenuation*. Prace IŁ, 1997, nr 108, s. 73–85
- [13] Kawecki A.: *Correlation of rain rate with wave attenuation at 11.5 and 18.6 GHz and frequency scaling factor during rain passage*. In: Proc. 7th URSI Comm. F, „Wave propagation and remote sensing”. Ahmendabad, Nov. 20–24, 1995
- [14] Kawecki A.: *Derivation of conversion factors from 1-minute rain rate distribution transformation into 5-, 10-, and 20-minutes rain rate distributions*. Prace IŁ, 1995, nr 104, s. 49-66
- [15] Kawecki A.: „Dubna” – Międzynarodowy Ośrodek Badań Systemów Łączności Satelitarnej. Przegląd Telekom., 1985, nr 10, s. 286–289
- [16] Kawecki A.: *Finalne charakterystyki propagacji mikrofal na trasie doświadczalnej Instytutu Łączności*. Prace IŁ, 1997, nr 109, s. 33–81
- [17] Kawecki A.: *One-hour rainfall application for derivation of 1-minute rain rate distribution*. Prace IŁ, 1996, nr 107, s. 57–73
- [18] Kawecki A.: *Przewidywane tłumienia fal przez deszcz w liniach radiowych na obszarze Polski*. Prace IŁ, 1984, nr 90, s. 63–80
- [19] Kawecki A.: *Refrakcja fal na podstawie meteorologicznych sondowań atmosfery*. Prace IŁ, 1986, nr 93, s. 61–91
- [20] Kawecki A.: *Some aspects of attenuation due to rain prediction and rain rate correlation with attenuation*. Prace IŁ, 1995, nr 104, s. 67–93
- [21] Kawecki A.: *Some characteristics of 0°C isotherm height in Warsaw region*. In: Proc. 17th OPEX Conf., Stockholm – Helsinki, May 1992
- [22] Kawecki A.: *Wave propagation attenuation characteristics in presence of rain on 15.4 km path near Warsaw at 11.5 and 18.6 GHz*. Prace IŁ, 1997, nr 108, s. 87–111
- [23] Kawecki A., Bykow W.L., Skonieczny W.: *Kompleks dla meteorologicznych izmieriений na międzynarodnom opytnom uczastkie Dubna – Interkosmos*. Elektroswiaz, 1987, no. 5
- [24] Kawecki A., Jambaljavyn N.: *Frequency scaling model of wave attenuation due to rain*. Prace IŁ, 1993, nr 101, s. 85–106
- [25] Kawecki A., Maciążek E.W.: *Możliwość uzyskania regionalnych charakterystyk intensywności deszczu do prognoz tłumienia mikrofal na obszarze Polski*. Prace IŁ, 1998, nr 110, s. 103–131

- [26] Kawecki A., Wielowieyska E.: *Przetworzenie rozkładu średniej 1-minutowej intensywności opadu na rozkłady średniej 5-, 10- i 20-minutowej intensywności metodą uśredniania „w ruchomym oknie”*. Prace IŁ, 1992, nr 99, s. 97–117
- [27] Misme P., Fimbel J.: *Determination theorique et experimentale del affaiblissement par la pluie sur un trajet radioelectrique*. Ann. Telecom., vol. 30, 1975
- [28] Misme P., Waldteufel P.: *Affaiblissements calculés pour liaisons Terre-satellite en France*. Ann. Telecom., vol. 37, no. 7–8, 1982
- [29] Stutzman W.L., Dishman W.K.: *A simple model for estimation of rain induced attenuation along Earth-space at millimetre wavelengths*. Radio Sci., vol. 17, no. 6, 1982
- [30] Swiatogor W.W.: *O metodzie prognozowania zatuchania sygnałów na liniach IZS – Ziemia*. In: Naucznyj simpozium po temie nr 1 – Interkosmos. Drezden, Feb. 1985
- [31] Wielowieyska E., Kocimowski B., Kawecki A.: *System automatycznej rejestracji i przetwarzania danych radiometeorologicznych dla badań propagacji fal radiowych w zakresach powyżej 10 GHz*. Prace IŁ, 1986, nr 93, s. 93–110

Ewa Wielowieyska



Ewa Wielowieyska (1952) – absolwentka Wydziału Matematyki i Mechaniki Uniwersytetu Warszawskiego (1977); pracownik Zakładu Metod i Analiz Matematycznych AWF w Warszawie (1978–1982), długoletni pracownik Instytutu Łączności w Warszawie (od 1982); zainteresowania: oprogramowanie systemu rejestracji i przetwarzania danych radiometeorologicznych na doświadczalnych liniach radiowych oraz oprogramowanie dotyczące analiz propagacyjno-sieciowych w zakresie fal średnich i długich.
e-mail: E.Wielowieyska@itl.waw.pl

Wojciech Skonieczny



Mgr inż. Wojciech Skonieczny (1935) – absolwent Wydziału Łączności Politechniki Warszawskiej (1961); długoletni pracownik naukowy Instytutu Łączności w Warszawie (od 1955); zainteresowania naukowe: badania jonosferyczne, zagadnienia propagacji mikrofal i wpływu parametrów meteorologicznych na tę propagację, synchronizacja urządzeń transmisyjnych i centralowych (szczególnie w systemach SDH), technika sieci ATM.
e-mail: W.Skonieczny@itl.waw.pl