

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA-MIEDZESZYN

BIULETYN

INFORMACYJNY

9-10 (262-263)

1988

BIULETYN INFORMACYJNY

ROK 28

WARSZAWA 1988

NR 9-10/262-263/

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
Branżowy Ośrodek
Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Biuletynu Informatycznego

Redaktor Naczelny - dr inż. Krystyn Plewko
Z-ca Redaktora Naczelnego - doc. dr inż. Stanisław Sołta

Redaktorzy działów:

doc. dr inż. Alina Karwowska-Lamparska,
mgr inż. Mirosław Żurawski

Adres Redakcji:

Instytut Łączności
Branżowy Ośrodek
Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej
Warszawa-Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

ISSN 0209-1046

Redaktor: mgr Krystyna Juszkiewicz
Montaż tekstu: techn. Grażyna Woźnica

Dział Wydawniczy Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 570. Wpłynęło do
Działu Wydawniczego 1988.10.19.
Druk ukończono w lutym 1988 r.

Arnold Kawecki

KOMPLEKSOWE BADANIA PROPAGACJI FAL
W LINIACH SATELITARNYCH I HORYZONTOWYCH

/Przegląd podstawowych zagadnień
i niektóre wyniki badań krajowych/

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wprowadzenie	1
2. Związki między parametrami fali i opadu	3
2.1. Tłumienie jednostkowe	3
2.2. Jednostkowe przesunięcie fazy	5
2.3. Zależność tłumienia i przesunięcia fazy od odległości	5
2.4. Obliczanie współczynników a, b dla wybra- nych częstotliwości	7
3. Kompleks pomiarowy do badań propagacji fal w liniach satelitarnych i horyzontowych	8
4. Modelowanie tłumienia fali w liniach radiowych	11
4.1. Modele opadów	11
4.2. Modelowanie tłumienia w liniach radiowych na trasie doświadczalnej Miedzeszyn- -Piaseczno	14
4.3. Przykłady modelowania	16
5. Przewidywanie tłumienia fali w linii radiowej	19
5.1. Algorytm Assis-Einlclfta	20
5.2. Algorytm Misme-Fimbela	21
5.3. Algorytm Crane'a	22
5.4. Algorytm eksponenoidalny	24
5.5. Skalowanie częstotliwościowe rozkładu tłumienia	27
5.6. Skalowanie rozkładu tłumienia długością trasy	29

	Str.
5.7. Ocena formuły prognostycznej	29
5.8. Możliwości prognozowania tłumienia fal przez deszcze	30
5.9. Przykład wykorzystania prognoz tłumienia fali do wyznaczania długości skoku cyfrowej linii radiowej	33
5.10. Przykład zaników wielodrogowych na trasie doświadczalnej	35
6. Opracowanie danych statystycznych	39
6.1. Prezentacja empirycznego rozkładu intensywności opadu rozkładem logarytmiczno-normalnym	39
6.2. Przekształcanie rozkładów ze względu na stałą opadu ozujnika	42
7. Zmiana polaryzacji fali przez niejednorodności atmosferyczne	44
7.1. Depolaryzacja fali przez elementy opadu	44
7.2. Określenia i podstawy teoretyczne prognozowania	45
7.3. Prognozowanie XPD oraz XPI wg dokumentów CCIR	48
Wykaz literatury	50

KOMPLEKSOWE BADANIA PROPAGACJI FAL
W LINIACH SATELITARNYCH I HORYZONTOWYCH

/Przegląd podstawowych zagadnień
i niektóre wyniki badań krajowych/

1. WPROWADZENIE

Od współczesnej wielokanałowej linii radiowej wymaga się wysokiej niezawodności pracy. W przypadku linii satelitarnej niezawodność ta zależy nie tylko od jakości aparatury, lecz także od warunków propagacji fal w atmosferze, a w przypadku linii horyzontowych - także od charakterystyki terenu. Obecnie niezawodność aparatury jest wysoka, staje się przeto istotną niezawodnością propagacyjną. Wobec tego ze perspektywicznego, a nawet aktualnie uruchamiane, linie satelitarne wykorzystują pasma częstotliwości powyżej 10 GHz /12; 14; 20; 30 GHz/, zaś przewidywana w kraju rozbudowa sieci telekomunikacyjnej będzie opierała się na horyzontowych liniach radiowych w pasmach 11 i 13 GHz, w niniejszym artykule zwrócono szczególną uwagę na wpływ opadów atmosferycznych na propagację fal w tych zakresach częstotliwości. Elementy opadu o rozmiarach dochodzących do kilku milimetrów są porównywalne z długością fali. Pochlaniają i rozpraszają one energię fali, a także wywołują powstawanie ortogonalnej składowej fali. W pasmach częstotliwości 11-13 GHz istotnym czynnikiem obniżającym niezawodność propagacyjną linii radiowej są intensywne opady deszczu. Na wyższych częstotliwościach również grad, śnieg i mgła wywołują głębokie i długotrwałe zaniki odbieranego sygnału. W przypadku linii horyzontowych istotne jest także występowanie warstw powietrza o wysokiej /bezwzględnie/ wartości gradientu wskaźnika refrakcji na wysokościach w obrębie I strefy Fresnela lub wyżej. Mogą one

wywołać interferencję fali bezpośredniej i odbitej od takiej warstwy, co prowadzi do krótkotrwałych, wielokrotnie powtarzających się głębokich zaników. Występowanie silnej sub- lub superrefrakcji w I strefie Fresnela wywołuje nieraz głębokie i długotrwałe zaniki sygnału.

Badaniom tej problematyki poświęcono już wiele wysiłku. Są dokumenty CCIiR, które pozwalają określić procent T roku i najgorszego miesiąca, w którym na terenie Polski intensywność opadu przekroczy określony próg [10]. Pozwala to oszacować próg tłumienia przekraczany w tym samym procencie czasu w linii radiowej na terenie kraju. Jednak wiadomo, że w zależności od regionalnego klimatu na obszarze Polski charakterystyki opadowe są bardzo zróżnicowane. Przeprowadzono specjalne badania oparte na danych z 10-letniego okresu ciągłej rejestracji opadów w 114 punktach na terenie Polski [20, 21, 24]. Z badań tych wynika, że w najgorszym miesiącu intensywność opadu 90 mm/godz. jest przekraczana w ciągu ok. 1,5 min. /obszar od Szczecina do Gdańska, a na południe do Gniezna i Bydgoszczy/, zaś na południu kraju - w ciągu 6 min. /obszar od Opola, Częstochowy, Buska-Zdroju, Tarnowa, Sanoka do południowej granicy oraz trójkąt Wałbrzych, Kłodzko, Wrocław/. Na tej podstawie można szacować, że w przypadku linii radiowej o długości 15 km, pracującej na częstotliwości 11 GHz, zlokalizowanej na północy kraju, próg tłumienia o wartości 30 dB byłby przekraczany w ciągu 1,5 minuty, zaś na południu - w ciągu 6 min. w jednym z miesięcy letnich.

Doświadczenia wykazały, że na linii horyzontowej 18,6 GHz o długości 15 km w rejonie Warszawy /region o przeciętnej charakterystyce opadowej/ silne burze na trasie fali spowodowały 3-krotnie, w ciągu dwóch letnich sezonów, tłumienia przekraczające 30 dB w ciągu 10-35 minut. Odpowiadałoby to okresem czasu 4-5-krotnie krótszym w odniesieniu do linii 11 GHz.

Z powyższych ocen można wyciągnąć wnioski, dotyczące przewidzianych do budowy na terenie całego kraju linii 11 GHz. Jeśli uznać, że dopuszcza się przekroczenie tłumienia o war-

tości 30 dB w ciągu 2 minut w najgorszym miesiącu, to długość poszczególnych odcinków /skoków/ będzie zawierać się w przedziale od 25 km na północy do 15 km na południu kraju, gdyby nie uwzględnić innego rodzaju ograniczających czynników. Optymalizacja długości skoku w zależności od charakterystyki opadowej pozwoli zaoszczędzić pewną liczbę stacji przekaźnikowych w porównaniu z rozwiązaniem nieoptymalnym.

Ilustracją błędów popełnionych przy projektowaniu linii radiowych są wyniki badań sześciu odcinków linii 6 GHz oparte na 5-letnich ciągłych pomiarach tych linii. Zaniki sygnału w tym pasmie częstotliwości głównie zależą od zmienności refrakcji atmosfery. Wybrane do badań odcinki linii miały długości od 37 km do 69 km [19, 22]. Okazało się, że suma czasów przerw transmisji w linii najkrótszej była równa 30 s, podczas gdy w linii najdłuższej - 45 minut w ciągu roku /głównie w okresie od maja do września/. Warto zauważyć, że jeśli radioklimat wzdłuż trasy fali jest taki sam, zaś odcinki linii radiowych są równe, to czasy przerw w odcinkach powinny być jednakowe, aby linia jako całość pracowała optymalnie. W przeciwnym razie niezawodność całej linii będzie zależała głównie od najgorszego odcinka. W opisanym przypadku długości skrajnych odcinków mają się do siebie jak 70/37 /a więc ok. 2/. Ponieważ dopuszczalne czasy przerw są proporcjonalne do długości odcinka, więc miarą nieprawidłowości zaprojektowania tych odcinków linii radiowych jest iloraz czasów przerw w odcinkach o skrajnych długościach /45 min./0,5 min./ = 90 odniesiony do ilorazu długości odcinków /równego 2/. W wyniku otrzymuje się, zamiast pożądanej wartości równej ok. 1, liczbę 45-krotnie większą.

2. ZWIĄZKI MIĘDZY PARAMETRAMI FALI I OPADU

2.1. Tłumienie jednostkowe

Tłumienie jednostkowe na trasie jest określone zależnością:

$$\alpha = aR^b \quad [dB/km]$$

gdzie R - intensywność opadu w mm/godz., zaś a, b - współczynniki regresji, uzależnione od częstotliwości i polaryzacji fal, od rozkładu średnic kropel opadu, od ich kształtu i temperatury. Na podstawie licznych badań deszczów i tiumienia fal oraz analiz teoretycznych określono wartości współczynników a i b , co przedstawiają tablice 1 i 2, odnoszące się do temperatur 0°C i 20°C [25].

Tablica 1

Współczynniki regresji dla 0°C

f [GHz]	Polaryzacja pozioma		Polaryzacja pionowa	
	a	b	a	b
10	0,01234	1,194	0,011	1,174
15	0,03434	1,147	0,031	1,115
20	0,06772	1,119	0,061	1,084
25	0,1159	1,081	0,1028	1,054
30	0,1811	1,035	0,159	1,018

Tablica 2

Współczynniki regresji dla 20°C

f [GHz]	Polaryzacja pozioma		Polaryzacja pionowa		Polaryzacja kołowa	
	a	b	a	b	a	b
10	0,010	1,276	0,0089	1,284	0,00946	1,273
15	0,0367	1,154	0,0335	1,128	0,035	1,143
20	0,075	1,099	0,069	1,065	0,072	1,083
25	0,1244	1,061	0,113	1,030	0,119	1,044
30	0,187	1,020	0,167	1,00	0,178	1,007

Podane w tablicach 1 i 2 wartości autor [25] otrzymał z obliczeń, w których przyjęł następujące założenia:

- deszcz ma rozkład średnic kropel wg Lawsa-Parsonsa,
- prędkość końcowa kropel jest określona wg Gunna-Kinzera,

- eliptyczność kropeł, w zależności od średnicy przy zachowaniu stałej ich objętości, jest określona wg Oguchi'ego.

2.2. Jednostkowe przesunięcie fazy

Deszcz na trasie fali powoduje przesunięcie fazy tej fali. Jeśli intensywność deszczu jest stała, to przesunięcie fazy φ na jednostkę odległości wyraża związek korelacyjny w postaci:

$$\varphi = hR^k \quad [\text{st/km}]$$

Wartości współczynników h , k przedstawiono w tabelicy 3.

Tablica 3

Wartości współczynników h i k dla 0°C

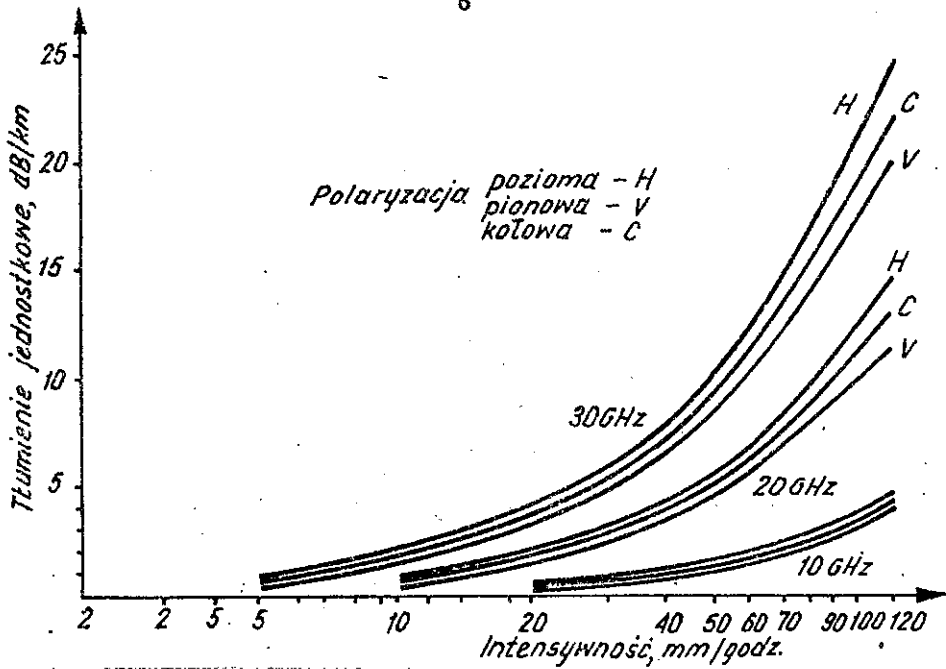
f [GHz]	Polaryzacja pozioma		Polaryzacja pionowa	
	h	k	h	k
10	1,212	0,896	1,147	0,8763
15	1,858	0,876	1,757	0,8556
20	2,532	0,848	2,372	0,8356
25	3,243	0,808	3,01	0,8067
30	3,94	0,764	3,644	0,7722

Zależność tłumienia jednostkowego od intensywności opadu pokazuje rys. 1, zaś przesunięcia fazy na jednostkę długości od intensywności opadu - rys. 2.

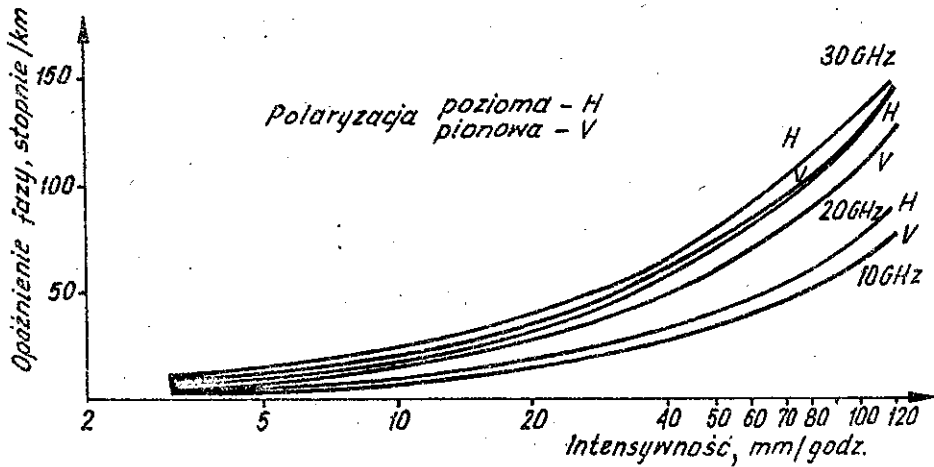
2.3. Zależność tłumienia i przesunięcia fazy od odległości

Ponieważ na ogół na trasie fali $R \neq \text{const.}$, wobec tego tłumienie A na odcinku L jest równe:

$$A = a \int_0^L R^b(l) dl \quad [\text{dB}]$$



Rys. 1. Tłumienie jednostkowe fali w pasmach 10, 20 i 30 GHz w zależności od intensywności opadu na trasie



Rys. 2. Jednostkowe opóźnienie fazowe fali w pasmach 10, 20 i 30 GHz w zależności od intensywności opadu na trasie

zaś przesunięcie fazy:

$$\phi = h \int_0^L R^k(l) dl \quad [\text{stopni}].$$

Zazwyczaj zależność $R(l)$ nie jest znana w konkretnych sytuacjach. Znana jest natomiast intensywność punktowa R_p . Wtedy przyjmuje się pojęcie efektywnej długości trasy L_{eff} , która przy wysokich intensywnościach R jest krótsza niż rzeczywista długość trasy /jeśli trasa jest dłuższa od 10 km/, bowiem opad o wysokiej intensywności pokrywa jedynie część tej trasy. Długość efektywną trasy określa się doświadczalnie. Jeśli jest znana wartość L_{eff} dla danej intensywności punktowej R_p , to tłumienie $A = aR^b L_{\text{eff}}$.

2.4. Obliczanie współczynników a, b dla wybranych częstotliwości

Wartości a, b dla częstotliwości różnych od podanych w tabelicy 1 i 2 można obliczyć, przyjmując, że pomiędzy częstotliwością górną f_g i najbliższą dolną f_d współczynnik b zmienia się liniowo, zaś a - według zależności potęgowej:

$$a = x(\log f)^y$$

Tak więc znając b_g i b_d z tabelicy 1 lub 2 mamy:

$$b = \frac{b_g - b_d}{f_g - f_d} (f - f_d) + b_d$$

Z kolei, znając wartości a_g i a_d możemy wyznaczyć a dla częstotliwości f , przy czym jeśli $f = 10$ GHz, to $x = a_{10}$, zaś:

$$y = \frac{\log \frac{a_g}{a_{10}}}{\log(\log f_g)}$$

Można stwierdzić, że wykładnik y zmienia się nieco w zależności od przedziału częstotliwości. I tak:

w temperaturze 20°C dla przedziałów:

$$10 \div 12 \text{ GHz} \quad y = 8,16;$$

$$10 \div 20 \text{ GHz} \quad y = 7,64;$$

$$10 \div 30 \text{ GHz} \quad y = 7,52;$$

znów w temperaturze 0°C dla przedziałów:

$$10 \div 15 \text{ GHz} \quad y = 6,31;$$

$$10 \div 20 \text{ GHz} \quad y = 6,48;$$

$$10 \div 30 \text{ GHz} \quad y = 6,886.$$

Wskazane jest więc obliczanie wartości w przedziale pomiędzy najbliższymi częstotliwościami.

Wg autorów publikacji [12] dla jakościowych ocen można przyjmować przybliżone wartości a, b dla częstotliwości 11, 14 i 18 GHz równe odpowiednio 0,014; 0,03; 0,06 oraz 1,22; 1,15; 1,11. Bardzo użyteczne są również zależności:

$$a(f) = 4,1 f^{2,42} 10^{-5},$$

$$b(f) = 1,41 f^{-0,0779}$$

/podane w [31, 35] pozwalające obliczyć te współczynniki dla każdej częstotliwości/.

3. KOMPLEKS POMIAROWY DO BADAŃ PROPAGACJI FAL W LINIACH SATELITARNYCH I HORYZONTOWYCH

Podstawowymi członami kompleksu pomiarowego są dwie horyzontowe linie radiowe pracujące w pasmach częstotliwości 11,5 i 18,6 GHz, linia satelitarna w pasmie 11,5 GHz oraz czujniki intensywności opadu rozmieszczone wzdłuż linii horyzontowych przebiegających pod linią satelitarną. Dane pomiarowe zbiera komputerowy system rejestracji i przetwarzania danych [23]. W Instytucie Łączności w Warszawie-Miedzeszynie /na dachu budynku/ umieszczone urządzenia odbiorcze linii radiowych, kilka czujników intensywności opadu, czujniki prędkości i kierunku wiatru, temperatury i wilgotności powietrza, przy czym wyjścia odbiorników i czujników podłączono do komputera MERA-400 poprzez urządzenie INTELDIGIT PI.

Zespoły nadawcze linii horyzontowych znajdują się w Piasecz-
 nio w odległości 15,4 km od Instytutu. Anteny wraz z odbior-
 nikami zainstalowane na dachu 6-piętrowego budynku zakładów
 Lamina na wysokości 20 m nad terenem. Umieszczono tam także
 autonomiczny czujnik deszczu, który ma własny rejestrator
 intensywności opadu i rejestrator czasu oparty na zegarze
 kwarcowym. Na trasie między Piasecznem i Miedzeszynem /gdzie
 znajduje się Instytut Łączności/ są zainstalowane jeszcze
 3 autonomiczne czujniki deszczu /w Kierszku, Powsinie i Ju-
 lianowie/.

Niżej podano techniczne parametry urządzeń.

a. Linie radiowe horyzontowe

Urządzenia nadawcze:

moc nadajników - 100 mW, zysk anten - 37 dB;

polaryzacja fali - horyzontalna.

Urządzenia odbiorcze:

fale odbierane są odbijane w dół /przez anteny peryskopo-
 we zawieszane na maszcie na wysokościach 30 i 24 m nad
 terenem/ w kierunku anten odbiorczych ustawionych na da-
 chu;

zysk anten odbiorczych - 37 dB;

odbiornik fali podstawowej - dynamika 60 dB;

odbiornik fali ortogonalnej - dynamika 30 dB.

b. Linia satelitarna:

kąt elewacji - 23° ;

fala ciągła z satelity Luoz /W, 14° /;

moc nadajnika transpondera - 15 W, EIRP - 37 dBW;

zakres dynamiki odbiornika - 20 dB.

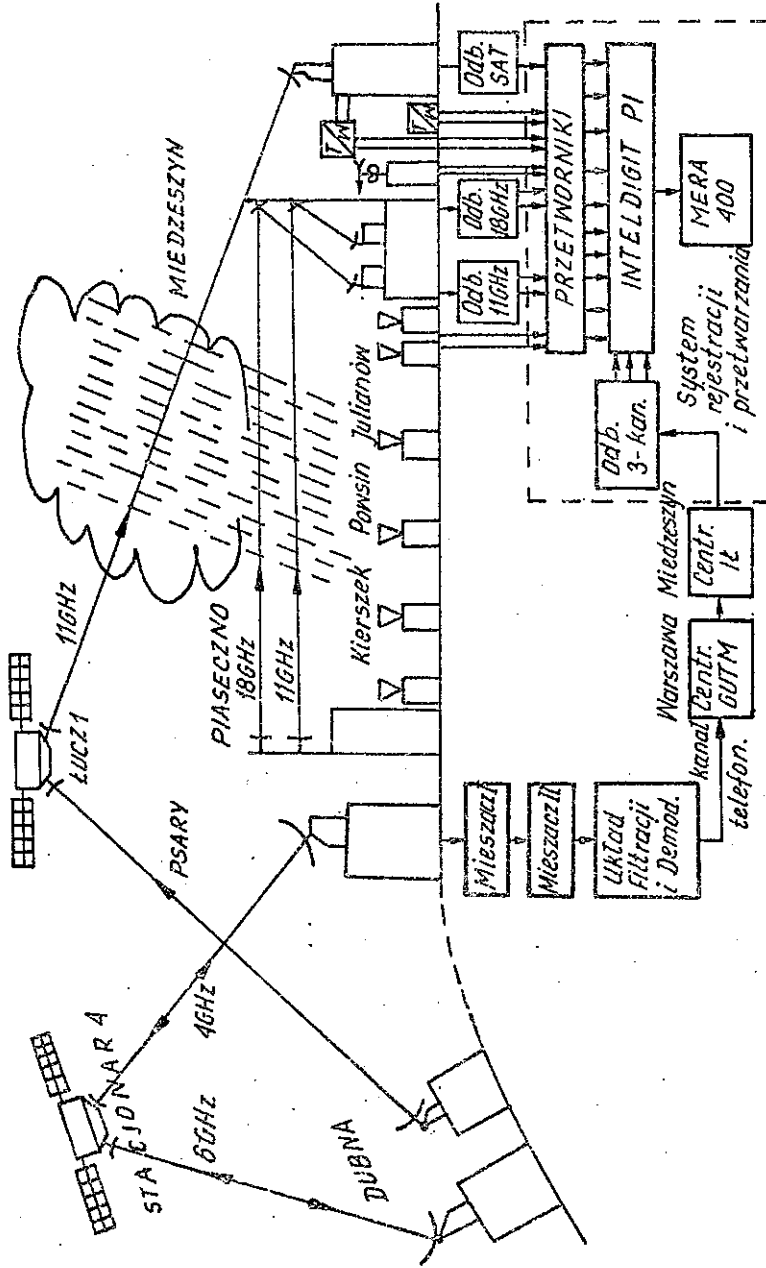
c. Autonomiczne czujniki intensywności opadu:

pomiar średniej 1-minutowej intensywności;

bezwzględny błąd pomiaru czasu - 30 s.

d. Czujniki parametrów powietrza:

czujniki platynowe temperatury i czujniki wilgotności z
 chlorkiem litu znajdują się na wysokości 2 m i 27 m nad
 gruntem.



Rys. 3. Kompleks pomiarowy Ośrodka Badań Propagacji Mikrofal

Pewnym utrudnieniem badań propagacji fal jest przeszkoda na trasie linii radiowych na odcinku o długości 3 km w odległości 5 km od Piaseczna w postaci lasu Kabackiego. Wierzchołki drzew wnikaają w I strefę Fresnela na głębokość uzależnioną od wahań gradientu refrakcji w warstwie przygruntowej.

Schemat kompleksu pomiarowego przedstawiono na rys. 3.

4. MODELOWANIE TLUMIENIA FALI W LINIACH RADIOWYCH

Modelowanie tłumienia fali w liniach radiowych opiera się w dużym stopniu na modelach opadów. Modeli tych jest wiele, jednak dla naszych celów niezbędne jest przedstawienie dwóch najprostszych.

4.1. Modele opadów

Opady ciągłe z chmur warstwowych charakteryzują się niską intensywnością $R < 5$ mm/godz./, dużym obszarem występowania /setki km/ i długotrwałością występowania /godziny/. Opady mają postać śniegu powyżej izotermy 0°C i deszczu - poniżej tej izotermy. Modelem tego opadu jest stała intensywność $R < 5$ mm/godz. i pułap deszczu na wysokości izotermy 0°C .

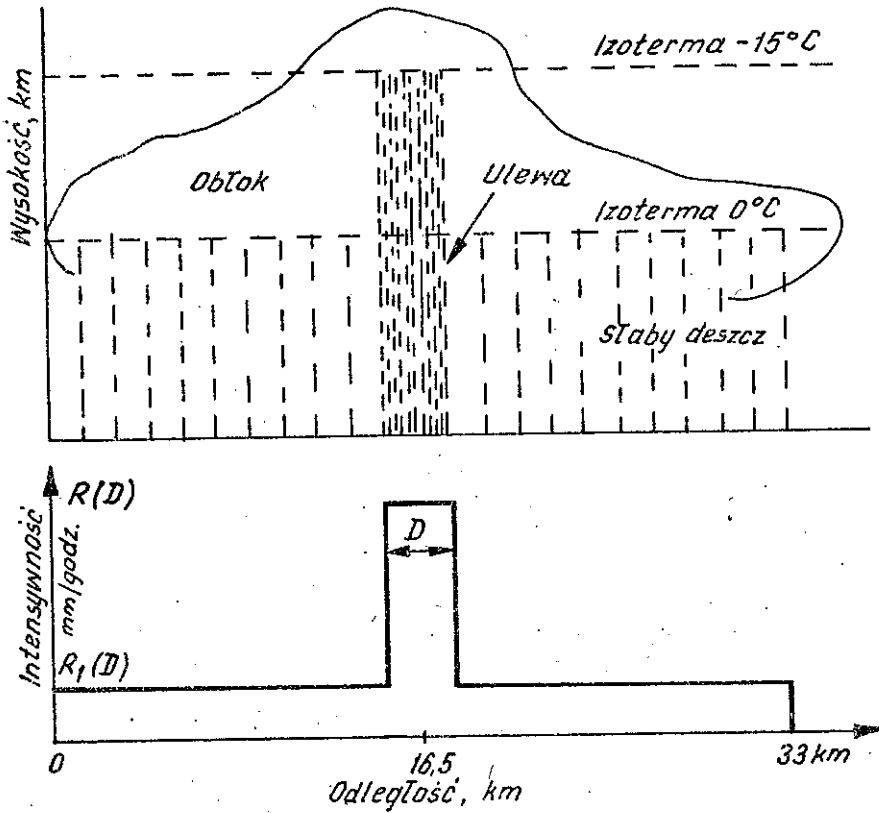
Opady z chmur konwekcyjnych /Cb/ są krótkotrwałe /minuty/, lecz intensywne /przekraczają nieraz intensywność 100 mm/godz./. Krople deszczu /w postaci ciekłej/ wznoszą się prawie do wysokości izotermy -15°C . Intensywny opad występuje w postaci kolumny o średnicy 1-2 km sięgającej do wysokości kilometra, nawet 2,5 kilometra powyżej izotermy 0°C . Ta ostatnia wysokość odpowiada wysokości izotermy -15°C . Średnica kolumny opadu D wg [23] jest równa:

$$D(R) = 2,2 \left(\frac{100}{R} \right)^{0.4} \quad /1/$$

Wokół kolumny o wysokiej intensywności R rozciąga się obszar o średnicy $L_1 = 33$ km, w którym intensywność ta jest znacznie niższa i równa:

$$R_1(R) = 10 [1 - \exp(-0,0105 R)] \quad /2/$$

Opisany model przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Model opadu przelotnego

Wart też jest zainteresowania model opadu, który nie nadaje się do rozpatrywania pojedynczych przypadków opadu, lecz jest odpowiedni do analiz o charakterze statystycznym [35]. W modelu tym bierze się pod uwagę intensywność punktową R_p i statystyczny profil intensywności wzdłuż trasy $R_p(L)$:

$$R(L) = R_p \quad \text{dla } R_p \leq 10 \text{ mm/godz.} \quad /3a/$$

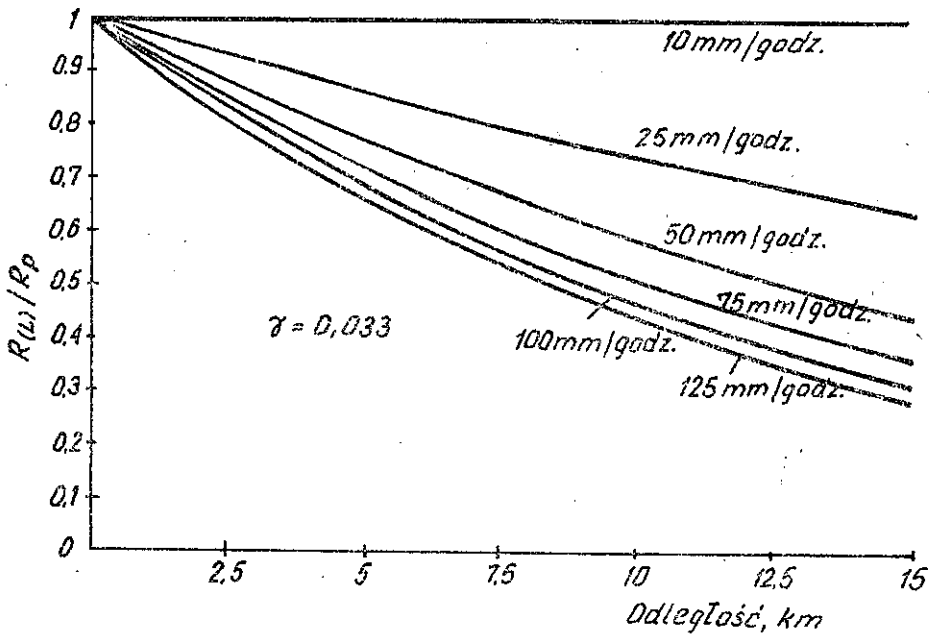
$$R(L) = R_p \exp\left(-\gamma L \ln \frac{R_p}{10}\right) \quad \text{dla } R_p > 10 \text{ mm/godz.} \quad /3b/$$

gdzie γ - wykładnik uzależniony od charakterystyki opadów, równy w przybliżeniu $1/22$ (na podstawie pomiaru opadów w USA - N. Jersey, Illinois i na Florydzie oraz RFN i W. Brytanii). Wysokość kolumny opadów wzdłuż tego profilu wynosi:

$$H_{\text{eff}} = H_0 \quad \text{dla } R_p \leq 10 \text{ mm/godz.}$$

$$H_{\text{eff}} = H_0 + \log \frac{R_p}{10} \quad \text{dla } R_p > 10 \text{ mm/godz.}$$

Statystyczny model opadu pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Statystyczny model opadu do celów prognozowania tłumienia fal w liniach radiowych

4.2. Modelowanie tłumienia w liniach radiowych na trasie doświadczalnej Miedzeszyn-Piaseczno

Kompleks pomiarowy obejmuje 5 czujników intensywności opadu rozmieszczonych wzdłuż trasy doświadczalnej. Nazwy czujników przyporządkowano nazwom miejscowości, w których się one znajdują. Odległości czujników od Miedzeszyna wynoszą jak następuje: 2,7 km do Julianowa; 8,7 km do Powsina; 12,4 km do Kierszka i 15,4 km do Piaseczna. Z kolei odległości między czujnikami są równe:

Miedzeszyn-Julianów /M,J/	2,7 km,
Julianów-Powsin /J,P/	6 km
Powsin-Kierszek /P,K/	3,3 km,
Kierszek-Piaseczno /K,Pl/	3 km.

Przewiduje się zainstalowanie dodatkowego czujnika pomiędzy Julianowem i Powsinem tak, że średnia odległość pomiędzy czujnikami będzie równa ok. 3 km. Nie zapewni to jednak dobrego odwzorowania intensywności opadu wzdłuż trasy, gdyż przy wysokich intensywnościach średnice kolumn mogą być nawet węższe od 2 km. Tym niemniej nawet przy takim rozstawieniu można oczekiwać zadowalających wyników modelowania tłumienia fali w liniach przebiegających wzdłuż trasy doświadczalnej.

W przypadku trasy satelitarnej uwzględnia się zmianę charakterystyk opadu wraz z wysokością oraz ograniczenie pułapu dla opadów ciągłych do wysokości izotermy 0°C, zaś dla opadów przelotnych /z charakteru typu Cb/ - do wysokości o 2,5 km większej.

A. Algorytm obliczania tłumienia w liniach horyzontowych

Założenia:

- 1/ w wyniku pomiaru uzyskuje się wartości R skwantowane co 3 mm/godz. i równe 0,3,6,..... 144 mm/godz.;
- 2/ intensywność R_k w danej minucie w punkcie k rozciąga się na odcinku o długości W_k , którego skraję leżą w połowie

odległości pomiędzy sąsiednimi ozujnikami, zaś w przypadku skrajnych - równa się połowie odległości do sąsiedniego ozujnika;

- 3/ w przypadku $R_k \geq 15$ mm/godz. zamiast W_k oblicza się wg wzoru /1/ średnicę kolumny D, która jest mniejsza niż W_k i przyjmuje się, że R_k występuje na odcinku $D(R_k)$.

Wobec tego:

$$W_1 = \frac{d(M,J)}{2} = 1,35 \text{ km}$$

$$W_4 = \frac{d(P,K)}{2} + W_5 = 3,15 \text{ km}$$

$$W_2 = W_1 + \frac{d(J,P)}{2} = 4,35 \text{ km}$$

$$W_5 = \frac{d(K,P_1)}{2} = 1,5 \text{ km}$$

$$W_3 = \frac{d(J,P)}{2} + d(P,K) = 4,65 \text{ km} \quad d - \text{odległość};$$

zaś tłumienie na trasie

$$A = a \sum_{k=1}^5 R_k^b W_k \quad [\text{dB}]$$

przy czym, jeśli $R_k > 15$ mm/godz., to:

$$W_k = D = 2,2 \left(\frac{100}{R_k} \right)^{0,4} \quad \text{dla } k = 2, 3, 4$$

$$W_k = \frac{D}{2} \quad \text{dla } k = 1, 5.$$

B. Algorytm obliczania tłumienia w linii satelitarnej

Założenia:

- 1, 2 i 3 - jak w punkcie A
- 4/ dla $R_k < 6$ mm/godz. - ograniczenie wysokości do izotermi $0^\circ\text{C} / H /$ w km /średnia w miesiącu, w dekadzie miesiąca/;
- 5/ dla $R_k > 9$ mm/godz. - ograniczenie wysokości do izotermi $-15^\circ\text{C} / H_0 + 2,5 \text{ km} /$;

6/ przyjmuje się redukcję tłumienia wraz ze wzrostem wysokości odpowiednio do wartości współczynnika B_k korygującego to tłumienie; wartość B_k jest równa średniej na odcinku W_k .

Współczynnik korekcyjny B oblicza się dla standardowej atmosfery [15,26], a więc w warunkach gdy temperatura na powierzchni morza jest równa -15°C , zaś gradient temperatury $\frac{\Delta T}{\Delta H}$ jest równy $6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Wtedy zależność B od wysokości H i od częstotliwości f przyjmuje postać:

$$B(f,H) = 0,937 - 0,082H + (0,0021 + 0,0015H)f$$

gdzie f w GHz [15, 26].

Wysokość trasy fali nad ozunikami $H_k = \text{tg } \varepsilon \cdot L_k$ gdzie ε - kąt elewacji anteny, zaś L_k - odległości ozuników od Instytutu. Wartości B dla $f = 11,5$ GHz i wysokości $H_k = 0$ km; 1,15 km; 3,7 km; 5,26 km i 6,54 km dla $k = 1, 2 \dots 5$ są odpowiednio równe 0,88; 0,8; 0,69; 0,59 i 0,52.

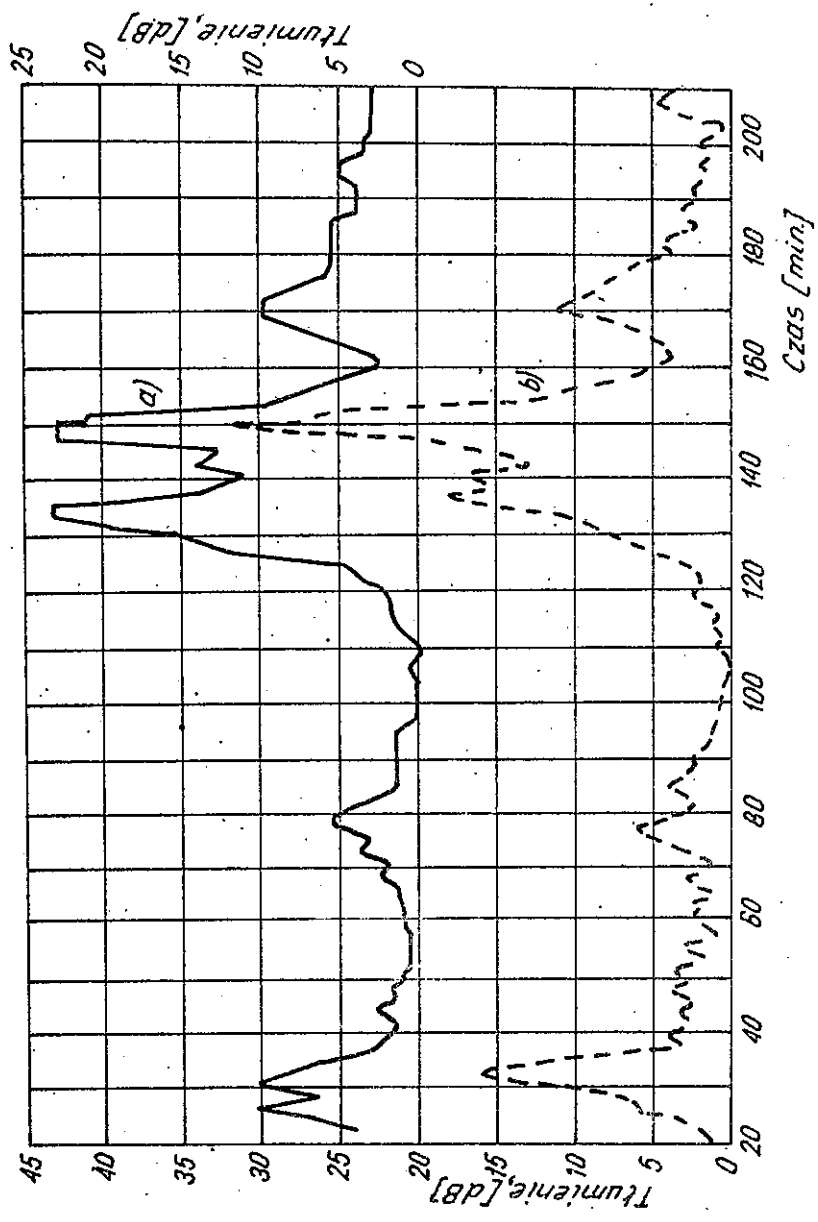
Tak więc tłumienie na trasie satelitarnej wynosi:

$$A = a \sum_{k=1}^5 \frac{R_k^b W_k B_k}{\cos \varepsilon}$$

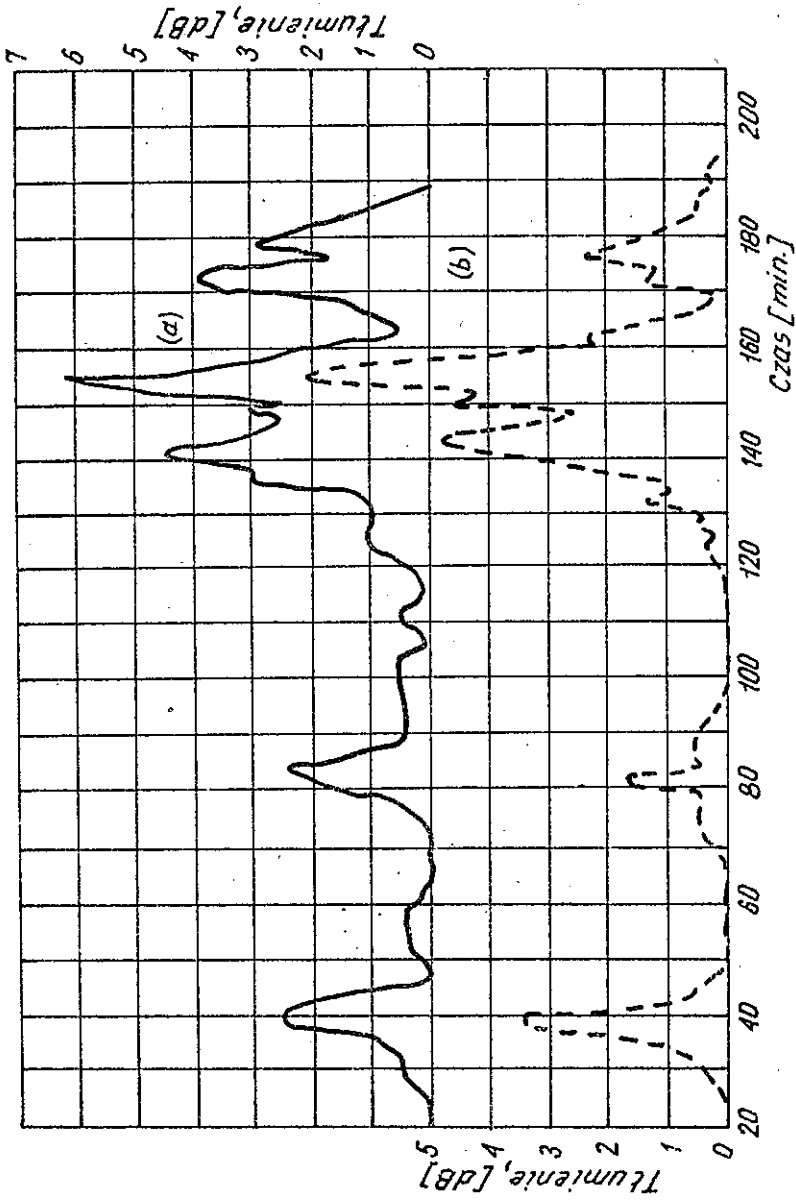
przy czym, jeśli $R_k < 6$ mm/godz. i $H_k > H_0$, to $R_k = 0$, a jeśli $R_k > 9$ mm/godz. i $H_k > H_0 + 2,5$ km, to również $R_k = 0$.

4.3. Przykłady modelowania

Wykonano obliczenia tłumień w linii horyzontowej 18,6 GHz i satelitarnej 11,5 GHz na podstawie danych o opadach, które wystąpiły w lipcu 1987 roku w godzinach od 22.30 dnia 11 lipca do 2.30 12 lipca. Wyniki przedstawiono na rys. 6 i 7, na których dla porównania naniesiono wartości zmierzonych tłumień. Przyjęto wartość $H_0 = 3,4$ km na podstawie danych dla rejonu Warszawy opartych na sondowaniach atmosfery w latach 1948-57 [32]. Wg tych danych średnie miesięczne wartości H_0



Rys. 6. Porównanie przebiegu tłumienia fali w linii 18,6 GHz z przebiegiem modelowanym
a/ przebieg tłumienia z eksperymentu; b/ model



Rys. 7. Porównanie przebiegu tłumienia fali w linii satelitarnej z przebiegiem modelowanym
 a/ przebieg tłumienia z eksperymentu; b/ model

w miesiącach od maja do września oraz przedziały wysokości, w których izoterma ta najczęściej występuje podano w tablicy 4.

Tablica 4

Wysokości izotermy 0°C

Miesiąc	V	VI	VII	VIII	IX
H ₀ [km]	2,4	3,1	3,4	3,25	2,9
Przedział					
H _{0,mod} [km]	2,5÷3	3÷4	3÷4	3,5÷4	3÷4

Z danych w tablicy 4 wynika, że trasa satelitarna w Piasecznie przebiega powyżej średniej wartości izotermy -15°C, a w Kierszku - nawet powyżej izotermy 0°C. W związku z tym dla $R_k > 9$ mm/godz. punkt w Piasecznie nie wnosi swego wkładu w tłumienie linii, zaś dla $R_k < 6$ mm/godz. - również punkt w Kierszku.

W przypadku bardziej precyzyjnego modelowania można by uwzględnić aktualną wysokość izotermy 0°C, która nieraz znacznie odbiega od średniej. Może się też zdarzyć, że jedynie część kolumny opadu wnosi swój wkład w tłumienie linii satelitarnej. Wtedy algorytm wymaga znacznego rozbudowania.

5. PRZEWIDYWANIE TLUMIENIA FALI W LINII RADIOWEJ

Istnieje oczywisty związek między parametrami deszczu na trasie linii radiowej i tłumieniem fali, gdy częstotliwość fali jest wyższa od 10 GHz. Można stwierdzić, że chwilowa wartość intensywności opadu uśrednionej wzdłuż trasy jest skorelowana z chwilowym tłumieniem. Jednak punktowa wartość intensywności opadu nie jest skorelowana z tłumieniem w tym sensie. Jeśli natomiast wziąć pod uwagę dłuższy przedział czasu /godziny/, to występowanie opadu w punkcie trasy jest skorelowane z tłumieniem fali na trasie. Dlatego w skali mie-

siąca czy roku można szukać związku między rozkładem intensywności opadu a rozkładem tłumienia. Należy jedynie określić funkcję, która transformuje punktową intensywność opadu na trasową bez narzucania ścisłego warunku na jednoczesność występowania tych zmiennych losowych.

Wiadomo, że w liniach radiowych nieuniknione jest występowanie zaników wywołanych wielodrogowością. Jednak udział ich maleje, im krótsze są odcinki linii i im niższa częstotliwość, przy czym silniejszy wpływ ma skracanie linii. Z badań wynika, że w pasmie 12 GHz dla odcinków linii krótszych od 20 km główną przyczyną zaników były deszcze, natomiast dla dłuższych od 50 km - wielodrogowość [18]. Badania zaników sygnału w kraju w linii eksperymentalnej 18,6 GHz /15,4 km/ również wykazały, że wielodrogowość ma nieznaczny udział w rozkładzie tłumień wywołanych przez opady i inne czynniki łącznie. Zjawisko wielodrogowości występowało w ciepłych miesiącach /czerwiec, lipiec, sierpień i w mniejszym stopniu we wrześniu/ w godzinach nocnych.

Prognozy tłumienia spowodowanego przez opady mogą być wiarygodne, jeśli opierają się na wiarygodnych danych o opadach w przeszłości. Wiadomo, że zadowalająco wiarygodne rozkłady intensywności opadu w punkcie można uzyskać po co najmniej 5-letnim okresie pomiarów. Misme i Waldteufel [27] stwierdzili, że nawet 10-letnie rozkłady, zmierzone w rejonie Paryża, różniły się w kolejnych dekadach. W związku z tym niepewność prognoz wiąże się nie tylko z niedoskonałością modelu prognostycznego, lecz także z ograniczoną wiarygodnością rozkładu punktowej intensywności opadu.

5.1. Algorytm Assis-Einlofta

Przykładem prostego algorytmu prognostycznego, opartego na modelu opadu przedstawionym na rys. 4 /p. 4.1/, jest algorytm Assis-Einlofta [14] w postaci:

$$A_1 = aR_1^b \cdot D(R_1) + aR_{1,1}^b [L_m - D(R_1)]$$

gdzie $L_m = \min(L, 33 \text{ km})$ - warunek odnoszący się do linii o długości L .

Prognozowany rozkład procentu ozasu przewyższenia przez tłumienie progu A_1 jest iloczynem analogicznego rozkładu intensywności opadu R_1 i pewnej funkcji transformującej intensywność punktową na trasową w sferze prawdopodobieństwa, a więc:

$$P(A > A_1) = \frac{L}{D(R_1)} P(R > R_1)$$

W modelu tym przyjmuje się, że środek kolumny opadu leży na trasie linii radiowej.

5.2. Algorytm Misme-Fimbela

Jednym z najdawniej opublikowanych algorytmów prognostycznych, który zyskał opinię najlepszego /1975 r./, jest algorytm Misme-Fimbela /M-F/. Opiera się on na modelu opadu opisanym w pkt. 4.1 [26]. Wg tego algorytmu:

$$P(A > A_1) = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \frac{S}{S_0} p(R) dR$$

gdzie $p(R)$ - gęstość prawdopodobieństwa punktowej intensywności opadu R w dowolnym miejscu, zaś wyrażenie $\frac{S}{S_0} p(R)$ jest gęstością prawdopodobieństwa wystąpienia opadu o intensywności R w dowolnym punkcie linii radiowej o długości L .

$S_0 = \pi D^2(R)$ jest powierzchnią przekroju kolumny opadu o średnicy $D(R)$, zaś S jest powierzchnią, na której mogą leżeć środki kolumn, mających wspólne punkty z trasą fali. Pole wynosi:

$$S = (L - D_1) \sqrt{D^2 - D_1^2} + \frac{1}{2} \frac{D^2 \arctg \sqrt{D^2 - D_1^2}}{D_1} - D_1 \sqrt{D^2 - D_1^2}$$

Tłumienie A_1 na trasie, gdy kolumna przecina trasę na odcinku D_1 , równa się:

$$A_i = a \left[R_{1,i}^b D_i + R_{1,i}^b (L_m - D_i) \right]$$

a stąd odcinek D_i :

$$D_i(R_i) = \frac{A_i - a R_{1,i}^b L_m}{a(R_{1,i}^b - R_{1,i}^b)}$$

Jeśli wybrać próg A_i , którego prawdopodobieństwo przekroczenia chcemy obliczyć, to należy znaleźć minimalną intensywność opadu R_{\min} i odpowiadającą tej granicy średnicę kolumny $D(R_{\min})$, a tym samym intensywność $R_1(R_{\min})$ tak, by spełnić warunek:

$$D_i(R_{\min}) = D(R_{\min})$$

Warunek ten oblicza się iteracyjnie. Jego spełnienie oznacza, że próg A_i zostanie osiągnięty, gdy środek kolumny opadu o intensywności R_{\min} pokryje się z trasą.

Gęstość $p(R)$ uzyskana z pomiarów przedstawia się w postaci analitycznej jako rozkład logarytmiczno-normalny, którego parametry σ i μ /odchylenie standardowe i średnią/ są oszacowane z danych empirycznych /patrz pkt. 6/.

Algorytm ten został rozszerzony przez Misme i Waldteufela do prognozowania tłumienia w liniach satelitarnych. Zastosowane są w nim ograniczenia pułapu na wysokości 0°C i -15°C i korekta tłumienia falii uzależniona od wysokości, jak opisano w pkt. 4 [37].

5.3. Algorytm Crane'a

Spśród szeregu znanych algorytmów warto przedstawić algorytm prognostyczny Crane'a [11], oparty na charakterystykach opadów zawartych w średniej trasowej intensywności opadu. Algorytm ten ma postać:

$$A(R_p, L) = a R_p^b \left\{ \frac{\exp(ubD) - 1}{ub} - \frac{B^b \exp(CbD)}{Cb} + \frac{B^b \exp(CbL)}{Cb} \right\}$$

dla $D < L = 22,5$ km, zaś dla $0 < L < D$

$$A(R_p, L) = a R_p^b \frac{\exp(ubL-1)}{ub}$$

gdzie $D = 3,8 - 0,6 \ln R_p$, $C = 0,026 - 0,03 \ln R_p$, $B = 2,3 R_p^{-0,17}$
 i $u = \frac{\ln [B \exp(CD)]}{D}$.

Wartości współczynników uzyskane są z charakterystyk opadów mierzonych w USA i w Europie, o których już wspomniano w pkt. 4.1 przy opisywaniu modeli opadów. Wyrażenie w nawiasie ma wymiar odległości i stanowi długość efektywną trasy, zaś wyrażenie przed nawiasem jest tłumieniem jednostkowym.

Algorytm pozwala obliczyć tłumienie przekrozone w linii o długości L w procencie czasu, w którym intensywność punkto-
 wa opadu przekracza wartość R_p . Dysponując empirycznym rozkładem $P(R_p > R_{p,i})$ oblicza się rozkład $P(A > A_1)$ dla wybranej długości trasy L , częstotliwości i polaryzacji /odpowiednie wartości $a, b/$. Algorytm może być stosowany do prognoz w odniesieniu do przeciętnego roku.

W przypadku tras satelitarnych ograniczenie trasy od góry dokonuje się wg koncepcji zbliżonej do przedstawionej w pracy [15]. Wiadomo, że wysokości izotermy 0°C w zakresie małych procentów okresu rocznego /1% - 0,001%/ są skorelowane z intensywnością opadu. Wg [11] dla $p = 0,001\%$ wysokość ta jest równa średniej wysokości izotermy -5°C . W modelu tym wysokość H pułapu określa się ze związku:

$$H = m + n \log(p)$$

gdzie m, n są współczynnikami uzależnionymi od szerokości geograficznej. Długość rzutu trasy satelitarnej na płaszczyznę horyzontalną jest równa:

$$L = \frac{H}{\text{tg } \epsilon}$$

Tłumienie $A(R_p, L)$ oblicza się jak dla trasy horyzontowej, zaś tłumienie na trasie satelitarnej jest równe:

$$A_s(R_p, L) = \frac{A(R_p, L)}{\cos \epsilon}$$

5.4. Algorytm eksponencjalny

Wg autorów pracy [35] algorytm Crane'a przecenia tłumienie w zakresie małych wartości. Proponują oni prostszy algorytm, nie posiadający tej wady, oparty na wykładniczym modelu opadu wzdłuż trasy fali w postaci przedstawionej wzorem /3/.

Algorytm prognostyczny tłumienia ma wtedy postać:

$$A(R_p) = aR_p^b L \quad \text{dla } R_p < 10 \text{ mm/godz.} \quad /4a/$$

$$A(R_p) = aR_p^b \frac{1 - \exp(-\gamma L b \ln \frac{R_p}{10})}{\gamma b \ln \frac{R_p}{10}} \quad \text{dla } R_p > 10 \text{ mm/godz.} \quad /4b/$$

Współczynnik γ można skorelować z istniejącymi rozkładami tłumienia. Autorzy [35] zalecają wartość $\gamma = \frac{1}{22}$.

Dla trasy satelitarnej jej długość wynosi:

$$L = \frac{H_{\text{eff}}}{\sin \varepsilon} = \frac{H_0 + \log \frac{R_p}{10}}{\sin \varepsilon}$$

i tłumienie

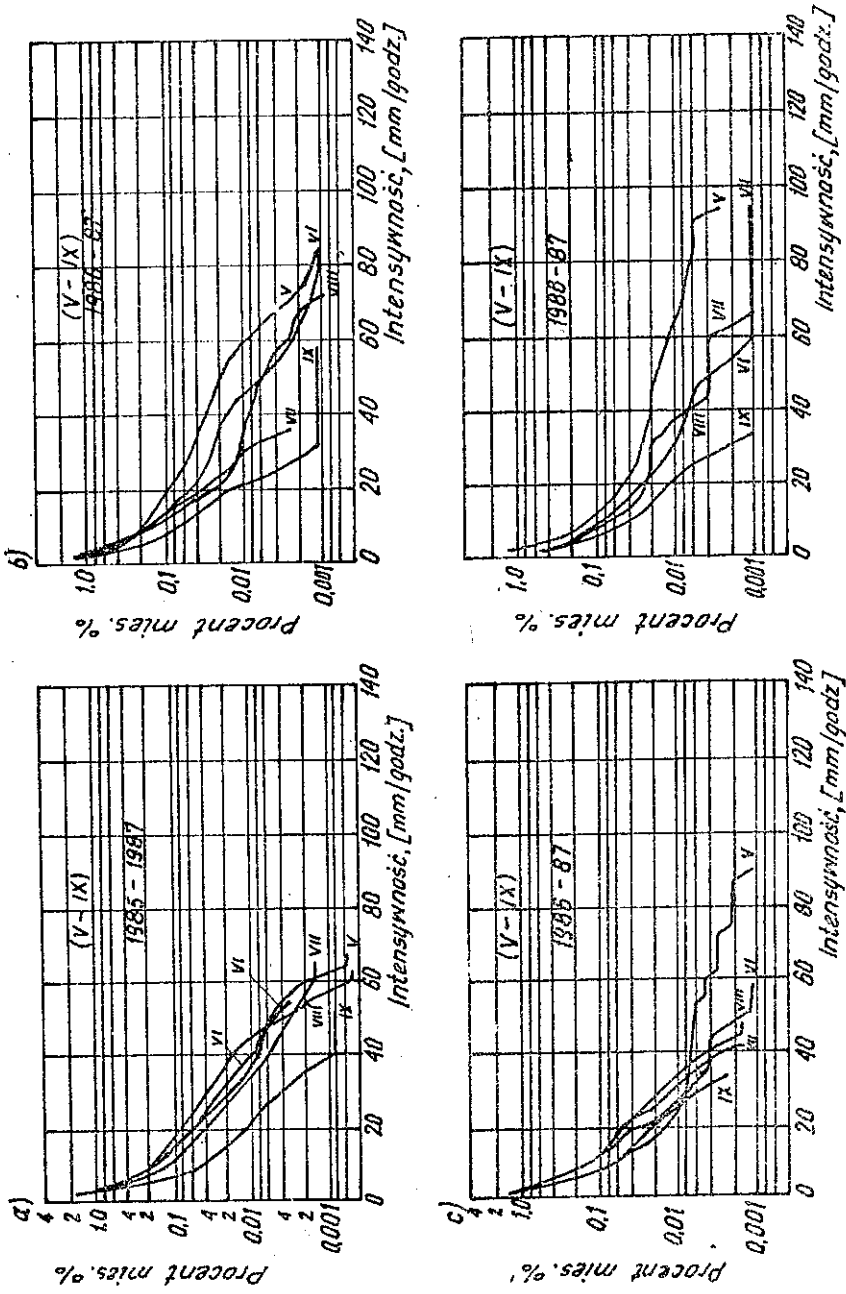
$$A_s(R_p) = aR_p^b L \quad \text{dla } R_p < 10 \text{ mm/godz.}$$

zaś dla $R_p > 10$ mm/godz.

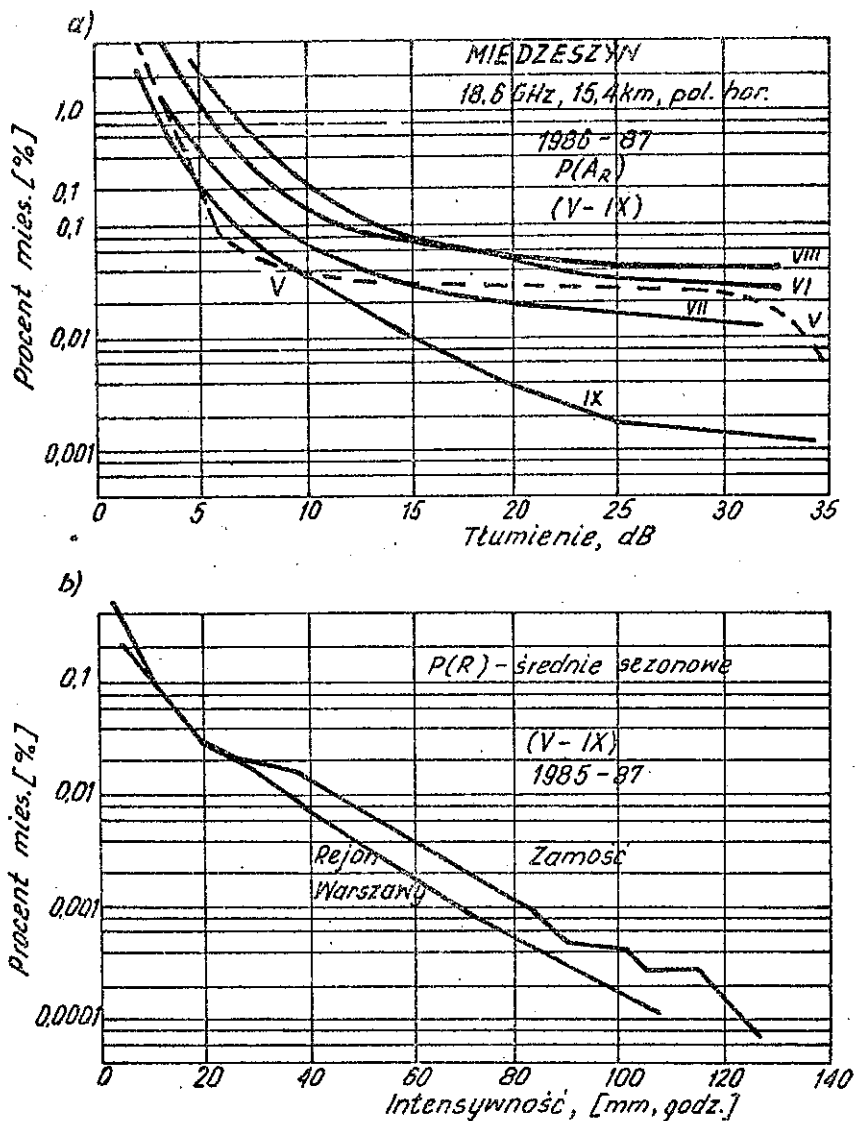
$$A_s(R_p) = aR_p^b \frac{1 - \exp(-\gamma b L \cos \varepsilon \ln \frac{R_p}{10})}{\gamma b \ln \left(\frac{R_p}{10}\right) \cos \varepsilon} \quad /5/$$

Trzeba zaznaczyć, że sprawdzenie przydatności przedstawionych algorytmów dla naszych potrzeb może być sprawdzone po zebraniu odpowiedniej liczby reprezentatywnych rozkładów tłumienia fali w liniach horyzontowych i satelitarnych.

Na podstawie 2-letnich rozkładów intensywności opadów w Miedzeszynie, Julianowie, Powsinie i Piasecznis /rys. 8/ i rozkładu uśrednionego dla rejonu Warszawy /rys. 9b/ oraz

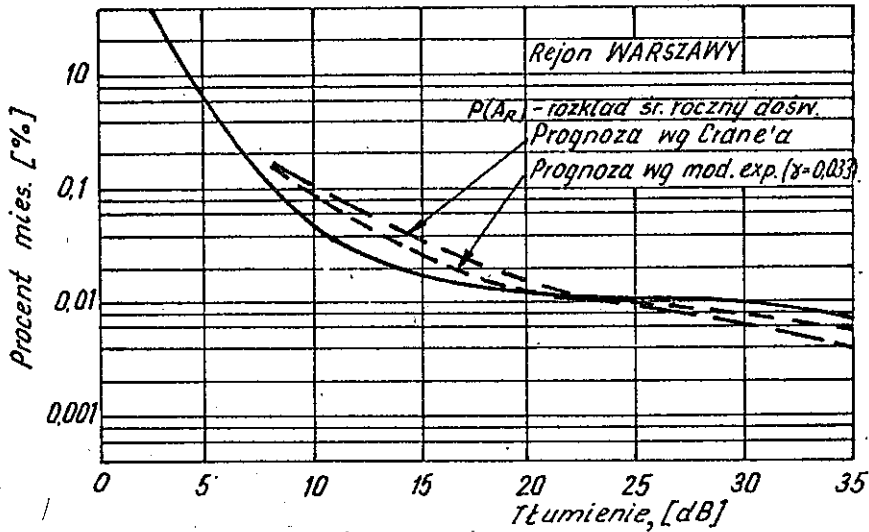


Rys. 8. Miesięczne rozkłady intensywności opadu w różnych punktach
a/ Miedzeszyn; b/ Julianów; c/ Powsin; d/ Piaseczno



Rys. 9. Miesięczne rozkłady tłumień w linii 18,6 GHz /a/ oraz miesięczne średnie w sezonie /V-IX/ rozkłady intensywności opadu w rejonie Warszawy i Zamościa

2-letnich rozkładów tłumień na linii horyzontowej 18,6 GHz /rys. 9a/, wybrano współczynnik γ tak, by algorytm najlepiej prognozował tłumienie na trasie horyzontowej 18,6 GHz /rys. 10/. Dla rejonu Warszawy wstępnie przyjęto $\gamma = 0,033$. Wykładniczy model opadu dla tej wartości jest przedstawiony na rys. 5.



Rys. 10. Porównanie średniorocznych rozkładów tłumień z eksperymentu i z prognozy wg Crane'a i wg modelu wykładniczego przy $\gamma = 0,033$

5.5. Skalowanie częstotliwościowe rozkładu tłumienia

Jeśli znany jest rozkład tłumienia fali $\Lambda(f_1)$ wywołany opadami na częstotliwości f_1 , to można określić rozkład tłumienia na częstotliwości f_2 w linii o tej samej długości [3, 12]. I tak:

$$\Lambda(f_2) = a_2 \left[\frac{\Lambda(f_1)}{a_1} \right]^{\frac{b_2}{b_1}}$$

lub w przypadku bardziej złożonego modelu przejścia:

$$A(f_2) = a_2 \left[\frac{A(f_1)}{a_1} \right]^{\frac{b_2}{b_1}} \times \left[4 \left(1 - \frac{b_2}{b_1} \right) \right]$$

Istnieją również inne algorytmy oparte na modelach opadu zapewniających lepszą transformację [12]. W przypadku prognozowania na podstawie rozkładu intensywności opadu mamy:

$$A(f_2) = A(f_1) \frac{a_2}{a_1} R^{(b_2 - b_1)}$$

Można też podać formułę proponowaną przez CCIR [9], która pozwala obliczyć tłumienie na jednej częstotliwości, gdy znane jest tłumienie na drugiej w postaci:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{\varepsilon(f_1)}{\varepsilon(f_2)}$$

gdzie

$$\varepsilon(f) = f^{1,72} [1 + 3 \times 10^{-7} (f^{3,44})]$$

Jeśli prowadzi się równoczesne pomiary tłumienia w liniach horyzontowych o częstotliwościach f_1 i f_2 oraz na trasie satelitarnej o częstotliwości f_1 jak w Dubnej [1], to można określić korelacyjny związek między tłumieniami $A_{1,h}$ i $A_{2,h}$ w liniach horyzontowych w postaci:

$$\frac{A_{2,h}}{A_{1,h}} = m A_{1,h}^{-n}$$

Można też określić funkcję transformującą tłumienie w linii horyzontowej na tłumienie w linii satelitarnej [1]. Dla stacji satelitarnej w Dubnej /f = 11,5 GHz, kąt elewacji anteny 12° i linii horyzontowej /11,5 GHz; 12,4 km/ zależność ta ma postać:

$$\frac{A_{1,s}}{A_{1,h}} = F(A_{s/h}) = 1,76 A_{1,h}^{-0,33}$$

Powstaje też możliwość określenia tłumienia w linii satelitarnej na częstotliwości f_2 w zależności od tłumienia w linii horyzontowej na częstotliwości f_1 w postaci:

$$A_{2,s} = F(A_{s/h})^m A_{1,h}^{1-n}$$

gdzie, m, n są współczynnikami związku korelacyjnego, określającego zależność tłumień w liniach horyzontowych na częstotliwościach f_2 i f_1 .

5.6. Skalowanie rozkładu tłumienia długością trasy

Dysponując rozkładem $P_1(A)$ odnoszącym się do linii o długości L_1 można określić rozkład $P_2(A)$ odnoszący się do linii o długości L_2 pracującej na tej samej częstotliwości. I tak w przypadku opadów przelotnych

$$P_2(A) = \frac{L_2}{L_1} P_1(A)$$

zaś w przypadku opadów ciągłych

$$P_2(A) = P_1\left(A \frac{L_1}{L_2}\right)$$

Ogólna formuła wg [12] ma postać:

$$P_2(A) = \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^r P_1\left[A \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^s\right]$$

przy czym $0,85 < r < 0,95$ i $0,35 < s < 0,45$. Oczywiście gdy r rośnie, to s maleje.

5.7. Ocena formuły prognostycznej

Algorytm prognostyczny ocenia się przez porównanie rozkładu prognozowanego z rozkładem z pomiaru. Wg CCIR [5] tworzy się względne różnice tłumienia z prognozy A_p i z pomiaru - A_m dla wybranych procentów czasu $p\%$ i dla pewnej liczby odcinków linii. I tak dla $p = \text{const}$ i dla i -tej linii:

$$e_1 = 100 \frac{A_p - A_m}{A_m}$$

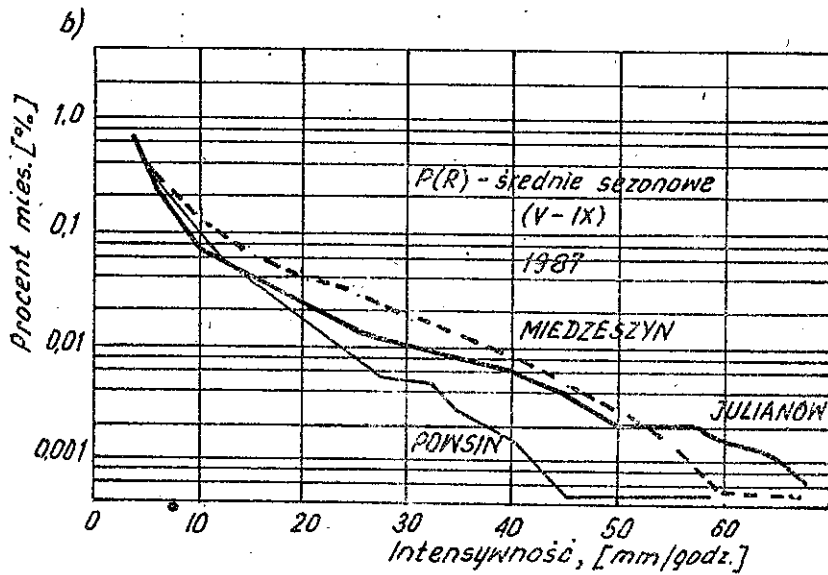
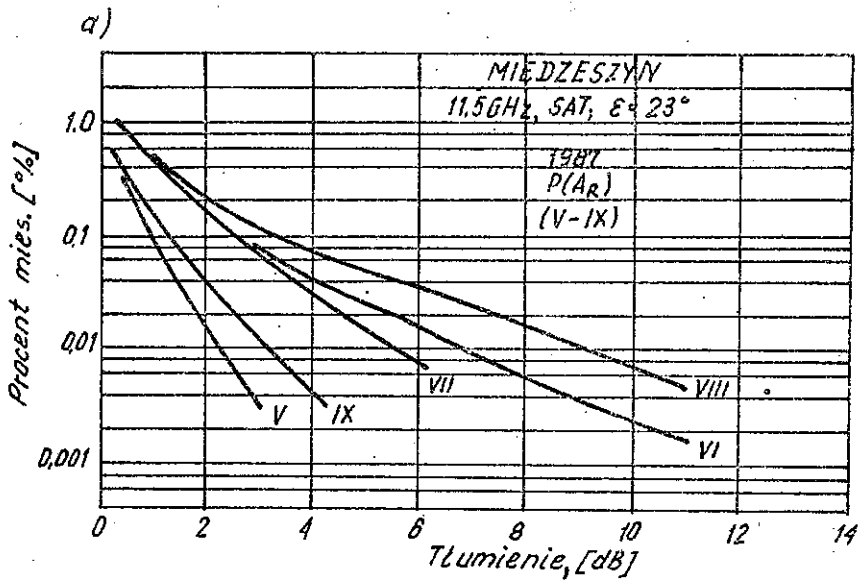
przy czym jeśli $|A_p(p) - A_m(p)| < 1$ dB, to $e_1(p) = 0$. Dysponując n wartościami $e_1(p)$ oblicza się średnie odchylenie oraz standardowe odchylenie σ . Błąd średniokwadratowy M.R.S. = $\sqrt{\mu^2 + \sigma^2}$ dla danej wartości p%. Podobne obliczenia należy wykonać dla wartości p od 0,1% do 0,001% lub innych.

5.8. Możliwości prognozowania tłumienia fal przez deszcze

Ostatnio w kraju uzyskano z pomiarów rozkłady intensywności opadów, charakteryzujące miesiące od maja do września w okresie od 1985 do 1987 r. w punktach Miedzeszyn i Zamość oraz w okresie od 1986 do 1987 r. w punktach Julianów, Powsin i Piaseczno wzdłuż trasy doświadczalnej /rys. 8 a-d/. Uzyskano również rozkłady tłumień fali na trasie horyzontowej 18,6 GHz Miedzeszyn-Piaseczno /15,4 km/ w ciągu dwóch ciepłych sezonów lat 1986-87 /rys. 9a/ oraz miesięczne rozkłady tłumień w linii satelitarnej 11,5 GHz /kąt elewacji $\varepsilon = 23^\circ$ / w sezonie 1987 r. /rys. 11a/. Utworzono uogólnione rozkłady intensywności opadu charakteryzujące rejon trasy doświadczalnej, stanowiące średnią z rozkładów w punktach od Miedzeszyna do Piaseczna. Można je traktować jako rozkłady opisujące deszcze w rejonie Warszawy. Rozkład średni za sezon /V-IX/ dla rejonu Warszawy i dla Zamościa przedstawiono na rys. 9b.

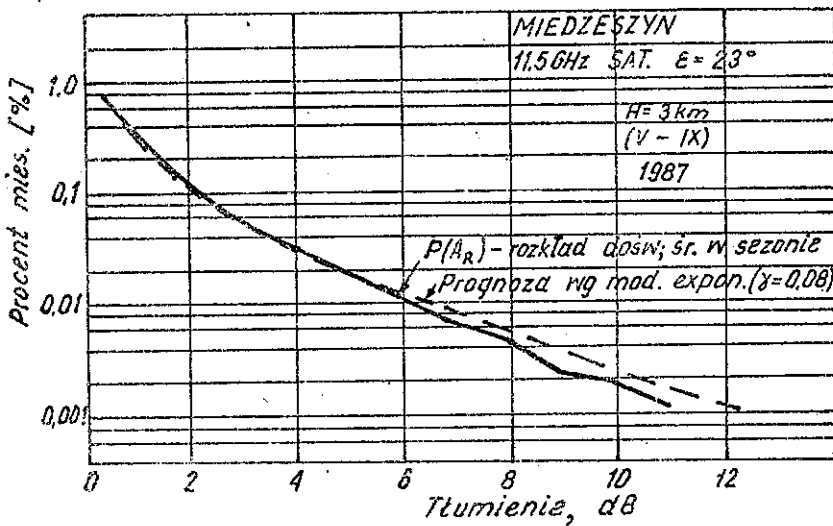
Przykłady rozkładów prognozowanych dla linii horyzontowej 18,6 GHz wg modelu wykładniczego i modelu Crane'a podano na rys. 10. Są one oparte na rozkładzie intensywności opadu dla trasy doświadczalnej za okres V-IX i porównane z rozkładem tłumień uzyskanych z pomiarów za ten sam okres.

Prognozy dla trasy satelitarnej z konieczności opierają się tylko na jednym sezonie pomiarowym. Wzięto pod uwagę rozkład intensywności opadu oparty na danych z trzech punk-



Rys. 11. Miesięczne rozkłady tłumień w linii satelitarnej /a/ i średnie w sezonie miesięczne rozkłady intensywności opadu w punktach Miedzeszyn, Julianów i Powsin /b/

tów pomiarowych: Miedzyszyn, Julianów i Powsin, gdyż trasa satelitarna przebiega ponad punktem Piaseczno. Rozkłady intensywności opadu uśrednione w okresie V-IX w punktach Miedzyszyn, Julianów i Powsin przedstawiono na rys. 11b, zaś rozkład tłumień z pomiaru oparty na rozkładach miesięcznych /z rys. 11a/ i prognozowany rozkład tłumień pokazano na rys. 12. Do obliczeń prognozy wykorzystano model wykładniczy /dla trasy satelitarnej/.



Rys. 12. Porównanie średniosezonowych rozkładów tłumienia fali w linii satelitarnej otrzymanych eksperymentalnie i na podstawie prognozy wg modelu wykładniczego przy $\gamma = 0,08$

W następnych latach, gdy wzrośnie długookresowa reprezentatywność rozkładów intensywności opadu oraz rozkładów tłumienia fali, modele prognostyczne zostaną odpowiednio zoptymalizowane.

5.9. Przykład wykorzystania prognoz tłumienia fali do wyznaczenia długości skoku cyfrowej linii radiowej

W celu wyznaczenia długości skoku linii radiowej w pasmie 11 - 18 GHz, gdy przewiduje się długości skoków mniejsze od 25 km, należy dysponować rozkładem intensywności opadów $P(R_p)$ w rejonie budowy linii, odnoszącym się do przeciętnego roku, a także znać metodykę prognozowania tłumienia fali w liniach o wybranych częstotliwościach i długościach skoku na podstawie $P(R_p)$. Zjawisko wielodrogowości jest w tym przypadku pomijane. W procedurze zostaną wykorzystane przykłady rozkładów $P(R_p)$ dla rejonu Warszawy i Zamościa przedstawione na rys. 9b. Prognozowane rozkłady tłumienia $P(A_R)$, wywołanego przez deszcze w tych regionach w liniach radiowych w pasmie 11,5 GHz na odcinkach o długościach 7,5 km, 15 km i 30 km - obliczone w tym przypadku wg wykładniczego algorytmu prognostycznego - pokazano na rys. 13.

Współczynnik dostępności linii P_{av} dla linii cyfrowej o długości 2500 km według zaleceń CCIR [7] jest równy 0,3% roku, zaś dla linii o długości L:

$$P_{av} = 0,3 \frac{L}{2500} = 1,2 \times 10^{-4} L \quad [\% \text{ roku}].$$

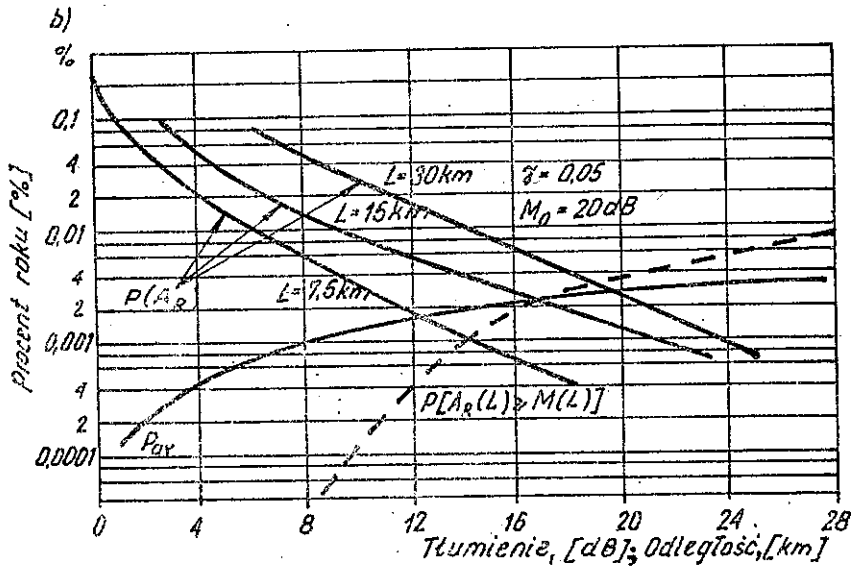
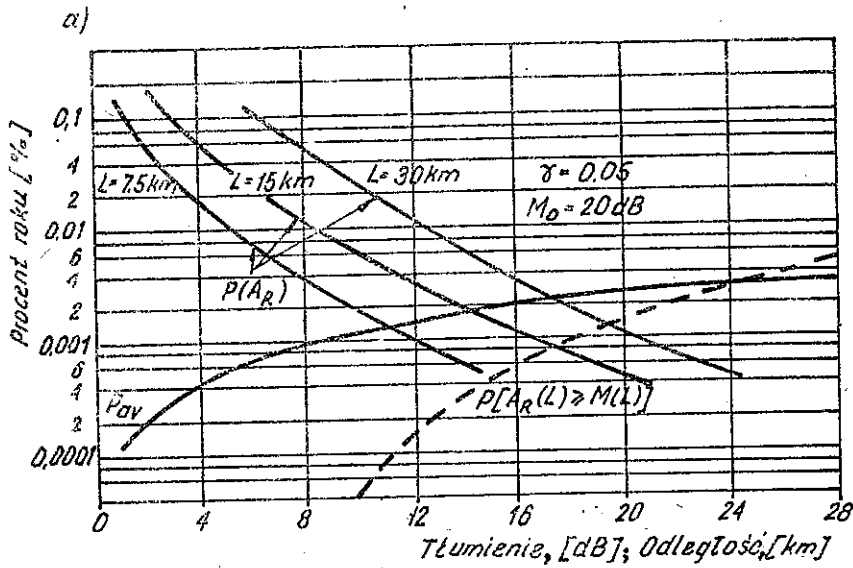
Z kolei wg wymagań CCITT dopuszczalna liczba błędów na 1000 bitów $BER_M = 10^{-3}$. Linia jest niedostępna, jeśli na jakimkolwiek odcinku $BER > BER_M$ w ciągu co najmniej 10 kolejnych sekund. Wszystkie takie przerwy w sumie we wszystkich odcinkach w roku nie powinny stanowić procentu wyższego od P_{av} .

Dopuszczalny spadek sygnału $M(L)$ na odcinku L, przy którym $BER = BER_M$, zwany marginesem, jest równy:

$$M(L) = M_0 - 20 \log \frac{L}{L_0}$$

gdzie M_0 - margines w linii wzorcowej o długości L_0 [17].

Prawdopodobieństwo wystąpienia tłumienia A_R wywołanego przez deszcz na odcinku L większego od marginesu $M(L)$ okre-



Rys. 13. Przykład wyznaczania długości skoku horyzontalnej linii cyfrowej 11,5 GHz w rejonie:

a/ Warszawy; b/ Zamościa

śla prawdopodobieństwo wystąpienia przerwy w linii:

$$P(\text{BER} \geq 10^{-3}) = P[A_R(L) \geq M(L)].$$

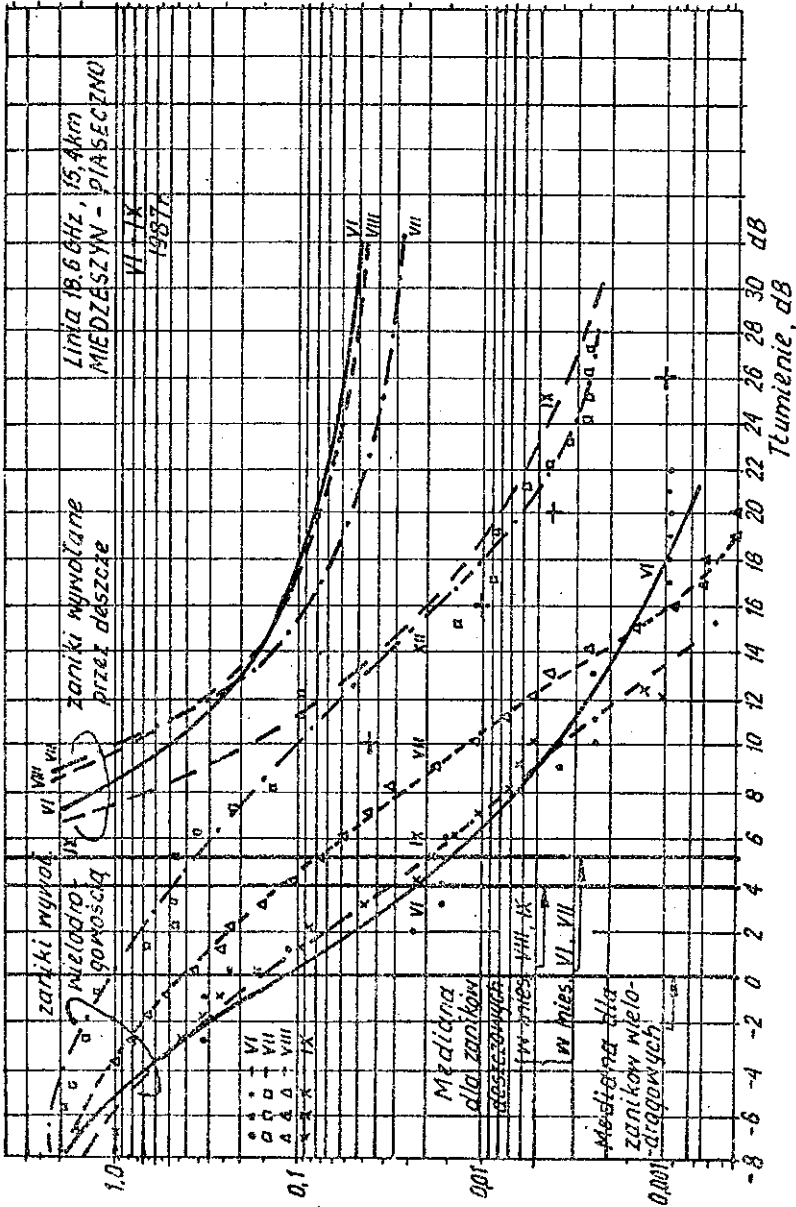
Jeśli przyjąć margines dla wzorowego odcinka L_0 odpowiednio do możliwości zespołów nadawczo-odbiorczych oraz wykorzystać rozkłady $P(A_R)$ dla kilku długości odcinków /skoków/, to można wyznaczyć procenty czasu, przy których $A_R(L) = M(L)$, a więc $P[A_R(L) \geq M(L)]$. Łatwo też wyznaczyć funkcję $P_{av}(L)$. Funkcje te są naniesione na rys. 13a,b, który ilustruje wyznaczanie długości skoku L_s , gdy $M_0 = 20$ dB dla odcinka $L_0 = 15$ km. Odpowiednio do rozkładów intensywności opadu w rejonach Warszawy i Zamościa odcinki L_s byłyby w tym przykładzie równe 25 km i 17 km. Przyjmując wyższy margines, uzyska się dłuższe skoki.

Wg [17] przy prędkości modulacji 34 Mbit/s można stosować linie na częstotliwości 13-15 GHz przy długościach skoków 20-30 km.

Trzeba zauważyć, że margines określony na podstawie badań na fali ciągłej może być niewystarczający w przypadku linii cyfrowej. Różnice fazy na skrajach widma modulacyjnego oraz różnice amplitud wywołują błędy przy demodulacji. W związku z tym określenie marginesu wymaga przeprowadzenia eksperymentów w warunkach naturalnych.

5.10. Przykład zaników wielodrogowych na trasie doświadczalnej

Z zarejestrowanych zaników sygnału na trasie Miedzeszyn-Piaseczno /18,6 GHz, 15,4 km/ zostały wyodrębnione przedziały czasu, w których występowały zaniki o charakterze wielodrogowym i sygnał w tych przedziałach poddano statystycznej analizie. Mediana sygnału w tych przedziałach przesuwała się ku wartościom dodatnim o 4-5 dB w odniesieniu do miesięcznej mediany sygnału. Wiązało się to prawdopodobnie ze zmianą gradientu wskaźnika refrakcji w warstwie przygruntowej w tych okresach. Rozkłady tłumień wywołanych zjawiskiem wielodrogo-



Rys. 14. Rozkłady zaniików wywołanych wielodrogowością, uzupełnione przez rozkłady zaniików wywołanych deszczem

wości w miesiącach od czerwca do września 1987 r. przedstawiono na rys. 14. W pozostałych miesiącach roku zaniki wielodrogowe nie występowały. Podobnie było w roku ubiegłym. Dla porównania na rys. 14 naniesiono wygładzone rozkłady tłumień wywołanych przez deszcze w tych miesiącach. Jak widać, zaniki wielodrogowe stanowiły nikły procent zaników sumarycznych. Dotyczy to nawet lipca, gdy zaniki wielodrogowe były częste.

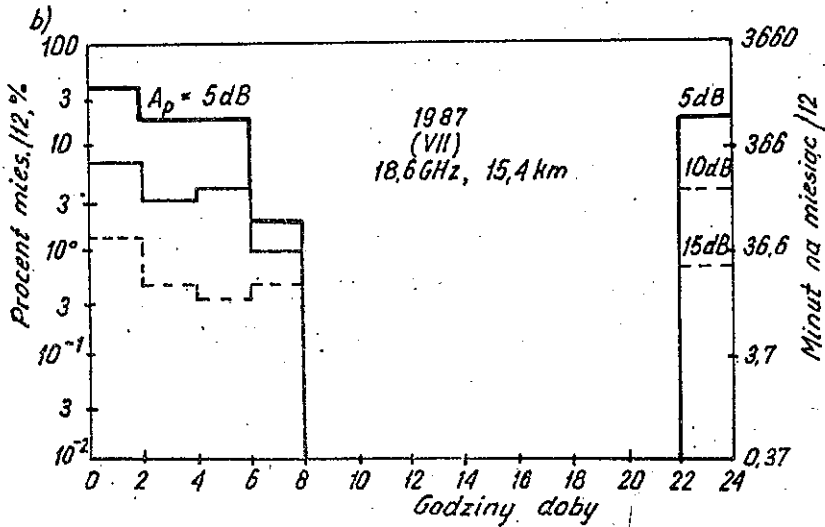
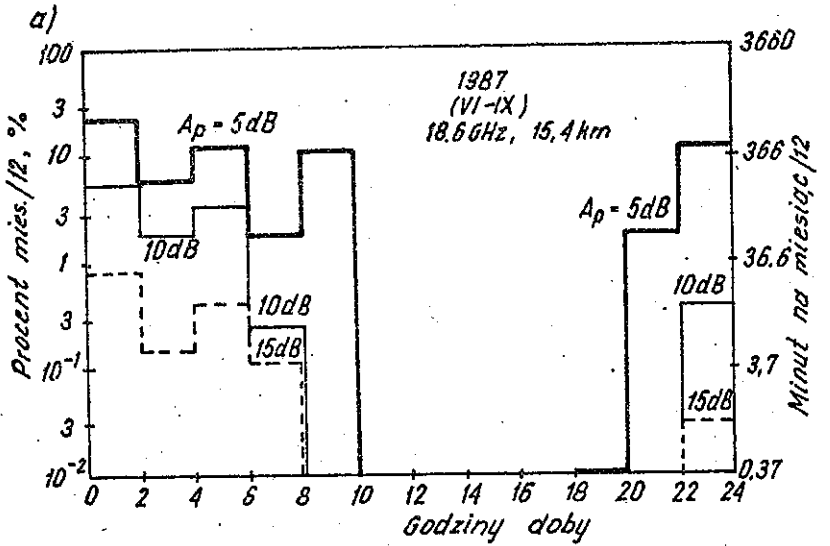
Dobowy przebieg zaników wielodrogowych ilustrują wykresy na rys. 15. Obliczono procenty czasu, w których są przekraczane wybrane progi tłumienia /5, 10 i 15 dB względem mediany/ w 12 dwugodzinnych przedziałach doby. Zaniki były rozpatrywane w tych przedziałach w przekroju miesięcznym, w związku z tym procenty odnoszą się do 1/12 części miesiąca.

Przebiegi uśrednione w okresie czterech miesięcy przedstawia rys. 15a, zaś w lipcu - rys. 15b. Zaniki przekraczające próg 15 dB zdarzają się między godz. 22.00 a 6.00 rano. We wrześniu gdy dni są krótsze, słabe zaniki mogą wystąpić już o 18.00 i mogą trwać aż do 10.00 rano.

Wg sprawozdania CCIR [9] w przypadku głębokich zaników wielodrogowych / >15 dB/ w systemie wąskopasmowym procent czasu przeciętnego, najgorszego miesiąca roku, w którym tłumienie przekracza określony próg można wyrazić zależnością:

$$p_x(w) = KQ \left(\frac{w}{w_0} \right) f^B d^C$$

gdzie f - częstotliwość w GHz, d - długość odcinka w km,
 $\frac{w}{w_0}$ - iloraz mocy odpowiadający głębokości zaniku w dB. Dla Europy północno-zachodniej $KQ = 1,4 \times 10^{-8}$, $B = 1$ zaś $C = 3,5$. Obliczenia $p_x(w)$ dla zaników przekraczających progi 10, 16, 20, 26 dB wskazują, że w najgorszym miesiącu /lipcu/ obliczony rozkład jest w przybliżeniu zgodny z rozkładem uzyskanym z pomiaru. Obliczone wartości $p_x(w)$ zaznaczono na rys. 14 krzyżykami.



Rys. 15. Cykl dobowy procentu czasu zaników przekraczających progi 5 dB, 10 dB i 15 dB:

a/ średniomiesięczny w okresie /VI-IX/, 1987; b/ w najgorszym miesiącu /lipcu/ 1987 r.

6. OPRAWIANIE DANYCH STATYSTYCZNYCH

Niejednokrotnie istnieje potrzeba zastąpienia rozkładu empirycznego przez jego analityczną reprezentację lub przekształcenie rozkładu opartego na danych zmierzonych przyrzędem o stałej osazu T na rozkład związany z pomiarami przyrzędem o innej stałej osazu.

6.1. Prezentacja empirycznego rozkładu intensywności opadu rozkładem logarytmiczno-normalnym

Interesującym przykładem zastąpienia empirycznego rozkładu jego analityczną reprezentacją jest sposób wyznaczenia estymatorów σ i μ rozkładów intensywności opadu i przedstawienia ich w postaci rozkładów typu logarytmiczno-normalnego. Rozkłady intensywności opadu po uśrednieniach w okresie miesięcy i lat przybliżają się do rozkładu logarytmiczno-normalnego, im liczniejsze są statystyki [14, 34].

Gęstość rozkładu logarytmiczno-normalnego (L-N) zmiennej R jest równa:

$$p(R) = \frac{1}{R\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln R - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

zaś dystrybuanta tego rozkładu ma postać:

$$F\left(\frac{\ln R_1 - \mu}{\sigma}\right) = \sqrt{(2\pi)^{-1}} \int_{-\infty}^{x_1} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad /6/$$

w której wyrażenie $x_1 = \frac{\ln R_1 - \mu}{\sigma}$ jest zmienną standaryzowaną, zaś σ i μ są odchyleniem standardowym i średnią rozkładu. Rozkład empiryczny procentu osazu przewyższenia progę R_1 w wybranym procencie osazu $P(R > R_1)$ można powiązać z dystrybuantą, jak niżej:

$$P(R > R_1) = P_0 \left\{ 1 - F \left[\frac{\ln R_1 - \mu}{\sigma} \right] \right\} \quad /7/$$

gdzie: P_0 - prawdopodobieństwo wystąpienia opadu, zaś μ, σ są wartościami oszacowanymi z próby. Oszacowanie to jest możliwe, gdy znany jest rozkład $P(R > R_1)$ oraz wartość P_0 . I tak po przekształceniu równania /7/ mamy:

$$\frac{\ln R_1 - \mu}{\sigma} = F^{-1} \left[\frac{1 - P(R > R_1)}{P_0} \right]$$

a stąd

$$\ln R_1 = \sigma F^{-1} \left[\frac{1 - P(R > R_1)}{P_0} \right] + \mu \quad /8/$$

W tym miejscu wprowadzimy oznaczenia zwyczajowo przyjmowane w statystyce do obliczeń współzależności zmiennych losowych. Jeśli oznaczymy $\ln R_1 = y_1$ oraz $F^{-1} \left[\frac{1 - P(R > R_1)}{P_0} \right] = x_1$, to mamy równanie regresji liniowej między zmiennymi losowymi Y, X w postaci:

$$Y = A + BX$$

gdzie $A = \mu$ i $\sigma = B$.

Jak wiadomo [16], jeśli znane są pary wartości y_1, x_1 , to:

$$B = \frac{N \sum_{i=1}^N x_1 y_1 - \sum_{i=1}^N x_1 \sum_{i=1}^N y_1}{N \sum_{i=1}^N x_1^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_1 \right)^2} \quad i=1, 2, \dots, N$$

zaś

$$A = \sum_{i=1}^N y_1 - B \frac{\sum_{i=1}^N x_1}{N}$$

Po oszacowaniu wartości $\sigma^2 = B$ oraz $\mu = A$ można wrócić do problemu rozkładu logarytmiczno-normalnego zmiennej R . Wartości funkcji $F^{-1} \left[\frac{1 - P(R > R_1)}{P_0} \right]$ są równe jak uprzednio $x_1 = \frac{\ln R - \mu}{\sigma}$. Można je obliczyć [14], posługując się funkcją w postaci:

$$x_1 = t_1 - \frac{c_0 + c_1 t_1 + c_2 t_1^2}{1 + d_1 t_1 + d_2 t_1^2 + d_3 t_1^3} + \varepsilon < 10^{-4}$$

gdzie $t_1 = \sqrt{\ln \frac{1}{p_1}}$ zaś $p_1 = \frac{P(R > R_1)}{P_0}$ oraz

$$\begin{aligned} c_0 &= 2,515517 & d_1 &= 1,432788 \\ c_1 &= 0,802853 & d_2 &= 0,189269 \\ c_2 &= 0,010328 & d_3 &= 0,001308 \end{aligned}$$

Aproksymację rozkładu empirycznego $P(R > R_1)$ w postaci funkcji L-N można uzyskać korzystając ze wzoru /7/:

$$P_{\text{apr}}(R > R_1) = P_0 \left\{ 1 - F \left[\frac{\ln R_1 - \mu}{\sigma} \right] \right\} \quad /9/$$

w którym wykorzystane są estymowane wartości μ , σ .

Wartości funkcji $F(x_1)$, znane na ogół z tablic, można obliczyć z aproksymacji:

$$F(x) = 1 - Z(x) [b_1 t + b_2 t^2 + \dots + b_5 t^5]$$

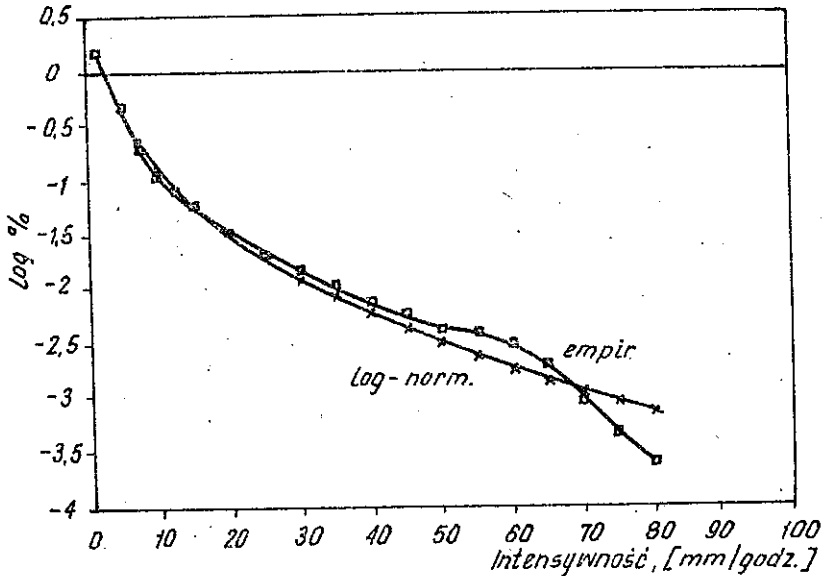
gdzie

$$Z(x) = \left(\sqrt{2\pi}^{-1} \right) \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right)$$

$$\text{zaś } t = \frac{1}{1 + \exp x}, \quad w = 0,2316419$$

$$\begin{aligned} b_1 &= 0,319381530 & b_2 &= -0,356563782 \\ b_3 &= 1,781477937 & b_4 &= -1,821255978 \\ b_5 &= 1,330274429. \end{aligned}$$

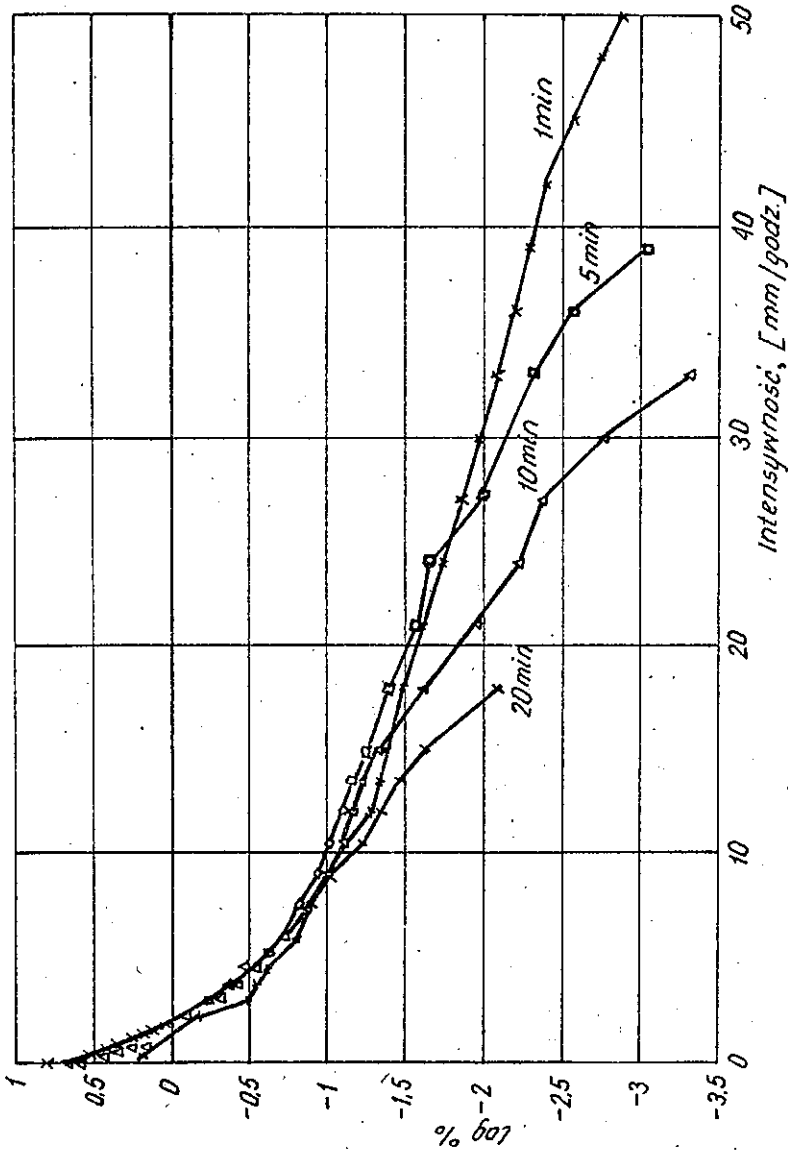
Przykłady prezentacji empirycznych rozkładów intensywności opadu w postaci funkcji logarytmiczno-normalnej przedstawiono na rys. 16.



Rys. 16. Przykład prezentacji empirycznego rozkładu intensywności opadu w postaci rozkładu logarytmiczno-normalnego

6.2. Przekształcanie rozkładów ze względu na stałą czasu ozujnika

Istnieje potrzeba porównywania rozkładów intensywności opadu uzyskanych ze statystyk opartych na danych z ozujników o różnej stałej czasu [2,34]. Wiąże się to z posiadaniem wieloletnich statystyk służb meteorologicznych opartych na średniej 5-minutowej intensywności lub 10- i więcej minutowej. Dysponowane przebiegi średniej 1-minutowej intensywności zostały przekształcone na przebiegi uśrednione w 5-, 10- i 20-minutowych przedziałach czasu wg algorytmu:



rys. 17. Średni z sezonu, miesięczny rozkład intensywności opadu oparty na danych z czujnika o 1-minutowym czasie integracji /+/- i rozkłady uzyskane po całkowaniu tych danych w okresie 5 /o/, 10 /v/ i 20 minut /x/

$$R_{m,k} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R(t_{k+i}) \quad \begin{array}{l} k=1,2,\dots \\ i=1,2,\dots,m, \end{array}$$

w którym t_k - kolejne minuty przebiegu 1-minutowego. Uzyskane w ten sposób próbki posłużyły do obliczenia odpowiednich rozkładów. Przykłady rozkładów opartych na próbkach 5-, 10- i 20-minutowych uzyskanych z próbek 1-minutowych przedstawiono na rys. 17.

7. ZMIANA POLARYZACJI FALI PRZEZ NIEJEDNORODNOŚCI ATMOSFERYCZNE

Wykorzystanie pasma częstotliwości dla utworzenia kanałów pracujących z polaryzacją poziomą i pionową lub kołową lewo- i prawoskrętną napotyka na ograniczenia związane z niejednorodnością ośrodka propagacji. Występowanie elementów opadu w atmosferze lub niejednorodności gradientu refrakcji są przyczynami powstawania ortogonalnej składowej fali. Prowadzi to do przenikania sygnału ortogonalnego do kanału podstawowego w przypadku jednego nadajnika lub w przypadku dwóch nadajników, emitujących fale wzajemnie ortogonalne - również do przenikania składowych ortogonalnych do kanałów podstawowych, a więc do wzajemnych zakłóceń.

Oocenia się, że na częstotliwościach powyżej 10 GHz, gdy stacje przekaźnikowe znajdują się w odległościach mniejszych od 20 km, główną przyczyną depolaryzacji fali są deszcze, natomiast gdy odległości te są większe od 50 km, dominującą przyczyną depolaryzacji jest wielodrogowość [18].

7.1. Depolaryzacja fali przez elementy opadu

Krople deszczu w trakcie opadania splaszają się tym bardziej, im większa jest ich średnica. Jeśli fala pada na kroplę deszczu pod pewnym kątem, to kropla wypromieniowuje falę o polaryzacji fali padającej i falę o polaryzacji ortogonalnej.

W przypadku trasy horyzontalnej i polaryzacji liniowej oraz kropeł opadających pionowo, depolaryzacja nie występuje.

W rzeczywistości, wobec występowania gradientu pionowej prędkości wiatru [4], osie symetrii kropeł są odchyłone od "pionu" /kierunku prostopadłego do kierunku propagacji fali i do poziomu/. Najsilniejsze hamowanie wiatru występuje w przygruntowej warstwie atmosfery. W związku z tym tam jest najwyższy gradient pionowej prędkości wiatru i najsilniejsza depolaryzacja fali. Również w chmurach burzowych występują silne odchylenia osi symetrii kropeł od pionu w obrębie znacznych fragmentów chmury. Pewne wyobrażenie o wartości kąta odchylenia w zależności od średnicy kropli i wysokości kropli nad gruntem, w przypadku przeciętnie nierównomiernej powierzchni gruntu /współczynnik nierównomierności $m = 0,2/$ i poziomej składowej prędkości wiatru na wysokości 10 m równej 15 m/s, przedstawiają wyniki analizy uzyskane w pracy [4]. I tak na wysokości 10 m kąt odchylenia ϕ osi największych kropeł dochodzi do 10° , zaś na wysokości 80 m - nie osiąga 3° .

W przypadku polaryzacji kołowej depolaryzacja powstaje przy każdej wartości kąta ϕ , a także zależy ona od różnicy kąta propagacji fali i kąta osi symetrii kropli. Różnica ta jest maksymalna dla trasy horyzontalnej, gdy kąt ϕ osiąga wartość 90° .

7.2. Określenia i podstawy teoretyczne prognozowania

Weźmy pod uwagę linię radiową, w której występują dwa nadajniki emitujące fale liniowo spolaryzowane i wzajemnie ortogonalne o natężeniach $E_{1,t}$ i $E_{2,t}$. Przyjmijmy jak Olsen [29], że $A_{11} = \frac{E_{11}}{E_{1t}}$ i $A_{22} = \frac{E_{22}}{E_{2t}}$ są współczynnikami tłumienia fali w kanale 1 /odpowiadającemu nadajnikowi $t = 1/$ i w

kanale 2 /odpowiadającemu nadajnikowi $t = 2$ / zaś $A_{21} = \frac{E_{21}}{E_{1t}}$ i $A_{12} = \frac{E_{12}}{E_{2t}}$ są współczynnikami tłumienia sygnałów ortogonalnych w tych kanałach.

Z kolei $D_1 = \frac{E_{21}}{E_{11}}$ i $D_2 = \frac{E_{12}}{E_{22}}$ są współczynnikami depolaryzacji sygnału 1 i sygnału 2 i w kołcu $C = \frac{E_{22}}{E_{11}}$ jest ilorazem sygnałów odebranych w kanale 2 i w kanale 1, a nadanych odpowiednio przez nadajnik 2 i nadajnik 1.

Dysponując tymi określeniami można wyrazić tłumienie fali na trasie wzorami

$$CPA_1 = 20 \log |A_{11}| \quad [\text{dB}] ,$$

$$CPA_2 = 20 \log |A_{22}| \quad [\text{dB}] .$$

dla kanałów 1 i 2. Można też określić dyskryminację np. sygnału ortogonalnego, odebranego w kanale 2 do sygnału odebranego w kanale 1, gdy nadawał nadajnik 1, w postaci wzoru:

$$XPD_1 = 20 \log \left| \frac{A_{11}}{A_{21}} \right| \quad [\text{dB}]$$

lub izolację sygnału, pochodzącego z nadajnika 2 w kanale 1, w postaci wzoru:

$$XPI_1 = 20 \log \left| \frac{A_{11}}{A_{12}} \right| \quad [\text{dB}] .$$

Określenie rozkładu składowej zdepolaryzowanej wywołanej przez deszcz jest możliwe, gdy są znane parametry rozkładu odchyleni osi kropel od pionu, a więc efektywny kąt ϕ i odchylenie standardowe σ . Według Olsena określenie parametrów tego rozkładu jest możliwe poprzez pomiary sygnałów i współczynników D i C .

Jeśli przyjąć, że $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ jest różnicą tłumień fal ortogonalnych, zaś $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$ jest różnicą ich faz,

to stała propagacji różnicowej wynosi:

$$|\Delta k| = (\Delta \alpha^2 + \Delta \beta^2)^{0,5}$$

Wg Olsena stałą tę można wyrazić w postaci:

$$\Delta k = \left\{ 4(D)^2 + \left[\ln(C) - \ln \left| \frac{E_{2t}}{E_{1t}} \right| \right]^2 + \left[\arg(C) - \arg \left(\frac{E_{2t}}{E_{1t}} \right) \right]^2 \right\}^{0,5}$$

a więc poprzez zmierzone wielkości. Analogicznie zostały wyrażone parametry rozkładu kąta ϕ .

Z kolei Valentin [36] zbadał możliwości uzależnienia XPD od intensywności opadu R dla przypadku polaryzacji liniowej i kołowej. Niezbędna jednak była przy tym znajomość szeregu trudno mierzalnych parametrów deszczu. W związku z tym przyjęł on następujące założenia:

- a/ rozkład średnic kropeł jest określony wg zależności lawsa-Parsonsa,
- b/ podczas opadania krople stają się elipsoidalne,
- c/ rozkład kąta odchylenia osi symetrii kropeł od pionu jest określony wg Ostberga,
- d/ rozkłady średnic i kąta odchylenia ϕ są niezależne.

Autorzy pracy [13] wyprowadzili zależność XPD od CPA w postaci

$$XPD = -20 \ln(CPA) - 40 \ln(\cos \alpha) - 20 \ln(\sin 2\tau) + B + 17,375^2$$

w której α - kąt padania fali względem osi symetrii kropeł, τ - kąt polaryzacji fali względem kierunku horyzontalnego, σ - odchylenie standardowe rozkładu kąta ϕ i B - człon zależny od temperatury i częstotliwości. Podstawą do wyprowadzenia zależności było wyznaczenie różnicy tłumień $\Delta \alpha$ i różnicy faz $\Delta \beta$ w płaszczyznach ortogonalnych na trasie fali.

W pracy [33] wyznaczone XPD i CPA przy kołowej polaryzacji fali na podstawie różnicowego tłumienia i różnicowej fazy oraz składowej sygnału o polaryzacji pionowej A_V :

$$\text{XPD} = 20 \log \left| \frac{1 + \exp(-\Delta\alpha - j\Delta\beta)}{1 - \exp(-\Delta\alpha - j\Delta\beta)} \right| ,$$

$$\text{CPA} = A_v + 20 \log \left| \frac{1 + \exp(-\Delta\alpha - j\Delta\beta)}{2} \right| .$$

Otrzymane związki pozwoliły uzyskać wyniki bliskie wynikiem otrzymanym z zależności podanej przez CCIR [6]:

$$\text{XPD}(p) = U - V \log [\text{CPA}(p)]$$

gdzie $U = 30$ 35 i $V = 20$.

Półempiryczny związek podany przez Olsena i Nowlanda [30] w tejże postaci określa:

$$U = 0,00536 f^2 + 30 \log(f) - 40 \log(\cos \varepsilon) - 20 \log |\sin^2(\phi - \tau)|$$

$$V = 20 \quad 8 < f < 15 \text{ GHz}$$

$$V = 23 \quad 15 < f < 35 \text{ GHz}$$

przy czym ε - kąt elewacji trasy fali, zaś ϕ - skuteczny kąt odchylenia osi kropel od pionu. Formuła ta, po uproszczeniu $\phi = 0 = 0$ dla polaryzacji kołowej $\tau = 45^\circ$ i dla trasy horyzontowej $\varepsilon = 0$ ma kształt

$$\text{XPD}(p) = 30 \log(f) + V \log [\text{CPA}(p)] ,$$

$$U = 30 \log(f) .$$

7.3. Prognozowanie XPD oraz XPI wg dokumentów CCIR

Obecnie stosuje się półempiryczne metody prognozowania składowej ortogonalnej [6]. Przyjmuje się dwuparametrowy model prognostyczny oparty na gaussowskim rozkładzie kątów odchylenia osi symetrii kropel od pionu, w którym:

$$\text{XPD} = U - V \log(\text{CPA}) \quad [\text{dB}]$$

gdzie $U = C(f) + D(\varepsilon) + \chi^2 + I(\tau)$ oraz $V = V(f)$.

W przybliżeniu $C(f) = 30 \log(f)$ dla $8 \leq f \leq 35$ GHz i dla kształtu kropel wg Pruppachera i Pittera, zaś rozkład średnio kropel jest wg Lawsa-Parsonsa w temperaturze 20°C i dla szczególnej postaci efektywnej długości trasy [30]. Współczynnik V jest prawie stały i równy 20 dla $f = 12$ GHz, zaś dla $f = 30$ GHz ok. 23.

Z kolei $D(\varepsilon) = 40 \log \cos(\varepsilon)$ z wyjątkiem kątów bliskich $\varepsilon = 90^\circ$ oraz $\chi^2 = 0,0053 \sigma_m^2$. $I(\tau)$ jest w przybliżeniu zyskiem polaryzacji liniowej nad kołową. Jeśli kąt ϕ zmienia się przypadkowo w czasie burzy i od burzy do burzy, przy czym rozkład ϕ jest gaussowski o zerowej średniej i standardowym odchyleniu σ_m , to [6]:

$$I(\tau) = -10 \log \frac{1}{2} [1 - \cos(4\tau) \exp(-\chi_m^2)],$$

$$\chi_m^2 = 0,0024 \sigma_m^2.$$

Ogólna metoda statystycznego przewidywania XPD jest podana w [8], zaś przegląd metod - w [28].

WYKAZ LITERATURY

1. Bałabanow B., Alexandrowa E., Swiatogor W., Bykow W., Kawecki A.: Application of frequency and space correlation of radio wave propagation conditions for the purpose of designing satellite communication links. 38 Congress of IAF, październik 1987, Brighton.
2. Barbaliscia F., Fedi F.: Rainfall intensity statistical properties and prediction techniques. Ann. Telecomm., vol. 35, No 11-12, 1980.
3. Barbaliscia F., Fedi F., Maggiorini P., Maggiori D.: Frequency scaling of rain induced attenuation at 11, 18 and 30 GHz. Ann. Telecomm., vol. 35, No 11-12, 1980.
4. Brussard G.: A meteorological model for rain induced crosspolarisation. IEEE Trans. Ant. Prop., AP-24, No 1, 1976, pp. 5-11.
5. CCIR: Attenuation by hydrometeors in particular by precipitation and other atmospheric particles. Rep. 721-2, vol. 5, Dubrovnik 1986.
6. CCIR: Cross-polarisation due to atmosphere. Rep. 722-2, vol. 5, Dubrovnik 1986.
7. CCIR: Fixed service using radio-relay systems. Rep. 378-3, vol. 9. Zalecenie 556, 557, Genewa 1978.
8. CCIR: Propagation data and prediction methods required for Earth-space telecommunication systems. Rep. 564-3, vol. 5, Dubrovnik 1986.
9. CCIR: Propagation data and prediction methods required for line-of-sight radio-relay systems. Rep. 338-5, Dubrovnik 1986.
10. CCIR: Radiometeorological data. Rep. 563-3. Dubrovnik 1986.

11. Crane R.K.: Prediction of attenuation by rain. IEEE Trans. Comm., Com. 28-9, No 9, pp.1717-1733, 1980.
12. Debrunner W.: Prediction of rain attenuation statistics. Ann. Telecomm., vol. 35, No 11-12, 1980.
13. Dissanayke A.W., Havorth D.P., Watson P.A.: Analytical models for cross-polarisation on earth-space radio-paths for frequency range 9-30 GHz. Ann. Telecomm., vol. 35, No 11-12, 1980.
14. Dok. roboczoj CSRS: Przegląd teoretyczny procedur prognozytycznych tłumienia wywołanego przez deszcze i porównanie z wynikami eksperymentów w 1985 roku w Dubnej. /Interkosmos/.
15. Dok. roboczoj CSRS: Wkład do prac teoretycznych w zakresie propagacji fal. Dubna 1987 /Interkosmos/.
16. Draper N.R., Smith H.: Analiza regresji stosowana. PWN, Warszawa 1973.
17. Fedi F.: Prediction of attenuation due to rainfall on terrestrial links. Radio Science, vol. 16, No 5, 1981.
18. Hall M.P.M.: Effects of the troposphere on the radio-communication Peter Peregrinus Ltd. IEE, Londyn, N.York, 1979.
19. Kawecki A.: Badanie propagacyjnych właściwości krajowych linii radiowych. Przegląd Telekomunikacyjny, nr 5, 1988.
20. Kawecki A.: Określenie kumulatywnego rozkładu prawdopodobieństwa natężenia opadu atmosferycznego w Polsce dla potrzeb radiokomunikacji. Referaty Problemowe IL, z. 41, 1981.
21. Kawecki A.: Przewidywane tłumienia fal przez deszcze w liniach radiowych na obszarze Polski. Prace IL, nr 90, 1984.
22. Kawecki A., Thong D.: Niektóre charakterystyki propagacyjne linii radiowych w pasmie 6 GHz o różnej długości skoku. Prace IL, nr 96, /w druku/.

23. Kawecki A. + zespół: Doświadczalny ośrodek badań propagacji mikrofal na trasach horyzontowych i satelitarnych. Referaty Problemowe IL, z. 80, 1987.
24. Lorenc H. + zespół: Czasowo-przestrzenny rozkład opadu deszczu o określonym natężeniu na terytorium Polski. Zakład Klimatologii, IMGW, 1979 /na zlecenie IL/.
25. Maggiori D.: Computed transmission through rain in the 1 - 400 GHz range for spherical and elliptical drops and any polarisation. Alta Freq., No 5, 1981.
26. Misme P., Fimbel J.: Determination theorique et experimentale de l'afaiblissement par la pluie sur un trajet radioelectrique. Ann.Telecom., vol. 30, 1975.
27. Misme P., Waldteufel P.: Afaiblissements calcules pour liaisons Terre-satellite en France. Ann.Telecom., vol. 37, No 7-8, 1982.
28. Olsen R.L.: Cross-polarisation during precipitation on terrestrial links: A review. Radio Science, vol. 16, No 5, 1981.
29. Olsen R.L.: Theory of measuring the effective polarisation parameters of rain from ortogonal linearly polarised transmissions. Ann. Telecomm., vol. 36, No 7-8, 1981.
30. Olsen R.L., Nowland W.L.: Semi-empirical relation for the prediction of rain depolarisation statistics, their theoretical and experimental basis. Proc. Intern. Symp. on Ant. and Propagation, Sendai, Japonia 1978.
31. Olsen R.L., Rogers D.V., Hodge D.E.: The aR^b relation in the calculation of rain attenuation. IEEE Trans. AP, USA, vol. 26, 1978.
32. Parczewski W.: Struktura termiczna troposfery nad rejonem Warszawy. Wiadomości Służby Hydro-Met., nr 52, 1962.

33. Schlesak J.J., Strickland J.I.: Circular cross-polarisation measurements on earth-space paths at 11,7 GHz. Ann. Telecomm., vol. 36, No 7-8, 1981.
34. Segal B.: Analytical examination of mathematical models for the rainfall rate distribution function. Ann. Telecomm., vol. 35, No 11-12, 1980.
35. Stutzman W.L., Dishman W.K.: A simple model for estimation of rain induced attenuation along earth-space paths at millimeter wave-lengths. Radio Science, vol. 17, No 6, 1982.
36. Valentin R.: Probability distribution of rain induced cross-polarisation. Ann. Telecomm., vol. 36, No 1-2, 1981.
37. Waldteufel P., Misme P.: Amelioration du modele pour le calcul des attenuations dues a la pluie sur un trajet Terre-espace et etude de sensibilitte aux parametres. Ann. Telecomm., vol. 36, No 7-8, 1980.

ISSN 0209-1046

