

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA-MIEDZESZYN

BIULETYN

INFORMACYJNY

4 (268)

1989

BIULETYN INFORMACYJNY

ROK 29

WARSZAWA 1989

NR 4(268)

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
Branżowy Ośrodek
Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Biuletynu Informacyjnego

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

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: Barbara Skwara

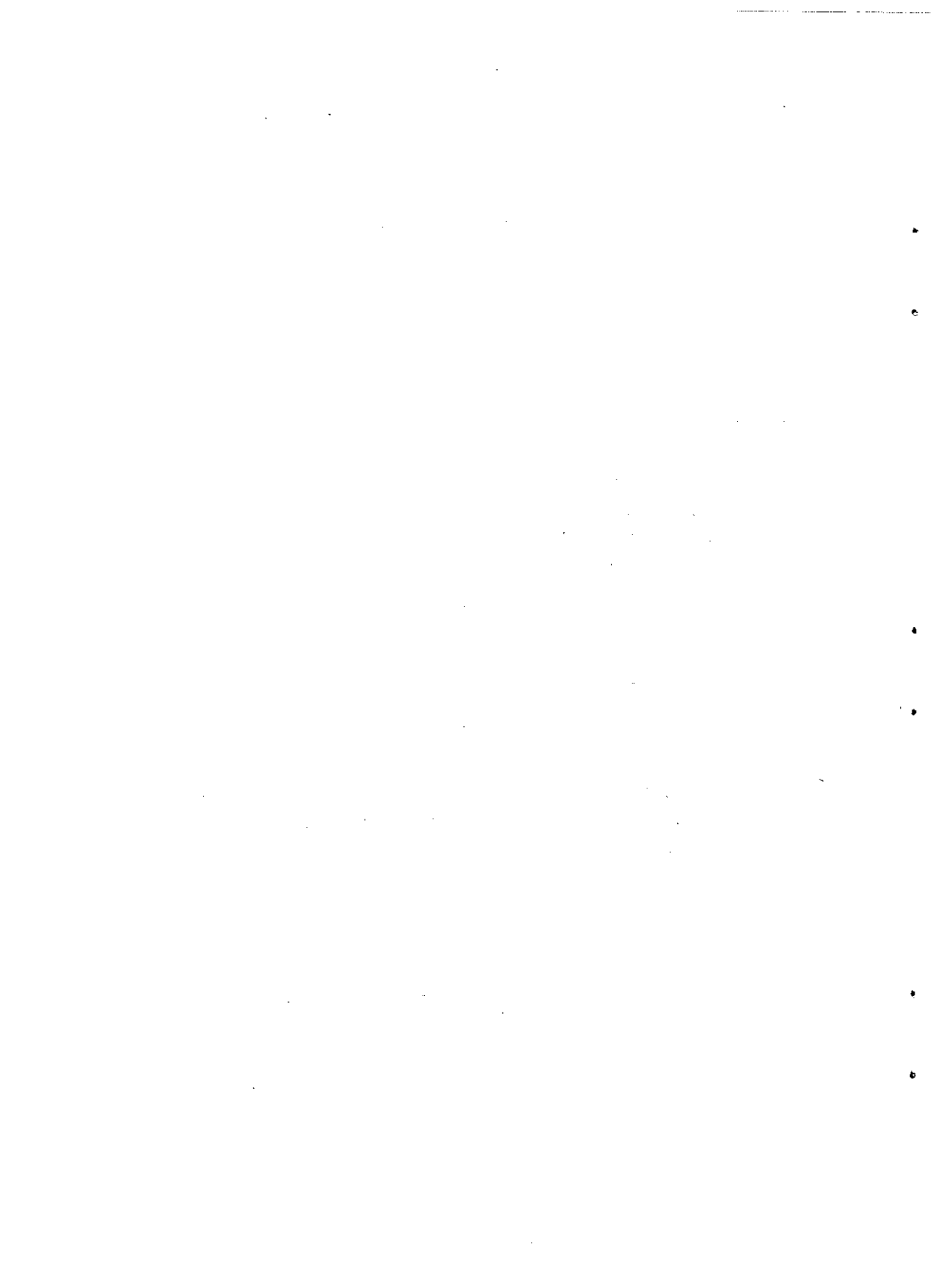
Dział Wydawniczy Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 570. Wpłynęło do
Działu Wydawniczego 1989.05.18.
Druk ukończono w listopadzie 1989 r.

Arnold Kawecki

KRÓTKI PRZEGLĄD ŚWIATOWEGO DOROBKU
W ZAKRESIE BADAŃ PROPAGACJI FAL
W PASMACH POWYŻEJ 10 GHz

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wprowadzenie	1
2. Zarys prac w dziedzinie badań linii ziemskich i satelitarnych	2
2.1. Niektóre modele opadów atmosferycznych	4
2.2. Prognozowanie tłumienia fal w liniach radiowych	6
2.2.1. Formuła prognostyczna Misme-Fimbela	8
2.2.2. Formuła prognostyczna Crane'a	9
2.2.3. Wykładnicza formuła prognostyczna	10
2.2.4. Częstotliwościowe skalowanie rozkładu tłumienia	11
2.2.5. Skalowanie rozkładu tłumienia długością trasy	12
2.2.6. Ocena formuły prognostycznej	12
2.3. Zmiana polaryzacji fali przez niejednorodności atmosferyczne	13
2.3.1. Depolaryzacja fali przez elementy opadu	13
3. Niektóre aspekty badań satelitarnych linii radiowych	19
4. Cyfrowe linie radiowe	21
4.1. Specyfika cyfrowych linii radiowych	21
5. Problematyka badań w latach osiemdziesiątych	24
Wykaz literatury	29



KRÓTKI PRZEGLĄD ŚWIATOWEGO DOROBKU
W ZAKRESIE BADAŃ PROPAGACJI FAL
W PASMACH POWYŻEJ 10 GHz

1. WPROWADZENIE

Niniejszy przegląd dotyczy problematyki propagacji fal w atmosferze, odnoszącej się do horyzontalnych i satelitarnych linii radiowych, pracujących na częstotliwościach powyżej 10 GHz, w tym szczególnie do zagadnień związków parametrów technicznych linii ze statystycznymi parametrami atmosfery. Wzięto pod uwagę prace dotyczące:

- a) opisu zjawisk atmosferycznych, takich jak: opady deszczu, śniegu i ich wpływu na tłumienie, rozpraszanie i depolaryzację fali radiowej;
- b) niejednorodności wskaźnika refrakcji atmosfery, które prowadzą do interferencyjnych zaników sygnału wywołanych wielodrogową propagacją lub zjawiskiem dyfrakcji na przeszkodach albo wywołują efekt depolaryzacji sygnału.

Omówiono publikacje prezentujące wyniki badań analogowych i cyfrowych linii radiowych, ziemskich i satelitarnych w powiązaniu z pomiarami pośrednimi lub bezpośrednimi parametrów atmosfery wpływających na propagację. Również zostały uwypuklone zagadnienia ujęte w publikacjach poświęconych prognozowaniu tłumienia fal radiowych lub zaników interferencyjnych, a także depolaryzacji fal na podstawie uprzedniej znajomości statystycznych charakterystyk deszczu, refrakcji lub innych danych o ośrodku propagacji. Podkreślono metody prognozowania posługujące się matematycznym modelowaniem zjawisk atmosferycznych czy symulacją zjawisk za pomocą układów elektronicznych lub innymi niekonwencjonalnymi metodami.

Ze względu na obszerny dorobek w tej dziedzinie, osiągnięty w wielu krajach świata, w przeglądzie zostały uwzględnione jedynie niektóre prace, stanowiące bądź typowy przykład rozwiązania problemu, bądź świadczące o wkroczeniu na nowy etap rozwoju badań, bądź wskazujące na dalszy kierunek rozwoju techniki badań lub nowego ujęcia problematyki propagacji. W Europie główny wkład w rozwiązanie problemów propagacji fal w zakresach powyżej 10 GHz wnieśli przede wszystkim Italia, Francja i Wielka Brytania, zaś w skali światowej przede wszystkim - USA, Kanada i Japonia.

Przegląd opiera się na dostępnej literaturze, poczynając od końca lat siedemdziesiątych i na dokumentach CCIR.

2. ZARYS PRAC W DZIEDZINIE BADAŃ LINII ZIEMSKICH I SATELITARNYCH

Problematyka propagacji fal w zakresach fal powyżej 10 GHz, w porównaniu ze znanymi już zagadnieniami obejmującymi niższe zakresy fal, rozszerza się o efekt pochłaniania, rozpraszania i depolaryzacji fal w elementach opadów (deszczu, śniegu, gradu), w chmurach, mgłach i obłokach pyłu. Badanie związków tłumienia fali z intensywnością opadu i jego mikrostrukturą zaoferowały licznymi publikacjami, wśród których należy wymienić pracę D. Maggiori [39], przedstawiającą współczynniki regresji tłumienia i opóźnienia fazowego fali względem intensywności opadu przy różnych częstotliwościach i polaryzacji fali oraz temperaturach ośrodka, a także pracę R.L. Olsena [48], prezentującą te współczynniki w zależności od rozkładu średnic kropeł i temperatury. Obliczenia przeprowadzono dla kropeł sferycznych, są więc one ściśle dla fali o polaryzacji kołowej. Autor uwzględnił wyodrębnione rodzaje deszczów opisane przez rozkłady średnic kropeł: typu Marshalla-Palmera, Parsonsa, Jossa (odnoszące się do opadów burzowych) i Jossa (odnoszące się do opadu ciągłego)

Godne podkreślenia są prace analityczne poświęcone zbadaniu zjawiska pochłaniania i rozpraszania fal w niesferycznych

elementach opadów w przypadku fal o różnej polaryzacji i różnych kątach padania fali na te elementy. Wiązało się to z zaganieniem depolaryzacji fali przez elementy opadu, które ustawiają się w przestrzeni odpowiednio do pionowego gradientu prędkości wiatru. Analizowano przy tym sytuacje skrajne, gdy osi symetrii kropeł ustawione są zgodnie lub chaotycznie. Można tu wymienić pracę T. Oguchi [44], który wprowadził model spłaszczonej kropli i uwzględnił ten fakt w analizie depolaryzacji fali oraz pracę A. Ishimaru i R. Cheunga [32], którzy wzięli pod uwagę wielokrotne odbicia fali od kropeł deszczu o kształcie sferycznym. Zjawisko to odgrywa istotną rolę, gdyż powyżej częstotliwości 10 GHz, dla kropeł powierzchnia skuteczna rozpraszania staje się porównywalna z powierzchnią skuteczną pochłaniania. W wyniku analizy oszacowali oni proporcje między składową koherentną i niekoherentną sygnału. Usystematyzowanie tych zagadnień znalazło swój wyraz w dokumentach CCIR: 338-5 [6], 723-2 [12], 722-1 [11], 721-2 [10] i 564-3 [9].

Oprócz prac teoretycznych prowadzono wiele badań eksperymentalnych mających na celu opanowanie technik pomiaru propagacyjnych parametrów linii radiowych (parametrów decydujących o jakości lub błędach transmisji) i jednocześnie pomiaru parametrów atmosfery (zjawisk meteorologicznych), które wpływają na propagację fal). W efekcie uzyskano związki pomiędzy statystycznymi charakterystykami linii radiowej i charakterystykami opadów lub refrakcji dolnej warstwy atmosfery w zależności od częstotliwości, polaryzacji fali, długości odcinka trasy fali, od pory roku, pory dnia, geometrycznego przekroju trasy, jej pokrycia szatą roślinną oraz zabudową. Wśród wielu prac można wymienić tu, np. publikacje [23, 28, 42], a także [24, 25], które powstały w latach 1972-78 jako efekt realizacji programu badawczego w skali europejskiej. Program ten obejmował problematykę badań propagacji fal na trasach horyzontowych w zakresach częstotliwości powyżej 10 GHz, w tym również pomiary intensywności opadów w 37 punktach na obszarze Europy, poczynając od Skandynawii na północy i kończąc na Hiszpanii, Italii i Grecji na południu (kraje znajdujące się w granicach obozu

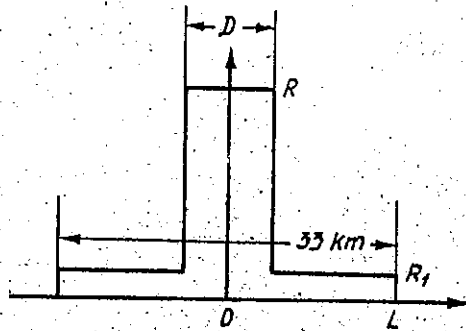
socjalistycznego nie brały udziału w tym programie). Prace te stworzyły możliwość opanowania zagadnień prognozowania propagacyjnych parametrów linii, a tym samym umożliwiły projektowanie linii spełniających ustalone wymagania niezawodnościowe.

Można wyróżnić zagadnienie prognozy rozkładu tłumienia fal w linii radiowej w zależności od rozkładu punktowej intensywności opadów występujących na trasie linii oraz zagadnienie przeskalowywania rozkładu tłumienia na inne zakresy częstotliwości lub inne długości odcinków, gdy znane są rozkłady tłumienia przebadanej linii radiowej o określonej długości i częstotliwości pracy. Prognozowanie tłumienia fal ułatwiły modele opadów oraz funkcje modelujące przejście z punktowej intensywności opadu na trasowe tłumienie fali.

2.1. Niektóre modele opadów atmosferycznych

Opady ciągle 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 1 km, a nawet 2,5 km powyżej izotermy 0°C . Ta ostatnia wysokość odpowiada wysokości izotermy -15°C . W wyniku badań w różnych strefach klimatycznych świata przyjęto model opadu przelotnego, w którym wokół kolumny o wysokiej intensywności opadu R i średnicy D zależnej od R rozpościera się obszar o średnicy $L_1 = 33$ km z małą intensywnością opadu R_1 (rys. 1), [41].



Rys. 1. Model intensywności opadu w poziomym przekroju kolumny opadu

Średnica kolumny opadu wiąże się z intensywnością opadu, zgodnie z zależnością:

$$D(R) = 2,2 \left(\frac{100}{R} \right)^{0,4},$$

zaś intensywność opadu R_1 w kole o średnicy L_1 (również uzależniona od R) wyraża się wzorem:

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

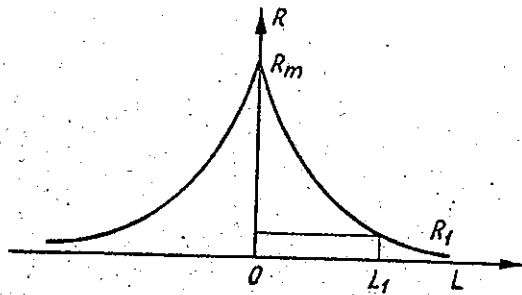
Znajduje również zastosowanie wykładniczy model intensywności opadu, bliższy rzeczywistości, wyrażony funkcją:

$$R = R_m \exp(-\sigma |L|),$$

gdzie: R_m jest intensywnością w centrum kolumny (rys. 2), L jest odległością od centrum w płaszczyźnie poziomej, zaś σ jest współczynnikiem. Średnicę kolumny D określa się przez promień L_1 , przy którym $R = 1$ mm/godz.:

$$D = 2L_1 = \frac{2 \ln(R_m)}{\sigma}$$

Wzór ten zastosował E.M.Salman w latach sześćdziesiątych do radiolokacyjnych badań opadów przelotnych (w Głównym Obserwatorium Geofizycznym w Wojejkowie koło Leningradu).



Rys. 2. Wykładniczy model intensywności opadu w poziomym przekroju kolumny opadu wg Salmana

Został także zaprezentowany model opadu, który nie nadaje się do rozpatrywania pojedynczych przypadków opadu, lecz jest odpowiedni do analiz o charakterze statystycznym [51]. W modelu tym bierze się pod uwagę intensywność punktową R_p i statystyczny profil intensywności wzdłuż trasy $R_p(L)$:

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

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

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

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

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

Problematyka modelowania opadów jest szerzej ujęta w [33].

2.2. Prognozowanie tłumienia fal w liniach radiowych

Jednym z głównych celów badań propagacji fal jest stworzenie podstaw przewidywania parametrów propagacyjnych projekto-

wanych linii radiowych na podstawie znanych uprzednio charakterystyk klimatycznych regionu, w którym budowane są te linie.

Istnieje oczywisty związek pomiędzy parametrami deszczu na trasie linii radiowej i tłumieniem fali, gdy częstotliwość fali jest wyższa od 10 GHz. Można stwierdzić, że chwilowa wartość intensywności opadu uśredniona wzdłuż trasy jest skorelowana z chwilowym tłumieniem fali. Jednak punktowa wartość intensywności opadu nie jest skorelowana z tłumieniem fali w tym sensie. Jeśli natomiast wziąć pod uwagę dłuższy przedział czasu (godziny, dni, miesiące i lata), to występowanie opadu w punkcie trasy jest skorelowane z tłumieniem fali na trasie. Dlatego w skali miesiąca czy roku można szukać związku pomiędzy rozkładem intensywności opadu a rozkładem tłumienia. Należy jedynie określić funkcję, która transformuje punktową intensywność opadu na intensywność trasową bez narzucania ścisłego warunku na jednoczesność występowania tych zmiennych losowych.

Wiadomo, że w liniach radiowych jest nieuniknione pojawianie się zaników wywołanych wielodrogowością fali radiowej. Jednak udział tych zaników maleje, im krótsze są odcinki linii i im niższa częstotliwość, przy czym silniejszy wpływ na redukcję zaników wielodrogowych ma skracanie długości odcinków linii radiowej.

Wg sprawozdania CCIR [6] w przypadku głębokich zaników wielodrogowych (> 15 dB) w systemie wąskopasmowym procent czasu przeciętnego, najgorszego miesiąca roku, w którym tłumienie przekracza określony próg można wyrazić następująco:

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

gdzie f w GHz, d - długość odcinka w km, w/w_0 - iloraz mocy odpowiadający głębokości zaniku w dB. Dla Europy północno-zachodniej $KQ = 1,4 \times 10^{-8}$, $B = 1$ zaś $C = 3,5$. 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 [27].

Prognozy tłumienia spowodowanego przez opady mogą być wiarygodne, jeśli opierają się na wiarygodnych danych o opadach w przeszłości. Wiadomo, że zadawalająco wiarygodne rozkłady intensywności opadu w punkcie można uzyskać po co najmniej 5-letnim okresie pomiarów. Misme i Waldteufel [42] 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. Niewątpliwie jest, że prognozowanie winno opierać się na wieloletnim rozkładzie intensywności opadów, zaś prognozowany rozkład tłumień będzie tym samym przeciętnym dla długiego okresu czasu.

2.2.1. Formuła prognostyczna Misme-Fimbela

Jedna z najdawniej opublikowanych formuł prognostycznych została opracowana przez Mismę-Fimbela (M-F). Opiera się ona na modelu opadu przedstawionym na rys. 1 i wywodzi się z całki [41]:

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

gdzie $p(R)$ to gęstość prawdopodobieństwa punktowej intensywności opadu R w dowolnym miejscu, zaś wyrażenie $(S/S_0)p(R)$ jest gęstością prawdopodobieństwa wystąpienia opadu o intensywności R w dowolnym punkcie linii radiowej o długości L , $S_0 = \frac{1}{4} \pi D^2(R)$ jest powierzchnią przekroju kolumny opadu o średnicy $D(R)$, zaś S jest powierzchnią, na której mogą leżeć środki kolumn, mających wspólne punkty z trasą propagacji fali radiowej. Pole S wyraża się złożoną funkcją zależną od $L, D(R)$ oraz od długości cięciwy, wzdłuż której trasa fali przecina kolumnę opadu.

Gęstość $p(R)$, uzyskana z pomiarów, przedstawia się w postaci analitycznej jako rozkład logarytmiczno-normalny, którego

parametry σ i μ (odchylenie standardowe i średnia) są oszacowane z danych pomiarowych.

Opisana formuła została rozszerzona przez Misme i Waldteuffla do prognozowania tłumienia w liniach satelitarnych. Zastosowane są w niej ograniczenia pułapu o wysokości odpowiadającej 0°C i -15°C , a korekcja tłumienia fali jest uzależniona od wysokości [55]. Szerzej temat ten jest potraktowany we wspomnianej pracy [33].

2.2.2. Formuła prognostyczna Crane'a

Spośród szeregu znanych formuł prognostycznych można jeszcze wymienić formułę Crane'a [17], opartą na charakterystykach opadów zawartych w średniej-trasowej intensywności opadu. Ma ona postać:

$$A(R_p, L) = aR_p^b L_{\text{eff}}(R_p, L)$$

gdzie funkcja $L_{\text{eff}}(R_p, L)$ zawiera szereg stałych empirycznych, związanych z charakterystykami opadów.

Zależność ta pozwala obliczyć tłumienie fali przekraczane w linii o długości L w procencie czasu, w którym intensywność punktowa opadu przekracza wartość R_p . Dysponując empirycznym rozkładem $P(R_p > R_{p,i})$ oblicza się rozkład $P(A > A_i)$ dla wybranej długości trasy L , częstotliwości i polaryzacji (odpowiednie wartości a, b).

W przypadku tras satelitarnych ograniczanie trasy od góry dokonuje się według koncepcji zbliżonej do koncepcji przedstawionej w pracy [42]. Są dane, że wysokość izotermy 0°C w zakresie małych wartości względnych okresu rocznego (1% - 0,001%) jest skorelowana z intensywnością opadu. Wg [17] dla $p=0,001\%$ wysokość ta jest równa średniej wysokości izotermy -5°C . W tym modelu 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:

$$L = \frac{H}{\operatorname{tg} \varepsilon}$$

gdzie ε - kąt elewacji trasy fali. Tłumienie $A(R_p, L)$ oblicza się jak dla trasy horyzontowej, zaś tłumienie na trasie satelitarnej jest równe:

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

2.2.3. Wykładnicza formuła prognostyczna

Wg autorów pracy [51] wzór Crane'a przecenia tłumienie w zakresie małych wartości. Proponują oni prostszą zależność, nie posiadającą tej wady, opartą na wykładniczym modelu opadu wzdłuż trasy fali (pkt. 2.1).

Zależność ta ma wtedy postać:

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

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

Zaletą tej formuły jest możliwość dobrania współczynnika γ tak, by prognostyczny rozkład tłumienia dla linii doświadczalnej był zgodny z empirycznym rozkładem tłumienia, jeśli taki już istnieje.

Dla trasy satelitarnej jej długość wynosi:

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

zaś tłumienie

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

a dla $R_p > 10$ mm/godz.

$$A_s(R_p) = \frac{AR_p^b \left[1 - \exp \left(-\gamma b L \cos \epsilon \ln \frac{R_p}{10} \right) \right]}{\gamma b \ln \frac{R_p}{10} \cos \epsilon}$$

Przedstawione wyżej w skrócie wzory prognostyczne są dokładniej opisane w pracy [33].

2.2.4. Częstotliwościowe skalowanie rozkładu tłumienia

Istnieje możliwość przewidywania rozkładu tłumień w projektowanej linii radiowej, jeśli jest znany rozkład tłumień w już istniejącej linii o określonej długości L_1 , pracującej na określonej częstotliwości f_1 .

I tak, jeśli znany jest rozkład $A(f_1)$ tłumienia fali - wywołanego opadami - na częstotliwości f_1 , to można określić rozkład tłumienia na częstotliwości f_2 w linii o tej samej długości [3,18] za pomocą wzoru:

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

Istnieją również inne, bardziej złożone zależności, oparte na modelach opadu zapewniających lepszą transformację rozkładu $A(f_1)$ na rozkład $A(f_2)$, [18].

W przypadku prognozowania tłumienia na podstawie rozkładu intensywności opadu i znanych współczynników a, b dla częstotliwości f_1 i f_2 mamy wzór:

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

Przeskalowywania rozkładów tłumienia można też wykonywać, posługując się formułą proponowaną w sprawozdaniu CCIR [6].

2.2.5. 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 [18] ma postać:

$$p_2(A) = \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^r p_1\left[A \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^s\right]$$

przy czym $0,85 < r < 0,95$ i $0,35 < s < 0,45$. Oczywiście gdy r rośnie, to s maleje. Zagadnienie przekształcania rozkładów tłumienia fali na liniach radiowych jest pełniej przedstawione w pracy [33].

2.2.6. Ocena formuły prognostycznej

Przydatność wzorów prognostycznych tłumienia ocenia się przez porównanie rozkładu prognozowanego z rozkładem z pomiaru. Wg sprawozdania CCIR [10] 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

$$e_i = \frac{100(A_p - A_m)}{A_m}$$

przy czym: jeśli $|A_p(p) - A_m(p)| \leq 1$ dB, to $e_i(p) = 0$. Dysponując n wartościami $e_i(p)$ oblicza się średnie odchylenie μ oraz

standardowe odchylenie σ . Błąd średniokwadratowy (M.R.S.) = $(\mu^2 + \sigma^2)^{0,5}$ dla danej wartości p%. Podobne obliczenia należy wykonać dla wartości p od 0,1% do 0,001% lub innych.

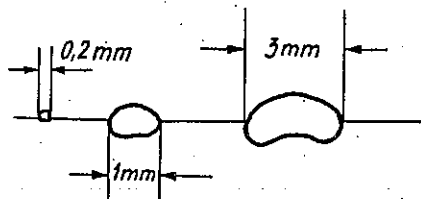
2.3. Zmiana polaryzacji fali przez niejednorodności atmosferyczne

Wykorzystanie pasma częstotliwości dla utworzenia kanałów pracujących z polaryzacją ortogonalną napotyka na ograniczenia związane z niejednorodnością ośrodka propagacji. Występowanie elementów opadu w atmosferze lub niejednorodności gradientu refrakcji są przyczyną powstawania ortogonalnej składowej fali, która przenika do drugiego kanału ortogonalnego o tej samej częstotliwości.

Ocenia 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 [27].

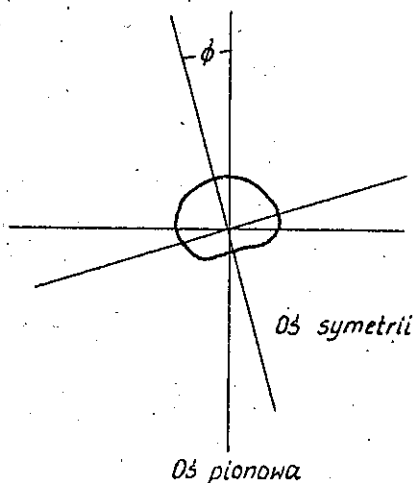
2.3.1. Depolaryzacja fali przez elementy opadu

Kropłe deszczu w trakcie opadania spłaszczają się tym bardziej, im większa jest ich średnica (rys. 3), przy czym ustalona prędkość końcowa kropeł jest w przybliżeniu proporcjonalna do pierwiastka z średnicy. Jeśli fala pada na kroplę deszczu pod pewnym kątem, to kropla ta wypromieniowuje



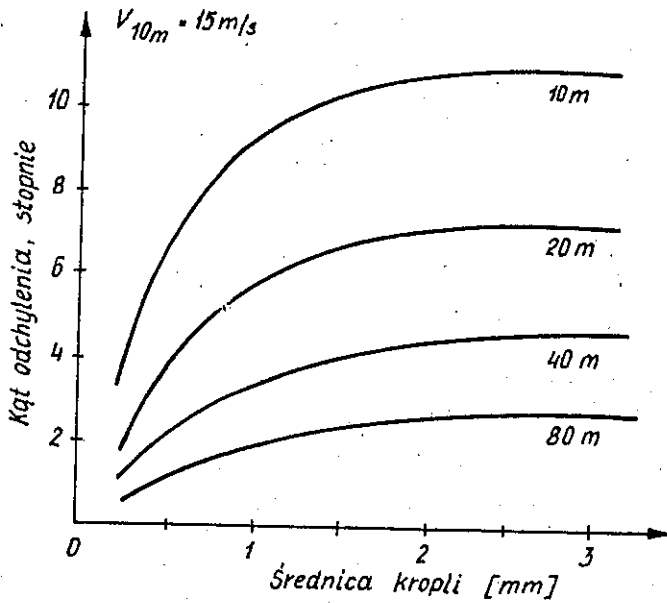
Rys. 3. Spłaszczanie kropeł deszczu podczas opadania

falę o polaryzacji fali padającej i falę o polaryzacji ortogonalnej (rys. 4).



Rys. 4. Odchylenie osi symetrii spłaszczonej kropli od pionu podczas opadania

Wobec występowania gradientu pionowej prędkości wiatru osi 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 jest tam najwyższy gradient pionowej prędkości wiatru i najsilniejsza zmiana polaryzacji fali. Również w chmurach burzowych występują silne odchylenia osi symetrii kropeł od pionu w obrębie znacznych fragmentów chmury. Problem ten rozpatrzył Brussard [4]. Obliczył on, że w przeciętnych warunkach (prędkość wiatru v na wysokości 10 m równa jest 15 m/s, zaś współczynnik nierównomierności powierzchni gruntu M jest równy 0,2) kąty odchylenia osi symetrii największych kropeł, na wysokości 10 m, osiągają 10° , zaś na wysokości 80 m - nie dochodzą do 3° (rys. 5). Według obliczeń Brussarda zależność tłumienia sygnału 18 GHz (o polaryzacji horyzontalnej i pionowej) od intensywności opadu na odcinku o długości



Rys. 5. Zależność kąta odchylenia osi symetrii od średnicy kropli na różnych wysokościach nad gruntem wg Brussarda

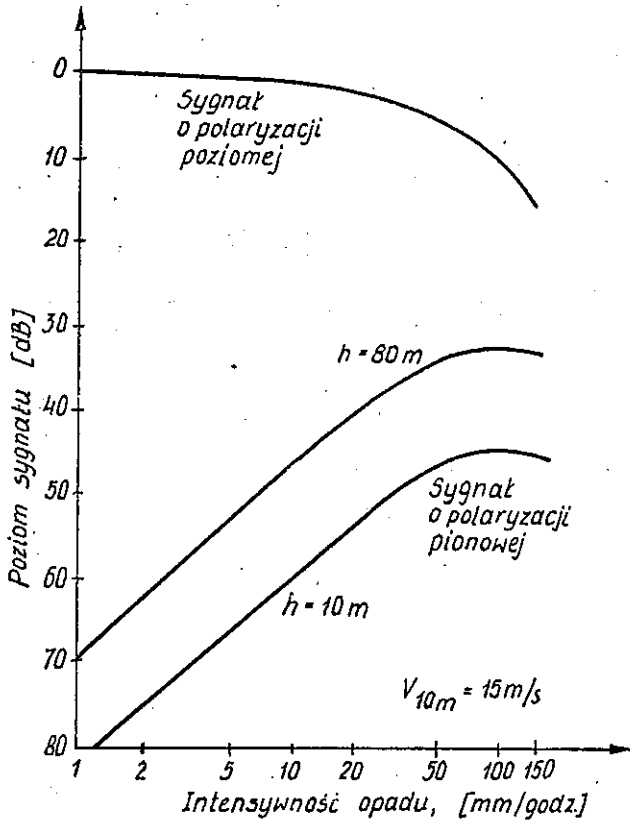
1 km można przedstawić jak na rys. 6. W obliczeniach przyjęto, że trasa linii przebiega na wysokości h równej 10 m albo 80 m, zaś prędkość wiatru v jest skierowana prostopadle do trasy przy czym jest ona równa 15 m/s. na wysokości 10 m.

Określenie statystyk składowej zdepolaryzowanej wywołanej przez deszcz przy różnych kątach padania fali jest możliwe, gdy są znane parametry rozkładu odchyień osi kropeł od pionu, a więc efektywny kąt ϕ i odchylenie standardowe σ tych kątów. Według Olsena [46] określenie niezbędnych parametrów tych statystyk jest możliwe poprzez pomiary mocy nadajników E_{1t} (kanału 1), E_{2t} (kanału 2, ortogonalnego) E_{11} i E_{22} odebranych w kanałach 1 i 2 i współczynnika depolaryzacji sygnałów D .

Jeśli przyjmąc, 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 poprzez mierzalne wielkości. Analogicznie mogą być wyrażone parametry rozkładu kąta ϕ .



Rys. 6. Zależność mocy ortogonalnych składowych sygnału na wysokości 10 m i 80 m od intensywności opadu wg Brussarda

Z kolei Valentin [53] zbadał możliwości uzależnienia depolaryzacji od intensywności opadu R dla przypadku polaryzacji zarówno liniowej jak i kołowej. Niezbędna jednak była przy tym znajomość szeregu trudno mierzalnych parametrów deszczu. W związku z tym przyjął 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 [19] wyprowadzili zależność dyskryminacji sygnału ortogonalnego (XPD) od tłumienia sygnału podstawowego (CPA) w postaci:

$$\text{XPD} = -20 \ln(\text{CPA}) - 40 \ln(\cos\alpha) - 20 \ln(\sin 2\tau) + B + 17,37\sigma^2,$$

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 tej zależności było wyznaczenie różnicy tłumień $\Delta\alpha$ i różnicy faz $\Delta\beta$ w płaszczyznach ortogonalnych na trasie fali.

W pracy [49] wyznaczono 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 wynikom otrzymanym z zależności podanej w sprawozdaniu CCIR [11]:

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

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

Półempiryczny związek podany przez Olsona i Nowlanda [47] w tejże postaci określa:

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

$$\text{dla } V = 20 \quad 8 \leq f \leq 15 \text{ GHz,}$$

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

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

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

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

Obecnie stosuje się półempiryczne metody prognozowania składowej ortogonalnej, [11]. Przyjmuje się dwuparametrowy model prognostyczny, oparty na gaussowskim rozkładzie kątów odchylenia osi symetrii kropel od pionu, w którym:

$$\text{XPD} = U - V \log(\text{CPA}) \text{ dB},$$

gdzie: $U = C(f) + D(\varepsilon) + \kappa^2 + I(\tau)$ 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 średnic kropel jest wg Lawsa-Parsonsa w temperaturze 20°C i dla szczególnej postaci efektywnej długości trasy [47]. 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 $\kappa^2 = 0,0053\sigma^2 \cdot I(\tau)$ 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 średnicy i standardowym odchyleniu σ_m , to [11]:

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

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

Ogólna metoda statystycznego przewidywania XPD jest podana w [9], zaś przegląd metod - w [45].

3. NIEKTÓRE ASPEKTY BADAŃ SATELITARNYCH LINII RADIOWYCH

Propagacja fali na trasie satelitarnej jest mniej uzależniona od zjawisk atmosferycznych niż trasa horyzontowa, gdyż niejednorodne warstwy atmosfery są ukośnie przecinane. Warto tu wyróżnić trasy satelitarne w strefach bliskich biegunów Ziemi o kątach elewacji $10-15^\circ$ i trasy satelitarne w strefach podzwrotnikowych o kątach elewacji powyżej 40° . W tych pierwszych mały kąt elewacji prowadzi do wydłużenia efektywnej długości trasy, zaś nisko zazwyczaj położona izoterma 0°C ogranicza to wydłużenie. W rejonach podzwrotnikowych i zwrotnikowych trasy są zwykle krótsze, mimo że izoterma 0°C osiąga nieraz wysokość 5-6 km.

Przykładem badań tłumienia fali wywołanego przez deszcz na trasie satelitarnej (11,7 GHz; 24°) były pomiary wykonane w stanie Massachusetts (USA) w latach 1977-79 [43]. Rezultatami były rozkłady tłumień w najgorszym miesiącu i uśrednione rozkłady w czterech porach roku i w roku, rozkłady czasów trwania zaników, szybkości narastania zaników oraz określenie korelacyjnych współczynników wiążących intensywność deszczu i tłumienie fali. Wyniki badań opublikowano w 1982 roku. Przykłady rozkładu szybkości narastania zaników w dB/s (dla zaników przekraczających 6 dB i czasów trwania zaników przekraczających 3 dB, 6 dB i 10 dB) są przedstawione na rys. 7.

W związku z tendencją do unikania przerw w transmisji wywołanych przez opady przelotne (głównie burzowe) badano zyski, wynikające z zastosowania systemu diversity, i opracowano modele prognostyczne, pozwalające przewidywać statystyczne charakterystyki propagacyjne w systemie diversity. Przykładem tu są prace Hodge'a [30], który wykorzystując metodę regresji nieliniowej i liczne wyniki pomiarów przeprowadzonych w Kanadzie, W. Brytanii, USA i Japonii, określił zysk na tłumieniu G_d wnoszony przez system diversity o bazie d km w odniesieniu do tłumienia A dB w stacji pojedynczej w postaci formuły:

$$G_d = a[1 - \exp(-bd)]$$

gdzie współczynniki regresji

$$a = 0,64A - 1,6 [1 - \exp(-0,11A)],$$

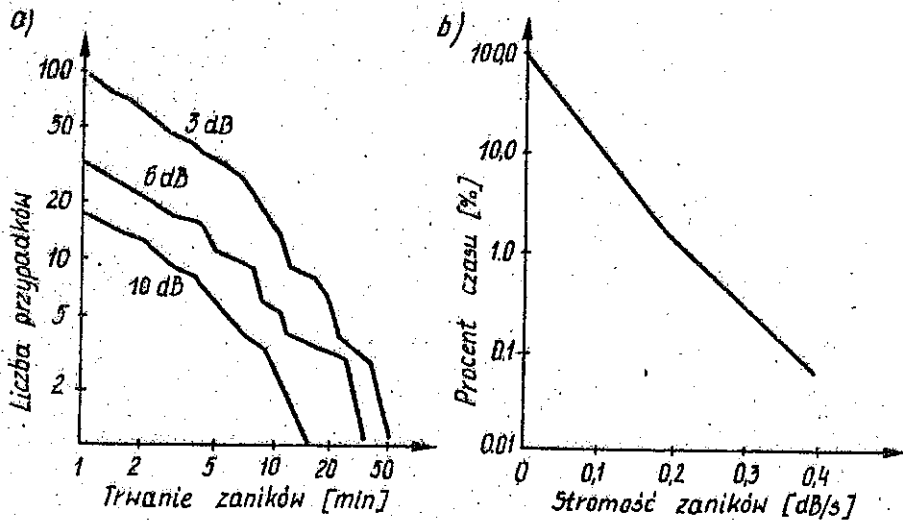
$$b = 0,585 [1 - \exp(-0,098A)].$$

Określił również zależność zysku od częstotliwości f w GHz w postaci:

$$G_f = 1,64 \exp(-0,025f)$$

a także od kąta elewacji anteny ε w stopniach

$$G_\varepsilon = 0,00492\varepsilon + 0,834.$$



Rys. 7. Rozkład czasów trwania zaników (a) i stromości zaników (b)

Inną pracą w tej dziedzinie było utworzenie modelu systemu diversity poprzez dopełnienie istniejącej trasy satelitarnej (radiolatarnia na częstotliwości 28,5 GHz na satelicie COMSTAR) trasą symulowaną za pomocą radaru. Radar wykorzystano do modelowania tłumień wywołanych przez deszczę na symulowanej trasie satelitarnej. Stwierdzono, że istotny zysk w systemie diversity powstaje już przy oddaleniu punktów odbioru sygnału o 5 km,

natomiast narastanie zysku staje się nieznaczne, gdy podstawa $d > 15$ km [26].

W badaniach uwzględniano problematykę depolaryzacji fali mierząc tłumienie różnicowe i fazę składowych ortogonalnych, a także różnice tłumień i faz na skrajach widma sygnału, mając na względzie cyfrowe linie radiowe i błędy dekodowania wywoływane deformacją widma sygnału. Przykładem tego rodzaju badań jest wykorzystanie sygnału z satelity OTS (11/14 GHz; $\epsilon = 34^\circ$) i sygnału z satelity SIRIO I (11 GHz; $\epsilon = 32^\circ$) do określenia rozkładu tłumień na trasach Ziemia - satelita i satelita - Ziemia, składowych ortogonalnych sygnału (XPD) i różnic tłumień oraz różnic faz na częstotliwościach nośnych oddalonych o 530 MHz w pasmie 11 GHz [49].

Dla celów prognozowania tłumienia tworzone modele przekroju atmosfery, które determinują efektywną długość trasy satelitarnej, ograniczając ją do izotermy 0°C (dla opadów ciągłych) lub do wysokości $1+2,5$ km wyżej (w przypadku intensywnych opadów przelotnych). Propozycje formuł prognostycznych przedstawili: Fedi [24], a także jak już wspomniano - Misme-Waldteufel [55], Stutzman-Dishman [51] i inni. Dorobek w zakresie badań tras satelitarnych jest ujęty w Sprawozdaniach CCIR 721-2 [10] i 564-3 [9].

4. CYFROWE LINIE RADIOWE

4.1. Specyfika cyfrowych linii radiowych

Od końca lat siedemdziesiątych rozpoczęło się wprowadzanie do eksploatacji cyfrowych linii radiowych (CLR). Wnikliwie badano warunki propagacji fal w zakresie częstotliwości powyżej 10 GHz do ok. 18 GHz, uwzględniając szerokie widmo modulatoryjne sygnału. Badano możliwości wykorzystania istniejących stacji przekaźnikowych pracujących w systemie linii analogowych w pasmach 2, 4 i 6 GHz, które oddalone są od siebie najczęściej o ok. 40 ± 60 km. W szczególności opracowywano problematykę:

- podziału pasma na kanały i wykorzystanie fali ortogonalnej,
- techniki modulacji wielopoziomowej modulacji z kluczowanym przesuwem fazy (PSK), amplitudy (ASK) i częstotliwości (FSK),
- przewagi cyfrowej modulacji fazowej w węzłowych punktach systemów linii radiowych nad analogową modulacją częstotliwości,
- odporności na zakłócenia systemów cyfrowych i porównanie z odpornością systemów analogowych,
- wpływu deszczu i propagacji wielodrogowej na błędy transmisji (CLR).

Odzwierciedleniem tych tendencji jest praca opublikowana w Australii w roku 1980 [31]. Opisano w niej podstawy teoretyczne projektowania CLR i przedstawiono pewne wyniki badań propagacyjnych. Fundamentalnym dziełem w tym zakresie była książka japońskiego profesora Uniwersytetu w Tokio Hirosi Inose [29].

Można podać interesujący przykład badań propagacyjnych na częstotliwości 10 GHz przeprowadzonych w Australii (rejon Melbourne), w trakcie których sprawdzono wpływ wielodrogowości i deszczu na błędy transmisji w CLR [5]. Utworzono linię na częstotliwości 11 GHz o długości 36 km nad płaskim terenem. Anteny zawieszono wysoko (130 m nad terenem) w celu zapewnienia wyraźnej różnicy faz między sygnałem bezpośrednim a odbitym od gruntu. W eksperymencie tym przestrajało nadajnik w zakresie 1 GHz z częstotliwością 5 MHz. Próbkę sygnału rejestrowano na taśmie magnetycznej w celu późniejszej obróbki w komputerze. Stwierdzono, między innymi, że tłumienia fali wywołane przez deszcze były o rząd wielkości większe od tłumień spowodowanych przez wielodrogowość fali. Te ostatnie występowały w nocy przy czystym niebie (w sytuacji antycyklonalnej). Zmierzono przebieg fazy i amplitudy sygnału bezpośredniego i odbitego w zależności od częstotliwości w zakresie przestrajania nadajnika. Stwierdzono, że zaniki wielodrogowe mają charakter selektywny, zaś wpływ opadów można uznać za nieselektywny w całym pasmie 1 GHz. Ze względu na błędy transmisji cyfrowej istotny jest margines tłumienia na zaniki, który w porównaniu

z marginesem w systemie wąskopasmowym jest tym większy, im szersze jest widmo modulacyjne sygnału, a tym samym i pasmo linii cyfrowej. Problematyka ta znalazła swoje odbicie w Sprawozdaniu CCIR [6].

Korzystając z pracy F.Fedi [23] i dokumentów CCIR można zaprojektować optymalną długość skoku linii cyfrowej w pasmie 11+18 GHz, gdy pomija się zaniki wielodrogowe. Niezbędną informacją do procedury projektowania jest rozkład intensywności opadów $P(R)$ w rejonie budowy linii odnoszący się do przeciętnego roku. Konieczne są też prognostyczne rozkłady tłumienia fali na wybranej częstotliwości obliczone dla różnych długości skoku.

Współczynnik dostępności linii P_{av} dla linii cyfrowej o długości 2500 km według Zaleceń CCIR [7, 13, 14] jest równy 0,3% roku, zaś dla linii o długości L :

$$P_{av} = 0,3 \left(\frac{L}{2500} \right) = 1,2 \times 10^{-4} L\% \text{ roku.}$$

Z kolei wg wymagań CCIT dopuszczalna liczba błędów na 1000 bitów wynosi $BER_M = 10^{-3}$. Linia jest niedostępna jeśli na jakimkolwiek odcinku $BER > BER_M$ w ciągu co najmniej dziesięciu 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 o długości 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 [23].

Prawdopodobieństwo wystąpienia tłumienia A_R , wywołanego przez deszcz na odcinku L , większego od marginesu $M(L)$, określa prawdopodobieństwo wystąpienia przerwy w linii:

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

Jeśli przyjąć margines na tłumienie dla wzorcowego 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 obliczyć funkcję $P_{av}(L)$. Punkt przecięcia tych funkcji wyznacza optymalną długość skoku.

W przypadku linii składającej się z n odcinków długość całkowita linii jest równa:

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^n L_i$$

a stąd $P_{av} = 1,2 \times 10^{-4} \mathcal{L}$. Jeśli przyjąć, że stacje przekaźnikowe są typu regeneracyjnego, a zjawiska wywołujące tłumienie przekraczające margines są statystycznie niezależne w poszczególnych odcinkach, to warunek na niezawodność dla n -odcinkowej linii ma kształt:

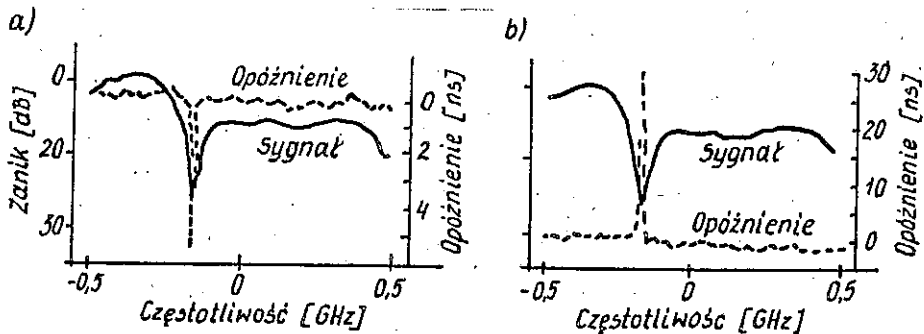
$$\sum_{i=1}^n P[A_R(L_i) \geq M(L_i)] \leq P_{av}(\mathcal{L}).$$

5. PROBLEMATYKA BADAŃ W LATACH OSIEMDZIESIĄTYCH

W ostatnich latach (1982-1986) analizowano i pogłębiano teoretyczny opis zjawiska wielodrogowego odbioru sygnału. Wiąże się to z faktem dominacji zaników wielodrogowych nad tłumieniem spowodowanym przez deszcze na odcinkach dłuższych od 50 km, a takie są przeciętnie odległości między dawniej zbudowanymi stacjami przekaźnikowymi, których wykorzystanie nakażą względy ekonomiczne. W celu gruntownego przebadania warunków wielodrogowej propagacji fal przeprowadzono koło Paryża w 1982 roku specjalny eksperyment (nazwany PACEM 1), podczas którego dokładnie określono warunki meteorologiczne propagacji

wielodrogowej [15]. Posługiwano się przy tym urządzeniami różnego typu w celu określenia pionowego profilu dolnej warstwy atmosfery (balon na uwięzi z czujnikami wilgotności, temperatury i ciśnienia, radar akustyczny, lidar, wieża 100-metrowej wysokości z czujnikami wilgotności, temperatury, ciśnienia i wiatru). Wyniki badań pozwoliły na utworzenie modelu umożliwiającego przewidywanie ewolucji gradientu refrakcji w pionowej płaszczyźnie, a tym samym warunków wielodrogowej propagacji fali [34]. Wyniki pomiarów wykorzystano do opracowania licznych modeli warunków propagacji fal lub modeli systemów odbiorczych.

W ten sposób stworzono podstawy do statystycznego opracowania modelu funkcji przenoszenia kanału linii radiowej w warunkach wielodrogowej propagacji fali [52] i wykorzystania tego modelu do przewidywania prawdopodobieństwa wystąpienia przerw w transmisji. Modele dwu lub trzy drogowej propagacji fali pozwalają obliczyć długości przerw transmisji z zastosowaniem różnych rodzajów systemów modulacji i porównywać te systemy pod względem niezawodności transmisji. Do oceny modeli wykorzystano posiadane dane doświadczalne. Ilustrację zaników wielodrogowych o selektywnym charakterze przedstawia rys. 8. Widać na nim; że w pasmie 1 GHz oprócz zaniku amplitudy występuje również skok opóźnienia sygnału równy 18 ns. (na rys. 8) lub skok wyprzedzenia równy 30 ns. Badana linia pracowała w zakresie częstotliwości 10,7-11,7 GHz.



Rys. 8. Przykłady zaników selektywnych w liniach szerokopasmowych (a) i (b)

Problem liczby statystycznych parametrów niezbędnych do określenia modelu funkcji przenoszenia kanału linii radiowej był rozpatrywany w pracy [35]. Autorzy uzyskali uniwersalny model funkcji oparty na trzech parametrach.

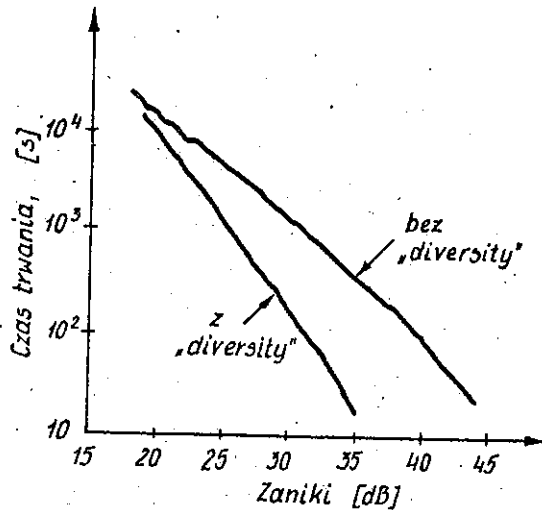
Z kolei szybką ocenę linii cyfrowej, jedynie na podstawie liczby błędnych bitów na sekundę (BER), opracował autor pracy [38]. Metoda pozwala obliczyć BER dla różnych typów wielopoziomowej modulacji cyfrowej. Natomiast w pracy [40] oblicza się statystyki BER dla linii radiowej w trakcie wielodrogowej propagacji fali na podstawie znajomości współczynnika szumów odbiornika i próbek funkcji przenoszenia atmosfery.

Przykład możliwości symulacji horyzontowej linii radiowej za pomocą układów elektronicznych jest przedstawiony w pracy [54]. Elektroniczny symulator pozwala generować zaniki wielodrogowe. Symulator może też tworzyć funkcję przenoszenia kanału przez kształtowanie charakterystyki amplitudy i grupowego opóźnienia sygnału za pomocą 13-segmentowego filtra. W efekcie uzyskuje się sygnał o charakterze selektywnego zaniku wielodrogowego w pasmie 50 MHz.

Możliwości redukcji zakłóceń transmisji wywołanej wielodrogowością są rozpatrywane w pracy [37]. Stosowanie systemu diversity w przestrzeni jest jednym z takich sposobów, zmniejszającym błędy transmisji. Przykładem efektywności systemu diversity jest odcinek linii 11 GHz o długości 50 km, w której anteny odbiorcze są rozstawione w pionie w odstępach 7 m. Otrzymane rozkłady tłumień przedstawia rys. 9.

Godnym podkreślenia efektem prac w tym zakresie jest model opracowany do komputerowej symulacji efektu wielodrogowości i określania związków między ortogonalnymi składowymi sygnału, a więc między tłumieniem składowej podstawowej (CPA) i dyskryminacją składowej ortogonalnej (XPD) [16]. Uwzględnia on krzywiznę Ziemi, kierunkowe charakterystyki anten, odbicie fali od gruntu. Informacją wejściową symulatora jest pionowy profil wskaźnika refrakcji.

Warto także wyróżnić pracę publikującą wyniki sześciolletnich badań cyfrowej linii radiowej z modulacją fazową (8 PSK)



Rys. 9. Zależność czasu trwania zaników od przekroczenia progu głębokości zaniku w systemie diversity w przestrzeni i bez diversity

o przepływności 140 Mbit/s, pracującej w pasmie 10,7-11,7 GHz na odcinku o długości 50 km [36]. W wyniku badań uzyskano rozkłady czasów trwania przerw transmisji w zależności od głębokości zaników w pobliżu marginesu tłumienia przy odbiorze z pojedynczą anteną lub w systemie diversity. Określono histogramy czasów trwania zaników oraz dobowe i roczne cykle zaników, przekraczających wybrane poziomy również z pojedynczą anteną i z uwzględnieniem systemu diversity. Stwierdzono różnicę między marginesem tłumienia wąsko- i szerokopasmowym (flat i net margin).

Można oceniać, że w najbliższych latach problematyka badań propagacji fal będzie się koncentrować na cyfrowych liniach radiowych o coraz wyższych przepływnościach, pracujących na częstotliwościach powyżej 11 GHz do ok. 20 GHz na odcinkach o długościach od kilku do 50 km. Mając na uwadze obniżenie kosztów i skrócenie czasu trwania badań nowych rozwiązań linii radiowych, do prognozowania parametrów niezawodnościowych tych linii będą stosowane metody symulacji zjawisk propagacyjnych

czy to za pomocą komputerów, czy specjalnych symulatorów elektronicznych.

Położony zostanie nacisk na prognozowanie dyskryminacji sygnału ortogonalnego (XPD) oraz izolacji tegoż sygnału (XPI), co będzie wymagało badań eksperymentalnych w różnych regionach świata. W miarę opanowywania wyższych zakresów częstotliwości będzie narastało znaczenie badań propagacyjnych, gdyż coraz więcej zjawisk atmosferycznych staje się czynnikami obniżającymi niezawodność pracy systemów linii radiowych.

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, Brighton, October 1987.
2. Barbaliscia F., Fedi F.: Rainfall intensity statistical properties and prediction techniques. Ann. Telecom. 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, vol. 1,5 - 11, 1976.
5. Bundrock A.J., Murphy J.V.: A broad-band 11 GHz propagation experiment. IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-32, No. 5, 1984.
6. CCIR Rep. 338-5.: Propagation data and prediction methods required for line-of-sight radio-relay systems, vol. V, Dubrownik 1986.
7. CCIR: Rep. 378-4. Characteristics of digital radio-relay systems. vol. IX, part. Geneva 1982.
8. CCIR: Rep. 563-3. Radiometeorological data, Dubrownik 1986.
9. CCIR: Rep. 564-3. Propagation data and prediction methods required for Earth-space telecommunication systems. Vol. V, Dubrovnik 1986.
10. CCIR: Rep. 721-2. Attenuation by hydrometeors in particular by precipitation and other atmospheric particles, vol. V, Dubrovnik 1986.
11. CCIR: Rep 722-1. Cross-polarisation due to atmosphere. vol. V, Dubrovnik 1986.

12. CCIR: Rep. 723-2. Worst-month statistics, vol. V, Dubrovnik 1986.
13. CCIR: Zalecenie 556. Hypothetical reference digital path for radio - relay systems for telephony; systems with capacity above the second hierarchical level. vol. IX, part I, Geneva 1982.
14. CCIR: Zalecenie 557. Availability objective for a hypothetical reference circuit and hypothetical reference digital path. Vol. IX, part I, Geneva 1982.
15. Claverie J., Klapisz C.: Meteorological features leading to multipath propagation observed in PACEM 1 experiment, Annales Telecom., vol. 40, No. 11-12, 1985.
16. Costa E.: A simulation of multipath effects on the cross-polarisation discrimination in microwave line-of-sight links. Annales Telecom., vol. 41, No. 3-4, 1986.
17. Crane R.K.: Prediction of attenuation by rain. IEEE Trans. Comm., Com. 28-9, 1980, pp. 1717-1733.
18. Debrunner W.: Prediction of rain attenuation statistics. Ann. Telecomm., vol. 35, No. 11-12, 1980.
19. Dissanayke A.W., Havorth D.P., Watson P.A.: Analytical models for cross-polarisation on earth-space radio-paths for frequency rang 9-30 GHz. Ann. Telecomm., vol. 35, No. 11-12, 1980.
20. Dok. roboczy CSRS: Przegląd teoretyczny procedur prognozy stycznych tłumienia wywołanego przez deszcze i porównanie z wynikami eksperymentów w 1985 roku w Dubnej.
21. Dok. roboczy CSRS: Wkład do prac teoretycznych w zakresie propagacji fal. Dubna 1987.
22. Draper N.R., Smith H.: Analiza regresji stosowana. PWN, Warszawa 1973.
23. Fedi F.: Prediction of attenuation due to rainfall on terrestrial links. Radio Science, vol. 16, No. 5, September - October 1981.

24. Fedi F.: Rainfall characteristics across Europe, *Alta Fr.*, vol. 48, No. 4, 1979.
25. Fedi F.: The Eurocop-Cost 25/4 project on radiopropagation above 10 GHz. *Alta Fr.*, vol. 48, No 4, 1979.
26. Goldhirsh J., Space diversity performance prediction for Earth-satellite paths using radar modelling techniques, *Radio Sc.*, vol. 17, No. 6, 1982.
27. Hall M.P.M.: Effects of the troposphere on the radiocommunication Peter Peregrinus Ltd, . IEE, Londyn, N.York, 1979.
28. Harden B.N., Norbury J.R., White W.J.K.: Estimation of attenuation by rain on terrestrial radio links in U.K. at frequencies from 10 to 100 GHz. *Microwaves, optics and acoustics*, vol. 2, No 4, 1978.
29. Hiroshi Inose: An introduction of digital communication systems. University Press, Tokyo, 1979, Peregrinus P.,U.K, 1979.
30. Hodge D.B.: An improved model for diversity gain on earth-space propagation paths. *Radio Sc.*, vol. 17, No 6, 1982.
31. Horton R., Lobert O.: Digital radio systems: part I-Status, application and performance of medium capacity systems, *A.T.R.*, vol. 14, No. 2, 1980.
32. Ishimaru A., Cheung R.: Multiple scattering effects on wave propagation due to rain, *Annales Telecom.*, vol. 35, No. 11-12, 1980.
33. Kawecki A.: Kompleksowe badania propagacji fal w liniach satelitarnych i horyzontowych. *Biul. Inf. IL*, nr 9-10, 1988.
34. Klapisz C., Weill A.: Modelisation semi-empirique de la couche limite nocturne. Application au calcul du profil d'indice de refraction. *Annales Telecom.*, vol. 40, No. 11-12, 1985.

35. Lavergnat J., Sylvain M.: Statistics on the multipath transfer function in medium bandwidth: Application to prediction of quality, vol. 40, No. 11-12, 1985.
36. Leclert A., Pinault J.C., Vandamme P.: Mesures des effets de la propagation sur un faisceau hertzien numerique a 140 Mbit/s utilisant une modulation a huit etats de phase. Annales Telecom., vol. 40, No. 11-12, 1985.
37. Leclert A., Vandamme P.: Countermeasure techniques for digital radiosystems in the presence of selective fading, vol. 40, No. 11-12, 1985.
38. Levy A.J.: Error rate performance of high level modulation techniques in selective fading periods. Ann. Telecom., vol. 40, No. 11-12, 1985.
39. 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.
40. Mayarargue S.: Parametric characterisation of radio channel transfer function leading to BER evaluation, vol. 40, No. 11-12, 1985.
41. Misme P., Fimbel J.: Determination theorique et experimentale de l'afaiblissement par la pluie sur un trajet radioelectrique. Ann. Telecom., vol. 30, May - June 1975.
42. Misme P., Waldteufel P.: Affaiblissements calcules pour liaisons Terre-satellite en France. Ann. Telecom., vol. 37, No. 7-8, 1982.
43. Naconay D.G., Davidson D.: Results of 11,7 GHz CTS rain measurements at Waltham-Messachusetts, Radio Sc., vol. 17, No. 6, 1982.
44. Oguchi T.: Summary of studies on scattering of centimeters and millimetre waves due to rain and hail. Annales Telecom., vol. 36, No 7-8, 1981.

45. Olsen R.L.: Cross-polarisation during precipitation on terrestrial links: A review, Radio Science, vol. 16, No. 5, 1981.
46. Olsen R.L.: Theory of measuring the effective polarisation parameters of rain from orthogonal linearly polarised transmissions. Ann. Telecomm., vol. 36, No. 7-8, 1981.
47. 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.
48. Olsen R.L., Rogers D.V., Hodge D.B.: The aR^b relation in the calculation of rain attenuation. IEEE Trans. AP, USA, vol. 26, 1978.
49. 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.
50. Segal B.: Analytical examination of mathematical models for the rainfall rate distribution function. Ann. Telecom., vol. 35, No. 11-12, 1980.
51. Stutzman W.L., Dishman W.K.: A simple model for estimation of rain induced attenuation along earth-space paths at millimeter wavelengths. Radio Science, vol. 17, No. 6, Norember - December 1982.
52. Sylvain M., Lavergnat J.: Modelling the transfer funktion in medium bandwith radio-channels during multipath propagation. Ann. Telecom., vol. 40, No. 11-12, 1985.
53. Valentin R.: Probability distribution of rain induced cross-polarisation. Ann. Telecomm., vol. 36, No. 1-2, 1981.
54. Vandamme P., Clavier R., Acx M.: Conception and realisation d'un simulateur de canal hertzien. Annales Telecom., vol. 41, No. 11-12, 1986.

55. Waldteufel P., Misme P.: Amelioration du modele pour le calcul des attenuations dues a la pluie sur un trajet Terre-espace et etude du sensibilite aux parametres. Ann. Telecomm., vol. 36, No. 7-8, 1980.

ISSN 0209-1046

