

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA-MIEDZESZYN

BIBLIOTEKA
Instytutu Łączności

PROBLEMY

ŁĄCZNOŚCI

114

1974

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI



PROBLEMY ŁĄCZNOŚCI

ROK 14

WARSZAWA 1974

NR 114

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

Branżowy Ośrodek
Informacji Naukowo-Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Problemów Łączności

Redaktor Naczelny - mgr inż. Jerzy Rutkowski

Redaktorzy działów:

mgr inż. Władysław Cetner, doc. mgr inż. Adam Moniuszko,
mgr inż. Józef Mozejko

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowo-Technicznej i Ekonomicznej

Warszawa-Miedzeszyń, ul. Szachowa 1

NA PRAWACH RĘKOPISU - DO UŻYTKU SŁUŻBOWEGO

Redaktor: J. Borkowska

Montaż tekstu: B. Drabik

Dział Wydawniczy Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 570 . Wpłynęło do
Działu Wydawniczego 19.02.1974 r.
Druk ukończono w kwietniu 1974 r.

PROBLEMY ŁĄCZNOŚCI

Opracowanie tłumaczeń

ZAGADNIENIA DOTYCZĄCE PROPAGACJI FAL POWYŻEJ 10 GHz

Opracował A. Dusiński

SPIS TRESCI

	Str.
1. Blevis B.C. : Przegląd propagacyjnych skutków w łączności Ziemia - kosmos na częstotliwościach większych niż 10 GHz	1
2. Eklung F. : Przegląd zagadnień propagacyjnych związanych z łącznością radiową na ziemskich trasach w zakresie częstotliwości większych niż 10 GHz	33
3. Sokolov A.V., Sukhonin E.V. : Propagacja submilimetrowych fal radiowych w atmosferze Ziemi	87

ZAGADNIENIA DOTYCZĄCE PROPAGACJI FAL
POWYŻEJ 10 GHz

621.371.029.64/.55

PRZEGLĄD PROPAGACYJNYCH SKUTKÓW
W ŁĄCZNOŚCI ZIEMIA - KOSMOS
NA CZĘSTOTLIWOŚCIACH WIĘKSZYCH NIŻ 10 GHz

Opracował A. Dusiński na podstawie referatu Blevis B.C.: Effects on Earth - Space Communications at Frequencies Greater than 10 GHz - A Review, wygłoszonego na XVII Generalnej Konferencji URSI w Warszawie, w dniach 21-29.8.1972 r.

1. WSTĘP

Przy projektowaniu połączeń radiowych Ziemia - kosmos na częstotliwościach większych niż 10 GHz szczególną rolę odgrywają takie parametry propagacyjne, jak: tłumienie, emisja szumów, miganie fazy i amplitudy sygnału. Parametry te są skutkami występowania w troposferze pewnych zjawisk fizycznych. Znaczny wzrost zainteresowania parametrami propagacyjnymi datuje się od ostatniej Światowej Administracyjnej Konferencji Radiokomunikacyjnej poświęconej Telekomunikacji Kosmicznej /World Administrative Radio Conference on Space Telecommunications - WARC/, której celem było uzgodnienie przydziałów częstotliwości dla służb kosmicznych. Wybór częstotliwości dla rozmaitych służb poprzedziło wiele badań skoncentrowanych na projektowaniu systemów wykorzysta-

jących pas:na częstotliwości wyznaczone na tej konferencji.

Opracowanie niniejsze przedstawia efekty propagacji troposferycznej raczej ze statystycznego punktu widzenia projektanta systemów niż radiofizyka, który zajmuje się wyjaśnieniem zjawisk zachodzących w troposferze.

2. CZĘSTOTLIWOŚCI W ŁĄCZNOŚCI ZIEMIA - KOSMOS

Częstotliwości przeznaczone dla kosmicznych systemów łączności zostały ustalone na Światowej Administracyjnej Konferencji Radiokomunikacyjnej wyłącznie w zakresie częstotliwości radiowych do 275 GHz. Rysunek 1^{x/} przedstawia zestawienie ustaleń WARC dla różnych służb w zakresie częstotliwości od 10 do 275 GHz. Zestawienie to nie uwzględnia ustaleń dotyczących wyłącznych i wspólnych zakresów dla poszczególnych regionów świata oraz o kategoriach służb.

Dla uzupełnienia należy dodać, że zaleca się dla celów badawczych, przede wszystkim wykorzystywać przydziały przeznaczone dla badań kosmosu, radioastronomii i służb łączności między satelitami.

Pomimo obszernych przydziałów dla rozmaitych służb, częstotliwości z zakresu powyżej 10 GHz nie są szeroko wykorzystywane w radiokomunikacji kosmicznej. Satelita Stanów Zjednoczonych ATS-5 jest jedynym satelitą, który został wypuszczony z radiolantarnią pracującą na częstotliwości powyżej 10 GHz. Oczywiście są planowane inne satelity, jak np. włoski SIRIO, kanadyjsko-ame-

^{x/} Rysunki są zamieszczone na końcu artykułu.

rykański Communications Technology Satellite i ATS-F^{x/}.

Jasne jest, że wczesny rozwój niedawno wyznaczonych pasm częstotliwościowych dla radiokomunikacji kosmicznej będzie skoncentrowany na wykorzystaniu pasm 12 i 14 GHz przez stacjonarną służbę satelitarną i służbę radiodifuzji satelitarnej. Ma to wpływ na pierwszeństwo przeprowadzenia pomiarów propagacyjnych z myślą o tych specyficznych zastosowaniach.

3. EFEKTY PROPAGACYJNE

Jednym ze znanych efektów propagacyjnych towarzyszących w szczególności radiokomunikacji w relacji Ziemia - kosmos jest tłumienie sygnałów spowodowane pochłanianiem przez gazy atmosferyczne oraz pochłanianiem i rozproszeniem przez hydrometeory, jak opady, mgły itp. Efekty te są szczególnie ważne dla częstotliwości powyżej 10 GHz i mogą przeważać w wielu praktycznych sytuacjach. Spadek poziomu odbieranego sygnału może również wynikać z rozbieżności promienia anteny naziemnej stacji i z dekorelacji fazy przez aperturę anteny.

Rozbieżność promienia lub rozogniskowanie są wytworzone przez regularną refrakcję w atmosferze. Dekorelacja fazy lub niespójność czoła fali są spowodowane przez nieregularne turbulencje. W dodatku amplituda, faza i kątowne migotanie mogą spowodować fluktuacje natężenia pola sygnału i kąta nadejścia. Skutki migotania zmniejszają się na ogół ze wzrostem kąta elewacji i nie mają, z punktu widzenia łączności, większego znaczenia dla kątów więk-

^{x/} Dane te odnoszą się do okresu, w którym pisany był artykuł. Obecnie satelity te znajdują się już na orbitach /przyp. red./.

szych niż 3° . Natomiast dla nieco większych kątów elewacji może utrzymywać się duża amplituda zaników przy dużej skali zmian wskaźnika refrakcji. Nie będą tu omawiane skutki rozproszenia przez opady i powstawanie duktów. Większe zainteresowanie tymi skutkami wykazuje CCIR ze względu na wzajemne oddziaływanie systemów komunikacyjnych ziemskiego i kosmicznego, wykorzystujących te same pasma częstotliwości.

4. POCHŁANIANIE PRZEZ GAZY ATMOSFERYCZNE

Pochłanianie przez gazy atmosferyczne, w interesującym nas zakresie częstotliwości, jest niemal wyłącznie spowodowane przez obojętny tlen i parę wodną. Szczególną rolę tych gazów tłumaczy się tym, że molekuly tlenu mają stały moment magnetyczny, zaś biegunowe molekuly pary wodnej mają stały moment elektryczny. Największe pochłanianie występuje w okolicach własnych częstotliwości wirowego widma molekuł. Dla tlenu istnieje szereg linii pochłaniania w pobliżu 60 GHz, które nie występują zdecydowanie w niższej atmosferze, oraz istnieje jedna linia na częstotliwości 119 GHz.

Pomiary pochłaniania przez tlen wykazują sensowną zgodność z teoretycznymi obliczeniami wykonywanymi według wzoru van Vleeka i Weisskopfa. Według badań przeprowadzonych w ZSRR [1], zgodność ta jest poprawna, jeśli stała związana z szerokością linii dla linii pochłaniania 119 GHz jest większa od takich stałych dla innych linii pochłaniania.

Widmo pary wodnej ma rezonansowe maksima na częstotliwościach 22,2 GHz, 183 GHz i większych częstotliwościach. Obliczenia tłu-

mienia przez parę wodną mogą być obarczone pewnym błędem. Na ten temat prowadzone były w Stanach Zjednoczonych wyjaśniające sprzeczności na bazie nierezonansowej dyspersji [2].

Na rysunku 2 przedstawione są wyniki teoretycznych oszacowań całkowitego tłumienia przy założeniu umiarkowanego klimatu /wilgotności pary wodnej na powierzchni Ziemi $7,5 \text{ g/m}^3$ dla tras przebiegających poziomo H lub pionowo V przez atmosferę [3]. Rysunek przedstawia również granice tłumienia zenitalnego, odpowiadającego całkowicie suchej i nasyconej atmosferze, licząc od powierzchni Ziemi do tropopauzy, wskazując na znaczne zmiany tłumienia spowodowanego pochłanianiem przez parę wodną w zależności od jej nasycenia.

Przy założeniu płaskiej Ziemi, tłumienie jako funkcja kąta elewacji jest określone przez zenitalne tłumienie pomnożone przez cosecans kąta elewacji. Z powodu istnienia jednak krzywizny Ziemi i występowania refrakcji, prawo cosecansa jest spełniane dla kątów elewacji większych niż około 5° . Istnieje szereg niejasności, na przykład jak wydzielić z całkowitego tłumienia przez atmosferę pasmo linii pochłaniania tlenu na częstotliwości 60 GHz.

Litery A i B na rysunku 2 oznaczają zakresy zmian wartości tłumienia zależnego od pochłaniania przez poszczególne linie tlenu. Maksimum krzywej oznacza zenitalne tłumienie pochodzące od linii tlenu najsilniejszego pochłaniania.

5. TŁUMIENIE SPOWODOWANE PRZEZ OPADY

Poza maksimami pochłaniania przez tlen i parę wodną ważne jest dla projektantów systemów tłumienie powodowane przez deszcz,

chmury i mgłę. Jednak czas występowania tego tłumienia stanowi bardzo mały procent interesującego nas czasu.

Na rysunku 3 przedstawiono krzywe opisujące zależność współczynnika tłumienia od częstotliwości dla różnych jakościowo zdarzeń występowania deszczu i chmur. Krzywe te są wynikiem obliczeń opartych na znanym rozkładzie Lawsa i Persons'a rozmiarów kropli dla temperatury 0°C . Współczynnik tłumienia szybko rośnie ze wzrostem częstotliwości i osiąga wartości bliskie pewnemu stałemu poziomowi dla częstotliwości znacznie mniejszych niż 100 GHz. Krzywe te pochodzą od R. K. Crane ze Stanów Zjednoczonych [3]. Podobne obliczenia były wykonane w innych krajach i stanowiły kontynuację pracy rozpoczętej w Wielkiej Brytanii. Ostatnie obliczenia wykonane w Wielkiej Brytanii przewidują, że tłumienie dla częstotliwości 100 GHz może być większe niż dla 900 GHz [4].

Zakładając, że rozkłady rozmiarów kropli objętości wody lub intensywność deszczu są znane lub mogą być założone, można teoretycznie obliczyć tłumienie powodowane przez hydrometeory, tzn. przez zjawiska meteorologiczne różne od chmury, składające się ze zbioru cząsteczek wody w stanie ciekłym lub stałym, opadających lub unoszonych przez wiatr albo też osadzonych na przedmiotach znajdujących się na powierzchni Ziemi lub w atmosferze, np.: deszcz, mżawka, grad, szron, mgła. Jednak w aktualnej praktyce prognozowanie tłumienia powodowanego przez opad deszczu dla bardzo małego procentu czasu interesującego kosmiczne systemy telekomunikacyjne jest trudne ze względu na znaczne zmiany rozkładów w przestrzeni i czasie opadu deszczu. Pożądana jest więc metoda, która by bardziej precyzyjnie brała pod uwagę charakterystyki deszczu dla różnych lokalizacji w przedziałach czasu, dla których

łatwo są osiągalne właściwe dane meteorologiczne. Tłumienia spowodowane przez lodową chmurę, suchy grad i śnieg mogą być zaniedbane w porównaniu z tłumieniem powodowanym przez deszcz. Natomiast ważną rolę może odgrywać chmura wodna ze względu na dużą gęstość ciekłej wody. W praktyce jednak trudne są do wydzielenia skutki jej istnienia spośród skutków powstałych z powodu deszczu.

5.1. Metody pomiarowe

Większość długotrwałych pomiarów tłumienia spowodowanego przez opady była prowadzona na ziemskich trasach linii o zasięgu optycznym. Istnieje jednak pewna liczba danych pomiarowych osiągalnych z pomiarów pośrednich lub bezpośrednich, przeprowadzonych na ukośnych trasach. Bezpośrednie pomiary dotyczą wykorzystania naturalnych lub sztucznych źródeł promieniowania, takich jak radiolatarnie samolotów, satelitów lub emisja szumów słonecznych. Doświadczenia, które przeprowadzono z radiolatarniami umieszczonymi na samolocie lub satelicie, z powodu praktycznych trudności, wykazały, że nie są one zadowalające do uzyskania statystycznej informacji o tłumieniu przez deszcz. Natomiast pomiary wykorzystujące radiometry śledzące Słońce zależą od zmian występowania zjawiska intensywnego opadu deszczu w ciągu dnia. Związana z tym zmiana kąta elewacji zależnego, z założenia, od tłumienia przez deszcz ogranicza wartość użytkową wyników tych pomiarów.

Jako pomiary pośrednie wykorzystuje się obserwacje radarowe odbić lub radiometryczne pomiary temperatury szumów nieba. Ist-

nieje zawsze tendencja sprawdzania korelacji wyników otrzymanych w wyżej wspomniany sposób z wynikami obliczeń wykorzystującymi pomiary opadu deszczu przeprowadzane deszczomierzami zainstalowanymi na powierzchni Ziemi. Mimo że wyniki doświadczeń opartych na podstawach o charakterze chwilowych zjawisk nie dostarczają wyczerpujących informacji, to jednak ze statystycznego punktu widzenia korelacja może być dość dobra.

Badania radiometryczne są odpowiednie przede wszystkim dla zbierania danych statystycznych. Natomiast ograniczone są możliwości wykorzystania wyników tej metody pomiarowej dla obliczenia wartości największego tłumienia dla danej częstotliwości.

W licznych badaniach próbowano wiązać obliczone wartości z wynikami pomiarów tłumienia. Badania takie wykonano między innymi w Stanach Zjednoczonych [5,6] i Kanadzie [7]. Rys. 4 przedstawia wyniki doświadczenia przeprowadzonego w Kanadzie. Tłumienie obliczone z pomiarów temperatury szumów nieba porównano z wartościami bezpośrednich pomiarów wykorzystujących radiolatarnię umieszczoną na satelicie ATS, pracującą na częstotliwości 15 GHz. Rys. 4 przedstawia wyniki, jakie otrzymano 28 lipca 1970 r. w środku dnia, podczas silnej ulewy z piorunami. Tłumienie przekraczało wówczas 10 dB w ciągu 15 minut. Środkowa linia została wyznaczona przy założeniu wartości skutecznej średniej temperatury równej 278°K . Pozostałe krzywe przedstawiają błędy w obliczeniach tłumienia powstałe na skutek zmian założonej temperatury o $\pm 10^{\circ}$ i $\pm 20^{\circ}\text{K}$.

Rysunek 5 przedstawia podobne wyniki otrzymane 3 wrześni 1970 r. podczas względnie ciągłego deszczu charakteryzującego się zróżnicowanymi warunkami padania.

Jednak więc widać, pomiary radiometryczne emisji szumów mogą dostarczyć prostych i dokładnych środków do otrzymania statystyk tłumienia przez deszcz dla tłumień nie przekraczających około 10 dB. Wartości większe od podanych mogą być otrzymywane z przeliczeń w skali częstotliwości.

5.2. Prognozowanie tłumienia spowodowanego przez deszcz

W związku z potrzebami planowania rozwoju służb kosmicznych, CCIR przedstawił, w postaci opracowania dla WARC, metodę prognozowania wartości spodziewanego tłumienia, które mogą być przekraczane w różnych procentach średniego roku w różnych warunkach klimatycznych [8]. Planowano, że procedurę prognozowania będzie się wykorzystywać tylko wtedy, kiedy brak będzie bardziej miarodajnych informacji dla danego miejsca. Pierwsza część procedury wymaga znajomości liczby stref klimatycznych deszczu. Takie wyszczególnienie nieco arbitralnie zdefiniowanych stref przedstawia rys. 7. Definicje te oparte są częściowo na danych meteorologicznych przedstawiających sumy opadu deszczu i częściowo na danych dotyczących liczby dni burzowych. Pięć stref, które zostały wyszczególnione na rys. 6, odpowiada w przybliżeniu tym, które są niekiedy nazywane klimatami:

- 1/ morski podzwrotnikowy lub równikowy,
- 2/ kontynentalny umiarkowany,
- 3/ morski umiarkowany,
- 4/ śródziemnomorski,
- 5/ pustylny.

Każda strefa klimatyczna jest scharakteryzowana przez krzywą

przedstawiającą łączny rozkład intensywności opadu deszczu mierzonego na powierzchni Ziemi /rys. 7/. Krzywe te opierają się na przeprowadzonych w Stanach Zjednoczonych badaniach światowych statystyk opadu deszczu. Przedstawiają one oczywiście średnie wartości intensywności opadu dla wymienionych regionów i należy spodziewać się dużych odchyłeń przy porównaniu rzeczywistych wartości dla różnych miejsc wewnątrz każdego z regionów oraz porównań wartości otrzymanych w kolejnych latach. Następnym krokiem procedury jest zamiana intensywności opadu deszczu na współczynnik tłumienia /w dB/km/. Dokonać tego można wykorzystując standardowe krzywe współczynnika tłumienia jako funkcji intensywności opadu deszczu.

Ostatnim krokiem jest wyznaczenie całkowitego tłumienia, do czego niezbędna jest znajomość długości odcinka trasy przebiegającego w deszczu. W wyniku badań prowadzonych w Japonii, Włoszech i w Stanach Zjednoczonych nad przestrzennymi rozkładami deszczu wprowadzono pojęcie skutecznej długości trasy deszczu. Istnieje bardzo ograniczona liczba dostępnych danych statystycznych dotyczących tłumienia przez deszcz i są to dane uzyskane za ledwie w kilku miejscowościach. Jest jeszcze mniej osiągalnych informacji o zależnościach tłumienia od kąta elewacji. Dlatego też krzywa, przedstawiająca zależność skutecznej długości trasy w deszczu od kąta elewacji /rys. 8/ opracowana przez CCIR, opiera się tylko na pomiarach wykonanych w W. Brytanii i w Japonii. Dla dużych wartości kątów krzywa zbliża się asymptotycznie do wartości skutecznej długości 3,5 km. Skuteczna długość jest funkcją malejącą kąta elewacji od wartości około 15 km dla 5° do wartości 3,5 km. Dane, które wykorzystano przy opracowaniu tej krzywej

nie zawierają informacji o zmianach skutecznej drogi w procentcie czasu lub o intensywnościach opadu deszczu, których wystąpienia można się spodziewać.

5.3. Pomiary statystyczne

Duże wartości tłumienia związane z procentem czasu większym niż wartość rzędu 0,01% /lub 53 minut w roku/ występują w większości klimatów jako skutki dużych burz z piorunami i wykazują ekstremalną zmienność dla kolejnych lat i dla różnych miejscowości. Dla uzyskania wartości tłumienia powodowanego przez deszcz, spodziewanego w tzw. średnim roku, istnieje potrzeba wykonywania pomiarów w ciągu kilku lat. Przypadki opadów deszczu, które spowodowały tłumienie zdarzające się w 0,001% czasu, występowały ponownie co dwa lub cztery lata. Pomimo tych naturalnych ograniczeń dane dotyczące dużych tłumień są osiągalne jako wyniki kontynuowanych badań nad wypadkowymi rozkładami tłumienia spowodowanego przez deszcz.

Najwięcej tych danych dostarczyły badania wykorzystujące podczas dnia radiometry śledzące Słońce. Noc zaś była reprezentowana przez dane otrzymane z pomiarów temperatury szumów nieba. Badania te były prowadzone w Japonii [9], Stanach Zjednoczonych [10], W. Brytanii [11], Malezji [12]. Na rys. 11 przedstawiono porównanie niektórych z wyników badań dla częstotliwości 12 GHz. Dane otrzymane z badań przeprowadzonych w Japonii oraz Malezji, w obu przypadkach wykonywali je Japończycy, są znormalizowane przez wykorzystanie prawa cosecansa dla kąta elewacji 45° . Dane otrzymane w W. Brytanii są wykonane dla kątów elewacji od 5° do

35°. Pomiary wykonane w Malezji są pierwszymi, które pochodzą z rejonu o klimacie tropikalnym. Najczęściej deszczowej porze, od późnego lipca po połowę grudnia, towarzyszyło silne tłumienie. Występowało ono najczęściej podczas godzin dziennych od połowy dnia do późnych godzin popołudniowych. We wszystkich przypadkach, kiedy tłumienie przekraczało 10 dB, czas trwania był mniejszy niż 20 minut.

Dla porównania na rys. 9 przedstawiono trzy rozkłady tłumienia, które przewiduje CCIR dla trzech stref klimatycznych.

5.4. Wykorzystanie odbioru przestrzennego

Ponieważ występowanie największych wartości tłumienia przez opady jest spowodowane głównie przez intensywną chmurę opadową o wymiarach ograniczonych w płaszczyźnie poziomej, w projektach tras Ziemia - kosmos może być wykorzystany z pożytkiem odbiór przestrzenny trasowy lub miejscowy. Pomiary tłumienia wykorzystujące odbiór przestrzenny wykonywano na częstotliwości 16 GHz w New Jersey w USA, w okresie od kwietnia do sierpnia 1969 r. [13]. W pomiarach tych wykorzystano trzy radiometry ustawione wzdłuż prostej przebiegającej z północnego-zachodu na południowy-wschód. Odległości radiometrów w skrajnych położeniach od środkowego wynosiły około 11 km północno-zachodniego i około 3 km południowo-wschodniego. Każda z anten była skierowana w kierunku azymutu prostopadłego do linii łączącej te radiometry, zaś kąt elewacji wynosił 32°, co w wyniku dawało kierunek trafiający w pobliże centrum pozornego ruchu satelity ATS-5. Szerokość wiązki promieniowania anten stacji skrajnych wynosiła

1,05°, zaś anteny stacji środkowej 0,65°. Na podstawie wyników pomiarów opracowano rozkłady tłumienia dla każdej stacji i rozkłady kombinowane, wspólne dla każdej pary stacji, a tym samym dla różnych odległości między stacjami, około 3,11 km i 14 km.

Tłumienie o wartości 10 dB występujące na każdej z dwóch tras Ziemia - kosmos, których stacje naziemne były oddalone o około 11 km występowało średnio w około 0,08% czasu, natomiast to samo tłumienie występowało jednocześnie na dwóch trasach, których stacje naziemne były oddalone o 11 - 14 km, średnio w około 0,002% czasu. Dla większych częstotliwości to samo tłumienie towarzyszy mniejszym intensywnościom opadu deszczu o większych rozmiarach przekroju poziomego kolumny deszczu. W związku z tym polepszenie odbioru przez wykorzystanie odbioru przestrzennego dla tych samych odległości między stacjami naziemnymi może być dużo mniejsze.

Wyniki badań, które opierają się na statystykach intensywności, a które otrzymano również w New Jersey [14] wskazują, że scalone prawdopodobieństwo występowania intensywności opadu o wartościach przekraczających daną wartość na obu trasach przechodzi przez minimum dla odległości między stacjami naziemnymi tych tras równej około 9 km.

6. SZUMY

Gazy atmosferyczne, jak para wody, tlen, oprócz tego, że pochłaniają energię mikrofal również promieniują energię w postaci fal elektromagnetycznych w szerokim zakresie częstotliwości według prawa przemiany energii [3]. Temperatura szumów nieba, wiel-

kość charakteryzująca promieniowaną energię przez widmo pochłaniające nie rozpraszające jest związana z tłumieniem następującym wzorem

$$T_s = \int_0^{\infty} T/r / \alpha / r / \exp \left(- \int_0^r \alpha / r' / dr' \right) dr \quad /1/$$

gdzie:

$T/r/$ - kinetyczna temperatura gazu, pochłaniającego widma, w stopniach Kelvina w odległości r wzdłuż promienia;

$\alpha / r /$ - współczynnik tłumienia;

$\alpha / r / = \frac{A}{4.34}$, gdzie A jest współczynnikiem tłumienia w dB przez jednostkę długości.

Jeżeli temperatura kinetyczna może być zastąpiona przez średnią temperaturę promieniowania T_m , wtedy równanie temperatury szumów nieba ma bardzo prostą postać:

$$T_s = T_m / 1 - \frac{1}{L} / \quad /2/$$

gdzie L jest współczynnikiem zaniku pochłaniającego widma.

Dla systemu z odbiornikiem o małym poziomie szumów przyczyną zmniejszania się stosunku sygnał/szum są: tłumienie sygnału i emisja szumu. Temperaturę szumów nieba pochodzącą od tlenu i pary wodnej przedstawia rys. 10 jako funkcję częstotliwości i kąta elewacji. Pomiaru tej temperatury wykonano w następujących warunkach: temperatura powietrza mierzona na powierzchni Ziemi równa 20°C , ciśnienie 760 mm Hg, gęstość pary wodnej 10 g/m^3 .

Tłumienie spowodowane przez deszcz również jest reprezentowane przez temperaturę szumów nieba. Ze wzrostem zbliża się do

wartości maksymalnej, określonej głównie przez kinetyczną temperaturę silnie pochłaniających obszarów w pobliżu anteny, tzn. przez temperaturę równą w przybliżeniu 280°K . Wypadkowy rozkład temperatury szumów nieba może być wtedy oszacowany podobnie jak rozkład tłumienia.

Należy jednak zwrócić uwagę na rozbieżne opinie na ten temat, które ukazują się w literaturze. Na wyższych częstotliwościach rozproszenie przyczynia się do proporcjonalnego wzrostu całkowitego tłumienia. Sprzeczności wynikają z tego, że występujący czasami współczynnik spadku w równaniu wiążącym temperaturę szumów i tłumienia, obejmuje tylko wpływ pochłaniającej składowej, a czasami wpływ całkowitego zaniku, tzn. pochłaniania i rozpraszania.

7. ROZBIEŻNOŚĆ PROMIENIA

Regularna zmienność z wysokością refrakcji w atmosferze jest przyczyną istnienia dewiacji kątów nadejścia fali, zatem zjawisko to może mieć duże znaczenie dla ekstremalnie niskich kątów elewacji. W dodatku występuje spadek poziomu sygnału spowodowany przez rozbieżność lub rozogniskowanie wiązki antenowej. Obliczenia efektów tych zjawisk wykonano w Japonii [15] jako funkcję powierzchniowej refrakcji /rys. 11/. Spadek poziomu sygnału spowodowany rozogniskowaniem nie zależy od częstotliwości i jest mniejszy niż 0,5 dB dla kąta elewacji równego 3° dla dużych wartości wskaźnika refrakcji. Obliczono także średni spadek sygnału zależny od rozogniskowania wiązki, zwany dalej zanikiem ogniskowania. Obliczenia te przeprowadzono wykorzystując profile

wskaźnika refrakcji [3], a ich wyniki pokazano na rys. 12, który ilustruje także średnią kwadratową zmian wokół średniej wartości. Prawdopodobnie znaczenie tych efektów nie jest tak duże przy projektowaniu linii Ziemia - kosmos jak znaczenie efektów tłumienia przez gazy i opady atmosferyczne.

W każdym bądź razie Regulamin Radiokomunikacyjny przewiduje, że antena stacji naziemnej nie będzie stosowana do transmisji przy kątach elewacji mniejszych niż 3° , w służbach badań kosmicznych w pobliżu Ziemi o kącie mniejszym niż 5° , zaś w służbach kosmicznych dalekiego zasięgu o kącie mniejszym niż 10° .

8. MIGOTANIE I ZANIKI

Przyczyną powstawania migotania amplitudy i fazy transmitowanych sygnałów na liniach bezpośredniej widoczności przechodzących przez atmosferę są nieregularne fluktuacje wskaźnika refrakcji. Dla sygnałów odbieranych przez anteny o wielkiej aperturze występują efekty zmniejszania się natężenia sygnału lub zmniejszania się zysku anteny, spowodowane istnieniem dekorelacji fazy lub niespójności czoła fali. Efekty te rosną ze wzrostem kąta elewacji i maleją z częstotliwością. Innymi efektami, mniej ważnymi z punktu widzenia rozważanych problemów, są zmiany kąta widoczności źródła, które ograniczają dokładność systemów śledzących.

Pomiary zmniejszenia zysku, zjawiska pojawiającego się podczas występowania zniekształcenia czoła fali, były wykonane w Japonii na częstotliwościach 4 i 6 GHz. Dla kąta elewacji 10° stwierdzono stratę zysku rzędu 0,1 dB na 4 GHz i od 0,2 do 0,3 dB dla 6 GHz.

Amplituda fluktuacji sygnału może osiągać znaczne wartości dla małych kątów elewacji, jakie mogą być wymagane przy łączności pomiędzy stacjami znajdującymi się na dużych szerokościach geograficznych a satelitą geostacjonarnym. Pomiarы amplitudy fluktuacji poziomu sygnału przeprowadzone w Kanadzie [16] wykorzystują radiolatarnie umieszczone na satelicie i pracujące na częstotliwości 7 GHz. Badania te wyraźnie wykazały doniosłość zjawiska. Wyniki pomiarów z miesiąca lutego 1971 r. pokazuje rys. 13. Przedstawione tam rozkłady zostały sprowadzone do poziomu mediany, który oznaczono przez 0 dB. Zarejestrowany zanik poziomu sygnału mierzony między szczytami dla najmniejszych kątów elewacji był większy niż 16 dB. Dla zapewnienia działania systemu w 99,9% czasu wymagana rezerwa systemu wynosi około 3 dB dla kąta elewacji większego niż 3° . Wyniki pomiarów otrzymane w okresie letnim przedstawiono na rys. 14. Głębokość zaników jest tutaj dużo większa. Wymagana zimą rezerwa systemu dla tych samych warunków /99,9% czasu, kąty elewacji większe niż 3° / wynosi około 6 dB. Wyniki pomiarów dla kątów elewacji 5° są podane na rys. 15. Przedstawiają sezonową zmianę fluktuacji, obserwowaną w Ottawie i Resolute Bay na szerokości geograficznej 75° N. Wymagana rezerwa systemu jest znacznie mniejsza w Arktyce niż dla regionów o klimacie umiarkowanym.

9. DODATKOWE BADANIA

Na zakończenie należy wspomnieć o programach, które są realizowane lub planowane. We Francji CNET /Centre National d'Études des Télécommunications/ podjął badania propagacji fal dla łącz-

ności Ziemia - kosmos, wykorzystując radiometr słoneczny, działający na częstotliwości około 20 GHz. W eksperymencie tym radiometr jest przełączany na przemian z obserwacji Słońca na obserwacje bliskiego obszaru nieba. Radiometr ma zdolność wykonania pomiarów temperatury szumów w kanałach o szerokości 6 i 10 MHz. Odstęp między kanałami może być zmieniany. Największy odstęp wynosi 400 MHz. Pierwsze analizy wyników pomiarów wykonanych w marcu 1972 r. wskazują, że nie występują dekorelacje: częstotliwościowa pomiędzy sygnałami w kanałach z maksymalnym odstępem 400 MHz i czasowa dla stałej częstotliwości i dla czasów dłuższych od jednej sekundy oraz, że efekty rozproszenia nie są istotne dla częstotliwości 20 GHz.

Wniosek mówiący o braku występowania dekorelacji częstotliwościowej, zgodny jest z wcześniejszymi teoretycznymi studiami przeprowadzonymi w USA nad zniekształceniami impulsu [17]. Studia te wykazały, że w klimacie umiarkowanym, dla częstotliwości większych niż 10 GHz potrzebna jest szerokość pasma większa niż 3,6 GHz, aby zniekształcenia impulsu nie były istotne.

Końcowy wniosek dotyczy skutków rozproszenia i wiąże się z problemem poruszonym już wyżej. Skutki pochłaniania i rozproszenia wchodzi do temperatury szumów i dlatego trudno je rozdzielić. Stany Zjednoczone zaproponowały umieszczenie na orbicie geostacjonarnej w 1974 r. satelity ATS-F, który by transmitował sygnał fali nośnej na częstotliwościach 20 i 30 GHz lub, spoiste widmo wieloprążkowe, składające się z nośnej i pewnej liczby prążków, zapewniając całkowity odstęp częstotliwościowy około 1500 MHz. Satelita ten może być również wykorzystywany do transmisji fali modulowanej, stosując przemianę częstotliwości z 6 GHz, wykorzy-

stywanej do transmisji na trasie Ziemia - satelita, na częstotliwość 20 lub 30 GHz do transmisji w przeciwną stronę. Różne sposoby badań pozwolą na wykonanie pomiarów charakterystyk trasy Ziemia - kosmos łącznie z tłumieniem, fazą i spójnymi szerokościami pasm. Pozwolą również oszacować skutki łączności na liniach komunikacyjnych na dwóch częstotliwościach dla różnych warunków meteorologicznych, wykorzystując różne techniki modulacji. Stacje odbiorcze będą również przygotowane do pomiarów temperatury szumów nieba.

W innym eksperymencie propagacyjnym, wykorzystującym satelitę ATS-F, sygnały będą nadawane do satelity na częstotliwościach 13 i 18 GHz z licznych /około 15/ naziemnych stacji oddalonych od siebie o odległości większej niż 320 km. Oprócz tego będzie 9 stacji naziemnych podzielonych na trzy grupy i rozmieszczonych bardzo równomiernie wokół trzech innych. Sygnały odebrane na satelicie zostaną przetworzone na sygnały o częstotliwości 4 GHz, a następnie zostaną wysłane do głównej stacji odbiorczej. Tam zostaną zapisane i poddane analizie.

Innym programem badań satelitarnych jest SIRIO, zaprojektowany przez National Reserch Counsil of Italy przy współpracy z Politechniką w Mediolanie. Pierwsze plany przewidują badania propagacyjne na częstotliwościach 12 i 18 GHz, w tym - pomiary tłumienia trasy oraz tłumienia różnicowego i fazy powyżej zakresu częstotliwości około 800 MHz. Planowane są również eksperymenty nawiązania łączności. Ta oryginalna propozycja wymaga dwóch stałych i jednej przewoźnej stacji naziemnej. Pozwoli to na zbadanie użyteczności odbioru przestrzennego w celu uniknięcia przykrych skutków intensywnego lokalnego opadu deszczu. Spodziewa-

ne jest uczestnictwo w tych eksperymentach pewnej liczby krajów zainteresowanych.

Na zakończenie należy stwierdzić, że istnieje pewna liczba programów pomiarowych, które mają za zadanie opracowanie statystyk tłumienia spowodowanego przez deszcz na podstawie pomiarów radiometrycznych. W dodatku pomiary rozpoczęte w krajach związanych z ESRO - European Space Research Organization powinny zostać uzupełnione przez badania radiometryczne na częstotliwości 11 GHz dla 4 lub 5 miejsc w zachodniej Europie charakteryzujących się różnymi warunkami klimatycznymi.

Australijskie Biuro Poczty planuje podjęcie pomiarów tłumienia spowodowanego przez deszcz, wykorzystując słoneczny radiometr zainstalowany w północno-wschodnim Queensland, w klimacie tropikalnym. Kanada również będzie prowadziła długoterminowe pomiary szumów nieba na częstotliwości 13 GHz w pewnej liczbie miejsc w kraju. W jednym z miejsc pomiary będą prowadzone dla różnych kątów elewacji.

10. UWAGI KOŃCOWE

W opracowaniu przedstawiono skrót wiadomości o skutkach propagacyjnych, o ich wpływie na projektowanie kosmicznych systemów radiokomunikacyjnych wykorzystujących częstotliwości powyżej 10 GHz. Omówiono również realizowane i planowane programy badań. Pozostaje zatem pytanie: jakie problemy pozostały jeszcze do wyjaśnienia?

Wiadomo na pewno, że wypadkowe rozkłady tłumienia przez opad deszczu dotyczące różnych miejscowości i jako funkcje kąta elewa-

cji powinny zawierać więcej danych i bardziej szczegółowych. Również metody prognozowania powinny być bardziej precyzyjne, a wtedy będzie konieczne określenie zależności pomiędzy dokładnymi pomiarami tłumienia z ogólnie i łatwo dostępnymi danymi meteorologicznymi. Niektóre prace kontynuowane we Francji i w Stanach Zjednoczonych mają zamiar powiązania dla części opadów różnych typów wypadkowych rozkładów punktowych intensywności opadu deszczu z całkowitym rocznym opadem deszczu w każdym punkcie. Nie bardzo zrozumiałe są jeszcze skutki opadu mokrego śniegu.

W związku z zainteresowaniem wykorzystania tych samych częstotliwości na trasach Ziemia - kosmos, lecz z różnymi polaryzacjami, ważnym problemem stało się zjawisko depolaryzacji sygnałów, powstającej przy przechodzeniu sygnałów przez deszcz, grad i topniejący śnieg.

Pozostałe nie wyjaśnione problemy dotyczą skutków pochłaniania przez parę wody, zastosowania równania przemiany radiacyjnej w przypadku występowania rozproszenia oraz zrozumienia mechanizmów i zdarzeń związanych z krótkoterminowymi fluktuacjami sygnału.

WYKAZ LITERATURY

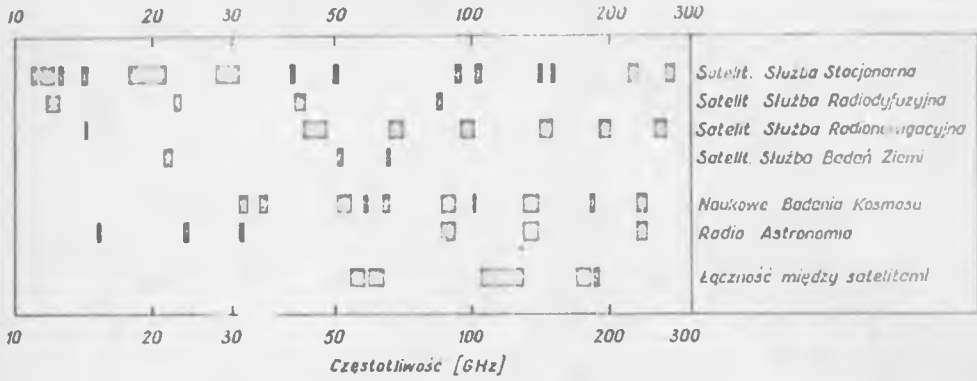
1. Zhevakin S. A., Naumov A. P. : The coefficient of absorption of centimeter and millimeter radiowaves in atmospheric oxygen. *Izv. Vysś. Uceb. Zaved. Radioelektron.* 1965 t. 10, nr 6, s. 987-996.
2. Liebe H. : Atmospheric propagation properties in the 10- to

75 GHz region: A survey and recommendations. ESSA Technical Report ERL 130-ITS-91 / Sept. 1969/.

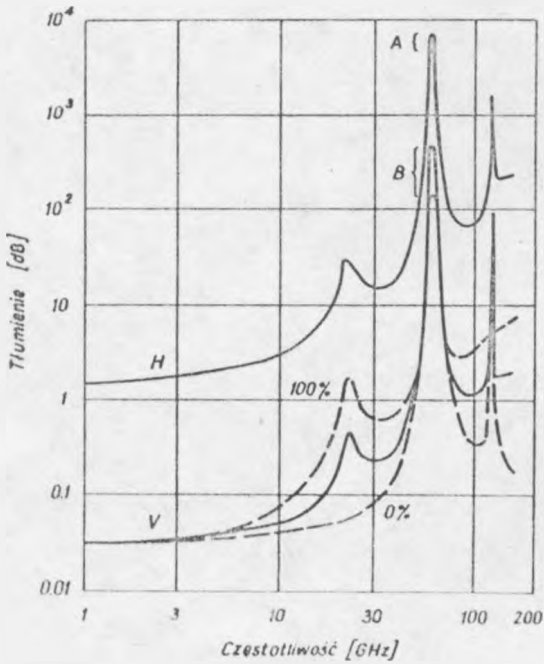
3. Crane R.K. : Propagation phenomena affecting satellite communication systems operating in the centimeter and millimeter wavelength bands. Proc. IEEE, 1971, t. 59 nr 2, s. 173-188.
4. Llewellyn-Jones D.T., Zavody A.M. : Rainfall attenuation at 110 and 890 GHz. Electron. Lett., 1971 t. 7 nr 12, s. 321-322.
5. Penzias A.A. : First results from 15.3 GHz earth-space propagation study. B.S.T.J. 1970 t. 49 nr 6, s. 1242-1245.
6. Wolfsberg K.N., Altshuler E.E. : Rain attenuation at 15 and 35 GHz. Trans. IEEE 1972 t. AD-20 nr 2, s. 181-187.
7. Strickland J.I. : Simultaneous direct, radiometric and radar measurements of precipitation attenuation at 15.3 GHz. USNC/URSI, Spring Meeting, May 1972.
8. CCIR. Propagation data required for space telecommunication systems. Doc. 5/123, Period 1970-1973.
9. CCIR. Influence of tropospheric refraction and attenuation on space telecommunications systems - statistics of attenuation due to precipitation of radio waves in the 12 GHz band at higher angles of elevation in a tropical zone. Doc. 5/39 /Japan/, Period 1970-1973.
10. Wilson R.W. : Sun tracker measurements of attenuation by rain at 16 and 30 GHz. Bell Syst. tech. J. 1969 t. 48 nr 5, s. 1383-1404.
11. CCIR. Attenuation on refraction due to the troposphere in space

telecommunication systems - Measurements of atmospheric noise and slant path attenuation in the United Kingdom. Doc. 5/22 /U.K./ , Period 1970-1973.

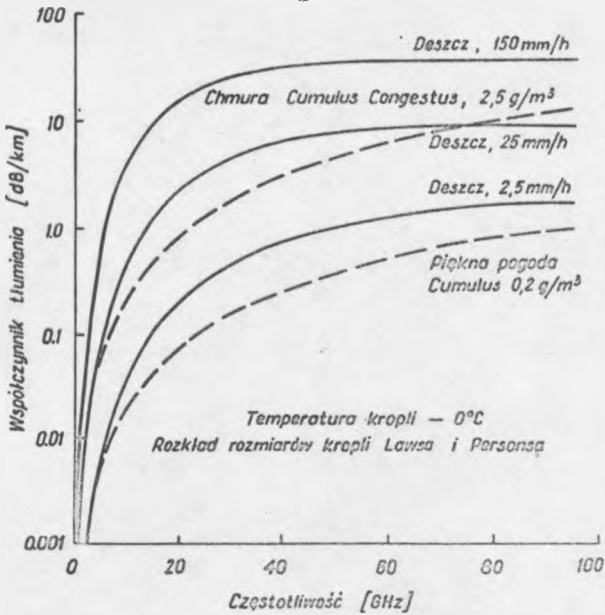
12. CCIR. Influence of tropospheric refraction and attenuation on space telecommunications systems - statistics of attenuation due to precipitation of radio waves in the 12 GHz band at higher angles of elevation in a tropical zone. Doc. 5/39 /Japan/ , Period 1970-1973.
13. Wilson R.W. : A three-radiometer path-diversity experiment. Bell Syst. tech. J. 1970 t. 49 nr 6, s. 1239-1242.
14. Freeny A.E. , Gabbe J.D. : A statistical description of intense rainfall. Bell Syst. tech. J. 1969 t. 48 nr 6, s. 1789-1852.
15. Yokoi H. , Yamada M. , Satoh T. : Atmospheric attenuation and scintillation of microwaves from outer space. Publ. Astr. Soc. Japan, 1972 t. 22 nr 4, s. 511-524.
16. Mc Cormick K.S. , Maynard L.A. : Measurements of S.H.F. Tropospheric fading along earth-space path at low elevation angles. Electron. Lett. 1972 t. 8 nr 10, s. 274-276.
17. Crane R.K. : Coherent pulse transmission through rain. Trans. IEEE, 1967 t. AP-15 nr 2, s. 252-256.



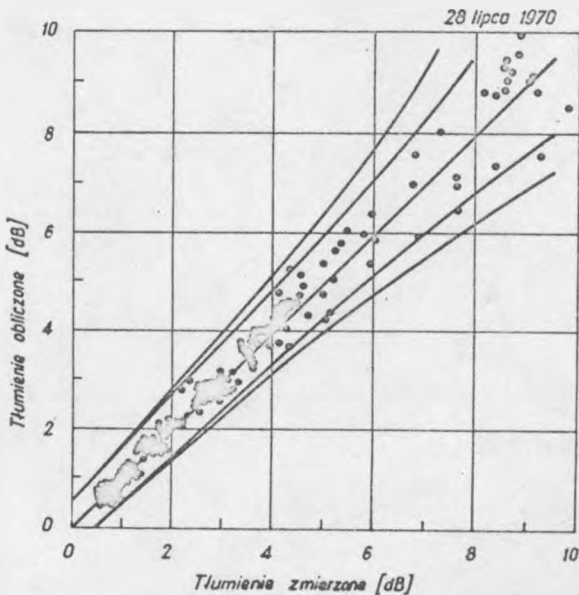
Rys. 1. Podział częstotliwości z zakresu 10 - 300 GHz pomiędzy różne służby



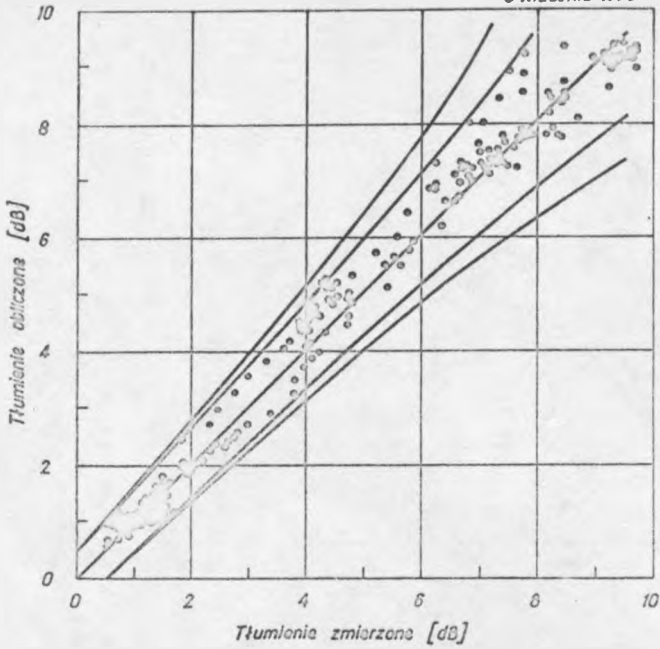
Rys. 2. Teoretyczne tłumienie atmosfery przez gazy; długość trasy 80 km
- trasa jednokierunkowa



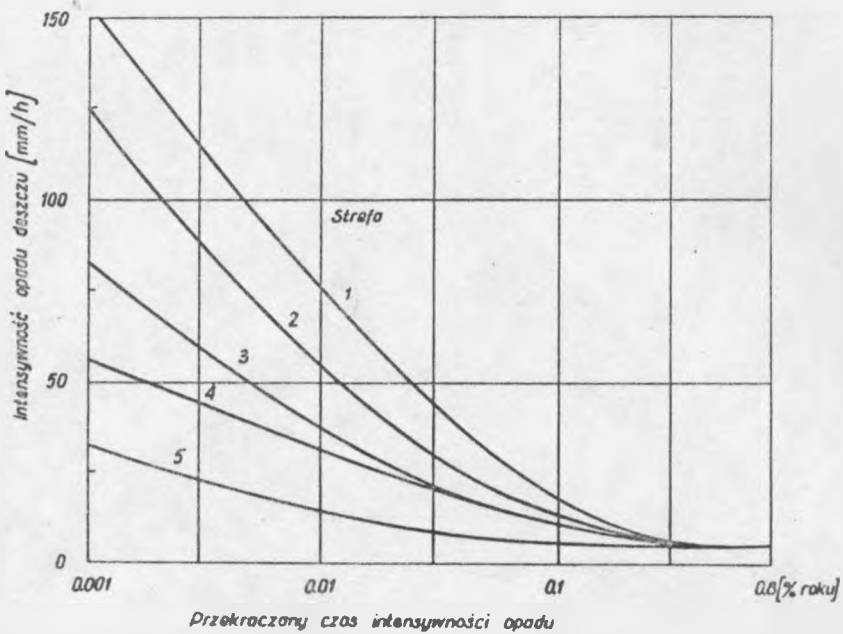
Rys. 3. Zależność częstotliwościowa współczynnika tłumienia dla deszczu i chmury



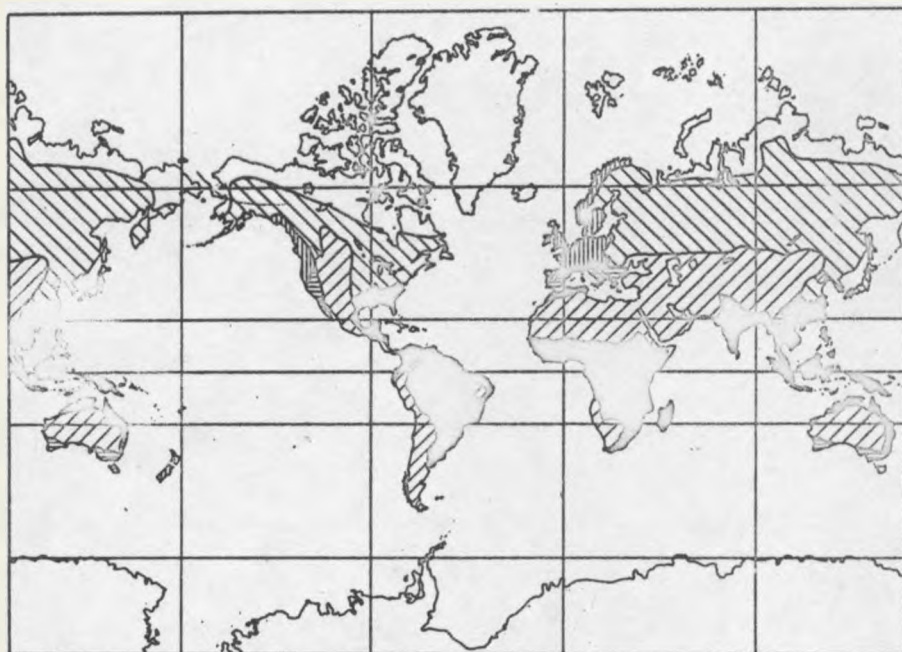
Rys. 4. Porównanie wartości tłumienia przez atmosferę obliczonej i bezpośrednio zmierzonej dla częstotliwości 15 GHz i dla przypadku nawalnego deszczu








Rys. 5. Porównanie wartości tłumienia przez atmosferę obliczonej i bezpośrednio zmierzonej dla częstotliwości 15 GHz dla przypadku ciągłego deszczu

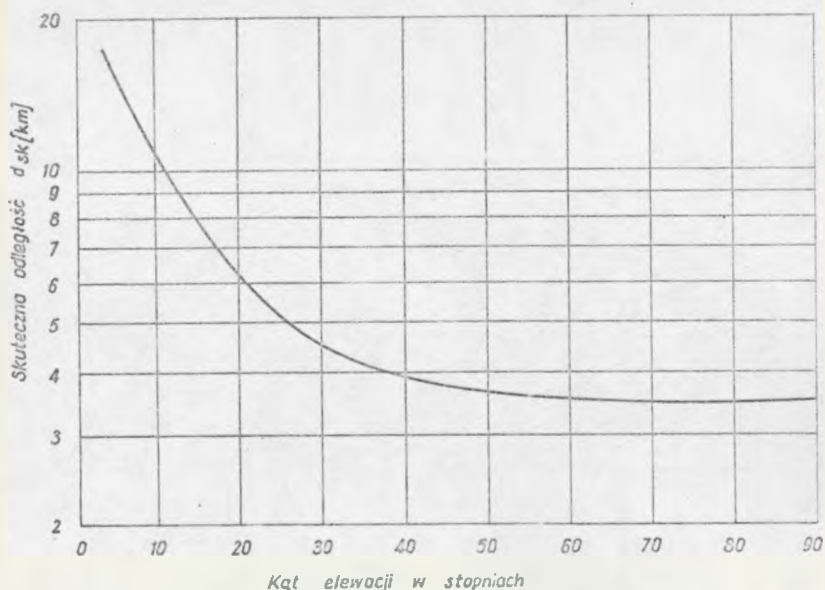


Rys. 7. Rozkłady intensywności opadów deszczu w różnych strefach klimatycznych

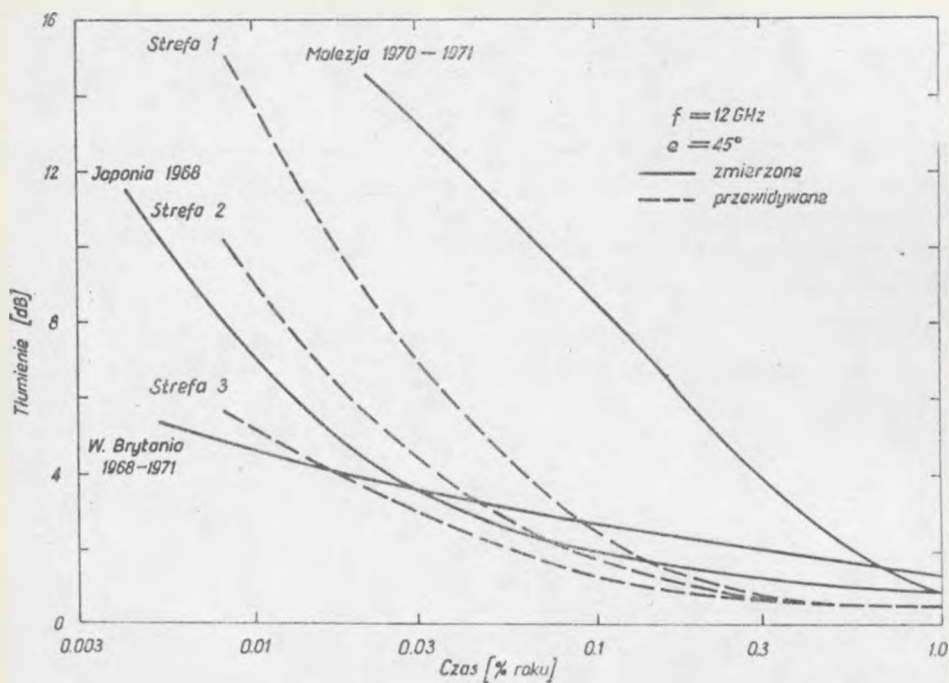


-  1. strefa klimatyczna
-  2. strefa klimatyczna
-  3. strefa klimatyczna
-  4. strefa klimatyczna
-  5. strefa klimatyczna

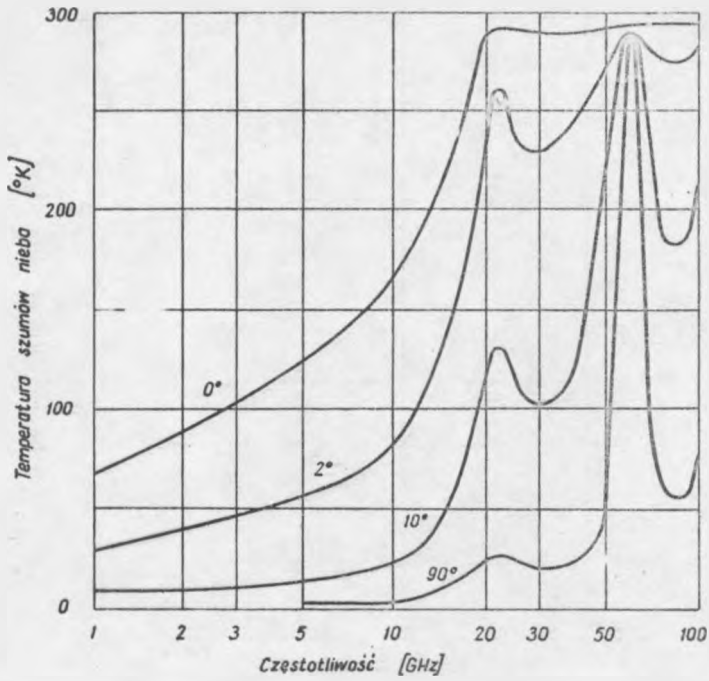
Rys. 6. Podział świata na deszczowe strefy klimatyczne



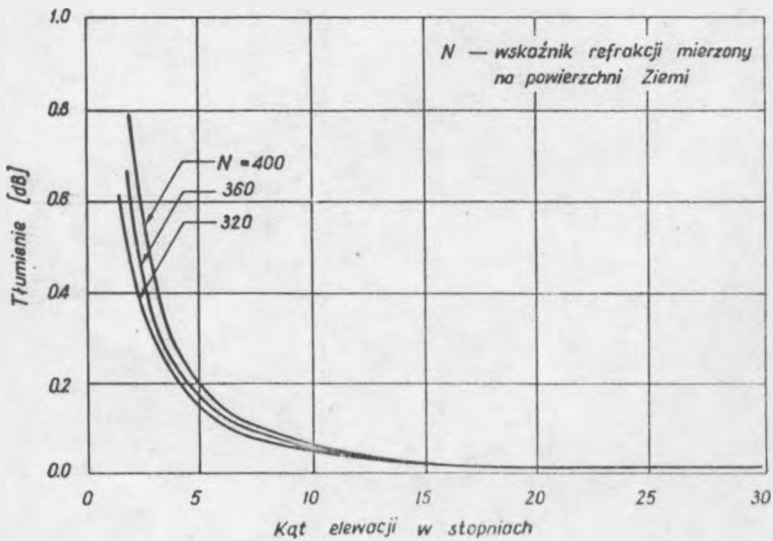
Rys. 8. Zależność skutecznej długości trasy od kąta elewacji



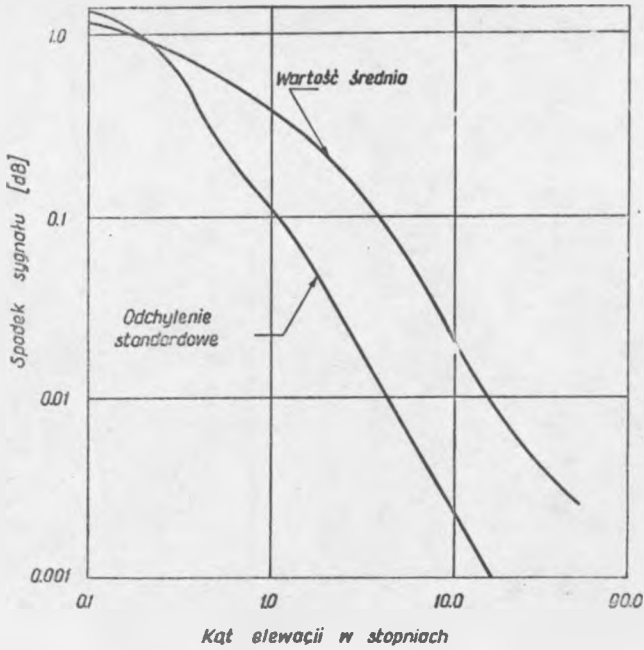
Rys. 9. Porównanie przewidywanych rozkładów tłumienia dla trzech stref klimatycznych z rozkładami eksperymentalnymi pochodzącymi z Wielkiej Brytanii, Japonii i Malezji



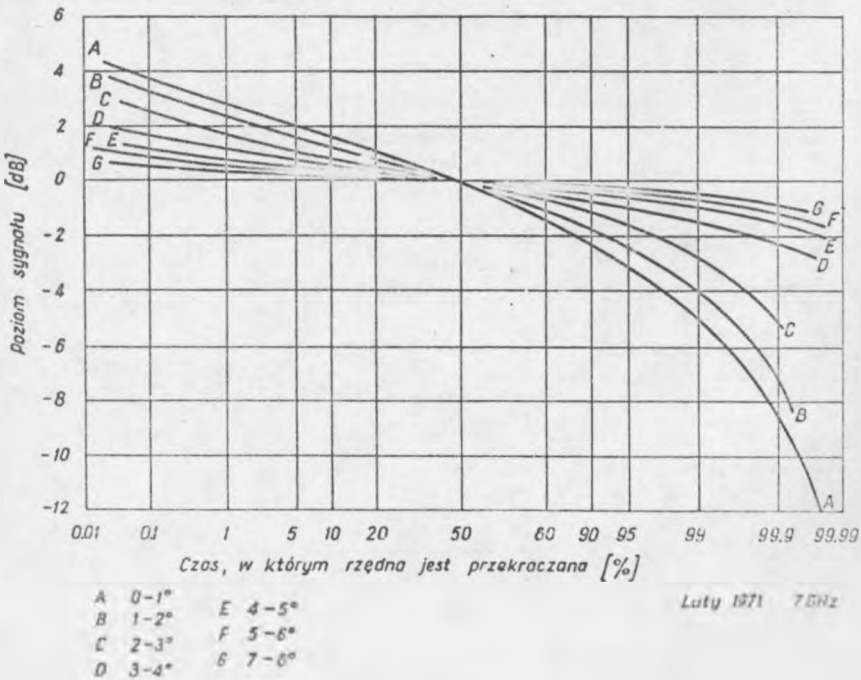
Rys. 10. Temperatura szumów nieba dla tlenu i pary wodnej



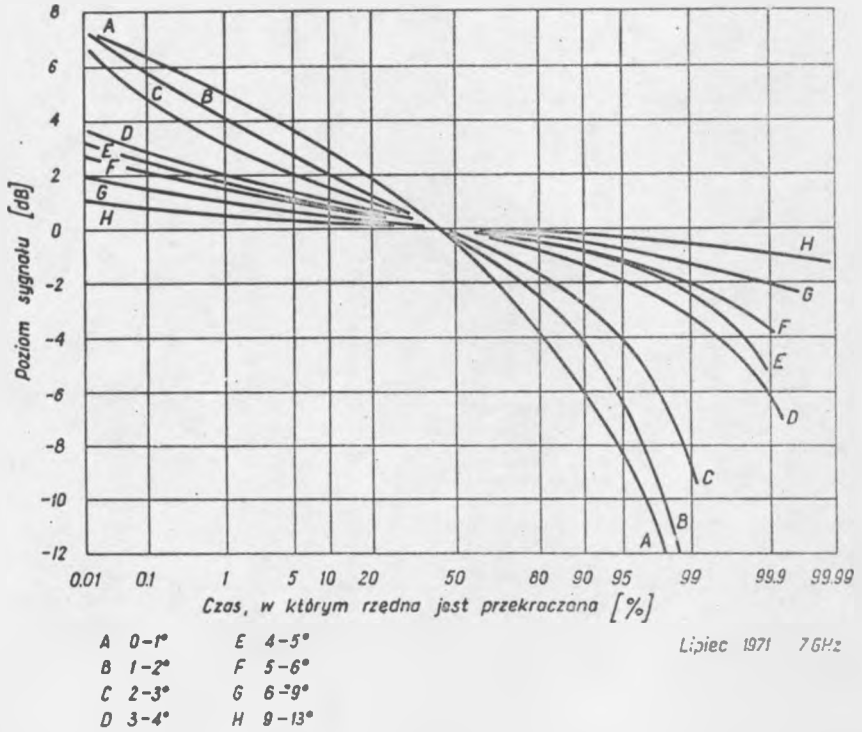
Rys. 11. Tłumienie spowodowane przez rozbieżność wiązki fal w funkcji kąta elewacji



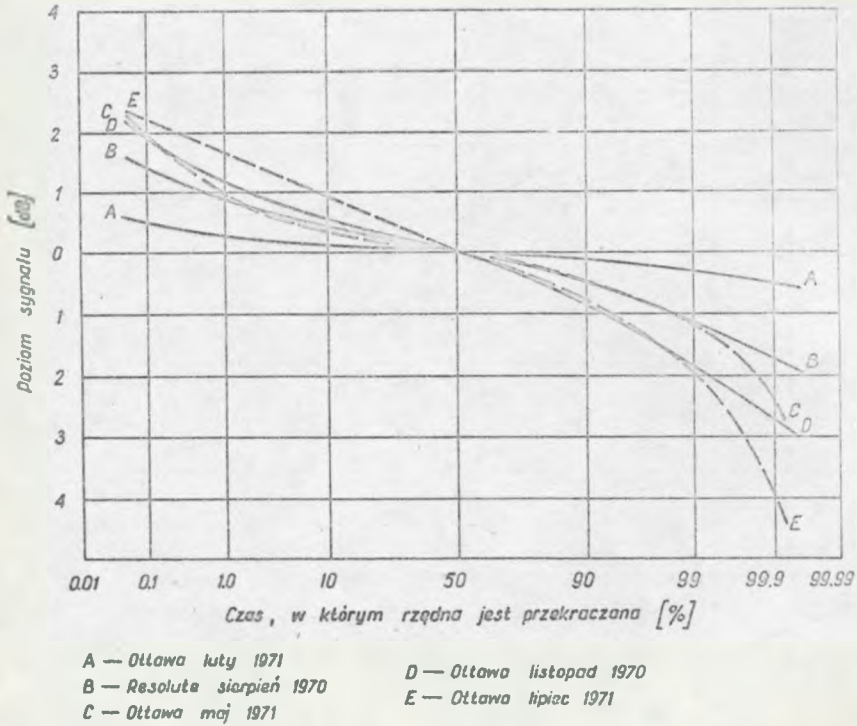
Rys. 12. Spadek poziomu sygnału spowodowany przez rozogniskowanie



Rys. 13. Rozkłady poziomów sygnału dla małych kątów elewacji dla warunków znanych; poziomem odniesienia jest mediana



Rys. 14. Rozkłady poziomów sygnału dla małych kątów elewacji dla warunków letnich; poziomem odniesienia jest mediana



Rys. 15. Porównanie rozkładów poziomu sygnału dla trzech pór roku i dwóch szerokości geograficznych; poziomem odniesienia jest mediana

PRZEGLĄD ZAGADNIEŃ PROPAGACYJNYCH
ZWIĄZANYCH Z ŁĄCZNOŚCIĄ RADIOWĄ NA ZIEMSKICH
TRASACH W ZAKRESIE CZĘSTOTLIWOŚCI WIĘKSZYCH NIŻ
10 GHz

Opracował A. Dusiński na podstawie referatu Eklung F. :
Radio Propagation Above 10 GHz. Ground to Ground Com-
munication wygłoszonego na XVII Generalnej Konferencji
URSI w Warszawie w sierpniu 21-29, 1972 r.

1. WPROWADZENIE

Podstawowym celem tego opracowania jest zwrócenie uwagi na główne problemy propagacji fal radiowych o częstotliwościach większych niż 10 GHz na ziemskich trasach łączności radiowej. W opracowaniu przedstawiono stan światowej wiedzy o propagacji na podstawie osiągalnych informacji zawartych w literaturze fachowej. Zamieszczony na końcu obszerny spis literatury nie jest kompletny. Uwydatniono zwłaszcza zakres wiadomości o częstotliwościowej zależności różnych zjawisk. Wskazano na te dziedziny, w których wiedza jest jeszcze niedostateczna z punktu widzenia spodziewanych w przyszłości projektów radiokomunikacyjnych systemów ziemskiej łączności wykorzystujących zakres fal milimetrowych.

Problemy przedstawione w opracowaniu podzielono na dwie części:

- wpływ hydrometeorów,
- zmiany troposferycznego wskaźnika refrakcji oraz odbicia od Ziemi.

Pominięto zagadnienie pochłaniania i rozpraszania przez gazy, które zostało omówione w poprzednim opracowaniu 62. Nie zostały również omówione zagadnienia związane z propagacją na dużych odległościach, szczególnie poza horyzont radiowy, oraz zagadnienia związane z wpływem pokrycia terenu. Te ostatnie są szczególnie ważne w zastosowaniach fal milimetrowych w radiodifuzji.

Nie wszystkie zagadnienia propagacji fal radiowych z omawianego zakresu częstotliwości zostały tutaj w pełni wyjaśnione. Powodem tego jest duża liczba opublikowanych informacji i jednocześnie brak ostatecznych wyjaśnień niektórych problemów. W wielu przypadkach czytelnik znajdzie zamiast dokładnego wyjaśnienia odwołanie się do literatury źródłowej.

2. WPLYW HYDROMETEORÓW

2.1. Tłumienie przez hydrometeory

2.1.1. Podstawowe równanie

Podstawowe równanie do obliczeń tłumienia płaskiej fali elektromagnetycznej przechodzącej przez objętość zawierającą hydrometeory, przy założeniu pojedynczego rozproszenia, ma następującą postać:

$$\Lambda_t = N/a/Q \int \epsilon_k, a, \lambda/da \quad /1/$$

gdzie:

Λ_t - całkowite tłumienie jednostkowego przekroju objętości,

$N/a/$ - liczba hydrometeorów o rozmiarach zawartych w przedziale $[a, a+da/$ i podzielona przez jednostkową objętość zawierającą te hydrometeory,

$Q/\epsilon_k, a, \lambda/$ - całkowite tłumiący poprzeczny przekrój przez hydrometeor będący sumą poprzecznego przekroju pochłaniającego Q_a i przekroju poprzecznego całkowitego rozproszenia Q_s .

Jeśli A_t wyraża się w m^2/m^3 , to związek między A_t i często używanym współczynnikiem tłumienia γ wyraża się w dB/km i ma postać:

$$\gamma = 4343 A_t \quad [dB/km]. \quad /2/$$

Technika obliczeń Q dla hydrometeorów jest dobrze znana od czasów pierwszych prac Mie i Strattona. Była wykorzystywana z sensownym powodzeniem do obliczeń tłumienia powodowanego przez opad deszczu dla częstotliwości z zakresu 10-30 GHz [1]. Przekrój poprzeczny Q jest funkcją zespolonego wskaźnika refrakcji substancji z której składa się hydrometeor oraz jest funkcją kształtu i stosunku rozmiarów hydrometeoru do długości fali.

2.1.2. Wskaźnik refrakcji hydrometeoru

W obliczeniach Q dla częstotliwości powyżej 10 GHz zasługuje na specjalną uwagę kilka aspektów, jak np. znaczna zmiana zespolonego wskaźnika refrakcji dla wody i lodu w zakresie częstotliwości 10-100 GHz. Na rys. 1^{x/} przedstawione są krzywe rzeczywi-

^{x/} Wykresy są zamieszczone na końcu artykułu.

stej i urojonej składowych zespolonego wskaźnika refrakcji wody $n_k = n_{re} - jn_{im}$, dla różnych temperatur jako funkcje częstotliwości. Krzywe te są sumą wyników otrzymanych z różnych źródeł [2]. Pokrywają się one w zasadzie z wynikami przedstawionymi przez Saxtona w [3].

Warto tu zwrócić uwagę na fakt, że stopień zanieczyszczeń wody nie wpływa bardzo na n_{re} lub n_{im} .

Wcześniejsze pomiary wykonane dla lodu wskazywały, że n_{re} ma wartość równą około 1,78. Pomiary przeprowadzone ostatnio na częstotliwościach 35 i 95 GHz wykazały, że dla wody czystej i wody wodociągowej n_{re} ma wartość równą około [1,4 4]. Wartość n_{im} dla lodu jest niska i zależy od jego zanieczyszczeń. W [4] podano $n_{im} 1.5 \cdot 10^{-3}$ dla czystej wody dla częstotliwości 35 i 95 GHz oraz $n_{im} 4.1 \cdot 10^{-2}$ dla 35 GHz i $2.3 \cdot 10^{-3}$ dla 95 GHz dla wody wodociągowej.

Informacja o elektrycznych własnościach wody wydaje się być adekwatna, ale wciąż brakuje dokładnych informacji o elektrycznych własnościach gradu i śniegu w zakresie fal milimetrowych.

2.1.3. Rozkłady przekroju i rozmiaru kropli

Oprócz informacji o elektrycznych własnościach i składzie hydrometeorów, potrzebne są informacje o ich rozmiarach i kształcie. Poszczególne źródła podają obliczenia Q dla kulistych wodnych kropli jako funkcje średnicy kropli. Zbiór takich krzywych Q przedstawiono na rys. 2. Krzywa dla 100 GHz pochodzi z [6], pozostałe z [5].

Były również wykonane obliczenia dla kul lodowych [7,8,9], o

których tutaj nie będzie mowy, ponieważ jest to deszcz szczególnie ukształtowany, stanowiący graniczne warunki dla propagacji fal milimetrowych na trasach ziemskich. Ponadto mało jest jeszcze informacji o tłumieniu przez mokry śnieg, który czasami jest przedstawiany jako hydrometeor, dający wysokie tłumienie.

Godny uwagi jest fakt osiągnięcia przez iloczyn N/a · Q/a maksimum dla pewnej wartości $a=a_{m}$, gdzie ujemnemu nachyleniu N/a odpowiada dodatnie nachylenie Q/a . Na rys. 2 jest przedstawiony rozkład Marshalla - Palmera N/a . Porównanie nachyleń krzywych N/a i Q/a pokazuje, że a_m kropli biorących maksymalny udział w określeniu współczynnika tłumienia maleje z częstotliwością w przybliżeniu podobnie jak na rys. 3.

Kiedy średnica maleje, związana z nią wartość N/a_m rośnie. Przekrój Q/a_m większości znaczących kropli w tłumieniu zmienił się w przybliżeniu tak, jak pokazuje to rys. 4.

Wartość przekroju Q/a_m zaczyna maleć z częstotliwością, począwszy od pewnej częstotliwości tak silnie, że nie może to być już skompensowane przez towarzyszący wzrost N/a_m . W konsekwencji rozpoczyna się powolne opadanie z częstotliwością powyżej pewnej częstotliwości krytycznej. Dla częstotliwości powyżej częstotliwości krytycznej obie wielkości Q/a_m i N/a_m rosną z częstotliwością, powodując dobrze znany silny wzrost γ z częstotliwością. To proste rozumowanie prowadzi do wniosku, że dla stałego rozkładu rozmiaru kropli N/a lub intensywności deszczu należy spodziewać się, że γ jako funkcja częstotliwości ma maksimum w zakresie 100 - 200 GHz.

Istnienie wspomnianego maksimum jasno wynika z rys. 5, który przedstawia teoretyczne obliczenia γ w funkcji częstotliwości.

Obliczenia te pochodzą z [10] i zostały przeprowadzone dla kilku wartości intensywności deszczu jako parametru przy założeniu rozkładu rozmiarów kropli Lawa i Parsonsa.

Wyniki obliczeń zależą krytycznie od założonego rozkładu rozmiarów kropli $N/a/$ i od związku $N/a/$ oraz intensywności opadów [11]. Ważny jest dokładny model $N/a/$ nie tylko dla kropli o dużych rozmiarach, ale również dla kropli o średnicach rzędu części milimetra.

W [12] i [13] przedstawione są wyniki obszernych pomiarów rozkładów rozmiarów kropli. Pomiarów te wykonywano wykorzystując czujnik elektromechaniczny, który przenosił moment spadku kropel na powierzchnię o 50 cm^2 na elektryczne impulsy.

Rysunek 6 wzięty z [13] przedstawia dla przykładu kilka wyników takich pomiarów. Widać dużą zmienność czasowo-przestrzenną rozkładów rozmiarów kropli deszczowych. Wygląda na to, że wypadki takie zdarzają się w silnych konwekcyjnych typach deszczów. Pomierzone rozkłady służyły do określenia parametrów rozkładu Marshalla - Palmera.

$$N/D/ = N_0 \cdot e^{-D} \quad /3/$$

gdzie:

$N/D/$ - liczba kropli przez jednostkę objętości i jednostkę rozmiaru średnicy,

D - średnica kropli w mm,

N_0 i Λ - parametry charakteryzujące rozkład deszczu.

Dla przypadków, kiedy wartość intensywności deszczu jest stała w okresach dziesięciominutowych, rozkłady otrzymane z pomiarów wykazują dobrą zgodność z rozkładem wykładniczym.

Dla przypadków niejednorodnego opadu współczynnik uchybu między krzywą rozkładu N/D uzyskaną z pomiarów, i bardziej przydatnym rozkładem wykładniczym wynosi 10.

W tabelicy 1 przedstawiono średnie wartości parametrów w rozkładzie Marshalla - Palmera wzięte z bogatych pomiarów wykonanych w Lucernie w Szwajcarii.

T a b l i c a 1

Typ deszczu	N_0	$\Lambda = f/R/$
	$[m^{-3} mm^{-1}]$	$mm^{-1} \quad R\Lambda [mm/h]$
Mżawka	30 000	$= 5,7 R^{-0,21}$
Jednostajny	7 000	$4,1 R^{-0,21}$
Burza	1 400	$3,0 R^{-0,21}$

Te wartości różnią się od oryginalnych propozycji Marshalla-Palmera dla $N_0 = 8 000$, $\Lambda = 4,1 R^{-0,21}$.

Sygnalizowana jest duża zmienność N_0 i zależność $\Lambda = f/R/$ dla wszystkich typów deszczu. Wydaje się bardzo prawdopodobne, że rozkłady rozmiarów kropli są zależne nie tylko od głównych typów deszczu, ale również od lokalnych warunków orograficznych i meteorologicznych. Konieczne jest eksperymentalne sprawdzenie teoretycznych obliczeń tłumienia spowodowanego przez opady ze względu na wykorzystywanie ich z pełnym zaufaniem w praktyce inżynierskiej. Można również dowodzić, że teoria pojedynczego rozproszenia fali płaskiej nie jest wystarczająca do obliczeń w zakresie fal milimetrowych, zwłaszcza dla deszczu o dużej intensywności opadu. W [2] rozważano skutki wielokrotnego rozproszenia w deszczu

dla płaskiej fali i dla przypadku wiązki fal. Wniosek jest taki, że dla częstotliwości poniżej 30 GHz istnieje duża zgodność pomiędzy teoriami pojedynczego rozproszenia i rozprożeń wielokrotnych. Dla większych częstotliwości wzrasta wpływ wielokrotnego rozproszenia na propagację fal w kierunku bezpośredniego promienia. Natomiast maleje teoretyczne tłumienie płaskiej fali jako skutek pojedynczego rozproszenia.

Różnica pomiędzy tłumieniem fali płaskiej i wiązki fal jest określana w funkcji częstotliwości i w funkcji intensywności opadu deszczu. Tłumienie dla wiązki fal jest wyższe. Dla częstotliwości 100 GHz i dla $R = 100 \text{ mm/h}$ znaleziona różnica wynosi około 3 dB dla współczynnika tłumienia γ równego około 20 dB/km.

2.1.4. Zależność od temperatury

Zależność $\gamma = f/R$ od temperatury jest spowodowana głównie istnieniem zależności n_{im} od temperatury. Jest ona rozważana w pracach [1] i [14], których wyniki badań trochę się różnią, lecz potwierdzają wniosek, że maksymalne tłumienie w większości przypadków propagacji na falach milimetrowych występuje dla temperatur z otoczenia 20°C .

Zależność γ od temperatury maleje z częstotliwością i wydaje się, że dla częstotliwości z zakresu około 30 GHz jej znaczenie jest niewielkie w zakresie temperatur $0^\circ - 40^\circ\text{C}$.

2.2. Eksperymentalne badania tłumienia przez opady

W przybliżeniu można mówić o dwóch rodzajach eksperymentalnych badań tłumienia. Zamierzeniem pierwszego rodzaju badań jest

głównie sprawdzanie teoretycznych obliczeń współczynnika tłumienia jako funkcji częstotliwości dla jednolitych opadów. Drugi rodzaj natomiast obejmuje znajdowanie metod przewidywania statystycznego tłumienia, wykorzystując statystykę opadów.

2.2.1. Zależność $\gamma = f/R$

Załóżmy, że wykonujemy pomiary całkowitego tłumienia deszczu A_c na testowej trasie. Pomierzoną wartość A_c można wyrazić całką

$$A_c = \int_N^0 \gamma/l/dl \quad /4/$$

gdzie:

$N-0$ - długość trasy,

γ - lokalny współczynnik tłumienia występujący na trasie od N do 0 :

$$\gamma/l/d = \int_0^d Q/a, l/N/a, l/d/a/ \quad /5/$$

gdzie d - średnica kropli.

Ponieważ $N/a/$ jest funkcją intensywności opadu R , zatem i γ jest funkcją R :

$$\gamma = \alpha \cdot R^\beta \quad /6/$$

gdzie:

α i β - współczynniki, których wartości, ustalone na podstawie dostępnych źródeł [15,16,17-22], przedstawia rys. 7.

Przegląd wyników uzyskanych z pomiarów oraz porównanie ich z obliczeniowymi wartościami tłumienia wykonał Medhurst w [1].

Jego wniosek wskazywał, że wartości pomierzonych tłumień przewyższają możliwe maksymalne poziomy przewidywane przez teorię. Starał się również wytłumaczyć poszczególne przypadki tego zjawiska.

Wartość tłumienia A uzyskana z pomiarów propagacyjnych na danej trasie przewyższa wartość tłumienia wolnej przestrzeni. Wartość całkowitego tłumienia przez opad ustala się po przeprowadzeniu wnikliwych korekcji związanych z uwzględnieniem tłumienia przez gazy, wpływu występowania troposferycznych struktur charakteryzowanych przez wskaźnik refrakcji oraz efektów odbić od Ziemi. Wartość A obciążona jest jeszcze dodatkowymi efektami rozproszenia pierwotnego i wtórnego. Efekty te nie były w zasadzie brane pod uwagę przy porównaniu zależności $\gamma = f/R$ otrzymanej z badań teoretycznych i praktycznych. Ich występowanie nie jest prawdopodobne w zakresie mniejszych częstotliwości milimetrowego zakresu. Natomiast dla częstotliwości większych zagadnienie tych efektów jest ważne i w dalszym ciągu nie wyjaśnione. Należy więc je zbadać, ponieważ udział rozproszenia w odbieranym sygnale wzrasta z częstotliwością.

Na koniec dodajmy, że porównanie tłumienia pomiarowego z obliczonym jest jeszcze komplikowane przez występowanie efektu depolaryzacji przesyłanej fali.

Związek między rozkładem rozmiarów kropli i intensywnością opadu deszczu zależy od wielu czynników, wśród których należy wymienić kierunek wiatru, mający wpływ na prędkość spadania kropli. Dotyczy to zwłaszcza małych kropli, których prędkość końcowa jest mniejsza od prędkości większych kropli. Istnieje zatem tendencja do większych zmian γ w funkcji R dla większych często-

tliwości. Eksperymentalne dane dotyczące częstotliwości większych niż 30 MHz pochodzą z pomiarów krótkich tras /kilka setek metrów/, na których działała gęsta sieć deszczomierzy. Dla określenia współczynników α i β wykorzystywano w obliczeniach średnią wartość intensywności opadu otrzymaną z poszczególnych deszczomierzy rozstawionych wzdłuż trasy. Wyniki pomiarów każdego z deszczomierzy określano w przedziałach czasu od 10 sekund do rzędu kilku minut.

Teoretyczne obliczenia związku $\gamma = f/R$ były wykonywane przy założeniu jednostajnego opadu deszczu wzdłuż trasy. Wartość współczynnika β , w zakresie 10 - 30 GHz, jest bliska jedności i A_c jest wprost proporcjonalne do średniej wartości intensywności dla danej trasy. Pewne błędy mogą występować przy wymienionym założeniu wtedy, kiedy β jest nieco większe od jedności. Kiedy β różni się znacznie od jedności, mierzona wartość A_c musi być wyliczana ze wzoru:

$$A_c = \sum_i^n \alpha \cdot R_i^\beta \Delta l \quad |7|$$

gdzie:

Δl - długość jednostkowego odcinka trasy, nie porównywalna z przestrzenną skalą występowania jednorodności opadu deszczu,

R_i - intensywność opadu występująca na i -tym odcinku jednostkowym.

Jak wynika z rysunku 7, dla częstotliwości większych niż 30 GHz wartości współczynnika β maleją ze wzrostem częstotliwości. Wte-

dy zastępcza średnia wartość intensywności opadu, którą można wykorzystywać praktycznie do obliczeń, ma następującą postać:

$$R_z = \frac{1}{L} \int_0^L R/l/ dl^{1/\beta} \quad /8/$$

gdzie:

L - długość trasy,

R/l/ - chwilowa wartość intensywności w odległości l od początku trasy,

l - długość.

Kilka prac zwraca uwagę na trudności w przeprowadzeniu korekty pomierzonych intensywności deszczu i wyrażone tam opinie wskazują, że przyczyna tych trudności leży w założeniach związku $\gamma = f/R/$.

W [23] przedstawiono poszukiwania "naturalnej definicji intensywności deszczu właściwej dla wymagań radiokomunikacji" oraz zdefiniowano intensywność opadu deszczu jako wielkość wektorową, rozważając statystyki populacji kropli wzdłuż trasy wewnątrz pierwszej strefy Fresnela.

Teoria wymaga jeszcze uzupełnienia sposobów uzyskiwania eksperymentalnych rozkładów intensywności deszczu. Istnieją dyskutowane propozycje, aby zmiany intensywności nad całą siecią deszczomierzy sprowadzić do równoważnego deszczu, jak gdyby mierzonego przez jeden deszczomierz, co spowoduje, że wartości tłumienia otrzymane eksperymentalnie będą większe od tych, jakie przewiduje teoria.

2.2.2. Zależność γ od częstotliwości

Teoretyczne prognozy tłumienia przez deszcz w funkcji częstotliwości są potwierdzone eksperymentalnie. Eksperymenty takie wykonywane są z dużą pieczołowitością również na krótkich trasach. Dotyczą one częstotliwości z zakresu 30 - 150 GHz, a wyniki tych eksperymentów dla intensywności 5 i 50 mm/h razem z krzywymi przewidywań teoretycznych [17, 18] przedstawia rys. 8. Widoczna jest tam duża zgodność pomiędzy danymi teoretycznymi i eksperymentalnymi. Dane eksperymentalne wykazują istnienie maksimum tłumienia przez deszcz, o którym wspomniano już w [62], opierając się na informacjach z pracy [11]. Z porównania współczynników tłumienia dla częstotliwości 110 i 890 GHz stwierdzono w [11], że

$$\gamma_{890} = 1,25 \cdot \gamma_{110} \quad (9)$$

co nie zgadza się z przewidywaniami teoretycznymi. Mimo to należy zaznaczyć, że efekty spowodowane przez różne polaryzacje fal badane na dwóch częstotliwościach nie są wytłumaczone, ponieważ nie rozważano efektów rozproszenia. Napotkano dodatkowe trudności z wytłumaczeniem mniej znacznego tłumienia przez parę wodną na częstotliwości 890 GHz. Wyprowadzony wniosek stwierdza, że wzrost tłumienia związany ze wzrostem częstotliwości obserwowany na większej części zakresu mikrofalowego dla danych wartości intensywności opadu nie występuje jednak dla częstotliwości większych niż 200 GHz.

2.2.3. Prognozy statystyk tłumienia

Związek między współczynnikiem tłumienia i intensywnością deszczu dla jednostajnego opadu przedstawia wzór [6]. Problem prognozowania propagacyjnej trasy linii radiowej sprowadza się do określenia statystyk zastępczej intensywności deszczu R_z , wyrażonej wzorem [8].

Statystyki R_z mogą być więc traktowane bezpośrednio jako statystyki A_c .

Ogólnie dostępne materiały meteorologiczne zawierają punktowe statystyki średniej wartości intensywności deszczu, tzn. statystyki dla poszczególnych punktów z czasami uśredniania od dziesiątek sekund do kilku minut.

Rozwiązanie problemu otrzymania statystyki zastępczej intensywności deszczu R_z z punktowych statystyk intensywności deszczu przedstawiono w [24]. Zaproponowano tam prostą metodę, polegającą na określeniu empirycznych zależności między punktowymi średnimi intensywnościami deszczu i intensywnością zastępczą R_z dla różnych długości tras i spodziewanych czasów przekroczeń.

W pracach [21] i [25] przedstawiono bardziej wyrafinowane modele przestrzennego deszczu, uwzględniając w tym jego jednostajną strukturę i przemieszczenia. Za pomocą tych modeli próbowano znaleźć metodę prognozowania statystyk tłumienia A_c na podstawie statystyk punktowych intensywności deszczu. Przedstawione są tam przykłady dające bardzo dobrą zgodność krzywych wyznaczonych z prognoz rozkładów A_c z krzywymi rozkładów otrzymanych z pomiarów. Jednak większość danych musi być przed ich wykorzystaniem dobrze zbadana.

Różne warunki w skali światowej, w których występują opady, sprawiają, że prawdopodobnie w najbliższej przyszłości zostaną opracowane nowe modele prognozowania dla potrzeb linii radiowych pracujących na częstotliwościach z zakresu fal milimetrowych. Dla realizacji niektórych koncepcji, takich jak trasowy odbiór zbiorczy dla linii radiowych [26], wymagane są jednoczesne statystyki A_c dla dwóch sąsiednich tras. Wiąże się to z potrzebą rozważenia jednoczesnych zmian intensywności deszczu w czasie i w przestrzeni.

Dyskusja na temat trasowego odbioru zbiorczego dla krótkich skoków systemów linii radiowych jest przeprowadzona w pracy [27]. Wniosek, który tam zamieszczono stwierdza, że nie są dobrze znane ani statystyki intensywności ulewnych i nawalnych deszczów, ani ilościowy związek między intensywnością deszczu a tłumieniem, tak aby mogły służyć za podstawę do projektowania systemów linii radiowych. W związku z tym projektanci starają się wykorzystywać statystyki rozkładów tłumienia uzyskanych z bezpośrednich pomiarów. Nie rozwiązuje to jednak problemu, ponieważ liczba danych jest niewielka i nie zawsze dane te mogą być wykorzystane do statystycznych opracowań.

2.3. Skutki występowania hydrometeorów o kształtach nie kulistych

Przyczyny, dla których uwzględnia się fakt występowania hydrometeorów o kształtach różnych od kulistego na trasach radiowych systemów ziemskich wykorzystujących zakres fal milimetrowych są następujące:

1. Statystyki propagacyjnego tłumienia zależą od polaryzacji. Doświadczalnie stwierdzono, że tłumienie jest większe przy poziomej polaryzacji sygnału niż przy pionowej.
2. Planuje się wykonywanie systemów radiokomunikacyjnych o dużej pojemności, wykorzystujących dwie polaryzacje w celu zmniejszenia skutków depolaryzacji.
3. Depolaryzacja sygnałów rozproszonych przez deszcz może powodować powstanie możliwości wykorzystania dyskryminacji polaryzacji jako środków zwiększających izolację między różnymi systemami wykorzystującymi te same częstotliwości.

W celu sprawdzenia skutków istnienia niesferycznych hydro-meteorów potrzebne są informacje o kształcie poszczególnych cząstek i orientacji ich osi w przestrzeni.

Przykładowo, znany jest związek pomiędzy średnim promieniem kropli deszczu a deformacją kropli. Większe krople występują pod postacią sferoid. Na rys. 2. przedstawiono związek [29], dla średniej kropli, między stosunkiem dwóch osi $\frac{b}{a}$ i średnicą kropli zdefiniowaną jako $\frac{a+b}{2}$, gdzie a oznacza dłuższą oś, b zaś krótszą. Spodziewana jest znaczna zmienność kształtów kropli wokół tego kształtu "średniego". Obserwowane są często wydłużone sferoidy. W [30] zasugerowano, że zwłaszcza w burzach z piorunami hydro-meteory, które przyczyniają się do wtórnych rozprożeń radarowych sygnałów o długości fali 3 cm mogą zawierać pokryte wodą cząsteczki lodu, głównie o kształtach wydłużonych sferoid.

Z obserwacji warunków najczęściej spotykanych w systemach ziemskiej radiokomunikacji wynika, że prawdopodobnie opad deszczu i małe krople wody stanowią przypadki ograniczające wpływ o-

padów w propagacji fal radiowych. Mogą jednak istnieć pewne obszary, gdzie przypadkiem granicznym jest opad śniegu występujący w temperaturze 0°C , a więc opad o zniekształconych, mokrych płatkach. O wpływie mokrego śniegu na propagację fal radiowych w dalszym ciągu jest niewiele informacji.

W związku z badaniami wpływu rozproszenia sygnałów przez opady na polaryzację sygnału [31] stwierdzono, że cząstki opadów są zniekształcone, a w większych kroplach zniekształcenie to dotyczy głównie poziomej osi. W badaniach tych wykorzystano radar pracujący na częstotliwości 16,5 GHz, zdolny do jednoczesnego odbioru dwóch ortogonalnych polaryzacji i wysyłania sygnałów o polaryzacji eliptycznej z żądanym stosunkiem osi elipsy lub z zorientowaną polaryzacyjną elipsą.

Oprócz informacji o kształtach hydrometeorów konieczne są również informacje o ich orientacji, aby można było oszacować wpływ na propagację kształtów hydrometeorów różnych od kulistego.

W pracy [32] przedstawiono rozkład kąta nachylenia cząstki opadu w dwóch burzach z deszczami o intensywnościach 28 i 75 mm/h. Do obserwacji orientacji poszczególnych kropli zastosowano technikę fotograficzną. Autor pracy [33] ustalił spodziewany rozkład kąta nachylenia kropli deszczu o kształtach spłaszczonej sferoidy w warunkach różnicowego tłumienia związanego z zastosowaniem polaryzacji poziomej i pionowej. Wyniki tych obliczeń zostały porównane z wynikami pomiarów różnicowego tłumienia, tzn. różnicy tłumień sygnałów z polaryzacją poziomą i pionową, na częstotliwości 30,9 GHz [34]. Rozkłady prawdopodobieństwa występowania określonych wartości kątów nachylenia nachylonych kropli deszczowych przedstawia rys. 9.

Analiza wyników pomiarów rozkładów średniego kąta nachylenia była wykonana w [31] dla części kropli, które powodują depolaryzację. Na podstawie 1212 wyników pomiarów deszczów występujących podczas burz w lecie 1970 r. stwierdzono, że maksymalna wartość średniego kąta nachylenia wynosi około 7° . Wartość ta jest znacznie mniejsza od średniej wartości w [33]. Należy stwierdzić, że informacje o kształtach hydrometeorów różnych od kulistego i ich orientacji w przestrzeni są bardzo ubogie. Z tego powodu nie wystarczają na określenie wpływu tych zniekształconych hydrometeorów na propagację fal radiowych.

Zniekształcone krople deszczu i ich wpływ na tłumienie fal elektromagnetycznych były również tematem prac [6 i 35]. Przeprowadzono tam obliczenia tego tłumienia oraz stwierdzono znaczne różnice między tłumieniami fal o polaryzacji poziomej i pionowej. Warto podkreślić jest spostrzeżenie, że maksimum różnicy między tłumieniami dla fal spolaryzowanych liniowo wzdłuż osi dużej i małej spłaszczonej sferoidalnych kropli deszczu wystąpiło na częstotliwości około 60 GHz i dla intensywności mniejszych niż około 20 mm/h. Rys. 10 przedstawia zależność od częstotliwości różnicy między współczynnikami tłumień γ_H i γ_V związanymi z dwoma polaryzacjami, poziomą i pionową, dla deszczu o intensywności $R = 12,5$ mm/h [6]. Wyniki te, z przedziału częstotliwości 15 - 30 GHz, posłużyły do wykreślenia podobnych krzywych dla większych intensywności deszczu, mimo że nie są dostępne odpowiednie dane.

Obliczenia przedstawione w [6 i 35] zostały wykonane przy założeniu pierwszego rzędu deformacji kulistych kropli deszczu. Dlatego też obliczenia te mogą być nieściśle dla intensywności deszczu

większych niż około 12,5 mm/h. Właśnie wyniki tych obliczeń zostały wykorzystane przez ekstrapolację w procesie opracowywania rozkładu kąta nachylenia kropli deszczu [33].

Stosunkowo mało jest jeszcze przeprowadzonych doświadczeń uwzględniających wszystkie zależności między tłumieniem i polaryzacjami. Zebrane i osiągalne informacje o współczynnikach tłumień związanych z polaryzacjami pionową α_V i poziomą α_H dla częstotliwości 30 GHz przedstawiono na rys. 11 jako funkcje intensywności deszczu. Jak wynika z danych wziętych z [34], spodziewana różnica między tłumieniami sygnałów o częstotliwości 30 GHz spolaryzowanymi poziomo lub pionowo jest rzędu około 6 dB na trasie o długości 2 kilometrów dla deszczu o intensywności 100 mm/h.

Skutki depolaryzacji - polaryzacja skrośna - były badane z punktu widzenia radiokomunikacyjnych systemów o dużej pojemności, które wykorzystują podwójną polaryzację [33]. Badania te przy pewnych założeniach upraszczających przedstawiają rząd wielkości depolaryzacji jako funkcję intensywności deszczu. Dla małych tras depolaryzacja jest w przybliżeniu proporcjonalna do długości trasy [33]. Przy założeniu liniowej zależności między polaryzacją skrośną i długością trasy dane otrzymane w [33] odniesiono do trasy o długości jednego kilometra, rys. 12. Współczynnik polaryzacji skrośnej wzrasta z częstotliwością aż do około 50 GHz, gdzie prawdopodobnie osiąga maksimum. Trzeba również podkreślić, że współczynnik polaryzacji skrośnej rośnie z długością trasy.

W praktycznych zastosowaniach zatem trzeba brać pod uwagę i częstotliwość i długość trasy, tak jak to przedstawiono w [33]. Trzeba również pamiętać o eksperymentalnych weryfikacjach obli-

czeń współczynnika polaryzacji skrośnej, ponieważ wprowadzone upraszczające założenia mogą dać błędne wyniki. Należy też uwzględnić fakt, że bezpośrednie działanie deszczu i śniegu na pracę anten jest również przyczyną powstawania polaryzacji skrośnej. Porównanie oddziaływania nawalnego deszczu na anteny odpowiednio zabezpieczone i odkryte przedstawiono w pracy [36].

2.4. Amplituda i faza fluktuacji spowodowanych przez hydrometeory

Statystyczne fluktuacje amplitudy i fazy chwilowych radiowych sygnałów spowodowane przez środowisko zawierające hydrometeory powstają przez rozproszenie w przód energii padającej na spadające cząstki. Fale tak rozproszone dodają się do fal bezpośrednich. Teoretyczne badania fluktuacji sygnału spowodowane przez rozproszenia pierwszego rodzaju w deszczu są opisane w [37]. Przedstawione tam obliczenia dla częstotliwości 8,6 mm wykazały, że fluktuacje są bardzo małe dla tras o długościach mniejszych niż około 20 km i intensywności opadu deszczu 50 mm/h. Odchylenie standardowe amplitudy jest dla większości przypadków rzędu 10% średniej amplitudy, natomiast maksymalne odchylenie standardowe fazy jest rzędu 0,1 radiana. Problemy degradacji sygnałów podczas ciągłej transmisji impulsów przez rozpraszającą deszczową objętość były badane w [38] dla dużych szerokości pasm na częstotliwościach 8,0, 15,5, 34,9 GHz. Szerokości pasm kanałów zapewniające nie zniekształconą transmisję ciągu impulsów przekraczają 3,5 GHz, o czym również wspomniano w poprzednim opracowaniu publikowanym w tym numerze [62].

Rozproszone pole może być opisane przez kątową funkcję rozproszenia, która przedstawia względną ilość rozproszonej energii, w kierunku odbicia fali od cząstki hydrometeoru, zawartej w różnicy kąta bryłowego. Obliczenia wartości tej funkcji zostały wykonane w [39] dla częstotliwości 1,4 - 300 GHz i dla deszczów typu Lawsa i Parsonsa o intensywnościach 1 - 150 mm/h. Okazuje się, że dla częstotliwości mniejszych niż około 10 GHz wartościątowej funkcji rozproszenia są bliskie wartości tej funkcji dla rozproszenia izotropowego. Ze wzrostem częstotliwości funkcja wykazuje istnienie rosnącego maksimum dla kierunku fali pierwotnej. Na rys. 13 przedstawiono kątową funkcję rozproszenia dla deszczu o intensywności 100 mm/h i częstotliwości w zakresie 2 - 300 GHz.

Wpływ intensywności deszczu na kątową funkcję rozproszenia można określić opisowo w odniesieniu do odpowiednich przebiegów jako łagodny. Informacje o rozproszeniu przedstawione w [10 i 39] stwarzają możliwości oszacowań fluktuacji amplitudy dla ulewnych i nawalnych deszczów dla różnych częstotliwości [37].

Z wyników przeprowadzonych doświadczeń wynika, że dla większych częstotliwości i deszczów ulewnych i nawalnych fala bezpośrednia będzie bardziej tłumiona i znacznie wzrośnie sygnał rozproszenia w przód. Większe będą fluktuacje, co może mieć duże znaczenie z punktu widzenia pojemności kanałów transmisyjnych przy projektowaniu linii radiowych zakresu milimetrowego. Na zakończenie tych rozważań należy stwierdzić, że trzeba dokładnie analizować fluktuacje amplitudy i fazy sygnałów spowodowane przez hydrometeory w celu otrzymania potrzebnych danych. Można również uwzględnić w obliczeniach wielokrotne rozproszenia oraz

wpływ niejednorodnej struktury burzowych deszczów na amplitudy i fazę sygnału bezpośredniego kierunku transmisji.

3. TROPOSFERYCZNY WSKAŹNIK REFRAKЦИИ I ODBICIA OD ZIEMI

3.1. Fale milimetrowe a troposferyczne struktury w warunkach refrakcji

Zmienność radiowego wskaźnika refrakcji w granicach warstwy troposferycznej jest bardzo duża. Dlatego też dla rozważań propagacyjnych fal radiowych nad Ziemią w czystej atmosferze istnieje ogólna potrzeba wykorzystywania prostych modeli struktur w warunkach refrakcji, które tylko w pewnym ograniczonym sensie opisują rzeczywistą sytuację. Zakładając przy tym, że badania teoretyczne różnych zjawisk propagacyjnych wywołanych przez troposferyczne struktury refrakcyjne wykazują właściwe kierunki i tendencje wtedy, kiedy zmienne są takie parametry, jak częstotliwość pracy, gradienty refrakcyjne, funkcje strukturalne i inne. W większości przypadków można mieć nadzieję, że tak właśnie jest. Natomiast kiedy potrzebne są dokładne informacje ilościowe, wówczas wymagane są dane otrzymane z długotrwałych pomiarów.

Autor pracy [40] wprowadził trzy typy charakterystyk troposfery.

Pierwszy typ opisuje istotne własności i szeroką skalę zjawisk wykorzystywanych zazwyczaj w opisach charakteryzujących troposferę, jak na przykład: średnie gradienty, warstwy rozciągające się horyzontalnie i inne. Drugi typ charakteryzuje statystyczną na-

ture i opisuje czasowo-przestrzenną naturę zmian parametrów troposferycznych przez: funkcje korelacyjne, funkcje strukturalne, widmo mocy i inne. Zakłada się przy tym pewne warunki niezmienności i jednorodności. Ponieważ warunki te nie zawsze są spełnione, zachodzi potrzeba posiadania trzeciego typu charakterystyk. Ten trzeci typ dotyczy własności, które są zbyt złożone, aby je można było rozpatrywać znanymi sposobami i nie spełniają warunków koniecznych, żeby można było te własności rozpatrywać metodami statystycznymi.

Ta klasyfikacja typów jest użyteczna przy ocenie wyników ostatnich prac na temat struktur refrakcyjnych w propagacji fal milimetrowych.

3.1.1. Statystyczne fluktuacje

Szczegółowe teoretyczne badania nad propagacją fal radiowych w troposferze z fluktuacjami wskaźnika refrakcji z jednoczesnymi zmianami średniego gradientu pionowego przedstawione są w pracach [41 - 46]. Wyniki tych badań opisują w sposób statystyczny fluktuacje amplitudy i fazy sygnału występującego w czasie i w przestrzeni podczas propagacji ciągłej fali radiowej w troposferze normalnej. Fluktuacje te ograniczają zakres dokładności pomiarów w systemach precyzyjnych pomiarów długości odcinków w przestrzeni i kątów nadejścia fali.

Badania teoretyczne wykazują, że fluktuacje amplitudy i fazy rosną w funkcji częstotliwości. Wzrost ten może być skompensowany przez skrócenie długości trasy linii radiowej. Długość ta, jak wiadomo, jest ustalana ze względu na tłumienie przez deszcz. Nie

należy przy przejściu z zakresu centymetrowego fal radiowych do zakresu milimetrowego spodziewać się znacznych zakłóceń szerokości pasm kanałów transmisyjnych spowodowanych przez turbulencyjne struktury w nie uwarstwionej, nie zaburzonej troposferze. Jednak taki problem może powstać ze względu na wzrastające wymagania na pojemność informacyjną kanału transmisyjnego wraz ze wzrostem częstotliwości. Określenie związanej z tym fluktuacji przenoszenia kanału transmisyjnego wymagałoby posiadania kompletnych informacji o zmianach przestrzenno-czasowych chwilowych opóźnień rozrzutu propagacyjnego i rozrzutu doplerowskiego. Jednak informacje te nie są osiągalne. Zamiast więc obliczeń ograniczeń pasma przez propagacyjne efekty, robiono bardziej czytelne opisy charakterystyk propagacyjnych.

W USA wykonano w latach 1967 i 1968 pomiary związane z wyznaczeniem korelacyjnego pasma częstotliwości [18]. Pomiary te przeprowadzono na dwóch trasach o długościach 8 i 32 km. Znalaziona szerokość korelacyjnego pasma częstotliwości z środkową częstotliwością 35,5 GHz przekracza 6 GHz dla wszystkich czasów na trasie o długości 8 km i w 99,9% czasu na trasie o długości 32 km. Przez szerokość pasma korelacyjnego częstotliwości rozumie się tu różnicę między dwoma częstotliwościami, dla której wartość amplitudy współczynnika korelacji poziomów sygnałów spadnie do wartości $1/e$ równej w przybliżeniu 0,37. Propagacyjny rozrzut opóźnień, który jest obliczany jako odwrotność szerokości korelacyjnej pasma, jest mniejszy od $1,6 \cdot 10^{-6}$ s. Jest prawdopodobne, że przedstawione wyniki odzwierciedlają istotne ograniczenie kanału transmisyjnego, spowodowane wpływem charakterystyk trasy i anteny, oraz w małym stopniu nieregul-

larnościami troposferycznego wskaźnika refrakcji. Nie jest raczej prawdopodobny wpływ na te wyniki warstwowości troposfery i odbić od Ziemi.

Stąd również wypływa, że rozproszenie w przód spowodowane przez nieregularności wskaźnika refrakcji w troposferze normalnej nie będzie silnie ograniczać pasma częstotliwości systemów radiokomunikacyjnych wykorzystujących fale milimetrowe. Należy jednak zaznaczyć, że istnieje składowa rozproszenia nakładana na silny sygnał. Jej istnienie może oznaczać żądanie wzrostu stosunku sygnału do szumów w systemach PCM, zwłaszcza dla małej stopy błędu [18] w porównaniu z żądaniami, jakie istnieją, gdy rozważane są tylko termiczne szумы odbiornika.

3.1.2. Odbicia troposferyczne

Współczynnik odbicia R rozległej pionowej warstwy troposferycznej o grubości B jest wyrażony przez:

$$R = R_o \cdot G$$

gdzie:

R_o - współczynnik odbicia Fresnela, który dla blisko występujących odbić ma postać:

$$R_o = \frac{n}{2 \psi^2}$$

gdzie:

n - zmiana wskaźnika refrakcji w warstwie o grubości B ,

ψ - kąt pomiędzy padającym promieniem na warstwę a warstwą,

G - zależy od założonego profilu wskaźnika refrakcji w warstwie; odpowiednie wzory można znaleźć w podręcznikach.

W 47 dla warstwy o podwójnie wykładniczym profilu wykorzystano następującą zależność:

$$G = \frac{1}{1 + 10 \frac{\beta \Psi}{\lambda}^2}$$

wartość G jako funkcję $\frac{\beta \Psi}{\lambda}$ pokazuje rys. 14.

Na ogół dla warstwy odbijającej skutecznie, $G > -10$ dB, żąda się aby

$$B < 0,5 \frac{\lambda}{\Psi}$$

Kąt padania Ψ na poziomą warstwę odbijającą będzie rzędu 7,7 rad dla składowej odbitej od tej warstwy i opóźnionej jedną nanosekundą. Grubość B warstwy potrzebna do otrzymania znacznej składowej odbicia dla tego kąta była obliczona dla różnych długości fali i jest przedstawiona w tabl. 2 wraz ze składową poziomą rzutu na kierunek trasy obszaru odbicia odpowiadającemu pierwszej strefie Fresnela. Aby otrzymać opóźnienia dłuższe od rzędu jednej nanosekundy, odbijająca warstwa powinna być usytuowana wysoko nad trasą radiową. Współczynnik odbicia maleje szybko ze wzrostem opóźnienia, ponieważ kąt padania na warstwę staje się duży.

T a b l i c a 2

Długość fali	/mm/	30	10	5	3
B	/m/	2	0,6	0,3	0,2
Składowa pozioma obszaru odbicia	/km/	2,6	1,5	1	0,8

Należy również podkreślić, że dla otrzymania intensywnego zwierciadlanego odbicia wcale nie potrzeba, aby warstwa była rozciągnię-

ta w nieskończoność. Wystarczy, aby rozciągała się tylko nad obszarem o rozmiarach pierwszej strefy Fresnela. Rozmiar strefy Fresnela wzdłuż trasy jest rzędu $a = \sqrt{L \lambda / \psi}$.

Najnowsze badania struktur troposferycznych w warunkach refrakcji wykazały, że ekstremalnie rzadkie warstwy o grubości B rzędu metrów mogą istnieć nad obszarami o rozmiarach w płaszczyźnie poziomej rzędu stu lub więcej metrów. W ten sposób silne zwierciadlane odbicia od warstw troposferycznych mogą występować zwłaszcza dla najniższych częstotliwości milimetrowego zakresu. Mogą również występować opóźnione rozproszenia aż do jednej nanosekundy z amplitudą składowej odbitej mniejszą o około 10 dB lub mniej od amplitudy bezpośredniego promienia. Często dowodzi się, że wielodrogowość może nie występować w troposferze, jeśli trasa propagacyjna jest nachylona. Jednak na trasach o nieznacznym nachyleniu mogą stale występować zjawiska lustrzanych odbić od warstwy i zaniki spowodowane wielodrogowością. Spowodowane to jest przez troposferyczne warstwy mające lokalne falowanie i przejścia o znacznym nachyleniu.

3.1.3. Odbicie od Ziemi

Przyczyną wielodrogowej propagacji fal są również zwierciadlane odbicia od Ziemi. Jeśli pominąć powierzchnie wody występujące na Ziemi, to sama Ziemia stanowi dla fal milimetrowych "lustro" słabo odbijające. Niewiele jest odbić od Ziemi i rozproszeń w kierunku propagacji. Przeprowadzone pomiary na falach z zakresu X nad różnymi typami Ziemi [48] wykazały, że współczynnik odbicia jest rzędu 0,15 - 0,33 w okolicy padania promienia. Nie należy

spodziewać się dużych zmian własności odbijania przez Ziemię fal milimetrowych.

Wyniki szeregu obszernych pomiarów odbić fal o długościach nie mniejszych niż 8,6 mm od powierzchni morza zebrano w [45]. Najważniejsze wyniki przedstawiono na rys. 15 i 16. Przedstawiona składowa odbicia zwierciadlanego zmienia się w funkcji zmian stosunku $\frac{h \Psi}{\lambda}$ zgodnie z teorią dla $\frac{h \Psi}{\lambda}$ mniejszego niż 100, przy czym h jest tu standardowym odchyleniem powierzchni wody, jest długością fali, a Ψ jest kątem zawartym pomiędzy promieniem padania a średnią powierzchnią wody. Dla stosunku $\frac{h \Psi}{\lambda}$ większego niż 100 dane eksperymentalne wykazują istnienie większych wartości współczynnika odbicia od spodziewanych przez teorię. Niepoiste pole w funkcji $\frac{h \Psi}{\lambda}$ przedstawia rys. 16. Informacje na ten temat są również osiągalne z innych parametrów charakteryzujących odbicie od morza i rozproszenia.

Nowsze badania dotyczące propagacji fal radiowych o częstotliwości 53 GHz nad wodą na trasie o długości 11 km z antenami zawieszonymi na wysokościach 6 i 16 m nad poziomem morza przedstawiono w [50]. Wyniki tych badań podtrzymują wnioski wynikające z pracy [45]. Badania współczynnika odbicia od powierzchni morza opisano również w pracy [51].

Współczynnik odbicia od powierzchni morza mierzony był na dwóch częstotliwościach 7 i 20 GHz dla kąta padania 7 miliradianów. Krzywe rozkładu współczynnika odbicia dla obu częstotliwości były zbliżone do krzywej rozkładu normalnego. Dla częstotliwości 7 GHz mediana R wynosiła 0,69, zaś dla 20 GHz 0,31. Natomiast 1% wszystkich wartości to 1 dla 7 GHz, zaś 0,8 dla 20 GHz oraz 0,99% to 0,4 i 0,1 odpowiednio dla 7 i 20 GHz. Ponieważ nie

jest podany stan morza podczas pomiarów, trudno więc porównywać te wyniki z wynikami przedstawionymi w [45].

Udział rozprożeń od Ziemi i morza w odbieranym sygnale w ziemskich systemach łączności radiowej jest niewielki w porównaniu z udziałem składowych pochodzących od odbić zwierciadlanych. Ich charakterystyki przestrzenno-czasowe muszą być jednak znane dla obliczeń systemów radiokomunikacyjnych o dużych wydajnościach. Jest oczywiste, że przypadki szkodliwych interferencji między odbieranymi dużymi składowymi, pochodzącymi z przypadkowych, nieraz znacznych składowych rozproszenia, będą stanowiły graniczny przypadek dla systemu transmisyjnego.

3.1.4. Refrakcja troposferyczna

Efekty wielodrogowości sygnałów mogą być również wywoływane przez zjawisko refrakcji występujące w troposferycznych warstwach w pobliżu poziomej trasy propagacyjnej. W badaniach możliwych opóźnień i zaników, przedstawionych w [52], podzielono trasy o zasięgu optycznym na dwie grupy, na trasy krótkie i długie. Trasa uważana jest za krótką, jeżeli opóźnienia propagacyjne spowodowane przez występowanie wielodrogowej refrakcji nie są dłuższe aniżeli opóźnienia potrzebne do wytworzenia zaniku sygnału o 3 dB. Dopuszczalne maksymalne opóźnienie na krótkich trasach dla różnych częstotliwości przedstawia tabl. 3.

Maksymalne długości tych tras są obliczone dla normalnych warunków meteorologicznych w New Jersey w USA. Jest zatem oczywiste, że krótkie trasy pozwalają na przesyłanie z bardzo małymi zniekształceniami impulsów o czasach trwania rzędu nanosekundy.

T a b l i c a 3

Częstotliwość w GHz	10	20	30	60
Maksymalne propagacyjne opóźnienie w ns.	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$0,7 \cdot 10^{-2}$
Maksymalna długość krótkiej trasy w km	6,9	5,5	4,8	3,8

Trasy, których długość przekracza maksymalną długość tras krótkich, są określone jako trasy długie. Mogą na nich występować głębokie zaniki sygnału, spowodowane wielodrogowością, powstałą w wyniku wpływu refrakcji. Dla małych procentów czasu nieprzekraczalne wartości strat sygnału powstałych w wyniku tych zaników, są proporcjonalne do iloczynu $L^3 \lambda^{-1}$, gdzie L jest długością długiej trasy, zaś λ długością fali.

3.2. Eksperymentalne badania nad efektami wielodrogowości

Można mówić o dwóch rodzajach eksperymentów. Pierwszy rodzaj to eksperymenty wykonywane dla wyjaśnienia szczegółowych zależności propagacji fal milimetrowych od własności troposfery i Ziemi. Drugi rodzaj to eksperymenty, które mają za zadanie dostarczenie statystycznych informacji o propagacji fal milimetrowych dla potrzeb planowania i projektowania systemów łączności radiowej.

Okazuje się, że nie jest wystarczająco wykorzystywany w projektach systemów przestrzennego i częstotliwościowego odbioru sygnałów model rozchodzenia się mikrofal, uwzględniający istnie-

nie promienia bezpośredniego i promienia odbitego od Ziemi, oraz występowanie zmienności zastępczego promienia Ziemi. Dla uzyskania zadowalającego opisu warunków propagacji fal radiowych w omawianym zakresie częstotliwości należy włączyć do modelu zjawisko wielodrogowości fal w troposferze i wielodrogowości związanej z odbiciami od Ziemi.

Badania związane ze zbiorczym odbiorem, popierające powyższe twierdzenie, przeprowadzono na 48 kilometrowej trasie linii zasięgu optycznego na częstotliwościach 9,1 i 9,3 GHz. Nachylenie trasy względem horyzontu wynosiło 3 miliradiany. W Szwecji natomiast przeprowadzono pomiary wskaźnika refrakcji na 7,4 km trasie nad morzem na częstotliwości 32 GHz. Antena nadajnika znajdowała się na wysokości 4 m nad średnim poziomem morza. Krzywe zysku wysokościowego określono w miejscu odbiornika w zakresie wysokości od 0 do 20 m nad poziomem morza. Jednocześnie dokonywano pomiaru profilu wskaźnika refrakcji. Na rys. 17 przedstawiono wyniki pomiarów dla standardowej atmosfery i dla przypadku występowania duktów adwekcyjnych, które były częściej mierzone. Okazuje się, że regularne kształty krzywych zysku wysokościowego są typowymi dla wspomnianych tu pomiarów. Wskazuje to, że dla celów projektowania odbiorów zbiorczych wystarczy, wspomniany na wstępie tego paragrafu, dwupromieniowy model ze zmieniającym się zastępczym promieniem Ziemi.

Te dwa przykłady wskazują również, że propagacyjny model potrzebny dla projektowania systemów radiokomunikacyjnych będzie zmieniał się znacznie w zależności od typu trasy propagacyjnej i lokalnych warunków meteorologicznych.

Eksperymenty przedstawione w [54] można zaliczyć do drugiej

klasy wspomnianej tu klasyfikacji. Na szczególną uwagę zasługują wyniki dotyczące opóźnienia propagacyjnego w funkcji amplitudy składowych opóźnionego sygnału. Na rys. 18 przedstawiono wyniki otrzymane na trasach o długościach 58, 39, 32 km. Dyskusja nad tymi wynikami przedstawiona jest w [60]. Okazuje się, że metoda, którą zastosowano przy badaniach opóźnień i amplitudy opóźnionych sygnałów umożliwia również określenie warunków wielodrogowości. Jednak w niektórych sytuacjach propagacyjnych metoda ta może okazać się zawodna. Przyczyną jest to, że opóźnienia są obliczane z pomiarów zaników propagacyjnych, które wykorzystują omiot częstotliwości. W pomiarach tych zakłada się liniową zależność fazowo-częstotliwościową, co nie zawsze jest prawdą. Niemniej, wyniki o których mowa wyżej, wskazują na to, że składowa opóźnionego sygnału powinna być rozważana jako przyczyna szumów intermodulacyjnych w systemach FM-FDM o dużej wydajności.

Możliwie dobrym uzasadnieniem odbicia troposferycznego, przynajmniej w zakresie częstotliwości 10 - 15 GHz, jest silny spadek amplitudy opóźnionego sygnału w funkcji opóźnienia. Drugim, podobnym uzasadnieniem jest wzrost tej amplitudy ze wzrostem długości trasy. Jednak niewiele jest wyników, na podstawie których można by skonstruować wyrażenia opisujące zależność między długością trasy a charakterystyką opóźnieniową. Ponadto silny wpływ na takie zależności miałyby warunki meteorologiczne, które w różnych regionach są jednak różne. Te same uwagi odnoszą się do statystyk zaników w funkcji długości trasy. Wiele należy jeszcze wyjaśnić przed przystąpieniem do zdefiniowania takich wyrażień. Istnieją pewne wskazówki w [56,57], że zakres zmian poziomów za-

ników dla małych procentów czasu nie przekracza skali zmian proporcjonalnej do zmian od L^1 do L^3 . Jest to tak duża skala zmian wartości, że trudno byłoby ją w pełni wykorzystać do konstrukcji wspomnianych wyżej wyrażeń.

Interesujące mogłoby być również przedstawienie charakterystyk opóźnienia i zaników w funkcji częstotliwości dla typowych tras w różnych rejonach, których charakterystyki Ziemi i warunków meteorologicznych są dobrze znane. Jednak dane, które spełniałyby powyższe wymagania są nieliczne. Jeden taki zestaw częstotliwościowych charakterystyk statystyk wielodrogowych zaników przedstawiono na rys. 19 [57]. Są to wyniki pomiarów przeprowadzonych w południowo-zachodniej części NRF na 69 km trasie. Godne uwagi jest spostrzeżenie, że w zakresach fal radiowych centymetrowym i milimetrowym można spodziewać się wzrostu z częstotliwością amplitudy zaników związanych z występowaniem zjawiska wielodrogowości. Ekstremum tego wzrostu znajduje się daleko powyżej 10 GHz. Charakterystyki częstotliwościowe zaników wielodrogowości są bardzo pożądane dla rozbudowania modeli prognozowania propagacji.

3.3. Wpływ efektów propagacyjnych na zysk anteny

Niewiele jest informacji w literaturze o wpływie efektów propagacyjnych na zmniejszenie się zysku anteny. Niemniej jednak należy wspomnieć tu przynajmniej o dwóch przypadkach, które mogą być interesujące i powinny być brane pod uwagę w obliczeniach. Pierwszym z nich jest zmniejszenie się skutecznej apertury anteny przez fluktuacje fazy sygnału powstałe na skutek występowania turbulen-

cyjnych struktur, powodujących zmiany wskaźnika refrakcji. Drugi przypadek spowodowany jest istnieniem ugięcia promienia radiowego na skutek silnych zmian wskaźnika refrakcji. W ten sposób nadana wiązka fal nie trafia w antenę odbiorczą. Jedne z nielicznych informacji na ten temat znajdują się w [61]. Wynika z nich, że odchylenie kąta nadejścia promienia bezpośredniego osiągały wartość $0,12^\circ$ na częstotliwości 35 GHz i na trasie o długości 10 km. Przypadek ten jest szczególnie interesujący z punktu widzenia projektów dużych anten przewidzianych dla radiokomunikacji na falach milimetrowych.

Wracając do pierwszego przypadku należy wspomnieć, że problem ten był już częściowo omawiany w poprzednim opracowaniu [62]. Na uwagę zasługują trzy prace [58, 59 i 60], w których przedstawiono podjęte próby opracowania przestrzennych charakterystyk zmian fazy na drodze wykorzystania wyników badań teoretycznych i eksperymentalnych. Okazuje się, że apertury anten z szerokością poziomą rzędu 1000λ można jeszcze wykorzystywać w zakresie fal milimetrowych na trasach o długości rzędu dziesiątków kilometrów, bez zauważalnych zmian zysku anteny i szerokości wiązki spowodowanych przez turbulencyjne zmiany wskaźnika refrakcji. Natomiast dla systemów radiokomunikacyjnych wykorzystujących fale o największych częstotliwościach zakresu milimetrowego, dla których posługiwanie się antenami o rozmiarach apertur rzędu 1000λ nie sprawia kłopotów, wpływy fluktuacji wskaźnika refrakcji są poważnym problemem.

WYKAZ LITERATURY

1. Medhurst R.G. : Rainfall attenuation of centimeter waves: Comparison of theory and measurement. IEEE Trans. Antennas Propagation 1965 t. AP-13 nr 4, s. 550-564.
2. Lin J.C., Ishimaru A. : Propagation of millimeter waves in rain. AFCRL-71-0310. Tech. Rep. 144.
3. Saxton J.A., Lane J.A. : Anomalous dispersion of water at very high radio frequencies. Meteorological Faktors in Radio-Wave propagation. Physical Society and Royal Meteorological Society Londyn 1946.
4. Perry J.W., Straiton A.W. : Dielectric constant of ice at 35,3 and 94,5 GHz. J. Appl. Phys. 1972 t. 43 nr 2, s. 731-732.
5. Fowler M.S., La Grone A.H. : Estimating attenuation through precipitation from the radar echo. Electr. Eng. Res. Labs. The University of Texas at Austin. Rep. nr P-41, 1970 nr 1, s. 26.
6. Oguchi T. : Attenuation of electromagnetic wave due to rain with disported raindrops. J. Radio Res. Labs 1964 t. 11 nr 1, s. 19-44.
7. Herman B.M., Battan L.J. : Calculations of the total attenuation and angular scatter of ice spheres. ICES. Pergamon Press 1963.
8. Battan L.J. : Radar attenuation by wet ice spheres. J. Applied Met. 1971 t. 10 nr 2, s. 247-252.

9. Oguchi T. : Scattering and absorption of a millimeter wave due to rain and melting hailstones. J. Radio Res. Lab. 1966 t. 13 nr 5, s. 141-172.
10. Setzer D.E. : Computer transmission trough rain at microwave and visible frequencies. Bell Syst. tech. J. 1970 nr 8, s. 1873-1892.
11. Llewellyn-Jones D.T., Zavody A.M. : Rainfall attenuation at 110 and 890 GHz. Electron. Lett. 1971 t. 7 nr 12, s.321-322.
12. Joss J., Waldvogel A. : Raindrop size distributions and doppler velocities.
Wiley R.L., Browning K.A., Joss J., Waldvogel A. : Measurement of drop size distribution and vertical air motion in widespread rain using pulsed doppler radar and distrometer. Proc. of the Fourteenth Radar Met. Conf. 1970 Nov. Tucson Arizona.
13. Joss J., Thams J.C., Waldvogel A. : The variation of raindrop size distributions at Locarno. Proc. of Internat. Conf. on Cloud Physics. 1968, aug., Toronto, Canada.
Waldvogel A., Joss J. : The influence of a cold front on the drop size distribution. Proc. of the Conf. on Cloud Physics. 1970, aug., Ft Collins, Col.
14. Assis M.S., Salles A.A. : Some topics on the application of millimeter waves in tropical and equatorial regions. Catholic University, Rio de Janeiro, Brazil.
15. Crane R.K. : Propagation phenomena affecting satellite communication systems operating in the centimeter and millimeter wavelength bands. Proc. IEEE 1971 t. 59 nr 2, s. 173-188.

16. Norbury J. R., White W. J. : Microwave attenuation at 35,8 GHz due to rainfall. Electr. Lett. 1972 t. 8 nr 4, s. 91-92.
17. Sander J. : Experimentelle Ergebnisse aus Messungen zur Regendämpfung von mm-Wellen bei $\lambda = 5.77, 3.3$ und 2 mm. Heinrich Hertz Inst. für Schwingungsforschung. Berlin - Charlottenburg .
18. Roche J.F., Lake H., Worthington D.T., Tsao C.K.H., Bettencourt J.T. : Radio Propagation at 27-40 GHz. IEEE Trans. Antennas Propagation 1970 t. AP-18 nr 4, s. 452-462.
19. Blevis B.C., Dohoo R.M., Cormick K.S. : Measurements of rainfall attenuation at 8 and 15 GHz. IEEE Trans. Antennas Prop. 1967 t. AP-15 nr 3, s. 394-403.
20. Turner D.J., Turner D. : Attenuation due to rainfall on a 24 km microwave link working at 11, 18 and 36 GHz. Electron Lett. 1970 t. 6 nr 10 s. 297.
21. Drufuca G. : A method to calculate attenuation statistics for microwave ground links based on raingauge records. Stormy Weather Group, Mc Gill University.
22. CCIR SG 5 Rep. 234-2, XII-th Plenary Assembly. New Delhi 1970.
23. Ruthroff C.L. : Rain attenuation and radio path design. Bell Syst. tech. J. , 1970 t. 49 nr 1, s. 121-135.
24. Battesti J., Boithias L., Misme P. : Determination de L'affaiblissement du a la pluie pour les frequences superieures a 10 GHz. Annal. Telecom. 1971 t. 26 nr 11-12, s. 439-444.

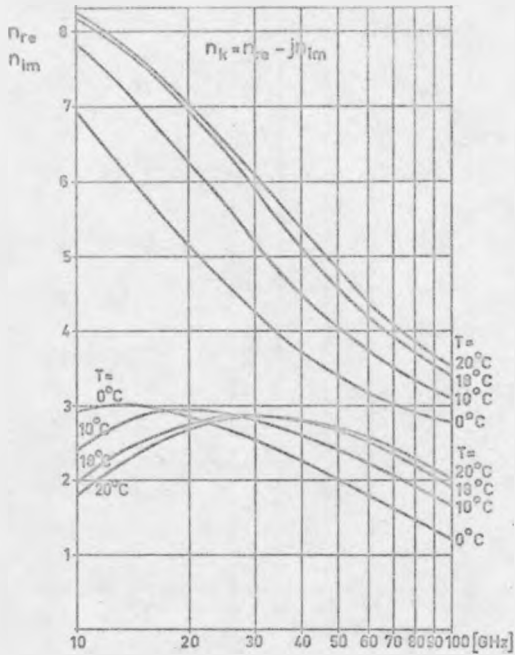
25. Guy Lefrançois: Modele theorique de precipitation equivalente sur un trajet radioelectrique. Ann. Télécomm. 1971 t. 26 nr 11-12, s. 445-454.
26. Hogg D.C.: Path diversity in propagation of millimeter waves through rain. IEEE Trans. A.P. 1967 t. AP-15 nr 3, s.410-415.
27. Osborne T.L.: Rain outage performance of tandem and path diversity 18 GHz short hop radio systems. Bell Syst. tech. J. 1971 t. 50 nr 1, s. 59-79.
28. Magono C.: Shorter contribution on the shape of water drops falling in stagnant air. J. Meteorol. 1954 t. 11 nr 1, s. 77-79.
29. Jones D.M.: The shape of raindrops. J. Meteorology 1959 nr 16.
30. Battan L.J., Theiss J.B.: Depolarization of microwaves by hydrometeors in a thunderstorm. J. atmos. Sc. 1970 t. 27 nr 6, s. 974-977.
31. Hendry A., McCormick G.C.: Polarization properties of precipitation scattering. /maszynopis/. Opublikowano na ten temat: McCormick G.C., Hendry A.: Results of precipitation backscatter measurements at 1,8 cm with a polarization diversity radar. Bull. Am. Meteorol. Soc. 1972 t. 53, nr 7, s. 684.
32. Saunders M.J.: Cross polarization at 18 and 30 GHz due to rain. IEEE Trans. Antennas Prop. 1971 t. AP-19 nr 2, s.273-277.
33. Thomas D.T.: Cross - polarization distortion in microwave

- radio transmission due to rain. Radio Sc. 1971 t. 6 nr 10, s. 833-839.
34. Semplak R. A. : Effects of oblate raindrops on attenuation at 30,9 GHz. Radio Sc. 1970 t. 5 nr 3, s. 559-564.
35. Oguchi T. : Attenuation of electromagnetic wave due to rain with disorted raidrops. J. Radio Res. Labs. 1960 t. 7 nr 33, s. 467-485.
36. Watson P. A. , Goodall F. , Chobrial S. : Mutual interference between linear crosspolarized radio channels at 11 GHz. Electron. Letters 1971 t. 7 nr 13, s. 374-375.
37. Oguchi T. : Statistical fluctuation of amplitude and phase of radio signals passing through the rain. J. Radio Res. Labs 1962 t. 9 nr 41, s. 51-72.
38. Crane R. K. : Coherent pulse transmission through rain. IEEE Trans. Antennas Prop. 1967 t. AP-15 nr 2, s. 252-256.
39. Setzer D. E. : Anisotropic scattering due to rain at radio relay frequencies. Bell Syst. tech. J. 1971 t. 50 nr 3, s. 861-868.
40. Lee R. W. : A review of line-of-sight propagation studies of the small scale structure of the atmosphere. Radio Sc. 1969 t. 4 nr 12.
41. Tatarski V. I. : The effects of the turbulent atmosphere on wave propagation / tłum. z rosyjskiego na ang. / . US Department of Commerce, National Information Sevice; chronione prawem autorskim: Israel Program for Scientific Translations 1971.

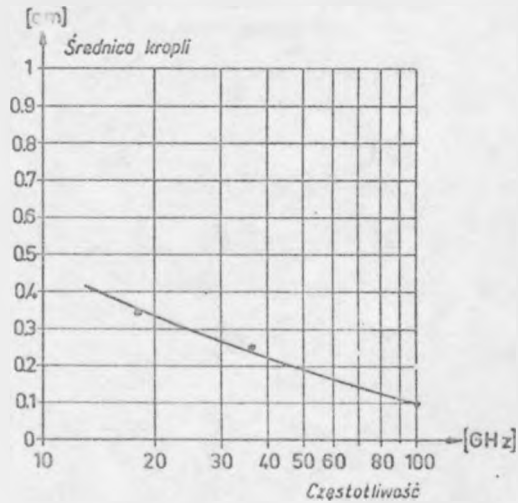
42. Strohbehn J.W. : Line-of-sight wave propagation through the turbulent atmosphere. Proc. IEEE 1968 t. 56 nr 8, s. 1301-1318.
43. Ishimaru A. : Temporal frequency spectra of multifrequency waves in turbulent atmosphere. IEEE Trans. A.P. 1972 t. AP-20 nr 1, s. 10-19.
44. Clifford A.F., Strohbehn J.W. : The theory of microwave line-of sight propagation through a turbulent atmosphere. IEEE Trans. Antennas Prop. 1970 t. AP-18 nr 2, s. 264-274.
45. Beard C.I. : Coherent and incoherent scattering of microwaves from the ocean. IRE Trans. Antennas Prop. 1961, t. AP-9, nr 5, s. 470-483.
46. Lee R.W., Harp J.C. : Weak scattering in random media, with applications to remote probing. Proc. IEEE. 1969 t. 57 nr 4, s. 375-406.
47. Eklund F., Wickerts S. : Wavelength dependence of microwave propagation for beyond the radio horizon. Radio Sc. 1968 t. 3 nr 11, s. 1066-1074.
48. Tomlinson H.T., Straiton A.W. : Analysis of 3-cm radio height-gain curves taken over rough terrain. Trans IRE Antennas Prop. 1959, t. AP-7, nr 10, s. 405-413.
49. Keelty J.M. : PCM communications using millimeter and sub-millimeter wave frequency bands. Presented at 1970 IEEE Canadian symposium on Communications in Montreal.
50. Mondloch A.J. : Overwater propagation of millimeter waves. IEEE Trans. A.P. 1969 t. AP-17 nr 1, s. 82-85.

51. Akiyama T., Inoue T., Sakagami S.: Experimental studies for microwave propagation on oversea line-of-sight path. /Conference report/.
52. Ruthroff C. L.: Multiple-path fading on line-of-sight microwave radio systems as a function of path length and frequency. Bell. Syst. tech. J. 1971 t. 50 nr 7, s. 2375-2398.
53. Mc Gavin R.E., Dougherty H.T., Emmanuel C.B.: Microwave space and frequency diversity performance under adverse conditions. IEEE Trans. Comm. Techn. 1970 t. 18 nr 3, s. 261-263.
54. Turner D., Easterbrook B.J., Golding J.E.: Experimental investigation into radio propagation at 11,0 - 11,5 GHz. Proc. IEE 1966 t. 113 nr 9, s. 1477-1489.
55. Lintz Cristensen E., Gudmandsen P.E.: A study of 10-18 GHz line-of-sight propagation measurements. The Technical University of Denmark Rep. 1970 t. 85 nr 12.
56. Abel N.: Wellenausbreitung im Bereich VI. NTF.
57. Abel N.: Dämpfungsverhalten von Funkstrecken mit direkter Sicht bei 7 bis 15 GHz.
58. Thompson M.C., Janes H.B.: Measurements of phase-front distortion on an elevated line-of-sight path. IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. 1970 t. AES-6, nr 5, s. 646-656.
59. Brown W.M., Riordan J.F.: Resolution limits with propagation phase errors. IEEE Trans. A.E.S. 1970 t. AES-6 nr 5, s. 657-662.

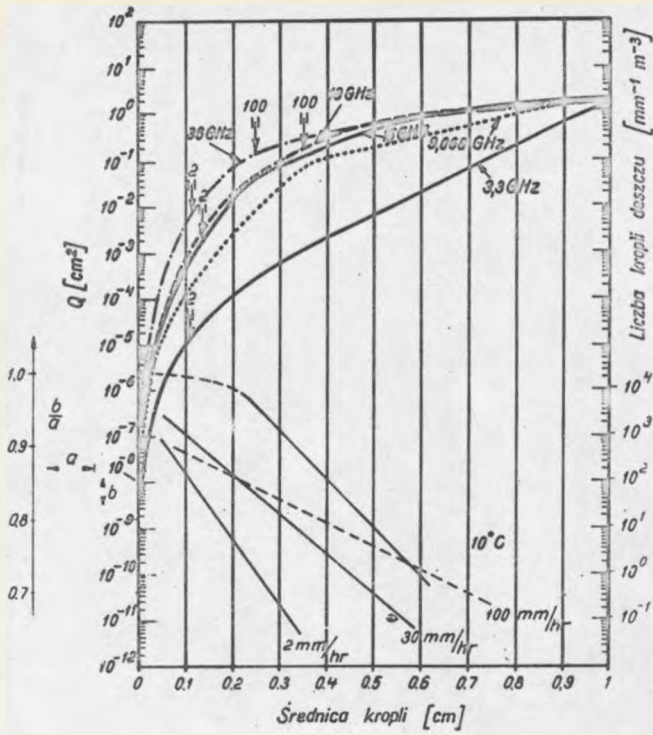
60. Porcello L.J. : Turbulence-induced phase errors in synthetic aperture radars. IEEE Trans. AES 1970 t. AES-6 nr 5, s. 636-644.
61. Lees M.L. : High resolution measurement of microwave refraction on short tropospheric paths. IEEE Trans. Antennas Prop. 1972 t. AP-20 nr 2, s. 176-181.
62. Dusiński A. : Przegląd propagacyjnych skutków w łączności Ziemia - kosmos na częstotliwościach wyższych od 10 GHz. Opracowano na podstawie referatu wygłoszonego na XVIII Generalnej Konferencji URSI w Warszawie w 1972 r. 21-29 sierpnia. Blevis B.S. : Effects on earth - space communications at frequencies greater than 10 GHz a review.



Rys. 1. Rzeczywiste i urojone części wskaźnika refrakcji wody w funkcji częstotliwości



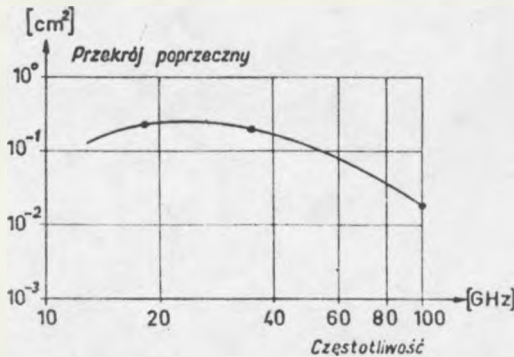
Rys. 3. Średnice kropli biorące maksymalny udział w tłumieniu funkcji częstotliwości



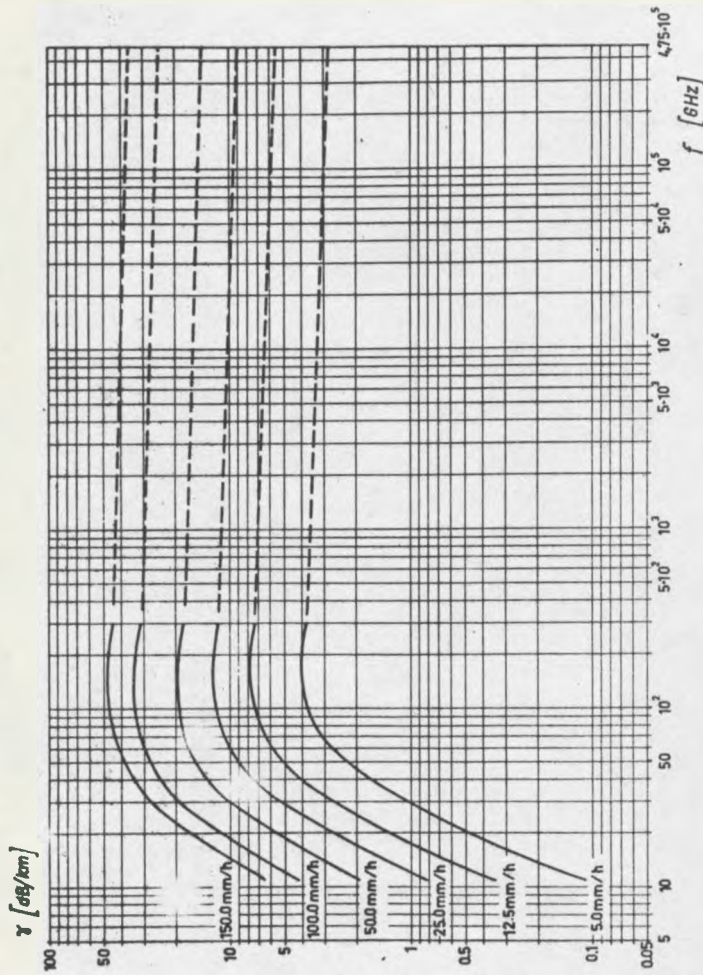
Rys. 2. Krzywe górne - całkowite tłumiący przekrój poprzeczny Q w funkcji średnic kropli przy założeniu ich kulistości dla temperatury 10° i częstotliwości z zakresu 3,3 - 100 GHz

Trzy krzywe dolne i skala prawa - rozkłady Marshalla - Palmera rozmiarów kropli dla $R=2, 30, 100$ mm/h

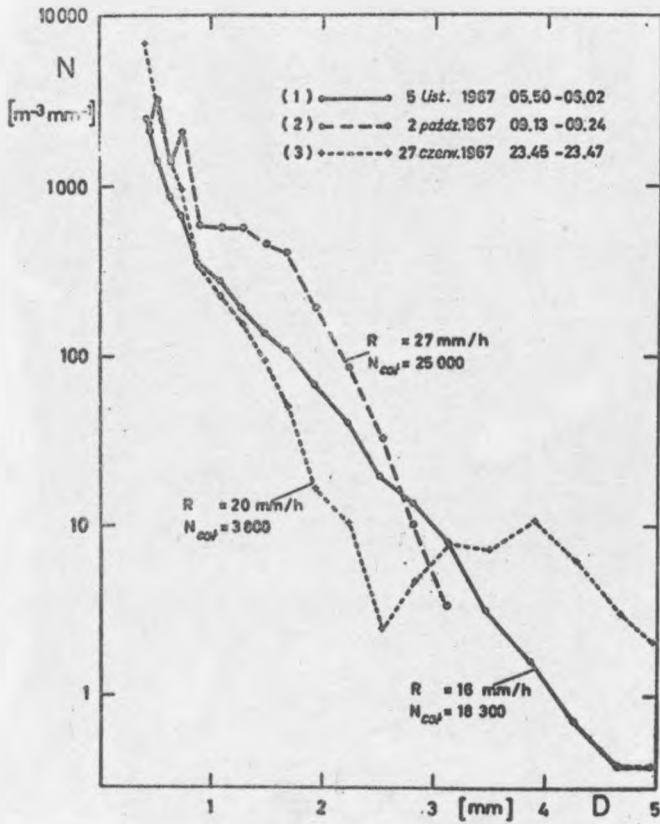
Skala lewa $\frac{a}{b}$ - stosunek osi spłaszczonej kropli w funkcji średniej średnicy kropli



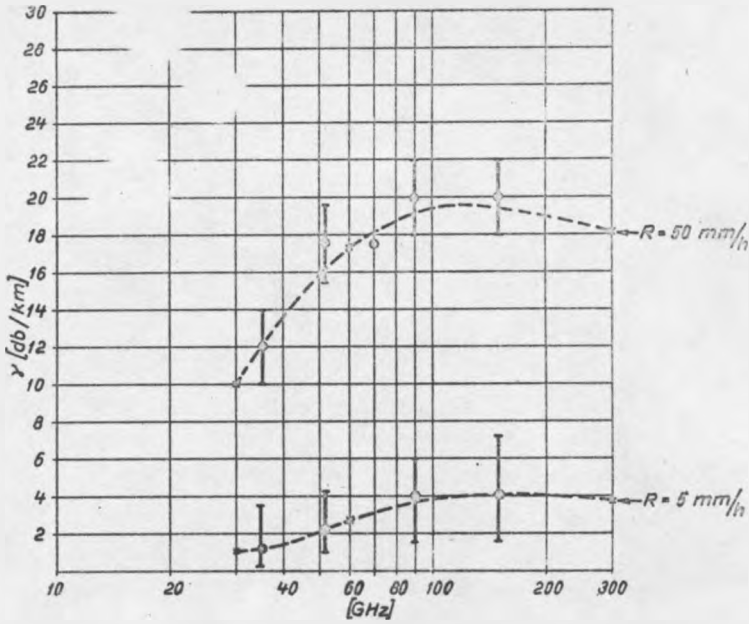
Rys. 4. Całkowite tłumiący przekrój, dający maksymalne tłumienie, w funkcji częstotliwości



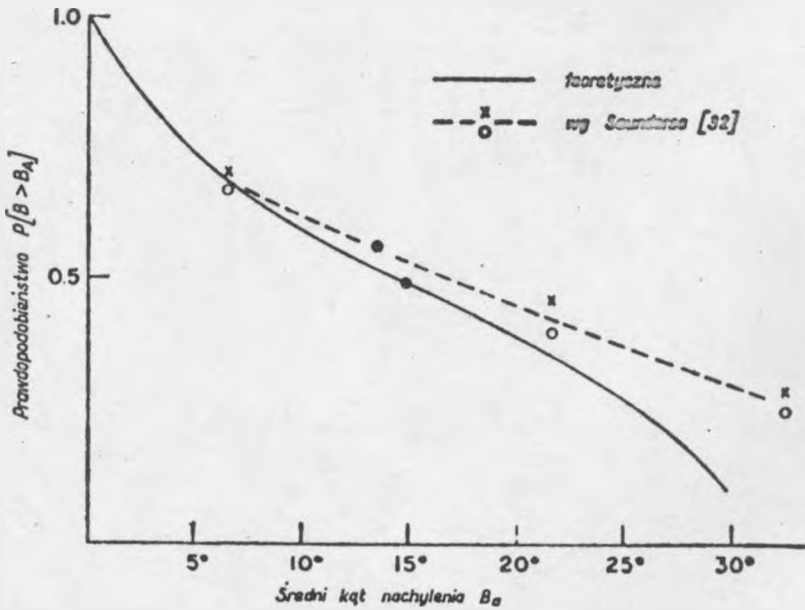
Rys. 5. Współczynnik tłumienia γ w funkcji częstotliwości dla różnych wartości intensywności opadu R



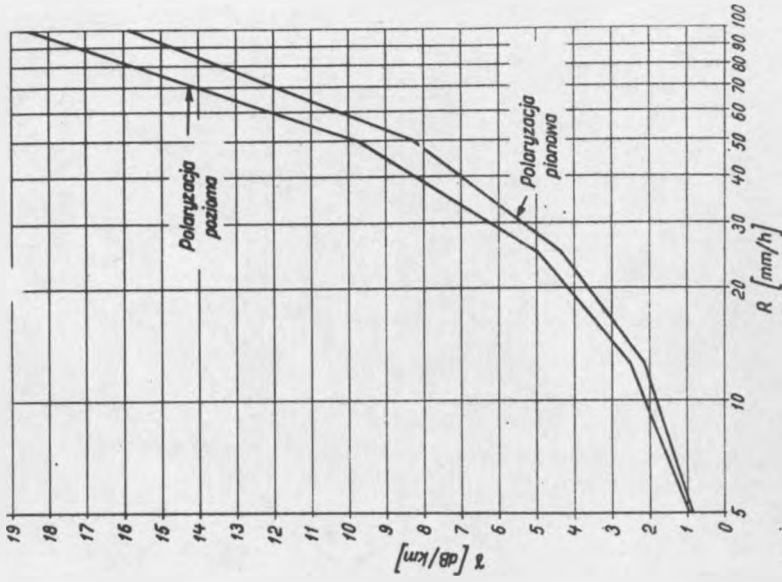
Rys. 6. Przykłady rozkładów kropli w deszczu uzyskane z pomiarów



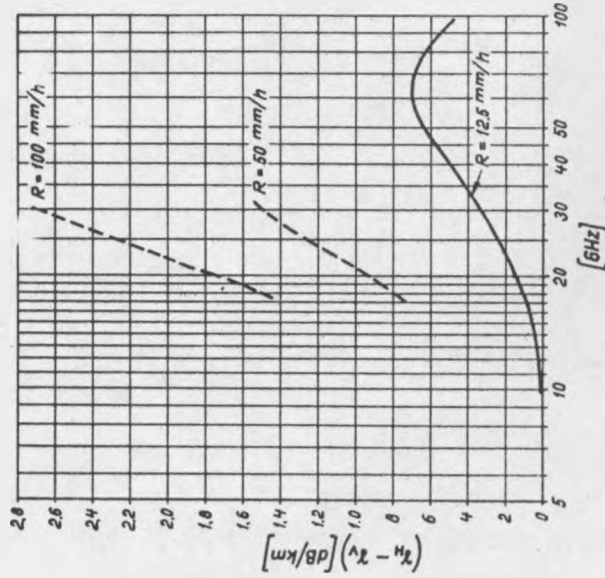
Rys. 8. Porównanie tłumień spowodowanych przez deszcz, obliczonego i pomierzonego



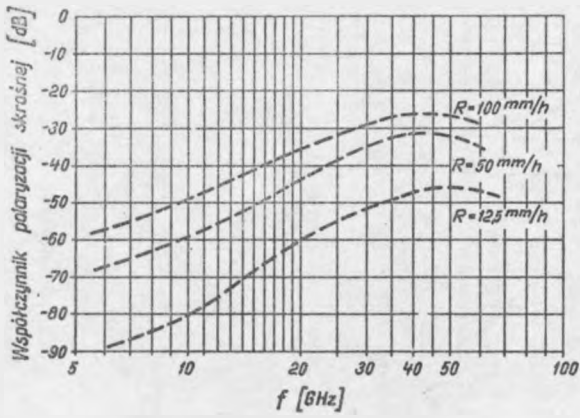
Rys. 9. Rozkłady prawdopodobieństwa kąta nachylenia nachylonych kropli



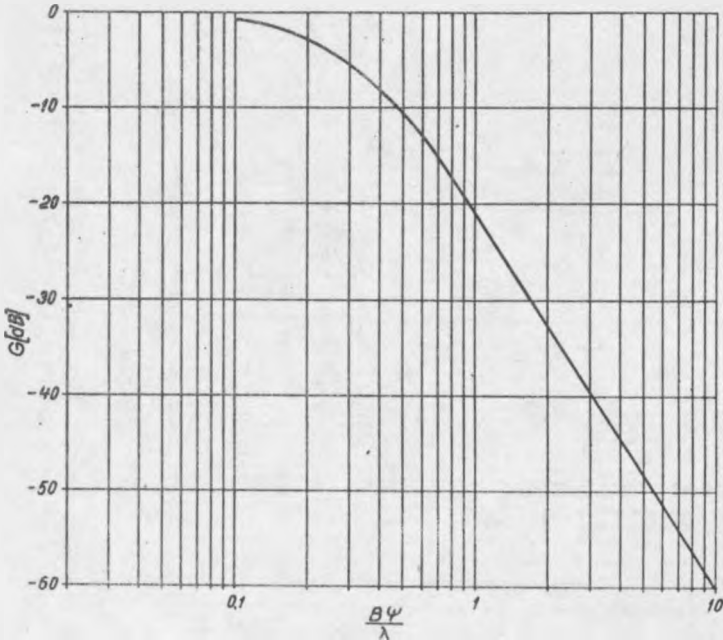
Rys. 11. Zależność współczynnika tłumienia spowodowanego przez deszcz fal o częstotliwości 30 GHz z polaryzacjami poziomą i pionową od wartości intensywności



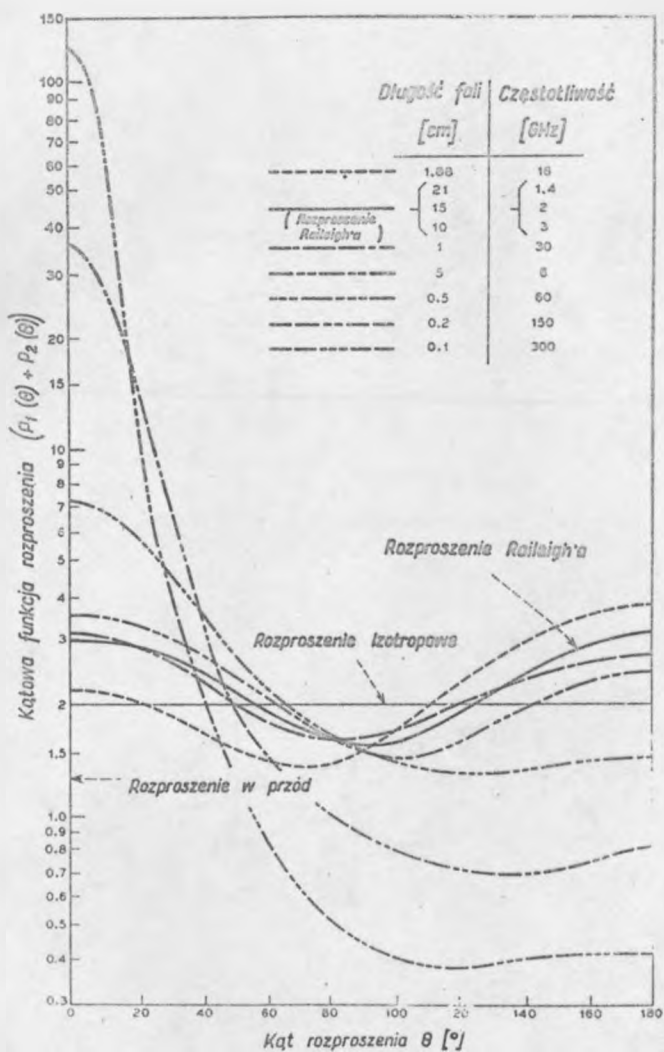
Rys. 10. Zależność częstotliwościowa różnicy w współczynników tłumienia dla poziomej i pionowej polaryzacji



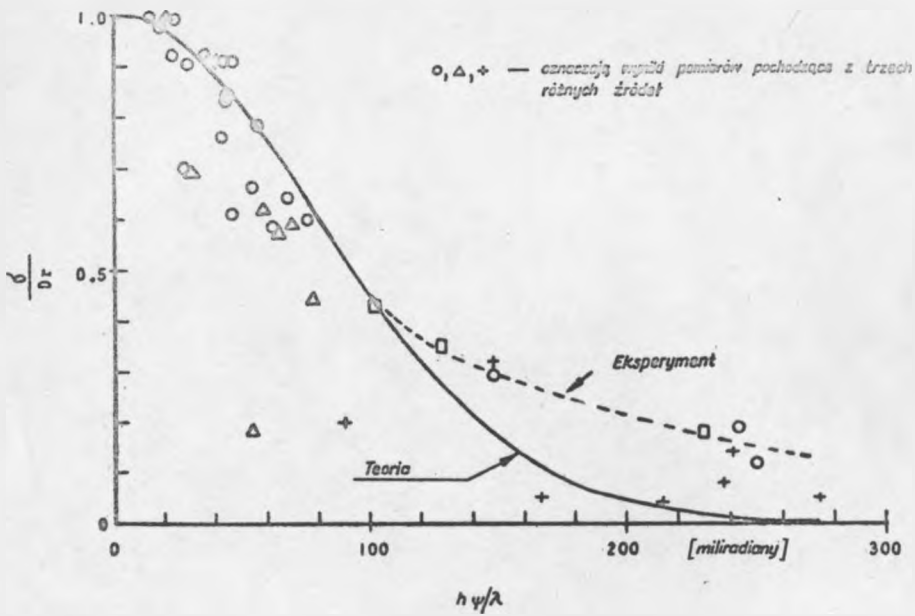
Rys. 12. Polaryzacja skrajna spowodowana przez deszcz w funkcji częstotliwości; wyniki pomiarów na trasie o długości 1 km



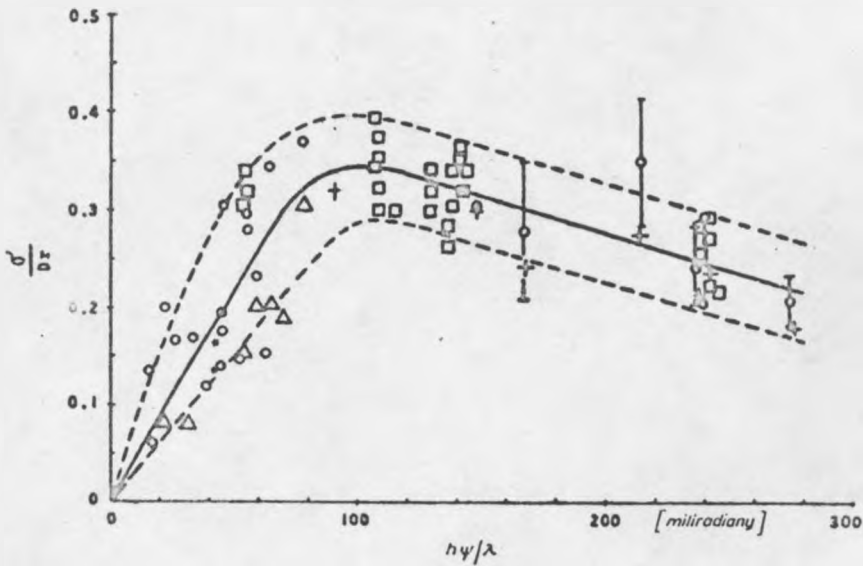
Rys. 14. Współczynnik G w funkcji parametru warstwy $B\Psi/\lambda$



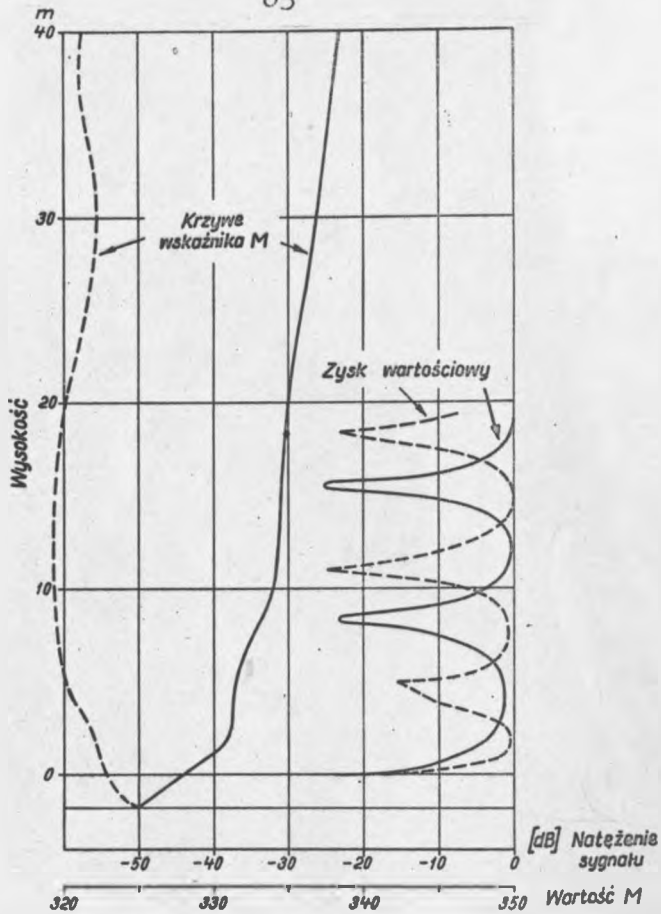
Rys. 13. Przebiegi funkcji kątowej rozproszenia dla różnych częstotliwości



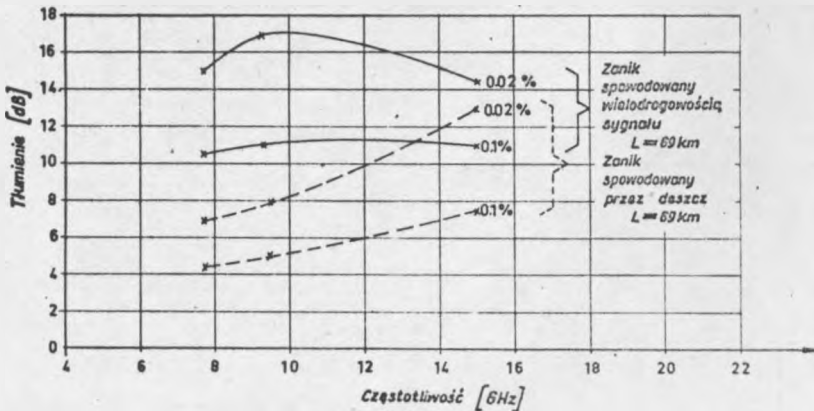
Rys. 15. Odbite spójne pole w funkcji nierówności powierzchni wody oceanu



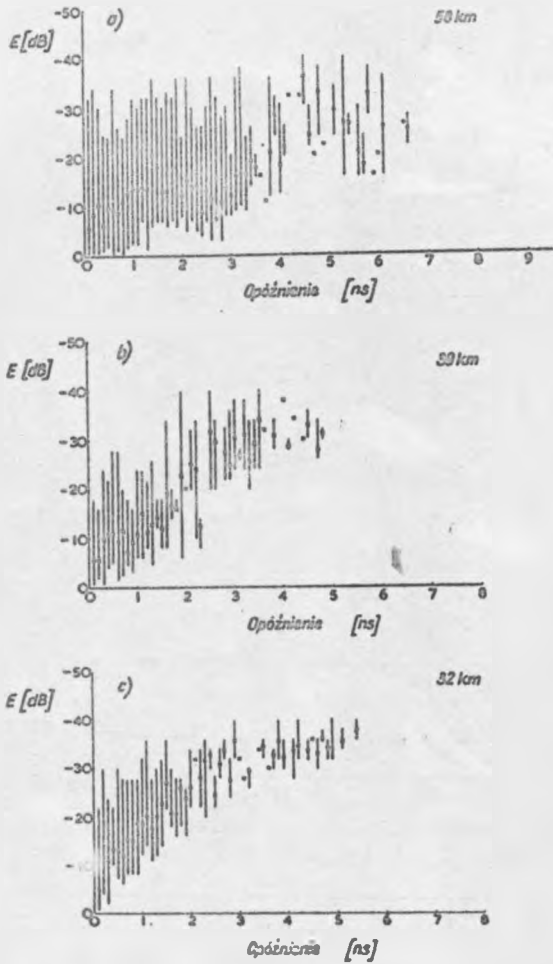
Rys. 16. Odbite niespójne pole w funkcji nierówności powierzchni wody oceanu



Rys. 17. Profile zmodyfikowanego wskaźnika refrakcji M i zysku wysokościowego dla częstotliwości 32 GHz dla trasy o długości 7,4 km



Rys. 19. Charakterystyki częstotliwościowe statystyk wielodrogowych zaników na trasie o długości 69 km dla 0,1% i 0,02% czasu



Rys. 18. Zakres zmian amplitudy składowej opóźnionego sygnału i jej wartości średniej w funkcji opóźnienia dla częstotliwości 11,0 - 11,5 GHz na trasach o bezpośredniej widoczności

x - średnia wartość, E - amplituda składowej opóźnionej odniesiona do składowej bezpośredniego sygnału

PROPAGACJA SUBMILIMETROWYCH FAL RADIOWYCH W ATMOSFERZE ZIEMI

Opracował A. Dusiński na podstawie referatu Sokolov A.V., Sukhonin E.V.: Propagation of Submillimeter Radio Waves in the Earth Atmosphere, ogłoszonego na XVII Generalnej Konferencji URSI w Warszawie w sierpniu 1972 r.

1. WPROWADZENIE

Rozwój systemów komunikacyjnych radarowych i nawigacyjnych i innych radioelektronicznych zastosowań wymaga stopniowego opanowywania zakresów fal milimetrowych, submilimetrowych, podczerwieni i światła widzialnego. Wykorzystanie tych fal pozwoliłoby na transmisję dużej ilości informacji i dostarczyłoby korzystnych rozwiązań bezinterferencyjnych systemów radarowych krótkich zakresów. Oprócz tego można wykorzystać te fale do celów badań atmosfery Ziemi i innych planet oraz jeszcze innych zastosowań w przyszłości [1].

Zakres fal submilimetrowych to fale o długościach od 0,1 do 1,0 mm / 3000-300 GHz/. W praktyce fale te nie są wykorzystywane mimo silnego rozwoju w ostatnich latach techniki nadawania i odbioru. Jest to spowodowane przede wszystkim istnieniem dużego tłumienia tych fal przez atmosferę, większego w porównaniu z tłumieniem fal centymetrowych i milimetrowych. Całkowite tłumienie fal submilimetrowych jest połączone z rezonansowym i nierezonansowym pochłanianiem w atmosferze. Badania prowadzone w ostatnim czasie są jeszcze niepełne. Dotyczy to zwłaszcza badań pro-

prowadzonych w naturalnych warunkach. Niniejsze opracowanie omawia badania i ich wyniki z ostatnich 12 lat.

2. MOLEKULARNE TŁUMIENIE

Podstawowym składnikiem pochłaniającym intensywnie energię fal submilimetrowych w atmosferze Ziemi jest para wodna. Molekularne widmo pochłaniania pary wodnej składa się z 900 intensywnych linii oraz sponad 2000 słabych linii. Tłumienie powodowane przez linie tlenu jest małe i współczynnik tłumienia nie przekracza 0,03 dB/km dla fal dłuższych niż jeden milimetr.

Pierwszą ilościową ocenę tłumienia milimetrowych i submilimetrowych fal radiowych wykonał van Vleck [4]. Później teoria molekularnego tłumienia była rozwijana przez innych autorów jak Weisskopf, Rogers, Zhevakin, Bastin, Hall i innych [5-12,20]. O niektórych wynikach badań w odniesieniu do fal centymetrowych i milimetrowych wspomniano już w pierwszym opracowaniu zamieszczonym w tym numerze [42].

Podobnie, jak zostały obliczone efekty związane z istnieniem widma pochłaniania pary wodnej w zakresie długości fal radiowych 8 cm' - 0,01 mm, zostały również oszacowane skutki istnienia pewnych form linii i szerokości połówkowej linii odzwierciedlane przez współczynnik tłumienia, np. [3,8,18,19]. Największy udział w rozwoju teorii form linii ma Gross [13], który pierwszy otrzymał wszystkie formy linii z rozwiązań kinetycznego równania Boltzmann.

Pierwsze ilościowe pomiary pochłaniania submilimetrowych fal przez parę wodną wykonali Theissing, Caplan i Gebbie [14,15]. Podobne pomiary prowadzone były w ZSRR przez N.G. Yaroslavsky'ego [16]. W czasie kilku lat minionych pomiary pochłaniania przez parę

wodną prowadzone były w warunkach sztucznych i naturalnych i wykorzystywały źródła spójnych i niespójnych sygnałów. Znalezione teoretycznie wartości współczynnika pochłaniania okazały się od 1,25 do 2,5 razy większe od zmierzonych [2,18].

Polepszenie zgodności wyników badań teoretycznych z wynikami pomiarów jest możliwe do wykonania sposobami sugerowanymi w [12,22].

Pierwszy sposób jest połączony z wydzieleniem linii z wymienionej grupy słabych linii pochłaniających, poprawnym określeniem ich szerokości połówkowej stosownie do niedawnych pomiarów Ruska oraz ich wierzchołków. Metoda, jaką przedstawił K. A. Aganbekyan [12] pozwala na zmniejszenie rozbieżności między teorią i eksperymentem do 40% dla dłuższych fal zakresu submilimetrowego i do 15% dla fal krótkich tego zakresu / tabl. 1/.

Druga możliwość, rozważana po raz pierwszy przez S. A. Zhevakina i A. A. Viktorova, zakłada istnienie dimerów pary wodnej [22], [23]. Okazało się, że dimery mogą przyczyniać się do występowania pochłaniania fal w przybliżeniu dłuższych niż 0,7 mm, podobnie jak monomery pary wodnej. Metoda taka pozwala również zredukować różnicę między wynikami badań teoretycznych i eksperymentalnych, mimo że do chwili obecnej uzyskane eksperymentalnie dimery są niepewne.

Podsumowując przyczyny różnicy między wynikami teoretycznymi i eksperymentalnymi należy wymienić główne z nich:

1. Brak wiedzy odnośnie zależności półszerokości linii od długości fali.
2. Możliwości występowania dimerów pary wodnej.

3. Nieuwzględnianie udziału we współczynniku pochłaniania izotopów pary wodnej, innych gazów i dużej liczby słabych linii pary wodnej.
4. Nieuwzględnienie efektów spowodowanych przez niesztuczne wierzchołki molekuł pary wodnej.

3. ZANIKI

Zjawisko zanikania sygnału na falach submilimetrowych różni się znacznie od zjawiska występującego w zakresie fal centymetrowych. Jeśli brak jest wpływu powierzchni Ziemi, to poziom sygnału fal submilimetrowych posiada powolne i silne fluktuacje. Powolne fluktuacje spowodowane są przez zmiany zawartości pary wodnej lub opadów wzdłuż trasy propagacyjnej. Średnie tłumienie przez molekuly i aerozole może być przewidywane na podstawie danych dotyczących zmian koncentracji bezwzględnej wilgotności lub intensywności opadu. Badania silnych fluktuacji o częstotliwościach 0-50 Hz wykryły zjawisko malenia fluktuacji związane ze wzrostem pochłaniania [2, 24, 25]. Badania teoretyczne tego problemu były prowadzone przez H. Gurvicha i innych [40, 41]. Natomiast dokładne i szczegółowe badania tego zjawiska prowadzone były w ZSRR w pracach wykorzystujących słynną metodę S.M. Rytova jednokrotnych zaburzeń, biorąc pod uwagę fluktuacje składowych wskaźnika refrakcji rzeczywistej i urojonej [25].

Można pokazać, że jeśli rozkłady fluktuacji wilgotności są zgodne z prawem Gaussa, stopień zmniejszenia fluktuacji P/χ zgodnie z [25] będzie wynosił:

$$P/x/ = \frac{B^2}{B_0^2} = 0,625 \quad /1/$$

gdzie: B^2 i B_0^2 - średnie kwadratowe fluktuacji amplitudy sygnału dla przypadków odpowiednio: ośrodka pochłaniającego i nie pochłaniającego, tzn. przezroczystego. Zjawisko zmniejszania się fluktuacji było badane eksperymentalnie przez Sokolova i Sukhoina w pobliżu środkowej linii pochłaniania pary wodnej występującej na fali o długości 0,921 mm w warunkach propagacji fal submilimetrowych na trasach o długościach 363, 680 i 1200 m. Otrzymane wyniki przedstawiają rys. 1,2,3,4^{x/}, pokazując jednocześnie jakościową zgodność między teorią i praktyką. Amplituda fluktuacji dla środka linii pochłaniającej rys. 1,2,3,4, jest w przybliżeniu taka sama jak dla fali o długości 8 mm. Maksymalny współczynnik zmniejszenia fluktuacji odniesionych do środkowej linii 0,921 mm wynosi 5 dla propagacji na trasie o długości 680 m. Z teorii wynika, że w tych samych warunkach można spodziewać się większych zaników od zaobserwowanych.

Przyczyny różnicy między wynikami teoretycznych badań fluktuacji amplitudy sygnału w ośrodku pochłaniającym a wynikami eksperymentalnymi nie są w pełni wyjaśnione. Możliwe, że te rozbieżności łączą się z ograniczającym widmem turbulencji w przypadku wąskiej wiązki promieniowania, brakiem danych eksperymentalnych dla rzeczywistej średniej temperatury i dla fluktuacji wilgotności w przyływach powietrza w pobliżu powierzchni Ziemi oraz z nie-

^{x/} Rysunki są zamieszczone na końcu artykułu.

kulistym czołem padających fal radiowych. Uwzględniając w rozważaniach te przyczyny, można doprowadzić do poprawy zgodności między teorią a eksperymentem.

4. TŁUMIENIE PRZEZ HYDROMETEORY

Tłumienie fal submilimetrowych spowodowane przez różne typy hydrometeorów, jak np.: opad deszczu, płatki śniegu, grad, obłoki i inne, jest wywołane istnieniem cieplnym strat w poszczególnych cząsteczkach i rozproszeniem fal radiowych w środowisku hydrometeorów. Na początku lat siedemdziesiątych prowadzone były teoretyczne badania tłumienia fal submilimetrowych spowodowanego przez deszcz i mgłę. Należy wspomnieć, że w przypadku fal submilimetrowych nie można użyć wzoru relaksacyjnego Debay'a [27-29] w celu określenia zespolonej stałej dielektrycznej płynnej wody.

4.1. Deszcz

Do obliczeń tłumienia powodowanego przez deszcz można wykorzystywać wzór Mie, biorąc pod uwagę najnowsze dane z pomiarów składowych rzeczywistej i urojonej, wskaźnika refrakcji płynnej wody. Przy założeniu kulistego kształtu kropli deszczu i ciągłego rozkładu w przestrzeni wyrażenie na współczynnik tłumienia może być zapisane w następujący sposób:

$$\gamma = 4,34 \int_0^{\infty} Q_{sk} / x, m / \pi a^2 N_0 f / a / da \quad |2/$$

gdzie:

- Q_{sk} - współczynnik skutecznego tłumienia,
 N_o - całkowita liczba kropli w jednostce objętości,
 $f/a/$ - funkcja rozkładu rozmiarów kropli deszczu,
 a - promień kropli deszczu,
 $x = 2\pi a/\lambda$,
 λ - długość promieniowanej fali,
 m - zespolony wskaźnik refrakcji płynnej wody.

Wzór ten stanowi rozwiniętą postać wzoru przedstawionego w poprzednim opracowaniu [43]. W pracy [30] wartość zespolonego wskaźnika refrakcji została określona za pomocą wzoru relaksacyjnego Debay'a, natomiast w pracy [31] do wspomnianych obliczeń wykorzystano wzór Debay'a i składowe Polaryzacji Frelicha.

Wyniki obliczeń współczynnika tłumienia fal submilimetrowych i milimetrowych spowodowanego przez deszcz o różnych intensywnościach przedstawia rys. 5. Obliczenia te zostały wykonane przez autorów referatu, na podstawie którego wykonano niniejsze opracowanie. Do obliczeń tych wykorzystano wartości współczynnika refrakcji m z danych przedstawionych w pracach [28, 29] oraz rozkłady rozmiarów kropli, które są szczególnymi przypadkami rozkładu gamma.

4.2. Śnieg

Tłumienie spowodowane przez suche płatki śniegu było mierzone na fali 0,96 mm na trasie o długości 680 m [35]. Średnia gęstość spadającego śniegu wynosiła 0,07 g/cm w temperaturze powietrza nie większej niż -2°C . Zależność tłumienia od intensywno-

ności opadu śniegu przedstawia rys. 6. Krzywa 1 przedstawia aproksymację wyników pomiarów przez równanie

$$\gamma = 3,02 I^{0,8} \text{ [dB/km]} \quad /3/$$

gdzie: I - intensywność opadu śniegu.

Krzywa 2 przedstawia wyniki obliczeń współczynników tłumienia spowodowanego przez śnieg, wykonanych za pomocą wzoru Mie, zastępując cząstki śniegu kulami śnieżnymi z promieniami skutecznymi równymi kropłom uzyskanym po stopieniu rzeczywistych cząstek śniegu. Rozkład rozmiarów kul śnieżnych wzięto do obliczeń z pracy [36]. Obliczone wartości tłumienia są pięciokrotnie mniejsze niż wartości eksperymentalne, mimo że promienie skuteczne kul śnieżnych wzrosły dwukrotnie.

Znalezione tłumienie spowodowane przez śnieg było 2,0-2,5 razy większe niż przez deszcz o tej samej intensywności. Ten fakt może oznaczać większą zawartość wody w opadzie śniegu niż w opadzie deszczu.

4.3. Grad

Brak jest eksperymentalnych danych dotyczących tłumienia fal submilimetrowych przez grad, pochodzących z omawianego tu przedziału czasu. Tłumienie spowodowane przez grad zostało oszacowane przez autorów referatu [43] dla cząstek gradu, mających rozmiary zgodne z rozkładem ze wzoru /2/ po odrzuceniu efektów wielokrotnych rozprożeń. Obliczenia wykonywane były dla różnych intensywności opadu gradu i różnych średnic cząstek. Zespolony wskaźnik refrakcji wzięty do obliczeń wynosił $m = 1,78 - j 0,0024$. Wyniki obliczeń prezentuje tabl. 2.

T a b l i c a 2

Współczynnik tłumienia spowodowanego przez grad
o intensywności $R = 10 \text{ mm/h}$ [dB/km]

Średnice cząstek gradu, [mm]	Długość fali, [mm]	
	1,0	0,1
2,5	2,7	2,0
5,0	0,9	0,8
10,0	0,4	0,4

4.4. Mgły i obłoki

Również tłumienie spowodowane przez mgły i obłoki jest zupełnie niedostatecznie zbadane. Otrzymano kilka teoretycznych i eksperymentalnych wyników obliczeń tłumienia przez te hydrometeory. Obliczenia wykonano za pomocą wzoru /2/ dla rozkładu gamma rozmiarów kropli.

$$f/a/ = \frac{1}{\mu!} \left(\frac{\mu}{\tau}\right)^{\mu+1} a^{\mu} e^{-\mu \frac{a}{\tau}} \quad /4/$$

gdzie:

a - promień cząstki,

τ - najbardziej prawdopodobny promień,

μ - parametr związany z liczbą zdarzeń.

Pomiary tłumienia spowodowanego przez mgły wykonano na falach o długościach 0,311, 0,337 i 0,345 mm [37,38]. Zmierzono również tłumienie sztucznej mgły o różnej gęstości dla fal 0,311 i 0,063 mm. Rysunek 7 ilustruje dostateczną zgodność wyników teoretycznych z eksperymentalnymi. Uważa się, że współczynnik tłumienia

mienia spowodowanego przez mgły fali 0,311 mm jest połączony z meteorologicznym zasięgiem widoczności S_m w następujący sposób:

$$\gamma = \frac{700}{S_m} \quad [\text{dB/km}] \quad /5/$$

Zależność częstotliwościową współczynnika tłumienia dla różnych widoczności przedstawia rys. 8.

Należy zauważyć, że współczynnik tłumienia spowodowanego przez mgły fal o długościach rzędu 0,300 mm jest w przybliżeniu mniejszy 20 razy niż dla fal z zakresu optycznego.

Podobne oszacowanie tłumienia w obłokach można otrzymać aproksymując pojedyncze rozproszenie za pomocą wzorów /2/ i /4/. Wyniki obliczeń dla fal 0,1 - 1,0 mm zgodnie z danymi pochodzącymi z pracy [39] i dotyczącymi struktury mikrofizycznej obłoków przedstawia tabl. 3.

T a b l i c a 3

Średnie wartości współczynnika tłumienia
spowodowanego przez chmury [dB/km]

Typy chmur	Długość fali [mm]			
	1,0	0,5	0,3	0,1
Ac, Sc, St	0,3	1,2	2,9	14,5
Ns, As	0,6	2,3	5,8	29,0
Cb	2,7	10,9	27,0	13,6
cu cong	3,7	14,0	34,0	172,0

Porównanie udziału molekuł i hydrometeorów w spodziewanym tłumieniu fal submilimetrowych w pobliżu powierzchni Ziemi przed-

stawia rys. 9. Z góry ustalone dane mogą służyć jako obliczone dane dla określenia całkowitego tłumienia dla prawdopodobnych danych bezwzględnej wilgotności i hydrometeorów. Przykład określenia całkowitego tłumienia dla warunków klimatycznych panujących w centralnym rejonie europejskiej części ZSRR przedstawia rys. 10 dla przypadku propagacji fali o długości 0,96 mm przez całą warstwę ziemskiej atmosfery i zmiennych kątów zenitalnych, nie uwzględniając refrakcji. Charakterystyczna wysokość pochłaniania przez parę wodną wynosiła 1,5 km. Z rysunku 10 wynika, że dla kąta zenitalnego 0° całkowite tłumienie przez całą warstwę atmosfery przekracza 16 dB tylko przez 1% roku.

5. WNIOSKI

1. W rozważanym tutaj przedziale czasu przeprowadzono badania podstawowych składowych tłumienia, tzn. pochłaniania przez parę wodną i tłumienie przez różne hydrometeory. Wyniki badań naukowych pozwalają wykonywać obliczenia wartości całkowitego tłumienia fal submilimetrowych.
2. Pochłanianie molekularne przeważa nad innymi rodzajami tłumienia dla fal mniejszych od 0,7 mm. Fakt ten może dowodzić niemożliwości praktycznych zastosowań tych fal w ziemskich warunkach, wykluczając naturalnie czysto naukowe zastosowania.
3. Można spodziewać się, że część dłuższych fal zakresu submilimetrowego znajdzie zastosowanie w systemach radiokomunikacyjnych krótkich zasięgów.

WYKAZ LITERATURY

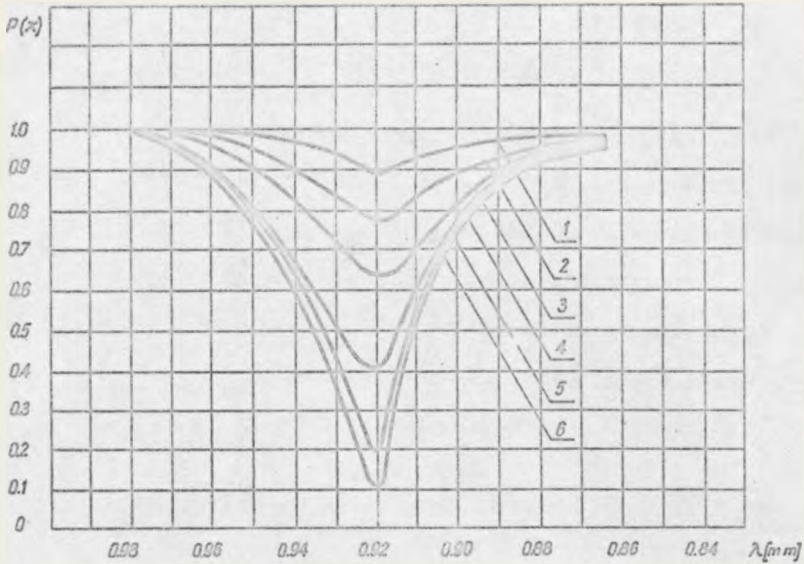
1. Skolnik M.J. : Proc. of the Symp. on submillimeters waves. Polytechn. Inst. od Brooklyn. 1970 march 31, april 1-2, s. 9.
2. Praca zbiorowa pod kierunkiem R.A. Valitova: Technika submillimetrovych voln. Sov. Radio, 1969.
3. Kolosov M.A., Sokolov A.V. : Niekotorye problemy rasprostraneniya millimetrovych i submillimetrovych radiovoln. Radiotechn. i elektron. 1970 t. 15 nr 4, s. 667-676.
4. Van Vleck J.H. : The absorpction of microwaves by oxygen. Phys. Rev. 1947 t. 71 nr 7, s. 413-424.
Van Vleck J.H. : The absorpction of microwaves by uncondensed water vapor. Phys. Rev. 1947 t. 71 nr 7, s. 425-433.
5. Rodgers T. : Proc. conf. of radio meteorology 1953 1-4, nov. s. 9-12.
6. Ževakin S.A., Naumov A.P. : O koëfficiente poglošćenija elektromagnitnych voln vodianymi parami v diapazone 10 μ - 2 cm. Izv. VUZ Radiofiz. 1963 t. 6 nr 4, s. 674.
7. Vvedenskij B.A., Kolosov M.A., Sokolov A.V. : Issledovanija rasprostraneniya metrovych, decimetrovych, santimetrovych i submillimetrovych radiovoln. Radiotechn. i elektron. 1967 t. 12 nr 11, s. 1867-1890.
8. Sokolov A.V., Sukhonin E.V. : Proc. of the Symp. on submillimeters waves. Polytechn. Inst. of Brooklyn 1970 march 31, april 1-2, s. 465.

9. Bastin J. A. : Infrared Physics 1966 nr 4, s. 209.
10. Aganbekyan K. A. : Trudy IX vsesojuznoj konferencii po rasprostraneniu radiovoln, Charkov, Č. P. 111 1969 23-28 jun.
11. Aganbekyan K. A. : Trudy IX vsesojuznoj konferencii po rasprostraneniu radiovoln, Charkov, Č. P. 115 1969 23-28 jun.
12. Aganbekyan K. A. : Trudy IX vsesojuznoj konferencii po rasprostraneniu radiovoln, Charkov, Č. P. 126 1969 23-28 jun.
13. Gross E. P. : Shape of collision-broadened spectral lines. Phys. Rev. 1955 t. 97 nr 2, s. 395-403.
14. Theissing H. H., Caplan P. I. J. appl. Phys. 1956 nr 27, s. 538.
15. Gebbie H. A. : Detection of submillimeter solar radiation. Phys. Rev. 1957 t. 107 nr 4, s. 1194-1195.
16. Jaroslavskij N. G., Stanevič A. E. : Dlinnovolnovyj infrakrasnyj spektr parov H_2O i pogloščenie atmosfernovo vozducha v oblasti 20-2500 mk /500-4 cm^{-1} /. Optika i spektroskopija 1959 t. 7 nr 5, s. 620.
17. Sokolov A. B., Aganbekyan K. A., Puškarev I. I. : Doklady do naučnoj sessii NTO. Moskva 1964.
18. Ževakin A. S., Naumov A. P. : Rasprostranenie santimetrovych, millimetrovych i submillimetrovych radiovoln v zemnoj atmosfere. Izv. VUZ Radiofiz. 1967 t. 10 nr 9-10, s. 1213-1243.
19. Sheppard A. P., Breeden K. H., Mc Sweeny A. : Proc. of the Symp. on submillimeter waves. Polytechn. Inst. of Brooklyn 1970 march 31, april 1-2, s. 445.

20. Hall J.H. : Proc. of the symp. on submillimeter waves. Polytechn. Inst. of Brooklyn 1970 march 31, april 1-2, s. 445.
21. Rusk J.R. : J. Chem. Phys. 1965 t. 43 nr 8, s. 2919.
22. Viktorova A. A. , Ževakin S. A. : DAN SSSR. 1966 t. 171, s. 833.
23. Viktorova A. A. , Ževakin S. A. : DAN SSSR. 1966 t. 171, s. 1061.
24. Izjumov A.O. : Fluktuacii amplitudy i fazy plaskoj monochromatickej volny submillimetrovogo diapazona pri rasprostranjenii v prizemnom sloe turbulentnoi atmosfery s učetom po glšačhenija v vodjanom pare. Radiotechn. i elektron. 1971 t. 13 nr 7, s. 1155-1168.
25. Armand N. A. , Izjumov A.O. , Sokolov A.V. : Fluktuacii submillimetrovych radiovoln v turbulentnoj atmosfere. Radiotechn. i elektron. 1971 t. 16 nr 8, 1333-1341.
26. Babkin Ju.S. : Trudy IX vsesojuznoj konferencii po rasprostranjeniju radiovoln, Charkov, C. P. 133 1969 jun 23-28.
27. Debay P. : Polar molecules. New York 1929.
28. Chamberlain J.E. : Nature 1966 t. 210 nr 5038, s. 790.
29. Apletalin V.A. , Meriakri V.V. , Čigrjaj E.E. : Izmerenie poglaščajuščich i otažajuščich svoistv vody na volnach ot 2 do 0,8 mm. Radiotechn. i elektron. 1970 t. 15 nr 7 s. 1502-1503.
30. Naumov A.P. , Stankevič V.S. : Ob oslablenii millimetrovych i submillimetrovych radiovoln v doždjach. Izv. VUZ Radiofiz. 1969 t. 12 nr 12, s. 181-184.

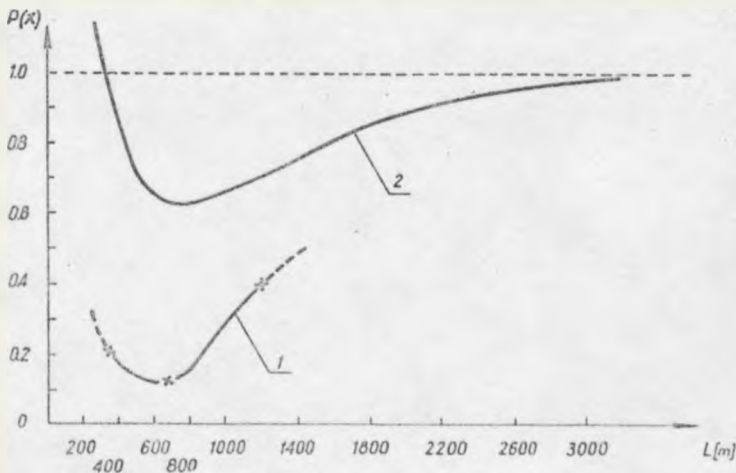
31. Vakser I.Ch. , Kopilovič L.E. , Malyšenko J.I. : Trudy IX vsesojuznoj konferencii po rasprostraneniu radiovoln, Char'kov, Č. P. 137 1969 jun 23-28.
32. Sokolov A.V. , Sukhonin J.V. : K voprosu oslablenija submillimetrovych radiovoln v doždjach. Radiotechn. i elektron. 1970 t. 15 nr 12, s. 2454-2458.
33. Babkin J.S. i inni: K voprosu ob oslablenii izlučeniya na volne 0,96 mm v snege. Radiotechn. i elektron. 1970 t. 15 nr 12, s. 2451-2458.
34. Malyšenko J.I. , Vakser I.Ch. : Izmerenie koefficienta oslableniya radiovoln 1,3 i 0,86 mm v doždjach. Izv. VUZ Radiofiz. 1971 t. 14 nr 6, s. 968-
35. Babkin J.S. i inni: K voprosu ob oslablenii izlučeniya na volne 0,96 mm v snege. Radiotechn. i elektron. 1970 t. 15 nr 12, s. 2459.
36. Gunn K.L. , Marshall J.S. : J. Meteorology 1958 nr 15, s.452.
37. Burroughs W.J. , Pyatt E.C. , Gebbie H.A. : Nature 1966 t.212 nr 387.
38. Platt C.M. : J. Atm. Sc. 1970 t. 27 nr 3, s. 421.
39. Zuev V.E. : Rasprostranenie optičeskich i infrakrasnych voln v atmosfere. Sov. Radio 1970.
40. Gurvič A.S. : O vlijanii pogloščenija na fluktuacii urovnija signala pri rasprostranении v atmosfere. Radiotechn. i elektron. 1968 t. 13 nr 11, s. 1923-1930.

41. Ho T.H. : J. Opt. Soc. of America 1969 t. 59 nr 4, s. 385.
42. Dusiński A. : Przegląd propagacyjnych skutków w łączności Ziemia - kosmos na częstotliwościach większych niż 10 GHz. Opracowano na podstawie referatu Blewis S. : Effects on Earth-Space Communication at Frequencies Greater than 10 GHz - review, wygłoszonego na XVII-ej Generalnej Konferencji URSI w Warszawie, 21-29 sierpnia 1972.

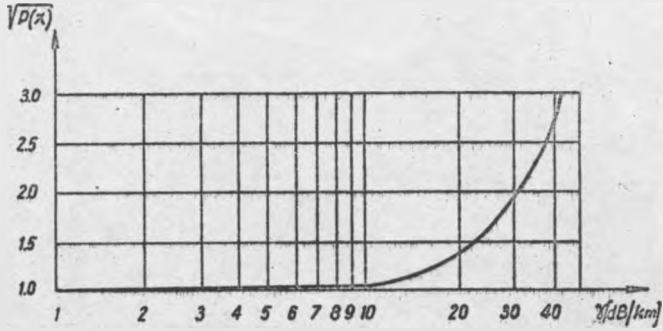


Rys. 1. Stopień zmniejszenia amplitudy fluktuacji w funkcji częstotliwości

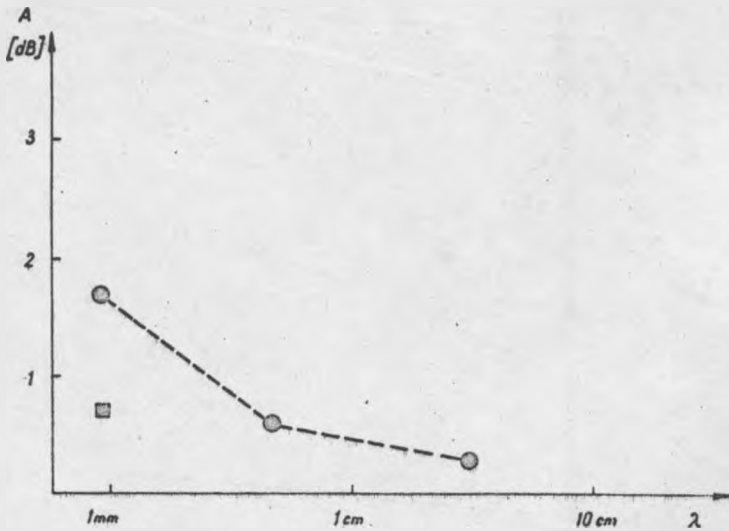
1 - wyniki obliczeń widma Karmana dla fluktuacji temperatury i wilgotności,
 2 - wyniki obliczeń widma Gaussa dla fluktuacji temperatury i wilgotności,
 3 - wyniki obliczeń widma Gaussa tylko dla fluktuacji wilgotności, 4 - średnie wartości zmierzone dla trasy o długości 360 m, 5 - średnie wartości zmierzone dla trasy o długości 680 m, 6 - średnie wartości zmierzone dla trasy o długości 1200 m



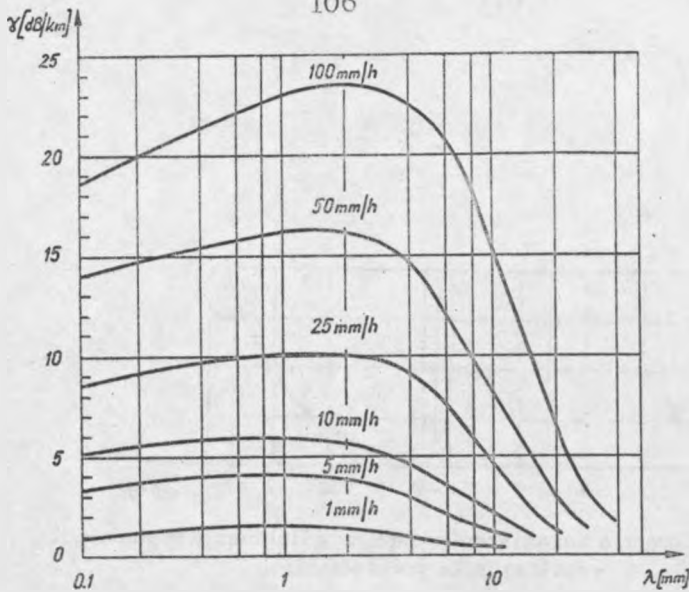
Rys. 2. Stopień zmniejszenia amplitudy fluktuacji w funkcji długości trasy



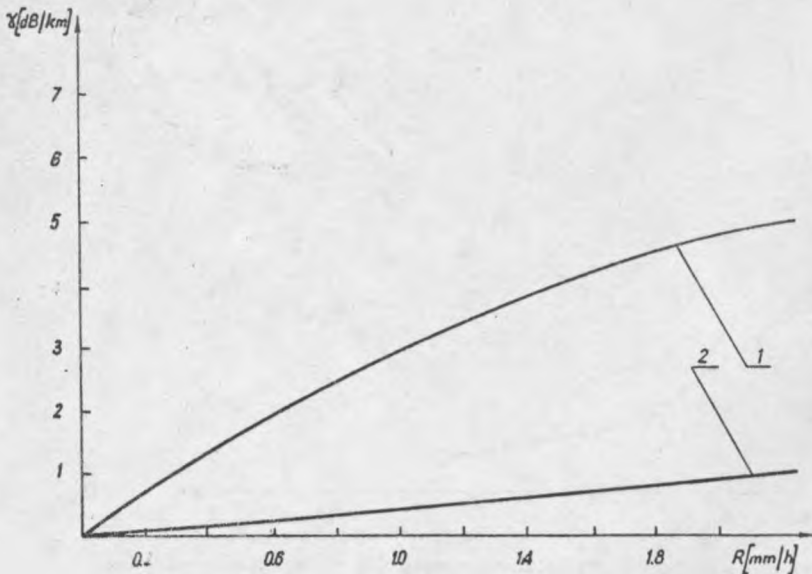
Rys. 3. Zależność stopnia zmniejszenia amplitudy fluktuacji sygnału od współczynnika pochłaniania



Rys. 4. Porównanie fluktuacji amplitudy sygnału dla różnych długości fal

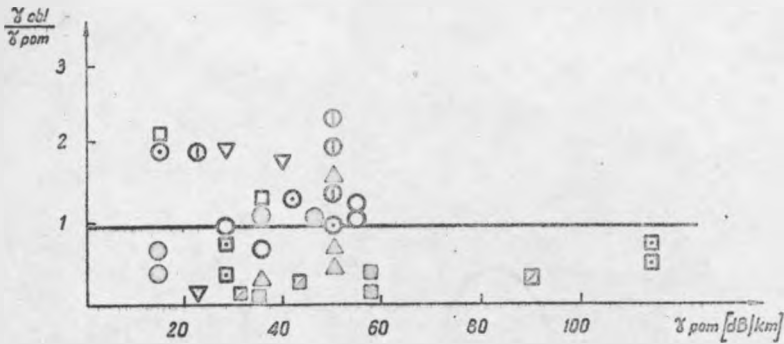


Rys. 5. Współczynnik tłumienia spowodowany przez deszcz w funkcji długości fali dla różnych intensywności deszczu i $t = 20^{\circ}\text{C}$

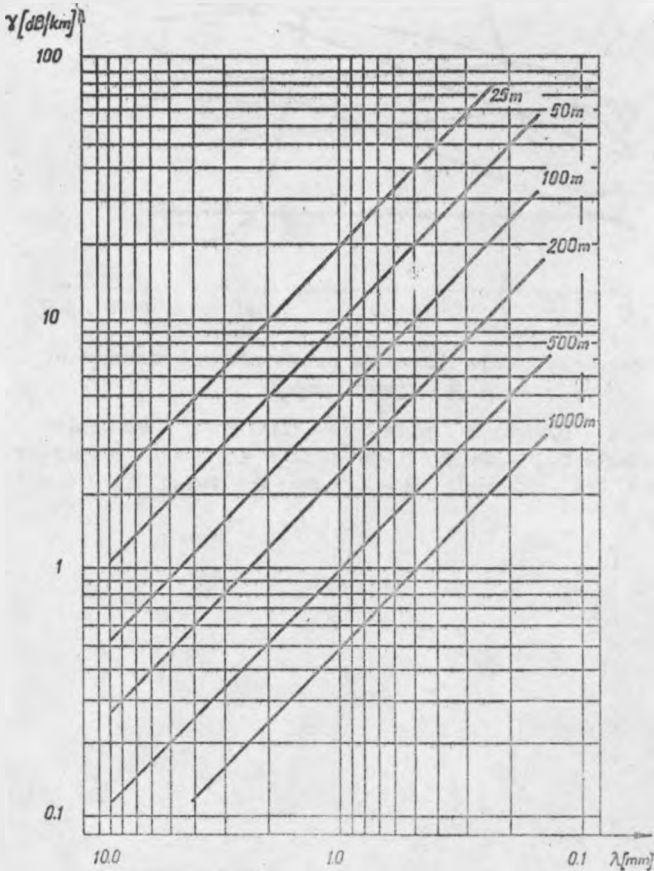


Rys. 6. Współczynnik tłumienia spowodowany przez śnieg w funkcji intensywności śniegu

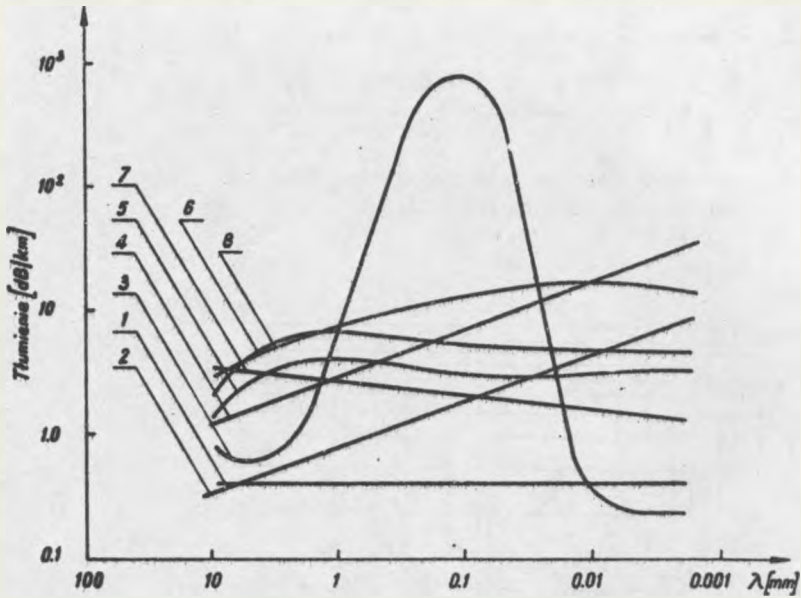
1 - wyniki uzyskane z pomiarów; krzywa przedstawia równanie:
 $\gamma = 3,02 \cdot 10,8 \text{ [dB/km]}$; 2 - wyniki obliczeń za pomocą wzoru Mie



Rys. 7. Przykład porównania wyników teoretycznych obliczeń z wynikami pomiarów dla mgły na fali 0,311 mm

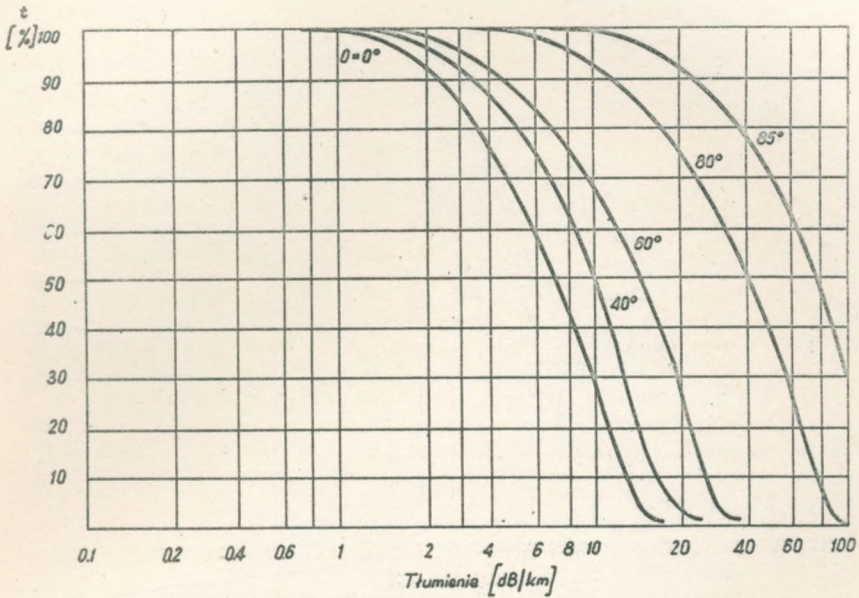


Rys. 8. Współczynnik tłumienia spowodowanego przez mgłę w funkcji długości fali dla różnych wartości widoczności i $t = 20^{\circ}\text{C}$



Rys. 9. Porównanie współczynników tłumienia przez różne hydrometeory w funkcji częstotliwości

1 - grad $R = 10$ mm/h, $d = 10$ mm; 2 - mgła $S_M = 1000$ m; 3 - minimalne tłumienie w H_2O ; 4 - mgła $S_M = 200$ m; 5 - deszcz $R = 5$ mm/h; 6 - deszcz $R = 10$ mm/h; 7 - grad - $R = 10$ mm/h, $d = 2,5$ mm; 8 - śnieg $R = 1$ mm/h



Rys. 10. Procent czasu, w którym całkowite tłumienie przez całą warstwę atmosfery ziemskiej jest nie mniejsze niż wartość odciętej dla różnych kątów zenitalnych

