

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA-MIEDZESZYN

BIULETYN

INFORMACYJNY

6 (184)

1979

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

BIULETYN INFORMACYJNY

RCK 19

WARSZAWA 1979

NR 6/184/

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Biuletynu Informacyjnego

Redaktor Naczelny - prof. mgr inż. Lesław Kędziński
Z-ca Redaktora Naczelnego - doc. dr inż. Krystyn Plewko

Redaktorzy działów:

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

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Warszawa-Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

NA PRAWACH RĘKOPISU - DO UŻYTKU SŁUŻBOWEGO

Redaktor: mgr K. Juszkiewicz

Montaż tekstu: B. Drabik

Dział Wydawniczy Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 570. Wpłynęło do
Działu Wydawniczego 31.05.1979 r.
Druk ukończono w lipcu 1979 r.

Stanisław Ogulewicz

WPLYW TROPOSFERY NA PROPAGACJĘ FAL RADIOWYCH
W RELACJACH ZIEMIA-SATELITA-ZIEMIA

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wstęp	1
2. Ogólny przegląd dorobku światowego	2
3. Rodzaje oddziaływania troposfery na propagację fal radiowych	4
3.1. Normalna refrakcja troposferyczna	4
3.2. Spadek zysku anteny naziemnej od niekoherencji czoła fali	5
3.3. Zmiany poziomu sygnałów przy braku opadów - efekty scyntylnacyjne i wielodrogowe	5
3.4. Absorpcja przez gazy atmosferyczne	6
3.5. Tłumienie wywołwane przez opady atmosferyczne	10
3.5.1. Metody prognozowania	15
3.5.2. Wyniki pomiarów tłumień atmosfery	18
3.5.3. Czas trwania zaników od opadów	20
3.5.4. Przeciwdziałanie szkodliwym efektom intensywnych opadów	21
3.6. Temperatura szumowa nieba	21
3.7. Efekty depolaryzacji sygnału	24
3.8. Ograniczenie szerokości pasma w systemach telekomunikacji satelitarnej	25
3.9. Opóźnienia propagacyjne na trasach Ziemia-kosmos	25
4. Potrzeba dalszych badań propagacyjnych i radiometeorologicznych do uściślenia podstaw planowania systemów łączności	25
5. Współpraca międzynarodowa w zakresie badań nad wpływem troposfery na łączność satelitarną	26
Wykaz literatury	28



WPLYW TROPOSFERY NA PROPAGACJĘ FAL RADIOWYCH
W RELACJACH ZIEMIA-SATELITA-ZIEMIA

1. WSTĘP

Droga propagacji fal radiowych w relacji Ziemia - satelita lub satelita - Ziemia w najkorzystniejszym przypadku wzajemnego położenia satelity geostacjonarnego względem stacji naziemnej wynosi około 40.000 km. Na troposferę przypada z tego tylko kilkanaście kilometrów, tj. poniżej pół promila całej długości trasy. Przy przebiegu promienia satelita - Ziemia stycznym do powierzchni Ziemi wydłuża się całkowita droga propagacji, ale stosunkowo bardziej wydłuża się odcinek przypadający na atmosferę. Długość jego pozostaje wówczas w granicach 1%. Jednak ten ułamek drogi odgrywa bardzo istotną rolę w pracy całego łącza. Tłumienie wolnej przestrzeni na trasie o wspomnianej długości jest w zakresie interesujących nas częstotliwości rzędu 200 do 210 dB i zbilansowanie mocy wielkiej częstotliwości, możliwej do wyprodukowania po stronie nadawczej, zysków anten o rozsądnych wymiarach i czułości urządzeń odbiorczych, nie pozostawia dużego marginesu na dodatkowe tłumienie wnoszone przez atmosferę. Stąd tłumienie to ma istotne znaczenie przy projektowaniu systemów łączności satelitarnej i należy znać nie tylko jego wartość przeciętną, ale również statystykę zmienności i okoliczności, jakim ona towarzyszy na obszarach instalowania stacji naziemnych czy punktów odbiorczych. Poza tym troposfera nie tylko tłumí sygnały, ale też jest przyczyną szeregu innych oddziaływań i zniekształceń nie mniej istotnych od tłumienia.

Zagadnienia te są badane od szeregu lat w skali światowej; przy czym ilość nagromadzonych w tej dziedzinie informacji wzrasta bardzo szybko. Wzrost ten jest stymulowany dynamiką rozwoju służb radiowych i zapotrzebowaniem na nowe środki łączności zarówno w skali krajowej, międzynarodowej jak i międzykontynentalnej, gdzie systemy satelitarne oferują rozwiązania szczególnie atrakcyjne.

Ilustracją tego stanu może być informacja, że 5 komisja Studiów CCIR, która zajmuje się propagacją fal radiowych w ośrodkach niezjonizowanych, podczas kilku ostatnich sesji plenarnych poświęciła tym zagadnieniom ponad 50% swojej aktywności; podobnie ponad połowa dokumentów nadestanych na specjalne zebranie przygotowawcze /SPM/ do Światowej Konferencji Administracyjnej Radiokomunikacji /WARC-79/ dotyczy zagadnień telekomunikacji satelitarnej.

Zjawiska, jakie zachodzą przy przechodzeniu fal radiowych przez troposferę zależą od szeregu czynników charakteryzujących ten ośrodek, a również od parametrów transmitowanego sygnału, przede wszystkim długości jego fali. I tu trzeba dodać, że wobec zajętości niższych zakresów częstotliwości przez istniejące już i eksploatowane systemy ziemskich służb radiowych, rozwój telekomunikacji satelitarnej wiąże się ściśle z wykorzystaniem nowych, nie w pełni jeszcze rozpoznanych zakresów częstotliwości powyżej 10 GHz, gdzie zjawiska propagacyjne różnią się dość istotnie jakościowo, a nie tylko ilościowo, od występujących w niższych zakresach. I tak efekt dyssypatywności troposfery zaczyna się pojawiać już przy częstotliwościach około 3 GHz, ale przy częstotliwościach do około 6 GHz odgrywa jeszcze rolę drugorzędną, natomiast powyżej 10 GHz ma już znaczenie decydujące. Stąd na niektóre zjawiska propagacyjne i charakterystyki ośrodka zwrócono uwagę dopiero w związku z wejściem w nowe zakresy częstotliwości, powyżej 10 GHz, a więc stosunkowo niedawno /w ostatnim dziesięcioleciu/.

W dalszym ciągu będą omówione nieco bliżej poszczególne rodzaje wpływów i efekty oddziaływania troposfery na pracę łączy radiowych i systemów, głównie dla zakresów częstotliwości powyżej 10 GHz, w świetle aktualnego stanu wiedzy światowej, co pozwoli wykazać potrzebę dalszych badań w tym przedmiocie.

Po przedstawieniu zakresu badań przewidzianego do realizacji w ramach tematu Nr 1 międzynarodowego Programu krajów socjalistycznych "Interkosmos" zostaną omówione niektóre prace krajowe aktualnie prowadzone bądź organizacyjnie przygotowywane do podjęcia w problemie węzłowym 06.2 poświęconym rozwojowi telekomunikacji w kraju.

2. OGÓLNY PRZEGLĄD DOROBKU ŚWIATOWEGO

Aktualny stan wiedzy światowej dotyczącej rozważanej problematyki zawiera się w kilkunastu sprawozdaniach CCIR, przygotowanych na ostatniej plenarnej sesji 5. komisji Studiów i zatwierdzonych przez XIV Plenarne Zgromadzenie CCIR /Kyoto 1978/.

Najbardziej skrótowny przegląd tej problematyki daje niżej przytoczone zestawienie tytułów dokumentów /w nawiasie podany jest numer odpowiedniego dokumentu wg oznaczenia z Kyoto/

- oddziaływanie refrakcji troposferycznej na propagację /1023/ [1],
- tłumienie przez gazy atmosferyczne /1024/ [2],
- emisja radiowa powstająca w rezultacie absorpcji przez gazy i opady atmosferyczne /1025/ [3],
- tłumienie i rozproszenie przez opady atmosferyczne i inne cząsteczki zawieszane w atmosferze /1026/ [4],
- depolaryzacja sygnału powodowana obecnością atmosfery /1027/ [5],
- statystyka parametrów propagacji najgorszego miesiąca /1028/ [6].

Wymienione na liście tytuły dotyczą w zasadzie nowych sprawozdań lub rozszerzenia zagadnień poprzednio zaledwie sygnalizowanych. Zestawienie to uzupełniają trzy wcześniejsze sprawozdania datujące się z poprzedniej sesji plenarnej, których numery podane są obok odpowiadających im numerów dokumentów z Kyoto:

- dane radiometeorologiczne /1022, Spr. 563/ [7],
- dane propagacyjne dla radiodifuzji satelitarnej > 10 GHz /1038, Spr. 565/ [8],
- dane propagacyjne dla systemów telekomunikacji kosmicznej /1049, Spr. 564/ [9].

Wreszcie, przydatne dla praktyki inżynierskiej, uzupełnienie danych w zakresie wpływu troposfery na propagację fal radiowych w interesujących relacjach Ziemia - kosmos - Ziemia stanowi:

Sprawozdanie 569: [10].

- szacowanie czynników propagacyjnych przy rozwiązywaniu problemów interferencyjnych w zakresach częstotliwości $> 0,6$ GHz.

oraz Sprawozdanie 271:

- dane propagacyjne do szacowania odległości koordynacyjnych w zakresie częstotliwości 1 do 40 GHz [11].

Sprawozdania te zawierają właściwe kompendium wiedzy potrzebnej do planowania i projektowania systemów radiokomunikacyjnych i radiodifuzyjnych satelitarnych. W postaci skondensowanej podają one wyniki badań szczegółowych, publikowanych w fachowych czasopismach a przede wszystkim roboczych

dokumentach CCIR, OIRT, UER i innych organizacji wyspecjalizowanych, zajmujących się tą problematyką.

3. RODZAJE ODDZIAŁYWANIA TROPOSFERY NA PROPAGACJĘ FAL RADIOWYCH

— Przy projektowaniu i eksploatacji łączy Ziemia-satelita pod uwagę musi być brane pięć następujących głównych grup zjawisk związanych z oddziaływaniem troposfery:

1. Strata poziomu sygnału związana z rozbieżnością wiązki energii promieniowanej przez antenę stacji naziemnej wskutek normalnej refrakcji atmosferycznej /troposferycznej/.
2. Spadek skutecznego zysku anteny wskutek dekorelacji fazy czoła fali na aperturze anteny; jest on wywoływany strukturalną nieregularnością wskaźnika refrakcji.
3. Zaniki - stosunkowo powolne - od zmian zakrzywienia toru fali, wywoływanych wielkoskalowymi zmianami wskaźnika refrakcji; zaniki szybkie /scyntylacje/ i zmiany kąta nadejścia pochodzące od małoskalowych zmian wskaźnika refrakcji /o wymiarach poniżej 10 m/.
4. Tłumienie: wskutek absorpcji przez gazy atmosferyczne oraz absorpcji i rozproszenia przez hydrometeory /kropelki wody i kryształki lodu w opadach i chmurach/; zjawisko szumu emitowanego przez ośrodki absorbujące; wszystkie z wymienionych tu zjawisk są szczególnie ważne przy częstotliwościach powyżej 10 GHz.
5. Ograniczenie szerokości pasma wynikające z efektów wielodrogowych.

W dalszej części artykułu zjawiska te zostaną omówione nieco bliżej.

3.1. Normalna refrakcja troposferyczna

Regularny spadek wskaźnika refrakcji ze wzrostem wysokości powoduje zakrzywienie toru fali i objawia się jako dezogniskowanie wiązki fal radiowych oraz prowadzi do błędów kąta nacelowania anteny odbiorczej czy nadawczej. Oba efekty przybierają na sile przy malejącym kącie elewacji, gdy droga fali przez atmosferę wydłuża się. Efekt dezogniskowania wiązki anteny był określany przez badaczy japońskich i amerykańskich, którzy stwier-

dzili, że strata nie zależy od częstotliwości i nawet przy dużych wartościach wskaźnika refrakcji oraz małych kątach elewacji nie przekracza 0,4 dB. W porównaniu z innymi efektami tłumieniowymi nie jest to więc czynnik o znaczeniu podstawowym. Poważniejszy problem stanowią natomiast błędy kąta elewacji. Całkowity pozorny wzrost kąta elewacji dla 5° zawiera się w granicach od około 4,36 mrad w strefie tropikalnej do około 2,96 mrad w strefie klimatu polarnego kontynentalnego i przy kącie elewacji 1° błędy te rosną odpowiednio do 11,34 i 7,68 mrad. Wartości te są porównywalne z wymaganą dokładnością nacelowania anten w systemach satelitarnych. Dobowe zmiany wskaźnika refrakcji powodują odpowiednie wahania pozornego kąta elewacji, wahania te jednak przy 1° elewacji nie przekraczają 1,75 mrad.

3.2. Spadek zysku anteny naziemnej od niekoherencji czoła fali

Redukcja zysku anteny wywoływana tym efektem wzrasta z częstotliwością i maleje ze wzrostem kąta elewacji; poza tym jest funkcją średnicy anteny. Badania japońskie przeprowadzone w zakresie 4/6 GHz z anteną o średnicy 22 m i przy kącie elewacji 5° wykazały, że omawiana strata zawiera się w granicach 0,2 do 0,4 dB. Podobne wartości strat: 0,3 do 0,6 dB uzyskano przy tym samym kącie elewacji i antenie o średnicy \varnothing 7 m, ale przy częstotliwościach 15,5 i 31,6 GHz. Wynika stąd, że efekt jest znaczący przy małych kątach elewacji, wysokich zakresach częstotliwości i dużych średnicach anten.

3.3. Zmiany poziomu sygnałów przy braku opadów - efekty scyntyacyjne i wielodrogowe

Efekty troposferyczne przy braku opadów nie wywołują, jak się dotychczas uważa, poważniejszych zaników w telekomunikacji kosmicznej przy częstotliwościach pracy poniżej 10 GHz i przy kątach elewacji powyżej 10° . Poniżej 6 GHz mogą odgrywać pewną rolę scyntyacje jonosferyczne, natomiast scyntyacje troposferyczne bywają czynnikiem istotnym, ale dopiero przy małych kątach elewacji. Materiały eksperymentalne nagromadzone dotychczas, przy wykorzystaniu emisji z satelitów, nie dają jednak jeszcze dostatecznej podstawy do scharakteryzowania tego typu zaników z zadowalającą niezawodnością. Z tego względu zachodzi potrzeba prowadzenia dalszych,

bardziej kompleksowych pomiarów, w szczególności obejmujących różne warunki klimatyczne.

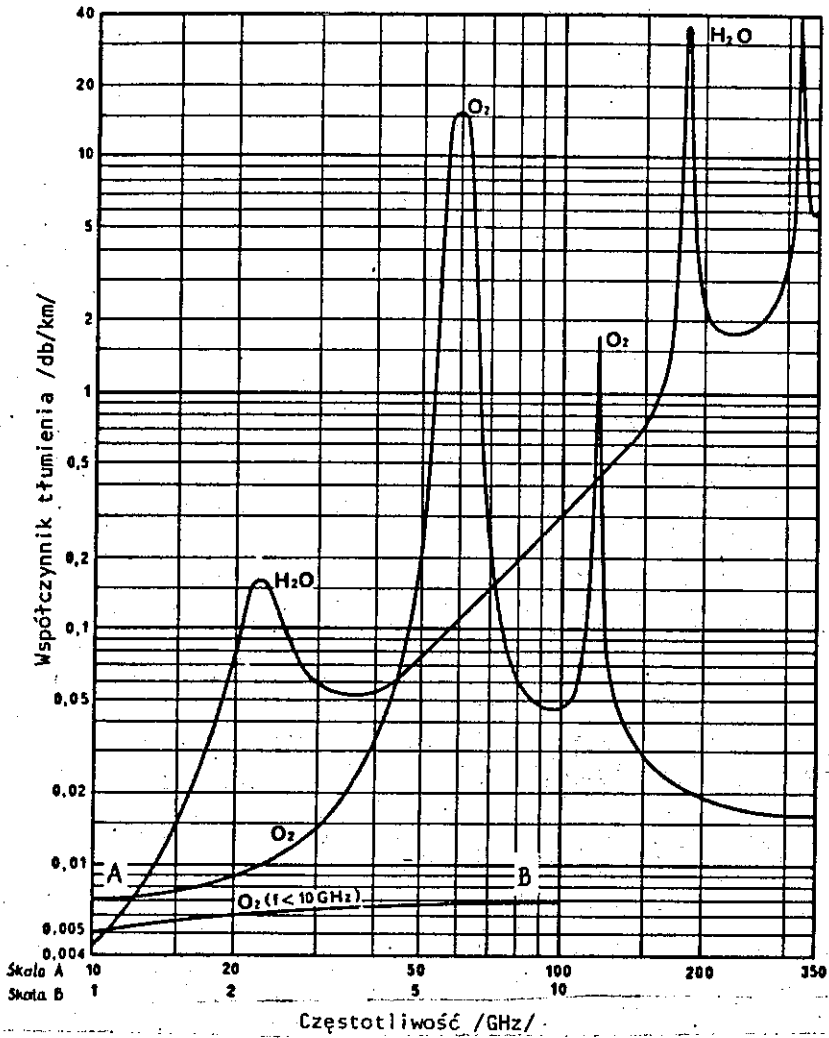
Wpływy kąta elewacji mogą być pokazane przykładowo przez porównania wyników obserwacji przeprowadzonych na częstotliwości 30 GHz. Scyntylnacyjne wahanie sygnałów zaobserwowane przy użyciu satelity ATS-6 /USA, Anglia, Holandia/ wynosiły 0,5 do 1 dB przy kącie elewacji 21 do 25° /odbiór sygnału w warunkach bezwietrznych/ oraz okresowo 2 do 6 dB. Dla tej samej częstotliwości przy kącie elewacji 6,5° wartość międzyszczytowa wahań wynosiła już 6,5 dB i dla kąta około 1° okresowo dochodziła do 20 dB. Wpływ częstotliwości ilustruje porównanie wyników uzyskanych przy małych kątach elewacji. Dla 30 GHz i 2,4° wahań wynosiły około 18 dB, natomiast dla zbliżonego kąta przy 7 GHz tylko 10 dB. Dla tej samej częstotliwości scyntylnacyjne fluktuacje kąta elewacji wynosiły 0,01° przy elewacji 3° i 0,002° przy 10°.

Ogólnie można stwierdzić, że w klimacie umiarkowanym i czystym niebie wahań scyntylnacyjne dla elewacji 20° do 30° nie przekraczają 1 dB w locie i 0,2 do 0,3 dB w zimie /dane dla 20 GHz/, przy czym częstotliwość scyntylnacji wynosi na ogół 0,5 do 1 Hz, ale bywają również i szybsze do 10 Hz, jak też i dużo wolniejsze 0,02 do 0,002 Hz. Przy kątach elewacji znacznie mniejszych od 10° efekty scyntylnacyjne nasilają się i zbliżają do obserwowanych na trasach ziemskich linii radiowych; następuje wzrost szybkich głębokich zaników o kilkusekundowym czasie trwania typu zaników wielodrogowych. Przeprowadzona /na 7 GHz/ statystyka głębokości zaników w zależności od czasów trwania wykazała przy 5°: 2,8 dB dla 1% czasu i 5,5 dB dla 0,1% czasu oraz przy 1° i 15 dB dla 1% czasu. Stwierdzono również, że 10% zaników przekraczających 15 dB trwa przynajmniej 30 sekund, natomiast 90% zaników przekraczających 20 dB trwa nie krócej niż 11 sekund /obserwacje przy użyciu satelity INTELSAT/.

3.4. Absorpcja przez gazy atmosferyczne

Tłumienie właściwe gazów atmosferycznych wyrażane w jednostkach dB/km w zależności od częstotliwości sygnału podawane jest w postaci uniwersalnej dla pionowej trasy propagacji i standardowej atmosfery o zawartości pary wodnej przy powierzchni ziemi równej 7,5 g/m³.

Odpowiednie charakterystyki dla głównych składników atmosfery: pary wodnej i tlenu przedstawione są na rys. 1, który uwidacznia charaktery-

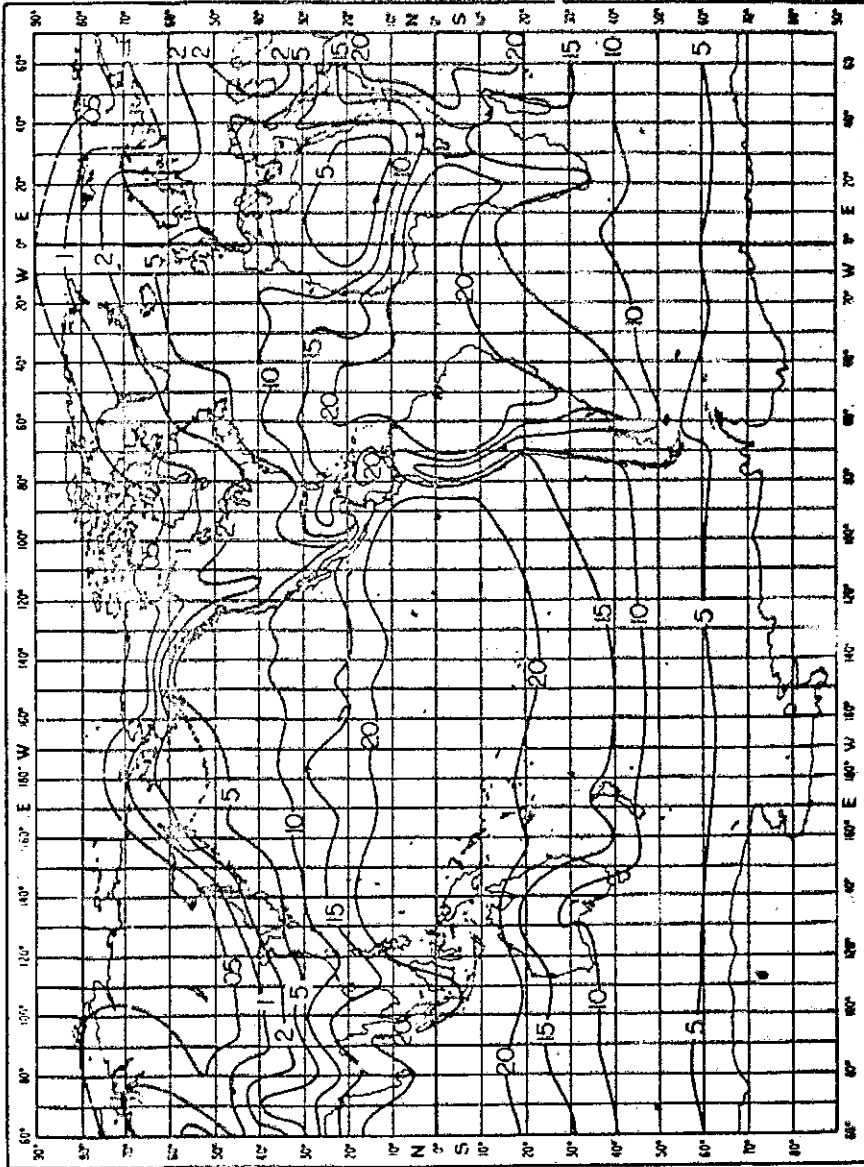


Rys. 1. Tłumienie właściwe gazów atmosferycznych
Skala B dla absorpcji tlenu poniżej 10 GHz [2]

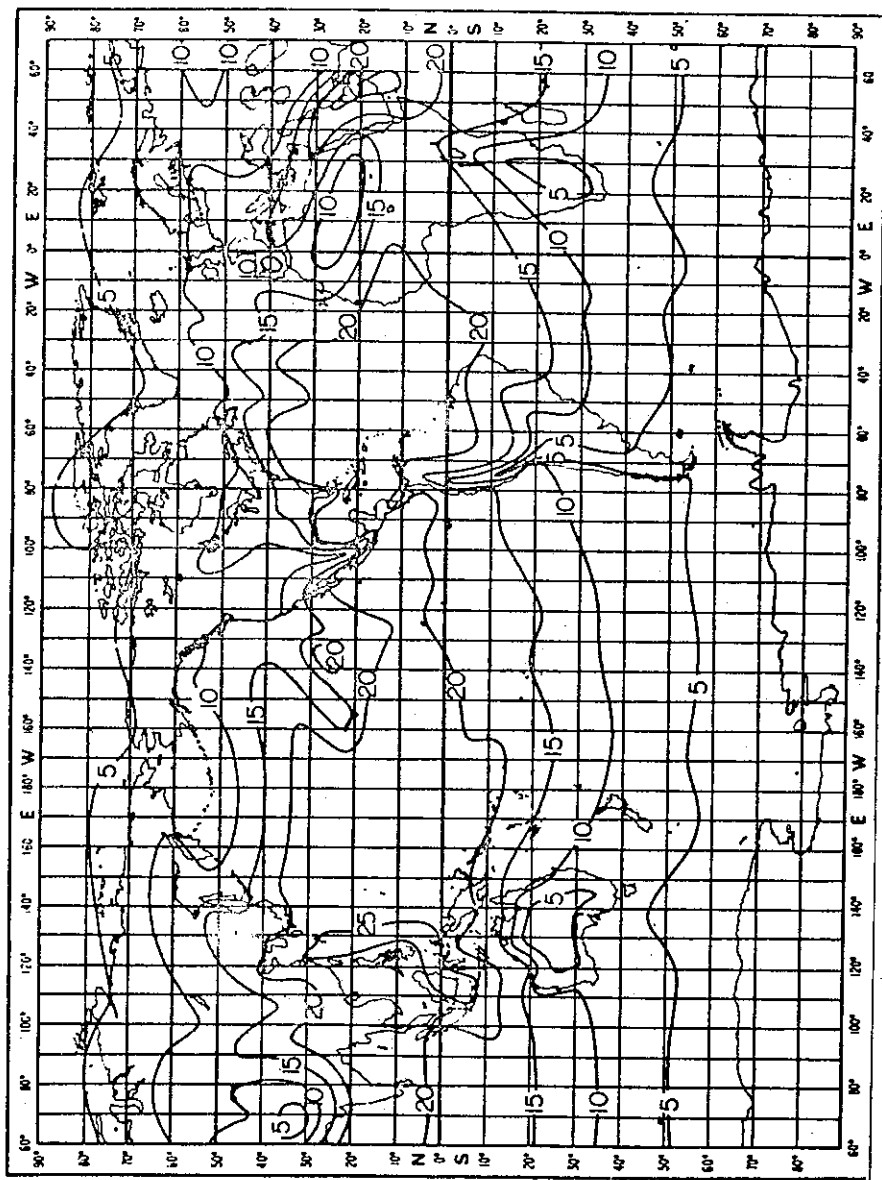
Ciśnienie - 1 atm /1013,6 mb/

Temperatura 20°C

Zawartość pary wodnej 7,5 g/m³



Rys. 2a. Średnia zawartość pary wodnej /g/m³/, luty [10]



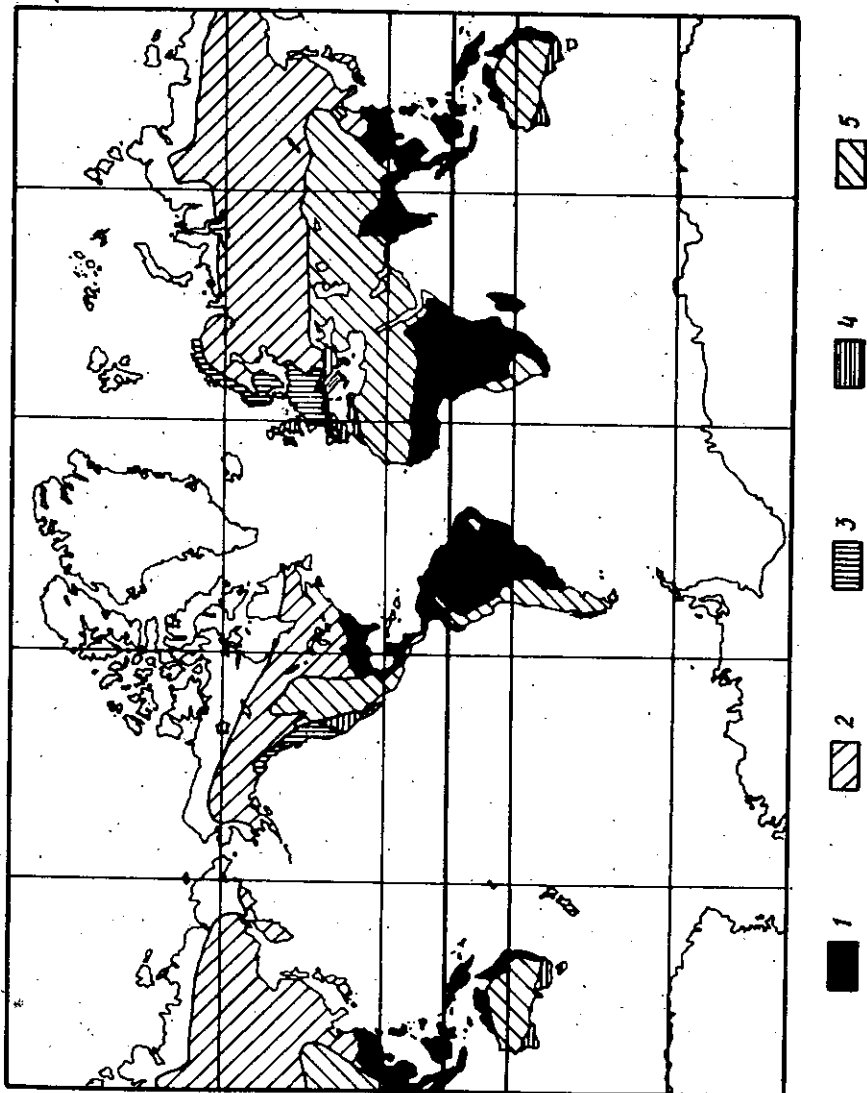
Rys. 2b. Średnia zawartość pary wodnej g/m^3 , sierpień [10]

styczne maksima związane z rezonansowymi częstotliwościami molekularnymi tych gazów. Przebieg charakterystyki H_2O wyjaśnia motywy wyboru zakresów częstotliwości dla radiodifuzji satelitarnej poniżej 18 GHz i powyżej 27 GHz.

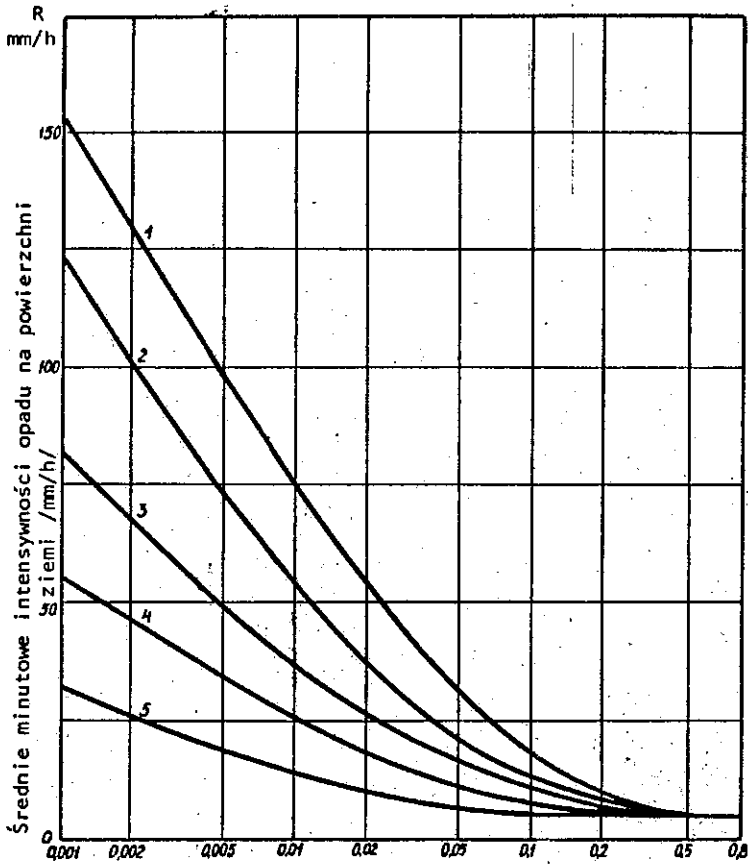
Dla obliczania tłumienia atmosfery przy trasach nachylonych dane przedstawione na rys. 1 należy po prostu mnożyć przez cosecans kąta elewacji, natomiast aby uzyskać wyniki przy innych niż standardowa koncentracjach pary wodnej, należy uwzględnić poprawkę: $\frac{p}{7,5}$. Wartości p w tych przypadkach winny być odczytywane z sezonowych map absolutnej wilgotności powietrza, wyrażanych w postaci izolinii g/m^3 . Przykład takiej mapy dla sierpnia podany jest na rys. 2. Wynika z niej, że warunki środkowoeuropejskie zbliżone są w lecie do standardowych. W zimie wilgotność absolutna atmosfery europejskiej spada do wartości ok. $2 g/m^3$, natomiast maksimum koncentracji pary wodnej w sezonie letnim wypada przy południowo-wschodnich wybrzeżach Azji i obejmuje Japonię.

3.5. Tłumienie wywołane przez opady atmosferyczne

Jednym z czołowych problemów przy projektowaniu systemów telekomunikacji satelitarnej w zakresach częstotliwości powyżej 10 GHz jest prognozowanie tłumień pochodzących od opadów i chmur. Stąd konieczna jest znajomość rozkładu /rozemieszczenia/ opadów w przestrzeni i czasie oraz współczynników tłumienia przez nie wywołanych. Aktualne materiały CCIR podają krzywe statystycznego rozkładu intensywności opadów w czasie dla pięciu klimatycznych stref opadowych, wyróżnionych dla całego globu ziemskiego. Strefy te i związane z nimi rozkłady są przedstawione odpowiednio na rys. 3 i 4. Obszar Polski, jak widać w ok. 2/3 należy do strefy 3 /część północno-zachodnia/ i w ok. 1/3 do strefy drugiej o większych intensywnościach opadów, obejmującej całą północną Azję. Przytoczone dane oparte są na materiałach uśrednionych w b. dużej skali i są zalecane do stosowania jedynie przy braku informacji bardziej szczegółowych dla danego wydzielonego terytorium. Dla wybranych lokalizacji w poszczególnych strefach odchylenia mogą być bardzo znaczne, również dla ustalonego miejsca zmiany z roku na rok mogą osiągać wartości bardzo duże. Stąd dla uściślenia podstaw planowania wynika potrzeba prowadzenia obserwacji we wszystkich, gdzie można spodziewać się zróżnicowań, mikrorejonach klimatycznych i w dostatecznie długich, wielosezonowych okresach.



Rys. 3. Strefy klimatyczne rozkładów intensywności opadów deszczu podanych na rys. 4 [7]



Procenty czasu /%/ w ciągu średniego roku dla których intensywność opadu jest przekraczana w poszczególnych strefach

Rys. 4. Rozkłady intensywności opadów deszczu w strefach klimatycznych podanych na rys. 3 [7]

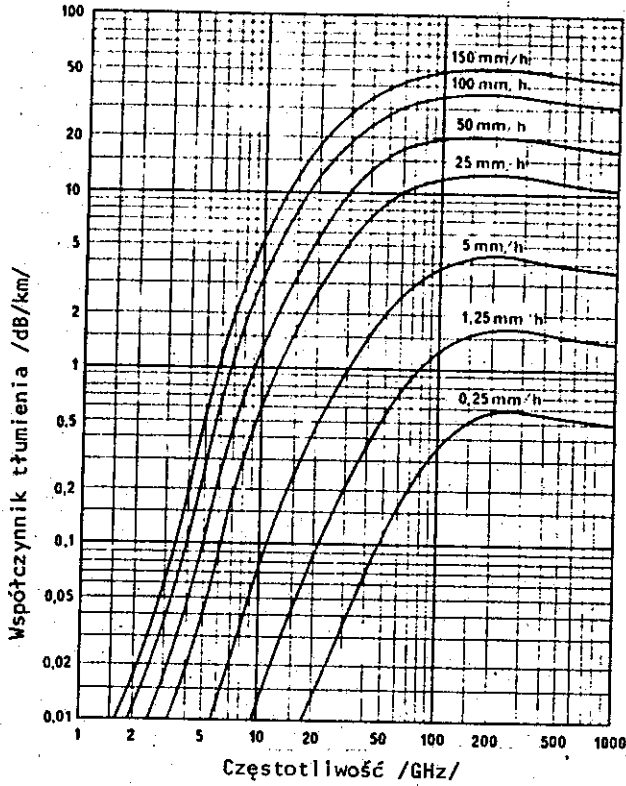
Przejścia z intensywności opadu na tłumienie drogi propagacji wymaga znajomości współczynników tłumienia jednostkowego, zależnych od częstotliwości. Współczynniki te wyrażone w dB/km dla zakresu intensywności od 0,25 mm/h do 150 mm/h oraz zakresu częstotliwości 1 do 1000 GHz podane są na wykresie rys. 5a oraz mogą być odczytane z nomogramu zawartego na rys. 5b. Zostały one wyprowadzone przez autorów brytyjskich z teoretycznych zależności przy założeniu standardowego rozkładu wymiarów kropli deszczu i potwierdzone eksperymentalnie. Aby obliczyć całkowite tłumienie trasy należy znać nie tylko tłumienie jednostkowe dla poszczególnych intensywności, ale również długość drogi przez deszcz o różnych intensywnościach. Długości te zależą od typu opadów, które są sklasyfikowane i wykazują duże zróżnicowanie pod względem intensywności oraz wymiarów rozciągających się zarówno w kierunku horyzontalnym, jak i pionowym.

3.5.1. Metody prognozowania

Dla danej miejscowości /terytorium/ przy określonej elewacji trasy nachylonej Ziemia-satelita interesująca jest wartość tłumienia jaka będzie przekraczana w założonym z góry % czasu. Chodzi przy tym o wartość uśrednioną w okresie kilku lat, ponieważ projektowany system musi uwzględniać zmienność wielosezonową. W postępowaniu można wyróżnić trzy etapy:

1. Jeżeli brak jest bliższych danych, wówczas dla ustalonej czy wybranej wartości % czasu średnia minutowa wartość intensywności opadu /na powierzchni Ziemi/ może być odczytana z rys. 4 zgodnie ze strefą oszacowaną na podstawie rys. 3.
2. Następnie dla wybranej wyżej intensywności z wykresów czy nomogramu podanych na rys. 5 określony jest współczynnik tłumienia /dB/km/.
3. Spodziewane tłumienie trasy jest iloczynem współczynnika tłumienia przez skuteczną długość trasy przez deszcz. Wielkość tę można odczytać z wykresów przytoczonych na rys. 6, zawierających dane dla kilku krajów europejskich i porównawczo dla Japonii.

Wykresy te pokazują równoważne długości trasy dla różnych kątów elewacji przy intensywności opadu jako parametrze. Podane charakterystyki wyznaczone zostały na drodze eksperymentalnej z długookresowej statystyki intensywności punktowych i tłumień zmierzonych na trasach nachylonych w tych samych punktach i tym samym okresie czasu. Przykładowo: oszacowane w Ja-

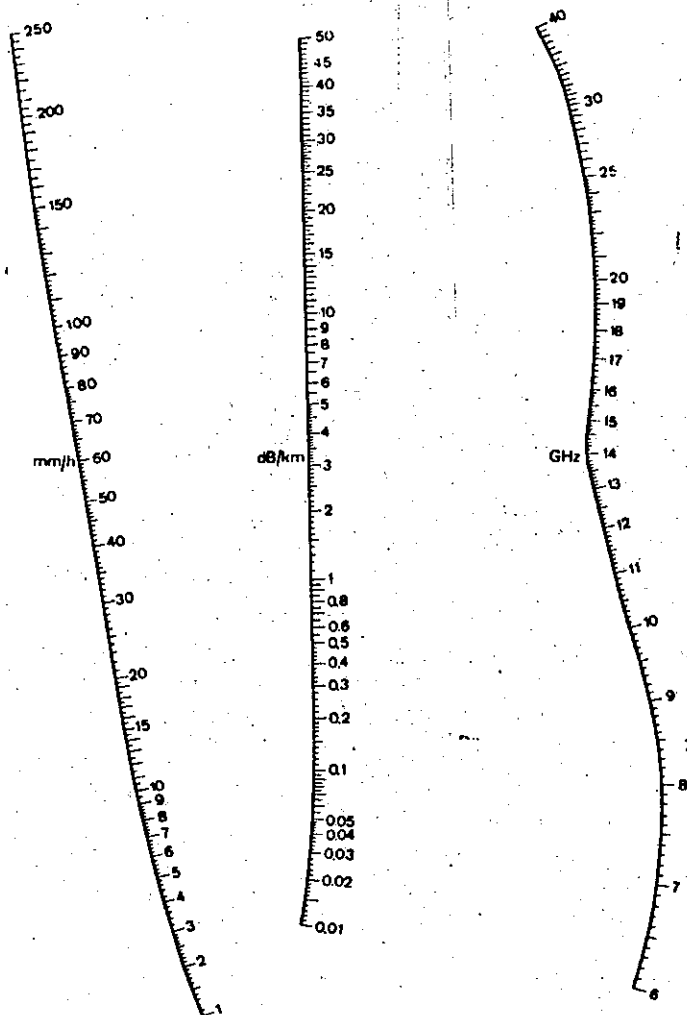


Rys. 5a. Współczynnik tłumienia deszczu [4]

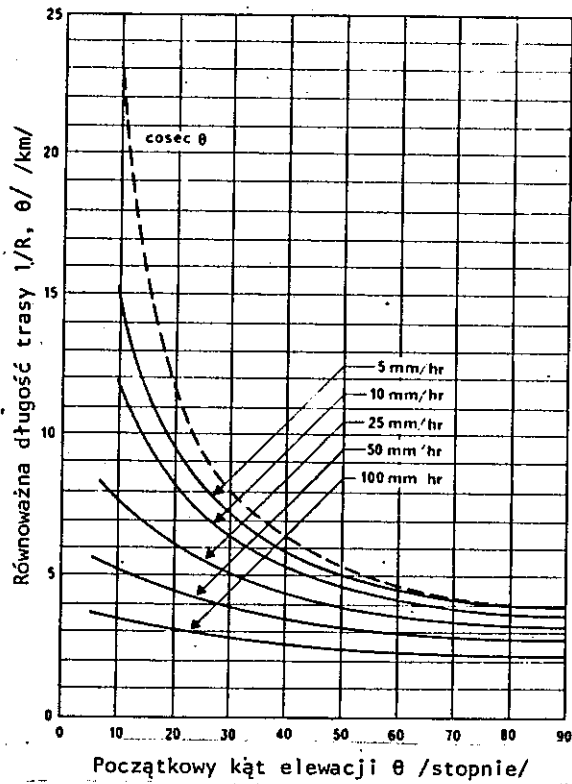
Rozkład wymiarów kropel wg Laws'a i Parsons'a 1943

Końcowa szybkość opadania kropel wg Gunn'a i Kinzer'a, 1949

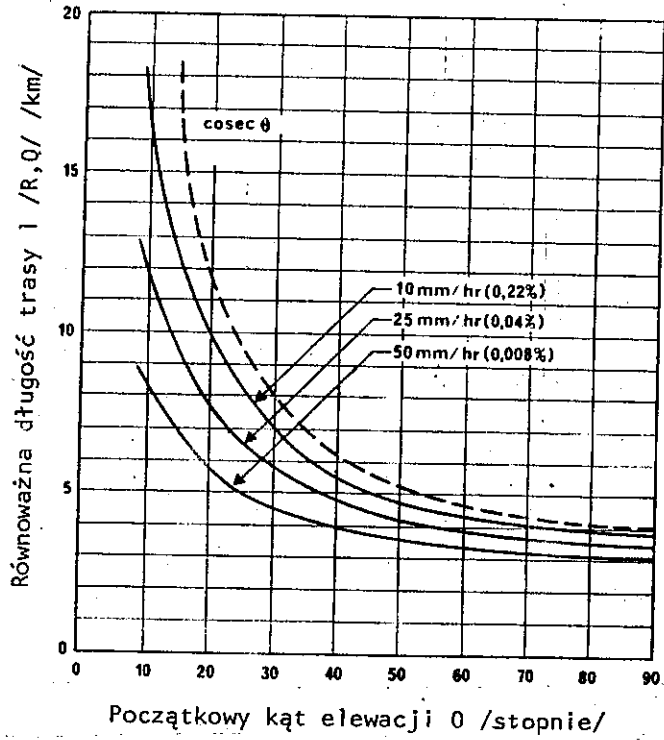
Wskaźnik refrakcji wody przy 20°C wg Ray'a, 1972



Rys. 5b. Nomogram do obliczania współczynnika tłumienia od deszczu [4]



Rys. 6a. Równoważna długość trasy uśredniona dla szeregu krajów [9]



Rys. 6b. Równoważna długość trasy w rejonie Tokio [9]

ponii efektywne długości tras poprzez opad dla intensywności 65 i 25 mm/h wynoszą odpowiednio 10 i 20 km dla elewacji 8° , natomiast przy zbliżonej elewacji do 10° efektywna długość trasy przy 10 mm/h i 150 mm/h wynosi odpowiednio 16 i 10,5 km. Zróżnicowanie wartości wskazuje, że dane powyższe należy traktować jako prowizoryczne i szacunkowe oraz że należy gromadzić dalsze pomiary i obserwacje na możliwie wielu obszarach.

3.5.2. Wyniki pomiarów tłumień atmosfery

Szacowanie wartości dużych tłumień, które są przekraczane w b. małych procentach czasu wymaga mierzenia rzadkich zjawisk o czasie trwania pojedynczych minut. Np. 0,01% miesiąca - wskaźnik wykorzystywany w planowaniu systemów łączności - odpowiada czasowi 4 minut. Takie krótkotrwałe zjawiska pojawiają się niekiedy w odstępach kilkuletnich, stąd potrzeba prowadzenia pomiarów przynajmniej przez kilka lat. Ostatnio liczba pomiarów wykonywanych przy użyciu satelitów wyraźnie wzrasta, jednak nie obejmują one jeszcze wszelkich kątów elewacji, częstotliwości i klimatów. Wynika stąd, że niezbędne informacje trzeba zbierać różnymi metodami, np. za pomocą radiometrów śledzących słońce, pasywnych radiometrów, obserwacji radarowych. Najsilniejsze tłumienia wnoszą opady bardzo intensywne, których rozciągłość w płaszczyźnie horyzontu jest dość ograniczona.

Z wyjątkiem tras pionowych lub opadu ciągłego efektywna długość drogi znaczącego tłumienia zależy od wymiarów kolumny deszczowej w płaszczyźnie horyzontu. Dla małych procentów czasu tłumienie zależy więc od prawdopodobieństwa zjawienia się na trasie kolumny deszczowej oraz, przy małych kątach elewacji, prawdopodobieństwa napotykania więcej niż jednej kolumny.

Wśród stosowanych metod pomiaru tłumienia wyróżniane są:

- a/ pomiary bezpośrednie /z udziałem satelity/,
- b/ pomiary radiometryczne /np. ze śledzeniem słońca lub pasywny pomiar szumu emitowanego przez atmosferę/,
- c/ pomiary radarowe /na razie wstępne próby prowadzono w Kanadzie/.

Z wymienionych najpewniejsze wyniki dają pomiary bezpośrednie, mogą one jednak być realizowane dopiero po umieszczeniu satelity na orbicie. Obecnie w USA trwają intensywne pomiary tłumienia przy 11 GHz z wykorzy-

stanem satelity Comstar, ale na wyniki jeszcze trzeba poczekać. Pomiar radiometryczny ze siedzeniem słońca mają charakter dość selektywny, ograniczone są do części doby i ze względu na zmiany kąta elewacji utrudniają ocenę statystyczną; pomiary pasywne natomiast wymagają stosowania współczynników korekcyjnych ze względu na rozproszenie i z tej racji uważane są za mniej pewne.

Wyniki badań radiometrycznych, z wykorzystaniem obu systemów, przedstawione na rys. 7 podają wartości całkowitego tłumienia atmosfery zmierzony w zakresie częstotliwości 9,4 do 19 GHz. Widoczna jest na ogół słaba zależność kąta elewacji nawet przy 19 GHz /krzywe 2, 9A, 5, 11/, natomiast występuje wybitne zróżnicowanie od warunków klimatycznych. I tak np. dla 0,1% czasu na częstotliwościach 11 i 12 GHz tłumienie w Anglii wynosi tylko 3 dB, natomiast w Malajzji 20 dB.

Do precyzowania danych radiometeorologicznych przy planowaniu systemów łączności wprowadzono bardzo wygodne pojęcie "najgorszego miesiąca". Jest to miesiąc, w którym określona wartość jakiejś wielkości, w danym przypadku tłumienia, jest przekraczana w największym procencie czasu. Charakterystyka ta jest oznaczona dwoma parametrami: liczbą lat z jakiej pochodzą obserwacje i przekraczonym poziomem.

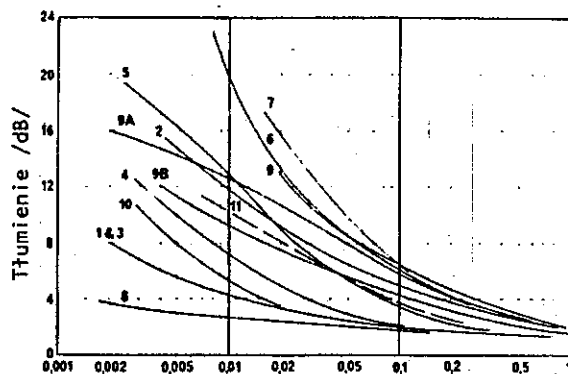
Dane zebrane przez Europejską Agencję Przestrzeni Kosmicznej /ESA/ z 10 punktów obserwacji i okresu 3 lat - z czego wyznaczono 31 rozkładów - wykazały, że w ciągu najgorszego miesiąca tłumienie wynosiło nie mniej niż:

w 90% przypadków	-	3,1 dB
w 50% "	-	7,3 dB
w 10% "	-	11,0 dB.

Pomiędzy wartościami wyznaczonymi dla najgorszego miesiąca i średnimi rocznymi określona została zależność, wg której dla ustalonego procentu obu przedziałów czasu wartości przekraczane w najgorszym miesiącu są 7 razy większe od przekraczanych w średnim roku.

3.5.3. Czas trwania zaników od opadów

Statystyka tego efektu zebrana w Anglii podczas 50-miesięcznych obserwacji wykazuje, że nie stwierdzono zaników przekraczających 10 dB, które trwałyby dłużej niż 8 minut i zaników 5 dB rozciągniętych w czasie ponad 38 minut.



Procenty czasu w których wartości rzędnych są przekraczane

Rys. 7. Tłumienie trasy Ziemia-Satelita z pomiarów radiometrycznych w zakresie częstotliwości 9,4 do 19 GHz dla różnych kątów elewacji [9]

1	Slough, UK	12 GHz	$\theta = 10^\circ - 50^\circ$
2	Slough, UK	19 GHz	" "
3	Toyokawa, Japan	9,4 GHz	$\theta = 45^\circ$
4	Setegaya, Japan	11,8 GHz	"
5	Mitaka, Japan	17 GHz	"
6	Klang, Malaysia	11,8 GHz	"
7	New Jersey, USA	16 GHz	$\theta = 30^\circ$
8	Lake Cowichan, Canada	13 GHz	$\theta = 33^\circ$
9	Innisfail, Australia	11 GHz	$\theta = 30^\circ$
9A	Innisfail, Australia	11 GHz	$\theta = 10^\circ - 90^\circ$ średni dzień
9B	Innisfail, Australia	11 GHz	$\theta = 90^\circ$ (pora nocna)
10	Leeheim, F. Rep. of Germany	11 GHz	$\theta = 27^\circ$
11	Maryland, USA	11,6 GHz	$\theta = 45^\circ$

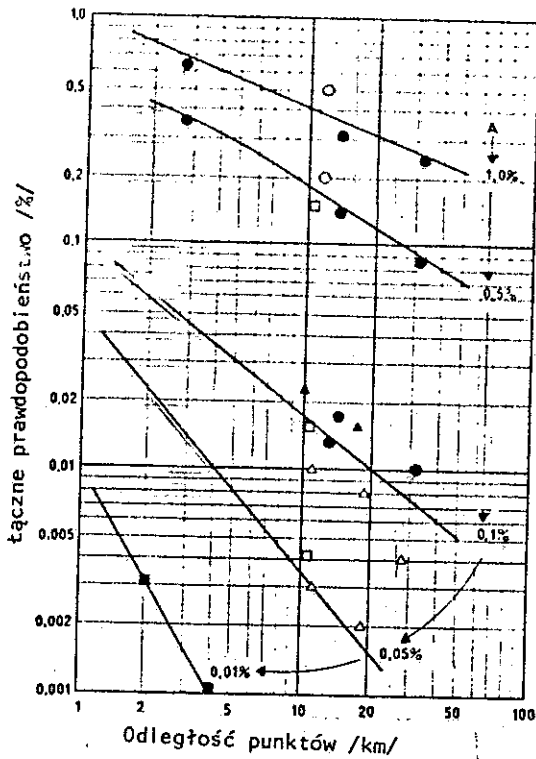
3.5.4. Przeciwdziałanie szkodliwym efektom intensywnych opadów

Skończone rozmiary kolumn deszczowych wywołujących silne tłumienia sugerują korzyści ze stosowania systemów zbiorczych przestrzennie. Ocena korzyści daje łączny rozkład prawdopodobieństwa przekroczenia określonych tłumień, przedstawiony w zależności od odległości punktów odbiorczych. Ważna jest też orientacja linii łączącej oba punkty względem głównego kierunku przemieszczania się zjawisk burzowych i względem kierunku z jakiego widziany jest satelita. Systemy zbiorcze wykazują również korzystną redukcję zaników scyntylacyjnych.

Na rys. 8 przedstawione są uogólnione wyniki badań prowadzonych w Japonii, Anglii i USA. Pokazują one, w jaki sposób maleje prawdopodobieństwo równoczesnego przekroczenia założonej wartości tłumienia w obu punktach odbiorczych, gdy odległość tych punktów jest powiększana. Np. wg pomiarów angielskich, przeprowadzonych na częstotliwości 11,6 GHz, prawdopodobieństwo czasowe 0,01% przekroczenia jakiegoś poziomu tłumienia spada w porównaniu do odbioru jednopunktowego o rząd wielkości, gdy odległość pomiędzy punktami odbioru wynosi 4 km, natomiast wg pomiarów japońskich /16 GHz/ prawdopodobieństwo 0,1% może być zredukowane do 0,005%, gdy punkty odbiorcze są rozstawione na odległości 50 km.

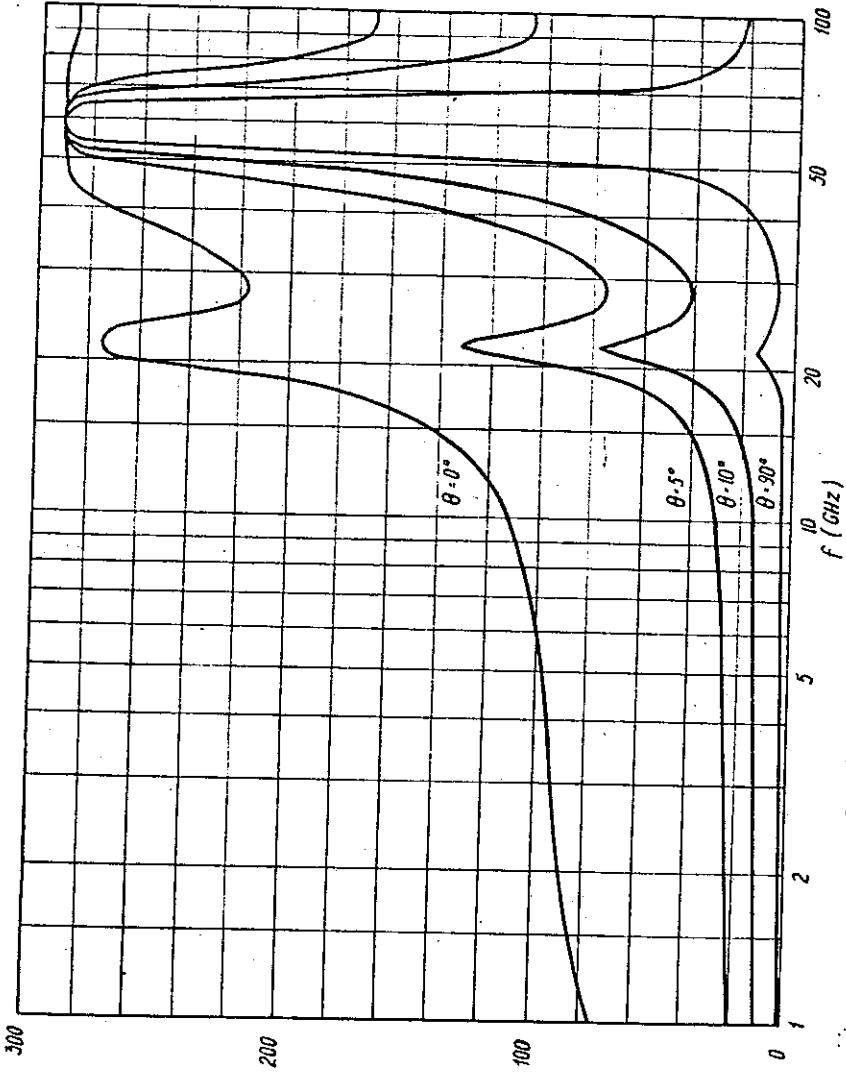
3.6. Temperatura szumowa nieba

Niejonizowane rejony atmosfery, jako ośrodek absorpcyjny, są również źródłem promieniowania szumowego, które może być wykryte przez czuły odbiornik. Na rys. 9 podane są przykładowo wyniki teoretycznych obliczeń temperatury szumowej czystego nieba dla różnych kątów elewacji w zależności od częstotliwości w określonych warunkach ciśnienia atmosferycznego, temperatury na powierzchni Ziemi i koncentracji pary wodnej. Częstotliwości charakterystyczne przedstawionych na wykresie maksimów temperatury szumowej odpowiadają oczywiście rezonansom molekularnym gazów wchodzących w skład atmosfery i podanym na rys. 1. Dane opublikowane przez badaczy ZSRR dla warunków deszczowych i pochmurnych przy elewacji $\theta = 10^\circ$ wykazują wartości kilkakrotnie wyższe, np. dla 10 GHz wartości przekroczone w 1% czasu wynoszą 40°K i dla 20 GHz: 140°K oraz dla 0,1% czasu odpowiednio 90°K i 260°K .



- Japan 17-35 GHz
- Slough 30 GHz
- ▲ Slough 37 GHz
- △ New Jersey 16 GHz
- Slough 11,6 GHz
- Austin, Texas 30 GHz.
- ▲ prawdopodobieństwo /%/
dla pojedynczego punktu

Rys. 8. Prawdopodobieństwo jednoczesnego przekraczania tłumienia w dwóch odległych punktach w zależności od wzajemnej odległości punktów [9]



Rys. 9. Temperatura szumowa nieba /bez zachmurzenia/ [3]
 Koncentracja pary wodnej 3 gm^{-3} ; Ciśnienie na powierzchni 1 atm;
 Temperatura na powierzchni 20°C ; θ kąt elewacji

3.7. Efekty depolaryzacji sygnału

W celu powiększenia pojemności widma radiowego stosowane jest powszechnie powtórne wykorzystywanie częstotliwości przy użyciu ortogonalnych polaryzacji. Technikę tę ograniczają zjawiska depolaryzacji pochodzące od propagacji troposferycznej, w szczególności od intensywnych opadów deszczu.

Wyniki badań nad dyskryminacją sygnałów spolaryzowanych ortogonalnie /XPD/^{1/} wykazały, że wielkość tej dyskryminacji jest wyraźnie skorelowana z wielkością tłumienia sygnału odbieranego przy zgodnej polaryzacji anten strony nadawczej i odbiorczej /CPA/^{2/}. Jednak ta korelacja występuje tylko dla intensywnych opadów. Dla opadów o mniejszych intensywnościach, np. gdy tłumienie jest mniejsze od 4 dB, korelacja nie występuje.

Badania przeprowadzone przy użyciu kanadyjskiego satelity CTS na częstotliwości 11,7 GHz przy kołowej polaryzacji sygnałów odbieranych przy kącie elewacji 24° wykazały, że współczynnik XPD zawierał się w granicach od 40 do 15 dB, przy czym najmniejsze wartości odpowiadały tłumieniu /CPA/ powyżej 3 dB; w zakresie dobrej korelacji z CPA. Wartości typowe dla 20 i 30 GHz przy linearnej polaryzacji sygnałów, określone z wykorzystaniem satelity ATS-6, wynoszą dla 0,01% czasu i przy $\theta \cong 20 \div 25^\circ$ około 20 dB.

W niektórych przypadkach, gdy depolaryzacja sygnałów nie może być wyraźnie skojarzona ze zjawiskiem występującego deszczu, jest ona przypisywana działaniu chmur lodowych na trasie propagacji. Obecność lodu odgrywa tym większą rolę, im wyższa jest częstotliwość, jednak do częstotliwości ok. 14 GHz tłumienie sygnału o polaryzacji ortogonalnej może być określane wyłącznie jako skutek opadów deszczu.

^{1/}XPD - jest skrótem pełnej nazwy, stosowanym w literaturze anglosaskiej: crosspolarization discrimination.

^{2/}CPA - skrót od co-polar attenuation.

3.8. Ograniczenie szerokości pasma w systemach telekomunikacji satelitarnej

Ograniczenie to może występować ze względu na zależność tłumienia od częstotliwości i przesunięć fazowych wywołanych intensywnymi opadami. Problem zaczyna się pojawiać powyżej 3,5 GHz, ale wielkość tłumienia trasy stanowi zagadnienie znacznie poważniejsze niż jej zmiany, z częstotliwością w granicach stosowanych szerokości pasm. W celu ustalenia częstotliwościowych funkcji przenoszeniowych /amplitudy i fazy/ wymagane są dalsze badania.

3.9. Opóźnienia propagacyjne na trasach Ziemia-kosmos

Zjawiska te są szczególnie ważne w cyfrowych systemach telekomunikacji, gdzie dla synchronizacji przebiegów istotne jest określenie zmian czasu przejścia. Przy częstotliwościach wyższych od 10 GHz ośrodkiem powodującym zmiany opóźnienia jest troposfera. Średnia wariancja opóźnienia propagacji jest określona na podstawie regresji pomiędzy powierzchniowym wskaźnikiem refrakcji N_s i stopą błędu lub odpowiadającym mu błędem czasu przejścia.

4. POTRZEBA DALSZYCH BADAŃ PROPAGACYJNYCH I RADIOMETEOROLOGICZNYCH DO UŚCISŁANIA PODSTAW PLANOWANIA SYSTEMÓW ŁĄCZNOŚCI

W kilku miejscach w poprzednich rozdziałach podkreślano prowizoryczny charakter danych, np. przy omawianiu efektywnej długości drogi przez troposferę w czasie opadu deszczu, przy określaniu bardzo dużych intensywności na skonkretyzowanych terenach, które jako zjawiska b. rzadkie wymagają kilkuletnich obserwacji. Zwrócono uwagę, że podział na strefy globu ziemskiego jest uproszczony i niewystarczający do dokładnego prognozowania. Materiały są uśredniane, a wahania w poszczególnych strefach b. znaczne. Wskazano również, że prognozowanie w oparciu o sprawozdania 563 [7] i 5/287 [4] jest środkiem zastępczym, zalecanym do stosowania jedynie, gdy brak jest bliższych i dokładniejszych danych. Problemy ograniczania szerokości pasma są dotychczas b. mało znane, to samo dotyczy efektów opóźnień propagacyjnych.

Programy studiów CCIR, m.in. Program 7B-1/5 [12], wyraźnie wskazują na prowizoryczny charakter danych aktualnie dostępnych w Sprawozdaniu 565 [8] i zachęcają do prowadzenia dalszych obserwacji wielosezonowych na możliwie wielkiej liczbie terytoriów rozmieszczonych na całej powierzchni Ziemi, gdzie przewidywane jest lokalizowanie stacji naziemnych i docieranie służb kosmicznych.

5. WSPÓŁPRACA MIĘDZYNARODOWA W ZAKRESIE BADAŃ NAD WPŁYWEM TROPOSFERY NA ŁĄCZNOŚĆ SATELITARNĄ

W ramach współpracy międzynarodowej m.in. w grupie krajów socjalistycznych, od kilku lat prowadzone są intensywne prace organizacyjne i technologiczne zmierzające do realizacji badań eksperymentalnych związanych z wykorzystaniem zakresów cz. > 10 GHz do celów telekomunikacji, zarówno w służbach ziemskich jak i przede wszystkim satelitarnych.

W chwili obecnej opracowany jest i zatwierdzony projekt wstępny takiego eksperymentu w którym bierze udział również Polska. Ostatnio opracowane są poszczególne rozdziały projektu technicznego. Eksperyment przewiduje podjęcie na szeroką skalę badań propagacyjnych w zakresach częstotliwości 10-30 GHz, z wykorzystaniem doświadczalnej stacji satelitarnej i szeregu stacji naziemnych na terenie krajów uczestniczących. Przewiduje się stacje I i II klasy, przy czym stacje II klasy w dwóch wariantach. Planowane jest przy tym zróżnicowanie badań na czysto propagacyjne i na badania obejmujące próby transmisji sygnałów i testowania systemów, co wymaga również zróżnicowanych wyposażzeń stacji naziemnych. W okresie poprzedzającym umieszczenie satelity na orbicie /które jest obecnie planowane na rok 1980/81/ prowadzone są wstępne badania propagacyjne na ziemskich liniach radiowych, wchodzących do służb eksploatacyjnych lub specjalnie uruchomionych do celów eksperymentalnych. Równolegle z badaniami propagacyjnymi rozwijane są badania parametrów meteorologicznych. Badania kompleksowe propagacyjne mają obejmować pomiary absorpcji, refrakcji, rozproszenia, zaników, temperatury szumowej nieba, koherentnej szerokości pasma.

Polska administracja łączności, zgłaszając uczestnictwo w programie eksperymentu czyni starania zapewnienia również udziału w opracowaniach technologicznych, co byłoby bardzo korzystne przy późniejszym udziale we właściwym eksperymencie.

Badania podstaw propagacyjnych systemów w zakresach częstotliwości powyżej 10 GHz stanowią istotną część składową jednego z problemów węzłowych. Tematy wchodzące do tego problemu również w skali krajowej muszą być rozwiązywane przy szerokiej kooperacji międzynarodowej. W tym celu Instytut Łączności nawiązuje współpracę z innymi instytucjami, ośrodkami oraz instytucjami uczelnianymi, przemysłowymi i eksploatacyjnymi. Bardzo ważny udział w wykonaniu zadań spoczywa na Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej, którego doświadczenia w sprawie zróżnicowań i charakterystyki klimatycznej kraju będą wykorzystane do zorganizowania sieci odpowiednich punktów pomiarowych w wytypowanych regionach mikroklimatycznych. Przewidziana jest również budowa centralnego poligonu doświadczalnego, który łącznie z punktami terenowymi umożliwi zgromadzenie materiału statystycznego, potrzebnego do scharakteryzowania radioklimatu kraju oraz jego zróżnicowań czasowo-przestrzennych.

Prace przygotowawcze prowadzone obecnie w PRL mają już za sobą opracowania aparaturowe /m.in. mierniki bezpośrednio intensywności opadów i innych wielkości meteorologicznych oraz zautomatyzowane rejestratory danych pomiarowych z cyfrowym zapisem/, koncepcje systemu gromadzenia danych pomiarowych i ich analizy statystycznej, opracowania wstępne do typowania rejonów mikroklimatycznych w oparciu o materiały archiwalne IMGW /sporządzono atlas map wskaźnika refrakcji na obszarze kraju oraz jest w trakcie opracowania atlas przestrzenno-czasowych rozkładów intensywności opadów deszczu, wyznaczonych pośrednio na podstawie wysokości opadów/. Wykonano prace przygotowawcze umożliwiające wykorzystanie radaru meteorologicznego do badania przestrzennych rozkładów intensywnych opadów. Równoległe z tymi pracami podjęto opracowania aparatury mikrofalowej eksperymentalnej przeznaczonej do zainstalowania na trasach doświadczalnych - prace te są prowadzone w kooperacji z Politechniką Warszawską. Oczekują jeszcze na wykonawców prace związane z wyposażeniem linii doświadczalnych w systemy antenowe.

WYKAZ LITERATURY

1. Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation. CCIR Rep. doc. 5/1023, Kyoto 1978.
2. Attenuation by atmospheric gases. CCIR Rep. doc. 5/1024, Kyoto 1978.
3. Radio emission due to absorption by atmospheric gases and precipitation. CCIR Rep. doc. 5/1025, Kyoto 1978.
4. Attenuation and scattering by precipitation and other atmospheric particles. CCIR Rep. doc. 5/1026, Kyoto 1978.
5. Cross-polarization due to the atmosphere. CCIR Rep. doc. 5/1027, Kyoto 1978.
6. Worst-month statistics. CCIR Rep. doc. 5/1028, Kyoto 1978.
7. Radiometeorological data. CCIR Rep. 563-1; doc. 5/1022, Kyoto 1978.
8. Propagation data for broadcasting from satellites at frequencies above 10 GHz. CCIR Rep. 561-1; doc. 5/1038, Kyoto 1978.
9. Propagation data required for space telecommunication systems. CCIR Rep. 564-1; doc. 5/1049, Kyoto 1978.
10. The evaluation of propagation factors in interference problems at frequencies greater than 0,6 GHz. CCIR Rep. 569-1; doc. 5/1052, Kyoto 1978.
11. Propagation data for the evaluation of co-ordination distance in the frequency range 1 to 40 GHz. CCIR Rep.; doc. 5/1053, Kyoto 1978.
12. Propagation data required for broadcasting in the frequency bands above 10 GHz /including satellite broadcasting/. CCIR Study Programme 7B-1/5; doc. 5/1040, Kyoto 1978.

