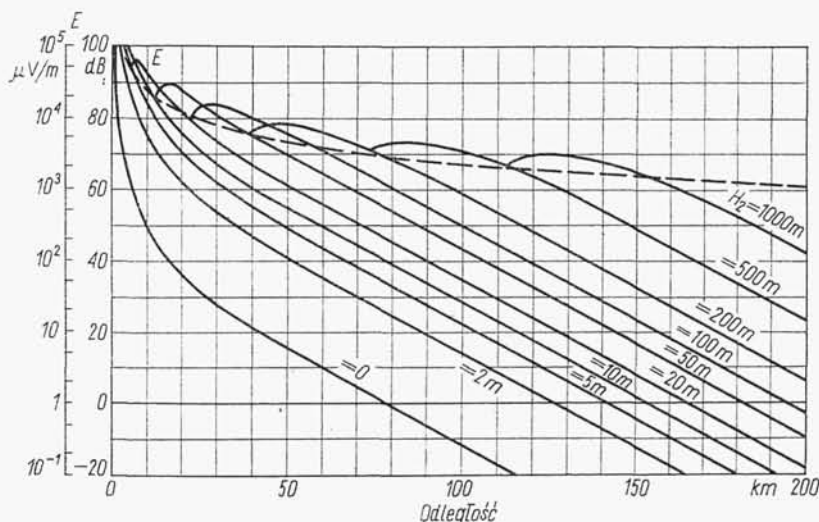


specjalne nomogramy do obliczania LUF [10], których ze względu na brak miejsca nie będziemy tu omawiać. Należy tylko zwrócić uwagę na to, że przebiegi LUF na jednej i tej samej trasie i w tych samych warunkach mogą być różne dla obu końców trasy, ze względu na różne poziomy zakłóceń atmosferycznych.

16.5. ROZCHODZENIE SIĘ FAL ULTRAKRÓTKICH I MIKROFAL

Fale ultrakrótkie i mikrofałe obejmują zakres częstotliwości radiowych powyżej 30 MHz. Zakres ten dzieli się na cztery podzakresy:

- fale metrowe — od 10 m do 1 m (30...300) MHz;
- fale decymetrowe — od 1 m do 10 cm (300...3000) GHz;
- fale centymetrowe — od 10 cm do 1 cm (3...30) GHz;
- fale milimetrowe — od 10 mm do 1 mm (30...300) GHz.



Rys. 16-36. Krzywe natężenia pola w funkcji odległości dla częstotliwości 150 MHz i polaryzacji poziomej. Wysokość zawieszenia: anteny nadawczej $H_1 = 200$ m, anteny odbiorczej $H_2 = \text{par.}$; parametry elektryczne gruntu: $\sigma = 0,01$ S/m, $\epsilon_r = 10$ (według I Atlasu CCIR)

Fale ultrakrótkie wykazują przy rozchodzeniu się w otoczeniu ziemi właściwości quasi-optyczne, to jest w zasadzie rozchodzą się zgodnie z prawami optyki geometrycznej. Gdyby prawa optyki geometrycznej obowiązywały ściśle, wówczas odbiór na falach ultrakrótkich byłby możliwy tylko w granicach zasięgu optycznego. W rzeczywistości można wyróżnić zjawiska, które powodują, że fale docierają poza zasięg optyczny. Spośród tych zjawisk główną rolę odgrywają:

- refrakcja fal w troposferze;

- dyfrakcja fal wokół kulistej powierzchni ziemi oraz wokół wzniesień naturalnych lub budowli na powierzchni ziemi;
- rozpraszanie fal przez troposferę;
- odbicie od śladów meteorów.

W zakresie fal ultrakrótkich mamy na ogół do czynienia z antenami podniesionymi. Obliczanie natężenia pola w warunkach idealnych można więc wykonać za pomocą wzoru Wwiedeńskiego dla ziemi płaskiej (12-32) lub dla ziemi kulistej (p. 12.6). W tym ostatnim przypadku należy uwzględnić normalną refrakcję troposferyczną przez wprowadzenie zastępczego promienia ziemi (p. 13.4). Ponieważ natężenie pola fal ultrakrótkich zależy od całego zespołu czynników takich, jak: częstotliwość, wysokość zawieszenia anten, parametry elektryczne gruntu, polaryzacja itp., opracowano specjalne atlasy teoretycznych krzywych propagacji [7]. Przykład jednej rodziny takich krzywych pokazano na rys. 16-36. Podają one natężenie pola w decybelach ponad $1\mu\text{V/m}$ dla mocy promieniowanej przez antenę półfalową równej 1 kW i odnoszą się do standardowej atmosfery, dla której zastępczy promień kuli ziemskiej jest równy $4/3$ promienia rzeczywistego.

16.5.1. STATYSTYCZNE KRZYWE PROPAGACJI FAL METROWYCH I DECYMETROWYCH

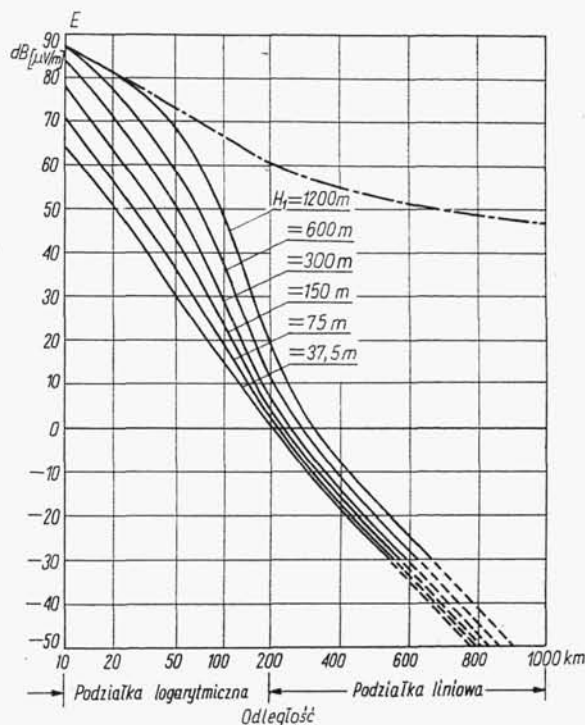
Wzory podane w rozdz. 12 i teoretyczne krzywe propagacji fali przyziemnej są słuszne przy założeniu ziemi gładkiej i atmosfery znormalizowanej. Niedostateczna jeszcze znajomość mechanizmu propagacji troposferycznej i różnorodność działających na nią wpływów nie pozwoliły dotychczas ustalić dostatecznie miarodajnych zależności, na podstawie których można by opracować teoretyczne krzywe propagacji troposferycznej, uwzględniające wszelkie możliwe warunki. Ponieważ rzeczywisty teren w wyjątkowych tylko przypadkach może być traktowany jako ziemia gładka, zaś atmosfera rzeczywista zazwyczaj różni się mniej lub więcej od atmosfery znormalizowanej, do obliczeń praktycznych stosuje się *statystyczne krzywe propagacji*. Krzywe takie zostały opracowane na podstawie wielkiej liczby pomiarów natężenia pola, wykonanych na różnych obszarach i w rozmaitych warunkach klimatycznych.

W odróżnieniu od krzywych teoretycznych, krzywe statystyczne nie podają ustalonej wartości natężenia pola w funkcji odległości. Krzywe te podają wartość przekraczaną w określonym procencie miejsc odbioru i w określonym procencie czasu. Z krzywych statystycznych odczytujemy zatem prawdopodobieństwo przekroczenia pewnej wartości natężenia pola w określonej odległości od nadajnika i w określonym procencie czasu.

Ze względu na znaczne zróżnicowanie ukształtowania i pokrycia terenu, a także ze względu na rozmaite warunki klimatyczne różnych obszarów świata, krzywe statystyczne są sporządzone oddzielnie dla każdego obszaru charakteryzującego się jednolitymi w przybliżeniu właściwościami terenowymi i klimatycznymi. Zmienność warunków meteorologicznych w funkcji czasu narzuca wymaganie prowadzenia

pomiarów przez dłuższy okres czasu, tak, aby można było uwzględnić dobowe i roczne wahania natężenia pola. Ta ostatnia uwaga dotyczy w szczególności propagacji pozahoryzontowej.

Dla celów telewizji i radiofonii ultrakrótkofalowej CCIR zaleca krzywe $F(50, 50)^{1)}$ do obliczania natężenia pola użytecznego oraz krzywe $F(50, 10)$ lub $F(50, 1)$ — do obliczania natężenia pola zakłóceń. Krzywe CCIR są sporządzone dla mocy promieniowanej przez antenę półfalową równej 1 kW [9].



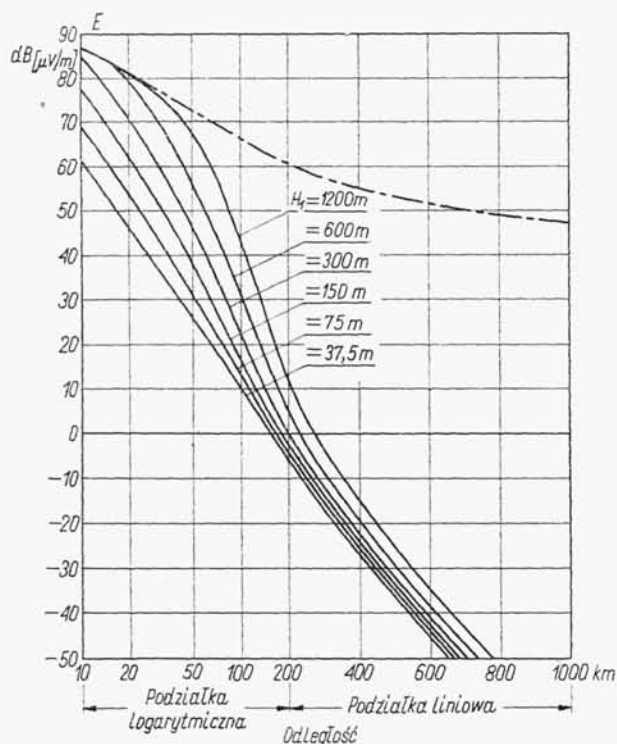
Rys. 16-37. Krzywe propagacji $F(50, 50)$ dla zakresu częstotliwości 30...250 MHz (wysokość zawieszenia anteny odbiorczej $H_2 = 10$ m) (według Zalecenia nr 369-1 CCIR, Oslo 1966)

Na rysunku 16-37 przedstawiono przykładowo krzywe $F(50, 50)$ dla zakresu częstotliwości 30...250 MHz, a na rys. 16-38 — dla zakresu częstotliwości 450...1000 MHz. Mediana natężenia pola zależy również od pofałdowania terenu, określanego parametrem ΔH , zdefiniowanym jako różnica wysokości (w metrach) przekraczanych przez 10% i 90% krzywej profilu terenu w zakresie odległości od 10 do 50 km, licząc od anteny nadawczej. Podane krzywe propagacji odnoszą się do terenów nizinnych o niewielkim pofałdowaniu, dla których $\Delta H = 50$ m. Dla wartości parametru ΔH

¹⁾ Są to krzywe natężenia pola w funkcji odległości, przekraczanej w 50% miejsc w danej odległości od stacji nadawczej i w 50% czasu.

innych niż 50 m od wartości natężenia pola odczytanych z krzywych propagacji należy odjąć poprawkę podaną na rys. 16-39. Dla terenów o urozmaiconej rzeźbie topograficznej parametr ΔH przyjmuje wartości 100...200 m; dla terenów podgórskich i górskich — 200...400 m.

Jeśli zastępczą moc promieniowaną przez dipol półfalowy jest równa P_z [kW], to do wartości mediany natężenia pola odczytanej z krzywych propagacji należy dodać poprawkę wynoszącą $10 \lg P_z$ [dB].



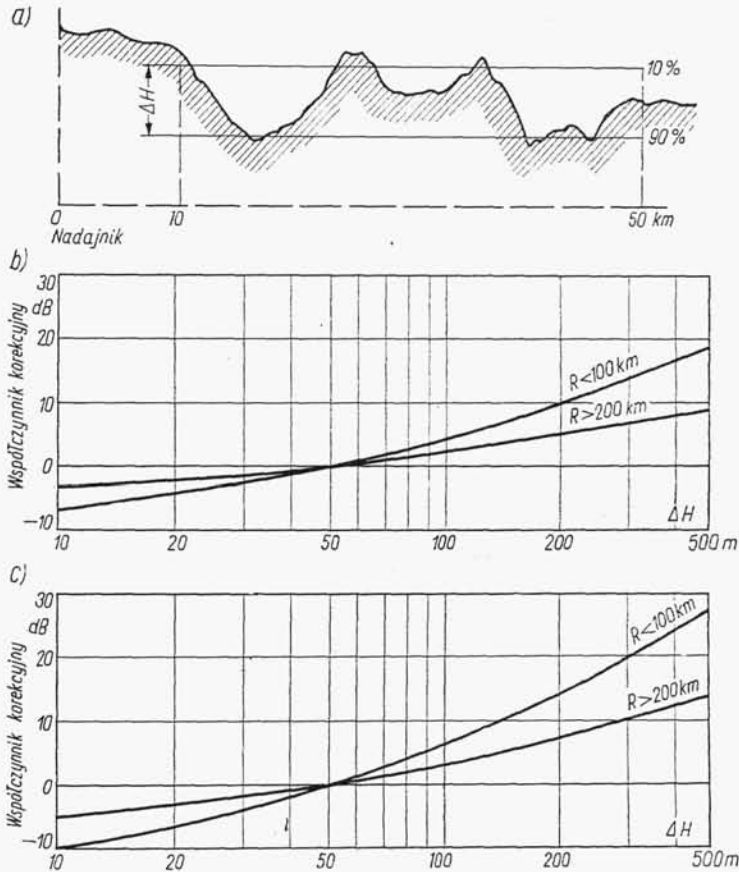
Rys. 16-38. Krzywe propagacji $F(50,50)$ dla zakresu częstotliwości 450...1000 MHz (wysokość zawieszenia anteny odbiorczej $H_2 = 10$ m) (według Zalecenia nr 369-I CCIR, Oslo 1966)

Przykład liczbowy. Wyznaczyć przeciętne zasięgi użyteczne nadawczych stacji telewizyjnych przy następujących założeniach:

- zastępcza moc promieniowana przez dipol półfalowy: 100 kW w zakresach I, II i III;
1000 kW w zakresach IV i V;
- wysokość zawieszenia anteny nadawczej 300 m;
- graniczna wartość natężenia pola: 48 dB w zakresach I i II;
55 dB w zakresie III;
67 dBw zakresie IV;
72 dB w zakresie V.

Obliczenia wykonać dla obszarów nizinnych o niewielkim pofałdowaniu ($\Delta H = 50$ m) oraz dla obszarów podgórskich ($\Delta H = 200$ m).

Wykonamy najpierw obliczenia dla I zakresu częstotliwości. Przy zastępczej mocy promieniowanej przez dipol półfalowy równej 100 kW poprawka ze względu na moc wynosi 20 dB. Odejmujemy tę poprawkę od granicznej wartości natężenia pola i dla uzyskanej wartości (28 dB) kreślimy na wykresie $F(50, 50)$ (rys. 16-37) prostą poziomą. Punkt przecięcia tej prostej z krzywą odpowiadającą wysokości zawieszenia anteny nadawczej $H_1 = 300$ m wyznacza poszukiwany



Rys. 16-39. Wpływ pofałdowania terenu na medianę natężenia pola a) definicja parametru ΔH ; b) współczynnik korekcyjny dla zakresu częstotliwości 30...250 MHz; c) współczynnik korekcyjny dla zakresu częstotliwości 450...1000 MHz (według Zalecenia nr 369-1 CCIR, Oslo 1966)

zasięg stacji w terenie nizinnym. Wynosi on 100 km. Do wyznaczenia zasięgu stacji w terenie podgórskim odczytujemy z wykresu na rys. 6-38b poprawkę dla $\Delta H = 200$ m. Wartość tej poprawki (10 dB) dodajemy do poprzednio określonego poziomu 28 dB i z krzywej $F(50, 50)$ dla $H_1 = 300$ m znajdujemy zasięg stacji w terenie podgórskim równy 75 km. Wyniki obliczeń dla pozostałych zakresów częstotliwości podano w tabl. 16-1.

Tablica 16-1

Przeciętne zasięgi użyteczne nadawczych stacji telewizyjnych

Zakres częstotliwości		I/II	III	IV	V
Zastępcza moc promieniowana przez dipol półfalowy [kW]		100	100	1000	1000
Poprawka ze względu na moc p_1 [dB]		20	20	30	30
Graniczna wartość natężenia pola E [dB]		48	55	67	72
$E - p_1$		28	35	37	42
Poprawka dla terenu podgórskiego p_2 [dB]		10	10	14	14
$E - p_1 + p_2$		38	45	51	56
Przeciętny zasięg użyteczny [km]	na obszarach nizinnych o niewielkim pofalowaniu	100	85	65	58
	na obszarach podgórskich	75	60	42	35

16.5.2. POZAHORYZONTOWA PROPAGACJA TROPOSFERYCZNA

Znane teorie rozpraszania fal radiowych w troposferze (p. p. 13.6) nie potrafią wyjaśnić wszystkich zjawisk towarzyszących pozahoryzontowej propagacji fal ultrakrótkich. Dla obliczeń inżynierskich stosuje się więc metody półempiryczne [13, 32].

Na podstawie uogólnienia wyników pomiarów natężenia pola fal ultrakrótkich przeprowadzonych w dużych odległościach od nadajnika, w warunkach wyłączających wpływ duktów troposferycznych na rys. 16-40 dla fal o różnej długości podano zależność mediany współczynnika osłabienia (w stosunku do natężenia pola w swobodnej przestrzeni) od odległości. Za pomocą krzywych z rys. 16-40 bez trudu można określić medianę natężenia pola rozproszonego w określonej odległości od nadajnika przy standardowych warunkach meteorologicznych (wskaźnik refrakcji przy powierzchni ziemi $N = 310$) i gładkiej powierzchni ziemi. Wpływ warunków meteorologicznych i rzeźby terenu uwzględnia się przez wprowadzenie odpowiednich poprawek, których tu nie będziemy omawiać.

Sposób korzystania z podanego wykresu zilustrujemy następującym przykładem.

Przykład liczbowy. Wyznaczyć moc nadajnika konieczną do zapewnienia łączności w ciągu 99% czasu na trasie o długości 400 km przy częstotliwości $f = 1,5$ GHz ($\lambda = 20$ cm). Zysk energetyczny anteny nadawczej i odbiorczej odniesiony do źródła izotropowego wynosi 46 dB ($G_0 = 4 \cdot 10$ W/W). W celu zapewnienia poprawnej detekcji moc doprowadzona do wejścia odbiornika nie może być mniejsza od $2 \cdot 10^{-13}$ W.

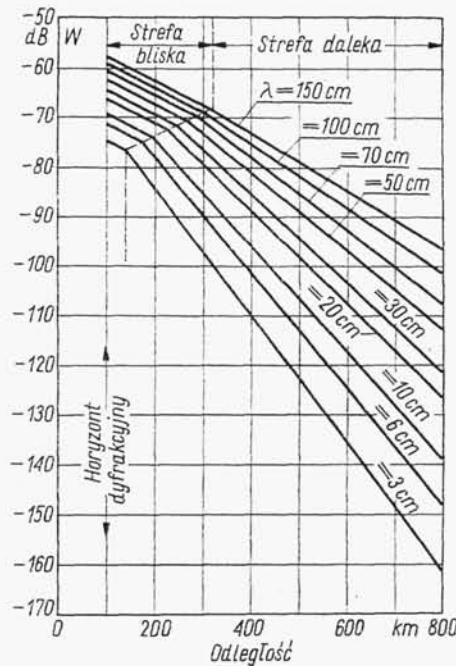
Z wykresu na rys. 16-40 odczytujemy medianę współczynnika osłabienia, dla odległości 400 km i $\lambda = 20$ cm; $W = -89$ dB, czyli $W = 3,55 \cdot 10^{-5}$. Moc doprowadzona do odbiornika przy propagacji fali w swobodnej przestrzeni jest określona wzorem (11-8). Wprowadzając współczynnik osłabienia otrzymujemy

$$P_{odb} = \frac{G_1 G_2 \lambda^2 P_N}{(4\pi R)^2} W^2 \quad (16-21)$$

przy czym P_N — moc nadajnika.

Podstawiając do wzoru (16-21) wartości liczbowe i uwzględniając, że w naszym przypadku zyski energetyczne obu anten są jednakowe ($G_1 = G_2 = G_0$) otrzymujemy

$$P_N = \left(\frac{4\pi R}{G_0 \lambda W} \right)^2 P_{odb} = \left(\frac{4\pi \cdot 4 \cdot 10^5}{4 \cdot 10^4 \cdot 0,2 \cdot 3,55 \cdot 10^{-5}} \right)^2 2 \cdot 10^{-13} \approx 62,5 \text{ W}$$



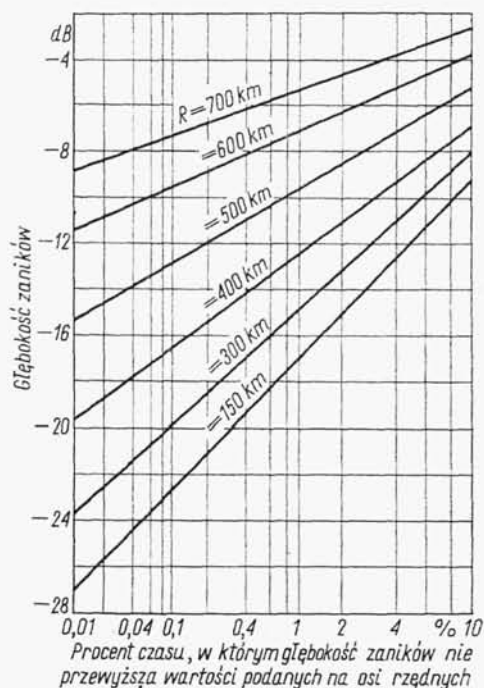
Rys. 16-40. Zależność mediany współczynnika osłabienia natężenia pola od odległości przy $N = 310$ (według Б. А. Введенский и др.: Дальнее тропосферное распространение ультракоротких радиоволн. Изд. Советское Радио, Москва 1965)

Obliczona w ten sposób moc nadajnika zapewnia utrzymanie łączności tylko w 50% czasu pracy. W celu zapewnienia wymaganej niezawodności łącza wynoszącej 99%, należy uwzględnić wpływ wolnych i szybkich zaników. Statystyczny rozkład głębokości wolnych zaników przedstawiono na rys. 16-41. Wynika zeń, że dla osiągnięcia założonej niezawodności łącza należy zwiększyć moc nadajnika o 12,5 dB, tzn. do 1,11 kW.

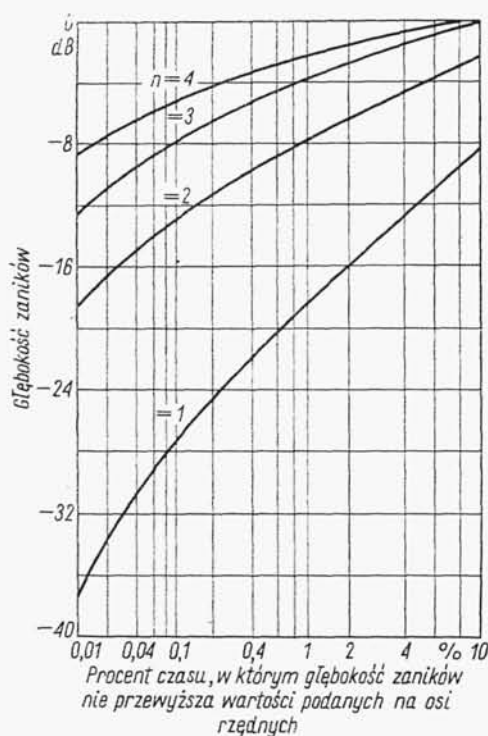
Głębokość szybkich zaników można wydatnie zmniejszyć przez zastosowanie odbioru zbiorczego. Statystyczny rozkład szybkich zaników pokazano na rys. 16-42. Dla skompensowania szybkich za-

ników przy odbiorze na jedną antenę należy zwiększyć moc nadajnika o 18 dB, tzn. do ok. 70 kW. Przy zastosowaniu dwóch anten moc nadajnika może być o 10 dB mniejsza (7 kW),

Zjawisko rozpraszania troposferycznego jest charakterystyczne dla propagacji fal ultrakrótkich. W pozostałych zakresach częstotliwości bowiem działają inne czynniki (dyfrakcja i odbicie od jonosfery) umożliwiające rozchodzenie się fal radiowych na duże odległości. Wykorzystując zjawisko rozpraszania troposferycznego można, za pomocą nadajników o mocy dochodzącej do 50, a nawet 100 kW i anten



Rys. 16-41. Statystyczny rozkład głębokości wolnych zaników (według Б. А. Введенский и др.: Дальнее тропосферное распространение ультракоротких радиоволн. Изд. Советское Радио, Москва 1965)



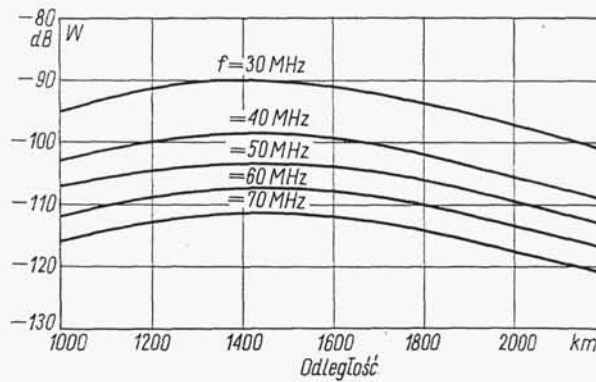
Rys. 16-42. Statystyczny rozkład głębokości szybkich zaników przy odbiorze za pomocą jednej anteny oraz przy odbiorze zbiorczym za pomocą n anten (według Б. А. Введенский и др.: Дальнее тропосферное распространение ультракоротких радиоволн. Изд. Советское Радио, Москва 1965)

o dużym zysku energetycznym (średnica anten ok. 20 m), zapewnić niezawodną łączność na falach *od 6 m do kilku centymetrów na odległość do 1000 km. Szerokość pasma przekazywanego bez zniekształceń wynosi około 5 MHz. Łąca troposferyczne znalazły zastosowanie w telefonii wielokrotnej oraz do przekazywania programów telewizyjnych.

16.5.3. ROZCHODZENIE SIĘ FAŁ METROWYCH WSKUTEK ROZPRASZANIA W JONOSFERZE

Podobnie jak w troposferze, tak i w jonosferze zachodzi zjawisko rozpraszania fal radiowych, dzięki któremu jest możliwa stała łączność dalekosiężna w pewnym zakresie częstotliwości fal metrowych, niezależnie od aktywności słonecznej i zmian sezonowych stanu jonosfery. Przyczyną rozproszenia są nieregularności jonizacji warstwy *D* i dolnej części warstwy *E*.

W przeciwieństwie do rozproszenia troposferycznego, rozproszenie jonosferyczne jest użyteczne w stosunkowo wąskim zakresie częstotliwości, mianowicie między 30



Rys. 16-43. Zależność mediany współczynnika osłabienia przy rozpraszaniu w jonosferze fal metrowych od odległości i częstotliwości (według M. П. Долуханов: Распространение радиоволн. Изд. Связь, Москва 1965)

a 70 MHz. Ograniczenie od dołu jest spowodowane interferencją z falami rozchodzącymi się za pośrednictwem stałej warstwy *F*₂. W okresach silnej aktywności słonecznej nawet częstotliwości rzędu 30 do 40 MHz są z tego powodu niekorzystne. Częstotliwości powyżej 70 MHz nie są wykorzystywane do komunikacji na zasadzie rozproszenia jonosferycznego, ponieważ — ze względu na spadek natężenia pola w funkcji częstotliwości — należałoby stosować wielkie moce promieniowane, co byłoby ekonomicznie nieopłacalne.

Na rys. 16-43 przedstawiono zależność mediany współczynnika osłabienia przy rozpraszaniu w jonosferze fal metrowych od odległości i częstotliwości.

Zjawisko rozpraszania jonosferycznego wykorzystuje się do łączności na odległości dochodzące do 2000 km. W tego typu łączności można przysyłać sygnały o szerokości pasma do 6 kHz. Duże osłabienie pola zachodzące w procesie rozchodzenia się fal można skompensować przez zastosowanie nadajników o dużej mocy (dziesiątki kilowatów) i anten o dużym zysku energetycznym. Łąca jonosferyczne na fali rozproszonej stosuje się przede wszystkim w obszarach podbiegunowych, gdzie częste burze magnetyczne utrudniają łączność na falach krótkich.

16.5.4. ROZCHODZENIE SIĘ FAL ULTRAKRÓTKICH PRZEZ ROZPROSZENIE NA ZJONIZOWANYCH ŚLADACH METEORÓW

Jak podawaliśmy już w p. 14.1, przenikającym do atmosfery ziemskiej meteorom towarzyszy powstawanie słupów zjonizowanego powietrza, nazywanych *śladami meteorów*. Fale ultrakrótkie, spotykając na swej drodze podobne ślady, rozpraszają się i mogą docierać do punktów na powierzchni ziemi, znajdujących się w strefie cienia. Ponieważ ślady meteorów pojawiają się od czasu do czasu, a przekazywanie sygnałów może być dokonywane tylko w czasie ich istnienia, odbywa się ono w sposób szczególny. Sposób ten nazywamy przerywanym. Po stronie nadawczej stosuje się urządzenia, które gromadzą informacje podlegające przekazaniu, a następnie — w czasie istnienia śladu — przekazują je porcjami w sposób przyspieszony.

Drogą doświadczalną ustalono, że ślady meteorów mogą być wykorzystane do łączności na falach metrowych (30...50 MHz). Stosunek czasu faktycznego istnienia łączności do czasu pracy nadajników (tzw. współczynnik wykorzystania łącza) zależy od mocy nadajnika, zysku energetycznego anten i czułości odbiornika. Przy niewielkich mocach nadajnika (kilkaset watów) i stosunkowo prostych antenach, współczynnik ten jest rzędu 3% (3% czasu — aktywna łączność, 97% czasu — oczekiwanie). W sprzyjających okolicznościach oraz przy większych mocach nadajników i skomplikowanych antenach współczynnik wykorzystania łącza może dochodzić do 16%.

Główną zaletą łączy wykorzystujących zjonizowane ślady meteorów, w porównaniu z łączami opartymi na rozpraszaniu w jonosferze, jest możliwość stosowania mniejszych mocy nadajników i prostszych anten.

Omawiane łącza mogą zapewnić niezawodną łączność na odległość do 2000 km, przy szerokości pasma rzędu 3 kHz.

16.6. PROPAGACJA ŚWIATŁA LASEROWEGO

Gigantyczny przeskok od mikrofal do fal świetlnych, możliwy do realizacji dzięki zdolności lasera do emisji promieniowania spójnego, otworzył dla telekomunikacji zupełnie nowy, niewspółmiernie wielki w stosunku do dotychczasowych osiągnięć, zakres częstotliwości. W ten sposób tendencja opanowywania coraz wyższych zakresów częstotliwości, występująca od początku wykorzystywania fal radiowych w praktyce, znalazła w laserze najbardziej jaskrawy wyraz. Tendencja ta jest podyktowana dążeniem do zwiększenia pojemności informacyjnej i kierunkowości łączy telekomunikacyjnych oraz potrzebą doskonalenia urządzeń radiolokacyjnych, radionawigacyjnych itp.

Zasadniczą właściwością światła laserowego jest możliwość otrzymania wiązki o wyjątkowo małej rozbieżności. Miarą rozbieżności wiązki jest kąt rozwarcia stożka, który bezpośrednio na wyjściu lasera może wynosić kilka minut, a przy użyciu odpo-