

16

SPECYFIKA ROZCHODZENIA SIĘ FAL RADIOWYCH RÓŻNYCH ZAKRESÓW CZĘSTOTLIWOŚCI

16.1. ROZCHODZENIE SIĘ FAL DŁUGICH I BARDZO DŁUGICH

Fale długie obejmują zakres częstotliwości od 15 do 100 kHz (20 000...30 000 m). Falami bardzo długimi przyjęto nazywać fale dłuższe od 20 km.

Fale długie, wskutek bardzo małego tłumienia w ziemi, która — praktycznie biorąc — zachowuje się jak przewodnik, oraz dużej dyfrakcji, rozchodzą się w postaci fali powierzchniowej na dość duże odległości. Jednakże już w odległości 1000...2000 km od nadajnika natężenie pola fali jonosferycznej przewyższa natężenie pola fali powierzchniowej. Dlatego też w dalekosiężnej komunikacji na falach długich wykorzystuje się falę jonosferyczną.

W zakresie fal długich w najniższej warstwie jonosfery liczba zderzeń znacznie przewyższa pulsację fali

$$\nu \gg \omega \quad (\nu \approx 10^7 \text{ 1/s})$$

W związku z tym nie możemy stosować teorii wyprowadzonej w poprzednim rozdziale. Ponadto, ze względu na bardzo dużą długość fali, zawodzi również przybliżenie optyki geometrycznej. Jednak wyniki eksperymentów oraz ekstrapolacja rozważań teoretycznych dla większych częstotliwości pozwalają uważać, że fale długie rozchodzą się jak gdyby w kulistym falowodzie z tłumieniem, ulegając kolejnym odbiciom od ziemi i od dolnej granicy jonosfery (obszar *D* w ciągu dnia i obszar *E* w nocy; rys. 16-1).

Matematyczne wyprowadzenie wzorów określających natężenia pola fal długich zależnie od odległości od nadajnika jest trudne ze względu na brak możliwości ścisłego sprecyzowania warunków rozchodzenia się fali na granicy między stratosferą i jonosferą. Do obliczeń praktycznych posługujemy się wzorami półempirycznymi Austina [14].

Natężenie pola fal długich (E_{sk} w V/m) w odległości R kilometrów od anteny promieniującej moc P kilowatów wyraża się wzorem

$$E_{sk} = \frac{300 \sqrt{P}}{R} \sqrt{\frac{\Theta}{\sin \Theta}} e^{-\frac{0,0014}{\lambda^{0,6}} R} \quad (16-1)$$

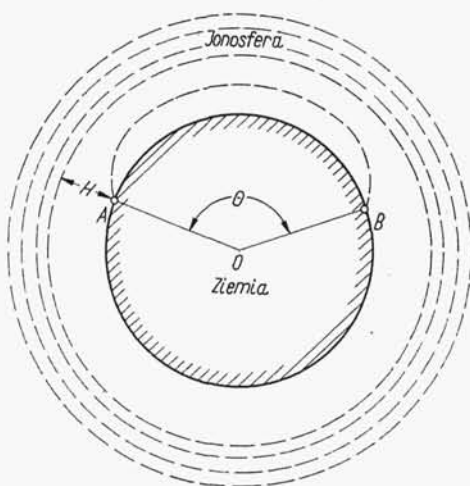
przy czym: Θ — kąt oznaczony na rys. 6-1;

λ — długość fali [km].

Gdy jest znana wysokość skuteczna anteny h_{sk} (w metrach) i wartość skuteczna prądu u podstawy anteny I_A (w amperach), wówczas wzór (16-1) przyjmuje postać

$$E_{sk} = \frac{120\pi h_{sk} I_A}{\lambda R} \sqrt{\frac{\Theta}{\sin \Theta}} e^{-\frac{0,0014}{\lambda^{0,6}} R} \quad (16-2)$$

Według Waita [69] pole w zakresie fal długich jest sumą kilku składowych, wynikających z kilku modów propagacji fali w falowodzie Ziemia—jonosfera. W związku z tym natężenie pola nie maleje monotonicznie, jak to wynika ze wzoru Austina, ale wykazuje maksima i minima. Obecność maksimów i minimów w rozkładzie pola została potwierdzona doświadczalnie.



Rys. 16-1. Rozchodzenie się fal długich w falowodzie kulistym

Warunki propagacji fal długich ulegają małym i powolnym zmianom w czasie. Jest to duża zaleta radiokomunikacji długofalowej. Tłumienie fal długich wprowadzone przez jonosferę podlega wahaniom dobowym, sezonowym i rocznym. Także jedenastoletni okres aktywności słonecznej zmienia warunki rozchodzenia się fal długich.

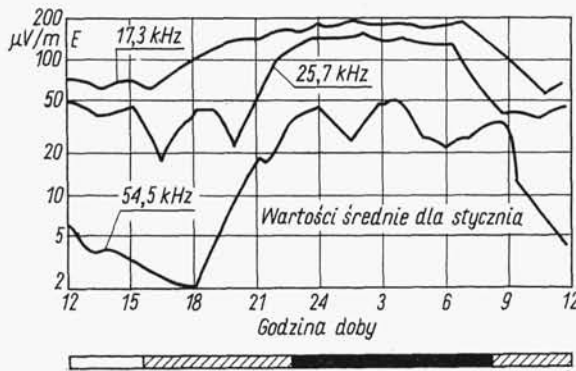
Typowy przebieg natężenia pola w ciągu doby pokazano na rys. 16-2. Wykres ten odnosi się do dużych odległości od nadajnika. Jak widać, natężenie pola wzrasta w nocy, co wynika z faktu, że tłumienie wnoszone przez obszar E jonosfery jest mniejsze niż tłumienie wnoszone przez obszar D .

Ze względu na stosowanie fal długich i bardzo długich w radiowej służbie czasu i częstotliwości wzorcowych oraz w pewnych systemach nawigacyjnych, duże znaczenie mają zmiany czasu przejścia sygnałów, towarzyszące propagacji tego zakresu fal. Na rys. 16-3 przedstawiono, dla przykładu, dobowe zmiany czasu przejścia sygnału o częstotliwości 16 kHz na trasie Rugby (Anglia) — Cambridge Massa-

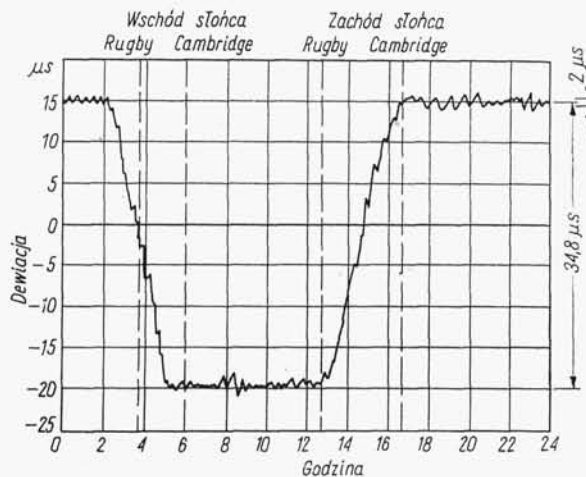
chusetts (USA). Długość trasy wynosi 5200 km. Występujące zmiany można podzielić na dwie grupy:

- małe, przypadkowe fluktuacje czasu przejścia o standardowym odchyleniu około $2 \mu\text{s}$;
- znacznie większe zmiany czasu przejścia (ok. $34 \mu\text{s}$), mające charakter quasi-okresowy.

Zmiany drugiego rodzaju są związane z porą dnia, a dokładniej mówiąc, z obecnością strefy światłocienia na drodze między stacją nadawczą a odbiorczą.



Rys. 16-2. Przebieg dobowy natężenia pola fal długich dla częstotliwości roboczych 17,3 kHz; 25,7 kHz oraz 54,5 kHz. Odległość od nadajnika 5000 km. Pasek pod rysunkiem oznacza: biały — dzień, czarny — noc, zakresowany — półmrok (według S. Hahn: Podstawy radiokomunikacji, WKŁ, Warszawa 1964)

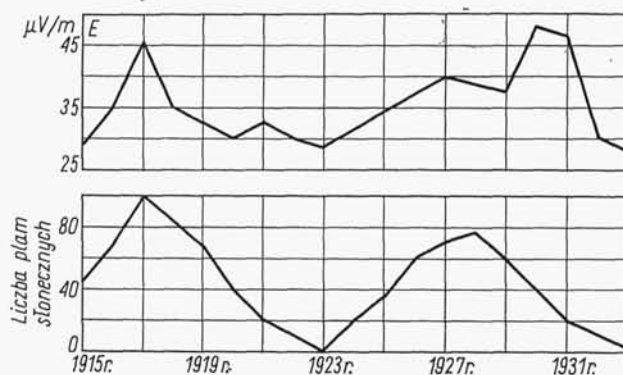


Rys. 16-3. Zmiany czasu przejścia sygnału 16 kHz na trasie Rugby (Anglia) — Cambridge Massachusetts (USA) (według S. Hahn: Współczesna służba czasu i częstotliwości wzorcowych, WKŁ, Warszawa 1964)

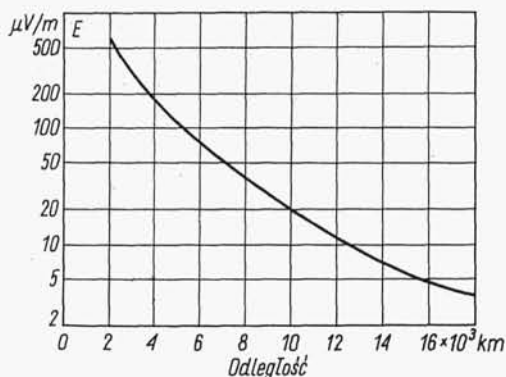
Wartość zmian czasu propagacji jest niezależna od pory roku z wyjątkiem zależności pośredniej, związanej ze zmianą długości dnia.

Średnie wahania roczne natężenia pola fal długich są rzędu 20...50%, przy czym w dzień natężenie pola jest większe latem, a w nocy — zimą.

Wpływ jedenastoletniego okresu aktywności słonecznej na rozchodzenie się fal długich jest nieznaczny (rys. 16-4). W latach zwiększonej aktywności słonecznej



Rys. 16-4. Dane uwidoczniające korelację między liczbą plam słonecznych a natężeniem pola fal długich (według S. Hahn: Podstawy radiokomunikacji, WKŁ, Warszawa 1964)



Rys. 16-5. Zależność natężenia pola od odległości obliczona na podstawie wzoru Austina; $P = 40 \text{ kW}$, $\lambda = 18 \text{ km}$

natężenie pola wzrasta. Jest to spowodowane zmniejszeniem tłumienia w obszarze D , a więc poprawa następuje głównie w porze dziennej.

Długość fali w zakresie fal bardzo długich jest porównywalna z wysokością najniższej warstwy jonosferycznej. W związku z tym mówienie o fali powierzchniowej i fali jonosferycznej traci sens. Tym bardziej możemy więc przyjąć falowodowy mechanizm rozchodzenia się fal bardzo długich. Fale bardzo długie rozchodzą się zatem wokół Ziemi z nieznacznym tłumieniem. Między innymi z tego powodu fale bardzo długie są wykorzystywane w nowoczesnej nawigacji.

Przykład liczbowy. Wyznamy natężenie pola wytwarzanego w odległości $R = 4000$ km przez nadajnik o mocy 500 kW pracujący przy częstotliwości 16,67 kHz. Sprawność anteny przyjmijmy równą 8%.

Moc promieniowana, przy uwzględnieniu sprawności anteny

$$P = 0,08 \cdot 500 = 40 \text{ kW}$$

Kąt Θ obliczymy jako stosunek odległości R mierzonej wzdłuż powierzchni Ziemi do promienia kuli ziemskiej

$$\Theta = \frac{R}{a} = \frac{4000}{6370} = 0,629 \text{ rad} = 36^\circ$$

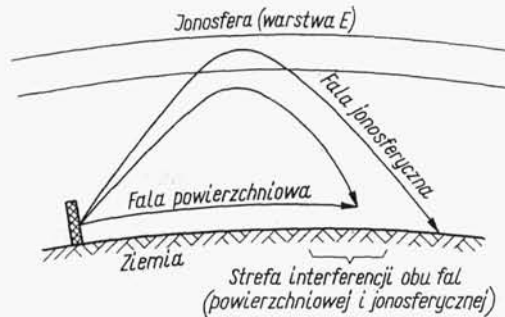
Częstotliwości 16,67 kHz odpowiada fala $\lambda = 18$ km. Wstawiając powyższe wartości do wzoru (15-1) znajdujemy

$$E_{sk} = \frac{300 \sqrt{40}}{4000} \sqrt{\frac{0,628}{\sin 36^\circ}} e^{-\frac{0,0014}{180,6} 4000} = 183 \text{ } \mu\text{V/m}$$

Postępując analogicznie dla innych wartości R wyznaczmy zależność natężenia pola od odległości (rys. 16-5).

16.2. ROZCHODZENIE SIĘ FAL ŚREDNICH

Fale średnie obejmują zakres częstotliwości od 100 kHz do 1,5 MHz (3000... 200 m). Fale te — ze względu na szerokie zastosowanie w radiofonii — noszą również nazwę fal radiofonicznych. Jeśli nadajnik i odbiornik znajdują się na powierzchni ziemi, to w przypadku ogólnym, w zakresie fal średnich, do anteny odbiorczej dociera fala powierzchniowa, jak również fala jonosferyczna (rys. 16-6).



Rys. 16-6. Fala powierzchniowa i fala jonosferyczna przy rozchodzeniu się fal średnich

Gęstość elektronowa obszaru D jonosfery nie jest wystarczająca do odbicia fal średnich, które wnikają do jonosfery i są odbijane przez warstwę E . Jednakże w ciągu dnia współczynnik absorpcji dolnego obszaru jonosfery jest dla fal średnich tak duży, że — praktycznie biorąc — fala jonosferyczna nie występuje. W tych warunkach o zasięgu dziennym na falach średnich decyduje natężenie pola fali powierzchniowej. Metody obliczania natężenia pola fali powierzchniowej poznaliśmy w p. 12.5 i 12.6.