

W szczególności, jeśli $\varepsilon_{r2} \ll 60\lambda_0\sigma_2$, wyrażenie na kąt refrakcji brzegowej przyjmuje prostą postać

$$\alpha = \frac{\operatorname{tg} \Theta}{2\pi \sqrt{60\sigma R_2}} \quad (12-70)$$

Dla przykładu obliczymy błąd pomiaru kierunku przychodzenia fali padającej na linię brzegową pod kątem 30° w przypadku, gdy radionamiernik znajduje się w odległości 150 m od brzegu morza, a konduktywność ziemi wynosi 0,001 S/m. Wstawiając odpowiednie wartości do wzoru (12-70) otrzymujemy

$$\alpha = \frac{\operatorname{tg} 30^\circ}{2\pi \sqrt{60 \cdot 0,001 \cdot 150}} = 0,0306 \text{ rad} = 1,75^\circ$$

Ze wzoru (12-70) wynika, że kąt refrakcji maleje ze wzrostem odległości anteny odbiorczej od brzegu morza oraz ze zmniejszeniem kąta padania. Wartość kąta refrakcji na ogół nie przekracza kilku stopni.

12.6. ROZCHODZENIE SIĘ FALI PRZYZIEMNEJ NAD KULISTĄ POWIERZCHNIĄ JEDNORODNEJ ZIEMI

W dotychczasowych rozważaniach nie uwzględnialiśmy krzywizny ziemi i dlatego wzory Wwiedenskiego (12-32) i Szulejkina–van der Pola (12-52) mogą być stosowane tylko przy niezbyt dużych odległościach między antenami.

Uwzględnienie kulistości ziemi w przypadku anten podniesionych jest proste, gdy anteny znajdują się w *obszarze bezpośredniej widoczności*. Wzór Wwiedenskiego możemy stosować w tym obszarze, jeżeli w miejsce rzeczywistych wysokości zawieszenia anten wprowadzimy *wysokości sprowadzone* H'_1 i H'_2 , odniesione do płaszczyzny stycznej do powierzchni ziemi w punkcie, w którym następuje odbicie fali (rys. 12-17).

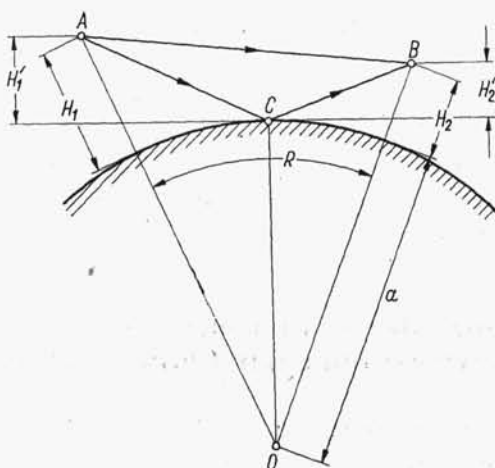
Z prostych zależności geometrycznych łatwo wyznaczyć granicę bezpośredniej widoczności anten

$$R_0 = \sqrt{2a} (\sqrt{H'_1} + \sqrt{H'_2}) \quad (12-71)$$

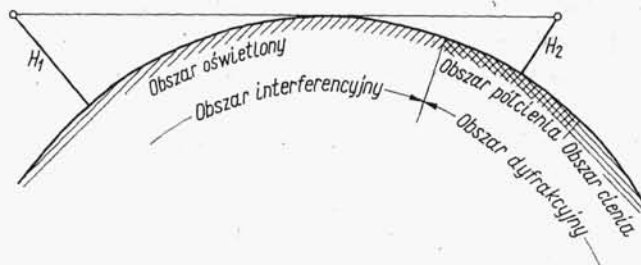
przy czym a — promień kuli ziemskiej.

Gdy odległość między antenami jest równa długości strefy bezpośredniej widoczności, wysokości sprowadzone stają się równe zero i według wzoru Wwiedenskiego pole w miejscu odbioru znika. Rezultat ten jest sprzeczny z doświadczeniem, które wykazuje, że pole istnieje nie tylko na granicy strefy widoczności, lecz i znacznie dalej. W praktyce przyjmuje się, że wzór Wwiedenskiego można stosować dla odległości mniejszych od $0,7R_0$. Obszar stosowalności wzoru Wwiedenskiego nazywamy *obszarem interferencyjnym*. W tym obszarze pole w miejscu odbioru można uważać za wynik interferencji fali bezpośredniej i fali odbitej od powierzchni ziemi. Zwiększając odległość między antenami przechodzimy z obszaru interferencyjnego do *obszaru*

dyfrakcyjnego, w którym pole nie może już być przedstawione w postaci sumy pól dwóch fal. Pojęcie obszaru dyfrakcyjnego jest szersze niż pojęcie *obszaru cienia*, obejmuje ono bowiem zarówno oszar cienia jak i *półcienia* (rys. 12-18). Obliczenie natężenia pola w obszarze dyfrakcyjnym jest zadaniem zbyt skomplikowanym i obszernym, abyśmy mogli je tutaj rozważać. Klasyczne rozwiązanie zagadnienia dyfrakcji fal radiowych wokół półprzewodzącej i kulistej powierzchni ziemi polega

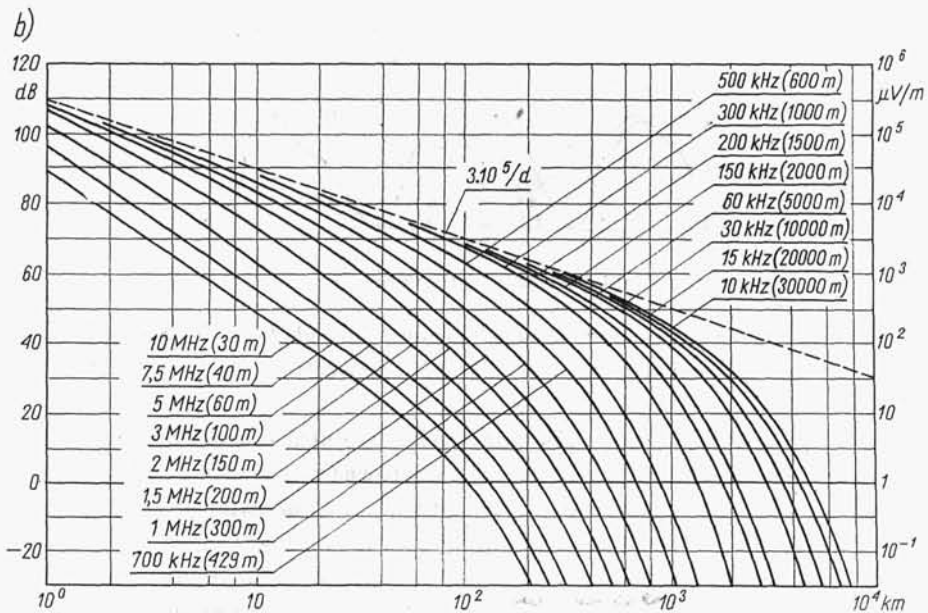
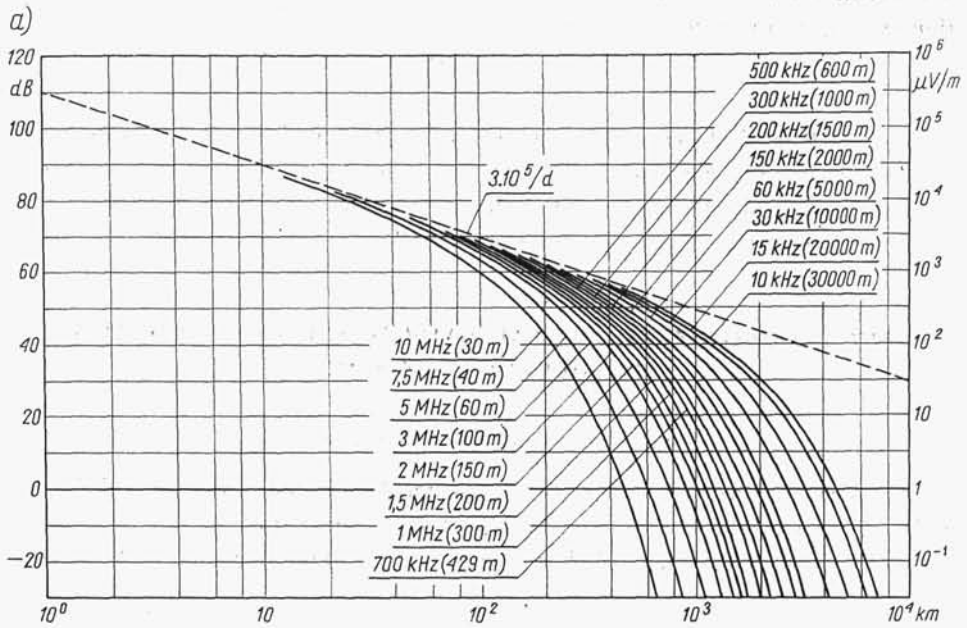


Rys. 12-17. Wysokości sprowadzone zawieszenia anten przy rozchodzeniu się fal radiowych nad ziemią kulistą w zakresie bezpośredniej widoczności



Rys. 12-18. Podział trasy propagacji fal radiowych nad ziemią kulistą

na rozwiązaniu równań Maxwella dla ziemi i otaczającej ją przestrzeni. Rozwiązanie takie powinno spełniać warunki brzegowe i mieć osłabiłość w miejscu umieszczenia anteny nadawczej. Prowadzi ono niestety do bardzo wolno zbieżnego szeregu zbudowanego z funkcji Legendre'a, Hankela i Bessela. W różny sposób można przyspieszyć zbieżność tego szeregu. Do najciekawszych należą prace van der Pola, Bremmera i Foka [16, 43]. Na podstawie tych prac przygotowano krzywe ułatwiające obliczenia inżynierskie. Krzywe te, zwane *krzywymi propagacji CCIR* [9], dotyczą przypadku



Rys. 12-19. Krzywe CCIR propagacji fali powierzchniowej: a) $\sigma = 4 \text{ S/m}$, $\epsilon_r = 80$; b) $\sigma = 0,01 \text{ S/m}$, $\epsilon_r = 4$ (według Zalecenia nr 368 CCIR, Oslo 1966)

anten umieszczonych na powierzchni ziemi. Są one odniesione do wartości pola nie tłumionego, wynoszącej (w $\mu\text{V/m}$)

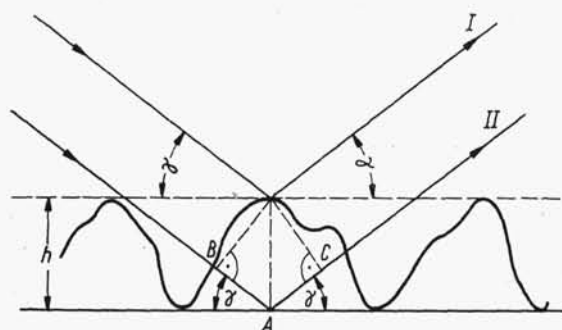
$$E_0 = \frac{3 \cdot 10^5}{R}$$

przy czym R jest odległością (w km) między punktami nadawania i odbioru. Wartość ta odpowiada natężeniu pola wytwarzanemu przez krótką pionową antenę umieszczoną na powierzchni ziemi doskonale przewodzącej i promieniującą moc 1 kW. Dwa przykłady krzywych propagacji CCIR przedstawiono na rys. 12-19.

12.7. ROZCHODZENIE SIĘ FAL RADIOWYCH NAD NIERÓWNĄ POWIERZCHNIĄ ZIEMI

12.7.1. KRYTERIUM RAYLEIGHA

Nierówność powierzchni ziemi w odniesieniu do rozchodzących się nad nią fal radiowych ma charakter względny. Decyduje tutaj stosunek długości fali do wysokości nierówności. Podczas gdy okolica pagórkowata ze wzniesieniami rzędu kilkuset



Rys. 12-20. Odbicie fali od nierównej powierzchni

metrów przedstawia dla fal bardzo długich powierzchnię gładką, to równe pole pokryte trawą o wysokości 10 cm jest dla fal centymetrowych powierzchnią nierówną.

Do oceny stopnia nierówności powierzchni stosujemy zapożyczone z optyki kryterium Rayleigha. Wyobraźmy sobie, że na nierówną powierzchnię pada pod kątem wzniesienia γ fala płaska i postarajmy się odpowiedzieć na pytanie: przy jakiej wysokości nierówności zaczyna znikać lustrzany charakter odbicia i pojawia się rozproszenie? Dla ułatwienia założmy, że wszystkie nierówności mają jednakową wysokość. Na rys. 12-20 linia ciągła przedstawia płaszczyznę będącą dolną granicą nierówności, a linia przerywana — płaszczyznę stanowiącą górną granicę nierówności.

W powstawaniu fali odbitej bierze udział zarówno górna jak i dolna płaszczyzna. Fala odbita od dolnej płaszczyzny przechodzi dodatkową drogę $BAC = 2h \sin \gamma$,