

różni się znacznie od prędkości światła w próżni. Długość fali w ośrodku półprzewodzącym λ ulega więc istotnemu skróceniu w stosunku do długości fali w swobodnej przestrzeni

$$\lambda = \sqrt{\frac{\lambda_0}{30\sigma}} \quad (12-17)$$

Na przykład przy częstotliwości 150 kHz ($\lambda_0 = 2000$ m) długość fali w suchej glebie ($\sigma = 0,001$ S/m) wynosi 258 m, a w wodzie morskiej ($\sigma = 4$ S/m) — tylko 4,1 m.

Jednocześnie fala ulega silnemu tłumieniu. O stopniu tłumienia świadczy *głębokość wnikania fali*, tj. głębokość, na której amplituda fali maleje e-krotnie w stosunku do amplitudy na powierzchni ośrodka półprzewodzącego. Głębokość wnikania jest oczywiście równa odwrotności współczynnika tłumienia

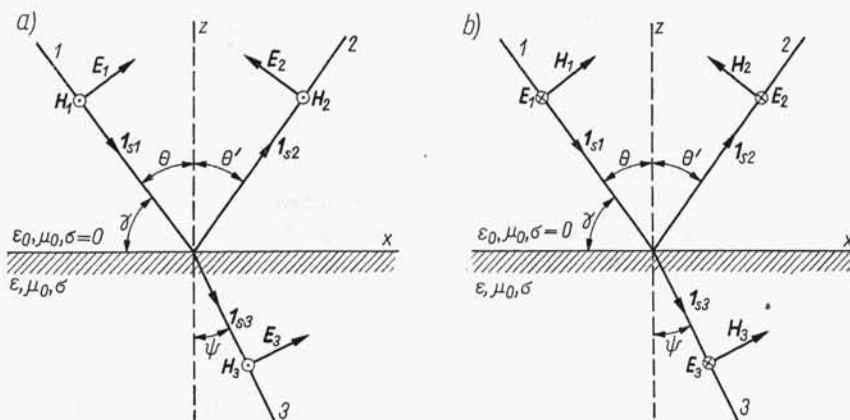
$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda_0}{30\sigma}} \quad (12-18)$$

W podanym wyżej przykładzie głębokości wnikania są równe odpowiednio: 41,2 m oraz 0,65 m.

12.3. ODBICIE FAŁ RADIOWYCH OD POWIERZCHNI ZIEMI

Przy studiach nad rozchodzeniem się fal krótkich i ultrakrótkich często spotykamy się ze zjawiskiem odbicia się fal od powierzchni ziemi. Interesujący nas problem można sformułować w następujący sposób: na płaską granicę między powietrzem a półprzewodnikiem pada pod kątem θ jednorodna fala płaska o polaryzacji pionowej lub poziomej.

Przez pojęcie fali spolaryzowanej pionowo będziemy w tym przypadku rozumieli falę, której wektor pola elektrycznego leży w płaszczyźnie padania (tj. w płaszczyźnie pionowej, rys. 12-2a); natomiast wektor pola elektrycznego fali spolaryzowanej



Rys. 12-2. Odbicie i załamanie fali na granicy dwóch ośrodków: a) fala spolaryzowana pionowo; b) fala spolaryzowana poziomo

poziomo jest prostopadły do płaszczyzny padania (rys. 12-2b), tzn. jest równoległy do płaszczyzny granicznej. Przy dowolnej polaryzacji fali padającej można ją rozłożyć na składowe o polaryzacji pionowej i poziomej.

Promień 1 padający na granicę ośrodków (płaszczyzna xy) rozszczepia się na promienie: odbity 2 i załamany 3, które tworzą z normalną do granicy ośrodków (oś z) kąty Θ' i Ψ . Z warunku ciągłości składowych stycznych pola na powierzchni granicznej wynika, że:

1. Wektory jednostkowe I_{s1} , I_{s2} i I_{s3} określające kierunek ruchu fali padającej odbitej i załamanej muszą spełniać następujące równości:

$$k_0 I_x \cdot I_{s1} = k_0 I_x \cdot I_{s2} = k I_x \cdot I_{s3} \quad (12-19)$$

2. Współczynnik odbicia będący stosunkiem natężenia pola fali odbitej do natężenia pola fali padającej wyraża się wzorem:
dla polaryzacji pionowej

$$R_V = \frac{\epsilon'_r \sin \gamma - \sqrt{\epsilon'_r - \cos^2 \gamma}}{\epsilon'_r \sin \gamma + \sqrt{\epsilon'_r - \cos^2 \gamma}} \quad (12-20)$$

dla polaryzacji poziomej

$$R_H = \frac{\sin \gamma - \sqrt{\epsilon'_r - \cos^2 \gamma}}{\sin \gamma + \sqrt{\epsilon'_r - \cos^2 \gamma}} \quad (12-21)$$

przy czym γ jest dopełnieniem kąta padania.

Z równości (12-19) wynika, że kąt padania równa się kątowi odbicia. Ponadto, ponieważ k jest liczbą zespoloną, równość ta może być spełniona tylko wówczas, gdy przyjmiemy, że wektor jednostkowy I_{s3} jest zespolony. Założenie takie wpływa w sposób istotny na strukturę fali przechodzącej. Podstawiając

$$k I_{s3} = u - jv \quad (12-22)$$

przy czym u oraz v są wektorami rzeczywistymi, widzimy, że fala przechodząca jest scharakteryzowana przez czynniki wykładnicze

$$e^{-r \cdot u} e^{-r \cdot v}$$

przy czym $r = I_x x + I_z z$.

Płaszczyzny $r \cdot u = \text{const}$ są płaszczyznami ekwifazowymi, natomiast płaszczyzny $r \cdot v = \text{const}$ — płaszczyznami ekwiampplitudowymi. Wykażemy, że wektory u oraz v nie są równoległe, zatem płaszczyzny ekwifazowe i ekwiampplitudowe nie pokrywają się. Falę o takiej strukturze nazywamy *niejednorodną falą płaską*.

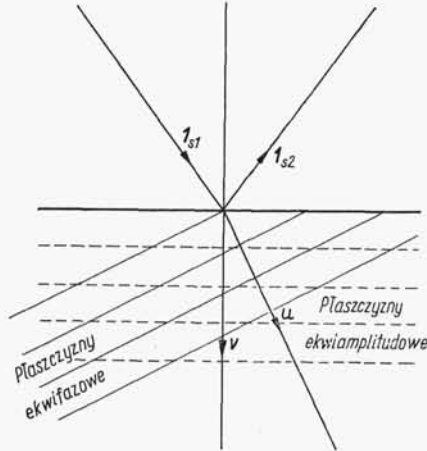
Równość (12-19) przy uwzględnieniu zależności (12-22) wyraża się przez

$$\begin{aligned} k_0 I_x \cdot I_{s1} &= I_x \cdot u \\ I_x \cdot v &= 0 \end{aligned} \quad (12-23)$$

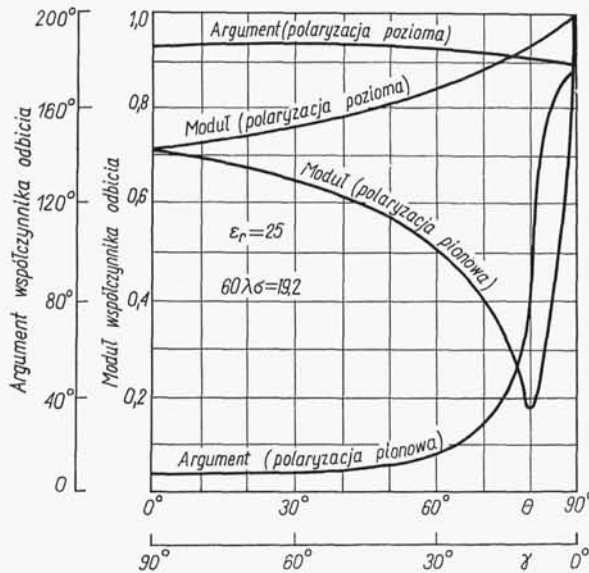
Ze wzoru (12-23) wynika, że wektor v jest prostopadły do płaszczyzny granicznej, tzn. że płaszczyzny ekwiampplitudowe są równoległe do płaszczyzny xy (rys. 12-3). Rezultat ten jest zupełnie naturalny, gdyż w miarę zagłębiania się fali załamanej

w ziemię, natężenie pola powinno maleć ze wzrostem głębokości, niezależnie od współrzędnej x .

Przeanalizujemy teraz dokładniej wyrażenia na współczynniki odbicia. Szczególnie ważny w zagadnieniach propagacyjnych jest przypadek małych kątów γ . Łatwo



Rys. 12-3. Struktura fali załamanej w ziemi



Rys. 12-4. Przykładowy przebieg modułu i argumentu współczynnika odbicia w funkcji kąta padania

zauważyć, że dla γ dążącego do zera współczynnik odbicia dąży do wartości -1 zarówno przy polaryzacji pionowej jak i poziomej. Dla dostatecznie małych kątów γ można więc przyjmować $R_V \approx -1$ oraz $R_H \approx -1$, przy czym dla polaryzacji poziomej przybliżenie to obowiązuje dla szerszego zakresu kątów.

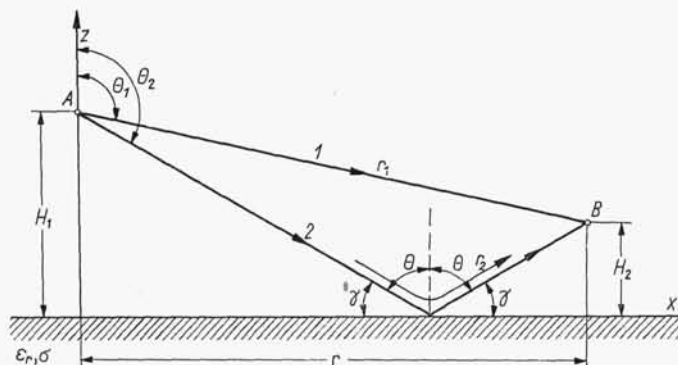
Jeśli konduktywność drugiego ośrodka jest równa zeru, to dla kąta $\gamma = \gamma_0$ określonego wzorem

$$\gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon_r}} \quad (12-24)$$

licznik wyrażenia (12-20) staje się równy zeru. Oznacza to, że cała energia fali padającej przechodzi do drugiego ośrodka, a promień odbity znika. Kąt γ_0 nazywamy *kątem Brewstera*. Jeśli konduktywność drugiego ośrodka jest różna od zera, to moduł współczynnika odbicia przy pewnej wartości γ_0 osiąga minimum tym głębsze, im mniejsza jest konduktywność ziemi. W przypadku polaryzacji poziomej współczynnik odbicia jest zawsze różny od zera. Przykładowy przebieg modułu i argumentu współczynnika odbicia w funkcji γ pokazano na rys. 12-4.

12.4. ROZCHODZENIE SIĘ FAL RADIOWYCH NAD PŁASKĄ POWIERZCHNIĄ ZIEMI PRZY PODNIESIONEJ ANTENIE NADAWCZEJ I ODBIORCZEJ

W ogólnym przypadku określenie pola w miejscu odbioru polega na znalezieniu rozwiązania równań Maxwella spełniającego odpowiednie warunki brzegowe. Zadanie to można znacznie uprościć, jeśli zarówno antena nadawcza jak i antena



Rys. 12-5. Rozchodzenie się fal radiowych nad płaską ziemią przy podniesionych antenach

odbiorcza są podniesione. Przez *antnę podniesioną* rozumiemy przy tym antnę umieszczoną na wysokości przynajmniej kilkakrotnie przewyższającej długość fali i zasilaną niepromieniującym torem. Z antenami podniesionymi mamy do czynienia w zakresie fal krótkich i ultrakrótkich.

W przypadku anten podniesionych możemy pole w miejscu odbioru uważać za wynik interferencji fali bezpośredniej i fali odbitej od powierzchni ziemi (rys. 12-5). Pole elektryczne fali bezpośredniej jest określone zależnością