

W warunkach *superrefrakcji* trajektorie fal radiowych są nadal zwrócone wypukłością do góry, jednakże ich promień krzywizny jest mniejszy od promienia ziemi, w wyniku czego promienie wychodzące pod niewielkimi kątami wzniesienia ulegają w troposferze całkowitemu wewnętrznemu odbiciu i w pewnej odległości od nadajnika powracają na powierzchnię ziemi.

*Słaba refrakcja* zachodzi w warunkach pośrednich między brakiem refrakcji a refrakcją normalną. *Silna refrakcja* zachodzi w warunkach pośrednich między refrakcją normalną a krytyczną.

W tablicy 13-1 podano wartości gradientu wskaźnika refrakcji, promienia krzywizny trajektorii fali oraz zastępczego promienia ziemi dla wymienionych rodzajów refrakcji troposferycznej. Przedstawiono również rzeczywiste trajektorie fal radiowych rozchodzących się nad powierzchnią ziemi oraz trajektorie równoważne nad ziemią o zastępczym promieniu. Przy refrakcji ujemnej zastępczy promień ziemi jest mniejszy od promienia rzeczywistego. Przy refrakcji krytycznej promień równoważny staje się nieskończenie wielki, natomiast przy superfrakcji — przyjmuje wartość ujemną. W tym ostatnim przypadku zastępcza ziemia staje się wklęsła, tak że prostoliniowy promień odbijając się wielokrotnie od wklęsłej powierzchni może dotrzeć do odległych punktów.

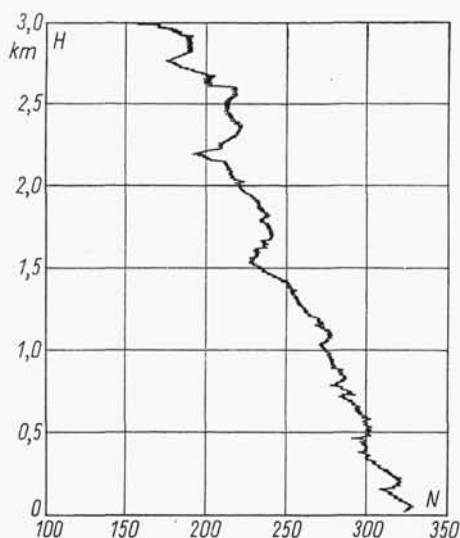
### 13.6. ROZPRASZANIE FAL RADIOWYCH W TROPOSFERZE

Wiele znanych od dawna faktów, takich jak migotanie gwiazd, drganie przedmiotów oglądanych przez przylegającą do nagrzanej powierzchni ziemi warstwę powietrza, kłębianie się dymu nad wysokimi kominami fabrycznymi, a także późniejsze obserwacje śladów kondensacji spalin pozostawionych przez wysoko lecące samoloty, wskazują na istnienie w troposferze chaotycznych turbulencyjnych ruchów mas powietrza. Ruchy te mają wpływ na lokalną wartość współczynnika załamania, tak że wykres zależności wskaźnika refrakcji od wysokości (tzw. *profil wskaźnika refrakcji*) wykazuje charakterystyczne „zębki” (rys. 13-2).

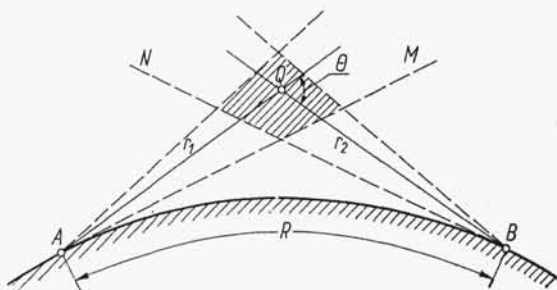
Fluktuacje współczynnika załamania są powodem rozpraszania fal radiowych w troposferze, dzięki czemu istnieje możliwość zrealizowania dalekosiężnej łączności radiowej na falach ultrakrótkich [13, 31, 32].

Istnienie pola, powstałego wskutek rozpraszania w troposferze, daleko poza horyzontem można wyjaśnić w następujący sposób. Przypuśćmy, że anteny stacji nadawczej i odbiorczej są umieszczone w pobliżu powierzchni ziemi w punktach *A* i *B* (rys. 13-3). Oczywiście jest, że wszystkie punkty położone nad stycznymi *AM* i *BN* są jednocześnie widoczne z obu stacji. Oznaczmy przez *V* tę część troposfery, która jest widoczna jednocześnie z punktów *A* i *B* i która uczestniczy w procesie powstawania pola rozproszonego. Górna granica obszaru uczestniczącego w procesie powstawania pola rozproszonego jest określona przez właściwości kierunkowe użytych anten. Każdy element objętości wewnątrz obszaru *V* oświetlony przez antenę

nadawcą staje się źródłem promieniowania wtórnego oddziaływającego z kolei na antenę odbiorczą. Energia odebrana przez antenę odbiorczą jest wynikiem sumarycznego działania wszystkich źródeł wtórnych znajdujących się w obszarze  $V$ .



Rys. 13-2. Profil wskaźnika refrakcji zmierzony za pomocą refraktometru. Na wykresie jest widoczna struktura drobnych, losowych zmian wskaźnika refrakcji



Rys. 13-3. Powstawanie promieniowania-rozproszonego

Obierzmy punkt  $Q$  wewnątrz obszaru  $V$ . Gęstość strumienia mocy w tym punkcie jest określona zależnością

$$S_Q = \frac{P_m}{4\pi r_1^2} \quad (13-28)$$

przy czym:

$P_m$  — zastępcza moc promieniowana w kierunku punktu  $Q$ ;

$r_1$  — odległość od anteny nadawczej do punktu  $Q$ .

Jeśli przez  $\sigma(\theta)$  oznaczmy *skuteczną powierzchnię rozpraszającą* w kierunku anteny odbiorczej elementu objętości troposfery  $dV$  ze środkiem w punkcie  $Q$ , to gęstość strumienia mocy wytwarzanego przez ten element w punkcie  $B$

$$dS_B = \frac{P_m \sigma(\theta)}{(4\pi r_1 r_2)^2} dV \quad (13-29)$$

przy czym  $r_2$  — odległość punktu  $Q$  od anteny odbiorczej.

Moc dostarczona antenie odbiorczej przez element objętości w punkcie  $Q$  znajdziemy mnożąc gęstość strumienia mocy  $dS_B$  przez powierzchnię skuteczną anteny odbiorczej  $A_2$

$$dP_2 = \frac{P_m A_2 \sigma(\theta)}{(4\pi r_1 r_2)^2} dV \quad (13-30)$$

Dla wyznaczenia mocy dostarczonej przez cały obszar  $V$  należy otrzymane wyrażenie scałkować. Jeśli jednak kierunkowość obu anten jest duża, a w praktyce mamy do czynienia tylko z takimi przypadkami, to rozmiary obszaru  $V$  są na tyle małe, że możemy dla wszystkich punktów  $Q$  przyjąć  $r_1 \approx r_2 \approx R/2$  oraz założyć stałość skutecznej powierzchni rozpraszającej  $\sigma(\theta)$ . Ponadto, zastępcza moc promieniowana przez antenę nadawczą jest w przybliżeniu stała dla całego obszaru  $V$  i równa iloczynowi mocy nadajnika  $P_N$  przez zysk energetyczny anteny nadawczej  $G_1$ . Podobnie możemy założyć stałość skutecznej powierzchni anteny odbiorczej. Uwzględniając powyższe założenia i wyrażając powierzchnię skuteczną anteny odbiorczej przez jej zysk energetyczny  $G_2$ , otrzymujemy następujące wyrażenie na moc doprowadzaną do dopasowanego odbiornika:

$$P_2 = \frac{P_N G_1 G_2 \lambda^2 V \sigma(\theta)}{4\pi^3 R^4} \quad (13-31)$$

Gdyby fale radiowe rozchodziły się w swobodnej przestrzeni, wówczas w odległości  $R$  (odległość między nadajnikiem a odbiornikiem mierzona wzdłuż powierzchni ziemi, rys. 13-3) przy właściwej orientacji anten, moc doprowadzona do odbiornika byłaby równa

$$P_{o2} = \frac{P_N G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2} \quad (13-32)$$

Korzystając z pojęcia współczynnika osłabienia  $W$  możemy moc doprowadzoną do odbiornika w warunkach rozpraszania troposferycznego zapisać w postaci

$$P_2 = P_{o2} W^2 \quad (13-33)$$

Porównując wyrażenie (13-33) i (13-31) oraz korzystając ze wzoru (13-32) otrzymujemy następujące wyrażenie na współczynnik osłabienia przy rozpraszaniu fal radiowych w troposferze:

$$W = \frac{2}{R} \sqrt{\frac{V \sigma(\theta)}{\pi}} \quad (13-34)$$

Według Villarsa i Weisskopfa [32] skuteczna powierzchnia rozpraszająca wyraża się zależnością

$$\sigma(\theta) \approx \frac{4\pi^2\lambda}{\theta^5} \left( \overline{\frac{dN}{dH}} - \frac{dN}{dH} \right)^2 \quad (13-35)$$

Objętość obszaru uczestniczącego w powstawaniu promieniowania rozproszonego przy założeniu, że obie anteny są jednakowe, można wyznaczyć z prostych zależności geometrycznych

$$V \approx \frac{1}{8} a R^2 \alpha_V^2 \alpha_H \quad (13-36)$$

przy czym  $\alpha_V$  i  $\alpha_H$  są kątami połowy mocy odpowiednio w płaszczyźnie pionowej i poziomej.

Rozpraszaniu fal ultrakrótkich w troposferze towarzyszą wahania poziomu sygnałów (fluktuacje). Obserwuje się zarówno wahania szybkie (trwające minuty, sekundy i ułamki sekund) jak i wahania powolne (godzinowe, dobowe, miesięczne). Przyczyną powolnych wahań natężenia pola są regularne (dobowe i sezonowe) oraz przypadkowe zmiany warunków meteorologicznych, a w szczególności zmiany średniego gradientu współczynnika załamania i intensywności procesów turbulentnych w troposferze.

Występowanie fluktuacji zmusza do stosowania metod statystycznych do opisu warunków odbioru sygnałów przy rozpraszaniu fal w troposferze. Doświadczalnie stwierdzono, że powolne zmiany natężenia pola dają się najlepiej opisać za pomocą rozkładu logarytmicznie normalnego, natomiast szybkie zmiany są podporządkowane rozkładowi Rayleigha.

Związek statystyczny między fluktuacjami natężenia pola w dwóch różnych punktach przestrzeni opisuje się za pomocą *przestrzennej funkcji korelacji*  $\rho(R)$ . Fluktuacje obserwowane w dostatecznie odległych punktach są statystycznie niezależne, ponieważ fale rozproszone dochodzące do tych punktów powstają w różnych obszarach troposfery, w których losowe zmiany współczynnika załamania nie są statystycznie powiązane. Przestrzenna funkcja korelacji jest więc malejącą funkcją odległości. Fluktuacje uważa się za statystycznie niezależne, gdy przestrzenna funkcja korelacji maleje do wartości  $1/e \approx 0,37$ ; odpowiadającą tej wartości odległość  $R_m$  nazywamy *promieniem przestrzennej korelacji fluktuacji*. Na ogół promień przestrzennej korelacji fluktuacji nie przekracza kilkudziesięciu długości fali.

Właściwość braku przestrzennej korelacji fluktuacji już przy odległościach rzędu kilkudziesięciu długości fali wykorzystuje się do poprawienia warunków odbioru sygnałów radiowych (*odbiór zbiorczy*) [58]. Jeśli do odbioru stosuje się dwie anteny rozstawione na odległość większą od promienia przestrzennej korelacji fluktuacji, to wahania sygnału w każdej antenie są statystycznie niezależne. Oznaczmy przez  $p(E)$  prawdopodobieństwo tego, że natężenie pola przy antenie spada poniżej wartości  $E$ . Prawdopodobieństwo spadku natężenia pola poniżej wartości  $E$  jedno-

cznie w obu antenach jest równe  $p^2(E)$ , jest więc znacznie mniejsze niż dla pojedynczej anteny (szczególnie gdy  $p(E) \ll 1$ ).

Obserwując fluktuację dwóch sygnałów o różnych częstotliwościach stwierdzamy, że przy dostatecznie dużej różnicy częstotliwości sygnałów  $\Delta f$  fluktuacje są statystycznie niezależne. Do opisu związków statystycznych między fluktuacjami dwóch sygnałów różniących się częstotliwością wprowadzamy *częstotliwościową funkcję korelacji fluktuacji*  $\varrho(\Delta f)$ . Odstęp częstotliwości  $\Delta f_m$ , przy którym funkcja  $\varrho(\Delta f)$  przyjmuje wartość  $1/e$  nazywamy *odstępem korelacji*.

Brak korelacji częstotliwościowej fluktuacji ma dwojakie znaczenie dla pracy systemów radiokomunikacyjnych. Z jednej strony jest on wykorzystywany do poprawy warunków odbioru (*odbiór zbiorczy częstotliwościowy*), z drugiej strony odstęp korelacji  $\Delta f_m$  określa szerokość pasma, którą można przesłać bez zniekształceń. Jeśli szerokość pasma przesyłanego sygnału jest mniejsza od  $\Delta f_m$ , to fluktuacje poszczególnych składowych sygnału są silnie skorelowane i sygnał nie ulega zniekształceniu. Jeśli jednak szerokość pasma sygnału znacznie przewyższa  $\Delta f_m$ , to fluktuacje poszczególnych składowych sygnału przestają być skorelowane i sygnał ulega dużym zniekształceniom. Możemy więc uważać, że ośrodek propagacji ma określone „pasma przenoszenia”, ograniczające dopuszczalną szerokość pasma sygnału.

### 13.7. TŁUMIENIE FAŁ RADIOWYCH W TROPOSFERZE

W poprzednich rozdziałach badaliśmy wpływ troposfery na propagację fal radiowych biorąc pod uwagę jej niejednorodność. Wpływ ten polegał na zakrzywieniu trajektorii i rozpraszaniu fal. Zakładaliśmy przy tym, że troposfera jest całkowicie przezroczysta dla rozchodzących się w niej fal, czyli — innymi słowy — zakładaliśmy, że fale radiowe nie ulegają w troposferze tłumieniu. Bogaty materiał doświadczalny, uzyskany w wyniku eksploatacji linii radiowych w szerokim zakresie częstotliwości, wykazuje, że założenie to jest słuszne w każdych warunkach meteorologicznych dla fal dłuższych od 10 cm. Fale krótsze natomiast rozchodząc się w troposferze ulegają tłumieniu, które w pewnych warunkach meteorologicznych może być tak duże, że uniemożliwia nawiązanie łączności radiowej [41, 44, 53].

Rozróżniamy cztery rodzaje tłumienia powodowanego przez troposferę, a mianowicie: 1) tłumienie powodowane opadami atmosferycznymi (deszcz, mgła, grad, śnieg); 2) absorpcja molekularna, 3) rozpraszanie na cząsteczkach, 4) tłumienie w twardych cząsteczkach (pył, cząsteczki dymu). Dwa ostatnie rodzaje tłumienia mają znaczenie tylko dla najkrótszych fal przylegających do zakresu światła widzialnego. Pierwsze dwa rodzaje omówimy nieco szerzej.

*Tłumienie powodowane opadami atmosferycznymi.* Można wskazać dwie przyczyny powodujące tłumienie fal radiowych przez kropelki wody. Po pierwsze, kropelkę wody możemy uważać za półprzewodnik, w którym fala radiowa indukuje prądy