

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. Miara rozbieżności wiązki jest kąt rozwarcia stożka, który bezpośrednio na wyjściu lasera może wynosić kilka minut, a przy użyciu odpo-

wiedniego układu optycznego może dojść nawet do 1 sekundy. Rozszerzenie wiązki wynosi w tym ostatnim przypadku ok. 5 mm na drodze promienia o długości 1 km.

Układ kolimacyjny na wyjściu lasera odgrywa właściwie rolę urządzenia antenowego. W porównaniu z konwencjonalnymi antenami dla zakresu fal radiowych, anteny optyczne mają bardzo małe wymiary dzięki bardzo małej długości fal emitowanych przez laser. Z tego też powodu charakterystyka promieniowania takiej anteny jest bardzo wąska, a zysk energetyczny — ogromny. Ta właśnie cecha światła laserowego — obok ogromnej pojemności informacyjnej — przyciąga uwagę i powoduje zainteresowanie licznych ośrodków badawczych zastosowaniem laserów w telekomunikacji [26].

Przy opisanej kolimacji wiązki światła laserowego gęstość wypromieniowanej energii ulega nieznacznemu tylko zmniejszeniu nawet przy bardzo dużym oddaleniu od źródła, oczywiście w warunkach rozchodzenia się promieni laserowych w swobodnej przestrzeni. Można dzięki temu uzyskać olbrzymie zasięgi działania, mierzone astronomicznymi wręcz odległościami, co czyni lasery szczególnie przydatne do superdalekosiężnej łączności, zwłaszcza w przypadkach dalekich lotów kosmicznych.

Radiokomunikacja konwencjonalna może, praktycznie biorąc, objąć swym zasięgiem nasz układ planetarny. Zastosowanie wiązki laserowej jako nośnika informacji zwiększa te możliwości w sposób zasadniczy, otwierając — na razie teoretycznie — perspektywy komunikowania się na odległości, mierzone jednostkami używanymi w astronomii. Według Townesa [26] światło lasera o mocy 10 kW i rozbieżności wiązki 10^{-7} rad ($0,02''$)¹⁾ mogłoby być obserwowane gołym okiem z odległości 0,1 roku świetlnego ($9 \cdot 10^{11}$ km), a sfotografować je można by przez 200-calowy teleskop nawet z odległości 10 lat świetlnych.

Znaczny stopień kolimacji wiązki laserowej określa przede wszystkim zasięg łączności; prócz tego sprzyja on eliminacji zakłóceń zewnętrznych oraz zachowaniu tajemnicy przesyłanych informacji. Wiąże się z nim wszakże poważny kłopot, a mianowicie konieczność dokładnego nacelowania wiązki świetlnej na korespondenta. Trudności rosną pod tym względem wraz ze wzrostem zasięgu łączności; dotyczy to przede wszystkim telekomunikacji kosmicznej, przy której odległości są olbrzymie, a ponadto nawiązywanie łączności może się odbywać z obiektami ruchomymi.

Telekomunikacja za pomocą światła laserowego w warunkach naziemnych jest mocno utrudniona wskutek pochłaniania, rozpraszania i załamывania promieni świetlnych w atmosferze, zwłaszcza pod wpływem takich czynników, jak mgła, deszcz, śnieg, dym, pył, zawirowania powietrza itp. Nawet zupełnie czyste i idealnie spokojne powietrze pochłania i rozprasza określoną część energii przechodzącego przezeń strumienia świetlnego.

Tłumienie promieniowania w atmosferze jest zawsze rezultatem równocześnie występujących zjawisk pochłaniania i rozpraszania, przy czym udział każdego z tych

¹⁾ Taką niemal idealną równoległość wiązki można osiągnąć tylko poza atmosferą ziemską, ponieważ zjawisko refrakcji atmosferycznej uniemożliwia zmniejszenie kąta rozwarcia wiązki poniżej wartości granicznej $5 \cdot 10^{-6}$ rad ($1''$).

zjawisk może być różny, zależnie od stanu atmosfery (warunków meteorologicznych, wysokości, rodzaju i koncentracji zawieszin itp.) i długości fal świetlnych.

Rozchodzenie się wiązki promieniowania w atmosferze można scharakteryzować zależnością

$$I = I_0 e^{-\alpha l} \quad (16-22)$$

w której:

I_0 — natężenie promieniowania na początku drogi;

l — długość przebytej drogi w atmosferze;

I — natężenie promieniowania na końcu drogi l ;

α — współczynnik tłumienia.

Zgodnie z poprzednim stwierdzeniem, współczynnik tłumienia jest sumą współczynnika pochłaniania α_p i współczynnika rozpraszania α_r ,

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_r \quad (16-23)$$

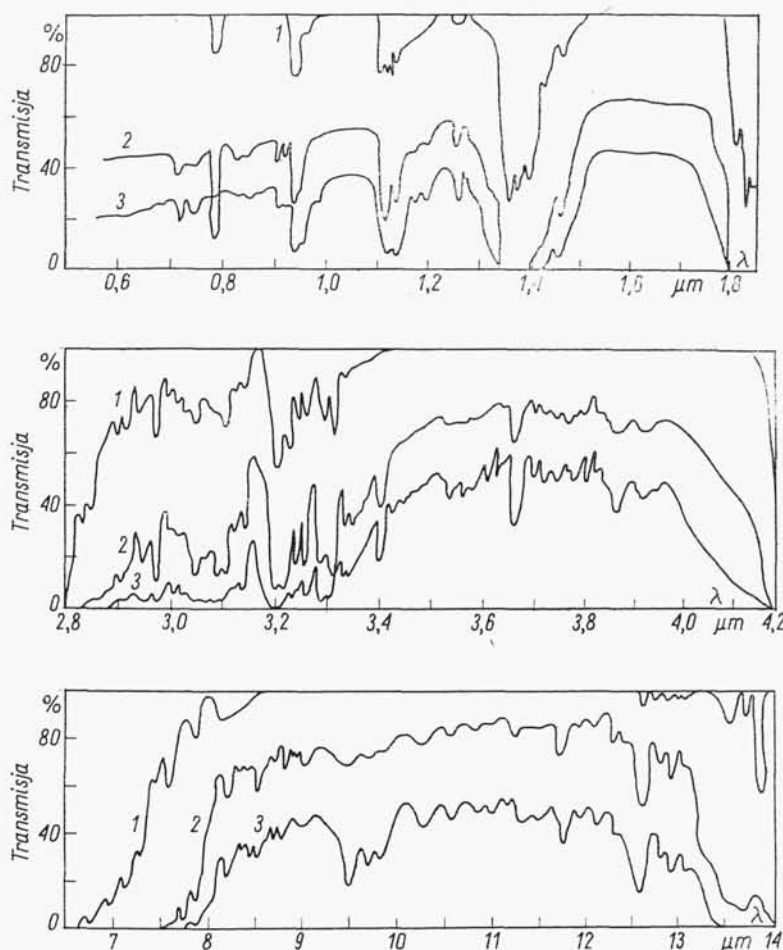
Współczynnik tłumienia zależy w sposób bardzo skomplikowany od długości fali. Ilustruje to rys. 16-44, na którym przedstawiono charakterystykę widmową przezroczystości troposfery dla trzech odcinków zakresu optycznego w różnych porach dnia i przy różnych długościach dróg rozchodzenia się wiązki świetlnej.

Jak widać, zależność przezroczystości troposfery od długości fali jest bardzo duża i nieregularna; krzywe mają wiele szczytów odpowiadających tzw. oknom, w których przezroczystość atmosfery jest duża, i głębokich dolin, w których światło jest szczególnie silnie tłumione. Dolna warstwa atmosfery jest więc dla promieniowania optycznego filtrem selektywnym o bardzo skomplikowanym działaniu. Można jednak wyodrębnić pasma falowe, w których powietrze przepuszcza promienie świetlne znacznie lepiej niż w pozostałych odcinkach widma optycznego. Są to np. pasma: 0,5...0,9 μm , 1,0...1,1 μm , 1,2...1,3 μm , 1,55...1,75 μm , 2,1...2,4 μm , 3,4...4,1 μm oraz 8...12 μm . Wraz ze wzrostem wysokości, tłumienie światła w atmosferze maleje i na wysokościach większych od 60...70 km, praktycznie biorąc, można go już nie uwzględniać.

Główną rolę w pochłanianiu promieniowania optycznego w troposferze odgrywają cząsteczki pary wodnej i dwutlenku węgla. Ilustrują to wykresy podane na rys. 16-45. Zawartość pary wodnej w atmosferze waha się w szerokich granicach 0,001...4% (objętościowo). Ze wzrostem wysokości zawartość pary wodnej w powietrzu szybko maleje. Zawartość dwutlenku węgla w powietrzu waha się w granicach 0,03...0,05%, przy czym górna granica odpowiada ośrodkom miejskim. Na większych wysokościach (ok. 30 km) stosunkowo znaczny wpływ na absorpcję światła ma ozon.

Wybitnie ujemny wpływ na rozchodzenie się wiązki świetlnej w atmosferze mają opady śniegu lub deszczu oraz tzw. aerozole, czyli zawiesziny w powietrzu bardzo drobnych ciał ciekłych (mgła, chmury) lub stałych (dym, pył, kryształki lodu). Na niewielkich wysokościach główną przyczyną zanieczyszczenia atmosfery jest dym i pył. Liczba pyłków w 1 cm^3 powietrza podczas suchej jasnej pogody nie przekracza 100 na wysokości 3000 m, natomiast przy powierzchni ziemi liczba ta sięga 130 000.

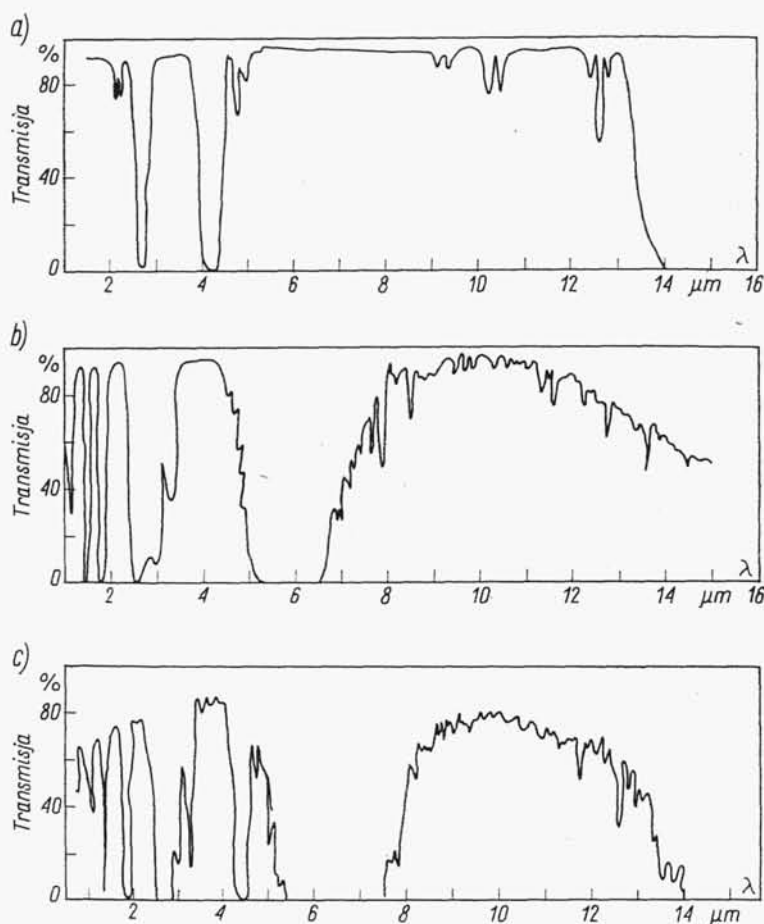
Deszcz zmniejsza ją do około 30 000, a nad morzem lub jeziorem, w odległości np. 20 km od brzegu, zapylenie atmosfery wynosi już tylko ok. 1000 pyłków/cm³. Nad wielkimi miastami pyłu i dymu jest, oczywiście, bardzo dużo, lecz zanieczyszczenia te nie sięgają powyżej 500...700 m.



Rys. 16-44. Charakterystyka widmowa przeźroczystości troposfery w kierunku poziomym
1 — długość drogi wiązki 0,3 km, wilgotność powietrza 62%, godz. 15⁰⁰; 2 — długość drogi wiązki 5,5 km, wilgotność powietrza 47%, godz. 22⁰⁰; 3 — długość drogi wiązki 16 km, wilgotność powietrza 48%, godz. 12⁰⁰ (według H. Klejman i in.: Lasery w telekomunikacji. WNT, Warszawa 1970)

Drugim elementem tłumienia wiązki świetlnej w atmosferze jest zjawisko rozpraszania światła. Może to być tzw. *rozpraszanie molekularne* zachodzące nawet w zupełnie czystym powietrzu. Mamy tu do czynienia z oddziaływaniem fali świetlnej (fotonów) z cząsteczkami gazów wchodzących w skład atmosfery. Intensywność

tego procesu silnie zależy od długości fali; współczynnik rozpraszania jest odwrotnie proporcjonalny do czwartej potęgi długości fali. Tłumienie promieniowania, zachodzące w wyniku rozpraszania molekularnego, może być w widzialnej części widma znacznie silniejsze aniżeli omówiona przedtem absorpcja molekularna. W zakresie podczerwieni rozpraszanie molekularne jest bardzo słabe.



Rys. 16-45. Charakterystyka widmowa przepuszczalności: a) dwutlenku węgla; b) pary wodnej; c) troposfery na długości drogi wiązki świetlnej 1850 m (według H. Klejman i in.: Lasery w telekomunikacji, WNT, Warszawa 1970)

Inne rodzaje rozpraszania to tzw. *rozpraszanie dyfrakcyjne*, kiedy wymiary cząsteczek rozpraszających światło są współmierne z jego długością fali, oraz *rozpraszanie geometryczne*, kiedy wymiary cząsteczek znacznie przewyższają długość rozpraszanej fali świetlnej. W tym ostatnim przypadku mamy do czynienia z rozpraszaniem na zawiesinach (aerozolach), stąd też pochodzi spotykana niekiedy nazwa *rozpraszania*

aerozolowego. Wpływ rozpraszania aerozolowego na przepuszczalność atmosfery przejawia się w całym zakresie optycznym.

Oprócz strat w atmosferze, spowodowanych pochłanianiem i rozpraszaniem wiązki laserowej, poważnym utrudnieniem dla naziemnej łączności optycznej, jest również załamanie promieni świetlnych, wywołane głównie gradientem temperaturowym powietrza. Nawet nieznaczne załamania promieni i wynikające stąd wahania kąta padania wiązki nadchodzącej do odbiornika mogą naruszyć łączność, jeśli jej rozbieżność jest tak mała jak w przypadku wiązki laserowej. Turbulencje powietrza wpływają też na światło laserowe w stopniu silniejszym niż na zwykłe światło niespójne, powodując naruszenie fazowej jednolitości czoła fali świetlnej oraz niepożądane zmiany poziomu sygnału. Występowanie szkodliwej modulacji intensywności promieniowania jest wynikiem fluktuacji przekroju wiązki, wywołanej małymi niejednorodnościami optycznymi (o wymiarach porównywalnych ze średnicą wiązki), spowodowanymi turbulencyjnością ośrodka powietrznego. Z tego samego powodu powstają też fluktuacje czasu przelotu promieni, a więc i fazy, jako rezultat prędkości rozchodzenia się fali świetlnej.