

Rozdział 13

Łącza optyczne wolnej przestrzeni

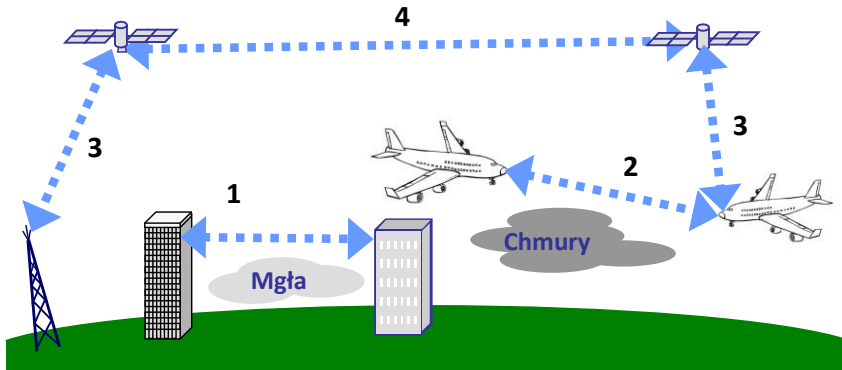
13.1. Wprowadzenie

Światłowód kwarcowy jako medium transmisyjne zrewolucjonizował technikę transmisji informacji na długich dystansach. Długości fal, na których realizowana jest transmisja wyznaczyła natura, gdyż dla długości fal w okolicach 1300 nm i 1550 nm straty mocy w procesie transmisji są najmniejsze. Mając opanowane techniki generacji fali elektromagnetycznej w tych pasmach, jej modulacji, wzmacniania i detekcji, opracowano całe serie różnorodnych optycznych systemów transmisyjnych pracujących w wolnej przestrzeni FSO (ang. *Free Space Optical Communication*).

Systemy i łącza FSO wykorzystują różne fragmenty pasma optycznego. Wymienione wyżej pasma 1300 nm i 1500 nm są użyteczne, gdyż transmitowane sygnały można wyprowadzić i wprowadzić do światłowodu. Popularnym jest także pasmo bliskiej podczerwieni w okolicach 800 nm. Przyrządy półprzewodnikowe pracujące w tym paśmie: lasery, diody LED i fotodiody wykonywane są w oparciu o dobrze opanowaną technologię krzemową. Poza tym w szeregu publikacjach opisano systemy FSO pracujące w paśmie widzialnym. Przy wyborze pasma pracy istotnym i brany pod uwagę czynnikiem jest wrażliwość oka ludzkiego na promieniowanie.

Na rysunku 13.1 zilustrowano kilka możliwości wykorzystania transmisji łącami optycznymi wolnej przestrzeni. Numerem 1 oznaczono łącza Ziemia–Ziemia do transmisji między obiektami naziemnymi, w praktyce bardzo często między budynkami w centrach metropolii, na przykład w londyńskim City. W ostatnich latach sieć optyczna wykorzystująca łącza FSO zyskała istotne znaczenie dzięki takim cechom jak: duża szybkość transmisji, wolne od licencji (!) spektrum, łatwość i szybkość rozmieszczania, niewielka masa urządzeń. Bywa, że przepustowość sieci światłowodowej nie wystarcza, położenie nowych kabli wymaga długiego czasu. Jeżeli punkty, które należy połączyć łącem transmisyjnym są nawzajem widoczne, to ustawienie w oknach budynków optycznych układów nadawczo-odbiorczych zajmuje zaledwie kilka godzin.

Oznaczone numerem 2 łącza FSO samolot–samolot, a także Ziemia–samolot, wykorzystywane są często w systemach militarnych, do transmisji danych objętych tajemnicą. W takich przypadkach potrzebna szybkość transmisji nie jest na tyle duża, by konieczne było sięganie po nośną z pasma optycznego. Decydującym argumentem za użyciem systemów FSO jest możliwość skupienia wiązki optycznej, co utrudnia lub wręcz uniemożliwia podsłuch.



Rys. 13.1. Ilustracja możliwości wykorzystania połączeń optycznych FSO w wolnej przestrzeni do transmisji informacji. 1 – Połączenie między obiektami na powierzchni Ziemi. 2 – Połączenie FSO między samolotami. 3 – Połączenie FSO między satelitą a obiektami bliskimi powierzchni. 4 – Połączenie FSO między satelitami.

Oznaczone numerem 3 łącza optyczne satelita–Ziemia, kierują strumień danych do systemu sieci satelitarnej i odbierają go od niej. Do tej rodziny należą łącza FSO do transmisji z samolotu do satelity. Część tych połączeń także służy celom wojskowym.

Łącza optyczne satelita–satelita oznaczone numerem 4, o dużej przepustowości, są w stanie uczynić z satelitarnych sieci telekomunikacyjnych systemy, które mogą konkurować bardzo dużą szybkością transmisji z naziemnymi systemami światłowodowymi. Łącza mikrofalowe nie pozwalają na uzyskanie odpowiednich szybkości transmisji danych.

Jak widać, wielka różnorodność łączy optycznych dalekiego zasięgu, począwszy od połączeń między samolotami a skończywszy na łącach między satelitami, stwarza przed telekomunikacją optyczną wielkie wyzwania. Na rys. 13.1 narysowano symbolicznie chmurę i mgłę. Te niezależne od użytkowników efekty pogodowe mogą zakłócić lub wręcz przerwać transmisję między obiektami na powierzchni Ziemi. To jest oczywiście słaba strona łączy FSO. Przy transmisji światłowodem nie napotykamy na takie przeszkody.

Systemy satelitarne wykorzystują do połączeń z Ziemią i między sobą transmisje radiowe w pasmach mikrofalowych. Zaletą łączy optycznych w stosunku do mikrofalowych jest znacznie większa szybkość transmisji. Jest jeszcze jedna cecha łączy FSO. Zobaczmy dalej, że łącza optyczne posługują się bardzo wąskimi wiązkami sygnału i dlatego nie występują przesłuchy między łączami na długich dystansach. Łącza optyczne nie przeszkadzają sobie wzajemnie, podczas gdy łącza mikrofalowe, nawet w pasmach milimetrycznych, interferują między sobą.

Łącza optyczne wewnątrz zamkniętych pomieszczeń, to zupełnie inna grupa zastosowań i związanych z tym problemów: inne moce, inne zasięgi i inne szybkości transmisji. Zagadnienia te omówione zostaną w kolejnym punkcie tego rozdziału.

Jednym z bardzo interesujących zastosowań systemów transmisji wykorzystujących pasmo optyczne są łącza do transmisji podwodnej. Ogólnie uznajemy, że woda nie jest dobrym środowiskiem do transmisji promieniowania elektromagnetycznego. Mgły, chmury i deszcz tłumią promieniowanie pasm optycznych. Jednakże badania wykazały, że w paśmie 450–550 nm w charakterystyce tłumienia wody morskiej istnieje coś w rodzaju „okna”. Fakt ten wykorzystano, budując systemy transmisyjne o prędkości transmisji kilkadziesiątu Mb/s i zasięgu kilkuset metrów. Optyczne systemy transmisyjne w ośrodku podwodnym wykorzystano dla potrzeb militarnych, ale także w urządzeniach poszukiwania i obserwacji dna. Zainteresowanych tą tematyką odsyłamy do publikacji.

Systemy transmisyjne wykorzystujące łącza FSO są zwykle dopełnieniem systemu transmisji światłowodowej; są rozwiązaniem problemu ostatniej mili (ang. *last mile*), czyli dotarcia do końcowego użytkownika. Systemy radiowo-światłowodowe RoF – jak wiemy z poprzedniego rozdziału – także rozwiązują ten problem, chociaż inaczej. Szeroko rozpowszechnione systemy komunikacji mobilnej wykorzystują pasma częstotliwości pozwalające na transmisję promieniowania elektromagnetycznego przez ściany i okna domów. Promieniowanie podczerwone tej właściwości nie ma.

13.2. Idea łącza optycznego wolnej przestrzeni

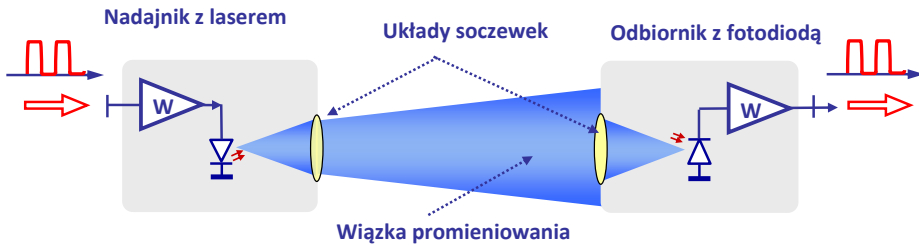
13.2.1. Układ łącza i jego elementy

Zasady transmisji informacji łączem optycznym w wolnej przestrzeni są takie same, jak w znanych nam przypadkach, gdy do transmisji użyto przewodnicę falową, jaką jest światłowod. Podstawowymi elementami łącza są: nadajnik, odbiornik i układ transmisji fali elektromagnetycznej. Ideę takiego układu pokazano na rys. 13.2.

Źródłem sygnału optycznego jest zwykle laser diodowy, choć w niektórych przypadkach stosuje się także diodę LED. Generowana przez laser moc jest bezpośrednio sterowana i modulowana prądowo. Ten sposób modulacji mocy optycznej, analogowy bądź cyfrowy jest najprostszy i zapewnia bardzo dobre parametry transmisji; opisany został szczegółowo w rozdziale 6. W przypadku gdy należy zwiększyć szybkości transmisji łącza, można zastosować modulatory zewnętrzne, z których modulator Macha-Zehndera zapewnia najlepsze warunki pracy. Oczywiście możliwe jest także zastosowanie modulacji amplitudowo-fazowej, wielostanowej, chociaż wtedy układy nadajnika stają się bardziej złożone. W takich przypadkach konieczne jest użycie detekcji koherentnej z lokalnym oscylatorem w postaci drugiego lasera bądź detekcji homodynowej. W nadajniku stosowane są także wzmacniacze sygnałów optycznych, najczęściej wzmacniacze półprzewodnikowe.

Sygnał optyczny po zmodulowaniu kierowany jest w łączach światłowodowych do światłowodu. W przypadku łącza w wolnej przestrzeni zespół soczewek formuje wiązkę i skierowuje ją w stronę odbiornika. Wiązka formowana jest w kształcie walca. Jednakże

efekty ugięcia, o których będzie mowa w kolejnym punkcie, zależne od długości fali λ , powodują zmianę średnicy wiązki, która w rezultacie przyjmuje kształt stożka.



Rys. 13.2. Idea układu łącza optycznego w wolnej przestrzeni. Łącze z nadajnikiem laserowym modulowanym bezpośrednio, odbiornikiem z fotodiodą i uformowaną układem soczewek wiązką promieniowania.

Część mocy wypromieniowanej przez nadajnik wiązki trafia do układu soczewek odbiornika i skierowana jest do fotodiody. Jeśli w nadajniku zastosowano modulację mocy, to w odbiorniku stosuje się bezpośrednią detekcję. Po usunięciu optycznej fali nośnej i wzmacnieniu, często filtracji, sygnał kierowany jest do dalszej obróbki. Możliwe jest także zastosowanie bardziej czułego odbiornika koherentnego, a w przypadku modulacji wielostanowej jest to koniecznością.

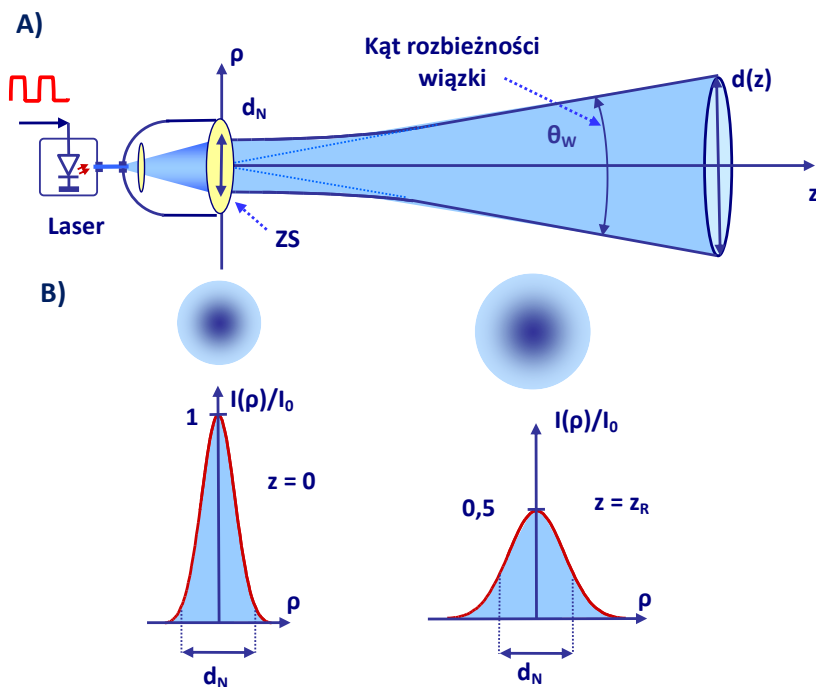
Wszystkie układy łącza z transmisją w wolnej przestrzeni pełnią te same lub podobne funkcje, jak w przypadku łączy światłowodowych. Tym drugim jednakże stawiane są znacznie trudniejsze zadania, wśród których najważniejszym jest bardzo duża szybkość transmisji.

13.2.2. Parametry wiązki promieniowania

Sygnał optyczny bądź radiowy w postaci fali elektromagnetycznej, na drodze od nadajnika do odbiornika łącza, propagowany jest w wolnej przestrzeni najczęściej jako uformowana wiązka. Warunki propagacji wiązki i jej parametry odgrywają istotną rolę przy określaniu parametrów transmisji informacji. Przyjmijemy w tym punkcie, że analizowana będzie wiązka promieniowania optycznego, której źródłem jest laser. Zmodulowany sygnał optyczny formowany jest przez układ soczewek nadajnika w postaci równoległej wiązki, w kształcie walca – rys. 13.3A. Analizowano zmiany kształtu propagowanej wzdłuż osi z wiązki przy założeniu, że gęstość mocy w przekroju wiązki ma rozkład opisany krzywą Gaussa. Ilustrację takiego rozkładu pokazano na rys. 13.3B, dla $z = 0$. Eksperymenty wykazały, że rzeczywiste wiązki zachowują się z dużą dokładnością zgodnie z wynikami tej analizy.

Jak zauważono, efekty ugięcia, zależne od długości fali λ , powodują zmianę średnicy wiązki w miarę propagacji wzdłuż osi z . Średnica $d(z)$ jest funkcją z i rośnie, od wartości d_N równej średnicy wiązki w porcie wyjściowym nadajnika, zgodnie z zależnością (13-1).

$$d(z) = d_N \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}; \quad (13-1)$$



Rys. 13.3. Wpływ efektu ugięcia na średnicę wiązki lasera propagowanej w wolnej przestrzeni. A) Wymiary propagowanej wiązki w kształcie stożka. ZS – zespół soczewek. B) Rozkład gaussowski gęstości mocy $I(\rho)$ w przekroju poprzecznym wiązki dla $z = 0$ i w odległości $z = z_R$.

Układ soczewek nadajnika może uformować wiązkę zbieżną. W takim przypadku jej średnica będzie początkowo malała aż do wartości minimalnej w miejscu zwanym talią wiązki, a następnie rosta, zgodnie z zależnością (13-1). Średnica d_N jest właśnie najmniejszą wartością średnicy w talii.

Występująca we wzorze (13-1) wielkość z_R jest tak zwaną długością Rayleigha, określoną zależnością (13-2), w której S_N jest powierzchnią przekroju wiązki, a λ długością fali.

$$z_R = \frac{\pi d_N^2}{4\lambda} = \frac{S_N}{\lambda}; \quad (13-2)$$

Zależność (13-1) ma istotne znaczenie dla układów formujących wiązki promieniowania elektromagnetycznego, zarówno w pasmach mikrofalowych, jak i optycznych. Wiązka uformowana zgodnie z regułami optyki geometrycznej na równoległą, zmienia swoje wymiary

w miarę wzrostu odległości od anteny/soczewki¹ ze względu na zjawisko ugięcia. Rysunek 13.3 ilustruje wpływ efektu ugięcia na rozmiary wiązki (pokazano bez zachowania proporcji).

Zgodnie z zależnością (13-1), w polu bliskim soczewki, gdy $(z/z_R) \ll 1$, wiązka jest równoległa, ma kształt walca i średnicę d_N , zgodnie z zapisem (13-3).

$$\frac{z}{z_R} \ll 1; \quad d(z) \cong d_N; \quad (13-3)$$

W polu dalekim, gdy $(z/z_R) \gg 1$, wiązka przyjmuje kształt stożka o średnicy $d(z)$ rosnącej liniowo wraz z odległością z – zależność (13-4):

$$\frac{z}{z_R} \gg 1; \quad d(z) \cong \frac{d_N}{z_R} z; \quad (13-4)$$

Zaznaczony na rys. 13.3 kąt θ_W rozbieżności wiązki można obliczyć z zależności (13-4), ponieważ zwykle spełniony jest warunek $d/z \ll 1$.

$$\theta_W = \frac{d(z)}{z} = \frac{d_N}{z_R} = \frac{4\lambda}{\pi d_N}; \quad (13-5)$$

Wartości kątów rozbieżności θ_W podawane są zwykle w miliradianach i mikroradianach. Dla kąta rozbieżności $\theta_W = 1$ mrad wiązka ma średnicę 1 metra w odległości 1 kilometra od nadajnika.

Na rys. 13.3B pokazano gaussowski rozkład gęstości $I(\rho, z)$ mocy optycznej w przekroju poprzecznym wiązki. Opisuje go zależność (13-6).

$$I(\rho, z) = I_0 \left[\frac{d_N}{d(z)} \right]^2 \exp \left[-\frac{8\rho^2}{d^2(z)} \right]; \quad (13-6)$$

Występująca w powyższej zależności wartość gęstości mocy I_0 związana jest z mocą P niesioną przez wiązkę wzorem (13-7):

$$P = \frac{\pi d_N^2}{8} I_0; \quad (13-7)$$

Jak pokazano na rys. 13.3B, gęstość mocy $I(0, z)$ na osi wiązki maleje, mimo że niesiona przez wiązkę moc całkowita nie ulega zmianie. Dla $z = z_R$ wartość gęstości mocy na osi wiązki $I(0, z_R)$ maleje do połowy.

$$I(0, z) = \frac{I_0}{1 + (z/z_R)^2}; \quad (13-8)$$

Matematyczny opis parametrów wiązki o gaussowskim rozkładzie gęstości jest czytelny i zrozumiały. Niezależnie od warunków początkowych wiązka przyjmuje kształt stożka, a kąt rozwarcia θ_W będzie tym większy, im większą wartość ma długość fali λ . Należy dodać, że zwiększenie kąta rozwarcia stożka promieniowania i rozproszenie wiązki może łatwo zrealizować – według potrzeby – układ ogniskujący.

¹ Pod terminem „soczewka” rozumiany jest tutaj optyczny układ ogniskujący.

13.2.3. Wzmocnienie anteny/soczewki

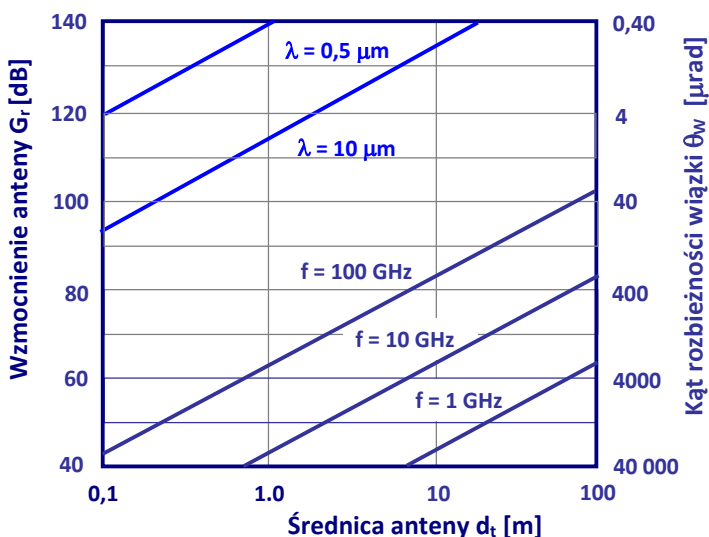
Przy obliczaniu warunków transmisji łączy z propagacją fali w wolnej przestrzeni, od anteny nadajnika do anteny odbiornika, ważnymi parametrami łączy są wzmocnienia obu anten. Aby obliczyć wzmocnienie anteny, należy porównać jej charakterystykę promieniowania z charakterystyką anteny dookólnej, zwanej także izotropową. Antena tego rodzaju promieniuje moc jednakową w każdym kierunku. W przypadku nadajnika optycznego z laserem i zespołem ogniskujących soczewek można przyjąć, że wiązka promieniowania ma gaussowski rozkład gęstości mocy. Wtedy prawie cała moc nadajnika zostaje skierowana wewnątrz stożka o kącie bryłowym ψ_W . Kąt ten można obliczyć z zależności (13-9).

$$\psi_W = \frac{S(z)}{z^2} = \frac{\pi d^2(z)}{4z^2} = \frac{\pi \theta_W^2}{4}; \quad (13-9)$$

We wzorze tym $S(z)$ jest powierzchnią koła podstawy stożka o średnicy $d(z)$ i kącie rozwarcia θ_W . Jeżeli moc wyemitowanej przez nadajnik fali mieści się wewnątrz kąta bryłowego ψ_W , to wzmocnienie G_N anteny/zespołu soczewek nadajnika określa stosunek kąta bryłowego ψ_W do kąta bryłowego kuli, równego 4π . Można napisać:

$$G_N = \frac{4\pi}{\psi_W} = \frac{16}{\theta_W^2} = \left(\frac{\pi d_N}{\lambda}\right)^2; \quad (13-10)$$

Wykorzystując zależność (13-10), na rys. 13.4 narysowano rodzinę charakterystyk $G_N(d_N, \lambda)$ dla anten emitujących sygnały optyczne i mikrofalowe.



Rys. 13.4. Porównanie wzmocnienia i kątów rozbieżności anten pracujących w paśmie mikrofalowym i układów ogniskowania w pasmach optycznych.

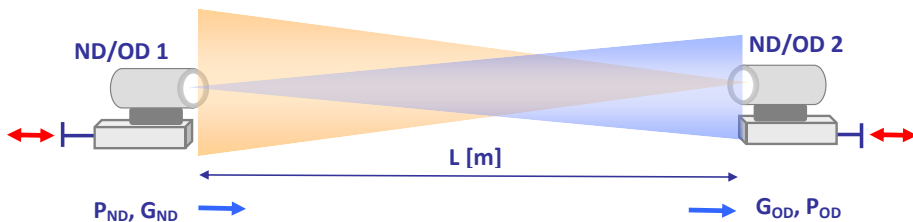
Zależność (13-10) wskazuje na dwa parametry anteny, które należy wziąć pod uwagę przy obliczaniu czy też projektowaniu. Jednym z nich jest średnica anteny d_N , drugim długość fali λ emitowanego przez antenę sygnału. Stosunek tych parametrów d_N/λ decyduje o wartości wzmocnienia. W pasmach mikrofalowych uzyskanie odpowiedniego wzmocnienia anteny pracującej w łączach satelitarnych wymaga użycia anten parabolicznych o średnicach kilku-dziesięciu metrów. W pasmach optycznych znacznie większe wartości wzmocnień uzyskuje się dla układów soczewek o średnicach kilkunastu centymetrów.

Interpretacja prostych na wykresie z rys. 13.4 jest łatwa i czytelna. Przewaga optycznych układów ogniskujących nad antenowymi układami mikrofalowymi jest widoczna. Ze względu na mniejsze długości fali wzmocnienie optycznych układów ogniskujących jest o kilkadziesiąt decybeli większe. Dzięki temu poziomy mocy wyjściowej nadajników mogą być znacznie mniejsze, przy tych samych zasięgach.

13.2.4. Jaką moc odbiera odbiornik

Łącza optyczne wykorzystujące transmisję w wolnej przestrzeni umożliwiają transmisję sygnałów w obie strony. Najczęściej stosowane są urządzenia nadawczo-odbiorcze, bardzo często identyczne na obu końcach łącza. Na rysunku 13.5 w dużym uproszczeniu pokazano dwa układy nadawczo-odbiorcze łącza, odległe o L . Nadajnik ND 1 wysyła w stronę odbiornika OD 2 sygnał o mocy P_{ND} . Moc P_{OD} odebraną przez odbiornik można wyznaczyć z zależności (13-11). Jest to zależność uniwersalna, można z niej korzystać także w przypadku transmisji na falach radiowych.

$$P_{OD} = P_{ND} G_{ND} T G_{OD} \tau_{ATM} \tau_{ND} \tau_{OD} \quad (13-11)$$



Rys. 13.5. Łącza optyczne z transmisją w wolnej przestrzeni z oznaczeniami mocy nadawanej i odbieranej.

Moc propagowanego swobodnie, bez dodatkowych odbić, sygnału maleje z kwadratem odległości. Straty $T(L)$ przy transmisji na odległość L można obliczyć ze wzoru (13-12).

$$T(L) = \left(\frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2 ; \quad (13-12)$$

Istotną rolę odgrywa iloczyn $G_{ND}G_{OD}$ wzmocnień obu układów antenowych. Do jego obliczenia wykorzystać można zależność (13-10). Po przekształceniach można wybrać następującą, łatwą do interpretacji formę zależności końcowej:

$$P_{OD} = P_{ND} \left(\frac{d_{OD}^2}{\theta_{ND}^2 L^2} \right) \tau_{ATM} \tau_{ND} \tau_{OD}; \quad (13-13)$$

Wzmocnienie G_{ND} nadajnika reprezentowane jest w tym wzorze obecnością kąta θ_{ND} rozbieżności wiązki. Wzmocnienie odbiornika G_{OD} reprezentowane jest obecnością średnicy d_{OD} zespołu soczewek odbiornika. Współczynniki $\tau_{ATM} \tau_{ND} \tau_{OD}$, mniejsze od jednośc, reprezentują obecność możliwych, dodatkowych strat transmisji. Współczynnik τ_{ATM} reprezentuje dodatkowe straty transmisji przez atmosferę. Straty te wywołane są turbulencjami powietrza, obecnością pary wodnej (mgła) czy też deszczu. Będzie o nich mowa w kolejnym punkcie tego rozdziału. Następane dwa współczynniki reprezentują sprawności transmisji mocy optycznej w układach nadajnika i odbiornika. W rzeczywistych układach wartość tych współczynników jest bliska 1.

13.3. Łączy optyczne FSO Ziemia–Ziemia

13.3.1. Stosowane rozwiązania

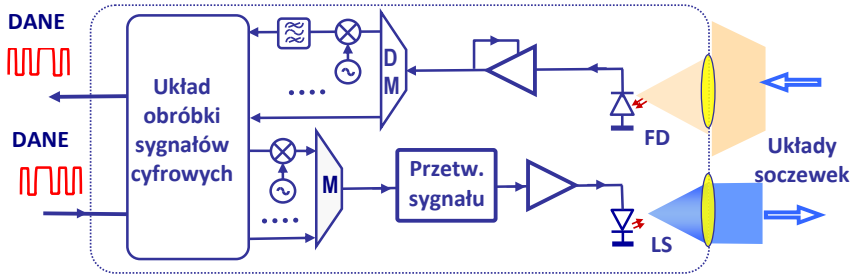
Systemy łączy optycznych FSO z transmisją w wolnej przestrzeni w zastosowaniach naziemnych są w ostatnich latach intensywnie rozbudowywane. Jak wspomniano wcześniej, systemy FSO mają wiele zalet. Kolejne generacje opracowywanych urządzeń powiększają prędkości transmisji do 10 Gb/s. Cały szereg układów umożliwia równoległą pracę kilku kanałów transmisji. Układy nadawczo-odbiorcze mają zwykle niewielkie rozmiary i mały pobór mocy, z łatwością można je montować wewnątrz budynków bez specjalnych instalacji. Transmisja odbywa się między punktami, które są widoczne. Aby usprawnić instalacje, układy FSO wyposażane są w lunety ułatwiające skierowanie wiązki we właściwym kierunku. Bardzo ważną zaletą systemów FSO jest praca w obszarze widma elektromagnetycznego, w którym nie wymaga się licencji. Z wymienionych powodów prowadzone są intensywne prace nad dalszym rozwojem systemów FSO, poprawą parametrów i poszerzeniem oferty.

Jeden z przykładów organizacji układu nadawczo-odbiorczego N-O do transmisji w wolnej przestrzeni pokazano na rys. 13.6.

Przedstawiony układ N-O wykorzystuje prostą i niezawodną, bezpośrednią modulację amplitudy lasera diodowego LS. Łączy pracuje w modzie IM-DD, wcześniej opisanym w rozdziale 10. W układzie zastosowano wielokanałową modulację na podnośnych. Obiektem transmisji są informacje cyfrowe nałożone na fale nośne o częstotliwości radiowej, a suma sygnałów z multipleksera M po nałożeniu na falę nośną o częstotliwości optycznej transmitowana jest analogowo do odbiornika. Aby powiększyć moc nadajnika, stosowane są w niektórych rozwiązaniach półprzewodnikowe wzmacniacze mocy SOA.

Sygnal optyczny w torze odbiornika kierowany jest przez układ soczewek do fotodetektora FD. Po usunięciu nośnej o częstotliwości optycznej i wzmocnieniu sygnał kierowany

jest do demultipleksera DM. W kolejnych kanałach układy demodulatorów i filtrów usuwają nośne o częstotliwości radiowej.



Rys. 13.6. Uproszczony układ nadawczo-odbiorczy łączy optycznego FSO do naziemnej transmisji w wolnej przestrzeni. W torze nadawczym wykorzystano multipleksację na podnośnych i bezpośrednią modulację mocy lasera LS. W torze odbiorczym wykorzystano detekcję bezpośrednią z fotodetekтором FD, demultipleksę DM, demodulację i filtrację w każdym kanale.

Wymienione funkcje układu N-O mogą być realizowane także w inny sposób. Konstruowane są układy transmisji czysto cyfrowej z podziałem czasowym TDM.

Proces modulacji można rozwiązać w różny sposób. W niektórych układach nadajników wykorzystywane są modulatory zewnętrzne, realizujące modulację amplitudy. Wprowadzając do układu modulator Macha-Zehndera, można zastosować wielostanową modulację amplitudy i fazy. W tym przypadku konieczne jest zastosowanie detekcji koherentnej. Komplikując znacznie układ nadajnika i odbiornika, uzyskuje się istotne zwiększenie szybkości transmisji łączy oraz zwiększenie czułości odbiornika. To z kolei pozwala zwiększyć zasięg transmisji łączy FSO.

13.3.2. Warunki propagacji w atmosferze

Fala elektromagnetyczna propagowana w atmosferze jest tłumiona, atmosfera absorbuje i rozprasza promieniowanie EM. Efekty te zależą od długości fali, poznamy niektóre z nich.

Atmosfera składa się z atomów i cząstek gazów, pary wodnej, pyłu, często deszczu, a nawet w pewnych przypadkach śniegu, wszystko utrzymywane siłą grawitacji. Jak wiemy, największa koncentracja tych czynników występuje w troposferze, przy powierzchni Ziemi. Powietrze ma tutaj największą gęstość, występuje najwięcej pary wodnej, chmury, mgły i opady. Jest oczywiste, że straty mocy zależą od typu transmisji horyzontalnej i wertykalnej. Ogólnie mówiąc, efekty tłumienia stają się tym wyraźniejsze, im bardziej długość fali zbliży się do rozmiaru drobin.

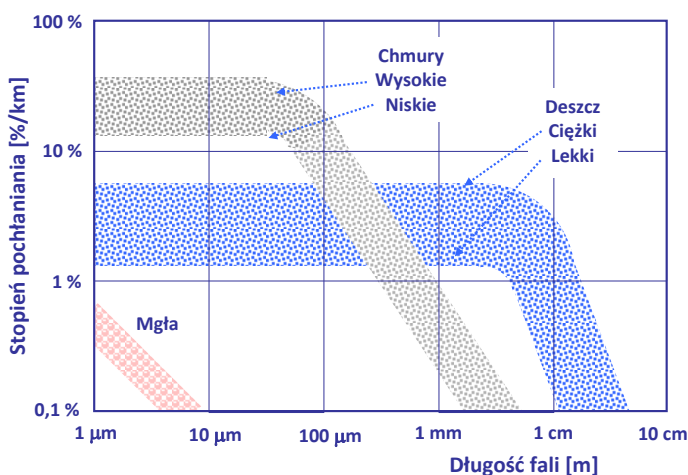
Badacze warunków propagacji rozróżniają trzy podstawowe rodzaje warunków:

- czyste powietrze,

- chmury, mgły,
- deszcze.

W warunkach czystego powietrza zmiany temperatury powodują turbulencje powietrza, zmienia się wtedy współczynnik załamania, powstają soczewki zmieniające kierunek propagacji. Efekty turbulencji w czystym powietrzu powodują dodatkowe tłumienie fali.

Czyste powietrze jest w stanie silnie absorbować promieniowanie podczerwone. Absorpcja promieniowania ma charakter selektywny, związany z pobudzeniem określonych cząsteczek: tlenu, azotu, dwutlenku węgla i pary wodnej. Efektów tak silnej absorpcji nie obserwujemy w zakresie promieniowania widzialnego, a także w zakresie fal radiowych i mikrofal, poniżej 30 GHz.



Rys. 13.7. Orientacyjne wartości współczynnika pochłaniania fali [%/km] w różnych warunkach atmosferycznych i dla różnych długości fali.

W miarę rozrzedzenia powietrza absorpcja słabnie. Przy transmisji między satelitami, na wysokościach powyżej 200 km, można ją pominąć. Absorpcja i rozpraszanie wiązki powodują dodatkowe tłumienie, które zależy od długości fali.

Na rysunku 13.7 pokazano otrzymane doświadczalnie orientacyjne dane, pokazujące wpływ pary wodnej w postaci chmur i opadów deszczu na tłumienie promieniowania elektromagnetycznego o różnej długości fali. Promieniowanie EM w pasmach mikrofalowych 10–30 cm jest prawie niewrażliwe na opady deszczu, dlatego radary mikrofalowe dużego zasięgu pracują w tych zakresach długości fali. Promieniowanie podczerwone jest silnie wrażliwe na obecność w atmosferze mgły, chmur i deszczu.

W tabeli 13.1 zestawiono wyniki pomiarów tłumienia fali płaskiej z zakresu bliskiej podczerwieni i rozchodzącej się w atmosferze w rozmaitych warunkach pogodowych. Dodano orientacyjne wartości zasięgów typowych łączy FSO, przyjmując, że moce instalowanych nadajników optycznych nie przekraczają wartości 100 mW. Z tabeli tej wynika, że

w transmisji optycznej między budynkami na odległości do 500 m warunki pogodowe mogą przeszkodzić tylko w rzadkich przypadkach silnej mgły i dużych opadów deszczu i śniegu.

Tabela 13.1. Porównanie współczynnika tłumienia fali płaskiej w atmosferze i zasięg łącza w paśmie bliskiej podczerwieni

Stan atmosfery	Tłumienie α [dB/km]	Zasięg D
Ciężka mgła	> 250	< 50 m
Średnia mgła	20–60	200 m–500 m
Ciężki deszcz (150 mm/g)	25–40	300 m–450 m
Lekka mgła, słaby deszcz, miasto	4–13	770 m–2000 m
Mgietka	0,4–2,6	2,8 km–10 km
Czyste, przejrzyste powietrze	0,06–0,24	18 km–50 km
Podwójna szyba okna	1–3 dB	–

13.2.3. Łącza FSO w sieci

Systemy telefonii komórkowej wykorzystujące transmisję bezprzewodową pokryły całe kontynenty i wyspy siecią stacji bazowych, umożliwiającą połączenie z prawie każdego punktu. Sieci te działają w określony, precyzyjnie opisany i znormalizowany sposób. Transmisja drogą radiową odbywa się w określonych pasmach częstotliwości i z wykorzystaniem ustalonych formatów modulacji. Łącza FSO z transmisją w wolnej przestrzeni tworzone są nieregularnie, w miarę potrzeb. Można powiedzieć, że są to wyspy w morzu systemów transmisji w pasmach radiowych.

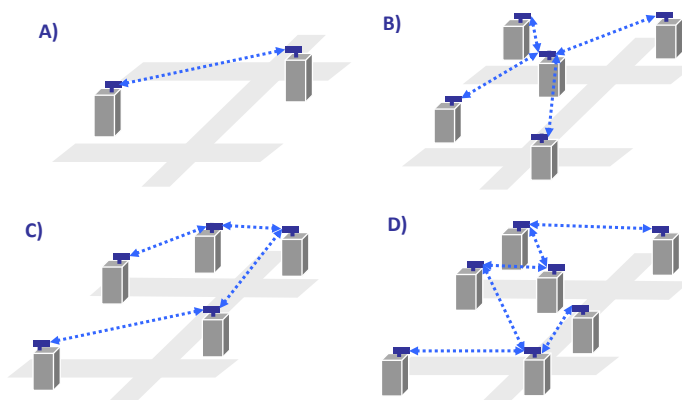
Tworzone lokalne mikrosystemy transmisyjne wykorzystują zwykle urządzenia jednego producenta. Proces normowania parametrów, które umożliwiałyby współpracę rozmaitych systemów jeszcze się nie zakończył. Niezależnie od wykorzystanej techniki transmisji wszystkie układy N-O umożliwiają współpracę z siecią telekomunikacyjną.

Łącza FSO mogą być zainstalowane w celu umożliwienia transmisji informacji między dwoma punktami. Przypadek taki pokazano na rys. 13.8 A. Zwykle w obu punktach końcowych instalowane są takie same urządzenia N-O.

Na rysunku 13.8 B widać mikrosieć połączoną w strukturę gwiazdy. Urządzenie centralne połączone jest ze wszystkimi pozostałymi urządzeniami. Jego możliwości nadawania, odbioru i obróbki danych są większe niż pozostałych. W takich rozwiązaniach stosuje się często multipleksację WDM, przeznaczając dla każdego łącza inną długość fali.

Multipleksacja WDM stosowana jest zwykle przy pierścieniowej strukturze sieci, której przykład pokazano na rysunku 13.8C. Zasady transmisji, wprowadzone układy *add/drop*

funkcjonują na zasadach stosowanych w sieciach światłowodowych. Najczęściej struktury mikrosieci FSO są nieregularne, tworzone w zależności od potrzeb – rys. 13.8D. Opracowane układy N-O pozwalają na elastyczne tworzenie połączeń sieciowych w różnych konfiguracjach i dla różnych szybkości transmisji.



Rys. 13.8. Struktury sieci połączeń łączy optycznych FSO w wolnej przestrzeni dużego miasta. A) Łącza optyczne do transmisji między dwoma punktami nadawania i odbioru. B) Łącza optyczne w układzie gwiazdy. C) Łącza FSO w połączeniu pierścieniowym. D) Łącza FSO połączone w nieregularnej sieci.

Systemy i łącza FSO, przeznaczone do naziemnej transmisji informacji, są w ostatnich latach intensywnie rozwijane. Traktowane są jako uzupełnienie systemów radiowo-światłowodowych. Ich zaletą jest łatwość i krótki czas instalacji, a wadą wrażliwość na warunki atmosferyczne. Zasięgi łączy naziemnych są ograniczone, w najlepszych przypadkach do kilku kilometrów.

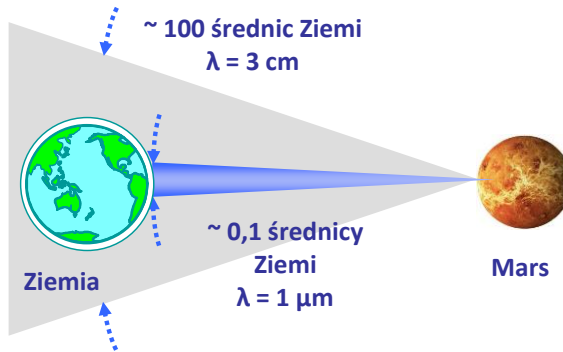
13.4. Komunikacja optyczna w przestrzeni

13.4.1. Specyfika łączy satelitarnych

Po umieszczeniu pierwszych satelitów na orbitach okołoziemskich powstał techniczny problem transmisji sygnałów do satelity i odbioru na ziemi sygnałów wysłanych przez jego nadajnik. Rozwój i doskonalenie technik transmisji satelitarnej jest ważnym fragmentem rozwoju systemów telekomunikacji. Historia tego rozwoju ma wiele fascynujących wątków.

Dobór pasma częstotliwości był i jest nadal istotnym zagadnieniem. Stosunkowo wcześniej postawiono pytanie, czy konstruować łącza na pasma mikrofalowe, czy na pasma optyczne. W latach 70. i 80. ubiegłego wieku technika mikrofalowa była bardzo zaawansowana i miała znaczną przewagę nad telekomunikacją optofalową. Na przełomie wieków

poziom rozwoju tej ostatniej podniósł się znacznie. Obecnie można przyjąć, że systemy transmisji w pasmach optycznych mają przewagę nad ich konkurentami w pasmach mikrofalowych.



Rys. 13.9. Porównanie szerokości wiązek promieniowania przy transmisji z Marsa do Ziemi sygnału w paśmie mikrofal, $\lambda = 3 \text{ cm}$, i w paśmie optycznym, $\lambda = 1 \mu\text{m}$.

Przewaga pierwsza związana jest z pasmem, w którym można przesyłać informację. Szerokość wykorzystywanego pasma jest tym większa, im większa jest częstotliwość fali nośnej. W zakresie częstotliwości mikrofalowych pasmo wykorzystywane do transmisji nie przekracza 20% wartości częstotliwości nośnej. Dla częstotliwości fali nośnej 30 GHz pasmo transmisji nie przekracza 6 GHz. W zakresie częstotliwości optycznych, dla częstotliwości fali nośnej 200 THz, 1% pasmo wynosi 1000 GHz. Prędkości transmisji mierzone w bitach/sekundę mogą być o dwa rzędy wielkości większe.

Drugą czynnik stanowiący o wyższości tych pasm związany jest z możliwością koncentracji wypromieniowanej wiązki. Zagadnienie to dyskutowano wcześniej w punkcie 13.2.3. Możliwość skupienia wiązki odgrywa szczególnie dużą rolę przy transmisjach na duże odległości. Wykresy na rys. 13.4 pokazują, że wzmocnienia optycznych układów ogniskujących są o kilka rzędów wielkości większe od wzmocnień anten mikrofalowych. Jak istotne ma to znaczenie przy transmisji z Marsa do Ziemi pokazuje rys. 13.9. Koncentracja energii wysyłanej fali w wąskim stożku pozwala zwiększyć zasięg łącza bądź, dla określonej odległości między nadajnikiem i odbiornikiem, zmniejszyć moc emitowanego przez nadajnik sygnału.

Trzecia przewaga wynika bezpośrednio z drugiej. Skupienie emitowanego sygnału pozwala zmniejszyć moc nadajnika, a tym samym pobieraną moc z układu zasilania. W przypadku satelity czerpiącego energię z baterii słonecznych ma to istotne znaczenie. Maleją rozmiary anten, a tym samym maleje masa łącza transmisyjnego.

Ostatnia kwestia związana jest z bezpieczeństwem transmitowanych informacji. Aby odebrać sygnał transmitowany silnie skupioną wiązką optyczną między satelitami, należy

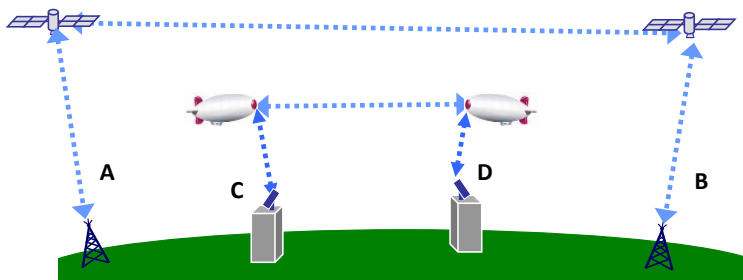
umieścić dodatkowy odbiornik w przestrzeni kosmicznej, na prostej łączącej nadajnik z odbiornikiem. Jest to praktycznie niemożliwe.

Łącza optyczne funkcjonujące w przestrzeni kosmicznej można podzielić na trzy grupy.

- łącza Ziemia–satelita i satelita–Ziemia z propagacją częściowo w atmosferze. Parametry transmisji są do pewnego stopnia zależne od warunków atmosferycznych (turbulencje, mgła, chmury, deszcz). W tej grupie szczególnie liczne i ważne są transmisje obrazów z satelitów LEO poruszających się na niskich orbitach i obserwujących powierzchnię Ziemi.
- łącza satelita–satelita, konstruowane do połączeń między satelitami GEO umieszczonymi na orbicie geostacjonarnej, a także do transmisji międzyorbitalnych, między satelitami GEO i poruszającymi się na niskich i średnich orbitach kołowych LEO/MEO.
- łącza stacji naziemnej z odległym satelitą, wymagają specjalnych, nietypowych rozwiązań zarówno nadajników, jak i odbiorników. Pracują przy niewielkich szybkościach transmisji ze względu na niski poziom mocy docierającej do odbiorników. Znanym wydarzeniem w świecie telekomunikacji stało się połączenie Ziemia–Mars opisane w publikacji z 2006 roku.

Łącza do transmisji między satelitarnej są intensywnie rozwijane i doskonalone. Należy oczekiwać kolejnych rozwiązań zwiększających szybkość transmisji danych.

Na rysunku 13.10 przedstawiono ilustrację optycznego systemu transmisyjnego realizującego szybkie połączenia między odległymi punktami. Punkty A i B są odległe o setki i tysiące kilometrów. Do ich połączenia nie można użyć naziemnej sieci światłowodowej. Połączenie realizowane jest z użyciem łącza optycznego między dwoma satelitami oraz dwóch łączy Ziemia–satelita.



Rys. 13.10. Ilustracja wykorzystania łączy optycznych do transmisji między punktami na powierzchni Ziemi. Łącze satelitarne tworzy połączenie między punktami A i B odległymi o tysiące kilometrów. Łącze z połączeniem między balonami stratosferycznymi wykorzystane do transmisji między punktami C i D odległymi o dziesiątki kilometrów.

Punkty C i D odległe są o kilkadziesiąt kilometrów. Sieć światłowodowa nie może być użyta, a odległość między punktami końcowymi jest za duża, by użyć łącza FSO Ziemia–Ziemia. Nad punktami C i D, na wysokości około 20 km umieszczono wypełnione helem balony/

sterowce na uwięzi. Na balonach umieszczono transpondery, układy nadawczo-odbiorcze i zrealizowano trzyetapowe łącze optyczne.

Satelitarne łącza optyczne pracują, wykorzystując pasmo promieniowania w zakresie podczerwieni 700–1600 nm. Dwa podpasma stosowane są szczególnie często: bliska podczerwień 780–850 nm oraz pasmo trzeciego okna światłowodowego 1520–1600 nm. W obu podpasmach opanowano technologię wytwarzania wielu elementów łączy, co ułatwia pracę konstruktorom. Jako źródła sygnału optycznego wykorzystywane są lasery diodowe AlGaAs na pasmo 830 nm i lasery DFB na pasmo 1550 nm, o mocy 30–400 miliwatów. W wielu łączach zastosowano pompowane diodowo lasery Nd/YAG o mocach kilku, a nawet kilkuset watów.

Optyczne łącza satelitarne są udoskonalane i tworzone są nowe rozwiązania. Jak wspomniano, łącza te wykorzystywane są także dla celów militarnych. To ważny powód, by nie publikować ich parametrów i sposobu pracy.

13.4.2. Naprowadzanie, wykrywanie i śledzenie

Wykrywanie, naprowadzanie i śledzenie obustronne są ważnymi problemami automatyki systemu transmisji sygnałów mikrofalowych i optycznych między oddalonymi obiektami. Aby wyjaśnić problem, należy wrócić do zależności (13-11) i (13-13), które pozwalają określić moc sygnału transmitowanego między nadajnikiem a odbiornikiem. W zależnościach tych pojawiają się parametry nazywane wzmocnieniem anteny/układu skupiającego nadajnika i odbiornika. Wzmocnienia G_{ND} i G_{OD} związane są z parametrami wiązki zależnościami (13-10), która zakłada gaussowski, nierównomierny rozkład gęstości mocy wiązki – rys. 13.3B. Moc odbierana przez odbiornik będzie maksymalna, jeśli oś wiązki sygnału optycznego pokrywa się z prostą łączącą nadajnik i odbiornik.

Na rysunku 13.11 pokazano sytuację, gdy odbiornik SAT 2 nie leży na osi wiązki. Odbiornik znajduje się w miejscu, w którym gęstość mocy docierającego do niego sygnału jest mniejsza od maksymalnej. Jeśli kąt między obu prostymi wynosi δ_{ND} , to wzmocnienie nadajnika maleje od wartości maksymalnej G_{ND} do wartości G'_{ND} , zgodnie z zależnością (13-14).

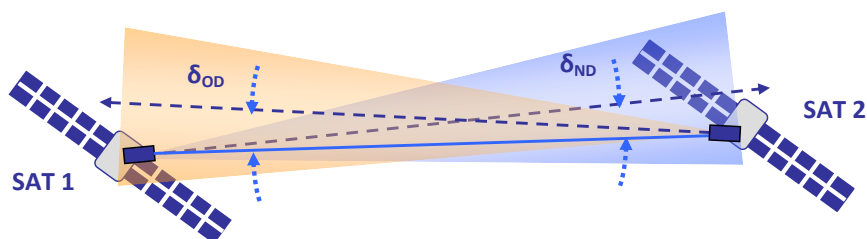
$$G'_{ND} = G_{ND} \exp[-(2\delta_{ND}/\theta_{ND})^2]; \quad (13-14)$$

Podobnie maleje wzmocnienie odbiornika G_{OD} , jeśli oś największej czułości nie pokrywa się z prostą łączącą nadajnik z odbiornikiem. Na rys. 13.11 ten kąt odchylenia oznaczono przez δ_{OD} . Niedoskonałe ustawienie kierunków emisji sygnału nadajnika i odbioru odbiornika powoduje zmniejszenie mocy odbieranej aż do utraty sygnału.

Przyczyny niedokładnego ustawienia warunków transmisji są różnorokie:

- niedokładne określenie kierunku,
- ruch nadajnika i odbiornika względem punktu odniesienia (gwiazdy),
- niedoskonałość aparatury kierującej wiązką,

- źle skompensowany ruch-obrót nadajnika i odbiornika,
- turbulencje powietrza, gradienty temperatury atmosfery (wpływ atmosfery jest większy przy transmisji z Ziemi do satelity niż odwrotnie).



Rys. 13.11. Łącze optyczne między satelitami SAT 1 i SAT 2. Oś stożka sygnału optycznego propagowanego przez SAT 1 odchylna jest o kąt δ_{ND} od prostej łączącej satelity. Oś stożka sygnału propagowanego przez SAT 2 odchylna jest o kąt δ_{OD} od wymienionej prostej.

Problem doboru optymalnych warunków transmisji między nadajnikiem i odbiornikiem jest na tyle poważny, że pomaga go rozwiązać specjalny układ automatyki instalowany w nadajniku i odbiorniku. Im większa odległość między nadajnikiem a odbiornikiem, im mniejsza długość fali i węższa wiązka, tym trudniej wykryć położenie nadajnika i ustawić własny system optyczny na odbiór maksimum mocy. Jeśli transmisja ma miejsce między obiektami poruszającymi się, np. między satelitami, samolotami czy też samolotem i anteną naziemną, to po wzajemnym wykryciu należy utrzymać transmisję mimo zmiany położenia i odległości. Ten stan nazywany jest śledzeniem.

Zagadnienia wykrywania i śledzenia jednostronnego i wzajemnego przez nadajnik i odbiornik są trudne, ale możliwe do rozwiązania. Aby docenić wagę problemu, należy mieć na uwadze fakt, że niskoorbitalne satelity LEO wykonują wielką liczbę obserwacji powierzchni Ziemi i wyniki obserwacji transmitują łączyami optycznymi do nieruchomych stacji naziemnych. Stosowane są w takich przypadkach wyrafinowane układy automatyki. Często stosuje się dodatkową, niewielką modulację położenia wiązki, aby ułatwić działanie automatyki systemu.

13.4.3. Porównanie transmisji radiowej i optycznej

Rozwój technologii ostatnich lat umożliwia budowę satelitarnych systemów transmisyjnych na falach radiowych, w pasmach mikrofalowych i milimetrowych, oraz z użyciem sygnałów o częstotliwościach optycznych. Systemy takie są instalowane i wykorzystywane równolegle, gdyż każdy z nich ma swoje zalety i przewagi nad innymi. Aby zdawać sobie sprawę z ich zalet i niedostatków, trzeba porównać ich właściwości. Z poprzednich punktów wiemy o zasadniczej różnicy kątów rozbieżności wiązek promieniowania w pasmach mikrofalowych i optycznych. Różnice te są widoczne na rys. 13.4 i rys. 13.9.

Aby podkreślić różnice i skutki ich obecności, wykonano symulacyjne obliczenia łączy satelitarnych do pracy w pasmach milimetrowych dla 32 GHz i 60 GHz oraz w paśmie optycznym dla $\lambda = 1534$ nm. Obliczenia symulacyjne wykonano przy następujących założeniach:

- łączy przeznaczone są do transmisji między satelitami, co uniemożliwia użycia anten o dużych rozmiarach.
- Odległość między satelitami wynosi 42 000 km.
- łączy powinny zapewnić transmisję o prędkości 2,5 Gb/s.

Pierwsze z założeń wykluczyło możliwość wykorzystania łączy mikrofalowych z pasma decymetrowego i centymetrowego. Wybrano najniższą częstotliwość fali nośnej na 32 GHz. Wyniki obliczeń symulacyjnych zestawiono w tabeli 13.2.

Tabela 13.2. Porównanie parametrów łączy LEO-GEO na odległość 42 000 km, wykonanych w technice mikrofalowej i optycznej

Częstotliwość / długość fali	32 GHz / 9,4 mm	60 GHz / 5 mm	1535 nm / 193 THz
Moc nadajnika	50 W	20 W	10 W
Prędkość transmisji	2,5 Gb/s	2,5 Gb/s	2,5 Gb/s
Wzmocnienie anteny nadajnika	55 dB	59 dB	109 dB
Średnica anteny nadajnika	2,2 m	1,9 m	10 cm
Wzmocnienie anteny odbiornika	55 dB	59 dB	116 dB
Średnica anteny odbiornika	2,2 m	1,9 m	10 cm
Moc odebrana przez odbiornik	-64 dBm	-64 dBm	-42,4 dBm
Czułość odbiornika	-	-	90 fot./bit
Margines wzmocnienia łączy	3,4 dB	3,0 dB	3,0 dB

Analiza parametrów zestawionych w tabeli 13.2 prowadzi do ciekawych wniosków. Zauważmy najpierw ogromną różnicę w kierunkowościach anten mikrofalowych i ogniskujących systemów optycznych. Jest to różnica około 50 dB. Różnica ta jest częściowo niwelowana większą czułością odbiorników mikrofalowych. Pamiętajmy o tym, że systemy mikrofalowe doskonalone były od 50 lat i są w pełni dojrzałe.

Różnice między wzmocnieniami anten kompensowane są wzrostem ich rozmiarów, a także wzrostem mocy nadajników. O przewadze łączy optycznych nad mikrofalowymi decydują ostatecznie dwa parametry:

- Nadajniki optyczne potrzebują mniej mocy, to znaczy wydajność baterii słonecznych może być znacząco mniejsza. Różnice między 1 W a 20 W nie są istotne w warunkach naziemnych, jednak w warunkach pracy w kosmosie odgrywają dużą rolę.

- Rozmiary anten nadajników i odbiorników w pasmach mikrofalowych są znacznie większe niż w pasmach optycznych. Duże rozmiary anten utrudniają wystrzelenie satelitów na orbitę.

Kończąc opis satelitarnych łączy optycznych, należy mieć na uwadze fakt, że technika ta jest obiektem badań i intensywnego rozwoju, także – niestety – dla potrzeb militarnych.

13.5. Komunikacja optyczna wewnątrz budynków

13.5.1. Uwagi ogólne

Wewnątrz budynków, w pomieszczeniach o różnych rozmiarach pracuje wiele milionów pracowników, którzy z racji swojej pracy muszą mieć kontakt ze światową siecią telekomunikacyjną. Narzędziem ich pracy jest komputer w różnej postaci. W milionach sal szkolnych setki milionów uczniów wpatrują się w ekran, na którym pojawi się obraz piramidy Cheopsa bądź meduzy. Problem doprowadzenia informacji do terminalu końcowego użytkownika, pracownika, ucznia nazywany jest czasami problemem ostatniej mili. Ostatni użytkownik nie jest biernym odbiorcą, sam jest źródłem informacji, które kieruje do odległych kontynentów. Niektórzy autorzy publikacji użyli poszerzonej nazwy: problem pierwszej i ostatniej mili.

Problem pierwszej i ostatniej mili rozwiązywany jest w rozmaity sposób. Jednym z nich jest kwestia dostępu – doprowadzenie do każdego stanowiska łączy światłowodowego. Jednakże to rozwiązanie, choć wydaje się oczywiste i uniwersalne, jest też bardzo kosztowne, a poza tym utrudnia wprowadzanie zmian i reorganizacji. Wygodną metodą pozwalającą na rekonfigurację jest wykorzystanie systemu, w którym ostatnie połączenie z użytkownikiem terminala jest bezprzewodowe.

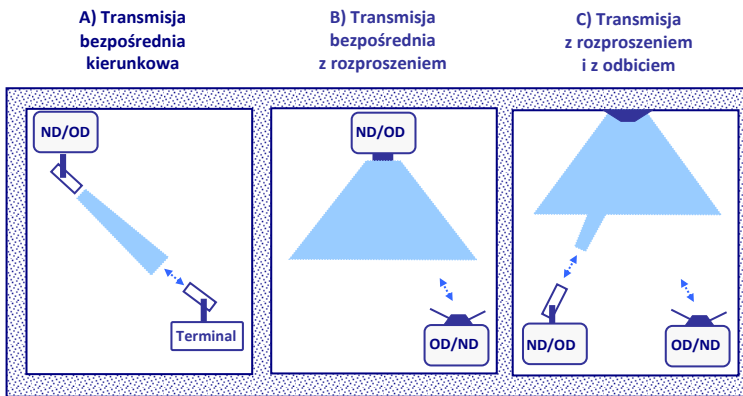
Na obecnym etapie rozwoju telekomunikacji naturalnym rozwiązaniem jest wykorzystanie systemów telefonii mobilnej, pracujących – jak wiemy z rozdziału 12 – w paśmie mikrofalowym o decymetrowej długości fali. Czynnikiem ograniczającym użyteczność tego sposobu są trudności z uzyskaniem dużej szybkości transmisji.

Innym rozwiązaniem kwestii pierwszej i ostatniej mili jest wykorzystanie do transmisji bezprzewodowej pasma fal milimetrowych. W rozdziale 12, w punkcie 12.3, opisano z powodzeniem działające systemy radiowo-swiatłowodowe w zakresie pasma fal milimetrowych 30–90 GHz do realizacji końcowego połączenia. Intensywne prace w obszarze fal milimetrowych trwają i oczekiwane są kolejne rozwiązania o coraz to lepszych parametrach.

Jednocześnie pojawiły się publikacje na temat możliwości wykorzystania pasma częstotliwości terahercowych 0,3–1 THz do realizacji transmisji w ostatnim odcinku. Aktualny stan zaawansowania prac wykorzystujących to pasmo jest niewielki (2018), niemniej wkrótce mogą pojawić się ciekawe i konkurencyjne rozwiązania.

Rozwinięcie przyrządów i technik służących transmisji światłowodowej stworzyło warunki wykorzystania pasm optycznych do rozwiązania problemu pierwszej i ostatniej mili.

W tym punkcie przedstawimy krótki przegląd rozwiązań transmisji bezprzewodowej wykorzystujących promieniowanie widzialne i bliską podczerwień.



Rys. 13.12. Różne rozwiązania transmisji między nadajnikiem i odbiornikiem wykorzystujące sygnały z pasma optycznego we wnętrzach. A) Bezpośrednia transmisja sygnału wąską wiązką do obsługi pojedynczego odbiorcy. B) Transmisja bezpośrednia z rozproszoną, szeroką wiązką obsługującą kilka/kilkanaście odbiorników. C) Transmisja z rozproszoną i odbitą wiązką do obsługi wielu odbiorników.

Na rysunku 13.12 pokazano idee dwóch najważniejszych grup rozwiązań. Rysunek 13.12A ilustruje rozwiązanie wykorzystujące łącze optyczne, w którym między urządzeniami końcowymi ND/OD i OD/ND transmitowane są wąskie, skupione wiązki promieniowania. Takich łączy można zainstalować w dużym pomieszczeniu kilkanaście.

Na rysunku 13.12B i C pokazano ideę systemu transmisyjnego, w którym sygnał uformowany w szeroką, rozproszoną wiązkę oświetla dużą powierzchnię, docierając do kilku, a nawet kilkunastu końcowych użytkowników. Wykorzystywane są także transmisje z odbiciem od reflektora umieszczonego na jednej ze ścian pomieszczenia.

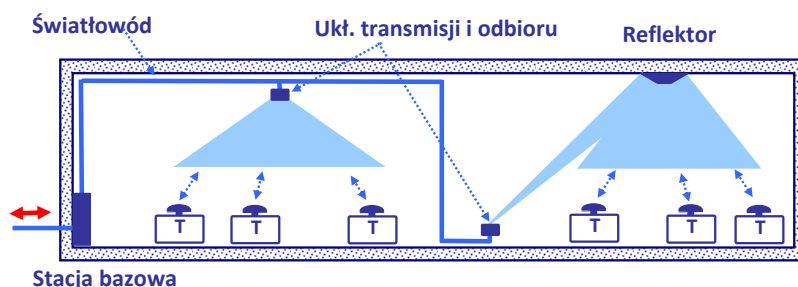
W ostatnich latach opracowano wiele bardzo interesujących systemów do transmisji wewnątrz pomieszczeń. Najważniejszym celem nowych opracowań jest zwiększenie szybkości transmisji informacji przy możliwie niewielkim wzroście kosztów.

13.5.2. Systemy z szeroką wiązką

Prostym i naturalnym rozwiązaniem utworzenia bezprzewodowego łącza optycznego, które połączy końcowego użytkownika z siecią telekomunikacyjną jest przestrzenne rozmieszczenie układów nadawczo-odbiorczych formujących szerokie wiązki promieniowania. Promieniowanie „oświetla” duże powierzchnie pomieszczeń, gdzie zlokalizowane są terminale końcowych użytkowników. Na rysunku 13.13 pokazano dwa rozwiązania. W pomieszczeniu z lewej strony układ nadawczo-odbiorczy umieszczono wysoko, w pobliżu sufitu. Szeroka wiązka skierowana w dół trafia do wielu układów odbiorników. Jest to

transmisja bezpośrednia, w której promieniowanie między nadajnikiem a odbiornikiem propagowane jest po najkrótszej drodze.

Inne rozwiązanie pokazano w pomieszczeniu z prawej strony. Wiązka emitowana przez nadajnik oświetla reflektor umieszczony na suficie. Po odbiciu skierowana jest do terminali użytkowników. Wadą tego rozwiązania jest zmniejszenie poziomu mocy sygnału docierającego do odbiornika oraz zmniejszenie pasma modulacji w wyniku interferencji sygnałów docierających drogami o różnej długości, co może doprowadzić do zaniku sygnału. Tak więc rozwiązanie z reflektorami ma ograniczoną użyteczność.



Rys. 13.13. Idea działania bezprzewodowej sieci połączeń końcowych użytkowników z wykorzystaniem pasma optycznego i szerokich wiązek promieniowania. W pomieszczeniu z lewej strony promiennik umieszczono pod sufitem. W pomieszczeniu z prawej strony pod sufitem umieszczono reflektor.

Łąca optyczne krótkiego zasięgu wykorzystują najczęściej pasmo bliskiej podczerwieni. Ich nadajniki pracują w paśmie 780–950 nm i konstruowane są w oparciu o technologię krzemową, tanią i dobrze opanowaną. Najczęściej są to diody LED, o wystarczającej mocy i paśmie modulacji, bezpieczne i tanie. Najprostszym i dobrym rozwiązaniem jest łącze typu IM-DD, z prądową modulacją mocy i detekcją bezpośrednią. Aby zminimalizować ograniczenia charakterystyki modulacji, wynikające z pojemnościowego charakteru impedancji diody LED, elementami indukcyjnymi doprowadzić można obwód diody do rezonansu.

Opisywane łącza optyczne pracują w warunkach wysokiego poziomu szumów. Źródłami szumów są – poza szumami termicznymi i szumami śrutowymi fotodiody i przedwzmacniacza – także promieniowanie słoneczne i sztuczne źródła światła (żarówki, lampy fluorescencyjne, jarzeniowe itp.). Obfitość szumów powoduje zmniejszenie zasięgu łącza, wzrost stopy błędów, a niekiedy konieczność powtarzania transmisji.

Kolejnym krokiem na drodze rozwoju było opracowanie techniki łączy optycznych pracujących w paśmie częstotliwości widzialnych 380–780 nm. W ciągu kilku lat opracowano szereg systemów o parametrach konkurencyjnych w stosunku do istniejących rozwiązań.

Systemy transmisyjne wykorzystujące pasmo widzialne mają kilka bardzo istotnych zalet: duże pasmo transmisji, nie stwarzają niebezpieczeństwa dla zdrowia ludzi, małą moc

zasilania oraz brak licencjonowanych pasm. Promieniowanie pasma widzialnego nie przechodzi przez ściany pomieszczeń, co zapewnia doskonałą izolację między pomieszczeniami biurowymi czy też szpitalnymi.

Przez analogię do popularnego standardu Wi-Fi² utworzono standard Li-Fi od nazwy *Light Fidelity*. Jest to system transmisji dwukierunkowej o przepustowości dochodzącej do 10 Gb/s. Obszary zastosowań nie zostały do końca określone. Najważniejszym zastosowaniem, dla którego opracowano standard Li-Fi, jest praca w systemach lokalnych sieci transmisyjnych WLAN (ang. *Wireless Local Area Network*). Należy też mieć na uwadze, że tworzone są zasady działania systemów transmisji informacji nazywane IoT, od ang. *Internet-of-Things*. Systemy IoT mogą przesyłać informacje między instalacjami czujników w szpitalach, na dworcach lotniczych, a także informacje o zdarzeniach na drodze między samochodami jadącymi sznurem na autostradzie itp. Warto dodać, że opracowano łącze pracujące w paśmie widzialnym do transmisji podwodnej.

Właściwości diod LED wykorzystywanych w łączach transmisyjnych opisano krótko w rozdziale 3 w punkcie 3.3, koncentrując się na diodach generujących promieniowanie podczerwone. Diody LED wytwarzające promieniowanie widzialne o barwach czerwonej, niebieskiej i zielonej znane są od wielu lat. Odpowiednio dobrana suma tych trzech kolorów tworzy barwę białą. Opracowano strukturę kilku kombinacji diod LED, których połączenie dawało światło białe lub zbliżone do białego. Strukturę trójki diod o barwach niebieskiej, czerwonej i zielonej przedstawiono w dużym uproszczeniu na rys. 13.14A. Dioda wykonana dla potrzeb łącza optycznego powinna z jednej strony wytwarzać światło białe, pełniąc swoje funkcje w strukturze lampy, z drugiej strony każda z diod powinna mieć parametry pozwalające na prądową modulację generowanej mocy.

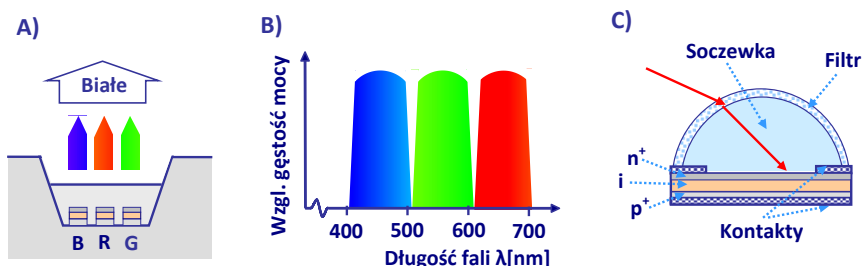
Charakterystyki widmowe diod, które w uproszczeniu pokazano na rysunku 13.14B, są tak dobrane, by uzyskać odpowiednią barwę światła. Opisano struktury czterokolorowe, z czwartą diodą generującą kolor żółty. Pasma modulacji diod LED pełniących podwójną rolę są ograniczone do kilkudziesięciu megaherców. Jeśli zastosować modulację WDM i każdą diodę modulować odrębnym sygnałem, to szybkość transmisji rośnie trzy-, czterokrotnie. Powszechnie w łączach Li-Fi stosuje się modulacje na podnośnych. Transmitowane elektryczne sygnały cyfrowe wykorzystują modulację wielostanową. Tak więc prędkość transmisji łącza Li-Fi może dochodzić do 10 Gb/s.

W strukturze lamp umieszcza się siatkę diod LED. Zwykle cztery z nich poddawane są równolegle modulacji. Uzyskuje się wtedy szeroką wiązkę, w polu oświetlenia której można umieścić odbiorniki.

Fotodiody p-i-n stosowane w łączach Li-Fi mają konstrukcję dostosowaną do warunków, co pokazano na rys. 13.14C. Specjalnie skonstruowana soczewka skupia promienio-

² Wi-Fi skrót od nazwy *Wireless Fidelity*, oznaczającej standard transmisji radiowej używanej przy budowie bezprzewodowych sieci komputerowych. Systemy Wi-Fi wykorzystują pasmo 2400 do 2485 MHz i 4915 do 5825 MHz i osiągają prędkość transmisji do 300 Mb/s.

wanie na powierzchni fotodiody. Ważną rolę odgrywa filtr, który w przypadku użycia multipleksacji WDM selekcjonuje pożądany składnik widma. Poziom szumów jest oczywiście wysoki. Filtr fotodiody redukuje jego wartość. Dodatkowo umieszczone w obwodzie fotodiody filtry elektryczne oddzielają pożądany sygnał od szumu.



Rys. 13.14. Elementy łącz optycznych Li-Fi. A) Trzy diody LED o barwach niebieskiej, czerwonej i zielonej tworzą punkt światła białego lampy LED. Moc każdej z nich można modulować. B) Przybliżone charakterystyki widmowe trójki diod LED. C) Fotodioda p-i-n z soczewką i filtrem.

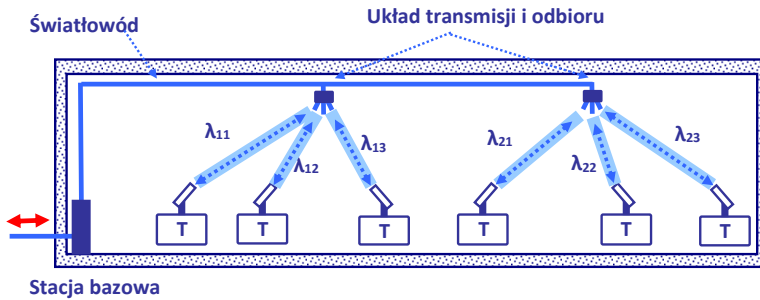
Bezprzewodowe systemy transmisji wykorzystujące widzialny zakres promieniowania są intensywnie rozwijane. Należy oczekiwać kolejnych interesujących rozwiązań i zastosowań.

13.5.3. Systemy ze skupioną wiązką

W wielu przypadkach istnieje potrzeba użycia łącza bezprzewodowego o dużej szybkości transmisji, rzędu gigabajtów na sekundę. Rozwiązanie w takim przypadku musi być oparte na wykorzystaniu jako fali nośnej sygnału optycznego z pasma podczerwieni, generowanego przez laser, a nie przez diodę LED. Sygnał optyczny powinien następnie być poddany modulacji, która pozwoli uzyskać odpowiednie parametry transmisji. Opisywane układy pracują zwykle w podpaśmie C 1530–1560 nm trzeciego okna światłowodu, gdyż dla tego pasma skonstruowano komplet przyrządów do generacji, modulacji, wzmacniania i detekcji.

Przykład organizacji bezprzewodowej sieci z transmisją sygnałów pasma optycznego pokazano na rys. 13.15. Podłączony do sieci światłowodowej układ transmisji i odbioru transmituje „do” i odbiera „od” kilku, czy też kilkunastu końcowych użytkowników strumienie informacji, wykorzystując odrębne długości fal nośnych. Szybkość transmisji w przypadku *downlink* może być równa kilka Gb/s, dla łącza *uplink* jest zwykle mniejsza. Dla tak określonych warunków pracy łącza konieczne jest użycie multipleksacji WDM. Odpowiednią szybkość transmisji może zapewnić użycie modulacji wielostanowej QAM oraz odbiorników koherentnych. Wiązki promieniowania są bardzo wąskie o małym kącie rozbieżności, tory transmisji są krótkie, od kilku do kilkunastu metrów. Układy transmisji i odbioru wyposażone są w aktywne albo pasywne sterowniki wiązek, pozwalające na ich precyzyjne

skierowanie do odbiorników urządzeń końcowych. Układy aktywne pozwalają lokalizować odbiorców sygnałów, a następnie utrzymywać optymalne warunki transmisji.



Rys. 13.15. Idea działania bezprzewodowej sieci połączeń końcowych użytkowników z zewnętrzną siecią komunikacyjną, z wykorzystaniem multipleksacji WDM i nadajników wielowiązkowych do transmisji wąskich, kierowanych wiązek promieniowania podczerwonego.

13.6. Podsumowanie

Optyczna komunikacja bezprzewodowa oznaczana skrótem jako OWC (ang. *Optical Wireless Communication*) jest jedną z kilku uzupełniających technik tworzenia globalnej i lokalnej sieci telekomunikacyjnej. Dla potrzeb transmisji Ziemia–satelita i satelita–satelita opracowano łącza optyczne dalekiego zasięgu o parametrach lepszych niż łącza radiowych pracujących na częstotliwościach mikrofalowych. Opracowanie układów automatyki umożliwiło transmisję sygnałów optycznych między obiektami ruchomymi, satelitami LEO i GEO oraz między samolotami.

Przy transmisjach na odległościach kosmicznych łącza wykorzystujące falę nośną z pasma optycznego, dzięki możliwości skupienia wiązki promieniowania, pozwalają na uzyskanie parametrów transmisji nieosiągalnych w innych pasmach częstotliwości.

Dla potrzeb transmisji Ziemia–Ziemia opracowano rodzinę optycznych łączy bezprzewodowych FSO, które z powodzeniem uzupełniają systemy komunikacji światłowodowej i radiowej telekomunikacji mobilnej. Wykorzystują do transmisji fale nośne z pasm, na które nie potrzeba licencji. Poza tym są łatwe w instalacji i w obsłudze.

Łącza optyczne w zakresie podczerwieni są atrakcyjną i użyteczną alternatywą w stosunku do łączy mikrofalowych dla przenośnych komputerów i terminali telekomunikacyjnych. Jakkolwiek podstawową techniką łączy krótkiego zasięgu jest IM-DD, to możliwe jest wykorzystanie techniki transmisji na podnośnych, multipleksacji WDM i odbioru koherentnego.

Zakres zastosowań łączy optycznych Li-Fi pracujących w paśmie widzialnym jeszcze nie został do końca określony. Należy mieć na uwadze możliwości transmisji informacji między

samochodami, w sieciach czujników różnego rodzaju, w szpitalach i jeszcze wielu innych. Każdy rok będzie przynosił coraz to nowsze, ciekawsze rozwiązania.

Bibliografia rozdziału 13

- 13.1 N. Karafolas, S. Baroni, "Optical Satellite Networks", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 18, No. 12, 2000.
- 13.2 H. Willebrand, B. Ghuman, "Fiber optics without fiber", *IEEE Spectrum*, Vol. 38, No. 8, 2001.
- 13.3 I. Kim, E. Korevaar, "Availability of free space optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems", *Optical Wireless Communications IV. Proceedings of SPIE*, Vol. 4530, 2001, <http://www.ece.mcmaster.ca/~hranilovic/woc/resources/local/spie2001b.pdf>.
- 13.4 R. You, J. Kahn, "Upper-bounding the capacity of optical IM/DD Channels with multiple-subcarrier modulation and fixed bias using trigonometric moment space method", *IEEE Transactions Information Theory*, Vol. 48, No. 2, 2002.
- 13.5 V.W.S. Chan, "Optical Satellite Networks", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, No. 11, 2003.
- 13.6 D.W.K. Wong, G.C.K. Chen, J. Yao, "Optimization of Spot pattern in indoor diffuse optical wireless local area networks", *Optics Express* 3000, Vol. 13, 2005.
- 13.7 R. Ramirez-Iniguez, R.J. Green, "Optical antenna design for indoor optical wireless communication systems", *International Journal of Communication Systems – Special Iss. on Indoor Optical Wireless Communication Systems and Networks*, No. 18, 2005.
- 13.8 J. Akella et al., "Building blocks for mobile free-space-optical networks", *Wireless and Optical Communication Networks*, 2005, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.143.6352&rep=rep1&type=pdf>.
- 13.9 A.K. Majumdar, J.C. Ricklin, "Effects of the atmospheric channel on free-space laser communications", *Proceedings of SPIE*, Vol. 5892, 2005.
- 13.10 A. Biswas, D. Boroson, B. Edwards, "Mars laser communication demonstration: what it would have been", *Proceedings of SPIE*, Vol. 6105, 2006.
- 13.11 A. Sivabalan, J. John, "Improved power distribution in diffuse indoor optical wireless systems employing multiple transmitter configurations", *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 38, 2006.
- 13.12 H.H. Refai et al., "Comparative study of the performance of analog fiber optic links versus free-space optical links", *Optical Engineering*, Vol. 45, No. 2, 2006.
- 13.13 D. O'Brien, G. Parry, P. Stavrinou, "Optical hotspots speed up wireless communication", *Nature Photonics*, Vol. 1, 2007.
- 13.14 S. Das et al., "Requirements and challenges for tactical free-space laser communication", *IEEE Military Communications Conference*, San Diego (USA), 2008.
- 13.15 R.J. Green et al., "Recent developments in indoor optical wireless systems", *IET Communications*, Vol. 2, 2008.
- 13.16 M. Jafar et al., "Evaluation of coverage area for a wide line-of-sight indoor optical free-space communication system employing coherent detection", *The Institution of Engineering and Technology Communications*, Vol. 2, No. 1, 2008.
- 13.17 A.K. Majumdar, J.C. Ricklin, *Free-Space Laser Communications: Principles and Advances*, Springer, 2008.
- 13.18 R.J. Green et al., "Recent developments in indoor optical wireless systems", *IET Communications*, Vol. 2, 2008.
- 13.19 B. Smutny et al., "5.6 Gbps optical intersatellite communication link", *Proceedings of SPIE, Free Space Laser Communication Technologies XXI*, Vol. 7199, 2009.
- 13.20 P. Bharadwaj, B. Deutsch, L. Novotny, "Optical Antennas", *Advances in Optics and Photonics*, Vol. 1, 2009.

- 13.21 K. Kazaura et al., "RoFSO: A universal platform for convergence of fiber and free-space optical communication networks", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 48, 2010.
- 13.22 H. Henniger, O. Wilfert, "An Introduction to Free-space Optical Communications", *Radioengineering*, Vol. 19, No. 2, 2010.
- 13.23 K. Kazaura et al., "RoFSO: A universal platform for convergence of fiber and free-space optical communication networks", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 48, 2010.
- 13.24 D.K. Killinger, J.H. Churnside, L.S. Rothman, *Atmospheric optics, w: Handbook of Optics*, Third Edition (ed.) M. Bass, Vol. 5, McGraw-Hill, 2010.
- 13.25 H. Elgala, R. Mesleh, H. Haas, "Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 49, 2011.
- 13.26 L. Kwonhyung, P. Hyuncheol, J.R. Barry, "Indoor channel characteristics for visible light communications", *IEEE Communications Letters*, Vol. 15, 2011.
- 13.27 W. Ke et al., "4x12.5 Gb/s WDM optical wireless communication system for indoor applications", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 29, No. 7, 2011.
- 13.28 A. Sevincer et al., "LIGHTNETs: Smart LIGHTing and Mobile Optical Wireless NETworks – A Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 15, No. 4, 2013.
- 13.29 Z. Zhu et al., "Performance comparison of analogue inter-satellite microwave photonics link using intensity modulation with direct detection and phase modulation with interferometric detection", *IET Optoelectronics*, Vol. 9, No. 2, 2015.
- 13.30 A. J. Seeds et al., "TeraHertz Photonics for Wireless Communications", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, No. 3, 2015.
- 13.31 T. Cevik, S. Yilmaz, "An Overview of Visible Light Communication Systems", *International Journal of Computer Network & Communications*, Vol. 7, No. 6, 2015.
- 13.32 H. Haas et al., "What is LiFi?", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 34, No. 6, 2016.
- 13.33 A. Gomez et al., "A 50 Gb/s Transparent Indoor Optical Wireless Communications Link With an Integrated Localization and Tracking System", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 34, No. 10, 2016.
- 13.34 A.S. Hamza, J.S. Deogun, D.R. Alexander, "Wireless Communication in Data Centers: A Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 18, No. 3, 2016.
- 13.35 H. Kaushal, G. Kaddoum, "Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 19, No. 1, 2017.
- 13.36 Z. Zeng et al., "A Survey of Underwater Optical Wireless Communications", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 19, No. 1, 2017.
- 13.37 Ch. Chen, W.D. Zhong, D. Wu, "On the Coverage of Multiple-Input Multiple-Output Visible Light Communication", *Journal Optical Communication Network*, Vol. 9, No. 9, 2017.
- 13.38 L.U. Khan, "Visible light communication: applications, architecture, standardization and research challenges", *Digital Comm. and Networks*, No. 3, 2017.
- 13.39 J. Yu, "Photonics-Assisted Millimeter-Wave Wireless Communication", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 53, No. 6, 2017.
- 13.40 T.J. Martin-Mur et al., "Using Optical Communications Links for Deep-Space Navigation", *IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications*, 2017.
- 13.41 K. Yan et al., "Signal Characterization for Indoor Close-Range Free-Space Optical Communications", *17th IEEE International Conference on Communication Technology*, 2017.
- 13.42 T. Koonen, "Indoor Optical Wireless Systems: Technology, Trends and Applications", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 36, No. 8, 2018.
- 13.43 H. Marshoud et al., "Optical Non-Orthogonal Multiple Access for Visible Light Communication", *IEEE Wireless Communications*, 2018.