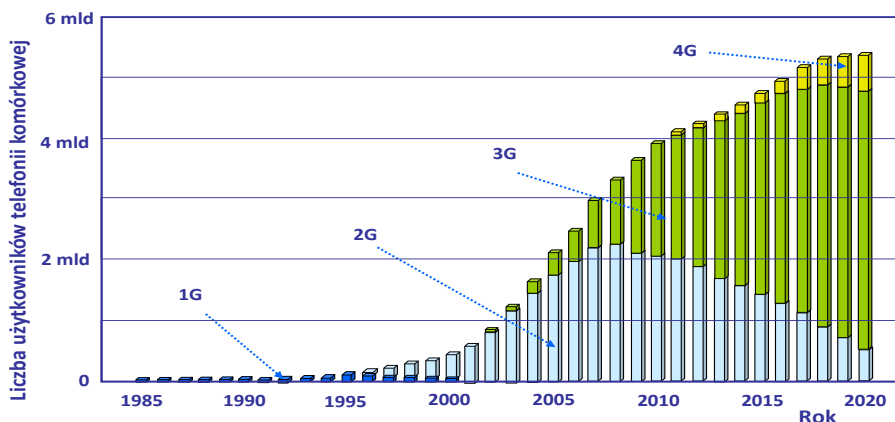


# Rozdział 12

## Systemy radiowo-światłowodowe

### 12.1. Wprowadzenie

Światłowód kwarcowy jako medium transmisyjne zrewolucjonizował technikę transmisji informacji na długich dystansach. O tym już wiemy. Czy w takim razie jest jeszcze miejsce na transmisję radiową? Znamy odpowiedź: oczywiście tak. Cała telefonia komórkowa bazuje na transmisji radiowej wykorzystującej pasma mikrofalowe. Ostatnie dekady są okresem ogromnego, szybkiego rozwoju telefonii komórkowej. Wzrost liczby użytkowników na globie pokazuje rys. 12.1. Jak widać, znaczna większość dorosłych mieszkańców naszej planety korzysta z telefonii komórkowej. Tak już pozostanie, bo zaletą tego systemu jest mobilność, możliwość zmiany miejsca w trakcie transmisji.

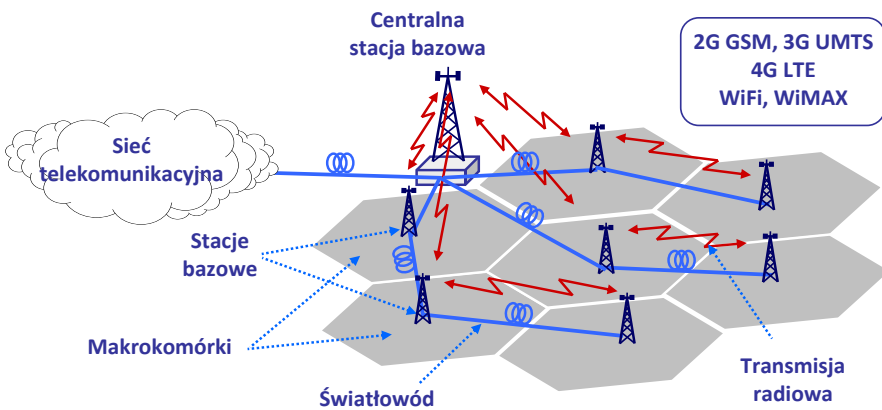


**Rys. 12.1.** Wzrost liczby użytkowników telefonii komórkowej na świecie w ostatnich 30 latach, z bicciem na kolejne generacje. Prawdopodobnie przed rokiem 2020 zostanie uruchomiona 5. generacja, niewidoczna na rysunku.

Bardzo popularnym systemem telefonii komórkowej o największym zasięgu – w pierwszej dekadzie XXI wieku – był należący do drugiej generacji system GSM. Wprowadzenie sieci trzeciej generacji 3G na bazie standardu UMTS zmieniło proporcje. System 3G jest obecnie najpopularniejszy. Czwarta generacja 4G nabiera popularności. Bariery wzrostu są prawdopodobnie koszty budowy systemu. Trwają prace nad urządzeniami i oprogramowaniem piątej generacji 5G. Oczekuje się, że przed 2020 rokiem pojawią się pierwsze sieci.

Obok wzrostu liczby użytkowników telefonów komórkowych bardzo wzrosły możliwości transmisyjne tego urządzenia. Telefony komórkowe, które pierwotnie służyły do prowadzenia rozmów, w krótkim czasie stały się terminalami zdolnymi do transmisji w obie strony filmów w dobrym standardzie. Liczne funkcje, które powierzono iPadom i smartfonom spowodowały, że liczba bitów transmitowanych w systemie wzrosła o wiele rzędów wielkości. W rezultacie systemy telefonii komórkowej przeszły drogę wielokrotnych przekształceń i modyfikacji.

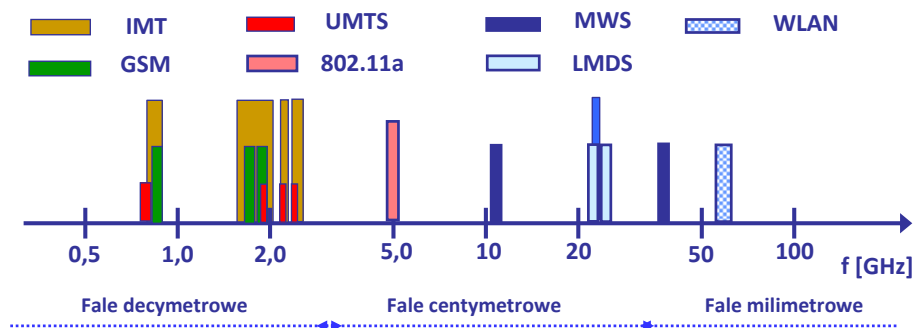
Na rysunku 12.2 z dużym uproszczeniem pokazano strukturę sieci telefonii komórkowej. Nie wchodząc w opis szczegółowy, użytkownik z telefonem komunikuje się z najbliższą stacją bazową drogą radiową. W pierwszych generacjach systemów stacje bazowe łączyły się także za pomocą radiolinii z centralną stacją bazową. Stacja centralna miała połączenie z systemem telekomunikacyjnym. W miarę wzrostu liczby transmitowanych bitów najpierw rosła liczba stacji bazowych i małe rozmiary komórek. Wreszcie sięgnięto po pomoc łączy światłowodowych, które doprowadziły do większości stacji bazowych.



**Rys. 12.2.** Idea współdziałania mobilnej sieci radiowej i sieci światłowodowej. W rozwiązaniach pierwszych generacji stacje bazowe porozumiewały się z centralną stacją bazową drogą radiową, przez użycie radiolinii. Obecnie najczęściej stacje bazowe połączone są łączy światłowodowym z globalną siecią telekomunikacyjną.

W obecnie uruchamianych lub modernizowanych systemach stacje bazowe połączone są światłowodami z centralną stacją bazową. Stacja centralna połączona jest zwykle z globalną, światłowodową siecią telekomunikacyjną i przez nią można dotrzeć z informacją do tysięcy stacji bazowych na całym świecie, a tą drogą do jednego z kilku miliardów użytkowników telefonii komórkowej. Rezultatem prac ostatnich dekad jest powstanie i rozwinięcie mieszanego, dobrze ze sobą współdziałającego, radiowo-światłowodowego systemu

transmisji informacji. Obie techniki: radiowa i światłowodowa przenikają się wzajemnie i uzupełniają. Powstała globalna przestrzeń informacyjna, tzw. infosfera, której obecność i rozliczne zastosowania już wpływają na kształt naszej cywilizacji.



**Rys. 12.3.** Pasma częstotliwości radiowych wykorzystywane w wybranych systemach telekomunikacji mobilnej. IMT – International Mobile Telecommunications-Advanced Standard, GSM – Global System for Mobile Communications, UMTS – Universal Mobile Telecommunications System, 802.11a – jeden ze standardów zalecanych przez organizację IEEE, MWS – Multimedia Wireless System standards, LMDS – „Les messagers du son”, francuska nazwa jednego ze standardów w telekomunikacji mobilnej, WLAN – Wireless Local Area Network.

Mobilna sieć radiowa wykorzystuje rozmaite pasma częstotliwości do transmisji sygnałów między stacją bazową a terminalem użytkownika. Podział pasm częstotliwości i określenie ich przeznaczenia dokonują odpowiednie gremia międzynarodowe. Dla transmisji radiowej w sieciach mobilnych przeznaczono kilka pasm w okolicach 2 GHz. Większość połączeń dla standardów GSM i UMTS realizowanych jest właśnie w tych pasmach. Wybór ten ma określone zalety. Fala elektromagnetyczna o długości około 15 cm przenika przez ściany budynków, przez szkło okien w domach i samochodach ze stosunkowo małymi stratami. Problemy z niewielką szerokością pasm transmisyjnych rozwiązano, stosując wielostanową modulację amplitudy i fazy. Poza tym pasma pracy modulowanych laserów, czy też modulatorów zewnętrznych, obejmują bez problemu zakresy częstotliwości poniżej 10 GHz.

Możliwości zwiększenia szybkości transmisji informacji drogą radiową daje wykorzystanie pasm fal milimetrowych. Obok popularnych systemów kolejnych generacji, prowadzone są równolegle intensywne prace nad systemami, w których do transmisji między stacją bazową a terminalem użytkownika wykorzystywane są sygnały o częstotliwościach z pasma fal milimetrowych. Opracowano wiele bardzo interesujących rozwiązań układów optycznej transmisji dla pasma transmisji radiowej w okolicach 60 GHz. Opisowi tych rozwiązań poświęcono w tym rozdziale odrębny punkt.

## 12.2. Architektura sieci radiowo-światłowodowych RoF

### 12.2.1. Zasady pracy systemów radiowo-światłowodowych

Idea współpracy sieci radiowej i światłowodowej jest prosta i czytelna. Pokazano ją na rys. 12.4. Informacja dociera do użytkownika dwuetapowo. Jeden z odcinków to łącze światłowodowe, pracujące w jednej z wielu konfiguracji. Na tym odcinku informacja naniesiona jest na falę nośną o częstotliwości optycznej. Odcinek drugi to transmisja radiowa między terminalem użytkownika a stacją bazową. Na tym odcinku informacja naniesiona jest na falę nośną o częstotliwości radiowej. Stacja bazowa jest ważnym składnikiem tej drogi, to tam następuje wymiana/zamiana nośnych. Proces przeniesienia informacji z jednej fali nośnej na drugą jest cechą charakterystyczną systemów radiowo-światłowodowych.



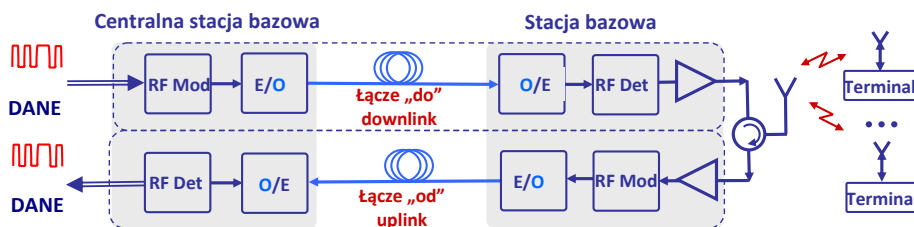
**Rys. 12.4.** Idea wykorzystania w systemie telefonii komórkowej łącza światłowodowego do połączenia stacji bazowej z centralną stacją bazową i międzynarodową siecią telekomunikacyjną.

Częstotliwości sygnałów transmitowanych w obie strony drogą radiową leżą w paśmie mikrofalowym, zwykle – jak pokazano na rys. 12.3 – w okolicach 2 GHz. W niektórych rozwiązaniach wykorzystywane jest pasmo fal milimetrowych. Prędkość transmisji połączenia radiowego zależy od formatu modulacji, który stosuje się w danym systemie użytym do transmisji. W systemach 3. generacji wynosiła około 20 Mb/s. W systemach 4. generacji prędkość transmisji do terminalu użytkownika może dochodzić do 300 Mb/s, a w kierunku odwrotnym, do stacji bazowej, do 75 Mb/s. Jest oczywiste, że stacja bazowa, obsługując 100 użytkowników, musi użyć światłowodu do transmisji strumieni informacji do i od centralnej stacji bazowej. Stacja centralna połączona jest ze światłowodową siecią telekomunikacyjną, a przez nią z całym globem.

Opracowane protokoły pozwalają praktycznie na wzajemne połączenie użytkowników w każdym punkcie kuli ziemskiej. Oczywiście na morzach i oceanach nie umieszcza się stacji bazowych. W takich przypadkach użytkownicy korzystają z połączeń satelitarnych.

Jak pokazano na rys. 12.2 centralna stacja bazowa współpracuje z kilkoma czy kilkunastoma stacjami bazowymi. Konfigurując połączenia, wykorzystuje się najczęściej strukturę gwiazdy lub pierścienia. Odległości między stacją centralną a stacjami bazowymi są niewielkie, zwykle poniżej 10 km, efekty dyspersji nie odgrywają istotnej roli, a z tłumieniem

sygnałów można sobie poradzić, dodając wzmacniacze na pasma o częstotliwościach radiowych.



**Rys. 12.5.** Podstawowa struktura łącza światłowodowego do transmisji między centralną stacją bazową a stacją bazową (łącze downlink) i w drugim kierunku (łącze uplink).

Na rys. 12.5 pokazano podstawową strukturę łącza światłowodowego, którym transmitowane są sygnały między centralną stacją bazową a stacją bazową. Mówiąc o systemach RoF, mamy na myśli dwa rodzaje łącza transmisyjnych. Docierający do stacji centralnej strumień informacji przeznaczony jest dla setek użytkowników odbierających informacje wypromieniowane przez anteny stacji bazowych. Strumień ten po podzieleniu kierowany jest ze stacji centralnej do właściwej stacji bazowej łączem „do”, zwanym *downlink*. Anteny stacji bazowej transmitują drogą radiową informację do ruchomych terminali i proces transmisji kończy się po odbiorze przez terminal.

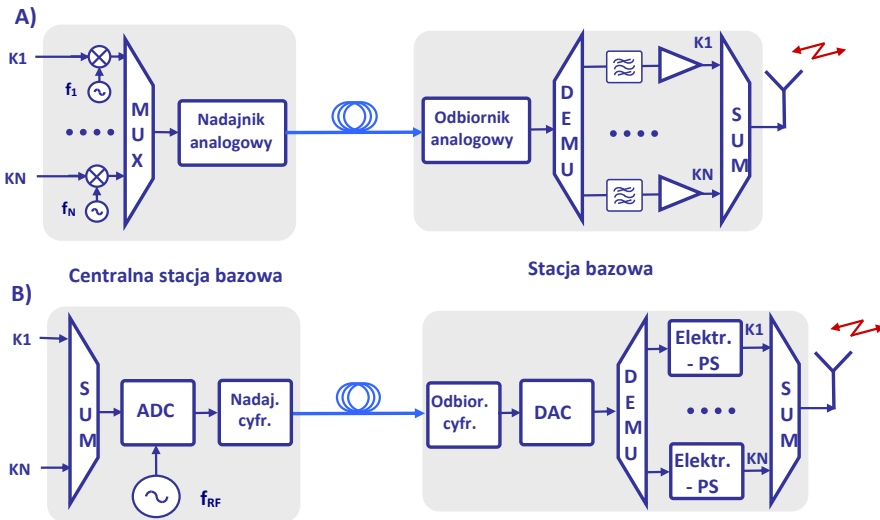
Sygnały kierowane od użytkowników do anten stacji bazowych wykorzystują fale nośne o częstotliwości radiowej, różniące się nieznacznie między sobą. W stacji bazowej odebrane sygnały są zwykle sumowane i kierowane do modulatora łącza optycznego. Po naniesieniu na falę nośną o częstotliwości optycznej sygnał transmitowany jest światłowodem „od” stacji bazowej do stacji centralnej. Łącze to nazywane jest *uplink*. Ze stacji centralnej, po odpowiednim przetworzeniu, informacje kierowane są do zewnętrznych miejsc przeznaczenia.

Charakterystyczną cechą systemu jest zróżnicowanie mierzonej w bitach ilości informacji przesyłanej od stacji centralnej do stacji bazowej i w kierunku przeciwnym. Użytkownicy terminali są raczej odbiorcami informacji niż jej źródłami. Z tego powodu szybkość transmisji łącza *downlink* jest zwykle kilkakrotnie większa niż *uplink*.

Jak wiemy, problem transmisji informacji łączem optycznym może być rozwiązany w rozmaity sposób. Stosowane w praktyce systemy można podzielić na dwie grupy. Pierwsza z grup to łącza wykorzystujące transmisję analogową. Schemat ideowy łącza tej grupy pokazuje rys. 12.6A.

Sygnały niosące informacje z kanałów K1-KN, oczywiście zapisane cyfrowo, kierowane są do modulatorów i nanoszone na fale nośne o częstotliwościach radiowych  $f_1-f_N$ . Zsumowane sygnały kierowane są do optycznego nadajnika analogowego, wykorzystującego opisaną w punkcie 11.4 multipleksację na podnośnych. Po transmisji światłowodem do

odbiornika optycznego stacji bazowej fala nośna o częstotliwości optycznej zostaje usunięta. Sygnał kierowany jest do kanałów K1-KN i poddany obróbce. Sygnały są zwykle filtrowane, wzmacniane do odpowiedniego poziomu, następnie sumowane i kierowane do anteny.



**Rys. 12.6.** Dwie zasadnicze struktury łączy optycznych downlink do transmisji informacji od stacji centralnej do stacji bazowej. A) Optyczne łącze z transmisją analogową i modulacją na podnośnych. B) Optyczne łącze z transmisją cyfrową. ADC i DAC – przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe, MUX, DEMUX i SUM – układy sumowania i rozdzielania sygnałów elektrycznych.

Odebrane przez antenę sygnały, wysłane przez użytkowników na częstotliwościach radiowych, transmitowane są w podobnym procesie łączem *uplink* do stacji centralnej. Dopiero w stacji centralnej usuwane są nośne o częstotliwości radiowej i informacja staje się czysto cyfrową.

Łącze optyczne *downlink* może pracować inaczej, jeśli strumień danych docierających do stacji centralnej przesyłany jest do stacji bazowej bez użycia nośnych o częstotliwości radiowej – rys. 12.6B. Nadajnik cyfrowy wykorzystuje zwykle multipleksację WDM, przeznaczając dla każdej ze stacji bazowych jedną długość fali. Informacje dla różnych użytkowników wysyłane są z wykorzystaniem multipleksacji z podziałem czasowym TDM. Zwykle równocześnie przesyłana jest informacja o wzorcowej częstotliwości radiowej  $f_{RF}$ .

Stacja bazowa po usunięciu nośnej optycznej dzieli strumień informacji do odpowiednich kanałów. W każdym kanale w procesie modulacji dane nanoszone są na radiowe fale nośne. Procesy te realizują układy oznaczone jako Elektr.-PS. Po odpowiedniej filtracji i wzmocnieniu sygnały ze wszystkich kanałów są sumowane i kierowane do anteny stacji bazowej.

Transmisja danych łączem optycznym *uplink* może być także czysto cyfrowa. Sygnały odebrane od użytkowników przez stację bazową są przesyłane – po usunięciu fali nośnej – pakietami do stacji centralnej.

Zastosowanie transmisji analogowej do przesyłania łączem światłowodowym grzebienia zmodulowanych sygnałów z wykorzystaniem multipleksacji na podnośnych jest funkcjonalnie procesem prostszym i dlatego szerzej omówione zostaną dwa najpopularniejsze układy łącz.

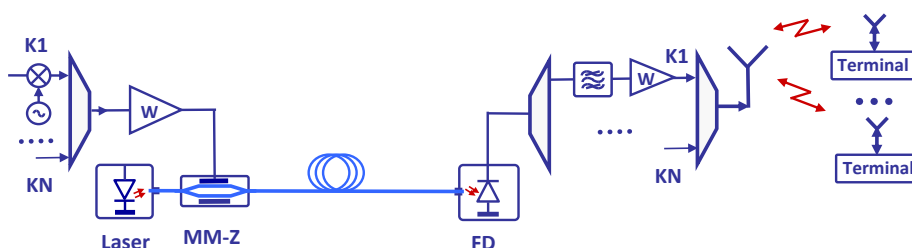
### 12.2.2. Łącza optyczne z modulacją mocy i detekcją bezpośrednią

Optyczne łącza analogowe typu IM-DD z modulacją mocy i bezpośrednią detekcją zostały szczegółowo opisane w rozdziale 7. Najprostszym układowym rozwiązaniem jest doprowadzenie sygnału niosącego informację do diody laserowej i modulacja jej mocy. Mechanizmy zamiany sygnału elektrycznego na optyczny w diodzie laserowej i sygnału optycznego na elektryczny w fotodetektorze są tego rodzaju, że straty transmisji – pomijając tłumienie światłowodu – przewyższają zwykle 10 dB. Jak wykazano w rozdziale 7, łącze z zewnętrznym modulatorem Macha-Zehndera ma większe wzmocnienie i większy zakres pracy liniowej. Ideę układu takiego łącza w wersji *downlink* pokazano na rys. 12.7.

Układ transmituje między innymi sygnał kanału K1, którego napięcie  $v_1(\omega_1 t)$  można opisać zależnością (12-1).

$$v_1(\omega_1 t) = \text{Re}\{V_1(t)e^{j(\omega_1 t + \varphi_1)}\} = \text{Re}\{|V_1(t)|e^{j\psi_1(t)}e^{j(\omega_1 t + \varphi_1)}\}; \quad (12-1)$$

Na falę nośną o pulsacji  $\omega_1$  nanosi się informację, modulując jej amplitudę  $|V_1(t)|$  i fazę  $\varphi_1(t)$ . Podobnie postępuje się w kolejnych kanałach transmisyjnych.



**Rys. 12.7.** Układ łącza optycznego downlink z multipleksacją na podnośnych wykorzystującego modulację mocy i detekcję bezpośrednią IM-DD, z zewnętrznym modulatorem MM-Z.

Obiektem równoczesnej transmisji jest suma  $v_2(t)$  sygnałów pochodzących z  $N$  kanałów. Są to fale nośne o pulsacjach  $\omega_1, \dots, \omega_k, \dots, \omega_N$ , zmodulowane amplitudowo i fazowo odrębnymi strumieniami informacji, co opisuje zależność (12-2).

$$v_{\Sigma}(t) = \operatorname{Re}\{V_{\Sigma}(t)\} = \sum_{k=1}^N \operatorname{Re}\{V_k(t)e^{j(\omega_k t + \varphi_k)}\} = \operatorname{Re}\left\{\sum_{k=1}^N |V_k(t)|e^{j\psi_k(t)}e^{j(\omega_k t + \varphi_k)}\right\}; \quad (12-2)$$

W opisywanym układzie modulację mocy optycznej otrzymuje się, modulując napięciem  $v_{\Sigma}(t)$  transmisję  $T(v_{\Sigma})$  modulatora MM-Z (patrz zależność (7-20)).

$$T[v_{\Sigma}(t)]|_{V_0=v_{\pi}/2} = T_{\text{MAX}} \left[ \frac{1}{2} + S_{\text{MZ}}v_{\Sigma}(t) + \dots \right]; \quad (12-3)$$

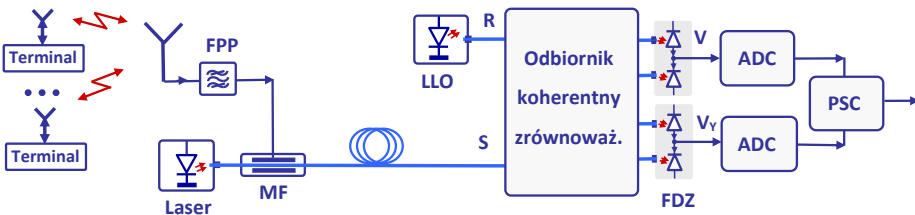
Sygnal optyczny  $P_N(t)$  na wyjściu nadajnika można zapisać następująco:

$$P_N(t) = P_0 T[v_{\Sigma}(t)]; \quad (12-4)$$

Zmodulowany sygnał optyczny transmitowany jest do odbiornika, gdzie trafia do fotodetektora. Jak wyjaśniono w rozdziale 7, prąd w obwodzie fotodiody jest proporcjonalny do wartości chwilowej mocy optycznej i odtwarza z dobrą dokładnością przebieg  $v_{\Sigma}(t)$  opisany zależnością (12-2).

### 12.2.3. Łąca optyczne z modulacją fazy i detekcją koherentną

Przy transmisji grzebienia częstotliwości chwilowe napięcie  $v_{\Sigma}(t)$  może osiągać duże wartości. Stwarza to możliwość powstawania zniekształceń nieliniowych, wśród których istotną rolę odgrywają zniekształcenia intermodulacyjne. Tak więc ważnym parametrem łącza jest zakres liniowej pracy, określony maksymalną wartością mocy transmitowanego sygnału, poniżej której poziom generowanych zniekształceń intermodulacyjnych nie przekracza dopuszczalnej wartości.



**Rys. 12.8.** Układ łącza optycznego uplink z multipleksacją na podnośnych, wykorzystującego modulację fazy modulatorem MF i odbiornik koherentny. FPP – filtr pasmowo-przepustowy, ADC – przetworniki analogowo-cyfrowe, PSC – układ przetwarzania sygnałów cyfrowych.

Opisywany w tym punkcie i pokazany na rys. 12.8 układ łącza *uplink* z modulacją fazy ma znacząco większy zakres pracy liniowej w porównaniu z opisanym wyżej łączem



wykorzystującym modulację amplitudy i bezpośrednią detekcję IM-DD. Ta istotna zaleta okupiona jest koniecznością użycia fazoczułego odbiornika koherentnego.

W rozdziałach 6 i 9 opisano parametry modulatora fazy i łącza z modulatorem fazy. Dla rozważań w tym punkcie przyjęto, że natężenie pola elektrycznego  $E_N$  sygnału optycznego o częstotliwości  $f_0$  w porcie wyjściowym modulatora fazy MF zapisać można następująco (przy pominięciu wartości stałej kąta fazowego):

$$E_N = A_S e^{j\omega_0 t} = |A_S(t)| e^{j[2\pi f_0 t + \Phi_{v\Sigma}(t)]}; \quad (12-5)$$

$$|A_S(t)| = \sqrt{P_S(t)};$$

Wartość modułu amplitudy  $|A_S(t)|$  jest stała, natomiast argument  $\Phi_{v\Sigma}(t)$  jest modulowany napięciem  $v_\Sigma(t)$ . Wartość kąta  $\Phi_{v\Sigma}(t)$  zmienia się liniowo z wartością napięcia  $v_\Sigma(t)$ , co pokazuje zależność (12-6). Napięcie  $V_\pi$  jest charakterystycznym napięciem modulatora fazy, dla którego faza transmitowanego sygnału zmienia się o  $\pi$ .

$$\Phi_{v\Sigma}(t) = \frac{\pi v_\Sigma(t)}{V_\pi}; \quad (12-6)$$

Zmodulowany sygnał optyczny dopływa na stacji bazowej do odbiornika optycznego ze zrównoważonym detektorem koherentnym. Działanie takiego przyrządu opisano dokładnie w punkcie 9.2. Aby móc wyznaczyć wartość argumentu  $\Phi_{v\Sigma}(t)$  sygnału transmitowanego łączem, dodawany jest do niego przed detekcją sygnał z lokalnego oscylatora LLO o mocy  $P_{LO}$  i fazie  $\varphi_{LO}$ : bez przesunięcia i po przesunięciu o  $90^\circ$ . W portach wyjściowych zrównoważonego odbiornika koherentnego pojawiają się sygnały o napięciach  $V_X(\omega_{IF}t)$  i  $V_Y(\omega_{IF}t)$ , o częstotliwości pośredniej  $\omega_{IF} = 2\pi f_{IF}$ , będącej różnicą częstotliwości optycznych laserów nadajnika i odbiornika LLO, zgodnie z zależnościami (12-7).

$$V_X = \frac{R_{FD}}{\sqrt{2}} \sqrt{P_S P_{LO}} \cos[\omega_{IF}t + \varphi_{LO} + \Phi_{v\Sigma}(t)]; \quad (12-7)$$

$$V_Y = \frac{R_{FD}}{\sqrt{2}} \sqrt{P_S P_{LO}} \sin[\omega_{IF}t + \varphi_{LO} + \Phi_{v\Sigma}(t)];$$

Oba napięcia niosą informację o kącie  $\Phi_{v\Sigma}(t)$ . Napięcie  $V_\Sigma(t)$  w formule zespolonej można zapisać wzorem (12-8).

$$V_\Sigma(t) = V_X(t) + jV_Y(t) = \frac{R_{FD}}{\sqrt{2}} \sqrt{P_S P_{LO}} e^{j[\omega_{IF}t + \varphi_{LO} + \Phi_{v\Sigma}(t)]}; \quad (12-8)$$

Kąt fazowy napięcia  $V_\Sigma(t)$  obliczony z zależności (12-9) związany jest liniowo z niosącym informację napięciem  $v_\Sigma(t)$ .

$$\text{Arg}\{V_{\Sigma V}(t)\} = \arctg\left(\frac{V_Y}{V_X}\right) = \omega_{IF}t + \Phi_{v\Sigma}(t); \quad (12-9)$$

Układ przetworników analogowo-cyfrowych ADC i układ przetwarzania sygnałów cyfrowych PSC dokonują obliczeń na bieżąco. Działanie układów przetwarzania sygnałów w portach wyjściowych odbiornika koherentnego oparte jest na szybko działających przetwornikach cyfrowych odpowiednio zaprogramowanych. Rezultatem jest duży zakres liniowej pracy łącza światłowodowego przy dużej szybkości transmisji. Takie właśnie łącze spełnia wymagania związane z wprowadzaniem kolejnej generacji telekomunikacji mobilnej.

## 12.3. Systemy radiowo-światłowodowe pasm milimetrowych

### 12.3.1. Uwagi ogólne

Wybór pasm transmisji radiowych w systemach telekomunikacji mobilnej jest wynikiem starannie dobranego kompromisu. Z jednej strony ze wzrostem częstotliwości fali nośnej wzrasta tłumienie przy transmisji przez ściany domów i szyby okienne. Z drugiej strony wzrost częstotliwości fali nośnej umożliwia zwiększenie mierzonej w bitach na sekundę szybkości transmisji łącza. Wybór pasm w sąsiedztwie 2–3 GHz zmusił konstruktorów do szukania sposobów na powiększenie prędkości transmisji i tak opanowano technikę modulacji wielostanowej, dzięki której transmisja jednego impulsu pozwala na przesłanie informacji o liczbie ośmiobitowej.

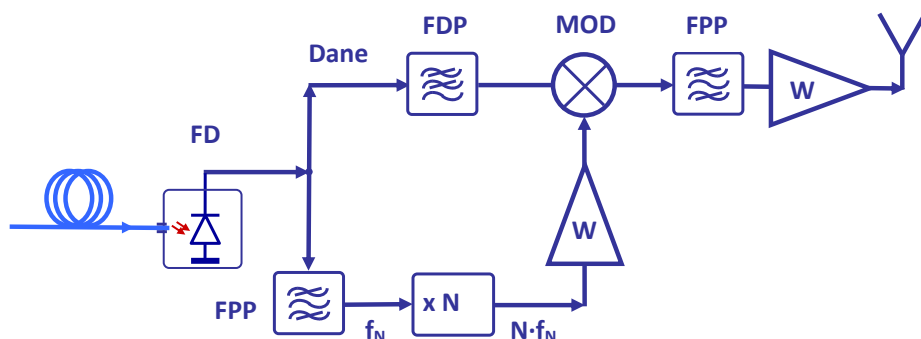
Na problem transmisji radiowej można spojrzeć także z innej strony. Wiadomo, że największą szybkość transmisji dla określonego użytkownika zapewni doprowadzenie światłowodu do miejsca jego lokalizacji. W wielu przypadkach nie jest to jednakże, z wielu powodów, możliwe. Elastyczność transmisji radiowej, możliwość zmiany położenia zarówno nadajnika, jak i odbiornika jest często koniecznością. Jeśli do tego nie ma potrzeby transmisji przez ściany i szyby, to naturalnym rozwiązaniem jest przesunięcie częstotliwości transmisji radiowej do pasma fal milimetrowych, gdzie z łatwością uzyskujemy prędkość transmisji przekraczającą 1 Gb/s.

Opublikowano opisy wielu rozwiązań układowych systemów RoF z transmisją radiową na falach milimetrowych. Wykorzystano wiele rozwiązań dobrze znanych z innych aplikacji. Nie ma potrzeby powtarzać ich opisu w tym punkcie. Charakterystycznym dla tych systemów problemem jest wytworzenie fali nośnej o częstotliwości w granicach 60–120 GHz, na której pracują nadajniki i odbiorniki stacji bazowej. W punkcie tym opisane zostaną rozmaite rozwiązania tego problemu.

### 12.3.2. Systemy z powielaniem częstotliwości nośnej

W układzie łącza optycznego przedstawionego na rys. 12.7 na stacji centralnej modulowano fale nośne o częstotliwościach około 2 GHz, a następnie grzebię takich sygnałów

transmitowany był do stacji bazowej. Tam, po odpowiedniej obróbce, kierowany był do anteny nadajnika. Takie rozwiązanie nie może być przyjęte, gdy częstotliwości transmisji radiowej mieszczą się w paśmie 40–120 GHz. Jednym z możliwych rozwiązań jest użycie powielaczy częstotliwości w układach stacji bazowej. Rozwiązanie to pokazano na rys. 12.9.



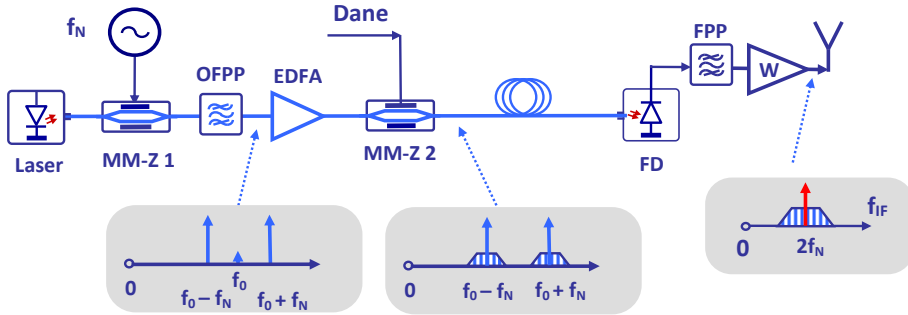
**Rys. 12.9.** Idea układu nadajnika stacji bazowej, w którym radiową falę nośną o częstotliwości pasma milimetrowego otrzymuje się, wykorzystując elektroniczne powielacze częstotliwości. FD – fotodetektor, FPP – filtr pasmowo-przepustowy, FDP – filtr dolnoprzepustowy,  $xN$  – powielacz częstotliwości, MOD – modulator, W – wzmacniacz.

Łączem światłowodowym przesyłane są do stacji bazowej: zapisany cyfrowo strumień informacji oraz sinusoidalny sygnał  $N$ -tej podharmonicznej częstotliwości pasma fal milimetrowych. Oba sygnały w obwodzie wyjściowym fotodetektora FD oddzielane są odpowiednimi filtrami: dolnoprzepustowym FDP i środkowoprzepustowym FPP. Sygnał podharmonicznej o częstotliwości  $f_N$  kierowany jest do powielacza częstotliwości o krotności  $N$ . Po powieleniu do częstotliwości  $Nf_N$  i wzmocnieniu sygnał nośnej kierowany jest do modulatora MOD. Po modulacji, dodatkowej filtracji i wzmocnieniu sygnał kierowany jest do anteny.

Przykład liczbowy: dla częstotliwości nośnej  $Nf_N = 60$  GHz wybierana jest krotność powielania  $N = 8$ , uzyskana łańcuchem podwajaczy częstotliwości  $2 \times 2 \times 2$ . Wtedy łączem transmitowany jest sygnał o częstotliwości  $f_N = 7,5$  GHz.

Inne rozwiązanie problemu powielania częstotliwości przedstawiono w układzie z rys. 12.10.

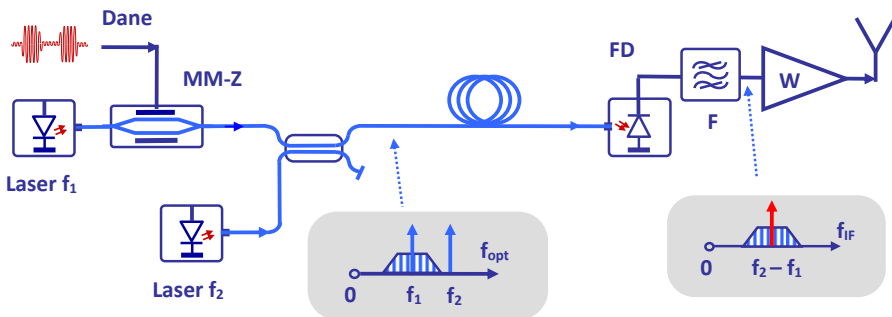
Często stosowanym rozwiązaniem jest transmisja do stacji bazowej częstotliwości wzorcowej. Sygnał wzorca kontroluje w detektorze fazy pętli fazowej PLL częstotliwość oscylatora wielokrotnie większą od częstotliwości wzorca. Użycie powielacza częstotliwości  $\times 2$  lub  $\times 4$  pozwala uzyskać częstotliwość fali nośnej w granicach 60–120 GHz.



**Rys. 12.10.** Idea pracy optycznego łącza downlink z transmisją radiową w zakresie fal milimetrowych, w którym wykorzystano modulator Macha-Zehndera MMZ-1 jako podwajacz częstotliwości. MMZ-2 – modulator nadajnika optycznego, OFPP – optyczny filtr pasmowo-przepustowy, EDFA – wzmacniacz optyczny, FD – fotodetektor odbiornika, FPP – filtr pasmowo-przepustowy, W – wzmacniacz.

### 12.3.3. Generacja nośnej drogą mieszania sygnałów optycznych

Inny sposób otrzymywania fali nośnej pasma milimetrowego przedstawia układ z rys. 12.11.



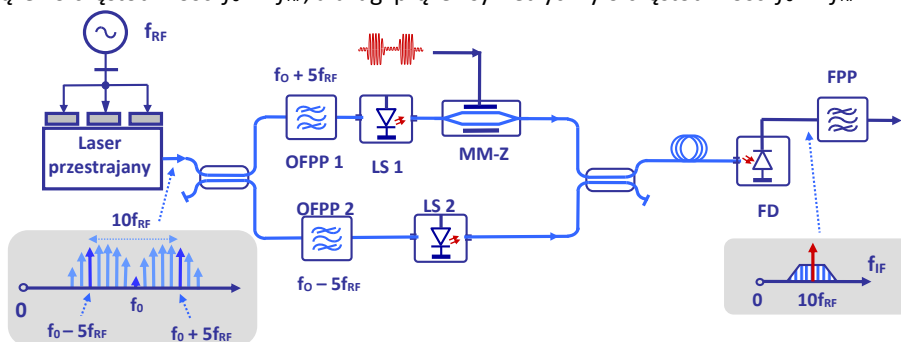
**Rys. 12.11.** Układ łącza, w którym częstotliwość nośnej z pasma milimetrowego uzyskano w procesie fotodetekcji wykorzystując dwa lasery. MM-Z – modulator, FD – fotodetektor, FPP – filtr pasmowo-przepustowy, W – wzmacniacz.

W łączu wykorzystano dwa lasery jako źródła sygnałów optycznych o częstotliwościach  $f_1$  i  $f_2$ . Jeden z sygnałów zostaje zmodulowany. Drugi z sygnałów jest transmitowany tym samym światłowodem i pełni w procesie fotodetekcji rolę heterodyny. W obwodzie fotodetektora pojawi się składnik prądu o częstotliwości pośredniej, różnicowej  $f_2 - f_1$ . Wszystkie składniki modulacji wytworzone wokół  $f_1$  zostają wiernie przeniesione wokół częstotliwości pośredniej  $f_2 - f_1$ . Sygnał wyjściowy zostaje poddany filtracji i po wzmacnieniu zostaje skierowany do anteny.

Wartość częstotliwości pośredniej można dobrać w paśmie 30–200 GHz. Różnica częstotliwości laserów jest zwykle kontrolowana i stabilizowana przez układ, który pominięto

na rys. 12.11. Wartość częstotliwości pośredniej jest zwykle dużo mniejsza od częstotliwości sygnałów optycznych. Dla przykładu, aby uzyskać  $f_2 - f_1 = 100$  GHz, można użyć lasery o częstotliwościach 200 THz i 200,1 THz. W takim przypadku wymagamy, aby lasery pracowały stabilnie z bardzo czystym widmem. Wymagania te są trudne do spełnienia. Innym rozwiązaniem jest wykorzystanie laserów synchronizowanych w układzie z rys. 12.12.

W opisywanym układzie pracują dwa lasery LS 1 i LS 2 na bliskich sobie częstotliwościach. Jeden z sygnałów optycznych jest modulowany, drugi pełni rolę heterodyny. Poza nimi w układzie pracuje trzeci laser przestrajany. Częstotliwość tego lasera jest modulowana wokół wartości  $f_0$  sygnałem generatora mikrofalowego  $f_{RF}$ . Przy odpowiednimysterowaniu widmo sygnału lasera przestrajanego zawiera wiele prążków odległych od siebie o  $f_{RF}$ . Sygnał lasera przestrajanego kierowany jest do dwóch torów, w których umieszczono lasery LS 1 i LS 2. Przed laserami umieszczono filtry optyczne, z których jeden wybiera prążek o częstotliwości  $f_0 + nf_{RF}$ , a drugi prążek symetryczny o częstotliwości  $f_0 - nf_{RF}$ .

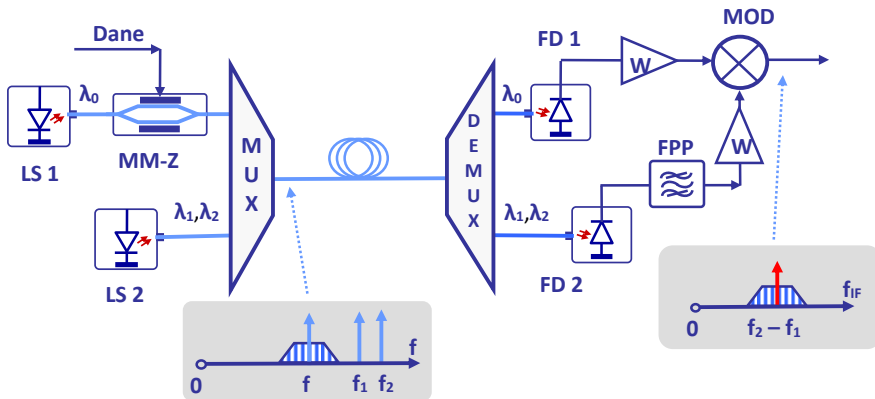


**Rys. 12.12.** Układ łączący, w którym częstotliwość nośnej z pasma milimetrowego uzyskano w procesie fotodetekcji, wykorzystując dwa synchronizowane lasery.

Na rysunku przyjęto, że  $n = 5$ . Moc obu prążków po filtracji jest wystarczająca, aby synchronizować obydwa lasery. Różnica częstotliwości sygnałów obu laserów wynosi dokładnie  $2nf_{RF}$ , w układzie na rysunku  $10f_{RF}$ . Różnica ta jest bardzo dokładnie określona częstotliwością  $f_{RF}$  generatora mikrofalowego i nie wymaga dodatkowej kontroli i stabilizacji. Częstotliwość środkowa  $f_0$  lasera przestrajanego może nieznacznie zmieniać się w czasie pracy. Jednakże częstotliwość pośrednia otrzymanego w procesie fotodetekcji sygnału jest stała.

Ostatnim z prezentowanych w tym punkcie rozwiązań problemu generacji sygnału fali nośnej w paśmie fal milimetrowych jest układ z laserem generującym dwie częstotliwości o określonej różnicy częstotliwości, przedstawiony na rys. 12.13.

W rozdziale 3 opisano grupę laserów Fabry'ego-Perota wytwarzających grzebień częstotliwości w procesie generacji. Istnieje możliwość takiego doboru warunków generacji, że laser będzie generował dwa prążki o długościach fal  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$ . Różnica częstotliwości generacji może być w pewnych granicach regulowana i kontrolowana.



**Rys. 12.13.** Układ łącza optycznego z dwoma laserami LS 1 i LS 2, z których ten drugi LS 2 generuje dwie częstotliwości. FD 1 i FD 2 – fotodetektory, FPP – filtr pasmowo-przepustowy, W – wzmacniacz, MOD – modulator.

W układzie na rys. 12.13 laser LS 1 pracuje monoczęstotliwościowo przy długości fali  $\lambda_0$ . Jego sygnał jest modulowany i transmitowany do odbiornika. Drugi z laserów generuje dwie częstotliwości. Jego sygnał może być transmitowany tym samym światłowodem. Po rozdzieleniu obu sygnałów i skierowaniu do dwóch fotodetektorów otrzymuje się w porcie wyjściowym FD 1 transmitowany strumień danych, a w porcie wyjściowym fotodetektora FD 2 sygnał o częstotliwości pośredniej  $f_2 - f_1$ . Proces nakładania danych na falę nośną realizuje modulator MOD. Po odfiltrowaniu i wzmacnieniu zmodulowany sygnał kierowany jest do anteny.

W punkcie tym opisano wybrane przykłady układów, które pozwalają uzyskać sygnał w paśmie fal milimetrowych, aby wykorzystać go do transmisji radiowej. Liczba rozwiązań, często bardzo pomysłowych, jest oczywiście większa. Rozwój techniki fotoniki mikrofalowej stworzył narzędzia, które pojawiające się problemy pozwalają rozwiązywać w różny sposób.

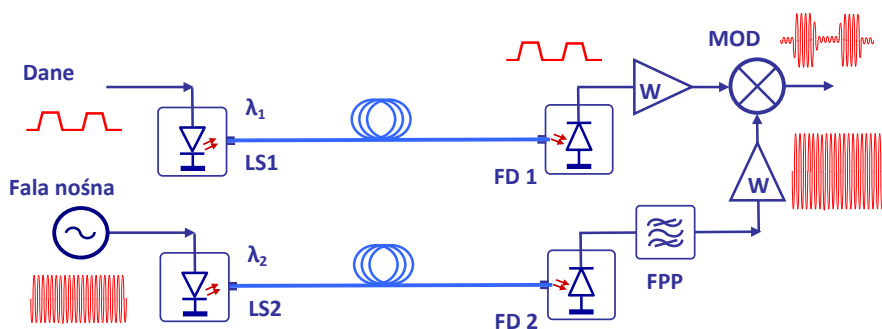
## 12.4. Transmisja sygnałów mikrofalowych łączyami RoF

### 12.4.1. Struktura łączy z modulacją bezpośrednią

W opisanych wyżej układach głównym celem łącza światłowodowego *downlink* jest transmisja na stronę stacji bazowej, a w konsekwencji do odbiornika, fali nośnej o częstotliwości radiowej zmodulowanej sygnałem niosącym informację. W punkcie tym przedstawiona zostanie próba pogrupowania i uogólnienia rozmaitych rozwiązań układowych tego problemu.

Popularny i często spotykany w praktyce układ łącza optycznego *downlink* z multiplexacją na podnośnych, pokazano na rys. 12.7 i opisano w punkcie 12.2. W układzie tym modulator nanoszący dane na radiową falę nośną umieszczono po stronie nadajnika. Aby uniknąć zniekształceń przy transmisji światłowodem zmodulowanej fali nośnej, można umieścić modulator po stronie odbiornika.

Jedno z możliwych rozwiązań przedstawia układ z rys. 12.14. W opisywanym układzie sygnał fali nośnej moduluje prądowo moc optyczną laserów LS2 nadajnika (długość fali  $\lambda_2$ ) i następnie transmitowany jest do odbiornika. Sygnał niosący informację moduluje moc optyczną drugiego lasera LS1 (długość fali  $\lambda_1$ ) i także kierowany jest do odbiornika. Oba sygnały optyczne mogą być transmitowane tym samym światłowodem, gdyż lasery pracują na różnych długościach fal, co umożliwia rozdzielenie sygnałów po stronie odbiornika. Po detekcji oba sygnały są wzmacniane, filtrowane i kierowane do modulatora. Po wzmocnieniu do odpowiedniego poziomu mogą być kierowane do anteny nadawczej.



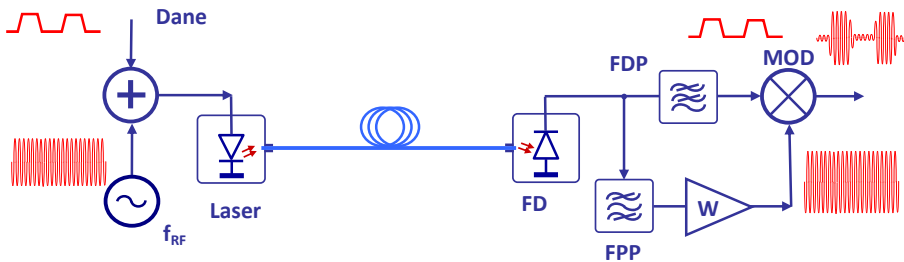
**Rys. 12.14.** Zmodyfikowany układ łącza optycznego, w którym dane i fala podnośna transmitowane są oddzielnie do odbiornika, a proces modulacji realizowany jest po stronie odbiorczej przez modulator MOD.

W rozdziale 7 opisano podstawowe parametry łącza analogowego: wzmocnienie i współczynnik szumów. Gdy stosuje się bezpośrednią modulację mocy lasera, to można oczekiwać, że wzmocnienie sygnału optycznego będzie mniejsze od 1, a w mierze decybelowej będzie wynosiło  $G_{dB} = (-10) - (-20)$  dB. Taką też wartość osiągnie współczynnik szumów. Oddzielna transmisja danych i nośnej oraz ulokowanie modulatora po stronie odbiornika poprawia stosunek sygnału do szumu i zwiększa dynamikę transmisji.

Jeszcze inne proste rozwiązanie transmisji zaproponowano w układzie z rys. 12.15.

W układzie modulator fali nośnej RF umieszczono także po stronie odbiornika. Po stronie nadajnika fala nośna RF i strumień danych są sumowane w prostym, pasywnym układzie i kierowane do lasera. Wygenerowany przez laser i zmodulowany sygnał optyczny transmitowany jest światłowodem do odbiornika. Po fotodetekcji oba sygnały są rozdzielane przez proste filtry: dolnoprzepustowy i środkowoprzepustowy. Należy zauważyć, że

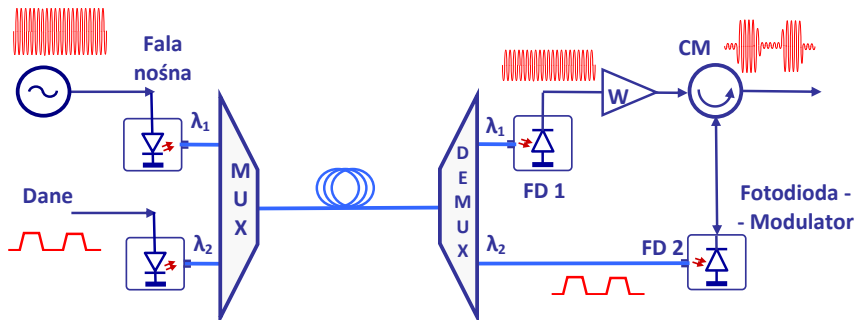
przesyłany strumień danych, cyfrowych lub analogowych zajmuje pasma kilku bądź kilkadziesiąt megaherców. Częstotliwość fali nośnej RF wynosi nie mniej niż kilkaset megaherców, a najczęściej leży w paśmie gigaherców. Tak więc problem rozdzielania obu sygnałów jest prosto realizowany. Po odfiltrowaniu i wzmacnieniu obydwu sygnałów fala nośna RF zostaje zmodulowana i skierowana do dalszej obróbki.



**Rys. 12.15.** Układ łącza, w którym modulator MOD umieszczono po stronie odbiornika. Zsumowane dane i fala nośna o częstotliwości  $f_{RF}$  modują bezpośrednio moc optyczną lasera. Filtry po stronie odbiornika: dolnoprasmowy FDP i pasmowo-przepustowy FPP oddzielają falę nośną od strumienia danych.

W opisanych wyżej układach łącza optyczne użyte zostało do transmisji sygnałów elektrycznych na dystansie między nadajnikiem i odbiornikiem. Wykorzystano tutaj właściwość światłowodu kwarcowego, którego tłumienie 0,2–0,5 dB/km jest znikomo małe w porównaniu do tłumień kabli współosiowych przekraczających często 100 dB/km dla częstotliwości gigahercowych.

Przedstawiona na rys. 12.16 struktura układu transmisyjnego jest podobna do pokazanego wcześniej na rys. 12.14.



**Rys. 12.16.** Układ transmisyjny, w którym jedna z fotodiód FD2 odbiornika pełni rolę modulatora mikrofalowego. Rozwiązanie redukuje liczbę elementów. CM – cyrkulator mikrofalowy.



Zarówno fala nośna RF, jak i strumień danych przesyłane są na stronę odbiornika z wykorzystaniem bezpośredniej modulacji mocy dwóch laserów pracujących na różnych długościach fal. Różnica między obu obwodami polega na tym, że jedna z fotodiod, oznaczona jako FD 2, została użyta w procesie modulacji. W rozdziale 4, poświęconym fotodetektorom, omawiano efekty nieliniowe fotodiod. W normalnych warunkach pracy efekty nieliniowe staramy się minimalizować. W tym układzie zostały wykorzystane do modulacji, co upraszcza układ odbiornika.

W obwodzie modulatora umieszczono cyrkulator mikrofalowy CM, co umożliwia doprowadzenie obu sygnałów do fotodetektora. W rzeczywistych układach wykorzystuje się w tym celu sprzęgacze kierunkowe. Wprowadzenie ich do rysunku mogło uczynić jego strukturę nieczytelną.

### 12.4.2. Struktura łącza z modulacją zewnętrzną

Przedstawione wyżej układy wykorzystują prostą technikę modulacji mocy optycznej generowanej przez laser diodowy przez bezpośrednią modulację jego prądu. Jest to rozwiązanie najprostsze i tanie. Jednakże identyczne funkcje w procesie transmisji sygnałów RF może spełnić układ z zewnętrznym modulatorem M-Z. Wiemy już, że modulator M-Z jest uniwersalnym narzędziem, pozwalającym przeprowadzić modulację z wytłumieniem fali nośnej, czy też modulację jednowstęgową, których nie można zrealizować w procesie bezpośredniej modulacji lasera.

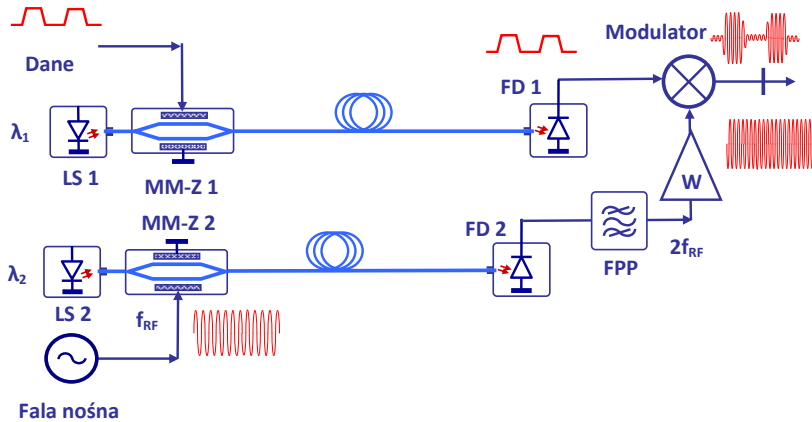
Z przeprowadzonej w rozdziale 7 dyskusji wiadomo, że użycie modulatora M-Z pozwala poprawić kilka istotnych parametrów transmisji.

- Wzmocnienie łącza może być znacznie większe, co pozwoli uzyskać lepsze właściwości szumowe.
- Istnieje możliwość powiększenia zakresu pracy liniowej i zmniejszenia poziomu zniekształceń nieliniowych. Duży zakres pracy liniowej jest ważny szczególnie wtedy, gdy – jak w przypadku multipleksacji na podnośnych – transmituje się jednocześnie kilka zmodulowanych podnośnych.
- Poza tym w układzie łącza istnieje możliwość użycia równoległego, dualnego modulatora M-Z, aby zrealizować modulację jednowstęgową. Rozwiązanie to minimalizuje efekt dyspersji światłowodu przy transmisji na odległości wielokilometrowe.

Lepsze parametry łącza z zewnętrznym modulatorem M-Z okupione są jednakże wyższym kosztem, ponieważ modulator M-Z jest najdroższym elementem opisywanego układu.

Optyczny układ transmisyjny z zewnętrznymi modulatorami optycznymi MM-Z1 i MM-Z 2 został pokazany na rys. 12.17. Funkcjonuje on podobnie, jak układ z rys. 12.14. Jego przewaga – poza wymienionymi wyżej – polega na tym, że pozwala on na podwojenie częstotliwości fali nośnej  $f_{RF}$ . W wielu zastosowaniach konieczne jest uzyskanie po stronie odbiorczej częstotliwości fali nośnej w paśmie fal milimetrowych, w granicach 30–90 GHz. Zmodulowanie sygnału optycznego po stronie nadajnika może być dla tych częstotliwości

trudne, a czasami wręcz niemożliwe. Jednym z rozwiązań jest wykorzystanie modulatora MM-Z 2 jako powielacza częstotliwości. Praca modulatora w punkcie minimalnej transmisji mocy umożliwia realizację podwojenia częstotliwości modulacji.



**Rys. 12.17.** Optyczny układ transmisyjny z zewnętrznymi modulatorami optycznymi MM-Z1 i MM-Z2. Ten drugi wykorzystano jako powielacz częstotliwości. Modulator radiowej fali nośnej umieszczono po stronie odbiornika. Polaryzacja modulatora MM-Z2 w punkcie minimalnej transmisji umożliwia podwojenie częstotliwości fali nośnej RF.

Rozwój radiowej, bezprzewodowej telekomunikacji mobilnej, opartej na transmisji fali elektromagnetycznej w wolnej przestrzeni, poczynił ogromne postępy. Szybko stwierdzono, że opracowane systemy powinny wykorzystywać techniki transmisji światłowodowej. W tym punkcie opisano przykłady użycia obu technik. W rozdziale 13 przedstawione zostaną układy wykorzystujące do transmisji informacji propagację w wolnej przestrzeni sygnałów o częstotliwości optycznej.

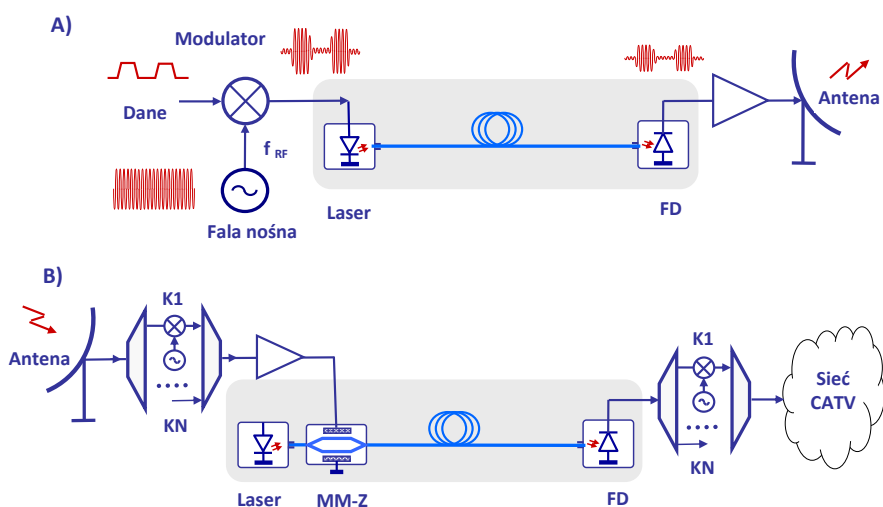
### 12.4.3. Przykłady rozwiązań

Aby lepiej zilustrować specyfikę problematyki współpracy systemów radio–światłowodów, omówimy kilka wybranych układów. Dwa z nich pokazano na rys. 12.18. W obu łącznie światłowodowe zostało użyte jako prowadnica falowa do transmisji sygnałów telewizyjnych i radiowych, zastępując w ten sposób transmisję silnie stratnym kablem koncentrycznym.

Na rys. 12.18A pokazano ideę układu realizującego transmisję radiowej fali nośnej zmodulowanej, z naniesioną informacją, do anteny nadawczej. Sygnał z informacją zostaje naniesiony na falę nośną (podnośną) o częstotliwości  $f_{RF}$ . W układzie nadajnika nie pokazano wzmacniaczy i filtrów, aby nie komplikować układu na rysunku. Wytworzony sygnał transmitowany jest analogowym łączem światłowodowym do anteny. W układzie odbiornika prąd fotodetektora jest proporcjonalny do docierającej mocy optycznej. Odbytą

zmodulowana fala nośna o częstotliwości  $f_{RF}$  jest wzmacniana i filtrowana. Po osiągnięciu odpowiedniego poziomu mocy można ją kierować do anteny nadawczej.

Układ z rys. 12.18B transmituje sygnały telewizyjne odebrane przez satelitarną antenę odbiorczą do miejskiej sieci telewizji kablowej. Gdy antena jest odległa o kilka, kilkanaście kilometrów najlepszym rozwiązaniem jest użycie analogowego łącza światłowodowego. Antena odbiera zwykle dużo kanałów, z których tylko część zostaje wprowadzona do sieci CATV. Odbiornik, nie pokazany na rysunku, selekcjonuje kanały, wybierając pożądane, oraz zmienia częstotliwości, na których będzie można je znaleźć w sieci CATV. Po takim przygotowaniu wybrana seria kanałów trafia do modulatora łącza światłowodowego, skąd jest transmitowana do odległej sieci CATV.

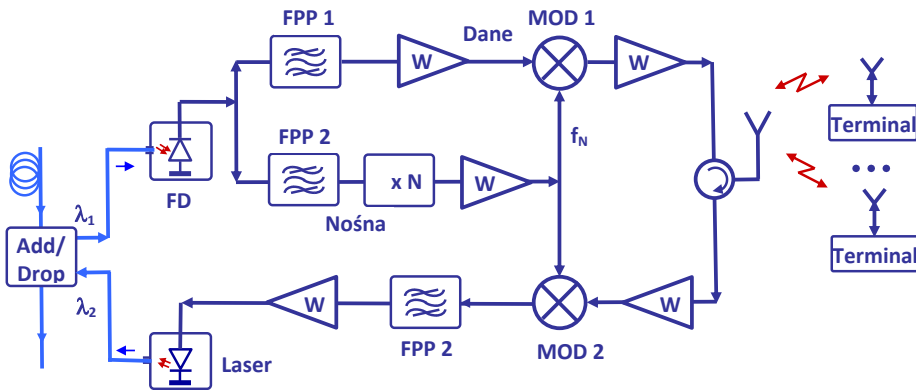


**Rys. 12.18.** Przykłady rozwiązań układów transmisji światłowodowej sygnałów wykorzystywanych w transmisji radiowej. A) Układ ilustrujący transmisję zmodulowanego sygnału analogowym łączem optycznym do anteny nadawczej w celu wyemitowania. B) Układ łącza optycznego do transmisji kilku z odebranych przez antenę kanałów telewizyjnych do odległej sieci telewizji kablowej.

Opisane w poprzednich rozdziałach rozmaite rozwiązania układowe pozwalają zaproponować wiele konfiguracji dla realizacji takich samych celów. Przykładem interesującego rozwiązania jest pokazany na rys. 12.19 układ stacji bazowej, w której zastosowano powielacz częstotliwości.

Stacja bazowa podłączona jest do łącza światłowodowego pracującego w strukturze pierścienia przez układ *add/drop*. Odebrany z łącza optycznego sygnał kierowany jest do fotodetektora FD, a następnie dwoma torami do modulatora MOD 1. Częstotliwość radiowej fali nośnej jest powielana  $N$  razy. Zmodulowany sygnał po odfiltrowaniu i wzmacnieniu kierowany jest do anteny. Sygnały odebrane przez antenę kierowane są do mieszacza MOD 2. Po procesie przemiany dolne wstęgi zostają odfiltrowane, wzmacnione i skierowane

do lasera. Zmodulowany amplitudowo sygnał optyczny o długości fali  $\lambda_2$  zostaje skierowany przez układ *add/drop* do transmisji światłowodem.



**Rys. 12.19.** Idea organizacji stacji bazowej połączonej z łączem światłowodowym układem *add/drop*. Stacja odbiera sygnały ( $\lambda_1$ ) przez fotodetektor FD i odsyła informację sygnałem generowanym przez laser ( $\lambda_2$ ). Częstotliwość radiowej fali nośnej jest powielana  $xN$ . Modulator MOD 1 nakłada informację przed wypromieniowaniem przez antenę. Modulator MOD 2 nakłada odebraną informację na nośną przed transmisją do stacji centralnej.

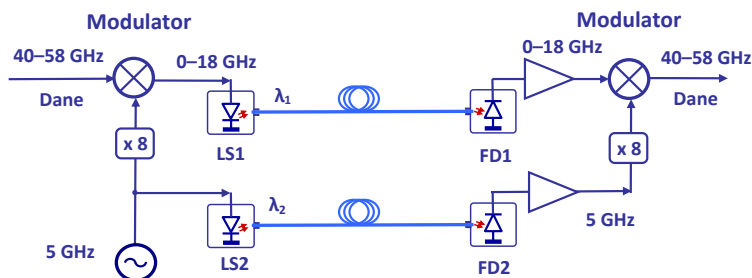
Przegląd układów pracujących w systemach radio–światłowód można zakończyć opisem bardzo ciekawego rozwiązania pokazanego na rys. 12.20. W wielu przypadkach konieczna jest transmisja sygnałów mikrofalowych z pasm powyżej osiągalnego pasma modulacji laserów. Częstotliwość transmitowanego sygnału jest na tyle duża, że nie można bezpośrednio modulować prądu lasera, a modulatory zewnętrzne tracą swoje parametry.

W opisywanym przypadku ilustrowanym rysunkiem 12.20 sygnał transmitowany zajmuje pasmo 40–58 GHz i nie może być bezpośrednio skierowany do modulacji mocy optycznej lasera. Aby obniżyć częstotliwość sygnału, zastosowano mieszacz mikrofalowy dolnowstęgowy, w którym częstotliwość heterodyny wynosi 40 GHz. Uzyskano dzięki temu przesunięcie sygnału, z pasma 40–58 GHz do pasma 0–18 GHz, co pozwala skierować go bezpośrednio do modulacji mocy lasera LS1 o długości fali  $\lambda_1$ . Oczywiście w układzie można zastosować zewnętrzne modulatory M-Z.

Sygnał heterodyny o częstotliwości 40 GHz uzyskano, powielając ośmiokrotnie częstotliwość 5 GHz. Sygnał o tej częstotliwości powinien być oddzielnie transmitowany przez łącze. W układzie wykorzystano w tym celu laser LS2 o długości fali  $\lambda_2$ .

W układzie na rysunku 12.20 sygnały optyczne z obu laserów transmitowane są do odbiornika oddzielnymi światłowodami. W układzie rzeczywistym można obydwie sygnały optyczne transmitować tym samym światłowodem, stosując odpowiednie pasywne elementy optyczne. Po transmisji oba sygnały kierowane są do różnych odbiorników optycznych. Aby odzyskać sygnał w paśmie pierwotnym 40–58 GHz, zastosowano mieszacz

górnowiąstęgowy. Częstotliwość heterodyny wynosi także tutaj 40 GHz, a uzyskano ją, powielając ośmiokrotnie częstotliwość 5 GHz. Dla uproszczenia w układzie na rys. 12.20 pominięto cały szereg filtrów i wzmacniaczy, zarówno po stronie nadawczej, jak i odbiorczej.



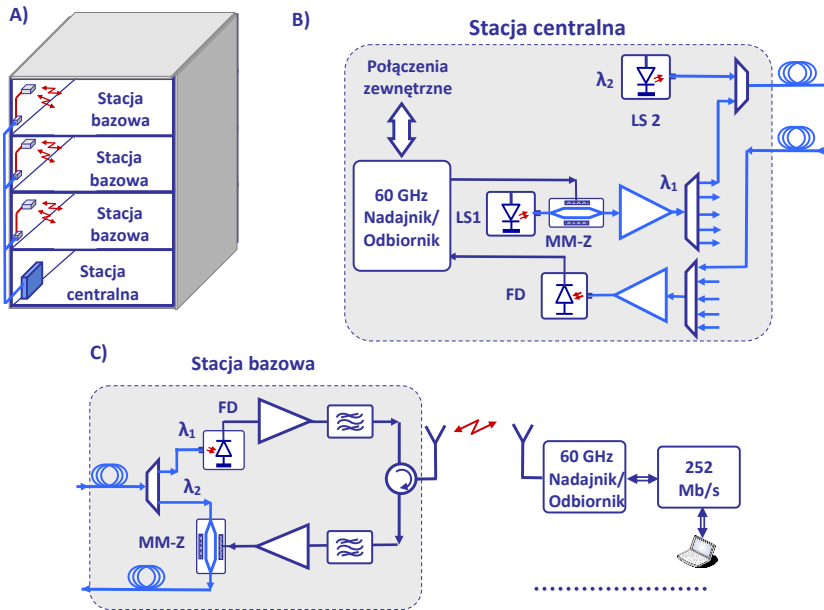
**Rys. 12.20.** Układ ideowy łącza optycznego do transmisji sygnałów mikrofalowych z pasma fal milimetrowych 40–58 GHz. Transmitowany sygnał został przesunięty o 40 GHz w kierunku mniejszych częstotliwości. Po stronie odbiornika modulator górnowiąstęgowy przesuwa transmitowany sygnał z powrotem do pasma 40–58 GHz.

Ostatnie z przykładowych rozwiązań systemów transmisji i rozprowadzania informacji pokazano na rys. 12.21.

Podstawowym składnikiem opisywanego układu jest system pracujący na falach milimetrowych, na częstotliwości 60 GHz. Jego głównym elementem jest Nadajnik–Odbiornik pracujący na 60 GHz. W systemie tym wykorzystano zarówno multipleksację z podziałem czasu, jak i z podziałem częstotliwości. Szybkość transmisji przy wykorzystaniu nośnej 60 GHz jest na tyle duża, by obsłużyć kilkudziesięciu użytkowników. Transmisja do terminali odbywa się drogą radiową i gdyby można było z jednej anteny rozprowadzić sygnał do wszystkich terminali na piętrach, to transmisja światłowodami nie byłaby konieczna. Terminale rozmieszczone są jednak na kilku piętrach, co wymusiło zbudowanie lokalnej sieci połączeń światłowodami. Sytuację tę pokazuje w uproszczeniu rys. 12.21A.

Sieć światłowodowa jest w tym przypadku prowadnicą falową umożliwiającą transmisję sygnałów pasma 60 GHz. Transmitowany sygnał doprowadzony jest z Nadajnika–Odbiornika do modulatora MM-Z i poprzez światłowód dociera do stacji bazowych – rys. 12.21B. Do stacji bazowych transmitowany światłowodem jest także niemodulowany sygnał optyczny z lasera LS 2. Sygnał ten zostaje zmodulowany na stacjach bazowych i wraca z naniesionymi informacjami do stacji centralnej.

Na piętrach budynku zainstalowano stacje bazowe odbierające i odsyłające strumienie informacji łączami światłowodowymi od i do stacji centralnej – rys. 12.21C. Odebrany ze stacji centralnej sygnał, po filtracji i wzmacnieniu zostaje wyemitowany przez antenę. Stacje bazowe drogą radiową połączone są z terminalami wyposażonymi w układy nadawczo-odbiorcze na pasmo 60 GHz. Do transmisji powrotnej wykorzystuje się optyczną falę nośną o długości  $\lambda_2$ , wytworzoną na stacji centralnej.



**Rys. 12.21.** Idea systemu wykorzystującego radiową transmisję w paśmie 60 GHz do stworzenia sieci łączącej dziesiątki terminali komputerowych. A) Budynek ze stacją centralną połączoną łączem światłowodowym ze stacjami bazowymi rozmieszczonymi na piętrach. B) Stacja centralna z Nadajnikiem/Odbiornikiem, z laserem LS1, którego sygnał moduluje modulator MM-Z, laserem pomocniczym LS2 i fotodetektorem FD. C) Stacja bazowa z fotodetektorem FD odbierającym sygnał ze stacji centralnej, transmitująca sygnał do terminali i wysyłająca informację zwrotną do stacji centralnej, korzystając z sygnału lasera LS2 o długości fali  $\lambda_2$ .

Systemy radiowo-światłowodowe pracują na podstawie bardzo ciekawych i nowatorskich rozwiązań układowych. Zainteresowani tematyką znajdą wiele publikacji prezentujących bardzo pomysłowe rozwiązania. Ich liczba rośnie z roku na rok.

## 12.5. Podsumowanie

Telekomunikacja bezprzewodowa, oparta na transmisji fal elektromagnetycznych pasma mikrofalowego i milimetrowego w wolnej przestrzeni, wprowadziła telefon komórkowy, smartfon czy laptop do zestawu niezbędnych narzędzi współczesnego człowieka. Ponieważ powstały potrzeby połączeń z odległymi źródłami informacji, to połączenia takie nie mogą być realizowane w wolnej przestrzeni. Trzeba było w tym celu użyć transmisji światłowodowej. Powstała potrzeba symbiozy obu technik: radiowej transmisji w wolnej przestrzeni i transmisji światłowodowej. Zadanie to zostało zrealizowane z powodzeniem. Wynikiem tej symbiozy jest globalna przestrzeń informacyjna, o nie do końca zbadanych

możliwościach i skutkach. Jej obecność stworzyła ludziom nowe potrzeby i możliwości. Pojawiają się opinie, że kontakt z tą przestrzenią jest trzecią potrzebą człowieka, po oddychaniu i jedzeniu.

Systemy radio-światłowodów są nadal intensywnie badane i rozwijane. Należy oczekiwać nowych rozwiązań, szczególnie z wykorzystaniem transmisji radiowej w paśmie fal milimetrowych i submilimetrowych. Należy jednakże mieć na uwadze, że wykorzystanie pasm fal milimetrowych wymaga opanowania technologii wytwarzania półprzewodnikowych elementów aktywnych, aby możliwa była w paśmie 100–300 GHz realizacja procesów generacji, wzmacniania i obróbki sygnałów elektronicznych. Badania w obszarze nanotechnologii są nadzieją najbliższych lat.

## Bibliografia rozdziału 12

- 12.1 H. Ogawa, D. Polifko, S. Banba, "Millimeter-Wave Fiber Optics Systems for Personal Radio Communication", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 40, No. 12, 1992.
- 12.3 A. Kaszubowska, P. Anandarajah, L.P. Barry, "Multifunctional Operation of a Fiber Bragg Grating in a WDM /SCM Radio Over Fiber Distribution System", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 16, No. 2, 2004.
- 12.4 H.B. Kim, "Radio over Fiber Based Network Architecture", *IEEE Proceedings in Optoelectronics*, Vol. 143, No. 6, 2005.
- 12.5 C.H. Cox III et al., "Limits on the performance of RF-over-fiber links and their impact on device design", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, No. 2, 2006.
- 12.6 C. Lim et al., "Analysis of Optical Carrier-to-Sideband Ratio for Improving Transmission Performance in Fiber-Radio Link", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, No. 5, 2006.
- 12.7 M. Sauer, A. Kobayakov, J. George, "Radio over Fiber for Picocellular Network Architecture", *Journal on Lightwave Technology*, Vol. 25, No. 11, 2007.
- 12.8 S. Iezekiel, "Measurement of Microwave Behavior in Optical Links", *IEEE Microwave Magazine*, June 2008.
- 12.9 A.M.J. Koonen, M. Garcia Larrode, "Radio-over-Fiber Techniques-Part II: Microwave to Millimeter-wave Systems", *Journal on Lightwave Technology*, Vol. 26, No. 15, 2008.
- 12.10 M.C.R. Medeiros et al., "RoFnet – Reconfigurable Radio over Fiber Network Architecture Overview", *Journal on Telecommunications and Information Technology*, No. 1, 2009.
- 12.11 T.R. Clark et al., "A Phase-Modulation I/Q-Demodulation Microwave-to-Digital Photonic Link", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 58, No. 11, 2010.
- 12.12 A.M. Zin et al., "An Overview of Radio-over-Fiber Network Technology", *IEEE International Conference On Photonics*, 2010.
- 12.13 R. Llorente, M. Beltrán, *Radio-over-Fibre Techniques and Performance*, w: *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*, IntechOpen, 2010. <http://www.intechopen.com/books/frontiers-in-guided-waveoptics-and-optoelectronics>.
- 12.14 A. Stohr et al., "Millimeter-wave photonic components for broadband wireless systems", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 58, No. 11, 2010.
- 12.15 A. Kanno et al., "10-Gb/s/ch QPSK FDM W-band radio-over-fibersignal generation, free-space radio transmission, and its demodulation", *Microwave Photonics, 2011 International Topical Meeting on & Microwave Photonics Conference*, 2011 Asia-Pacific, Oct. 2011.

- 12.16 Z. Huang et al., "Any Bias Point Control of Mach-Zehnder Electrooptic Modulator and its Applications in Optimization of Radio-over-Fiber links", *Microwave Photonics, 2011 International Topical Meeting on & Microwave Photonics Conference*, 2011 Asia-Pacific, Oct. 2011.
- 12.17 Y. Yang, C. Lim, A. Nirmalatha, "DRoF Incorporating Multi-Level Modulation for Radio-over-Fibers", *Microwave Photonics, 2011 International Topical Meeting on & Microwave Photonics Conference*, 2011.
- 12.18 Ch.T. Lin et al., "35-Gb/s 32-QAM Radio-over-Fiber System Employing Single-Sideband Single-Carrier Modulation at 60 GHz", *Microwave Photonics, 2011 International Topical Meeting on & Microwave Photonics Conference*, 2011 Asia-Pacific, Oct. 2011.
- 12.19 A.C. Jambriina et al., *High Capacity Radio over Fiber Transmission Links*, Technical University of Denmark, <http://www.dtu.dk/english/Research>, 2011.
- 12.20 C. Lim, C. Pulikkaseril, K-L. Lee, "A Study on LCoS-Based Remote Nodes for 60 GHz Fiber-Wireless Links", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 30, No. 19, 2012.
- 12.21 A.K. Vyas, N. Agrawal, "Radio over Fiber: Future Technology of Communication", *International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science*, Vol. 1, No. 2, 2012.
- 12.22 J. Liu et al., "Multi-band QPSK signal transmission implemented with remote up-conversion and Schottky RF detectors in a 60-GHz millimeter wave radio-over-fiber system", *Optical Fiber Technology*, Vol. 19, 2013.
- 12.23 R. Karthikeyan, S. Prakasam, "A Survey on Radio over Fiber (RoF) for Wireless Broadband Access Technologies", *International Journal on Computer Applications*, Vol. 64, No. 12, 2013.
- 12.24 W. Ji, J. Chang, "The radio-on-fiber-wavelength-division-multiplexed-passive-optical network (WDM-RoF-PON) for wireless and wire layout with linearly-polarized dual-wavelength fiber laser and carrier reusing", *Optics & Laser Technology*, Vol. 49, 2013.
- 12.25 K. Xu et al., "Microwave photonics: radio-over-fiber links, systems, and applications", *Photonics Research*, Vol. 2, No. 4, August 2014.
- 12.26 X. Zhang et al., "Linearization Technologies for Broadband Radio-Over-Fiber Transmission Systems", *Photonics*, Vol. 1, 2014.
- 12.27 K. Xu et al., "Microwave photonics: radio-over-fiber links, systems, and applications", *Photonics Research*, Vol. 2, No. 4, 2014.
- 12.28 M. Cao et al., "Multiband Phase-Modulated RoF Link With Coherent Detection and Bandpass Sampling", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 27, No. 21, Nov. 1, 2015.
- 12.29 F.A. Gutierrez et al., "Optimum Bias Point in Broadband Subcarrier Multiplexing With Optical IQ Modulators", *Journal on Lightwave Technology*, Vol. 33, No. 1, January 1, 2015.
- 12.30 A.E. Aghobahi, P. Assimakopoulos, N.J. Gomes, "Experimental analysis of single and multiple antenna units in uplink of radio-over-fiber distributed antenna system", *IEEE Int. Topical Meeting on Microwave Photonics*, Paphos, Cyprus, 2015.
- 12.31 S. Chen et al., "Mathematical Verification for Transmission Performance of Centralized Lightwave WDM-RoF-PON with Quintuple Services Integrated in Each Wavelength Channel", *Advances in Optoelectronics*, Vol. 2015, 2015, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/183675>.
- 12.32 L. Cheng et al., "Coordinated Multipoint Transmissions in Millimeter-Wave Radio-Over-Fiber Systems", *Journal on Lightwave Technology*, Vol. 34, No. 2, 2016.
- 12.33 A.E. Aghobahi, N.J. Gomes, "Capacity and Error Performance Verification of Multi-Antenna Schemes in Radio-over-Fiber Distributed Antenna System", *Journal on Lightwave Technology*, Vol. 34, No. 20, 2016.
- 12.34 G. Carpintero et al., "Photonic Integrated Circuits for Radio-Frequency Signal Generation", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 34, No. 2, 2016.
- 12.35 J. Yu, "Photonics-Assisted Millimeter-Wave Wireless Communication", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 53, No. 6, 2017.



- 12.36 I.A. Alimi, A.L. Teixeira, P.P. Monteiro, "Towards an Efficient C-RAN Optical Fronthaul for the Future Networks: A Tutorial on Technologies, Requirements, Challenges, and Solutions", *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, Vol. 21, No. 1, 2018.
- 12.37 B.G. Kim, S.H. Bae, H. Kim, "RoF-based Mobile Fronthaul Networks Implemented by Using DML and EML for 5G Wireless Communication Systems", *Journal of Lightwave Technolgy*, Vol. 36, No. 14, 2018.