

Rozdział 14

Fotonika w mikrofalowych systemach antenowych

14.1. Wprowadzenie

Anteny są bardzo ważnym elementem radiokomunikacyjnych systemów transmisyjnych i z tej racji technika konstrukcji antenowych jest nieustannie rozwijana i doskonalona. Antena wypromieniowuje do wolnej przestrzeni, w postaci fali elektromagnetycznej, moc sygnału elektrycznego docierającą do niej przewodniczą falową. Jest ona także elementem zapewniającym przejście z przewodnicy falowej do wolnej przestrzeni, z możliwie najmniejszą stratą mocy. Fala elektromagnetyczna kierowana jest zwykle w określonym kierunku.

Antena jest elementem odwracalnym, co oznacza, że może być jednocześnie urządzeniem nadawczym w modzie transmisyjnym i odbiorczym w modzie odbiorczym. Jest oczywiste, że między poziomami mocy wypromieniowanymi przez antenę, a odbieranymi z wolnej przestrzeni jest różnica wielu dekad.

Urządzenia te konstruowane są w rozmaity sposób na wiele zakresów częstotliwości, począwszy od zakresów fal radiowych poprzez zakresy mikrofal, fal milimetrowych i submilimetrowych, pasma terahercowe aż do zakresów optycznych.

Właściwości anteny określane są przez wiele parametrów związanych przede wszystkim z rozkładem pola elektromagnetycznego wypromieniowanej fali. Wymienić tu należy wzmocnienie anteny, charakterystykę wypromieniowanego pola czy polaryzację tego pola. Z elektrycznego punktu widzenia można ją charakteryzować, podając pasmo pracy, wartość impedancji i jej sprawność. Istotne są także mechaniczne właściwości anten: ich wymiary, waga, parametry ruchu itp.

Rozdział 14 nie jest poświęcony opisowi anten w ogólności ani też fazowanym szykom antenowym w szczególności. Czytelnicy zainteresowani opisem konstrukcji anten, zasadom ich działania, a także parametrami znajdą wiele pozycji książkowych. Rozdział 14 poświęcony jest opisowi zastosowań technik fotonicznych w rozwiązywaniu problemów formowania wiązki promieniowania w fazowanych szykach antenowych. Odmienność technik fotonicznych od tradycyjnych technik mikrofalowych jest na tyle duża, że nawet w bardzo dobrych książkach z rozdziałami poświęconymi antenom fazowanym nie wspomina się o możliwości wykorzystania transmisji optycznych. W takim stanie rzeczy rozdział 14 jest dodatkiem, uzupełnieniem czysto mikrofalowych opisów struktur anten fazowanych. Techniki fotoniczne rozwinięte dla potrzeb transmisji bitów stały się użyteczne

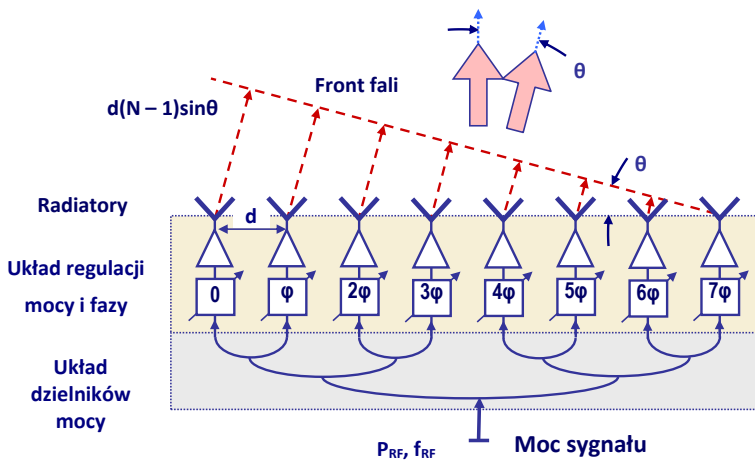
w wielu obszarach techniki. Warto w tym miejscu poczynić uwagę, że fotoniczne układy formowania wiązki wykazują rozliczne zalety i przewagi nad układami czysto mikrofalowymi. Czytelnik znajdzie tego potwierdzenie.

14.2. Mikrofalowe anteny fazowane

14.2.1. Struktura i działanie fazowanego szyku antenowego

Szyk antenowy jest konstrukcją, w skład której wchodzi anteny, czyli elementy promieniujące, zwane także radiatorami, zestawione w odpowiedniej strukturze. Podstawową strukturę liniowego szyku antenowego pokazano na rys. 14.1. Szyk ten pracuje w modzie nadawczym. Moc P_{RF} sygnału mikrofalowego o częstotliwości f_{RF} , który zostanie wypromieniowany, dostarcza odpowiedni generator. Moc ta dzielona jest przez pasywny układ dzielników mocy i kierowana w identycznych częściach do N identycznych radiatorów.

Na rys. 14.1 tych radiatorów jest 8. Należy zauważyć, że struktura układu dzielników mocy jest możliwie idealnie symetryczna. Moc P_{RF} powinna być z dużą dokładnością równo podzielona i skierowana do radiatorów. Aby fazy sygnałów docierających do nich były takie same, powinny być także identyczne drogi sygnału dla każdego radiatora. Równy podział mocy między elementy promieniujące nie jest warunkiem poprawnej pracy szyku antenowego, zostanie jednakże przyjęty na potrzeby analizy w tym rozdziale.



Rys. 14.1. Podstawowa struktura liniowego szyku antenowego z wieloma elementarnymi antenami i układem przesuwników fazy.

Także warunek liniowego rozmieszczenia elementów radiacyjnych nie jest koniecznością. Opisano kołowe szyki antenowe, a także planarne szyki antenowe, w których elementy

promieniujące rozmieszczone są w wierszach i kolumnach. Podstawowe zależności opisujące funkcjonowanie liniowego szyku antenowego sprawdzają się także dla innych struktur szyków.

Cząstkowe moce sygnału we wrotach wyjściowych układu dzielników mocy nie docierają od razu do radiatorów. Zwykle sygnały kierowane są do układu regulowanych przesuwników fazy bądź układów linii opóźniających. Na rysunku 14.1 przesuwniki fazy wprowadzają przesunięcia fazy równe: $0, \varphi, 2\varphi, \dots, 7\varphi$. Przed dotarciem do radiatorów sygnały są wzmacniane przez układ identycznych wzmacniaczy (użycia tłumików nie można wykluczyć, ale to rozwiązanie rzadko jest stosowane). Wymienione elementy tworzą układ formowania wiązki, a wprowadzane przez nie parametry transmisji sygnału decydują o kształcie wiązki i kierunku propagacji.

Radiatory anteny umieszczone są w jednej linii, a odległość między nimi wynosi d i jest zwykle porównywalna z długością propagowanej fali λ . Aby obliczyć natężenie pola elektrycznego w odległości r od szyku, w punkcie (θ, r) , należy zsumować promieniowanie wszystkich radiatorów od 1 do N .

$$E(\theta, r) = E_1(\theta, r) + E_2(\theta, r) + \dots + E_N(\theta, r); \quad (14-1)$$

Najczęściej moce wypromieniowywane przez cząstkowe anteny są jednakowe i opisane w tym punkcie wartością natężenia pola elektrycznego E_0 . Podobnie charakterystyki promieniowania wszystkich anten i parametry polaryzacji są także jednakowe i opisane funkcją $F_0(\theta)$. Natomiast fazy $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$ są różne, o wartościach ustalonych przesuwnikami fazy układu formowania wiązki. Natężenie pola elektrycznego $E_n(\theta, r_n)$, pochodzące od n -tej anteny, w punkcie określonym współrzędnymi (θ, r_n) , gdzie r_n jest odległością od radiatora, można zapisać następująco:

$$E_n(\theta, r_n) = E_0 F_0(\theta) \frac{\exp[j(\varphi_n - \beta r_n)]}{4\pi r_n}; \quad (14-2)$$

Tutaj β jest stałą propagacji w wolnej przestrzeni zależną od pulsacji ω promieniowanego sygnału, bądź długości fali λ (c – prędkość światła).

$$\beta = \frac{2\pi f_{RF}}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad (14-3)$$

Objektem rozważań jest pole dalekie anteny, co oznacza spełnienie warunku $r \gg Nd$. Można przyjąć, że z punktu widzenia zależności amplitudowych wartości odległości r_n są z dobrym przybliżeniem jednakowe i równe r .

$$r_1 = r_2 = \dots = r_N = r; \quad (14-4)$$

Natomiast z punktu widzenia relacji fazowych niewielkie różnice odległości odgrywają istotną rolę, co pokazują zależności (14-5):

$$\begin{aligned}
 r_1 &= r; \\
 r_2 &= r + d\sin\theta; \\
 &\dots \dots \dots \\
 r_N &= r + d(N-1)\sin\theta;
 \end{aligned}
 \tag{14-5}$$

Można teraz pole elektryczne wzbudzone przez n -tą antenę zapisać następująco:

$$E_n(\theta, r_n) = E_0 F_0(\theta) \frac{\exp(-j\beta r)}{4\pi r} \exp\{j[\varphi_n - (n-1)\beta d\sin\theta]\}; \tag{14-6}$$

Sumując wszystkie składniki pola elektromagnetycznego pochodzące od N radiatorów, otrzymuje się następującą zależność:

$$E_{\text{TOT}}(\theta, r) = E_0 F_0(\theta) \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \sum_{n=1}^N e^{j[\varphi_n - (n-1)\beta d\sin\theta]}; \tag{14-7}$$

Ostatni czynnik prawej strony jest sumą N liczb zespolonych o module 1. Łatwo zauważyć, że suma ta będzie równa N , gdy argumenty tych liczb będą równe zero. Fazowane szyki antenowe osiągają najlepsze parametry, gdy wartości przesunięć fazy w kolejnych antenach tworzą ciąg arytmetyczny z krokiem φ :

$$\varphi_n = 0, \varphi, 2\varphi, \dots, (n-1)\varphi \dots (N-1)\varphi; \tag{14-8}$$

Dla takiego ciągu wartości φ_n przesunięcia fazy i dla odległości d między radiatorami, punkty w przestrzeni promieniowania anteny na prostej nachylonej pod kątem θ do linii utworzonej przez radiatory spełniają warunek maksymalizacji wartości natężenia pola elektrycznego. Warunek ten może być zapisany równaniem (14-9):

$$\varphi = \beta d\sin\theta = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta; \tag{14-9}$$

W punktach na prostej tworzącej front fali natężenie pola elektrycznego wyrazi się zależnością (14-10).

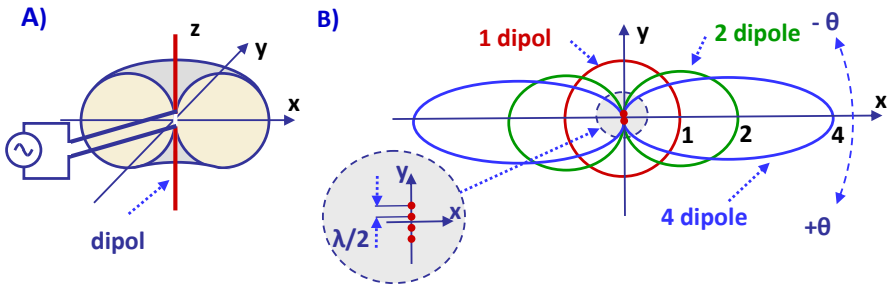
$$E_{\text{TOT}}(\theta, r) = E_0 F_0(\theta) \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} N; \tag{14-10}$$

Wynika z niej prosty wniosek, że zmieniając przesuwnikami fazy wartość kąta φ , można sterować kierunkiem propagacji promieniowanej przez szyk antenowy fali, bez mechanicznego przemieszczania struktur radiatorów. Ta właściwość szyku antenowego stanowi jego największą zaletę.

Efekty sumowania pól elektromagnetycznych wypromieniowanych z kilku radiatorów można ocenić na podstawie rys. 14.2.

Na rys. 14.2A pokazano w przestrzeni (x, y, z) charakterystykę promieniowania idealnego dipola antenowego. Antenę tworzą dwa pręty metalowe (na rysunku w kolorze czerwonym) umieszczone na końcu linii dwuprzewodowej zasilanej źródłem sygnału elektrycznego.

Charakterystyka swym kształtem przypomina obwarzanek. Na rysunku 14.2B pokazano charakterystyki promieniowania w płaszczyźnie (x,y) . Kolorem czerwonym oznaczono charakterystykę promieniowania pojedynczej anteny dipolowej w płaszczyźnie prostopadłej do dipola. Obecność dwóch dipoli istotnie zmienia kształt charakterystyki – krzywa zielona, a promieniowanie czterech anten zmienia kształt charakterystyki w sposób zasadniczy, na co wskazuje kształt krzywej niebieskiej.



Rys. 14.2. Ilustracja sumowania pól EM wypromieniowanych przez kilka radiatorów. A) Kształt wypromieniowanej wiązki przez pojedynczą antenę dipolową. B) Kształty charakterystyk promieniowania w płaszczyźnie x,y , dla pojedynczej anteny dipolowej (kolor czerwony), układu dwóch dipoli (kolor zielony) i układu czterech dipoli (kolor niebieski), rozmieszczonych liniowo w odległości pół fali.

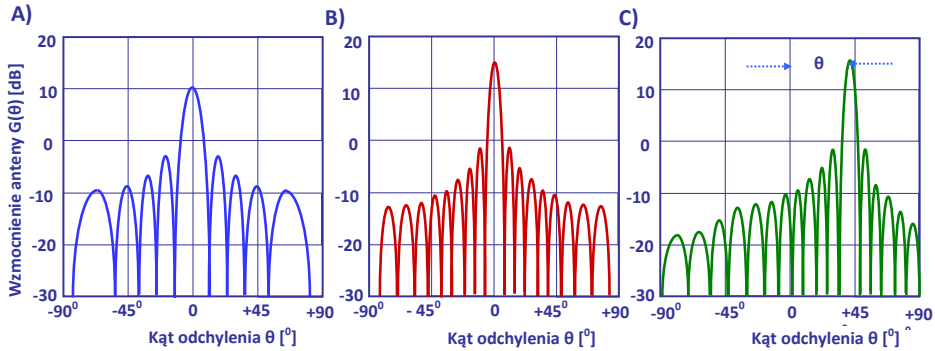
Ważnym parametrem anteny jest jej wzmocnienie G . Parametr ten mówi, ile razy większa jest moc fali elektromagnetycznej skierowanej przez antenę w wybranym kierunku, w stosunku do mocy wypromieniowanej przez antenę dookólną. W szyku promieniujących dipoli sumowanie wartości natężeń pól elektrycznych wszystkich radiatorów ma miejsce tylko w określonym kierunku. W miarę wzrostu liczby N radiatorów rośnie natężenie pola elektrycznego N razy, co oznacza wzrost promieniowanej mocy o N^2 w wybranym kierunku, a więc wzrost wzmocnienia G_N anteny złożonej z N elementów:

$$G_N = G_0 N^2 \quad (14-11)$$

W rzeczywistych szykach antenowych liczba radiatorów bywa wielokrotnie większa, a wiązka promieniowania staje się bardzo wąska. Aby zobrazować funkcjonowanie szyku antenowego, na rys. 14.3 przedstawiono wyniki symulacji charakterystyk promieniowania dla kilku przypadków.

Na rys. 14.3A przedstawiono charakterystykę promieniowania szyku złożonego z 8 radiatorów. Przesuwniki fazy nie wprowadzały różnych przesunięć fazy w torach transmisyjnych. Należy zauważyć, że obok głównej wiązki pojawiają się wstęgi boczne. Na wysokość wstęg bocznych i ich rozmieszczenie istotny wpływ mają odległości między radiatorami. W szczególnym przypadku opisywanego wykresu radiatorzy były oddalone od siebie o pół długości fali $\lambda/2$.

Na rysunku 14.3B przedstawiono wyniki obliczeń dla 16 radiatorów bez przesunięć fazowych. Można zauważyć, że – porównując z rys. 14.3A – wiązka jest bardziej smukła, wzmożenie anteny wzrosło. Wzrosła też liczba wstęg bocznych, ale poziom ich mocy obniżył się. Spostrzeżenie to można uogólnić – wzrostowi liczby radiatorów towarzyszy zmniejszenie szerokości wiązki.



Rys. 14.3. Wyniki symulacji charakterystyk promieniowania anten fazowanych. A) Sumowanie sygnałów z 8 radiatorów bez przesunięć fazowych. B) Sumowanie sygnałów z 16 radiatorów bez przesunięć fazowych. C) Sumowanie sygnałów z 16 radiatorów z przesunięciami fazowymi dla $\theta = 40^\circ$.

Na rysunku 14.3C zilustrowano wyniki obliczeń charakterystyki promieniowania szysku 16 radiatorów z przesuwnikami ustawionymi w taki sposób, aby $\theta = 40^\circ$. Przy zmianie kąta promieniowania wiązki w granicach (-60°) – $(+60^\circ)$ szerokość wiązki nie ulega istotnym zmianom.

Założenia rozdziału 14 nie pozwalają na przytoczenie większej liczby wyników symulacji, aby prześledzić wpływ odległości między radiatorami. Czytelnik znajdzie odpowiednie wiadomości w obszernej literaturze.

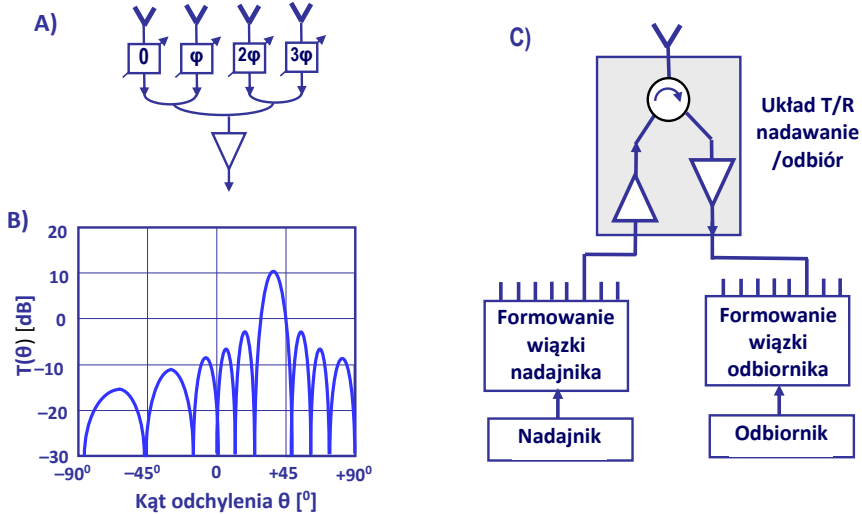
Warunek (14-9) wskazuje, że przez zmianę wartości kątów fazowych φ_n można zmieniać kierunek promieniowania wiązki. Daje to możliwość elektrycznego sterowania (skanowania) wiązką promieniowania anteny. Jednym ze stosowanych rozwiązań jest przygotowanie odpowiedniego zespołu przesuwników fazy sterowanych elektrycznie. Technika mikrofalowa pozwala rozwiązać to zadanie w rozmaity sposób.

Innym sposobem sterowania kierunkiem promieniowania wiązki jest wprowadzenie zestawu przełączanych linii opóźniających, zamiast zestawu przesuwników fazy. Sygnały, które zostaną wypromieniowane, przechodzą w każdym torze transmisyjnym przez różnej długości odcinki linii długiej i dochodzą do radiatora z różnymi fazami. W tej sytuacji front promieniowania fali zmienia swój kierunek.

Z powyższych rozważań wynika, że sterować kierunkiem promieniowania wiązki można w dwojaki sposób: umieszczając w układzie formowania wiązki zestaw sterowanych przesuwników fazy bądź zestaw przełączanych odcinków linii opóźniających. Pierwsze z rozwiązań, zestaw sterowanych przesuwników fazy, jest prostsze w realizacji i chętnie stosowane. Zagadnienie to zostanie szerzej opisane przy omawianiu technik fonicznych.

14.2.2. Szyk antenowy jako odbiornik

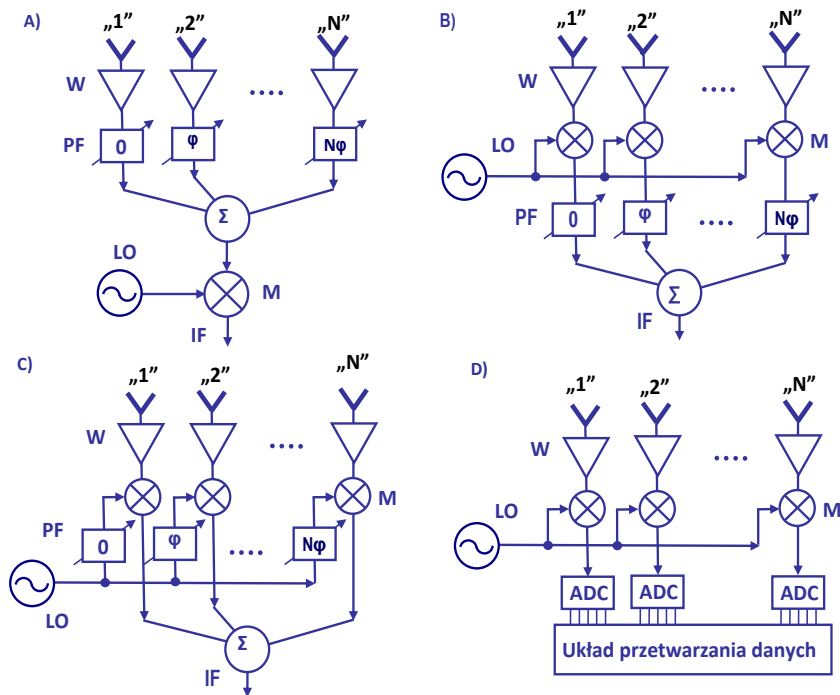
Funkcją szyku antenowego, którego strukturę pokazano na rys. 14.1, jest nadawanie. Szyk radiatorów wypromieniowuje kierunkowo dostarczoną moc w przestrzeń. W oparciu o opisane zasady można skonstruować fazowany antenowy szyk odbiorczy, który – jako antena kierunkowa – będzie odbierał sygnały propagowane z określonego kierunku. Zasady jego funkcjonowania ilustruje rys. 14.4.



Rys. 14.4. Fazowany szyk antenowy w funkcji odbiornika. A) Idea kierunkowego odbioru sygnałów przez liniowy szyk antenowy. B) Współczynnik transmisji sygnału przez szyk antenowy z określonym nastawieniem przesuwników fazy w zależności od kąta padania. C) Struktura systemu nadawczo-odbiorczego z anteną przeznaczoną do nadawania i odbioru wraz układem T/R nadawanie/odbior.

Na rysunku 14.4A pokazano prostą strukturę czterech elementarnych anten odbiorczych. Odebrane sygnały transmitowane są następnie przez przesuwniki fazy do układu sumatora i wzmacniacza. Charakterystyki promieniowania poszczególnych anten nie muszą odznaczać się dużą kierunkowością, a ich wzmocnienia są niewielkie. Zestaw przesuwników fazy wprowadzonych do każdego toru dobiera fazy sygnałów transmitowanych w taki sposób, aby zsumować sygnały pochodzące z określonego, wybranego kierunku. Rolę sumatora pełni odpowiedni układ pasywny. Charakterystyka transmisji takiego układu jest kierunkowa, co pokazuje rys. 14.4B. Dla wybranego kierunku wzmocnienie szyku antenowego może osiągać duże wartości. Sygnały pochodzące z innych kierunków znoszą się wzajemnie. Poprzez zmianę wartości przesunięć fazy można zmieniać kierunek odbioru sygnałów bez zmiany położenia anteny.

W wielu przypadkach fazowany szyk antenowy może służyć jedynie do celów nadawczych, w innych (na przykład w radioastronomii) – jedynie do celów odbiorczych. Jednak najczęściej system powinien być przygotowany do pełnienia obu funkcji jednocześnie. Zadanie to może być rozwiązane w różny sposób. Ideę jednego z rozwiązań pokazano na rys. 14.4C. W strukturze systemu antenowego pojawia się moduł nadawczo-odbiorczy T/R (ang. *Transmission/Reception*). Moduł T/R współpracuje z każdą cząstkową anteną i pełni kilka funkcji. Wzmacnia sygnał otrzymany z układu formowania wiązki nadajnika do odpowiedniego poziomu i kieruje go do anteny, aby został wypromieniowany. Za pomocą cyrkulatora (odpowiedniego sprzęgacza) kieruje odebrany przez antenę sygnał do toru odbiorczego, wzmacnia go wstępnie wzmacniaczem o małym poziomie szumów i kieruje dalej do układu formowania wiązki odbiornika. Połączone z antenami moduły T/R powinny być identyczne i mieć takie same parametry, aby nie popsuć wyników procesu formowania wiązki.



Rys. 14.5. Przegląd struktur fazowanego szyku antenowego pełniącego funkcje odbiorcze. A) Podstawowa struktura szyku, przesuwniki fazy PF pracują przy częstotliwości odbieranego sygnału. Sygnały po zsumowaniu poddane są mieszaniu w mieszaczu M. B) Odebrane sygnały poddane są mieszaniu. Przesuwniki fazy PF pracują przy częstotliwości pośredniej. C) Przesuwniki fazy umieszczone są w torze sygnałowym lokalnego oscylatora LO. D) Sygnały o częstotliwości pośredniej IF analizowane są cyfrowo po przetworzeniu przez przetworniki ADC analog–cyfra.

Układ przesuwników fazy jest w systemach szyków antenowych elementem kluczowym. Dzięki niemu realizowana jest funkcja kierunkowego sumowania sygnałów. W przypadku nadajnika sumowanie odbywa się po wypromieniowaniu sygnału, w przypadku odbiornika sygnały sumowane są na jednym z kolejnych etapów obróbki sygnałów. Na rysunku 14.5 przedstawiono kilka rozwiązań układów odbiorczych szyków antenowych, w których przesuwniki fazy umieszczono w różnych miejscach torów przetwarzania sygnałów.

Układ pokazany na rys. 14.5A jest rozwiązaniem najczęściej spotykanym. Odebrane przez anteny sygnały są najpierw wzmacniane przez wzmacniacze W, a następnie kierowane przez układ przesuwników fazy PF do obwodu sumowania mocy. Odpowiedni dobór przesunięć fazowych pozwala na dodanie sygnałów odebranych z określonego kierunku. Po zsumowaniu sygnał kierowany jest do mieszacza w celu obniżenia częstotliwości przed dalszą obróbką.

W układzie z rys. 14.5B proces przemiany częstotliwości odebranych sygnałów realizowany jest w każdym z torów przed ich zsumowaniem. Funkcję heterodyny pełni oscylator LO, który dostarcza identyczny sygnał do ciągu mieszaczy M. Po obniżeniu częstotliwości sygnały kierowane są do przesuwników fazy PF, a następnie do układu sumującego. Taka lokalizacja przesuwników fazy pozwala zrealizować wszystkie funkcje fazowanego szyku antenowego.

W procesie mieszania faza sygnału o pośredniej częstotliwości jest różnicą faz przetwarzanego sygnału i sygnału lokalnego oscylatora. Można wykorzystać ten fakt, wprowadzając przesuwniki faz do obwodów lokalnego oscylatora, różnicując w procesach przemiany częstotliwości, w sposób kontrolowany, fazy sygnałów heterodyny. Układ szyku antenowego działający w opisany sposób pokazano na rys. 14.5C.

Sygnały odebrane przez cząstkowe anteny szyku, po wzmocnieniu i przemianie w układach mieszaczy M, można zapisać cyfrowo, wykorzystując przetworniki ADC analog–cyfra, rys. 14.5D. Obróbka sygnałów cyfrowych pozwala w końcowym rezultacie uzyskać efekt kierunkowego odbioru.

Z powyższego krótkiego opisu można wnioskować, że parametry fazowanych szyków antenowych, kształt wiązki, duże wzmocnienia, możliwość szybkiej zmiany kierunków emisji i odbioru stawiają je w rzędzie najlepszych narzędzi systemów radarowych i transmisyjnych. Powstaje więc pytanie, gdzie tu jest miejsce dla fotoniki?

Aby odpowiedzieć na to pytanie, należy wymienić jeszcze jedno wymaganie stawiane fazowanym szynom antenowym, a mianowicie konieczność pracy w szerokim zakresie częstotliwości. W systemach radarowych częsta i radykalna zmiana częstotliwości wysyłanych impulsów jest warunkiem ochrony obiektu przed wykryciem i zniszczeniem. W systemach obserwacji radioastronomicznej możliwość zmiany długości fali odbieranych z kosmosu sygnałów jest niezwykle użyteczna. Technika mikrofalowa z największym trudem pozwala zapewnić warunki pracy szerokopasmowej, gdy stosunek częstotliwości górnej pasma pracy ma się do częstotliwości dolnej jak 2 : 1. W przypadku gdy praca układu formowania wiązki nadajnika oparta jest na wykorzystaniu przesuwników fazy, zmiana częstotliwości

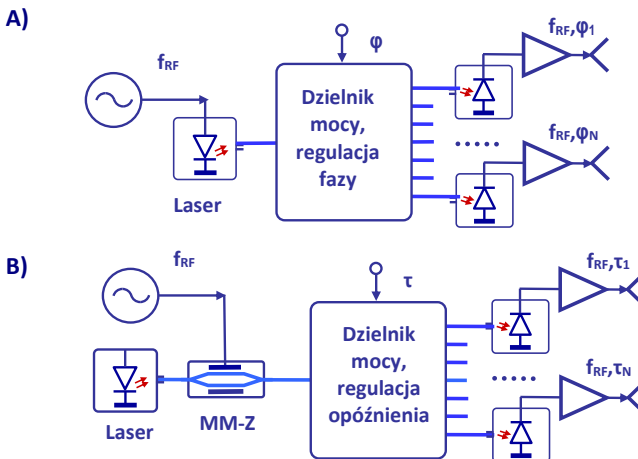
pracy powoduje zmianę przesunięć faz w poszczególnych torach i tym samym zmianę kierunku promieniowania wiązki pola EM. Efekt ten w języku angielskim nosi nazwę *squinting effect*, co oznacza efekt zesa. Tak więc pasma pracy fazowanych szyków antenowych wykorzystujących mikrofalowe przesuwniki fazy są niewielkie. Wykorzystanie technik fotoniki pozwala znacząco poszerzyć pasmo pracy systemów szyków antenowych. Opisano rozwiązania pozwalające na szerokopasmową pracę, gdy stosunek częstotliwości górnej pasma ma się do częstotliwości dolnej jak 5 : 1.

Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na jeszcze jedną korzyść z zastosowania technik fotoniki. Wykorzystanie technologii fotonicznych układów scalonych pozwoliło na miniaturyzację systemów antenowych, zarówno wagową, jak i wymiarową.

14.3. Fotonika w układach formowania wiązki

14.3.1. Łącze optyczne jako przewodnica sygnału mikrofalowego

W rozdziale 7 szczegółowo opisano działanie i parametry analogowego łącza optycznego. Wynika z niego, że w określonych warunkach łącze optyczne jest liniowym dwuwrotnikiem mikrofalowym, którego parametry można opisać macierzą rozproszenia. Można nim przesyłać rozmaite sygnały mikrofalowe, przebiegi niezmodulowane i zmodulowane w różny sposób. Pasma transmisji jest bardzo duże i może wynosić od kilku do kilkudziesięciu gigaherców. Tłumienie wnoszone przez taki dwuwrotnik jest niewielkie i stałe praktycznie w całym paśmie transmisji. O częstotliwościowej charakterystyce transmisji decydują właściwości modulatora i fotodetektora.



Rys. 14.6. Idea użycia łącza optycznego do transmisji sygnału mikrofalowego do radiatorów szyku antenowego oraz do regulacji jego przesunięcia fazy. A) Układ z bezpośrednią modulacją lasera, dzielnikami mocy i fonicznymi przesuwnikami fazy. B) Układ z zewnętrznym modulatorem MM-Z i strukturą linii opóźniających wprowadzającą opóźnienie czasowe τ .

Już w latach 80. XX wieku zadano sobie pytanie, czy właściwości łącza optycznego można wykorzystać przy tworzeniu struktury szerokopasmowych układów formowania wiązek w fazowanych szykach antenowych. Uzyskano pozytywną odpowiedź, potwierdzoną od tamtych czasów dziesiątkami interesujących rozwiązań.

Na rysunku 14.6 pokazano dwa proste układy optyczne, które mogą zostać użyte w układach formowania wiązek. Układ z rys. 14.6A jest światłowodowym łączem optycznym, w którym rolę nadajnika pełni laser bezpośrednio modulowany sygnałem mikrofalowym. Generowany i zmodulowany sygnał optyczny kierowany jest do układu optycznego, który dzieli zmodulowany sygnał do N radiatorów anteny. W każdym z N torów umieszczony jest optomikrofalowy przesuwnik fazy kontrolowany elektrycznie. Termin „optomikrofalowy przesuwnik fazy” oznacza, że przyrząd realizuje przesunięcie fazy transmitowanego sygnału mikrofalowego metodami optycznymi. Podzielone sygnały optyczne docierają do fotodetektorów i po usunięciu optycznej fali nośnej i wzmacnieniu kierowane są do radiatorów.

Układ z rys. 14.6B jest łączem optycznym realizującym podobne cele. Zastosowano w nim zewnętrzny modulator Macha-Zehndera. Jak uzasadniono w rozdziale 7, wzmacnienie łączy analogowych z modulatorem Macha-Zehndera może być o kilka, a nawet kilkanaście decybeli większe niż w przypadku łącza analogowego z bezpośrednią modulacją mocy lasera.

Systemy fazowanych szyków antenowych zarówno nadawczych, jak i odbiorczych wymagają wprowadzenia zespołu przesuwników fazy. Jak wiadomo z rozdziału 6, w którym opisano rozmaite techniki modulacji sygnałów optycznych, najlepsze rozwiązanie problemu regulacji fazy sygnału optycznego zapewnia optoelektroniczny przesuwnik fazy, opisany w punkcie 6.4.2. Przyrząd ten został zastosowany w wielu rozwiązaniach.

Przesunięcie fazy uzyskuje się także przez wydłużenie lub skrócenie drogi propagacji fali. Do układów formowania wiązki wprowadza się zestawy linii opóźniających, które przez różnicowanie dróg propagacji fali umożliwiają regulację i kontrolę przesunięć fazowych. Technika ta oznaczana jest skrótem TTD (ang. *True Time Delay*). W wielu przypadkach technika TTD pozwala uzyskać lepsze parametry szyku antenowego niż technika napięciowo kontrolowanych przesuwników fazy.

Rozpatrzmy prosty przypadek transmisji sygnału optycznego światłowodem o długości l , wykonanym z materiału o współczynniku załamania n . Czas t przepływu sygnału zapisać można zależnością (14-12), w której c jest prędkością światła w próżni, a v prędkością światła w światłowodzie.

$$t = \frac{ln}{c} = \frac{l}{v}; \quad (14-12)$$

Jeżeli chcemy zmienić czas przepływu sygnału optycznego o Δt , a tym samym zmienić przesunięcie fazy o $2\pi f\Delta t$, to można, zgodnie z zależnością (14-13), postąpić w dwojaki sposób:

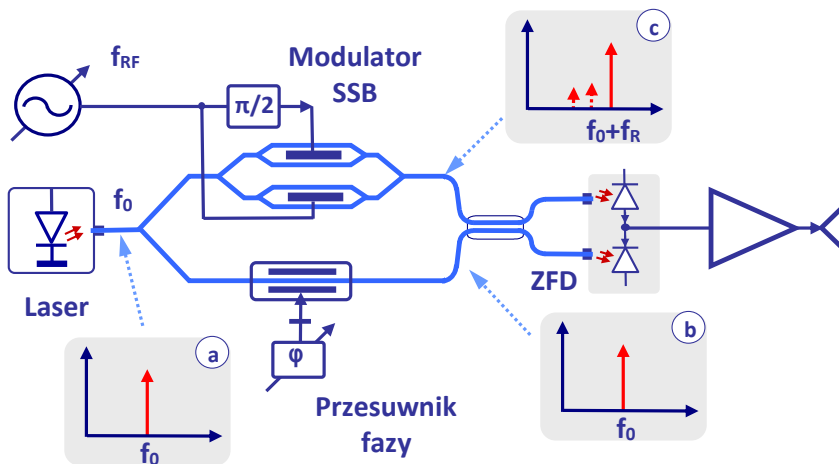
$$\Delta t = \frac{1}{v} \Delta l - \frac{l}{v^2} \Delta v; \quad (14-13)$$

- można zmienić długość toru optycznego, wydłużając go lub skracając o Δl ;
- można zmienić prędkość $v = c/n$ fali w światłowodzie, zmieniając na przykład długość fali generowanej przez laser, aby wykorzystać efekt dyspersji.

Obie możliwości zostały w różny sposób skutecznie wykorzystane. Rozwiązania tego problemu zostaną krótko opisane w następujących punktach.

14.3.2. Optomikrofalowe przesuwniki fazy

Problem przesunięcia fazy sygnału mikrofalowego, którym zmodulowano falę nośną o częstotliwości optycznej, przesyłaną następnie łączem światłowodowym, można rozwiązać w różny sposób. Literatura podaje wiele interesujących przykładów. Rozwiązanie należące do grupy najlepszych i niezawodnych przedstawia układ pokazany na rysunku 14.7. Jest to wybrany fragment układu szyku antenowego z transmisją sygnału mikrofalowego do jednej z anten; jego działanie ilustruje zasadę pracy całego systemu.



Rys. 14.7. Idea układu optomikrofalowego przesuwnika fazy wykorzystującego modulację jednowstęgową i homodynową detekcję. Rysunek a – widmo sygnału generowanego przez laser, rysunek b – sygnał przesunięty w fazie przez przesuwnik fazy, rysunek c – widmo sygnału w porcie wyjściowym modulatora SSB. ZFD – zrównoważony fotodetektor.

W układzie wykorzystano fazoczułą detekcję homodynową. Sygnał optyczny wygenerowany przez laser kierowany jest do dwóch ramion. W jednym z nich umieszczono układ jednowstęgowego modulatora amplitudy SSB (wytłumiającego falę nośną i drugą wstęgę), z elektrooptycznym modulatorem M-Z. Modulator ten przesuwia częstotliwość optycznej fali nośnej z f_0 na $f_0 + f_{RF}$. Modulator M-Z jest układem szerokopasmowym i częstotliwość

modulacji f_{RF} może zmieniać się w szerokich granicach. Zasadę działania modulatora jednowstęgowego opisano w rozdziale 6.

W ramieniu drugim umieszczono sterowany napięciowo elektrooptyczny modulator fazy, zmieniający fazę sygnału optycznego o φ . Należy zauważyć, że wartość φ nie zależy od wartości częstotliwości f_{RF} . Oba sygnały kierowane są następnie do fotodetektora i podane detekcji koherentnej.

Podstawowe zależności detekcji koherentnej podano w rozdziale 4. Wykorzystując podaną tam zależność (4-42), można prąd fotodiody i_{FD} zapisać zależnością (14-14), zgodnie z podanymi na rys. 14.7 oznaczeniami sygnałów (K jest stałą zależną od czułości diody).

$$i_{FD} = K |A_M e^{j2\pi(f_0 + f_{RF})t} + A_F e^{j(2\pi f_{RF}t + \varphi)}|^2; \quad (14-14)$$

Moce sygnałów optycznych dochodzących do fotodiody: P_M z toru z modulatorem SSB i P_F z toru z modulatorem fazy, mają podobne poziomy:

$$P_M = |A_M|^2; \quad P_F = |A_F|^2; \quad (14-15)$$

Wśród składowych prądu fotodiody znaleźć można składniki o częstotliwości różnicowej, równej w tym przypadku wprowadzonej do modulatora częstotliwości mikrofalowej f_{RF} .

$$i_{FD} = K \sqrt{P_M P_F} \cos(2\pi f_{RF}t + \varphi); \quad (14-16)$$

Użycie zrównoważonego fotodetektora usuwa nieużyteczne składniki, pozostawiając element prądu sygnału wyrażony powyższym równaniem. Przed wyemitowaniem należy go wzmacnić do odpowiedniego poziomu.

W układzie wieloantenowym zmodulowany przez modulator SSB sygnał dzielony jest równomiernie do wszystkich torów prowadzących do fotodetektorów zasilających elementarne anteny. Niemodulowana część mocy lasera dzielona jest równomiernie i prowadzona równoległymi torami do zrównoważonych fotodetektorów. W każdym z torów umieszczane są przesuwniki fazy. Przy dużej liczbie radiatorów sygnał optyczny lasera jest wzmacniany przez wzmacniacz optyczny, zwykle typu SOA.

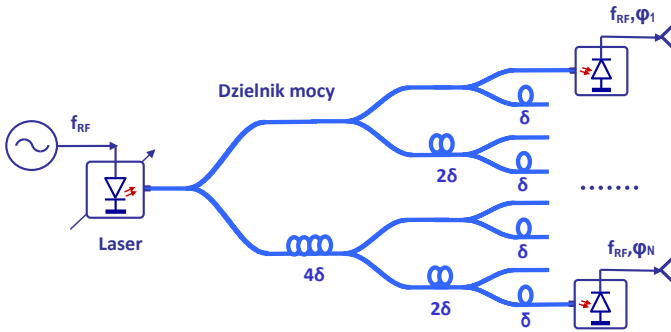
Jedną z zalet opisywanego rozwiązania jest możliwość integracji na jednym półprzewodnikowym podłożu całego fotonicznego układu sterowania wiązką.

W niektórych rozwiązaniach przesuwników fazy zaproponowano układ z dwoma laserami, w którym częstotliwość mikrofalowa otrzymywana jest jako różnica częstotliwości obu laserów. Wadą tego sposobu jest konieczność użycia układu stabilizacji częstotliwości laserów oraz duży poziom szumów różnicowej częstotliwości mikrofalowej. Detekcja homodynowa ma zdecydowaną przewagę nad układem z dwoma laserami.

Charakterystyczny dla drugiej grupy rozwiązań, w której przesunięcie fazy jest rezultatem zróżnicowania długości torów transmisyjnych, jest układ przedstawiony na rys. 14.8. Układ formowania wiązki przypomina drzewo. Zmodulowany amplitudowo z częstotliwością f_{RF} sygnał optyczny kierowany jest dzielnikiem światłowodowym utworzonym z hybrydowych

rozgałęzień do N (w tym przypadku $N = 8$) fotodiód sprężonych z radiatorami. Długości torów optycznych są celowo zróżnicowane w taki sposób:

$$l_n = l, l + \delta, l + 2\delta, \dots, l + \delta(N - 1); \quad (14-17)$$



Rys. 14.8. Układ formowania wiązki wykorzystujący strukturę światłowodowego dzielnika mocy 1 : 8 o zróżnicowanych długościach torów.

W rozdziale 8 opisano macierzą rozproszenia światłowodów, którym przesyłany jest zmodulowany amplitudowo sygnał optyczny. Transmisję takiego sygnału od lasera do fotodiody można, upraszczając zależność (8-60), opisać prostą zależnością (14-18):

$$T_O = \frac{e^{-j\beta_{RF}l}}{N} = \frac{\exp(-j2\pi l_n/\lambda_{RF})}{N}; \quad (14-18)$$

Pisząc powyższą zależność przyjęto, że światłowody są bezstratne, rozgałęzienia hybrydowe symetryczne i bezodbiciowe. Stała fazowa $\beta_{RF} = 2\pi/\lambda_{RF}$ opisuje ruch obwiedni modulowanej mocy optycznej.

Jeśli przyrosty odległości są tak dobrane, że $\delta/\lambda_{RF} = p$ (p jest liczbą całkowitą), to fazy sygnałów kierowanych do radiatorów są identyczne i kierunek promieniowania wiązki jest prostopadły do linii szyku antenowego.

Jeżeli zmienić częstotliwość sygnału mikrofalowego o Δf_{RF} , to elektryczne długości torów zmienią się proporcjonalnie do $\Delta f_{RF}/f_{RF}$. Zmieniają się też opóźnienia fazowe między kolejnymi radiatorami o $\Delta\varphi$, zgodnie z zapisem (14-19):

$$\Delta\varphi_n = \Delta\varphi, 2\Delta\varphi, 3\Delta\varphi, \dots, N\Delta\varphi; \quad (14-19)$$

gdzie:

$$\Delta\varphi = 2\pi p \frac{\Delta f_{RF}}{f_{RF}}; \quad (14-20)$$

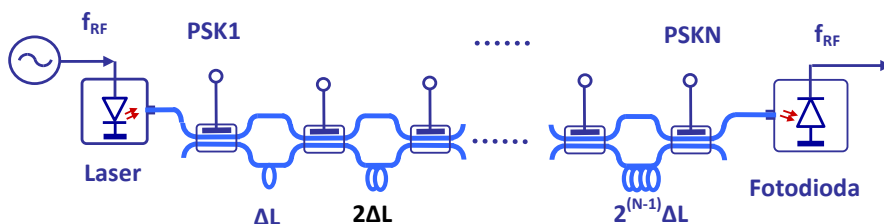
W rezultacie szuk antenowy zmieni swój kierunek promieniowania wiązki. Efekt skanowania uzyskany został tutaj przez zmianę częstotliwości f_{RF} sygnału mikrofalowego. Można powiedzieć, że wykorzystano tutaj wspomniany wcześniej efekt zera do skanowania ruchu

wiązki. Opisane rozwiązanie można zalecać w prostych przypadkach radarów wykorzystywanych np. w ruchu samochodowym.

14.3.3. Przełączane układy opóźniające

Struktura przełączanych układów opóźniających SDL (ang. *Switched Delay Line*) jest prosta i czytelna. Sygnał optyczny zostaje zmodulowany sygnałem o częstotliwości mikrofalowej, a następnie kierowany jest do fotoodbiornika torami światłowodowymi złożonymi z odcinków o różnej długości. Przełączniki optyczne programują drogę optycznej fali nośnej, ustalając tym samym całkowite opóźnienie fazowe sygnału mikrofalowego we wrotach wyjściowych odbiornika. Jedno z prostych rozwiązań przedstawiono na rys. 14.9.

Na rysunku pokazano podstawowy element struktury optycznej linii opóźniającej zwanej popularnie BIFODEL (ang. *Binary Fiber Optic DELay Line*). Przy pewnym położeniu przełączników PSK optyczna fala nośna dociera do fotodiody torem najkrótszym. Kolejne zmiany położenia przełączników zwiększają czas przepływu fali o Δt , $2\Delta t$, ..., $2^{(n-1)}\Delta t$. Przyrost ΔL drogi propagacji związany jest z przyrostem czasu przepływu prostą zależnością $\Delta t = \Delta L n_{\text{eff}}/c$, gdzie c/n_{eff} jest prędkością sygnału optycznego w światłowodzie.



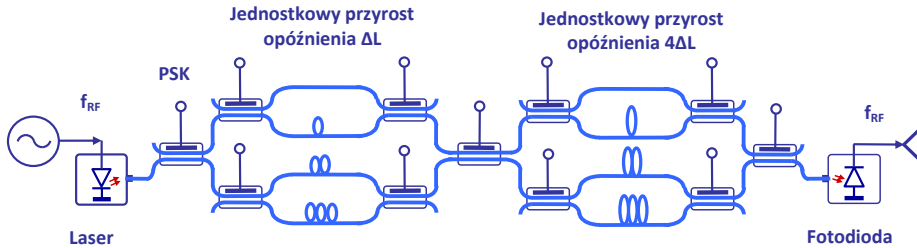
Rys. 14.9. Podstawowa struktura optycznej linii opóźniającej, zwanej historycznie BIFODEL. PSK – przełączane sprzęgacze kierunkowe.

Przełącznikami PSK mogą być sprzęgacze kierunkowe wykorzystujące efekt optoelektryczny do napięciowej regulacji sprzężenia. Ich działanie opisano w punkcie 6.4.3. Dla czterech elementów z podwójnymi odcinkami drogi liczba kombinacji czasu przepływu wynosi 16. Układ wraz z przełącznikami wykonywany jest zwykle w formie układu scalonego.

Nieco inną strukturę posiada układ pokazany na rys. 14.10. Kolejne odcinki przewodniczących optycznych pierwszej warstwy zwiększają swoją długość o ΔL , w kolejnej warstwie przyrosty równe są $4\Delta L$. Dla pokazanej na rysunku struktury liczba kombinacji wynosi 16. Układ ten nosi popularną nazwę SRODEL (ang. *Square Root Cascaded Delay Line*) i – podobnie jak poprzedni – może być wykonywany w postaci układu scalonego.

Układy linii opóźniających o strukturach przedstawionych na rys. 14.9 i rys. 14.10 można także realizować w wersji elektronicznej. Jednakże napotkamy wtedy na trudności

wykonania układów szerokopasmowych, np. 1–6 GHz, a także wprowadzających w szerokim paśmie tłumienie na tym samym poziomie. Oba wymienione problemy układy fotoniczne rozwiążą z łatwością.



Rys. 14.10. Podstawowa struktura optycznej linii opóźniającej zwanej historycznie SRODEL. PSK – przetwarzany napięciowo sprzęgacz kierunkowy.

14.3.4. Układy TTD z rezonatorami pierścieniowymi

W rozdziale 11, w punkcie 11.3.3, opisano właściwości rezonatora pierścieniowego stosowanego w procesach filtracji sygnału optycznego. Rezonator ten, w najprostszej strukturze, utworzony jest jako odcinek światłowodu tworzący zamkniętą pętlę, sprzężony z torem głównym za pomocą sprzęgacza kierunkowego. Strukturę rezonatora pierścieniowego pokazano na rys. 14.11A. Warunek wzbudzenia pola w pętli rezonatora jest prosty, opisuje go równanie (11-12), które można zapisać następująco:

$$\lambda_m = \frac{\pi D n_{\text{eff}}}{m}; \quad (14-21)$$

Tutaj λ_m jest długością fali w rezonansie, D średnicą pierścienia, m liczbą całkowitą, a n_{eff} efektywnym współczynnikiem załamania światłowodu.

Sygnał optyczny w pobudzonym rezonatorze potrzebuje czasu t_R , aby pokonać obwód πD światłowodu.

$$t_R = \frac{\pi D n_{\text{eff}}}{c}; \quad (14-22)$$

W rzeczywistych strukturach jest to zwykle ułamek nanosekundy, niemniej analiza pokazuje, że sygnał propagowany w torze głównym opóźnia się w kontrolowany sposób. Opóźnienie to wynika z zależności (14-23), która opisuje transmitancję $H(\omega_0)$ jako stosunek natężeń pola elektrycznego w portach zaznaczonych na rys. 14.11A.

$$H(\omega_0) = \frac{E_{1B}}{E_{1A}} = \frac{\sqrt{1-k} - e^{-(\alpha+j\beta)L}}{1 - \sqrt{1-k}e^{-(\alpha+j\beta)L}} = |H(\omega_0)|e^{j\tau}; \quad (14-23)$$

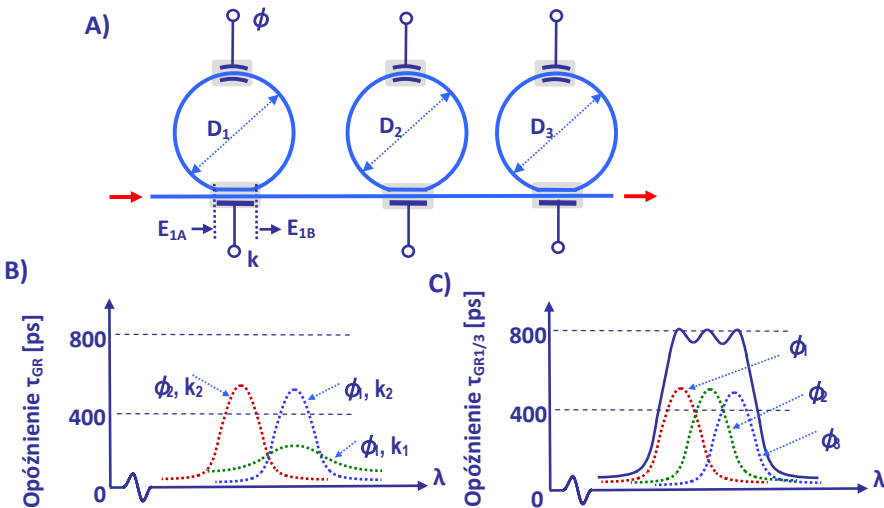
Tutaj ω_0 jest pulsacją sygnału optycznego w torze głównym, $L = \pi D$ jest obwodem pierścienia, k współczynnikiem sprzężenia, a stała propagacji $\gamma = \alpha + j\beta$ charakteryzuje światłowód. W ogólnym przypadku zależność argumentu transmitancji $\tau(\omega_0)$ charakteryzuje opóźnienie grupowe $\tau_{GR}(\omega_0)$, określone zależnością (14-24):

$$\tau_{GR}(\omega_0) = -\frac{\partial \tau(\omega_0)}{\partial \omega_0}; \quad (14-24)$$

Przyjmując założenie bezstratności światłowodu ($\alpha = 0$), można obliczyć opóźnienie sygnału Δt wywołane obecnością rezonatora pierścieniowego, wokół jego rezonansu.

$$\Delta t(\omega_0) = t_R \frac{k}{(2 - k) - 2\sqrt{1 - k}\cos(\beta L)}; \quad (14-25)$$

W praktycznie realizowanych układach rezonatorów pierścieniowych wprowadzane są dwa elementy regulacji: sprzęgacz o zmiennym sprzężeniu regulujący wartość współczynnika sprzężenia k i przesuwnik fazy ϕ , którym można w pewnych granicach przestrajać rezonator. Efekty działania obu regulacji pokazano na rys. 14.11B.



Rys. 14.11. Rezonator pierścieniowy jako element wprowadzający opóźnienie do toru transmisji. A) Obwód trzech rezonatorów pierścieniowych z regulacją współczynnika sprzężenia k i częstotliwości rezonansowej przesuwnikiem fazy ϕ . B) Regulacja parametrów pojedynczego rezonatora. C) Opóźnienie czasowe układu trzech rezonatorów pierścieniowych.

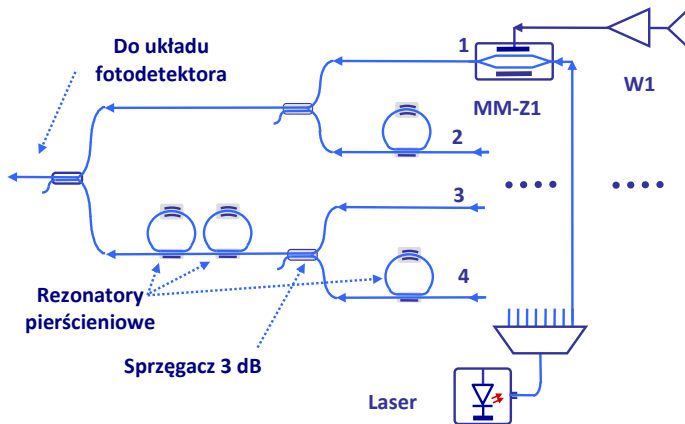
Aby powiększyć opóźnienie, stosuje się układy złożone z kilku rezonatorów. Rezonatory rozmieszczone są w niewielkich odległościach, choć nie są sprzężone ze sobą. Układ taki pokazano na rys. 14.11A. Całkowite opóźnienie czasowe $\Delta t_{1/3}$ można opisać zależnością (14-26), sumując opóźnienia wnoszone przez kolejne M rezonatorów. Składnik $t_{1/3}$ jest opóźnieniem sygnału przepływającego w torze głównym między rezonatorami 1 i 3.

$$\Delta t_{1/3}(\omega_0) = t_{1/3} + \sum_{n=1}^M \Delta t_n \frac{k_n}{(2 - k_n) - 2\sqrt{1 - k_n} \cos(\beta L_n)}; \quad (14-26)$$

Wykorzystując elementy regulacji, dobierane są częstotliwości rezonansowe i współczynniki sprzężenia, aby poszerzyć pasmo pracy układu, co pokazano na rys. 14.11C.

Na rys. 14.12 przedstawiono układ foniczny pracujący w modzie odbiorczym. Odbierane przez kolejne anteny sygnały w paśmie mikrofalowym, po wzmacnieniu, kierowane są do szerokopasmowych modulatorów Macha-Zehndera. Zmodulowane sygnały optyczne kierowane są do fotodetektora indywidualnie dobranymi ścieżkami w układzie sumującym ze sprzęgaczami kierunkowymi. W kolejnych odcinkach układu sumującego umieszczono rezonatory pierścieniowe wprowadzające opóźnienia transmitowanemu sygnałom.

Sygnały kolejnych anten napotykają na swej drodze różne liczby rezonatorów pierścieniowych. Sygnał z modulatora „1” nie napotyka odcinka z rezonatorem. Sygnał z modulatora „2” napotyka ścieżkę z jednym rezonatorem, sygnał z modulatora „3” ma na swej drodze dwa rezonatory, a z modulatora „4” – trzy rezonatory. Całkowite przesunięcie fazy sygnału jest tym większe, im więcej rezonatorów umieszczono na jego drodze propagacji.



Rys. 14.12. Przykład struktury fonicznego układu formowania wiązki pracującego w modzie odbiorczym z wykorzystaniem rezonatorów pierścieniowych. Parametry rezonatorów regulowane napięciowo. Sumowanie mocy sprzęgaczami kierunkowymi.

Optyczny układ formowania wiązki wykorzystujący rezonatory pierścieniowe jest strukturą wieloelementową, złożoną, z koniecznością strojenia i przełączania. Z tych powodów układy te nie znalazły szerszego zastosowania. Poszukiwano prostszych i tańszych rozwiązań.

14.3.5. Układy TTD z liniami dyspersyjnymi

Zgodnie z wnioskami płynącymi z równania (14-13) czas przepływu fali elektromagnetycznej sygnału optycznego zmodulowanego sygnałem mikrofalowym można regulować, zmieniając warunki propagacji sygnału optycznego. Zmieniamy czas przepływu, wydłużając bądź skracając długość toru. Można też uzyskać efekt zmiany, zmieniając prędkość fali. To rozwiązanie ma zastosowanie dzięki efektowi dyspersji. Jak opisano w rozdziałach 2 i 10, w typowych światłowodach prędkość grupowa sygnału optycznego zależy od długości fali. To z kolei wymaga zastosowania przestrajanego źródła sygnału optycznego, ale ten warunek łatwo spełnić.

W rozdziale 2 opisano szczegółowo efekt dyspersji i wprowadzono współczynnik dyspersji D prędkości grupowej v_g , nazywany dyspersją chromatyczną. Współczynnik D definiowany jest zgodnie z zależnością (14-27). Wiąże on ze sobą długość fali λ , stałą propagacji $\beta = 2\pi/\lambda$ i pulsację ω sygnału optycznego.

$$D_{\text{ps/km}\cdot\text{nm}} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2}; \quad (14-27)$$

Przypominając rozważania rozdziału 2, można dyspersję chromatyczną zapisać jako sumę dyspersji materiałowej D_M i falowodowej D_W :

$$D = D_M + D_W; \quad (14-28)$$

Pierwszy ze składników jest dla światłowodu kwarcowego związany z właściwościami kwarcu, drugi zaś może być w szerokich granicach modyfikowany przez zmianę struktury światłowodu. I tak dla standardowego światłowodu jednomodowego, dla $\lambda = 1550$ nm wartość $D = 16\text{--}18$ ps/nm·km, natomiast dla specyficznieskonstruowanego światłowodu wykorzystwanego do kompensacji skutków dyspersji można uzyskać nawet $D = -100$ ps/nm·km.

Poszukując światłowodów z dużym współczynnikiem dyspersji, zwrócono uwagę na kryształy fotoniczne. Opracowano światłowody PCF o strukturze kryształów fotonicznych (ang. *Photonic Crystal Fiber*), o współczynniku dyspersji równym $D = -600$ ps/nm·km. Światłowody tego typu pozwoliły na istotne skrócenie odcinków transmisyjnych w układach formowania wiązki.

Opracowano i opisano kilka bardzo interesujących rozwiązań fotonicznych układów formowania wiązki. Można wśród nich wyróżnić dwie podstawowe struktury: układ z jednym przestrajającym źródłem sygnału optycznego i strukturą zróżnicowanych torów transmisyjnych oraz układ w wieloma źródłami i jednym torem transmisyjnym. Pierwszą ze struktur pokazano na rys. 14.13.

Źródłem sygnału optycznego jest przestrajany laser. Sygnał modulowany jest przez zewnętrzny modulator Macha-Zendera. W układzie na rysunku pominięto wzmacniacz i kontroler polaryzacji. Następnie zmodulowany sygnał dzielony jest między N torów światłowodowych.

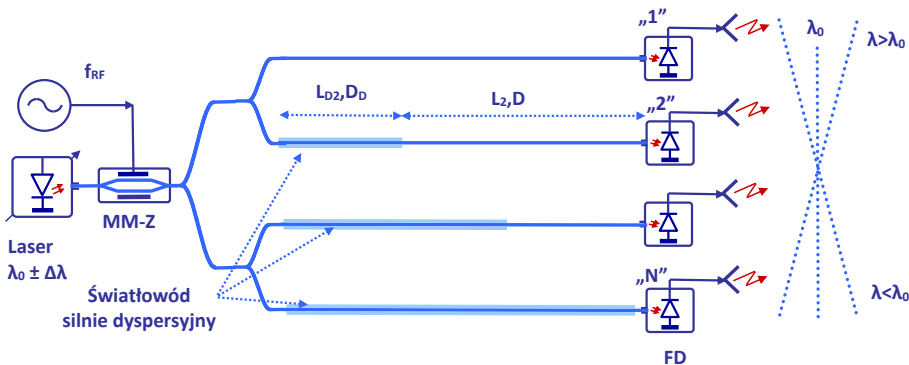
Kolejne tory światłowodowe są jednakowej długości i – poza oznaczonym numerem „1” – zawierają odcinki o dużej wartości współczynnika dyspersji D_D . Długość tych odcinków L_{Dn} rośnie liniowo ze wzrostem n numeru odcinka (anten). Drugi składnik każdego toru to odcinek światłowodu o normalnej dyspersji D . Długości L_n tych odcinków maleją liniowo ze wzrostem n . Zmodulowane sygnałem elektrycznym o częstotliwości f_{RF} sygnały optyczne po przepływie przez tory światłowodowe docierają do fotodetektorów FD. Na rysunku pominięto wzmacniacze i filtry umieszczone między fotodiodami a antenami. Długość $L_{Dn} + L_n$ światłowodów są tak zaprojektowane, aby dla środkowej długości fali λ_0 lasera przesunięcia fazy sygnału RF po fotodetekcji były w każdym z torów jednakowe. Wtedy wyróżniony kierunek promieniowania jest prostopadły do szyku radiatorów.

Jeżeli w warunkach równowagi zmienimy długość fali lasera z λ_0 na λ_i , to opóźnienie czasowe w torze n -tym można obliczyć z ogólnej zależności (14-29).

$$\Delta t_{ni} = L_{Dn} \int_{\lambda_0}^{\lambda_i} D_D(\lambda) d\lambda; \quad (14-29)$$

W ogólnym przypadku współczynnik dyspersji $D_D(\lambda)$ jest funkcją długości fali λ . Jeśli przyjąć, że w niewielkim przedziale długości fali wokół λ_0 zmiany wartości D_D można zaniedbać, to zależność powyższa upraszcza się:

$$\Delta t_{ni} = L_{Dn} D_D(\lambda_i - \lambda_0); \quad (14-30)$$



Rys. 14.13. Uproszczony fotoniczny układ formowania wiązki z przestrajającym laserem i siecią torów światłowodowych z odcinkami światłowodu o dużej dyspersji. Kierunek promieniowania anteny zmieniajany przez zmianę częstotliwości lasera. FD – fotodetektory.

Tor światłowodowy składa się z dwóch odcinków o długościach L_{Dn} i L_{nN} . Gdy efektu dyspersji drugiego z odcinków nie można zaniedbać, to zależność na Δt_{ni} będzie dwuskładnikowa:

$$\Delta t_{ni} = (L_{Dn} D_D + L_n D)(\lambda_i - \lambda_0); \quad (14-31)$$

Z punktu widzenia pracy anteny istotna jest różnica opóźnień czasowych w sąsiednich torach oznaczonych numerami n i $n - 1$.

$$\delta t_{(n/n-1)i} = \Delta t_{ni} - \Delta t_{(n-1)i} = [(L_{Dn} - L_{D(n-1)})D_D + (L_n - L_{n-1})D](\lambda_i - \lambda_0); \quad (14-32)$$

Równanie powyższe można zapisać w prostszej postaci, jeśli pominąć wpływ efektu dyspersji odcinka o małej wartości D . Otrzymamy wtedy:

$$\delta t_{(n/n-1)i} \cong (L_{Dn} - L_{D(n-1)})D_D(\lambda_i - \lambda_0); \quad (14-33)$$

Interpretacja powyższych równań jest prosta. W równaniu (14-30) widać, że trzy czynniki wpływają na wartość opóźnienia czasowego: współczynnik dyspersji D_D , długość odcinka L_{Dn} i wielkość przestrojenia lasera. Kiedy porównujemy ze sobą dwa sąsiednie tory, to najważniejszą rolę grają przyrosty długości odcinków o dużej dyspersji.

Aby obliczyć przyrost fazy φ sygnału o częstotliwości f_{RF} między sąsiednimi radiatorami, należy wykorzystać zależność (14-34).

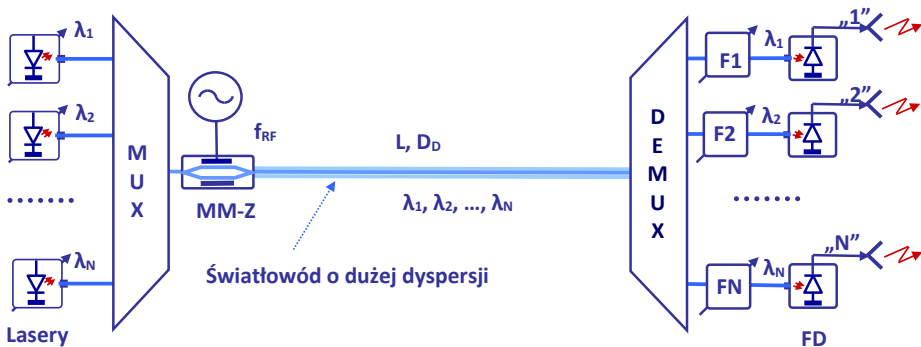
$$\varphi_{(n/n-1)i} = 2\pi f_{RF} \delta t_{(n/n-1)i}; \quad (14-34)$$

Układ z rys. 14.13 pozwala na zmianę częstotliwości f_{RF} emitowanej przez antenę. Ze wzrostem f_{RF} konieczny do zmiany kąta φ przyrost długości fali lasera maleje, zgodnie z wpisem (14-35).

$$\varphi = \text{const.} \text{ gdy } f_{RF}(\lambda_i - \lambda_0) = \text{const.} \quad (14-35)$$

Układ na rys. 14.13 pokazuje ideę funkcjonowania systemu formowania wiązki opartą na zróżnicowaniu torów światłowodowych, którymi doprowadzane są sygnały optyczne do fotodiody. Główne zadanie sterowania kierunkiem propagacji wiązki powierzono laserowi, który zmienia odpowiednio długość generowanej fali.

Układ z rys. 14.14 inaczej rozwiązuje problem sterowania wiązką.



Rys. 14.14. Uproszczony fotoniczny układ formowania wiązki z przestrajanymi laserami i torom ze światłowodem o dużej dyspersji. Kierunek promieniowania anteny zmieniany przez zmianę częstotliwości laserów. MM-Z – modulator elektrooptyczny, FN – filtry optyczne.

W układzie pracuje tyle laserów, ile jest radiatorów. Każdy laser pracuje na innej długości fali $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$, przy czym każdy z laserów może być w określonym zakresie przestrajany. Sygnały optyczne laserów, po zsumowaniu przez multiplekser MUX, poddawane są modulacji zewnętrznej przez modulator Macha-Zehndera. Następnie wszystkie transmitowane są torem o długości L , utworzonym przez światłowód o dużym współczynniku dyspersji D_D .

Demultiplekser DEMUX kieruje poszczególne sygnały do fotodetektorów współpracujących z radiatorami „1”, „2”, ..., „N”. Przed fotodiodami można umieścić filtry optyczne F1, ..., FN, aby usunąć niepożądane składniki. Sygnały elektryczne w obwodach wyjściowych fotodetektorów są zwykle wzmacniane i filtrowane.

System wymaga wstępnej regulacji i skalowania. Należy tak dobrać długości fal $\lambda_{10}, \lambda_{20}, \dots, \lambda_{N0}$ w środku zakresów przestrajania laserów, aby przesunięcia fazy między sygnałami emitowanymi przez radiatory były równe 0. Zgodnie z zależnością (14-30) opóźnienie czasowe sygnału w n -tym torze będzie związane ze zmianą generowanej przez laser fali z λ_{n0} na λ_{ni} zależnością (14-36):

$$\Delta t_{ni} = L_D D_D (\lambda_{ni} - \lambda_{n0}) \quad (14-36)$$

ciąg wartości λ_{ni} musi być dla każdego z laserów indywidualnie dobrany i zaprogramowany. Należy też mieć na uwadze, że dla każdej częstotliwości f_{RF} ciąg wartości λ_{ni} jest inny. Ważnym parametrem układu jest zakres zmian długości fali lasera, dla którego można uzyskać zmianę fazy o $\pi/2$ od położenia centralnego.

$$\lambda_{n\pi/2} - \lambda_{n0} = \frac{1}{L D_D(\lambda) f_{RF}} \quad (14-37)$$

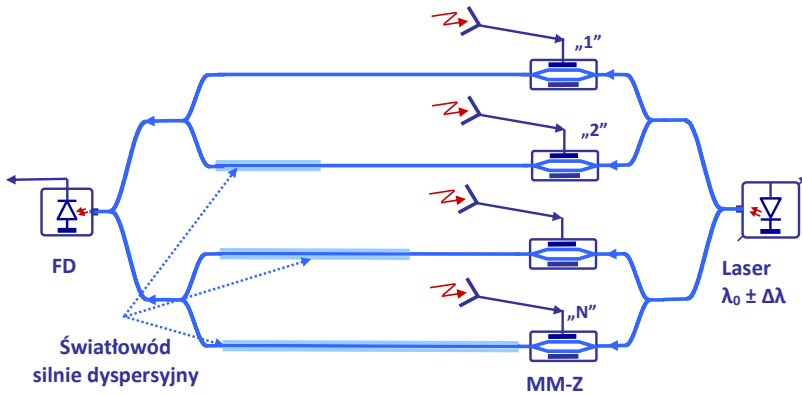
Jeśli pasma generacji fali laserów zajmują stosunkowo duży zakres długości fali, to należy uwzględnić zmianę współczynnika dyspersji D_D w tym zakresie.

Opisano wyżej dwa rozwiązania problemu regulacji zmian fazy wykorzystujące układy fotoniczne z dyspersyjnymi torami światłowodowymi. Są to układy nadajników. Opierając się na tych rozwiązaniach, można z powodzeniem konstruować układy odbiorcze oraz systemy pracujące w obu modach, co jest typowe dla systemów radarowych.

Na rysunku 14.15 przedstawiono układ ilustrujący zasadę działania kierunkowego odbioru sygnałów przez szyk antenowy. W układzie wykorzystano laser przestrajany i odcinki światłowodów o dużej dyspersji. Sygnały odbierane przez anteny kierowane są do modulatorów MM-Z. Sygnał optyczny generowany przez laser powinien być w jednakowej fazie, dlatego zastosowano symetryczny dzielnik mocy. Podobnie sumowanie sygnałów przed dostarczeniem do fotodetektora powinno zachować relacje fazowe. Sterowanie kierunkiem odbioru odbywa się przez zmianę długości fali generowanej przez laser.

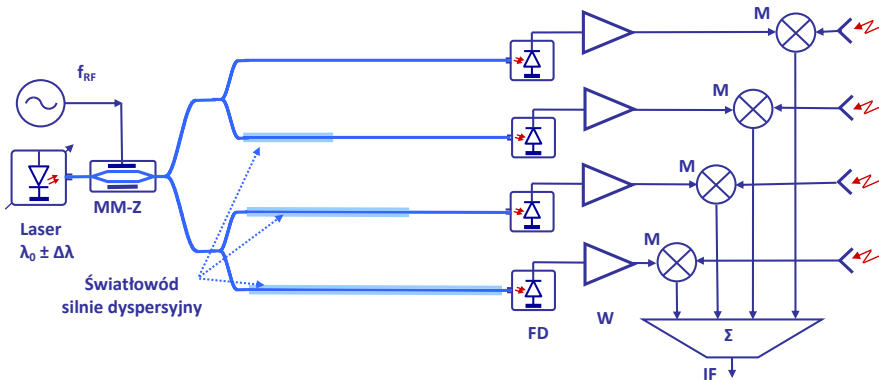
Fotoniczne systemy fazowania wiązki wykorzystujące odcinki światłowodów o dużej dyspersji pozwalają z powodzeniem konstruować szerokopasmowe szyki antenowe. W jednej z publikacji podano pasmo pracy szyku antenowego 2–18 GHz, pasmo niewyobrażalnie szerokie i nieosiągalne dla czysto mikrofalowej techniki. Ważnym warunkiem dobrej pracy opisanych w tym punkcie systemów jest użycie przestrajanych i stabilnych laserów,

generujących sygnał o dużej czystości widmowej. Rozwój technologii laserów półprzewodnikowych umożliwił spełnienie tych warunków.



Rys. 14.15. Uproszczony foniczny układ formowania kierunkowego odbioru sygnału przez szyk antenowy, wykorzystujący efekt dyspersji światłowodów. Działanie układu podobne do układu z rys. 14.14. FD – fotodetektor, MM-Z – modulatory Macha-Zehndera.

Interesującą odmianę systemu antenowego pracującego jako odbiornik kierunkowy przedstawiono na kolejnym rys. 14.16. W systemie wykorzystano foniczny układ z torami światłowodowymi, w których umieszczono różnej długości odcinki światłowodów o dużej dyspersji.



Rys. 14.16. Inna wersja fonicznego układu formowania kierunkowego odbioru sygnału przez szyk antenowy, wykorzystujący efekt dyspersji światłowodów. MM-Z – modulatory Macha-Zehndera, FD – fotodetektory, W – wzmacniacze, M – mieszacze mikrofalowe, IF – zsumowane sygnały pośredniej częstotliwości.

Sygnał optyczny generowany przez przestrajany laser zostaje zmodulowany przy przepływie przez modulator MM-Z. Działanie struktury światłowodów jest identyczne, jak już w tym punkcie opisano. Różnice faz sygnałów docierających do fotodetektorów regulowane są

długością fali sygnału generowanego przez laser, podobnie jak w opisanym wyżej układzie przedstawionym na rys. 14.13. Zróżnicowane fazowo sygnały elektryczne w portach wyjściowych fotodetektorów FD, po wzmocnieniu przez identyczne wzmacniacze W, kierowane są tym razem nie do radiatorów, ale do mieszaczy M jako sygnały heterodyn. Sygnały odebrane przez radiatory, po wzmocnieniu przez niskoszumne wzmacniacze niepokazane na rysunku, poddane są procesowi mieszania. W portach wyjściowych mieszaczy sygnały o częstotliwości pośredniej zachowują różnice faz sygnałów heterodyn. W konsekwencji w sumatorze dodają się sygnały, które dotarły do radiatorów z określonego kierunku. Pozostałe wzajemnie się znoszą.

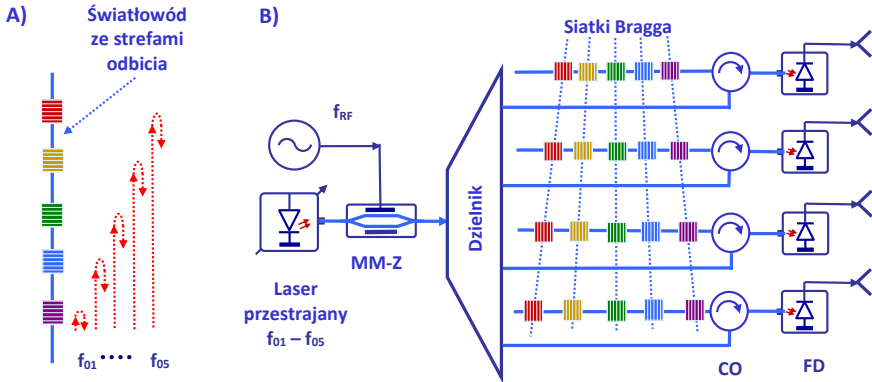
Opisany szyk antenowy pełni rolę kierunkowego, selektywnego odbiornika mikrofalowego. Kierunek odbioru regulowany jest długością fali generowanej przez laser, a częstotliwość odbieranego sygnału częstotliwością f_{RF} sygnału elektrycznego doprowadzonego do modulatora MM-Z.

14.3.6. Układy formowania impulsów z siatkami Bragga

Wykorzystanie właściwości siatek Bragga w układach formowania wiązki było bardzo znaczącym krokiem na drodze ich rozwoju. W rozdziale 2, w punkcie 2.5.3 opisano strukturę i właściwości światłowodowych siatek Bragga. Światłowodowa siatka Bragga jest elementem, w którym w rdzeniu światłowodu periodycznie zmienia się wartość współczynnika załamania wokół średniej wartości n_{10} . Perturbacje współczynnika załamania wykonuje się na długości kilku milimetrów lub centymetrów. Zmiany te powodują powstanie niewielkich odbić sygnału optycznego. Dla pewnych długości fali niewielkie odbicia sumują się i światłowod odbija w tym paśmie cały sygnał optyczny. Światłowod zachowuje się wtedy jak filtr pasmowo-zaporowy. Jeżeli okres perturbacji współczynnika załamania równy jest Λ , to pełne odbicie wystąpi dla długości fali λ_B w próżni, czyli dla długości fali 2Λ w światłowodzie.

$$\lambda_B = 2n_{10}\Lambda; \quad (14-38)$$

Dla promieniowania światłowod jest przezroczysty, poza niewielkim pasmem, w którym struktura siatki Bragga wywołuje silne odbicie. Na rysunku 14.17A pokazano odcinek światłowodu, w którym rozmieszczono strefy odbicia w ustalonych od siebie odstępach. Każda ze stref odbija inną długość fali. Sygnał optyczny o częstotliwości f_{05} wnika najdalej do światłowodu i odbity zostaje przez ostatnią ze stref. Sygnał o częstotliwości f_{04} wnika na mniejszą odległość, sygnał o częstotliwości f_{01} wnika na najmniejszą odległość. Przez zmianę długości fali sygnału optycznego, na który naniesiono sygnał mikrofalowy, można regulować skokowo głębokość wnikania sygnału optycznego i tym samym czas opóźnienia sygnału mikrofalowego. Ta właściwość światłowodowej siatki Bragga stała się podstawą interesujących rozwiązań układowych.



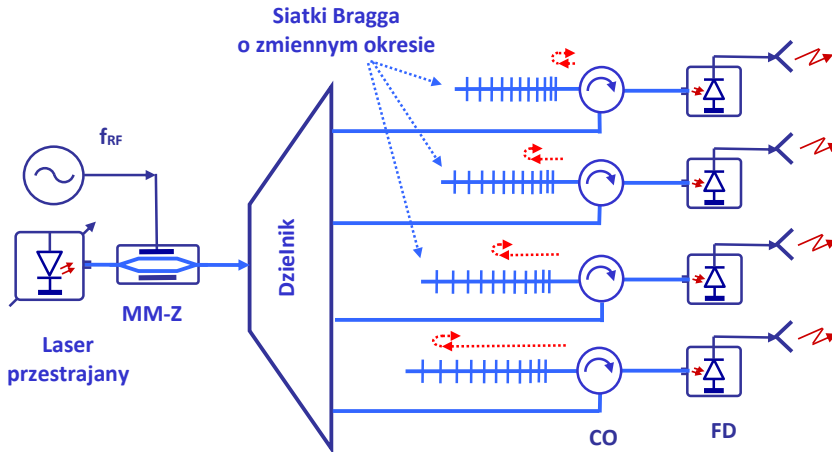
Rys. 14.17. Zastosowanie światłowodowej siatki Bragga w układach formowania wiązki. A) Siatki Bragga odbijają sygnał optyczny o określonej długości fali. B) Idea struktury fotonicznego układu formowania wiązki z laserem przestrajającym, modulatorem zewnętrznym MM-Z i czterema antenami w szyku. CO – cyrkulatory optyczne, FD – fotodetektory.

Na rys. 14.17B pokazano schemat ideowy układu formowania wiązki, w którym wykorzystano opisany wyżej efekt. Sygnał lasera modulowany jest sygnałem mikrofalowym przy transmisji przez modulator MM-Z. Układ kontroli generowanej długości fali lasera pozwala ustalić 5 dobranych częstotliwości f_{01}, \dots, f_{05} . Moc optyczna dzielona jest następnie przez dzielnik na cztery równe części i kierowana do czterech torów optycznych. Sygnały optyczne kierowane są przez cyrkulatory optyczne CO do czterech odcinków światłowódów, w których umieszczono siatki Bragga odbijające kolejno sygnały o częstotliwościach f_{01}, \dots, f_{05} . Należy zauważyć, że strefy odbijające rozmieszczone są w kolejnych światłowodach w różnych odstępach.

Sygnały optyczne po odbiciu od określonej strefy wracają do cyrkulatorów i kierowane są następnie do fotodetektorów. Sygnały elektryczne w obwodach wyjściowych fotodetektorów są wzmacniane do odpowiedniego poziomu mocy i kierowane do anten.

Dla kolejnych częstotliwości f_{01}, \dots, f_{05} sygnału optycznego zestaw opóźnień jest inny. Dla każdego zestawu opóźnień kąt promieniowania szyku antenowego będzie różny. W opisywanym przypadku szyk będzie promieniował w pięciu dobranych kierunkach. Aby zwiększyć liczbę kierunków, należy zwiększyć liczbę wybieranych częstotliwości lasera i liczbę struktur odbijających.

Postęp technologii umożliwił wytworzenie światłowodu, w którym perturbacje współczynnika załamania pojawiają się okresowo, ale okres zmienia się stopniowo. Taka konfiguracja zaburzeń powoduje, że promieniowanie optyczne dociera bez strat do obszaru, w którym, zgodnie z zależnością (14-38), odbicia sumują się i fala zawraca. Im większa długość fali λ promieniowania optycznego, tym dalej wnika fala i tym większy jest czas opóźnienia, co pokazano na rys. 14.18.



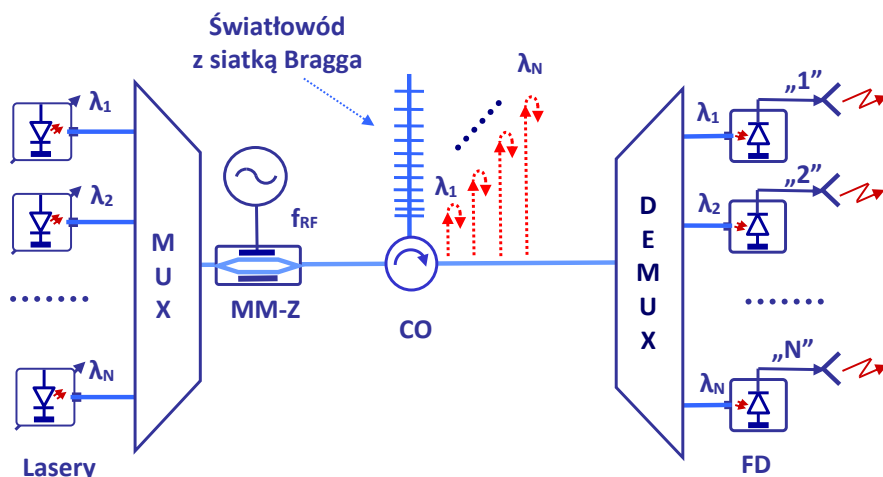
Rys. 14.18. Układ formowania wiązki wykorzystujący różne siatki Bragga o zmiennym okresie. MM-Z – modulator Macha-Zehndera, CO – cyrkulator optyczny, FD – fotodetektory.

Sygnał optyczny z lasera po zmodulowaniu sygnałem mikrofalowym dzielony jest równomiernie do czterech torów prowadzących do czterech radiatorów szyku. Po drodze cyrkulatory kierują fale do nieco różnych światłowodów z siatkami Bragga. Różnice te powodują, że posiadające te same długości fali sygnały optyczne zawracają w różnych miejscach, różnicując w ten sposób czasy przepływu, co z kolei powoduje odpowiednie ustawienie kierunku promieniowania wiązki mikrofalowej szyku. Przesłajenie lasera powoduje zmianę opóźnień w każdym z torów, a to skutkuje zmianą kierunku promieniowania wiązki. Struktura opisywanego układu jest podobna do przedstawionej na rys. 14.13. W torach światłowodowych prowadzących sygnały do fotodetektorów różnej długości odcinki o silnej dyspersji różnicowały opóźnienia. W układzie na rys. 14.18 zróżnicowanie opóźnień jest skutkiem zróżnicowania parametrów siatek Bragga. W obu układach zmiana kierunku propagacji wiązki wymaga przesłajenia lasera.

Ideę układu przedstawionego na rys. 14.14 i opisanego wcześniej powtarza układ pokazany na rys. 14.19. Układ formowania wiązki dostarcza sygnały do czterech anten. Z każdą anteną współpracuje laser przestrajany. Pasma przestrajania laserów są w stosunku do siebie przesunięte. Stwarza to pewne problemy z zapewnieniem współbieżności przy przestrajaniu laserów.

Sygnały optyczne laserów sumowane są przez multiplekser MUX i kierowane do wspólnego, elektrooptycznego modulatora MM-Z. Następnie cyrkulator kieruje cztery optyczne sygnały do światłowodu z siatką Bragga o zmiennym okresie. Każdy z sygnałów zawraca w innym miejscu światłowodu, dla każdego z nich opóźnienie jest inne. Cyrkulator kieruje następnie cztery odbite fale do obwodu demultipleksera DEMUX, w którym następuje ich rozdzielanie i skierowanie do kolejnych fotodetektorów. Odcinki światłowodów między

demultiplexerem a fotodetektorami mają w pewnych przypadkach nieco różne długości, aby dopasować całkowite wartości czasów opóźnień.



Rys. 14.19. Układy formowania wiązki szyku antenowego wykorzystujące siatkę Bragga o zmiennym okresie. Sygnały z N przestrajalnych laserów skierowane są do N radiatorów. MM-Z – modulator Macha-Zehndera, CO – cyrkulator optyczny, FD – fotodetektory.

Sterowanie wypromieniowanej przez szyk wiązki odbywa się przez równoczesne przestrojenie laserów. Po zmianie długości fal laserów inne są miejsca odbicia poszczególnych fal, zmianie ulegają też całkowite opóźnienia, a wypromieniowana przez szyk antenowy fala będzie miała inny kierunek.

Opisane w tym punkcie fotoniczne układy formowania wiązki mikrofalowego szyku antenowego wykorzystują rozmaite techniki i rozwiązania układowe. Wprowadzenie przyrządów i metod właściwych fotonice umożliwiło uzyskanie bardzo dobrych parametrów w szerokich zakresach częstotliwości mikrofalowych. Opracowane rozwiązania, dzięki specyficznym cechom układów fotonicznych, w wielu przypadkach przewyższają szerokością pasma pracy, szybkością działania oraz mniejszą wagą i rozmiarami rozwiązania czysto mikrofalowe.

14.4. Kierunki rozwoju

14.4.1. Systemy wielowięzkowe i dwuwymiarowe

Jednym z ważnych kierunków badań i intensywnego rozwoju jest opracowanie fotonicznych systemów jednoczesnego formowania dwóch lub więcej wiązek promieniowanych przez szyk antenowy w różnych kierunkach. Jednocześnie system powinien być w stanie

analizować sygnały odbierane z kilku kierunków. Tak trudne do realizacji zadania formułowane są z jednej strony przez specjalistów technik radarowych, z drugiej przez specjalistów telekomunikacji mobilnej. Zakres tej publikacji nie pozwala na opis i analizę zasad działania bardzo ciekawych rozwiązań realizujących te funkcje.

Aby przybliżyć jedno z możliwych rozwiązań, należy wrócić do układu przedstawionego na rys. 14.13. Sygnał optyczny generowany przez laser najpierw zostaje zmodulowany amplitudowo z częstotliwością f_{RF1} , którą finalnie otrzyma wypromieniowana przez szyk fala elektromagnetyczna. Zmodulowany sygnał dzielony jest i kierowany do tyłu torów światłowodowych, ile radiatorów umieszczonych jest w szyku. Kierunek promieniowanej wiązki regulowany jest długością fali generowanego przez laser sygnału optycznego, zmienianej wokół λ_{01} . W opisywanym układzie można dodać drugi laser pracujący niezależnie na innej długości fali. Po poddaniu go modulacji z inną częstotliwością radiową f_{RF2} drugi sygnał optyczny można skierować do tej samej sieci światłowodów z odcinkami dyspersyjnymi. Drugi z laserów będzie pracował wokół długości fali λ_{02} ; uzyskiwane przez sygnał optyczny opóźnienia fazowe będą w tym przypadku inne. W obwodach wyjściowych fotodiod pojawią się dwie grupy niezależnych od siebie składników o częstotliwościach f_{RF1} i f_{RF2} , przesuniętych fazowo względem siebie tak, że każdy z sygnałów będzie wypromieniowany w innym kierunku. Jak wspomniano, zmiany kierunków promieniowania obu niezależnych wiązek dokonamy, przestrajając lasery.

Można wykazać, że istnieje możliwość jednoczesnego, kierunkowego odbioru sygnałów mikrofalowych różnych częstotliwości przez ten sam szyk antenowy. Właściwość ta jest szczególnie istotna w systemach telekomunikacji mobilnej.

W innych rozwiązaniach problemu działania systemu antenowego pracującego równolegle z kilkoma wiązkami wykorzystano laser generujący grzebień częstotliwości optycznych. Sygnał optyczny modulowany jest kilkoma częstotliwościami radiowymi. Obwody współpracujące bezpośrednio z radiatorami wybierają właściwy prążek grzebienia i częstotliwość radiową.

Opracowano także systemy antenowe dwuwymiarowe. Radiatory tworzą tablicę złożoną z M wierszy i N kolumn. W systemie pracują zwykle dwa lasery: przestrajanie jednego zmienia fazy sygnału w radiatorach wierszy, przestrajanie drugiego modyfikuje fazy sygnału w kolumnach. Zmiany fazy dokonuje $M + 1$ układów formowania wiązki. W jednym z rozwiązań wykorzystano w układach TTD siatki Bragga o zmiennym skoku. Wiązki z anten dwuwymiarowych mają kształt cienkich prętów i są przydatne w wielu zastosowaniach, na przykład w telekomunikacji satelitarnej.

14.4.2. Cyfryzacja układów T/R

Postępująca cyfryzacja modyfikuje wiele procesów zmienia strukturę radiowych systemów elektronicznych nadawczych i odbiorczych. W wielu rozdziałach tej pracy opisano układy, w których pracują przetworniki analogowo-cyfrowe ADC i przetworniki cyfrowo-

analogowe DAC. Konstrukcja przetworników DAC umożliwiła budowę syntezerów częstotliwości o zadanej częstotliwości i fazie. Proces ten nosi angielską nazwę *Direct Digital Synthesis* – DDS. Wytwarzany przebieg nie jest idealną sinusoidą, ale po prostej filtracji niekształcenia zostają usunięte. Istotną zaletą syntezerów jest możliwość cyfrowej kontroli częstotliwości i fazy, co w przypadku fazowanych szyków antenowych odgrywa istotną rolę. Syntezerzy częstotliwości mikrofalowej są bardzo złożonymi przyrządami. Ich opis nie mieści się w ramach tej publikacji.

Częstotliwość sygnału generowana przez układ DAC w procesie DDS nie jest duża i bardzo często wymaga podniesienia przez mieszacz górno-wstęgowy w procesie przemiany częstotliwości. Odfiltrowana górna wstęga po wzmocnieniu przez wzmacniacz mocy zostaje skierowana do anteny.

W procesie przemiany częstotliwości stosowany jest sygnał heterodyny przesłany z systemu kontroli i przetwarzania danych. W systemie tym wykorzystywana jest częstotliwość wzorcowa, tzw. częstotliwość zegara, zwykle syntezerowana, przesyłana do modułu T/R optycznym łączem analogowym. Tam jest ona powielana do wymaganej wartości lub kontroluje częstotliwość lokalnego oscylatora w układzie fazowej kontroli częstotliwości.

Układy nadawanie-odbior z cyfrowym przetwarzaniem sygnału są złożonymi systemami elektronicznymi. Ich złożoność wpływa na koszt wykonania, co ogranicza ich pole zastosowań. W przypadku ich użycia fotoniczna warstwa systemu służy głównie do transmisji strumieni danych do układów T/R i do systemu kontroli i obróbki danych.

14.5. Podsumowanie

Zastosowanie układów fotonicznych w systemach formowania wiązki fazowanych szyków antenowych pozwoliło w wielu przypadkach poprawić parametry tych systemów. Szczególnie należy podkreślić możliwość istotnego powiększenia pasma pracy zarówno w modzie nadawczym, jak i odbiorczym, przy istotnej redukcji efektu zera. W wielu przypadkach konstrukcji systemów radarowych możliwość ta została wykorzystana z powodzeniem.

Kolejną zaletą jest możliwość integracji systemu formowania wiązki na jednym podłożu, co zmniejsza ciężar systemu, jego wymiary, także koszt wykonania i zwiększa niezawodność pracy. W wielu przypadkach zastosowanie fotonicznych, monolitycznych układów scalonych zadecydowało o możliwości realizacji projektu, który bez miniaturyzacji, na jaką pozwoliło zastosowanie układów scalonych, byłby praktycznie niewykonalny.

Systemy z szykiem antenowym i układem realizującym sterowanie wiązką były pierwotnie wykorzystywane w systemach radarowych. W systemach tych w modzie nadawczym emitowano krótki impuls promieniowania EM o stosunkowo dużej mocy, a następnie w trybie odbiorczym nasłuchiwano echa. Rozwój systemów telekomunikacji ruchomej stworzył sytuacje, w których w tym samym czasie i w tym samym paśmie częstotliwości należy wysyłać i odbierać sygnały z różnych kierunków. Układy formowania wiązki z wykorzystaniem technik fotonicznych oferują w takich przypadkach użyteczne rozwiązania.

Następnym obszarem zastosowań szyków antenowych ze sterowaną wiązką były sensory pracujące w samochodach i pojazdach ruchomych. W układach wykonywanych dla tych celów decydującym warunkiem jest miniaturyzacja, mały pobór mocy i transmisja dużej liczby danych. Techniki foniczne pozwoliły rozwiązać wiele trudnych problemów.

Materiał przedstawiony w rozdziale 14 nie tworzy kompletnego opisu zasad działania i konstrukcji fazowanych szyków antenowych. Zestawiono w nim i omówiono te techniki fotoniki mikrofalowej, które wykorzystane są przy konstruowaniu układów formowania wiązki. Analiza dokonań w tym obszarze wskazuje na wielkie możliwości wnoszone przez fotonikę do obszaru mikrofal. Pokazuje też wielką pomysłowość konstruktorów, dla których wciąż znaleźć można pola do nowych zastosowań i odkryć. Czytelnik szukający dokładnego przeglądu publikowanych technicznych i układowych rozwiązań powinien sięgnąć do literatury.

Bibliografia rozdziału 14

- 14.1 K.P. Jackson et al., "Optical Fiber Delay-Line Signal Processing", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 33, No. 3, 1985.
- 14.2 E.N. Toughlian, H. Zmuda, "Variable time-delay system for broadband phased array and other transversal filtering applications", *Optical Engineering*, Vol. 32, No. 3, 1993.
- 14.3 H. Zmuda et al., "Photonic Beamformer for Phased Array Antennas Using a Fiber Grating Prism", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 9, No. 2, 1997.
- 14.4 A.P. Goutzoulis, R.P. Gouse, "Comparison of conventional and fiberoptic manifolds for a dual band (UHF and S) phased-array antenna", *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, Vol. 45, No. 2, 1997.
- 14.5 K. Ghorbani, A. Mitchell, R.B. Waterhouse, "A novel wide-band tunable RF phase shifter using a variable optical directional coupler", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 47, 1999.
- 14.6 C. Curcio, *Photonic wideband phased array an optical time steered antenna based on a new true time delay unit*, Università Degli Studi di Napoli Federico II, 2004.
- 14.7 Y. Jiang et al., "Delay-time-enhanced photonic crystal fiber array for wireless communications using two-dimensional X-band phased-array antennas", *Optical Engineering*, Vol. 44, No. 12, 2005.
- 14.8 D.B. Hunter, M.E. Parker, J.L. Dexter, "Demonstration of a Continuously Variable True-Time Delay Beamformer Using a Multichannel Chirped Fiber Grating", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, No. 2, 2006.
- 14.9 S. Blanc et al., "Optical Multibeamforming Network Based on WDM and Dispersion Fiber in Receive Mode", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, No. 1, 2006.
- 14.10 M.A. Piqueras et al., "Optically Beamformed Beam-Switched Adaptive Antennas for Fixed and Mobile Broad-Band Wireless Access Networks", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, No. 2, 2006.
- 14.11 M.Y. Chen, H. Subbaraman, R.T. Chen, "Highly dispersive photonic crystal fiber for beamforming", *Optoelectronic Devices and Integration II, Proceedings of SPIE*, Vol. 6838, 2007.
- 14.12 M.Y. Chen, H. Subbaraman, R.T. Chen, "Photonic Crystal Fiber Beamformer for Multiple X-Band Phased-Array Antenna Transmissions", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 20, No. 5, 2008.

- 14.13 H. Subbaraman, M.Y. Chen, "Photonic Crystal Fiber-Based True-Time-Delay Beamformer for Multiple RF Beam Transmission and Reception of an X-Band Phased-Array Antenna", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 26, No. 15, 2008.
- 14.14 S. Blais, J. Yao, "Photonic True-Time Delay Beamforming Based on Superstructured Fiber Bragg Gratings With linearly Increasing Equivalent Chirps", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 27, No. 9, 2009.
- 14.15 Q. Chang, Q. Li et al., "A Tunable Broadband Photonic RF Phase Shifter Based on a Silicon Microring Resonator", *IEEE Photonics Technological Letters*, Vol. 21, No. 1, 2009.
- 14.16 A. Meijerink et al., "Novel Ring Resonator-Based Integrated Photonic Beamformer for Broadband Phased Array Receive Antennas – Part I: Design and Performance Analysis", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 28, No. 1, 2010.
- 14.17 J. Yao, "A Tutorial on Microwave Photonics", *IEEE Photonics Society Newsletter*, Vol. 26, No. 3, 2012.
- 14.18 Y. Wei et al., "Optical true time-delay for two-dimensional phased array antennas using compact fiber grating prism", *Chinese Optics Letters*, 2013.
- 14.19 S. Akiba et al., "Photonic Approach to Beam Steering of Phased Array Antenna", *Proceedings of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory*, 2013.
- 14.20 X. Ye, F. Zhang, S. Pan, "An optical true-time-delay unit for independent beamforming of multiple RF signals", *Asia Communications and Photonics Conference 2014, OSA Technical Digest (online)*, paper AF2E.5, 2014.
- 14.21 S. Sun et al., "Communications: Beamforming, Spatial Multiplexing, or Both?", *IEEE Communications Magazine*, 2014.
- 14.22 S. Shi, "Ultrawideband Optically Fed Tightly Coupled Phased Array", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, No. 23, 2015.
- 14.23 X. Ye, F. Zhang, S. Pan, "Optical true time delay unit for multibeamforming", *Optics Express*, Vol. 23, No. 8, 2015.
- 14.24 L. Zhang et al., "Photonic true time delay beamforming technique with ultra-fast beam scanning", *Optics Express*, Vol. 25, No. 13, 2017.
- 14.25 X. Xue et al., "Microcomb-based true-time-delay network for microwave beamforming with arbitrary beam pattern control", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 36, No. 12, 2018.
- 14.26 S. Sabouri, K. Jamshidi, "Design Considerations of Silicon Nitride Optical Phased Array for Visible Light Communications", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, DOI: 10.1109/JSTQE.2018.2836991.