

Rozdział 14

Systemy radiokomunikacji

14.1. Wprowadzenie

Ostatnie dekady XX wieku i pierwsze dekady XXI wieku stały się czasem intensywnego rozwoju światowej sieci telekomunikacyjnej. W kilku kierunkach rozwój technologii był szczególnie intensywny. Rozwój technologii układów scalonych, przejście z mikroelektroniki do nanoelektroniki, ogromne postępy miniaturyzacji umożliwiły wyprodukowanie kolejnych generacji pamięci półprzewodnikowych i mikroprocesorów. Postęp w tym obszarze umożliwił cyfryzację rejestracji, obróbki i transmisji danych. Rozwój technologii telefonii komórkowej radykalnie zmienił możliwości telefonu, który wyposażony w dużą pamięć i szybki procesor stał się terminalem. Teraz pełni on funkcje komputera, kamery filmowej i telewizora. W kilka dekad rozwinięto technologię światłowodowych łączy transmisyjnych, co pozwoliło zwiększyć możliwości transmisyjne liczone w bitach na sekundę o kilka rzędów wielkości. Do tego rozwinięto system satelitarnych połączeń transmisyjnych używając w rezultacie coś, co nazywamy infosferą.

W niniejszym rozdziale przedstawiono krótki przegląd technik użytych do tworzenia tej współczesnej przestrzeni informacji.

14.2. Telefonia komórkowa – telekomunikacja mobilna

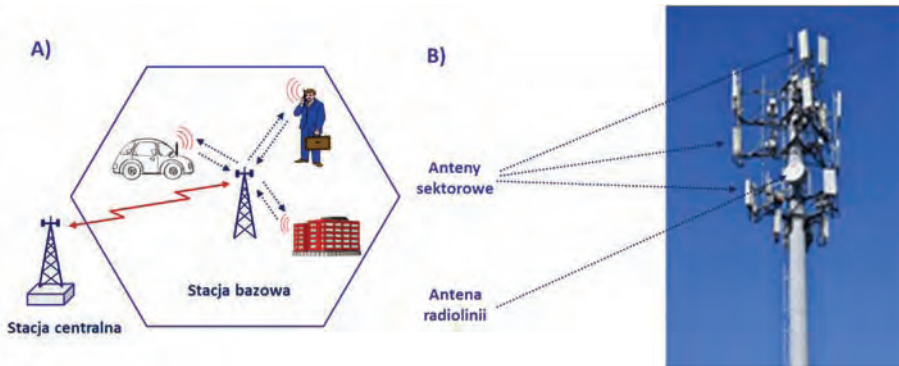
14.2.1. System telefonii komórkowej

W XX wieku rozwinięto systemy telefonii przewodowej wykorzystującej transmisję analogową kablami współosiowymi. Telefon stał się narzędziem powszechnie wykorzystywanym do porozumiewania się ludzi. Prace nad rozwojem telefonii bezprzewodowej podjęto bardzo wcześnie, w związku z rozwojem lotnictwa. Już w latach II wojny światowej (1939-1945) zapewniano samolotom stałe połączenie radiowe z obsługą na ziemi. Nie ulega wątpliwości, że lotnictwo odegrało w tej wojnie ogromną rolę. Jednak do powszechnego serwisu rozmów telefonicznych drogą radiową wiodła jeszcze długa droga.

W ostatnich dekadach XX wieku wprowadzano światłowody z transmisją informacji zapisanej cyfrowo. Transoceaniczne łącza światłowodowe umożliwiły jednoczesne prowadzenie rozmów telefonicznych setkom tysięcy użytkowników. Jednocześnie rozwijano techniki transmisji radiowej, bezprzewodowej, opanowując kolejne pasma częstotliwości, aż do pasm fal milimetrowych.

Bardzo ważną rolę odegrał rozwój technologii układów scalonych, umożliwiając miniatuризację układów oraz automatyzację procesów sterowania systemem połączeń.

Na przełomie lat 70. i 80. XX wieku podjęto intensywne prace nad rozwojem telefonii bezprzewodowej. Zasady transmisji radiowej wskazują, że zwiększanie odległości odbiornika od nadajnika zmusza do powiększania mocy emitowanej przez nadajnik, przy czym moc ta powinna rosnąć z kwadratem odległości. W założeniach systemu przyjęto, że zamiast obsługiwać dany obszar za pomocą jednego nadajnika i odbiornika, podzielono obszar usług na wiele mniejszych obszarów, zwanych komórkami. Typowa komórka obejmuje nie więcej niż kilkanaście kilometrów kwadratowych i zawiera własny odbiornik i nadajnik o małej, nieprzekraczającej zwykle mocy 300 W.

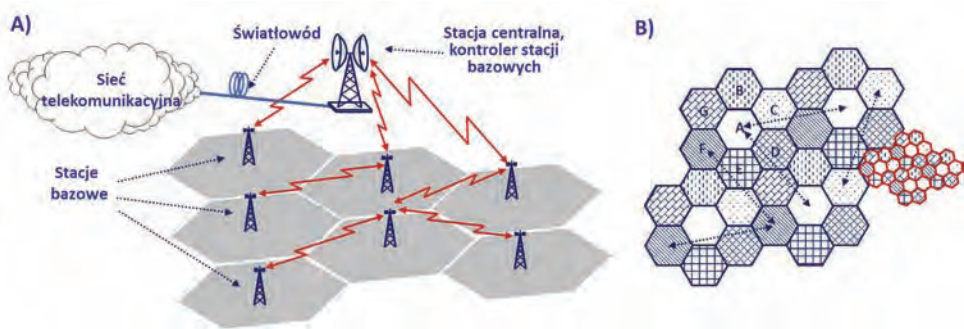


Rys. 14.1. Ilustracja funkcjonowania systemu telefonii komórkowej. **A)** Komórka z anteną stacji bazowej. Użytkownicy łączą się drogą radiową z systemem nadawczo-odbiorczym stacji bazowej. **B)** Antena stacji bazowej z antenami sektorowymi do połączeń z użytkownikami i parabolicznymi antenami radiolinii do połączenia ze stacją centralną.

Źródło: Raysonho @ Open Grid Scheduler / Scalable Grid Engine, Cell tower in Richmond Hill, 22 February 2020, Wikimedia Commons, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CellTowerRichmondHill.jpg>.

Na rys. 14.1A pokazano komórkę systemu wyposażoną w antenę stacji bazowej. Telefony użytkowników komórki wyposażone w układy nadajnika i odbiornika mają możliwość połączenia z odbiornikiem bądź nadajnikiem stacji bazowej. Aby ułatwić połączenia, na maszcie stacji bazowej instaluje się kilka anten sektorowych obsługujących 1/3 bądź 1/4 pola komórki, co pokazano na rys. 14.1B.

Stacje bazowe kilku komórek połączone są za pomocą łączy radiowych lub, coraz częściej, światłowodowych ze stacją centralną – rys. 14.2A, która jest ważnym pośrednikiem na drodze informacji do adresata. Stacja centralna połączona jest łączy światłowodowym, rzadziej łączy radiowym, z regionalną siecią telekomunikacyjną, a przez nią z siecią globalną. Tą drogą użytkownik z komórki połączony jest z całą światową siecią telekomunikacyjną.



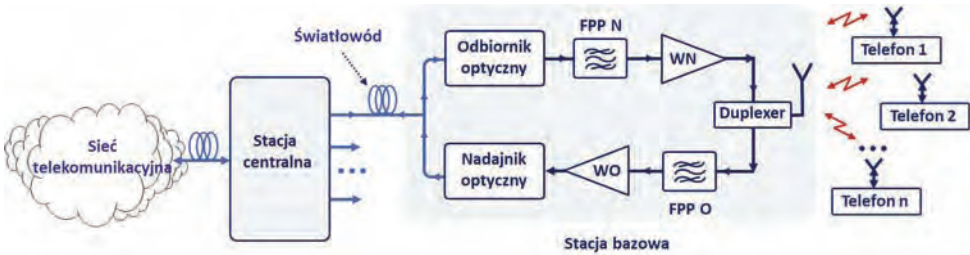
Rys. 14.2. Struktura sieci telefonii komórkowej. **A)** Sieć komórek ze stacjami bazowymi połączonymi radiowo z stacją centralną, która połączona jest linią światłowodową z siecią telekomunikacyjną. **B)** Struktura komórek sieci, w obszarze których wykorzystywane są różne podpasma częstotliwości oznaczone jako A, B, C, D, E, F i G. Komórki wykorzystujące to samo pasmo częstotliwości oddzielone są od siebie dwiema innymi komórkami.

System pracuje w określonym normami paśmie częstotliwości. Pasma pracy jest zwykle podzielone na siedem podpasm, które na rys. 14.2B oznaczono literami od A do G. W zespole siedmiu sąsiadujących komórek każda wykorzystuje inne podpasmo. Odpowiednie ustawienie sąsiednich „siedemek” powoduje, że między komórkami wykorzystującymi to samo podpasmo są dwie komórki z różnymi podpasmami, co pokazano na rys. 14.2B. Sygnał telefonu połączony z najbliższą stacją bazową komórki dociera do oddalonego o dwie komórki sąsiada, ale jest wtedy znacznie słabszy i dlatego jest ignorowany.

Można podzielić pasmo pracy na cztery podpasma, a wtedy komórki wykorzystujące to samo pasmo dzieli tylko jedna komórka. System podziału na siedem podpasm jest najczęściej stosowany.

W miarę wzrostu liczby telefonów w komórce rozmiary komórki maleją. W miastach o gęstej zabudowie rozmiary komórki mogą być mniejsze niż 100 metrów. Na rys. 14.2B pokazano podział komórki na siedem mniejszych części. W rozwiązaniach praktycznych zachowanie sześciokątnego, regularnego kształtu komórek jest niemożliwe.

Gdy osoba z telefonem komórkowym inicjuje połączenie w danej komórce, jest ona obsługiwana przez nadajnik i odbiornik stacji bazowej tej komórki. Połączenie wykorzystuje dwie częstotliwości z podpasma przydzielonego tej komórce. Odbiornik w każdej stacji komórkowej stale monitoruje moc sygnału telefonu. Gdy osoba porusza się i przejdzie do sąsiedniej komórki, to moc sygnału spadnie poniżej pożądanego poziomu i system automatycznie przełączy połączenie do sąsiedniej stacji bazowej, zmieniając częstotliwości nadawania i odbioru. Proces przekazania jest bardzo szybki i niezauważalny dla użytkownika.



Rys. 14.3. Jedno z możliwych rozwiązań układu łączącego radiowo telefony 1, 2, ..., n ze stacją bazową, a poprzez nią światłowodami ze stacją centralną i dalej z siecią telekomunikacyjną.

Na rys. 14.3 pokazano jedno z możliwych rozwiązań transmisji sygnałów w systemie telefonii komórkowej. Sygnały między telefonem a stacją bazową przesyłane są drogą radiową. Stacja bazowa połączona jest ze stacją centralną łączem światłowodowym.

Zwykle są to dwa światłowody do transmisji w obie strony. Grzebień fal nośnych z telefonów 1, 2, ..., n , o częstotliwościach z podpasma przeznaczonego dla danej stacji bazowej, zostaje wzmacniony i skierowany do nadajnika łącza optycznego. W łączy optycznym wykorzystuje się zwykle bezpośrednią modulację mocy optycznej lasera. Stacja centralna odbiera sygnały z wielu stacji bazowych. Po usunięciu optycznej fali nośnej sygnały są porządkowane, łączone w pakiety i – z wykorzystaniem multipleksacji z podziałem czasu i z podziałem częstotliwości – przesyłane kolejnym łączem światłowodowym do sieci telekomunikacyjnej.

Odbiornik optyczny stacji bazowej odbiera sygnały wysłane przez stację centralną także łączem światłowodowym. Po usunięciu w odbiorniku optycznej fali nośnej grzebień radiowych częstotliwości nośnych jest filtrowany, wzmacniany i przez duplexer kierowany do anteny, by po wyemitowaniu przez antenę dotrzeć do telefonów 1, 2, ..., n .

Pokazany na rys. 14.3 układ jest jednym z wielu możliwych rozwiązań problemu połączeń między mobilnym telefonem a światową siecią telekomunikacyjną. Stan współczesnej technologii umożliwia rozwiązanie tego problemu w różny sposób, w zależności od liczby użytkowników i stanu sieci w danym regionie.

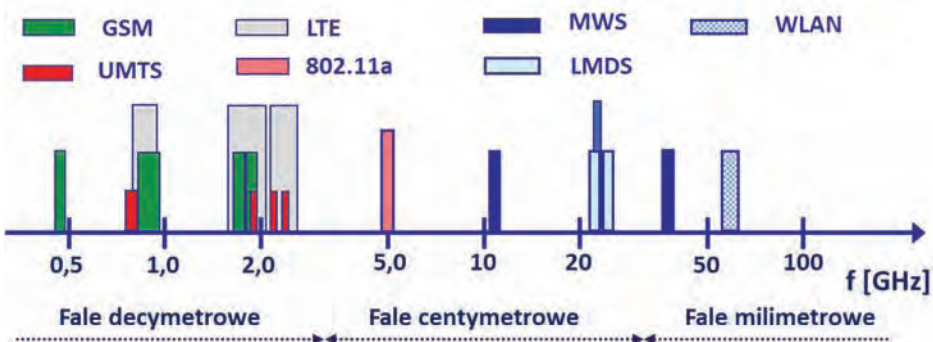
Komórka jest dzielona na pewną liczbę sektorów w kształcie klina. Każdy sektor ma własny zestaw kanałów i obsługiwany jest przez jedną antenę sektorową. Komórka dzielona jest zwykle na trzy, cztery lub sześć sektorów; tyle też anten sektorowych umieszczonych jest na antenie stacji bazowej. Opisany system jest w dużym stopniu elastyczny. Jeżeli liczba klientów w danej komórce rośnie, konieczne staje się zwiększenie przepustowości. Jednym z rozwiązań jest dodanie komórce nowych kanałów. Praktykowane jest okresowe pożyczanie kanałów od komórek, które nie są w tym czasie przeciążone. W ostateczności podejmowana jest decyzja o podziale komórki na mniejsze, by zmniejszyć liczbę telefonów obsługiwanych przez jedną stację bazową.

14.2.2. Kolejne generacje telefonii komórkowej

Pierwsze systemy telefonii komórkowej z transmisją bezprzewodową powstawały w latach 80. XX wieku. Nazywamy je teraz systemami pierwszej generacji 1G. W systemach tych zastosowano transmisję sygnału analogowego i multipleksację z podziałem częstotliwości. W czasie rozmowy użytkownik wykorzystywał określony wycinek pasma częstotliwości, zazwyczaj 25 lub 30 kHz. Zastosowanie technologii analogowej miało szereg wad. Transmisja rozmowy nie była kodowana i umożliwiała podsłuch. Ponadto szybkość transmisji była ograniczona, sieć komórkowa była przeciążona, a połączenia kosztowne.

Już w latach 80. podjęto prace nad nowymi rozwiązaniami, przyjmując, że w systemie transmitowane będą sygnały cyfrowe. W Europie, początkowo dla Europejskiej Wspólnoty Gospodarczej, zaprojektowano system GSM (ang. *Global System for Mobile Communications*). Sieci go wykorzystujące umożliwiały nie tylko transmisję głosu, ale także wysyłanie wiadomości w formie tekstowej oraz dostęp do Internetu. System GSM może pracować w kilku pasmach częstotliwości: 450-490 MHz, 820-960 MHz i 1710-1990 MHz, co pokazano na rys. 14.4. W obszarach o rzadkiej zabudowie wykorzystywane są najniższe pasma częstotliwości. Sieci wykorzystujące system GSM określane są jako telefonia komórkowa drugiej generacji 2G.

System GSM został powszechnie zaakceptowany. Odnotowano, że w roku 2005 liczba korzystających z telefonii komórkowej przekroczyła liczbę korzystających z telefonii przewodowej, a w roku 2010 system telefonii komórkowej GSM był najpopularniejszym na świecie – 3/4 wszystkich połączeń wykonano za jego pomocą.



Rys. 14.4. Pasma częstotliwości wykorzystywane w sieciach telefonii komórkowej różnych generacji. Łączą głównych systemów pracują poniżej częstotliwości 4 GHz.

Prace nad rozwojem telefonii komórkowej, nad opracowaniem nowych standardów i ich wdrożeniem, trwały nieprzerwanie. System GSM był nieustannie ulepszany. Jego kolejne wersje to technologie nazwane GPRS i EDGE. Wersja EDGE pozwoliła istotnie zwiększyć

szybkość transmisji do 300 kb/s. Ta ostatnia nazywana jest czasami technologią 2,5G, ponieważ była etapem przejściowym przed kolejną generacją 3G¹.

Najważniejszym systemem telefonii komórkowej trzeciej generacji 3G został Uniwersalny System Telekomunikacji Mobilnej (ang. *Universal Mobile Telecommunications System*, UMTS). W założeniu system ten miał obsługiwać połączenia głosowe i wideorozmowy użytkowników stacjonarnych i ruchomych. Poza tym miał umożliwić wysyłanie wiadomości tekstowych, transmisje danych i połączenie z Internetem. Zastosowano techniki modulacji QAM i pakietowanie informacji, co pozwoliło zwiększyć szybkość transmisji danych do użytkownika do 21 Mb/s, a od użytkownika do 5,7 Mb/s.

System UMTS umożliwił nieograniczony dostęp bezprzewodowy do globalnej infrastruktury telekomunikacyjnej użytkownikom stacjonarnym i mobilnym oraz, co jest jego wielką zaletą, integrację wszystkich systemów telekomunikacyjnych, w tym radiowych i telewizyjnych. System UMTS został powszechnie zaakceptowany. Już w roku 2008 uruchomiono ponad 230 sieci w 90 krajach.

Trzeba odnotować, że przejście na system 3G wymagało zmodernizowania wszystkich elementów architektury sieci i poniesienia związanych z tym dużych kosztów inwestycyjnych. Ponadto wysokie ceny licencji dla operatorów spowodowały, że wdrożenie telefonii komórkowej 3G znacznie się opóźniło.

Tabela 14.1. Zestawienie możliwości transmisyjnych kolejnych generacji telefonii komórkowych

Generacja	1G	2G	3G	4G	5G
Właściwości /możliwości	Rozmowa	Rozmowa SMS Internet	Rozmowa SMS Internet Wideorozmowa Multimedia	Rozmowa SMS Internet Wideorozmowa Multimedia Aplikacje	Rozmowa SMS Internet Wideorozmowa Multimedia Aplikacje IoT + ML
Prędkość b/s	-	0,3 Mb/s	do 21 Mb/s	do 300 Mb/s	do 20 Gb/s

Także już w roku 2008 podjęto prace nad nowym standardem telefonii komórkowej, który w krótkim czasie został przyjęty jako podstawowy dla czwartej generacji 4G. Głównymi celami nowego standardu było dalsze zwiększenie prędkości przesyłania danych, zmniejszenie opóźnień, zwiększenie efektywności spektralnej łączy radiowych. Zwrócono uwagę na uproszczenie architektury sieci stacji bazowych i centralnych, aby zmniejszyć koszty transmisji danych. Nowy standard oznaczono jako LTE (ang. *Long Term Evolution*).

¹ Bardziej szczegółowe omówienie systemów telefonii komórkowej wykracza poza ramy tej książki. Zainteresowanych Czytelników odsyłamy do obszernej literatury.

Parametry standardu LTE wskazują na znaczny postęp. W łącach „downlink” szybkość transmisji do użytkownika może dochodzić do 300 Mb/s, a w łącach „uplink” od użytkownika może dochodzić do 50 Mb/s. Tak duże szybkości transmisji uzyskano, stosując modulację 16QAM (4b/impuls) i 64QAM (6b/impuls). W przypadku potrzeby zwiększenia szybkości transmisji stworzono możliwości użycia więcej niż jednej fali nośnej.

Nad projektem systemu piątej generacji 5G pracowano kilka lat. W 2020 roku opublikowano jego założenia zwane systemem NR (ang. *New Radio Access Technology*) Założono poprawę całego szeregu parametrów systemu. Przyjęto, że jedno połączenie z systemem może być wykorzystane przez grupę użytkowników. W takim przypadku system ma zapewnić szybkość transmisji do grupy w łącach „downlink” do 20 Gb/s, a w łącach „uplink” od użytkownika do 10 Gb/s. Zastosowanie modulacji wielostanowej QAM i transmisja z użyciem kilku fal nośnych nie daje takich możliwości, jeżeli częstotliwość fal nośnych nie przekracza 6 GHz. Uzyskanie tak dużej szybkości transmisji wymagało stworzenia możliwości przeniesienia częstotliwości fali nośnych do pasma fal milimetrowych. W systemie NR można, poza typowymi dla telefonii komórkowej pasmami w zakresie 0,7-6 GHz, wykorzystać częstotliwości z szerokiego pasma fal milimetrowych 24-70 GHz.

Opisywany system stwarza możliwość transmisji informacji przekazywanych przez urządzenia fizyczne podłączone do sieci w ramach wspomnianego już internetu rzeczy (ang. – *Internet of Things*, IoT). Rosnące możliwości transmisji informacji przez sieci telekomunikacji bezprzewodowej stworzyły warunki ich wykorzystania nie tylko dla komunikacji między ludźmi. Bardzo wiele obiektów może być wyposażonych w sensory zbierające informacje o temperaturze, wilgotności, drganiach, ruchu samochodowym czy też wyposażonych w kamery rejestrujące obrazy. Informacje o zbieranych danych mogą być automatycznie, bez udziału człowieka, przesyłane siecią do centrów, gdzie są analizowane w ramach nadzoru nad bezpieczeństwem obiektów, ruchu drogowego, zapobiegania pożarom. Sieć telefonii bezprzewodowej jest doskonałym narzędziem do pełnienia tej funkcji, gdyż w wielu przypadkach obiekt wysyłający okresowo informacje porusza się. Internet rzeczy stał się obszarem nowych zastosowań współczesnych systemów telefonii komórkowej, którą teraz nazywamy telefonią mobilną albo telekomunikacją mobilną.

Systemy 5G są stopniowo instalowane i wdrażane, a specjaliści dyskutują już o założeniach systemów 6G. Praca nad rozbudową systemów transmisji informacji nieprzerwanie trwa.

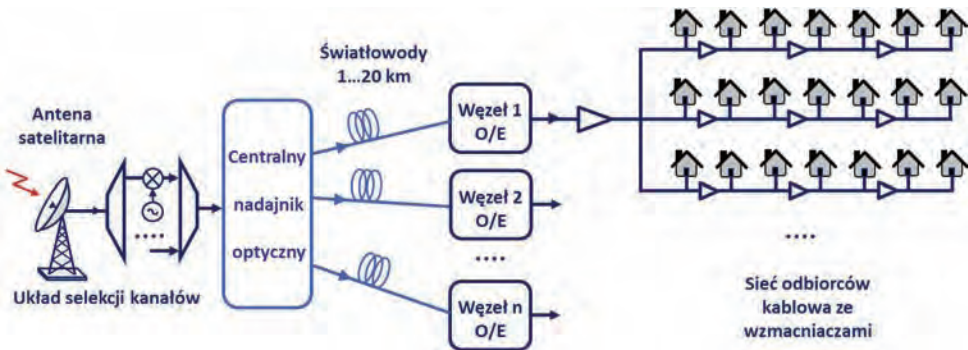
14.3. Telewizja kablowa

W początkowym okresie upowszechniania transmisji telewizyjnych każdy odbiorca instalował własną antenę. Wtedy też powstała koncepcja instalowania sieci, w której sygnał telewizyjny odbierany przez wspólną, dobrą antenę byłby następnie przesyłany kablami współosiowymi do grupy odbiorców. Tak powstawały sieci CATV (ang. *Common Antenna Television*), które instalowano we wszystkich krajach na terenach zabudowanych. W sieciach do prowadzenia sygnału wykorzystywano kable współosiowe o impedancji charakterystycznej $Z_0 = 75 \Omega$. Początkowo instalowano kable, których tłumienie na częstotliwości

100 MHz przekraczało 20 dB/100m, by po wprowadzeniu odpowiednich materiałów i optymalizacji ich struktury zmniejszyć wartość tłumienia poniżej 7 dB/100 m. W sieci instalowano znaczną liczbę wzmacniaczy, aby utrzymać odpowiedni poziom mocy sygnału.

Liczba kanałów telewizyjnych ciągle rosła, co wymuszało poszerzenie pasma transmisji. Uruchomienie telewizji satelitarnej pozwoliło kierować do sieci CATV dziesiątki kanałów telewizyjnych z innych krajów, a nawet z innych kontynentów. Pojawił się poważny problem techniczny. Tłumienie kabla współosiowego rosło z częstotliwością z powodu efektu naskórkowości. I tak dla najlepszych kabli tłumienie na częstotliwości 100 MHz wynosiło 6,5 dB/100 m, a na częstotliwości 1000 MHz rosło znacznie do 20 dB/100 m. Właściwość ta spowodowała konieczność budowy wzmacniaczy szerokopasmowych, których wzmocnienie rosnące z częstotliwością pozwalało wyrównać charakterystykę transmisji.

Nowe możliwości powstały wraz z opanowaniem techniki transmisji łązami światłowodowymi. Tłumienie światłowodu jest znacznie mniejsze niż kabla współosiowego i wynosi 0,2 dB/km dla długości fali 1550 nm. W struktury sieci CATV włączono łąza światłowodowe, powiększając tą drogą pasma transmisji i liczby przesyłanych kanałów telewizyjnych.



Rys. 14.5. Uproszczona struktura systemu telewizji kablowej CATV. Kanały telewizyjne odbierane są z połączeń satelitarnych. Centralny nadajnik optyczny przesyła światłowodami kilkadziesiąt kanałów telewizyjnych do węzłów na obszarze zabudowanym. Programy doprowadzane są do końcowych użytkowników kablami współosiowymi.

Na rys. 14.5 przedstawiono uproszczoną strukturę sieci telewizji CATV, w której użyto łąz światłowodowych do doprowadzenia sygnałów telewizyjnych do węzłów 1, 2, ..., n, ulokowanych w pobliżu końcowych odbiorców. Transmitowane sygnały kanałów są zwykle dobierane z anten skierowanych w stronę różnych satelitów stacjonarnych, oraz z lokalnych źródeł. W ostatnich odcinkach sieci doprowadzających sygnał do końcowych odbiorców wykorzystano kable współosiowe. Sieci z opisaną strukturą pracują z powodzeniem w wielu miastach na świecie.

Rozwój technologii łączy światłowodowych umożliwił doprowadzenie światłowodu do końcowego odbiorcy. Szybkość transmisji sygnału w takiej sieci CATV ogromnie wzrosła do kilku gigabitów na sekundę. Do użytkownika można w tym przypadku doprowadzić więcej niż 100 kanałów telewizyjnych i dziesiątki radiowych, zapewnić mu połączenia z Internetem, możliwość odbierania wiadomości tekstowych, a także – co ma niezwykłą wagę – przesyłać informację od użytkownika do sieci. Otworzyło to możliwość prowadzenia wideorozmów, wideokonferencji, edukacji online. Po doprowadzeniu światłowodu do końcowego użytkownika kilka osób może niezależnie, równolegle pracować, wykorzystując jedno łącze światłowodowe. Sieć telewizji kablowej CATV stała się w tym wydaniu ważnym składnikiem światowej sieci telekomunikacyjnej, którą nazywamy infosferą.

14.4. Radiokomunikacja satelitarna

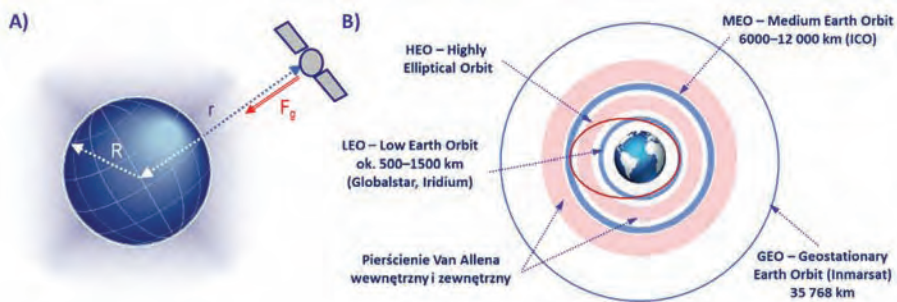
Sputnik był pierwszym sztucznym satelitą Ziemi. Został umieszczony na orbicie w roku 1957. Bardzo szybko zorientowano się, że satelitom można powierzyć pełnienie ważnych funkcji w systemach telekomunikacyjnych.

W tabeli 14.2 zestawiono kilka pierwszych satelitów, którym powierzono takie zadania. Pierwszym był satelita ECHO umieszczony na orbicie w roku 1960. Satelita miał pasywnie odbijać i rozpraszać wysłany z Ziemi sygnał. Już w roku 1963 umieszczono na orbicie geostacjonarnej satelitę SYNCOM. Jego zadaniem był obiór programów telewizyjnych wysyłanych z Ziemi, wzmocnienie i retransmisja na wybrany obszar na powierzchni Ziemi. Satelita na orbicie geostacjonarnej porusza się w płaszczyźnie równika z tą samą prędkością kątową co Ziemia. Antena odbiornika telewizyjnego na powierzchni Ziemi jest cały czas skierowana w jedną stronę. Satelity na orbicie geostacjonarnej zyskały ogromną popularność jako systemy retransmisji sygnałów telewizyjnych.

Tabela 14.2. Zestawienie dat uruchomienia pierwszych satelitów telekomunikacyjnych

Rok	Satelita komunikacyjny
1957	Pierwszy satelita SPUTNIK
1960	Satelita komunikacyjny ECHO – odbijający sygnał
1963	Pierwszy geostacjonarny satelita SYNCOM
1965	Pierwszy komercyjny satelita „Early Bird” – Intelsat 1
1976	3 satelity MARISAT – komunikacja morska
1982	Pierwszy satelita systemu telefonów INMARSAT – A
1988	Pierwszy satelita telefonii ruchomej INMARSAT – C

W kolejnych dekadach na orbitach umieszczono setki obiektów realizujących rozmaite cele. Wiele państw (na koniec roku 2022 aż 24) umieściło na orbitach satelity telekomunikacyjne. Część z nich realizuje cele militarne. Zainteresowani Czytelnicy znajdą wiele publikacji na ten temat.



Rys. 14.6. Ilustracja do telekomunikacji satelitarnej. **A)** Siła przyciągania F_g satelity przez Ziemię utrzymuje satelitę na orbicie i ustala jej promień r . **B)** Położenie orbit satelitów wokół Ziemi. Zaznaczono położenie pierścieni Van Allena o podwyższonej radiacji.

Aby określić położenie orbity i czas obrotu wokół Ziemi, należy rozpatrzyć dynamiczne warunki ruchu satelity. Na rys. 14.6A pokazano oznaczenia promienia Ziemi R i odległości r satelity od środka Ziemi. Na satelitę działa siła grawitacji F_g przyciągania przez Ziemię. Opisuje ją zależność (14-1).

$$F_g = mg \left(\frac{R}{r} \right)^2; \quad (14-1)$$

W zależności powyższej m jest masą satelity, a $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ stałą grawitacji na powierzchni Ziemi. Siła F_g jest siłą dośrodkową zakrzywiającą tor satelity, związaną z prędkością kątową ruchu ω zależnością (14-2):

$$F_g = mr\omega^2 = mr(2\pi f)^2; \quad (14-2)$$

Prędkość kątowa związana jest znanym wzorem $\omega = 2\pi f$ z częstotliwością f obrotów. Można teraz określić promień r orbity kołowej satelity.

$$r = \sqrt[3]{\frac{gR^2}{(2\pi f)^2}}; \quad (14-3)$$

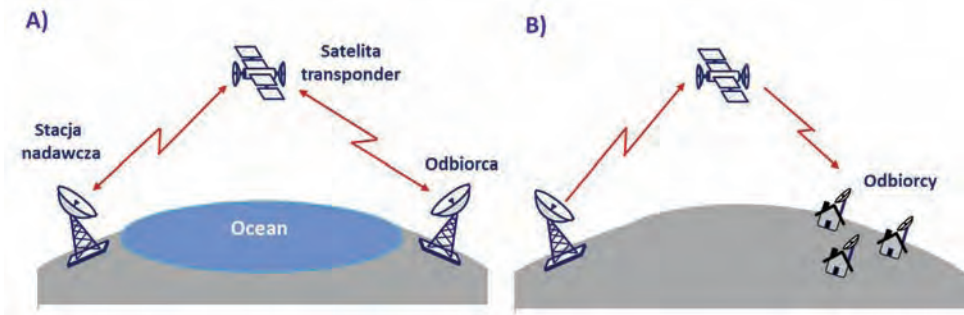
Na rys. 14.6B przedstawiono w dużym uproszczeniu położenie orbit, na które najczęściej wprowadzane są satelity. Wśród satelitów telekomunikacyjnych największą popularnością cieszą się umieszczone na orbicie geostacjonarnej. Orbita ta jest okręgiem położonym w płaszczyźnie równika, ze środkiem w środku Ziemi i promieniem $r = 42\,164 \text{ km}$.

Po odjęciu średniego promienia Ziemi $R = 6378$ km otrzymuje się odległość od powierzchni Ziemi $(r - R) = 35\,786$ km. Satelita geostacjonarny porusza się z prędkością $v = 3,07$ km/s = 11 068 km/h. Płaszczyzna i wymiary orbity oraz prędkość kątowna satelity zostały tak dobrane, by w stosunku do powierzchni Ziemi satelita nie zmieniał położenia. Anteny odbierające sygnały emitowane przez satelitę geostacjonarnego skierowane są zawsze w tą samą stronę.

Inne rodzaje orbit można charakteryzować następująco:

- ✓ Orbits niskie LEO (ang. *Low Earth Orbit*) położone są na wysokościach od 500 do 2000 km. Satelity poruszające się na orbitach LEO mają duże prędkości i dlatego krótki czas widoczności z Ziemi.
- ✓ Orbits na średniej wysokości MEO (ang. *Medium Earth Orbit*) położone są na wysokościach od 8 do 12 tysięcy kilometrów.
- ✓ Orbits silnie eliptyczne HEO (ang. *Highly Elliptical Orbit*) zbliżają się do Ziemi w punkcie perygeum do około 500 kilometrów, a odległość w apogeum może dochodzić do około 50 tysięcy kilometrów.

Na rys. 14.6B zaznaczono położenie pasów Van Allena. Są to otaczające Ziemię obszary intensywnego promieniowania korpuskularnego (elektrony i protony). Pole magnetyczne Ziemi zakrzywia tory tych cząsteczek i nadaje kształt pierścieniom. Poruszające się z dużą energią cząsteczki mogą uszkodzić elektroniczną aparaturę satelity. Orbits LEO i MEO położone są poza pasami Van Allena.

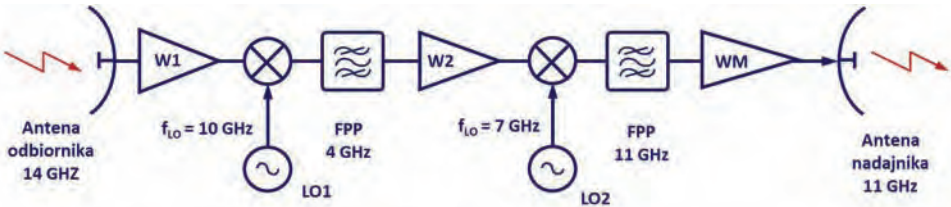


Rys. 14.7. Satelita transponder telekomunikacyjny na orbicie geostacjonarnej. **A)** Retransmisja nad oceanem / morzem / górami zastępuje połączenie kablowe. **B)** Retransmisja kanałów telewizyjnych do odbiorców na dużym obszarze powierzchni Ziemi.

Na rys. 14.7 pokazano przykłady zastosowań satelity transpondera umieszczonego na orbicie geostacjonarnej. Na rys. 14.7A satelita umożliwia utworzenie kanału informacyjnego nad oceanem bądź nad morzem. Informacja może być transmitowana w obie strony. Satelity tego typu umożliwiają transmisję informacji nad Oceanem Atlantyckim, nad Morzem Śródziemnym czy też nad Bałtykiem. Instalacja połączenia satelitarnego jest szybsza i tańsza

w porównaniu z kablem światłowodowym. Kable światłowodowe natomiast umożliwiają transmisję z większą prędkością.

Na rys. 14.7B pokazano transponder, który odbiera sygnały wielu kanałów telewizyjnych z naziemnej stacji nadawczej. Przesłany sygnał zostaje odpowiednio przetworzony i retransmitowany do odbiorców na dużym obszarze na powierzchni Ziemi. W praktycznym rozwiązaniu sygnał satelity może być z powodzeniem odbierany na 4/5 terytorium kontynentu Europy, bądź na całym prawie obszarze Indii.



Rys. 14.8. Jedno z rozwiązań układu transpondera satelity telekomunikacyjnego. Odbierany sygnał na częstotliwości fali nośnej 14 GHz jest po wzmacnieniu poddany dwukrotnej przemianie częstotliwości. Obwody filtrów usuwają zbędne składniki. Informacja zostaje przeniesiona na falę nośną o częstotliwości 11 GHz, która po wzmacnieniu zostaje wyemitowana.

Na rys. 14.8 pokazano jedno z możliwych rozwiązań układu blokowego transpondera satelity telekomunikacyjnego. Częstotliwość fali nośnej odbieranego sygnału jest równa 14 GHz. Sygnał jest poddany dwukrotnej przemianie częstotliwości i kilkakrotnie wzmacniany i filtrowany. Częstotliwość fali nośnej zostaje w pierwszym etapie obniżona do 4 GHz, a następnie podniesiona do 11 GHz i finalnie wyemitowana.

Satelity geostacjonarne często odbierają sygnały z kilku anten umieszczonych na Ziemi. Każdy z nich niesie informację o kilku kanałach telewizyjnych. W układzie transpondera satelity ustalana jest kolejność kanałów i wyrównywanie poziomów mocy. Tak uporządkowany grzebień kanałów zostaje wyemitowany do odbiorców na Ziemi.

W roku 1998 uruchomiono satelitarny system telekomunikacyjny Iridium. System Iridium wykorzystuje 66 sztucznych satelitów poruszających się na orbitach okołoziemskich LEO na wysokości 780 kilometrów. System miał zapewnić połączenia telefoniczne na całym globie. Położenia orbit były tak zaprojektowane, by w każdym punkcie na powierzchni Ziemi użytkownik mógł przesłać sygnał do przelatującego satelity. Gdy jeden satelita zniknął za horyzontem, na niebie pojawiał się kolejny. Transmisja sygnałów między satelitami umożliwiała prowadzenie rozmowy z użytkownikiem po drugiej stronie globu. Satelity systemu komunikują się z siecią 250 stacji naziemnych łączami pracującymi w paśmie 20-30 GHz. Liczba stacji naziemnych może ulec zwiększeniu. Stacje naziemne mają połączenie ze stacjonarną siecią telekomunikacyjną. Pierwotnie projekt systemu przewidywał

równoczesne działanie 77 satelitów, a ponieważ pierwiastkiem chemicznym o liczbie atomowej 77 jest iryd, całość nazwano Iridium.

Błyskotliwie zaprojektowany i bez zarzutu zainstalowany system Iridium okazał się kosztowny w eksploatacji w porównaniu z systemami telefonii komórkowej opisanymi w punkcie 14.2. Jego szybkość transmisji nie przekraczała wartości 4,8 kilobitów na sekundę. Ta prędkość wystarcza do prowadzenia rozmowy, jednakże nie pozwala na transmisję obrazu czy wideorozmowę. Mogą korzystać z niego żeglarze na rozległych przestrzeniach mórz i oceanów, ponieważ nie ma tam pobliskich stacji bazowych. Konkurentem dla Iridium jest wtedy bezpośrednio połączenie z innymi satelitami.

W tabeli 14.3 przedstawiono dla porównania zestawienie kilku wybranych parametrów dla powszechnie znanych satelitarnych systemów telekomunikacyjnych.

Tabela 14.3. Parametry wybranych satelitarnych systemów telekomunikacyjnych

System i jego cechy	INMARSAT	Iridium	Mołnia
Orbita i jej wymiary	GEO – kołowa 36 000 km	LEO – kołowa 780 km	HEO – eliptyczna 40 000 / 500 km
Okres okrążenia Ziemi	24 godziny	100 minut	12 godzin
Widoczność	24 godziny	10 minut	8 godzin
Waga satelity	1500 kg	700 kg	1000 kg
Liczba satelitów i orbit	3 satelity na 1 orbicie	66 satelitów na 11 orbitach	12 satelitów na 4 orbitach
Wykorzystywane pasma pracy	1,6/1,5 GHz	2,5/1,6 GHz	Brak danych

W roku 2019 rozpoczęto budowę nowego satelitarnego systemu telekomunikacyjnego o nazwie Starlink. Projekt systemu przewiduje umieszczenie na orbitach LEO około 12 tysięcy satelitów na trzech różnych wysokościach. 7500 satelitów będzie umieszczonych na wysokości 340 kilometrów, kolejne 1600 satelitów na wysokości 550 kilometrów i ostatnia warstwa 2800 satelitów na wysokości 1150 kilometrów. System Starlink ma zapewnić dostęp do Internetu w każdym punkcie globu. Przeprowadzone w latach 2021-2022 próbne testy wypadły pomyślnie. Zakończenie budowy systemu planowane jest na rok 2027.

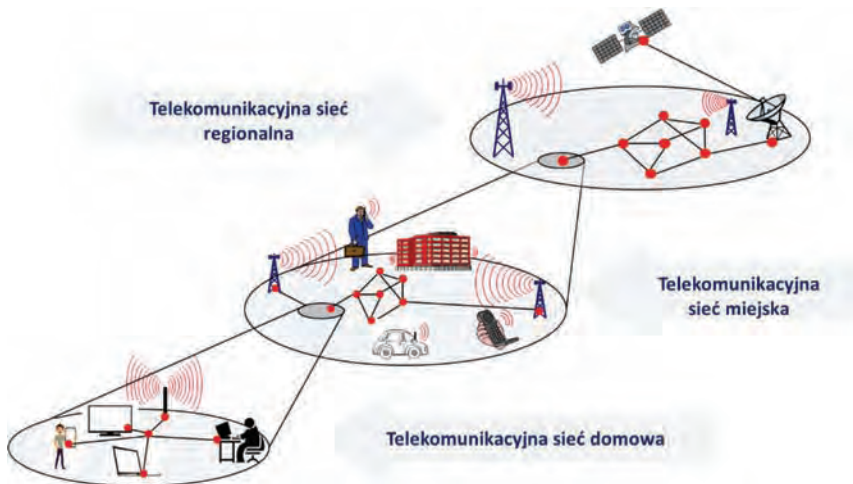
Satelitarne systemy telekomunikacyjne są wykorzystywane i nadal rozbudowywane. Są one uzupełnieniem rozbudowanej sieci połączeń światłowodowych i wykorzystującej transmisje radiowe sieci telekomunikacji mobilnej.

14.5. Sieć telekomunikacyjna

Do niedawna sieć telekomunikacyjna miała dwie warstwy, sieć telefoniczną, opartą na transmisji kablami koncentrycznymi wraz z łączami transoceanicznymi, oraz równolegle rozwijaną sieć radiowo-telewizyjną bazującą na transmisji w wolnej przestrzeni. Sieć telewizji kablowej CATV była strukturą wykorzystującą obie techniki. Rozwój techniki światłowodowej umożliwił budowę łączy o znacznie większej prędkości transmisji. Zastąpienie transmisji analogowej transmisją cyfrową umożliwiło ujednoczenie formy zapisu i transmisji informacji. Rozmowa, muzyka, obraz, informacje liczbowe, programy obliczeniowe, mogły być zapisywane jako strumień impulsów. Zastąpienie kabla koncentrycznego światłowodem dokonano się w ciągu kilku dekad. Do setek milionów domów i mieszkań dotarł światłowód, otwierając dostęp do ogromnych zasobów informacji.

Jednocześnie rozbudowywano systemy telefonii bezprzewodowej. Tak powstawała sieć telefonii komórkowej, a kolejnym generacjom towarzyszyło pokonywanie kolejnych barier ograniczających szybkość transmisji. Opanowanie technologii wielostanowej modulacji QAM było jednym z etapów wielkiej wagi. Zachowując strukturę sieci komórkowej, przekształcono telefonię w wysoce użyteczny system telekomunikacji mobilnej.

W tym wyścigu nowych rozwiązań system telefonii satelitarnej Iridium został na przegranej pozycji ze względu na ograniczoną szybkość transmisji. Być może tworzony obecnie system Starlink okaże się użytecznym składnikiem światowego systemu telekomunikacji. Jak dotąd telekomunikacja satelitarna pełni ważne funkcje pomocnicze.



Rys. 14.9. Uproszczona trójpoziomowa struktura współczesnej sieci telekomunikacyjnej, od najniższego poziomu sieci domowej, poprzez sieć miejską do sieci regionalnej.

Współczesna sieć telekomunikacyjna jest nadal intensywnie rozwijana i ulepszana. Jej struktura jest niedoskonała i często chaotyczna, jednak jej funkcjonalność zyskuje wysoką

ocenę. Na rys. 14.9 w dużym uproszczeniu pokazano trzy poziomy systemy. Poziom najniższy to sieć domowa. Informacja dociera do domu / mieszkania albo z anteny najbliższej stacji bazowej, albo światłowodem z sieci przewodowej. W domu kilku użytkowników ogląda telewizję, pracuje w Internecie, prowadzi wideorozmowę korzystając ze smartfonu.

Kolejny poziom to sieć miejska. Na tym poziomie pracują stacje bazowe, obsługujące tysiące użytkowników, stacje centralne połączone z sieciami regionalną i światową. Tysiące stacjonarnych i poruszających się odbiorców łączy się poprzez stacje bazowe z całym światem. Budynki mieszkalne i biurowe, centra handlowe i komunikacyjne, dworce kolejowe i lotnicze odbierają i wysyłają do odbiorców zewnętrznych ogromne ilości informacji.

Na tym poziomie pracują też systemy IoT – internetu rzeczy – z pomocą których kontrolowany jest ruch drogowy, monitorowany jest stan zdrowia milionów pacjentów, odbierane i analizowane są informacje sensorów i kamer systemów bezpieczeństwa zainstalowanych w setkach tysięcy obiektów i urzędów.

Sieć nazwana regionalną realizuje połączenia z całym światem. Są to: łącza światłowodowe o dużej szybkości transmisji, radiolinie, anteny do transmisji satelitarnej. Bardzo ważnym składnikiem systemu światowego są łącza transoceaniczne. Opanowanie techniki budowy łączy światłowodowych o dużych szybkościach transmisji i ich instalacji na dnie mórz pozwoliło stworzyć światową sieć infostrad, z ominięciem wielu granic państwowych i przepraw przez rzeki czy łańcuchy górskie. Sieć ta jest znacznie lepiej zabezpieczona przed atakami terrorystów. Dzięki niej połączenia transkontynentalne są realizowane w łatwy sposób i niskim kosztem.

14.6. Radionawigacja

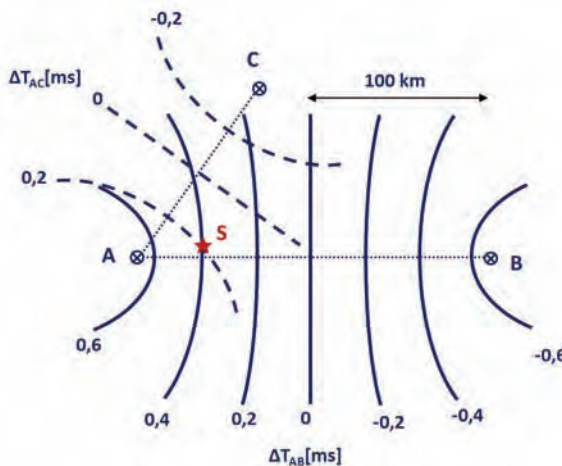
14.6.1. Hiperboliczny system radionawigacji

Pod terminem radionawigacja rozumiane jest określanie pozycji obiektu w procesie, który bazuje na falach radiowych. Stosowane systemy radionawigacji wykorzystują sygnały emitowane przez stacje bazowe. Określenie położenia obiektu w stosunku do stacji bazowych pozwala określić jego współrzędne. Radionawigacja jest wykorzystywana w lotnictwie, żegludze, a także w transporcie lądowym.

W połowie XX wieku opracowano system nazwany hiperbolicznym. W systemie tym mierzone są różnice odległości od trzech stacji bazowych. Ilustrację działania systemu hiperbolicznego przedstawiono na rys. 14.10.

Obiekt, który chce określić swoje położenie, znajduje się w punkcie S. Trzy stacje bazowe umieszczone są na powierzchni Ziemi w punktach A, B i C. Ich położenie jest precyzyjnie określone. Skalę odległości pokazano na rysunku. Można przyjąć, że wszystkie cztery punkty A, B, C i S leżą w jednej płaszczyźnie. Stacje bazowe wysyłają jednocześnie krótkie impulsy na wybranej częstotliwości radiowej. Impulsy odbierane są przez odbiornik obiektu, który mierzy w milisekundach różnice czasu ΔT_{AB} i ΔT_{AC} , między impulsami ze stacji A i B,

oraz A i C. Punkty, dla których różnica czasów odbioru jest taka sama tworzą hiperbole, co dało nazwę metodzie pomiaru.



Rys. 14.10. Ilustracja wyjaśniająca zasadę działania hiperbolicznego systemu radionawigacji. Obiekt *S* mierzy różnice czasu propagacji impulsów radiowych emitowanych równocześnie przez trzy stacje bazowe *A*, *B* i *C*.

Na rysunku oznaczono dwie rodziny hiperboli dla pomiaru różnic ΔT_{AB} i ΔT_{AC} . Impuls ze stacji *A* dociera do odbiornika obiektu 0,4 ms wcześniej, niż impuls ze stacji *B* i 0,2 ms wcześniej niż impuls ze stacji *C*. Przecięcie hiperboli określa punkt położenia obiektu.

Stacje bazowe mogą emitować sygnały o tej samej częstotliwości i o tej samej, precyzyjnie określonej fazie. Odbiornik obiektu w tym przypadku mierzy różnice faz odbieranych sygnałów. W jednym z rozwiązań stacje bazowe emitowały sygnał o częstotliwości 10 kHz, co pozwoliło uzyskać dokładność pomiaru w granicach 2-4 kilometry. Zwiększenie częstotliwości do 100 kHz pozwoliło zwiększyć dokładność pomiaru do 5-50 metrów. Systemy nawigacji z naziemnymi stacjami zostały zastąpione systemami satelitarnymi.

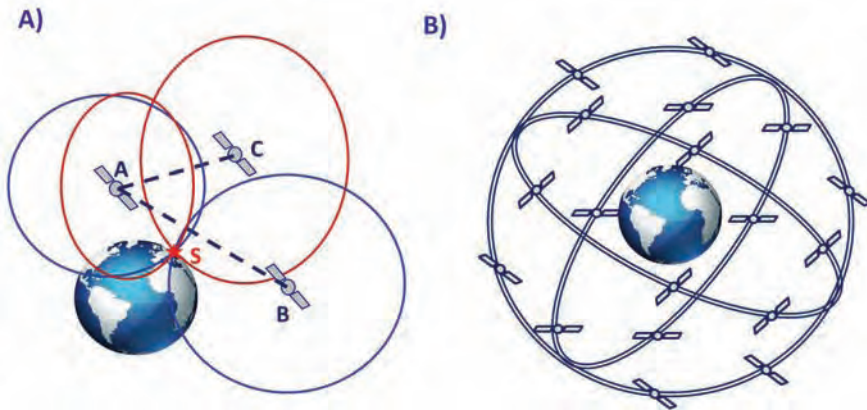
14.6.2. Satelitarny system radionawigacji

Zbudowanie globalnego systemu nawigacji wymagało umieszczenia stacji bazowych na satelitach. Rozwiązanie to umożliwiło niewielkiej liczbie satelitów pokryć cały obszar globu. Wykorzystanie zegarów atomowych pozwoliło dokładnie synchronizować częstotliwości emitowanych przez satelity sygnałów. Zwiększono częstotliwość emitowanego sygnału, co przyczyniło się do zwiększenia dokładności pomiaru. Poza tym nawigacja satelitarna umożliwiła trójwymiarowy pomiar położenia obiektu.

Zasadę pomiaru można wyjaśnić, analizując rys. 14.11. Obiekt mierzący swoje położenie znajduje się w punkcie *S*. Odbiornik obiektu w danym momencie czasu mierzy odległość od trzech satelitów oznaczonych na rysunku jako *A*, *B* i *C*. Położenie satelitów jest

także znane. Punkty A, B i S tworzą płaszczyznę. Przyjmijmy, że jest to płaszczyzna rysunku. Dwa okręgi niebieskie mają środek w punktach A i B, a jeden z punktów przecięcia jest punktem S. Punkty A, C i S tworzą inną płaszczyznę. Dwa okręgi czerwone o środkach w punktach A i C leżą w tej płaszczyźnie. Punkt S jest jedynym punktem wspólnym dla wszystkich czterech okręgów.

Można też przyjąć, że 3 kule o znanych promieniach AS, BS i CS przecinają się w punkcie S. Okręgi niebieskie i czerwone powstają po przecięciu ich przez płaszczyzny, w których leżą trójkąty A-B-S i A-C-S. Jeżeli znamy położenia A, B i C w stosunku do Ziemi, to wyznaczenie położenia punktu S jest zadaniem geometrycznym.



Rys. 14.11. Ilustracja wyjaśniająca zasady działania satelitarnego systemu nawigacji. **A)** Obiekt S mierzy odległości od satelitów A, B i C. Punkty A, B i S wyznaczają płaszczyznę w płaszczyźnie rysunku. Na niej leżą okręgi niebieskie. Punkty A, C i S wyznaczają płaszczyznę obróconą w stosunku do płaszczyzny rysunku. Na niej leżą okręgi czerwone. **B)** Położenie 3 orbit, na których umieszczono satelity nawigacyjnego systemu Galileo. Liczba satelitów na poszczególnych orbitach jest na rysunku kilkukrotnie mniejsza niż w rzeczywistości.

W zrealizowanych systemach nawigacyjnych mierzone są odległości do czterech widzianych przez obiekt satelitów, co zwiększa dokładność pomiaru.

Jeśli pominąć wczesne próby budowy systemów satelitarnej nawigacji dla celów wojskowych, to pierwszym profesjonalnym systemem nawigacyjnym był pracujący cały czas GPS (ang. *Global Positioning System*) zbudowany przez Departament Obrony USA. 24 satelity umieszczono na 6 orbitach na wysokości około 20 000 kilometrów z czasem obrotu około 12 godzin. W tym rozwiązaniu w dowolnym miejscu globu widoczne jest co najmniej 5 satelitów. Satelity GPS nadają sygnał na dwóch częstotliwościach, które kontrolowane są przez zegary atomowe. Odbiornik odbiera sygnały z czterech satelitów, ustala odległość do nich, a następnie określa swoje położenie na kuli ziemskiej. Dokładność pomiaru wynosi

kilka metrów, ale można poprawić ją dodatkowym pomiarem do kilku centymetrów. System GPS jest powszechnie stosowany na całej kuli ziemskiej. Najważniejsze dane systemu podano w tabeli 14.4.

Tabela 14.4. Parametry wybranych satelitarnych systemów nawigacyjnych

System i jego cechy	GPS	GLONASS	GALILEO
Liczba satelitów	21 + 3	24	24 + 6
Liczba orbit	6	3	3
Wysokość orbit	20 183 km	19 100 km	23 222 km
Czas 1 obrotu	11 h 58 min	11 h 15 min	bd
Wykorzystywane częstotliwości	1575,4 / 1227,6 MHz	1602 + n9 / 16 MHz 1246 + n7 / 16 MHz	1575,4 / 1191,8 / 1176,4 / 1207,1 / 1278,7 MHz

W drugiej połowie XX wieku dwa kraje – USA i Związek Socjalistycznych Republik Radzieckich (ZSRR) (rozpadł się w roku 1991) – rywalizowały ze sobą w podboju kosmosu. W roku 1976 w ZSRR podjęto decyzję o rozpoczęciu prac nad budową konkurencyjnego systemu radionawigacji o nazwie GLONASS. Po rozpadzie ZSSR zadanie uruchomienia systemu przejęła Rosja. Pełną zdolność pomiarową system ten uzyskał dopiero w roku 2011. Taka sama, jak w systemie GPS, liczba satelitów została umieszczona tylko na 3 orbitach, na podobnej wysokości. Zasada pomiaru jest nieco zmodyfikowana. Odbiornik powinien odebrać sygnał z 4 satelitów. Dokładność pozycjonowania poziomego mieści się w granicach 5-10 metrów, a pionowego w zakresie do 15 m. System wykonuje także pomiar prędkości obiektu z odbiornikiem. Podstawowe dane zawarto w tabeli 14.4.

Unia Europejska za pośrednictwem Europejskiej Agencji Kosmicznej ESA rozpoczęła w 1999 roku prace nad budową europejskiego systemu radionawigacji o nazwie GALILEO. W założeniach 30 satelitów systemu miało być rozłożonych na 3 orbitach na wysokości 23 222 kilometrów, aby pomiar położenia był dostępny w każdym miejscu globu. Zegary atomowe zapewniają najwyższą dokładność częstotliwości emitowanych sygnałów. Także w tym przypadku odbiornik powinien odebrać sygnały z 4 satelitów. GALILEO ma zapewniać pomiary pozycji poziomej i pionowej z dokładnością do 1 m.

Pierwsze uruchomienie nastąpiło w roku 2011. Korzystanie z podstawowych usług Galileo jest bezpłatne i otwarte dla wszystkich. W pełni szyfrowana usługa o wyższej precyzji jest dostępna bezpłatnie dla użytkowników autoryzowanych przez rządy krajów europejskich.

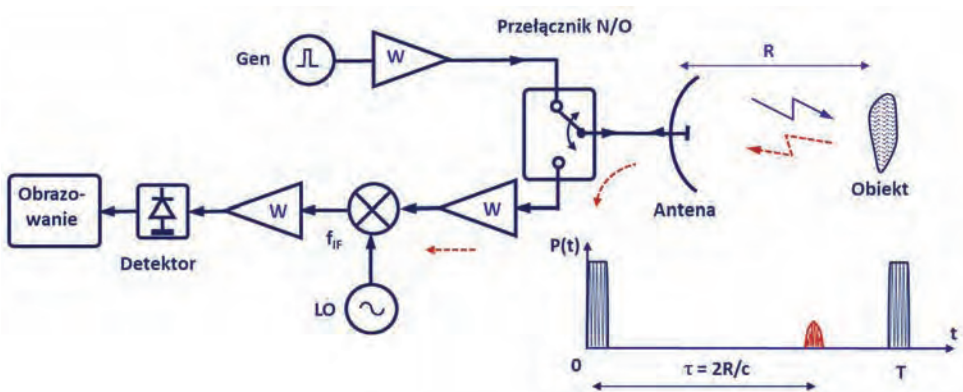
Nawigacja satelitarna pierwotnie miała służyć celom wojskowym. Rozwój technik kosmicznych, opracowanie atomowych wzorców częstotliwości i rozwój techniki radiokomunikacji umożliwiły umieszczenie na orbitach całych systemów satelitarnych, pozwoliły

znacznie zwiększyć dokładność pomiaru i w konsekwencji upowszechnić i spopularyzować odbiorniki zdolne do niemal ciągłego, dokładnego określenia swojej pozycji.

14.7. Radary

14.7.1. Zasada działania radaru

Historia powstania radaru (ang. *Radio Detecting and Ranging*) związana jest przebiegiem II wojny światowej. Rozwijająca się pod koniec lat 30. XX wieku technika radiowa została wykorzystana do lokalizacji w przestrzeni obiektów, które odbijają falę elektromagnetyczną. W Wielkiej Brytanii opanowano technikę wytwarzania impulsów promieniowania EM o stosunkowo dużej mocy. Udoskonalono też technikę odbioru słabych sygnałów. Jeśli do tego opanowano techniki kierunkowej emisji i odbioru fali EM, to powstały warunki funkcjonowania radaru. Ideę działania radaru mierzącego odległość między anteną stacji a obiektem przedstawiono na rys. 14.12.



Rys. 14.12. Układ idealny radaru do pomiaru odległości. Generator Gen i wzmacniacz W kierują impulsy sygnału mikrofalowego przez antenę w kierunku obiektu oddalonego o R . Impuls mocy odbitej wraca do anteny, a układ odbiorczy mierzy jego czas opóźnienia τ .

Generator Gen wraz ze wzmacniaczem W tworzą nadajnik systemu. Wytwarzają krótkotrwałe, rzędu 1 mikrosekundy, impulsy sygnału mikrofalowego o dużej mocy. W wielu rozwiązaniach stosuje się jako nadajnik magnetron – próżniową lampę mikrofalową, generującą impulsy dużej mocy. Długość fali λ sygnału jest różna w różnych systemach, od decymetrów do fal milimetrowych. Impuls o mocy P_N zostaje wypromieniowany przez antenę kierunkową o dużym wzmocnieniu G . Po wysłaniu impulsu przełącznik nadawanie / odbiór (N/O) łączy antenę z odbiornikiem o dużej czułości. Jeżeli w polu promieniowania anteny znajduje się obserwowany obiekt w odległości R , to gęstość mocy S_N docierającej do niego opisuje zależność (14-4):

$$S_N[\text{W/m}^2] = \frac{P_N G}{4\pi R^2}; \quad (14-4)$$

Część mocy P_{ODBITA} odbija się od niego i wraca w stronę anteny. Oznaczając przez σ [m²] przekrój czynny obserwowanego obiektu, można moc odbitą zapisać następująco:

$$P_{ODBITA} = \sigma S_N; \quad (14-5)$$

W tabeli 14.5 przedstawiono kilka przykładowych wartości przekroju czynnego dla różnych obiektów, począwszy od pojedynczej szarańczy, na samolocie jumbo jet kończąc.

Moc P_0 powracająca do anteny stacji radarowej jest niewielką częścią mocy P_N wypromieniowanej przez nadajnik. Opisuje ją zależność (14-6).

$$P_0 = \frac{P_N G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^2 R^4}; \quad (14-6)$$

Sygnal odbity analizowany jest przez czuły odbiornik, który określa czas opóźnienia τ powracającego impulsu w stosunku do impulsu wysłanego przez nadajnik, zwanego oświetlającym. Znając czas powrotu τ , można prosto obliczyć odległość R obiektu od anteny. We wzorze (14-7) c jest prędkością światła.

$$R = \frac{\tau c}{2} \quad (14-7)$$

Bardzo ważnym składnikiem procesu pomiarowego jest położenie anteny w momencie pomiaru. Anteny radarów mają duże wzmocnienia. Zmierzona odległość obiektu od anteny wyznacza promień powierzchni kulistej, na której znajduje się obiekt. Dokładne położenie określa kierunek anteny emitującej sygnał. Moc P_0 sygnału powracającego do anteny maleje szybko z odległością R obiektu. Ważnym parametrem systemu jest poziom najmniejszej mocy P_{OMIN} wykrywanej przez odbiornik. Pozwala on obliczyć maksymalny zasięg R_{MAX} radaru.

$$R_{MAX} = \sqrt[4]{\frac{P_N G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^2 P_{OMIN}}}; \quad (14-8)$$

Częstotliwość repetycji impulsów zależy od zasięgu radaru. Sygnal odbity od obiektu odległego od anteny o 150 metrów wraca po czasie 1 mikrosekundy, a od odległego o 150 kilometrów wraca po upływie 1 milisekundy. W tym przypadku impulsy mogą być wysyłane co 2 milisekundy.

Tabela 14.5. Przekrój czynny σ [m²] wybranych obiektów śledzonych przez radar

Obiekt	Przekrój czynny σ [m ²]
Pojedyncza szarańcza	0,00001
Ptaka	0,01
Rakieta	0,5
Dorosły mężczyzna	1
Samolot myśliwski	2-5
Duży bombowiec	40
Jumbo jet	100
Autobus	100

Radary analizujące czas powrotu odbitych impulsów znalazły rozliczne, niezwiązane z woj-skim zastosowania. Kontrola ruchu samolotów na lotniskach i w przestrzeni powietrznej jest jednym z ważniejszych zastosowań. Radary wspomagają obserwacje wędrujących stad szarańczy, pomagają w określeniu stanu dojrzewania niektórych zbóż. Analiza sygnałów odbitych od ścian starożytnych budowli pozwala lokalizować zamurowane komnaty i grobowce, nieznanne przejścia i korytarze.

14.7.2. Radar dopplerowski

Radar dopplerowski to wyspecjalizowany przyrząd, który wykorzystuje efekt Dopplera do pomiaru prędkości obiektów poruszających się w stosunku do anteny radaru. Ideę działania układu umożliwiającego taki pomiar przedstawiono na rys. 14.12.

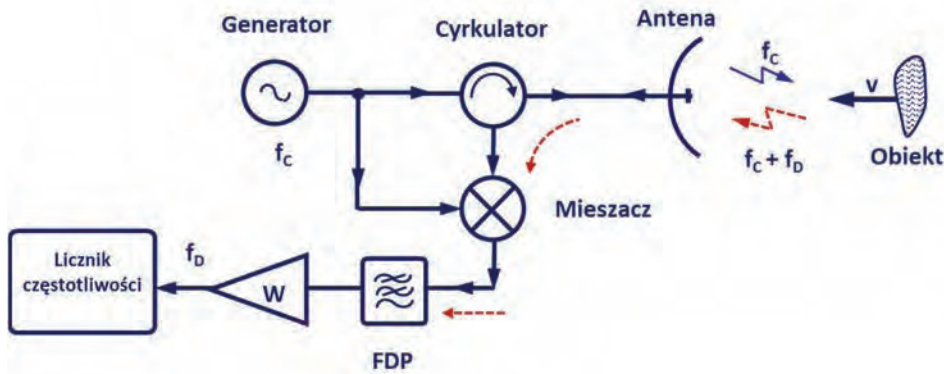
Generator mikrofalowy generuje sygnał fali ciągłej o częstotliwości f_c . Sygnał ten kierowany jest przez cyrkulator do anteny, gdzie zostaje wyemitowany w stronę poruszającego się obiektu. Na rysunku obiekt porusza się z prędkością v w stronę anteny. Sygnał odbity od obiektu wraca do anteny. Efekt Dopplera powoduje, że jego częstotliwość wzrosła do wartości $f_c + f_D$. Przyrost f_D prędkości można obliczyć ze wzoru (14-9).

$$f_D = \frac{2vf_c}{c}; \quad (14-9)$$

Jeśli obiekt oddala się od anteny z prędkością v , to częstotliwość f_D zmienia znak i częstotliwość sygnału odbitego maleje. Jeżeli obiekt porusza się po torze z prędkością, która ma w stosunku do anteny składowe radialną i kątową, to pomiar wskaże wartość składowej radialnej.

Powracający do anteny odbity sygnał kierowany jest przez cyrkulator do odbiorczej części układu. Ważnym składnikiem odbiornika jest mieszacz, w którym sygnałem hetero-

dyny jest część mocy generatora o częstotliwości f_c . Częstotliwość różnicowa w porcie wyjściowym mieszacza ma wartość f_D . Po odfiltrowaniu i wzmacnieniu oblicza ją licznik częstotliwości. Obliczenie prędkości v jest teraz prostym zabiegiem arytmetycznym.



Rys. 14.13. Układ ilustrujący zasadę działania radaru dopplerowskiego. Generator fali ciągłej o częstotliwości f_c generuje sygnał kierowany przez antenę w stronę obiektu poruszającego się z prędkością v . Sygnał odbity zmienił częstotliwość o wartość f_D . Częstotliwość f_D mierzona jest przez licznik w torze odbiornika.

Powracający do anteny odbity sygnał kierowany jest przez cyrkulator do odbiorczej części układu. Ważnym składnikiem odbiornika jest mieszacz, w którym sygnałem heterodyny jest część mocy generatora o częstotliwości f_c . Częstotliwość różnicowa w porcie wyjściowym mieszacza ma wartość f_D . Po odfiltrowaniu i wzmacnieniu oblicza ją licznik częstotliwości. Obliczenie prędkości v jest teraz prostym zabiegiem arytmetycznym.

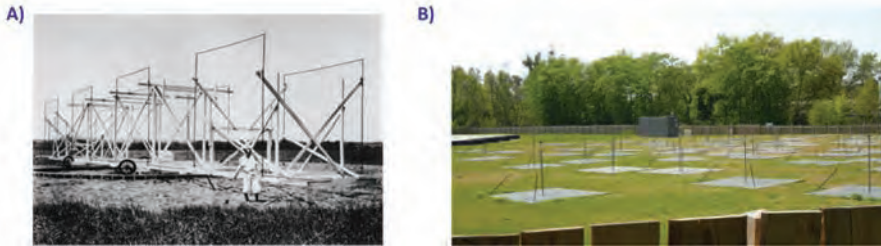
Z radarami dopplerowskimi stykają się kierowcy samochodów na drogach publicznych, gdzie radary kontrolują prędkości pojazdów, by mieściły się w granicach określonych przepisami. Radary dopplerowskie używane są także jako pomoc nawigacyjna dla samolotów i satków kosmicznych. W razie potrzeby mogą mierzyć bezpośrednio prędkość samolotu w stosunku do powierzchni Ziemi, niezależnie od prędkości wiatru.

14.8. Radioastronomia

Bardzo ciekawym polem zastosowań technik radiokomunikacji stała się radioastronomia, dziedzina astronomii, która bada obiekty pozaziemskie, analizując odebrane sygnały na częstotliwościach radiowych. Obserwacja w pasmach radiowych sygnałów dochodzących do Ziemi z odległych galaktyk znacznie poszerzyła naszą wiedzę o Wszechświecie.

Za prekursora radioastronomii uznano inżyniera Karla Guthe Jansky'ego, który w roku 1931 w Stanach Zjednoczonych skonstruował system antenowy, będący pierwszym radioteleskopem. Zastosowana w systemie odbiorczym antena miała 30 m długości, 4 m wyso-

kości i odbierała sygnały na częstotliwości około 20 MHz. Zdjęcie systemu Jansky'ego pokazano na rys. 14.14A. Antena była umieszczona na szynach i mogła się obracać. W roku 1933 Karl Jansky zarejestrował promieniowanie pochodzące z Drogi Mlecznej.



Rys. 14.14. Systemy antenowe w radioastronomii na pasma metrowe. **A)** Fotografia instalacji skonstruowanej przez Karla Jansky'ego w roku 1931. **B)** Grupa anten dipolowych systemu LOFAR pracującego w paśmie 10-240 MHz. W systemie pracują tysiące takich anten.

Źródła:

A): Jansky Antenna, Image courtesy of NRAO/AUI. Wikimedia Commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:JanskyatAntenna_hi.tif.

B): Haplochromis, LOFAR antennas in Potsdam, April 2011, Wikimedia Commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LOFAR_Potsdam_Bornim.jpg.

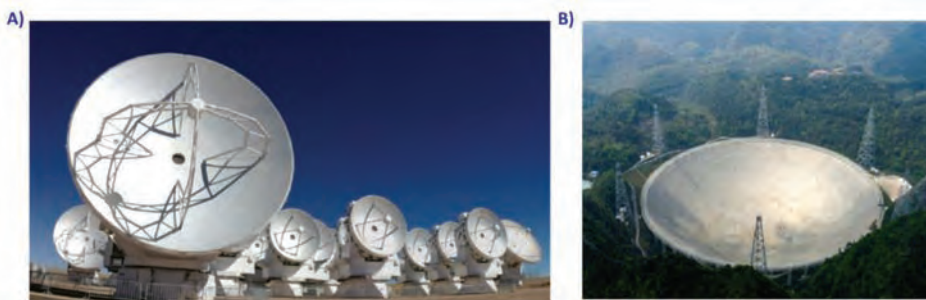
Rozwój systemów radioteleskopów prowadzono w kilku kierunkach. Aby uzyskać możliwość odbierania bardzo słabych sygnałów z odległych galaktyk, doskonalono układy wzmacniaczy, obniżając ich temperaturę szumów. Specjalne konstrukcje wzmacniaczy pracujących w niskich temperaturach ciekłego azotu i helu pozwoliły obniżyć ich temperaturę szumów do poziomu kilku-, kilkunastu kelwinów.

Wielkim osiągnięciem było opanowanie techniki równoczesnego odbioru sygnałów z tego samego kierunku przez odbiorniki rozmieszczone na dużych obszarach globu. Przykładem jest sieć odbioru radiowego LOFAR (ang. *Low-Frequency Array for Radio astronomy*). Ten wieloantenowy system został zaprojektowany i uruchomiony w roku 2010 przez Holenderski Instytut Radioastronomiczny ASTRON. W systemie pracuje 25 000 anten grupowanych w stacjach po 96 anten. Zdjęcie jednej z dookólnych anten dipolowych systemu LOFAR pokazano na rys. 14.14B. Stacje rozmieszczone są w Europie, najwięcej w Holandii, ale także w Niemczech, w Polsce i kilku innych krajach. Planuje się uruchomienie kolejnych. Całkowita efektywna powierzchnia, na której rozmieszczono anteny odbiorcze systemu, wynosi około 300 000 metrów kwadratowych.

System LOFAR prowadzi obserwacje i pomiary w zakresie częstotliwości od 10 MHz do 240 MHz. Kierunek obserwacji systemu jest wybierany elektronicznie przez regulację opóźnienia fazowego między antenami. Sygnały elektryczne odbierane przez stacje systemu są digitalizowane i następnie przesyłane do centralnego procesora cyfrowego w Holandii.

Bardzo zaawansowanym technicznie systemem obserwacji radiowej jest uruchomiony w roku 2011 na pustyni Atakama w Chile system ALMA (ang. *Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array*). W systemie pracuje 66 radioteleskopów. Obserwacje prowadzone są w pasmie fal milimetrowych, w zakresie częstotliwości od 31 do 1000 GHz. Lokalizację systemu na wysokości 5000 metrów w suchym miejscu wybrano, aby zmniejszyć poziom szumów i tłumienie atmosfery. System ALMA jest międzynarodowym przedsięwzięciem badawczym, w którym partycypują m.in. Europa, USA i Japonia.

Zdjęcie na rys. 14.15A pokazuje kilka parabolicznych anten systemu ALMA. Jest to najdroższy radioteleskop naziemny.



Rys. 14.15. Współczesne systemy radioastronomii. **A)** Grupa anten parabolicznych systemu ALMA, uruchomionego w 2011 roku w Chile. Na wysokości 5000 metrów pracuje 66 parabolicznych anten. **B)** Największa paraboliczna antena chińskiego radioteleskopu FAST o średnicy 500 metrów. Radioteleskop ten uruchomiono w roku 2020.

Źródła:

A): ESO, Atacama Compact Array, 7 May 2013, Wikimedia Commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Atacama_Compact_Array.jpg.

B): Absolute Cosmos, FAST Radio Telescope (captured from video), 28 January 2020, Wikimedia Commons, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FAST_Radio_Telescope_\(captured_from_video\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FAST_Radio_Telescope_(captured_from_video).jpg).

Bardzo ciekawym rozwiązaniem jest uruchomiony w pełni w roku 2020 w Chinach radioteleskop FAST (ang. *Five hundred meter Aperture Spherical Telescope*). Średnica anteny parabolicznej wynosi 500 metrów. Antena jest nieruchoma i wypełnia małą dolinę. Pokazano ją na zdjęciu na rys. 14.15B. System odbiorczy pozwala prowadzić obserwacje w szerokim paśmie od 70 MHz do 3.0 GHz. FAST rozpoczął obserwacje już w roku 2017 i w pierwszych latach funkcjonowania odkrył dziesiątki pulsarów. Konstruktorzy oczekują, że FAST będzie w stanie wykryć transmisje sygnałów obcych cywilizacji z odległości ponad 1000 lat świetlnych od Ziemi.

Przez całe wieki ludzie obserwowali wszechświat, używając lunet i teleskopów. Oko człowieka jest świetnym detektorem, ale tylko w paśmie promieniowania widzialnego. Od 90 lat, wykorzystując narzędzia radiokomunikacji, podjęto obserwacje w innych pasmach częstotliwości, w szerokim zakresie fal od długości metrów do milimetrów. Dzięki temu nasza wiedza o otaczającym nas wszechświecie znacznie wzrosła.

Zainteresowani urządzeniem wszechświata Czytelnicy znajdą wiele bardzo ciekawych publikacji na temat narzędzi i metod radioastronomii. Ograniczony zakres tej książki nie pozwala na poszerzenie tego tematu.

14.9. Podsumowanie

Światowy system telekomunikacji jest strukturą bardzo złożoną. W ostatnich dekadach rozwijał się niezwykle dynamicznie i nadal się rozwija. Telefonía bezprzewodowa, komórkowa, nazywana teraz telekomunikacją mobilną, w ciągu 40 lat stała się jednym z najważniejszych składników systemu światowej infosfery. Obecnie na początku trzeciej dekady XXI wieku trudno wyobrazić sobie bez niej pracę, edukację, rozrywkę i codzienne życie.

Telekomunikacja satelitarna jest ważnym składnikiem i uzupełnieniem globalnego systemu transmisji informacji. Powierzchnie mórz i oceanów zajmują około 70% powierzchni globu. Na oceanach nie zbudowano sieci stacji bazowych, dlatego komunikacja satelitarna jest dla przebywających na morzu jedynym rozwiązaniem.

Systemy radionawigacji są powszechnie stosowane przez użytkowników dróg, wędrowców, turystów przemierzających obszary leśne i tereny górskie. Rozwinięta technika radiokomunikacji pozwoliła stworzyć systemy lokalizacji pozycji o dokładności lepszej niż 1 metr. Radioastronomia, wykorzystując najnowsze osiągnięcia radiotechniki, ogromnie poszerzyła spektrum obserwacji w porównaniu z tradycyjnym teleskopem. Nasza wiedza o stanie i historii wszechświata wzbogaciła się o nowe fakty i hipotezy.

W każdym z wymienionych obszarów trwają prace nad nowymi, jeszcze wydajniejszymi rozwiązaniami. Należy oczekiwać, że kolejne dekady przyniosą nowe rozwiązania wzbogacające nasze możliwości rejestracji, transmisji i obróbki informacji.