

# Rozdział 1

## Wprowadzenie do telekomunikacji mikrofalowej

### 1.1. Rys historyczny

Przesyłanie informacji było i jest jedną z ważniejszych potrzeb człowieka. W dawnych czasach wysyłano w tym celu konnych posłańców, wykorzystywano gołębie pocztowe. Marynarze posługiwali się kodami flagowymi, budowano wielokilometrowe linie telegrafów optycznych z ruchomymi ramionami.

W roku 1800 Alessandro Volta zbudował ogniwo galwaniczne, które wytwarzało prąd w przewodzie umieszczonym między elektrodami zanurzonymi w elektrolicie. W roku 1831 Michael Faraday odkrył i opisał zjawisko indukcji elektromagnetycznej, co przyczyniło się do powstania elektrodynamiki, techniki, która pozwalała zamieniać energię mechaniczną na elektryczną i na odwrót. Zbudowano generatory prądu i silniki elektryczne. Rozpoczęła się era elektryczności, która gruntownie zmieniła model naszej cywilizacji.

Już w roku 1838 Samuel Morse opatentował kod, zwany później alfabetem Morse'a, w którym za pomocą kropek i kresek prezentowano litery alfabetu i cyfry. Do przesłania kropek i kresek przerywano przepływ prądu w obwodzie elektrycznym, który tworzył jeden izolowany przewód elektryczny, uziemiony na obu końcach. Jak bardzo potrzebnym było stworzenie możliwości przesyłania informacji, niech świadczy fakt, że już 20 lat później położono wielkim kosztem pierwszy transatlantyczny kabel telegraficzny. Wkrótce zbudowano kolejne, długodystansowe połączenia telegraficzne, zarówno na lądzie, jak i na morzu. Niektóre z nich wyszczególniono w tabeli 1.1.

**Tabela 1.1.** Porównanie parametrów transatlantycznych połączeń telegraficznych

Linia telegraficzna	Rok	Szybkość transmisji
Atlantyk: Irlandia – Nowa Funlandia	1858	Kilka słów na godzinę
Atlantyk: Irlandia – Nowa Funlandia	1866	6-8 słów na minutę
Odcinki transmisyjne na kontynencie	1880-1898	40 słów na minutę
Nowa Funlandia – Azory	1928	2500 liter na minutę

W roku 1864 James Clerk Maxwell, szkocki fizyk i matematyk, sformułował i opublikował zestaw równań wiążących ze sobą pola elektryczne i magnetyczne z ładunkami i prądem elektrycznym. Równania te, nazywane od momentu opublikowania równaniami Maxwella,

połączyły ze sobą prawa Gaussa, Ampere'a i Faradaya. Wkrótce uznano je za fundament wiedzy o elektromagnetyzmie. Rozwiązując równania Maxwella, poznaliśmy warunki propagacji fal elektromagnetycznych w atmosferze Ziemi, w kablach współosiowych i w światłowodach.

W roku 1876 Alexander Graham Bell wspólnie z Thomasem Watsonem skonstruowali w USA telefon, urządzenie elektryczne umożliwiające rozmowę oddalonych od siebie osób. Drgania membrany pod wpływem ludzkiego głosu powodowały przepływ prądu w obwodzie. Zmiany prądu na drugim końcu zamieniane na ruch membrany odtwarzały głos. Rozpoczęła się era telefonu.

W roku 1888 niemiecki fizyk Heinrich Hertz opublikował wyniki eksperymentów, które dowodziły istnienia fal elektromagnetycznych. Opisał działanie i parametry anteny dipolowej, co otworzyło drogę technice wytwarzania i propagacji fal elektromagnetycznych. Pierwsza transmisja radiowa miała miejsce w Rzymie w roku 1895. Przygotował ją Włoch, Guglielmo Marconi. W roku 1899 przeprowadził transmisję radiową przez kanał La Manche, a dwa lata później przekazano drogą radiową wiadomość z Anglii do Kanady.

Wielkim krokiem naprzód było wynalezienie lamp próżniowych – najpierw prostowniczej diody (1904), a następnie wzmacniającej triody (1906). Rozpoczęła się era radia. Radiowe stacje nadawcze wykorzystujące modulację amplitudy rozpoczęły nadawanie w latach 1919-1920. Regularne transmisje telewizyjne rozpoczęły emisję programów w Niemczech w roku 1935. W międzyczasie Karl Guthe Jansky w roku 1931 w USA odebrał jako pierwszy szum Drogi Mlecznej, co dało początek radioastronomii.

W okresie II wojny światowej rozwinęto technikę radarową. Wykorzystano nowe typy próżniowych lamp elektronowych: klistrony, magnetrony i lampy o fali bieżącej pracujące w pasmach mikrofalowych.

Sieć telefonii przewodowej rozwijała się nieprzerwanie. Jednakże poziom technologii lamp wzmacniających nie pozwalał na poprowadzenie transatlantyckiego kabla telefonicznego, gdyż wymagało to umieszczenia wzdłuż kabla wielu wzmacniaczy o długim czasie życia. Dopiero w roku 1956 położono pierwszy kabel transatlantycki TAT-1 ze wzmacniaczami lampowymi – patrz tabela 1.2.

W roku 1948 William Shockley wraz ze współpracownikami opatentował tranzystor złączowy. Rozwój technologii przyrządów półprzewodnikowych otworzył przed techniką radiokomunikacji nowe, nieoczekiwane perspektywy. Tranzystory okazały się uniwersalnymi przyrządami umożliwiającymi wzmacnianie i przetwarzanie sygnałów począwszy od prądu stałego do fal milimetrowych. Już w roku 1960 powstały pierwsze układy scalone. Na podłożu z materiału półprzewodnikowego powstawały układy zawierające najpierw setki, potem tysiące i miliony tranzystorów. Tak powstawały chipy, które pełniły funkcje procesorów i pamięci w systemach komputerowych. Liczba umieszczonych w chipie tranzystorów zgodnie z prawem Moore'a podwaja się co 2 lata, dochodząc w ostatnich latach do dziesiątek miliardów.

**Tabela 1.2.** Porównanie parametrów pierwszych transatlantyckich połączeń telefonicznych wykorzystujących kabel koncentryczny<sup>1</sup>

Nazwa	Lata pracy	Technologia	Pojemność kanałów	Linia między:
TAT-1	1956-1978	L. próżniowe	36-48	Nowa Funlandia – Szkocja
TAT-2	1959-1982	L. próżniowe	48-72	Nowa Funlandia – Francja
TAT-3	1963-1986	Tranzystory	138-276	New Jersey – Anglia
TAT-4	1965-1987	Tranzystory	138-345	New Jersey – Francja
TAT-5	1970-1993	Tranzystory	845-2112	Rhode Island – Hiszpania
TAT-6	1976-1994	Tranzystory	4000-10 000	Rhode Island – Francja
TAT-7	1978-1994	Tranzystory	4000-10 500	New Jersey – Anglia

Rozwijająca się technologia półprzewodników miała ogromny wpływ na rozwój telekomunikacji. Już w roku 1963 w kolejnym łączu transatlantyckim tranzystory zastąpiły lampy próżniowe, a liczba kanałów telefonicznych wzrosła do 138. Ostatnie transatlantyckie łącze z tej rodziny położono w roku 1978 i wykorzystywano je do roku 1994, w którym je wyłączone. Rozpoczęła się era transmisji światłowodowych. Opis tej techniki studiujący znajdzie w tomie *Podstawy telekomunikacji optofalowej*.

## 1.2. Widmo promieniowania elektromagnetycznego

Widmo fal radiowych przedstawione na rys. 1.1 mieści się w szerokich granicach częstotliwości, od 30 kHz do 300 GHz. Granice te można wyrazić w długości fal: od 10 km do 1 mm. Widmo podzielono na pasma o szerokości 1 dekady. Zakres pierwszy to fale długie LF, potem średnie MF i krótkie HF. W tych pasmach rozwijano w XX wieku publiczną radiofonie. Kolejne pasma to VHF, UHF, SHF i EHF. To ostatnie zwane jest pasmem fal milimetrycznych, gdyż odpowiada długościom fal od 10 mm do 1 mm. Kolejnym, nieprzedstawionym na wykresie, jest zakres długości fal od 1 mm do 0,1 mm, zwany zakresem fal submilimetrycznych. Zakres częstotliwości od 1 GHz do 110 GHz nazywany jest w niektórych opracowaniach pasmem mikrofalowym. Dzielony jest na mniejsze podzakresy, przedstawione w tabeli 1.3.

Rozwój technik radiokomunikacji odbywał się kilkutorowo. W pierwszym etapie rozwijano technikę elektronowych lamp próżniowych, zwiększając ich pasmo pracy, czułość,

<sup>1</sup> Identyczne tabele umieszczono w tomie *Podstawy telekomunikacji optofalowej* – patrz spis wszystkich przywoływanych lektur w bibliografii końcowej.

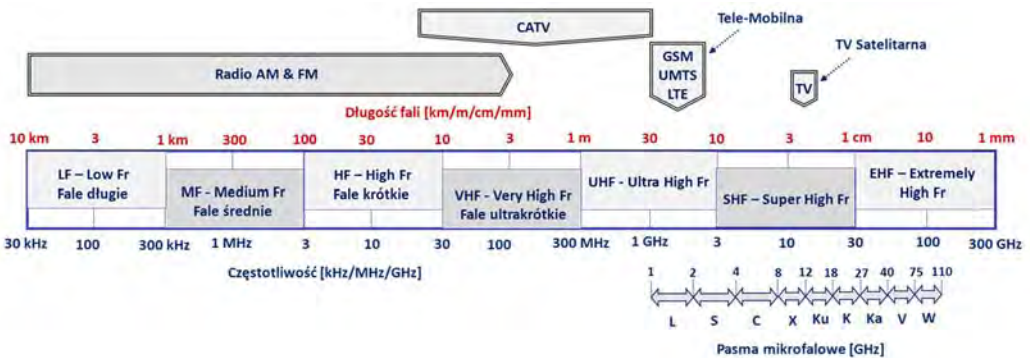
czas życia, osiągnęte moce. Pozwoliło to upowszechnić transmisje radiowe i telewizyjne oraz zwiększyć zasięg radiostacji. Po odkryciu tranzystorów rozwijano technologię przyrządów półprzewodnikowych z tymi samymi celami: zwiększanie poziomu mocy, obniżanie poziomu szumów, poszerzanie częstotliwościowych zakresów pracy.

**Tabela 1.3.** Podział pasma mikrofalowego 1 GHz-110 GHz na podpasma. Podział związany był z częstotliwościowymi zakresami pracy falowodów prostokątnych

Nazwa	L	S	C	X	Ku	K	Ka	V	W
Zakres [GHz]	1-2	2-4	4-8	8-12	12-18	18-26	26-40	40-75	75-110

Równoległe prowadzono prace nad opanowywaniem kolejnych pasm częstotliwości. Aby dany zakres częstotliwości mógł być uznany za „opanowany” w sensie technologicznym, produkowane przyrządy – w pierwszych okresach lampy elektronowe, w kolejnych okresach przyrządy półprzewodnikowe – musiały zapewniać realizację podstawowych funkcji:

- ✓ generację stabilnych i czystych widmowo sygnałów w tym paśmie,
- ✓ wzmacnianie sygnałów zarówno o małych (odbiorniki), jak i o dużych (nadajniki) poziomach mocy,
- ✓ procesy modulacji i przemiany częstotliwości.



**Rys. 1.1.** Podział zakresów częstotliwości oraz długości fal w pasmach pracy telekomunikacji mikrofalowej. Na rysunku zaznaczono podział na zakresy od LF (Low Frequency) do EHF (Extremely High Frequency). Pokazano także podział pasm mikrofalowych od pasma L do pasma W. Zaznaczono pasma wybranych zastosowań, począwszy od pasm radiowych AM&FM, pasma CATV telewizji kablowej, niektórych zakresów telekomunikacji mobilnej i telewizji satelitarnej.

Jak wspomniano wyżej, w pierwszych dekadach XX wieku intensywnie rozwijano publiczną radiofonję. Okres II wojny światowej i następne dekady charakteryzował intensywny rozwój techniki radarowej dla celów wojskowych. Pojawiały się kolejne generacje radarów, wykorzystujące coraz krótsze fale, od fal decymetrowych, poprzez fale centymetrowe do

milimetrowych. Umieszczenie na orbicie wokół Ziemi pierwszego sputnika rozpoczęło erę telekomunikacji satelitarnej. Dekady przełomu wieków to intensywny rozwój telefonii komórkowej.

Wszystkie pasma widma pokazane na rys. 1.1 są intensywnie wykorzystywane, co skłoniło specjalistów do przyjęcia szczegółowego częstotliwościowego podziału całego zakresu na podpasma przeznaczone na różne cele. Telekomunikacja zajmuje najwięcej podpasem; wyodrębnione podpasma przeznaczone są dla radarów, na cele wojskowe, przemysłowe, medyczne, a także specjalne podpasma dla wzywających pomocy sygnałem SOS.

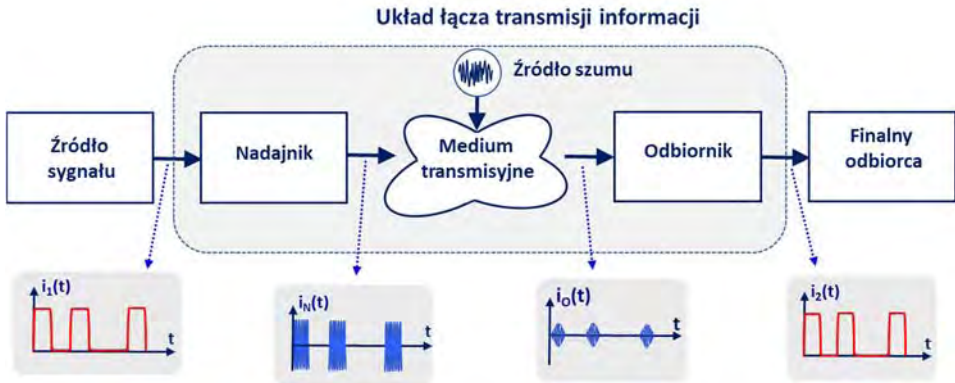
Znaczny wzrost liczby nadawców sygnałów w systemach telefonii komórkowej zwiększył poziom mocy fal elektromagnetycznych w przestrzeni, w której żyją mieszkańcy miast. Powstało pytanie, czy wzrastający poziom mocy sygnałów mikrofalowych może zagrozić zdrowiu człowieka. Jak wiadomo, energia niesiona przez falę elektromagnetyczną może oddziaływać z materią. O możliwości oddziaływania mówi energia fotonu  $E_f$  obliczana zgodnie ze znanym wzorem  $E_f = hf$ , gdzie  $h$  jest stałą Plancka, a  $f$  częstotliwością fali. Fotony fal radiowych mają niską energię. Dla przykładu dla częstotliwości  $f = 1000$  GHz energia fotonu wynosi  $4 \cdot 10^{-3}$  eV. Energia potrzebna do jonizacji cząsteczek tkanki biologicznej wynosi co najmniej 12 eV. Energia fal radiowych jest za mała, by wywołać jonizację atomów tkanek, ale energia ta może podgrzewać materiały dielektryczne i wodę, co wykorzystywane jest w dobrze znanych kuchenkach mikrofalowych, w których lampa generacyjna pracuje zwykle na częstotliwości 2,45 GHz. Biorąc pod uwagę możliwość podgrzewania tkanki biologicznej, eksperci wprowadzili ograniczenia mocy nadajników radiolinii i stacji bazowych pracujących w przestrzeni miast. Poziom mocy, z którym stykamy się w środowiskach miast, można uznać za bezpieczny.

### 1.3. Łącze transmisyjne

Podstawową funkcją systemów telekomunikacji jest transmisja informacji. Informacją może być głos, muzyka, obrazy rejestrowane, film kolorowy z dźwiękiem, teksty pisane, strumienie danych zarejestrowanych przez sensory, programy komputerowe itp. Wszystkie wymienione rodzaje informacji jesteśmy w stanie zapisać w postaci cyfrowej jako strumienie liczb, a z punktu widzenia elektroniki jako strumienie impulsów elektrycznych. Strumienie liczb mogą być przesyłane na niewielkie odległości – między sąsiednimi układami scalonymi bądź między blokami systemu komputerowego. Mogą to być również ogromne odległości – między Europą a Ameryką Północną. Dla każdej aplikacji znaleziono odpowiednie narzędzia i sposoby niemalże bezbłędnej transmisji.

Układ łącza transmisyjnego można przedstawić w ogólnym przypadku w postaci pokazanej na rys. 1.2. Obiektem transmisji jest strumień impulsów elektrycznych wysyłanych przez źródło sygnału i zapisanych tutaj w postaci prądu  $i_1(t)$ . Strumień impulsów przesyłany zostaje do łącza, którego pierwszym układem jest nadajnik. W nadajniku umieszczono

generator fali nośnej, na którą w procesie modulacji nałożona zostaje informacja. Przebieg zmodulowanego prądu  $i_M(t)$  fali nośnej pokazuje kolejny rysunek.



**Rys. 1.2.** Układ ideowy łącza telekomunikacyjnego do transmisji informacji zapisanych cyfrowo.

Długość fali / częstotliwość transmitowanego sygnału została tak dobrana, by spełnić warunki transmisji przez medium transmisyjne. Transmisja sygnału do odbiornika związana jest zwykle ze znacznym osłabieniem poziomu mocy transmitowanego sygnału. W trakcie transmisji impulsy zostają zdeformowane m.in. z powodu efektów dyspersji, o których będzie mowa w kolejnych rozdziałach.

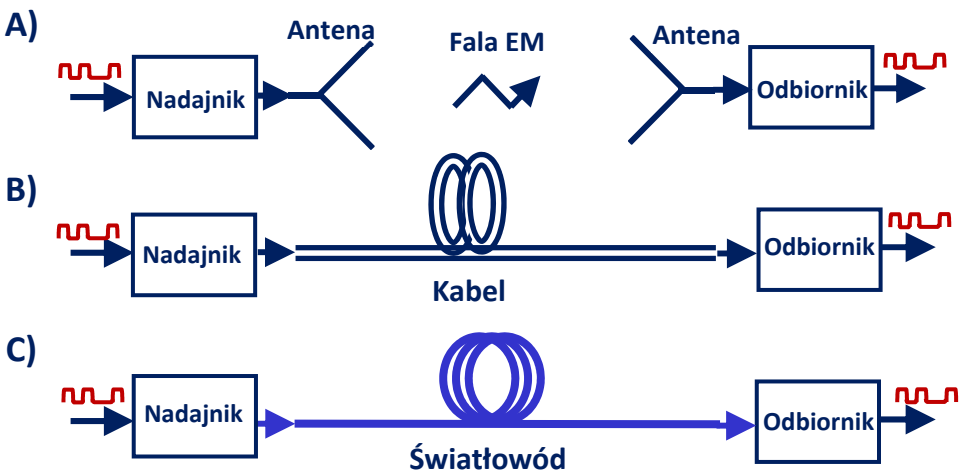
Znaczącym dla jakości transmisji efektem jest wzrost poziomu szumów odbieranych przez odbiornik. Na rys. 1.2 umieszczono źródło szumów, które w procesie transmisji przez medium transmisyjne dodają się i na ich tle widoczne są osłabione transmisją impulsy.

Wzmacniacze odbiornika podnoszą poziom mocy odbieranych impulsów, odpowiednie układy usuwają falę nośną, a filtry obniżają poziom szumów. W odbiorniku odtwarzane są kształty impulsów. W najprostszym przypadku transmisji sygnałów binarnych odpowiedni układ regeneracyjny podejmuje decyzję, czy w danym przedziale czasowym dotarł do odbiornika impuls, czy nie. Obecność szumów może powodować podjęcie błędnej decyzji i zniekształcenie przesyłanej informacji. Przy bezbłędnej transmisji sygnał  $i_2(t)$  przekazany finalnemu odbiorcy jest wiernym odwzorowaniem wejściowego  $i_1(t)$ .

Na rys. 1.3 pokazano trzy najważniejsze media transmisyjne stosowane we współczesnej telekomunikacji. Bardzo popularna i powszechnie stosowana bezprzewodowa telefonia komórkowa, często nazywana telekomunikacją mobilną, wykorzystuje transmisję w wolnej przestrzeni antena – antena. Tę technikę transmisji (rys. 1.3) stosują tradycyjne stacje radiowe i telewizyjne do przesyłania audycji. Także telekomunikacja satelitarna, z konieczności, wykorzystuje medium wolnej przestrzeni.

Na rys. 1.3B nadajnik połączony jest z odbiornikiem kablem współosiowym. Kabel współosiowy do niedawna dominował w sieciach telefonii przewodowej, także transoceanicznej. Teraz stosowany jest fragmentarycznie w sieciach telewizji CATV, w instalacjach przemysłowych i lokalnych przy ograniczonych szybkościach transmisji. W kolejnych rozdziałach tej książki opisane zostaną zarówno systemy transmisji bezprzewodowej, jak i przewodowej, z wykorzystaniem kabli współosiowych.

Na rys. 1.3C sygnał z nadajnika transmitowany jest światłowodem do odbiornika. Ten rodzaj linii transmisyjnej został w ostatnich 30 latach niezwykle rozwinięty. W krótkim czasie zbudowano gęstą sieć łączy światłowodowych na wszystkich kontynentach, a także wiele światłowodowych łączy transoceanicznych. Szybkość transmisji informacji łączami światłowodowymi bije wszelkie rekordy. Szybkość ta jest tak duża, że w złożonych systemach obliczeniowych celem jest wykorzystanie łączy światłowodowych do przesyłania danych między poszczególnymi blokami przy odległościach mierzonych w metrach. Technika transmisji informacji światłowodem opisana została w książce *Podstawy telekomunikacji optycznej*.



**Rys. 1.3.** Różne rodzaje medium do transmisji informacji od nadajnika do odbiornika. **A)** Transmisja w wolnej przestrzeni w układzie antena – antena. **B)** Transmisja z wykorzystaniem kabla współosiowego. **C)** Transmisja światłowodem.

## 1.4. Zastosowania technik radiokomunikacji

Od pierwszej transmisji radiowej Marconiego upłynęło 130 lat. W tym czasie rozwinięto techniki transmisji informacji w pasmach od 30 kHz do 300 GHz do bardzo wysokiego poziomu. Pierwsze stacje radiowe nadawały – stosując prostą modulację amplitudy – muzykę, wiadomości, prognozy pogody i programy rozrywkowe na falach długich, potem

średnich i krótkich. Wkrótce w podobny sposób transmitowano programy telewizyjne wzbogacone obrazem. Programy radiowe i telewizyjne tego rodzaju nadawane są nadal, ale zwykle w formacie cyfrowym, często z użyciem transmisji satelitarnej. Listę systemów transmisji rozwinęła telewizja kablowa, bardzo popularna w dzielnicach miast o dużym zagęszczeniu. Z biegiem czasu okazało się, że techniki transmisji informacji znalazły wiele zastosowań o ogromnym znaczeniu dla funkcjonowania współczesnych społeczeństw. Wymienimy te najważniejsze.

Internet jest bezsprzecznie najważniejszym obszarem zastosowania technik telekomunikacji. Jest to globalny system połączonych sieci komputerowych publicznych, prywatnych, uniwersyteckich, rządowych. Do transmisji sygnałów w skali globalnej wykorzystuje się zarówno łącza światłowodowe pracujące w pasmach optycznych, jak i sieci bezprzewodowe telekomunikacji mobilnej z transmisją do stacji bazowych w zakresie częstotliwości mikrofalowych. Internet umożliwia miliardom użytkowników dostęp do ogromnych zasobów informacji, wzajemną wymianę i udostępnianie zasobów. Obecność Internetu zmienia warunki życia społeczeństw, sposoby pracy, edukacji i rozrywki. Już teraz powstają opinie, że weszliśmy w okres transformacji naszej cywilizacji.

Rozwinięto techniki telefonii komórkowej, bezprzewodowej, uruchamiając kolejne generacje od G1 do G5. Jej działanie oparte jest na radiowych połączeniach użytkownika z najbliższą stacją bazową, która z kolei ma połączenia z całą światową siecią telekomunikacyjną. Współcześnie telefon komórkowy stał się złożonym terminalem komputerowym realizującym coraz więcej funkcji. Liczba użytkowników przekroczyła 3 miliardy.

Techniki transmisji bezprzewodowej są powszechnie stosowane w teledystrybucji. Wielka i rosnąca liczba systemów do monitorowania temperatury, ciśnienia, wilgotności, systemy ochrony przeciwpożarowej, śledzenia natężenia ruchu na drogach itp., posługuje się internetem rzeczy (ang. *Internet of Things*, IoT), a także transmisjami bezprzewodowymi w przeznaczonych do tego celu pasmach częstotliwości.

Rozwinięto bezprzewodowe systemy zdalnego sterowania. W najprostszych wydaniu jest to pilot do sterowania programami telewizyjnymi czy też do otwierania bramy. Bardzo złożone systemy sterują robotami, a także w zastosowaniach militarnych raketami i pociskami.

Zbudowano satelitarne systemy radionawigacji (GPS, GLONASS, GALILEO), które pomagają określić dokładną lokalizację odbiornika na powierzchni Ziemi przez dokładny pomiar jego odległości od kilku satelitów. Z systemów tych korzystają statki na morzu, samoloty, samochody ciężarowe i osobowe na drogach. Zasady działania systemów radionawigacji opisane zostaną w jednym z ostatnich rozdziałów.

Wielką rolę w historii II wojny światowej odegrał radar. Od tamtej pory bardzo rozwinięto technikę radarową określania pozycji i prędkości obiektu przez badanie sygnału mikrofalowego odbitego od niego. Badane są w ten sposób położenia i ruch statków, samolotów i pocisków raketowych. Technika radarowa jest stosowana przez wojsko, ale korzystają z niej także służby komunikacji morskiej i lotniczej. Odmianą radaru jest sonar



wykorzystujący wodę jako medium transmisyjne. Odbicie sygnału ultradźwiękowego od obiektu podwodnego pozwala określić jego położenie i prędkość.

Bardzo ważnym obszarem zastosowań radiokomunikacji jest radioastronomia. Użycie anten o dużej kierunkowości oraz bardzo czułych odbiorników pozwoliło astronomom badać tajemnice wszechświata przez analizę dopływających do Ziemi sygnałów w różnych pasmach częstotliwości. Narzędzia radioastronomii stały się ważnym uzupełnieniem badań prowadzonych przez teleskopy w pasmach optycznych.

## 1.5. Podsumowanie

Bardzo rozbudowaną i złożoną strukturę systemów telekomunikacyjnych można podzielić na dwa obszary, istotnie różniące się między sobą.

- ✓ **Telekomunikacja mikrofalowa** wykorzystuje szeroki, wielodekadowy zakres częstotliwości od 30 kHz do 300 GHz, z tendencją poszerzania w stronę fal submilimetrycznych. Cechą charakterystyczną opracowanych w tym obszarze częstotliwości technik jest wykorzystanie tranzystora, jako uniwersalnego elementu aktywnego w procesach generacji, wzmacniania i przemiany częstotliwości. Większość systemów pracuje z transmisją fali elektromagnetycznej w wolnej przestrzeni. W przewodnicach falowych w dolnych pasmach częstotliwości stosuje się linię wspólną, a w pasmach fal milimetrycznych falowody. Ponadto w wykorzystywanym paśmie:
  - rozmiary mikrofalowych elementów i obwodów są porównywalne do długości fali,
  - czas propagacji jest porównywalny lub wielokrotnie dłuższy od okresu drgań,
  - występuje efekt naskórkowości.
- ✓ **Telekomunikacja optofalowa** wykorzystuje optyczne pasma bliskiej podczerwieni dla transmisji światłowodowej oraz pasmo światła widzialnego dla transmisji w wolnej przestrzeni. Podstawowym przyrządem tej techniki jest laser półprzewodnikowy jako źródło fali nośnej, a przewodnicą falową światłowod. Opanowanie technik światłowodowych wymagało rozwoju technik generacji, modulacji, wzmacniania i detekcji promieniowania optycznego. Pasma transmisji światłowodem jest stosunkowo wąskie, obejmujące długości fali 1,2-1,6  $\mu\text{m}$ , ale jego użyteczność jest ogromna. W sieciach telekomunikacyjnych łączy światłowodowe, ze względu na ogromne prędkości transmisji informacji, są bezkonkurencyjne.

Opisany wyżej podział wzięto pod uwagę przy określaniu zakresu materiału w książkach *Podstawy telekomunikacji mikrofalowej* i *Podstawy telekomunikacji optofalowej*.