

WYKŁAD 5

Fale elektromagnetyczne. Skala fal elektromagnetycznych. Radiowa transmisja danych. Modulacja AM i FM. Zasada działania bezprzewodowych sieci komputerowych opartych na komunikacji radiowej. Przykłady zastosowań fal radiowych.

Fale elektromagnetyczne – wstęp

Poruszając rytmicznie końcem patyka po wodzie wzbudzamy na jej powierzchni fale mechaniczne



Podobnie, poruszając tam i z powrotem naelektryzowanym prętem, wytwarzamy w pustej przestrzeni **fale elektromagnetyczne**

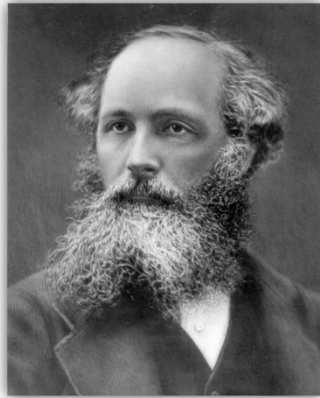
Poruszający się ładunek oznacza prąd elektryczny → W otoczeniu prądu elektrycznego pojawia się pole magnetyczne

Gdy prąd elektryczny jest zmienny, pole magnetyczne jest również zmienne

Zmienne pole magnetyczne indukuje zmienne pole elektryczne i odwrotnie – zmienne pole elektryczne indukuje zmienne pole magnetyczne

Jeśli jedno pole wykonuje drgania, to drga również drugie pole.

Te drgające pola wzajemnie się odtwarzają i przyczyniają do powstania **fali elektromagnetycznej**, która rozchodzi się od drgającego ładunku.



Fale elektromagnetyczne – wstęp, c.d.

James Clerk Maxwell (1831 – 1879), fizyk, twórca elektromagnetycznej teorii światła, która jest ilustracją matematyczną i objaśnieniem zjawisk elektromagnetycznych, nad którymi pracowali Faraday, Ampere, Oersted i inni.

Równania Maxwella

	Postać różniczkowa	Postać całkowa	Opis
1	$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\varepsilon_0}$ gdzie Q – całkowity ładunek zawarty wewnątrz powierzchni S	Prawo Gaussa dla pola elektrycznego (Ładunki są źródłem pola elektrycznego)
2	$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ gdzie Φ_B – strumień pola magnetycznego przez dowolny kontur rozpięty na krzywej L	Prawo Faraday’a (Zmienne w czasie pole magnetyczne wytwarza pole elektryczne)
3	$\operatorname{div} \vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	Prawo Gaussa dla pola magnetycznego (Pole magnetyczne jest bezźródłowe)
4	$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ gdzie j – gęstość prądu elektrycznego	$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$ gdzie Φ_E – strumień elektryczny przez dowolny kontur rozpięty na krzywej L, a I – całkowity prąd elektryczny przecinający ten kontur	Prawo Ampere’a (Przepływający prąd oraz zmienne pole elektryczne wytwarzają pole magnetyczne)

Równanie fali elektromagnetycznej

- Równanie fali elektromagnetycznej można wyprowadzić na bazie równań Maxwella
- Rozważając przypadek fali elektromagnetycznej w próżni zakładamy, że: $j = 0$ oraz $\rho = 0$, wówczas równania Maxwella mają postać:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \vec{E} = 0 & (1) \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0 & (2) \end{cases} \quad \begin{cases} \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & (3) \\ \operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} & (4) \end{cases}$$

Poddając równanie (3) obustronnie rotacji i wykorzystując równanie (4) dostajemy:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} (\operatorname{rot} \vec{B}) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (5)$$

Korzystając z tożsamości wektorowej: $\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = (\nabla \cdot \vec{E}) \nabla - \nabla^2 \vec{E}$ i łącząc ją z równaniem (5) otrzymujemy równanie (6):

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (6)$$

Podobnie dla pola magnetycznego:

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (7)$$

Równania (6) i (7) stanowią **równania fali elektromagnetycznej**.

Propagacja fali elektromagnetycznej

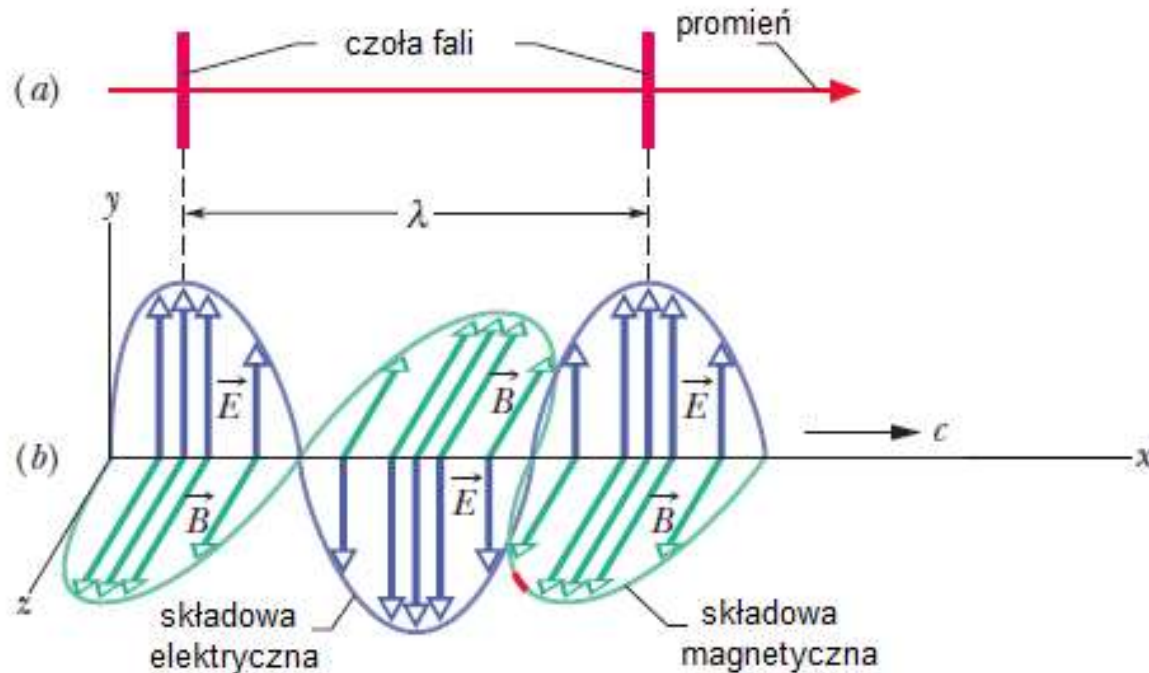
Falą elektromagnetyczną nazywamy zaburzenie pola elektrycznego i magnetycznego, które rozchodzi się w próżni lub ośrodku materialnym z prędkością światła, tj. $c \cong 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$.

$$\begin{cases} E = E_m \sin(kx - \omega t) \\ B = B_m \sin(kx - \omega t) \end{cases}$$

$$c = \frac{E_m}{B_m}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k}$$

$$\omega = 2\pi f$$

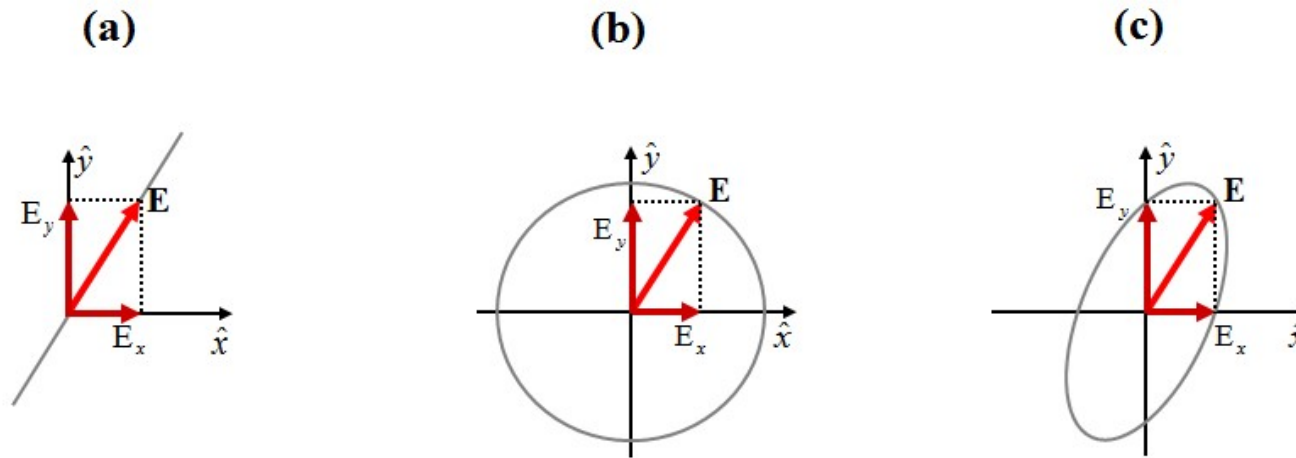


c – prędkość światła [m/s]
 E_m – amplituda pola elektrycznego
 B_m – amplituda pola magnetycznego
 λ – długość fali [m]
 k – wektor falowy (liczba falowa) [rad/m]
 ω – częstość kołowa [rad/s]
 f – częstoćliwość [Hz]

Rys. Reprezentacja graficzna fali elektromagnetycznej rozchodzącej się z prędkością c wzdłuż osi x : (a) fala e-m jako promień świetlny, (b) ta sama fala przedstawiona jako **złożenie wektorów: pola elektrycznego $\vec{E}$ i magnetycznego $\vec{B}$** .

Polaryzacja fali elektromagnetycznej

- ❑ Fale elektromagnetyczne wysyłane przez zwykłe źródła światła takie jak Słońce czy żarówka są **niespolaryzowane**.
- ❑ Ponieważ za wszystkie zjawiska optyczne odpowiedzialny jest wektor natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$, przyjęto opisywać fale elektromagnetyczne wektorem natężenia pola elektrycznego i nazwano go **wektorem świetlnym**.
- ❑ Kiedy mówimy, że światło jest niespolaryzowane oznacza to, że wektor $\vec{E}$ jest zawsze prostopadły do kierunku rozchodzenia się fal, ale może on drgać we wszystkich możliwych płaszczyznach, w których leży kierunek jego rozchodzenia się.
- ❑ Światło może być **spolaryzowane liniowo, kołowo lub eliptycznie**.
- ❑ **Polaryzacja liniowa** ma miejsce, gdy drgania wektora natężenia pola elektrycznego zachodzą tylko w jednej płaszczyźnie, która nie zmienia w czasie swej orientacji w przestrzeni (por rys. a).
- ❑ Jeśli koniec wektora natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ porusza się po linii kołowej lub eliptycznej mówimy o świetle **spolaryzowanym kołowo lub eliptycznie** (por rys. b i c).



Rys. Fala spolaryzowana liniowo (a), kołowo (b) i eliptycznie (c).

Przenoszenie energii przez falę elektromagnetyczną

Każdy plażowicz zażywający kąpeli słonecznej wie o tym, że fala elektromagnetyczna może przenosić energię (w tym przypadku w postaci ciepła) i dostarczać ją każdemu ciału, na które pada.

Szybkość przepływu energii takiej fali przez jednostkową powierzchnię opisana jest przez tzw. wektor Poyntinga, $\vec{S}$, który jest zdefiniowany jako:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

Długość wektora $\vec{S}$ (tj. jego wartość) wiąże się z szybkością, z jaką energia fali przepływa przez jednostkową powierzchnię w danej chwili:

$$S = \left(\frac{\text{energia/czas}}{\text{pole powierzchni}} \right)_{chw} = \left(\frac{\text{moc}}{\text{pole powierzchni}} \right)_{chw}, \rightarrow \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right).$$

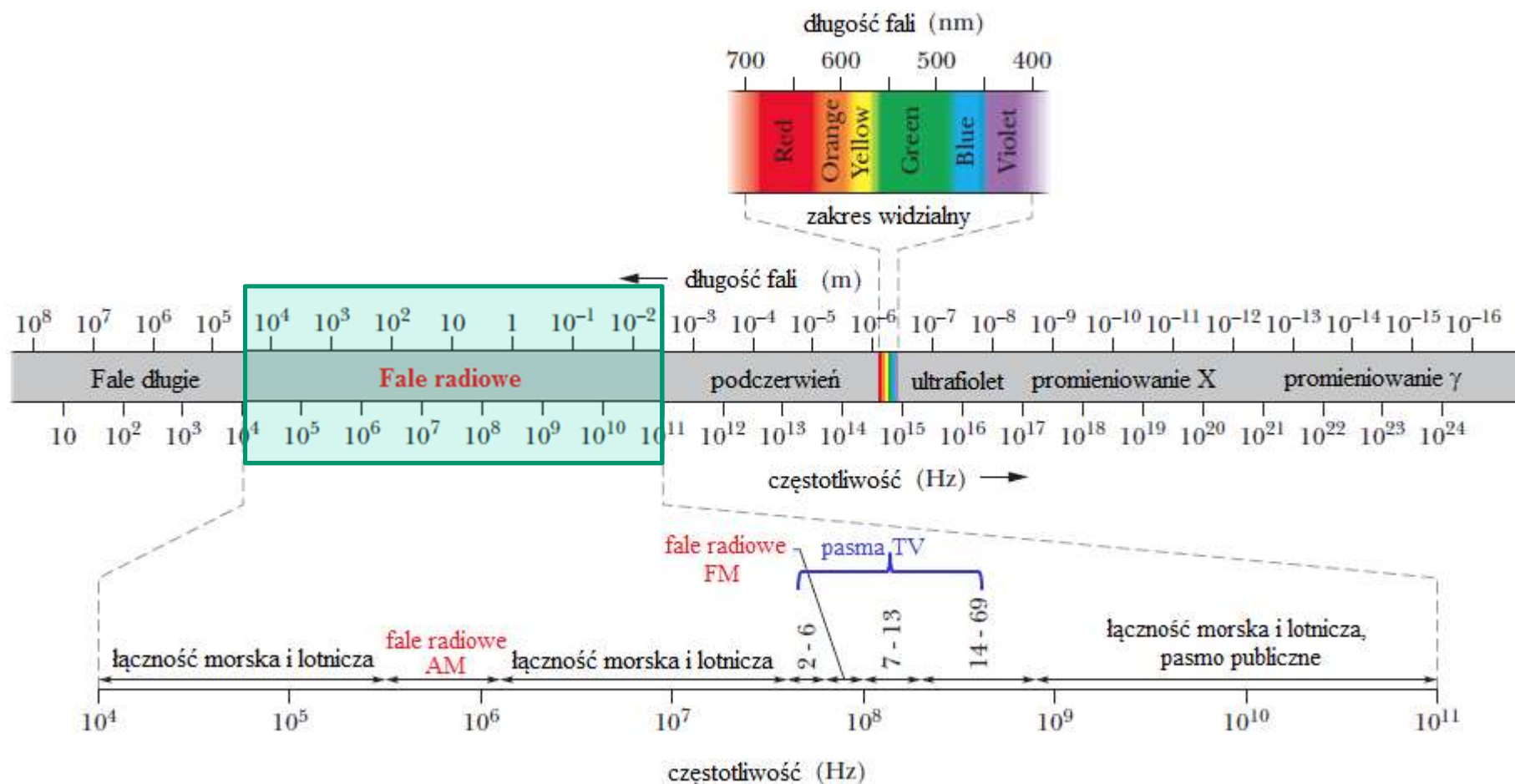
Większość przyrządów służących do detekcji fal elektromagnetycznych wykorzystuje składową elektryczną fali ($\vec{E}$), dlatego korzystając z tego, że $\vec{B} \perp \vec{E}$ oraz $B = E/c$, możemy zapisać, że :

$$S = \frac{1}{c\mu_0} E^2$$



$S \sim E^2$ ten związek pokazuje, że energia (informacja) niesiona przez falę e-m może być zarejestrowana przez detektory fal elektromagnetycznych

Widmo promieniowania elektromagnetycznego

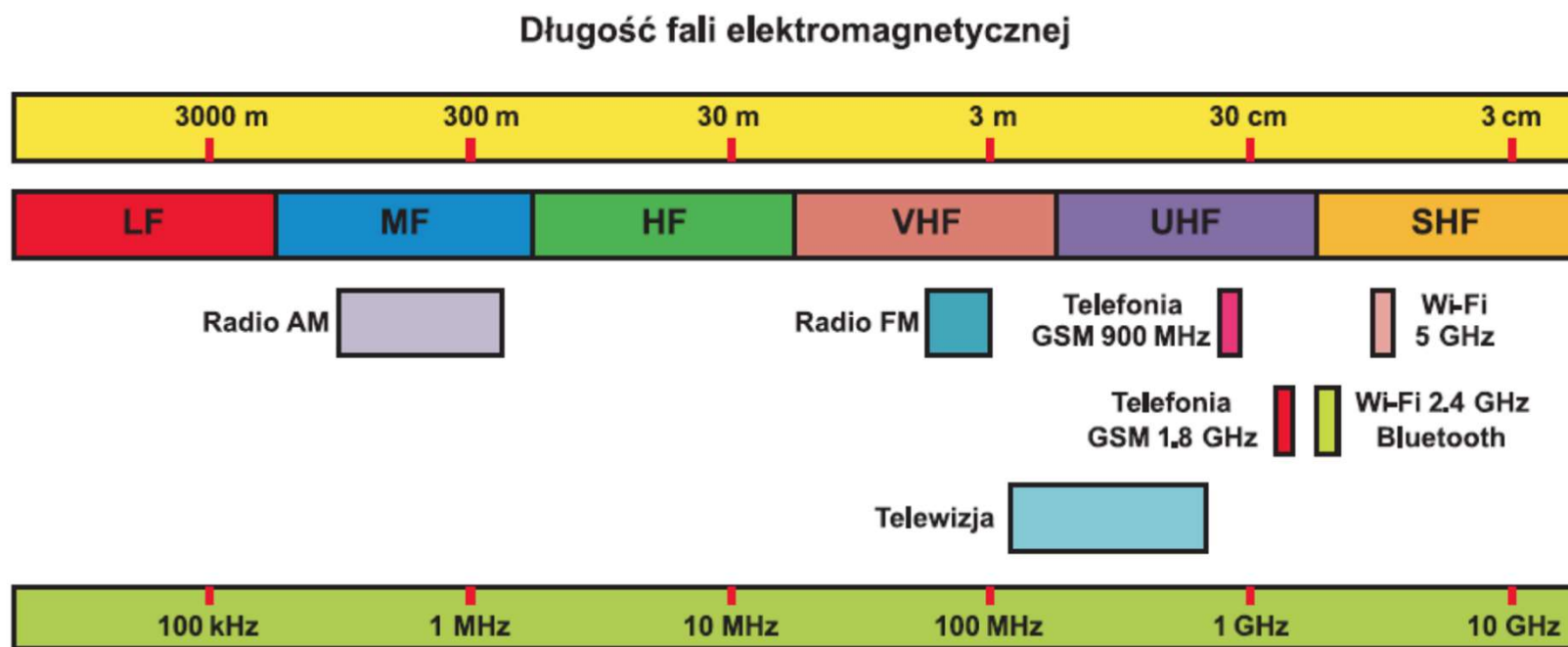


2-6, 7-13, 14-69 - częstotliwości kanałów TV

W sieciach bezprzewodowych (np. **Wi-Fi** i **Bluetooth**) wykorzystuje się **fale radiowe** a w sieciach **IrDA** – fale w kanale **podczerwieni**.

Wykorzystanie fal radiowych – bezprzewodowa transmisja danych

Wykorzystanie fal radiowych: radio, telewizja (w tym — satelitarna), telefony komórkowe, Wi-Fi, Bluetooth, GPS, pagers, telefony bezprzewodowe, zdalne sterowanie, piloty do bram, telewizorów itp., bezprzewodowe akcesoria do komputerów



Rys. Rozkład widmowy fal radiowych: LF – ang. *Low Frequency*, MF – ang. *Medium Frequency*, HF – ang. *High Frequency*, VHF – ang. *Very High Frequency*, UHF – ang. *Ultra High Frequency*, SHF – ang. *Super High Frequency*.

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

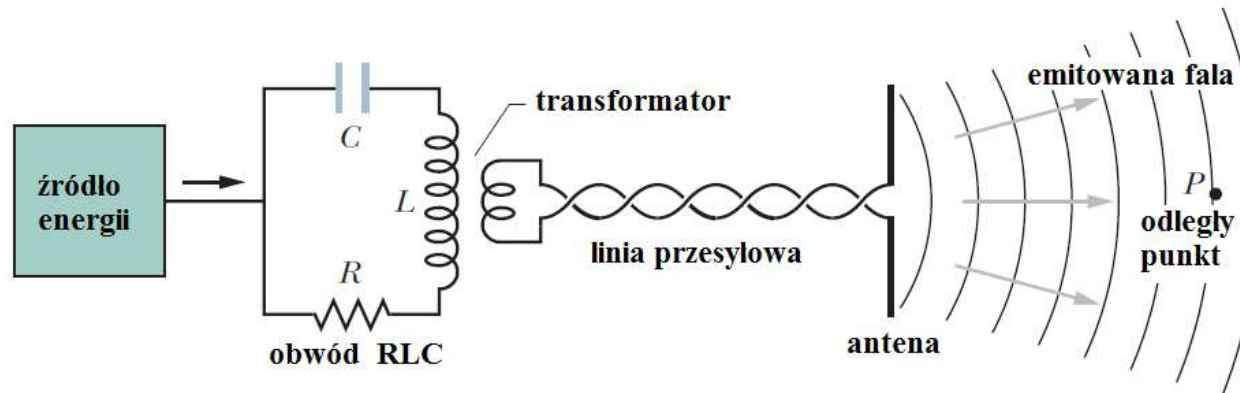
λ – długość fali [m]

v – prędkość fali w danym ośrodku [m/s]

f – częstotliwość fali [Hz]

Wytwarzanie fal radiowych

- Podany na rys. układ służy do wytwarzania fal elektromagnetycznych o długości fali $\sim 1\text{m}$ (krótka fala radiowa)
- Sercem układu jest obwód RLC drgający z częstością kołową $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
- Źródłem zasilania układu RLC jest generator napięcia zmiennego
- Obwód RLC jest sprzężony przez transformator i linię przesyłową z anteną, której zasadniczym elementem są dwa cienkie pręty przewodzące
- **Poprzez to sprzężenie sinusoidalnie zmieniający się prąd w obwodzie wywołuje sinusoidalne oscylacje ładunku w prętach anteny**
- **Antena staje się dipolem elektrycznym, którego moment dipolowy zmienia się sinusoidalnie co do wartości i kierunku wzdłuż anteny**
- Zmienia się również kierunek i wartość natężenia pola elektrycznego wytwarzanego przez dipol
- Jednocześnie zmiennie są kierunek i wartość pola magnetycznego wytwarzanego przez prąd zmienny
- Zmienne pole magnetyczne i elektryczne tworzą falę elektromagnetyczną – w tym przypadku radiową – która rozchodzi się na zewnątrz od anteny z prędkością światła.



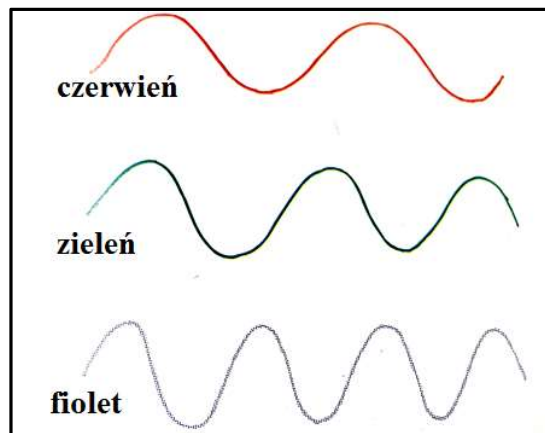
Rys. Układ do wytwarzania fali elektromagnetycznej z zakresu krótkich fal radiowych: obwód RLC wytwarza sinusoidalnie zmienny prąd w antenie, która wysyła falę. Punkt P jest odległym punktem, w którym detektor rejestruje falę radiową.

Fale radiowe - ciekawostki

- Zapamiętaj, że zarówno fale radiowe, jak i fale świetlne, są falami elektromagnetycznymi
- Częstotliwość fal radiowych jest mniejsza od częstotliwości fal świetlnych, por. z poniższym wzorem:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

λ dla fal świetlnych: $\sim 4 \times 10^{-7} - \sim 7 \times 10^{-7} \text{ m}$
 λ dla fal radiowych: $\sim 10^{-2} - \sim 10^4 \text{ m}$



Rys. Porównanie długości fali światła czerwonego, zielonego i fioletowego. **Światło fioletowe ma prawie dwa razy większą częstotliwość niż światło czerwone i prawie dwa razy mniejszą długość fali.**

- Fala radiowa **nie jest falą dźwiękową** (!) Fale dźwiękowe są falami mechanicznymi a nie elektromagnetycznymi

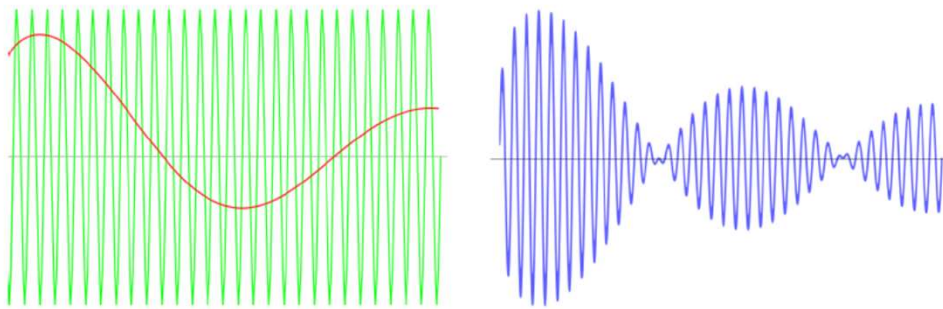
Radiowa transmisja danych – modulacja AM i FM

?

Jak przesłać głos/dźwięk dzięki falom radiowym?

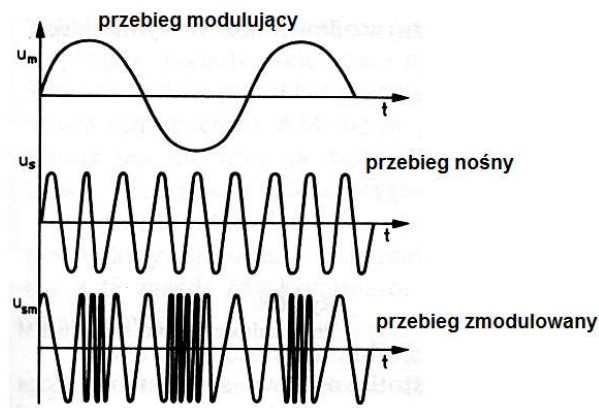
Sygnal (np. dźwięk), fala nośna (fala radiowa), fala nośna po modulacji

➤ Modulacja AM – modulacja amplitudy

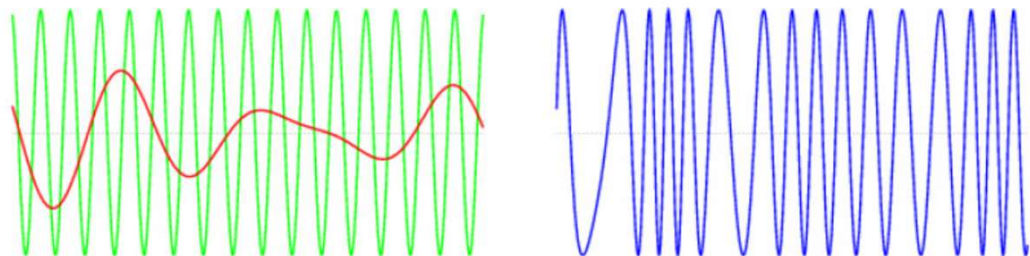


➔ polega na kodowaniu sygnału informacyjnego w fali nośnej **poprzez zmiany jej chwilowej amplitudy w zależności od amplitudy sygnału wejściowego**. Częstotliwość fali nośnej **pozostaje niezmienną**. Uzyskana zmodulowana fala nośna nadaje się np. do transmisji drogą radiową.

➤ Modulacja FM – modulacja częstotliwości



➔ polega na kodowaniu sygnału informacyjnego w fali nośnej przez zmiany **jej chwilowej częstotliwości w zależności od amplitudy sygnału wejściowego (modulującego)**.



Modulacja AM i FM - zastosowania

1. Radio AM i FM
2. Instrumenty muzyczne - theremin

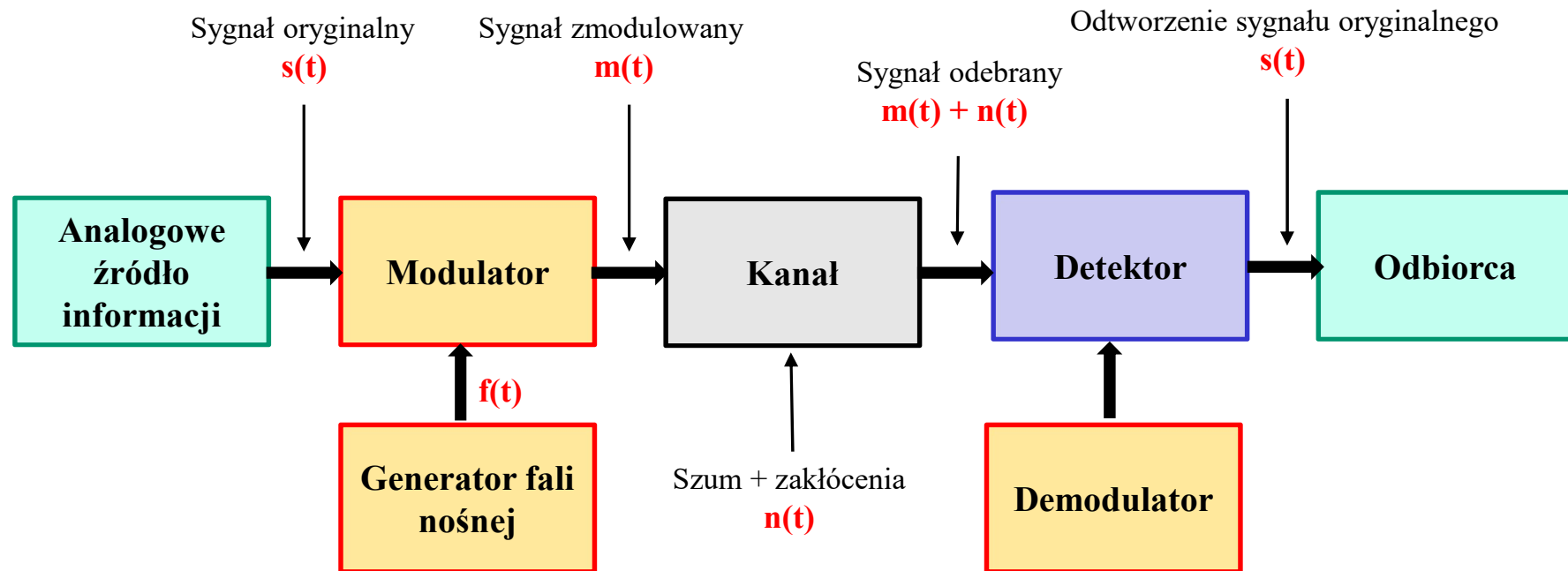


<https://www.youtube.com/watch?v=hCpZ4Oa3WzU>

Instrument składa się z dwóch metalowych anten emitujących fale radiowe na różnych częstotliwościach. Muzyk położeniem swych rąk zakłóca pole elektromagnetyczne fal radiowych: ruchem jednej dłoni kontroluje zmiany w częstotliwości fali radiowej emitowanej przez jedną z anten, a ruchem drugiej dłoni reguluje amplitudę, czyli głośność fali radiowej wysyłanej przez drugą antenę. Sygnały elektryczne z theremina są wzmacniane i przesyłane do głośnika



Jak przesłać dźwięk / głos **analogowo**?

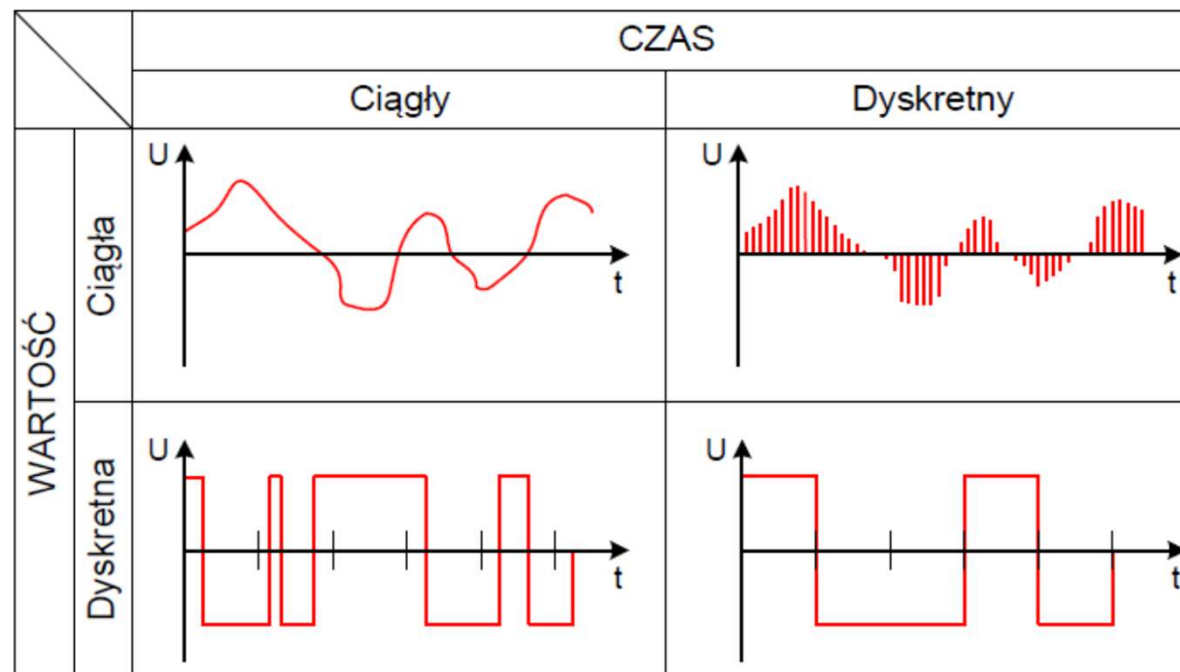


Rys. Analogowy system telekomunikacyjny.

Sygnal analogowy a sygnał cyfrowy

Sygnal analogowy – sygnał z czasem ciągłym oraz ciągłą skalą wartości

Sygnal cyfrowy – sygnał z czasem dyskretnym oraz dyskretną skalą wartości

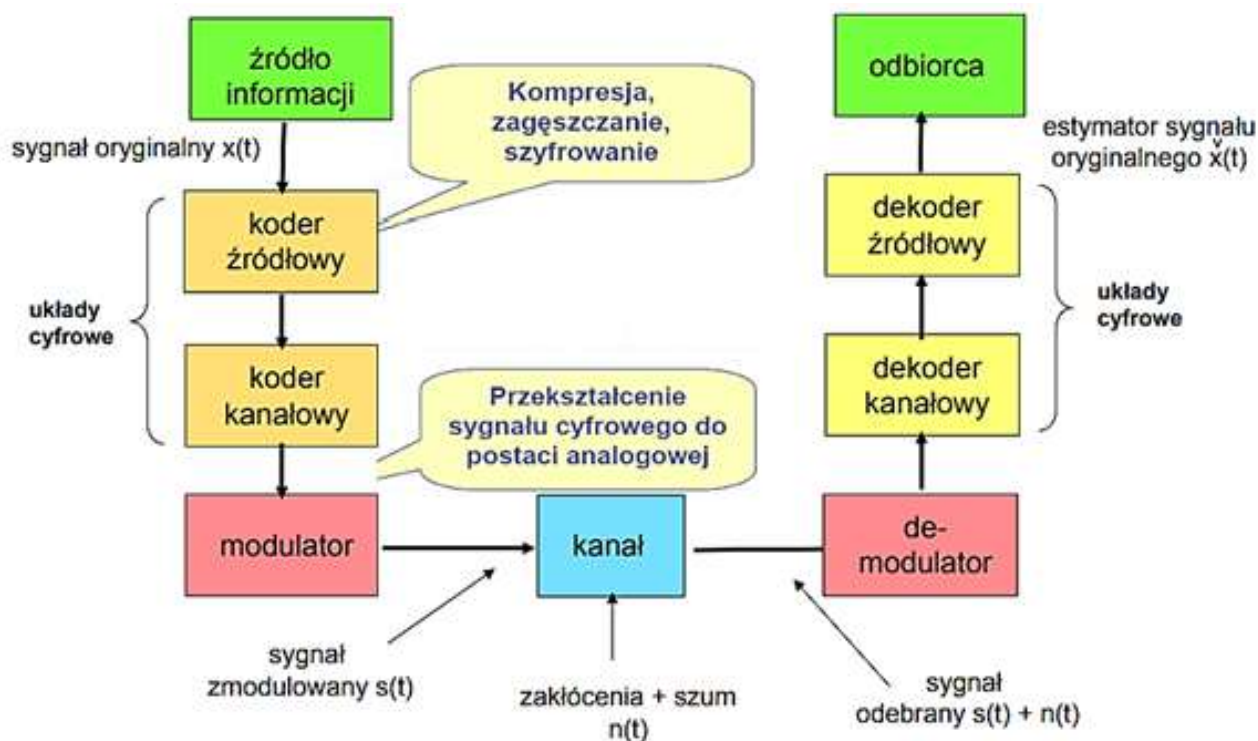
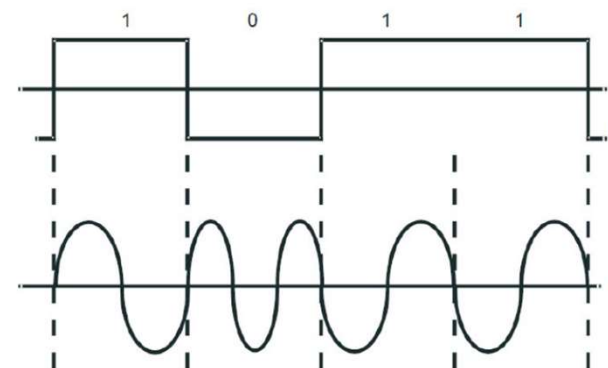


Rys. Podział sygnałów. W **sygnałach analogowych** wielkość niosąca informację zmienia swoją wartość w sposób ciągły i w dozwolonym przedziale czasowym liczba jej wartości jest nieograniczona. W **sygnałach cyfrowych** wielkość niosąca informację może przyjmować ściśle określoną i skończoną liczbę wartości.



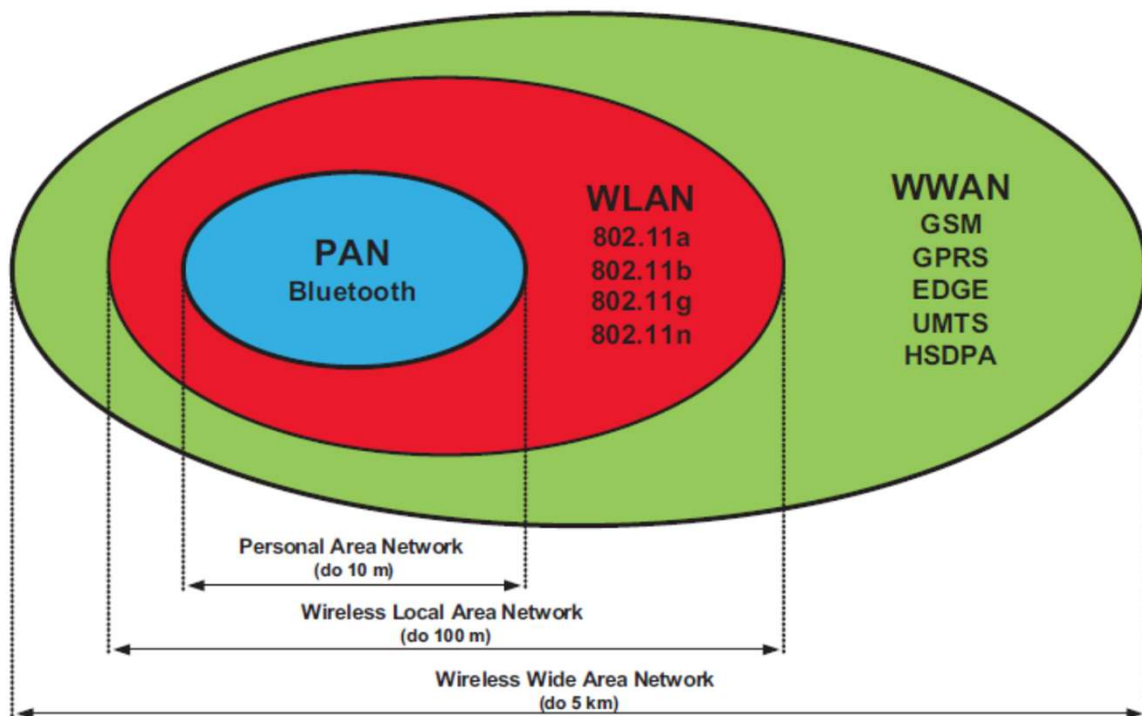
Jak przesłać dźwięk / głos **cyfrowo**?

1. Zamiana sygnału analogowego (np. zmienne napięcie) na liczby w systemie dwójkowym.
2. Przesłanie za pomocą fal radiowych liczb dwójkowych — ciągów zer i jedynek.
3. Jedną z metod: zmiana częstotliwości fali.



Rys. Cyfrowy system telekomunikacyjny.

Sieci bezprzewodowe



Rys. Podział zasięgu sieci bezprzewodowych.

1. **Sieci PAN** (ang. *Personal Area Network*) – działają na odległości do 10 metrów. Jako przykład tej sieci można podać standard **Bluetooth**.
2. **Sieci WLAN** (ang. *Wireless Local Area Network*) – działają w zakresie do 100 metrów w otwartej przestrzeni. Przykłady tych sieci to standardy **IEEE 802.11a/b/g/n/ac**.
3. **Sieci WWAN** (ang. *Wireless Wide Area Network*) – działają na odległości nawet do 5 kilometrów. To przede wszystkim systemy sieci telefonii komórkowej (GSM, GPRS, EDGE, UMTS).

Nazwa standardu	Częstotliwość radiowa	Zasięg sygnału	Maksymalna szybkość transmisji
802.11 b	2.4 GHz	30 m	11 Mb/s
802.11 a	5 GHz	30 m	54 Mb/s
802.11 g	2.4 GHz	30 m	54 Mb/s
802.11 n	2.4 GHz / 5 GHz	50 m	600 Mb/s
802.11 ac	5 GHz	różne dane	1 Gb/s
802.15.1 Bluetooth	2.4 GHz	10 m	2 Mb/s



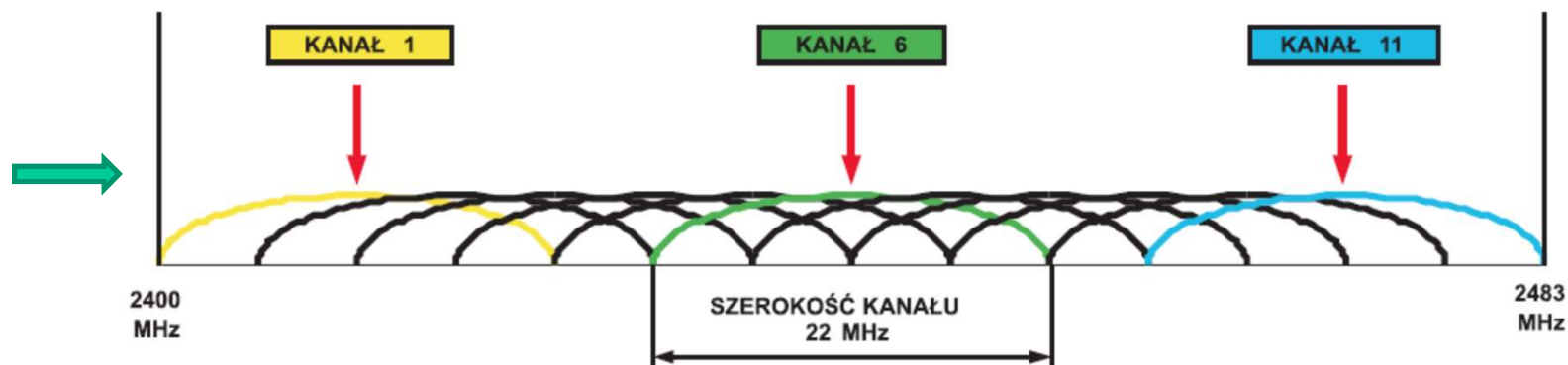
Technologia WiFi

Rys. Przykłady urządzeń wykorzystujących technologię Wi-Fi.

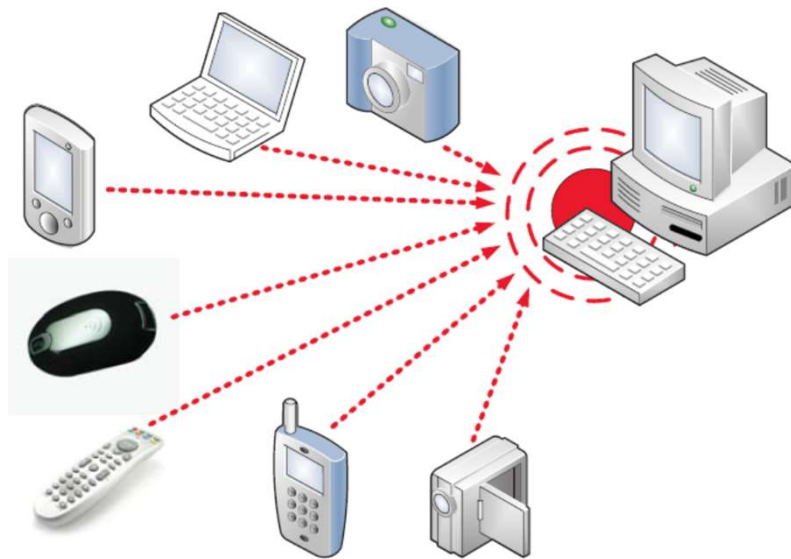
Technologia Wi-Fi polega na bezprzewodowej łączności w dwóch zakresach częstotliwości radiowych: 2.4 GHz oraz 5 GHz.

Dokładna częstotliwość stosowana w określonej sieci bezprzewodowej zależy od wykorzystywanego kanału transmisyjnego. Na przykład w USA używa się 11 kanałów, w Polsce 13, w Japonii 14 a we Francji tylko 4. Aby zachować światowy standard, na całym świecie używa się tej samej numeracji kanałów czyli kanał nr 6 w Warszawie odpowiada tej samej częstotliwości co w Tokio czy Los Angeles. W przypadku wyjazdu za granicę może być konieczne przestawienie karty sieciowej na inny kanał, aczkolwiek zazwyczaj robią one to automatycznie.

Rys. Kanały transmisyjne (Kanały 1, 6 i 11 nie nakładają się i zapewniają największą niezawodność.).



Technologia IrDa



Rys. Przykłady urządzeń wykorzystujących technologię IrDa.

W **technologii IrDA** (ang. *Infrared Data Association*) jest wykorzystywana silnie skupiona wiązka światła w pasmie podczerwieni (**850 - 920 nm**). Koniecznym warunkiem zastosowania tej technologii jest bezpośrednia widoczność nadajnika i odbiornika. Podstawowe zalety technologii IrDA to:

1. Prosta i tania implementacja;
2. Mały pobór mocy;
3. Długość fali świetlnej.

Wada: mały zasięg (< 10 metrów).

W standardzie IrDa wyróżnia się trzy zakresy:

- SIR (ang. Serial Infrared) 2.4 ÷ 115.2 kb/s,
- MIR (ang. Medium Infrared) 576 i 1152 kb/s,
- FIR (ang. Fast Infrared) 4 Mb/s.