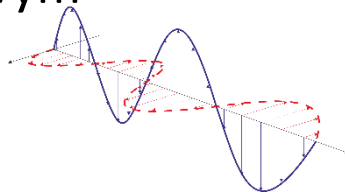


Właściwości fali elektromagnetycznej

dr inż. Stefan Jankowski
s.jankowski@am.szczecin.pl

Promieniowanie elektromagnetyczne

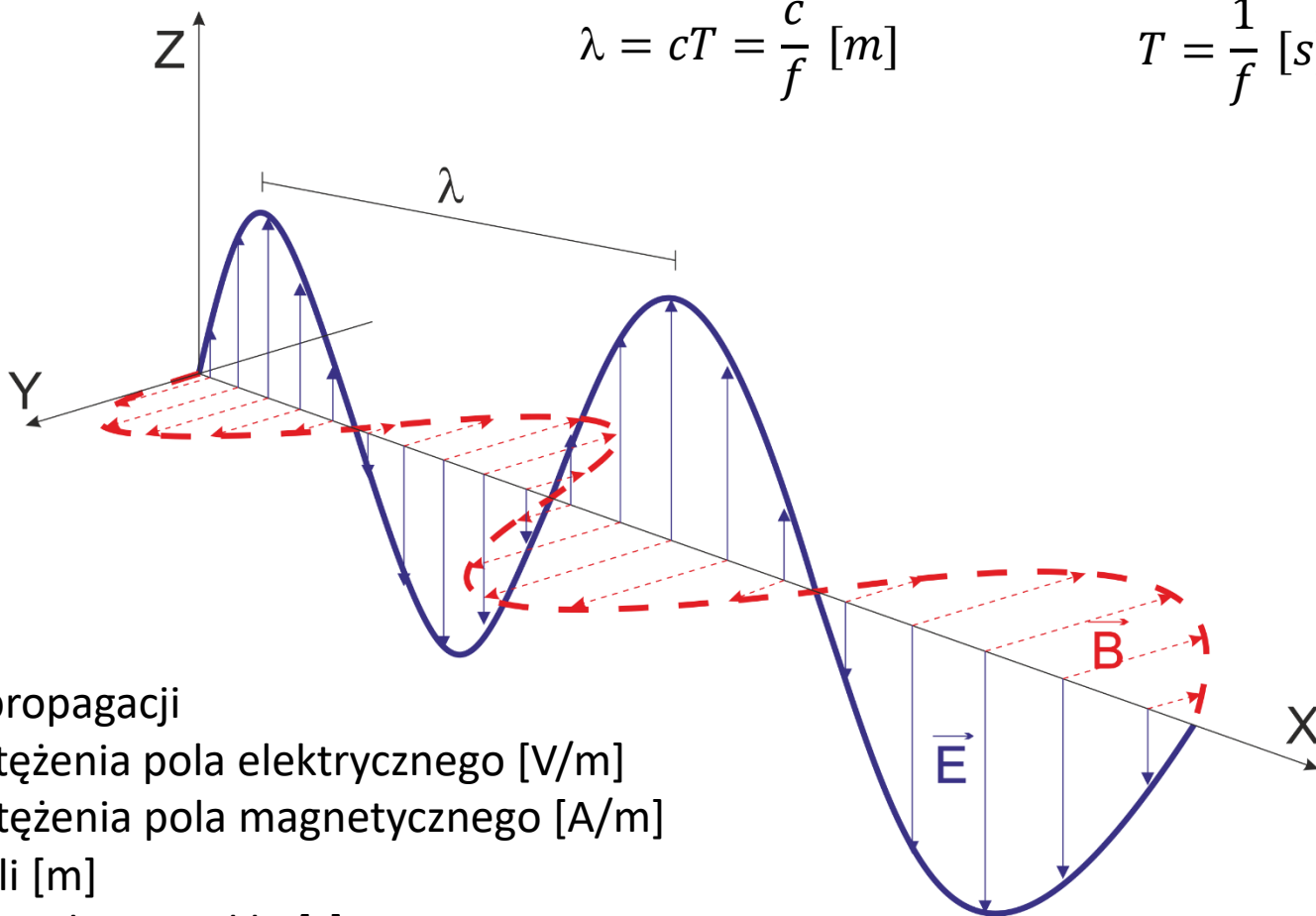
- przepływ energii z prędkością światła w próżni lub w innym ośrodku materialnym w postaci pól elektrycznego i magnetycznego, które tworzą fale elektromagnetyczne, takie jak fale radiowe, światło widzialne i promieniowanie gamma etc.
- W takiej fali zmieniające się w czasie pola elektryczne i magnetyczne są wzajemnie ze sobą powiązane i prostopadłe do siebie oraz do kierunku propagacji
- Fala elektromagnetyczna charakteryzuje się gęstością mocy oraz częstotliwością zmian w czasie pól elektrycznych i magnetycznych
- Ruch, w którym zjawisko okresowe, przemieszcza się w przestrzeni, nazywa się ruchem falowym



Fala elektromagnetyczna

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} [m]$$

$$T = \frac{1}{f} [s]$$



X – kierunek propagacji

Z – wektor natężenia pola elektrycznego [V/m]

Y – wektor natężenia pola magnetycznego [A/m]

λ – długość fali [m]

T – okres; czas pełnego cyklu [s]

f – częstotliwość; liczba pełnych cykli fali w jednostce czasu [1/s = Hz]

c – prędkość światła 299 762 458 [m/s] $\approx 3 \cdot 10^8$ [m/s]

Faza



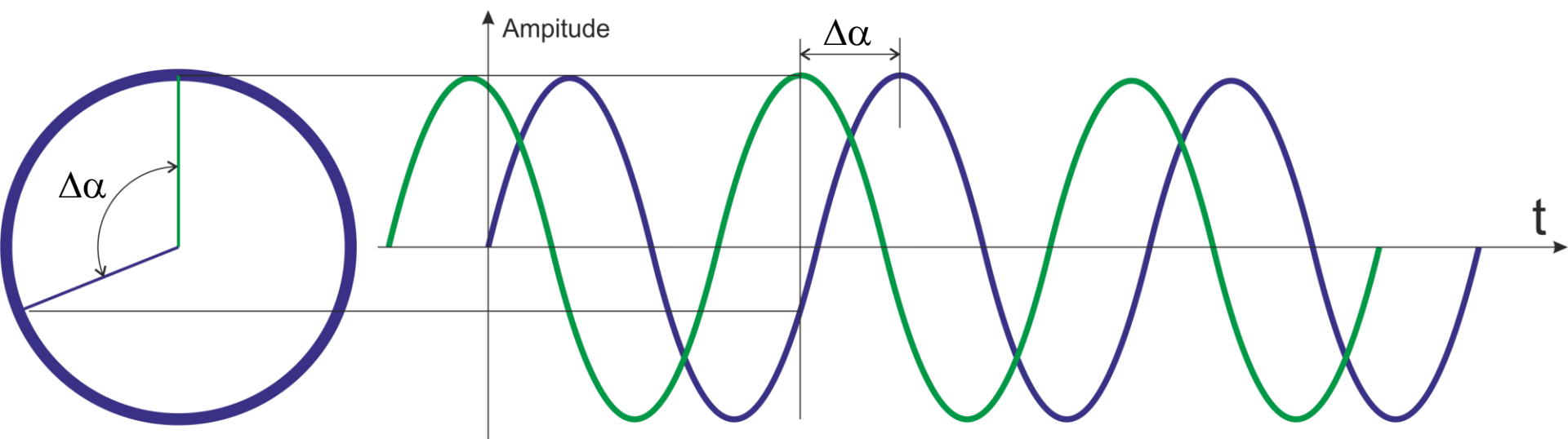
Okresowe zmiany fali elektromagnetycznej (amplituda wektora e) można opisać za pomocą prędkości obrotowej ω , która zależy od jej częstotliwości f :

$$\omega = 2\pi f$$

W obrębie jednego okresu wyróżnia się fazy. Fazę określa czas od początku okresu. Chwilowy kąt fazowy α można wyznaczyć za pomocą następującej zależności:

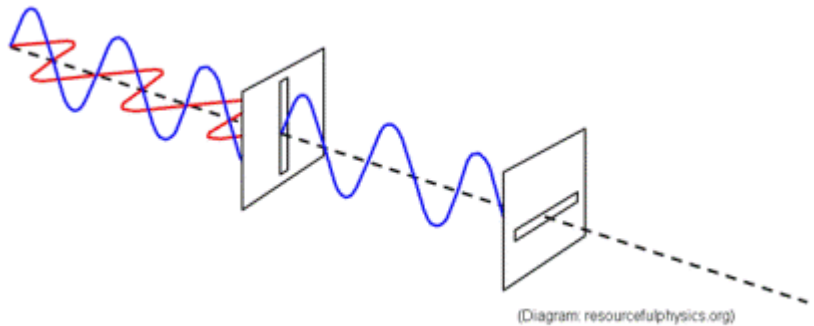
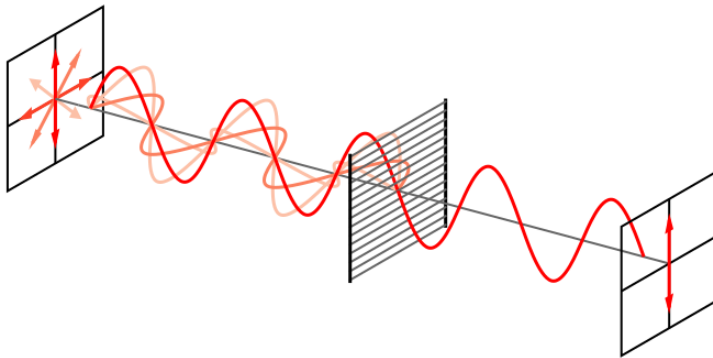
$$\alpha = \omega t = 2\pi f t$$

Różnica fazy



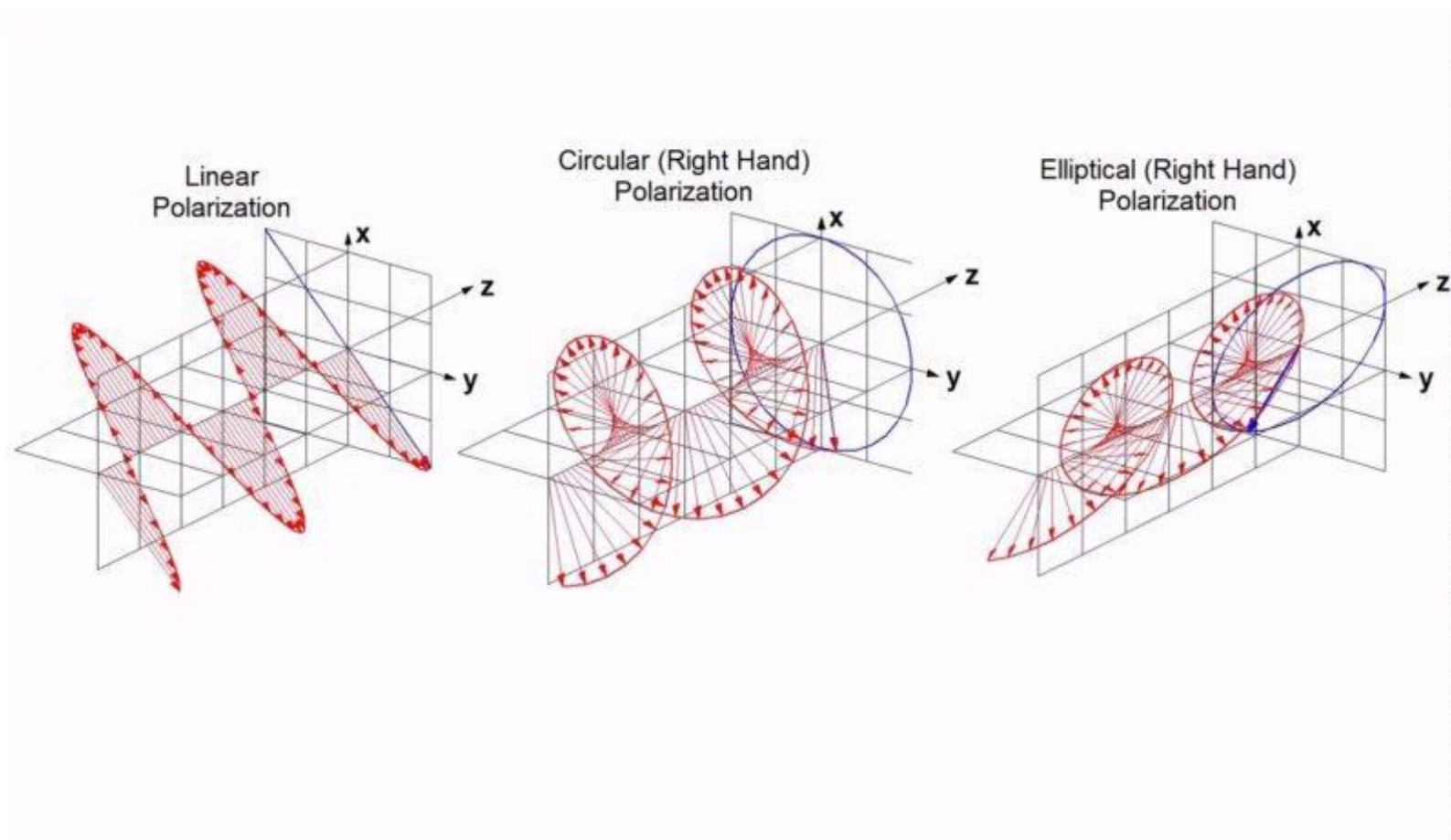
Różnica między chwilowymi wartościami fazy między dwoma ruchami falowymi

Polaryzacja



- Fale elektromagnetyczne można opisać za pomocą fal poprzecznych E i B (prostopadłych do siebie). Nie ma jednak nic szczególnego w żadnym konkretnym kierunku oscylacji wektorów E lub B
- W rzeczywistości niespolaryzowana fala zawiera fale z wektorami E we wszystkich możliwych kierunkach (dla każdej fali E występuje prostopadła fala B)
- W fali spolaryzowanej wektor E oscyluje w określonym kierunku - kierunku polaryzacji.

Rodzaje polaryzacji



Spektrum fal EM

A – ELF, SLF, ULF, VLF

B – fale radiowe

C – mikrofae

D – podczerwień

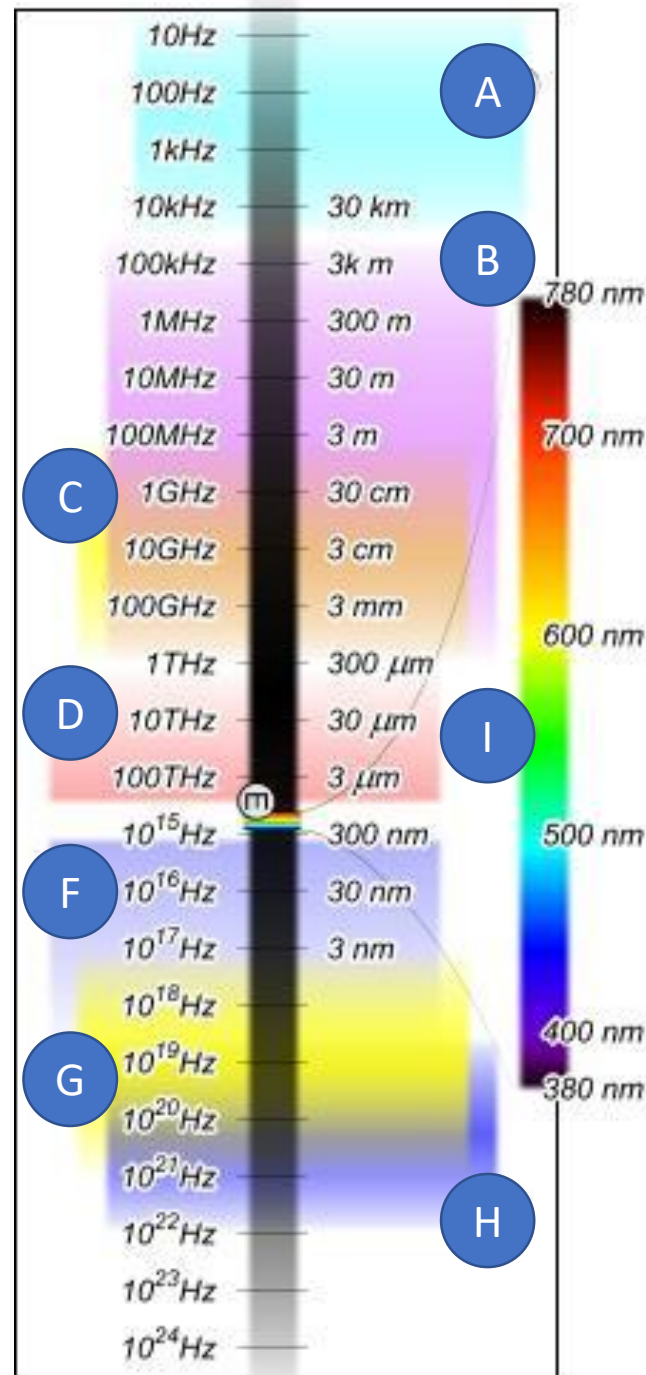
E – światło widzialne

F – promieniowanie nadfioletowe

G – promieniowanie X (rentgenowskie)

H – promieniowanie Gamma

I – spektrum światła widzialnego



Częstotliwości radiowe

Frequency	Wavelength	Designation	Abbreviation ^[6]	IEEE bands ^[7]
3–30 Hz	10^5 – 10^4 km	Extremely low frequency	ELF	-
30–300 Hz	10^4 – 10^3 km	Super low frequency	SLF	-
300–3000 Hz	10^3 –100 km	Ultra low frequency	ULF	-
3–30 kHz	100–10 km	Very low frequency	VLF	-
30–300 kHz	10–1 km	Low frequency	LF	-
300 kHz – 3 MHz	1 km – 100 m	Medium frequency	MF	-
3–30 MHz	100–10 m	High frequency	HF	HF
30–300 MHz	10–1 m	Very high frequency	VHF	VHF
300 MHz – 3 GHz	1 m – 10 cm	Ultra high frequency	UHF	UHF, L, S
3–30 GHz	10–1 cm	Super high frequency	SHF	S, C, X, Ku, K, Ka
30–300 GHz	1 cm – 1 mm	Extremely high frequency	EHF	Ka, V, W, mm
300 GHz – 3 THz	1 mm – 0.1 mm	Tremendously high frequency	THF	-

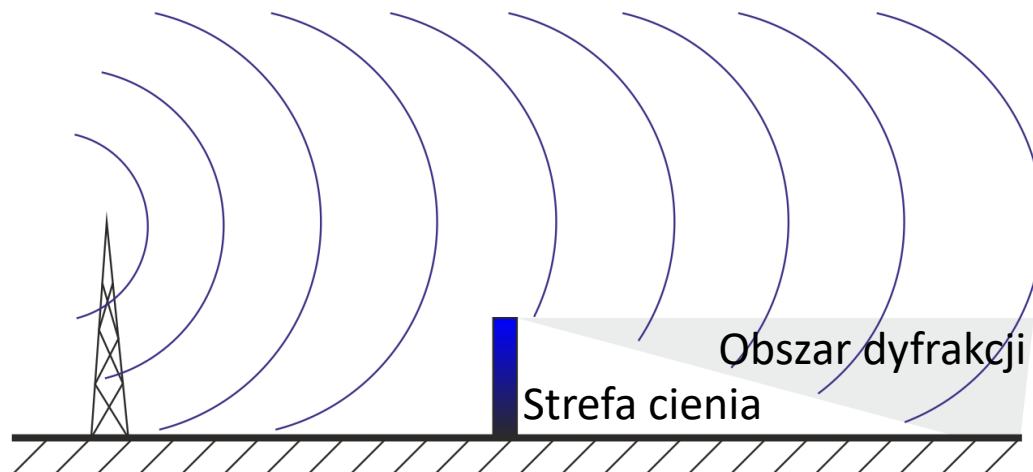
Widmo częstotliwości podzielone na pasma o nazwach konwencjonalnych oznaczonych przez International Telecommunications Union (ITU)

Propagacja fali radiowej

- Tylko w próżni fale elektromagnetyczne przemieszczają się po linii prostej ze stałą prędkość równą prędkości światła c .
W każdym innym ośrodku napotykają następujące zjawiska:
- Dyfrakcja - zaginanie fal nad powierzchnią Ziemi lub na przeszkodach
- Refrakcja – ugięcie, zmiana kierunku propagacji przy przejściu przez granicę między dwoma ośrodkami
- Ciągła refrakcja – zginanie fal w troposferze
- Absorpcja – pochłanianie, energii fal elektromagnetycznych przez cząstki atmosfery

Dyfrakcja

- Powstaje pod wpływem podania fal EM na przeszkodę
- Większa im mniejsze są wymiary przeszkody w stosunku do długości fali
- Natężenie pola w obszarze dyfrakcji, bezpośrednio za przeszkodą jest słabsze niż przed przeszkodą i maleje ze wzrostem częstotliwości.
- Fale długie – brak przeszkód takich jak góry.
- Ultrakrótkie – za przeszkodami występują strefy cienia



Refrakcja

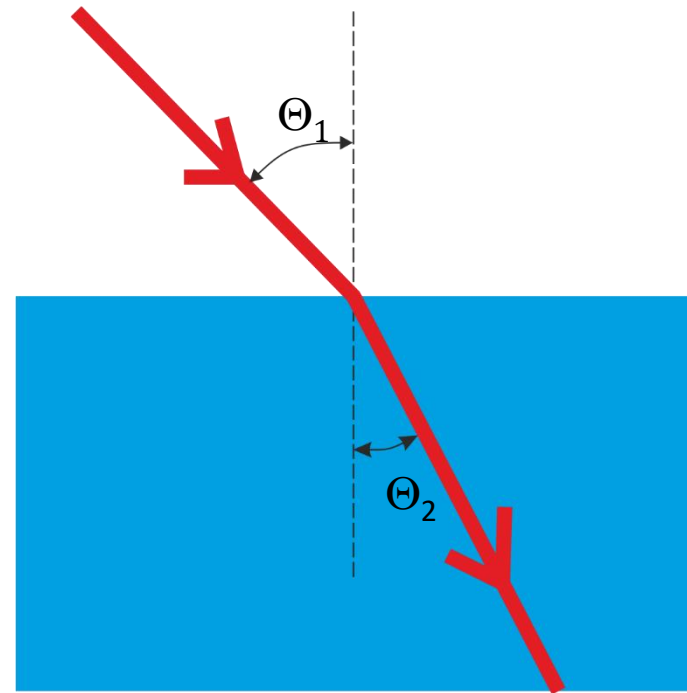
- Występuje na granicy dwóch ośrodków (różne parametry przenikalności elektrycznej, różna prędkość fali EM).
- Najczęściej zachodzi: załamanie, odbicie, rozproszenie
- Współczynnik załamania jest równy:

$$n = \frac{c}{v}$$

gdzie:

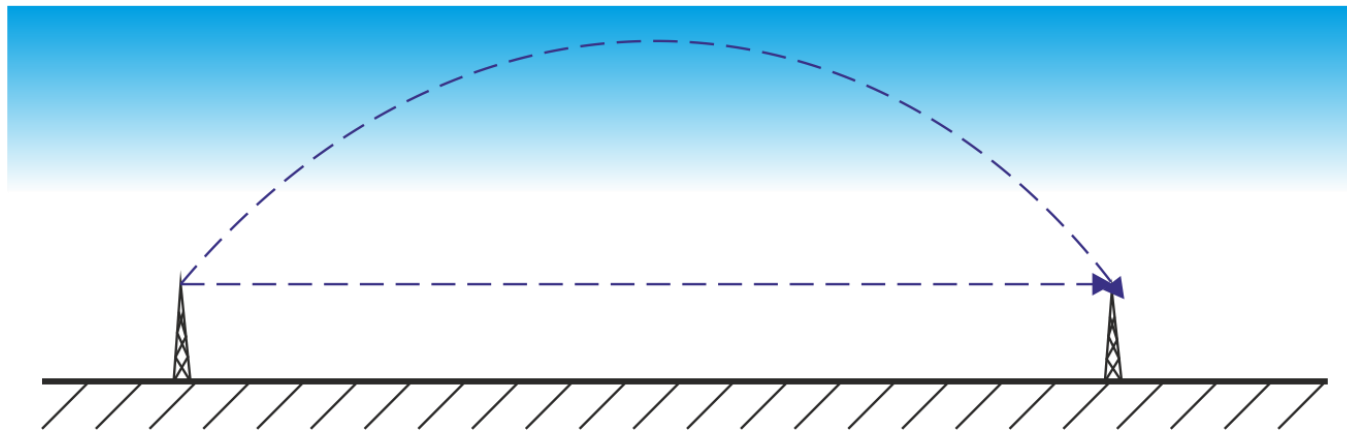
v – prędkość fali EM w ośrodku materialnym

$$\frac{\sin\Theta_1}{\sin\Theta_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_1}{v_2}$$



Refrakcja ciągła

- Zmiana ciągła przenikalności elektrycznej w danym ośrodku powoduje odchylenie i załamywanie się fali EM.
- Warunki odbicia fal EM zależą od jej polaryzacji.
- Niejednorodna struktura ośrodka sprzyja absorpcji energii fali EM i jej rozproszeniu.
- Fale radiowe pochodzące z różnych źródeł mogą ulec interferencji



Absorpcja

- absorpcja promieniowania elektromagnetycznego polega na, odbieraniu energii fotonu przez materię, zazwyczaj elektrony atomu
- w ten sposób energia elektromagnetyczna zostaje przekształcona w energię wewnętrzną absorbera (ośrodka propagacji), na przykład w energię cieplną

Ośrodki propagacji

- Próżnia
 - w wolnej przestrzeni fale elektromagnetyczne podlegają prawu, w którym gęstość mocy jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości od źródła promieniowania
- Powierzchniowa warstwa Ziemi (lądy oraz morza)
 - Medium jest elektrycznie niejednorodny
 - Zmiany właściwości wraz z głębokością oraz lokalizacją
 - Nierówności terenu powodują utratę energii
 - Efektem jest stopniowe tłumienie fali elektromagnetycznej

Ośrodki propagacji

- Troposfera

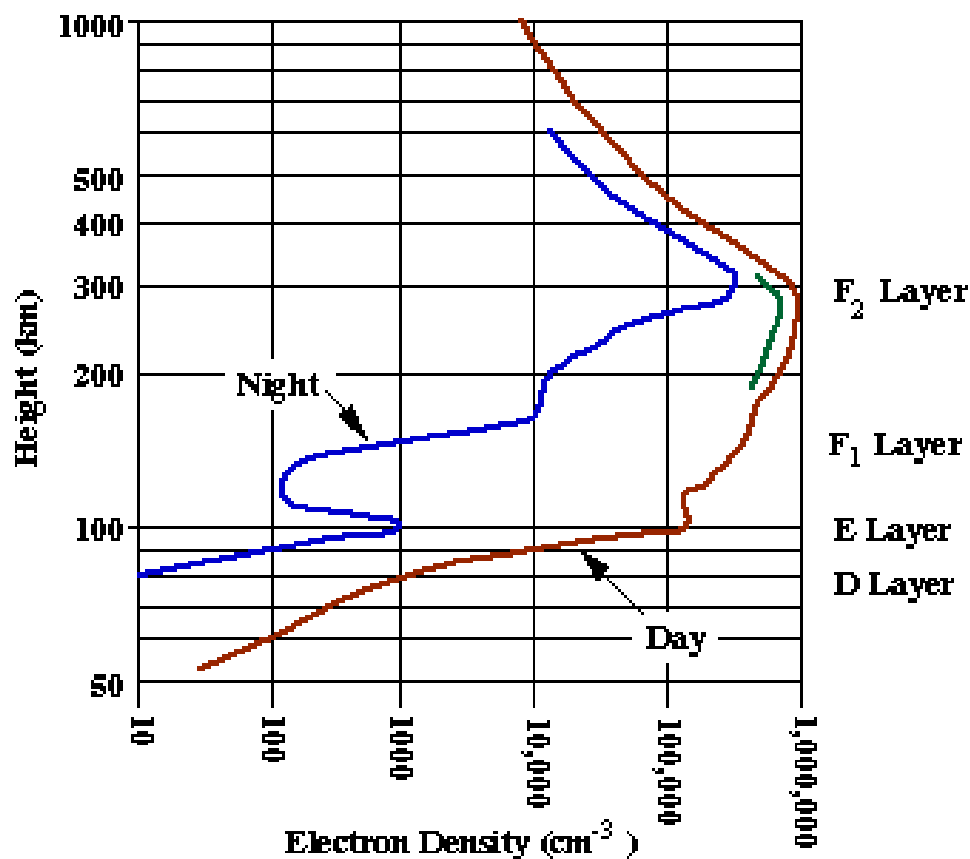
- najniższa warstwa atmosfery, od 0 do 10 km przy biegunach i od 0 do 20 km w okolicy równika
- temperatura spada wraz ze wzrostem wysokości
- zmienne warunki meteorologiczne powodują: załamanie, rozproszenie i absorpcję
- duży wpływ na fale ultrakrótkie

- Stratosfera

- Leży pomiędzy troposferą i jonosferą
- Obojętna dla fal radiowych

Ośrodki propagacji

- jonosfera
 - Górna warstwa atmosfery od 60 do 1000 km,
 - podzielona na podwarstwy według liczby wolnych elektronów (TEC – Total Electron Content)



Przykład kompozycji jonosfery
na średnich szerokościach
geograficznych

Ośrodki propagacji

- jonosfera

- jonizacja – zjawisko polegające na oddzieleniu elektronów walencyjnych od atomów lub cząstek, prowadzące do powstania jonów dodatnich oraz wolnych elektronów
- Jonizacja zachodzi pod wpływem promieniowania ultrafioletowego, słonecznego korpuskularnego oraz kosmicznego
- Zgodnie z koncentracją swobodnych elektronów w jonosferze można wyróżnić kilka warstw, m.in.:
 - D - najbliższej powierzchni Ziemi do ok. 90 km, w porze dziennej wykazuje wahania pod względem wysokości i koncentracji elektronów, w porze nocnej zanika
 - E - 90 do 140 km - zależy wysokość od szerokości geograficznej, ulega zmianom dobowym i sezonowym
 - F – 140 do 450 km
 - F1 – 140 do 250 km, powyżej 250 km (F2),
 - w porze nocnej pozostaje F2

Ośrodki propagacji

- Fale przyziemne
 - Propagacja w bliskiej odległości od pow. Ziemi
 - Fale powierzchniowe – rozchodzą się wzdłuż kulistej powierzchni Ziemi dzięki dyfrakcji
 - Wykorzystywane w systemach pracujących na falach długich
 - Antena nadawcza o polaryzacji pionowej znajduje się bezpośrednio nad powierzchnią Ziemi
- Fale krótkie – zasięg ograniczony głównie do horyzontu
 - Większy zasięg spowodowany zjawiskiem dyfrakcji na powierzchni Ziemi (krzywizna) oraz refrakcji w troposferze
 - W przypadku fal ultrakrótkich oraz mikrofal występują refrakcja superrefrakcja oraz interferencja

Ośrodki propagacji

- Fale troposferyczne

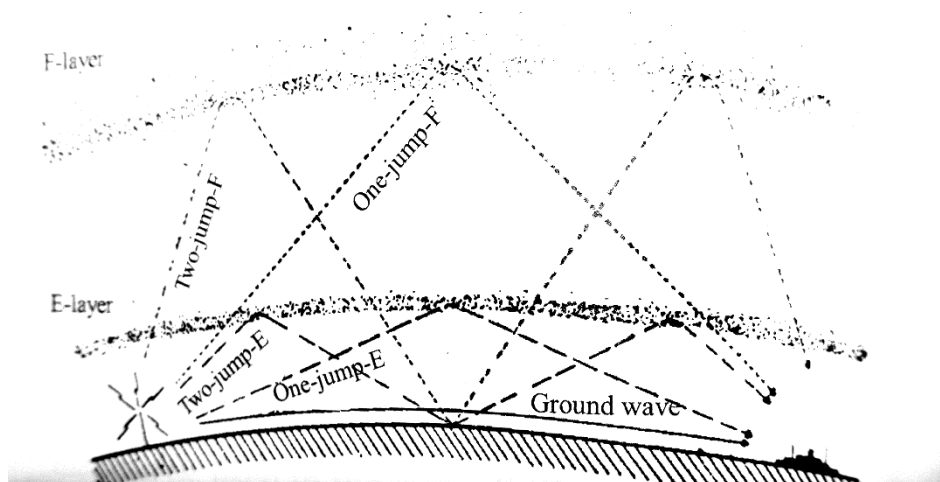
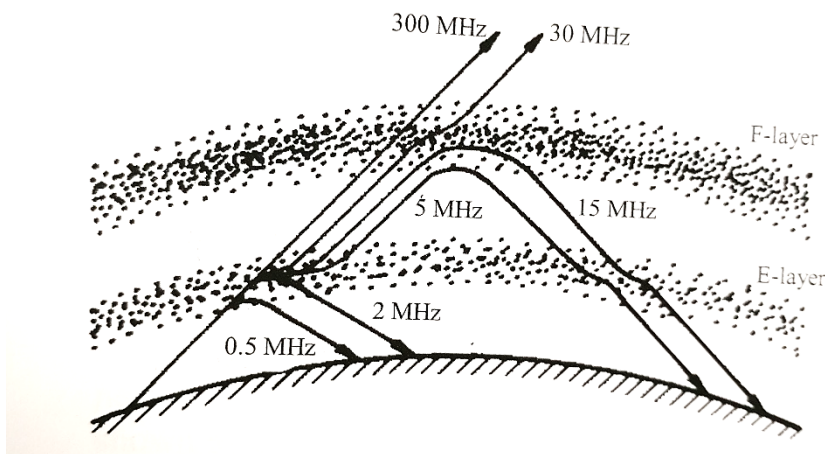
- Propagacja za pośrednictwem duktów lub rozproszeniu na niejednorodnościach troposfery.
- Zasięg często przewyższa odległość horyzontu radiowego.
- Fale ultrakrótkie i mikrofae rozprzestrzeniają się w duktach na znaczne odległości przy małym tłumieniu

Dukt – kanał falowodowy w troposferze, powstaje w sprzyjającym układzie warstw atmosferycznych i ciśnieniu atmosferycznym

Ośrodki propagacji

- Fale jonosferyczne

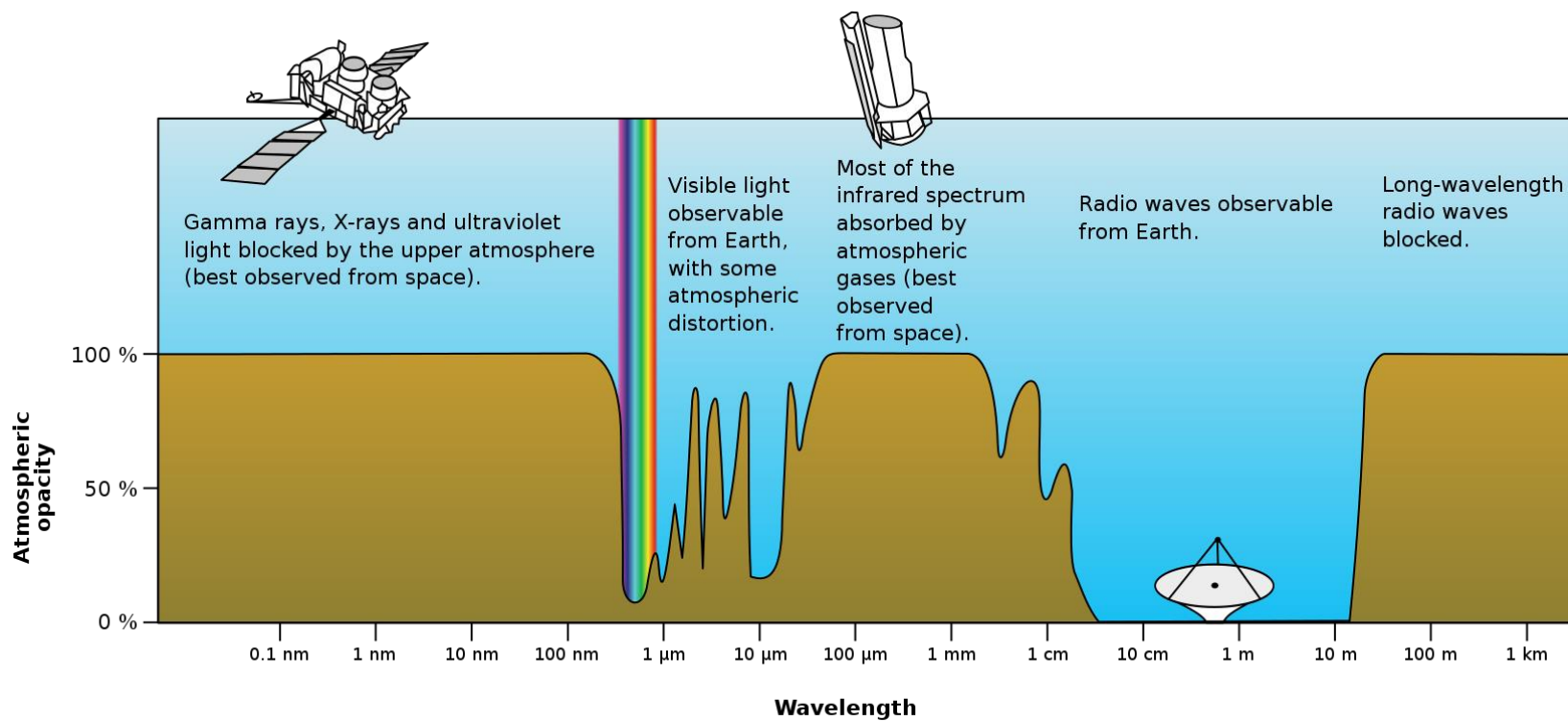
- Propagacja przebiega dzięki refrakcji jonosferycznej
- Propagacja zależy od trasy, pory doby, roku, aktywności słonecznej
- Wielokrotne odbicia od jonosfery i powierzchni Ziemi umożliwiają rozchodzenie się na bardzo duże odległości, zasięg globalny
- Propagacja zależy od częstotliwości: granicznych (krytycznych) – najwyższej, przy której fala EM jest w stanie się odbić od jonosfery oraz najniższej przy której tłumienie jeszcze pozwala nawiązać łączność
- Częstotliwości graniczne leżą w zakresie fal krótkich
 - MUF – Maximal Usable Frequency
 - LUF – Lowest Usable Frequency



Ośrodki propagacji

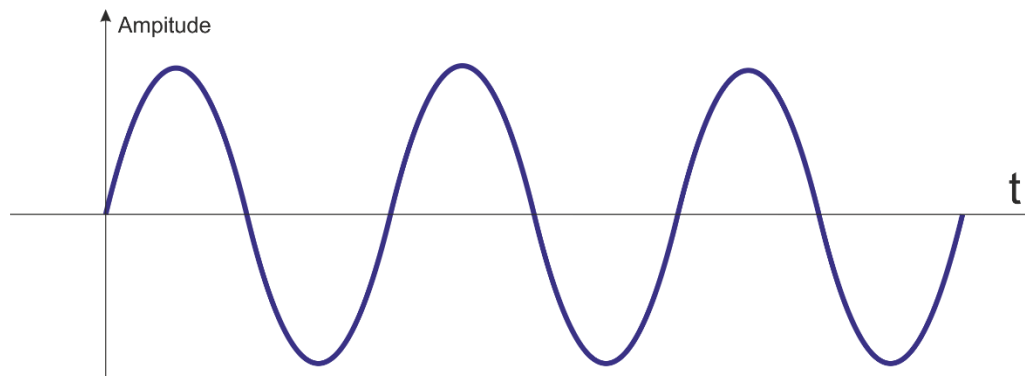
Band		Frequency	Wavelength	Propagation via
ELF	Extremely Low Frequency	3–30 Hz	100,000–10,000 km	Guided between the Earth and the D layer of the ionosphere.
SLF	Super Low Frequency	30–300 Hz	10,000–1,000 km	Guided between the Earth and the ionosphere .
ULF	Ultra Low Frequency	0.3–3 kHz (300–3,000 Hz)	1,000–100 km	Guided between the Earth and the ionosphere .
VLF	Very Low Frequency	3–30 kHz (3,000–30,000 Hz)	100–10 km	Guided between the Earth and the ionosphere .
LF	Low Frequency	30–300 kHz (30,000–300,000 Hz)	10–1 km	Guided between the Earth and the ionosphere. Ground waves .
MF	Medium Frequency	300–3000 kHz (300,000–3,000,000 Hz)	1000–100 m	Ground waves . E, F layer ionospheric refraction at night, when D layer absorption weakens.
HF	High Frequency (Short Wave)	3–30 MHz (3,000,000–30,000,000 Hz)	100–10 m	E layer ionospheric refraction. F1, F2 layer ionospheric refraction.
VHF	Very High Frequency	30–300 MHz (30,000,000–300,000,000 Hz)	10–1 m	Line-of-sight propagation . Infrequent E ionospheric (E_s) refraction . Uncommonly F2 layer ionospheric refraction during high sunspot activity up to 50 MHz and rarely to 80 MHz. Sometimes tropospheric ducting or meteor scatter
UHF	Ultra High Frequency	300–3000 MHz (300,000,000–3,000,000,000 Hz)	100–10 cm	Line-of-sight propagation . Sometimes tropospheric ducting .
SHF	Super High Frequency	3–30 GHz (3,000,000,000–30,000,000,000 Hz)	10–1 cm	Line-of-sight propagation . Sometimes rain scatter .
EHF	Extremely High Frequency	30–300 GHz (30,000,000,000–300,000,000,000 Hz)	10–1 mm	Line-of-sight propagation , limited by atmospheric absorption to a few kilometers
THF	Tremendously High frequency	0.3–3 THz (300,000,000,000–3,000,000,000,000 Hz)	1–0.1 mm	Line-of-sight propagation .

Ośrodki propagacji

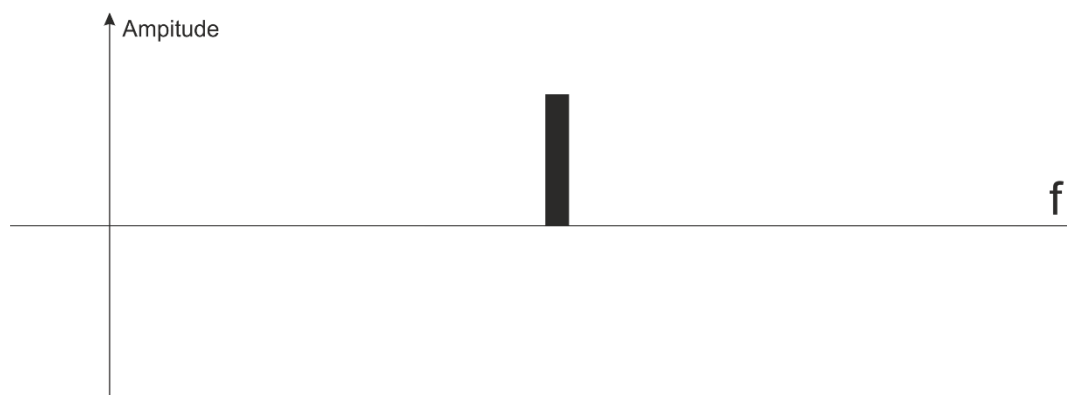


Domeny fal radiowych

- Domena czasu – okresowe oscylacje w czasie



- Domena częstotliwości – otrzymana przy pomocy analizy FFT (Fast Fourier Transform)



Szerokość pasma przenoszenia

- Pojęcie używane podczas nadawania i odbierania sygnałów radiowych. Po stronie nadajnika określa zakres częstotliwości (widmo), które zajmuje sygnał. Od strony odbiornika określa zakres częstotliwości, na której odbiornik jest czuły, gdy ustawiony jest na danej częstotliwości
- Szerokość pasma przenoszenia zależy od metody transmisji i ilości danych, które należy przesłać w określonym przedziale czasu - szybkość transmisji danych

Modulacja szerokopasmowa

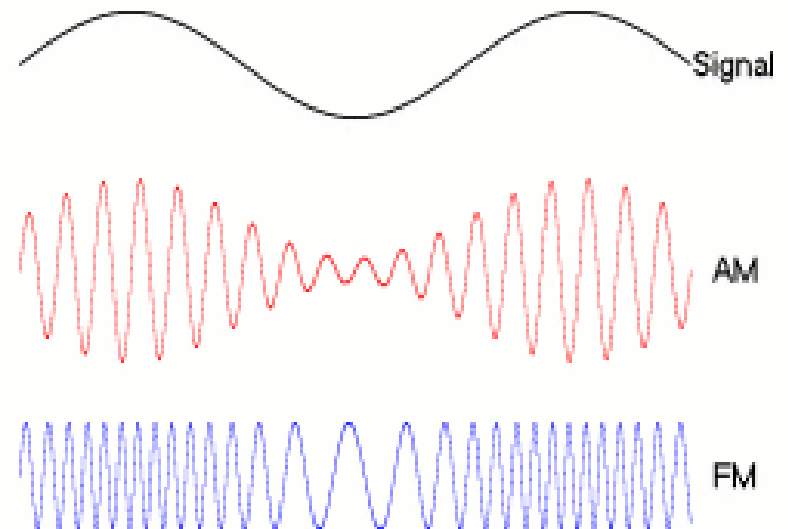
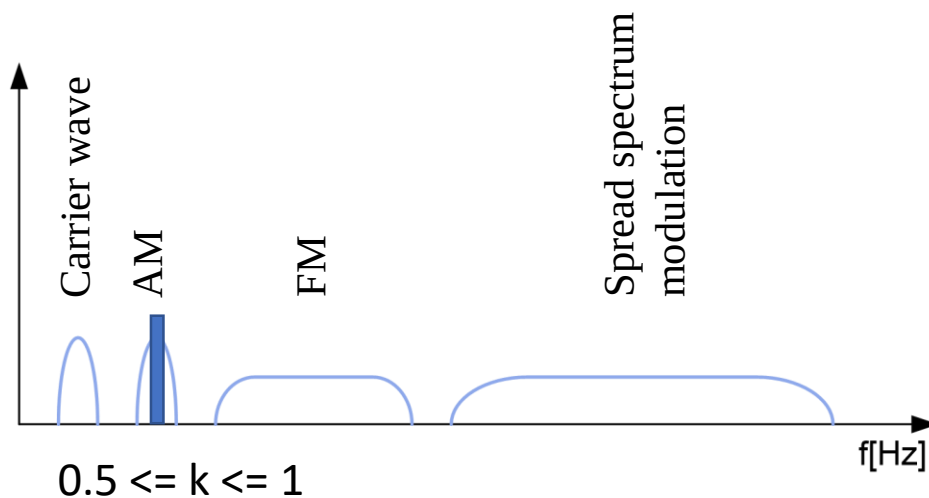
- modulacja to proces zmieniania jednej lub więcej właściwości okresowego kształtu fali EM, zwanego sygnałem nośnym, za pomocą sygnału modulującego. Sygnał modulujący zazwyczaj zawiera informacje, które mają być transmitowane. Najpopularniejszą modulacją jest modulacja częstotliwości FM, modulacja amplitudy AM i modulacja rozproszonego spektrum (szerokopasmowa)
- Szerokość pasma przenoszenia jest bezpośrednio związana z metodą dostępu do kanału radiowego i rodzajem modulacji.
- W celu przesłania danych z szybkością transmisji **B** [Hz, b/s], należy wykorzystać pasmo przenoszenia o szerokości **P** [Hz]:

$$P = 2kB$$

k – współczynnik poszerzenia pasma (zależny od metody modulacji)

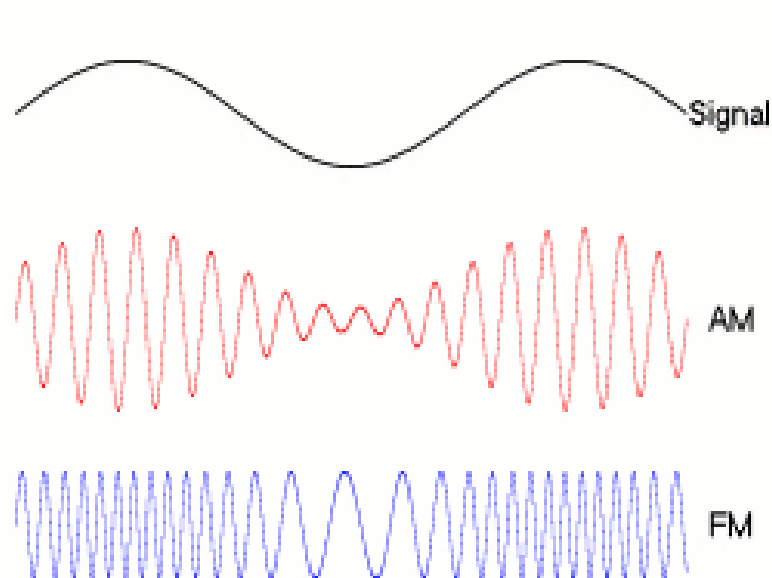
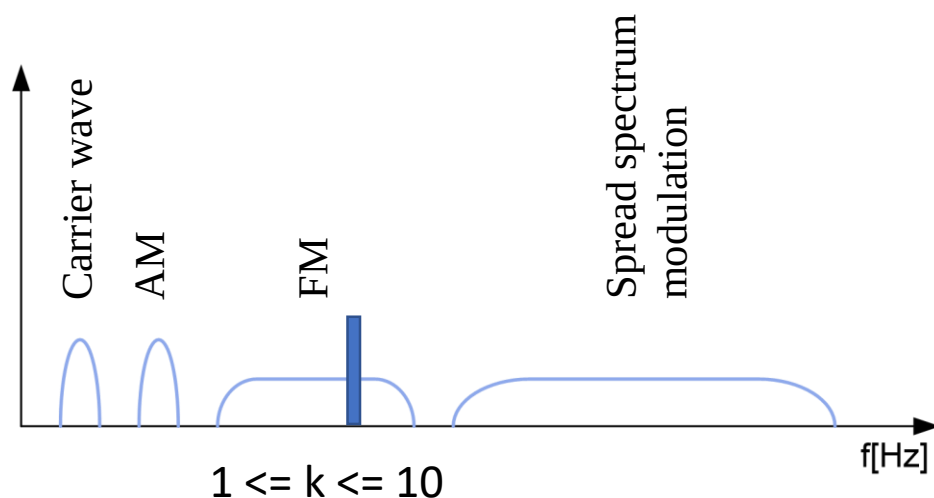
Modulacja amplitudy AM

- jest techniką modulacji stosowaną w komunikacji elektronicznej, najczęściej do przesyłania informacji za pośrednictwem fali nośnej
- w modulacji amplitudy, amplituda fali nośnej (siła sygnału) jest zmieniana proporcjonalnie do transmitowanego sygnału zawierającego informację



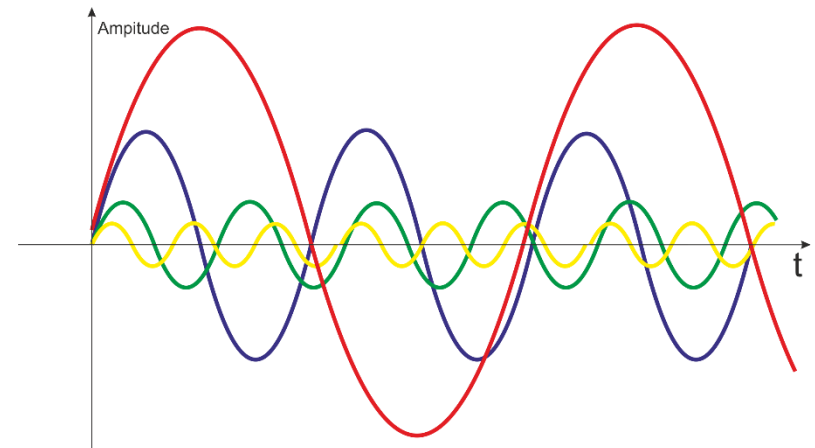
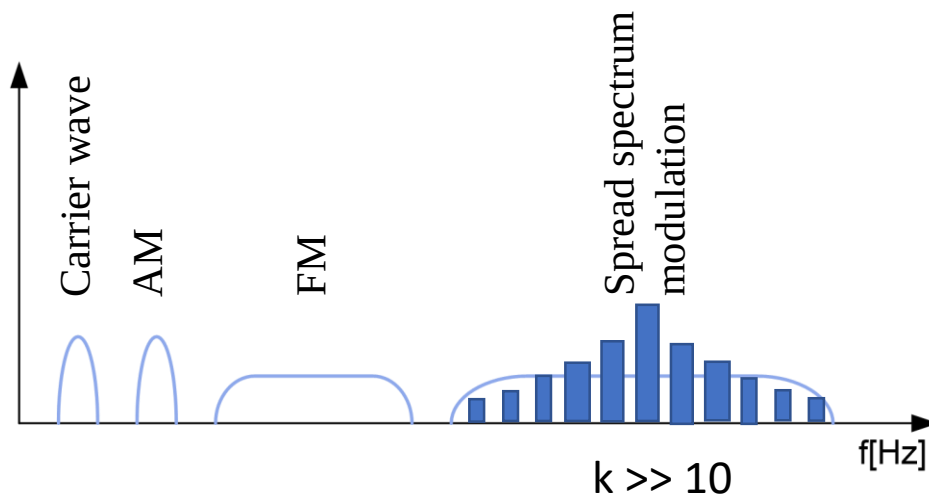
Modulacja częstotliwościowa FM

- jest kodowaniem informacji w fali nośnej przez zmianę chwilowej częstotliwości fali

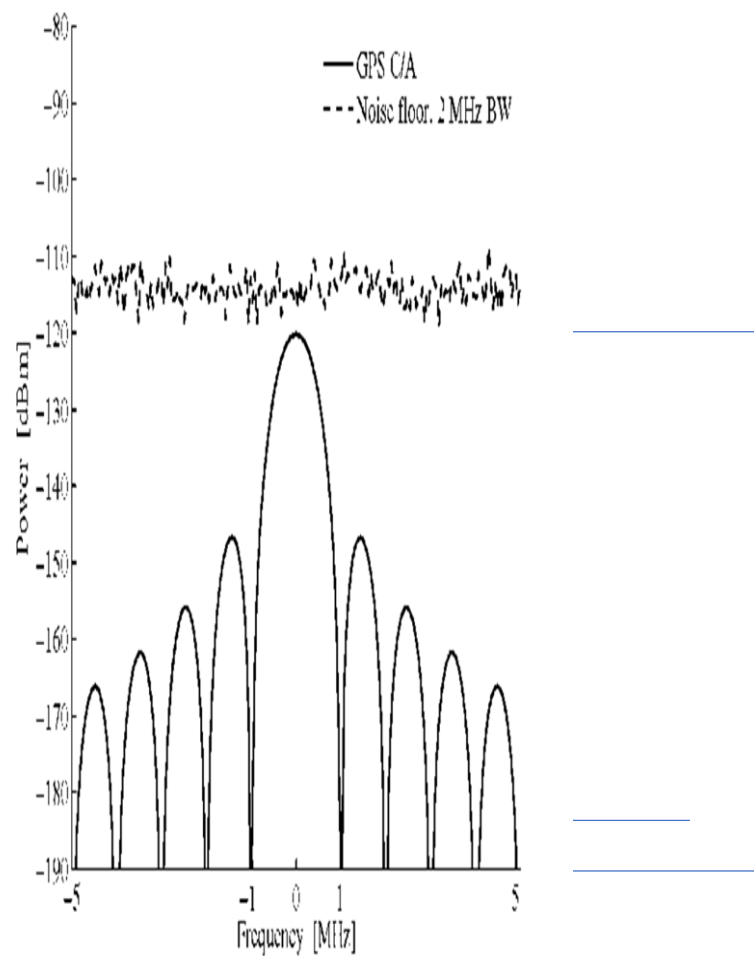


Modulacja szerokopasmowa

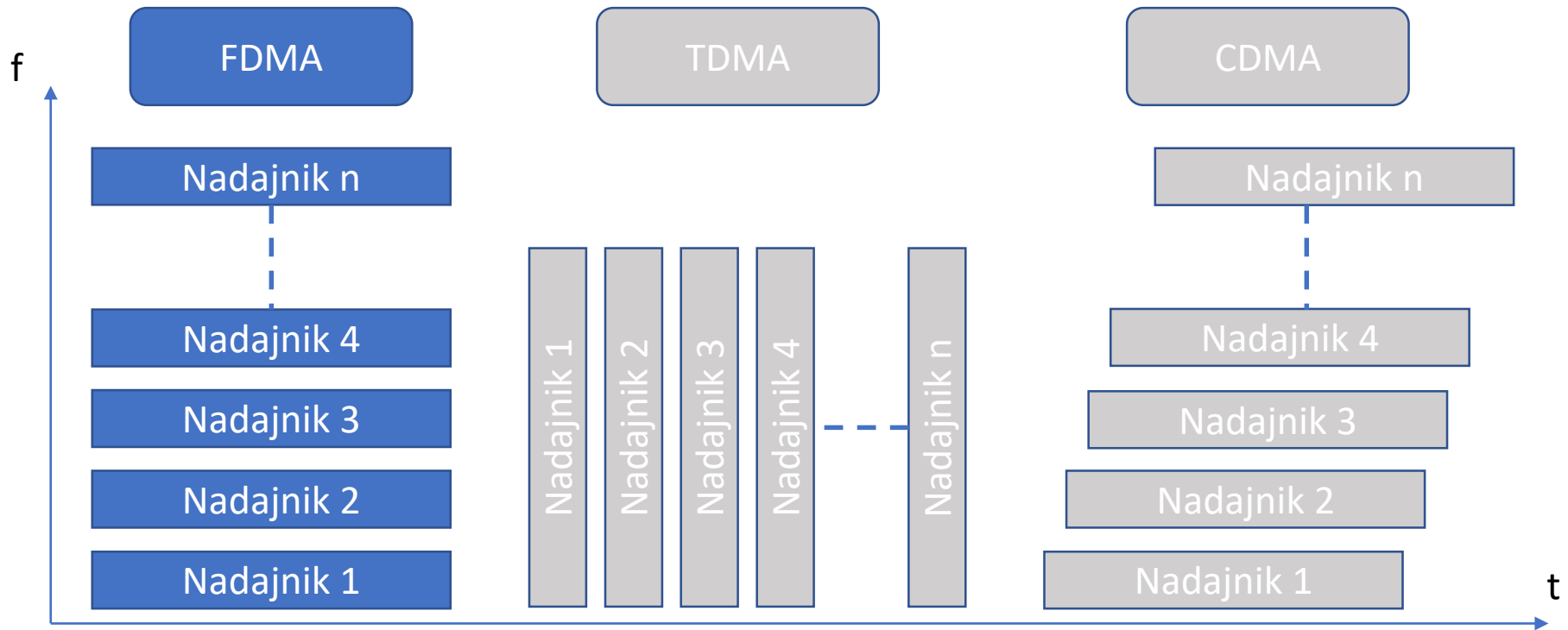
- metoda, w której sygnał generowany z określoną szerokością pasma celowo rozszerza się w dziedzinie (domenie) częstotliwości, co skutkuje sygnałem o większej szerokości pasma.
- Techniki te są wykorzystywane w celu ustanowienia bezpiecznej komunikacji, zwiększenia odporności na zakłócenia naturalne, szумы i zagłuszenie oraz w celu zapobiegania wykryciu i ograniczenia gęstości mocy (np. w łączności satelitarnej)



Modulacja szerokopasmowa



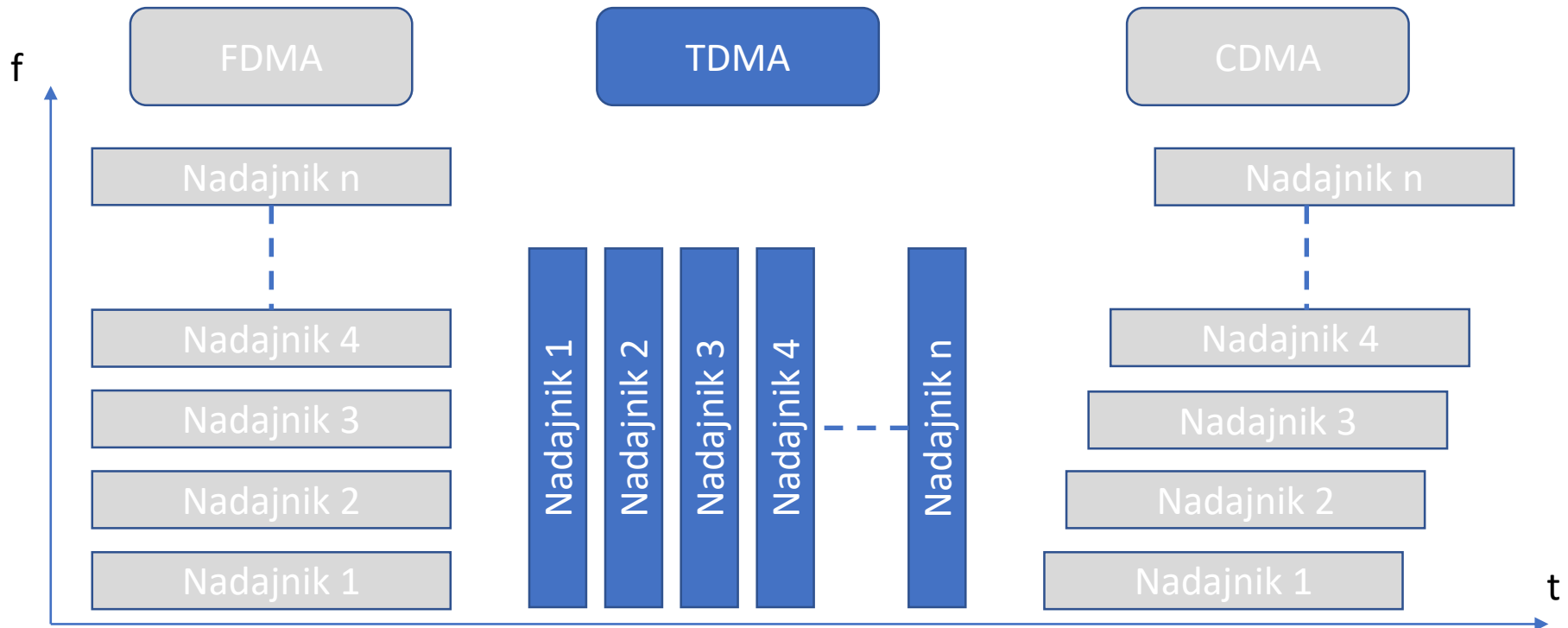
Metody wielodostępu do określonego pasma radiowego



FDMA – wielodostęp z podziałem częstotliwości

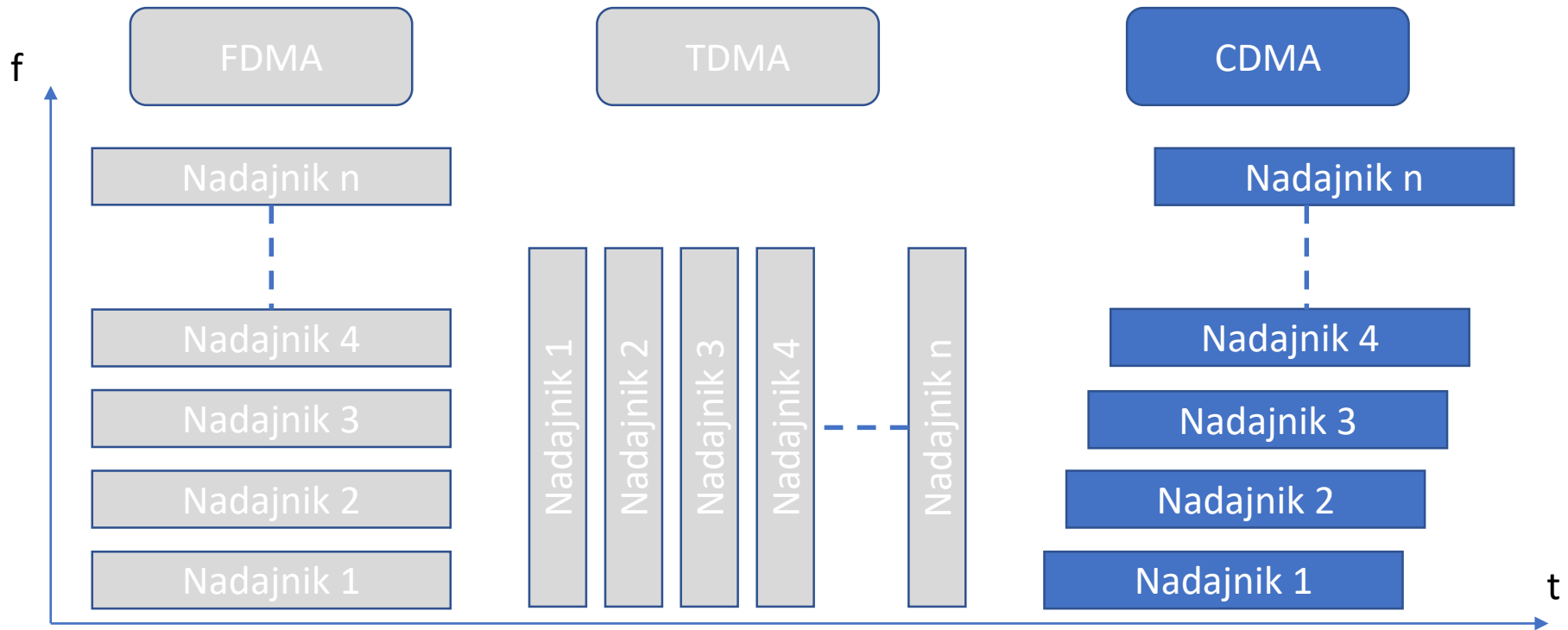
jest metodą dostępu do kanału używaną w protokołach wielodostępu jako protokół kanałowy. FDMA zapewnia użytkownikom indywidualną alokację jednego lub kilku pasm częstotliwości lub kanałów. Jest to szczególnie powszechne w komunikacji satelitarnej. FDMA, podobnie jak inne systemy wielodostępowe, koordynuje dostęp między wieloma użytkownikami

Methods of multiple access to a specific bandwidth



TDMA – wielodostęp z podziałem czasu
jest metodą dostępu do kanału dla sieci współdzielonych. Umożliwia kilku użytkownikom współużytkowanie tego samego kanału częstotliwości poprzez podzielenie sygnału na różne przedziały czasowe. Użytkownicy przesyłają jeden po drugim kolejno, każdy wykorzystując własny przedział czasowy.

Methods of multiple access to a specific bandwidth



CDMA – wielodostęp z podziałem kodowym
jest dostępem wielokrotnym, w którym kilka nadajników może wysyłać informacje jednocześnie przez jeden kanał komunikacyjny. Umożliwia to kilku użytkownikom współużytkowanie pasma częstotliwości. Aby umożliwić to bez zbędnych interferencji między użytkownikami, CDMA stosuje technologię widma rozproszonego i specjalny schemat kodowania (gdzie każdemu nadajnikowi przypisany jest kod)

Siła sygnału, SNR

Zgodnie z prawem Ohm'a zależność pomiędzy natężeniem, napięciem i oporem jest następująca:

$$U = R \cdot I$$

lub w bardziej złożonych wymiarowo obwodach prądu przemiennego z reaktancją indukcyjną i pojemnościową, w której wypadkowa nazywana jest impedancją:

$$U = Z \cdot I$$

W takich obwodach energia (moc) będzie zużyta proporcjonalnie do oporu oraz kwadratu natężenia:

$$P = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R} = U \cdot I$$

gdzie:

U – napięcie, R – pór, I – natężenie, Z – impedancja, P – moc

Siła sygnału, SNR

Stosunek pomiędzy mocą na wejściu i wyjściu wzmacniacza lub pomiędzy wyjściową z nadajnika a odebraną przez odbiornik możemy przedstawić następująco:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1}$$

Następuje wzmocnienie jeżeli wartość powyższego stosunku jest wyższa niż 1 oraz strata przy wartości mniejszej niż 1:

$$A = \frac{P_2}{P_1}$$

Ponieważ energia przy odbiorniku może być miliony razy słabsza niż wysyłana przez nadajnik, strata Amp jest wyrażana w decybelach [dB], który jest równy logarytmowi stosunku mocy pomnożonym przez 10:

$$Amp = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1}$$

Siła sygnału, SNR

SNR – signal to noise ratio / stosunek sygnału do szumu

- Opisany jako liczba logarytmiczna [dB] jest równa różnicy między poziomem sygnału $S[\text{dB/w}]$ a poziomem szumów $N[\text{dB/w}]$:

$$SNR = S - N[\text{dB}]$$

- Jeżeli wyrażony jako $\frac{C}{N_0}$, wówczas SNR będzie odnosił się do stosunku w danej części widma, określonego w [dB-Hz]
 - gdzie C wyraża wpływ fali nośnej
- W odbiornikach SNR może być przedstawiony jako "numer SNR", który może być wyrażony w decybelach lub jako liczba względna w skali od 1 do 10 lub podobnych
- Znaczenie tej liczby powinno być opisane w instrukcji odbiornika

Siła sygnału, SNR

- SNR zmniejsza się, gdy wzrasta odległość od nadajnika (siła sygnału jest słabsza), z powodu „strat propagacyjnych” w wyniku rozprzestrzeniania się fali EM:

$$\text{power density} = \frac{P_t}{2\pi r^2}$$

Signal strength, SNR

Dodatkowo współczynnik SNR zmniejsza się z powodu "szumu" (tła elektromagnetycznego), które jest spowodowane przez:

- Braku jednorodności ośrodka propagacji - zmienna prędkość rozprzestrzeniania się fali EM
- Niepożądane sygnały radiowe o podobnej częstotliwości
- Wyładowanie elektromagnetyczne w atmosferze lub z kosmosu
- Szumy własne odbiornika z powodu termicznego ruchu elektronów w obwodach elektronicznych
- Osłabienie / zła precyzja w modulatorze nadajnika i demodulatorze odbiornika
- Błędy operatora
- Zwiększona liczba nadajników wykorzystujących tę samą część widma (satelity)

Koniec