
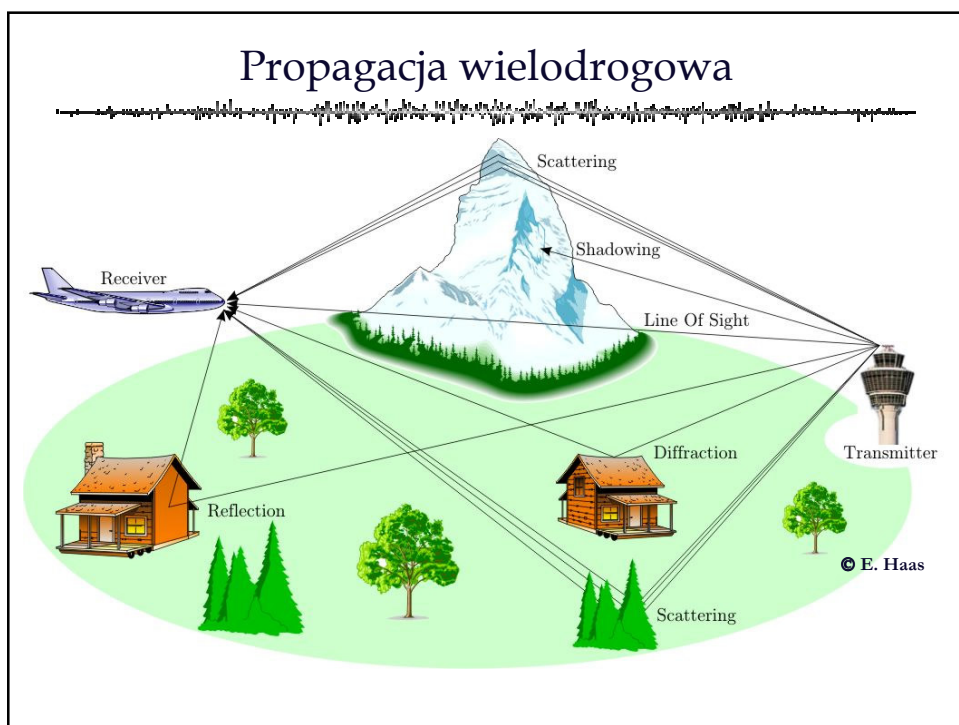
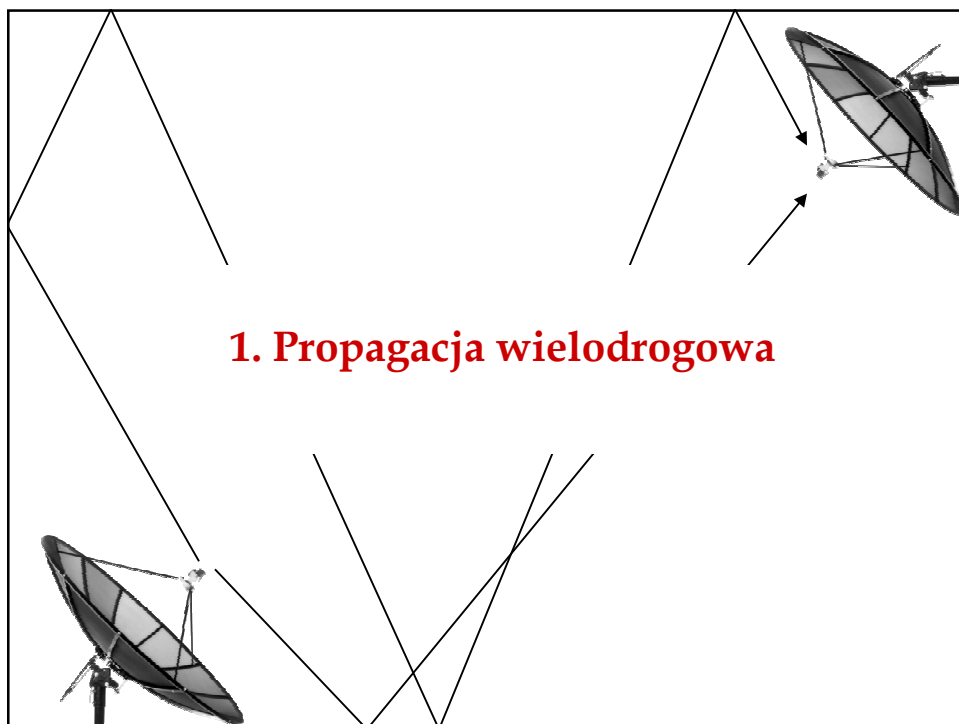




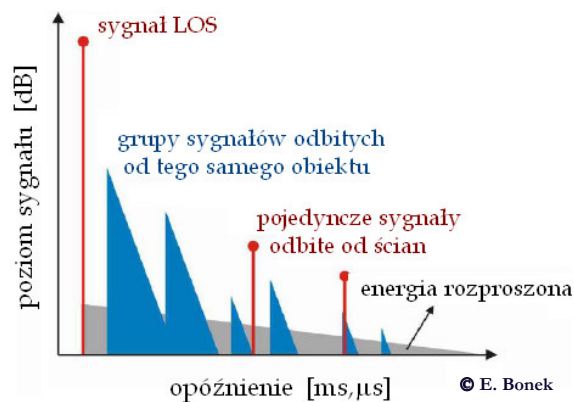
## Plan wykładu



1. Propagacja wielodrogowa
  - opis zjawiska w dziedzinie czasu i częstotliwości
  - przypadek propagacji przyziemnej
2. Zaniki sygnału radiowego
3. Interferencje międzysymbolowe
4. Techniki *diversity*



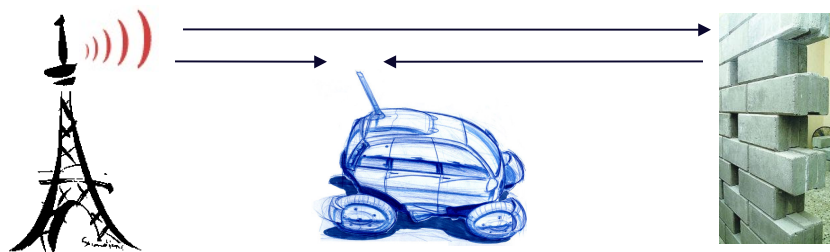
## Sygnal radiowy w dziedzinie czasu



### Pojęcia:

- odpowiedź impulsowa kanału radiowego (*channel impulse response*)
- profil mocy sygnału, profil opóźnień kanału (*power delay profile*)

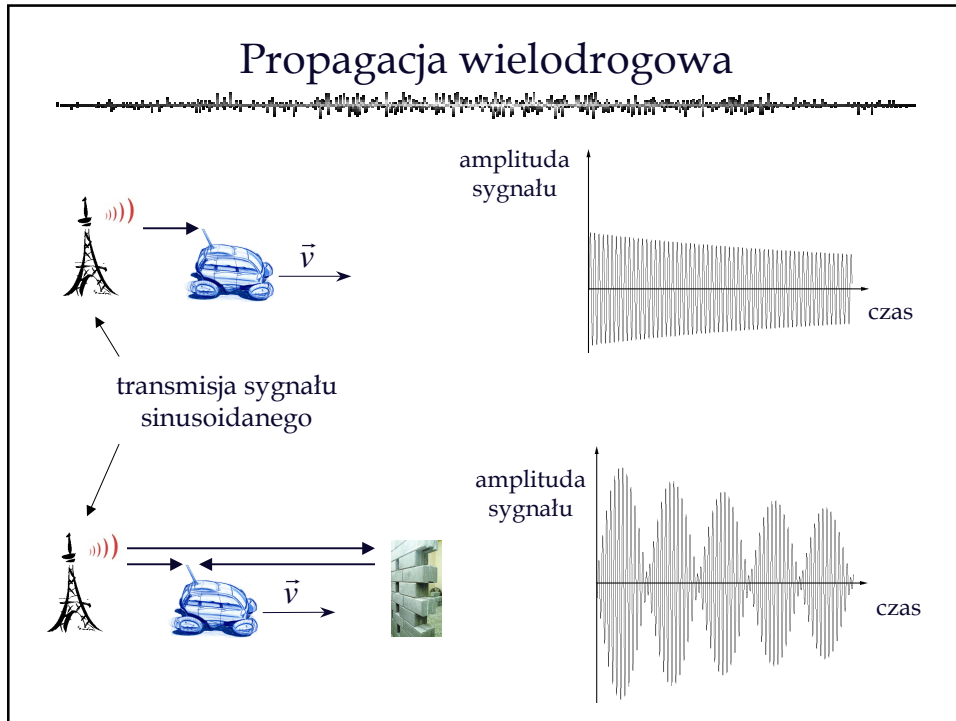
## Propagacja wielodrogowa



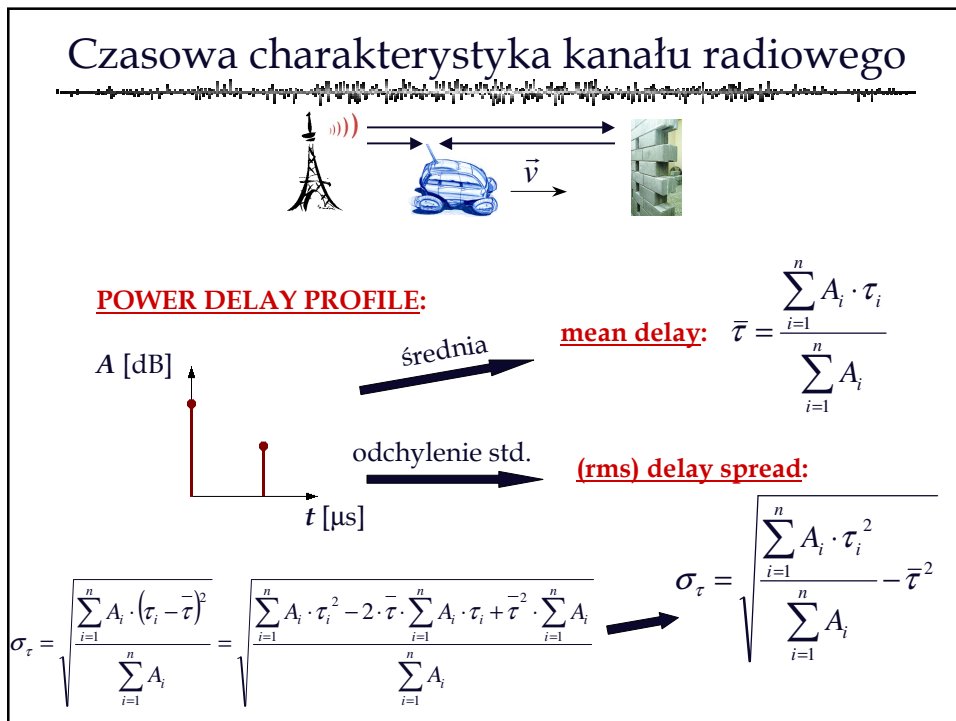
Założmy, że fala bezpośrednia i odbita dochodzą do anteny samochodu w tej samej fazie:  $|d_1 - d_2| = n \cdot \lambda$

A jaki będzie efekt, gdy samochód przesunie się o  $\lambda/4$  ?

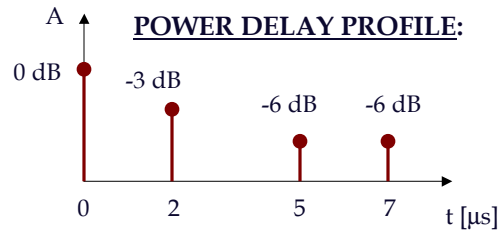
## Propagacja wielodrogowa



## Czasowa charakterystyka kanału radiowego



## Przykład obliczeń



**mean delay:**

$$\bar{\tau} = \frac{1 \cdot 0 \mu s + 0.5 \cdot 2 \mu s + 0.25 \cdot 5 \mu s + 0.25 \cdot 7 \mu s}{2} = 2 \mu s$$

**delay spread:**

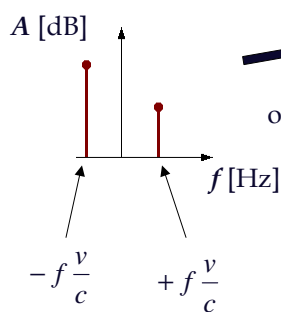
$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{1 \cdot 0 (\mu s)^2 + 0.5 \cdot 4 (\mu s)^2 + 0.25 \cdot 25 (\mu s)^2 + 0.25 \cdot 49 (\mu s)^2}{2} - 4 (\mu s)^2}$$

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{20.5 (\mu s)^2}{2} - 4 (\mu s)^2} = \sqrt{6.25 (\mu s)^2} = 2.5 \mu s$$

## Częstotliwościowa charakterystyka kanału



**DOPPLER SPECTRUM:**



**mean Doppler shift:**

$$\bar{f}_D = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot f_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

średnia

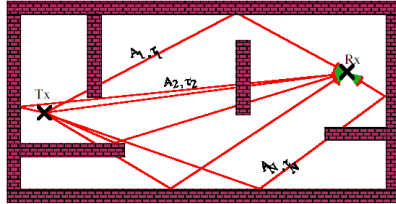
odchylenie std.

**(rms) Doppler spread:**

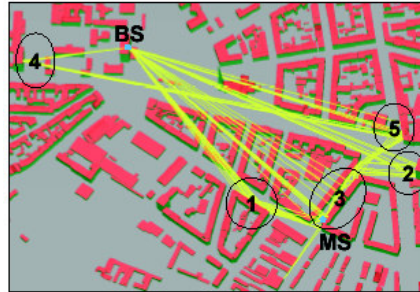
$$\sigma_f = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot f_i^2}{\sum_{i=1}^n A_i} - \bar{f}_D^2}$$

## Propagacja wielodrogowa

środowisko wewnątrz budynków (*indoor*):

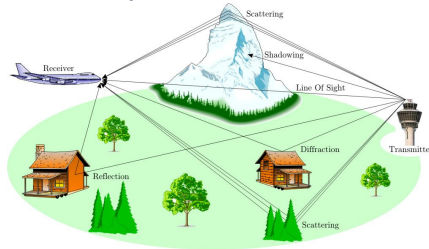


teren miejski (*urban*):



© T. Fugen

teren otwarty (*rural*):

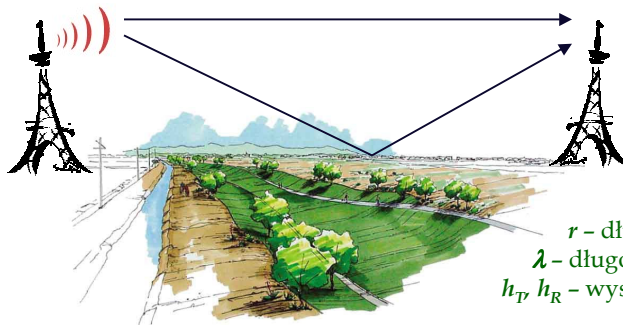


## Propagacja przyziemna

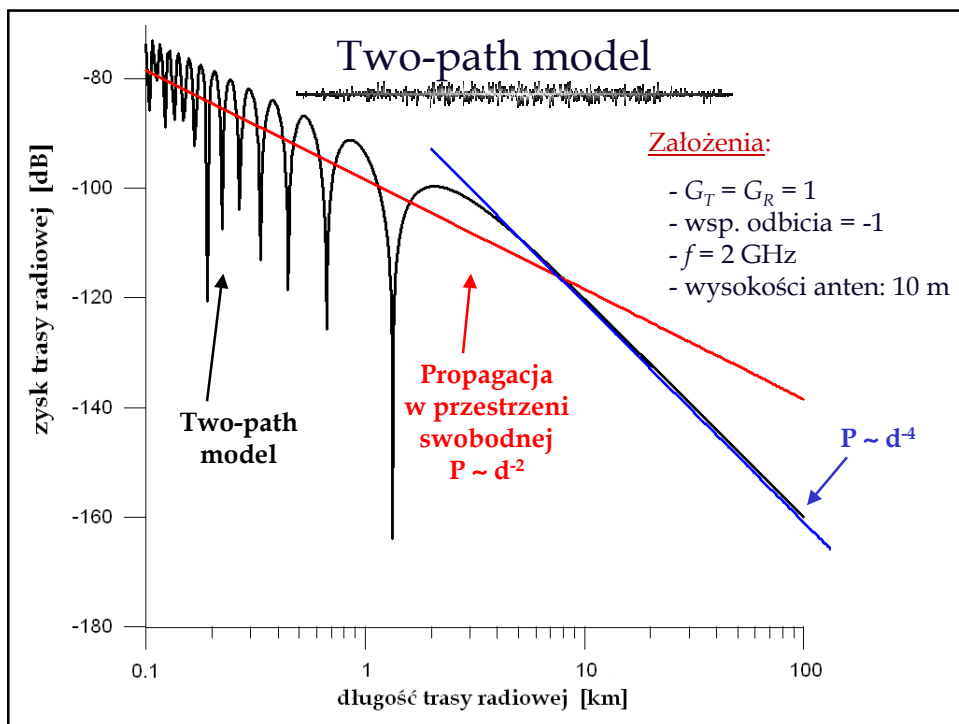
- propagacja w przestrzeni swobodnej :  $P \sim d^{-2}$
- modele propagacyjne :  $P \sim d^{-1.5}$  aż do  $P \sim d^{-6}$
- propagacja przyziemna :  $P \sim d^{-4}$  -> dlaczego ?

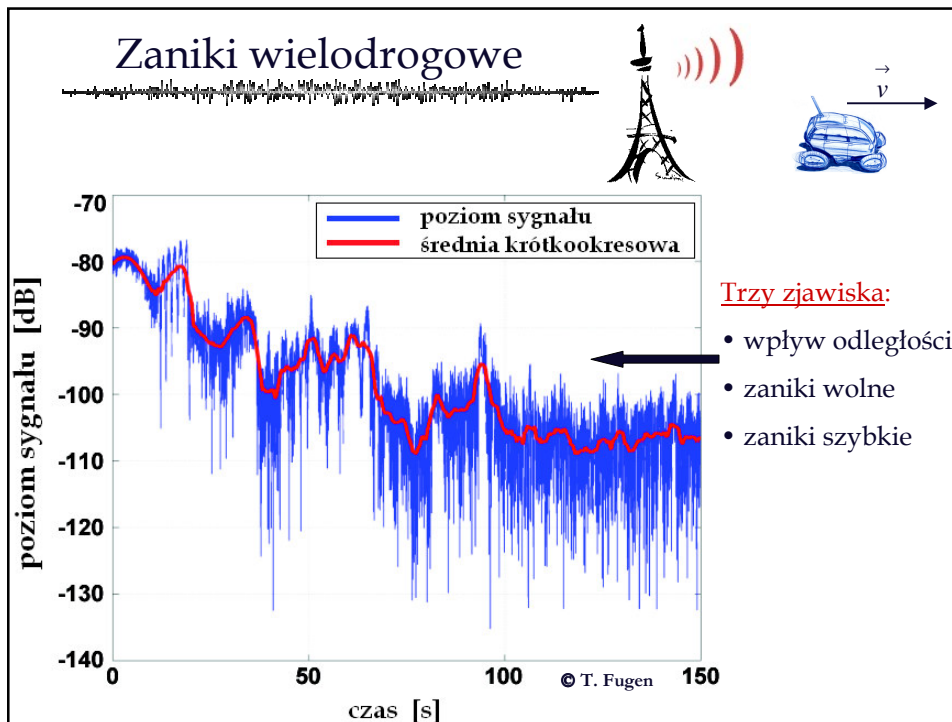
TWO-PATH MODEL:

$$\text{Zysk trasy } (G_T=G_R=1) : \frac{P_R}{P_T} = 10 \log \left[ \left( \frac{\lambda}{4\pi \cdot r} \right)^2 \cdot 4 \cdot \sin^2 \frac{2\pi \cdot h_T \cdot h_R}{\lambda \cdot r} \right]$$



$r$  - długość trasy radiowej  
 $\lambda$  - długość fali radiowej  
 $h_T, h_R$  - wysokości zawieszenia anten





## Zaniki wielodrogowe

-----

**1. Wpływ odległości:**

- $P \sim d^{-1.5} \div P \sim d^{-6}$  w zależności od środowiska propagacyjnego

**2. Zaniki wolne** (*slow fading, large-scale fading, long-term fading*):

- zmiany w otoczeniu anten nadawczych i odbiorczych, pojawianie się i znikanie możliwych dróg propagacji, *shadowing*
- fluktuacje jonosfery i zmienne warunki atmosferyczne

**3. Zaniki szybkie** (*fast fading, small-scale fading, short-term fading*):

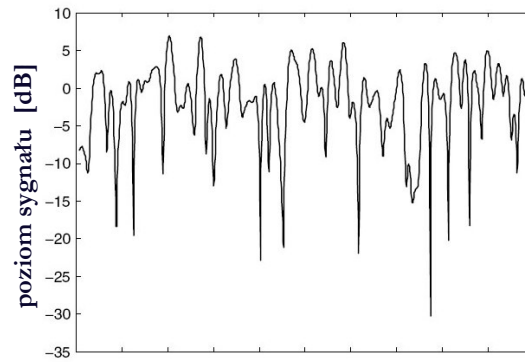
- superpozycja sygnałów dochodzących wieloma drogami do anteny odbiorczej -> interferencje konstruktywne i destruktywne

**Dodatkowe pojęcia:**

- kanał radiowy z zanikiem płaskim (*flat fading*)
- kanał radiowy z zanikami selektywnymi (*selective fading*)



## Sygnal radiowy w dziedzinie częstotliwości - zaniki selektywne



wybrane pasmo częstotliwości

### Pojęcia:

- charakterystyka, funkcja przenoszenia lub transmitancja kanału radiowego (*channel characteristics, channel transfer function*)

## Sygnal radiowy w dziedzinie częstotliwości - zaniki selektywne



$d1 = 100 \text{ m}$



$\vec{v} = 0$

$d2 = 200 \text{ m}$



### Przypadek I

$f = 3 \text{ GHz}$ :

$$|d1 - d2| = 100 \text{ m} = 1000 \lambda$$

=> **wzmocnienie odbieranego sygnału**

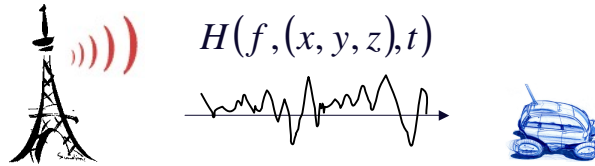
### Przypadek II -> zmiana częstotliwości o 0.05 %

$f = 2.9985 \text{ GHz}$ :

$$|d1 - d2| = 100 \text{ m} = 999.5 \lambda$$

=> **słabienie odbieranego sygnału**

## Charakterystyka kanału radiowego



1. Zaniki selektywne (wpływ częstotliwości)
2. Wpływ miejsca – lokalizacji odbiornika
3. Niestacjonarność (wpływ czasu) – zmiany w otoczeniu nadajnika i odbiornika skutkujące zmianami transmitancji kanału radiowego

## Zmienność charakterystyki kanału radiowego

**1. coherence bandwidth** - pasmo częstotliwości, w którym charakterystyka kanału jest w przybliżeniu stała:  $B_{coh} = \frac{1}{C_1 \cdot \sigma_\tau}$

$B \ll B_{coh}$  -> kanał radiowy z zanikiem płaskim

$B \gg B_{coh}$  -> kanał radiowy z zanikami selektywnymi

**2. coherence time** - okres czasu, po którym charakterystyka kanału znacząco się zmienia:  $T_{coh} = \frac{1}{C_2 \cdot \sigma_f}$

$T \ll T_{coh}$  -> zaniki wolne

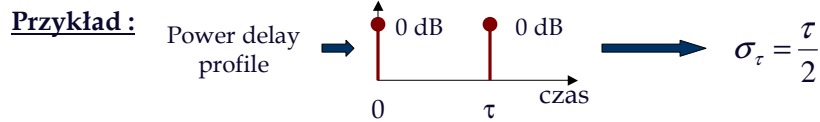
$T \gg T_{coh}$  -> zaniki szybkie

$C_1, C_2$  - stałe, wg różnych źródeł równe 2, 4 lub  $2\pi$

**3. coherence distance** - odległość, po przebyciu której charakterystyka kanału radiowego znacząco się zmienia.

UWAGA: Są to definicje nieściśle!

## Związek między *coherence bandwidth i delay spread*



Założmy, że dla częstotliwości  $f$  fale radiowe przychodzą w zgodnych fazach :

$$f = \frac{c}{\lambda} \rightarrow n \cdot \lambda = |d_1 - d_2| = c \cdot \tau \rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{n}{\tau}$$

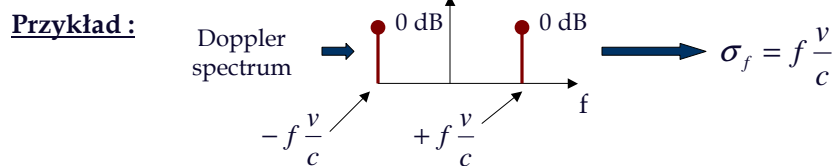
Jak bardzo musiałaby wzrosnąć częstotliwość, aby fale radiowe przychodziły w fazach przeciwnych ?

$$f_2 = \frac{c}{\lambda_2} \rightarrow (n+0.5) \cdot \lambda_2 = |d_1 - d_2| = c \cdot \tau \rightarrow f_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{n+0.5}{\tau}$$

Różnica tych częstotliwości :

$$f_2 - f = \frac{c}{\lambda_2} - \frac{c}{\lambda} = \frac{n}{\tau} - \frac{n+0.5}{\tau} = \frac{1}{2 \cdot \tau} = \frac{1}{4 \cdot \sigma_\tau}$$

## Związek między *coherence time i Doppler spread*



Założmy, że dla w chwili  $t = 0$  fale radiowe przychodzą w zgodnych fazach :

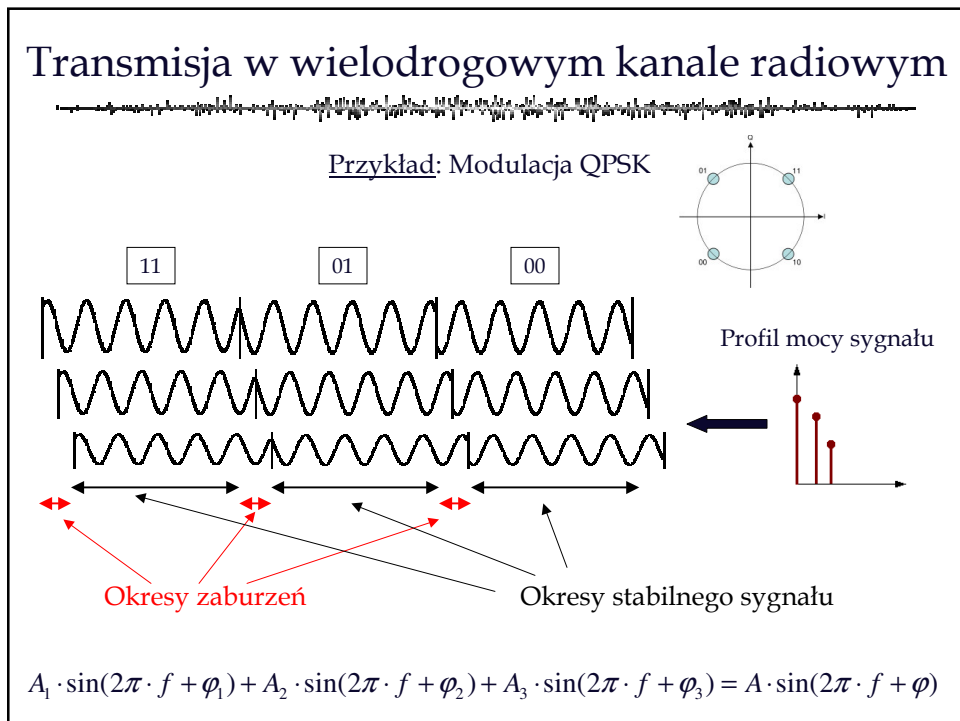
$$|d_1 - d_2| = n \cdot \lambda$$

Po jakim czasie  $t = T$  długości tras radiowych zmienią się do tego stopnia, że fale radiowe będą przychodzić w fazach przeciwnych ?

$$|d_1 + vT - (d_2 - vT)| = (n+0.5) \cdot \lambda$$

$$2vT = 0.5 \cdot \lambda$$

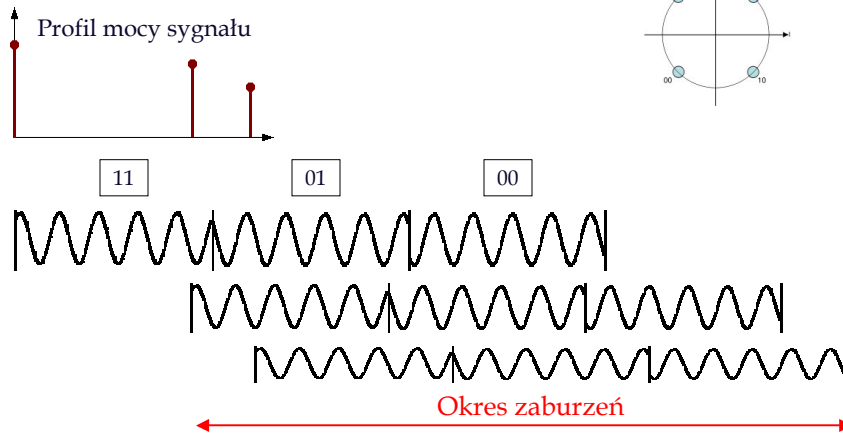
$$T = \frac{\lambda}{4v} = \frac{c}{f \cdot 4v} = \frac{1}{4f \cdot v/c} = \frac{1}{4 \cdot \sigma_f}$$



## Interferencje międzysymbolowe ISI



Przykład 2: Modulacja QPSK

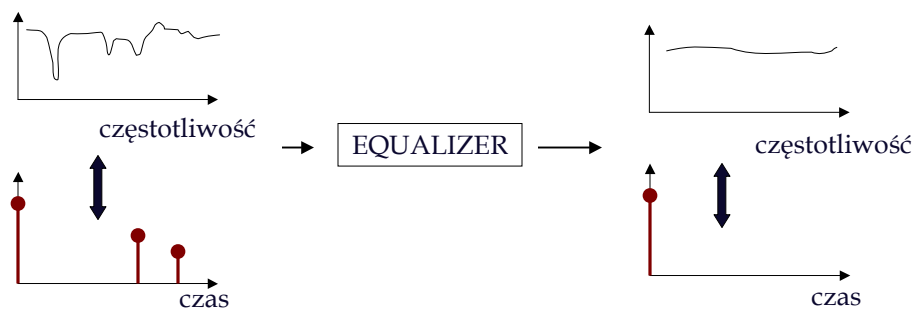


Energia danego symbolu odbierana jest w czasie trwania następnego symbolu => interferencje międzysymbolowe ISI (*inter-symbol interference*)

## Metody unikania interferencji międzysymbolowych ISI



1. Wydłużenie czasu trwania pojedynczego symbolu
  - okresy ochronne, podczas których sygnał nie jest dekodowany
  - transmisja z niską przepustowością
  - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM)
2. Zastosowanie korekcji adaptacyjnej (*equalization*) sygnału w odbiorniku:



## Korektory adaptacyjne

### Zero Forcing :

- > filtr FIR
- > kryterium: maksymalnie płaska transmitancja kanału radiowego
- UWAGA: w minimach transmitancji następuje silne wzmocnienie szumu radiowego

### Minimum Mean Square Error (MMSE) :

- > filtr FIR
- > kryterium: minimum błędu między sygnałem nadawanym a sygnałem na wyjściu korektora

### Korektory ze sprzężeniem zwrotnym DFE (Decision Feedback Equalizers) :

- > po zdekodowaniu fragmentu sygnału (jednego symbolu), repliki tego sygnału (ISI) usuwane są z następnych próbek

### Maximum Likelihood Sequence Estimation (MLSE) :

- > testowanie różnych możliwych sygnałów, które mogły zostać nadane i wybór tego najbardziej prawdopodobnego

## 4. DIVERSITY

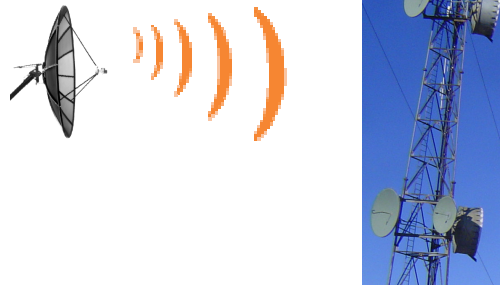


## Diversity

### Robocza definicja:

Technika jednoczesnego odbioru kilku sygnałów  
lub wyboru najlepszego z nich  
stosowana w celu uniknięcia zaników wielodrogowych

Przykład :



## Diversity

### Warunki stosowania technik *diversity* :

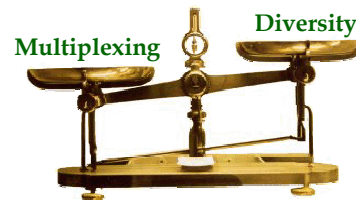
- podobne, porównywalne średnie wartości SNR wszystkich sygnałów
- mała korelacja między sygnałami :

$$\rho(X, Y) = \frac{E(X \cdot Y) - E(X) \cdot E(Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} < 0.5$$

### Techniki *diversity* :

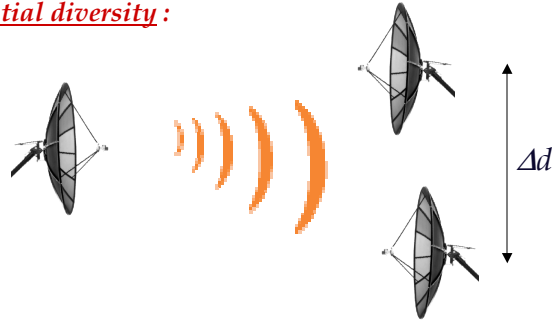
- *spatial diversity*
- *time diversity*
- *frequency diversity*
- *angular (pattern) diversity*
- *polarisation diversity*

### Kompromis :



## Diversity

### Spatial diversity :



Kanał radiowy Rayleigha :  $\Delta d > 0.5 \lambda$

Warunki propagacji LOS, mała ilość obiektów odbijających fale radiowe :  $\Delta d > 10 \lambda$

W ogólnym przypadku :  $\Delta d > coherence\ distance$

Wartości szacunkowe!

## Diversity

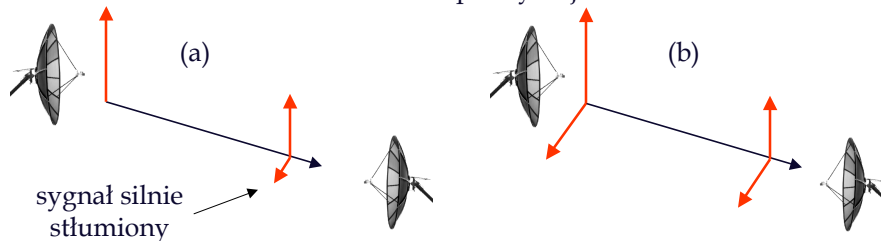
Time diversity - powtarzanie transmisji (*repetition coding*), kody FEC, ARQ

$$\Delta t > coherence\ time$$

Frequency diversity :  $\Delta f > coherence\ bandwidth$

- informacja jest transmitowana (rozpraszana) w szerokim paśmie częstotliwości -> techniki CDMA, OFDM, *frequency hopping*

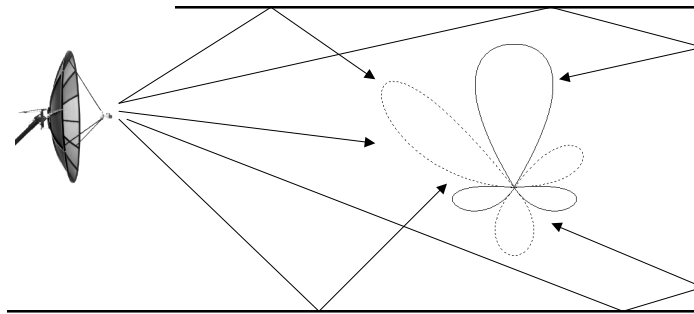
Polarisation diversity - nadawanie na jednej (a) lub dwóch (b) polaryzacjach, odbiór na obu polaryzacjach





## Diversity

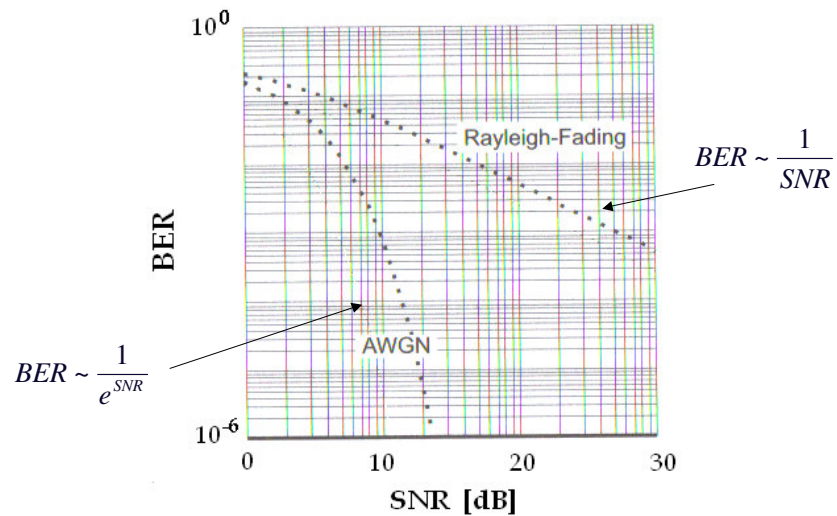
Angular diversity:



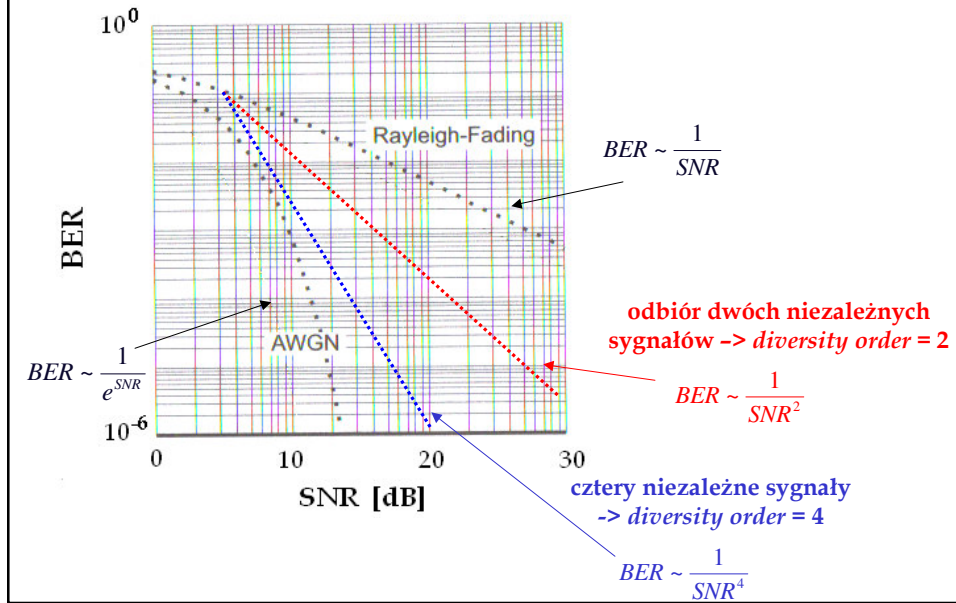
antena odbiorcza  
z dwoma ortogonalnymi  
diagramami kierunkowymi

## Bitowa stopa błędów BER

Porównanie zależności  $BER = f(SNR)$   
dla kanału radiowego AWGN i kanału z zanikami Rayleigha :

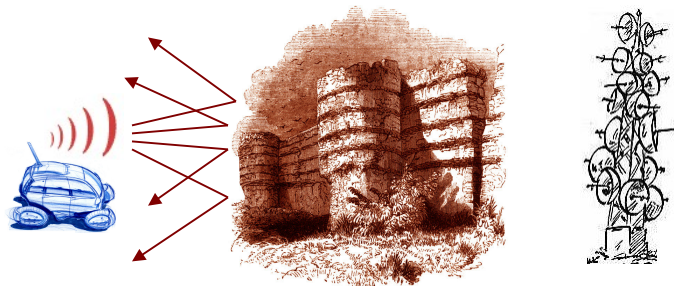


## Bitowa stopa błędów BER



## Macrodiversity

Przypadek **zaników wolnych** - techniki *diversity* są nieskuteczne :



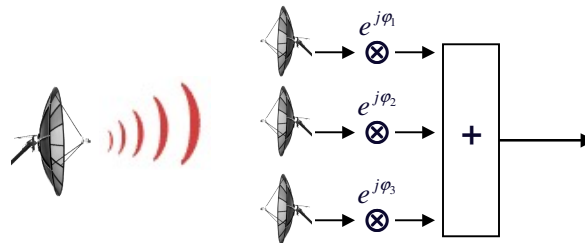
### Rozwiązanie - macrodiversity :

- *repeaters*
- *simulcast* - równoczesna transmisja z różnych stacji bazowych lub nadajników radiowych

## Jak wykorzystać jednoczesny odbiór kilku niezależnych sygnałów ?

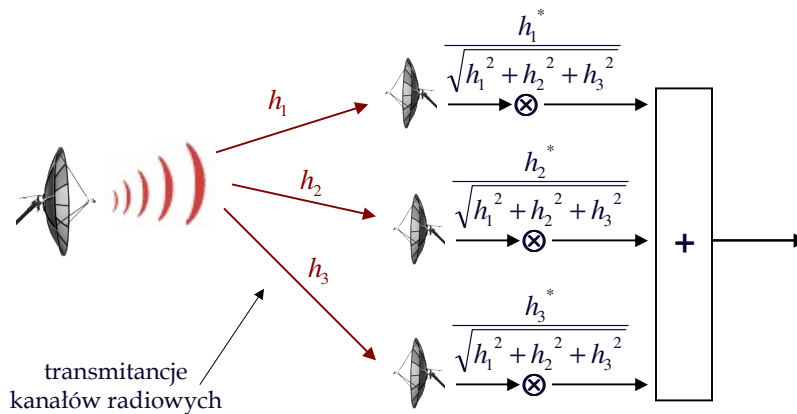
### Metody odbioru – combining techniques :

- *selection diversity combining* -> wybór najlepszego sygnału
- *switched diversity combining* -> gdy dany sygnał spadnie poniżej pewnego ustalonego poziomu, następuje przełączenie odbiornika na inny z odbieranych sygnałów
- *equal gain combining* -> kompensacja przesunięć fazowych odbieranych sygnałów i zsumowanie ich wszystkich :



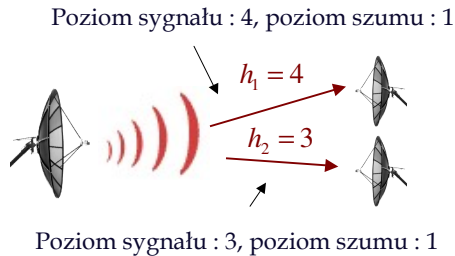
## Jak wykorzystać jednoczesny odbiór kilku niezależnych sygnałów ?

Metoda optymalna – *maximal ratio combining (MRC)* :



## Dlaczego MRC jest metodą optymalną ?

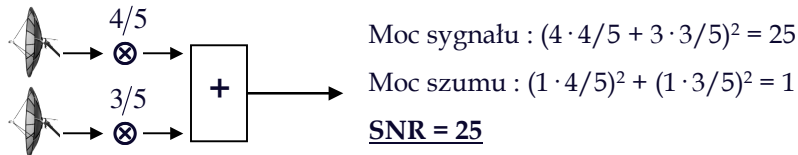
Przykład :



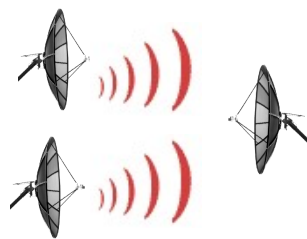
Metoda I - wybór lepszego sygnału :

Moc sygnału :  $4^2 = 16$ , moc szumu :  $1^2 = 1$ , **SNR = 16**

Metoda II - maximal ratio combining :



## Diversity po stronie nadawczej



Schemat nadawania zaproponowany przez S. Alamoutiego :

	czas $t$	czas $t+T$
antena 1	$x_1$	$-x_2^*$
antena 2	$x_2$	$x_1^*$

- rozwiązanie porównywalne z zastosowaniem dwóch anten po stronie odbiorczej (sygnał słabszy o 3 dB)
- możliwość stosowania techniki *spatial diversity* w łączy *downlink* w sieci komórkowej (dwie anteny na stacji bazowej, jedna antena w telefonie użytkownika)

**Dziękuję za uwagę**