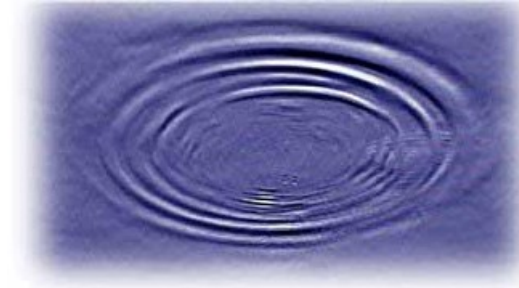
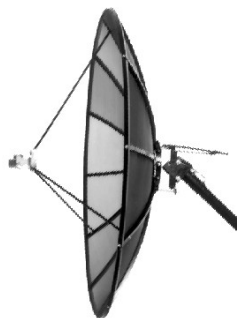
The background is a dark blue, textured field resembling a starry sky or nebula. A bright starburst with a white core and blue halo is positioned in the center. Two thin, light blue lines intersect at the starburst, forming an 'X' shape that extends towards the corners of the frame.

**Propagacja  
sygnałów radiowych,  
modele, ray tracing**

# Propagacja w przestrzeni swobodnej



dla nadawczej anteny  
izotropowej:



$$P_R = \frac{P_T}{4\pi \cdot r^2} \cdot A_S$$

powierzchnia  
skuteczna anteny



dla odbiorczej anteny  
izotropowej:

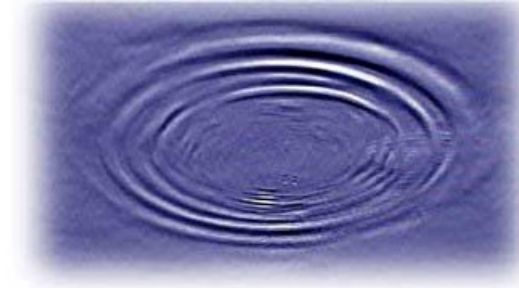
$$A_S = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$



$$P_R = P_T \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi \cdot r} \right)^2$$

# Propagacja w przestrzeni swobodnej

---



Równanie Friisa :

$$P_R = P_T \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi \cdot r} \right)^2$$

$$c = \lambda \cdot f$$

↙

$$3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

Tłumienie wolnej przestrzeni FSL (Free Space Loss) :

$$FSL = \frac{P_T}{P_R} = \left( \frac{4\pi \cdot r}{\lambda} \right)^2$$

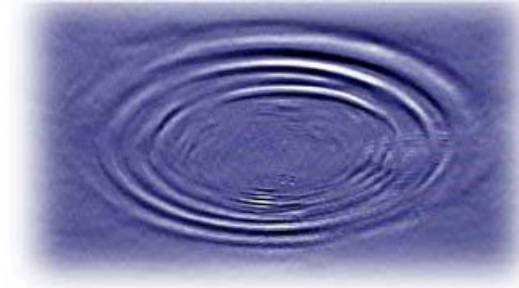
W mierze decybelowej:

↓  $10 \log_{10} (...)$

$$FSL_{dB} = 32.44 + 20 \log_{10} r_{[m]} + 20 \log_{10} f_{[GHz]}$$

# Zjawiska propagacyjne

---



Interferencja

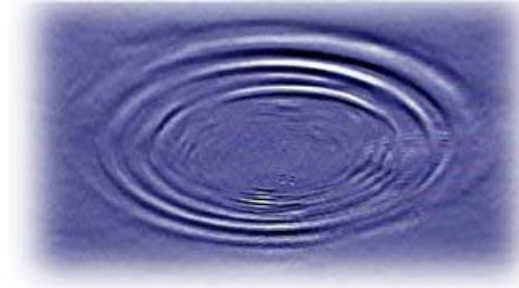
Odbicie

Załamanie (refrakcja)

Rozproszenie

Dyfrakcja

# Odbicie i załamanie



## Prawa Snella (Snelliusa):

1. równość kątów padania i odbicia
2. prawo załamania:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2}}{\sqrt{\epsilon_1 \mu_1}} = \frac{n_2}{n_1}$$

- współczynnik załamania w atmosferze:

$$n = 1 + N \cdot 10^{-6}$$

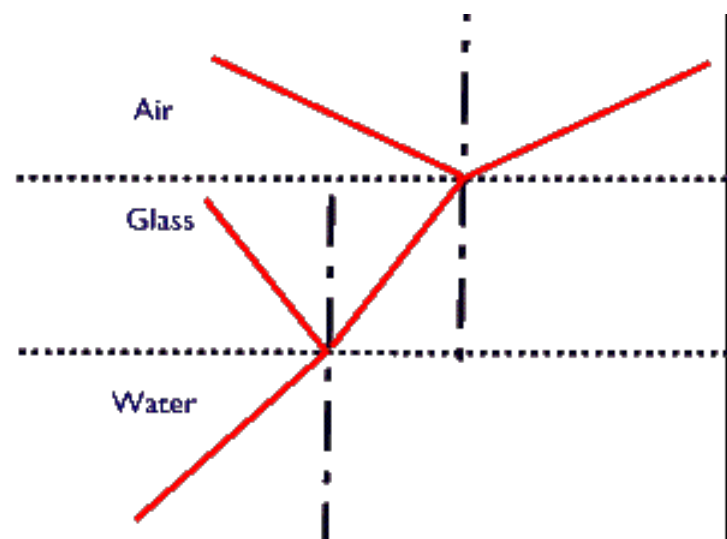
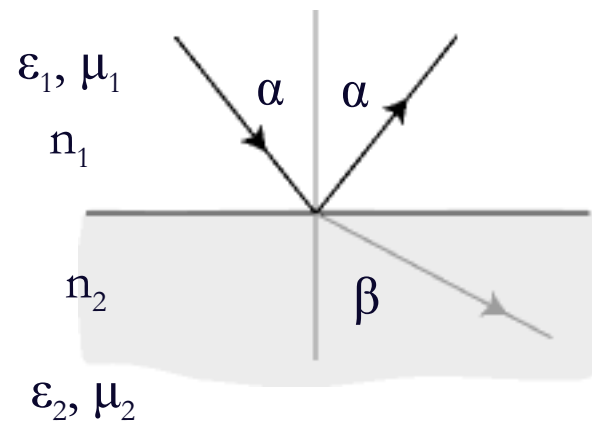
- wskaźnik refrakcji:

$$N = \frac{77.6}{T} (p + 22.2 \cdot \rho)$$

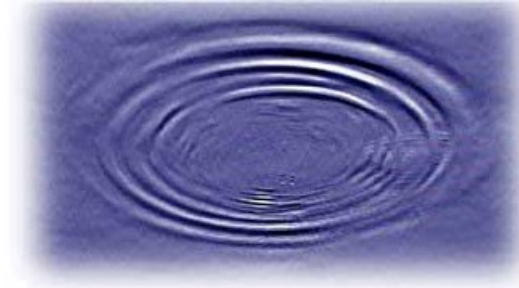
$T$  – temperatura powietrza [K]

$p$  – ciśnienie atmosferyczne [hPa]

$\rho$  – gęstość pary wodnej [g/m<sup>3</sup>]



# Zjawiska propagacyjne - refrakcja



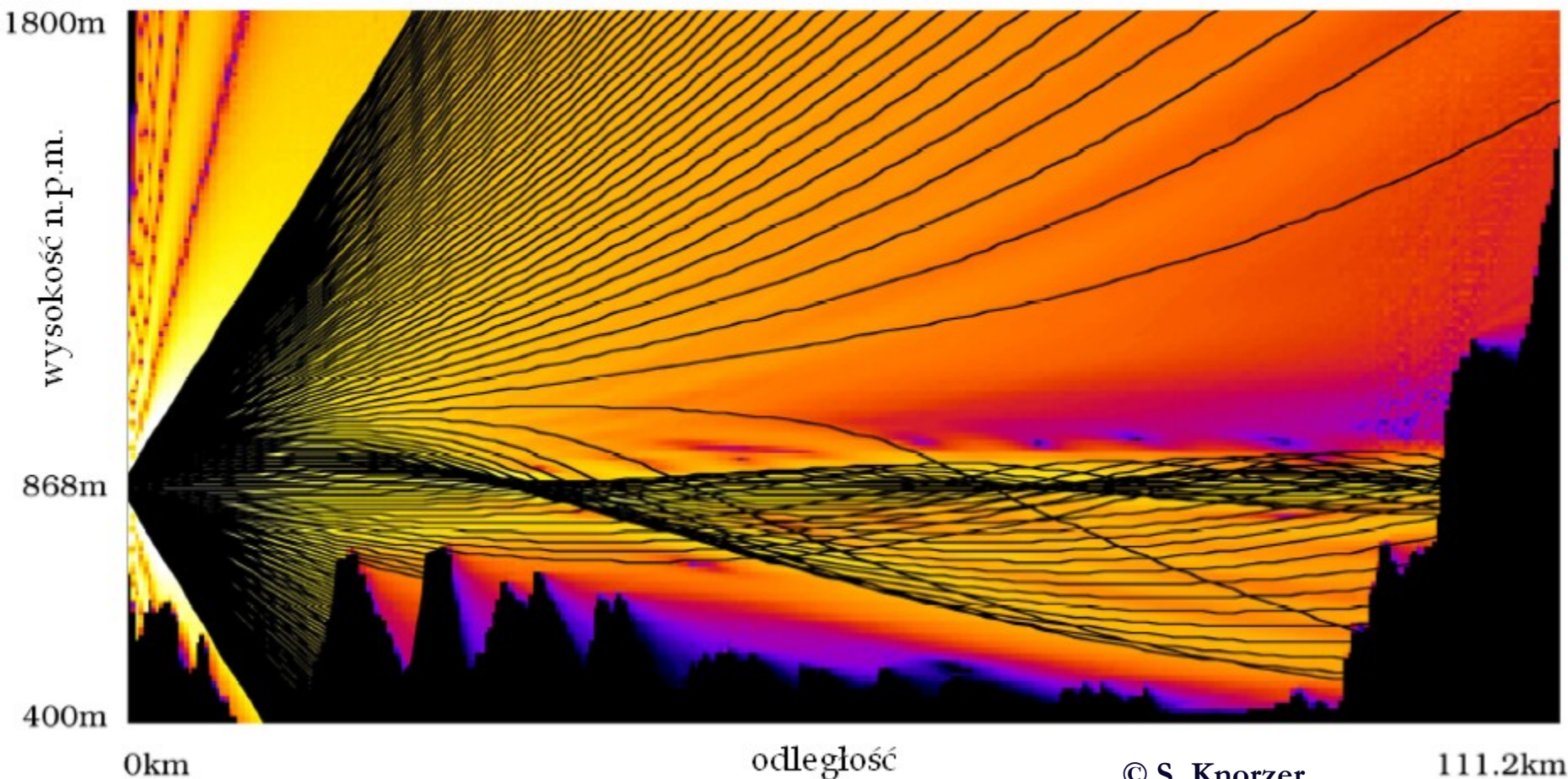
łumienie sygnału

$\geq 170\text{dB}$

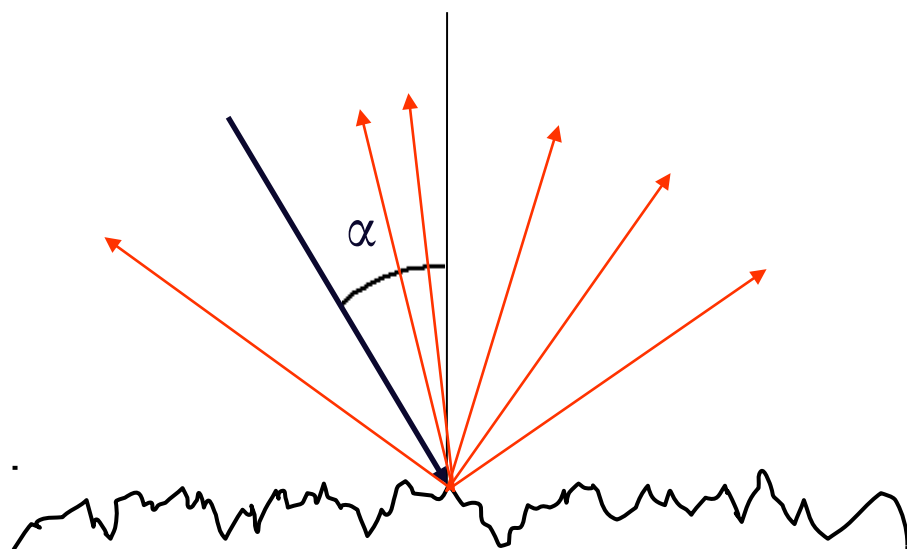
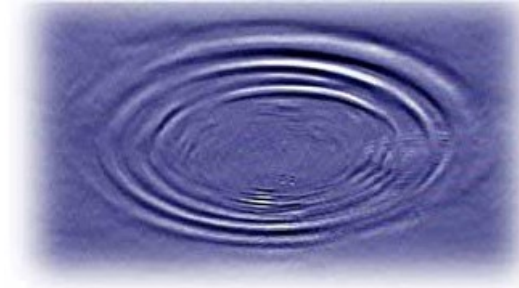


$\leq 100\text{dB}$

$f = 300\text{ MHz}$



# Zjawiska propagacyjne - rozproszenie



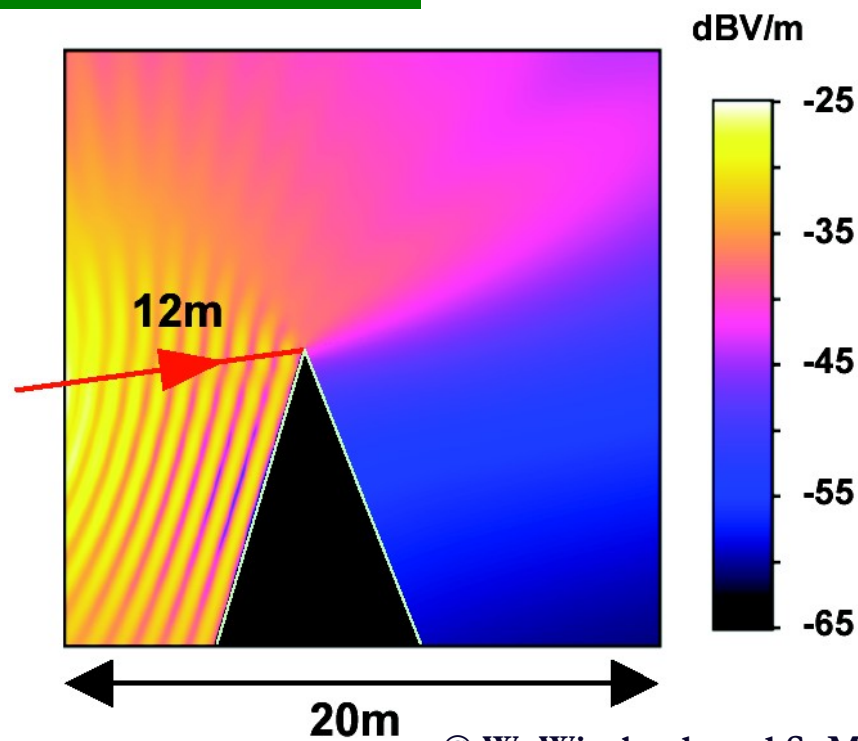
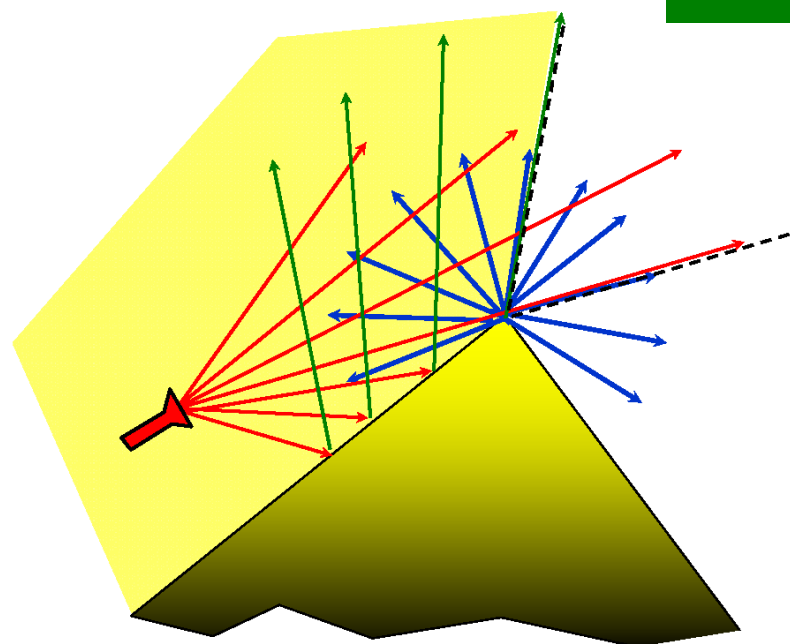
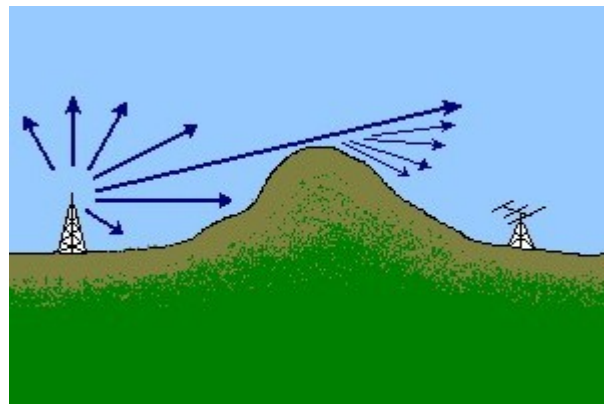
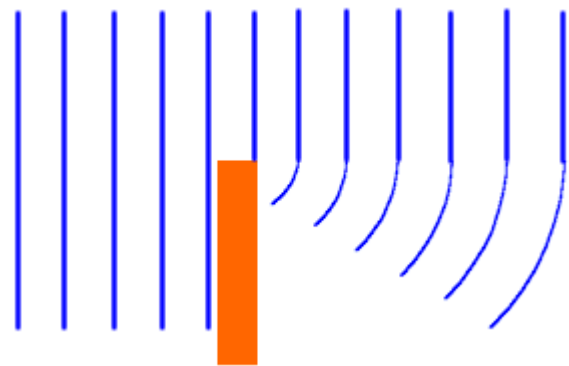
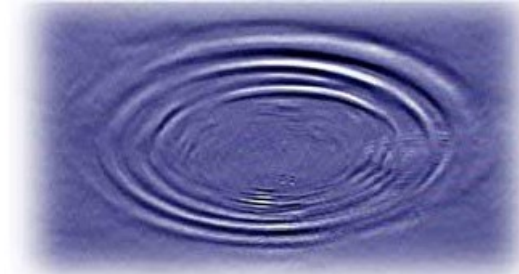
gdy kryterium nie jest spełnione,  
to fala się rozprasza

kryterium Fraunhofera  
na szorstkość powierzchni:

$$\sigma_h \leq \frac{\lambda}{32 \cos \alpha}$$

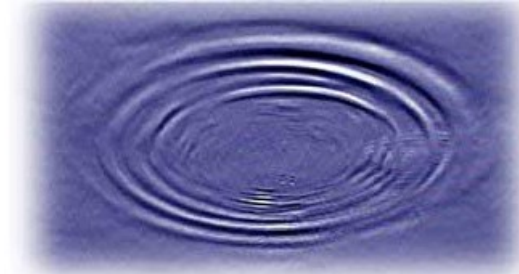
$\sigma_h$  – odchylenie standardowe  
nierówności powierzchni

# Zjawiska propagacyjne - dyfrakcja



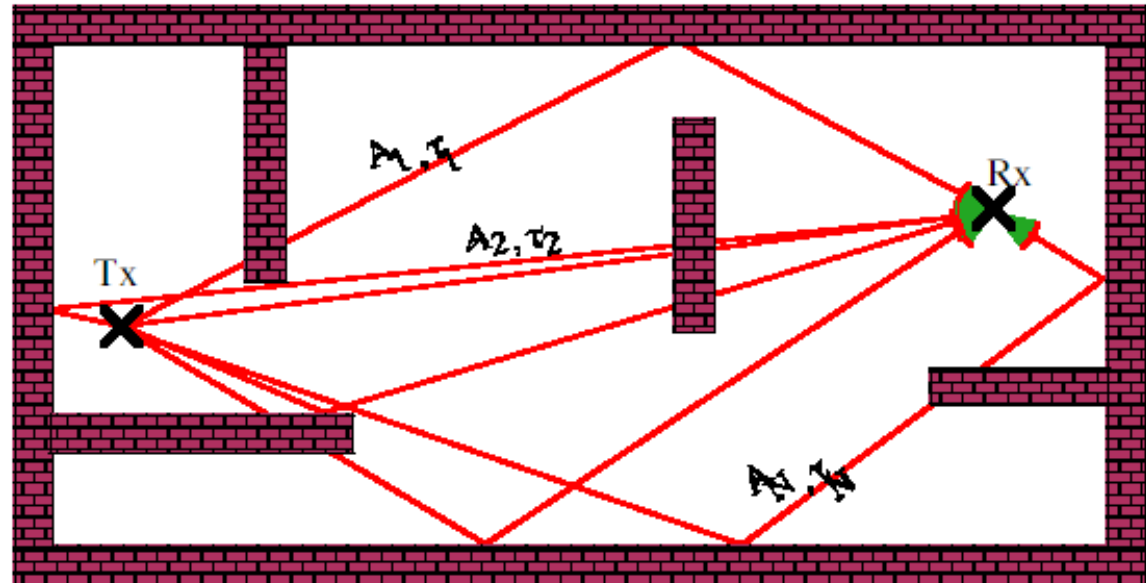


# Optyka geometryczna – modelowanie kanału radiowego



Warunki:

- kryterium Fraunhofera
- $\lambda \ll$  rozmiar obiektów w otoczeniu



© S. Knorz

Zastosowania:

- środowisko wewnątrz budynków (indoor)
- obszary miejskie

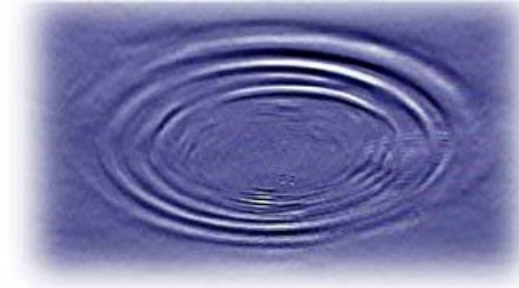
Metody:

- shadowing
- ray launching
- ray tracing

**Dlaczego promienie ???**

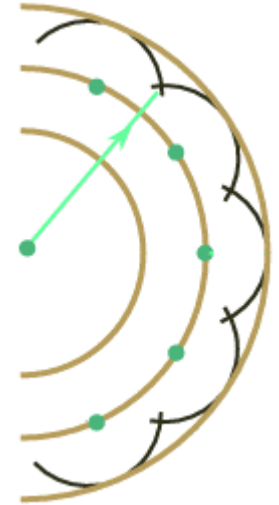
# Promienie radiowe w optyce geometrycznej

---

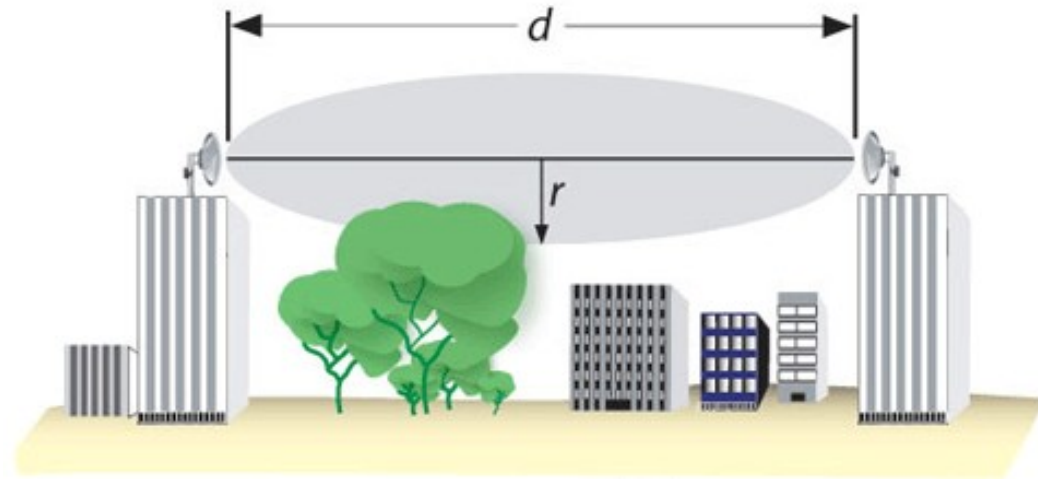
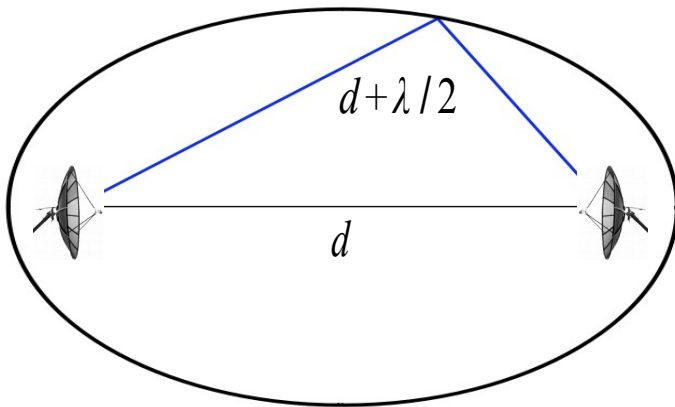


## Zasada Huygensa:

Każdy punkt na czole fali jest źródłem nowej fali kulistej:



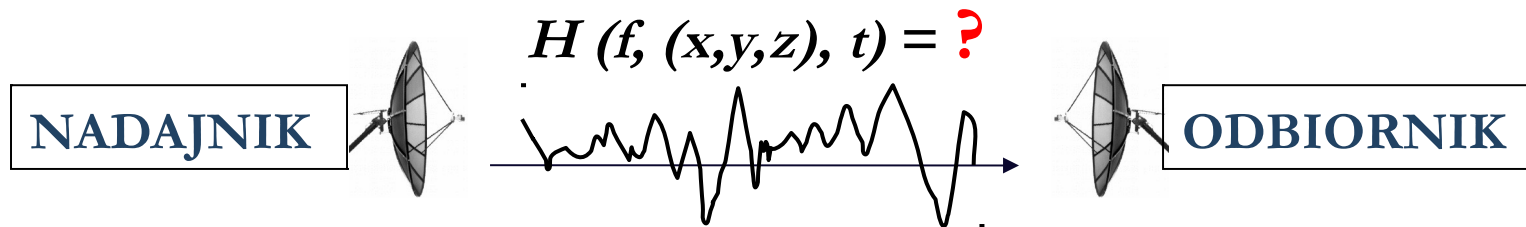
## Strefy Fresnela:



# Modele kanałów radiowych



# Modele kanału radiowego



## Pomiary ?

- uciążliwe, długotrwałe, kosztowne, wymagające sprzętu radiowego

Częstotliwość

Odległość Tx-Rx

Charakterystyka  
środowiska  
propagacyjnego



Profil mocy kanału

Widmo dopplerowskie

Tłumienie trasy  
radiowej

Polaryzacja

Kierunki propagacji  
sygnałów

# Zastosowania modeli kanału radiowego

NADAJNIK



$$H(f, (x, y, z), t) = ?$$



ODBIORNIK

Planowanie sieci radiowych:  
pokrycia terenu, zasięgu,  
mocy nadajników,  
interferencji, itp.

Projektowanie sieci  
bezprzewodowych: technik  
kodowania, modulacji,  
przetwarzania sygnałów,  
projektowanie i testowanie sprzętu

Opisanie konkretnych  
warunków  
propagacyjnych  
-> modele empiryczne  
i deterministyczne

Zobrazowanie w sposób ogólny  
typowych warunków  
propagacyjnych  
-> modele stochastyczne

# Modele empiryczne

---

- oparte na pomiarach, danych eksperymentalnych
- pozwalają wyliczyć parametry kanału radiowego (np. tłumienie, *power delay profile*) na podstawie danych o środowisku propagacyjnym – długości trasy radiowej, średnich wysokościach anten, rodzaju zabudowania terenu, itp.
- przykłady modeli:
  - Okumura-Hata,
  - Walfish-Ikegami,
  - COST 231 (rozbudowane wersje dwóch poprzednich),
  - ITU-R M.1225
  - WINNER (2-6 GHz) np. dla WiFi i 4G (LTE)
  - mmMagic (28 GHz) dla wybranych pasm sieci 5G
  - **3GPP** (szeroki zakres częstotliwości) również dla sieci 5G

# Modele kanału radiowego dla sieci mobilnych

---

## Modele Okumury-Haty i COST 231-Hata

- modele empiryczne, bazujący na pomiarach wykonanych w okolicach Tokio jeszcze w latach 60-tych
- założenia: duże komórki, anteny stacji bazowych wzniesione wysoko ponad zabudowę terenu
- częstotliwości do 2 GHz

$$\text{Path Loss [dB]} = A + B \cdot \log(d) + C$$

d -> odległość [w kilometrach]

A, B, C -> czynniki zależne od częstotliwości, wysokości, na której znajdują się anteny stacji bazowej i terminala ruchomego oraz środowiska propagacji  
(*metropolitan areas, small and medium-size cities, suburban, rural environments*)

## Przykład (dla niedużego miasta, $f < 1500$ MHz):

$$\begin{aligned} \text{Path Loss [dB]} = & 68.75 + 27.72 \cdot \log(f) - 13.82 \cdot \log(h_b) + \\ & + [44.9 - 6.55 \log(h_b)] \cdot \log(d) - [1.1 \log(f) - 0.7] \cdot h_m \end{aligned}$$

$h_b$ ,  $h_m$  -> wysokości anten stacji bazowej i terminala ruchomego [w metrach]

# Modele kanału radiowego dla sieci mobilnych

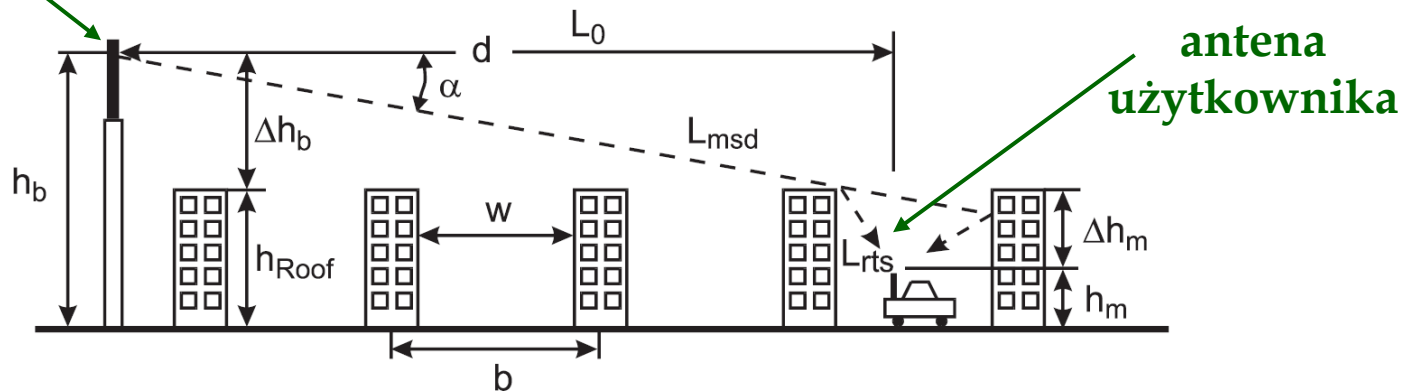
## Model COST 231-Walfish-Ikegami

- model empiryczny, odpowiedni dla małych komórek ( $d < 1\text{km}$ ) w środowisku miejskim
- uwzględnienie rodzaju zabudowy: wysokości budynków i szerokości ulic
- analizowane zjawiska: propagacja w kanionach ulicznych, rozproszenie i załamanie fali radiowej na dachach budynków
- uwzględnienie wpływu częstotliwości (do 2 GHz) i wysokości anten

$$\text{Path Loss [dB]} = \text{funkcja}(f, d, h_b, h_m, w, b, \alpha, h_{\text{Roof}}, \dots)$$

antena stacji  
bazowej

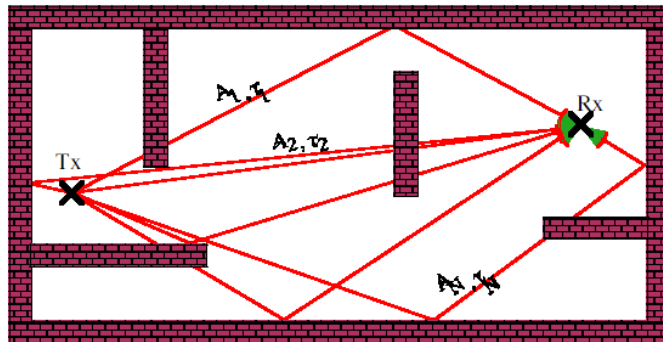
Typowy scenariusz propagacyjny:



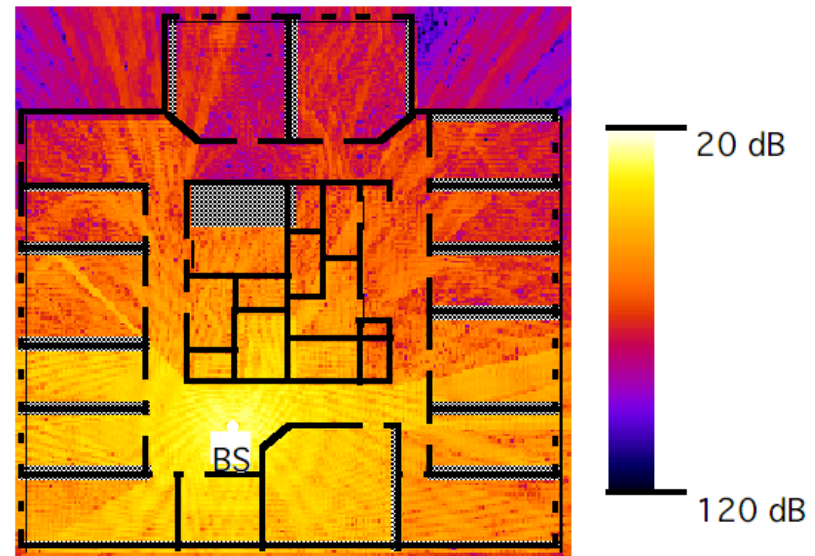


# Modele deterministyczne

- powstałe na bazie symulacji i obliczeń numerycznych
- parametry kanału radiowego są obliczane na podstawie bardzo dokładnych danych geometrycznych o obiektach znajdujących się w otoczeniu nadajnika i odbiornika
- przykłady : *ray tracing*, *ray launching*, numeryczne rozwiązywanie równań Maxwella



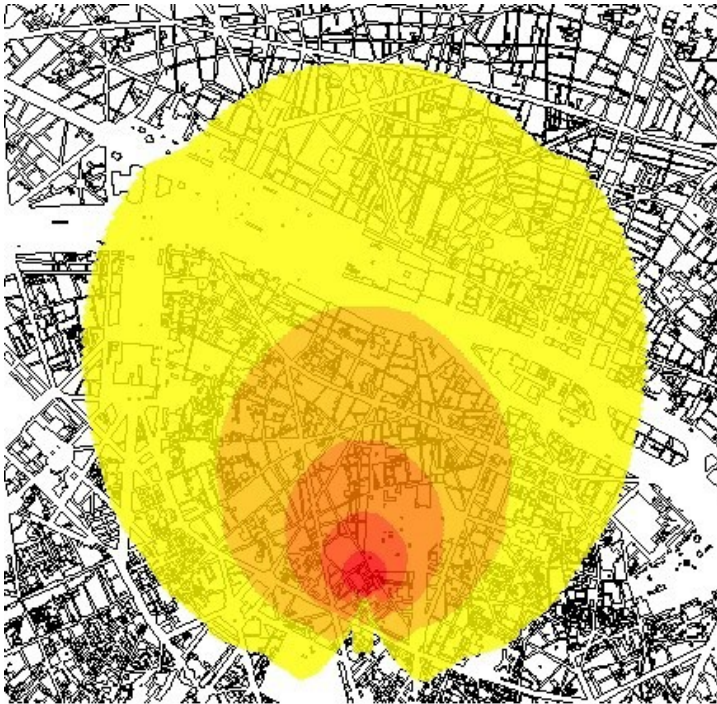
© S. Knorz



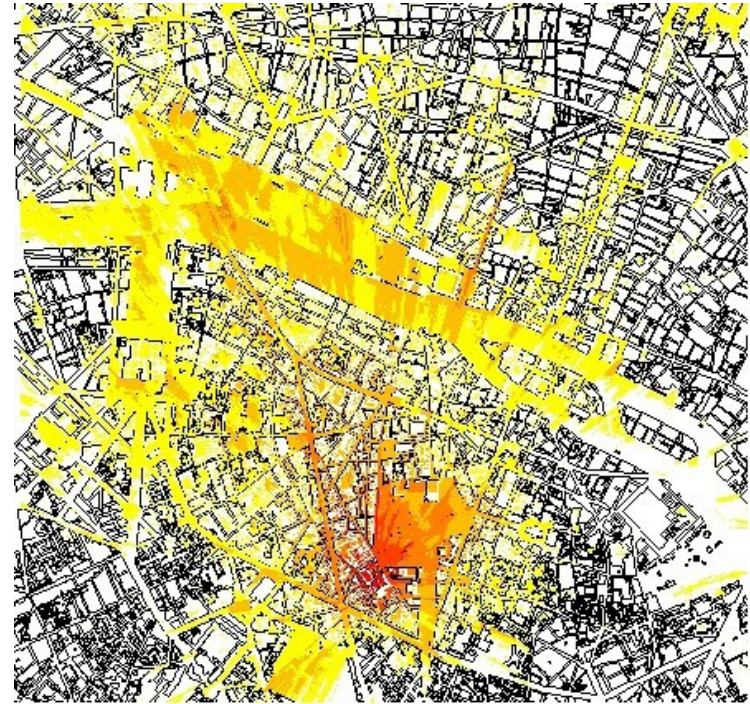
# Modele empiryczne vs ray tracing

---

## Przykładowy zasięg stacji bazowej:



Model Cost 231-Hata



Obliczenia ray tracing

© Y. Lostanlen

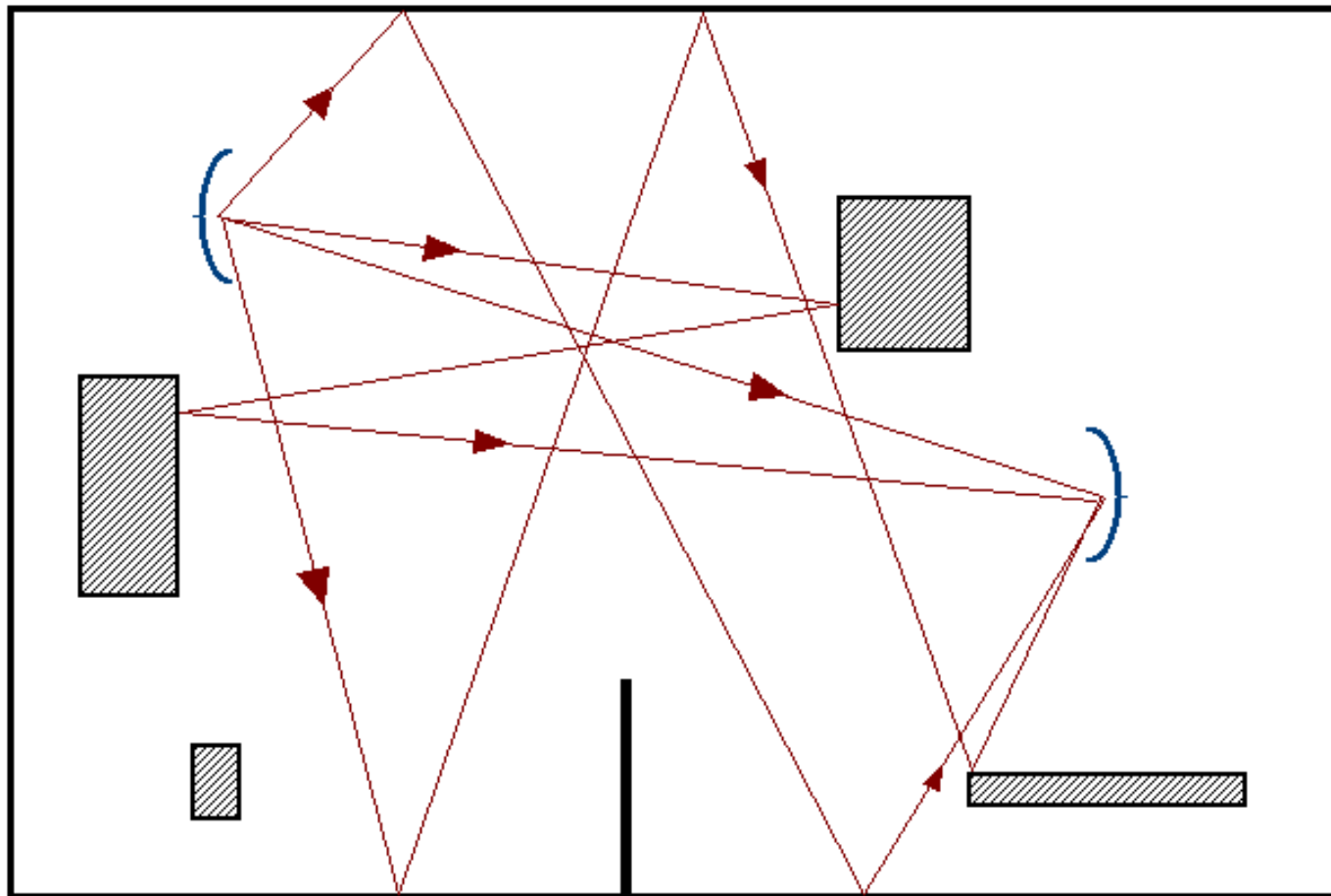
# Ray tracing



metoda analizy propagacji wielodrogowej  
w środowisku miejskim  
i wewnątrz budynków

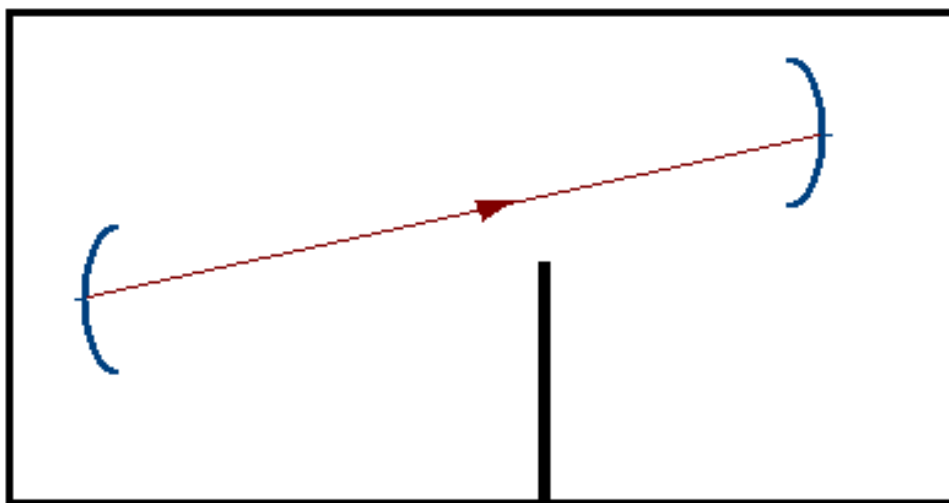
# Ray tracing - przykład

---



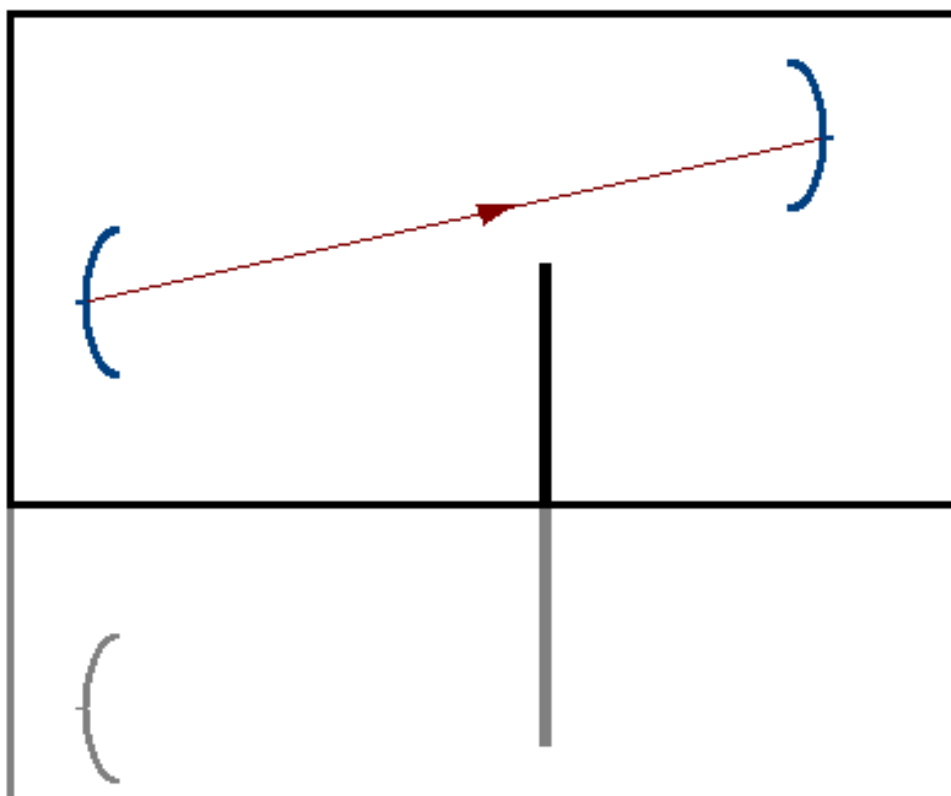
# Ray tracing - przykład

---



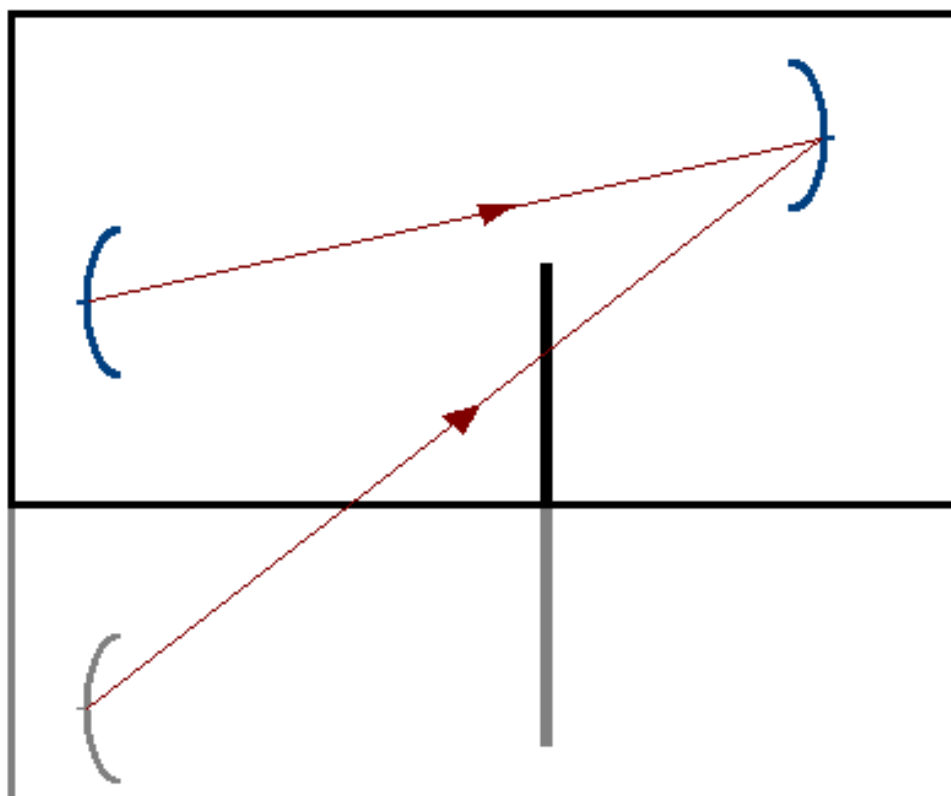
# Ray tracing - przykład

---



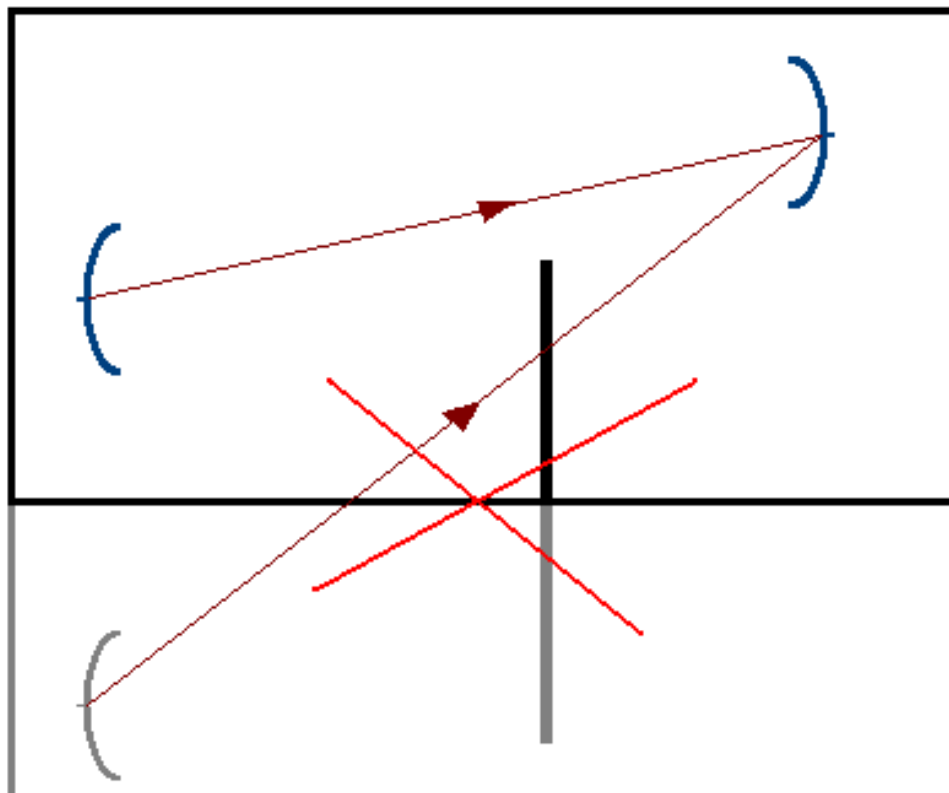
# Ray tracing - przykład

---



# Ray tracing - przykład

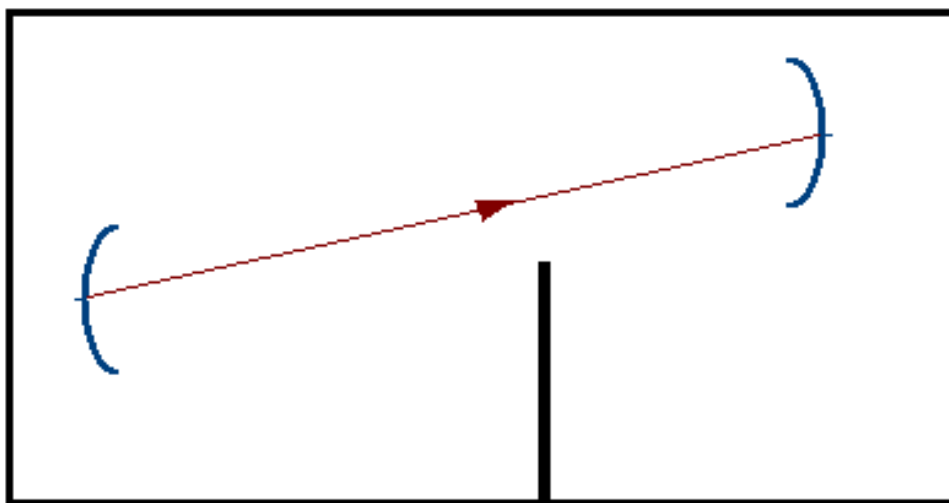
---





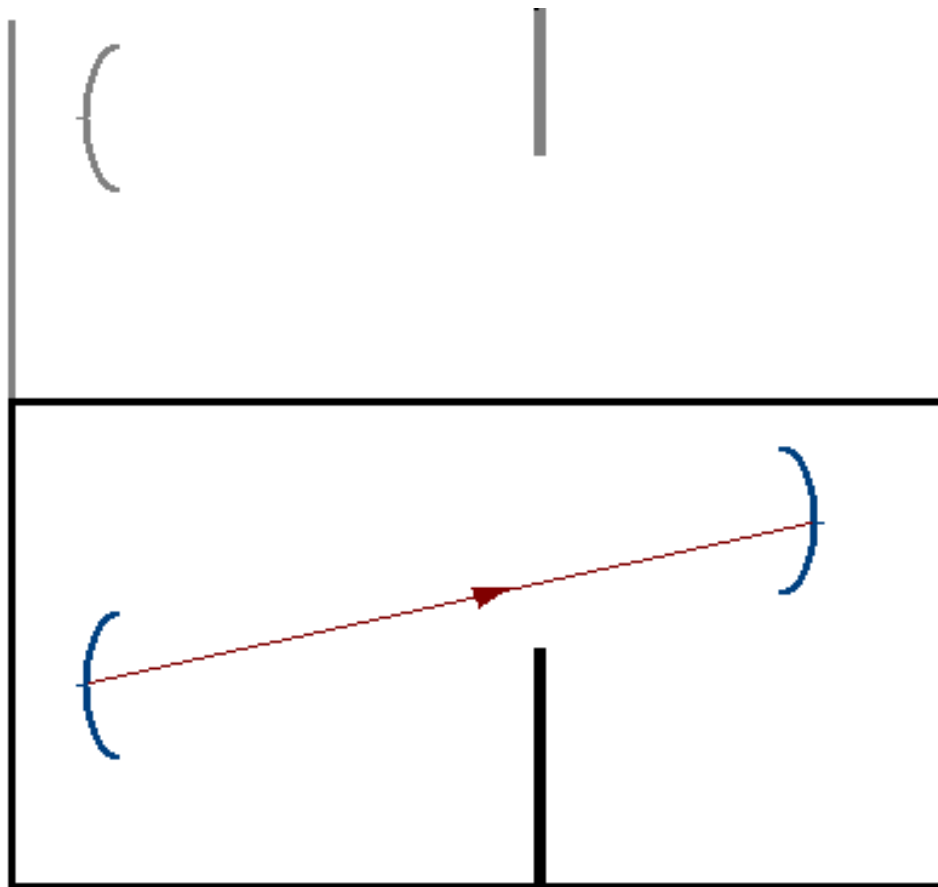
# Ray tracing - przykład

---



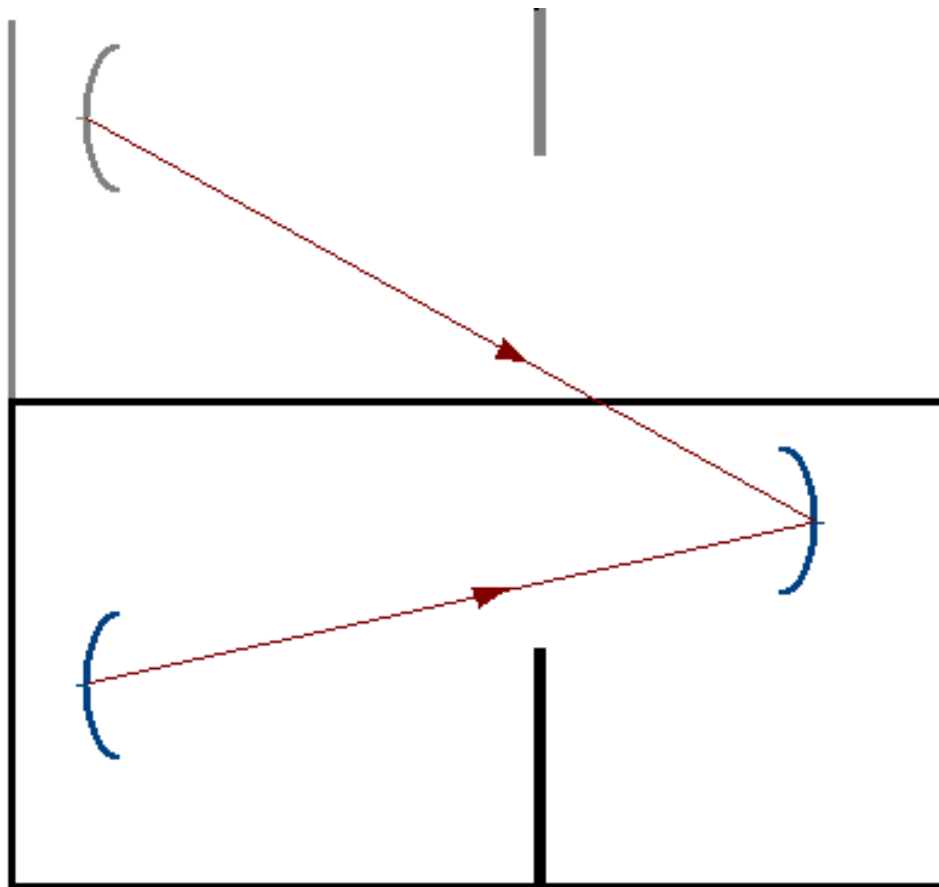
# Ray tracing - przykład

---



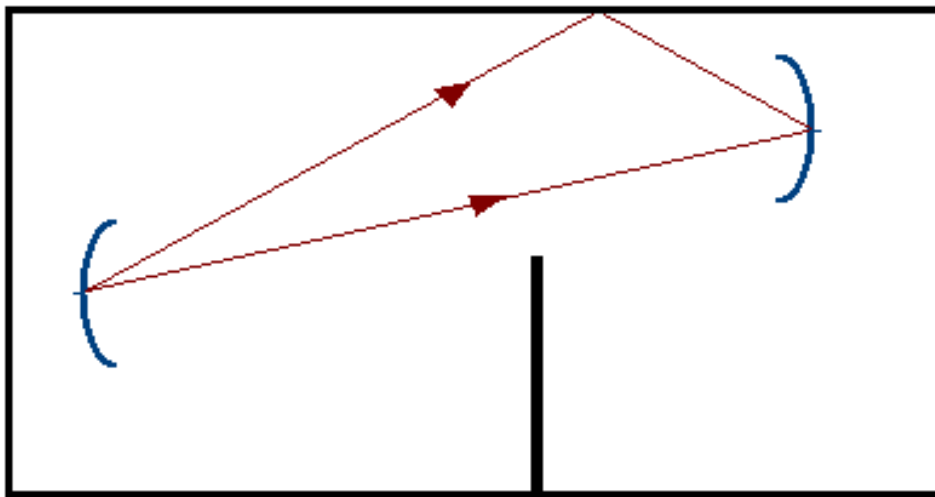
# Ray tracing - przykład

---



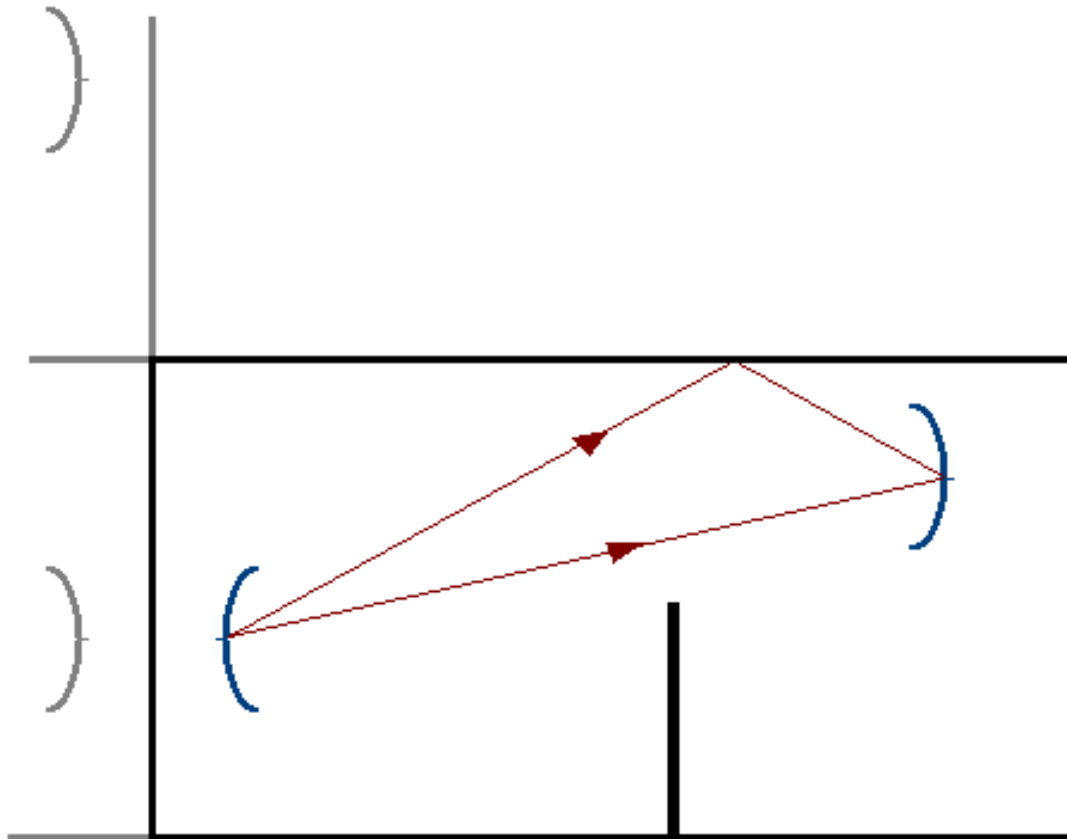
# Ray tracing - przykład

---



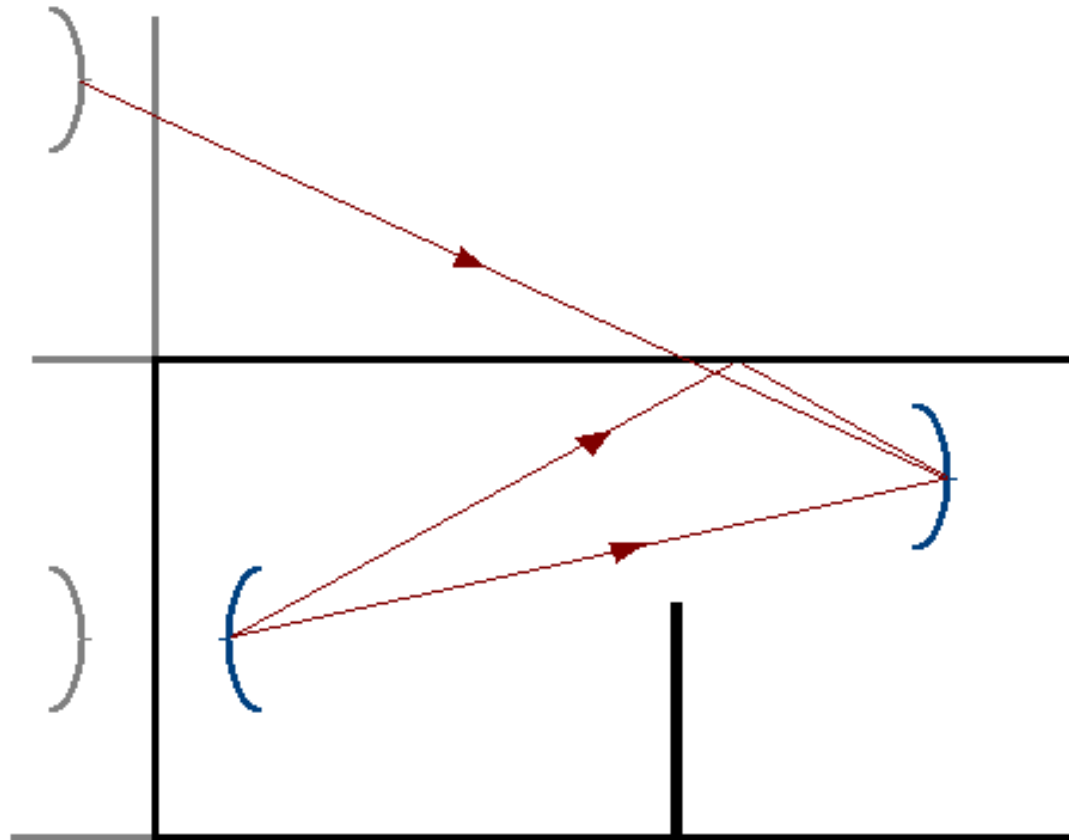
# Ray tracing - przykład

---



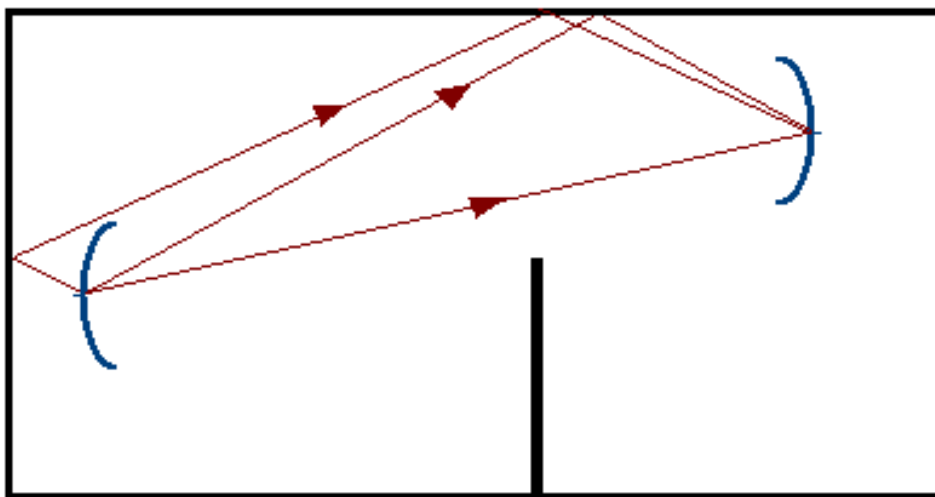
# Ray tracing - przykład

---



# Ray tracing - przykład

---



# Ray tracing - obliczenia

---

Na antenie odbiorczej sumują się (fazowo) amplitudy sygnałów:

$$A = A_1 e^{j\varphi_1} + A_2 e^{j\varphi_2} + \dots + A_n e^{j\varphi_n}$$

Amplituda sygnału jest proporcjonalna do pierwiastka z mocy:

Równanie Friisa:

$$P_R = P_T \left( \frac{\lambda}{4\pi \cdot r} \right)^2$$

$$A_i \sim \sqrt{P_T} \left( \frac{\lambda}{4\pi \cdot r} \right)$$

Transmitancja jednego promienia radiowego





# Ray tracing - obliczenia

---



Transmitancja kanału radiowego:

$$H = H_1 + H_2 + \dots + H_n$$

Transmitancja pojedynczego promienia radiowego:

$$H_i = R_i \cdot \frac{\lambda}{4\pi r_i} \cdot e^{\frac{-j2\pi r_i}{\lambda}}$$

$R_i$   $\rightarrow$  iloczyn wszystkich współczynników odbicia dla  $i$ -tego promienia,

$r_i$   $\rightarrow$  długość drogi pokonywanej przez  $i$ -ty promień radiowy,

$\lambda$   $\rightarrow$  długość fali nośnej.

# Ray tracing - obliczenia

---



Moc sygnału jest proporcjonalna do kwadratu amplitudy sygnału:

$$P_R = P_T \cdot |H|^2$$

W skali logarytmicznej:

$$P_{R[\text{dBm}]} = P_{T[\text{dBm}]} + 20 \log_{10} |H|$$

# Ray tracing - podsumowanie

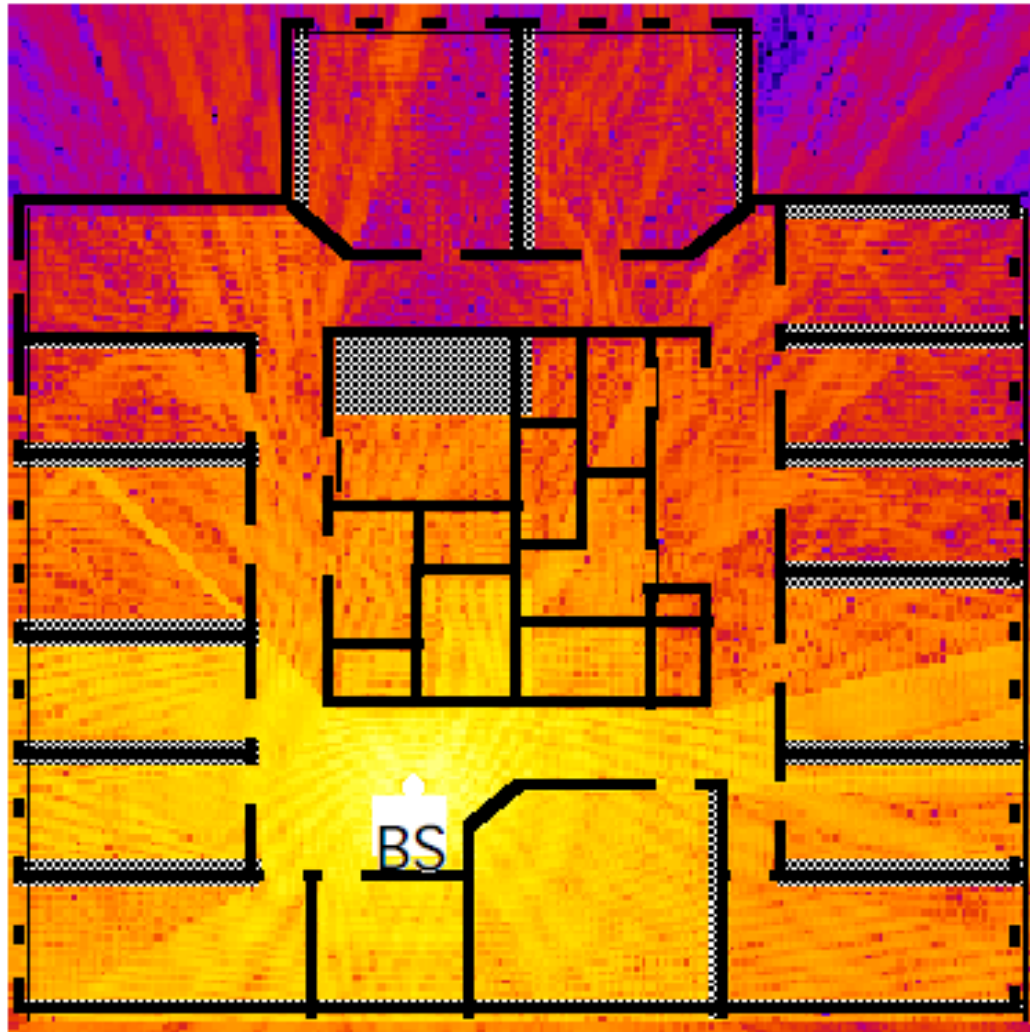
---

1. Analiza możliwych dróg propagacji między anteną nadawczą i odbiorczą
2. Odbicie fali radiowej :
  - dwie polaryzacje fali – różne współczynniki odbicia
  - współczynniki odbicia zależne od kąta padania fali radiowej i przenikalności dielektrycznej płaszczyzny odbicia
3. Ograniczenie liczby odbić fali radiowej
4. Inne zjawiska : rozproszenie, dyfrakcja, załamanie
5. Superpozycja (sumowanie) fal radiowych w odbiorniku

# Optyka geometryczna

– efekt techniki **ray tracing**

---



Tłumienie sygnału:

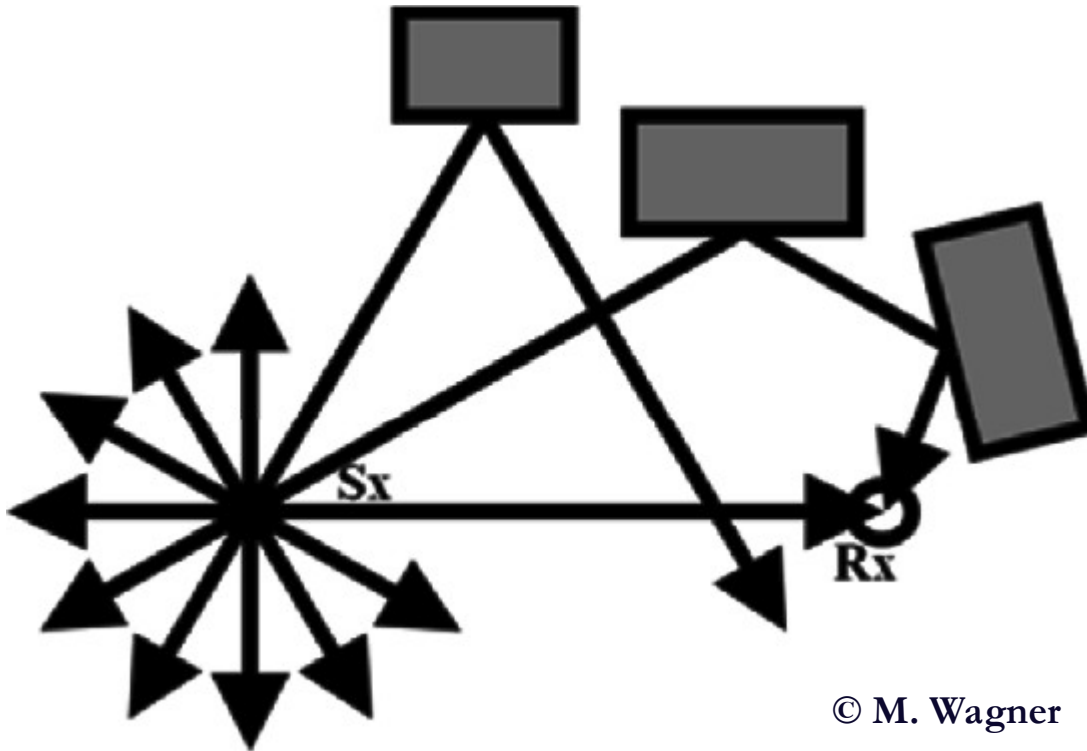
20 dB

$f = 856.5$  MHz

120 dB

# Ray launching

Wystrzeliwywanie promieni z nadajnika z określoną rozdzielczością kątową



© M. Wagner

# Źródło danych terenowych – point cloud city data

---

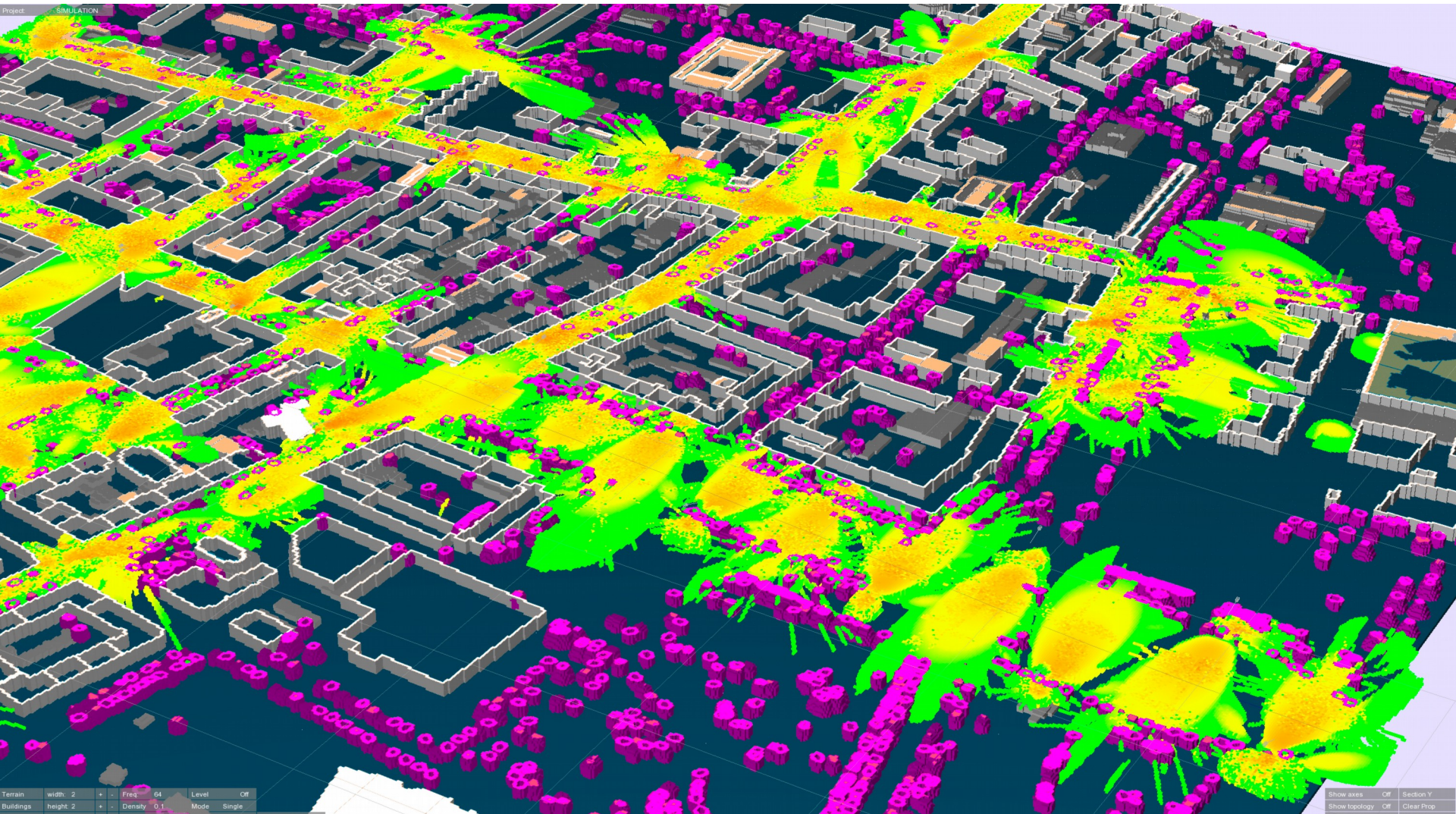
© virtualcitycloud.de

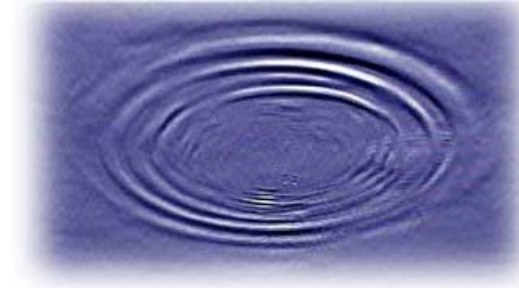


# Optyka geometryczna

– przykład wyników typu **ray launching**

© Blare.Tech Poland





**Dziękuję za uwagę**