

Parametry anten w
rzeczywistym środowisku
propagacyjnym oraz ich wpływ
na efektywność łącza radiowego

Hardware Design Masterclasses - Wrocław
13 listopada 2023

Marcin Rybakowski

Nokia – Mobile Networks – Architecture & Specification

marcin.rybakowski@nokia.com

The Nokia logo is centered within a large white circle on a blue background. The logo itself consists of the word "NOKIA" in a white, sans-serif, uppercase font.

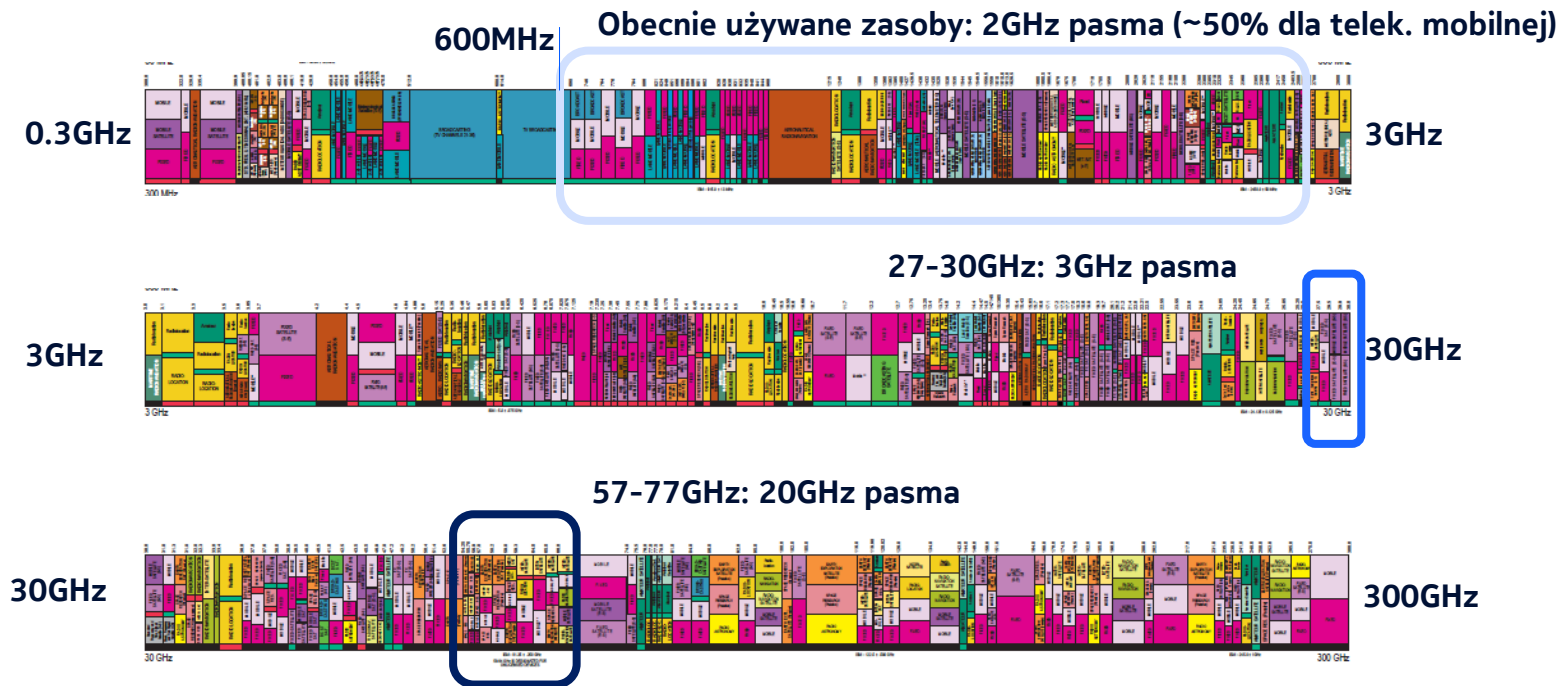
NOKIA

Plan prezentacji

1. Wprowadzenie
2. Antena w idealnym i rzeczywistym środowisku propagacyjnym
3. Wybrane wyniki pomiarów anten w różnych środowiskach propagacyjnych
4. Estymacja efektywnego zysku anteny i jego wpływ na efektywność łącza radiowego
5. Podsumowanie

Wprowadzenie

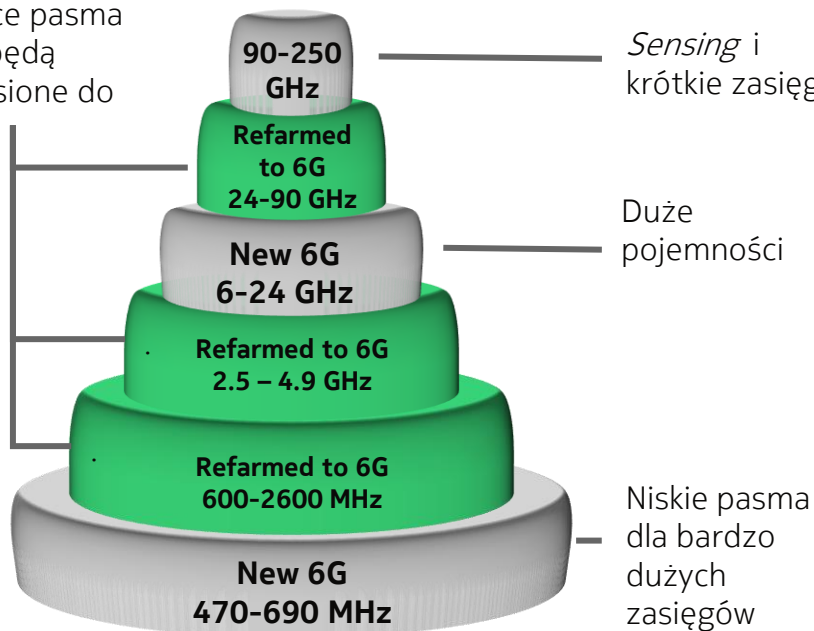
Widmo częstotliwościowe i pasmo są ograniczonymi zasobami



Widmo fal milimetrowych oferuje dużą szerokość pasma – wyzwaniem są zagadnienia RF i antenowe

Widmo dla 6G: refarming i nowe pasma częstotliwości

Istniejące pasma dla 5G będą przeniesione do 6G



Nowe pasma dla 6G

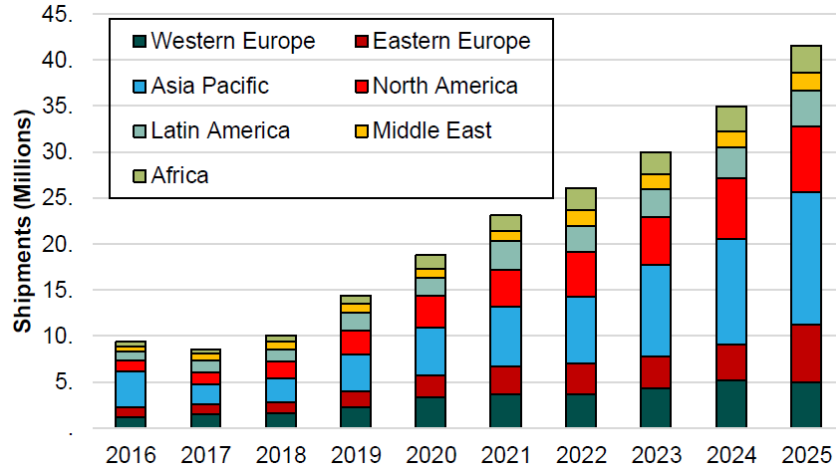
- 6 – 24 GHz dla zwiększenia pojemności przy istniejącej infrastrukturze 5G
- 470 – 690 MHz dla dużych zasięgów
- 90 – 250 GHz dla *sensing* i krótkich zasięgów

Refarming z 5G do 6G

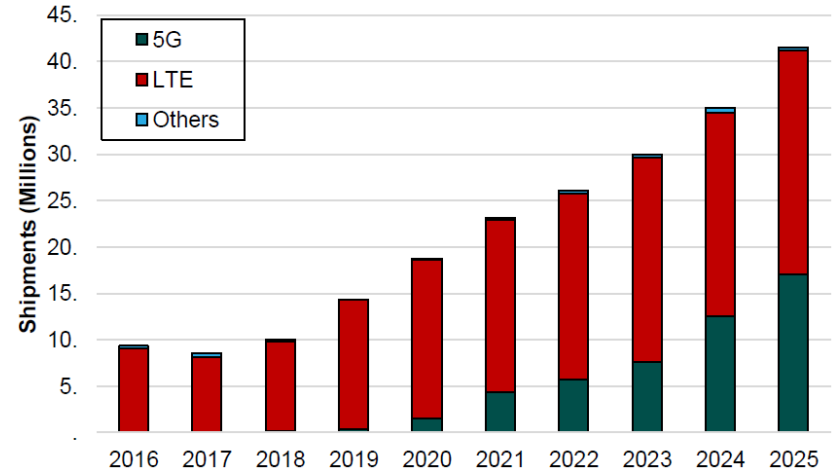
- mmWave 24 – 90 MHz
- Mid-band TDD at 2.5 – 4.9 GHz
- Low band FDD at 600 – 2600 MHz

Prognoza rynku FWA CPE *(Fixed Wireless Access Customer Premises Equipment)*

Dynamicznie rozwijający się rynek



Source: ABIresearch; 5G and LTE FWA Market Update, Dec. 9th 2020



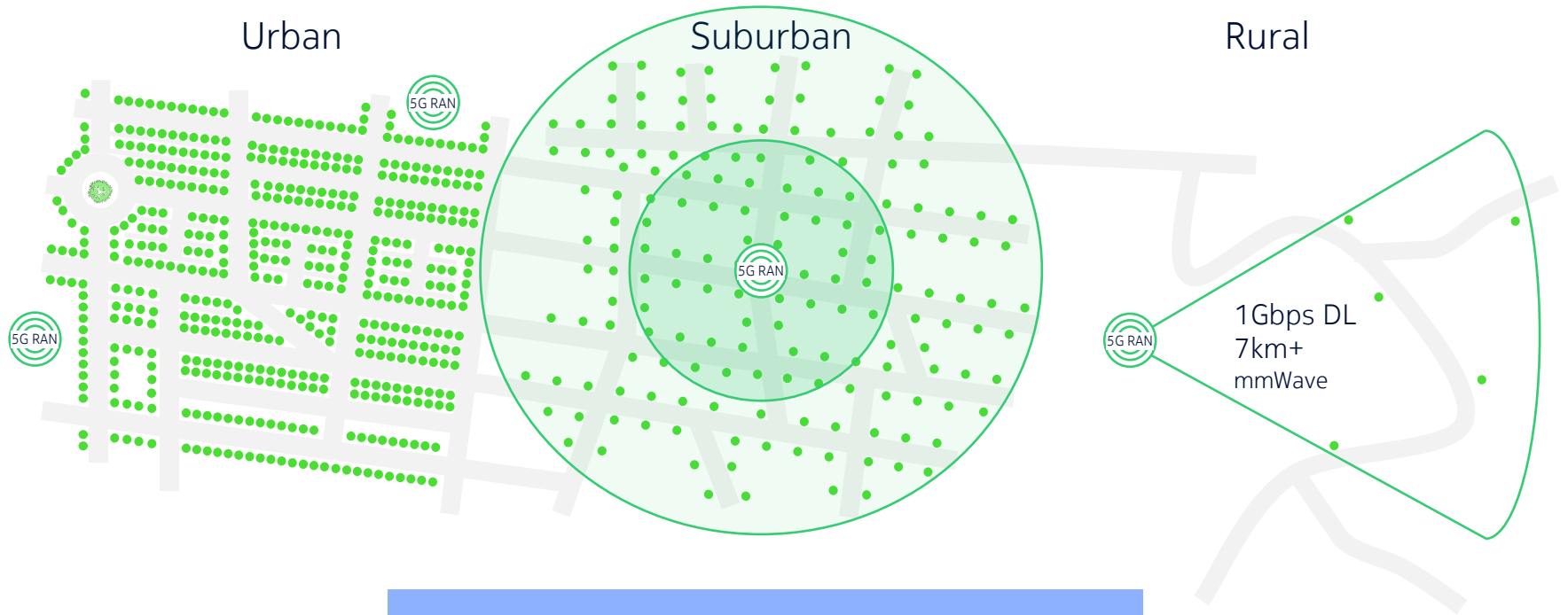
Source: ABIresearch; 5G and LTE FWA Market Update, Dec. 9th 2020

FWA – Fixed Wireless Access

Parametry anten są jedne z najważniejszych dla niezawodnego działania łącza radiowego dużej przepustowości szczególnie dla wysokich częstotliwości (jak mmWave)

mmWave FWA

Różne scenariusze i środowiska propagacyjne



Różne anteny dla różnych scenariuszy

Antena w idealnym i rzeczywistym środowisku propagacyjnym

Propagacja w wolnej przestrzeni

- **Fala rozprzestrzenia się we wszystkich kierunkach**

Wzór Friis'a :

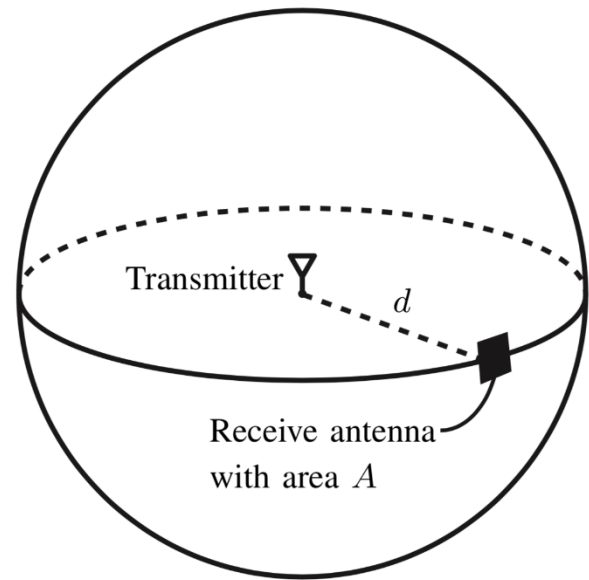
$$\text{Receive power} = \text{Radiated power} \cdot \frac{A}{4\pi d^2}$$

Przykład: $A = \frac{\lambda^2}{4\pi}$, $\frac{A}{4\pi d^2} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$

$\lambda = 0.1$ m (3 GHz)

0.006% received at 1 m (−42 dB)

0.00006% received at 10 m (−62 dB)



F [GHz]	FSPL at 1m
2	38.5 dB
10	52.4 dB
28	61.4 dB
73	69.7 dB

Propagacja w wolnej przestrzeni

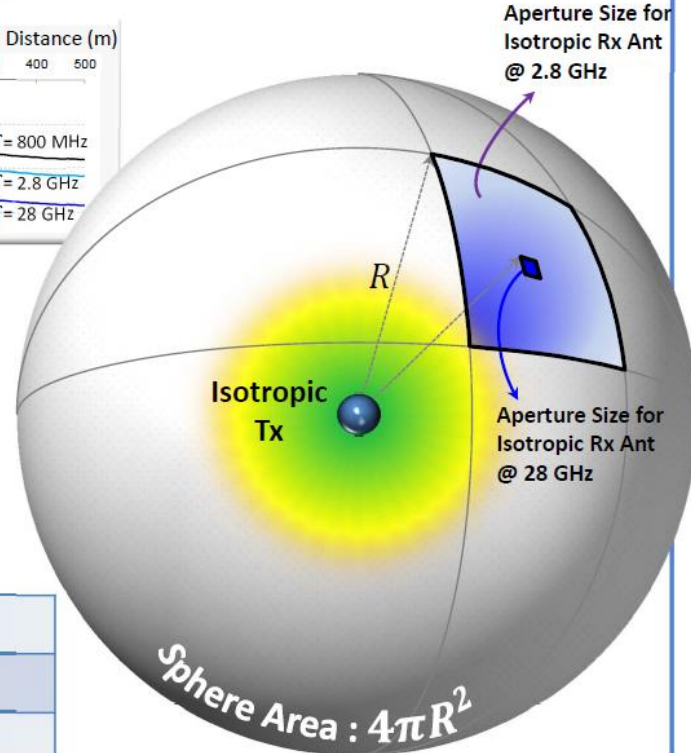
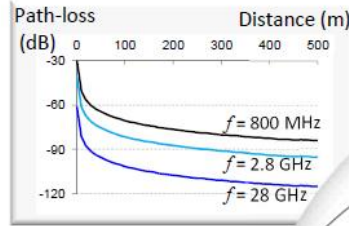
**Wolna przestrzeń nie tłumi sygnału !
Apertura anteny odbiera tylko
niewielką część energii !!!**

Isotropic Tx & Rx

□ **“Path-loss” is Proportional to Frequency Squared**

$$\begin{aligned} P_{RX} &= P_{TX} \underbrace{G_{TX} G_{RX}}_{= 1 \text{ for Isotropic}} \underbrace{\left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2}_{\text{Path-loss}} \\ &= P_{TX} \cdot 1 \cdot 1 \cdot \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right) \\ &= P_{TX} \cdot 1 \cdot 1 \cdot \left(\frac{c^2}{4\pi \cdot f^2} \right) \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right) \quad (c : \text{speed of light}) \end{aligned}$$

Labels in the equations:
- λ : Wavelength
- $\frac{\lambda^2}{4\pi}$: Aperture Size
- $\frac{1}{4\pi R^2}$: Spherical Area



□ **Comparison Example**

	2.8 GHz	28 GHz
RX Aperture Size	9.135 cm ²	0.091 cm ²
Path-loss (R=1m)	-41.4 dB	-61.4 dB

A yellow arrow points from the 2.8 GHz path-loss value (-41.4 dB) to the 28 GHz path-loss value (-61.4 dB), with the label **-20 dB** indicating the difference.

Propagacja w wolnej przestrzeni

**Wolna przestrzeń nie tłumi sygnału !
Apertura anteny odbiera tylko
niewielką część energii !!!**

Isotropic Tx but Rx Array Antennas

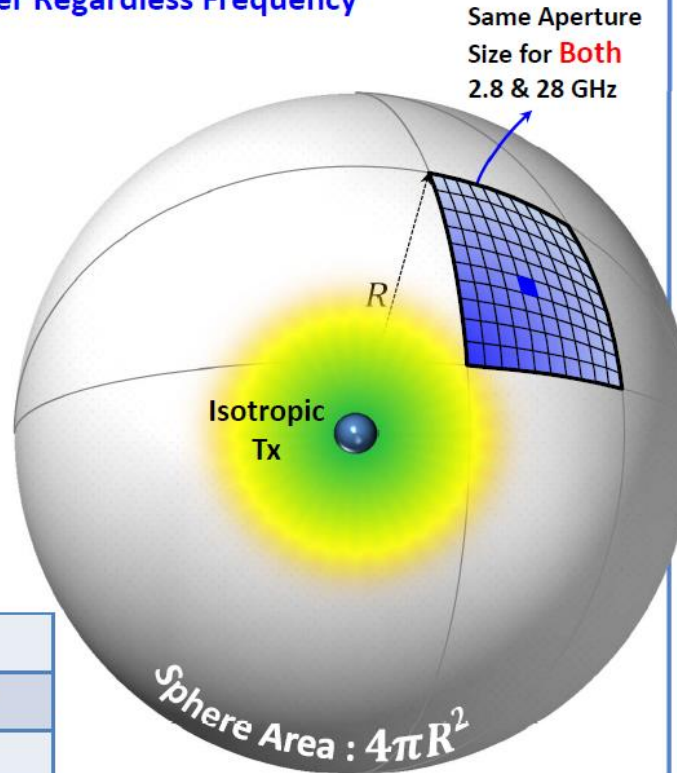
- Same Size of Rx Aperture Captures Same Rx Power Regardless Frequency

$$P_{RX} = P_{TX} \underbrace{G_{TX}}_{=1 \text{ for Isotropic}} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$$

$$\begin{aligned} &= P_{TX} \cdot 1 \cdot G_{RX} \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right) \\ \left(G = A_e \frac{4\pi}{\lambda^2} \right) &= P_{TX} \cdot 1 \cdot A_{e,RX} \left(\frac{4\pi}{\cancel{\lambda^2}} \right) \left(\frac{\cancel{\lambda^2}}{4\pi} \right) \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right) \\ &= P_{TX} \cdot 1 \cdot A_{e,RX} \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right) \end{aligned}$$

- Comparison Example

	2.8 GHz	28 GHz
RX Aperture Size	9.135 cm ²	9.135 cm ²
RX Power	P _{RX}	P _{RX}



Propagacja w wolnej przestrzeni

**Wolna przestrzeń nie tłumi sygnału !
Apertura anteny odbiera tylko niewielką część energii !!!**

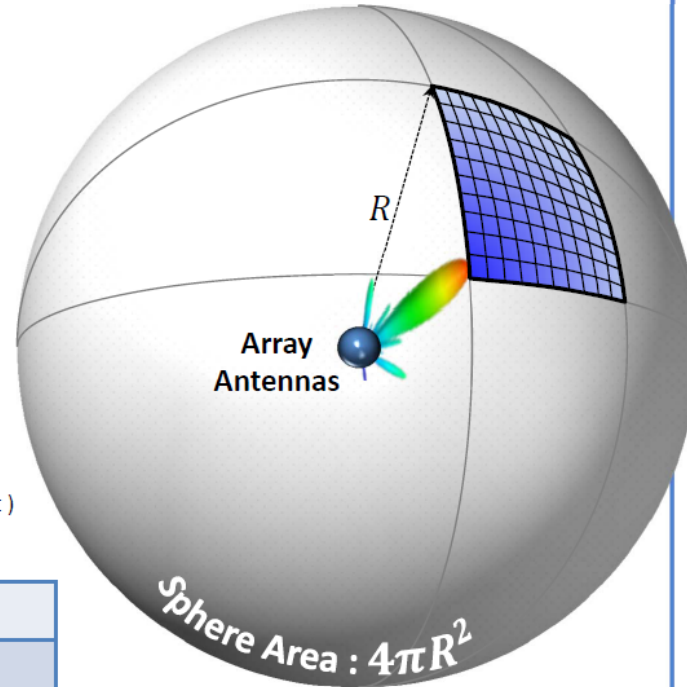
Array Antennas for Both Tx & Rx

- Rx Power is Even Bigger in Higher Frequency with Array Antennas for Both Tx & Rx

$$\begin{aligned}
 P_{RX} &= P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \\
 &= P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right) \\
 \left(G = A_e \frac{4\pi}{\lambda^2} \right) & \\
 &= P_{TX} A_{e, TX} A_{e, RX} \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} \right) \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} \right) \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right) \\
 &= P_{TX} A_{e, TX} A_{e, RX} \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} \right) \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right) \\
 &= P_{TX} A_{e, TX} A_{e, RX} \left(\frac{4\pi \cdot f^2}{c^2} \right) \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right) \quad (c : \text{speed of light})
 \end{aligned}$$

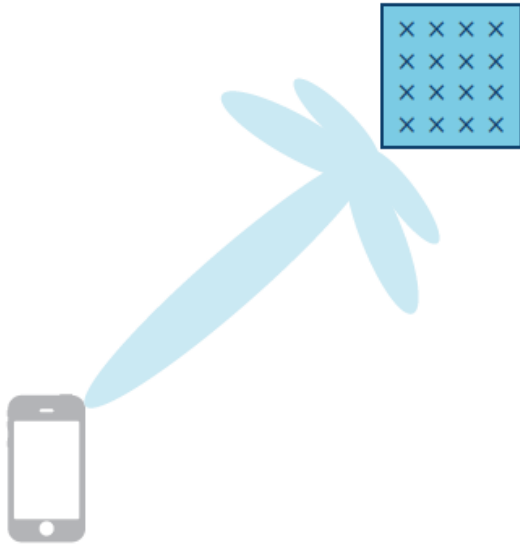
- Comparison Example

	2.8 GHz	28 GHz
RX Power	P_{RX}	$P_{RX} + 20 \text{ dB}$

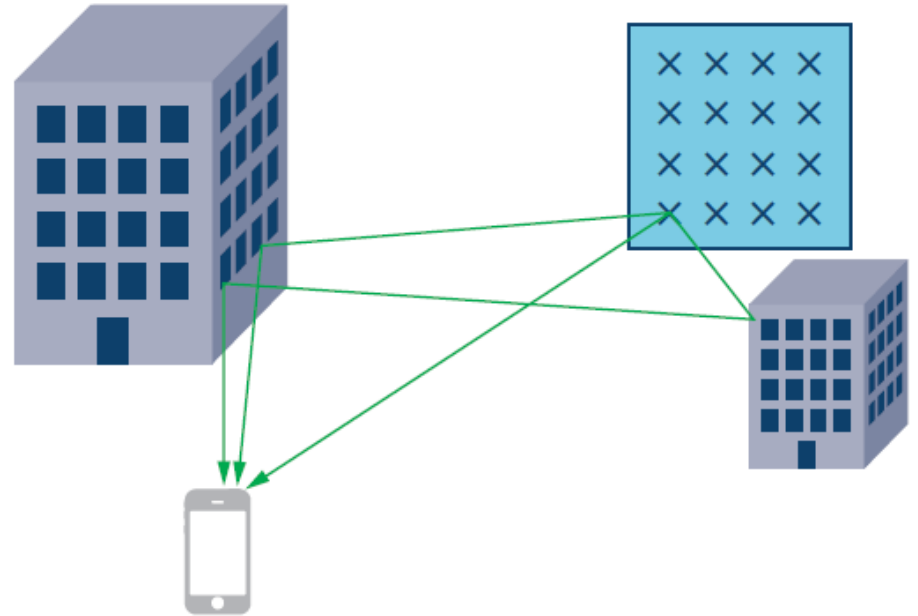


Antena kierunkowa w idealnym i wielodrogowym środowisku propagacyjnym

Idealne środowisko



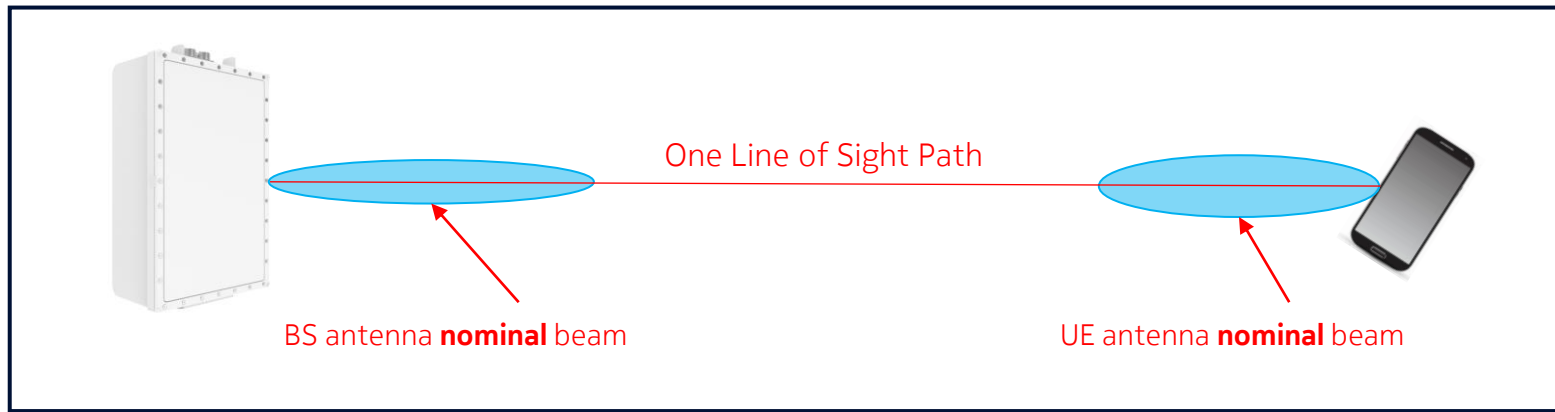
Rzeczywisty kanał propagacyjny



Antena kierunkowa w idealnym i wielodrogowym środowisku propagacyjnym

Idealne środowisko → komora bezodbiciowa (otoczenie nie ma wpływu na propagację fal radiowych)

Wąska wiązka jest utrzymana w “**wolnej przestrzeni**” -> **Zysk anteny bliski zyskowi nominalnemu**



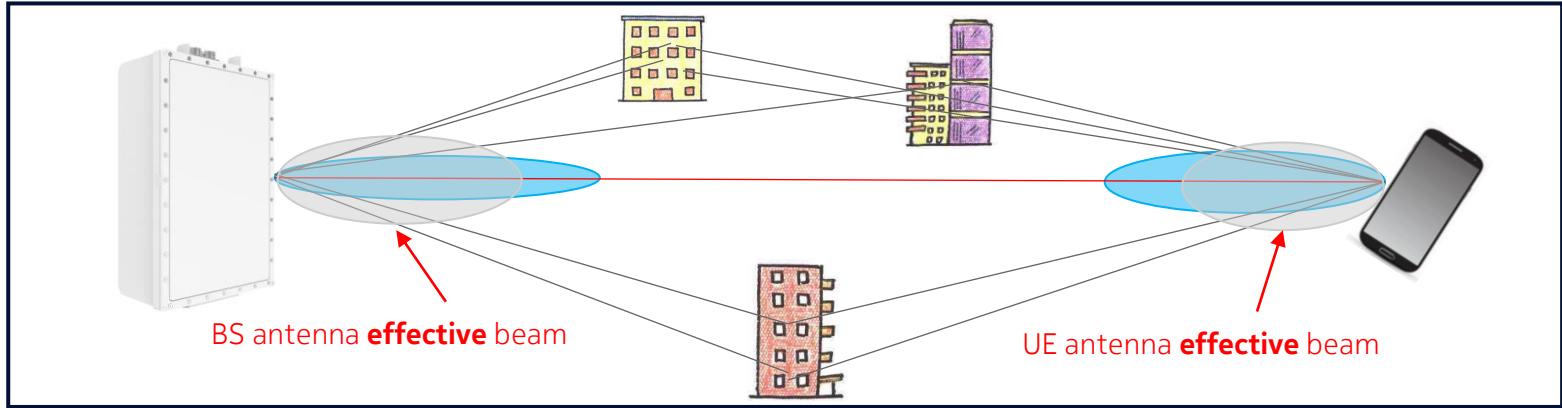
Przykład: wąska wiązka światła podczas ładnej pogody



Antena kierunkowa w idealnym i wielodrogowym środowisku propagacyjnym

Rzeczywiste środowisko → Propagacja wielodrogowa powoduje rozproszenie energii

Wąska wiązka jest **poszerzona** przez rozproszenie fali → **Efektywny zysk** jest znacznie mniejszy od **nominalnego zysku**

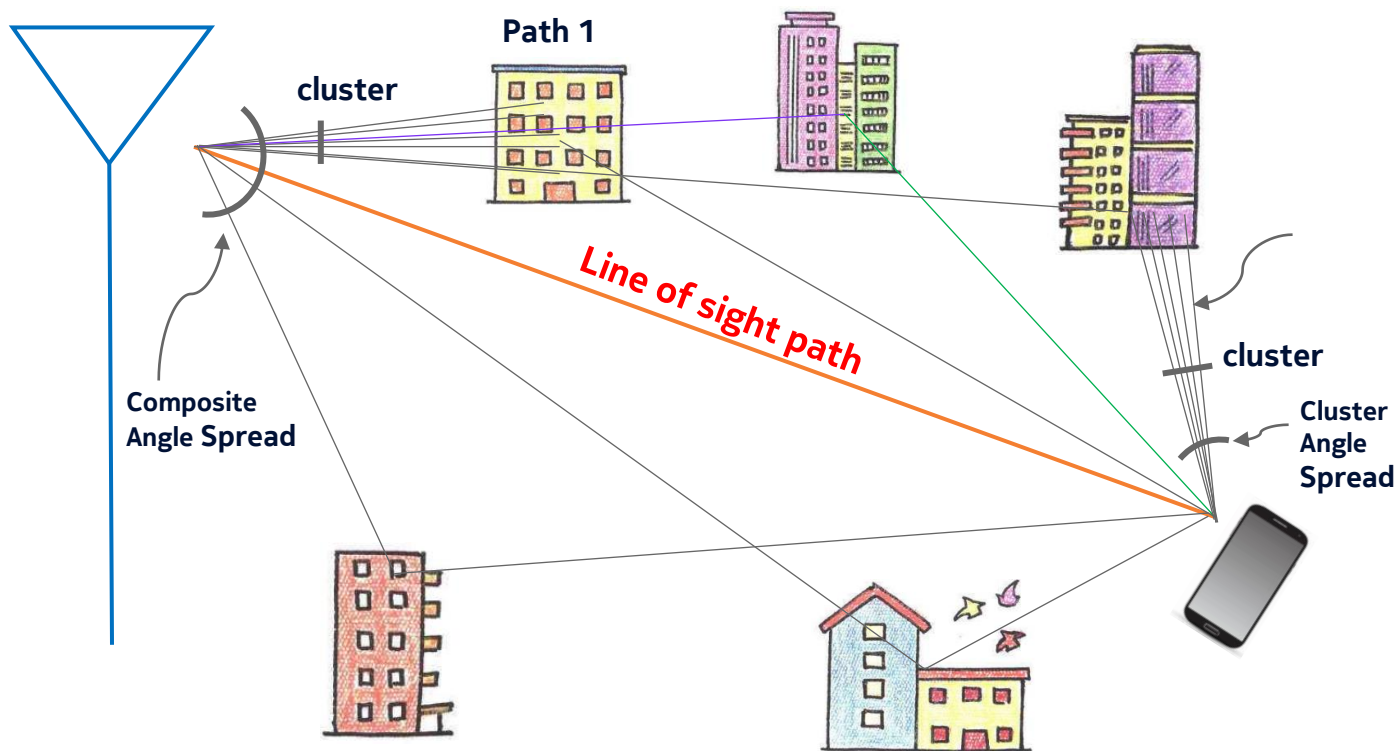


Przykład: Wiązka światła poszerza się z powodu mgły



Propagacja wielodrogowa i anteny

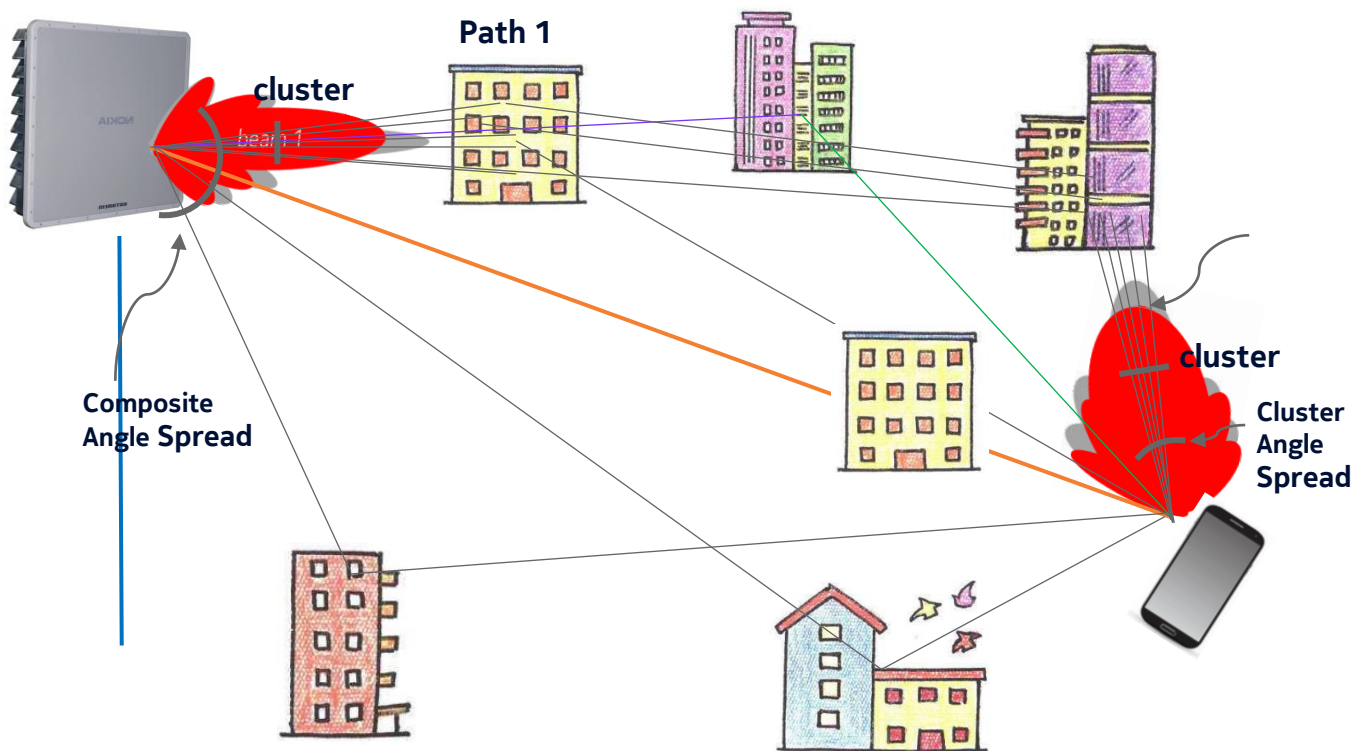
3D Statistical Spatial Channel Models (3GPP 38.901)



Model kanału radiowego 3D:

- A **cluster** is for a propagation path diffused in space, such as delay, power, and angle domains.
- A number of **rays** constitute a cluster
- **Delay spread** – rms of power weighted delay profile
- **Angular spread** – circular standard deviation of power weighted angle profile
- **Doppler Spread**
- **Polarisation**

Propagacja wielodrogowa i anteny



- **Filtracja przestrzenna:**
 - klastry i promienie są filtrowane przez charakterystykę anteny,
 - filtracja ta zależy od kierunku wiązki
- **Wpływ rozproszenia kąтового na zysk anteny:**
 - efektywny zysk anteny jest mniejszy
 - zależy od wielkości rozproszenia kąowego i użytego algorytmu formowania wiązki

Efekt ten występuje kiedy szerokość wiązki antenowej (*RMS beamwidth*) jest zbliżona lub mniejsza od kąowego rozproszenie mocy kanału radiowego (*angular spread*)

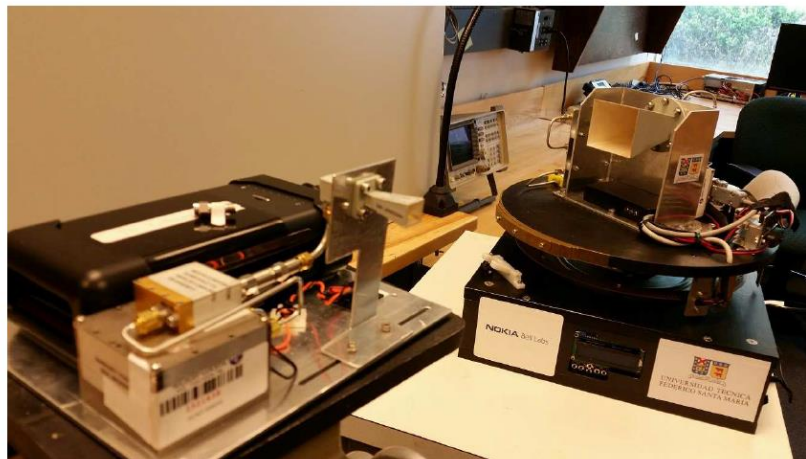
Wybrane wyniki pomiarów anten w różnych środowiskach propagacyjnych

System pomiarowy

Rotating horn receiver platform mounted on a van mast



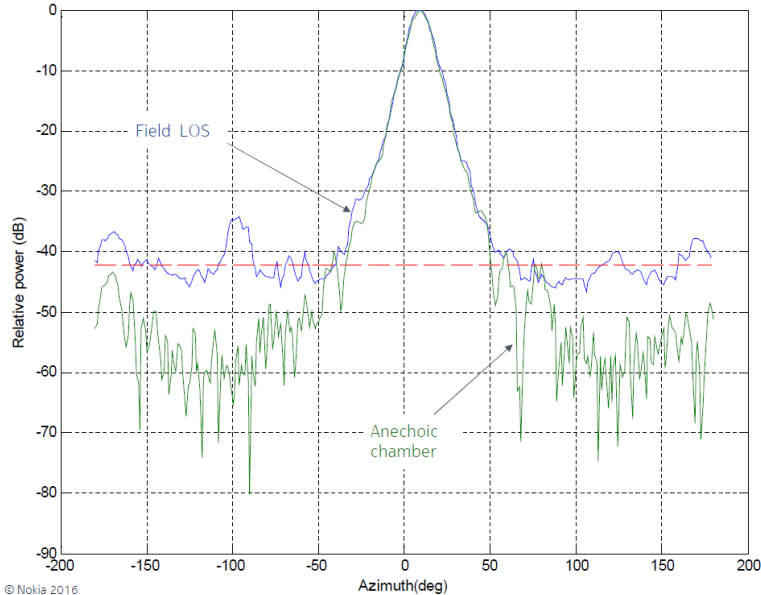
28 GHz Sounder designed and constructed by UTFSM, Chile



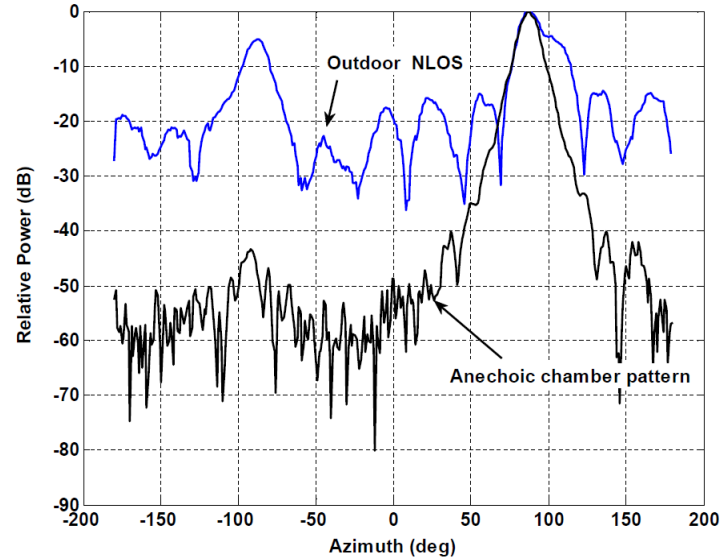
- Narrowband, rapidly rotating 10° horn receiver
- Tx: 22 dBm, 10 dBi horn (50°)

Charakterystyka anteny zmierzona w rzeczywistym kanale radiowym

LOS field main lobe well matched to anechoic pattern.
Same azimuthal gain



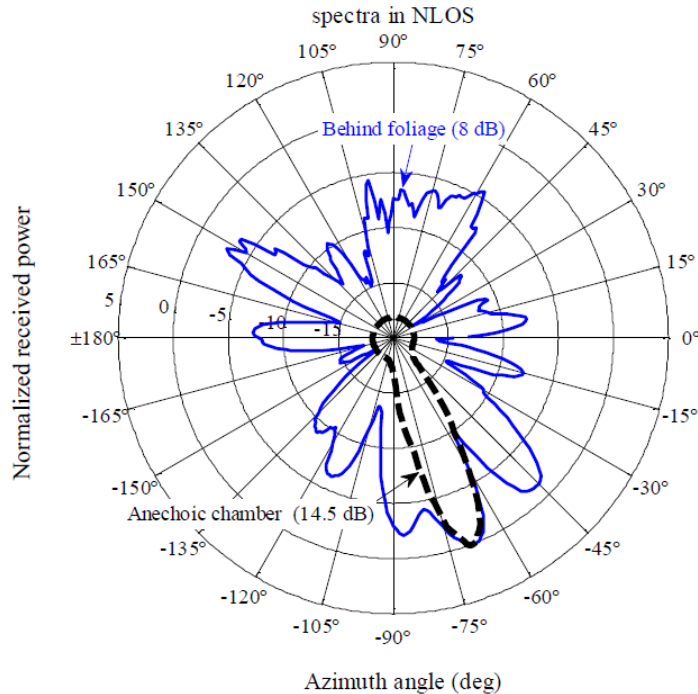
NLOS (blocked by a grove of trees) shows much scattering: effective azimuthal gain drops from 14.3 dBi to 10.4 dBi.



Charakterystyka anteny zmierzona w rzeczywistym kanale radiowym

Effective beamforming gain degraded by scattering

Measured NLOS pattern with direct path blocked by foliage: 6.5 dB less gain



Effective gain =

$\frac{\text{peak in azim.}}{\text{average in azim.}}$

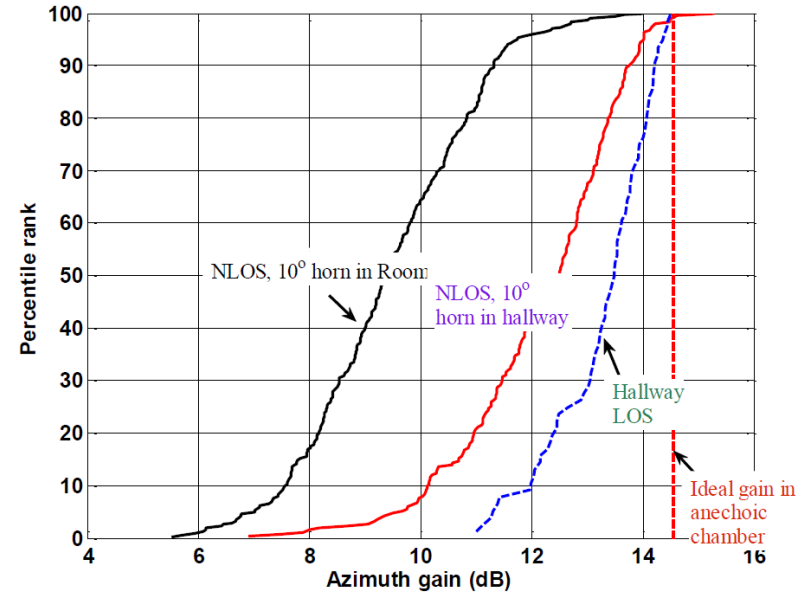
Pomiary w biurze (*indoor*)

Indoor 28 GHz measurements at Crawford Hill, NJ

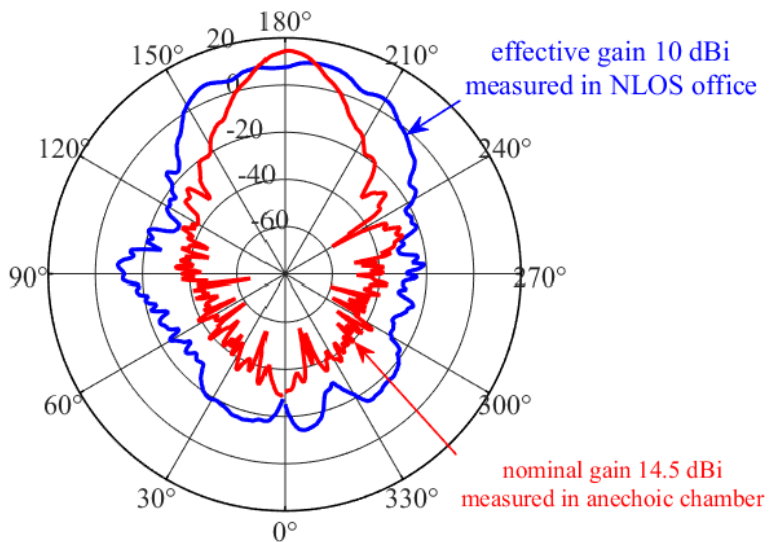
- 70 LOS measurements range 1-70 m down the hall
- 301 measurements hallway-office, (4 offices, range 1-70 m down the hall for each)
- Quantify effective path loss
- Slope-intercept fit, deviation
- Compare against mode-diffusion theory
- Results
 - Achievable azimuth gain distributions
 - Coverage and rate estimates



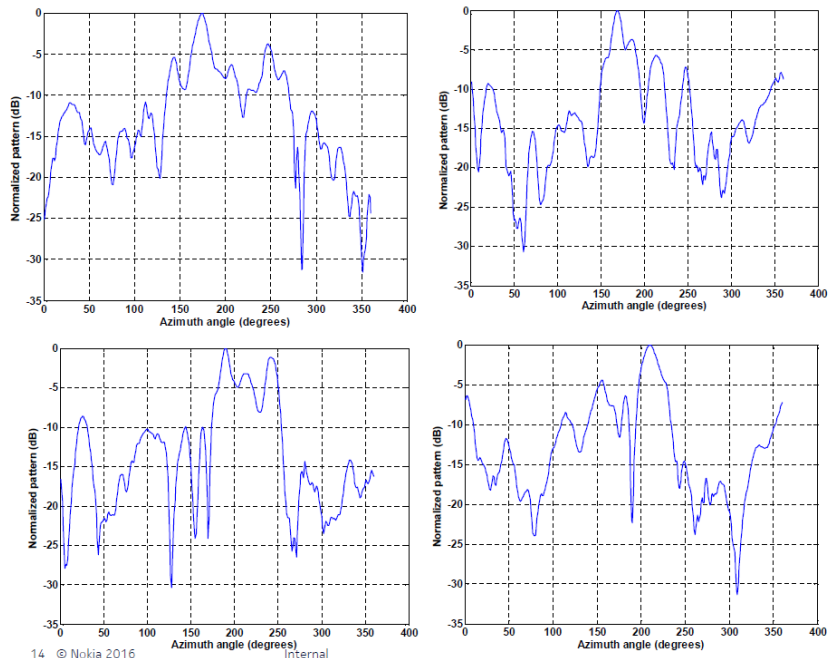
Scatter reduces azimuth gain by 4-7 dB at 90%



Pomiary w biurze (*indoor*)



In-room directional spectrum highly variable with distance from source
Mostly contained within 90° beam aimed at front wall



14 © Nokia 2016

Internal

NOKIA

Pomiary w przedmieściach (*suburban*)

Suburban measurement along streets in NJ; Tx/Rx to mimic FWA

Spinning horn Rx on van mast



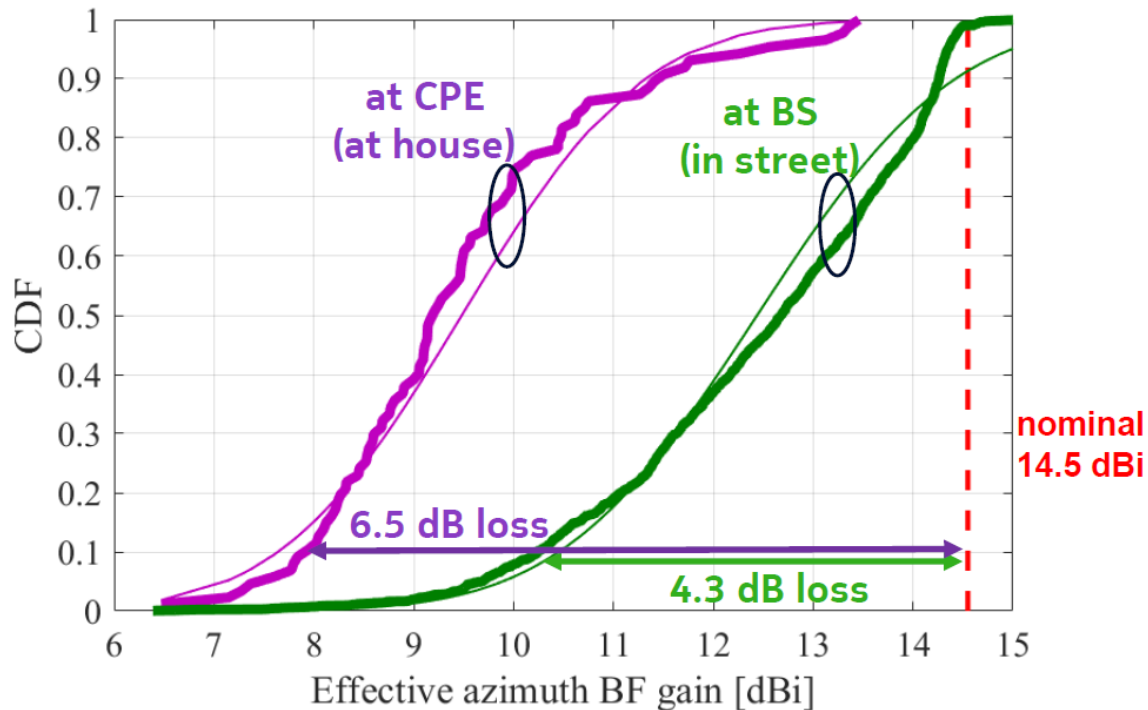
Tx on tripod, 1st & 2nd floor
Exterior wall/window



Pomiary w przedmieściach (*suburban*)

Effective azimuth gain under angular spread (vs. nominal 14.5 dBi)

CDFs well represented by log-normal distribution with $\text{std}=1.5$ dB



Pomiary w mieście (*urban*)

Measurement scenarios: Manhattan like street canyon with thin vegetation
Rooftop height varies, measured both with and without setback from edge

Tx on sidewalks, height 1.5m

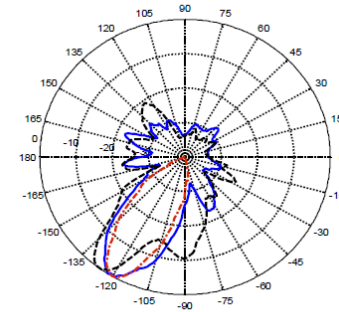
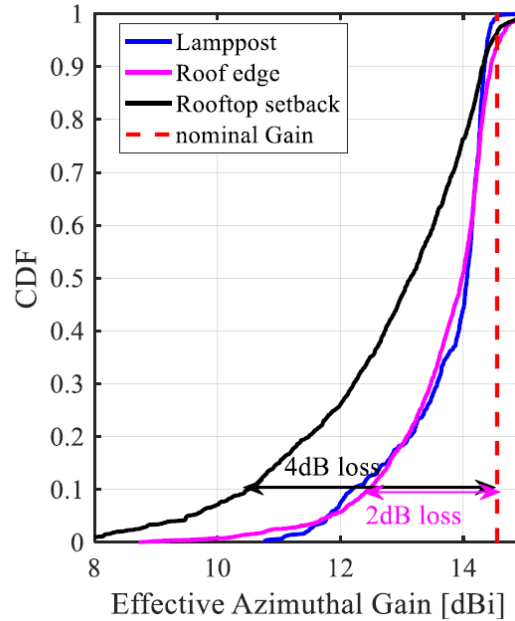
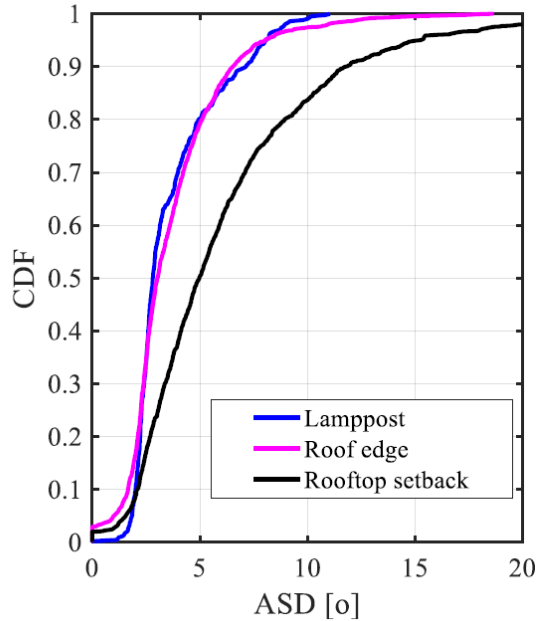


Rx at rooftop, w/o setback from edge



Pomiary w mieście (*urban*)

Roof-edge and lamppost have similar (small) angular spread



Gain reduction
(90%-tile)

Roof/lamppost:
"LOS" 2dB

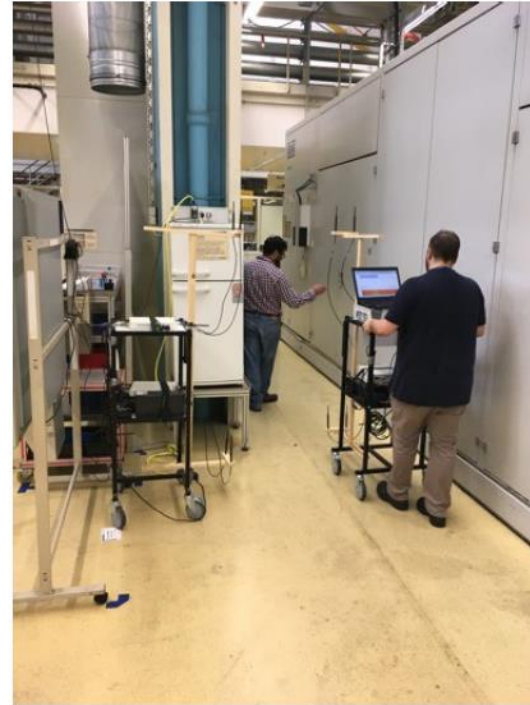
Roof setback:
NLOS 4dB

Pomiary w fabryce

3.5 GHz measurements in a Bosch factory



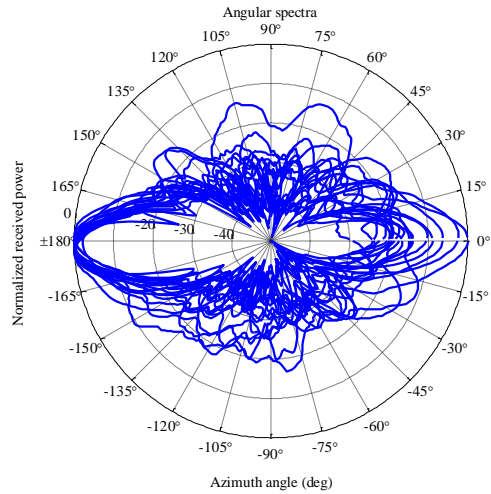
40 deg. directional panel TX @ 2.6m
EIRP ~ 23 dBm



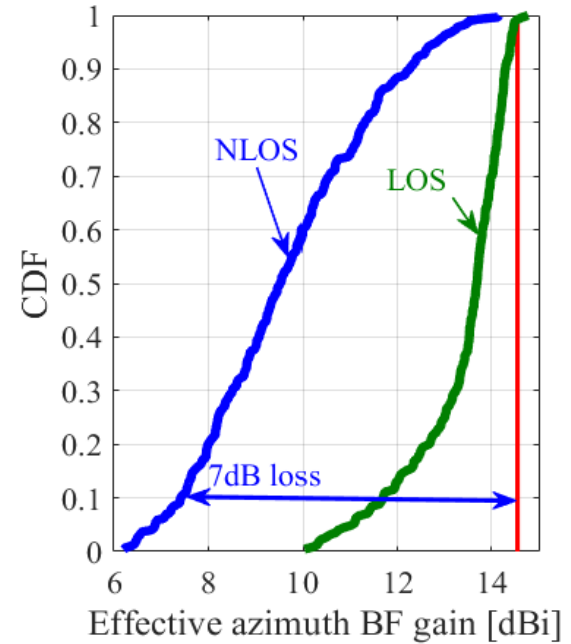
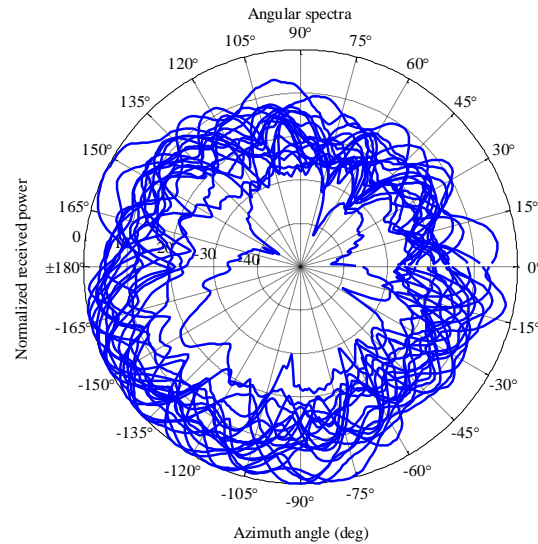
Omni RX @ 1.75m
R&S TSMW radio scanner, sensitivity ~ -120 dBm
Single RX antenna, 20 samples/s, ~constant speed
4 aligned route repetitions

Pomiary w fabryce

LOS



NLOS



Pomiary *outdoor to indoor*



(a) Hamilton Hall (HAM)



(b) Miller Theatre (MIL)



(c) Teachers' College (TEA)



(d) Hamilton Grange Middle School (HMS)



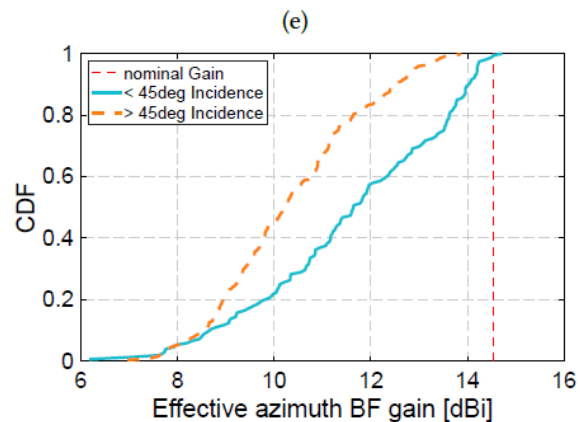
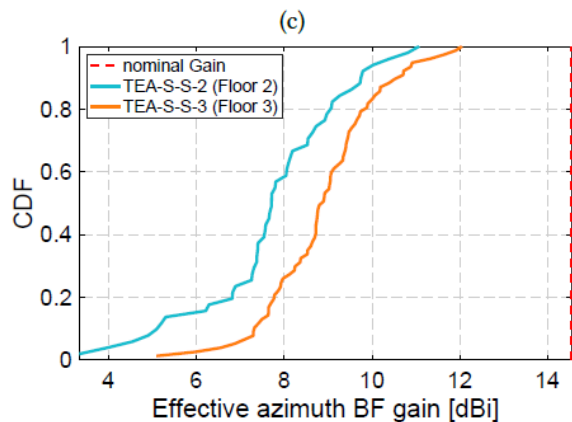
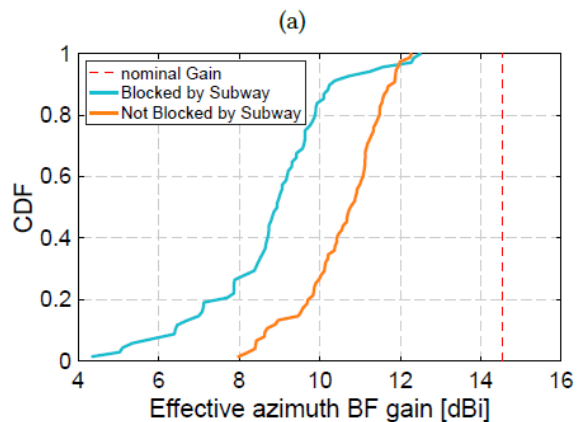
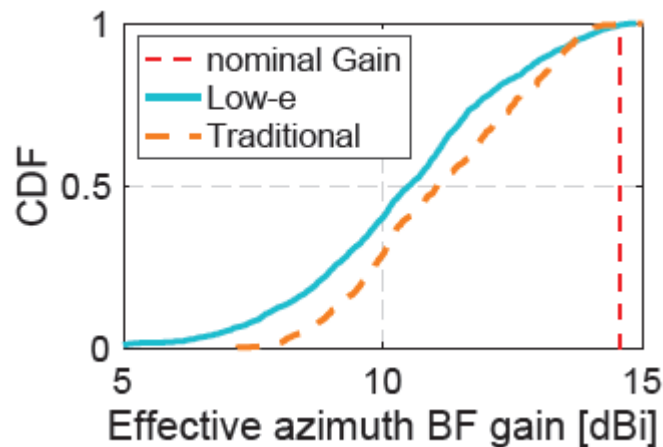
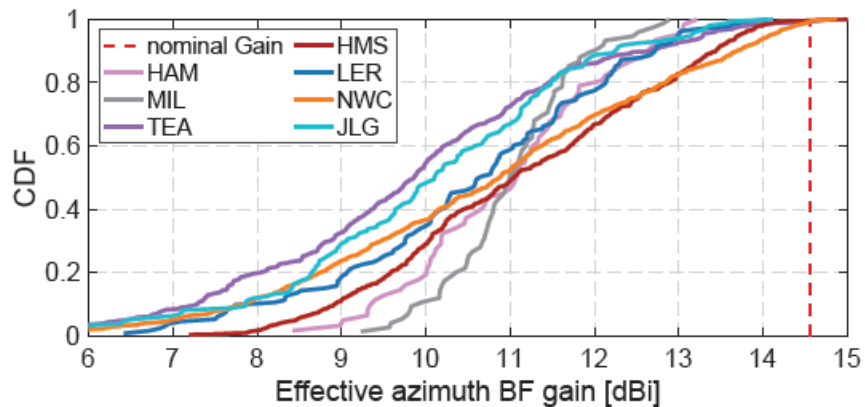
(e) Lerner Hall (LER)



(f) Northwest Corner Building (NWC)

Figure 2: Representative interior and exterior views of six of the seven locations (shown in Figure 1 and Table 2).

Pomiar *outdoor to indoor*



(a)

(c)

(e)

(b)

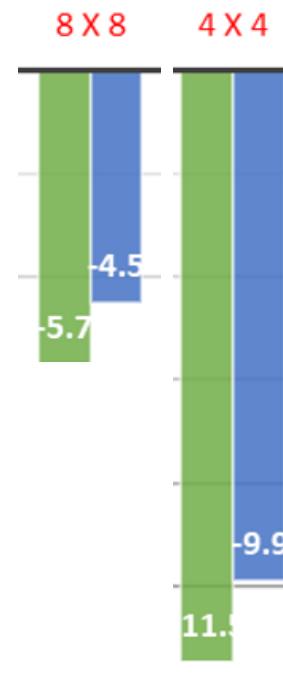
(d)

(f)

Pomiary w laboratorium R&D we Wrocławiu - LOS



LOS, difference in effective gain as compared to 16x16 array (VxH) [dB]
Estimation is based on ASD=4° and ZSD=0°



Measurement results match theoretical estimation

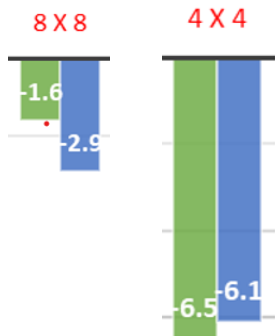
■ measurement ■ estimation

Pomiary w laboratorium R&D we Wrocławiu - NLOS



NLOS, difference in effective gain as compared to **16x16** array (VxH) [dB]

Estimation is based on ASD=27° and ZSD=1°



Efektywny zysk anteny układu **8x8** jest tylko o **1,6 dB** gorszy niż 16x16 (**nominalny spadek powinien wynosić 6 dB**), a efektywny zysk anteny **4x4** jest tylko o **6,5 dB** gorszy niż 16x16 (**nominalny spadek powinien wynosić 12 dB**).

Estymacja efektywnego zysku anteny i jego wpływ na efektywność łącza radiowego

Estymacja efektywnego zysku anteny

Efektywny zysk anteny:

$$g_{\max} = NG_e = \frac{2}{B_h B_v}$$

N – liczba elementów antenowych

Ge – zysk elementu antenowego

Bh, Bv = szerokość wiązki RMS anteny w azymucie i elewacji w radianach

Dla rzeczywistego kanału radiowego:

$$B_v = \sqrt{B_{v0}^2 + \sigma_v^2}, \quad B_h = \sqrt{B_{h0}^2 + \sigma_h^2}$$

σ_v, σ_h – *angular spread* w elewacji i azymucie w radianach

B_{v0}, B_{h0} – nominalna szerokość wiązki RMS anteny w elewacji i azymucie w radianach

$$B_{v0} = \text{HPBW}_v / (2 \cdot \sqrt{\ln(4)})$$

$$B_{h0} = \text{HPBW}_h / (2 \cdot \sqrt{\ln(4)})$$

HPBW_h, HPBW_v – 3dB szerokość wiązki w azymucie i elewacji w radianach

Angular Spreads of the Radio Channel (3GPP 38.901)

The mean of Azimuth Angle of Departure Spread (ASD) for BS antenna and Azimuth Angle of Arrival Spread (ASA) for UE antenna for 28GHz

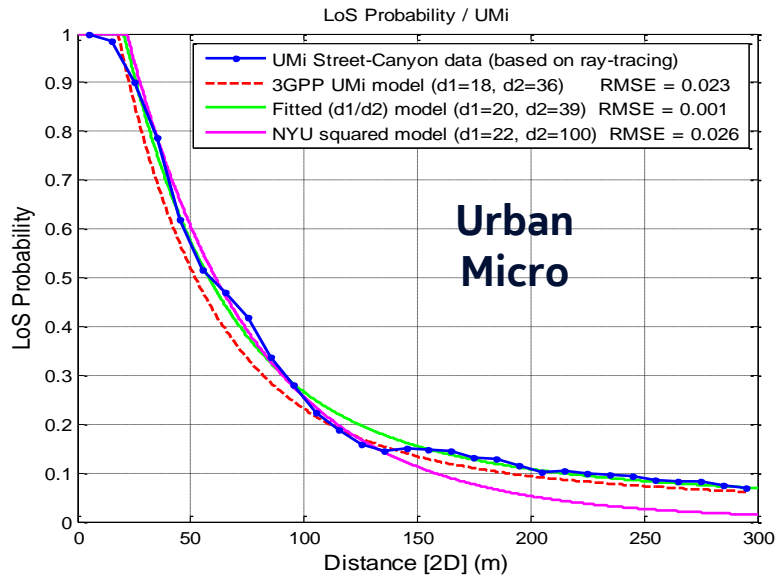
	UMi		UMa		RMa		InH	
	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS
BS ASD [deg]	14	16	17	22	8	9	40	42
UE ASA [deg]	41	49	65	49	33	33	32	50

Znacznie większy dla UE/CPE niż stacji bazowej

The mean of Zenith Angle of Departure Spread (ZSD) for BS antenna and Zenith Angle of Arrival Spread (ZSA) for UE antenna for 28GHz

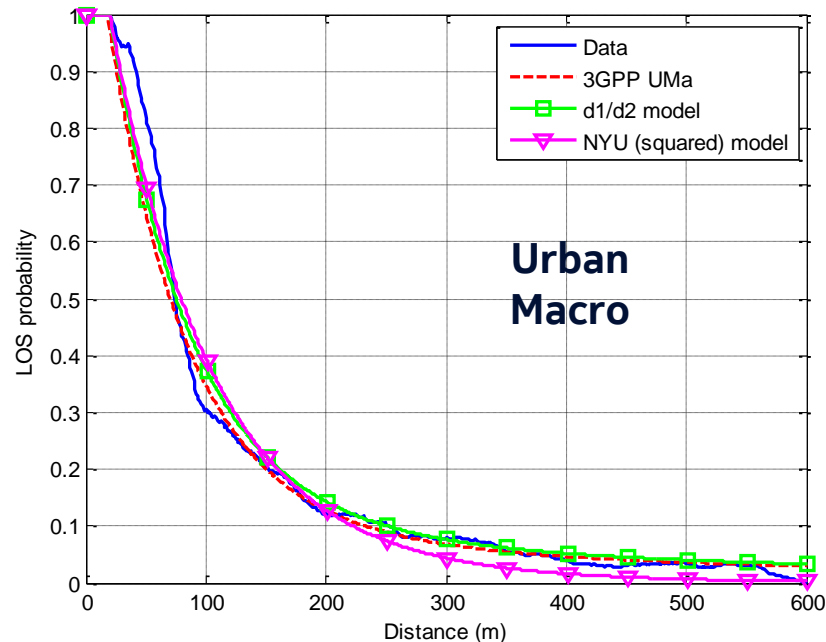
	UMi		UMa		RMa		InH	
	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS
BS ZSD [deg]	0,6	0,3	0,8	1,1	0,3	0,3	1,4	12
UE ZSA [deg]	3,8	7,3	8,9	11,1	1,7	1,3	11,5	14,7

Prawdopodobieństwo LOS/NLOS

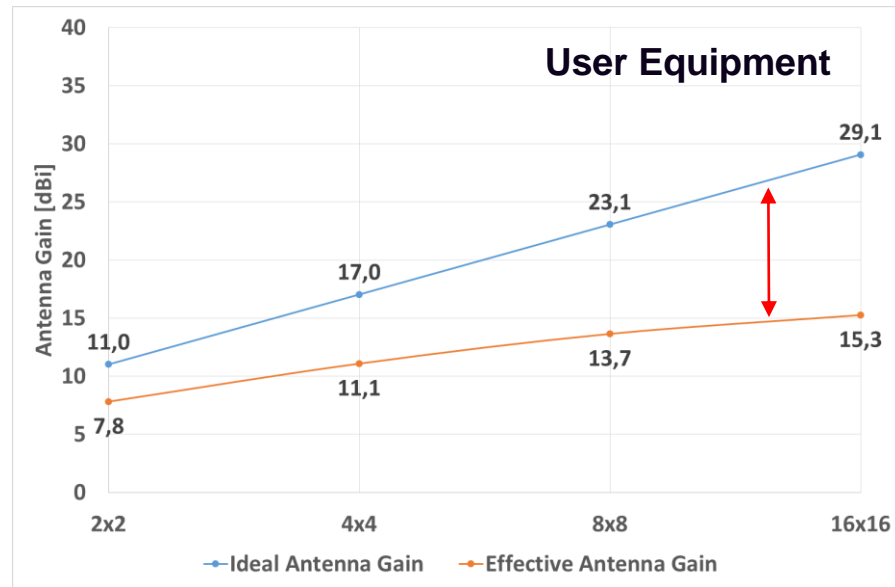
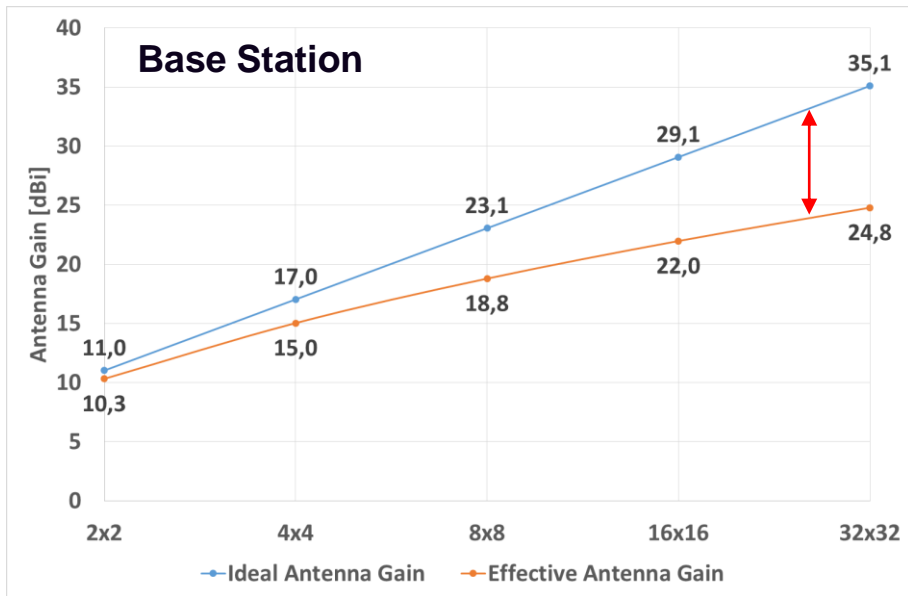


50% prawdopodobieństwa, że mamy NLOS już dla 50m (UMi)

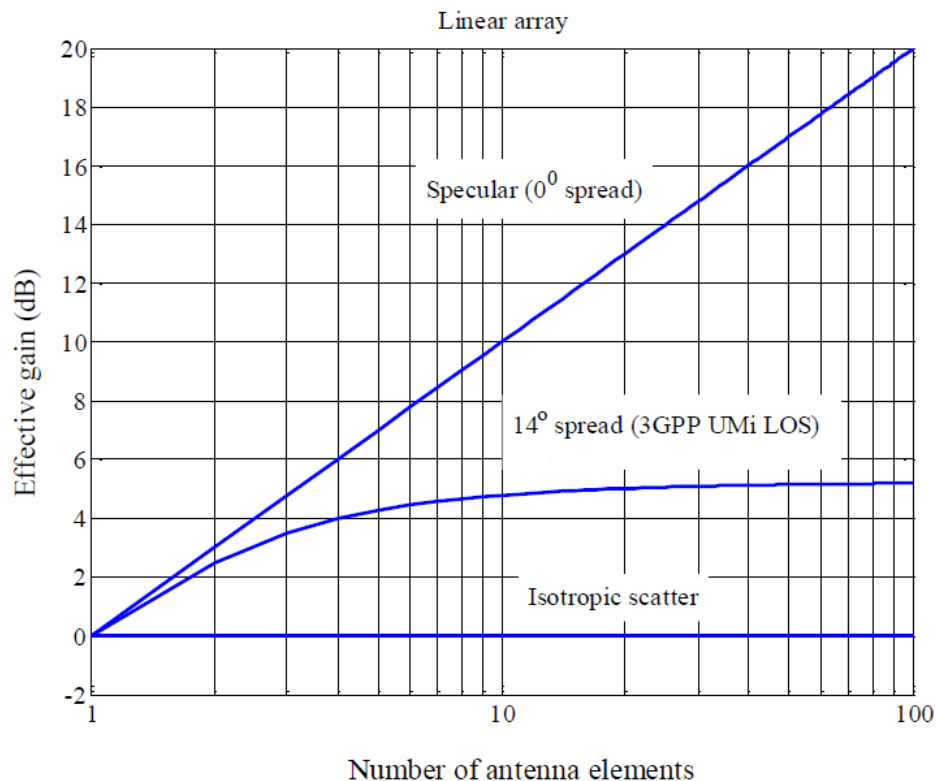
50% prawdopodobieństwa, że mamy NLOS dla około 100m (UMa)



Estymacja efektywnego zysku anteny



Channel Model 3GPP 38.901, Urban Micro Street Canyon, 28GHz



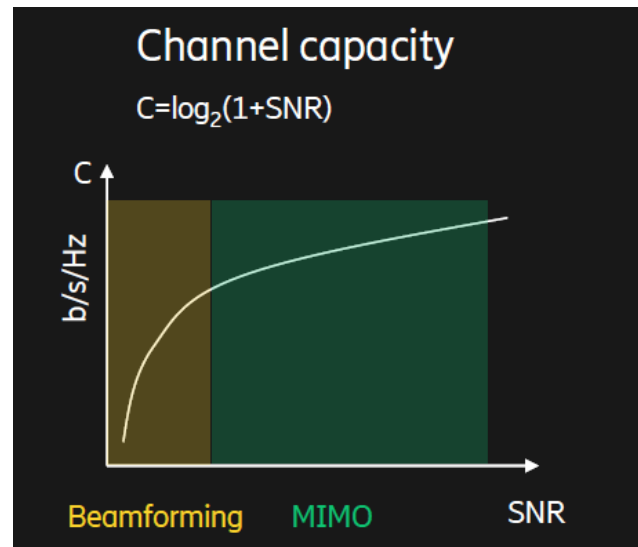
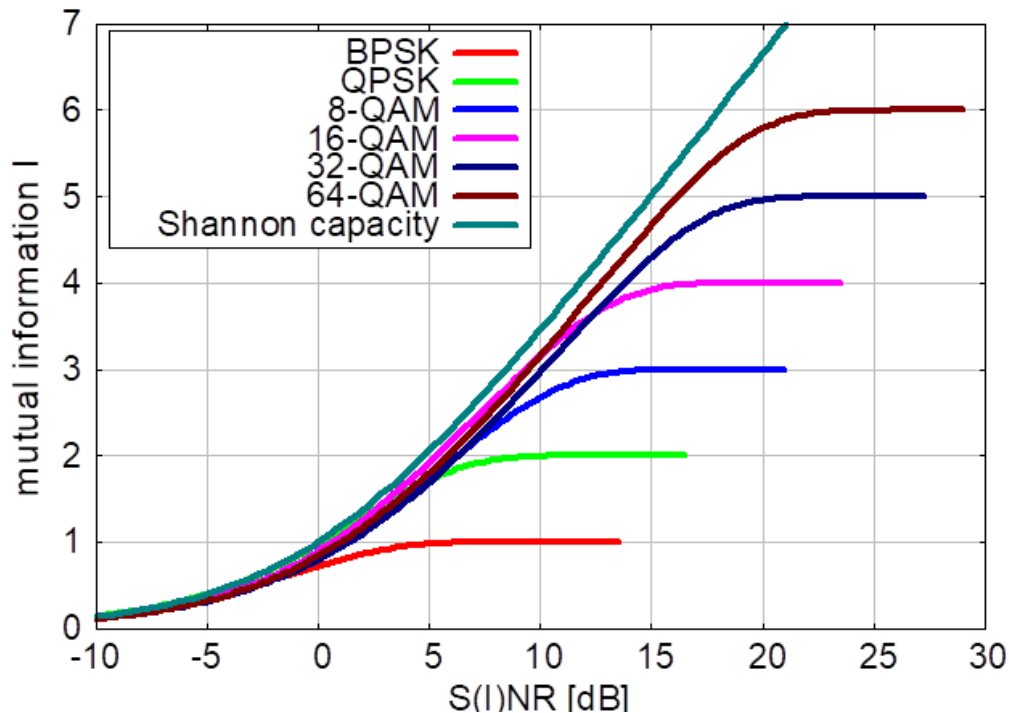
„Nasylenie” efektywnego zysku dla anten o dużej kierunkowości

Figure 6. Effective directional antenna gain is limited by the channel angle spread

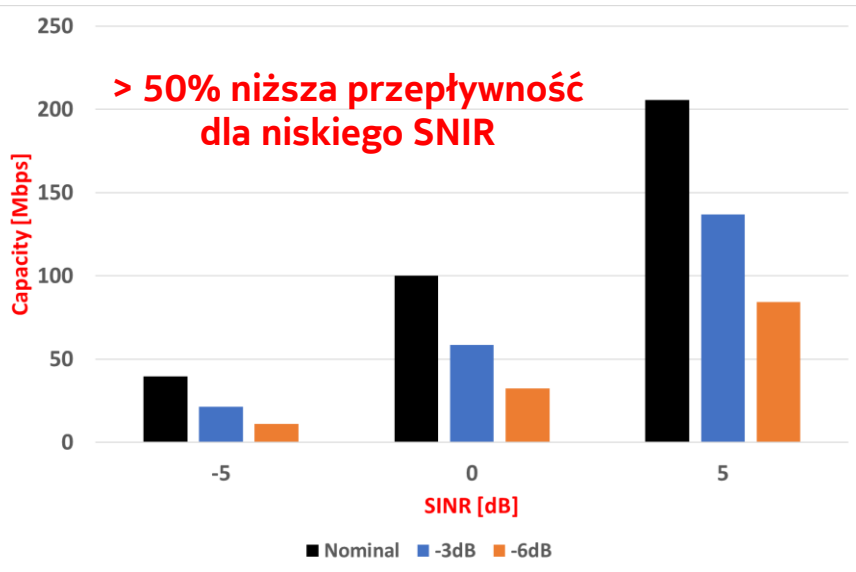
Wpływ na efektywność łącza radiowego

Wzór na pojemność kanału (Shannon) – $B \log_2(1 + \text{SNR})$

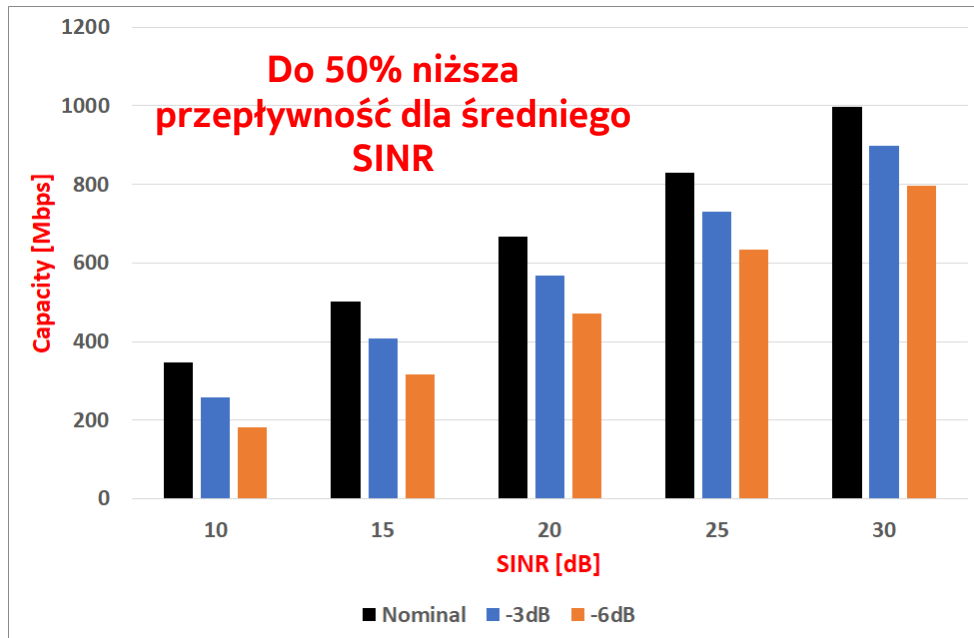
- liniowy dla małego SNR – **każdy dB straty jest znaczący**
- prawie płaski dla dużego SNR – **tutaj lepiej działają techniki MIMO**



Wpływ na efektywność łącza radiowego

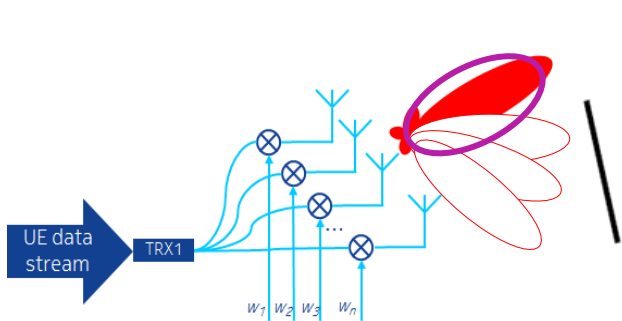


BW=100MHz



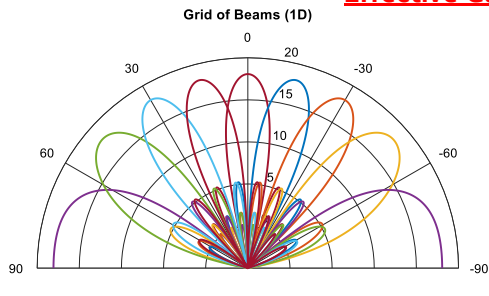
Poprawa efektywnego zysku anteny – *digital beamforming*

Analog Beamforming



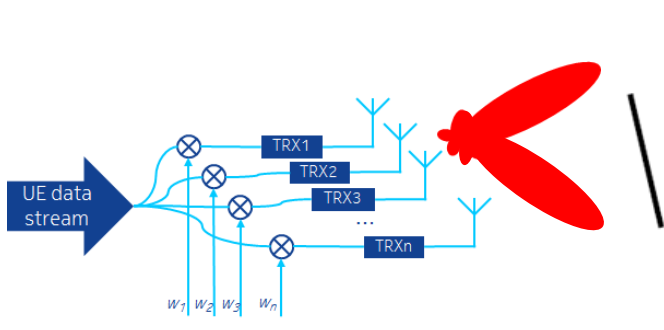
In **Analog Beamforming** beam pattern is obtained by modification of the **RF signal between the TRX and the antenna elements**

Effective Gain of antenna is **much lower** than **Nominal Gain**



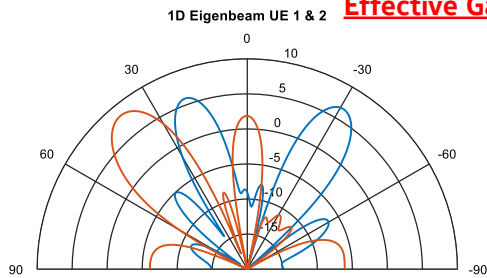
Grid of beams (GoB) approach: Beams are **pre-defined** on a regular grid, with a **regular shape**. The “best” beam is **selected** for each UE by beam management procedures.

Digital Beamforming



In **Digital Beamforming**, beam pattern is synthesized by manipulating weights of the **individual TRXs in baseband**

Effective Gain of antenna is **close to Nominal Gain**

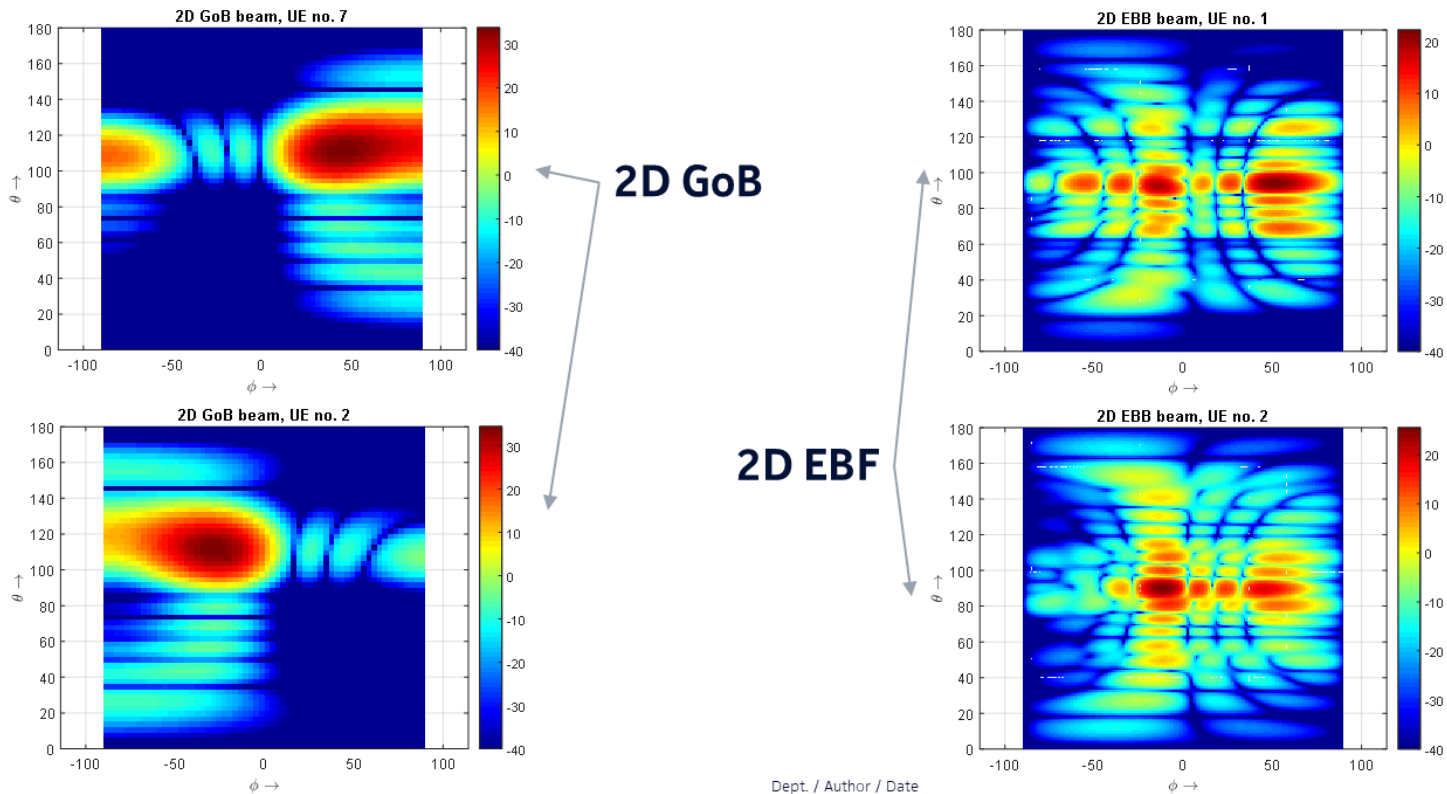


Eigenbeamforming (EBF) approach: Beams are **adapted** to the UE specific measured fading channel with a time-variant angular receive power distribution. **Irregular beam shapes**.

Poprawa efektywnego zysku anteny - *digital beamforming*

Grid of beams (GoB) beamforming vs. Eigenbeamforming (EBF)

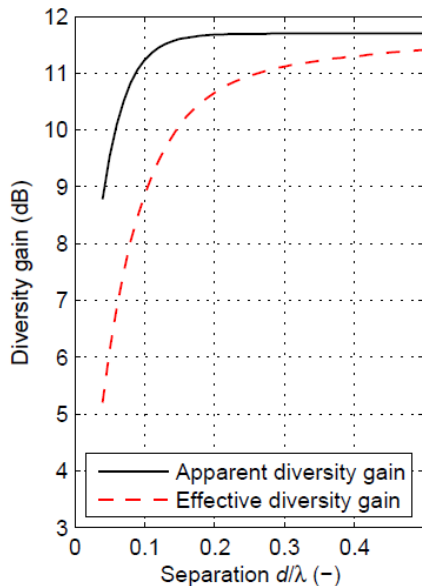
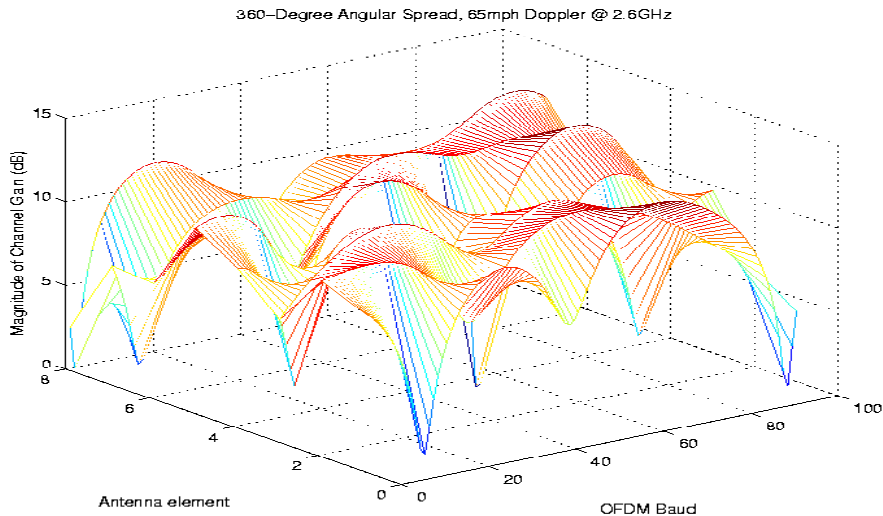
Azimuth and elevation beamforming (2D), example beams



Poprawa efektywnego zysku anteny – odbiór zbiorczy (*diversity*)

- sygnały wielodrogowe docierające z różnych kierunków są niezależne
- zaniki dla różnych anten są prawie niezależne
- duży *Angular Spread* = duża efektywność przestrzennego odbioru zbiorczego

-> może lepiej użyć dwóch anten o niższym zysku niż jednej o dużym zysku?



*diversity gains by MRC versus dipole spacing
in rich multipath*

Podsumowanie

- ❑ nowe wyższe pasma częstotliwości wymagają zastosowania anten kierunkowych w celu kompensacji większych strat propagacyjnych
- ❑ nominalna charakterystyka anteny oraz jej zysk energetyczny nie jest utrzymana w rzeczywistym środowisku propagacyjnym kiedy szerokość wiązki jest zbliżona lub mniejsza od kąтового rozproszenia mocy kanału radiowego (*angular spread*)
- ❑ efektywny zysk anteny zależy od rodzaju środowiska propagacyjnego
- ❑ należy uwzględnić zmniejszenie zysku anteny przy liczeniu budżetu łącza – proste formuły są dostępne
- ❑ cyfrowe algorytmy formowania wiązki mogą rozwiązać problem, ale wymagają złożonej architektury systemu antenowego i dużej mocy obliczeniowej
- ❑ warto wybrać optymalną antenę do danego scenariusza
- ❑ nowe rozwiązania i innowacje antenowe ??? -> **Make Antennae Great Again** 😊