

# **Design and Characterisation of 5G mmWave MIMO Antenna Systems with Beamforming Capabilities over AWGN and Rayleigh Channels**

Ricardo Fernández Rubio

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

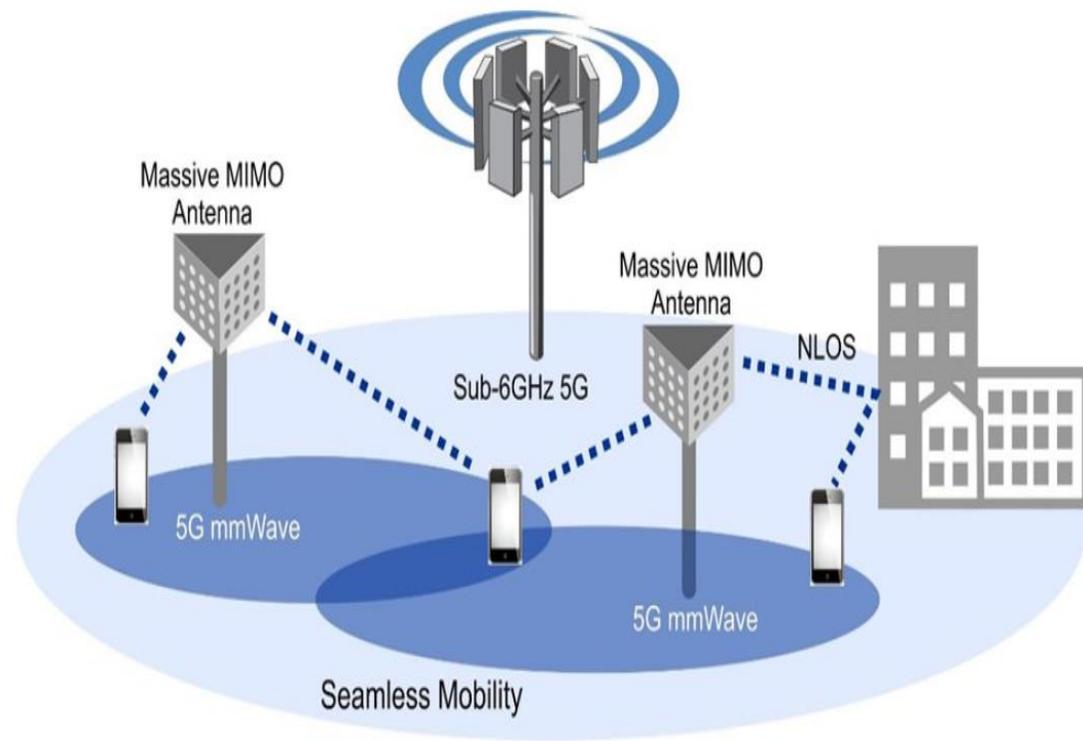
Análisis de Antenas



# Índice

---

1. Introducción
2. La quinta generación 5G
3. Sistemas multi-antena MIMO
4. Teoría de antenas
5. Teoría de arrays
6. Teoría de antenas microstrip
7. Antena microstrip 5G mmWave
8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave
9. Conclusiones y líneas futuras



# 1. Introducción

---

## 1.1 Contexto y justificación del trabajo

- ▶ Requisitos de sistemas de comunicaciones modernos 5G y B5G
  - Alta cobertura, fiabilidad, robustez, capacidad y movilidad
- ▶ Soluciones tecnológicas planteadas para satisfacer dichos requisitos
  - Explotación de la banda milimétrica 5G mmWave [24.25 GHz – 52.6 GHz]
    - Anchos de banda elevados (>1GHz) y alta tasa de velocidad (>1GBps)
    - Elevadas pérdidas de propagación a alta frecuencia
  - Sistemas multi-antena MIMO 5G
    - Beamforming: aumento de ganancia, cobertura, SNR y movilidad
    - Generalized Beamforming: aumento de robustez y reducción de BER (diversidad espacial)
    - SU/MU - MIMO: aumento de capacidad (multiplexación espacial)



# 1. Introducción

---

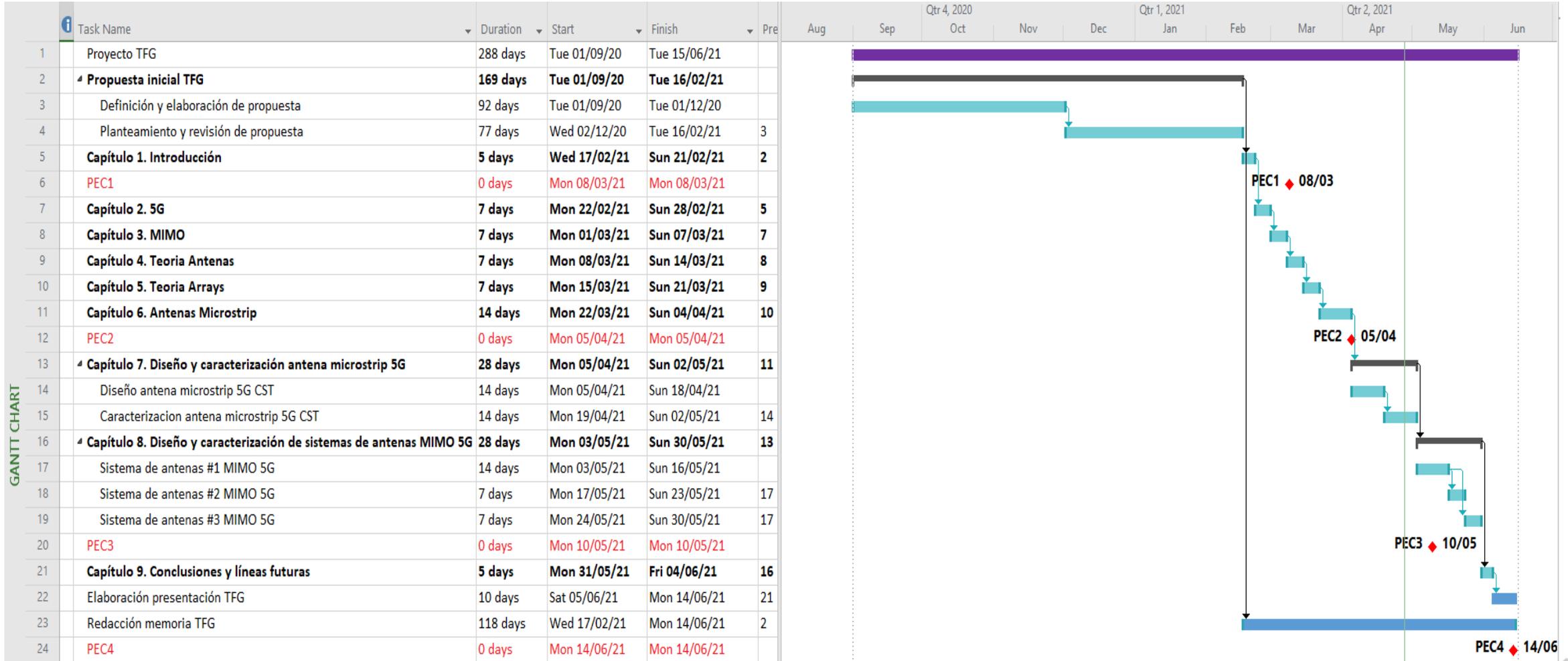
## 1.1 Contexto y justificación del trabajo

- ▶ Propuestas de diseño y caracterización con CST Microwave Studio y MATLAB
  - Antena de parche microstrip 5G mmWave 28 GHz BW=1GHz
  - Sistemas multi-antena microstrip MIMO 5G mmWave 28 GHz BW=1GHz
    - Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave
      - Beamforming, canal AWGN LOS, entorno rural
    - Sistema multi-antena #2 MIMO 5G mmWave
      - Generalized Beamforming, canal Rayleigh NLOS, entorno sub-urbano
    - Sistema multi-antena #3 MIMO 5G mmWave
      - SU/MU - MIMO, canal Rayleigh NLOS, entorno urbano



# 1. Introducción

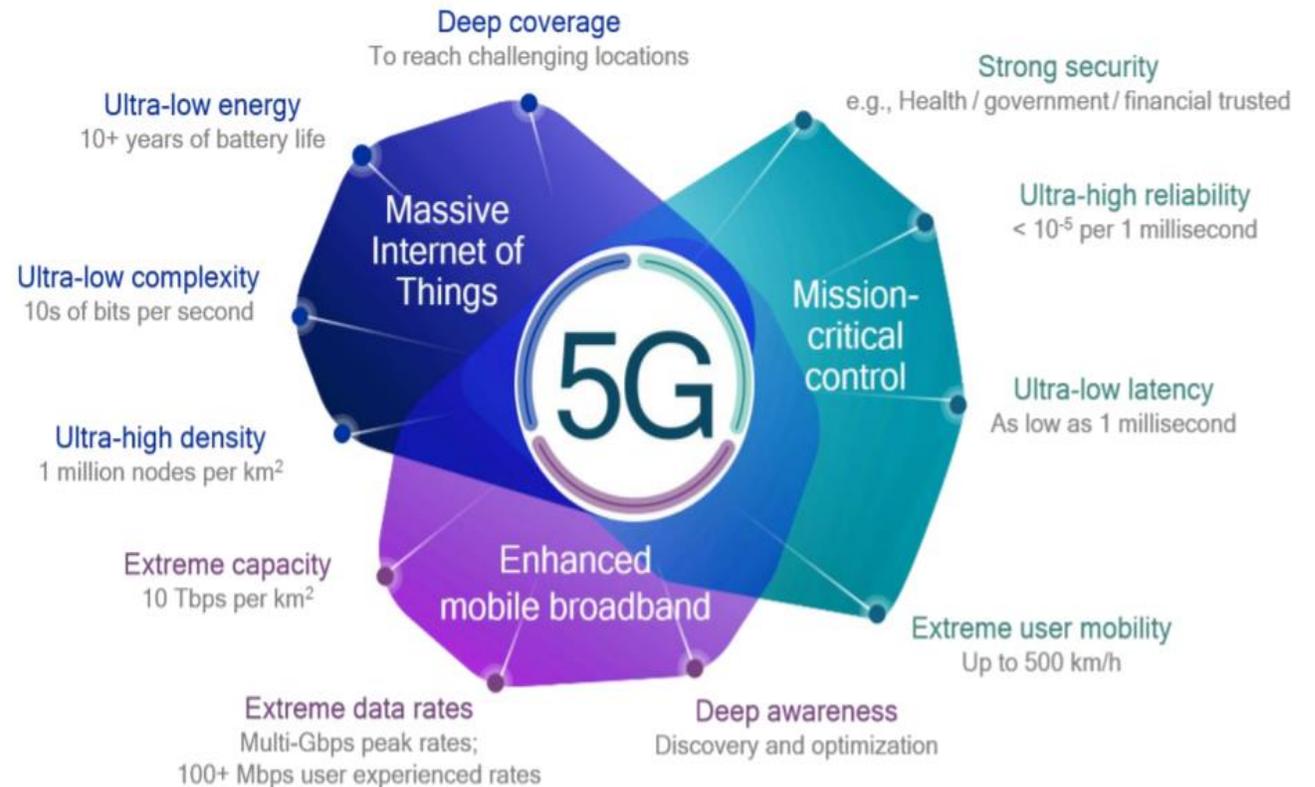
## 1.2 Planificación del trabajo



# 2. La quinta generación 5G

## 2.1 Requisitos y características 5G

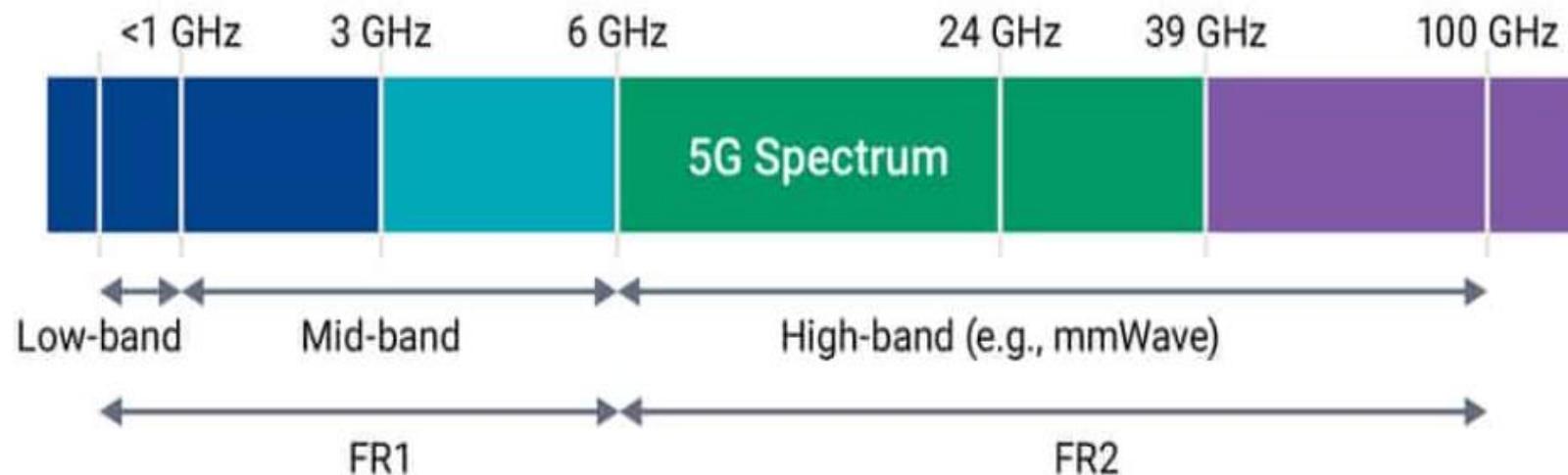
- ▶ Mayor volumen de datos
- ▶ Elevado número dispositivos
- ▶ Alta tasa de velocidad
- ▶ Baja latencia
- ▶ Escaso consumo de energía
- ▶ Alto rango de cobertura
- ▶ Robustez y fiabilidad
- ▶ Extrema movilidad usuarios
- ▶ Baja complejidad
- ▶ Alto nivel de seguridad



# 2. La quinta generación 5G

## 2.2 Espectro 5G

- ▶ Low-band (<1GHz): Excelente cobertura
- ▶ Mid-band (1 – 6 GHz): Óptima combinación de cobertura y velocidad
- ▶ High-band (>6 GHz): Cobertura reducida y tasas de velocidad extremas
- ▶ FR1 (sub-6 GHz) [450 MHz – 7.125 GHz]: Ancho de banda reducido (<100 MHz)
- ▶ FR2 (mmWave) [24.25 GHz – 300 GHz]: Ancho de banda elevados (>1 GHz)



# 2. La quinta generación 5G

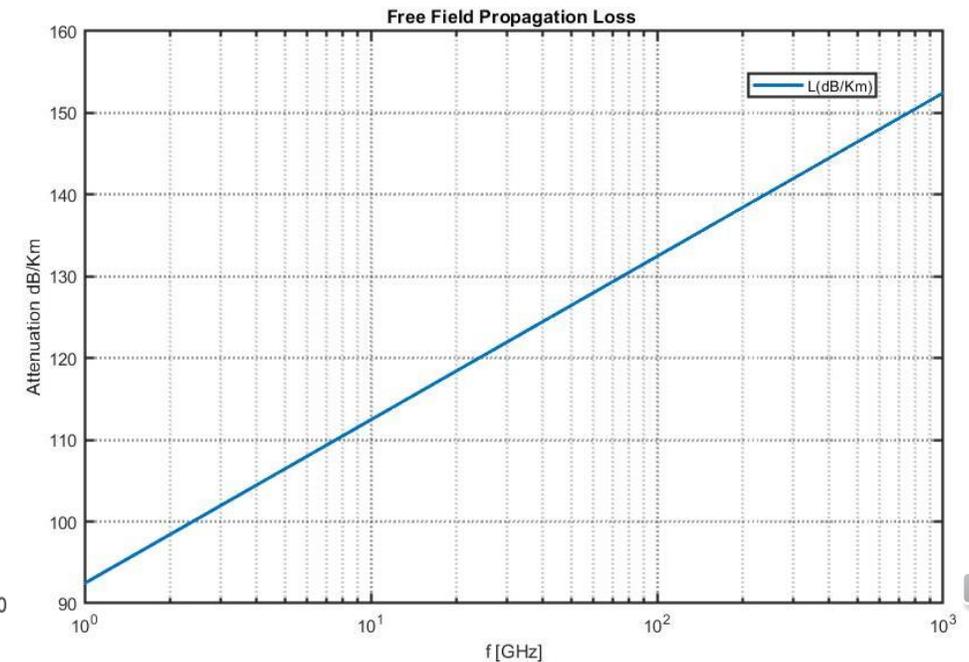
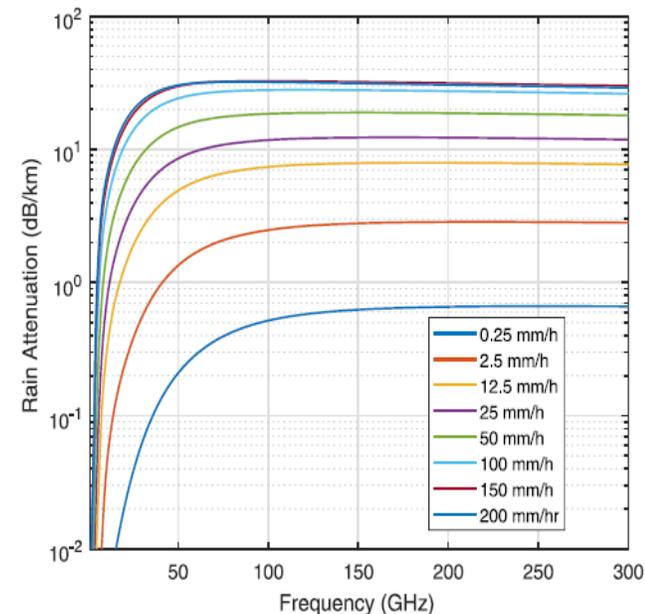
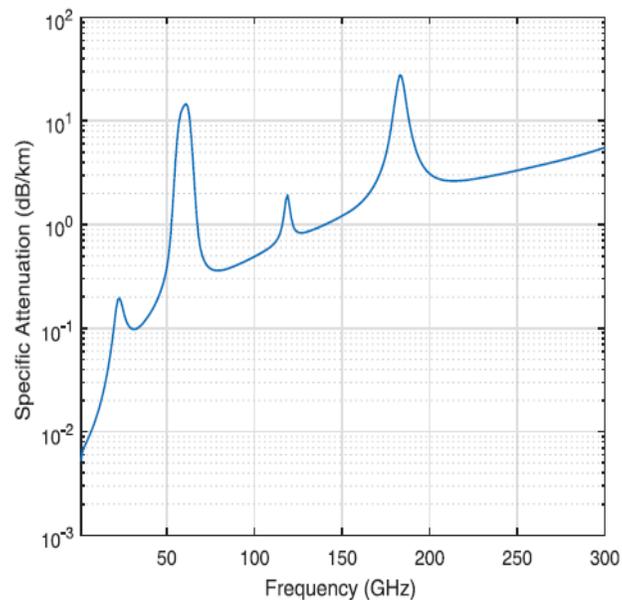
## 2.3 Banda milimétrica 5G FR2 mmWave

### ► Ventajas

- Ancho de banda elevados ( $>1\text{GHz}$ ) y alta tasa de velocidad ( $>1\text{Gbps}$ )

### ► Desventajas

- Altas pérdidas de propagación por absorción atmosférica, lluvia y espacio libre



# 3. Sistemas multi-antena MIMO

## 3.1 Modelos de canal según su propagación

► Relación señal ruido en el receptor  $SNR = \frac{P_t G_t G_r}{P_N} L = \frac{P_t G_t G_r}{k_B T_o (10^{\frac{NF}{10}} - 1) B} \left(\frac{c}{4\pi f}\right)^2 \left(\frac{1}{d}\right)^\gamma$

► Canal AWGN

- Línea de visión directa (LOS), sin fading y exponente path loss  $\gamma = 2$
- Señal recibida: réplica de señal transmitida retardada, atenuada y con ruido

$$y[n] = x[n] * h[n] + n[n] \quad h[n] = \alpha \cdot \delta(n - \tau) \quad y[n] = \alpha x[n - \tau] + n[n]$$

► Canal Rayleigh

- Sin línea de visión directa (NLOS), con fading y exponente path loss  $\gamma > 2$
- Señal recibida: réplicas de señal transmitida retardadas, atenuadas y con ruido
- Amplitud compleja canal con distribución Rayleigh

$$y[n] = x[n] * h[n, \tau] + n[n] \quad h[n, \tau] = \sum_{m=0}^{M-1} \alpha_m[n] \cdot \delta[n - \tau_m] \quad y[n] = \sum_{m=0}^{M-1} h[n, \tau] \cdot x[n - m] + n[n]$$
$$\alpha_m[n] = r_m e^{j\phi_m[n]} \quad f(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad f(\phi) = \frac{1}{2\pi} \quad 0 \leq \phi < 2\pi$$



# 3. Sistemas multi-antena MIMO

## 3.1 Modelos de canal según su propagación

### ► Probabilidad de error de bit BER

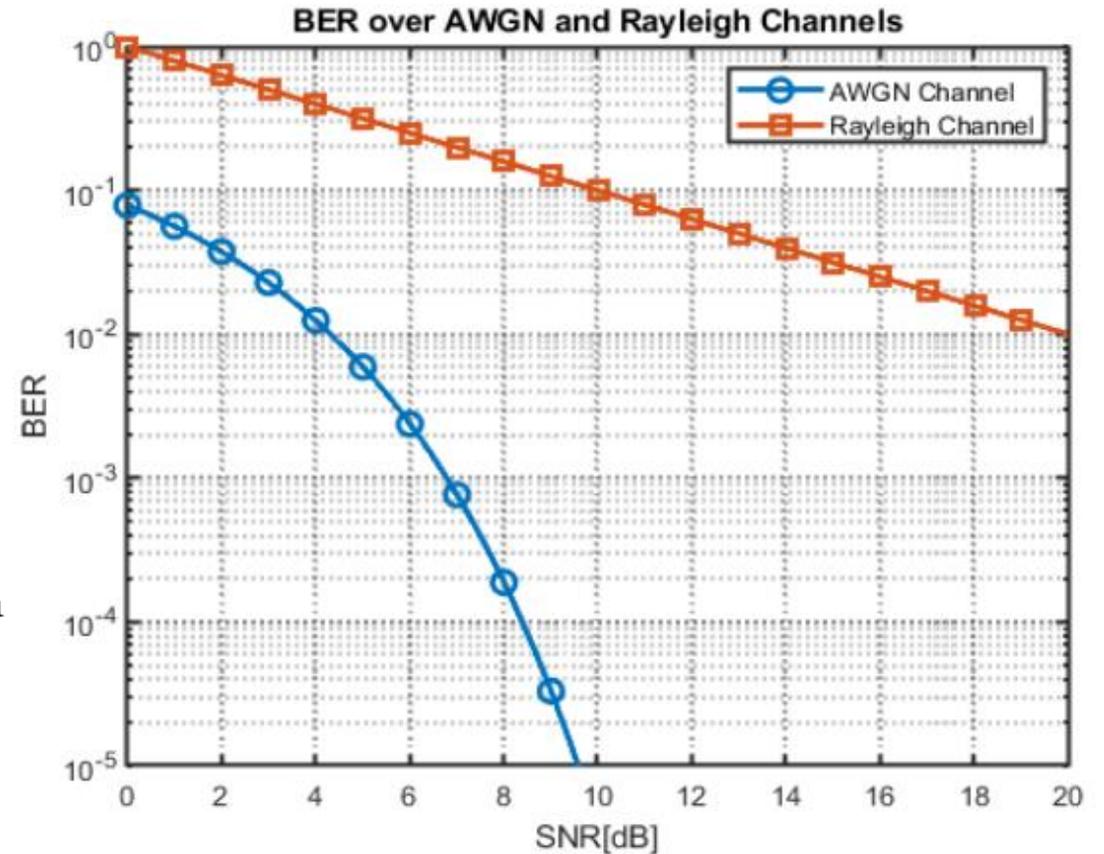
- Canal AWGN

$$BER^{AWGN} = Q(\sqrt{2SNR})$$

$$Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp - \left( \frac{x^2}{2} \right) dx \leq \frac{1}{2} \exp - \left( \frac{x^2}{2} \right)$$

- Canal Rayleigh

$$BER^{RAY} = \int_0^{\infty} f(h) Q(\sqrt{2|h|^2 SNR}) dh = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{SNR}{1 + SNR}} \right) \approx SNR^{-1}$$



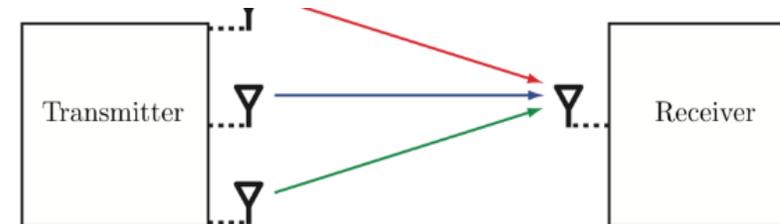
# 3. Sistemas multi-antena MIMO

## 3.2 Modelos de canal según su número de antenas

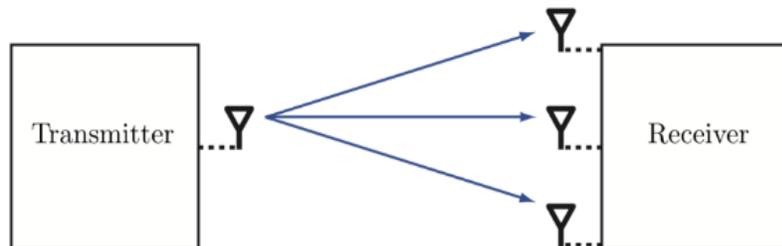
- ▶ SISO (Single-Input Single-Output)
- ▶ MISO (Multiple-Input Single-Output)
- ▶ SIMO (Single-Input Multiple-Output)
- ▶ MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)



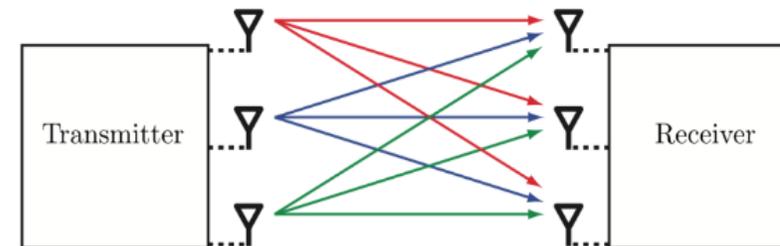
(a) Point-to-point SISO channel.



(c) Point-to-point MISO channel.



(b) Point-to-point SIMO channel.



(d) Point-to-point MIMO channel.



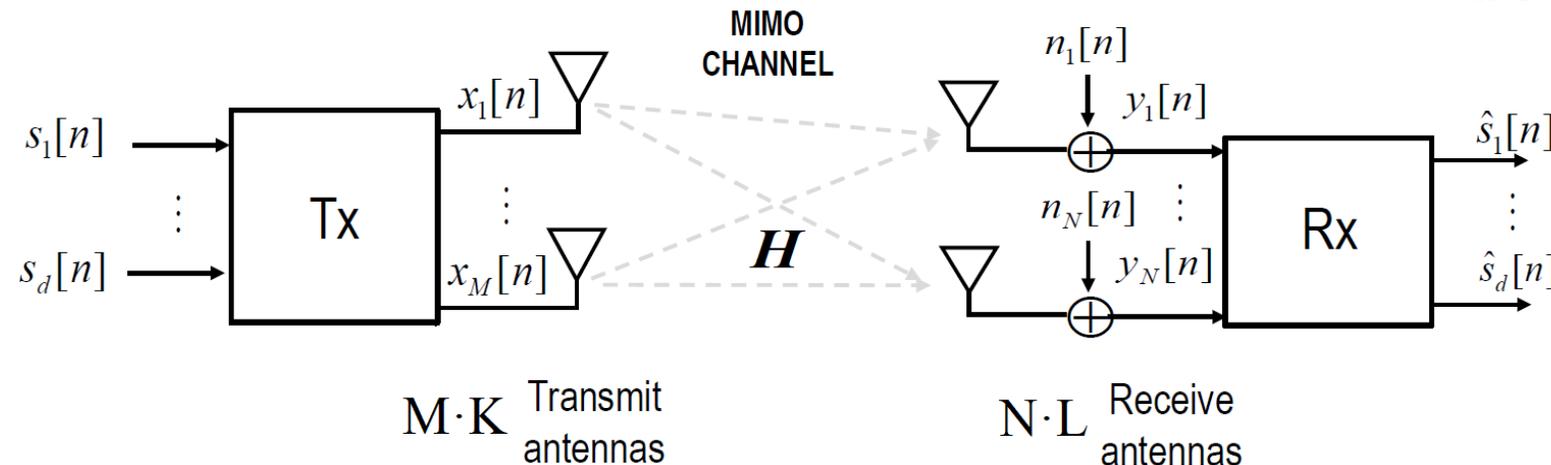
# 3. Sistemas multi-antena MIMO

## 3.2 Modelos de canal según su número de antenas

### ► Sistema multi-antena MIMO ( $M \cdot K \times N \cdot L$ )

- Número de sub-arrays Tx ( $M$ )
- Número de antenas Tx por sub-array Tx ( $K$ )
- Número de sub-arrays Rx ( $N$ )
- Número de antenas Rx por sub-array Rx ( $L$ )
- Señal recibida canal MIMO ( $M \cdot K \times N \cdot L$ )

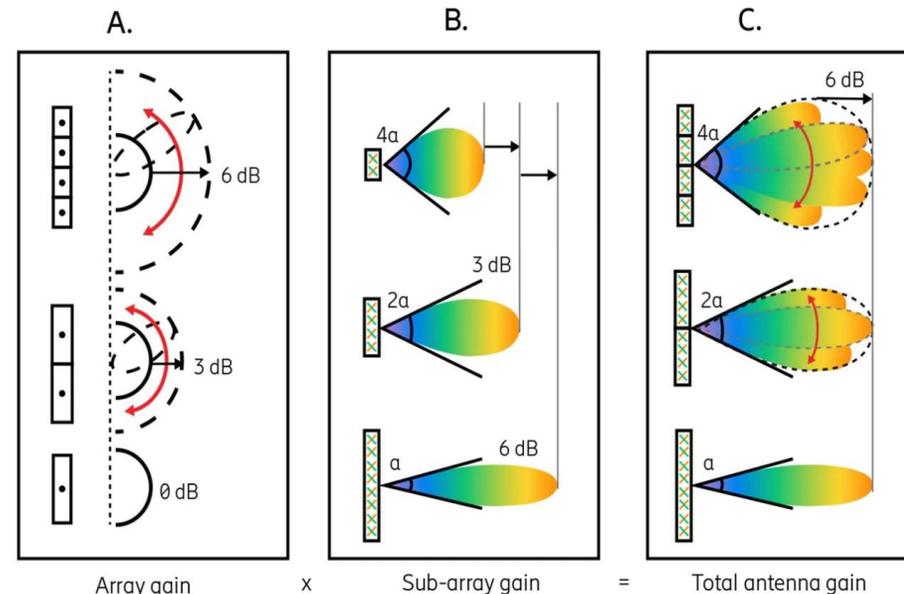
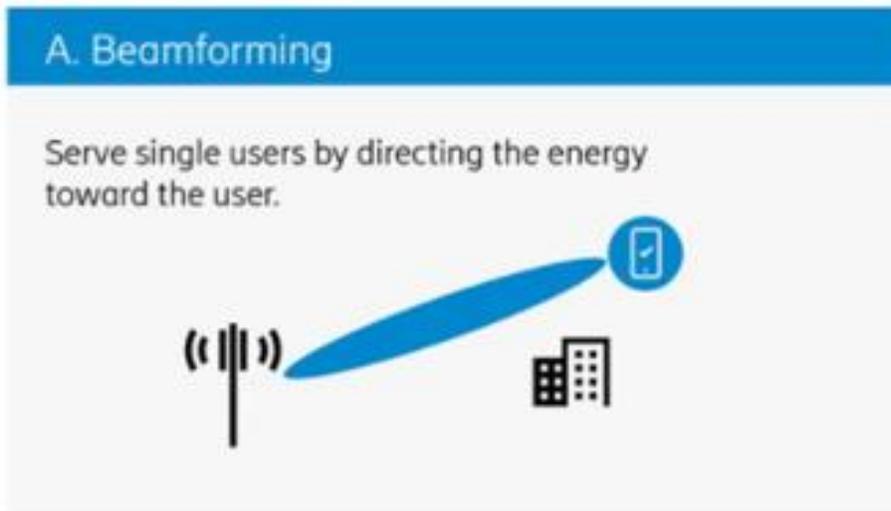
$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad y_n = \sum_{m=1}^M h_{mn}x_m + n_n \quad n = 1, 2, \dots, N$$



# 3. Sistemas multi-antena MIMO

## 3.3 Beamforming

- ▶ Control de la dirección del haz y aumento de ganancia, SNR/cobertura y movilidad
- ▶ Ganancia de array ( $g_A$ ): superposición constructiva de las señales de los sub-arrays
- ▶ Ganancia de sub-array ( $g_{SA}$ ): superposición constructiva de las señales de las antenas que forman los sub-arrays
- ▶ Ganancia total Beamforming ( $g_{BF}$ ): producto de la ganancia de array y sub-array



$$g_{BF} = g_A g_{SA} = MN \cdot KL$$



# 3. Sistemas multi-antena MIMO

## 3.3 Beamforming

- ▶ SNR sub-canal AWGN MIMO

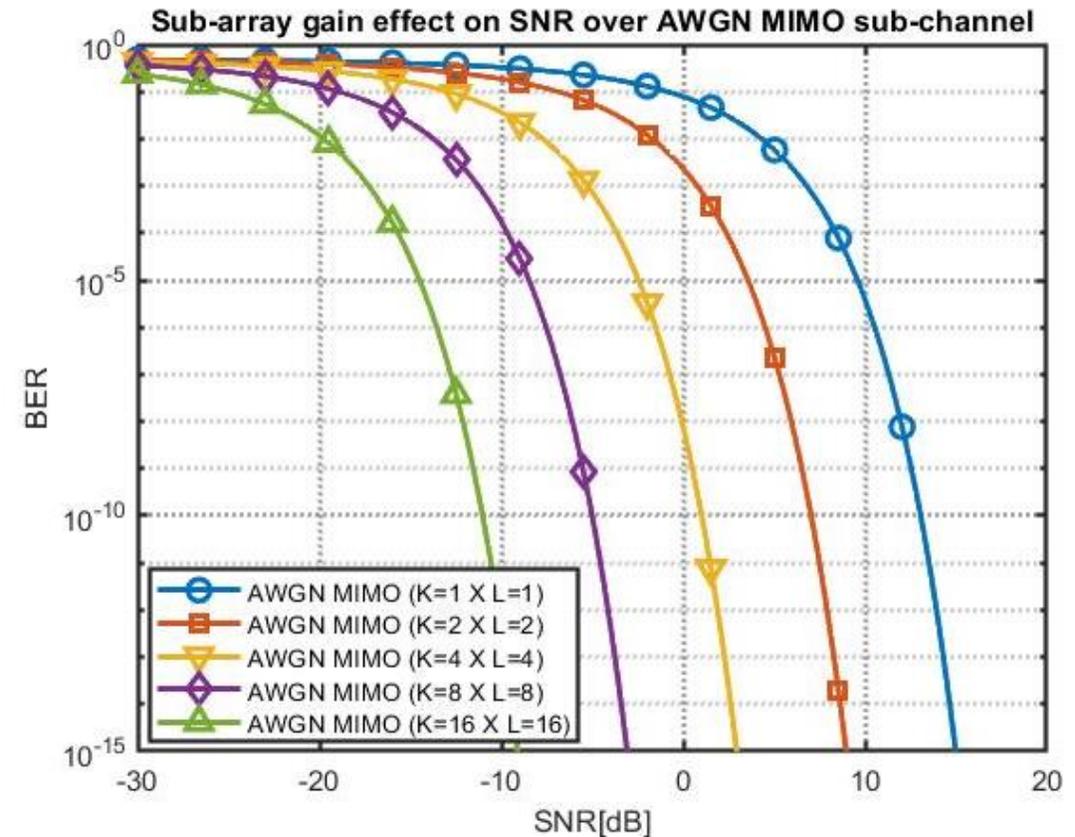
$$SNR_{MIMO} = g_{SA} SNR_{SISO} = KL \cdot SNR_{SISO}$$

- ▶ BER canal AWGN SISO

$$BER_{SISO}^{AWGN} = Q(\sqrt{2SNR_{SISO}})$$

- ▶ BER sub-canal AWGN MIMO

$$BER_{MIMO}^{AWGN} = Q(\sqrt{2SNR_{MIMO}}) = Q(\sqrt{2g_{SA}SNR_{SISO}}) = Q(\sqrt{2KL \cdot SNR_{SISO}})$$



# 3. Sistemas multi-antena MIMO

## 3.3 Beamforming

- ▶ SNR sub-canal Rayleigh MIMO

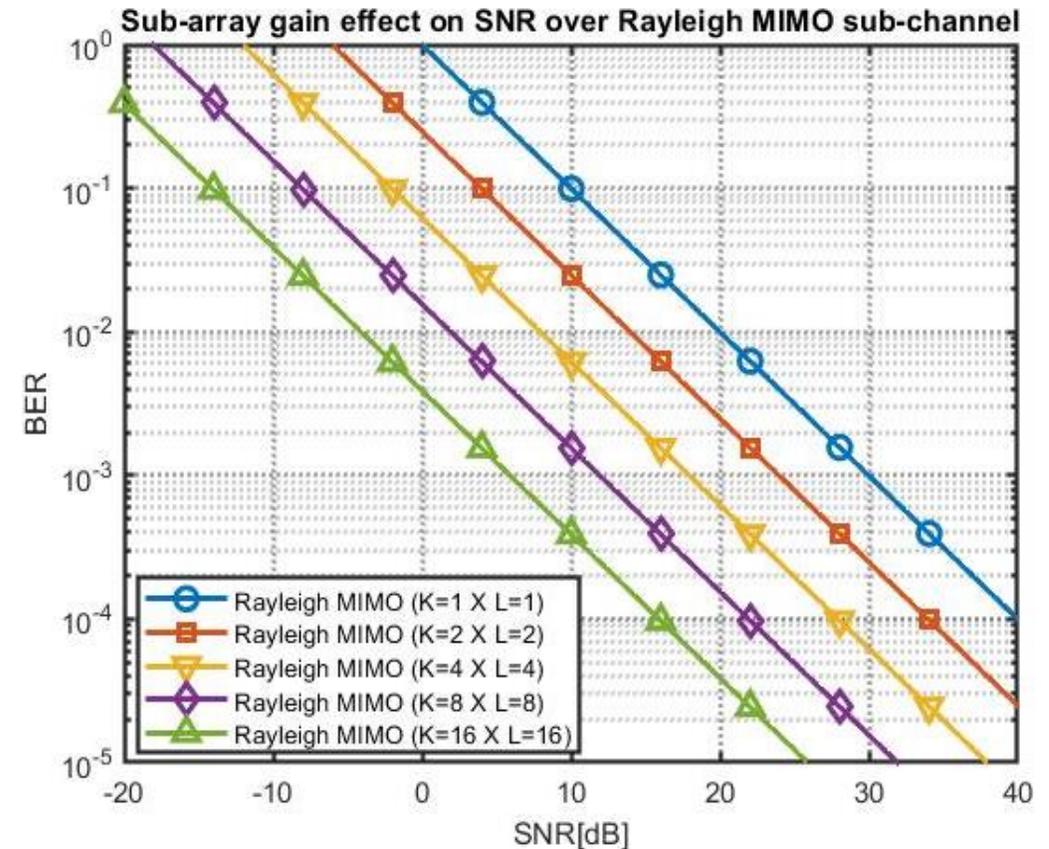
$$SNR_{MIMO} = g_{SA} SNR_{SISO} = KL \cdot SNR_{SISO}$$

- ▶ BER canal Rayleigh SISO

$$BER_{SISO}^{RAY} \approx SNR_{SISO}^{-1}$$

- ▶ BER sub-canal Rayleigh MIMO

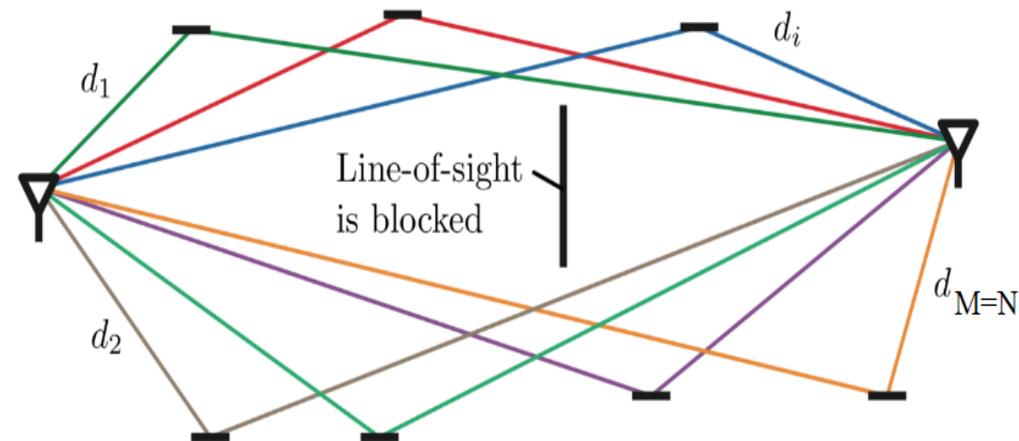
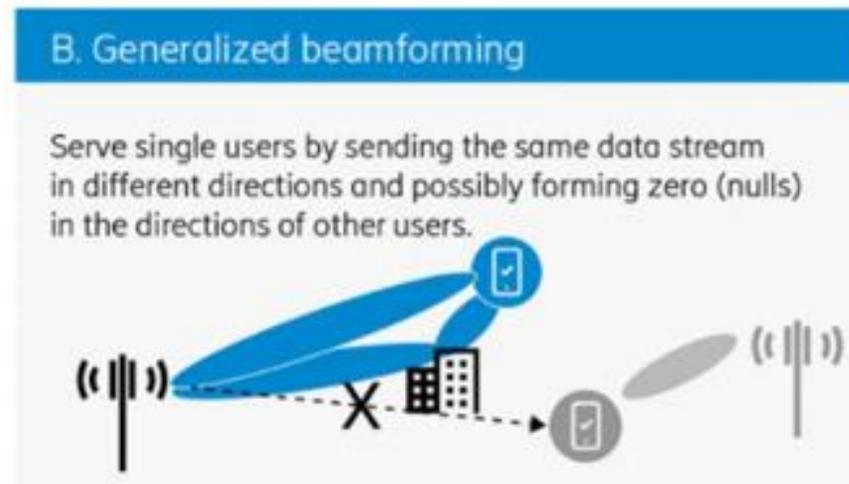
$$BER_{MIMO}^{RAY} \approx SNR_{MIMO}^{-1} \approx (g_{SA} SNR_{SISO})^{-1} \approx (KL \cdot SNR_{SISO})^{-1}$$



# 3. Sistemas multi-antena MIMO

## 3.4 Generalized Beamforming. Diversidad espacial

- ▶ Envío simultáneo de  $M$  símbolos de información duplicados para reducir la BER del canal MIMO, generando así ganancia de diversidad espacial
- ▶ Requisitos ganancia máxima de diversidad espacial ( $d = MN$ )
  - Máxima dispersión angular (*scattering*) en transmisión y recepción
  - Sectores TX/RX conectados a través de  $M=N$  sub-canales de propagación
  - Sub-canales con máxima independencia estadística de *fading*



# 3. Sistemas multi-antena MIMO

## 3.4 Generalized Beamforming. Diversidad espacial

### ► Definición ganancia diversidad espacial

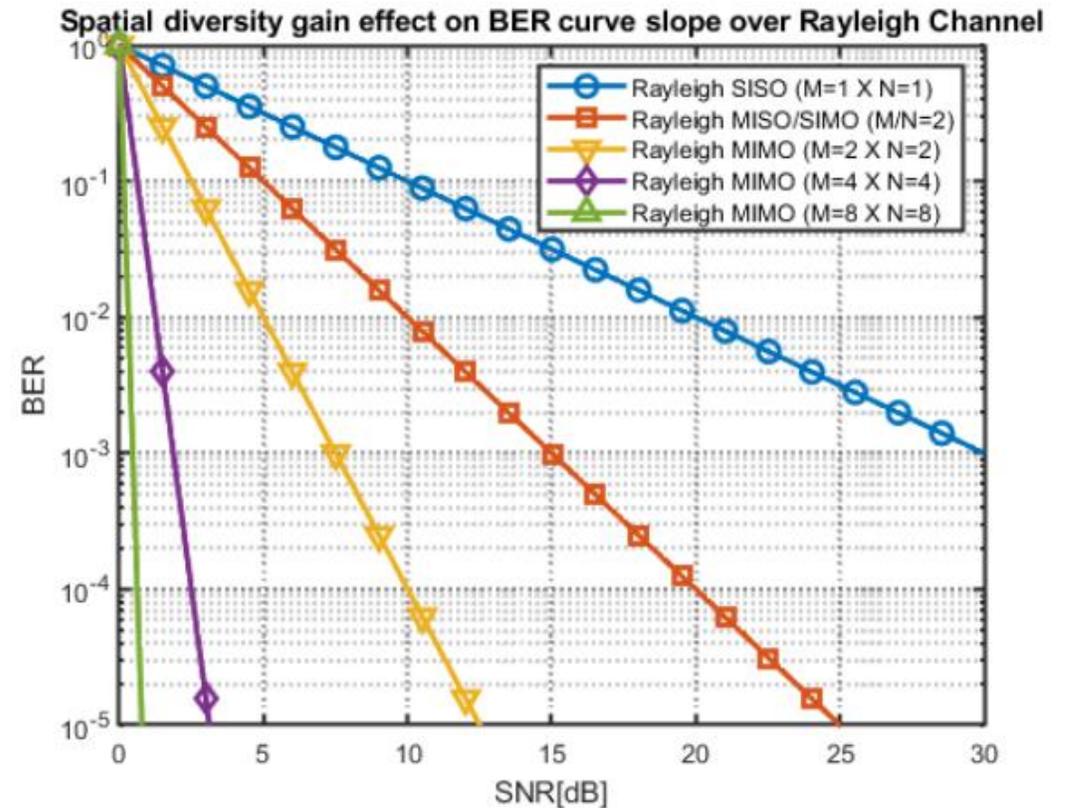
- Número de realizaciones de canal estadísticamente independientes
- Pendiente negativa de la curva

BER-SNR

$$d = - \lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{\log(BER(SNR))}{\log(SNR)}$$

### ► BER canal Rayleigh MIMO con máxima ganancia de diversidad espacial

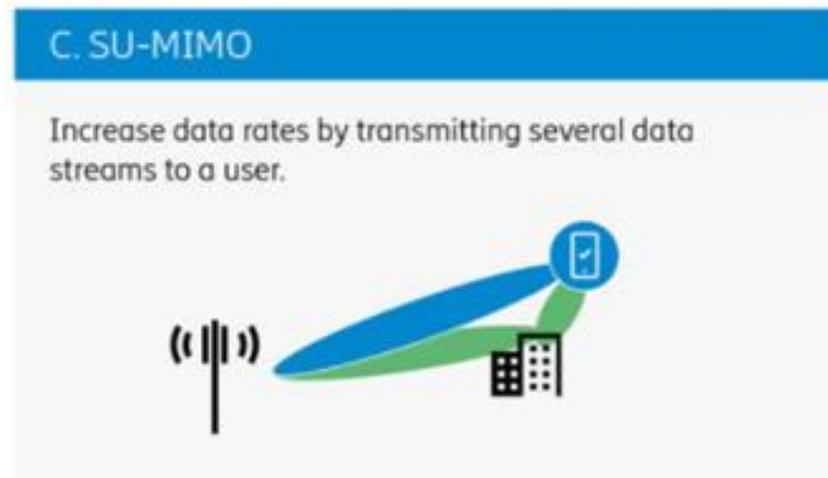
$$BER_{MIMO}^{RAY} \approx SNR_{MIMO}^{-d} \approx (g_{SA} SNR_{SISO})^{-MN}$$



# 3. Sistemas multi-antena MIMO

## 3.5 SU/MU MIMO. Multiplexación espacial

- ▶ Envío simultáneo de  $M$  símbolos de información diferentes para aumentar la capacidad de canal MIMO, generando así ganancia de multiplexación espacial
- ▶ Definición ganancia de multiplexación espacial  $r = \text{rank}(\mathbf{H}) = \min(M, N)$ 
  - Número de flujos de datos independientes que pueden ser enviados de forma simultánea por el canal MIMO
- ▶ Canal MIMO = conjunto de  $r$  sub-canales SISO estadísticamente independientes



# 3. Sistemas multi-antena MIMO

## 3.5 SU/MU MIMO. Multiplexación espacial

- ▶ Ganancia de multiplexación espacial
  - Pendiente positiva de la curva de capacidad-SNR

$$r = \lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{C(SNR)}{\log(SNR)}$$

- ▶ Capacidad canal AWGN/Rayleigh SISO

$$C_{AWGN} = C_{SISO} = B \log_2(1 + SNR)$$

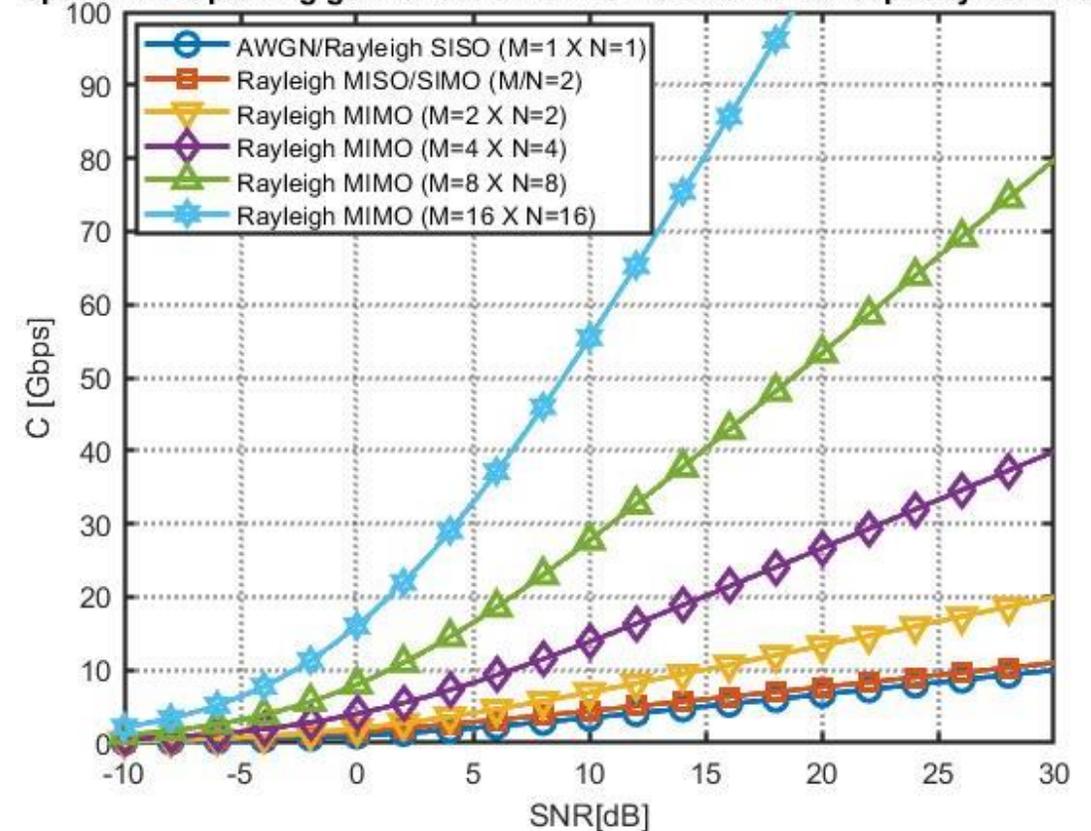
- ▶ Capacidad canal Rayleigh MISO/SIMO

$$C_{SIMO} = C_{MISO} = B \log_2(1 + M \cdot SNR)$$

- ▶ Capacidad canal Rayleigh MIMO

$$C_{MIMO} = rB \log_2(1 + SNR) = \min(M, N) C_{SISO}$$

Spatial multiplexing gain effect on MIMO 1GHz channel capacity curve slope



# 4. Teoría de antenas

---

## 4.1 Caracterización de antenas

- ▶ Impedancia de antena

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} = R_A + jX_A \quad (\Omega)$$

- ▶ Relación onda estacionaria

$$VSWR = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \in [1, \infty)$$

- ▶ Potencia radiada

$$P_r = \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} \vec{\rho}(\theta, \phi) r^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad [W]$$

- ▶ Ganancia

$$G = \frac{\rho_{max}}{\frac{P_A}{4\pi r^2}} = \frac{P_r}{P_A} \frac{\rho_{max}}{\frac{P_r}{4\pi r^2}} = \eta_r \cdot D$$

- ▶ Coeficiente de reflexión

$$\Gamma = |\Gamma|e^{j\theta} = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_A - Z_o}{Z_A + Z_o} \quad ; \quad |\Gamma| \in [0,1]$$

- ▶ Eficiencia de antena

$$\eta_A = \eta_r \eta_m = \eta_r \cdot (1 - |\Gamma|^2)$$

- ▶ Directividad

$$D = \frac{4\pi}{\int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} t(\theta, \phi) d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_e}$$

- ▶ Ancho de banda fraccional

$$FBW(C, \%) = \frac{\Delta f}{f_o} \cdot 100 = \frac{f_2 - f_1}{f_o} \cdot 100$$



# 4. Teoría de antenas

## 4.1 Caracterización de antenas

### ► Diagrama de radiación

- Coordenadas esféricas  $P(r, \theta, \phi)$

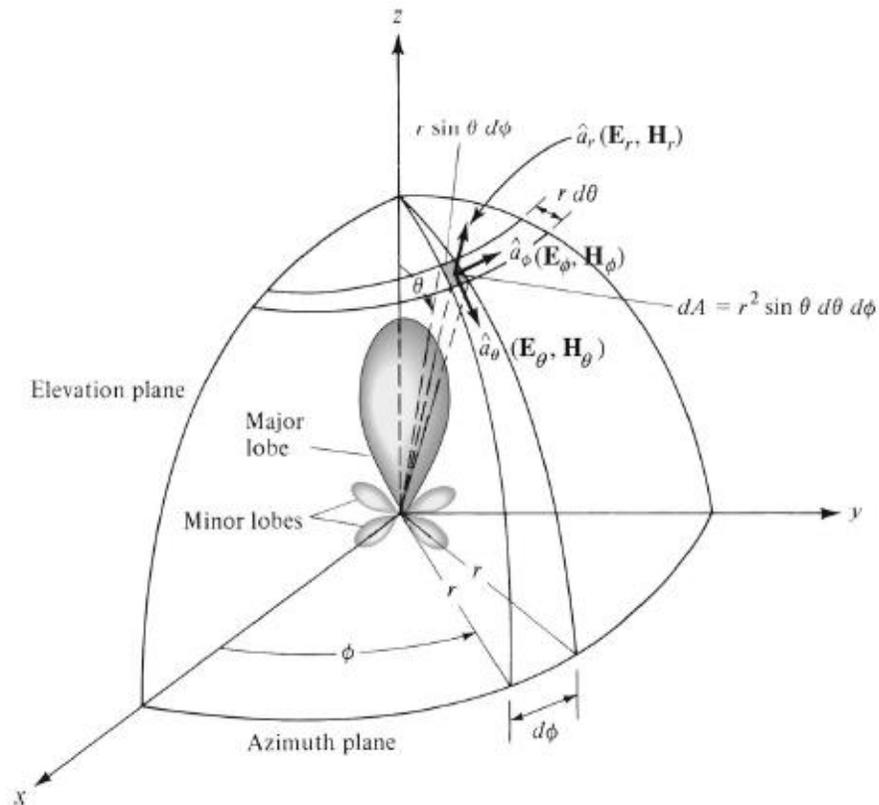


Tabla 4.1: Notación de ejes y planos en coordenadas esféricas

|          | $\theta$    | $\phi$      |
|----------|-------------|-------------|
| Eje +Z   | $0^\circ$   | $\forall$   |
| Eje -Z   | $180^\circ$ | $\forall$   |
| Eje +Y   | $90^\circ$  | $90^\circ$  |
| Eje -Y   | $90^\circ$  | $270^\circ$ |
| Eje +X   | $90^\circ$  | $0^\circ$   |
| Eje -X   | $90^\circ$  | $180^\circ$ |
| Plano XY | $90^\circ$  | $\forall$   |
| Plano XZ | $\forall$   | $0^\circ$   |
| Plano YZ | $\forall$   | $90^\circ$  |



# 4. Teoría de antenas

---

## 4.1 Caracterización de antenas

### ► Polarización

- Campo eléctrico onda EM plana con dirección propagación +Z

$$\vec{E}(z; t) = (\vec{E}_x + \vec{E}_y)e^{j(\omega t - kz)} \quad \vec{E}_x = E_{xo}e^{j\varphi_x}\hat{x} \quad \vec{E}_y = E_{yo}e^{j\varphi_y}\hat{y}$$

- Polarización lineal

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = n\pi \quad ; \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

- Polarización circular

$$|E_x| = |E_y| \rightarrow E_{xo} = E_{yo}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = \begin{cases} +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, & n = 0, 1, 2, \dots \text{ CW RHCP} \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, & n = 0, 1, 2, \dots \text{ CCW LHCP} \end{cases}$$

- Polarización elíptica

$$|E_x| \neq |E_y| \rightarrow E_{xo} \neq E_{yo}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = \begin{cases} +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, & n = 0, 1, 2, \dots \text{ CW RHCP} \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, & n = 0, 1, 2, \dots \text{ CCW LHCP} \end{cases}$$



# 5. Teoría de arrays

---

## 5.1 Introducción

- ▶ Agrupación de  $N$  elementos radiantes que permite sintetizar diagramas de radiación con mayores prestaciones de ganancia, directividad y movilidad
- ▶ Caracterización de arrays de antenas
  - Configuración geométrica del array (lineal, bidimensional)
  - Número de elementos ( $N$ )
  - Distancia entre elementos ( $d$ )
  - Excitación de corriente ( $a_n$ ) (Uniforme, Triangular, Binómica)
  - Factor de array  $FA(\Psi)$
  - Diagrama de radiación del elemento básico



# 5. Teoría de arrays

---

## 5.2 Arrays lineales

- ▶ Corriente compleja elemento radiante

$$I_n = a_n e^{jn\alpha} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

- ▶ Factor de array

$$FA(\psi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi}$$

- ▶ Directividad array

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_e}$$

$$\Omega_e = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |\overline{FA}(\theta, \phi)|^2 \sin\theta d\theta d\phi$$

$$\overline{FA}(\theta, \phi, ) = \frac{FA(\theta, \phi)}{FA_{max}}$$

- ▶ Margen visible ángulo eléctrico

$$\psi \in [\psi_{min}, \psi_{max}] \in [-kd + \alpha[rad], kd + \alpha[rad]]$$

- ▶ Polinomio de array

$$P(z) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n z^n$$

$$FA(\psi) = P(z)|_{z=e^{j\psi}}$$



# 5. Teoría de arrays

## 5.2 Arrays lineales. Efecto de la distribución de corriente

- ▶ Array distribución corriente uniforme

$$|FA_U(\psi)| = \left| \frac{\sin\left(\frac{N\psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \right| \quad a_n^U = 1$$

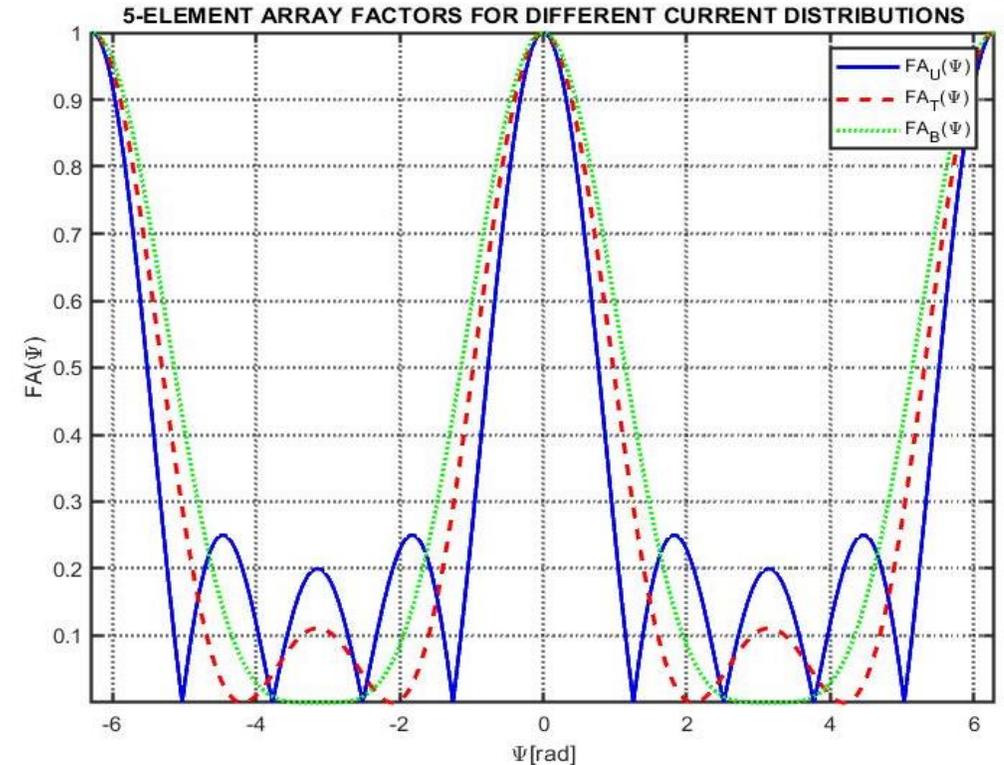
- ▶ Array distribución de corriente triangular

$$|FA_T(\psi)| = \left| \frac{\sin\left(\left(\frac{N+1}{2}\right)\frac{\psi}{2}\right)}{\sin(\psi/2)} \right|^2 \quad a_n^T = \begin{cases} \frac{2n}{N+1} & 0 \leq n \leq \frac{N-1}{2} \\ 2 - \frac{2n}{N+1} & \frac{N-1}{2} < n \leq N \end{cases}$$

- ▶ Array distribución de corriente binomial

$$|FA_B(\psi)| = |1 + e^{j\psi}|^{N-1} = \left(2 \cos\frac{\psi}{2}\right)^{N-1}$$

$$P(z) = (1+z)^{N-1} = \frac{1}{(N+1)} + \frac{(N-1)}{(N+1)}z + \frac{(N-1)(N-2)}{2!(N+1)}z^2 + \frac{(N-1)(N-2)(N-3)}{3!(N+1)}z^3 + \dots$$



$$D_U > D_T > D_B$$

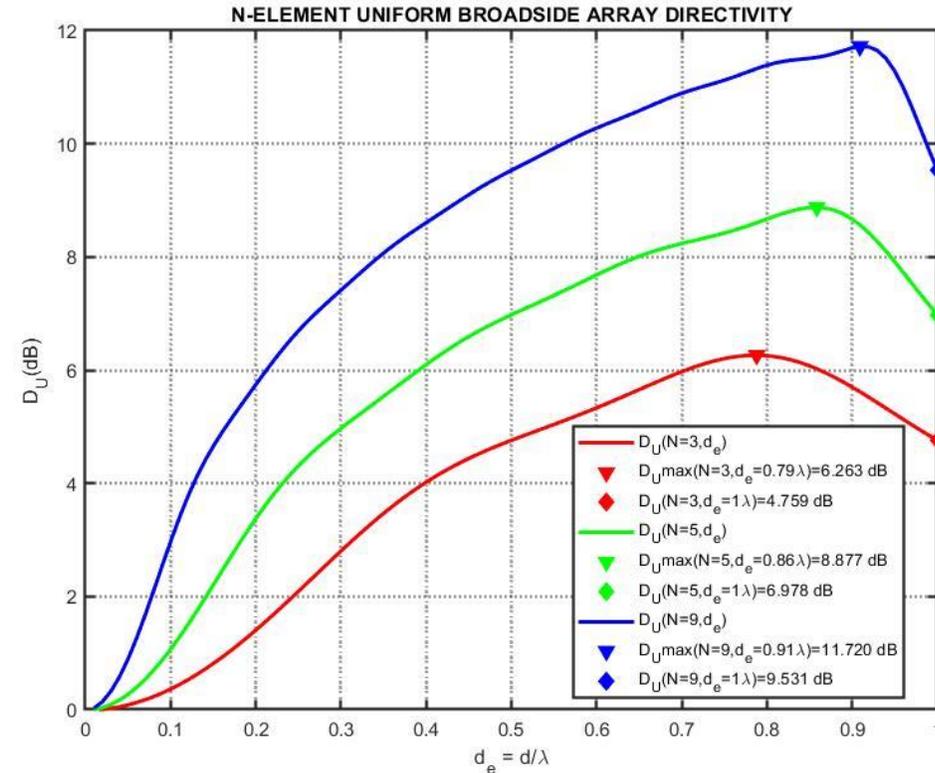
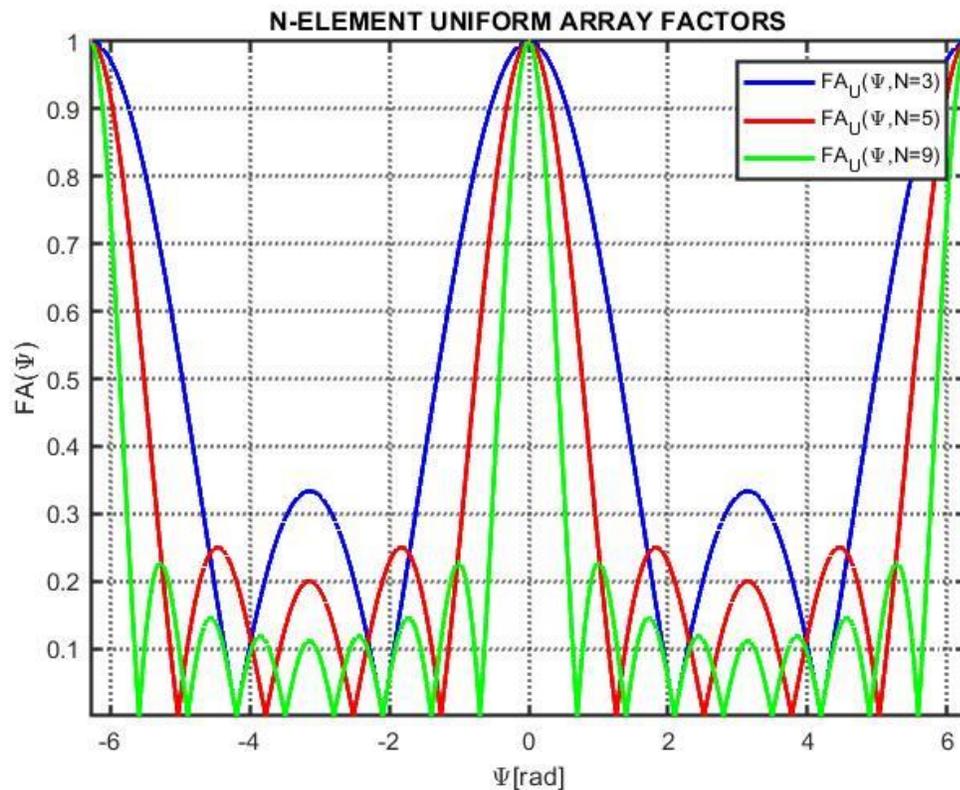
$$NLPS_B > NLPS_T > NLPS_U$$



# 5. Teoría de arrays

## 5.2 Arrays lineales. Efecto del número y distancia elementos

- Aumento de directividad con el número de elementos y con la distancia entre elementos del array siempre que se evite la aparición de lóbulos de difracción



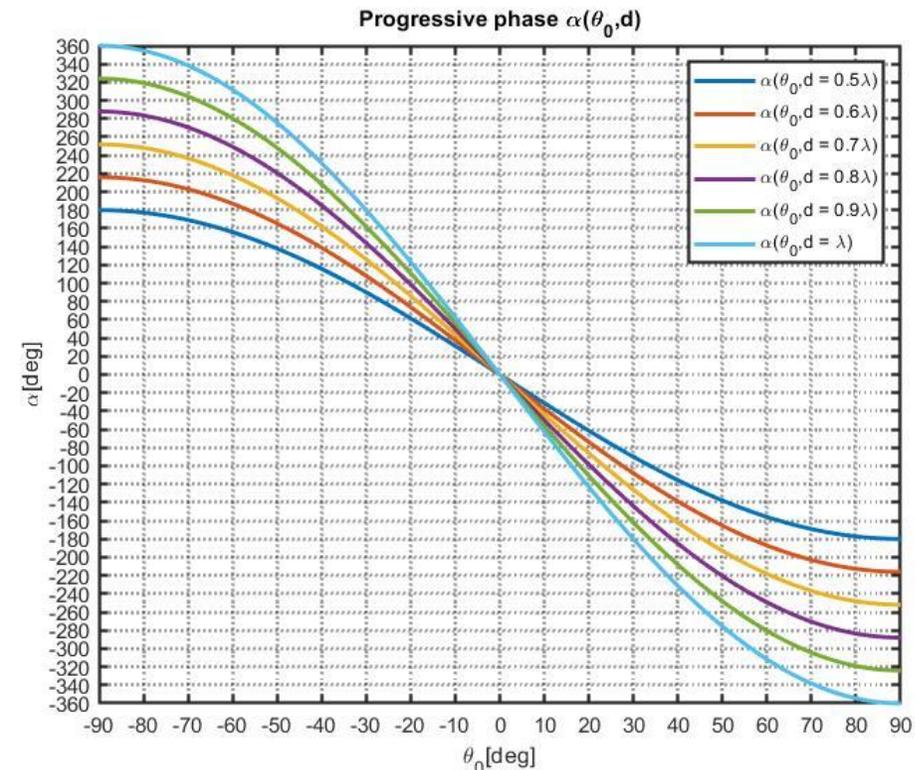
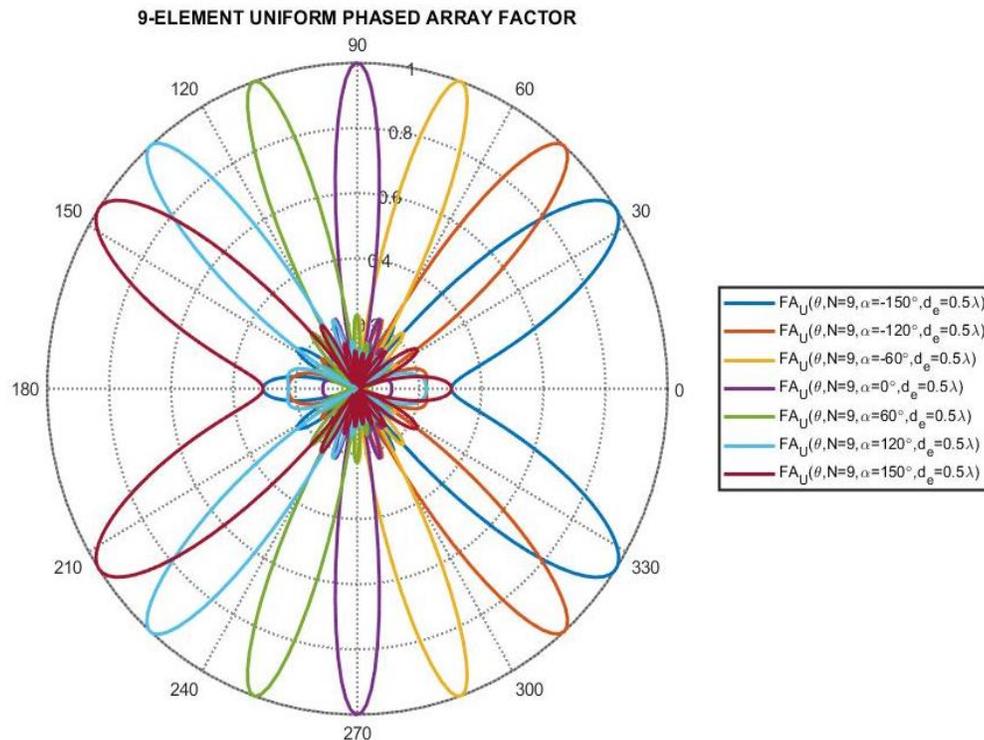
# 5. Teoría de arrays

## 5.2 Arrays lineales. Efecto de la fase progresiva

- Beamforming en la dirección de máxima radiación mediante el control de la fase progresiva del array

$$\theta_{max} = \cos^{-1}\left(-\frac{\alpha[\text{rad}]}{kd}\right) = \cos^{-1}\left(-\frac{\alpha[\text{deg}]\pi}{180kd}\right)$$

$$\alpha[\text{deg}] = -\frac{180\sin(\theta_0)kd}{\pi} \quad \theta_0 = 90^\circ - \theta_{max}$$



# 5. Teoría de arrays

## 5.2 Arrays lineales. Distancia máxima y lóbulos de difracción

- ▶ Distancia eléctrica máxima en función de fase progresiva

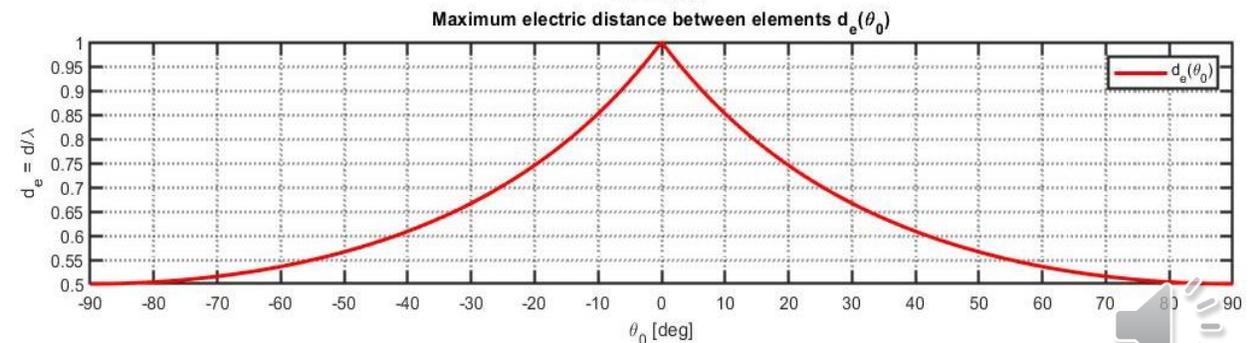
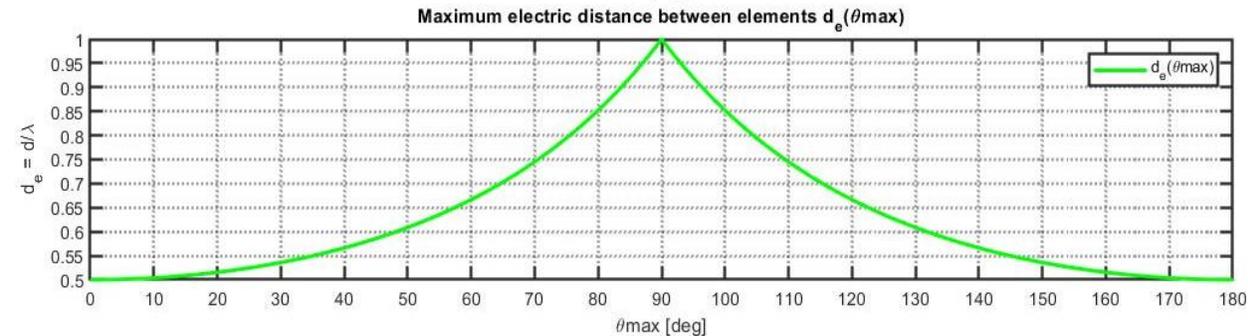
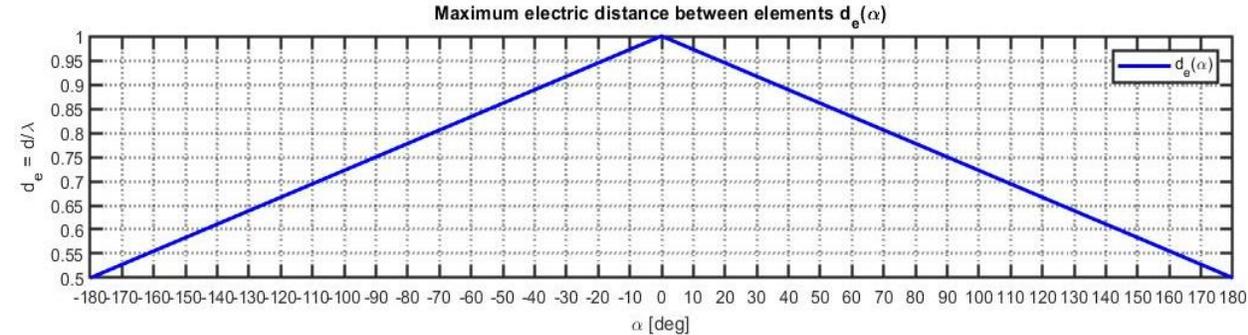
$$\frac{d}{\lambda} < 1 - \frac{|\alpha [deg]|}{360}$$

- ▶ Distancia eléctrica máxima en función de dirección máxima radiación

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{1}{1 + |\cos(\theta_{max})|}$$

- ▶ Distancia eléctrica máxima en función del rango de escaneo Beamforming

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{1}{1 + \sin|\theta_0|}$$



# 5. Teoría de arrays

## 5.3 Arrays bidimensionales

- Factor array bidimensional en plano XY

$$FA(\psi_x, \psi_y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} a_{mn} e^{jm\psi_x} e^{jn\psi_y}$$

- Dirección de máxima radiación  $(\theta_0, \phi_0)$

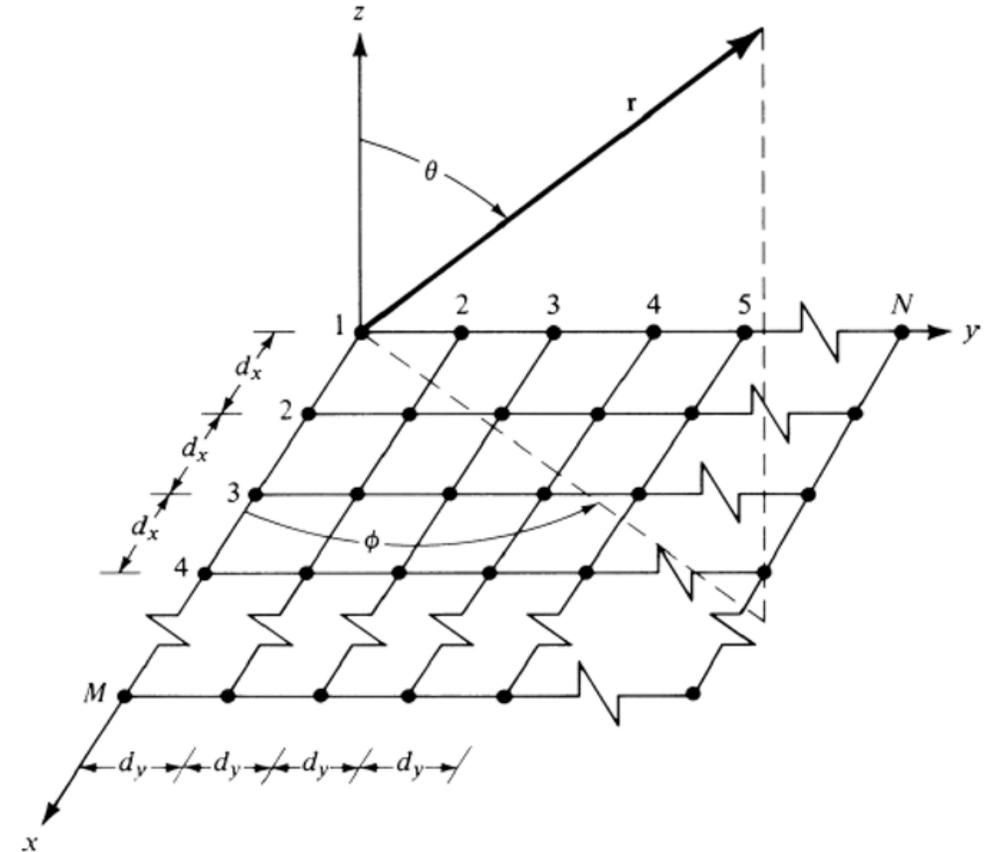
$$\theta_0 = \sin^{-1} \left( \sqrt{\left( \frac{\alpha_x}{kd_x} \right)^2 + \left( \frac{\alpha_y}{kd_y} \right)^2} \right)$$

$$\phi_0 = \tan^{-1} \left( \frac{\alpha_y d_x}{\alpha_x d_y} \right)$$

- Fases progresivas

$$\alpha_x = -kd_x \sin(\theta_0) \cos(\phi_0)$$

$$\alpha_y = -kd_y \sin(\theta_0) \sin(\phi_0)$$

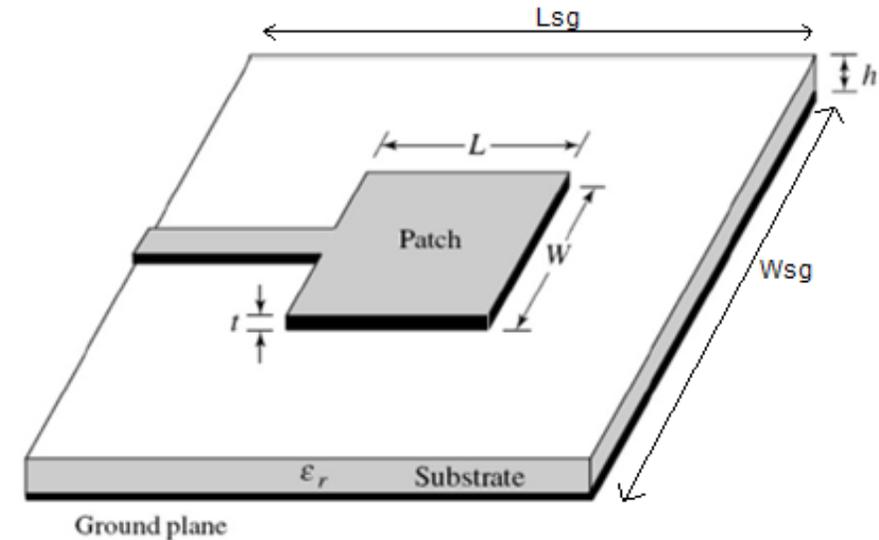


# 6. Teoría de antenas microstrip

## 6.1 Introducción

### ► Elementos antena de parche microstrip

- Plano de masa ( $L_{sg} \times W_{sg} \times t$ )
- Substrato ( $L_{sg} \times W_{sg} \times h$ ) con constante dieléctrica  $\epsilon_r$
- Parche radiante ( $L \times W \times t$ )



### ► Ventajas antenas microstrip

- Bajo perfil, peso, coste y volumen
- Facilidad de agrupación en arrays
- Red alimentación integrada en la estructura

### ► Desventajas antenas microstrip

- Alto factor de calidad
- Ancho de banda limitado
- Baja ganancia
- Limitación de potencia



# 6. Teoría de antenas microstrip

## 6.2 Modelo de línea de transmisión

- ▶ La antena microstrip es modelada como una sección de línea de transmisión de baja impedancia  $Z_c$  colocada entre dos ranuras radiantes de longitud  $L$
- ▶ Dado que las dimensiones del parche son finitas, se producirán los llamados *fringing effects* que provocarán que la antena sea eléctricamente más grande

▶ Ancho del parche

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \sqrt{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r \sqrt{\epsilon_r + 1}}$$

▶ Constante dieléctrica efectiva

$$\epsilon_{re\text{ff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

▶ Incremento longitud

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{re\text{ff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{re\text{ff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}$$

▶ Longitud efectiva parche

$$L_{eff} = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{re\text{ff}}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{v_0}{2f_r \sqrt{\epsilon_{re\text{ff}}}}$$

▶ Longitud real parche

$$L = L_{eff} - 2\Delta L$$

▶ Dimensiones substrato

$$L_{sg} = 6h + L \quad W_{sg} = 6h + W$$



# 6. Teoría de antenas microstrip

## 6.3 Técnica de adaptación de impedancias *inset feed*

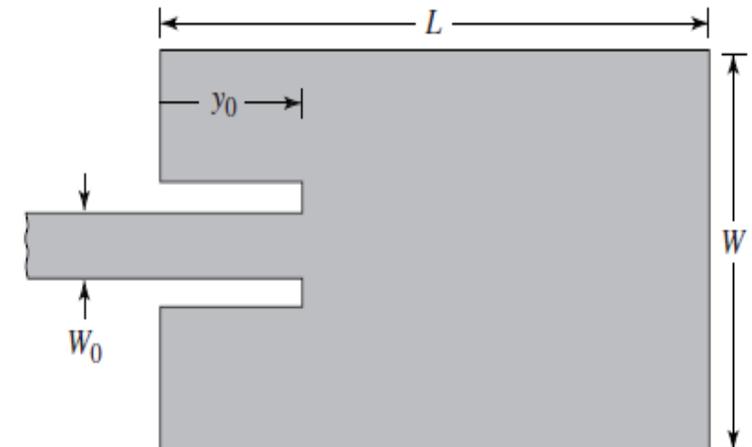
- ▶ La resistencia de entrada de una antena microstrip será máxima en los bordes y nula en el centro del parche
- ▶ Realización de dos incisiones de longitud  $y_0$  sobre el parche tal que la línea de alimentación *microstrip* de ancho  $W_0$  con impedancia característica  $Z_c$  sea adaptada con el parche  $R_{in}(y = y_0) = Z_c$
- ▶ Calculo de conductancias, resistencia en el borde de la antena y longitud  $y_0$

$$G_1 = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos(\theta)\right)}{\cos(\theta)} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos(\theta)\right)}{\cos(\theta)} \right]^2 J_0(k_0 L \sin\theta) \sin^3 \theta d\theta$$

$$R_{in}(y = 0) = \frac{1}{2(G_1 + G_{12})}$$

$$y_0 = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \left( \sqrt{\frac{R_{in}(y = y_0)}{R_{in}(y = 0)}} \right)$$



# 7. Antena microstrip 5G mmWave

## 7.1 Introducción. Requisitos del substrato dieléctrico

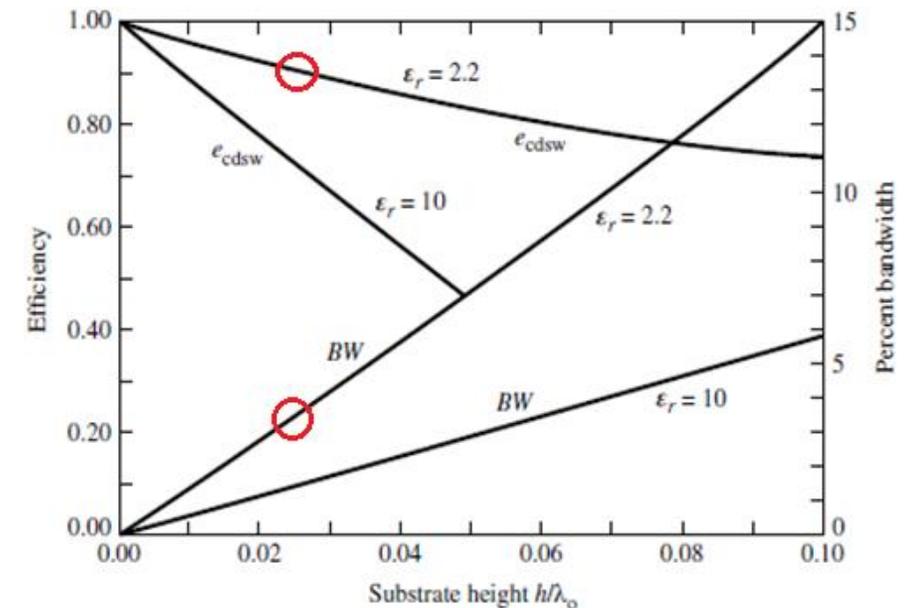
► Diseño de antena microstrip con ancho de banda  $BW = 1 \text{ GHz}$  resonante a la frecuencia  $f_0 = 28 \text{ GHz}$  para operar en la banda milimétrica 5G FR2 mmWave

► Mínimo ancho de banda fraccional

$$FBW = \frac{\Delta f}{f_0} \cdot 100 = \frac{1 \cdot 10^9 \text{ Hz}}{28 \cdot 10^9 \text{ Hz}} \cdot 100 = 3.57 \%$$

► Constantes dieléctricas  $\epsilon_r$  bajas y espesores de substrato  $h$  altos para lograr el ancho de banda requerido sin comprometer la eficiencia

► Mínimo espesor de substrato  $\epsilon_r = 2.2$  y eficiencia



$$h/\lambda_0 = 0.025, \quad h = 0.268 \text{ mm} \quad e_{cdsw} = 0.9 \rightarrow 90\% \quad FBW = 3.57 \%$$



# 7. Antena microstrip 5G mmWave

## 7.2 Diseño teórico antena microstrip 5G con MATLAB y ADS

Tabla 7.1: Parámetros antena microstrip 5G mmWave @ 28 GHz

| Definición                                     | Parámetro             | Valor          |
|--|-----------------------|----------------|
| Frecuencia de operación                        | $f_0$                 | 28 GHz         |
| Longitud de onda de operación                  | $\lambda_0 = v_0/f_0$ | 10.7142 mm     |
| Substrato dieléctrico                          | Rogers                | RT Duroid 5880 |
| Constante dieléctrica substrato                | $\epsilon_r$          | 2.2            |
| Constante dieléctrica efectiva substrato       | $\epsilon_{reff}$     | 2.016          |
| Tangente de pérdidas substrato                 | $\tan\delta$          | 0.0009         |
| Espesor substrato                              | $h$                   | 0.381 mm       |
| Incremento de longitud <i>fringing effects</i> | $\Delta L$            | 0.19749 mm     |
| Longitud efectiva del parche                   | $L_{eff}$             | 3.7704 mm      |
| Longitud real del parche                       | $L$                   | 3.3754 mm      |
| Ancho del parche                               | $W$                   | 4.2323 mm      |
| Longitud del substrato/plano de masa           | $L_{sg} = L + 6h$     | 5.6614 mm      |
| Ancho del substrato/plano de masa              | $W_{sg} = W + 6h$     | 6.5183 mm      |
| Espesor parche/plano de masa                   | $t$                   | 0.035 mm       |

Tabla 7.2: Parámetros de interés técnica alimentación *inset feed*

| Definición  | Parámetro     | Valor             |
|---|---------------|-------------------|
| Conductancia <i>slot 1</i>                        | $G_1$         | 1.5724 mS         |
| Conductancia mutua <i>slots 1, 2</i>              | $G_{12}$      | 0.5494 mS         |
| Resistencia en los bordes                         | $R_{in}(y=0)$ | 235.6469 $\Omega$ |
| Longitud <i>inset</i>                             | $y_0$         | 1.1734 mm         |
| Anchura <i>inset</i>                              | $W_i = W/25$  | 0.16929 mm        |
| Impedancia característica línea <i>microstrip</i> | $Z_0$         | 50 $\Omega$       |
| Anchura línea <i>microstrip</i>                   | $W_0$         | 1.15755 mm        |



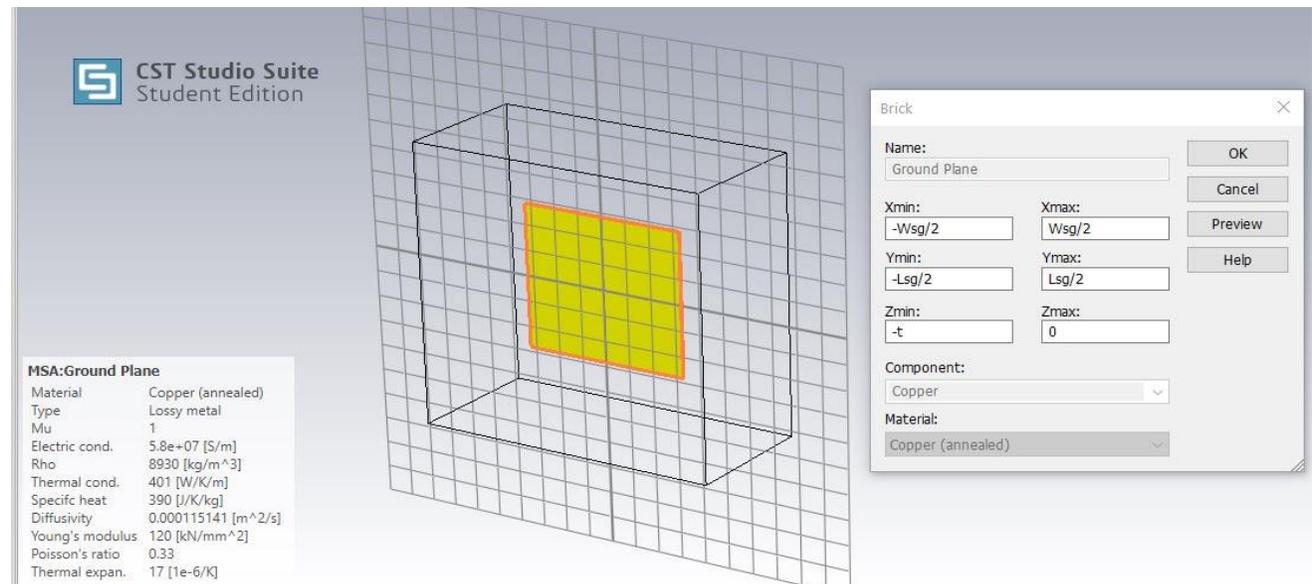
# 7. Antena microstrip 5G mmWave

## 7.3 Diseño antena microstrip 5G mmWave en CST

► Parametrización en CST

| Parameter List |            |          |                               |  |
|----------------|------------|----------|-------------------------------|--|
| Name           | Expression | Value    | Description                   |  |
| lambda         | = 10.7142  | 10.7142  | Wavelength                    |  |
| Lsg            | = L + 6*h  | 5.6614   | Substrate/Ground Plane Length |  |
| Wsg            | = W + 6*h  | 6.5183   | Substrate/Ground Plane Width  |  |
| L              | = 3.3754   | 3.3754   | Patch Length                  |  |
| W              | = 4.2323   | 4.2323   | Patch Width                   |  |
| h              | = 0.381    | 0.381    | Substrate Height              |  |
| t              | = 0.035    | 0.035    | Patch/Ground Plane Height     |  |
| Wo             | = 1.15755  | 1.15755  | Microstrip Line Width         |  |
| Wi             | = W/25     | 0.169292 | Inset Width                   |  |
| yo             | = 1.1734   | 1.1734   | Inset Length                  |  |

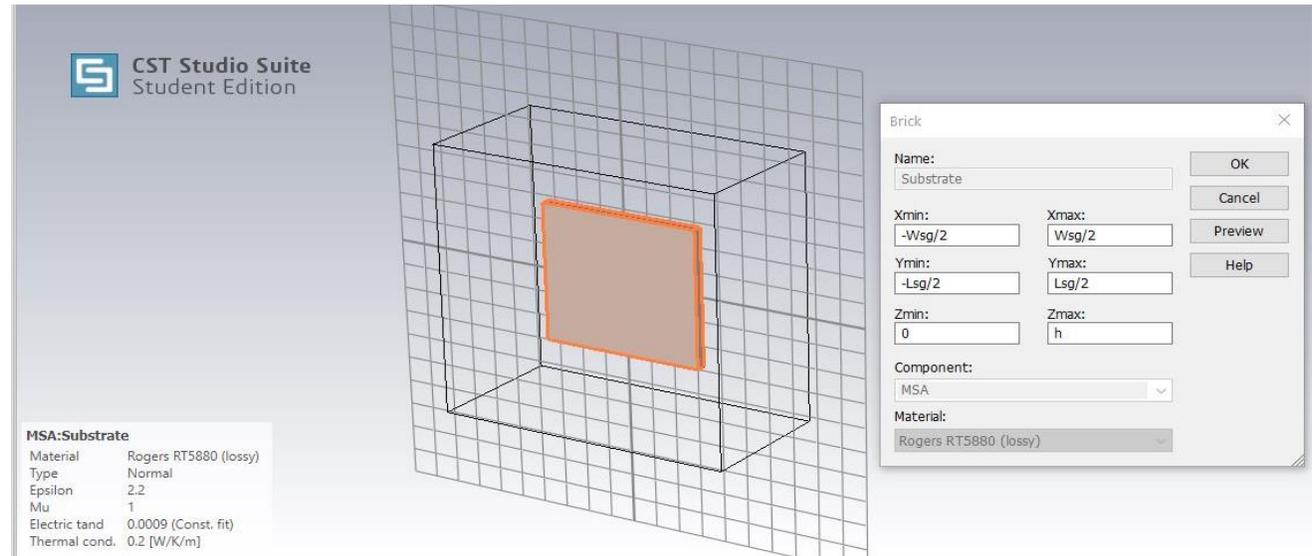
► Diseño del plano de masa



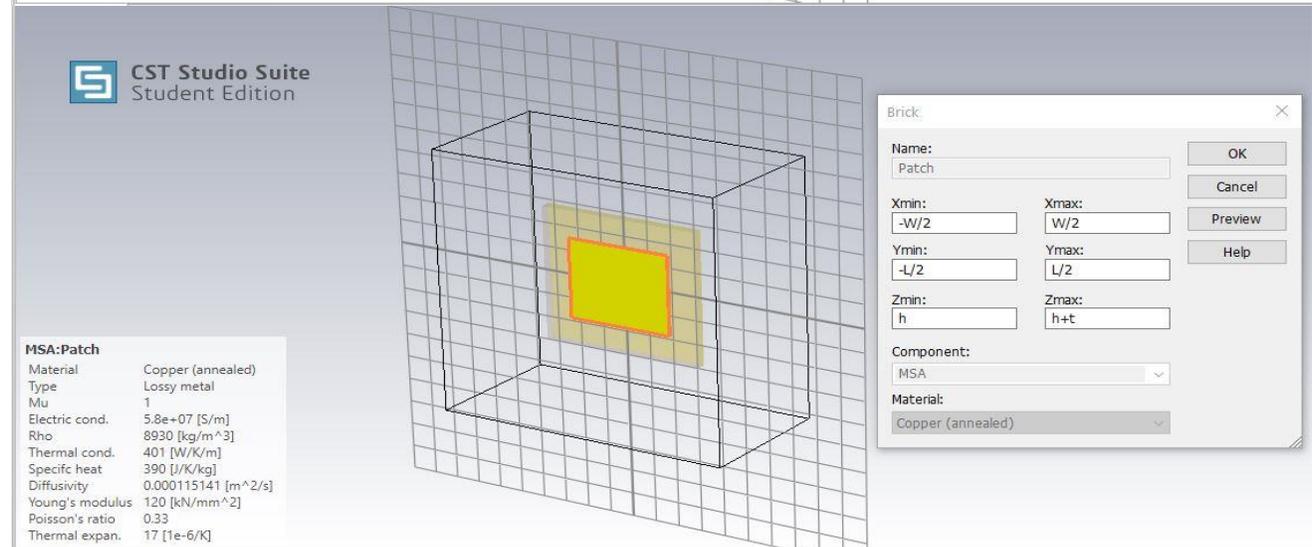
# 7. Antena microstrip 5G mmWave

## 7.3 Diseño antena microstrip 5G mmWave en CST

► Diseño del substrato



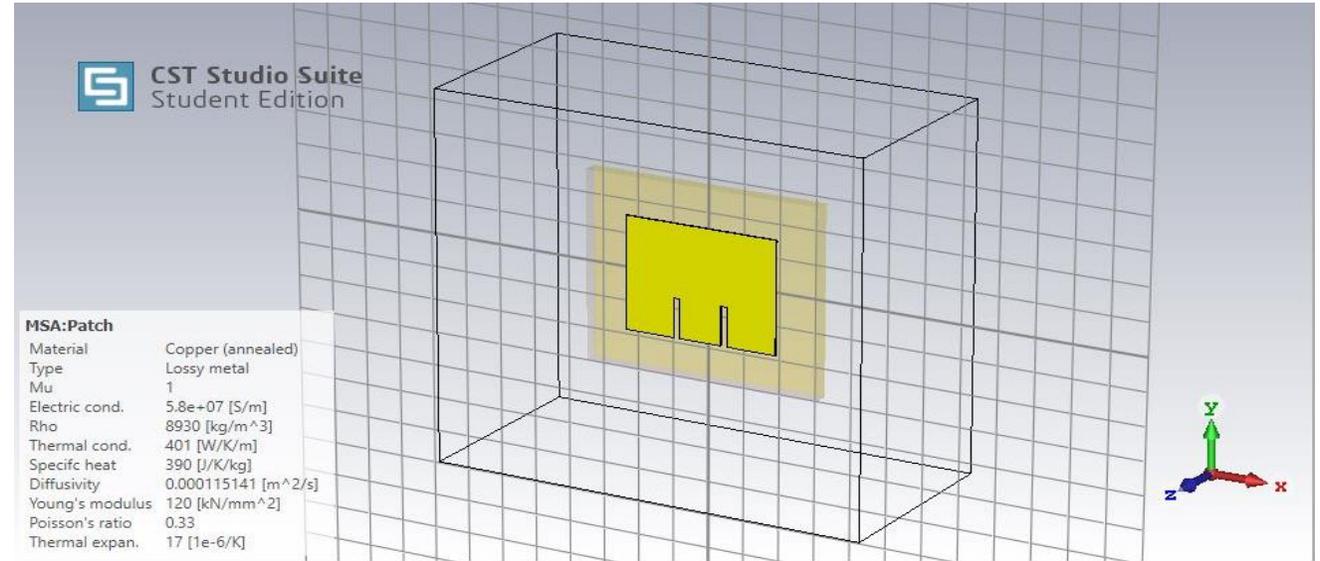
► Diseño del parche



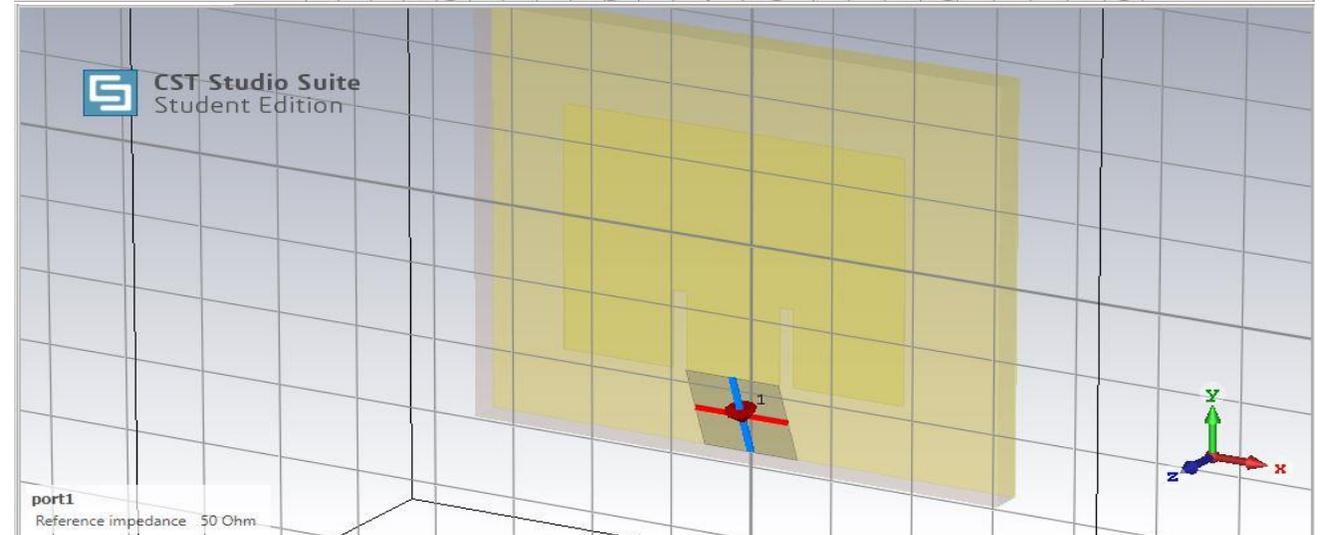
# 7. Antena microstrip 5G mmWave

## 7.3 Diseño antena microstrip 5G mmWave en CST

► Diseño del parche con los *insets*



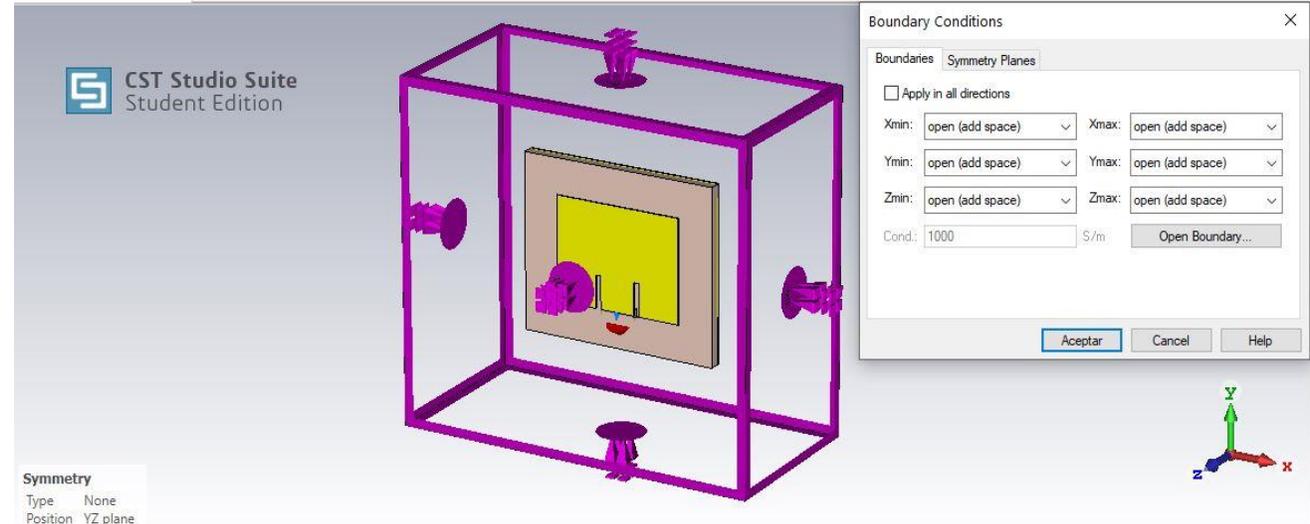
► Modelado del puerto de alimentación



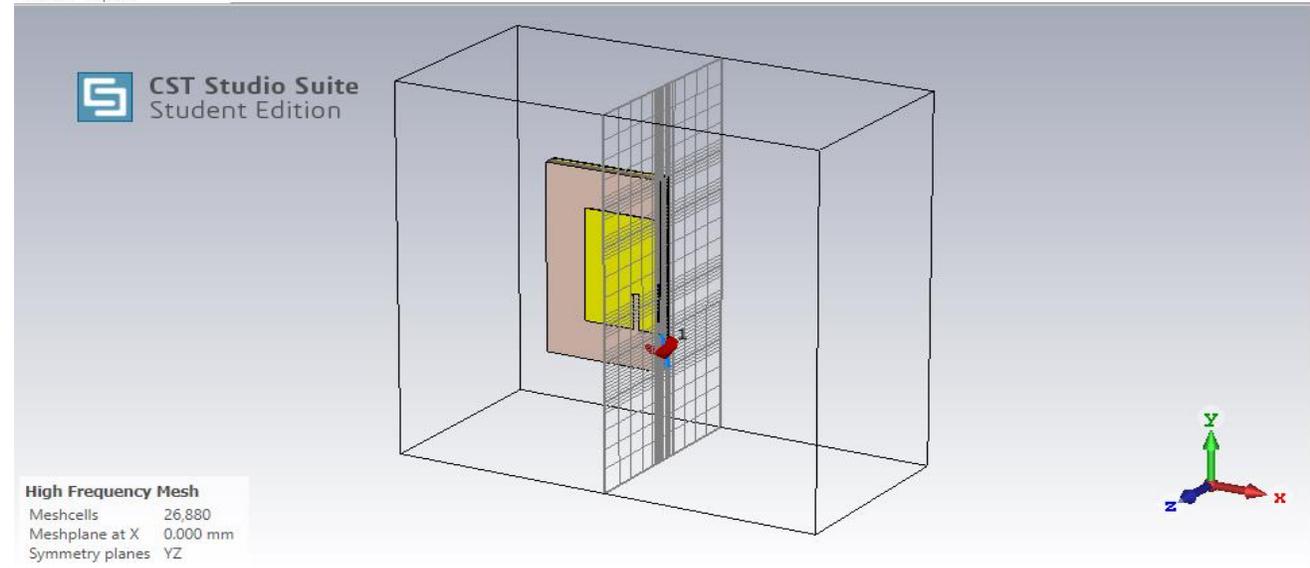
# 7. Antena microstrip 5G mmWave

## 7.3 Diseño antena microstrip 5G mmWave en CST

► Definición de las condiciones de contorno



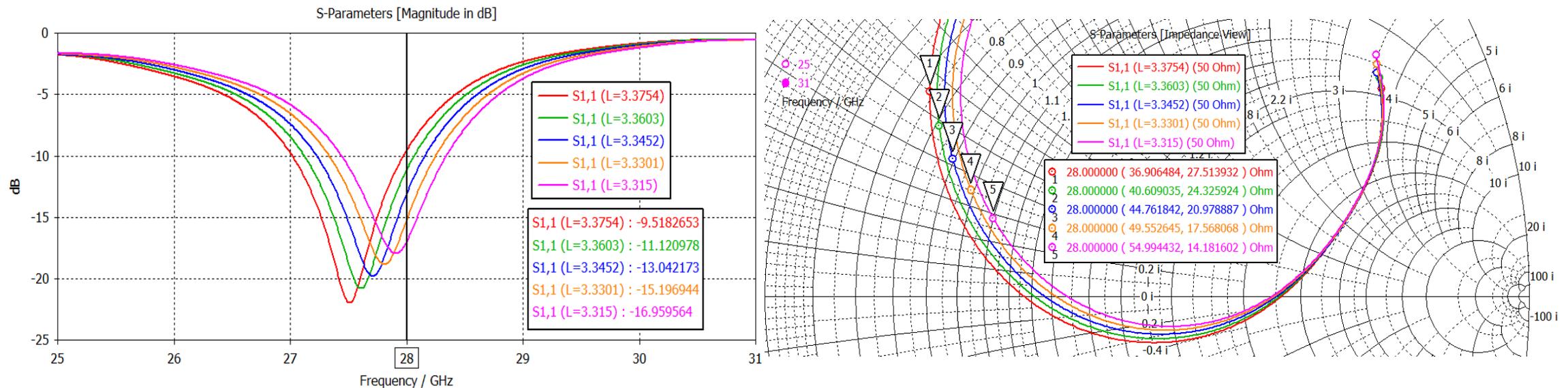
► Malla hexaédrica y plano de simetría YZ



# 7. Antena microstrip 5G mmWave

## 7.4 Caracterización antena microstrip 5G mmWave en CST

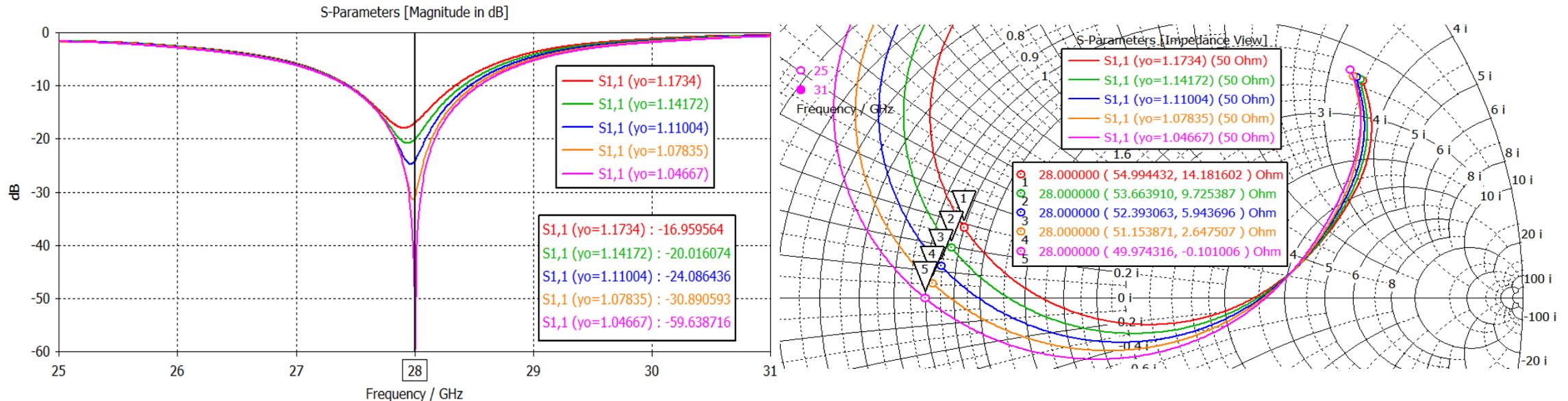
- ▶ Estudio paramétrico de reducción de longitud  $L$  del parche para aumentar la frecuencia de operación hasta 28 GHz y corregir la desviación frecuencial



# 7. Antena microstrip 5G mmWave

## 7.4 Caracterización antenna microstrip 5G mmWave en CST

- ▶ Estudio paramétrico de reducción de longitud  $y_0$  del *inset* para mejorar la adaptación de impedancias a la frecuencia de operación 28 GHz



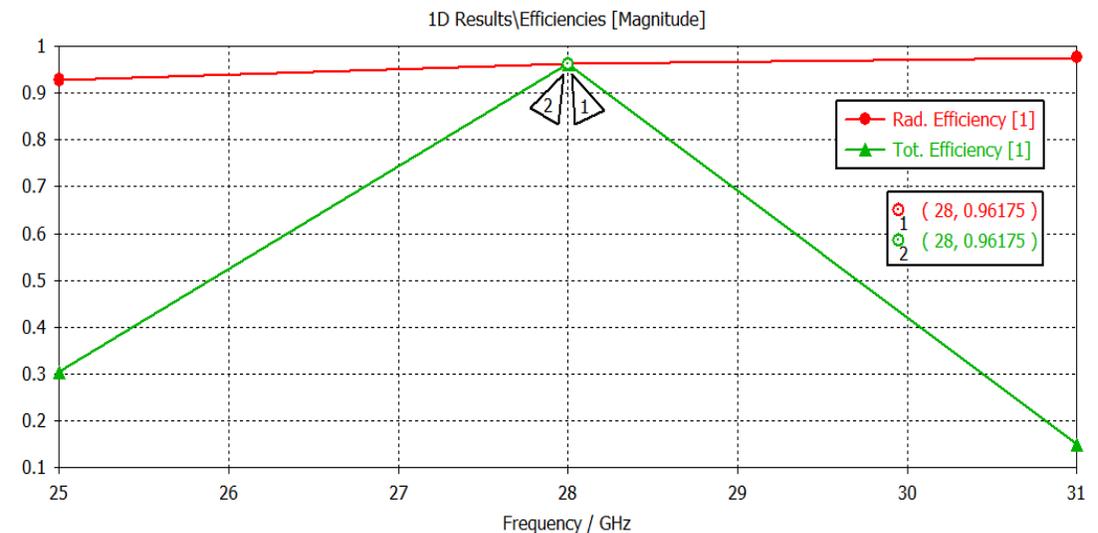
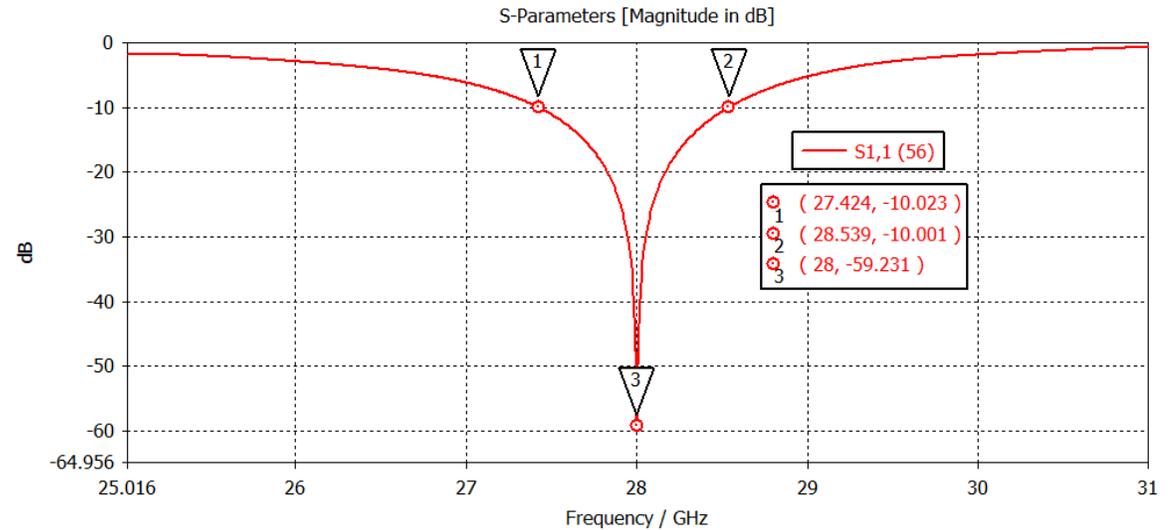
# 7. Antena microstrip 5G mmWave

## 7.4 Caracterización antena microstrip 5G mmWave en CST

- Pérdidas de retorno, ancho de banda y eficiencia

Tabla 7.3: Dimensiones MATLAB/optimizadas antena microstrip 5G mmWave @28 GHz

| Parámetro         | Dimensiones MATLAB | Dimensiones optimizadas |
|-------------------|--------------------|-------------------------|
| $L$               | 3.3754 mm          | <b>3.315 mm</b>         |
| $W$               | 4.2323 mm          | 4.2323 mm               |
| $L_{sg} = L + 6h$ | 5.6614 mm          | <b>5.601 mm</b>         |
| $W_{sg} = W + 6h$ | 6.5183 mm          | 6.5183 mm               |
| $h$               | 0.381 mm           | 0.381 mm                |
| $t$               | 0.035 mm           | 0.035 mm                |
| $W_0$             | 1.15755 mm         | 1.15755 mm              |
| $W_i = W/25$      | 0.1692 mm          | 0.1692 mm               |
| $y_0$             | 1.1734 mm          | <b>1.04667 mm</b>       |



# 7. Antena microstrip 5G mmWave

## 7.4 Caracterización antena microstrip 5G mmWave en CST

- Diagrama de radiación y figuras de mérito antena microstrip 5G mmWave

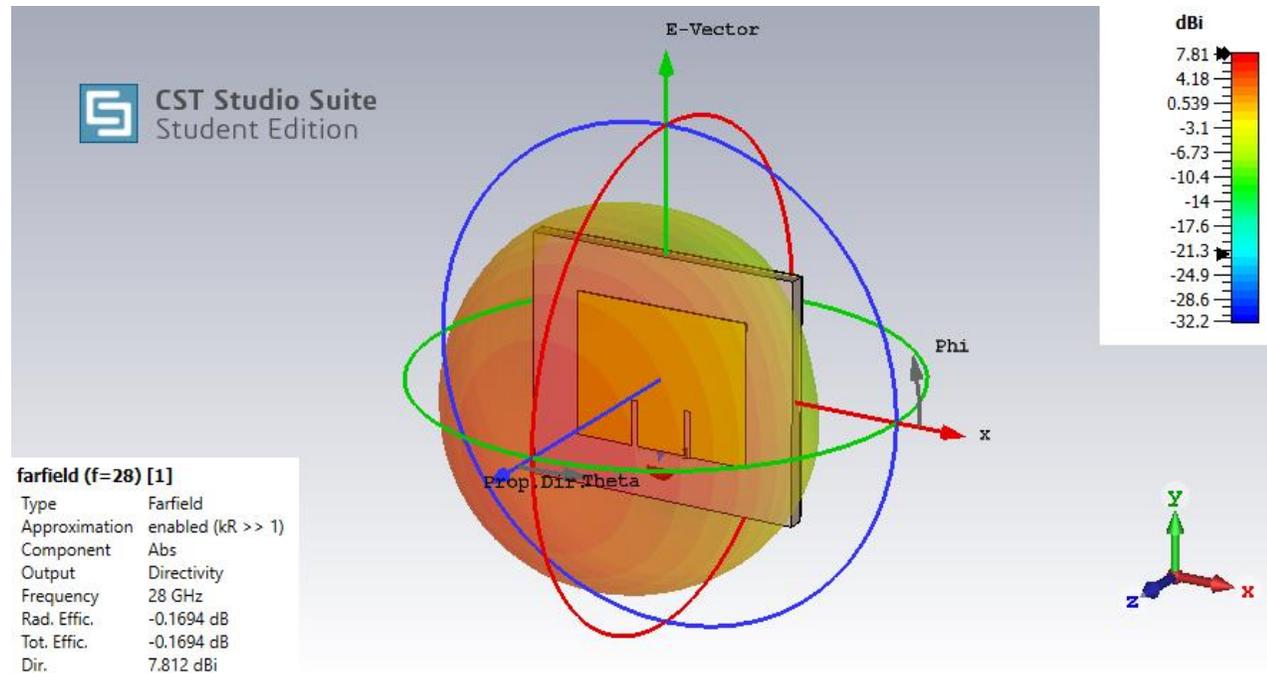


Tabla 7.4: Figuras de mérito antena microstrip optimizada 5G mmWave @ 28 GHz

| $Z_A$                      | $S_{11}(dB)$ | $VSWR$   | $BW$     | $FBW$                   | $e$                     |
|----------------------------|--------------|----------|----------|-------------------------|-------------------------|
| 49.974<br>$-j0.101 \Omega$ | -59.231 dB   | 1.0021   | 1.12 GHz | 4 %                     | 96.17 %                 |
| $Pol$                      | $D$          | $G$      | $NLPS$   | $\Delta\theta_{-3dB}^E$ | $\Delta\theta_{-3dB}^H$ |
| $\hat{y}$                  | 7.81 dBi     | 7.64 dBi | 19.2 dB  | 80.4 °                  | 74.7 °                  |



# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.1 Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

### ► Requisitos y características

Tabla 8.2: Requisitos sistema #1 MIMO 5G mmWave

| Canal                 | AWGN LOS               |
|-----------------------|------------------------|
| SNR/Cobertura         | Alta                   |
| Robustez (BER)        | Media                  |
| Capacidad canal       | Media                  |
| Digital Beamforming   | Horizontal/Vertical    |
| Frecuencia operación  | $f_o = 28 \text{ GHz}$ |
| Ancho de banda mínimo | $BW = 1 \text{ GHz}$   |

Tabla 8.3: Características sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

| Técnica sistema MIMO                  | Beamforming   |
|---------------------------------------|---|
| Canal                                 | AWGN LOS  |
| Escenario                             | Rural   |
| Exponente path loss                   | $\gamma = 2$  |
| Diversidad espacial canal             | No  |
| Multiplexación espacial canal         | No  |
| Número de antenas Tx/Rx por sub-array | $K = L = 16$  |
| Número de sub-arrays Tx/Rx            | $M = N = 1$   |
| Ganancia teórica sub-array            | $g_{SA} = KL = 256 \cong 24 \text{ dB}$                               |
| Ganancia teórica sub-array Tx         | $g_{SATx} = K = 16 \cong 12 \text{ dB}$                               |
| SNR teórica sub-canal MIMO            | $SNR_{MIMO} = g_{SA} SNR_{SISO} = 256 \cdot SNR_{SISO}$               |
| Ganancia diversidad espacial          | $d = MN = 1 = 0 \text{ dB}$   |
| Probabilidad de error teórica         | $BER_{MIMO}^{AWGN} = Q(\sqrt{2SNR_{MIMO}}) = Q(\sqrt{512SNR_{SISO}})$ |
| Ganancia multiplexación espacial      | $r = \min(M, N) = 1 = 0 \text{ dB}$                                   |
| Capacidad máxima canal                | $C_{MIMO} = rB \log(1 + SNR) = C_{SISO} = C_{AWGN}$                   |

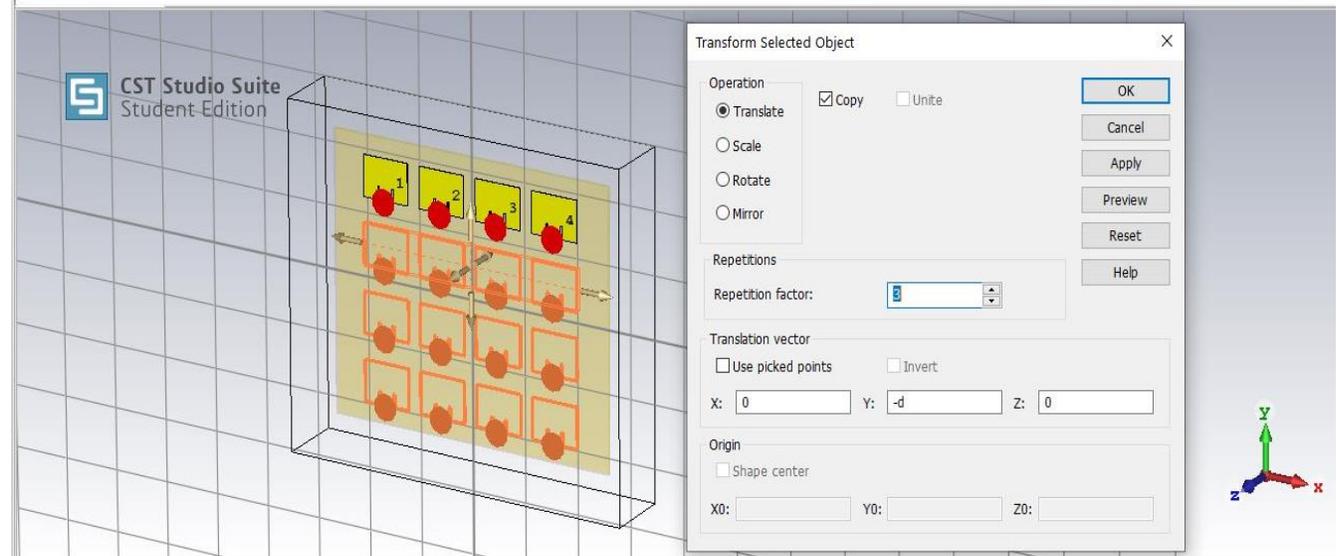
# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.1 Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

► Parametrización en CST

| Parameter List |                 |          |                                    |  |
|----------------|-----------------|----------|------------------------------------|--|
| Name           | Expression      | Value    | Description                        |  |
| lambda         | = 10.7142       | 10.7142  | Wavelength                         |  |
| Lsg            | = 4*(L+6*h) + d | 27.7611  | Substrate/Ground Plane Length      |  |
| Wsg            | = 4*(W+6*h) + d | 31.4303  | Substrate/Ground Plane Width       |  |
| L              | = 3.315         | 3.315    | Patch Length                       |  |
| W              | = 4.2323        | 4.2323   | Patch Width                        |  |
| h              | = 0.381         | 0.381    | Substrate Height                   |  |
| t              | = 0.035         | 0.035    | Patch/Ground Plane Height          |  |
| Wo             | = 1.15755       | 1.15755  | Microstrip Line Width              |  |
| Wi             | = W/25          | 0.169292 | Inset Width                        |  |
| yo             | = 1.04667       | 1.04667  | Inset Length                       |  |
| d              | = de*lambda     | 5.3571   | Distance between elements          |  |
| de             | = 0.5           | 0.5      | Electric distance between elements |  |

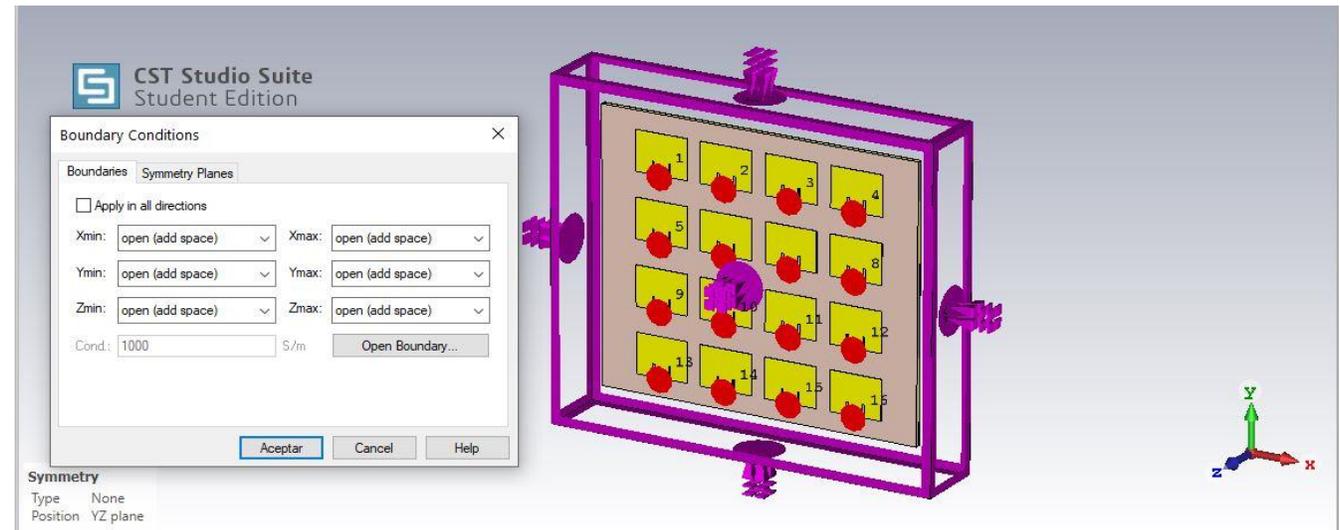
► Diseño del array



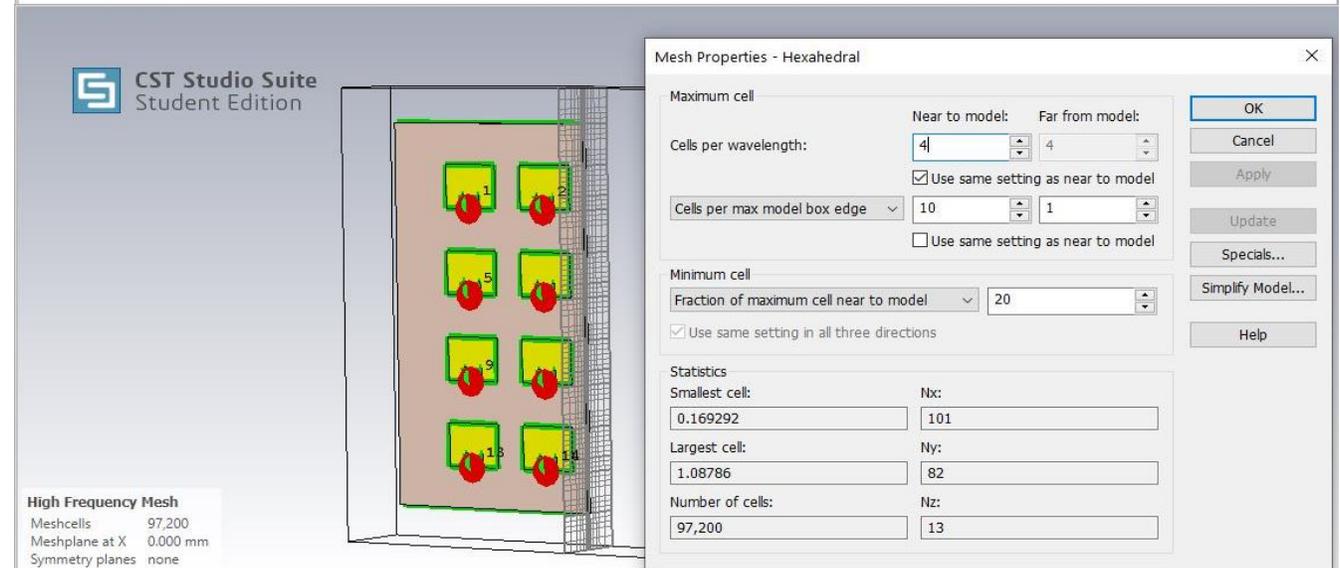
# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.1 Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

- Definición de condiciones de contorno



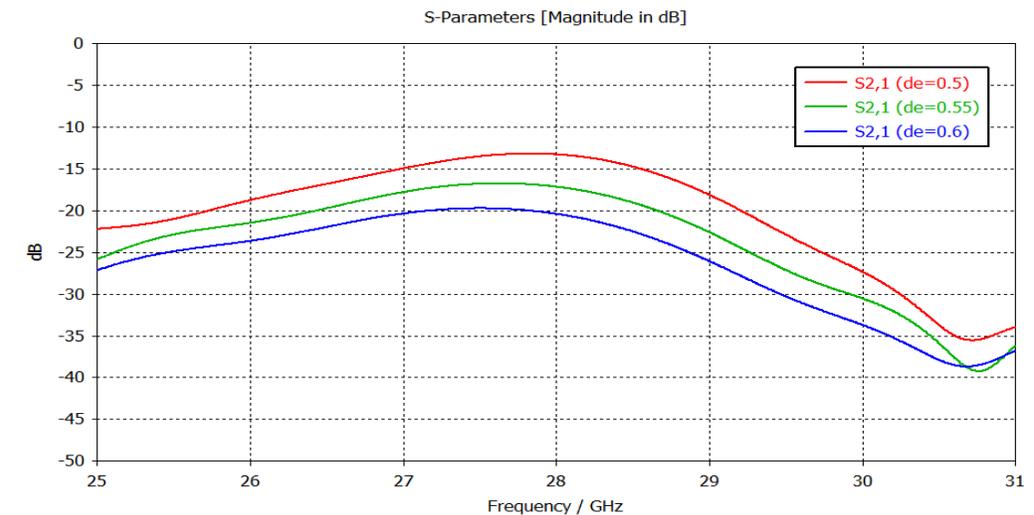
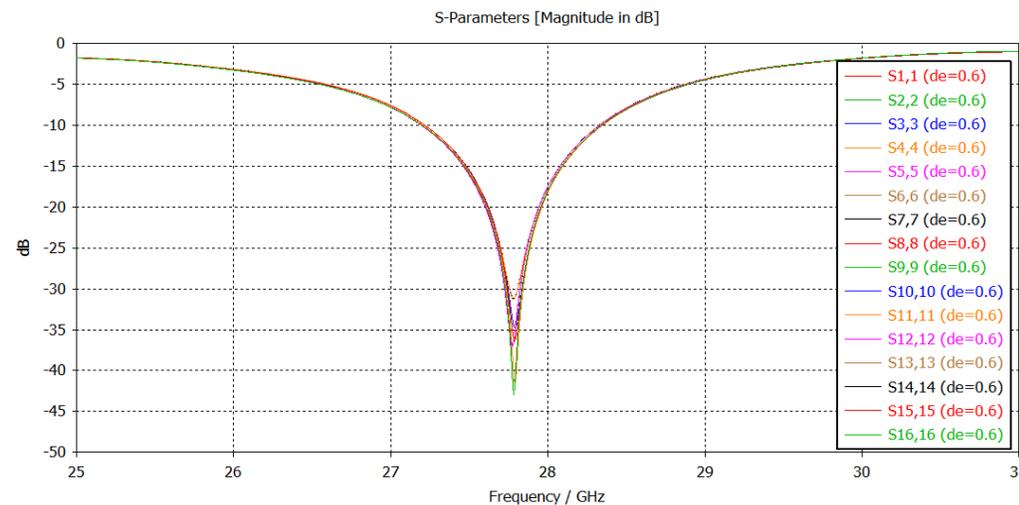
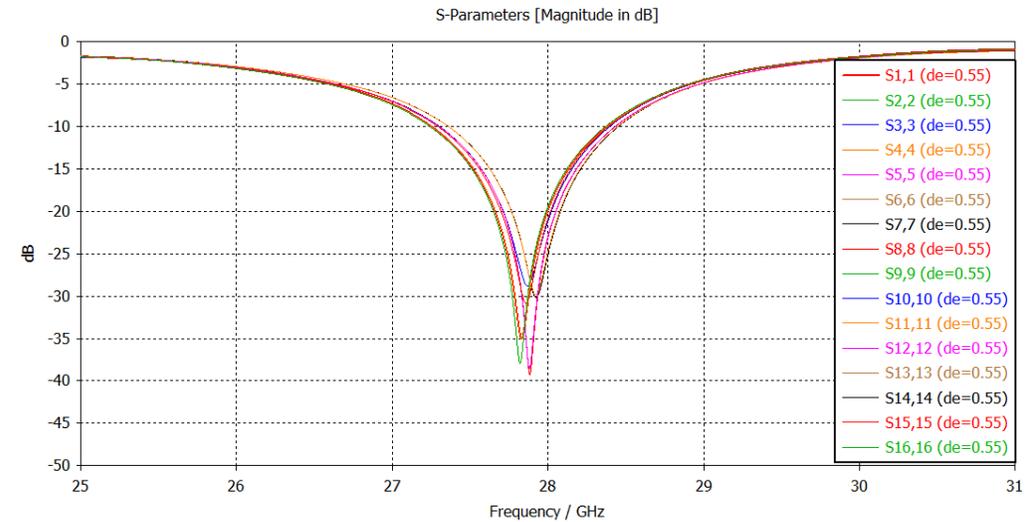
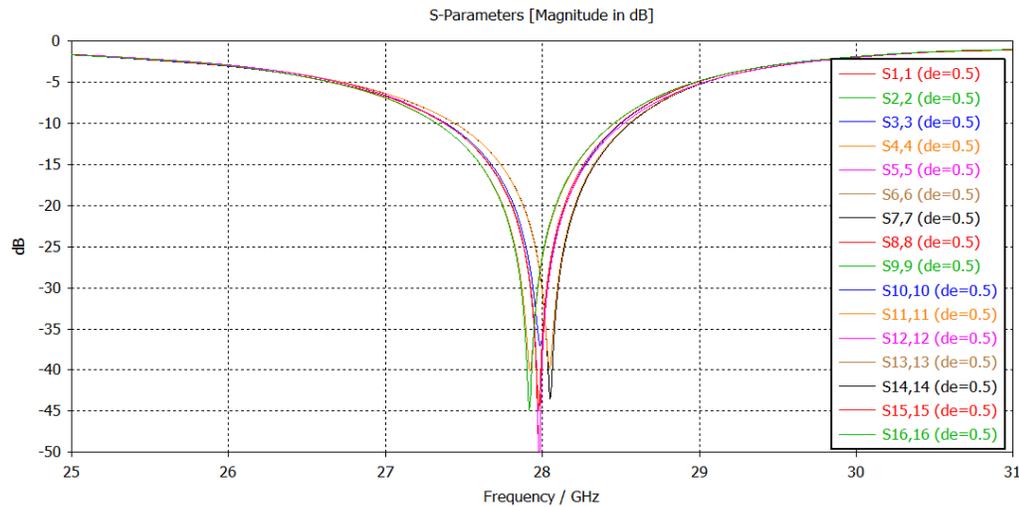
- Configuración de malla hexaédrica



# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.1 Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

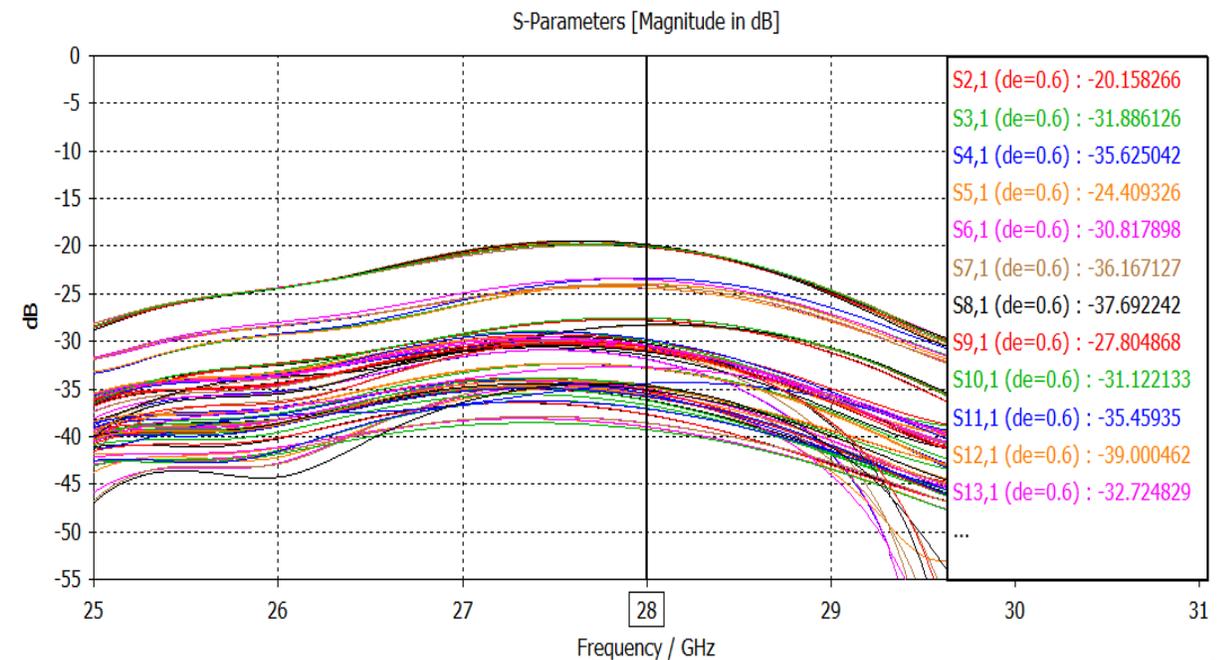
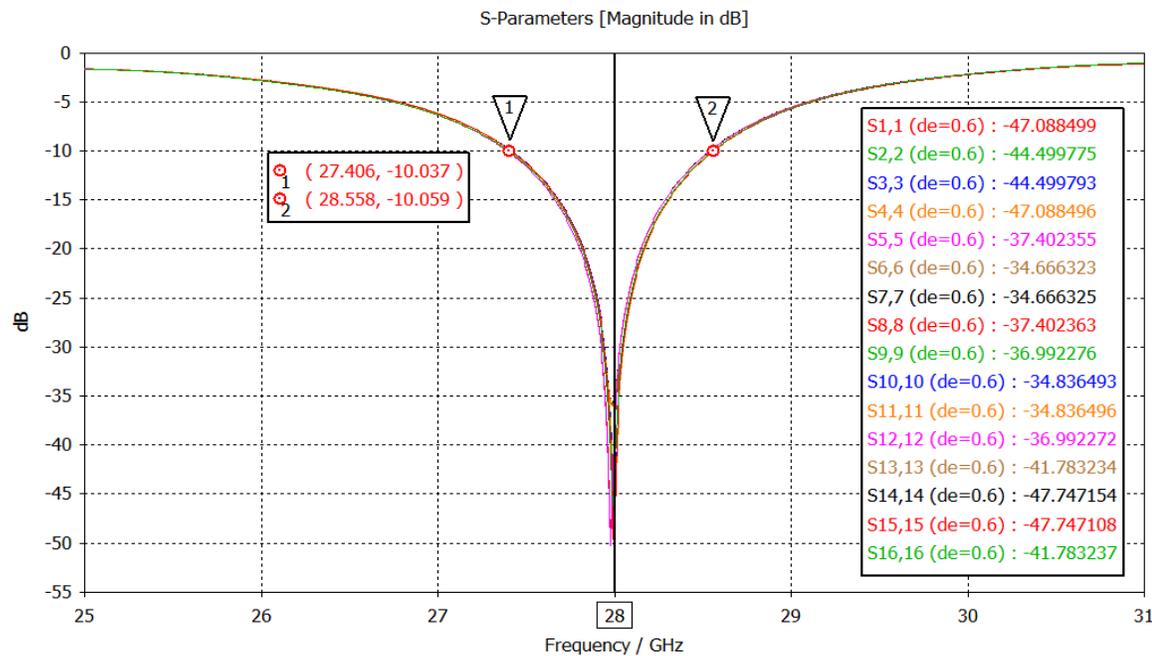
► Efecto de la distancia entre elementos del array



# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.1 Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

- ▶ Parámetros de dispersión y ancho de banda para la distancia óptima  $d = 0.6\lambda$  tras estudio paramétrico de longitud del parche e insets para lograr la adaptación a la frecuencia de operación 28 GHz

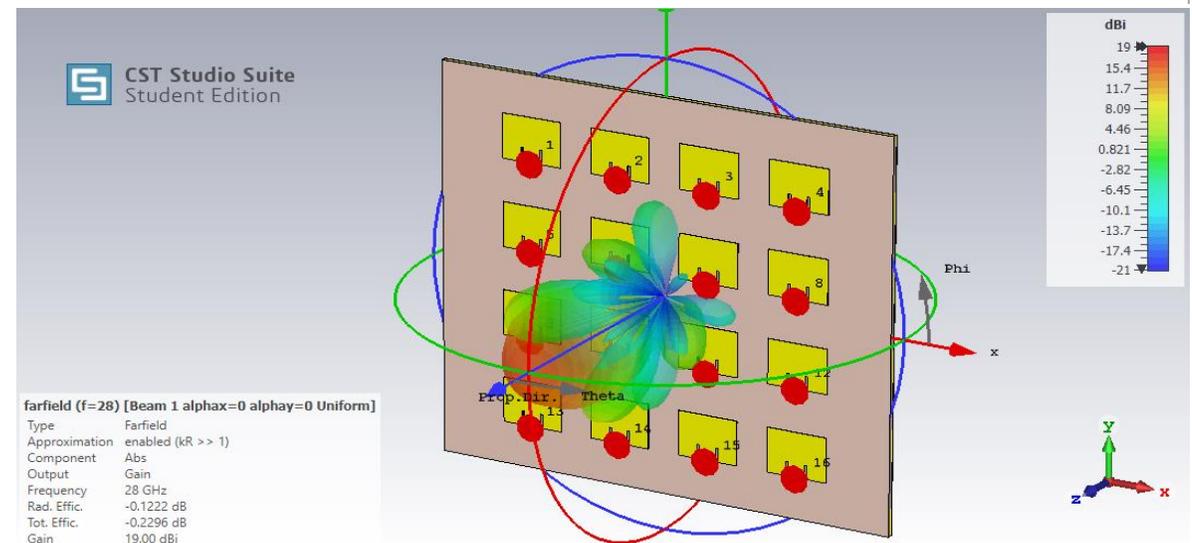
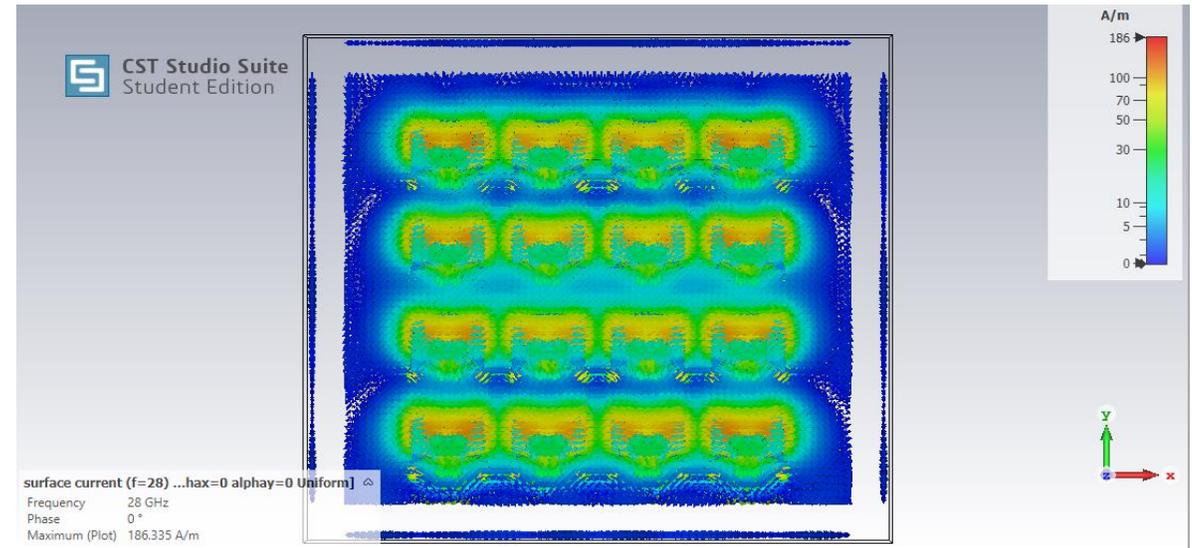


# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.1 Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

- ▶ Array broadside con distribución de corriente uniforme

$$w_U = \begin{pmatrix} 1\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ \\ 1\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ \\ 1\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ \\ 1\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ \end{pmatrix}$$

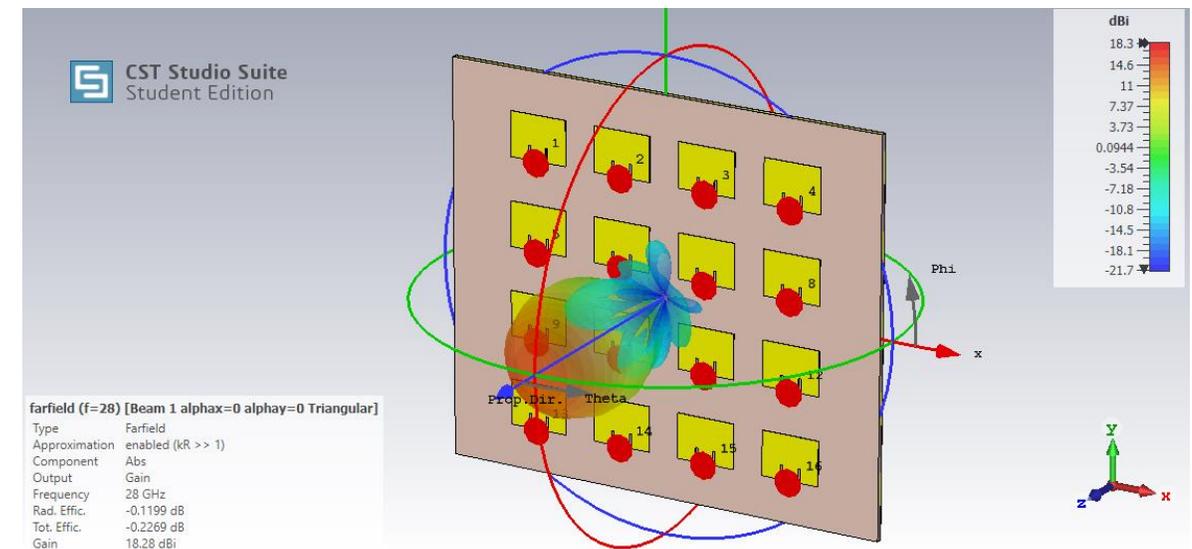
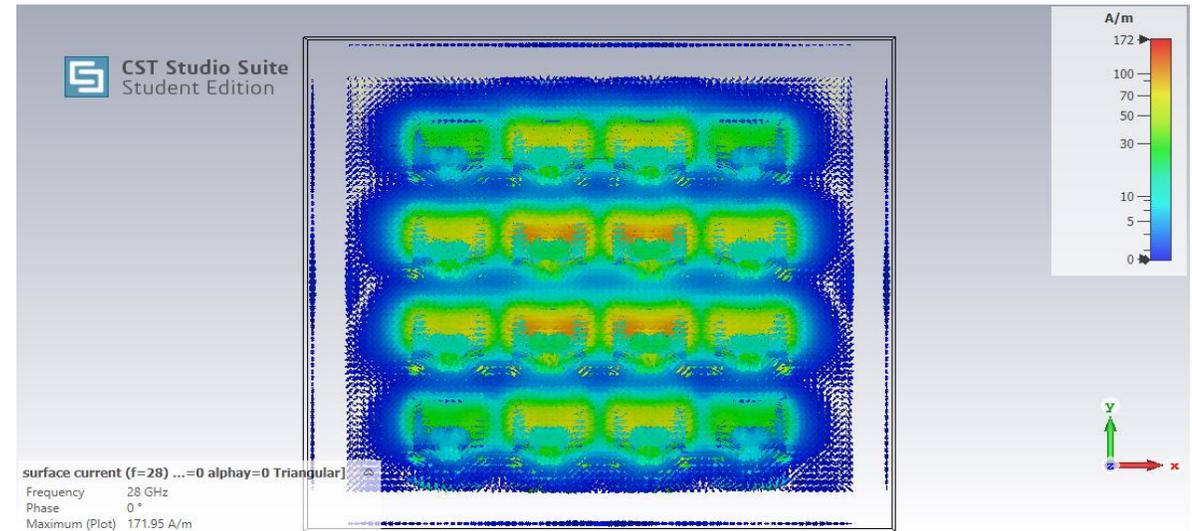


# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.1 Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

- ▶ Array broadside con distribución de corriente triangular

$$w_T = \begin{pmatrix} 0.33\angle 0^\circ & 0.66\angle 0^\circ & 0.66\angle 0^\circ & 0.33\angle 0^\circ \\ 0.66\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ & 0.66\angle 0^\circ \\ 0.66\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ & 0.66\angle 0^\circ \\ 0.33\angle 0^\circ & 0.66\angle 0^\circ & 0.66\angle 0^\circ & 0.33\angle 0^\circ \end{pmatrix}$$

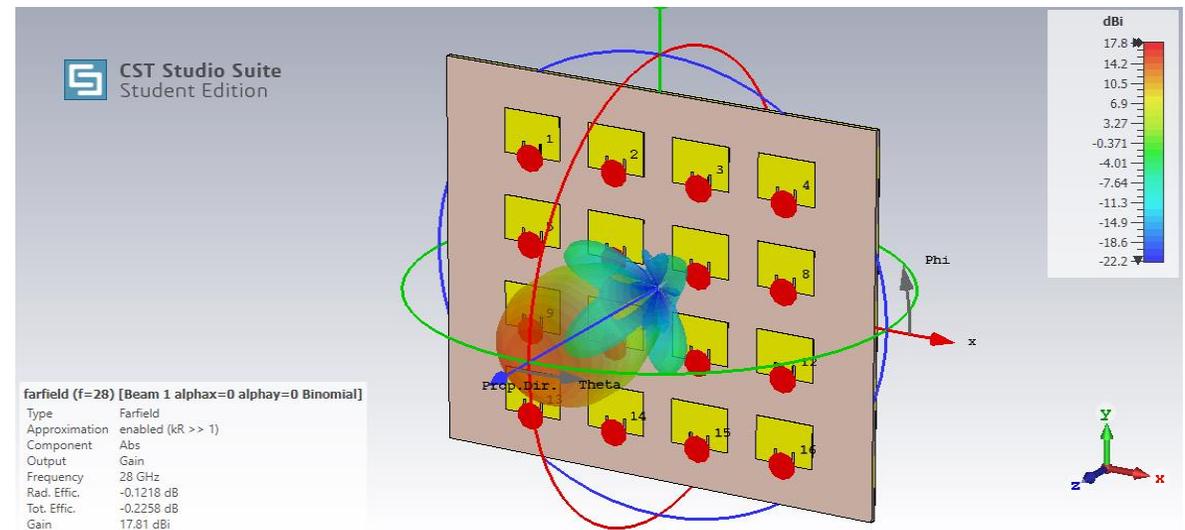
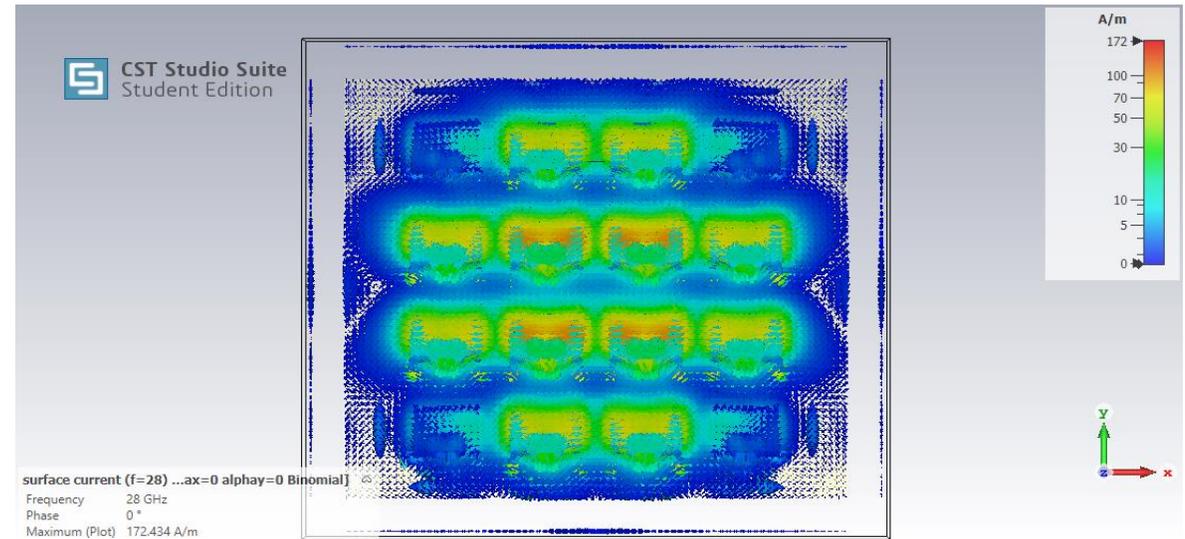


# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.1 Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

- Array broadside con distribución de corriente binomial

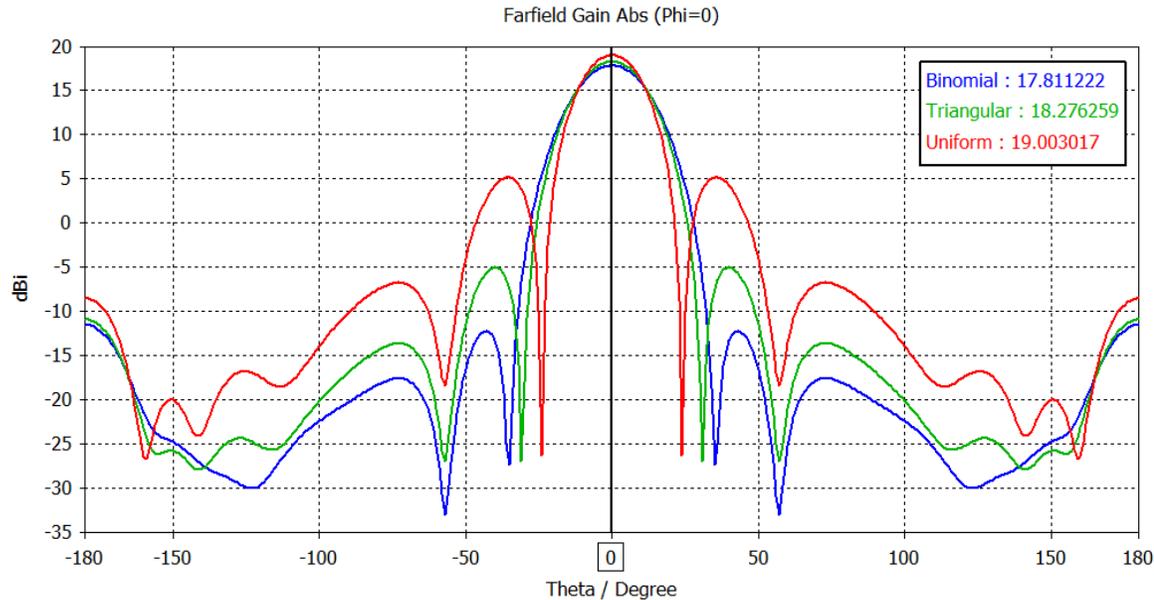
$$W_B = \begin{pmatrix} 0.16\angle 0^\circ & 0.66\angle 0^\circ & 0.66\angle 0^\circ & 0.16\angle 0^\circ \\ 0.66\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ & 0.66\angle 0^\circ \\ 0.66\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ & 1\angle 0^\circ & 0.66\angle 0^\circ \\ 0.16\angle 0^\circ & 0.66\angle 0^\circ & 0.66\angle 0^\circ & 0.16\angle 0^\circ \end{pmatrix}$$



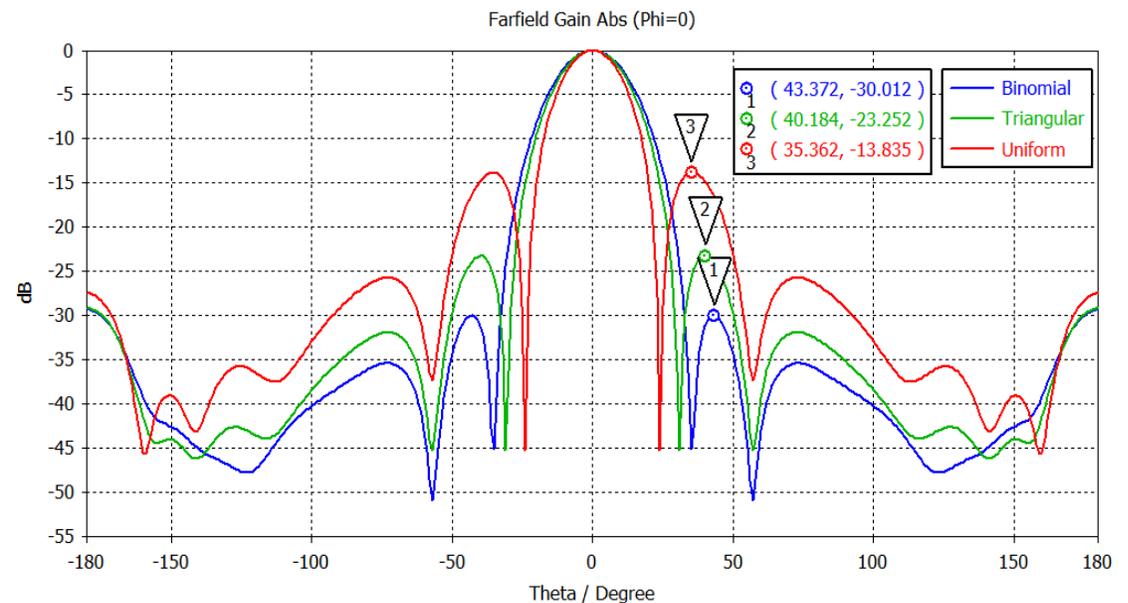
# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.1 Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

- Selección de distribución de corriente triangular: compromiso intermedio entre ganancia y NLPS



$$G_U > G_T > G_B$$



$$NLPS_U < NLPS_T < NLPS_B$$



# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

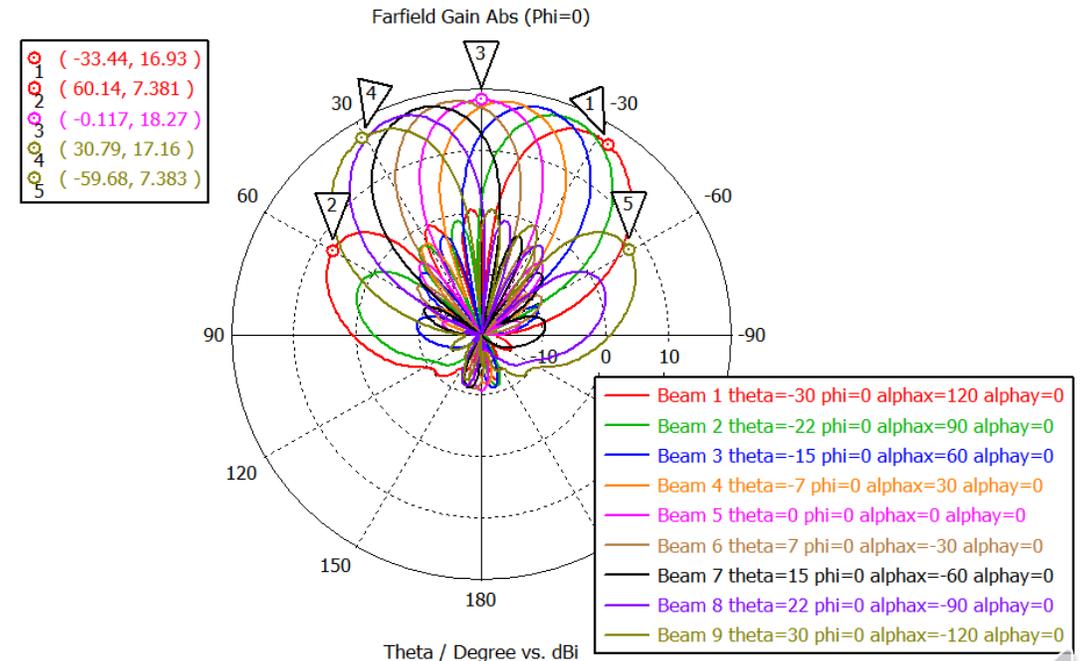
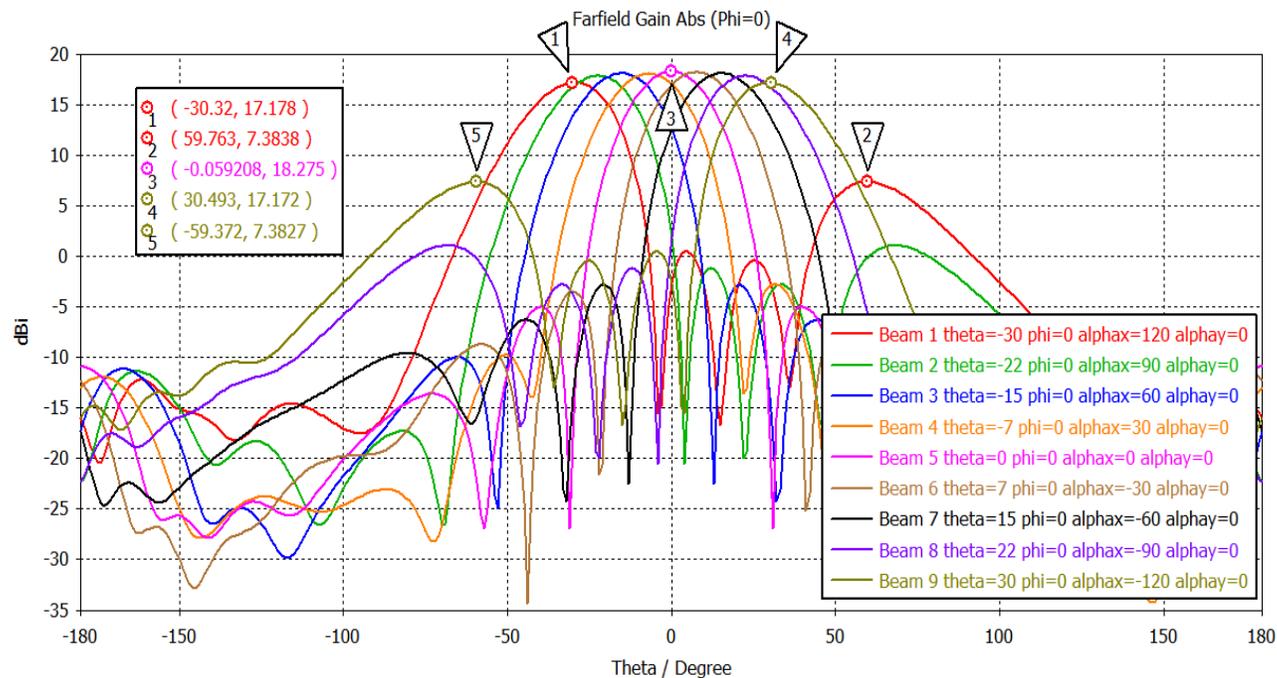
## 8.1 Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

► Beamforming horizontal ( $|\theta_o| = 30^\circ, \phi_o = 0^\circ$ )

$$\alpha_x = 0^\circ, \pm 30^\circ, \pm 60^\circ, \pm 90^\circ \dots, \alpha_y = 0^\circ$$

► NLPS = 10 dB @ ( $|\theta_o| = 30^\circ, \phi_o = 0^\circ$ )

$$\mathbf{w}_T = \begin{pmatrix} 0.33\angle 0^\circ & 0.66\angle \alpha_x & 0.66\angle 2\alpha_x & 0.33\angle 3\alpha_x \\ 0.66\angle \alpha_y & 1\angle(\alpha_x + \alpha_y) & 1\angle(2\alpha_x + \alpha_y) & 0.66\angle(3\alpha_x + \alpha_y) \\ 0.66\angle 2\alpha_y & 1\angle(\alpha_x + 2\alpha_y) & 1\angle(2\alpha_x + 2\alpha_y) & 0.66\angle(3\alpha_x + 2\alpha_y) \\ 0.33\angle 3\alpha_y & 0.66\angle(\alpha_x + 3\alpha_y) & 0.66\angle(2\alpha_x + 3\alpha_y) & 0.33\angle(3\alpha_x + 3\alpha_y) \end{pmatrix}$$



# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

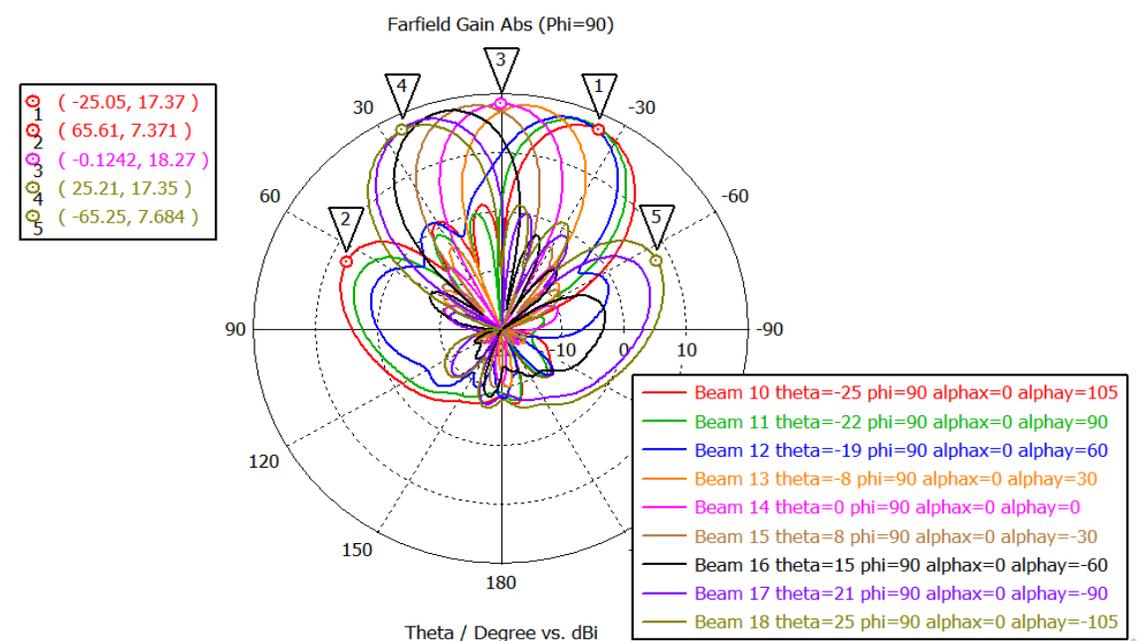
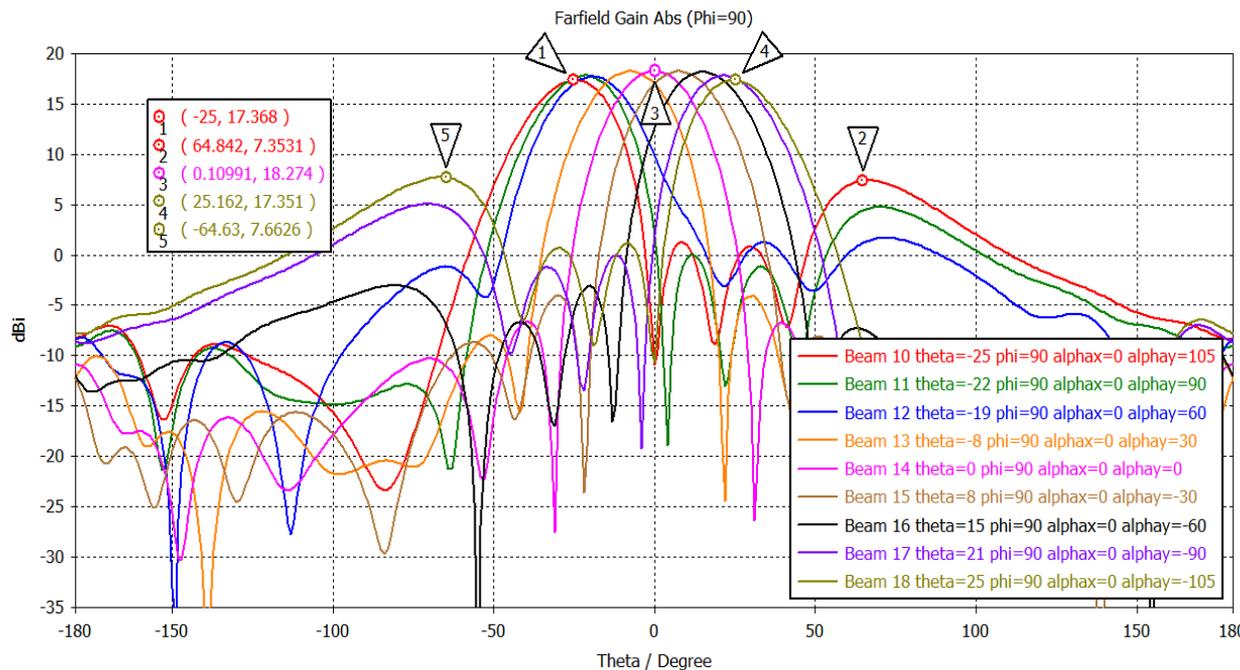
## 8.1 Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

► Beamforming Vertical ( $|\theta_o| = 25^\circ, \phi_o = 90^\circ$ )

$$\alpha_x = 0, \alpha_y = 0^\circ, \pm 30^\circ, \pm 60^\circ, \pm 90^\circ, \dots$$

► NLPS = 10 dB @ ( $|\theta_o| = 25^\circ, \phi_o = 90^\circ$ )

$$\mathbf{w}_T = \begin{pmatrix} 0.33\angle 0^\circ & 0.66\angle \alpha_x & 0.66\angle 2\alpha_x & 0.33\angle 3\alpha_x \\ 0.66\angle \alpha_y & 1\angle(\alpha_x + \alpha_y) & 1\angle(2\alpha_x + \alpha_y) & 0.66\angle(3\alpha_x + \alpha_y) \\ 0.66\angle 2\alpha_y & 1\angle(\alpha_x + 2\alpha_y) & 1\angle(2\alpha_x + 2\alpha_y) & 0.66\angle(3\alpha_x + 2\alpha_y) \\ 0.33\angle 3\alpha_y & 0.66\angle(\alpha_x + 3\alpha_y) & 0.66\angle(2\alpha_x + 3\alpha_y) & 0.33\angle(3\alpha_x + 3\alpha_y) \end{pmatrix}$$



# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.1 Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

### ► Ganancia, directividad, eficiencia y figuras de mérito

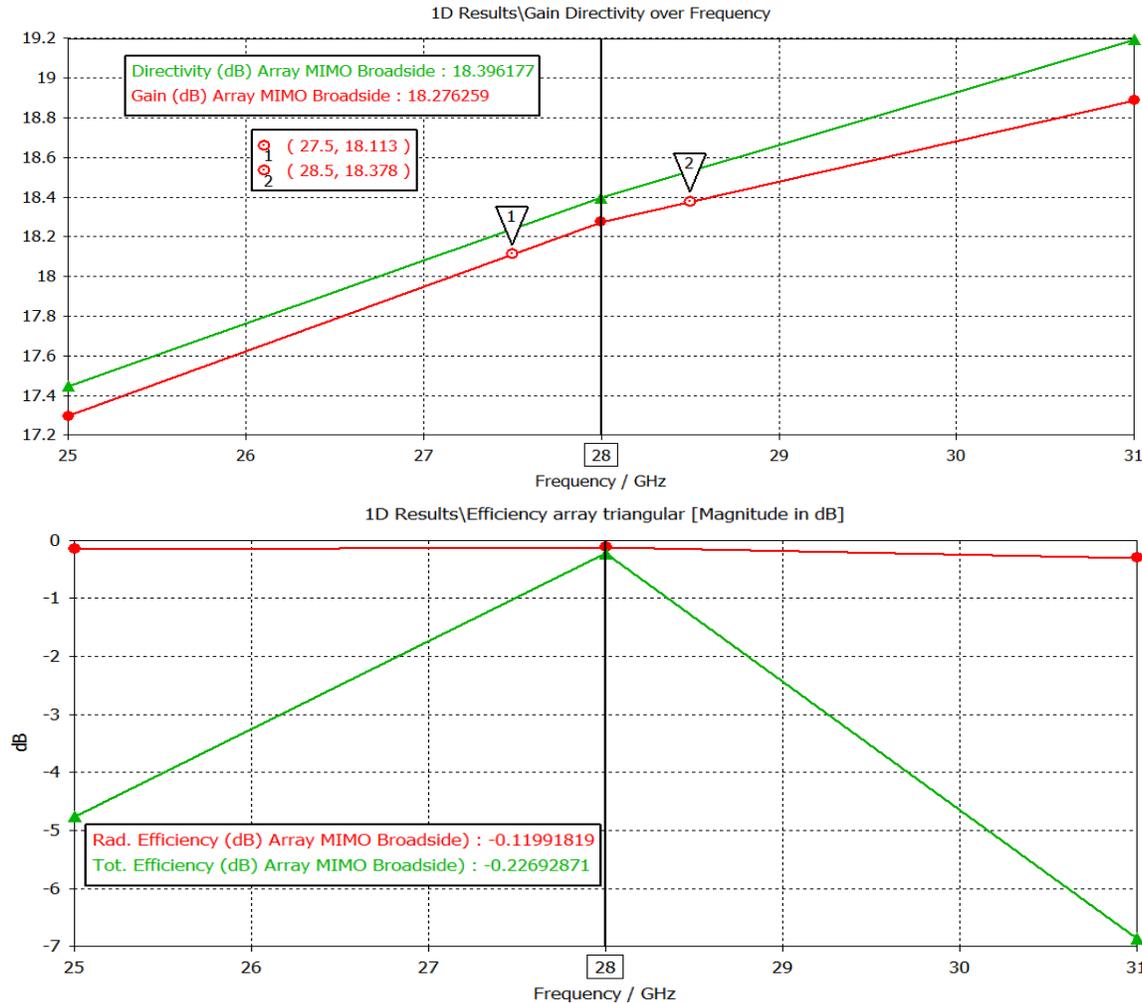


Tabla 8.6: Figuras de mérito sistema multi-antena #1 MIMO 5G

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| Número de sub-arrays TX/RX            | $M = N = 1$                                |
| Número de antenas TX/Rx por sub-array | $K = L = 16$                               |
| Frecuencia operación                  | $f_o = 28 \text{ GHz}$                     |
| Dimensiones físicas (mm)              | $(L_{sg} = 27.76) \times (W_{sg} = 31.43)$ |
| Distancia entre elementos             | $d = 0.6\lambda_o$                         |
| Polarización                          | $\hat{y}$                                  |
| Pérdidas de retorno                   | $S_{ii} < -34 \text{ dB}$                  |
| Acoplamiento mutuo                    | $S_{ji} < -20 \text{ dB}$                  |
| Ancho de banda                        | $B = 1.15 \text{ GHz}$                     |
| Distribución de corriente             | Triangular                                 |
| Ganancia MIMO Broadside               | $G_{MIMO}^{\#1} = 18.28 \text{ dB}$        |
| Nivel lóbulo principal-secundario     | $NLPS = 23.25 \text{ dB}$                  |
| Eficiencia total                      | $e = -0.23 \text{ dB}$                     |
| Beamforming horizontal                | $ \theta_o = 30^\circ $                    |
| Beamforming vertical                  | $ \theta_o = 25^\circ $                    |
| Ganancia Sub-array Tx                 | $g_{SATx}^{\#1} = 10.63 \text{ dB}$        |



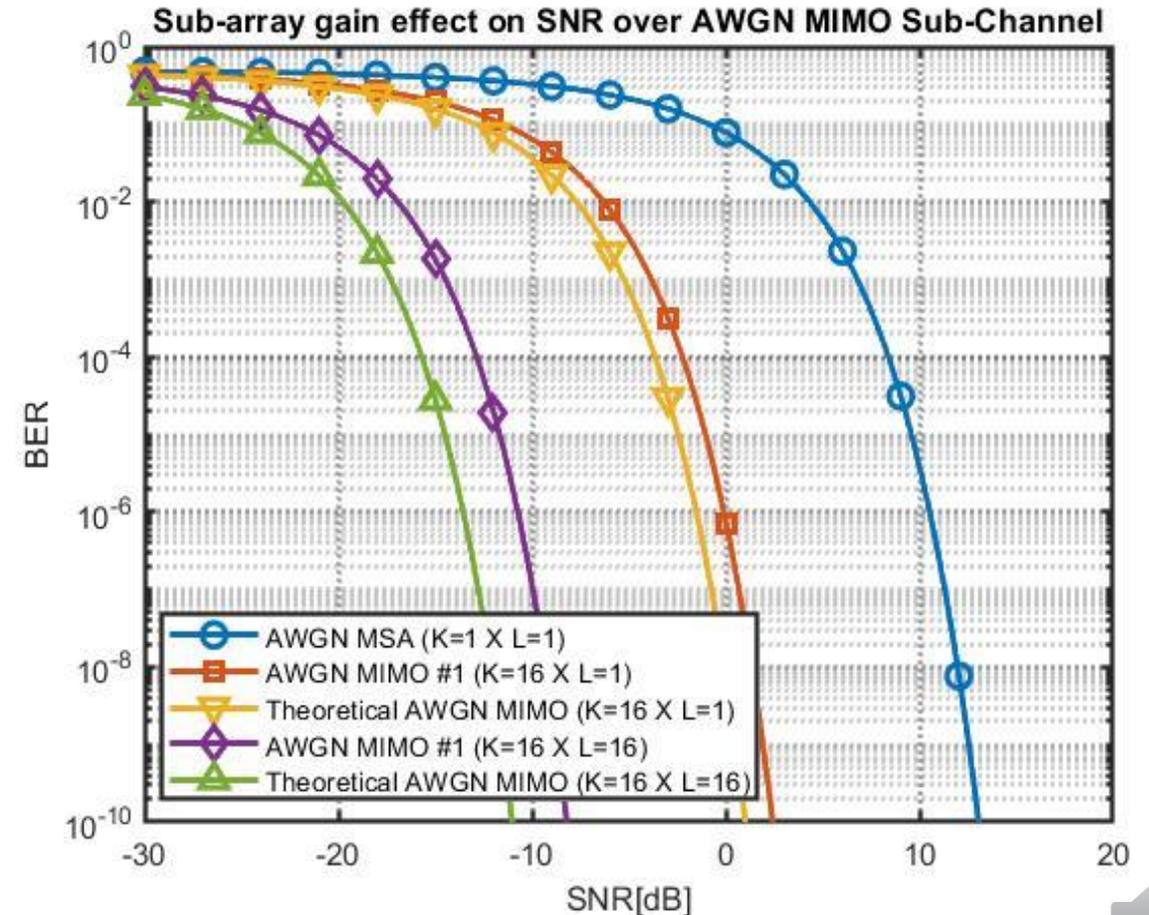
# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.1 Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

### ► Relación BER-SNR del sistema multi-antena #1 sobre canal AWGN LOS

Tabla 8.4: Ganancias y probabilidades de error sistema multi-antena #1 MIMO 5G sobre canal AWGN LOS

|   |   |
|---|---|
| Ganancia Tx MSA                                   | $G_{MSA} = 7.64 \text{ dB}$   |
| Ganancia Tx MIMO #1                               | $G_{MIMO}^{\#1} = 18.28 \text{ dB}$   |
| Ganancia teórica Sub-array                        | $g_{SA} = KL = 256 \approx 24 \text{ dB}$   |
| Ganancia teórica Sub-array Tx                     | $g_{SATx} = K = 16 \approx 12 \text{ dB}$   |
| Ganancia Sub-array MIMO #1                        | $g_{SA}^{\#1} = (g_{SATx}^{\#1})^2 = 133.63 = 21.25 \text{ dB}$                           |
| Ganancia Sub-array Tx MIMO #1                     | $g_{SATx}^{\#1} = G_{MIMO}^{\#1} - G_{MSA} = 11.56 = 10.64 \text{ dB}$                    |
| BER SISO/MSA                                      | $BER_{SISO} = Q(\sqrt{2SNR_{SISO}})$  |
| BER MIMO #1<br>( $K = 16 \times L = 1$ )          | $BER_{MIMO}^{\#1Tx} = Q(\sqrt{2SNR_{MIMO}^{\#1Tx}}) = (\sqrt{2g_{SATx}^{\#1}SNR_{SISO}})$ |
| BER teórica MIMO #1<br>( $K = 16 \times L = 1$ )  | $BER_{MIMO}^{Tx} = Q(\sqrt{2SNR_{MIMO}^{Tx}}) = (\sqrt{2g_{SATx}SNR_{SISO}})$             |
| BER MIMO #1<br>( $K = 16 \times L = 16$ )         | $BER_{MIMO}^{\#1} = Q(\sqrt{2SNR_{MIMO}^{\#1}}) = (\sqrt{2g_{SA}^{\#1}SNR_{SISO}})$       |
| BER teórica MIMO #1<br>( $K = 16 \times L = 16$ ) | $BER_{MIMO} = Q(\sqrt{2SNR_{MIMO}}) = (\sqrt{2g_{SA}SNR_{SISO}})$                         |

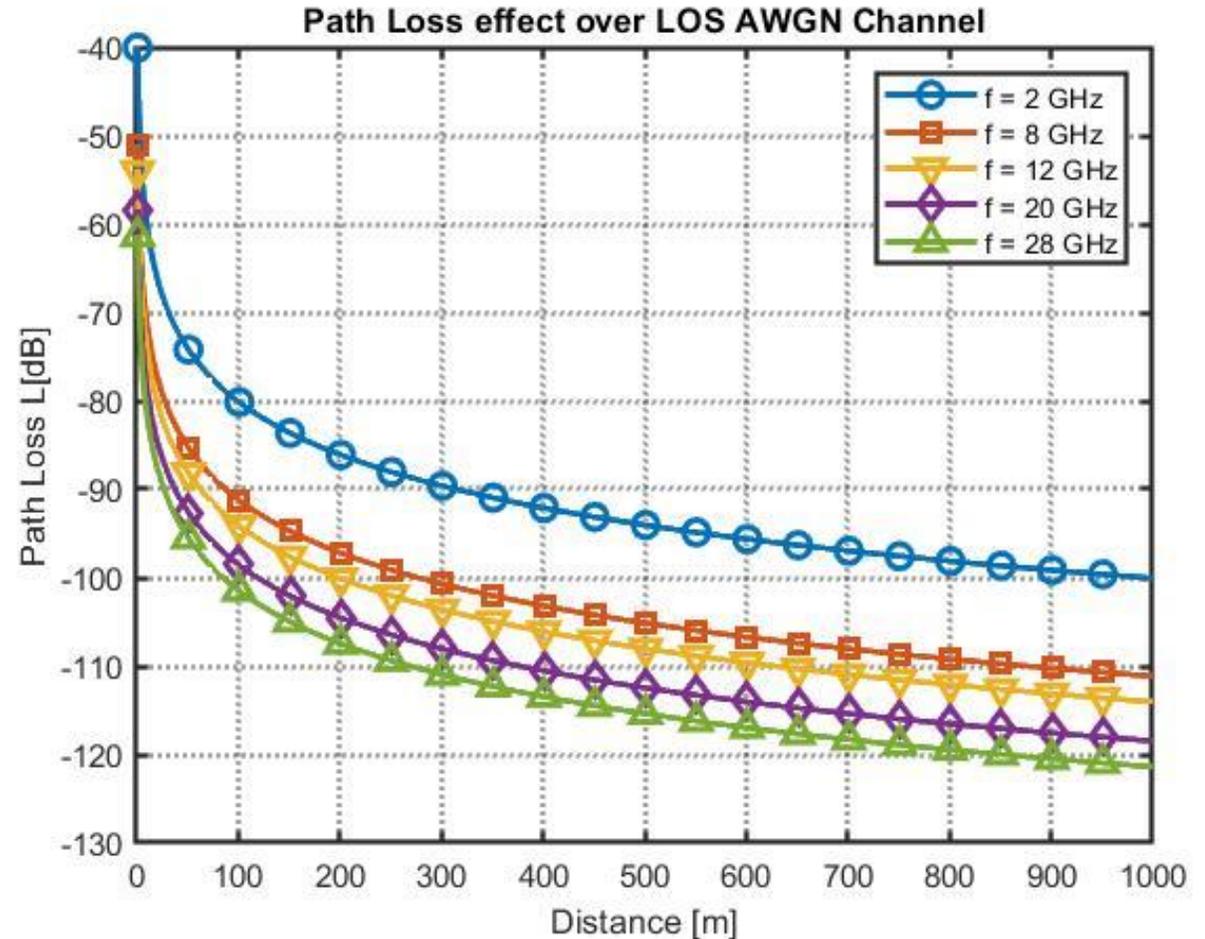


# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.1 Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

- ▶ Aumento de las pérdidas de propagación del canal AWGN LOS  $\gamma = 2$  con la frecuencia en función de la distancia entre transmisor y receptor

$$L = \left(\frac{c}{4\pi f}\right)^2 \left(\frac{1}{d}\right)^\gamma$$



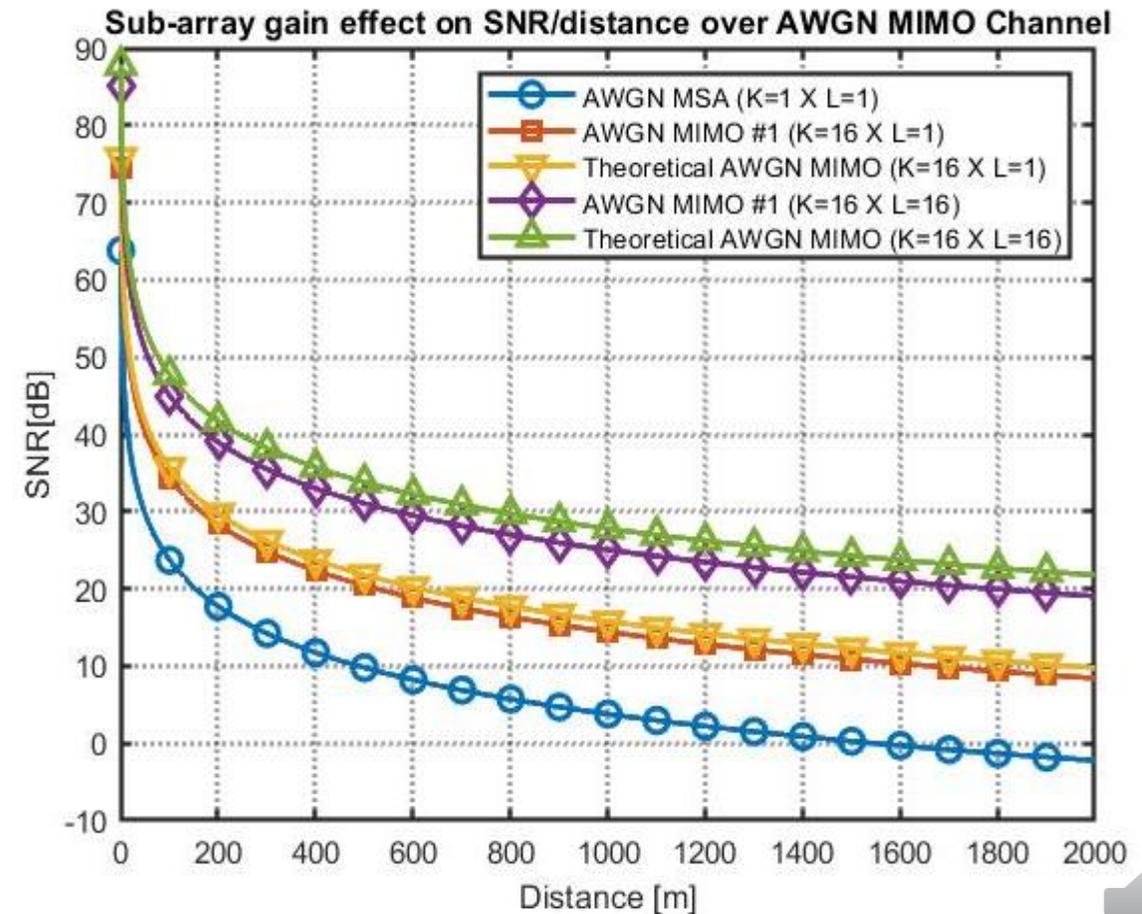
# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.1 Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

### ► Relación SNR-cobertura del sistema multi-antena #1 sobre canal AWGN LOS

Tabla 8.5: Parámetros de interés balance de potencias sistema multi-antena #1 MIMO 5G sobre canal AWGN LOS

|   |  |
|---|--|
| Relación señal-ruido en el receptor         | $SNR = \frac{P_t G_t G_r}{k_B T_o (10^{\frac{NF}{10}} - 1) B} \left(\frac{c}{4\pi f}\right)^2 \left(\frac{1}{d}\right)^\gamma$ |
| Potencia isotrópica radiada efectiva máxima | $EIRP_{max} = 50 \text{ dBm}$  |
| Ganancia Tx/Rx antena microstrip MSA        | $G_{MSA} = 7.63 \text{ dB} = 5.80$   |
| Ganancia Tx/Rx MIMO #1                      | $G_{MIMO}^{\#1} = G_{MSA} + g_{SATx}^{\#1} = 18.28 \text{ dB} = 67.14$   |
| Ganancia teórica Tx/Rx MIMO #1              | $G_{MIMO} = G_{MSA} + g_{SATx} = 19.63 \text{ dB} = 92.04$   |
| Ganancias Tx / Rx                           | $G_t, G_r \in \{G_{MSA}, G_{MIMO}^{\#1}, G_{MIMO}\}$   |
| Potencia de transmisión                     | $P_t = EIRP_{max} - G_{MIMO} \cong 30 \text{ dBm} = 1W$  |
| Constante Boltzmann                         | $k_B = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$   |
| Temperatura ruido referencia                | $T_o = 290 \text{ K}$  |
| Figura de ruido receptor 5G @ 28 GHz        | $NF = 5.5 \text{ dB}$  |
| Ancho de banda                              | $B = 1 \text{ GHz}$  |
| Velocidad luz en el vacío                   | $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$   |
| Frecuencia de operación                     | $f = 28 \text{ GHz}$   |
| Exponente path loss canal AWGN              | $\gamma = 2$   |



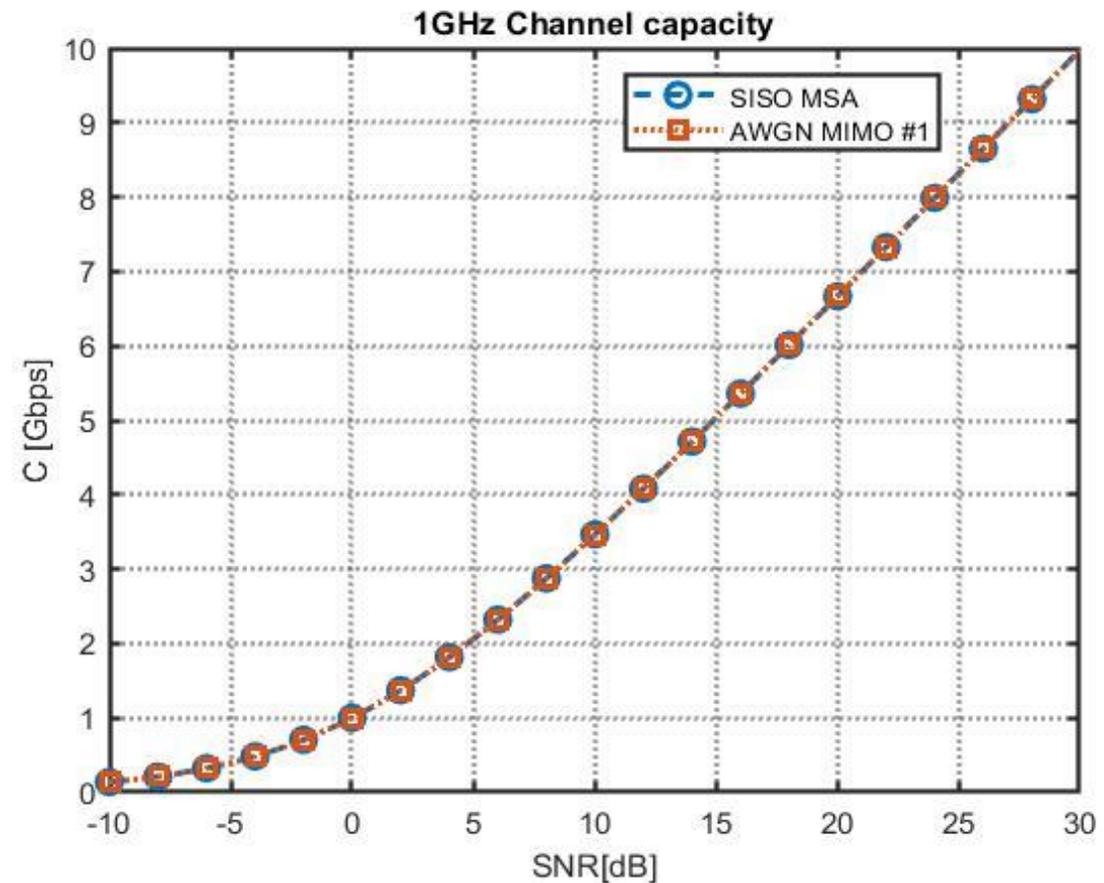
# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.1 Sistema multi-antena #1 MIMO 5G mmWave

► Relación capacidad-SNR del sistema multi-antena #1 sobre canal AWGN LOS

► Capacidad canal del sistema multi-antena #1 MIMO con ganancia de multiplexación nula

$$C_{MIMO}^{\#1} = rB \log_2(1 + SNR) = B \log_2(1 + SNR) = C_{SISO}$$



# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.2 Sistema multi-antena #2 MIMO 5G mmWave

### ► Requisitos y características

Tabla 8.7: Requisitos sistema #2 MIMO 5G mmWave

| Canal                | Rayleigh NLOS          |
|----------------------|------------------------|
| SNR/Cobertura        | Media                  |
| Robustez (BER)       | Alta                   |
| Capacidad canal      | Media                  |
| Digital Beamforming  | Horizontal/Vertical    |
| Frecuencia operación | $f_o = 28 \text{ GHz}$ |
| Ancho de banda       | $BW = 1 \text{ GHz}$   |

Tabla 8.8: Características sistema multi-antena #2 MIMO 5G mmWave

| Técnica sistema MIMO                    | Generalized Beamforming                                     |
|---|---|
| Canal                                   | Rayleigh NLOS   |
| Entorno                                 | Sub-urbano  |
| Exponente path loss                     | $\gamma = 2.5$  |
| Diversidad espacial canal               | Sí  |
| Multiplexación espacial canal           | No  |
| Número de antenas Tx/Rx por sub-array   | $K = L = 8$   |
| Número de sub-arrays Tx/Rx              | $M = N = 2$   |
| Ganancia teórica sub-array              | $g_{SA} = KL = 64 \cong 18 \text{ dB}$                      |
| Ganancia teórica sub-array Tx           | $g_{SATx} = K = 8 \cong 9 \text{ dB}$                       |
| SNR sub-canal MIMO                      | $SNR_{MIMO} = g_{SA} SNR_{SISO} = 64 \cdot SNR_{SISO}$      |
| Ganancia máxima diversidad espacial     | $d = MN = 4 \cong 6 \text{ dB}$                             |
| Probabilidad de error                   | $BER_{MIMO} = SNR_{MIMO}^{-d} = (64 \cdot SNR_{SISO})^{-4}$ |
| Ganancia máxima multiplexación espacial | $r = 1 = 0 \text{ dB}$                                      |
| Capacidad máxima canal                  | $C_{MIMO} = rB \log(1 + SNR) = rC_{SISO} = C_{SISO}$        |



# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

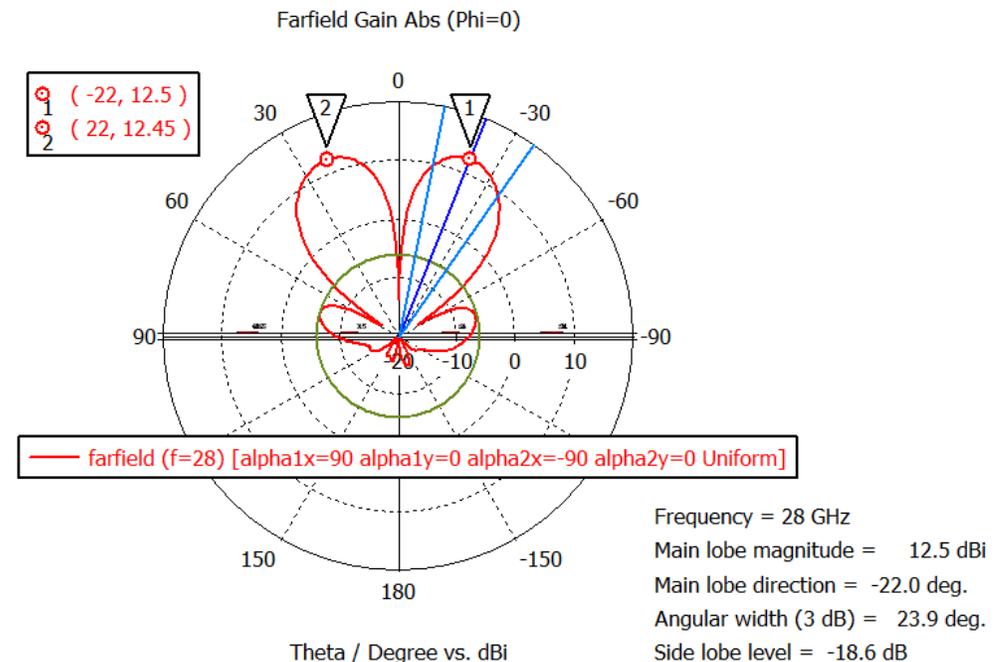
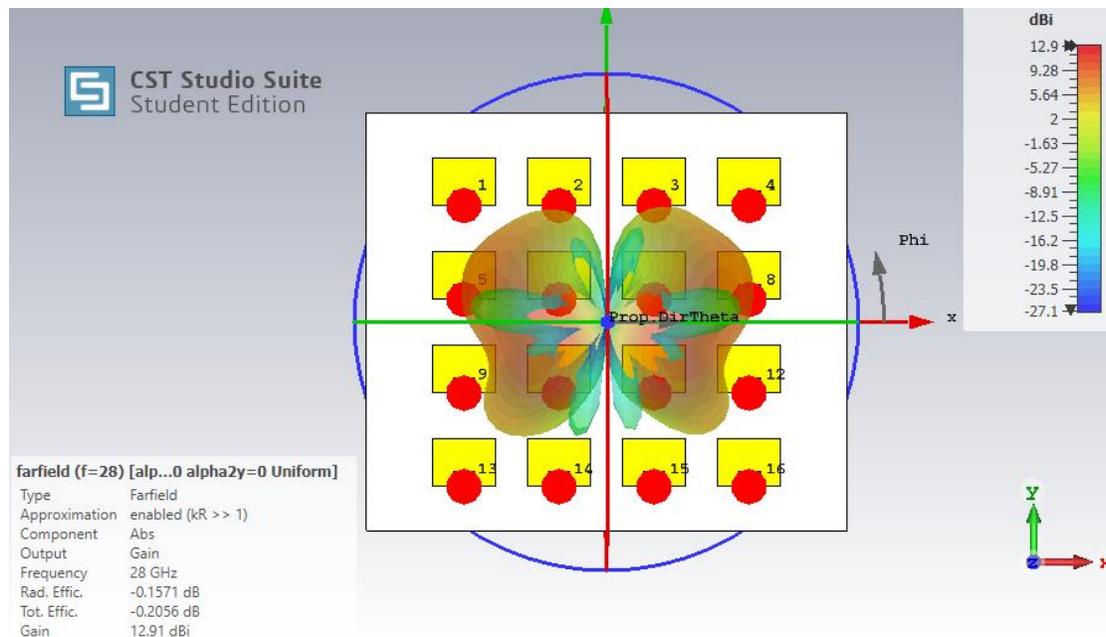
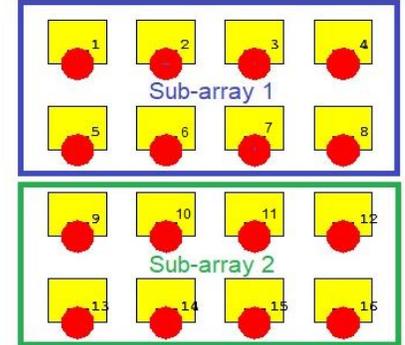
## 8.2.1 Sistema multi-antena #2A MIMO 5G mmWave

► Generalized Beamforming ( $\theta_o = \pm 22^\circ, \phi_o = 0^\circ$ ) con 2 sub-arrays

$$a_{ij} \in a_n^U, \alpha_x^1 = +90^\circ, \alpha_y^1 = 0^\circ \text{ y } \alpha_x^2 = -90^\circ, \alpha_y^2 = 0^\circ$$

$$w = \begin{pmatrix} a_{11} \angle 0^\circ & a_{12} \angle \alpha_x^1 & a_{13} \angle 2\alpha_x^1 & a_{14} \angle 3\alpha_x^1 \\ a_{21} \angle \alpha_y^1 & a_{22} \angle (\alpha_x^1 + \alpha_y^1) & a_{23} \angle (2\alpha_x^1 + \alpha_y^1) & a_{24} \angle (3\alpha_x^1 + \alpha_y^1) \\ a_{31} \angle 0^\circ & a_{32} \angle \alpha_x^2 & a_{33} \angle 2\alpha_x^2 & a_{34} \angle 3\alpha_x^2 \\ a_{41} \angle \alpha_y^2 & a_{42} \angle (\alpha_x^2 + \alpha_y^2) & a_{43} \angle (2\alpha_x^2 + \alpha_y^2) & a_{44} \angle (3\alpha_x^2 + \alpha_y^2) \end{pmatrix}$$

$$w^{\#2A} = \begin{pmatrix} 1 \angle 0^\circ & 1 \angle 90^\circ & 1 \angle 180^\circ & 1 \angle 270^\circ \\ 1 \angle 0^\circ & 1 \angle 90^\circ & 1 \angle 180^\circ & 1 \angle 270^\circ \\ 1 \angle 0^\circ & 1 \angle -90^\circ & 1 \angle -180^\circ & 1 \angle -270^\circ \\ 1 \angle 0^\circ & 1 \angle -90^\circ & 1 \angle -180^\circ & 1 \angle -270^\circ \end{pmatrix}$$



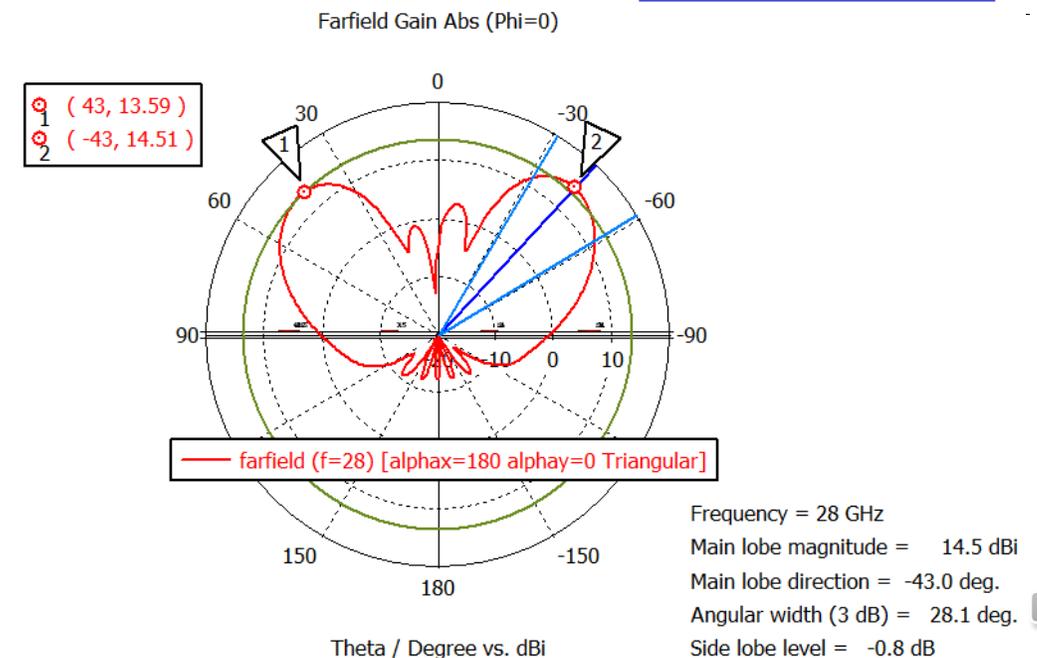
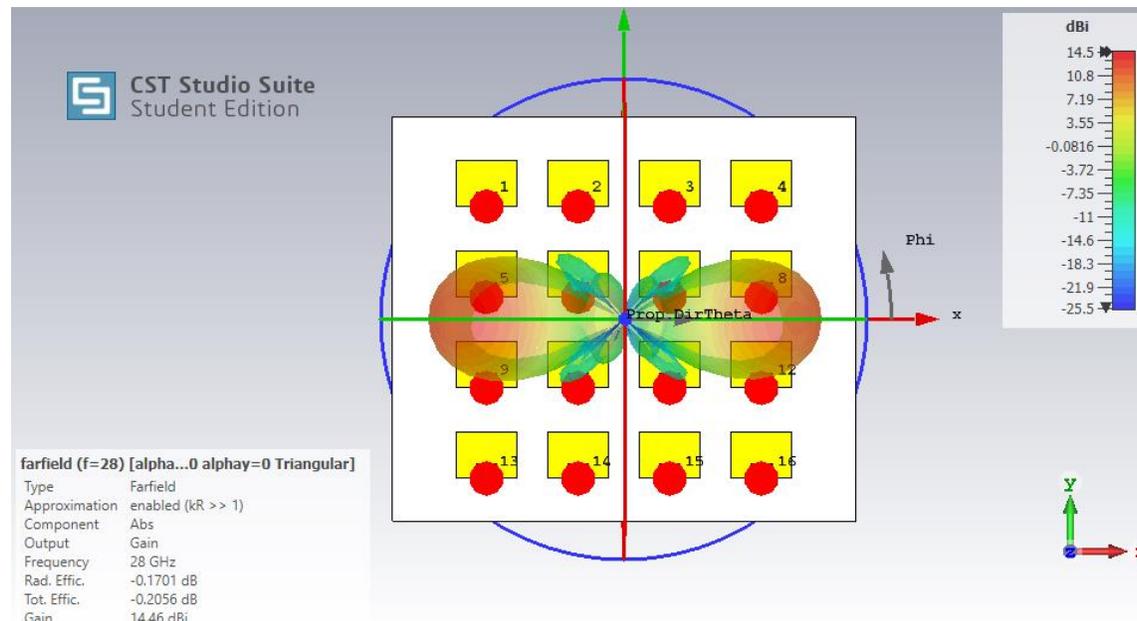
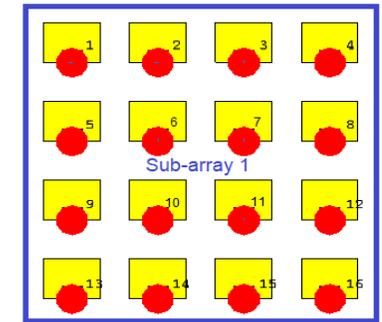
# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.2.2 Sistema multi-antena #2B MIMO 5G mmWave

► Generalized Beamforming ( $\theta_o = \pm 43^\circ, \phi_o = 0^\circ$ ) con lóbulo de difracción

$$a_{ij} \in a_n^T, \alpha_x = +180^\circ, \alpha_y = 0^\circ$$

$$w = \begin{pmatrix} a_{11} \angle 0^\circ & a_{12} \angle \alpha_x & a_{13} \angle 2\alpha_x & a_{14} \angle 3\alpha_x \\ a_{21} \angle \alpha_y & a_{22} \angle (\alpha_x + \alpha_y) & a_{23} \angle (2\alpha_x + \alpha_y) & a_{24} \angle (3\alpha_x + \alpha_y) \\ a_{31} \angle 2\alpha_y & a_{32} \angle (\alpha_x + 2\alpha_y) & a_{33} \angle (2\alpha_x + 2\alpha_y) & a_{34} \angle (3\alpha_x + 2\alpha_y) \\ a_{41} \angle 3\alpha_y & a_{42} \angle (\alpha_x + 3\alpha_y) & a_{43} \angle (2\alpha_x + 3\alpha_y) & a_{44} \angle (3\alpha_x + 3\alpha_y) \end{pmatrix} \quad w^{\#2B} = \begin{pmatrix} 0.33 \angle 0^\circ & 0.66 \angle 180^\circ & 0.66 \angle 360^\circ & 0.33 \angle 520^\circ \\ 0.66 \angle 0^\circ & 1 \angle 180^\circ & 1 \angle 360^\circ & 0.66 \angle 520^\circ \\ 0.66 \angle 0^\circ & 1 \angle 180^\circ & 1 \angle 360^\circ & 0.66 \angle 520^\circ \\ 0.33 \angle 0^\circ & 0.66 \angle 180^\circ & 0.66 \angle 360^\circ & 0.33 \angle 520^\circ \end{pmatrix}$$



# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.2.3 Sistemas multi-antena #2A y #2B MIMO 5G mmWave

Tabla 8.11: Figuras de mérito sistema de antenas #2A MIMO con 2 sub-arrays

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| Número de sub-arrays TX/RX            | $M = N = 2$  |
| Número de antenas TX/Rx por sub-array | $K = L = 8$  |
| Frecuencia operación                  | $f_o = 28 \text{ GHz}$   |
| Dimensiones físicas (mm)              | $(L_{sg} = 27.76) \times (W_{sg} = 31.43)$                                     |
| Distancia entre elementos             | $d = 0.6\lambda_o$   |
| Polarización                          | $\hat{y}$  |
| Pérdidas de retorno                   | $S_{ii} < -34 \text{ dB}$  |
| Acoplamiento mutuo                    | $S_{ji} < -20 \text{ dB}$  |
| Ancho de banda                        | $B = 1.15 \text{ GHz}$   |
| Distribución de corriente             | Uniforme   |
| Ganancia MIMO #2A                     | $G_{MIMO}^{\#2A}(\theta_o = \pm 22^\circ, \phi_o = 0^\circ) = 12.5 \text{ dB}$ |
| Nivel lóbulo principal-secundario     | $NLPS = 18.6 \text{ dB}$   |
| Eficiencia total                      | $e = -0.2 \text{ dB}$  |
| Beamforming horizontal                | $ \theta_o = 22^\circ $  |
| Ganancia Sub-array Tx                 | $g_{SATx}^{\#2A} = 4.87 \text{ dB}$  |

Tabla 8.12: Figuras de mérito sistema de antenas #2B MIMO con lóbulo de difracción

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| Número de sub-arrays TX/RX            | $M = N = 1$  |
| Número de antenas TX/Rx por sub-array | $K = L = 16$   |
| Frecuencia operación                  | $f_o = 28 \text{ GHz}$   |
| Dimensiones físicas (mm)              | $(L_{sg} = 27.76) \times (W_{sg} = 31.43)$                                     |
| Distancia entre elementos             | $d = 0.6\lambda_o$   |
| Polarización                          | $\hat{y}$  |
| Pérdidas de retorno                   | $S_{ii} < -34 \text{ dB}$  |
| Acoplamiento mutuo                    | $S_{ji} < -20 \text{ dB}$  |
| Ancho de banda                        | $B = 1.15 \text{ GHz}$   |
| Distribución de corriente             | Triangular   |
| Ganancia MIMO #2B                     | $G_{MIMO}^{\#2B}(\theta_o = \pm 43^\circ, \phi_o = 0^\circ) = 14.5 \text{ dB}$ |
| Nivel lóbulo principal-secundario     | $NLPS = 12.4 \text{ dB}$   |
| Eficiencia total                      | $e = -0.2 \text{ dB}$  |
| Beamforming horizontal                | $ \theta_o = 43^\circ $  |
| Ganancia Sub-array Tx                 | $g_{SATx}^{\#2B} = 6.37 \text{ dB}$  |



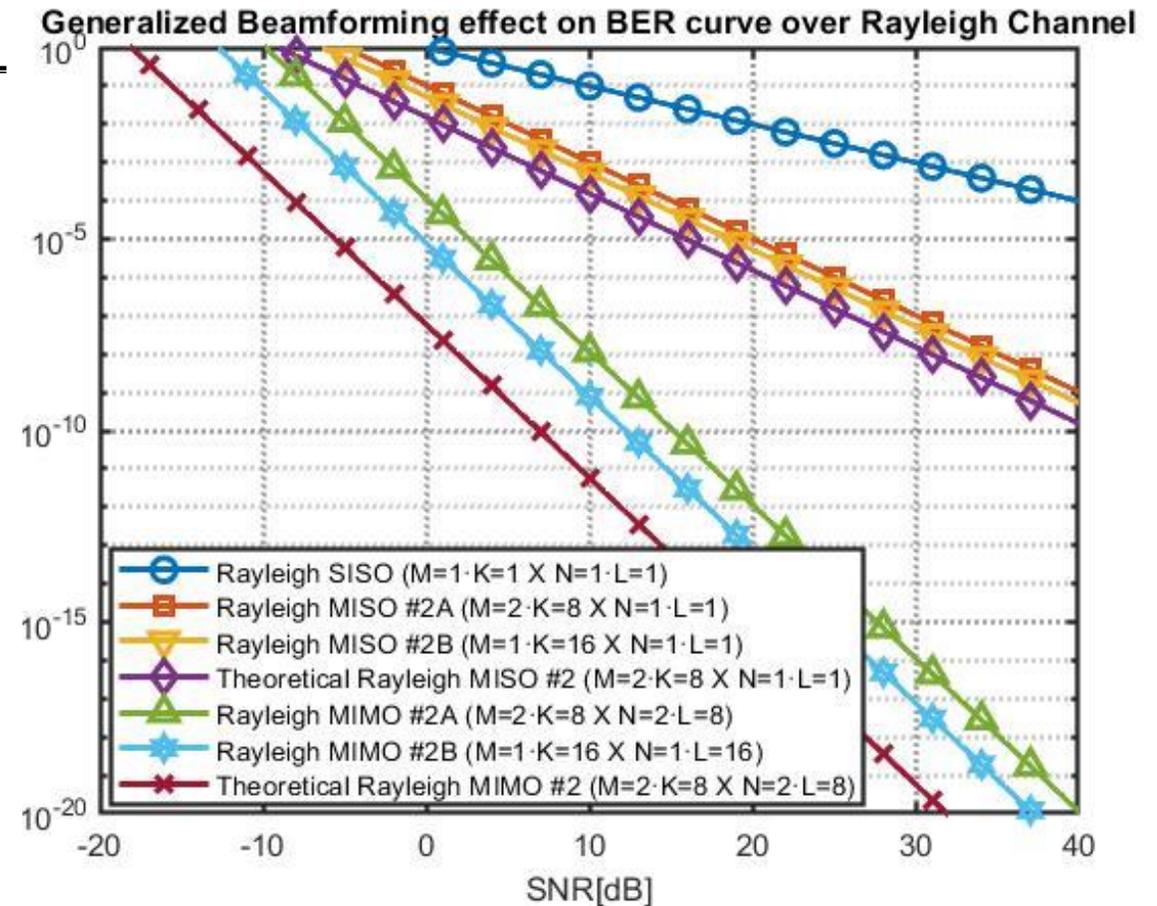
# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.2.3 Sistemas multi-antena #2A y #2B MIMO 5G mmWave

### ► Relación BER-SNR de los sistemas #2A y #2B sobre canal Rayleigh NLOS

Tabla 8.9: Ganancias y probabilidades de error sistema multi-antena #2 MIMO 5G sobre canal Rayleigh NLOS

|  |  |
|--|--|
| Ganancia teórica Sub-array   | $g_{SA} = KL = 64 \approx 18 \text{ dB}$   |
| Ganancia teórica Sub-array Tx  | $g_{SATx} = K = 8 \approx 9 \text{ dB}$  |
| Ganancia Sub-array MIMO #2A  | $g_{SA}^{\#2A} = (g_{SATx}^{\#2A})^2 = 9.61 = 9.82 \text{ dB}$                     |
| Ganancia Sub-array Tx MIMO #2A   | $g_{SATx}^{\#2A} = G_{MIMO}^{\#2A} - G_{MSA} = 3.1 = 4.87 \text{ dB}$              |
| Ganancia Sub-array MIMO #2B  | $g_{SA}^{\#2B} = (g_{SATx}^{\#2B})^2 = 18.79 = 12.74 \text{ dB}$                   |
| Ganancia Sub-array Tx MIMO #2B   | $g_{SATx}^{\#2B} = G_{MIMO}^{\#2B} - G_{MSA} = 4.33 = 6.37 \text{ dB}$             |
| BER SISO/MSA   | $BER_{SISO} = SNR_{SISO}^{-1}$   |
| BER MISO/SIMO #2A<br>( $M = 2 \cdot K = 8 \times N = 1 \cdot L = 1$ )        | $BER_{MISO}^{\#2A} = (SNR_{MISO}^{\#2A})^{-d} = (g_{SATx}^{\#2A} SNR_{SISO})^{-2}$ |
| BER MISO/SIMO #2B<br>( $M = 1 \cdot K = 16 \times N = 1 \cdot L = 1$ )       | $BER_{MISO}^{\#2B} = (SNR_{MISO}^{\#2B})^{-d} = (g_{SATx}^{\#2B} SNR_{SISO})^{-2}$ |
| BER teórica MISO/SIMO #2<br>( $M = 2 \cdot K = 8 \times N = 1 \cdot L = 1$ ) | $BER_{MISO} = SNR_{MISO}^{-d} = (g_{SATx} SNR_{SISO})^{-2}$                        |
| BER MIMO #2A<br>( $M = 2 \cdot K = 8 \times N = 2 \cdot L = 8$ )             | $BER_{MIMO}^{\#2A} = (SNR_{MIMO}^{\#2A})^{-d} = (g_{SA}^{\#2A} SNR_{SISO})^{-4}$   |
| BER MIMO #2B<br>( $M = 1 \cdot K = 16 \times N = 1 \cdot L = 16$ )           | $BER_{MIMO}^{\#2B} = (SNR_{MIMO}^{\#2B})^{-d} = (g_{SA}^{\#2B} SNR_{SISO})^{-4}$   |
| BER teórica MIMO #2<br>( $M = 2 \cdot K = 8 \times N = 2 \cdot L = 8$ )      | $BER_{MIMO} = (SNR_{MIMO})^{-d} = (g_{SA} SNR_{SISO})^{-4}$                        |

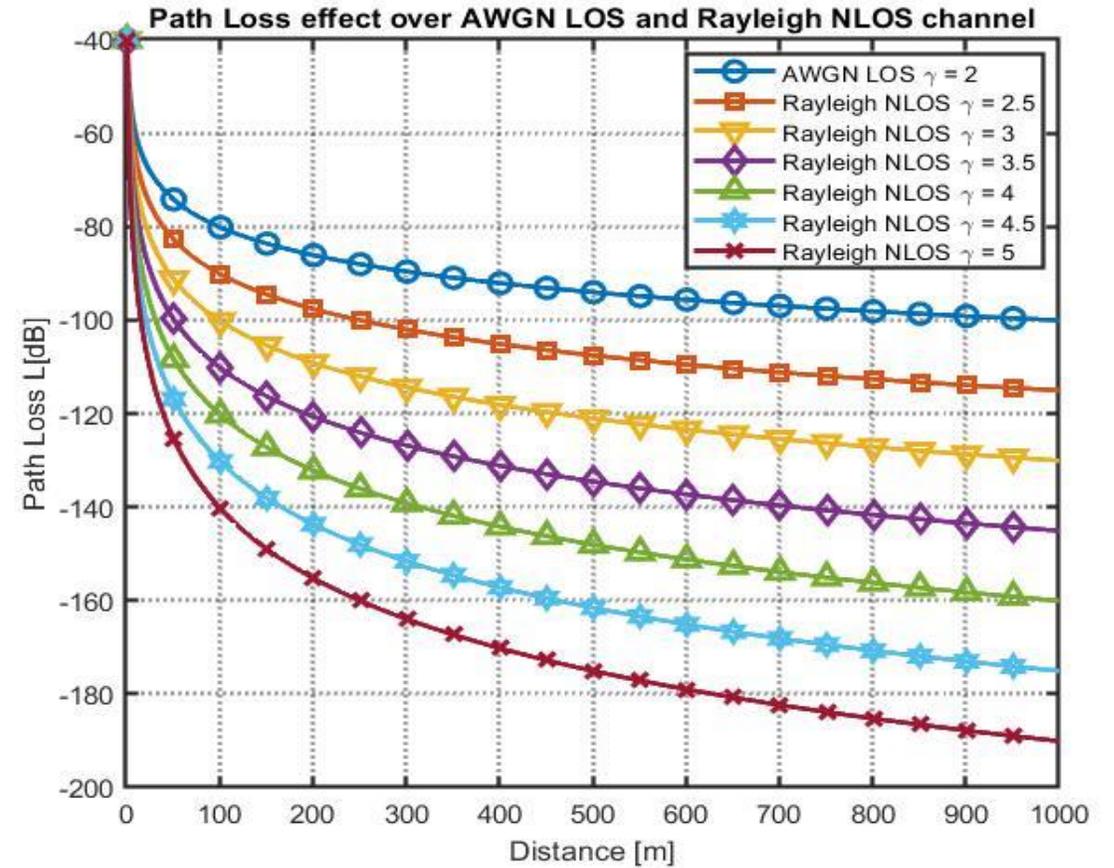


# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.2.3 Sistemas multi-antena #2A y #2B MIMO 5G mmWave

- Aumento de las pérdidas de propagación con el exponente path loss  $\gamma$  de canales AWGN LOS y Rayleigh NLOS a la frecuencia de operación 28 GHz en función de la distancia

$$L = \left(\frac{c}{4\pi f}\right)^2 \left(\frac{1}{d}\right)^\gamma$$



# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

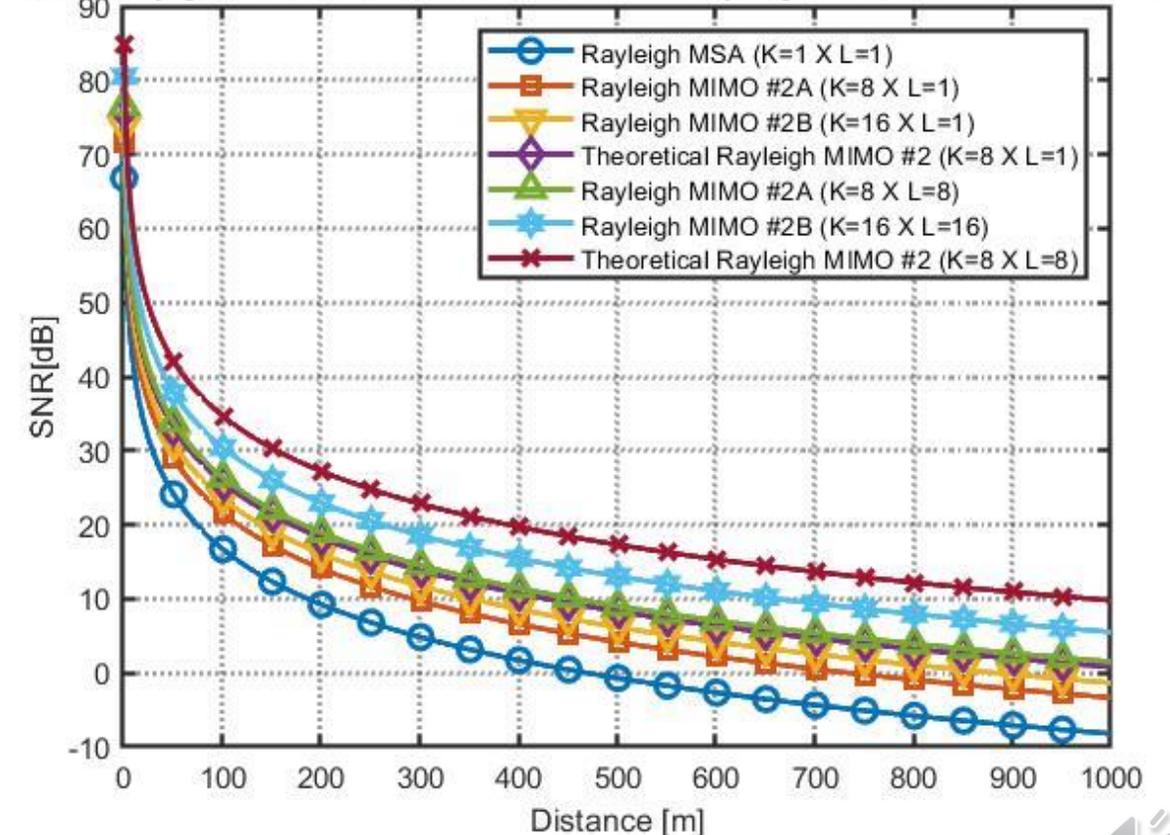
## 8.2.3 Sistemas multi-antena #2A y #2B MIMO 5G mmWave

### ► Relación SNR-cobertura de los sistemas #2A y #2B sobre canal Rayleigh NLOS

Tabla 8.10: Parámetros de interés balance de potencias sistema multi-antena #2 MIMO 5G sobre canal Rayleigh NLOS

|   |  |
|---|--|
| Relación señal-ruido sub-canal receptor     | $SNR = \frac{P_t G_t G_r}{k_B T_o (10^{\frac{NF}{10}} - 1) B} \left(\frac{c}{4\pi f}\right)^2 \left(\frac{1}{d}\right)^\gamma$ |
| Potencia isotrópica radiada efectiva máxima | $EIRP_{max} = 50 \text{ dBm}$  |
| Ganancia Tx/Rx antena microstrip MSA        | $G_{MSA} = 7.63 \text{ dB} = 5.80$   |
| Ganancia Tx/Rx MIMO #2A                     | $G_{MIMO}^{\#2A} = G_{MSA} + g_{SATx}^{\#2A} = 12.5 \text{ dB} = 17.78$  |
| Ganancia Tx/Rx MIMO #2B                     | $G_{MIMO}^{\#2B} = G_{MSA} + g_{SATx}^{\#2B} = 14.5 \text{ dB} = 28.18$  |
| Ganancia teórica Tx/Rx MIMO #2              | $G_{MIMO} = G_{MSA} + g_{SATx} = 16.63 \text{ dB} = 46.02$   |
| Ganancias Tx / Rx                           | $G_t, G_r \in \{G_{MSA}, G_{MIMO}^{\#2A}, G_{MIMO}^{\#2B}, G_{MIMO}\}$   |
| Potencia de transmisión                     | $P_t = EIRP_{max} - G_{MIMO} \cong 33 \text{ dBm} = 2W$  |
| Constante Boltzmann                         | $k_B = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$   |
| Temperatura ruido referencia                | $T_o = 290 \text{ K}$  |
| Figura de ruido receptor 5G @ 28 GHz        | $NF = 5.5 \text{ dB}$  |
| Ancho de banda                              | $B = 1 \text{ GHz}$  |
| Velocidad luz en el vacío                   | $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$   |
| Frecuencia de operación                     | $f = 28 \text{ GHz}$   |
| Exponente path loss canal Rayleigh NLOS     | $\gamma = 2.5$   |

Sub-array gain effect on SNR/distance over Rayleigh NLOS MIMO Sub-Channel



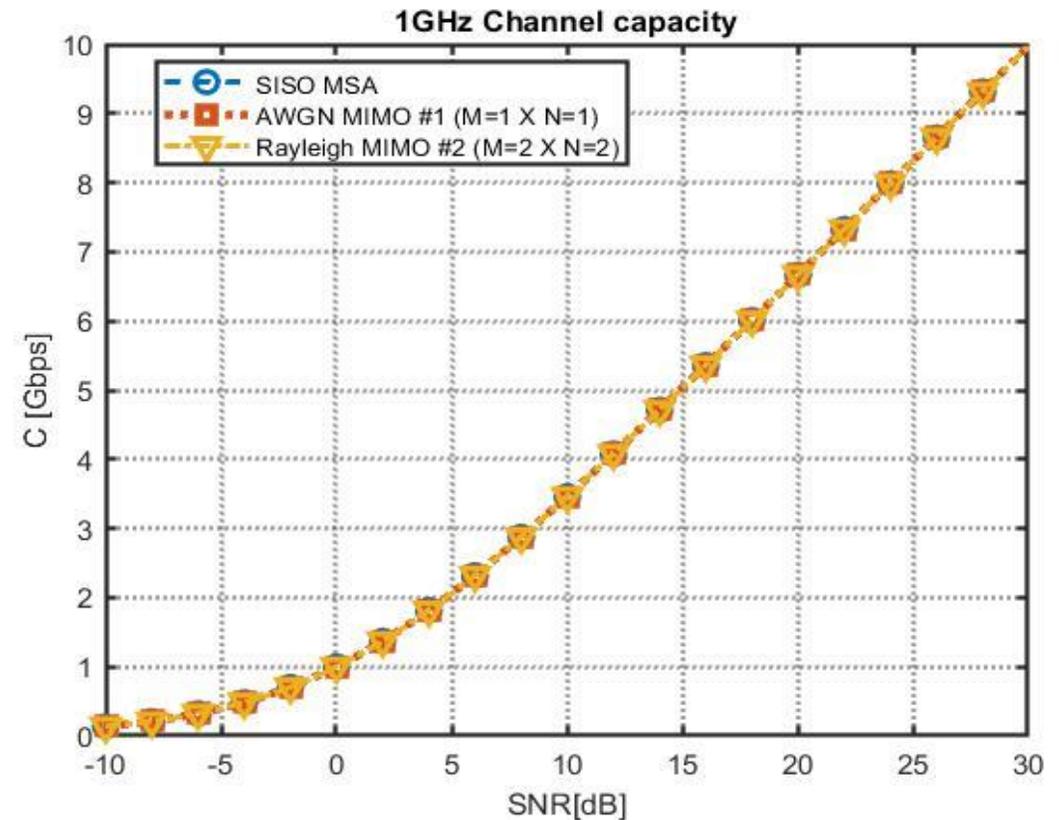
# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.2.3 Sistemas multi-antena #2A y #2B MIMO 5G mmWave

► Relación capacidad-SNR del sistema multi-antena #2 sobre canal Rayleigh NLOS

► Capacidad canal del sistema multi-antena #2 MIMO con ganancia de multiplexación nula

$$C_{MIMO}^{\#2} = rB \log_2(1 + SNR) = B \log_2(1 + SNR) = C_{SISO}$$



# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.3 Sistema multi-antena #3 MIMO 5G mmWave

### ► Requisitos y características

Tabla 8.13: Requisitos de sistema #3 MIMO 5G mmWave

|                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| SNR/Cobertura        | Media                  |
| Robustez (BER)       | Media                  |
| Capacidad canal      | Alta                   |
| Digital Beamforming  | Horizontal/Vertical    |
| Frecuencia operación | $f_o = 28 \text{ GHz}$ |
| Ancho de banda       | $B = 1 \text{ GHz}$    |

Tabla 8.14: Características sistema multi-antena #3 MIMO 5G mmWave

|   |   |
|---|---|
| Técnica Sistema MIMO                    | SU/MU - MIMO  |
| Canal                                   | NLOS Rayleigh   |
| Entorno                                 | Urbano  |
| Exponente path loss                     | $\gamma = 3$  |
| Diversidad espacial canal               | No  |
| Multiplexación espacial canal           | Sí  |
| Número de antenas Tx/Rx por sub-array   | $K = L = 8$   |
| Número de sub-arrays Tx/Rx              | $M = N = 2$   |
| Ganancia máxima sub-array               | $g_{SA} = KL = 64 \cong 18 \text{ dB}$                      |
| Ganancia máxima sub-array Tx            | $g_{SATx} = K = 8 \cong 9 \text{ dB}$                       |
| SNR sub-canal MIMO                      | $SNR_{MIMO} = g_{SA} SNR_{SISO} = 64 \cdot SNR_{SISO}$      |
| Ganancia máxima diversidad espacial     | $d = 1 = 0 \text{ dB}$                                      |
| Probabilidad de error                   | $BER_{MIMO} = SNR_{MIMO}^{-d} = (64 \cdot SNR_{SISO})^{-1}$ |
| Ganancia máxima multiplexación espacial | $r = \min(M, N) = 2 = 3 \text{ dB}$                         |
| Capacidad máxima canal                  | $C_{MIMO} = rB \log(1 + SNR) = rC_{SISO} = 2C_{SISO}$       |



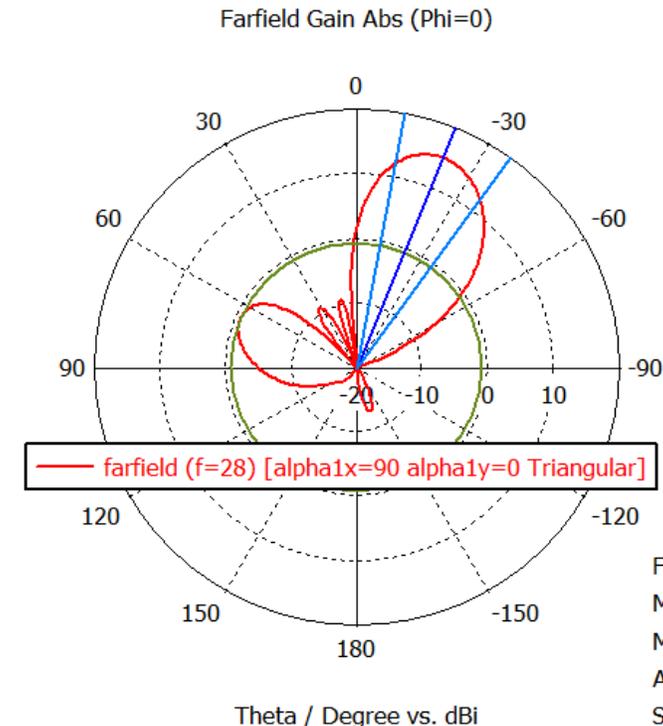
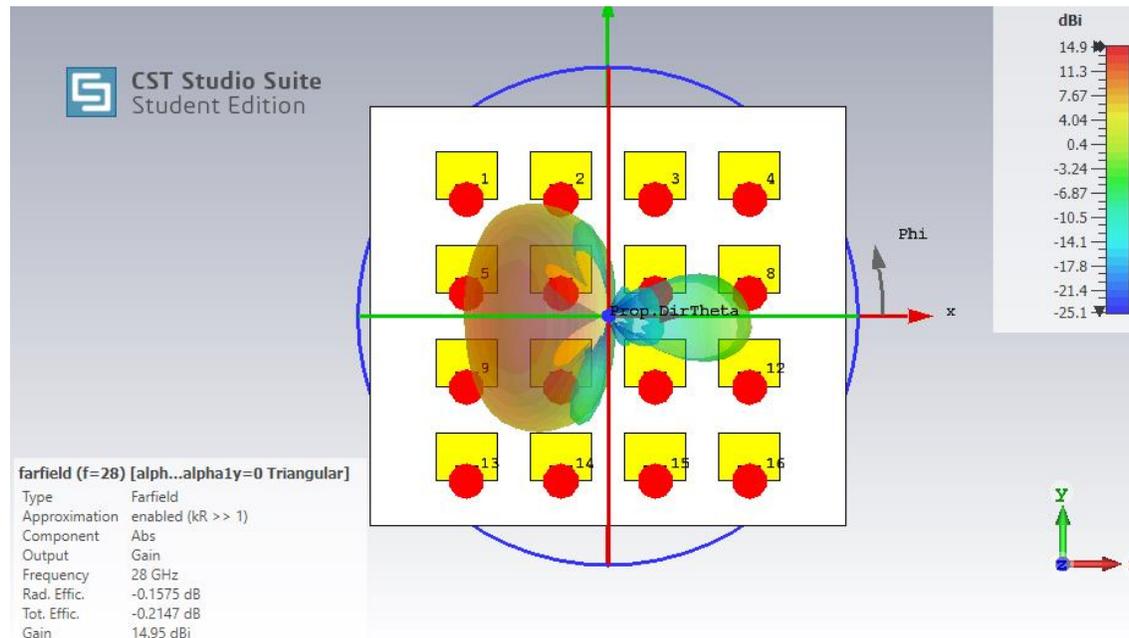
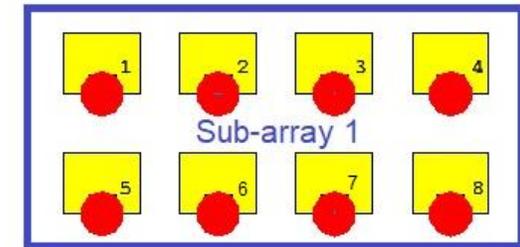
# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.3 Sistema multi-antena #3 MIMO 5G mmWave

► SU/MU-MIMO Sub-array 1 ( $\theta_o = -22^\circ, \phi_o = 0^\circ$ )

$$a_{ij} \in a_n^T, \alpha_x^1 = +90^\circ, \alpha_y^1 = 0^\circ$$

$$w_1 = \begin{pmatrix} a_{11} \angle 0^\circ & a_{12} \angle \alpha_x^1 & a_{13} \angle 2\alpha_x^1 & a_{14} \angle 3\alpha_x^1 \\ a_{21} \angle \alpha_y^1 & a_{22} \angle (\alpha_x^1 + \alpha_y^1) & a_{23} \angle (2\alpha_x^1 + \alpha_y^1) & a_{24} \angle (3\alpha_x^1 + \alpha_y^1) \end{pmatrix} w_1 = \begin{pmatrix} 0.5 \angle 0^\circ & 1 \angle 90^\circ & 1 \angle 180^\circ & 0.5 \angle 270^\circ \\ 0.5 \angle 0^\circ & 1 \angle 90^\circ & 1 \angle 180^\circ & 0.5 \angle 270^\circ \end{pmatrix}$$



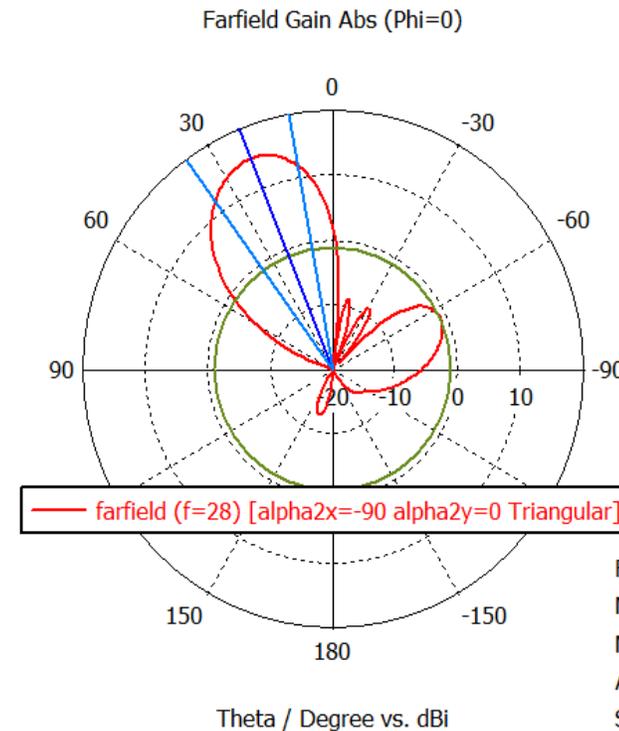
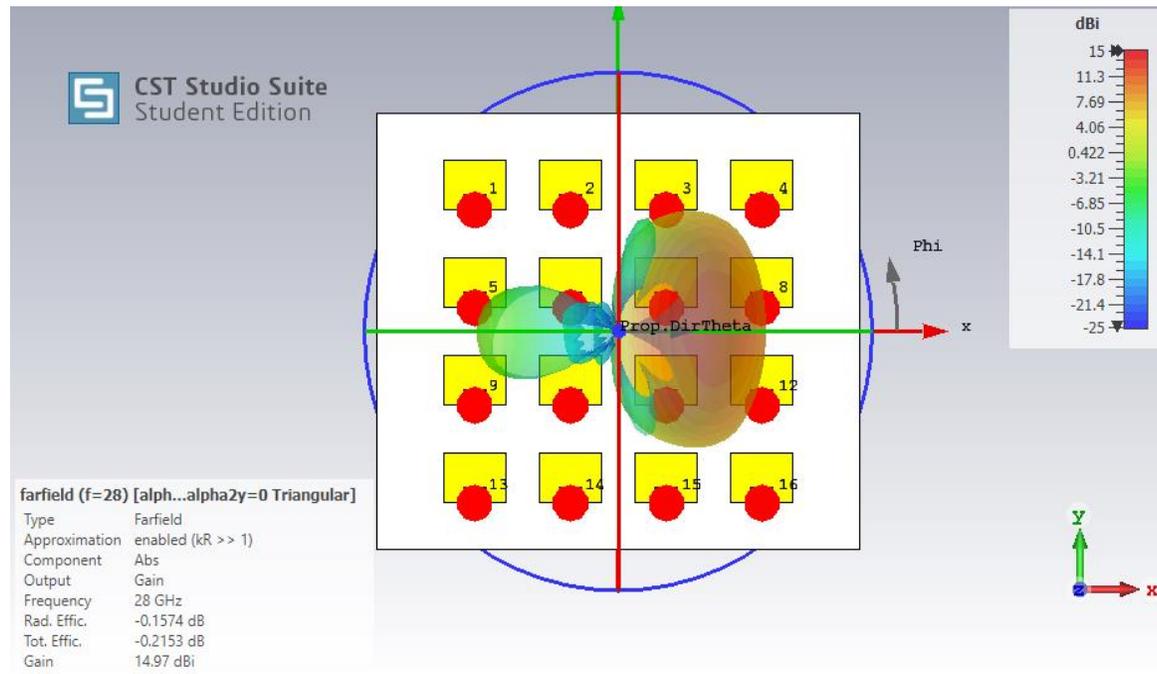
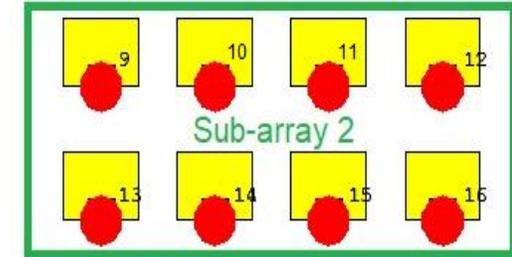
# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.3 Sistema multi-antena #3 MIMO 5G mmWave

► SU/MU-MIMO Sub-array 2 ( $\theta_o = +22^\circ, \phi_o = 0^\circ$ )

$$a_{ij} \in a_n^T, \alpha_x^2 = -90^\circ, \alpha_y^2 = 0^\circ$$

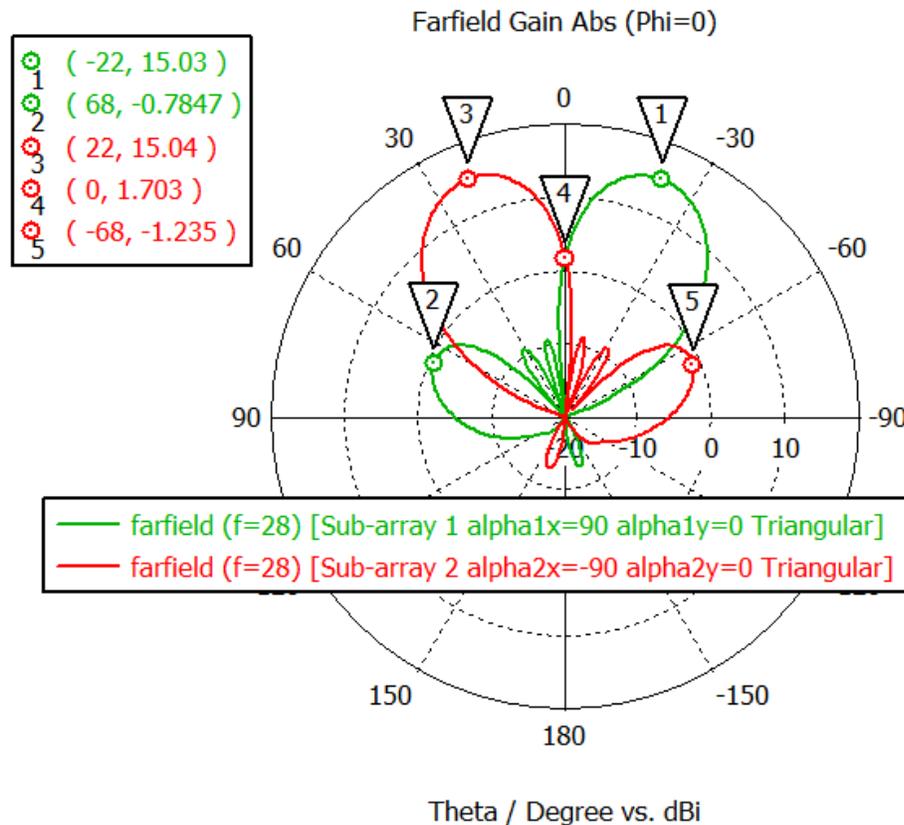
$$w_2 = \begin{pmatrix} a_{31} \angle 0^\circ & a_{32} \angle \alpha_x^1 & a_{33} \angle 2\alpha_x^1 & a_{34} \angle 3\alpha_x^1 \\ a_{41} \angle \alpha_y^1 & a_{42} \angle (\alpha_x^1 + \alpha_y^1) & a_{43} \angle (2\alpha_x^1 + \alpha_y^1) & a_{44} \angle (3\alpha_x^1 + \alpha_y^1) \end{pmatrix} \quad w_2 = \begin{pmatrix} 0.5 \angle 0^\circ & 1 \angle -90^\circ & 1 \angle -180^\circ & 0.5 \angle -270^\circ \\ 0.5 \angle 0^\circ & 1 \angle -90^\circ & 1 \angle -180^\circ & 0.5 \angle -270^\circ \end{pmatrix}$$



# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.3 Sistema multi-antena #3 MIMO 5G mmWave

Tabla 8.16: Figuras de mérito sistema de antenas #3 MIMO con 2 sub-canales



|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| Número de sub-arrays TX/RX            | $M = N = 2$                                |
| Número de antenas TX/Rx por sub-array | $K = L = 8$                                |
| Frecuencia operación                  | $f_o = 28 \text{ GHz}$                     |
| Dimensiones físicas (mm)              | $(L_{sg} = 27.76) \times (W_{sg} = 31.43)$ |
| Distancia entre elementos             | $d = 0.6\lambda_o$                         |
| Polarización                          | $\hat{y}$                                  |
| Pérdidas de retorno                   | $S_{ii} < -34 \text{ dB}$                  |
| Acoplamiento mutuo                    | $S_{ji} < -20 \text{ dB}$                  |
| Ancho de banda                        | $B = 1.15 \text{ GHz}$                     |
| Distribución de corriente             | Triangular                                 |
| Ganancia máxima                       | $G_{MIMO}^{\#3} = 15 \text{ dB}$           |
| Nivel lóbulo principal-secundario     | $NLPS = 16 \text{ dB}$                     |
| Eficiencia total                      | $e = -0.2 \text{ dB}$                      |
| Beamforming horizontal                | $ \theta_o = 22^\circ $                    |
| Ganancia Sub-array Tx                 | $g_{SATx}^{\#3} = 7.37 \text{ dB}$         |



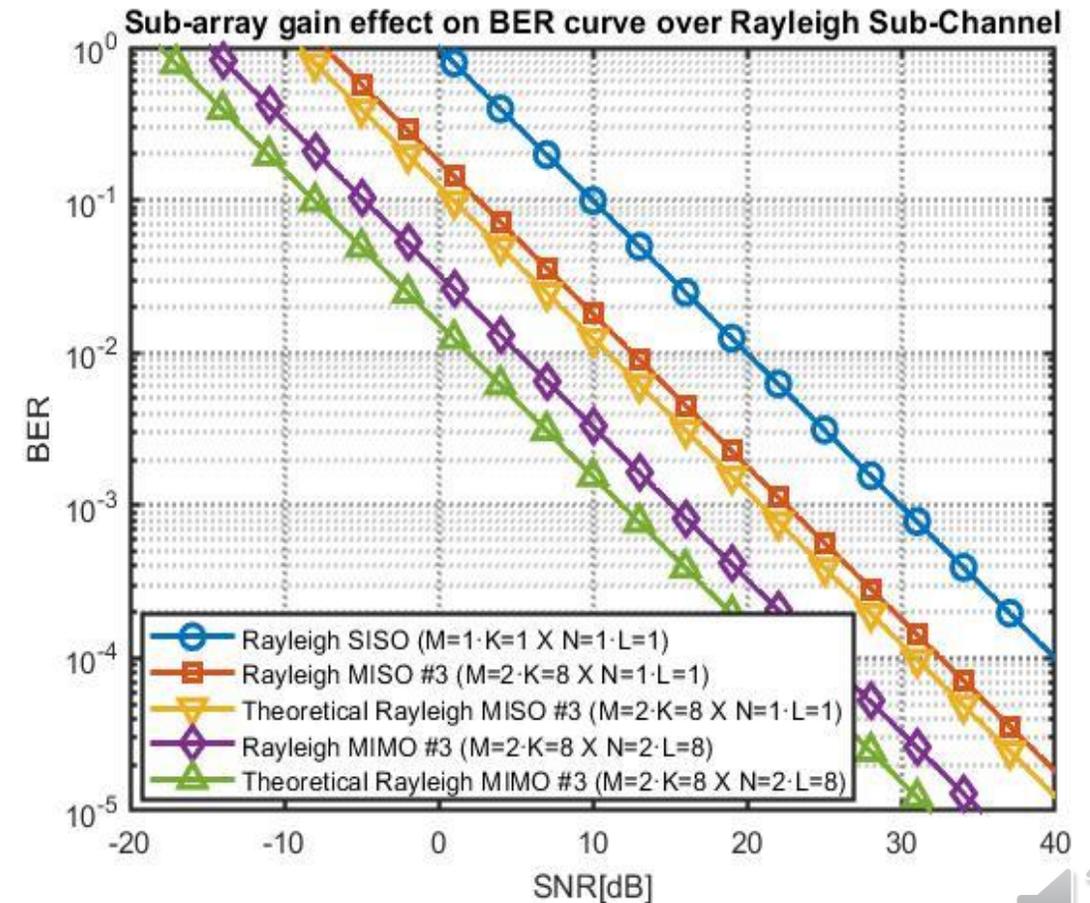
# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.3 Sistema multi-antena #3 MIMO 5G mmWave

### ► Relación BER-SNR del sistema multi-antena #3 sobre canal Rayleigh NLOS

Tabla 8.15: Ganancias y probabilidades de error sistema multi-antena #3 MIMO 5G sobre canal Rayleigh NLOS

|  |   |
|--|---|
| Ganancia Tx MSA  | $G_{MSA} = 7.64 \text{ dB}$   |
| Ganancia Tx MIMO #3  | $G_{MIMO}^{\#3} = 15 \text{ dB}$  |
| Ganancia teórica Sub-array   | $g_{SA} = KL = 64 \approx 18 \text{ dB}$  |
| Ganancia teórica Sub-array Tx  | $g_{SATx} = K = 8 \approx 9 \text{ dB}$   |
| Ganancia Sub-array MIMO #3   | $g_{SA}^{\#3} = (g_{SATx}^{\#3})^2 = 30.25 = 14.8 \text{ dB}$                   |
| Ganancia Sub-array Tx MIMO #3  | $g_{SATx}^{\#3} = G_{MIMO}^{\#3} - G_{MSA} = 5.5 = 7.37 \text{ dB}$             |
| Ganancia diversidad  | $d = 1 = 0 \text{ dB}$  |
| BER SISO/MSA   | $BER_{SISO} = SNR_{SISO}^{-1}$  |
| BER MISO/SIMO #3<br>( $M = 2 \cdot K = 8 \times N = 1 \cdot L = 1$ )         | $BER_{MISO}^{\#3} = (SNR_{MISO}^{\#3})^{-d} = (g_{SATx}^{\#3} SNR_{SISO})^{-1}$ |
| BER teórica MISO/SIMO #3<br>( $M = 2 \cdot K = 8 \times N = 1 \cdot L = 1$ ) | $BER_{MISO} = SNR_{MISO}^{-d} = (g_{SATx} SNR_{SISO})^{-1}$                     |
| BER MIMO #3<br>( $M = 2 \cdot K = 8 \times N = 2 \cdot L = 8$ )              | $BER_{MIMO}^{\#3} = (SNR_{MIMO}^{\#3})^{-d} = (g_{SA}^{\#3} SNR_{SISO})^{-1}$   |
| BER teórica MIMO #3<br>( $M = 2 \cdot K = 8 \times N = 2 \cdot L = 8$ )      | $BER_{MIMO} = (SNR_{MIMO})^{-d} = (g_{SA} SNR_{SISO})^{-1}$                     |



# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

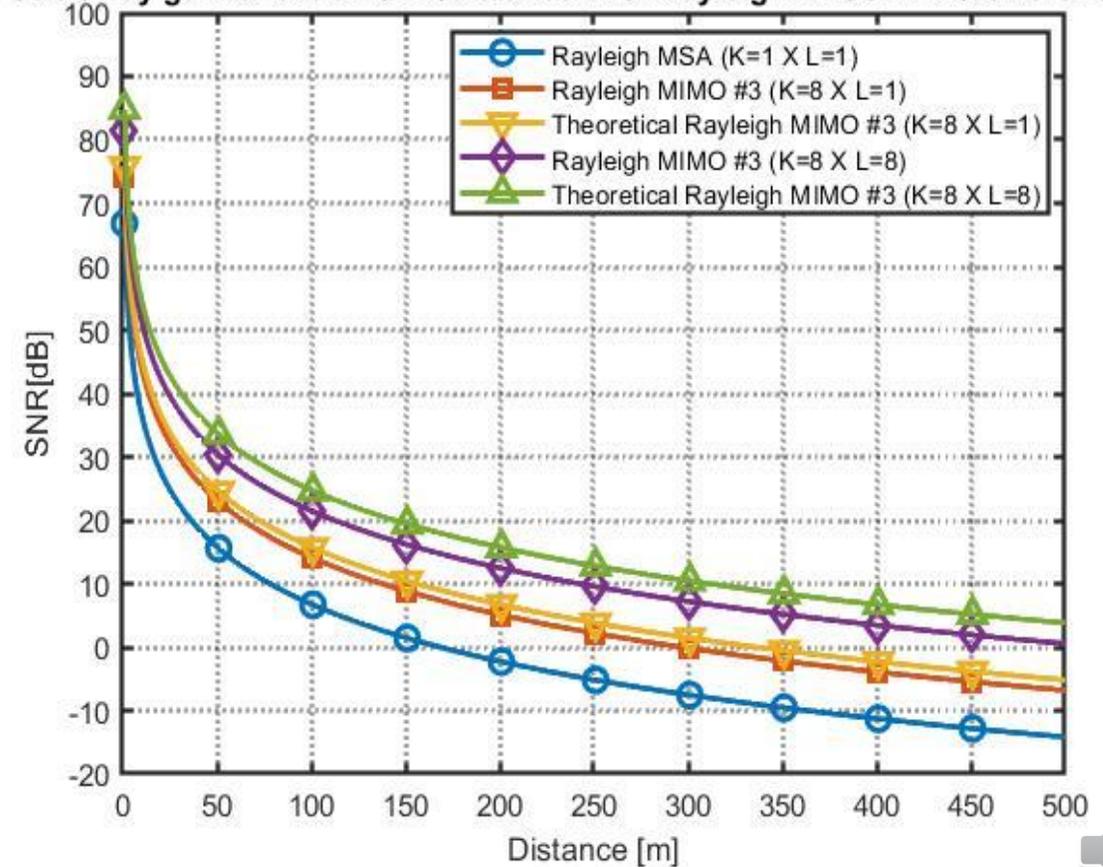
## 8.3 Sistema multi-antena #3 MIMO 5G mmWave

### ► Relación SNR-cobertura del sistema multi-antena #3 sobre canal Rayleigh NLOS

Tabla 8.16: Parámetros de interés balance de potencias sistema multi-antena #3 MIMO 5G sobre canal Rayleigh NLOS

|   |  |
|---|--|
| Relación señal-ruido sub-canal receptor     | $SNR = \frac{P_t G_t G_r}{k_B T_o (10^{\frac{NF}{10}} - 1) B} \left(\frac{c}{4\pi f}\right)^2 \left(\frac{1}{d}\right)^\gamma$ |
| Potencia isotrópica radiada efectiva máxima | $EIRP_{max} = 50 \text{ dBm}$  |
| Ganancia Tx/Rx antena microstrip MSA        | $G_{MSA} = 7.63 \text{ dB} = 5.80$   |
| Ganancia Tx/Rx MIMO #3                      | $G_{MIMO}^{\#3} = G_{MSA} + g_{SATx}^{\#3} = 15 \text{ dB} = 31.62$  |
| Ganancia teórica Tx/Rx MIMO #3              | $G_{MIMO} = G_{MSA} + g_{SATx} = 16.63 \text{ dB} = 46.0$  |
| Ganancias Tx / Rx                           | $G_t, G_r \in \{G_{MSA}, G_{MIMO}^{\#3}, G_{MIMO}\}$   |
| Potencia de transmisión                     | $P_t = EIRP_{max} - G_{MIMO} \cong 33 \text{ dBm} = 2W$  |
| Constante Boltzmann                         | $k_B = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$   |
| Temperatura ruido referencia                | $T_o = 290 \text{ K}$  |
| Figura de ruido receptor 5G @ 28 GHz        | $NF = 5.5 \text{ dB}$  |
| Ancho de banda                              | $B = 1 \text{ GHz}$  |
| Velocidad luz en el vacío                   | $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$   |
| Frecuencia de operación                     | $f = 28 \text{ GHz}$   |
| Exponente path loss canal Rayleigh NLOS     | $\gamma = 3$   |

Sub-array gain effect on SNR/distance over Rayleigh NLOS MIMO Sub-Channel



# 8. Sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave

## 8.3 Sistema multi-antena #3 MIMO 5G mmWave

► Relación capacidad-SNR del sistema multi-antena #3 sobre canal Rayleigh NLOS

► Capacidad canal MISO/SIMO #3

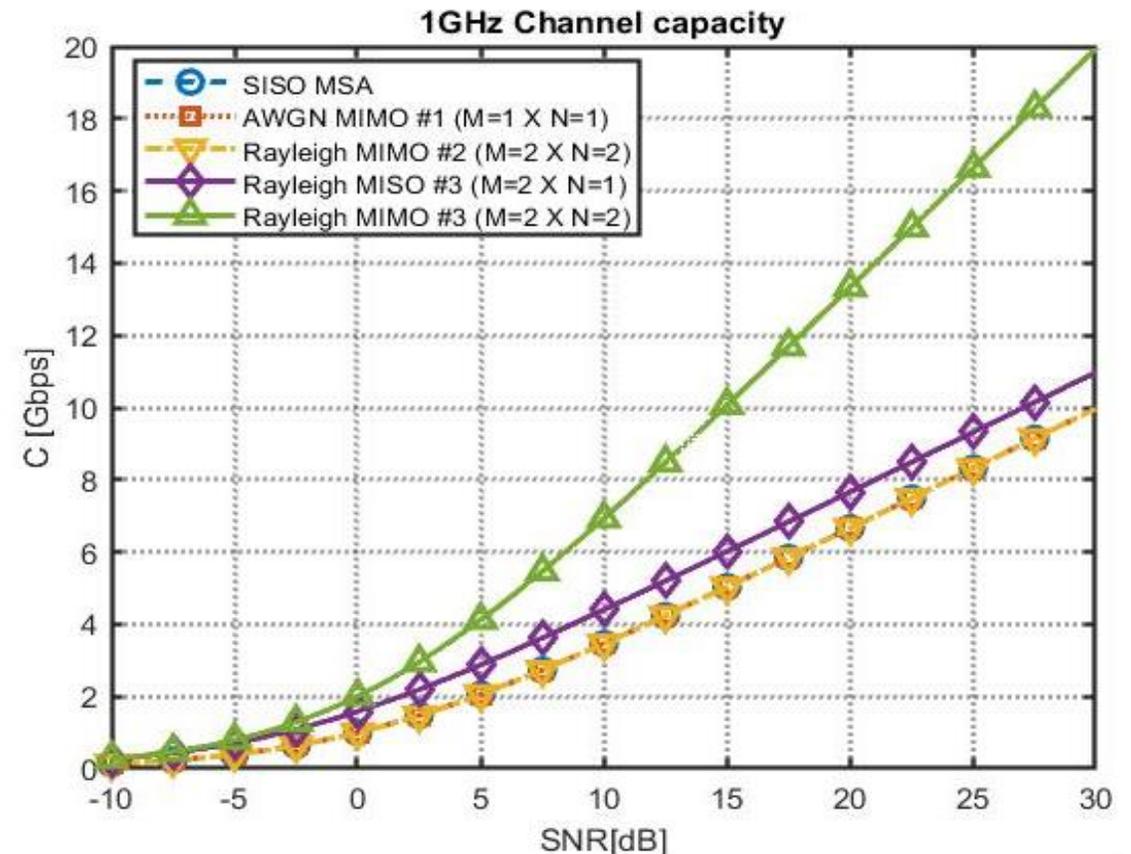
$$C_{SIMO}^{\#3} = C_{MISO}^{\#3} = B \log_2(1 + M \cdot SNR) = B \log_2(1 + 2SNR)$$

► Ganancia multiplexación MIMO #3

$$r = \text{rank}(\mathbf{H}) = \min(M, N) = \min(2, 2) = 2$$

► Capacidad canal MIMO #3

$$C_{MIMO}^{\#3} = rB \log_2(1 + SNR) = 2B \log_2(1 + SNR)$$



# 9. Conclusiones y líneas futuras

---

## 9.1 Conclusiones

- ▶ Debido a la relación inversamente proporcional de la longitud de onda con la frecuencia, se podrán implementar sistemas bidimensionales multi-antena microstrip MIMO de bajo perfil y alto ancho de banda ( $>1\text{GHz}$ ) en la banda milimétrica 5G mmWave sin comprometer las dimensiones físicas disponibles.
- ▶ Deberá de existir un compromiso entre ganancia, rango de escaneo Beamforming, acoplamiento mutuo y NLPS a la hora de diseñar la distancia entre elementos, número de elementos y el tipo de distribución de corriente en los sistemas multi-antena MIMO



# 9. Conclusiones y líneas futuras

---

## 9.1 Conclusiones

- ▶ En escenarios AWGN LOS la técnica MIMO Beamforming permitirá aumentar la movilidad, ganancia y SNR-cobertura, compensando así las altas pérdidas de propagación a alta frecuencia de las ondas EM por lluvia, absorción atmosférica y espacio libre
- ▶ En escenarios Rayleigh NLOS la técnica MIMO Generalized Beamforming proporcionará un aumento de la robustez del canal y reducción de la BER gracias a la ganancia de diversidad espacial mediante el envío simultáneo de símbolos de información duplicados
- ▶ En escenarios Rayleigh NLOS con alta densidad de usuarios la técnica SU/MU MIMO permitirá aumentar la capacidad de canal gracias a la ganancia de multiplexación espacial mediante el envío de símbolos de información diferentes



# 9. Conclusiones y líneas futuras

---

## 9.1 Conclusiones

- ▶ Se ha conseguido diseñar y caracterizar diferentes prototipos de sistemas multi-antena MIMO 5G mmWave mediante diversas herramientas de simulación: ADS, CST Microwave Studio Student Edition y MATLAB
- ▶ Se ha demostrado que los sistemas multi-antena MIMO permiten mejorar el rendimiento (ganancia, SNR-cobertura, BER, capacidad, movilidad) de los sistemas de antenas SISO
- ▶ Debe de existir un compromiso entre SNR, cobertura, BER y capacidad de canal a la hora de diseñar un sistema multi-antena MIMO
- ▶ Necesidad de realización de estudios paramétricos, ajuste del número de celdas malla hexaédrica y diseño espacial 3D para suplir limitaciones del software CST Microwave Student Edition



# 9. Conclusiones y líneas futuras

---

## 9.2 Propuestas de mejora y líneas futuras

- ▶ Sistemas multi-antena MIMO con ganancia de diversidad de polarización dual
- ▶ Realización de incisiones en el plano de masa (DGS) para poder reducir aun más la distancia entre elementos sin comprometer el acoplamiento mutuo y aumentar así el rango de escaneo Beamforming
- ▶ Modificación de la geometría de las antenas de parche y/o utilización de parches parásitos coplanares/multicapa con el objetivo de conseguir antenas resonantes multi-banda y antenas con anchos de banda elevados para sistemas 5G y B5G
- ▶ Utilización de metamateriales y superestratos en antenas de parche para aumentar aun más la directividad, ganancia y SNR-cobertura.
- ▶ Sistemas multi-antena masivos distribuidos (mMIMO) y superficies inteligentes reconfigurables (RIS)



**iGracias por vuestra atención!**

