

Estado del Arte (ampliado con fundamentos matemáticos)

La formación de haces (beamforming) en 5G/5G-A/6G se apoya en arreglos de antenas masivos (mMIMO) y en técnicas de precodificación que maximizan la relación señal-a-interferencia-ruido (SINR) y, por ende, el throughput. En 5G ya se emplea beamforming masivo; 5G Advanced mejora el beam management y eficiencia energética; 6G investiga bandas sub-THz/THz y superficies inteligentes reconfigurables (RIS), con apoyo de IA/ML.

4.1 Modelos de canal y presupuesto de enlace

Pérdida de trayectoria (path loss): Friis (espacio libre): $PL_{\{\mathrm{FS}\}}(d,f) = 32.44 +$

$20\log_{10}(f_{\{\mathrm{MHz}\}}) + 20\log_{10}(d_{\{\mathrm{km}\}}) - \ln(CI) : PL_{\{\mathrm{CI}\}}(d) =$

$PL(f,d_0) + 10 n \log_{10}(\frac{d}{d_0}) + X_{\sigma}$ Presupuesto de enlace (downlink):

$P_{\{\mathrm{rx}\}}[\mathrm{dBm}] = P_{\{\mathrm{tx}\}} + G_{\{\mathrm{tx}\}} + G_{\{\mathrm{rx}\}} - PL -$

$L_{\{\mathrm{misc}\}} \quad \mathrm{SNR}[\mathrm{dB}] = P_{\{\mathrm{rx}\}} - N_0 - 10\log_{10}(B)$ Capacidad

(Shannon): $C = B\log_2(1 + \gamma)$

4.2 Arreglos de antenas y formación de haces

Vector de dirección (steering): $\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{-j k d \sin \theta}, \dots, e^{-j (N-1) k d \sin \theta}]^T$

$\mathbf{w}_{\text{MRT}} = \frac{\mathbf{h}^H \mathbf{a}(\theta)}{\|\mathbf{h}\|^2} \mathbf{a}(\theta)$

$AF(\theta) = \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta)$

$G_{\text{array}}(\theta) = |AF(\theta)|^2$ Nota: con $d = \lambda/2$ la ganancia

pico escala $\approx N$ (10 log10 N dB).

4.3 MU-MIMO, SINR y precodificadores

$$\mathrm{SINR}_k = \frac{\rho \|\mathbf{h}_k\|^H \|\mathbf{w}_k\|^2}{\sum_{i \neq k} \rho \|\mathbf{h}_i\|^H \|\mathbf{w}_i\|^2 + \sigma^2}$$

$$\text{Tasa sumada: } R_{\Sigma} = \sum_k B \log_2(1 + \mathrm{SINR}_k) \quad \text{ZF:}$$

$$\mathbf{W}_{ZF} = \beta \mathbf{H}^H (\mathbf{H} \mathbf{H}^H)^{-1} \quad \text{MMSE:}$$

$$\mathbf{W}_{\mathrm{MMSE}} =$$

$$\beta \mathbf{H}^H (\mathbf{H} \mathbf{H}^H + \frac{\sigma^2}{\rho} \mathbf{I})^{-1}$$

4.4 OFDM, numerología y métricas

$\mathrm{SINR}=\frac{P_s}{I+N_0 B}$ Eficiencia espectral: $\eta=\frac{1}{B}\sum_k$

$\log_2(1+\mathrm{SINR}_k)$ Eficiencia energética: $\mathrm{EE}=\frac{R_\mathrm{Sigma}}{P_\mathrm{total}}$

PAPR (OFDM): $\mathrm{PAPR}=\frac{\max_t |x(t)|^2}{\mathbb{E}[|x(t)|^2]}$

4.5 6G: sub-THz/THz y RIS

Modelo aproximado en THz: $PL_{\text{THz}} \approx PL_{\text{FS}} + \alpha(f)$ d RIS (M

elementos): $\mathbf{y} = (\mathbf{h}_{\text{UR}})^H \mathbf{H} \mathbf{\Phi} \mathbf{H}_{\text{BR}} \mathbf{w} \mathbf{s} +$

$n, \text{quad } \mathbf{\Phi} = \text{diag}(e^{j\phi_1}, \dots, e^{j\phi_M})$

4.6 Ejemplos de cálculo (resueltos)

A) Presupuesto de enlace en 28 GHz: $f = 28$ GHz, $d = 200$ m, $B = 100$ MHz, $P_{tx} = 30$ dBm, $G_{tx} = 18$

dB, $G_{rx} = 12$ dB, $L_{misc} = 3$ dB $PL_{FS} \approx 101.4$ dB $P_{rx} \approx -44.4$ dBm $N_0B \approx -94$ dBm $SNR \approx 49.6$ dB

Capacidad ≈ 1.65 Gb/s B) Vector de pesos para $\theta = 30^\circ$ con ULA $N=8$: $\mathbf{w} \propto [1,$

$e^{-j\pi/2}, e^{-j\pi}, e^{-j3\pi/2}, \dots]^\top$ C) Precoding ZF para 2 usuarios:

$\mathbf{W}_{\text{ZF}} = \beta \mathbf{H}^H (\mathbf{H} \mathbf{H}^H)^{-1}$ D) RIS simple: ϕ_m

$= -\arg(h_{\text{UR},m}) - \arg(\mathbf{H}_{\text{BR}}(m, :)\mathbf{w})$