

Sistemas de comunicaciones inalámbricas

# Unidad 2: Canales inalámbricos

1

Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



**NEON**  
Network of Competence on Internet of Things

# El canal inalámbrico

- El canal de comunicación es un componente “fundamental” en todos los sistemas de comunicaciones.
- Es clave conocer los mecanismos de propagación en un canal inalámbrico y su modelado.
- Los canales inalámbricos se pueden estudiar siguiendo los conceptos de electromagnetismo y propagación de ondas.

# Mecanismos de propagación

- Las ondas electromagnéticas se pueden propagar en los canales inalámbricos siguiendo diferentes mecanismos.
  - Propagación en el espacio libre.
  - Reflexión y transmisión
  - Difracción
  - Scattering

# Propagación

- En los sistemas móviles generalmente las señales transmitidas no alcanzan la antena de recepción directamente debido a los obstáculos que bloquean la línea-de-vista entre antenas.
- Las ondas recibidas son una superposición de ondas que llegan desde diferentes direcciones debido a procesos de reflexión, difracción y scattering causados por edificios, árboles y otros obstáculos.
- Este efecto es denominado propagación multicamino (multipath propagation).
- Debido a la propagación multicamino, la señal recibida es formada por una suma infinita de replicas de la señal original atenuadas, retardadas y con un determinado desplazamiento de fase.

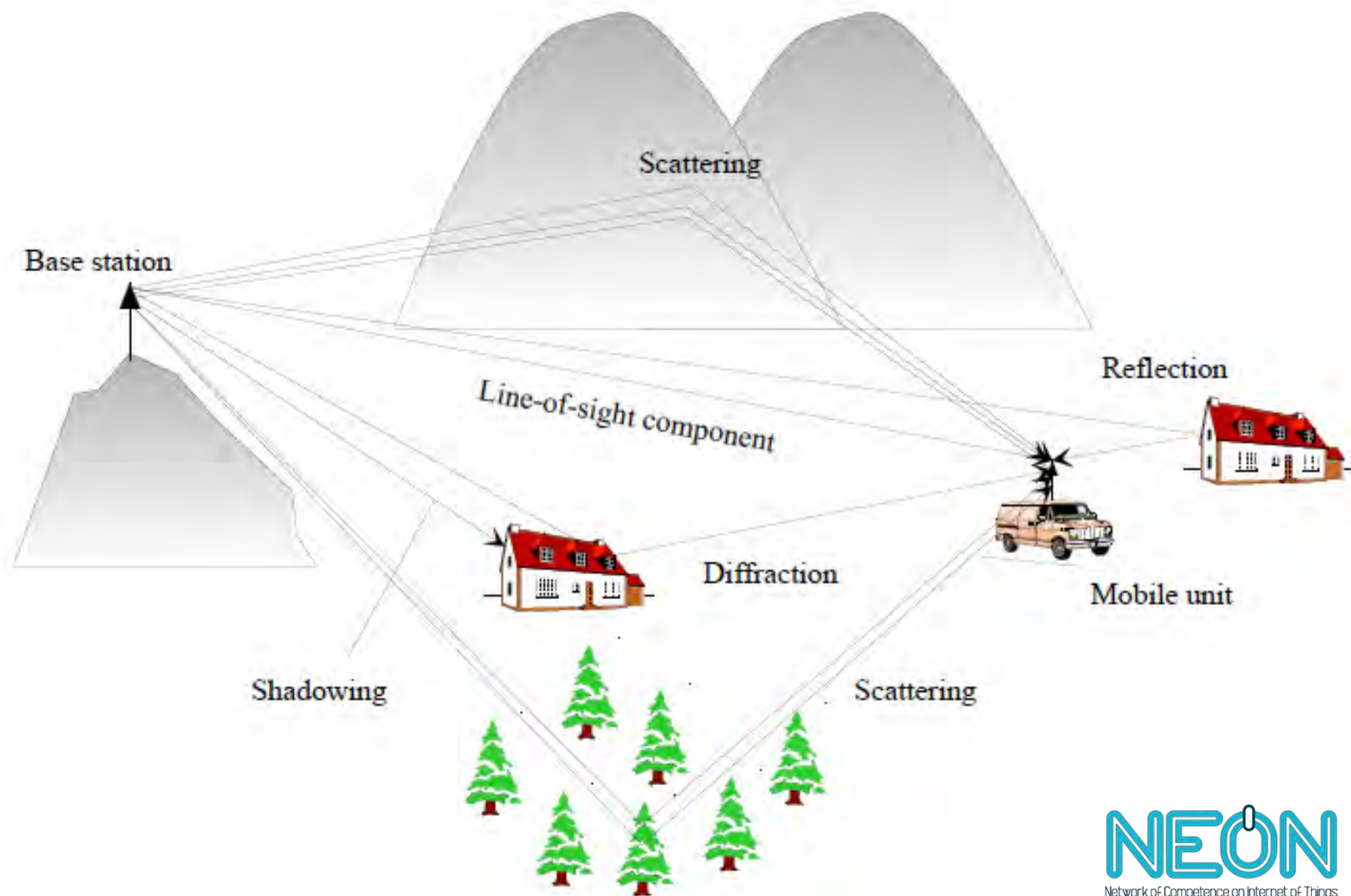
# Propagación

- En los sistemas inalámbricos la información es transmitida radiando una onda electromagnética modulada a una determinada frecuencia de portadora utilizando una antena de transmisión.
- La energía radiada es captada por medio de una antena en el receptor.
- La propagación de las ondas puede ser descripta utilizando las ecuaciones de Maxwell.

# Propagación

- En la mayoría de los escenarios, la resolución de las ecuaciones de Maxwell es “impracticable”.
- Excepto en el caso de propagación en el espacio libre, las ondas interactúan con dieléctricos y conductores.
- Estas interacciones se pueden clasificar:
  - Reflexión, transmisión, scattering y difracción

# Un escenario típico



# Ejemplo 1

- Espacio libre, con antenas de transmisión y recepción fijas
  - El campo eléctrico

$$E(f, t, (r, \theta, \psi)) = \frac{\alpha_s(\theta, \psi, f) \cos 2\pi f(t - \frac{r}{c})}{r}$$

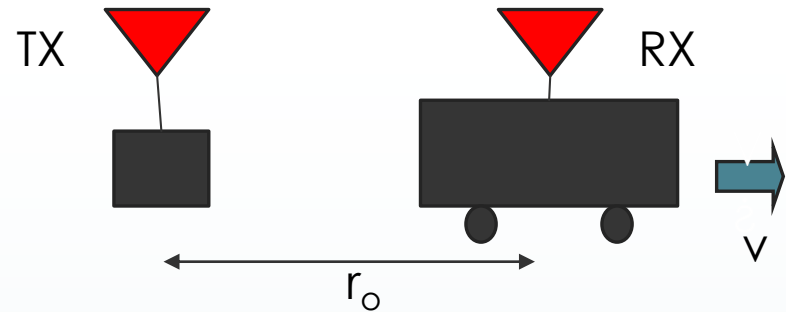
Diagram illustrating the electric field equation in free space:

- $E(f, t, (r, \theta, \psi))$ : Electric field function.
- $\alpha_s(\theta, \psi, f)$ : Patron de radiación de antena transmisora (Radiation pattern of the transmitting antenna).
- $\cos 2\pi f(t - \frac{r}{c})$ : Time and frequency components.
- $r$ : distancia (distance).
- $f$ : frecuencia (frequency).
- $t$ : Tiempo (Time).

- El campo electrico decrece con la distancia y la potencia con el cuadrado de la distancia



## Ejemplo 2



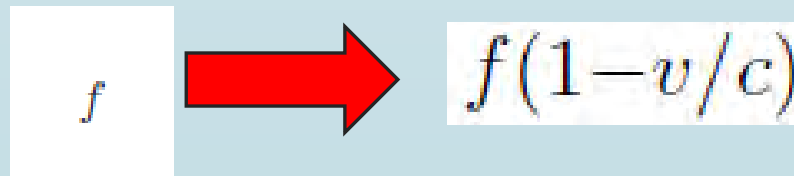
### ► Espacio libre, con antenas móviles

- Una antena fija y un móvil desplazándose a una velocidad  $v$

$$f(t - r_0/c - vt/c) \text{ as } f(1 - v/c)t - fr_0/c.$$

$$E(f, t, (r_0 + vt, \theta, \psi)) = \frac{\alpha_s(\theta, \psi, f) \cos 2\pi f \left( t - \frac{r_0}{c} - \frac{vt}{c} \right)}{r_0 + vt}.$$

- Efecto Doppler: debido al desplazamiento del móvil → la onda de frecuencia  $f$  ha sido convertida a una onda senoidal de frecuencia



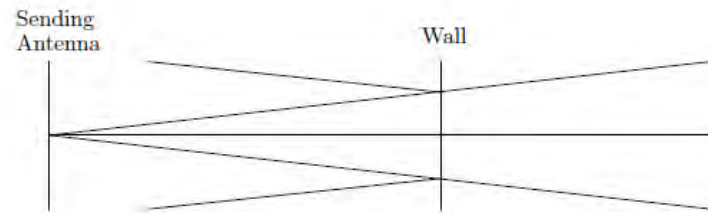
# EFFECTO DOPPLER

- El desplazamiento de frecuencia es función de la frecuencia de operación y de la velocidad relativa de las antenas de transmisión y recepción.

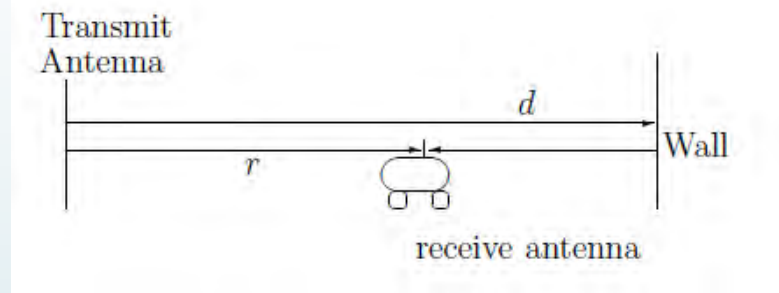
$$D_1 = -fv/c$$

- En aplicaciones móviles el efecto Doppler debe ser contemplado!!

## Ejemplo 3



### ► Reflexión en pared con antena fija



- La antena receptora recibe la señal directa desde la antena transmisora + la señal reflejada en la pared

$$E_r(f, t) = \frac{\alpha \cos(2\pi f(t - r/c))}{r} - \frac{\alpha \cos(2\pi f(t - (2d - r)/c))}{2d - r}$$

Cambio de signo debido a reflexión

## Ejemplo 3

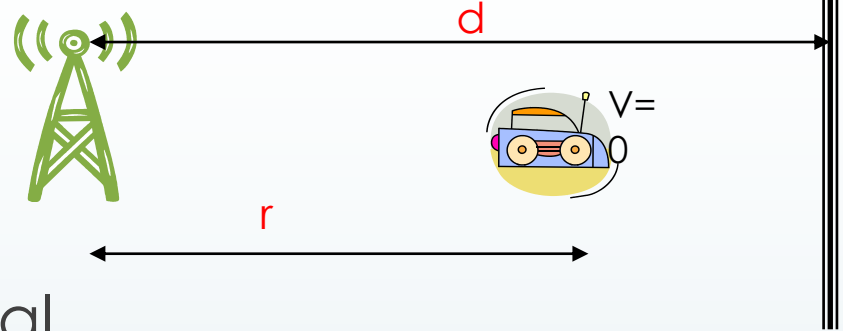
- La diferencia de fase entre la onda incidente y la reflejada es

$$\Delta\theta = \left( \frac{2\pi f(2d - r)}{c} + \pi \right) - \left( \frac{2\pi f r}{c} \right) = \frac{4\pi f}{c}(d - r) + \pi$$

- Si la diferencia de fase es un múltiplo entero de  $2\pi \rightarrow$  interferencia constructiva.
- Si es múltiplo impar de  $\pi \rightarrow$  interferencia destructiva.
- El patrón espacial tendrá máximos y mínimos separados una distancia

$$\Delta x_c = \frac{\lambda}{4}$$

# Ejemplo 3

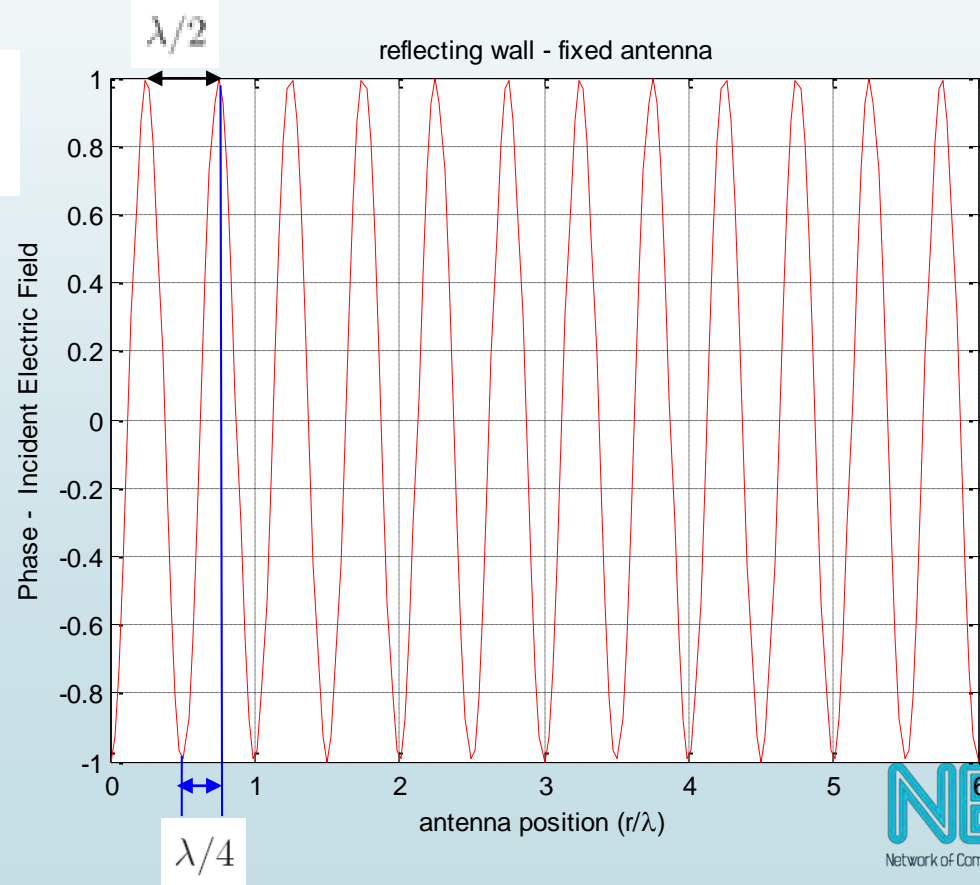


## Patron espacial

$$\Delta\theta = \frac{4\pi}{\lambda}(d - r) + \pi$$

$$(d - r) = n \frac{\lambda}{4}$$

n par → mínimo  
n impar → máximo



## Ejemplo 3

- El patrón de interferencia también depende de la frecuencia.
- Si fijamos  $r$ , y la frecuencia varia

$$\Delta_f = \frac{1}{2} \left( \frac{2d - r}{c} - \frac{r}{c} \right)^{-1}$$

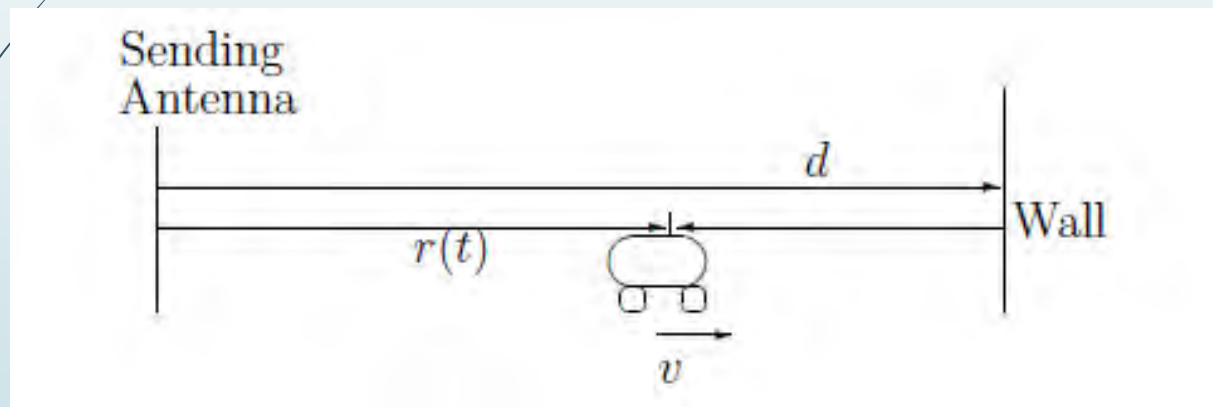
nos desplazamos de un máximo a un mínimo.

- Delay Spread: La diferencia entre los retardos de propagación de los dos caminos

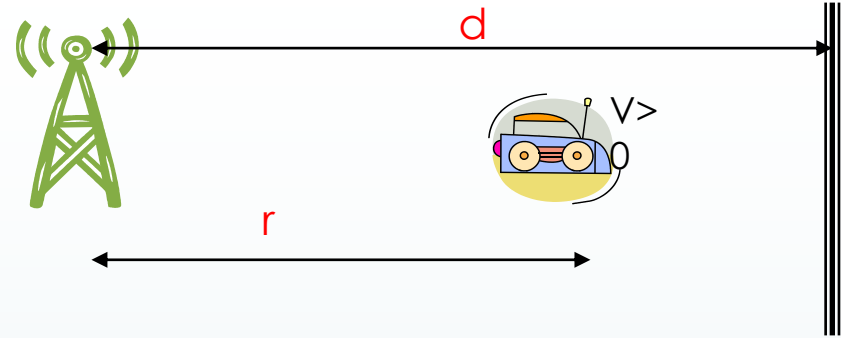
$$T_d = \frac{2d - r}{c} - \frac{r}{c}$$

## Ejemplo 4

- Reflexión en pared con antena móvil



## Ejemplo 4



► Onda directa y onda reflejada

$$E_r(f, t) = \frac{\alpha \cos(2\pi f [(1 - v/c)t - r_0/c])}{r_0 + vt} - \frac{\alpha \cos(2\pi f [(1 - v/c)t - (r_0 - 2d)/c])}{2d - r_0 - vt}$$

Onda directa de frecuencia

$$\begin{array}{c} f(1 - v/c) \\ \updownarrow \\ D_1 = -fv/c \end{array}$$

Onda reflejada de frecuencia

$$\begin{array}{c} f(1 + v/c) \\ \updownarrow \\ D_2 = +fv/c \end{array}$$

► Doppler spread

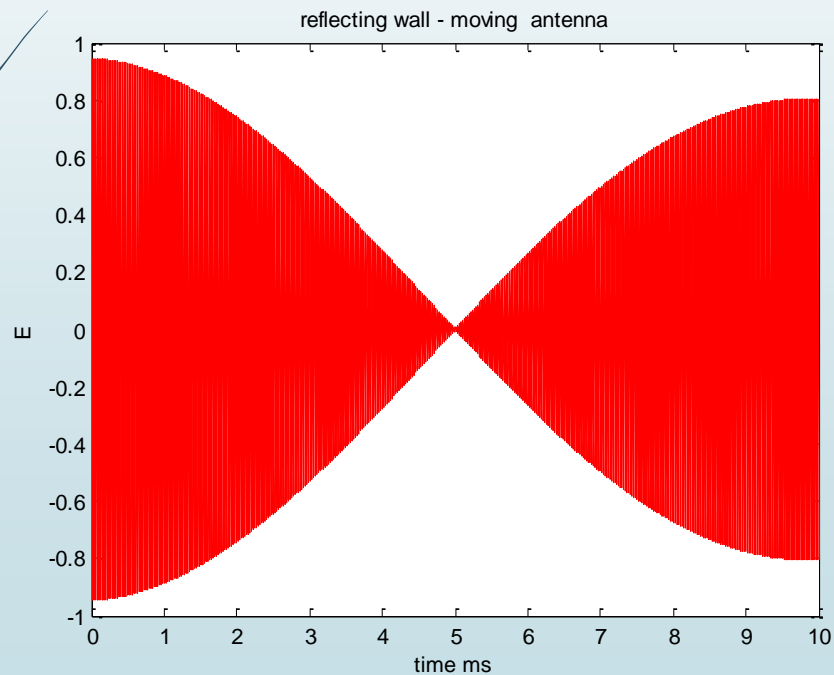
$$D_s = D_2 - D_1$$



## Ejemplo 4

- Señal recibida con frecuencia de portadora  $f$  y envolvente con frecuencia

$$D_s = D_2 - D_1$$



$F=900$  Mhz  
 $V=60$ Km/h  
 $d=10$ m



$D_s=100$ Hz

## Ejemplo 4

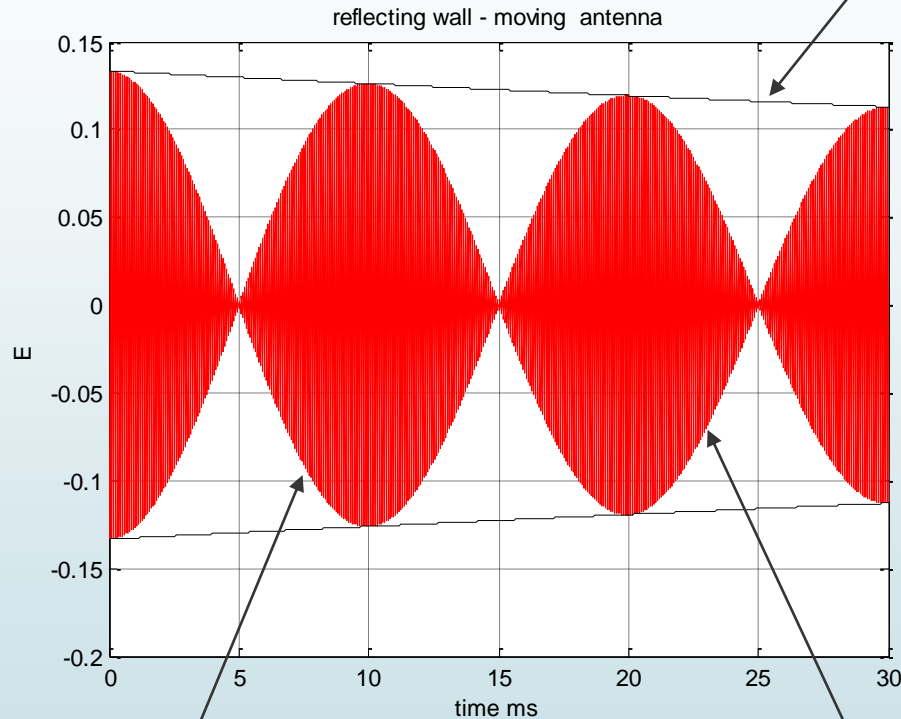
### ► Efecto Doppler

- La respuesta a una senoide, es otra senoide de igual frecuencia con una envolvente variante en el tiempo.
- La envolvente varia en función del doppler, haciendo variar la amplitud de la señal recibida.
- La atenuación con la distancia (denominador) se produce a una tasa mucho mas lenta

# EFFECTO DOPPLER vs EFFECTO

$1/r$

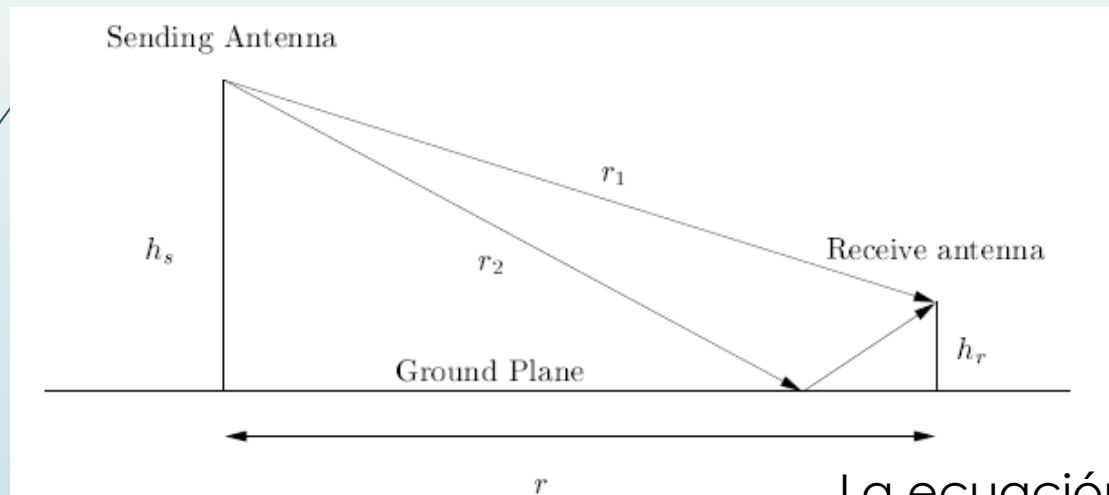
Atenuación  $1/r$



$$E_r(f, t) = \frac{\alpha \cos(2\pi f [(1 - v/c)t - r_0/c])}{r_0 + vt} - \frac{\alpha \cos(2\pi f [(1 - v/c)t - (r_0 - 2d)/c])}{2d - r_0 - vt}$$

## Ejemplo 5

- Reflexión con plano de tierra
  - La potencia recibida es inversamente proporcional a la 4ta potencia de la distancia entre antenas.

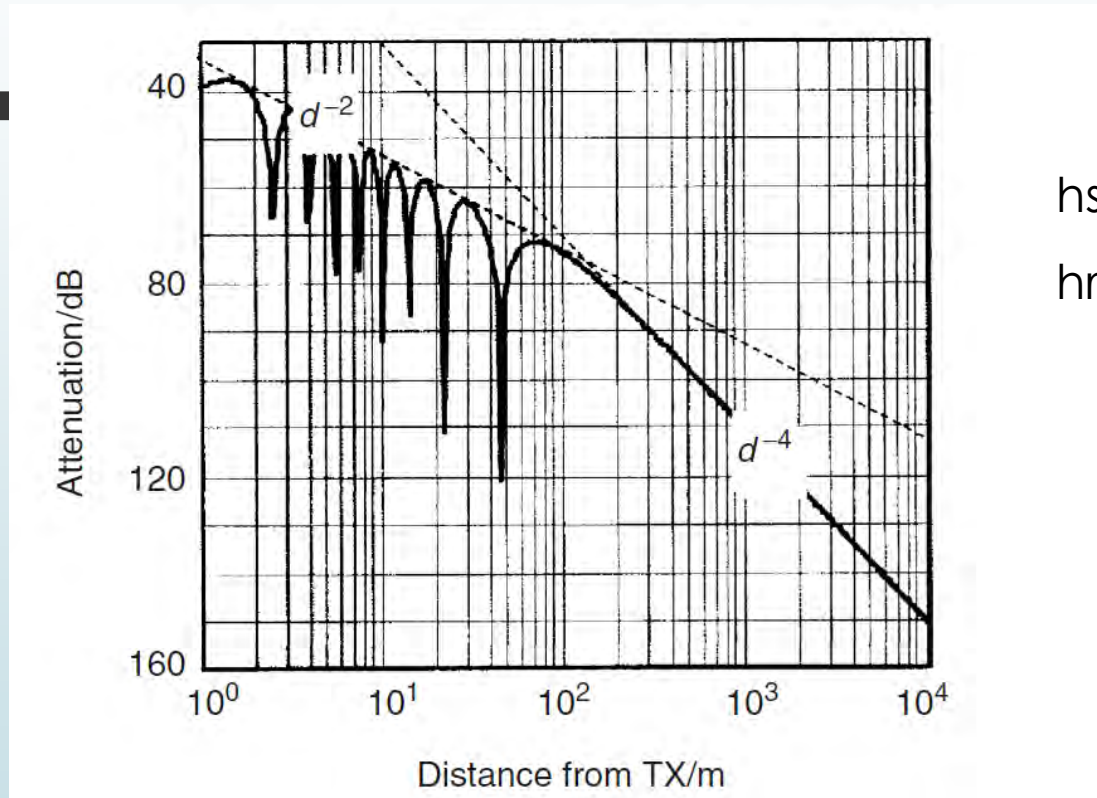


La ecuación es valida si:

$$P_{RX} \approx P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left( \frac{h_s h_r}{r^2} \right)^2$$

$$r_{break} > \frac{4h_s h_r}{\lambda}$$

# Ejemplo 5



hs=5m

hr=1.5m

# Modelo entrada/salida canal inalámbrico

- La relación entrada/salida para una frecuencia  $f$  (asumiendo que la atenuación y el retardo son independientes de  $f$ ):

$$y(t) = \sum_i a_i(t) x(t - \tau_i(t))$$

- Considerando reflexión en pared con antena móvil

$$a_1(t) = \frac{|\alpha|}{r_o + vt}$$

$$a_2(t) = \frac{|\alpha|}{2d - r_o - vt}$$

$$\tau_1(t) = \frac{r_o + vt}{c} - \frac{\angle \phi_1}{2\pi f}$$

$$\tau_2(t) = \frac{2d - r_o - vt}{c} - \frac{\angle \phi_2}{2\pi f}$$

$$\phi_1 = 0$$

$$\phi_2 = \pi$$

reflexión

# Modelo entrada/salida canal inalámbrico

- La señal recibida puede expresarse:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau, t) x(t - \tau) d\tau$$

- La respuesta impulsiva del canal será

$$h(\tau, t) = \sum_i a_i(t) \delta(t - \tau_i(t))$$

- Considerando el caso estacionario

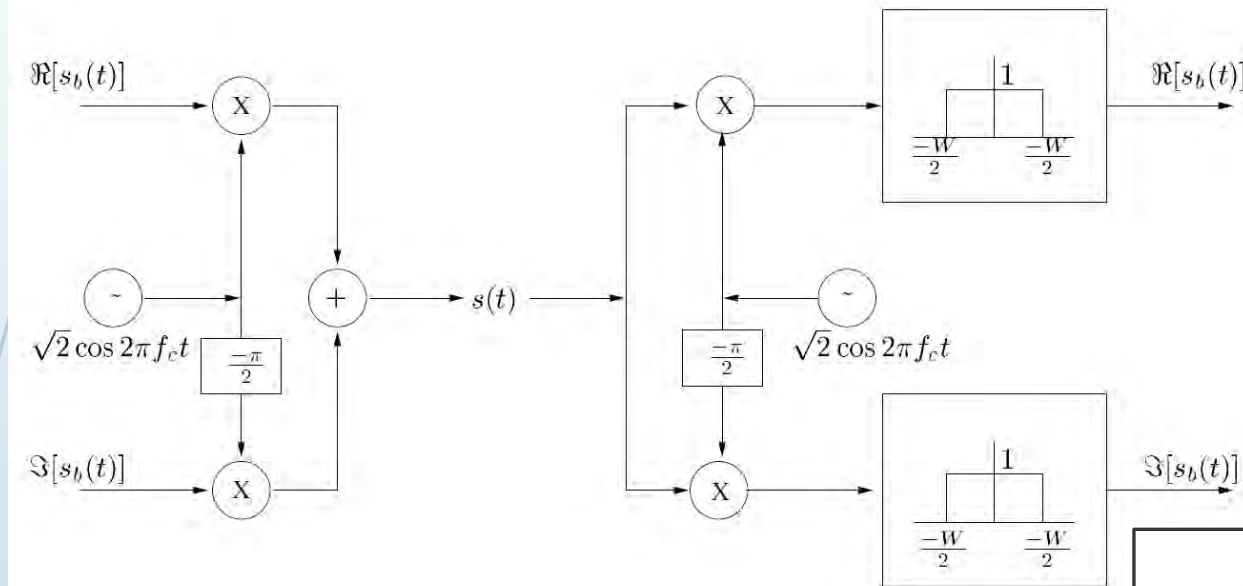
$$h(\tau) = \sum_i a_i(t) \delta(\tau - \tau_i(t))$$

- La respuesta en frecuencia (variante en el tiempo)

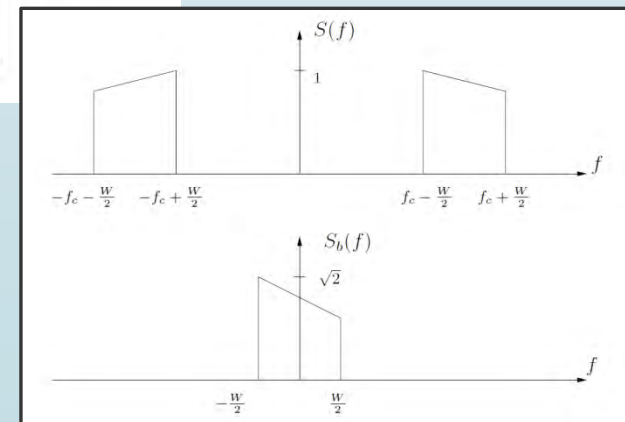
$$H(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau, t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \sum_i a_i(t) e^{-j2\pi f\tau_i(t)}$$

# Modelo equivalente banda-base

Proceso de up-conversion y down-conversion



$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ s_b(t) e^{j2\pi f_c t} + s_b^*(t) e^{j2\pi f_c t} \} = \sqrt{2} \Re [s_b(t) e^{j2\pi f_c t}]$$



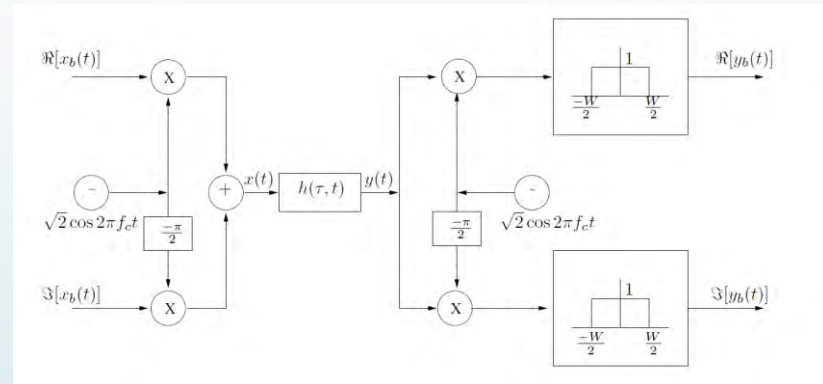


# Modelo equivalente banda-base

## ► Modulación en cuadratura QAM

## ► Equivalente banda-base

## ► Canal equivalente



$$y_b(t) = \sum_i a_i^b(t) x_b(t - \tau_i(t))$$

$$a_i^b(t) = a_i(t) e^{-j2\pi f_c \tau_i(t)}$$

$$h_b(\tau, t) = \sum_i a_i^b(t) \delta(t - \tau_i(t))$$

# Modelo banda-base discreto

- El modelo de tiempo-discreto se puede obtener a partir el teorema de muestreo

$$x_b(t) = \sum_n x[n] \text{sinc}(Wt - n)$$

$$x[n] = x_b(n/W)$$

$$\text{sinc}(Wt - n) = \frac{\sin(\pi t)}{\pi t}$$

- La salida banda-base

$$y_b(t) = \sum_n x[n] \sum_i a_i^b(t) \text{sinc}(Wt - W\tau_i - n)$$

- La salida muestreada a múltiplos  $1/W$

$$y[m] = \sum_l x[N] \sum_i a_i^b(m/W) \text{sinc}[Wt - W\tau_i - n]$$

# Modelo banda-base discreto

- La salida muestreada es una proyección de  $y_b(t)$  en la forma de onda

$$W \operatorname{sinc}(Wt - m)$$

$$y[m] = \sum_l x[m-l] \sum_i a_i^b(m/W) \operatorname{sinc}[l - W\tau_i(m/W)W]$$

$$l = m - n$$

- Definiendo

$$h_l[m] = \sum_i a_i^b(m/W) \operatorname{sinc}[l - W\tau_i(m/W)W]$$



$$y[m] = \sum_l h_l[m] x[m-l]$$

Coeficiente  $l$  del canal (complejo)

$$a_i^b(t)$$

El valor de cada coeficiente es función de las ganancias de cada camino cuyos retardos están cercanos a  $l/W$

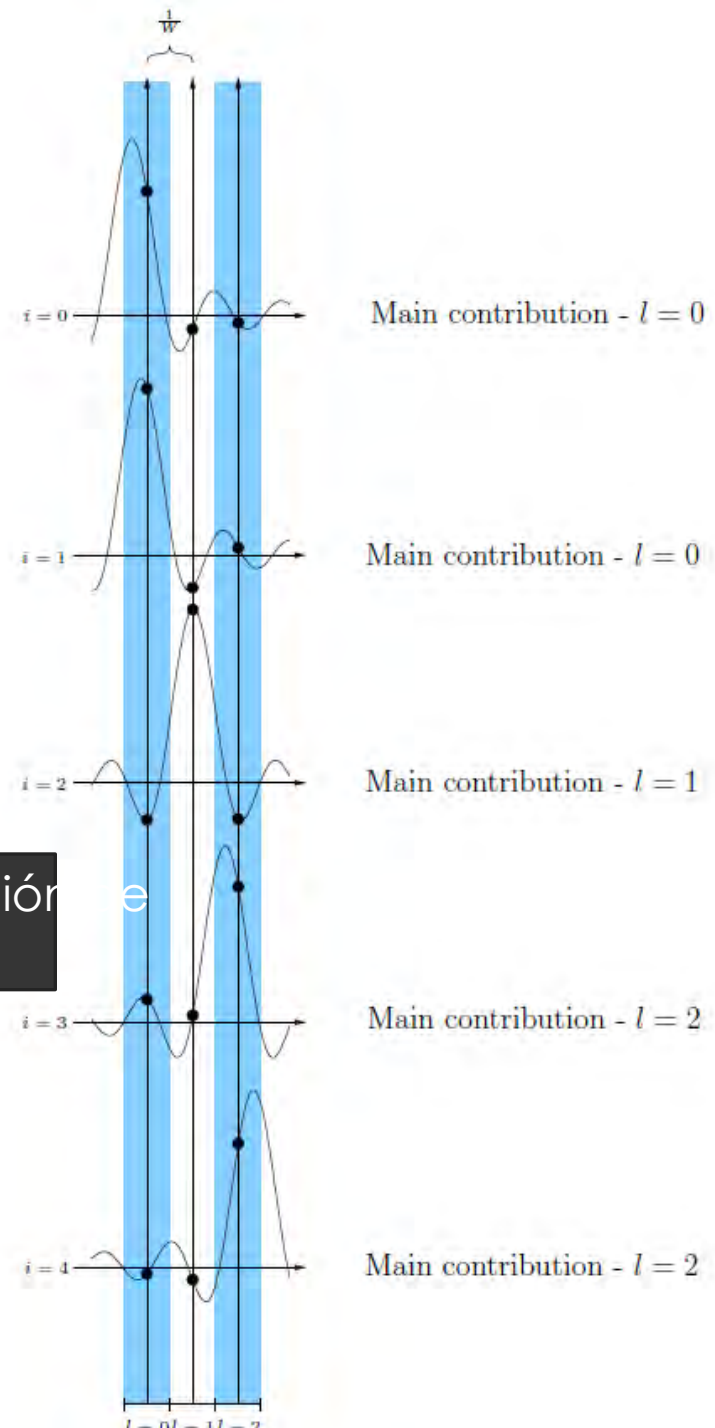
- En el caso de un canal invariante en tiempo

$$h_l = \sum_i a_i^b \operatorname{sinc}[l - W\tau_i W]$$

# Modelo banda -base discreto

$$h_l[m] = \sum_i a_i^b(m/W) \text{sinc}[l - W\tau_i(m/W)W]$$

Cada camino discreto es la combinación de  
Multiples caminos “reales” !!!



# Parámetros importantes

- Doppler spread

$$D_s = \max_{i,j} f_c |\dot{\tau}_i(t) - \dot{\tau}_j(t)|$$

- Tiempo de coherencia: se define como el intervalo de tiempo sobre el cual la respuesta del canal se mantiene invariante

$$T_c = \frac{1}{4D_s}$$

- Delay spread

$$T_d = \max_{i,j} |\tau_i(t) - \tau_j(t)|$$

# Parámetros importantes

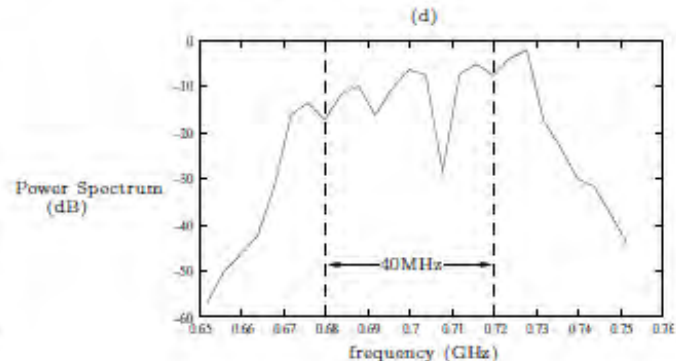
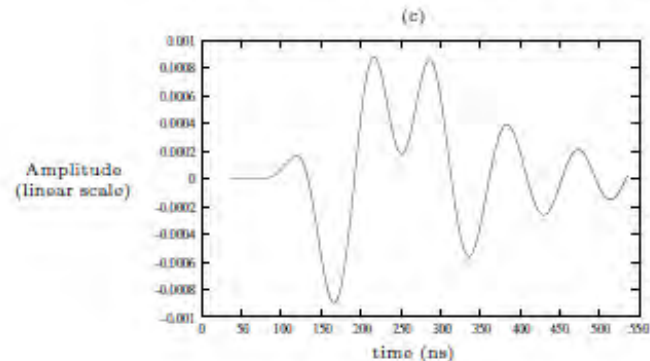
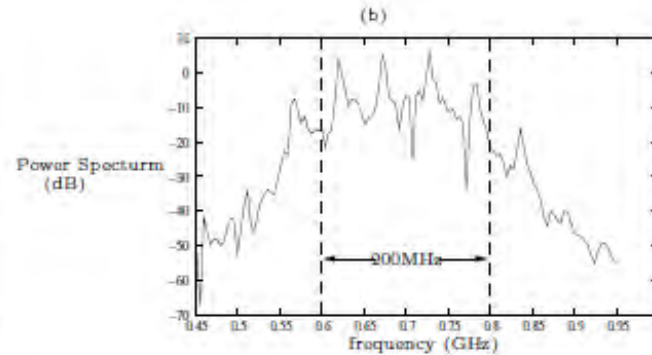
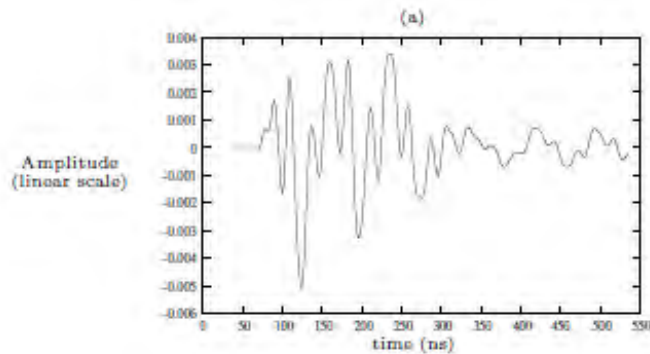
## ► Ancho de banda de coherencia

- Describe cuan rápido cambia el canal con la frecuencia

$$W_c = \frac{1}{4T_d}$$

**Este parámetro será clave en el diseño del sistema de comunicaciones.**

# Parámetros importantes



# Clasificación

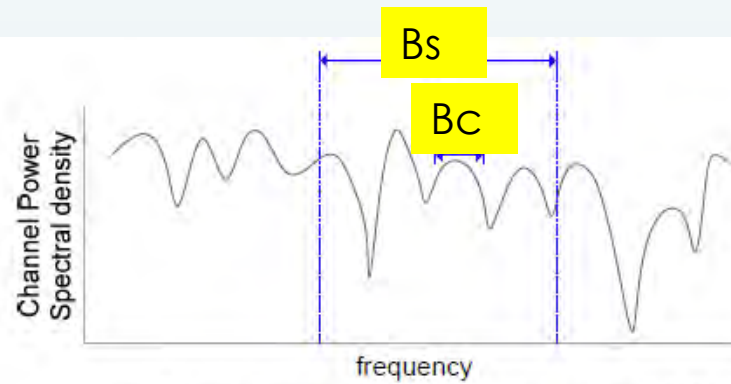
- Dependiendo de la relación con el periodo de señalización  $T_s$  y el ancho de banda de transmisión  $B_s$  se pueden clasificar los canales

|             | $B_c > B_s$                    | $B_c < B_s$                         |
|-------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| $T_c > T_s$ | Frequency non-selective fading | Frequency-selective fading          |
| $T_c < T_s$ | Time-selective fading          | Frequency and time selective fading |

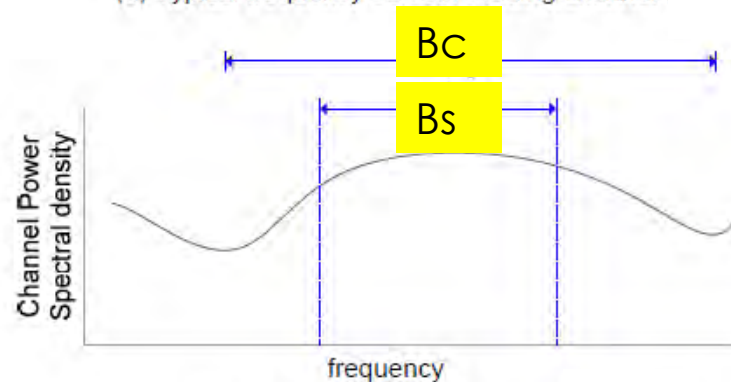


# Selectividad en frecuencia

- Canal selectivo o no selectivo en frecuencia ?



(a) Typical frequency-selective fading channel



(b) Typical flat fading channel

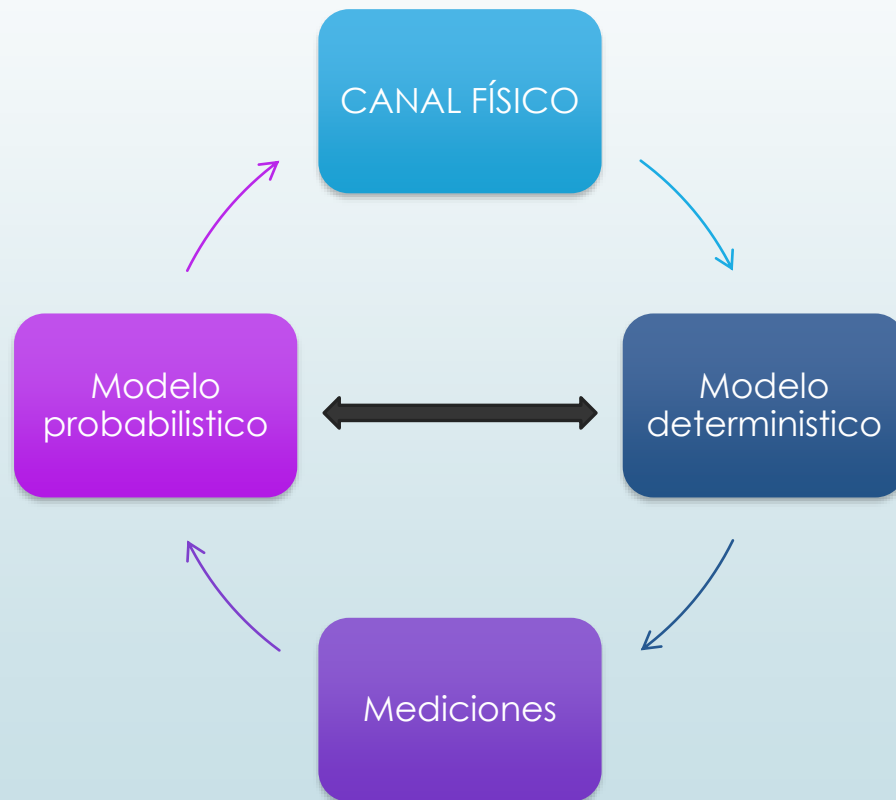
# Algunos valores

## ► Para aplicaciones de WiMAX (movil)

**Table 3.2** Some Typical RMS Delay Spread and Approximate Coherence Bandwidths for Various WiMAX Applications

| Environment | $f_c$ (GHz) | RMS Delay<br>$\tau_{RMS}$ (ns) | Coherence Bandwidth<br>$B_c \approx \frac{1}{5\tau_{RMS}}$ (MHz) | Reference |
|-------------|-------------|--------------------------------|--|-----------|
| Urban       | 9.1         | 1,300                          | 0.15   | [22]      |
| Rural       | 9.1         | 1,960                          | 0.1  | [22]      |
| Indoor      | 9.1         | 270                            | 0.7  | [22]      |
| Urban       | 5.3         | 44                             | 4.5  | [36]      |
| Rural       | 5.3         | 66                             | 3.0  | [36]      |
| Indoor      | 5.3         | 12.4                           | 16.1   | [36]      |

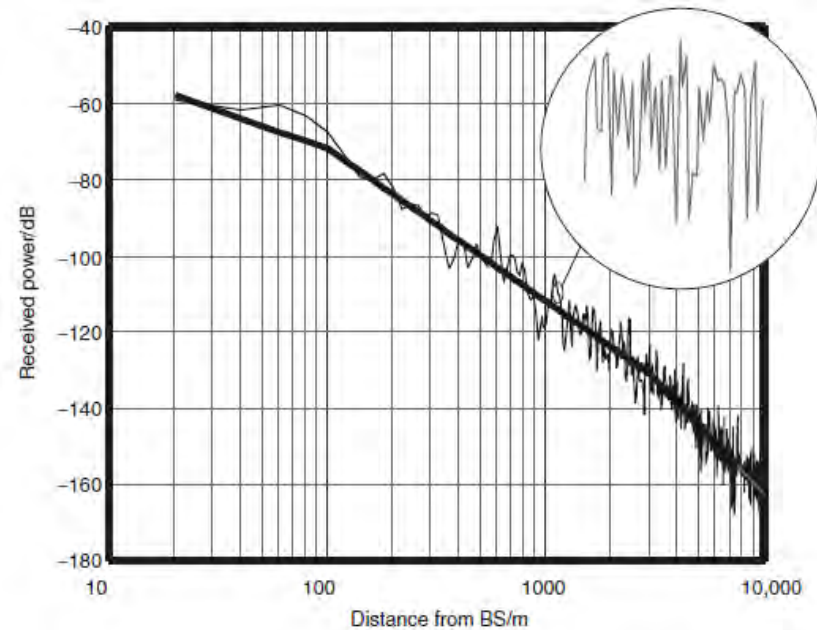
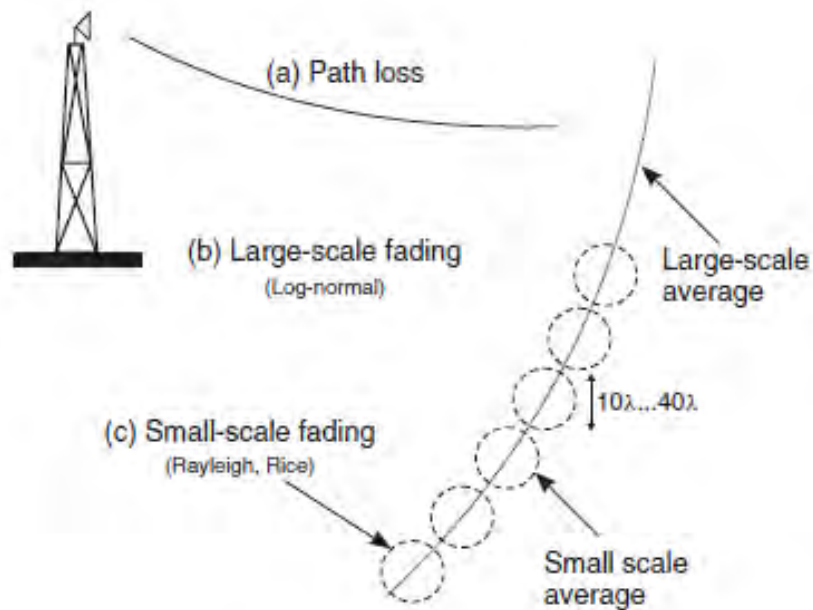
# Modelos de canal



# Modelos estadísticos

- Generalmente es muy dificultoso estudiar la propagación de las ondas utilizando los modelos físicos de propagación estudiados previamente.
- Los modelos físicos solo pueden utilizarse para un escenario en particular, y debe ser reformulado cuando existen cambios.
- Una alternativa es utilizar una aproximación estadística del canal que se ajusta empíricamente a un grupo de mediciones.
- Diferentes ambientes son evaluados: urbano, suburbano y rural.

# Modelos estadísticos



# Modelos estadísticos

- Nuestro objetivo es obtener un modelo probabilístico para modelar los coeficientes de canal.

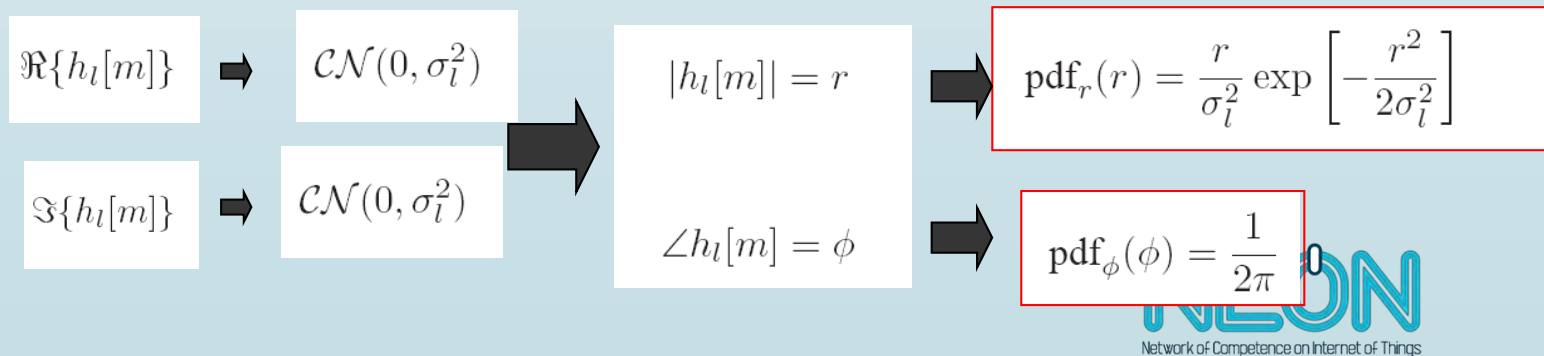
$$h_l[m] = \sum_i a_i^b(m/W) \text{sinc}[l - W\tau_i(m/W)W]$$

- El modelo mas simple se obtiene asumiendo que existe un gran número de ondas incidentes y reflejadas con amplitud aleatoria estadísticamente independientes que contribuyen en cada coeficiente de canal.
- Cada coeficiente  $h_l[m]$  es la suma de un gran número de variables aleatorias circulares simétricas independientes.
- $\Re\{h_l[m]\}$  es la suma de un gran número de variables aleatorias reales independientes → Teorema del limite central → variable aleatoria Gaussiana con media cero. →  $\mathcal{CN}(0, \sigma_l^2)$
- Ídem para la parte imaginaria

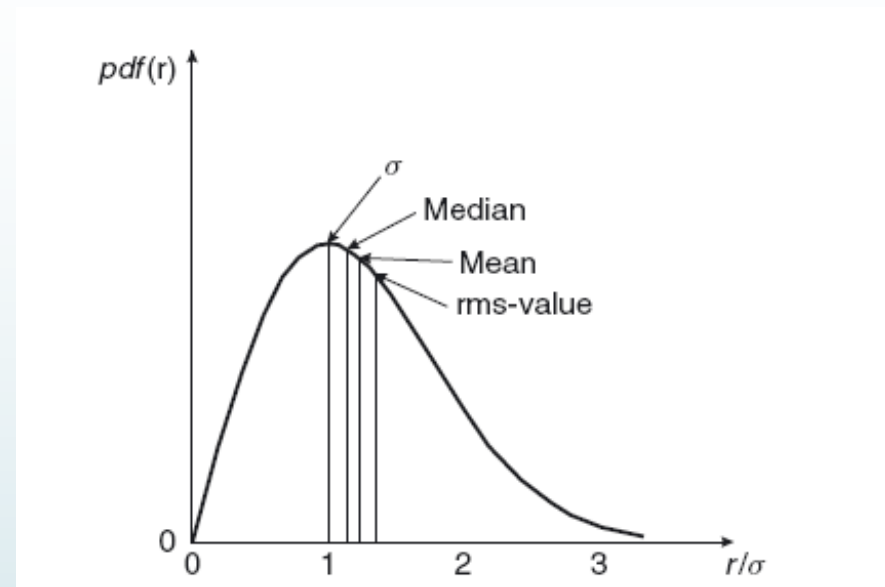
$$\Im\{h_l[m]\} \Rightarrow \mathcal{CN}(0, \sigma_l^2)$$

# Modelos estadísticos-Rayleigh

- Distribución Rayleigh :
  - Considerando números complejos con componentes real e imaginaria independientes y siguiendo una distribución Gaussiana. Su valor absoluto sigue una distribución de Rayleigh y su fase una distribución uniforme.



## ► Distribución Rayleigh



- La función distribución acumulada,  $cdf(x)$  define la probabilidad de que una realización de la variable aleatoria tenga un valor menor a  $x$

$$cdf(r) = \int_{-\infty}^r pdf(u) du = 1 - \exp \left[ -\frac{r^2}{2\sigma_l^2} \right]$$

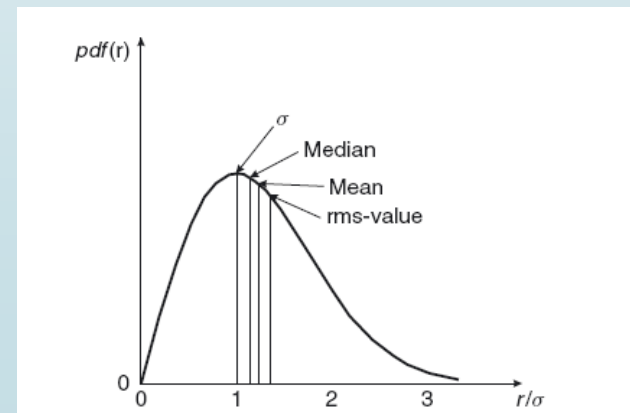


# Modelos estadísticos-Rayleigh

## ► Distribución de Rayleigh

- Es una muy buena aproximación para una gran variedad de escenarios “reales”.
- Describe el escenario de “peor caso” (no existe una componente dominante) → permite diseñar sistemas robustos
- Depende de un solo parámetro, la potencia media recibida.
- Tratable matemáticamente

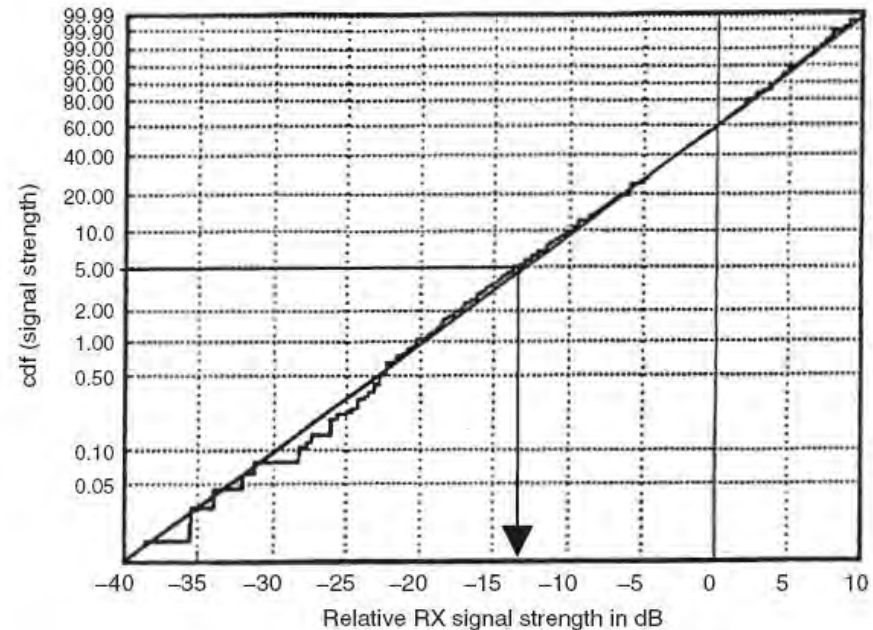
|                     |   |
|---------------------|---|
| Mean value          | $\bar{r} = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}}$   |
| Mean square value   | $\overline{r^2} = 2\sigma^2$  |
| Variance            | $\overline{r^2} - (\bar{r})^2 = 2\sigma^2 - \sigma^2 \frac{\pi}{2} = 0.429\sigma^2$ |
| Median value        | $r_{50} = \sigma \sqrt{2 \cdot \ln 2} = 1.18\sigma$                                 |
| Location of maximum | $\max\{pdf(r)\}$ occurs at $r = \sigma$   |



# Modelos estadísticos-Rayleigh

Indoor NLOS

- Signal strength



El nivel de señal excede un valor mínimo en un determinado porcentaje de situaciones.

- Si un nivel de señal mínimo es requerido para una adecuada comunicación.

¿Cuál debe ser la potencia mínima transmitida para asegurar un comunicación satisfactoria en un x% de situaciones?

# Modelos estadísticos-Rayleigh

¿Cuál debe ser la potencia mínima transmitida para asegurar un comunicación satisfactoria en un x % de situaciones?

Para valores pequeños de r

Mean value  $\bar{r} = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}}$

Mean square value  $\overline{r^2} = 2\sigma^2$

Variance  $\overline{r^2} - (\bar{r})^2 = 2\sigma^2 - \sigma^2 \frac{\pi}{2} = 0.429\sigma^2$

Median value  $r_{50} = \sigma \sqrt{2 \cdot \ln 2} = 1.18\sigma$

Location of maximum  $\max\{pdf(r)\}$  occurs at  $r = \sigma$

$$cdf(r) = \int_{-\infty}^r pdf(u) du = 1 - \exp \left[ -\frac{r^2}{2\sigma_l^2} \right]$$

$$\Rightarrow cdf(r) \approx \frac{r^2}{2\sigma_l^2}$$

$$x = cdf(r_{min}) \approx \frac{r_{min}^2}{2\sigma_l^2} \Rightarrow 2\sigma_l^2 \approx \frac{r_{min}^2}{x}$$

¿Cuál es la probabilidad de que la señal este a) 20 dB, b) 6dB y d) 3dB debajo de la potencia media?

20 dB



$$1 - \exp \left[ -\frac{1}{100} \right] = 9.95e - 3$$

6 dB



$$1 - \exp \left[ -\frac{1}{4} \right] = 0.221$$

3 dB



$$1 - \exp \left[ -\frac{1}{2} \right] = 0.393$$

Ec. aproximada

$$\frac{r_{min}^2}{2\sigma_l^2} = \frac{1}{100}$$

$$\frac{r_{min}^2}{2\sigma_l^2} = \frac{1}{4}$$

$$\frac{r_{min}^2}{2\sigma_l^2} = \frac{1}{2}$$

# Modelos estadísticos-Rayleigh

- Fading con una componente dominante (LOS)
  - En el caso de que exista una componente dominante (línea de vista) y por otro lado un grupo de caminos independientes, los coeficientes del canal pueden ser modelados:

$$h_l[m] = \sqrt{\frac{K}{K+1}} \sigma_l e^{j\phi} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \mathcal{CN}(0, \sigma_l^2)$$

Componente LOS  
(line-of-sight)  
(determinístico)

Componente NLOS

K define la relación de energía entre el camino especular (LOS) y la energía los caminos con scattering.

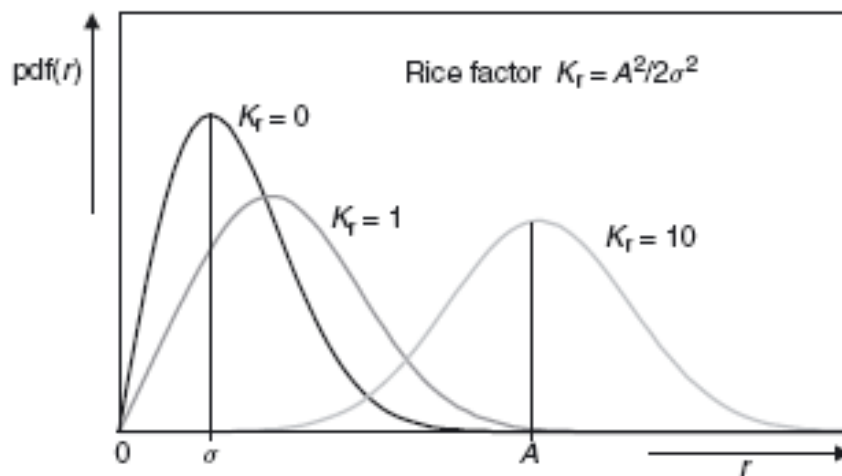
# Modelos estadísticos-RICE

- En los canales con línea de vista, la magnitud del coeficiente de canal sigue una distribución Rice

$$\text{pdf}_r(r) = \frac{r}{\sigma_l^2} \exp \left[ -\frac{r^2 + A^2}{2\sigma_l^2} \right] I_0 \left( \frac{rA}{\sigma_l^2} \right)$$

Valor cuadrático medio

$$\bar{r}^2 = 2\sigma_l^2 + A^2$$

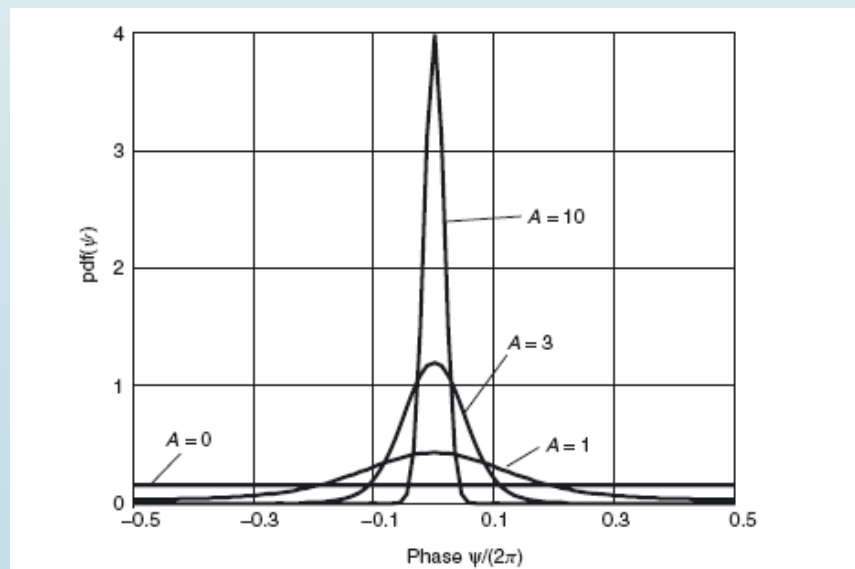


A mayor  $K$ , menor es la probabilidad de ocurrencia de mínimos (deep fading).

$K \rightarrow 0 \rightarrow \text{Rayleigh}$

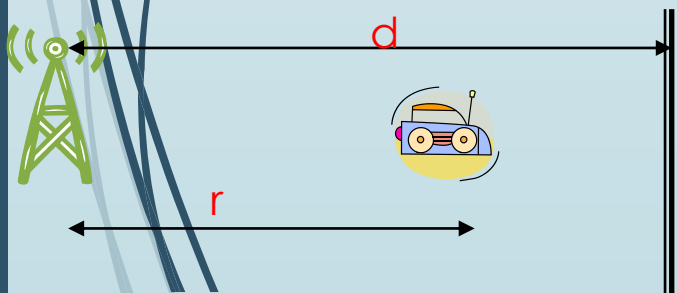
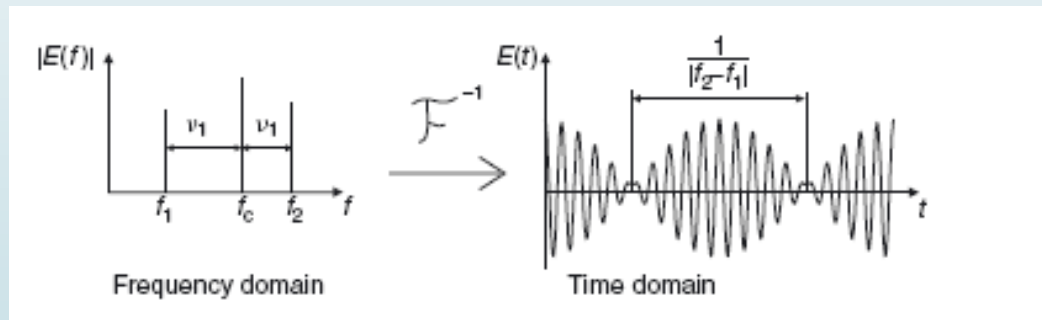
# Canal RICE

- La presencia de una componente dominante también afecta la distribución de fase.
  - Para una componente de LOS muy dominante, la fase de la resultante se aproxima a la fase de la dominante → la distribución converge a una distribución delta.
  - Para una LOS de bajo nivel, la fase resultante se aproxima a la distribución uniforme.



# Espectro de Doppler

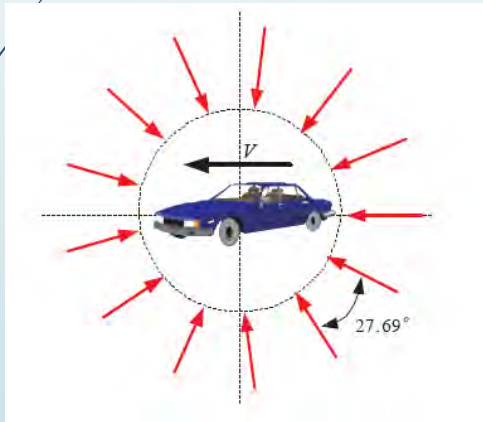
- Como ya conocemos, si una estación móvil se desplaza, cada componente multicamino llegará a la antena con diferentes desplazamientos de frecuencia (efecto Doppler) → el espectro recibido es ensanchado (broadening).



¿Cómo es el espectro recibido?

# Espectro de Doppler

- Considerando un escenario donde una antena omni-direccional recibe una gran cantidad de contribuciones multicamino en el plano horizontal proveniente de scatters uniformemente distribuidos (modelo de Clarke)



La función de autocorrelacion se puede calcular→

$$R[n] = \sigma_l^2 J_0(n\pi D_s/W)$$



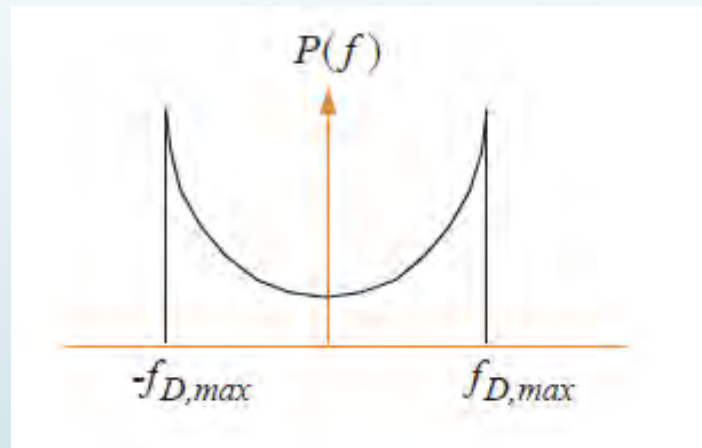
$$S(f) = \frac{2\sigma_l^2}{D_s \sqrt{1 - (2f/D_s)^2}}$$



# Espectro de Doppler

## ■ Espectro de “Jakes”

$$S(f) = \frac{2\sigma_l^2}{D_s \sqrt{1 - (2f/D_s)^2}}$$



- Describe la dispersion de frecuencia del canal
- Es una medida de la variabilidad temporal del canal

# Clasificación

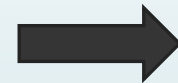
- Dependiendo de la relación con el periodo de señalización  $T_s$  y el ancho de banda de transmisión  $B_s$  se pueden clasificar los canales

|             | $B_c > B_s$                    | $B_c < B_s$                         |
|-------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| $T_c > T_s$ | Frequency non-selective fading | Frequency-selective fading          |
| $T_c < T_s$ | Time-selective fading          | Frequency and time selective fading |

# Canal no-selectivo en frecuencia con desvanecimiento lento

- En muchas aplicaciones, el tiempo de coherencia del canal es mucho mayor que la duración del símbolo → El canal puede ser considerado invariante sobre un intervalo de símbolos.

$$h(\tau, t) = \sum_i a_i(t) \delta(t - \tau_i(t))$$



$$h(\tau) = \sum_i a_i(t) \delta(\tau - \tau_i(t))$$

$$\rho e^{j\phi} = \sum_l^{N_p} \rho_l e^{j\theta_l}$$

Si el delay de cada path es mucho menor que la duración del símbolo →  $\tau_i \approx 0$

$$h(\tau) = \rho e^{j\phi} \delta(\tau)$$

Es la suma de N<sub>p</sub> estadísticamente independientes contribuciones

$$H(f) = \rho e^{j\phi}$$

El canal es plano en frecuencia

Distribución Rayleigh (NLOS) o Rice (LOS)

## Canal selectivo en frecuencia

- Asumimos un canal slow-fading.
- Si la señal transmitida tiene un ancho de banda  $B_s > B_c \rightarrow$  sus diferentes componentes espectrales serán afectadas por diferentes niveles de atenuación.
- En dominio temporal  $\rightarrow T_s < T_d$  (delay spread)

$$W_c = \frac{1}{4T_d}$$

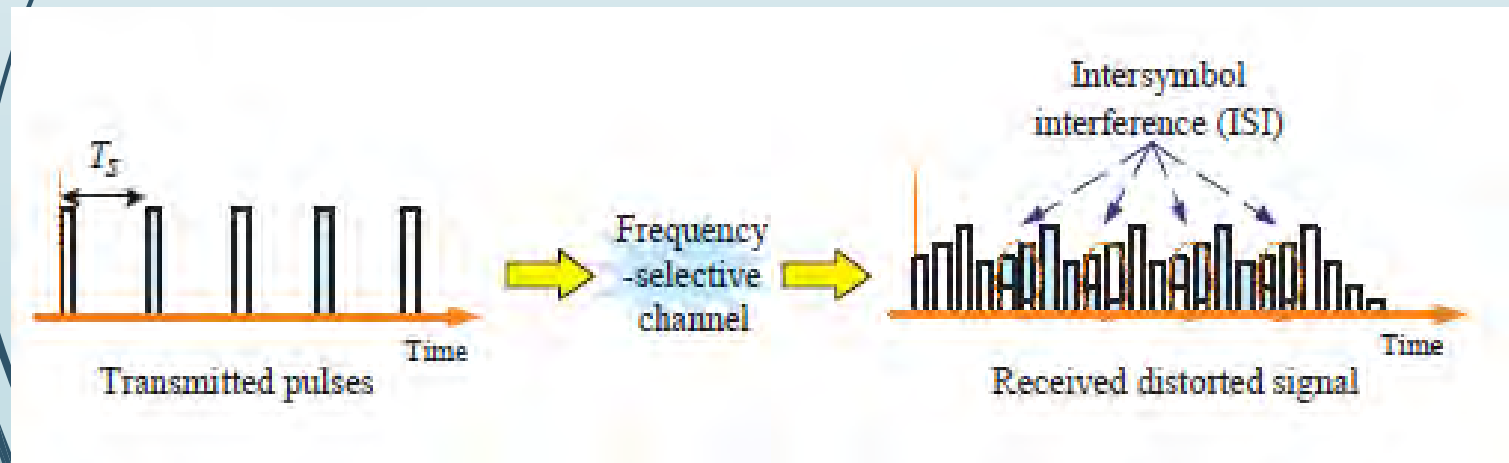
$$T_d = \max_{i,j} |\tau_i(t) - \tau_j(t)|$$

$$T_s < T_d$$

53

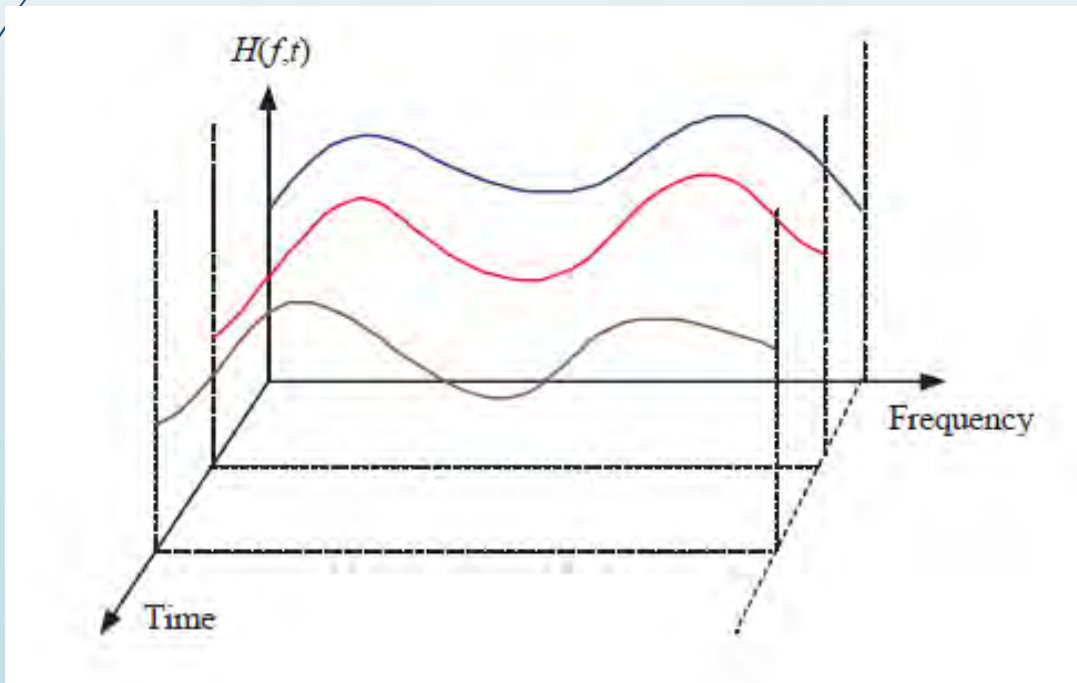
## CANAL SELECTIVO EN FRECUENCIA

- Si un tren de pulsos separados  $T_s$  segundos es transmitido por un canal selectivo en frecuencia, si  $T_s < T_d$ , cada pulso recibido se solapará con los pulsos vecinos → **INTERFERENCIA INTERSIMBOLO (ISI)**



# Canal selectivo en frecuencia

- Respuesta en frecuencia de un canal selectivo en frecuencia con slowly-fading

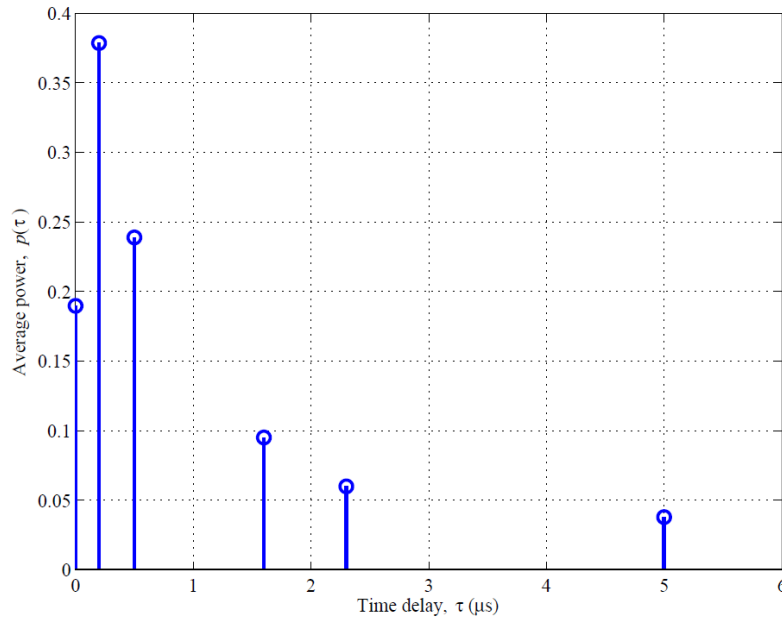


# Modelos de canales

Algunos ejemplos

# Modelo Tapped delay

- Es el modelo mas utilizado y mas sencillo para modelar un canal



$$h(\tau, t) = \sum_i^N c_i(t) \delta(t - \tau_i)$$

Número de taps

Coeficiente de cada tap

Retardo de cada tap



# Modelo Tapped delay

- Power delay profile (PDP)
- Es un parámetro estadístico que indica como la potencia de un pulso de Dirac es dispersada en el dominio tiempo como consecuencia de la propagación multicamino

$$p(\tau_i) = E\{|c_i(t)|^2\}$$

Potencia promedio del camino  $i$

$$\sum_i^N p(\tau_i) = 1$$

Potencia total recibida (normalizada)

$$p_h(\tau) = \exp(-\tau/S_\tau) \quad \forall \tau \geq 0$$

Delay spread

La potencia de cada path puede aproximarse utilizando una función exponencial

# Modelo tap delay

- PDP con decaimiento exponencial

$$p_h(\tau) = \exp(-\tau/S_\tau) \quad \forall \tau \geq 0$$

El delay spread es función de los diferentes escenarios:

- Indoor (hogar): 5-10ns
- Indoor (oficinas): 10-100ns
- Fábricas y halls de aeropuertos: 50-200ns
- Urbano y suburbano típicos (UT): 100-800ns
- Bad urban (BU) and hilly terrain (HT): 10-100us

# Canales estandarizados

- Modelo COST 207
  - Typical Urban (TU)
  - Bad urban (BU)
  - Rural area (RA)
  - Hilly terrain (HT)
- Modelo ITU
  - Pedestrian
  - Vehicular
  - Indoor

# Canales COST

60

Power delay profile (PDP)

Typical Urban area (TU)

$$P_h(\tau) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\tau}{\mu s}\right) & \text{for } 0 < \tau < 7\mu s \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}.$$

Rural Area (RA)

$$P_h(\tau) = \begin{cases} \exp\left(-9.2\frac{\tau}{\mu s}\right) & \text{for } 0 < \tau < 0.7\mu s \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}.$$

Bad Urban area (BU)

$$P_h(\tau) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\tau}{\mu s}\right) & \text{for } 0 < \tau < 5\mu s \\ 0.5 \exp\left(5 - \frac{\tau}{\mu s}\right) & \text{for } 5 < \tau < 10\mu s \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}.$$

Hilly Terrain (HT)

$$P_h(\tau) = \begin{cases} \exp\left(-3.5\frac{\tau}{\mu s}\right) & \text{for } 0 < \tau < 2\mu s \\ 0.1 \exp\left(15 - \frac{\tau}{\mu s}\right) & \text{for } 15 < \tau < 20\mu s \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}.$$

# Canales COST

- Cada coeficiente  $i$  de canal tiene un espectro de doppler

$$P_s(\nu, \tau_i)$$

- Tipos de Doppler

- a) *CLASS* is the classical (Jakes) Doppler spectrum and is used for paths with delays not in excess of 500 ns ( $\tau_i \leq 0.5 \mu\text{s}$ ):

$$P_s(\nu, \tau_i) = \frac{A}{\sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{\nu_{\max}}\right)^2}} \quad (7.40)$$

for  $\nu \in [-\nu_{\max}, \nu_{\max}]$ ;

- b) *GAUS1* is the sum of two Gaussian functions and is used for excess delay times in the range of 500 ns to 2  $\mu\text{s}$  ( $0.5 \mu\text{s} \leq \tau_i \leq 2 \mu\text{s}$ ):

$$P_s(\nu, \tau_i) = G(A, -0.8\nu_{\max}, 0.05\nu_{\max}) + G(A_1, 0.4\nu_{\max}, 0.1\nu_{\max}) \quad (7.41)$$

where  $A_1$  is 10 dB smaller than  $A$ ;

# Canales COST

- c) *GAUS2* is also the sum of two Gaussian functions and is used for paths with delays in excess of  $2 \mu\text{s}$  ( $\tau_i \geq 2 \mu\text{s}$ ):

$$P_s(\nu, \tau_i) = G(B, 0.7\nu_{\max}, 0.1\nu_{\max}) + G(B_1, -0.4\nu_{\max}, 0.15\nu_{\max}) \quad (7.42)$$

where  $B_1$  is 15 dB smaller than  $B$ ;

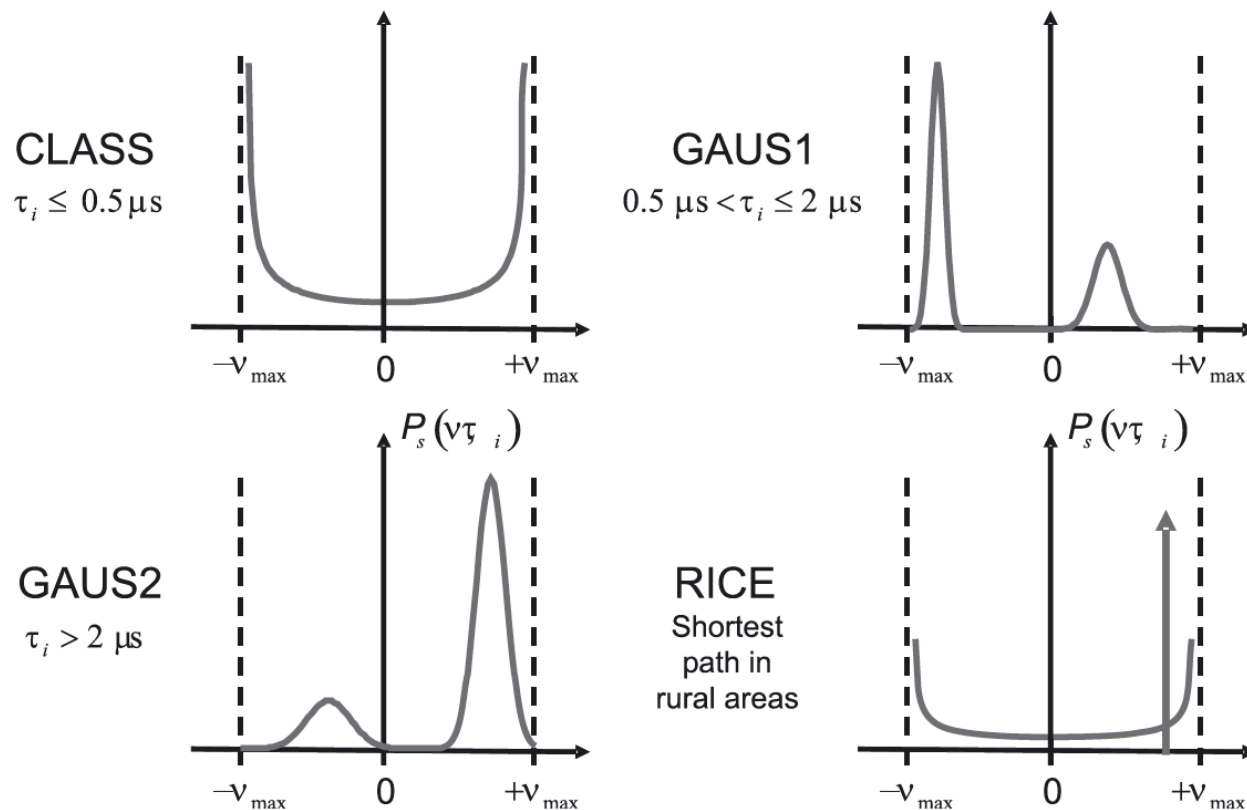
- d) *RICE* is the sum of a classical Doppler spectrum and one direct path, such that the total multipath contribution is equal to that of the direct path. This spectrum is used for the shortest path of the model for propagation in rural areas:

$$P_s(\nu, \tau_i) = \frac{0.41}{2\pi\nu_{\max}\sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{\nu_{\max}}\right)^2}} + 0.91\delta(\nu - 0.7\nu_{\max}) \quad (7.43)$$

for  $\nu \in [-\nu_{\max}, \nu_{\max}]$ ;

# Canales COST

Modelos usados en 2G



**Figure 7.16** Doppler spectra used in GSM channel models.

# Canales COST

**Table 7.3** Parameters for rural (non-hilly) area (RA)

| Tap# | Delay [ $\mu s$ ] | Power [dB] | Doppler category |
|------|-------------------|------------|------------------|
| 1    | 0                 | 0          | RICE             |
| 2    | 0.2               | -2         | CLASS            |
| 3    | 0.4               | -10        | CLASS            |
| 4    | 0.6               | -20        | CLASS            |

**Table 7.4** Parameters for urban (non-hilly) area (TU)

| Tap# | Delay [ $\mu s$ ] | Power [dB] | Doppler category |
|------|-------------------|------------|------------------|
| 1    | 0                 | -3         | CLASS            |
| 2    | 0.2               | 0          | CLASS            |
| 3    | 0.6               | -2         | GAUS1            |
| 4    | 1.6               | -6         | GAUS1            |
| 5    | 2.4               | -8         | GAUS2            |
| 6    | 5.0               | -10        | GAUS2            |

**Table 7.5** Parameters for hilly urban area (BU)

| Tap# | Delay [ $\mu s$ ] | Power [dB] | Doppler category |
|------|-------------------|------------|------------------|
| 1    | 0                 | -3         | CLASS            |
| 2    | 0.4               | 0          | CLASS            |
| 3    | 1.0               | -3         | GAUS1            |
| 4    | 1.6               | -5         | GAUS1            |
| 5    | 5.0               | -2         | GAUS2            |
| 6    | 6.6               | -4         | GAUS2            |

**Table 7.6** Parameters for hilly terrain (HT)

| Tap# | Delay [ $\mu s$ ] | Power [dB] | Doppler category |
|------|-------------------|------------|------------------|
| 1    | 0                 | 0          | CLASS            |
| 2    | 0.2               | -2         | CLASS            |
| 3    | 0.4               | -4         | CLASS            |
| 4    | 0.6               | -7         | CLASS            |
| 5    | 15                | -6         | GAUS2            |
| 6    | 17.2              | -12        | GAUS2            |



# Canales ITU

Canal A: low delay spread

**Table 7.7** Tapped-delay-line implementation of ITU-R models.

| Tap No.           | delay/ns               | power/dB | delay/ns               | power/dB |
|-------------------|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>INDOOR</b>     | <b>CHANNEL A (50%)</b> |          | <b>CHANNEL B (45%)</b> |          |
| 1                 | 0                      | 0        | 0                      | 0        |
| 2                 | 50                     | -3       | 100                    | -3.6     |
| 3                 | 110                    | -10      | 200                    | -7.2     |
| 4                 | 170                    | -18      | 300                    | -10.8    |
| 5                 | 290                    | -26      | 500                    | -18.0    |
| 6                 | 310                    | -32      | 700                    | -25.2    |
| <b>PEDESTRIAN</b> | <b>CHANNEL A (40%)</b> |          | <b>CHANNEL B (55%)</b> |          |
| 1                 | 0                      | 0        | 0                      | 0        |
| 2                 | 110                    | -9.7     | 200                    | -0.9     |
| 3                 | 190                    | -19.2    | 800                    | -4.9     |
| 4                 | 410                    | -22.8    | 1200                   | -8.0     |
| 5                 |                        |          | 2300                   | -7.8     |
| 6                 |                        |          | 3700                   | -23.9    |
| <b>VEHICULAR</b>  | <b>CHANNEL A (40%)</b> |          | <b>CHANNEL B (55%)</b> |          |
| 1                 | 0                      | 0        | 0                      | -2.5     |
| 2                 | 310                    | -1       | 300                    | 0        |
| 3                 | 710                    | -9       | 8900                   | -12.8    |
| 4                 | 1090                   | -10      | 12900                  | -10.0    |
| 5                 | 1730                   | -15      | 17100                  | -25.2    |
| 6                 | 2510                   | -20      | 20000                  | -16.0    |

Doppler  
Jakes

# Canales LTE

| Path number | Extended Pedestrian A<br>(EPA) |       | Extended Vehicular A<br>(EVA) |       | Extended Typical Urban<br>(ETU) |       |
|-------------|--------------------------------|-------|-------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
|             | Delay                          | Power | Delay                         | Power | Delay                           | Power |
|             | (ns)                           | (dB)  | (ns)                          | (dB)  | (ns)                            | (dB)  |
| 1           | 0                              | 0     | 0                             | 0     | 0                               | -1    |
| 2           | 30                             | -1    | 30                            | -1.5  | 50                              | -1    |
| 3           | 70                             | -2    | 150                           | -1.4  | 120                             | -1    |
| 4           | 90                             | -3    | 310                           | -3.6  | 200                             | 0     |
| 5           | 110                            | -8    | 370                           | -0.6  | 230                             | 0     |
| 6           | 190                            | -17.2 | 710                           | -9.1  | 500                             | 0     |
| 7           | 410                            | -20.8 | 1090                          | -7    | 1600                            | -3    |
| 8           |                                |       | 1730                          | -12   | 2300                            | -5    |
| 9           |                                |       | 2510                          | -16.9 | 5000                            | -7    |

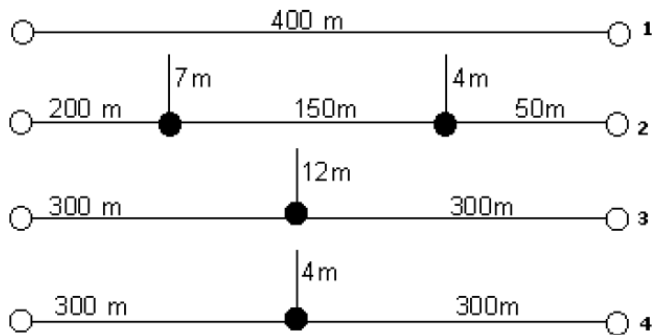
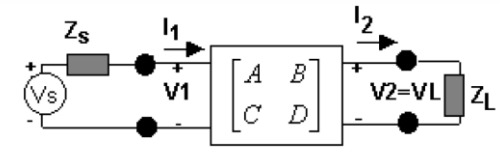
|           | Low Doppler frequency                    | Medium Doppler frequency                   | High Doppler frequency                     |
|-----------|--|--|--|
| Frequency | 5 Hz                                     | 70 Hz                                      | 300 Hz                                     |
| Velocity  | 2.7 km/h at 2 GHz<br>6.4 km/h at 850 MHz | 40.8 km/h at 2 GHz<br>88.9 km/h at 850 MHz | 162 km/h at 2 GHz<br>381.2 km/h at 850 MHz |

# Canales WIMAX

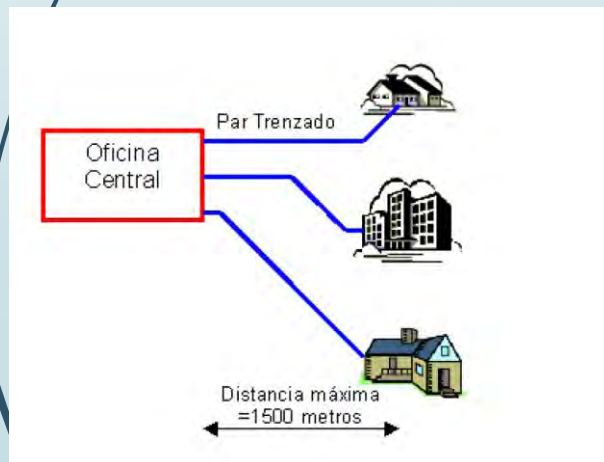
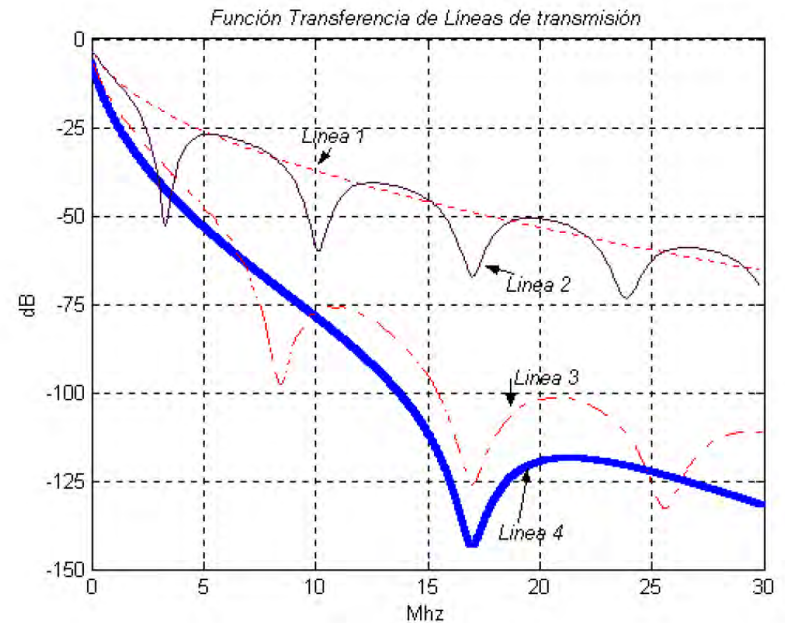
**Table 1-7** Multi-path profiles for different terrains for fixed positioned TS

| Ch. # | Area type    | Path 1           |                       | Path 2           |                       | Path 3           |                       |
|-------|--------------|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
|       |              | Delay ( $\mu$ s) | Mean attenuation (dB) | Delay ( $\mu$ s) | Mean attenuation (dB) | Delay ( $\mu$ s) | Mean attenuation (dB) |
| SUI1  | Flat         | 0                | 0                     | 0.4              | -15                   | 0.9              | -20                   |
| SUI2  | Flat         | 0                | 0                     | 0.4              | -12                   | 1.1              | -15                   |
| SUI3  | Weak hilly   | 0                | 0                     | 0.4              | -5                    | 0.9              | -10                   |
| SUI4  | Weak hilly   | 0                | 0                     | 1.5              | -4                    | 4                | -8                    |
| SUI5  | Strong hilly | 0                | 0                     | 4                | -5                    | 10               | -10                   |
| SUI6  | Strong hilly | 0                | 0                     | 14               | -10                   | 20               | -14                   |

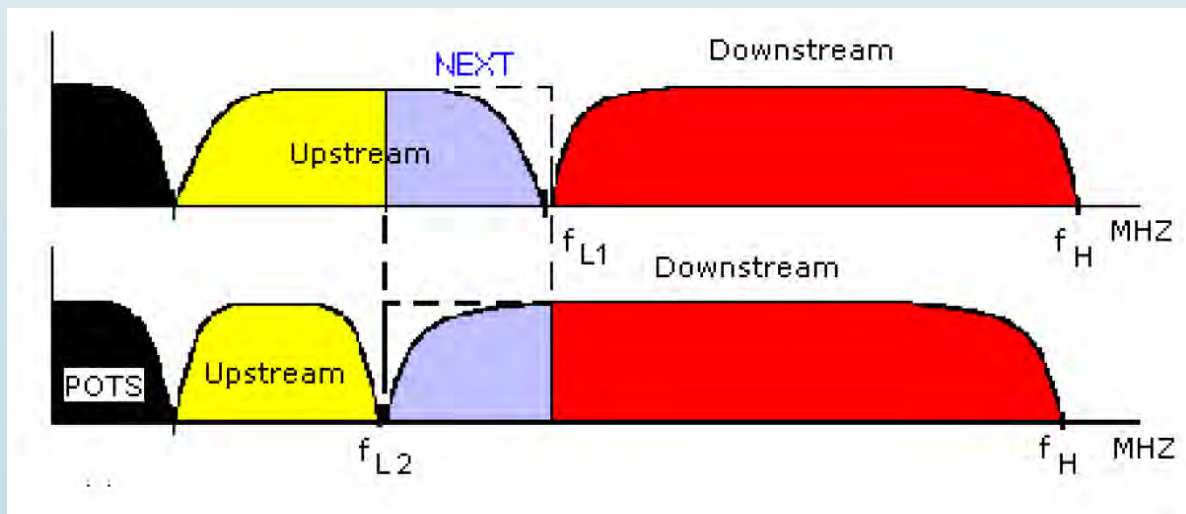
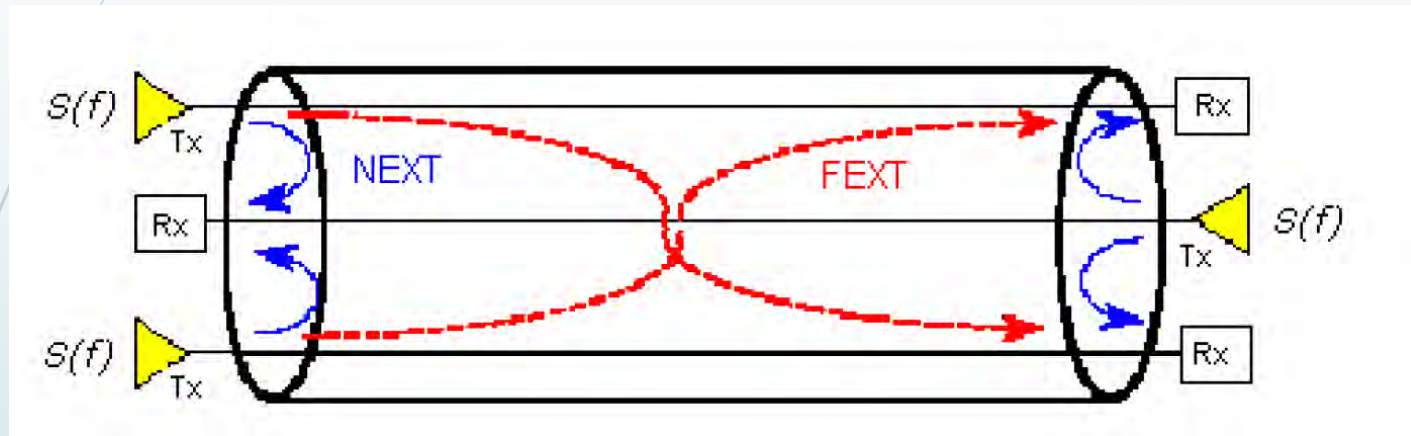
# Líneas cableadas



DS



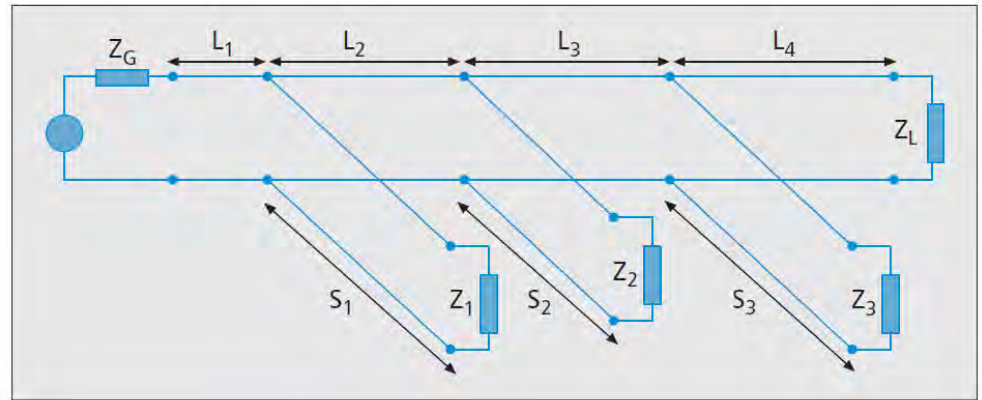
# Líneas cableadas





# Power line communication

► Canales

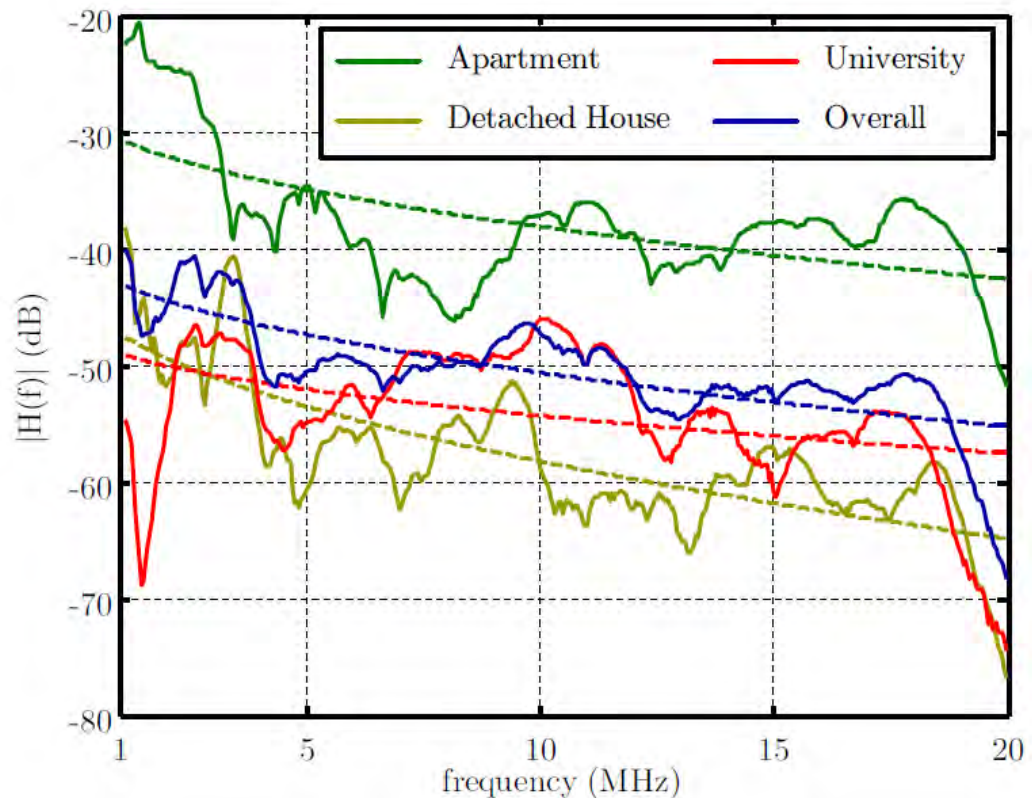


| Cable type                 | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    |
|----------------------------|------|------|------|------|------|
| section (mm <sup>2</sup> ) | 1.5  | 2.5  | 4    | 6    | 10   |
| $\epsilon_{eq}$            | 1.45 | 1.52 | 1.56 | 1.73 | 2    |
| $Z_0(\Omega)$              | 270  | 234  | 209  | 178  | 143  |
| $C(\text{pF/m})$           | 15   | 17.5 | 20   | 25   | 33   |
| $L(\mu\text{H/m})$         | 1.08 | 0.96 | 0.87 | 0.78 | 0.68 |
| $R_0$                      | 12   | 9.34 | 7.55 | 6.25 | 4.98 |
| $G_0$                      | 30.9 | 34.7 | 38.4 | 42.5 | 49.3 |

**Table 1.** Characteristics of actual indoor power network cables.  $R = R_0 \cdot 10^{-5} \sqrt{f} (\Omega/\text{m})$  and  $G = G_0 \cdot \ell \cdot 10^{-14} \cdot 2\pi f (\text{S/m})$ .

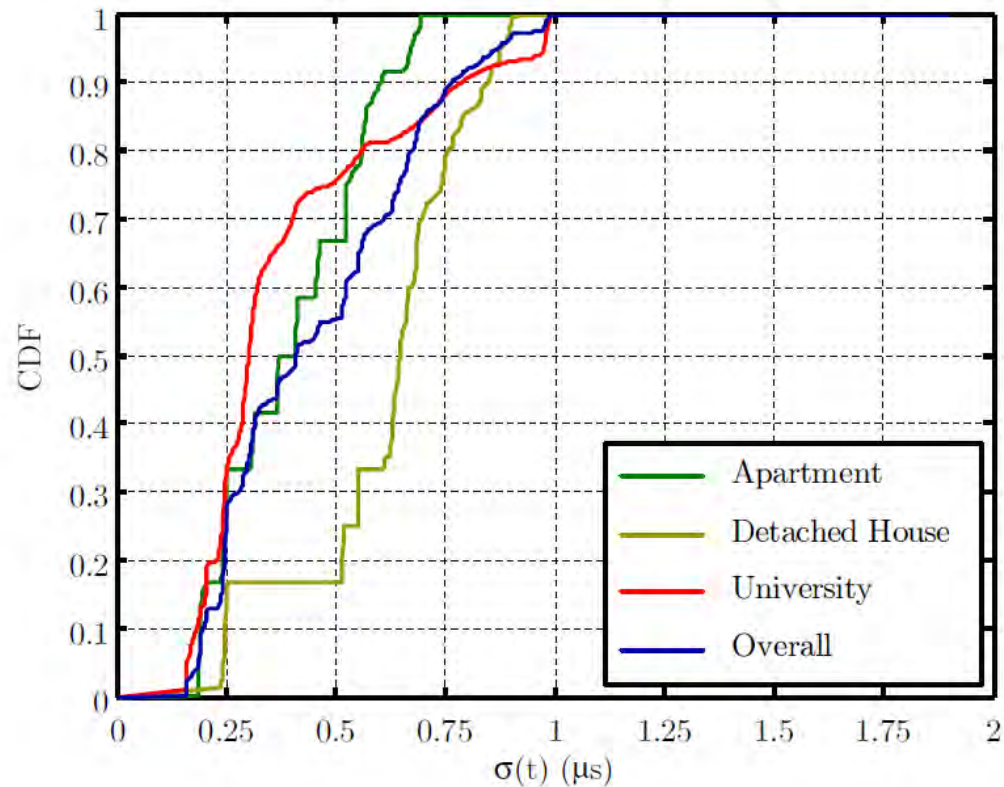
# PLC (valores experimentales)

## ■ Respuesta en frecuencia



# PLC (valores experimentales)

## ► Delay spread

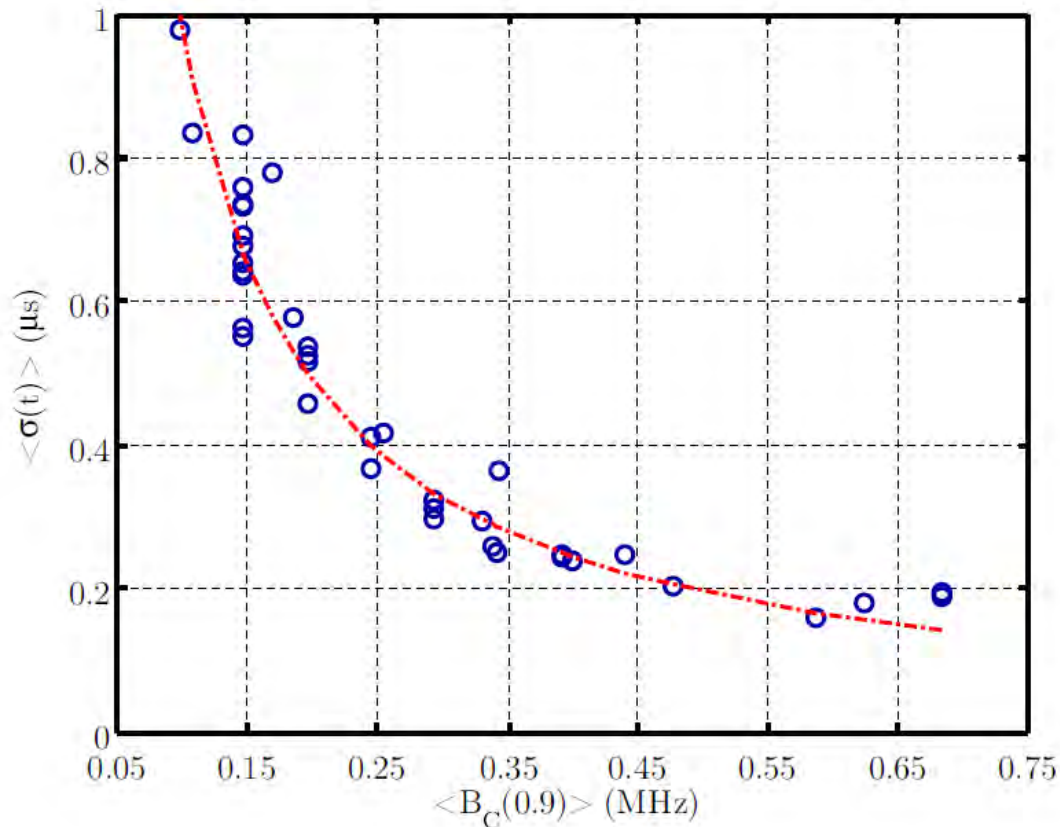




# PLC (valores experimentales)

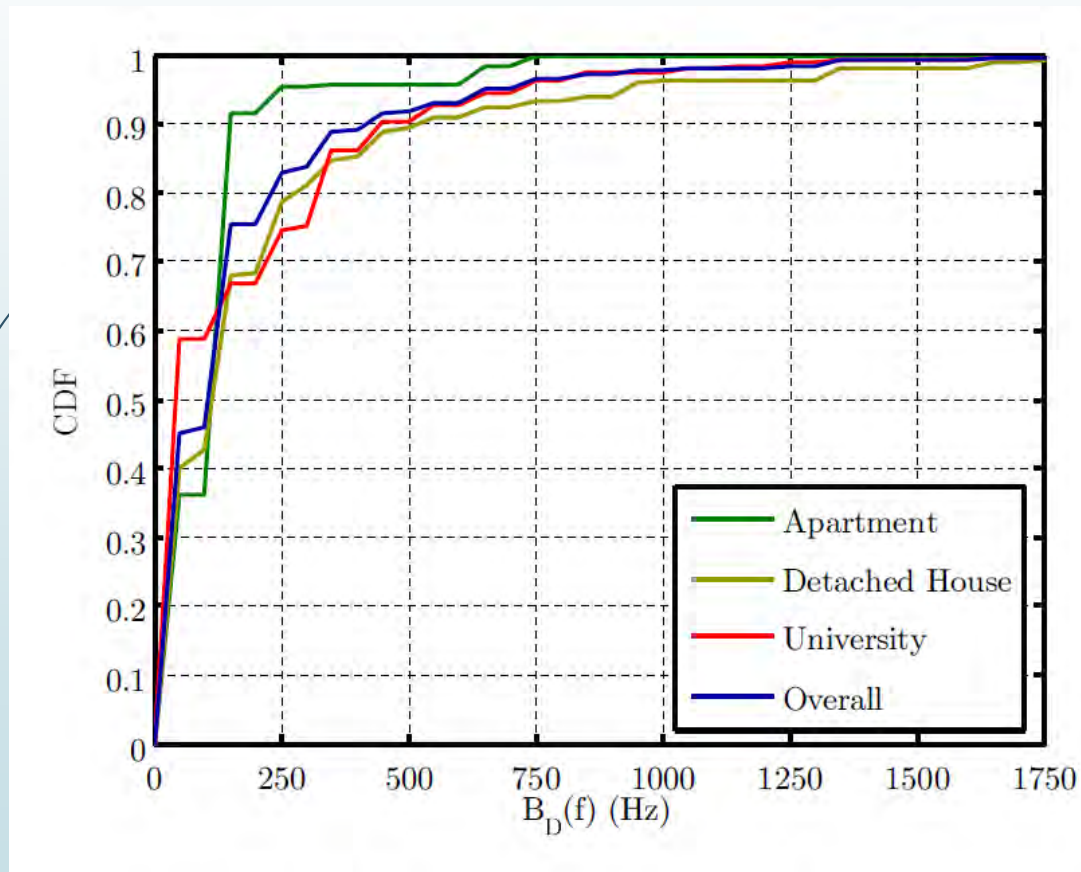
- Delay spread medio vs ancho de banda de

CC



# PLC (valores experimentales)

## ► Doppler spread



# PLC

- Es importante considerar:
  - Variaciones de las cargas
  - Tipo de tendido eléctrico
  - Ruido impulsivo
  - Otras fuentes de interferencia

## NUEVOS MODELOS DE CANAL

- ONDAS MILIMETRICAS

- Al incrementar las frecuencias de operación, las características de propagación se modifican.

Surgen nuevos modelos de canales para aplicaciones de:

- Ondas milimétricas
- Luz visible

Proyecto H2020

Referencia:



*mm-Wave based Mobile Radio Access  
Network for 5G Integrated Communications*

# Canales ondas MILIMETRICAS

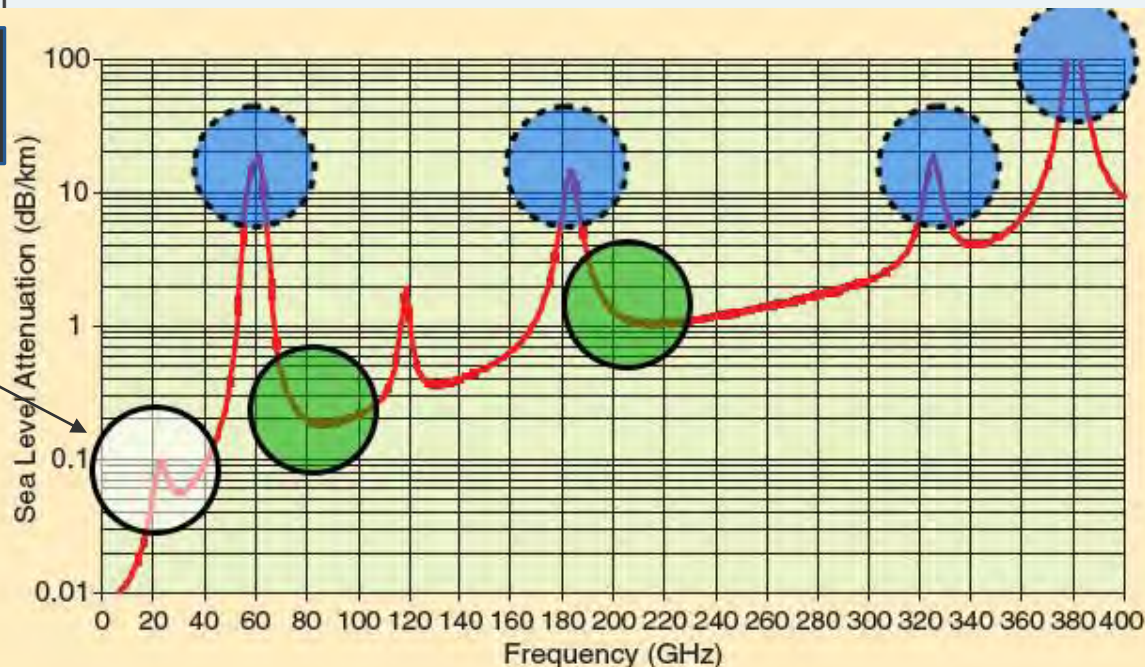
- En sistemas de ondas mm, las longitudes de ondas son menores a un cm → la mayoría de los objetos son relativamente muy grandes → diferentes fenómenos de propagación.
- Efectos de bloqueo (shadowing)
- La constitución molecular del aire y el agua afectan la propagación en el espacio libre

Atenuación adicional por absorción del aire

Banda para la futura 5G

GREEN: frequencies that have comparable free space (air) characteristics to modern cellular frequencies.

BLUE: frequencies with greater attenuation, which are therefore ideal for short-range indoor communications.



# Ondas MILIMETRICAS

- El modelado de los canales 5G impone nuevos requerimientos NO contemplados en modelos anteriores:
  - Validez del modelo hasta 100 GHz
  - Geometría 3D: Es requerido para modelar adecuadamente el canal incluyendo arreglos de antenas masivos y beamforming en 3D.
  - El modelo debe incluir movilidad (V2V, D2D)
  - Diversos escenarios son considerados: Urban micro (Umi), Urban Macro (Uma) e indoor

Umi street canyon



Umi open square



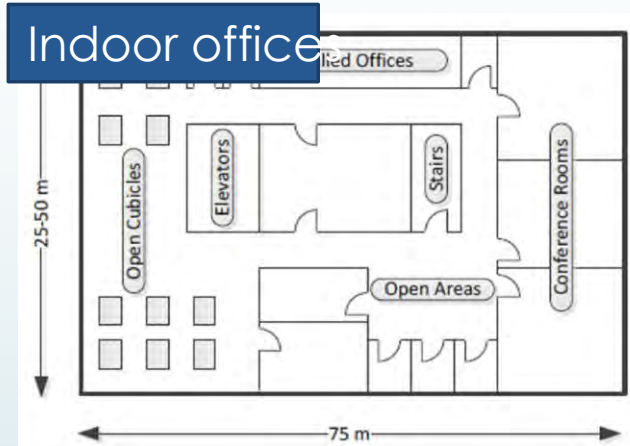


# ondas MILIMETRICAS

Indoor shopping mall



Indoor office



Uma



The cell radii for UMa is typically above 200 m and the APs are mounted on or above rooftops (e.g. 25-35 m),

# ondas MILIMETRICAS

## ► Path loss

$$PL_{dB} = A \cdot \log_{10}(d_m) + B + C \cdot \log_{10}(f_{GHz})$$

| Scenarios      |   | UMi Street Canyon |      |      |      | Indoor |      |
|----------------|---|-------------------|------|------|------|--------|------|
|                |   | LOS               |      | NLOS |      | LOS    | NLOS |
|                |   | O2O               | O2I  | O2O  | O2I  |        |      |
| Path Loss [dB] | A | 19.8              | 19.8 | 34.8 | 34.8 | 17.3   | 35.2 |
|                | B | 32.4              | 40.9 | 21.0 | 29.5 | 32.4   | 17.7 |
|                | C | 20.0              | 31.2 | 23.4 | 34.6 | 20.0   | 23.7 |

## ► LOS probability

$$p_{UMi}(d_m) = \min\left(\frac{18 \text{ m}}{d_m}, 1\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{d}{36 \text{ m}}}\right) + e^{-\frac{d}{36 \text{ m}}}$$

$$p_{InH}(d_m) = \begin{cases} 1, & d_m \leq 1.2 \text{ m} \\ e^{-\frac{d_m - 1.2 \text{ m}}{4.7 \text{ m}}}, & 1.2 \text{ m} < d_m < 6.5 \text{ m} \\ 0.36 \cdot e^{-\frac{d_m - 6.5 \text{ m}}{32.6 \text{ m}}}, & d_m > 6.5 \text{ m}. \end{cases}$$



# ondas MILIMETRICAS

## ► O2I penetration loss

$$O2I_{dB} = B_{O2I} + C_{O2I} \cdot \log_{10}(f_{GHz})$$

$$\approx 8.5 + 11.2 \cdot \log_{10}(f_{GHz})$$

## ► Shadow fading loss

$$\Sigma_{SF} = \sigma_{SF} + \delta_{SF} \cdot \log_{10}(f_{GHz})$$

$$\approx 5.7 + 2.3 \cdot \log_{10}(f_{GHz})$$

| Freq. [GHz]   | 10   | 25   | 40   | 55  | 70   |
|---------------|------|------|------|-----|------|
| O2I Loss [dB] | 19.7 | 24.2 | 26.4 | 28  | 29.2 |
| SF std. [dB]  | 8.0  | 8.9  | 9.4  | 9.7 | 9.9  |

# ondas MILIMETRICAS

➤ Delay spre  $DS_{\log10(s)} = \mu_{DS} + \gamma_{DS} \cdot \log10(f_{GHz}) + X(\sigma_{DS})$

➤ Azimuth of departure angle spread (ASD)

$$ASD_{\log10(^{\circ})} = \mu_{ASD} + \gamma_{ASD} \cdot \log10(f_{GHz}) + X(\Sigma_{ASD})$$

$$\Sigma_{ASD} = \sigma_{ASD} + \delta_{ASD} \cdot \log10(f_{GHz})$$

The base station per-path angle spread is defined as the root mean square (RMS) of angles with which a ray's power is received or transmitted by the base station

➤ Numero de clusters

$$No.CL = ceil\{ \mu_{No.CL} + \gamma_{No.CL} \cdot \log10(f_{GHz}) \}$$

Group of multipath components within a PDP traveling closely in propagation time delay at a specified lobe or direction in space

# Ondas MILIMETRICAS

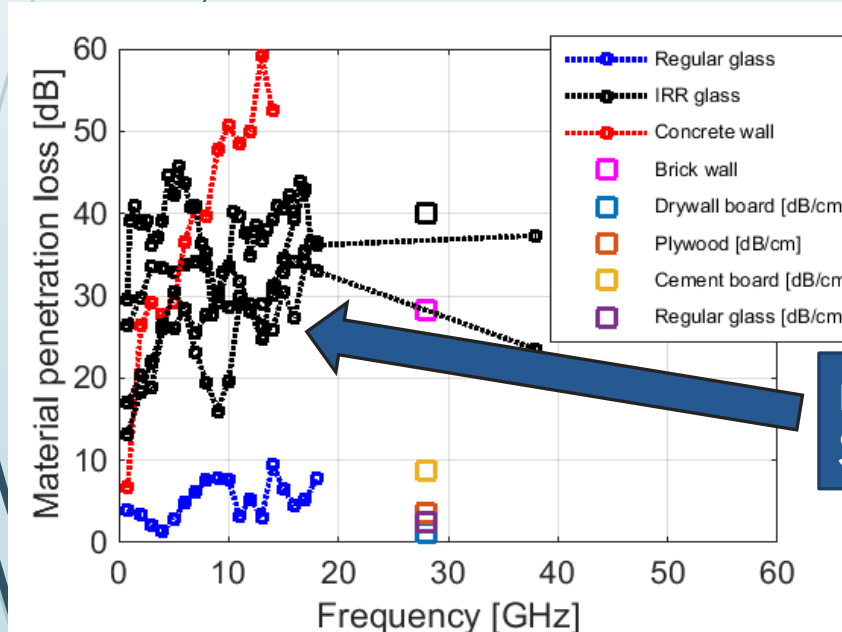
## Parámetros para diferentes escenarios

| Scenarios                       |                   | UMi Street Canyon |      |       |      | Indoor |       |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|------|-------|------|--------|-------|
|                                 |                   | LOS               |      | NLOS  |      | LOS    | NLOS  |
|                                 |                   | O2O               | O2I  | O2O   | O2I  |        |       |
| Path Loss [dB]                  | A                 | 19.8              | 19.8 | 34.8  | 34.8 | 17.3   | 35.2  |
|                                 | B                 | 32.4              | 40.9 | 21.0  | 29.5 | 32.4   | 17.7  |
|                                 | C                 | 20.0              | 31.2 | 23.4  | 34.6 | 20.0   | 23.7  |
| Shadow fading (SF) [dB]         | $\sigma_{SF}$     | 3.1               | 5.7  | 7.8   | 5.7  | 3.0    | 7.5   |
|                                 | $\delta_{SF}$     | 0                 | 2.3  | 0     | 2.3  | 0      | 0     |
| Delay spread (DS)<br>[log10(s)] | $\mu_{DS}$        | -7.1              |      | -6.8  |      | -6.9   | -7.3  |
|                                 | $\gamma_{DS}$     | -0.75             |      | -0.43 |      | -0.6   | -0.2  |
|                                 | $\sigma_{DS}$     | 0.38              |      | 0.36  |      | 0.23   | 0.18  |
| AoD spread (ASD)<br>[log10(°)]  | $\mu_{ASD}$       | 1                 |      | 1.25  |      | 1.8    | 1.76  |
|                                 | $\gamma_{ASD}$    | 0                 |      | 0     |      | -0.2   | -0.05 |
|                                 | $\sigma_{ASD}$    | 0.35              |      | 0.14  |      | 0.23   | 0.3   |
|                                 | $\delta_{ASD}$    | 0.15              |      | 0.13  |      | 0      | -0.1  |
| AoA spread (ASA)<br>[log10(°)]  | $\mu_{ASA}$       | 1.75              |      | 1.8   |      | 1.82   | 1.71  |
|                                 | $\gamma_{ASA}$    | -0.4              |      | -0.25 |      | -0.18  | -0.07 |
|                                 | $\sigma_{ASA}$    | 0.14              |      | 0.11  |      | 0.25   | 0.16  |
|                                 | $\delta_{ASA}$    | 0.14              |      | 0.14  |      | 0      | 0     |
| ZoD spread (ZSD)<br>[log10(°)]  | $\mu_{ZSD}$       | 0.55              |      | 0.57  |      | 0.86   | 1.14  |
|                                 | $\gamma_{ZSD}$    | -0.15             |      | -0.1  |      | 0      | -0.14 |
|                                 | $\sigma_{ZSD}$    | 0.18              |      | 0.52  |      | 0.29   | 0.22  |
|                                 | $\delta_{ZSD}$    | 0.32              |      | 0     |      | 0      | 0     |
| ZoA spread (ZSA)<br>[log10(°)]  | $\mu_{ZSA}$       | 0.66              |      | 0.93  |      | 1      | 1.29  |
|                                 | $\gamma_{ZSA}$    | 0                 |      | -0.12 |      | 0      | -0.37 |
|                                 | $\sigma_{ZSA}$    | 0.4               |      | 0.4   |      | 0.3    | 0.25  |
| K-factor (K) [dB]               | $\mu_{KF}$        | 8.8               |      | -100  |      | 3.2    | -100  |
|                                 | $\sigma_{KF}$     | 4                 |      | 0     |      | 4      | 0     |
| Cross-Correlations              | ASD vs DS         | 0.3               |      | 0.3   |      | 0.4    | 0.5   |
|                                 | ASA vs DS         | 0.5               |      | 0.4   |      | 0.5    | 0.3   |
|                                 | ASA vs SF         | -0.3              |      | -0.1  |      | -0.1   | 0.1   |
|                                 | ASD vs SF         | -0.4              |      | 0     |      | -0.3   | 0     |
|                                 | DS vs SF          | 0                 |      | 0.2   |      | 0.4    | -0.1  |
|                                 | ASD vs ASA        | 0.3               |      | -0.1  |      | 0.1    | -0.2  |
|                                 | ASD vs K          | -0.3              |      | 0     |      | -0.6   | 0     |
|                                 | ASA vs K          | -0.3              |      | 0     |      | -0.3   | 0     |
|                                 | DS vs K           | -0.5              |      | 0     |      | -0.3   | 0     |
| Cross-Correlations              | SF vs K           | 0.6               |      | 0     |      | 0.4    | 0     |
|                                 | ZSD vs SF         | -0.1              |      | -0.1  |      | -0.4   | 0     |
|                                 | ZSA vs SF         | 0                 |      | 0     |      | -0.1   | 0.2   |
|                                 | ZSD vs K          | -0.3              |      | 0     |      | 0.3    | 0     |
|                                 | ZSA vs K          | 0                 |      | 0     |      | 0.5    | 0     |
|                                 | ZSD vs DS         | 0                 |      | 0.1   |      | -0.6   | -0.3  |
|                                 | ZSA vs DS         | 0.2               |      | 0     |      | -0.5   | -0.1  |
|                                 | ZSD vs ASD        | 0.5               |      | 0.5   |      | -0.2   | 0.5   |
|                                 | ZSA vs ASD        | 0.2               |      | 0.1   |      | -0.6   | 0     |
|                                 | ZSD vs ASA        | 0                 |      | 0.2   |      | -0.4   | -0.1  |
|                                 | ZSA vs ASA        | 0.3               |      | 0.1   |      | -0.1   | 0.2   |
|                                 | ZSD vs ZSA        | 0.3               |      | 0     |      | 0.5    | 0.4   |
| Delay scaling parameter $r_t$   |                   | 3.3               |      | 4     |      | 3.6    | 4.5   |
| XPR [dB]                        | $\mu_{XPR}$       | 6                 |      | 5     |      | 6      | 4     |
|                                 | $\gamma_{XPR}$    | 12                |      | 12    |      | 9      | 10    |
|                                 | $\sigma_{XPR}$    | 6                 |      | 6     |      | 5      | 5     |
| Number of clusters              | $\mu_{No.cl.}$    | 12                |      | 19    |      | 14     | 17    |
|                                 | $\gamma_{No.cl.}$ | -4                |      | -4    |      | 0      | 0     |
| Number of rays per cluster      |                   | 20                |      | 20    |      | 20     | 20    |
| Cluster ASD                     |                   | 1.6               |      | 3.2   |      | 1.5    | 1.5   |
| Cluster ASA                     |                   | 4.9               |      | 5.6   |      | 1.5    | 1.5   |
| Cluster ZSD                     |                   | 0.9               |      | 1.1   |      | 1      | 1     |
| Cluster ZSA                     |                   | 2.5               |      | 2.5   |      | 1      | 1     |
| Per cluster shadowing [dB]      |                   | 5                 |      | 5     |      | 4      | 6     |
| Correlation distance            | DS                | 2.5               |      | 2.5   |      | 3.5    | 1     |
|                                 | ASD               | 3                 |      | 3.5   |      | 2.2    | 1.1   |
|                                 | ASA               | 2.5               |      | 3     |      | 1.3    | 1.3   |
|                                 | SF                | 8                 |      | 4.8   |      | 1.7    | 1     |
|                                 | K                 | 8                 |      | 3     |      | 3.3    | 1.3   |
|                                 | ZSA               | 2.5               |      | 2.5   |      | 2.5    | 1.3   |
|                                 | ZSD               | 3                 |      | 3     |      | 2      | 1.3   |

# ondas MILIMETRICAS

## ► Perdidas de penetración

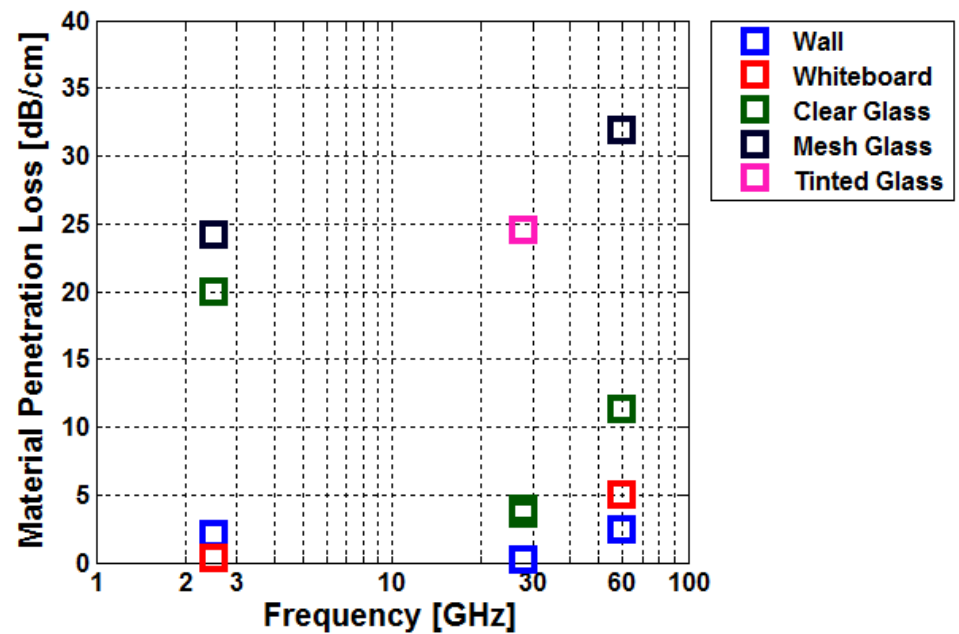
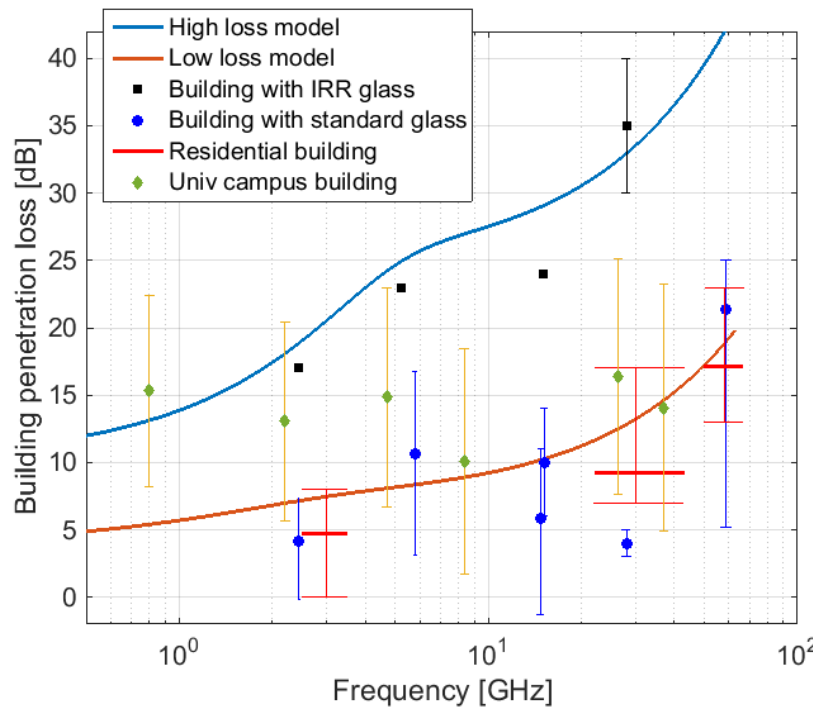
En Uma y Umi escenarios, una porción importante de los dispositivos móviles se ubicarán en el interior → pérdidas por penetración pueden ser muy significativas y afectar el calculo del enlace

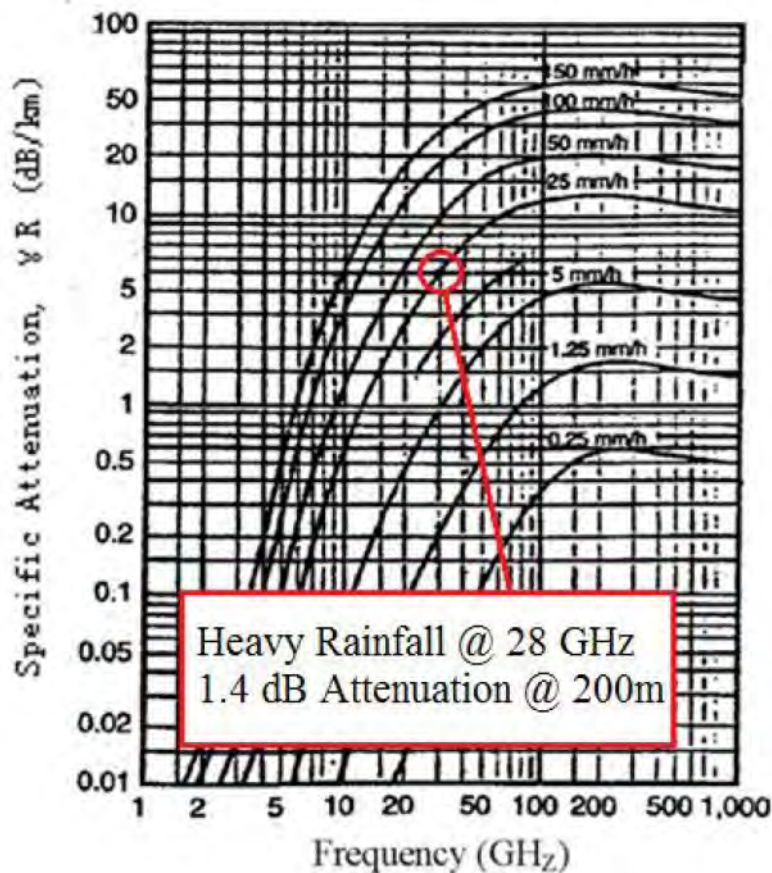


measurements by  
Samsung and Nokia

# ondas MILIMETRICAS

## Perdidas de penetración



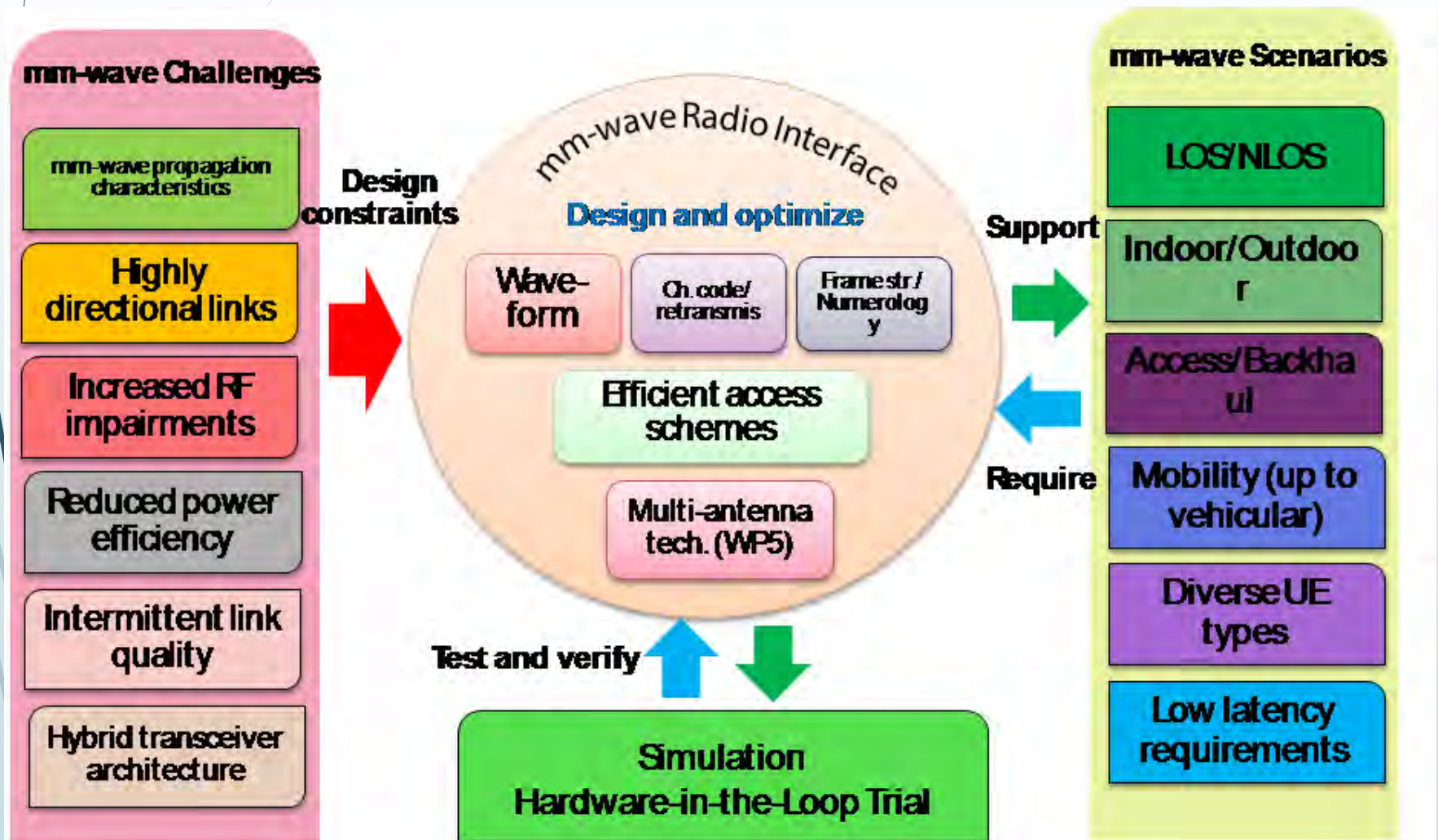


Existe el mito que la lluvia hace la transmisión en la banda milimetrica muy complicada debido a la gran atenuación  
→ si consideramos celdas de 200 metros (zonas urbanas) → el efecto no es tan significativo



# ondas MILIMETRICAS en 5g. mmMAGIC

## EL DESAFIO ES IMPORTANTE



# CANALES INALAMBRICOS

- El conocimiento del canal es clave para el desarrollo del sistema de comunicaciones
- Niveles de potencia de transmisión, frecuencia de operación, forma de onda, tipo de modulación, tasas de transmisión, son todas variables a seleccionar en función del canal.
- Los efectos del canal, tales como selectividad en frecuencia, selectividad en tiempo, distorsión, deben ser compensados para lograr desempeños elevados.
- ...