Unidad 3: Estructura de un transceiver inalámbrico

Sistemas de comunicaciones inalámbricas

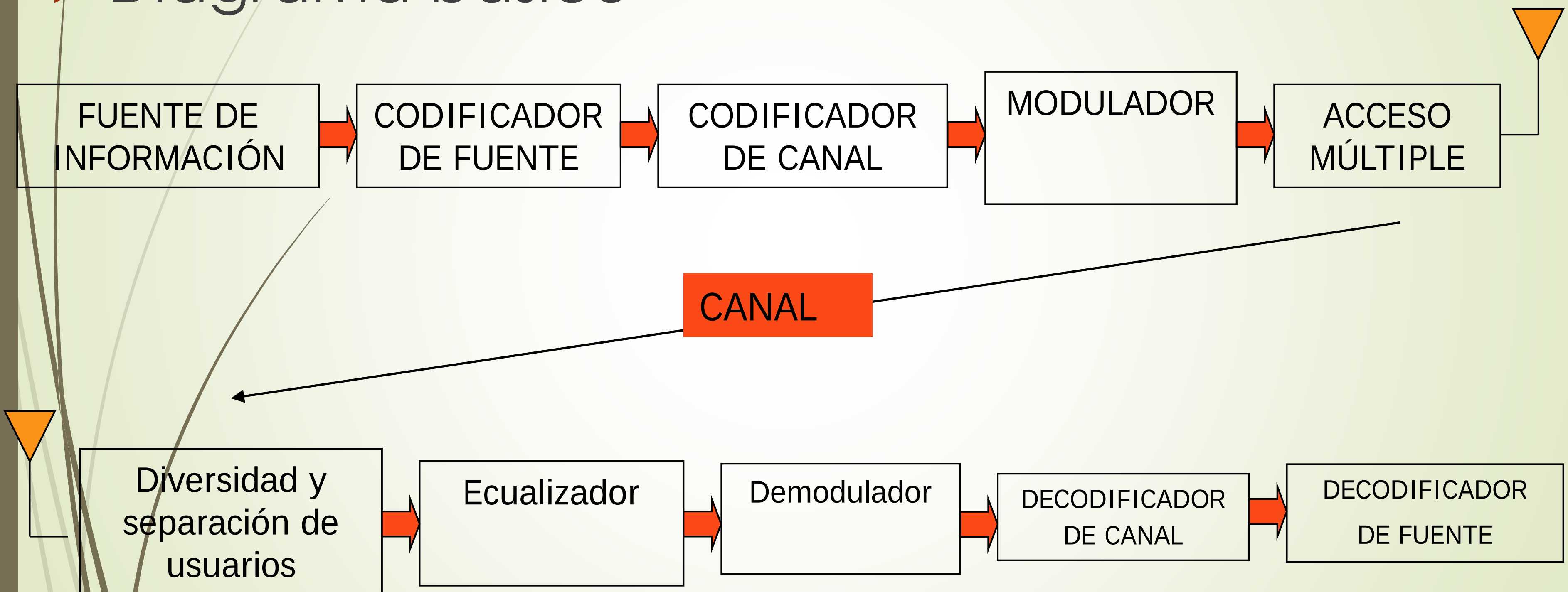
Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union

NEON

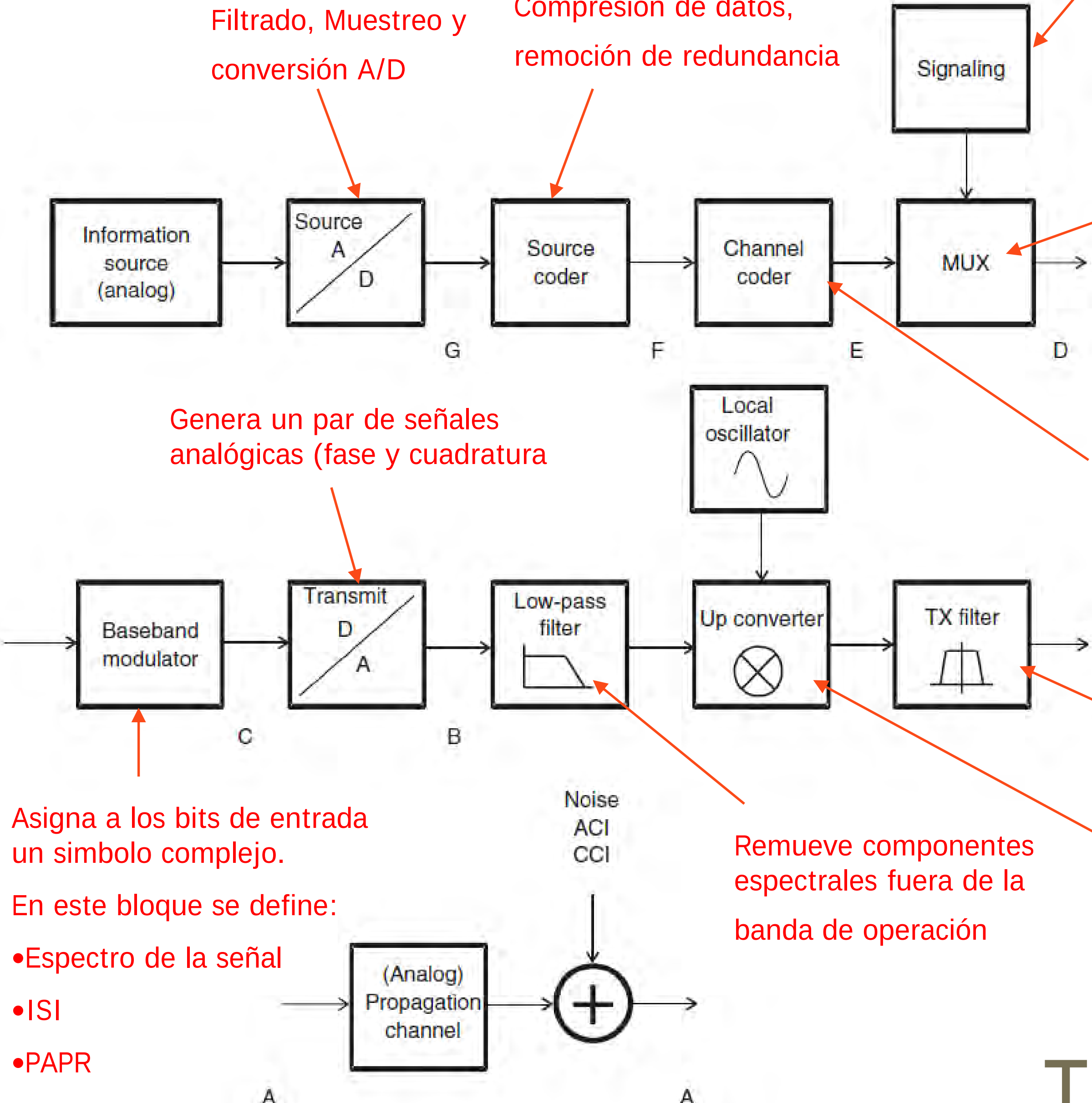
Network of Competence on Internet of Things

Transceiver inalámbrico

- Diagrama básico



TRANSMISOR



Agrega información de control

Filtrado, Muestreo y conversión A/D

Compresión de datos, remoción de redundancia

Combina datos e información de control.

En sistemas multiusuario combina los diferentes usuarios

Agrega información redundante para hacer mas robusto frrente al ruido/canal.

Codigos reed-salomon, convolucionales, turbo, LDPC,...

Genera un par de señales analógicas (fase y cuadratura

Remueve emisiones fuera de banda

Asigna a los bits de entrada un simbolo complejo.

En este bloque se define:

- Espectro de la señal
- ISI
- PAPR

Remueve componentes espectrales fuera de la banda de operación

Traslación de banda-base a pasabanda (frecuencia de portadora)

Receptor

Filtrado "grueso".

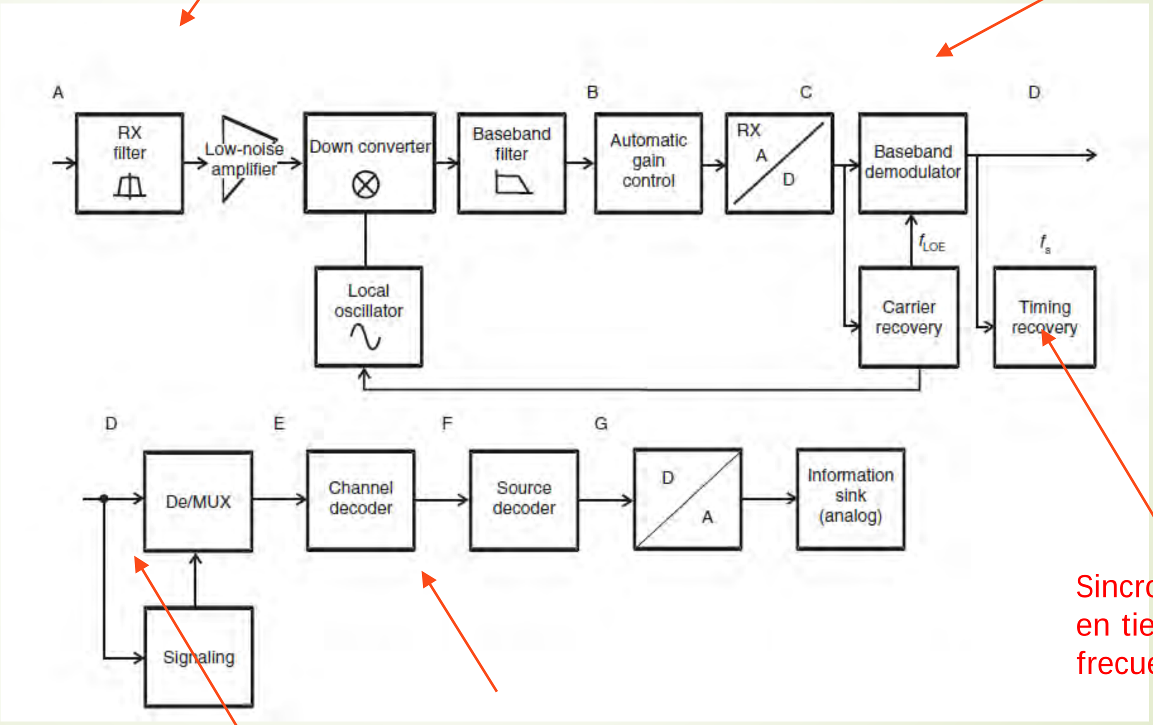
Amplificación. Fija la sensibilidad del receptor

Traslación de pasabanda (frecuencia de portadora) a banda-base

Selecciona el ancho de banda deseado

Conversión analógica a digital

Obtiene "soft-decisión" de los datos



Sincronización en tiempo y frecuencia

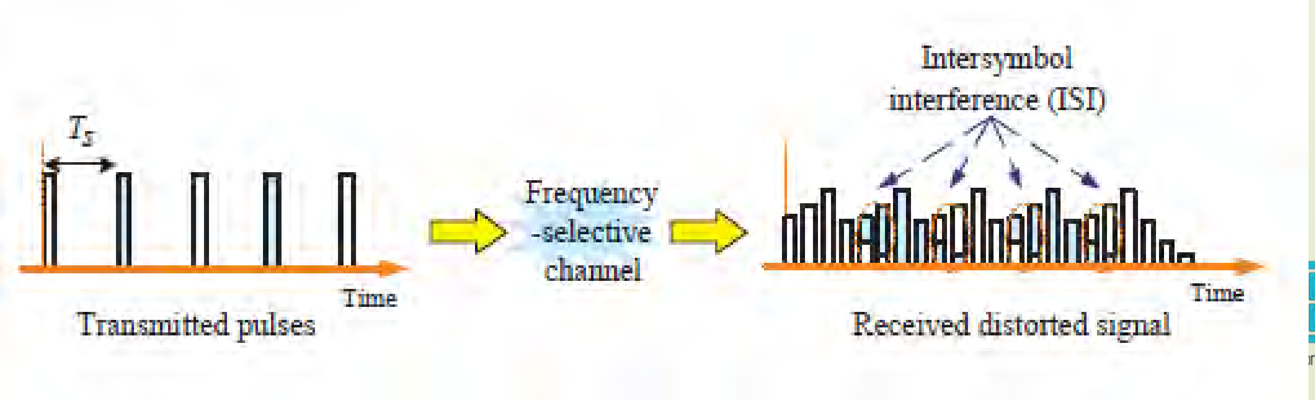
Utiliza las estimaciones "soft" para obtener los datos digitales originales

Reconstruye la señal original bajo las reglas que fue la información codificada originalmente

NEON
Network of Competence on Internet of Things

Receptor

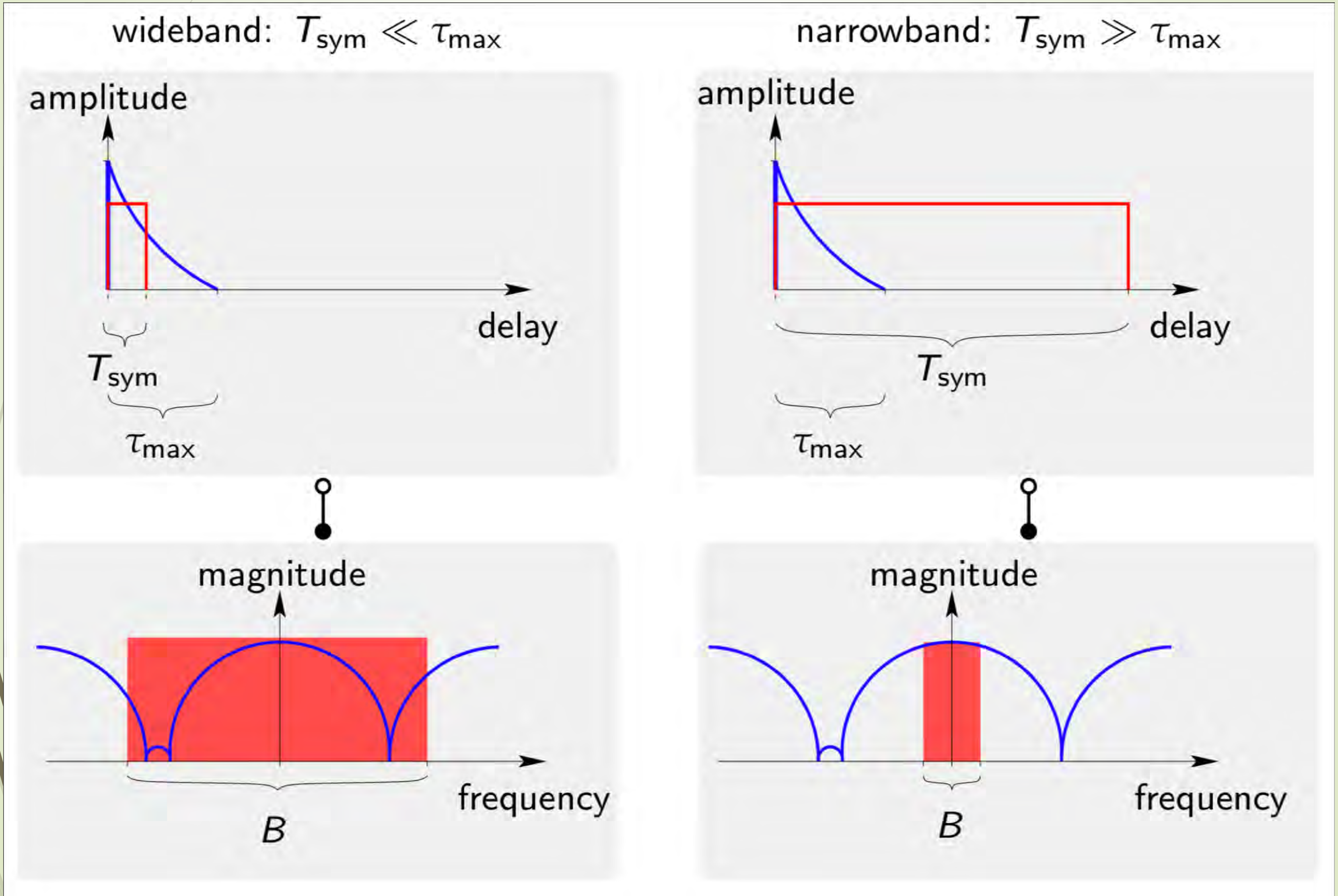
- En la etapa de demodulación los efectos del canal deben ser removidos→ **ecualización.**
- **En el caso de canales selectivos en frecuencia, si el Ts>Td, los pulsos se solapan→interferencia intersimbolo→ECUALIZACIÓN ES REQUERIDA**



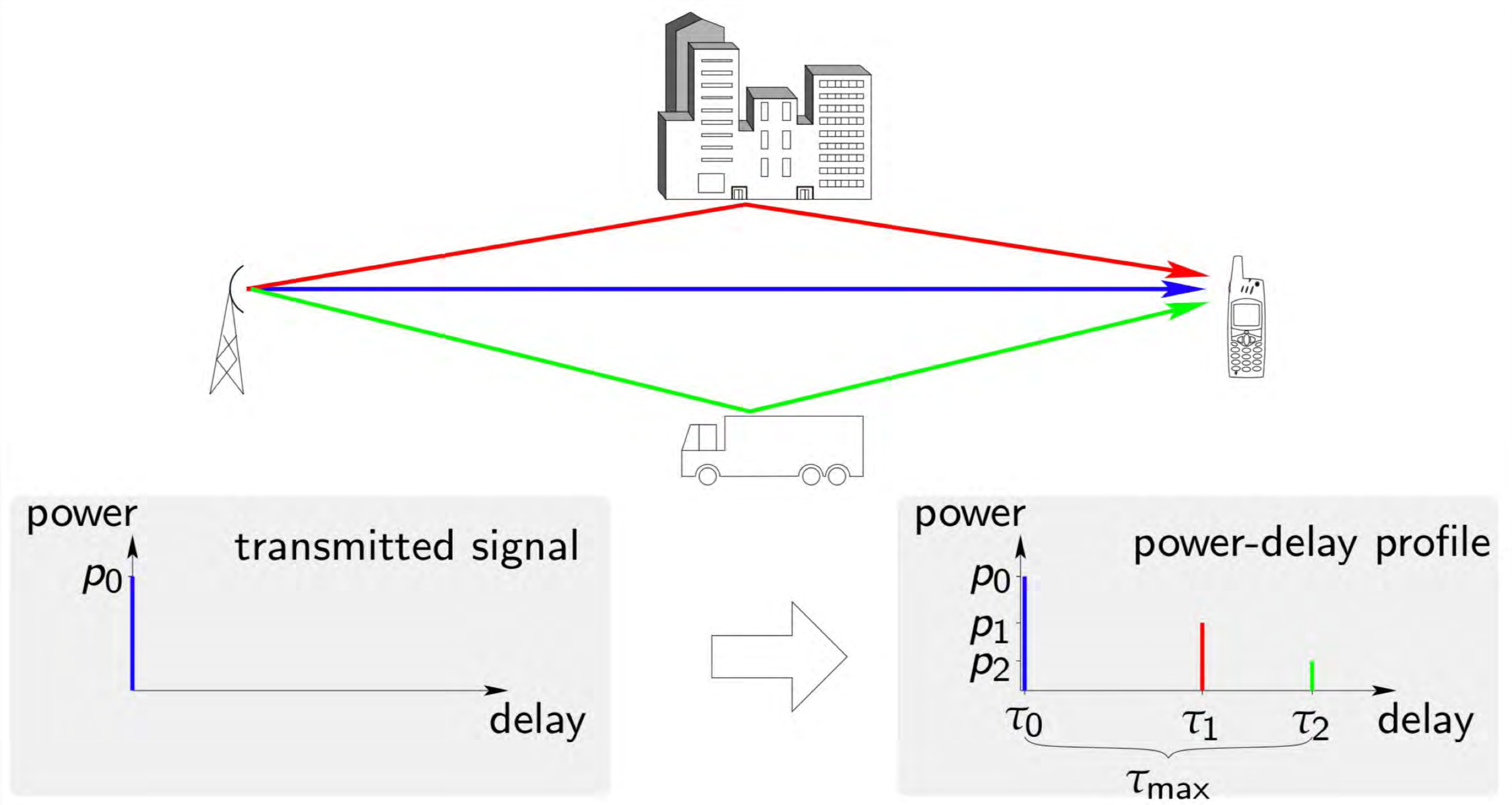
Receptor

- Si se requiere aumentar la tasa de transmisión, Ts disminuye → aumenta la ISI.
- Si Ts disminuye, el ancho de banda de transmisión aumenta → canales selectivos en frecuencia.
- Los efectos del canal deben ser compensados

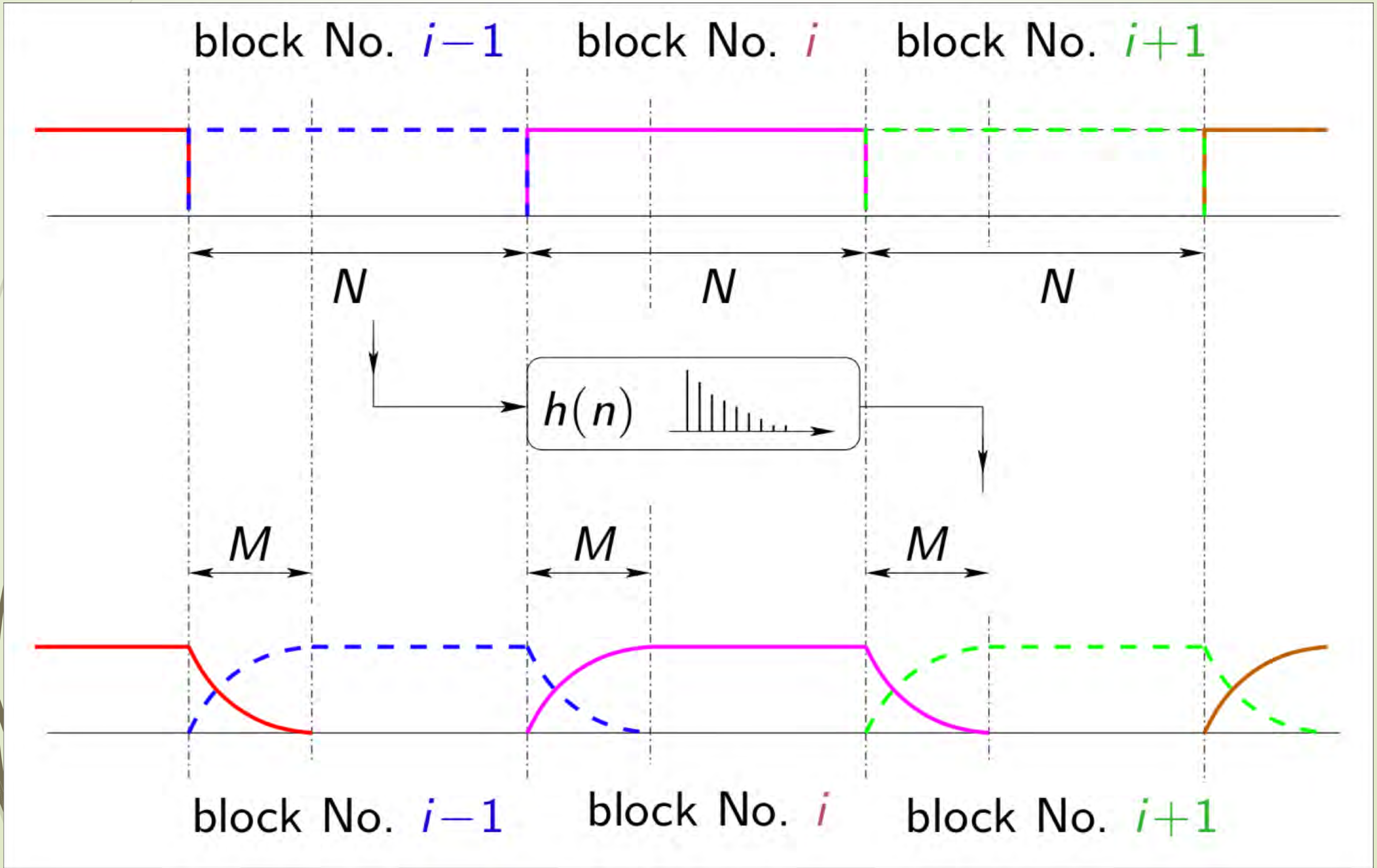
Banda Ancha – banda angosta



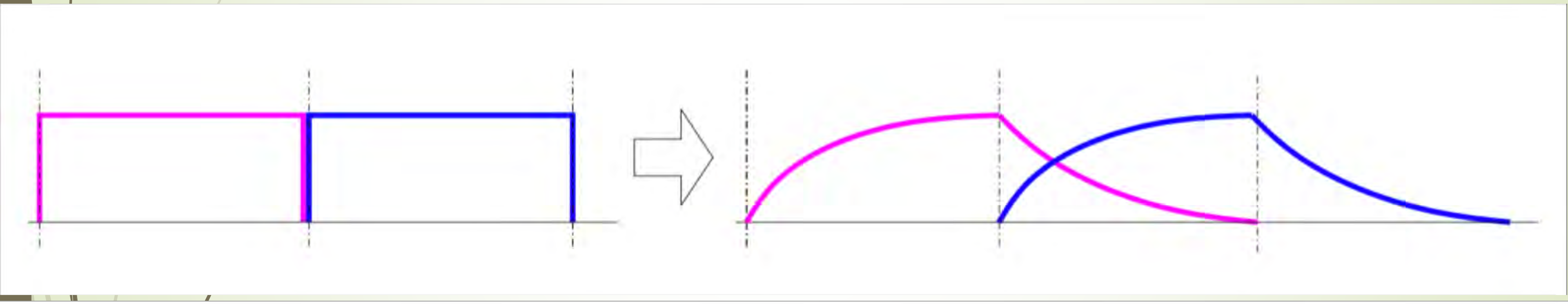
Canal multicamino

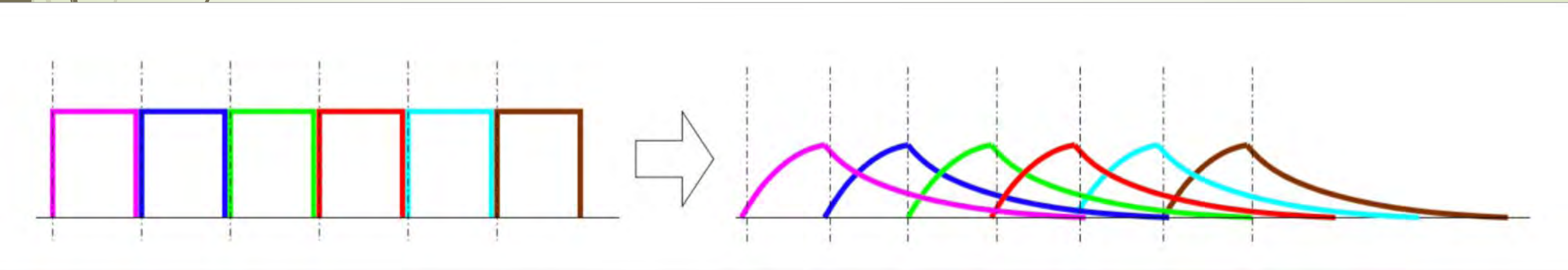


Efecto de la dispersión del canal

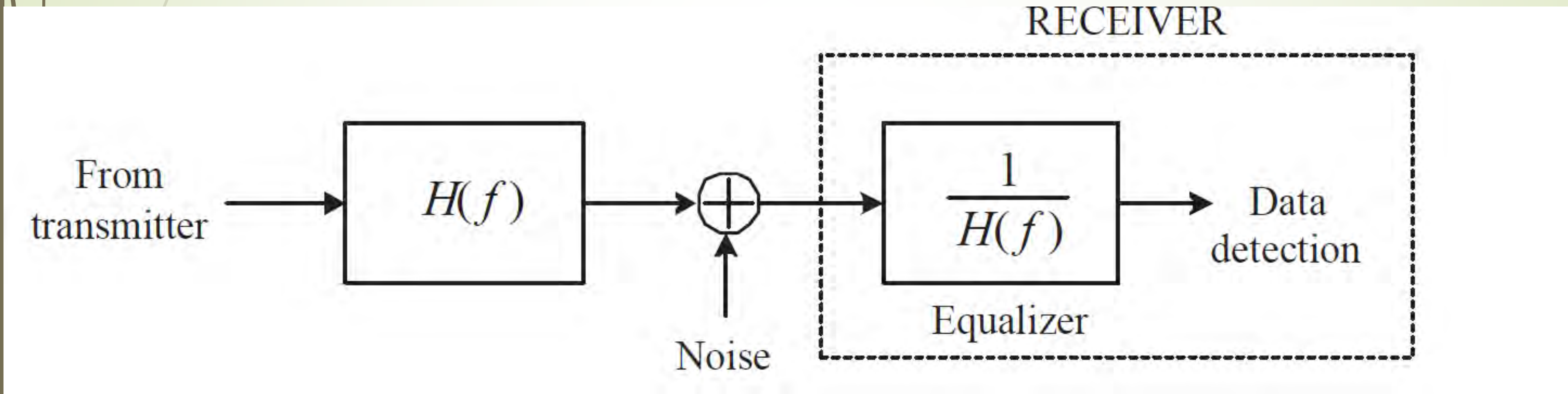


ISI y dispersión



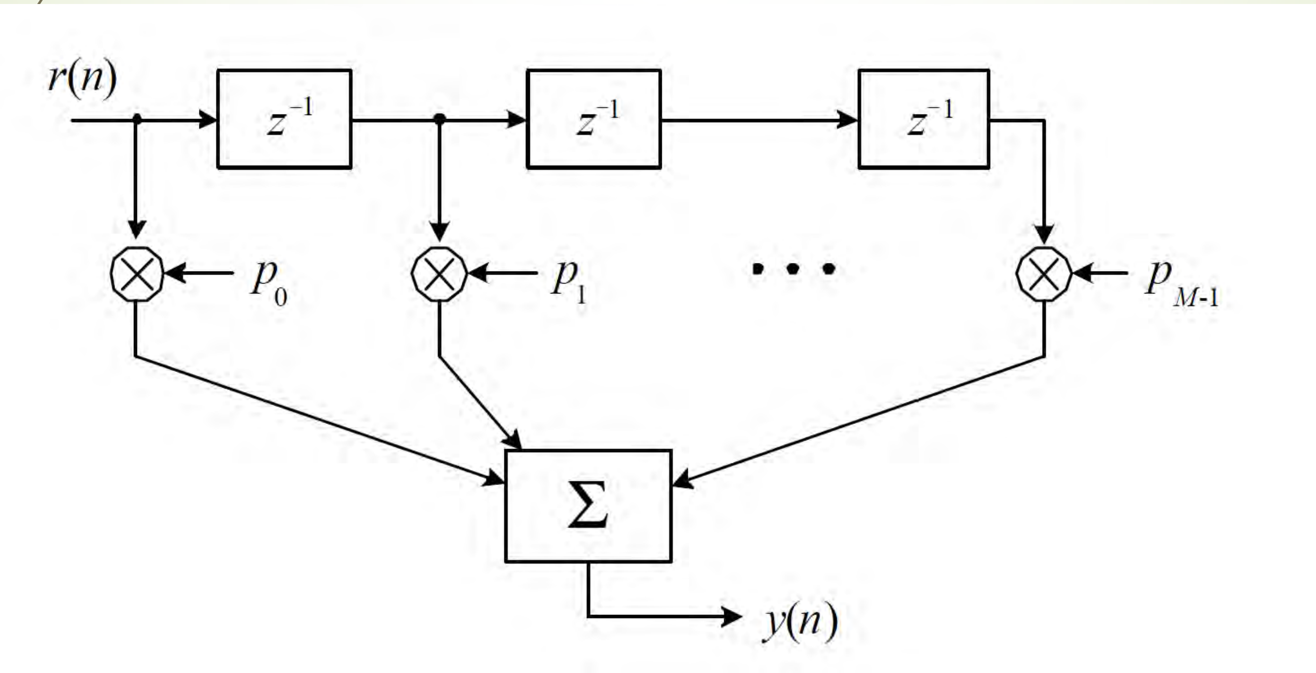


Ecualización



Ecualización

- El ecualizador se diseña para compensar la distorsión introducida por el canal.
- El ecualizador puede implementarse con un filtro FIR de longitud M.

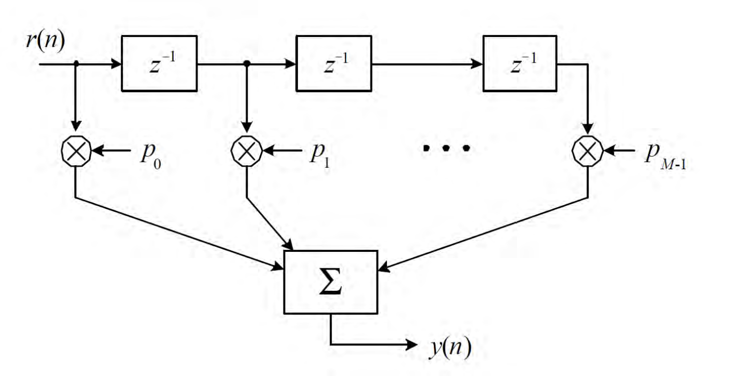


Ecualización

- Ecualizador Zero forcing: remueve la totalidad del ISI

$$H_{ZF}(z) = \frac{1}{H(z)}$$

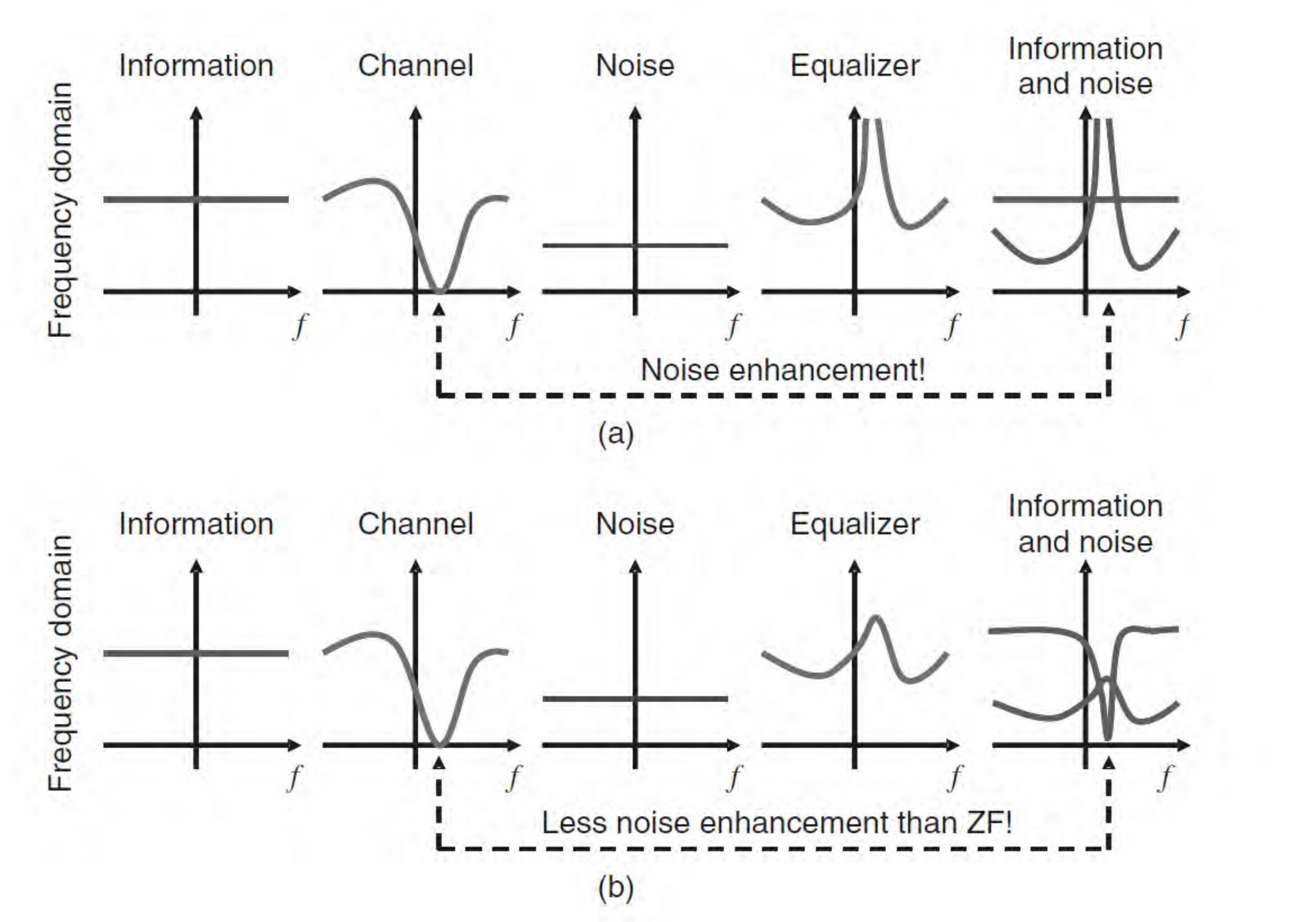
$$H_{ZF}(z) = p_0 + p_1 Z^{-1} + p_2 Z^{-2} + \cdots + p_M Z^{-M}$$



- Ecualizador MMSE: remueve el ISI limitando el efecto de aumento de ruido (noise enhancement)

$$H_{MMSE}(z) = \frac{1}{H(z) + N_0}$$

Ecualización- ZF o MMSE



Implementación del ecualizador

- Canales largos requieren un ecualizador FIR con gran número de coeficientes.

→la complejidad del receptor aumenta → el costo y consumo de la unidad aumenta

Interferencia Intersímbolo

- ¿Cuantós símbolos son afectados?

$$N_{ISI} = \frac{T_d}{T_s}$$

Se solapan/interefieren Nisi símbolos !!

•Si aumentamos la tasa de transmision Ts<Td → Aumenta el ISI.
•Si Ts<<Td -→ISI=0

NEON
Network of Competence on Internet of Things

ISI

- Canales con elevada dispersión en tiempo
- Sistemas con elevada tasa de transferencia

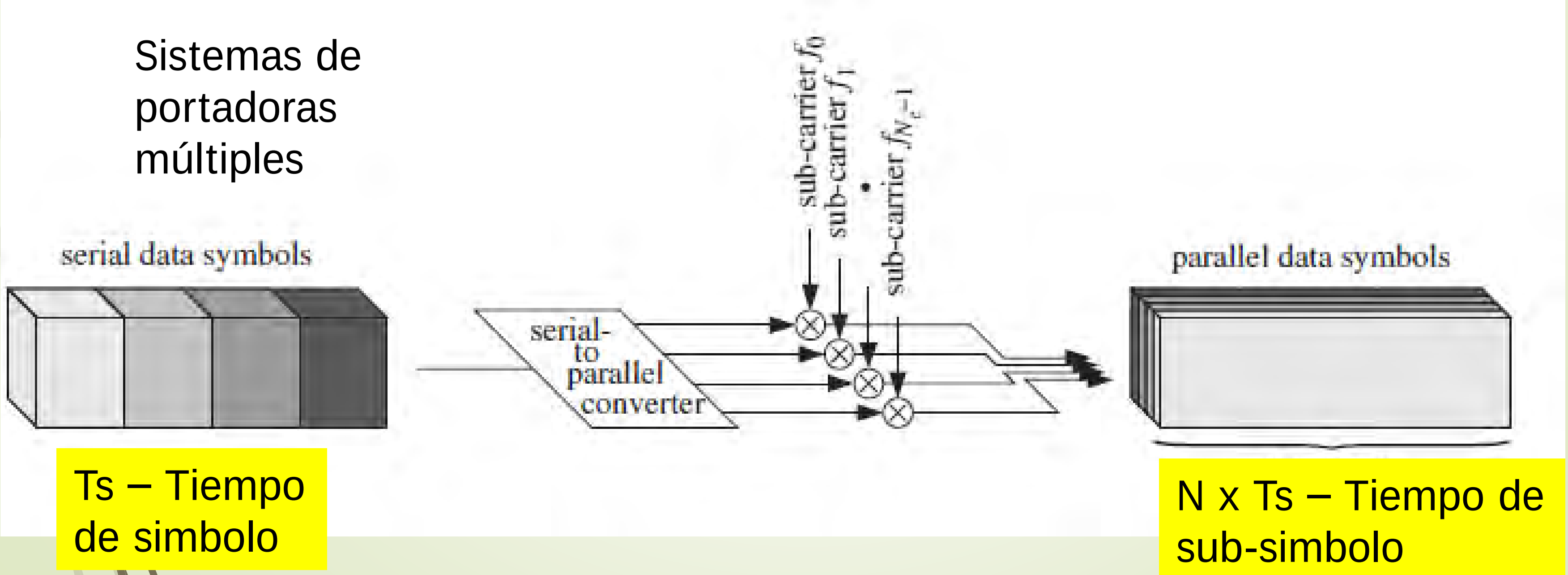
→ Ecualizacion compleja.

¿Solucion?

NEON
Network of Competence on Internet of Things

Sistemas de portadoras múltiples

- Se convierte una cadena serie de datos de alta velocidad, en **N** cadenas en paralelo de baja velocidad y se transmiten sobre N portadoras diferentes.

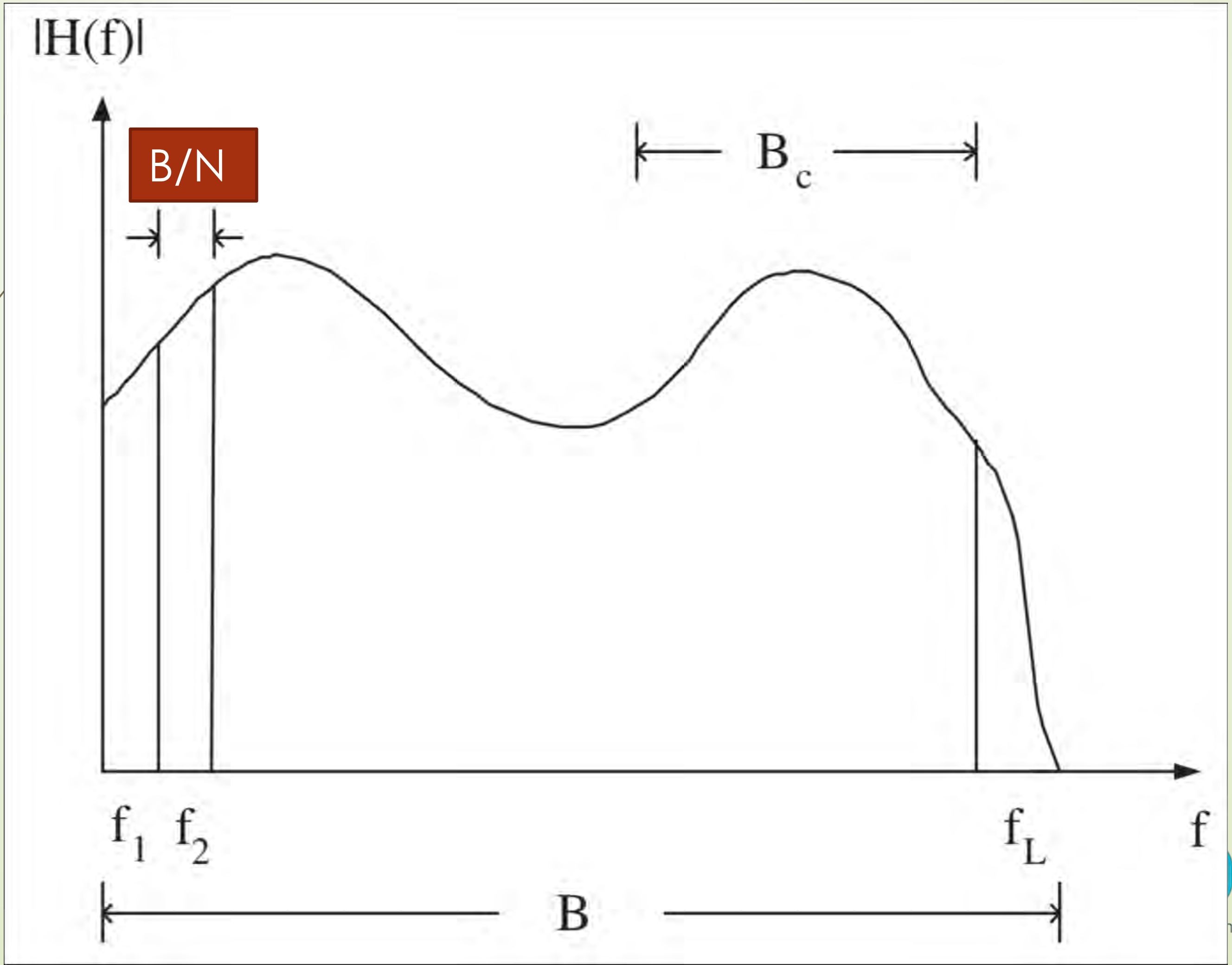


Sistemas de portadoras múltiples

- El ancho de banda total se divide en N sub-canales.
- Si N se elige adecuadamente, el ancho de banda de cada sub-simbolo < ancho de banda de coherencia → canal con respuesta en frecuencia plana.

NEON
Network of Competence on Internet of Things

Sistemas de portadoras múltiples



Sistemas de portadoras múltiples

- Partiendo de un sistema con una tasa de transmisión R y un ancho de banda B.
- Asumiendo que $Bc<B$ → canal selectivo en frecuencia.
- Si dividimos el canal en N sub-canales, Bn=B/N, y la tasa Rn=R/N. El tiempo de simbolo en cada subcanal es prooporcional a 1/Bn

Si N es grande → $Bn<Bc$ → Canal no-selectivo
Si N es grande → $Tn>Td$ → ISI=0

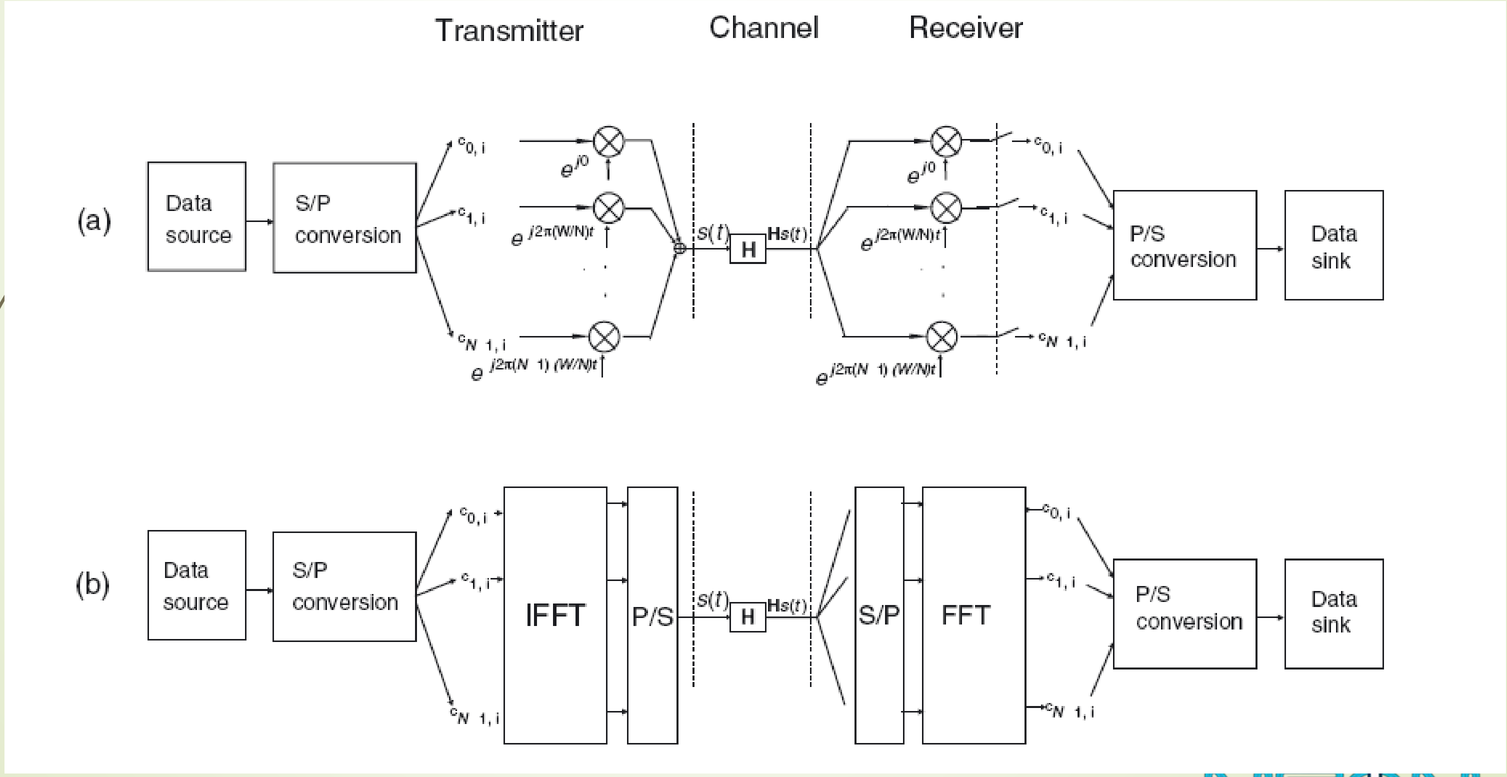
NEON
Network of Competence on Internet of Things

Sistemas OFDM

Network of Competence on Internet of Things

Diagrama en bloques

- Implementación analógica e implementación utilizando IFFT



Implementación digital

- La transformada discreta de Fourier
  - La DFT de una secuencia de N valores

$$DFT\{x[n]\} = X[k] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi nk/N}, \ 0 \leq k \leq N-1$$

  - La IDFT de una secuencia de N valores

$$IDFT\{X[k]\} = x[i] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j2\pi nk/N}, \ 0 \leq n \leq N-1$$

  - Convolución lineal:
    - x[n] secuencia de datos, h[n] canal, y[n] salida

$$y[n] = h[n] * x[n] = x[n] * h[n] = \sum_{l} h[l] x[n-l]$$

Implementación digital

- Convolución circular

$$y[n] = h[n] \otimes x[n] = x[n] \otimes h[n] = \sum_{l} h[l]x[n-l]_N$$

$$DFT\{y[n]\} = DFT\{x[n] \otimes h[n]\} = X[k]H[k], \; 0 \le k \le N-1$$

Si una secuencia x[n] se convoluciona circularmente con h[n], la secuencia original puede obtenerse

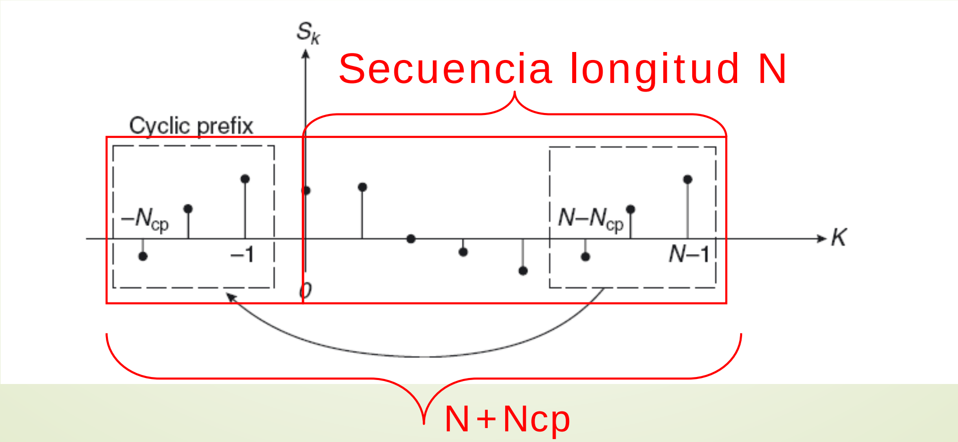
$$\hat{X}[k] = \frac{Y[k]}{H[k]}, \; 0 \le k \le N-1$$

Problema!!

La salida del canal es una convolución lineal !!

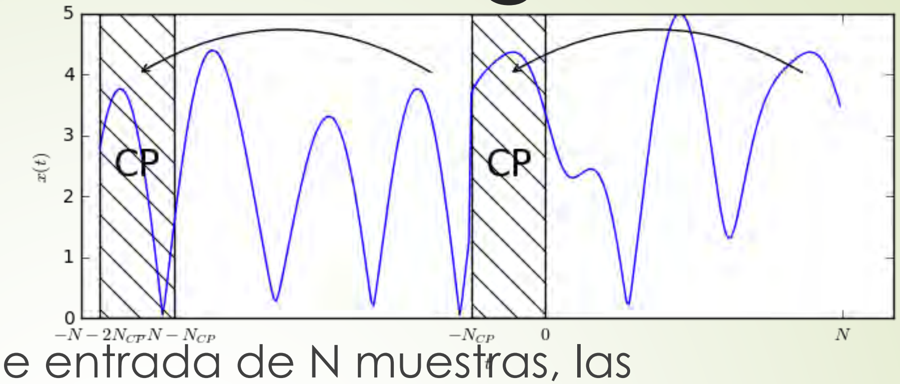
Implementación digital

- **El prefijo cíclico:**
  - Cuando una secuencia de datos es transmitida a través de un canal selectivo en frecuencia, la señal recibida es la convolución linear de la señal transmitida y la respuesta impulsiva del canal.
  - El agregado de un prefijo cíclico convierte la convolución lineal en una convolución circular.



NEON
Network of Competence on Internet of Things

Implementación digital



- Prefijo cíclico:
  - Por cada secuencia de entrada de N muestras, las ultimas Ncp son agregadas al comienzo de la secuencia

$$x[N-N_{cp}],x[N-N_{cp}+1],\cdots,x[N-1]\;x[0],x[1]\cdots,x[N-N_{cp}-1],\;x[N-N_{cp}],x[N-N_{cp}+1],\cdots,x[N-1]]$$

$$\tilde{x}[n]=x[n]_N,\;\; -N_{cp}\le n\le N-1$$

$$\tilde{x}[n-k]=x[n-k]_N,\;\; -N_{cp}\le n\le N-1$$

$$y[n]=\tilde{x}[n]*h[n]=\sum_{l=0}^{N_{cp}}h[l]\tilde{x}[n-l]$$

$$h[n]=[h[0],h[1],\cdots,h[N_{cp}]]$$

Rpta impulsiva canal

$$\boxed{y[n]=\tilde{x}[n]*h[n]=\sum_{l=0}^{N_{cp}}h[l]x[n-l]_N=x[n]\otimes h[n]}$$

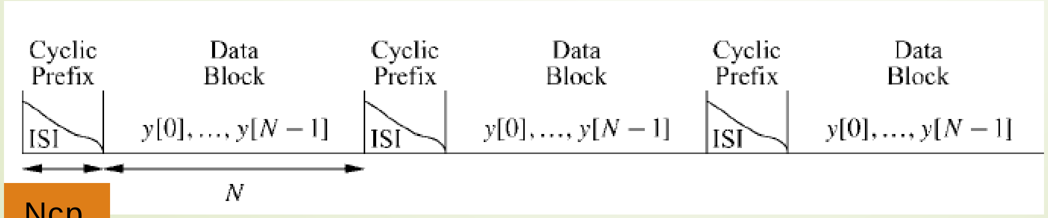
El agregado de un prefijo cíclico convierte la convolución lineal en una convolución circular

Implementación digital

- Aplicando la DFT (dominio frecuencia)

$$Y[k] = DFT\{y[n]\} = DFT\{x[n] \otimes h[n]\} = X[k]H[k],\ 0 \le k \le N-1$$

- La señal y[n] tiene N+Ncp muestras, de las cuales las primeras Ncp NO se necesitan para recuperar x[n].
- Estas primeras Nc muestras están afectadas por la ISI de las Ncp muestras del símbolo anterior.



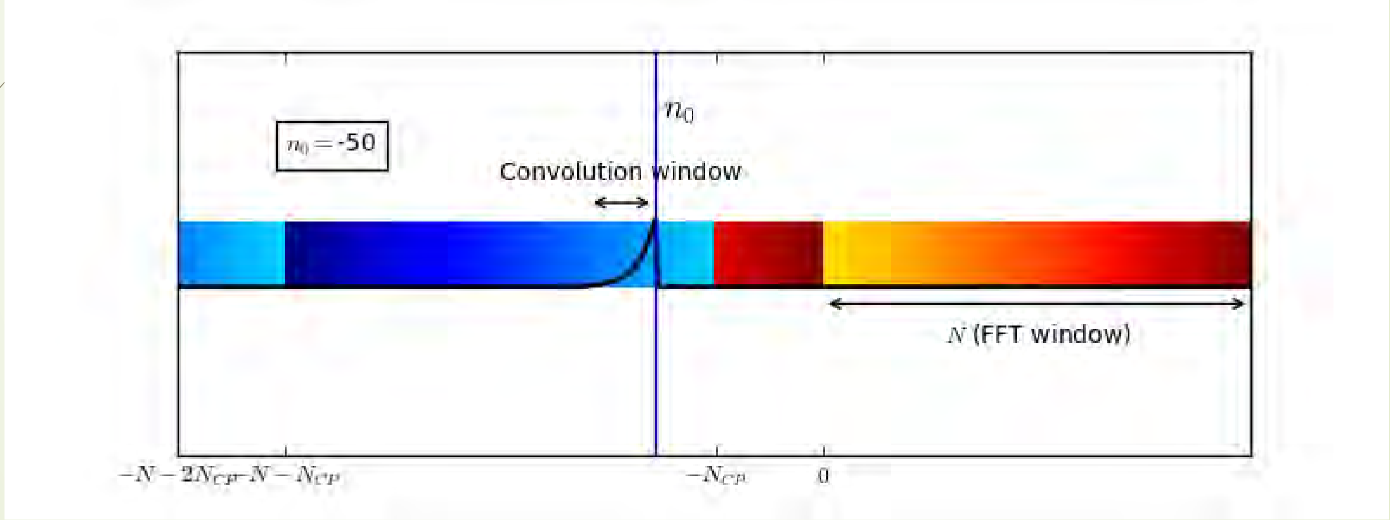
Ncp

Network of Competence on Internet of Things

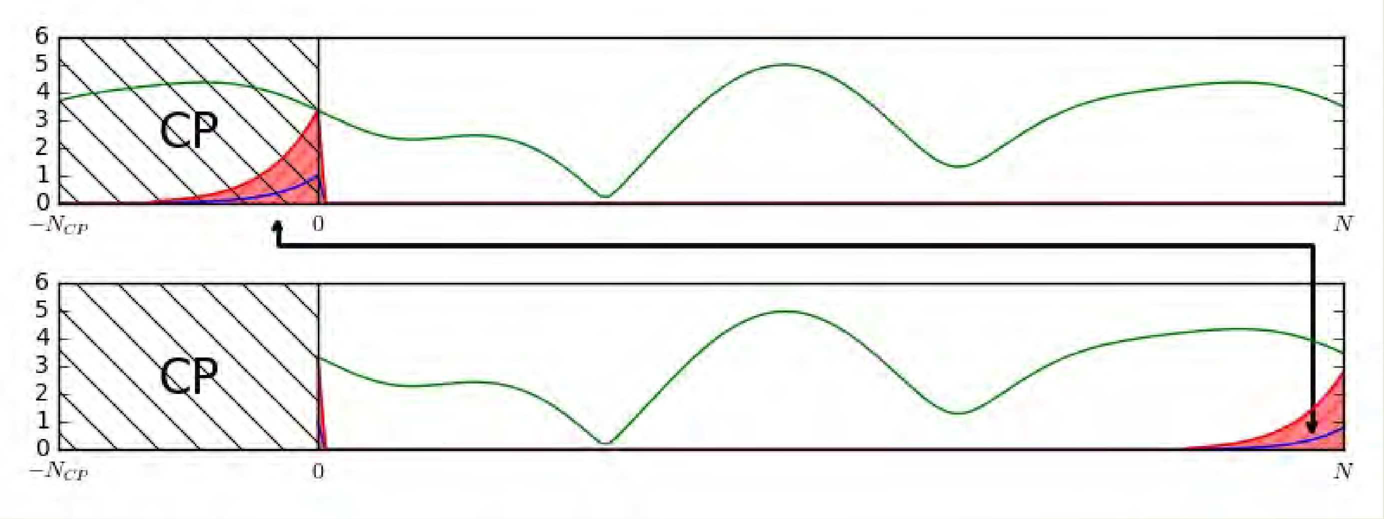
Circular vs lineal

- Ver script Matlab

Circular vs lineal



Circular vs lineal



Implementación digital

- Representación matricial

$$\begin{bmatrix} y_{N-1} \\ y_{N-2} \\ \vdots \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & \cdots & h_\mu & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & h_0 & \cdots & h_{\mu-1} & h_\mu & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & h_0 & \cdots & h_{\mu-1} & h_\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{N-1} \\ \vdots \\ x_0 \\ x_{-1} \\ \vdots \\ x_{-\mu} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nu_{N-1} \\ \nu_{N-2} \\ \vdots \\ \nu_0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \boldsymbol{\nu}.$$

$$\begin{bmatrix} y_{N-1} \\ y_{N-2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & \cdots & h_\mu & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & h_0 & \cdots & h_{\mu-1} & h_\mu & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & h_0 & \cdots & h_{\mu-1} & h_\mu \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ h_2 & h_3 & \cdots & h_{\mu-2} & \cdots & h_0 & h_1 \\ h_1 & h_2 & \cdots & h_{\mu-1} & \cdots & 0 & h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{N-1} \\ x_{N-2} \\ \vdots \\ \vdots \\ x_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nu_{N-1} \\ \nu_{N-2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \nu_0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{y} = \tilde{\mathbf{H}}\mathbf{x} + \boldsymbol{\nu}.$$

Nota: ecuaciones extraídas Wireless communication, Andrea Goldsmith

Implementación digital

$$\mathbf{X} = \mathbf{Q}\mathbf{x}, \qquad \mathbf{X} = (X[0], \ldots, X[N-1])^T, \mathbf{x} = (x[0], \ldots, x[N-1])^T,$$

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & W_N & W_N^2 & \cdots & W_N^{N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & W_N^{N-1} & W_N^{2(N-1)} & \cdots & W_N^{(N-1)^2} \end{bmatrix} \qquad W_N = e^{-j2\pi/N}.$$

$$\mathbf{Q}^{-1} = \mathbf{Q}^H, \Rightarrow \mathbf{x} = \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{X} = \mathbf{Q}^H\mathbf{X}.$$

El canal modelado como una matriz de convolución circular puede representarse por (factorización utilizando matrices DFT):

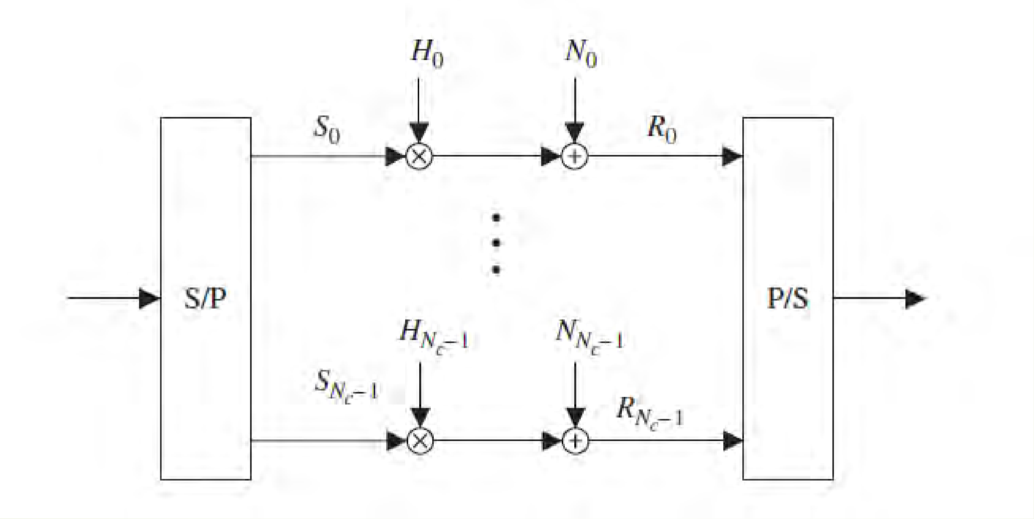
$$\tilde{H} = Q^H \Delta Q$$

Matriz diagonal donde cada elemento representa la respuesta En frecuencia del canal en cada indice De frecuencia

$$\boxed{Y = Qy = Q[Q^H \Delta Q Q^H X + \nu] = \Delta X + Q\nu}$$

NEON
Network of Competence on Internet of Things

Implementación digital



$$Y[k] = DFT\{y[n]\} = DFT\{x[n] \otimes h[n]\} = X[k]H[k], \; 0 \le k \le N-1$$

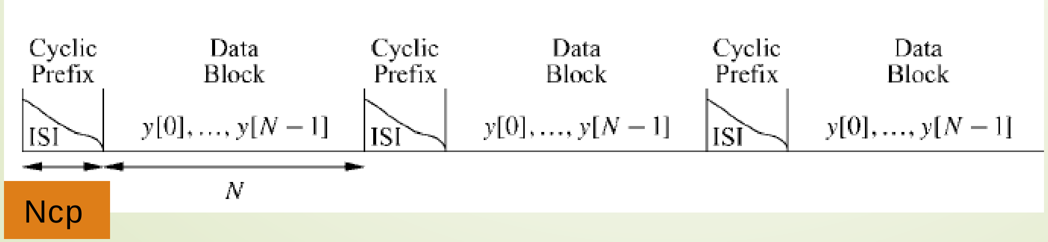
Network of Competence on Internet of Things

Implementación digital

- En resumen: El agregado del prefijo cíclico (de longitud mayor a la longitud del canal) presenta dos ventajas:
  - Convierte la convolución lineal en convolución circular → ecualización sencilla.

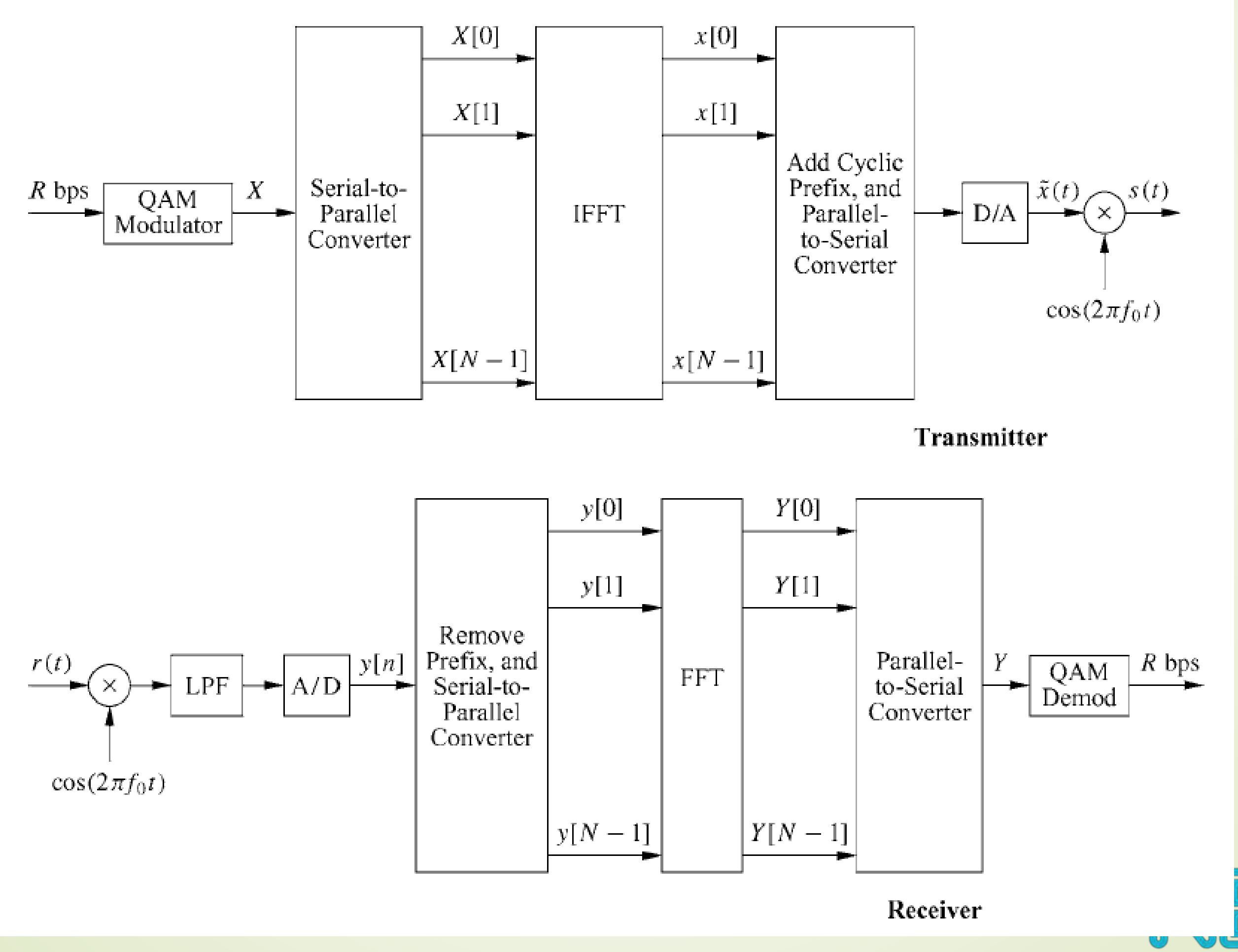
$$X[k] = \frac{Y(k)}{H[k]}, \; 0 \le k \le N-1$$

  - Elimina la ISI entre símbolos (también denominada interferencia inter-bloque IBI)



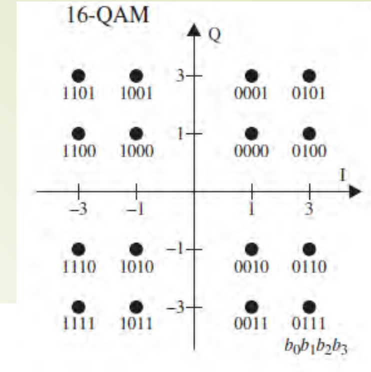
Network of Competence on Internet of Things

Implementación digital OFDM

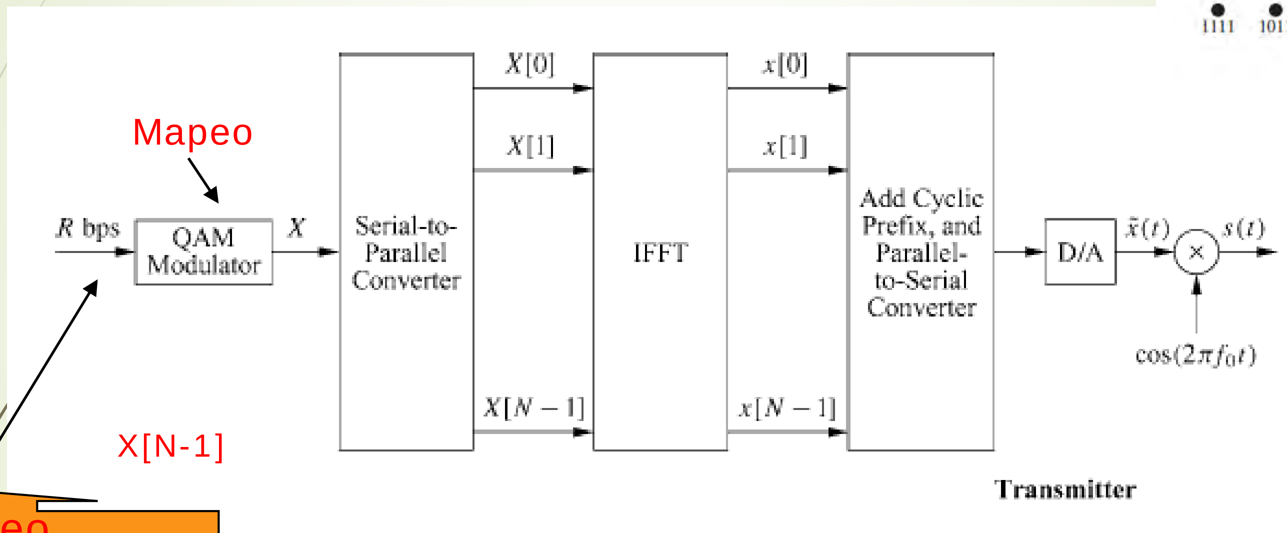


Transmisor OFDM

m=4



Mapeo



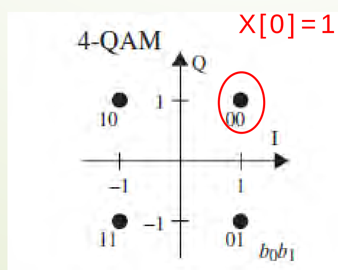
X[0] X[1] X[N-1]

mapeo

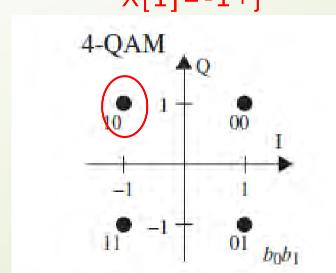
0 0 1 0 1 1 1 0...0 0 1.... 01

m=2

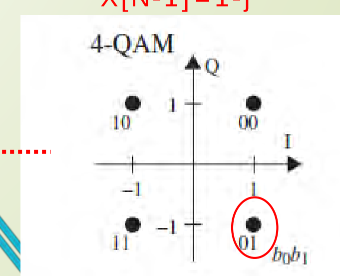
X[0]=1+j



X[1]=-1+j



X[N-1]=1-j



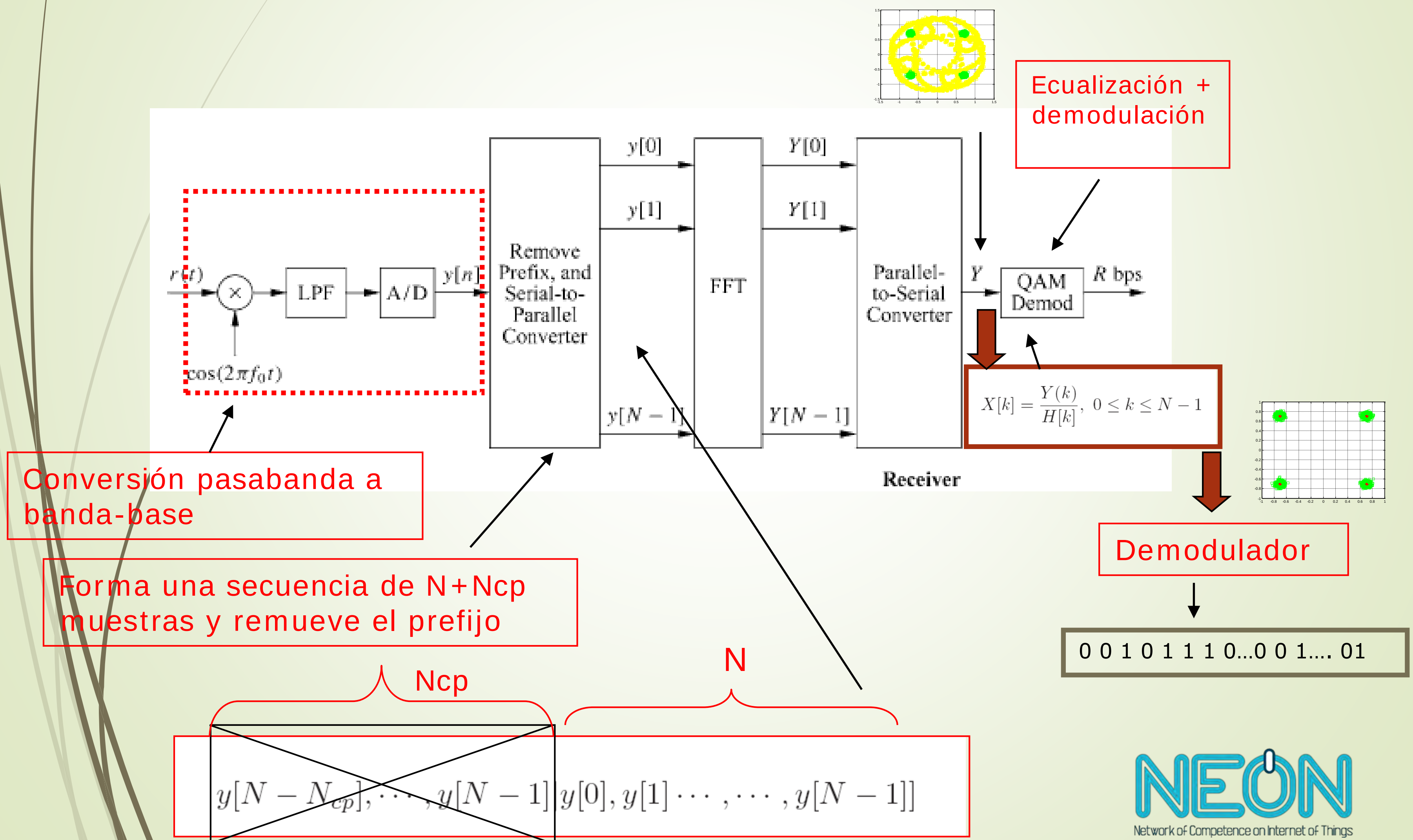
Número de bits por símbolo OFDM=N x m

m=1 BPSK

m=2 4-QAM

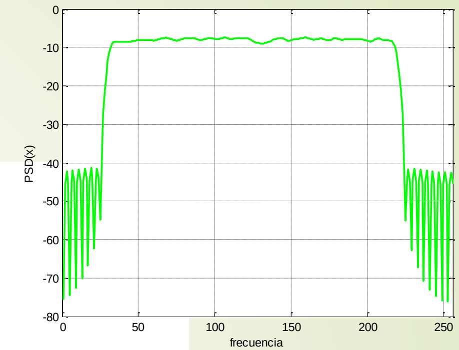
m=4 16-QAM

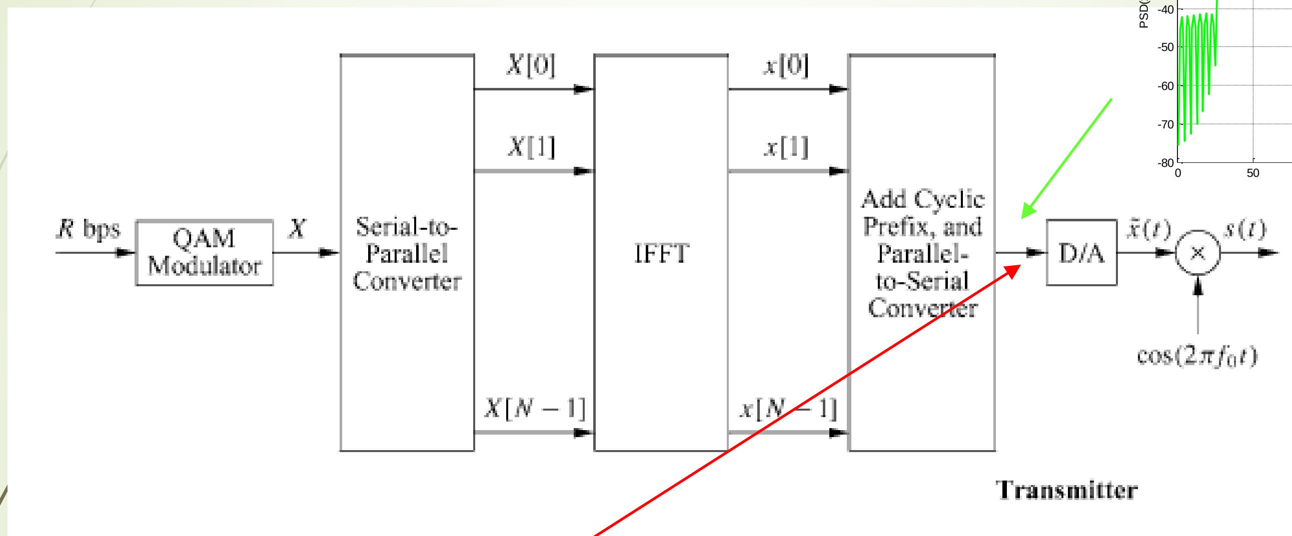
Receptor OFDM



Network of Competence on Internet of Things

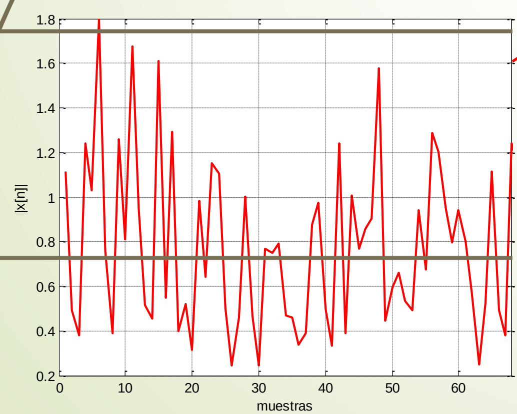
Formas de onda en un transmisor OFDM





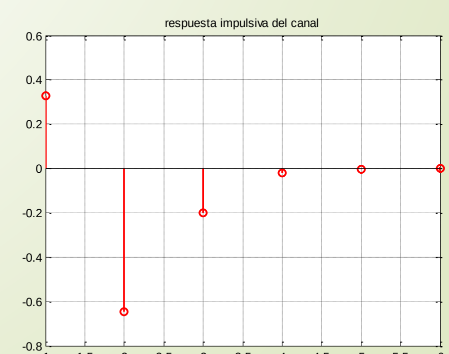
Valor pico

Valor medio



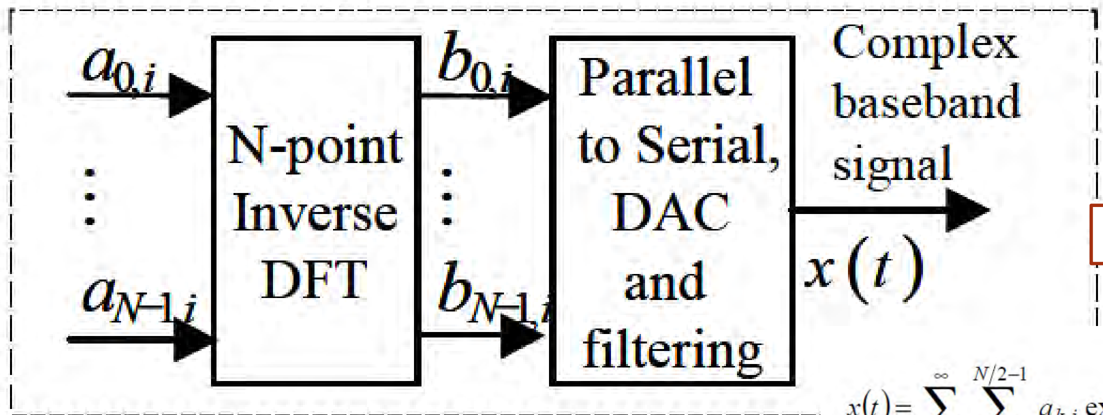
Señal dominio tiempo

Canal



Espectro de OFDM

Arquitectura Básica de un transmisor OFDM



Periodo del símbolo

$$x(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} a_{k,i} \exp j\left(2\pi f_k \left(t + \frac{T}{2} - iT\right)\right)$$

Símbolo complejo

$f_k = k/T$

PSD de un proceso aleatorio:

$$S_x(f) = E\left\{ \lim_{T_{AV}\to\infty} \frac{\left|X_{T_{AV}}(f)\right|^2}{T_{AV}} \right\} = \lim_{T_{AV}\to\infty} \frac{E\left\{X_{T_{AV}}(f) X^*_{T_{AV}}(f)\right\}}{T_{AV}}$$

T_{AV} *es un numero de simbolos grande*

PSD de una señal OFDM: $S_x(f) = E\left\{|a|^2\right\} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\left|X_k(f)^2\right|}{T}$

$\left|X_k(f)^2\right| / T$

PSD de la subportadora k

NEON Network of Competence on Internet of Things

Espectro de OFDM

- Calculo de la PSD para portadoras individuales

PSD de la subportadora k

$$|X_k(f)^2|/T$$

La representación en dominio tiempo de la portadora k

$$x_k(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \exp\left(j2\pi f_k \left(t + \frac{T}{2} \right) \right), \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}$$

La transformada continua de FOURIER se puede escribir como:

$$X_k(f) = \frac{1}{\sqrt{N}} T(-1^k) \left[\frac{\sin(\pi(fT-k))}{\pi(fT-k)} \right]$$

Substituting $T = NT_S$

$$X_k(f) = \sqrt{N} T_S (-1)^k \left[\frac{\sin(\pi(fT_S N - k))}{\pi(fT_S N - k)} \right]$$

$$S_k(f) = T_S \left[\frac{\sin(\pi(fT_S N - k))}{\pi(fT_S N - k)} \right]^2$$

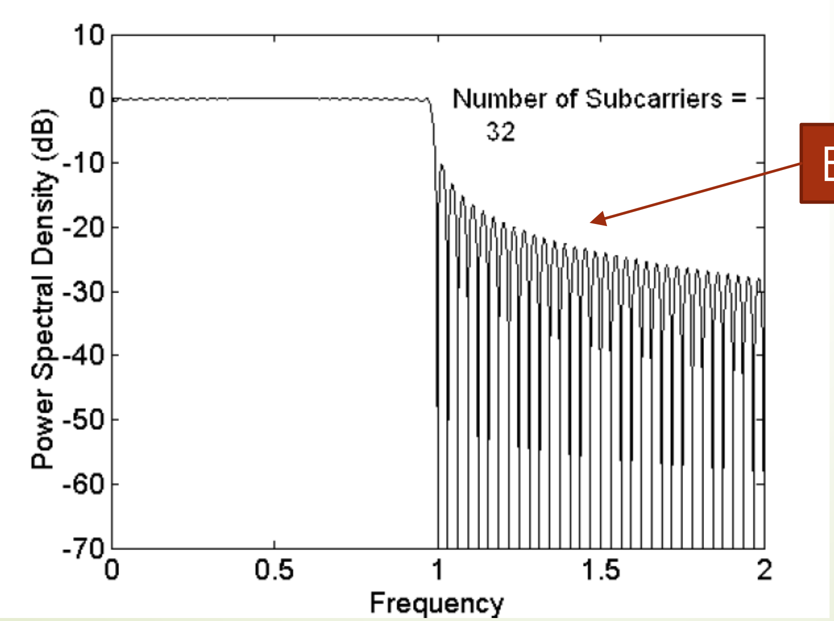
Densidad espectral de potencia de la portadora k

NEON
Network of Competence on Internet of Things

Espectro de OFDM

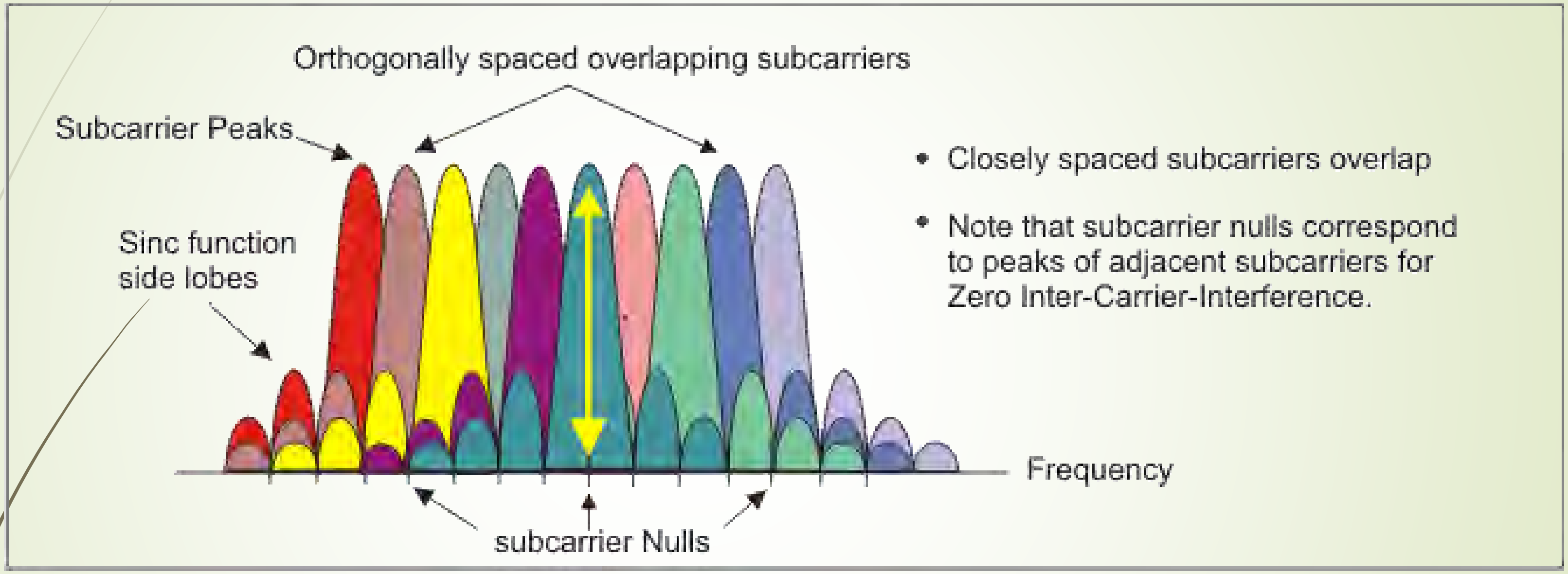
$$S_k(f) = T_S\left[\frac{\sin(\pi(fT_S N - k))}{\pi(fT_S N - k)}\right]^2$$

La PSD de una señal OFDM es la suma del espectro de sus N portadoras



Elevada emisión fuera de band

Espectro de OFDM



OFDM Signal Frequency Spectra

De:

Overview on OFDM Design

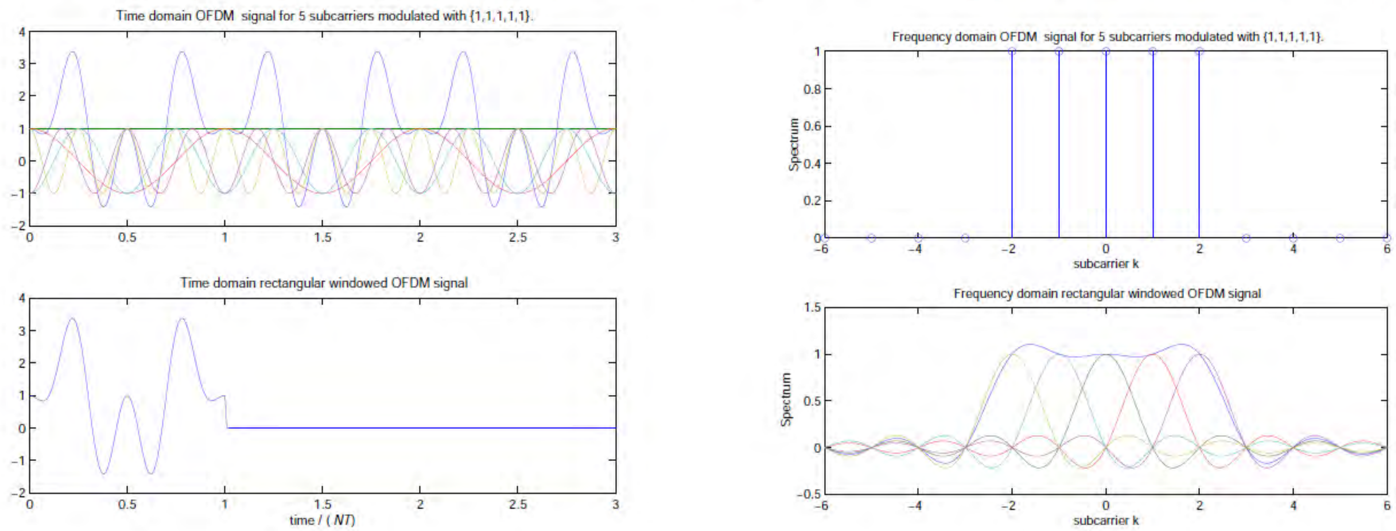
Ho Chin Keong

Communication Systems & Signal Processing
Centre for Wireless Communications
National University of Singapore

Espectro de OFDM

CENTRE FOR WIRELESS COMMUNICATIONS

OFDM symbol windowing - allows other OFDM symbols transmission



(a) Time domain before/after windowing. *(b) Freq. domain before/after windowing.*

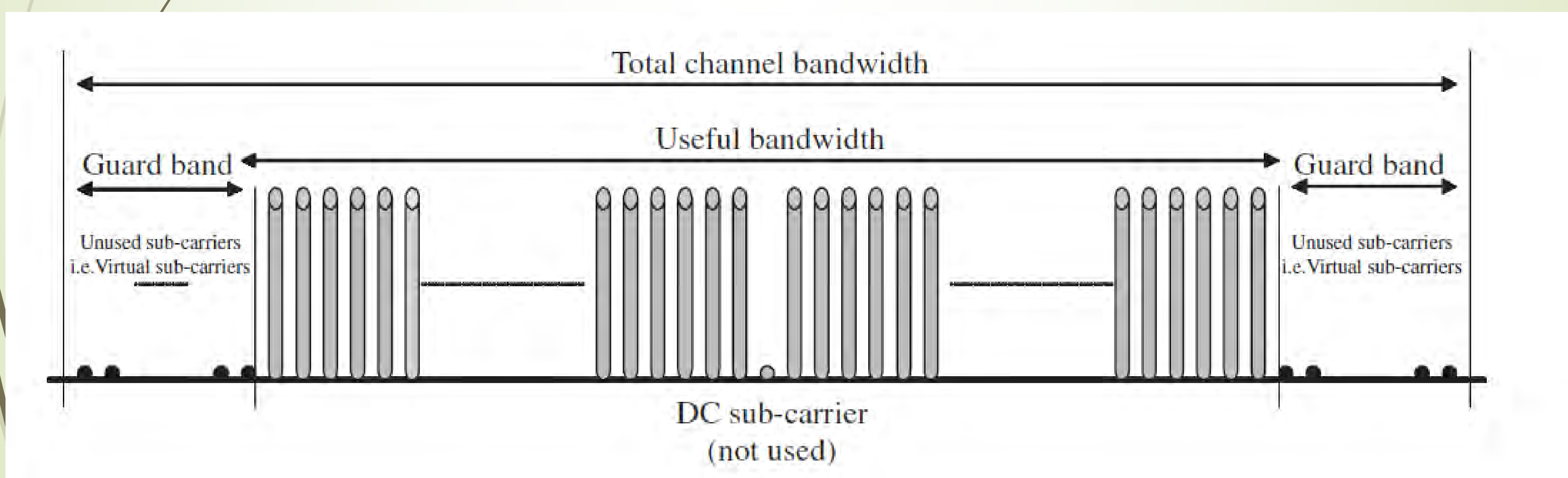
- before windowing: $X(f) = X(k)\delta(f - kf_o)$
- after windowing:

$$X(f)W(f) = X(k)\delta(f - kf_o) \otimes \text{sinc}(f/f_o) = X(k)\text{sinc}(f/f_o - k)$$

Note: X(f) from here on will be assumed to be windowed with rectangular window.

Portadoras virtuales

- Para confinar el ancho de banda de transmisión se utilizan portadoras nulas a ambos del espectro (null-carriers o guard subcarriers).
- Se utilizan tambien sub-portadoras nulas en el centro del espectro (DC)



Conversión D/A y A/D. Muestreo

- OFDM es implementada digitalmente utilizando IFFT/FFT.
- En el transmisor, la señal a la salida de la IFFT es convertida a analógica para luego ser procesada por la etapa de RF (up-conversion y amplificación).
- Los conversores D/A y A/D se deben seleccionar en función de:
  - Tasa de muestreo
  - Resolución
  - Rango dinamico

Resoluciones típicas: A/D >10 bits, D/A>8bits

NEON
Network of Competence on Internet of Things

Conversión D/A y A/D. Muestreo

- La tasa de muestreo debe verificar el criterio de Nyquist

$$f_{samp} = \frac{1}{T_{samp}} = \frac{N}{T_s} = B$$

- En general se utiliza un tasa de muestreo mayor

$$f_{samp} > \frac{N}{T_s}$$

NEON
Network of Competence on Internet of Things

Traslación en frecuencia (Up-conversion)

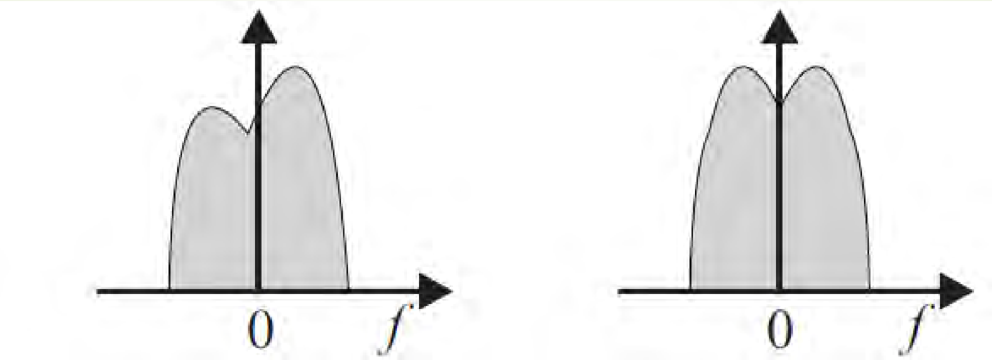
- Señales banda-base

$$\boxed{x(t) = x_I(t) + jx_Q(t)}$$

Si x(t) es real $\Rightarrow$ $\boxed{X(f) = X(-f)}$

Usualmente las señales digitales son señales complejas, debido a que se pueden procesar en forma mas eficiente (DSP).

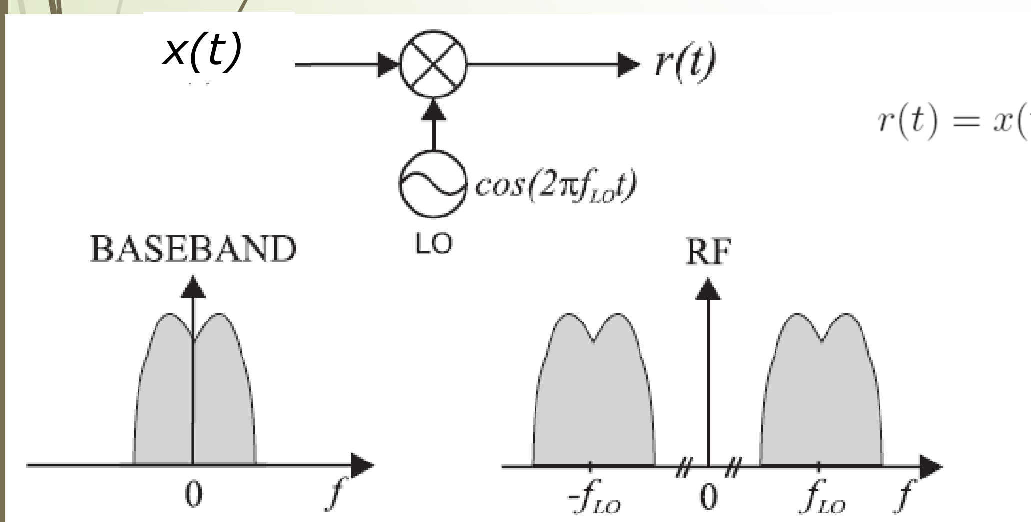
Los canales de comunicaciones son siempre "reales" y señales complejas NO pueden transmitirse sin un procesamiento previo !!!



NEON
Network of Competence on Internet of Things

Traslación en frecuencia (Up-conversion)

- La señal banda-base es traslada a la frecuencia de portadora del sistema.
  - Este proceso se denomina mezclado
  - Mezclado real: *x(t)* y el oscilador local son ambas reales



$$r(t) = x(t)\cos(2\pi f_{LO} t) = x(t)\left(\frac{e^{j2\pi f_{LO} t} + e^{-j2\pi f_{LO} t}}{2}\right)$$

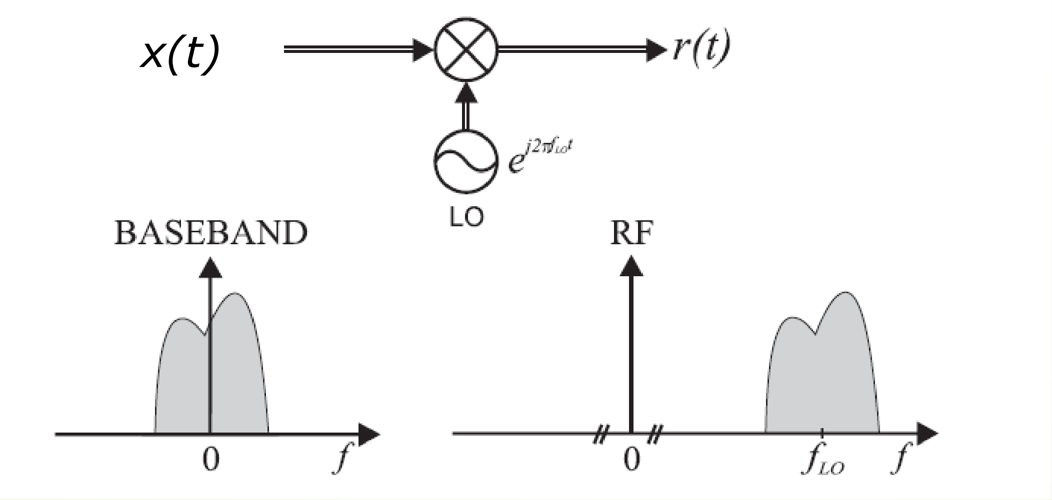
$$R(f) = \frac{1}{2}\left(X(f + f_{LO}) + X(f - f_{LO})\right)$$

NEON
Network of Competence on Internet of Things

Traslación en frecuencia (Up-conversion)

- Mezclado complejo: x*(t)* es multiplicado por una señal de oscilador local de valor complejo

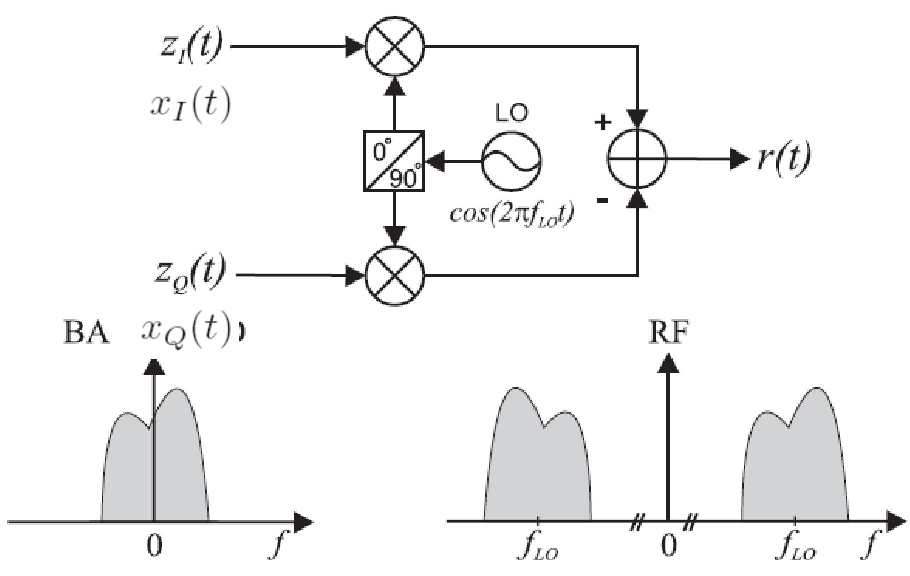
$$r(t) = x(t)e^{j2\pi f_{LO}t} = x(t)(\cos(2\pi f_{LO}t) + j\sin(2\pi f_{LO}t))$$



$$R(f) = X(f - f_{LO})$$

Transmisión pasabanda

- Modulación I/Q es utilizada en los sistemas inalámbricos para transmitir señales complejas sobre canales reales.
  - Las componentes de la señal mensaje son moduladas por dos funciones trigonométricas 90 grados desfasadas.



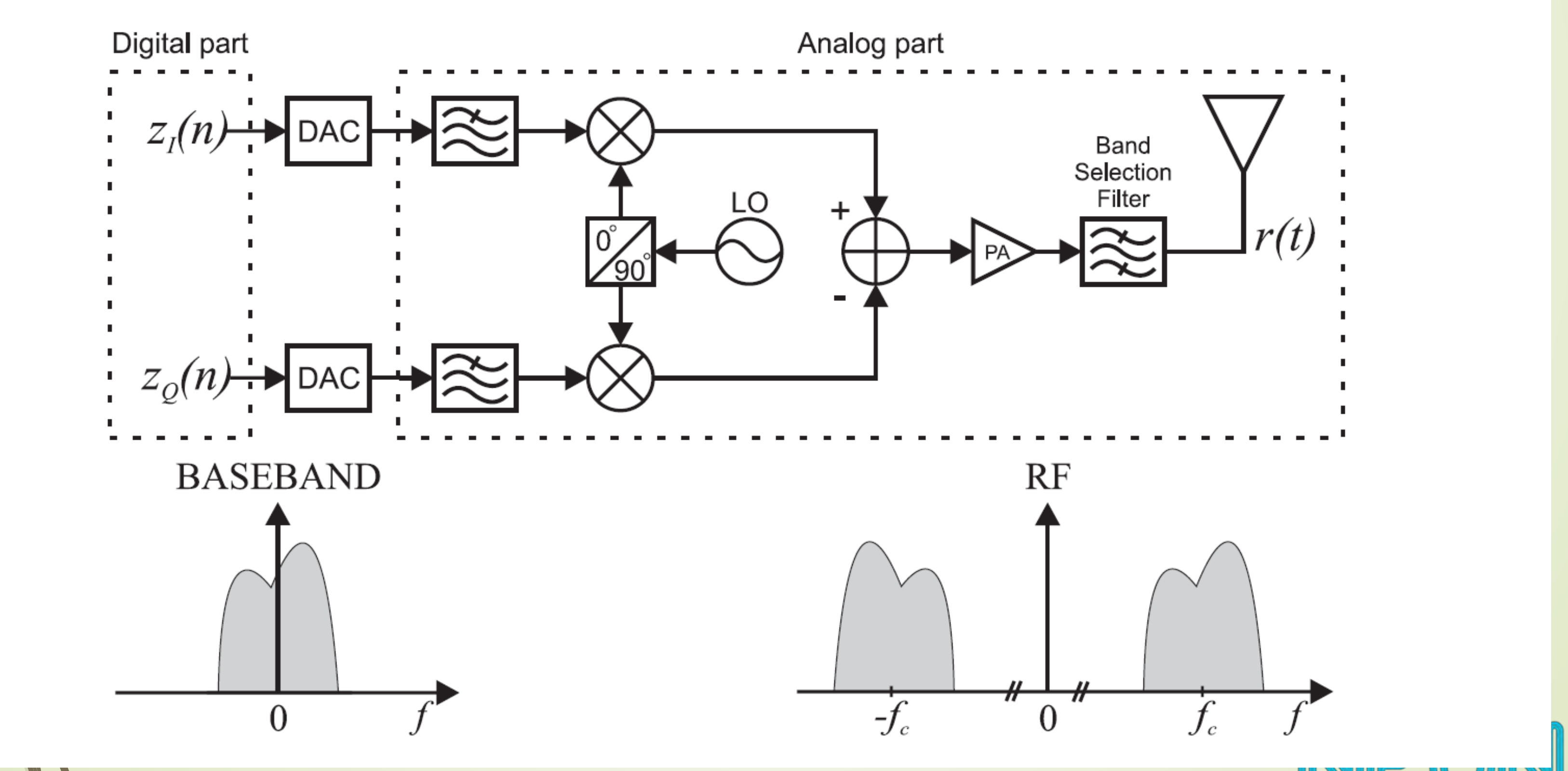
$$
\begin{aligned}
r(t) &= 2x_I(t)\cos(2\pi f_{LO}t) - 2x_Q(t)\cos(2\pi f_{LO}t) \\
r(t) &= x(t)e^{j2\pi f_{LO}t} + x^*(t)e^{-j2\pi f_{LO}t}
\end{aligned}
$$

$$
R(f) = X(f - f_{LO}) + X^*(-f - f_{LO})
$$

Network of Competence on Internet of Things

Implementación modulación IQ

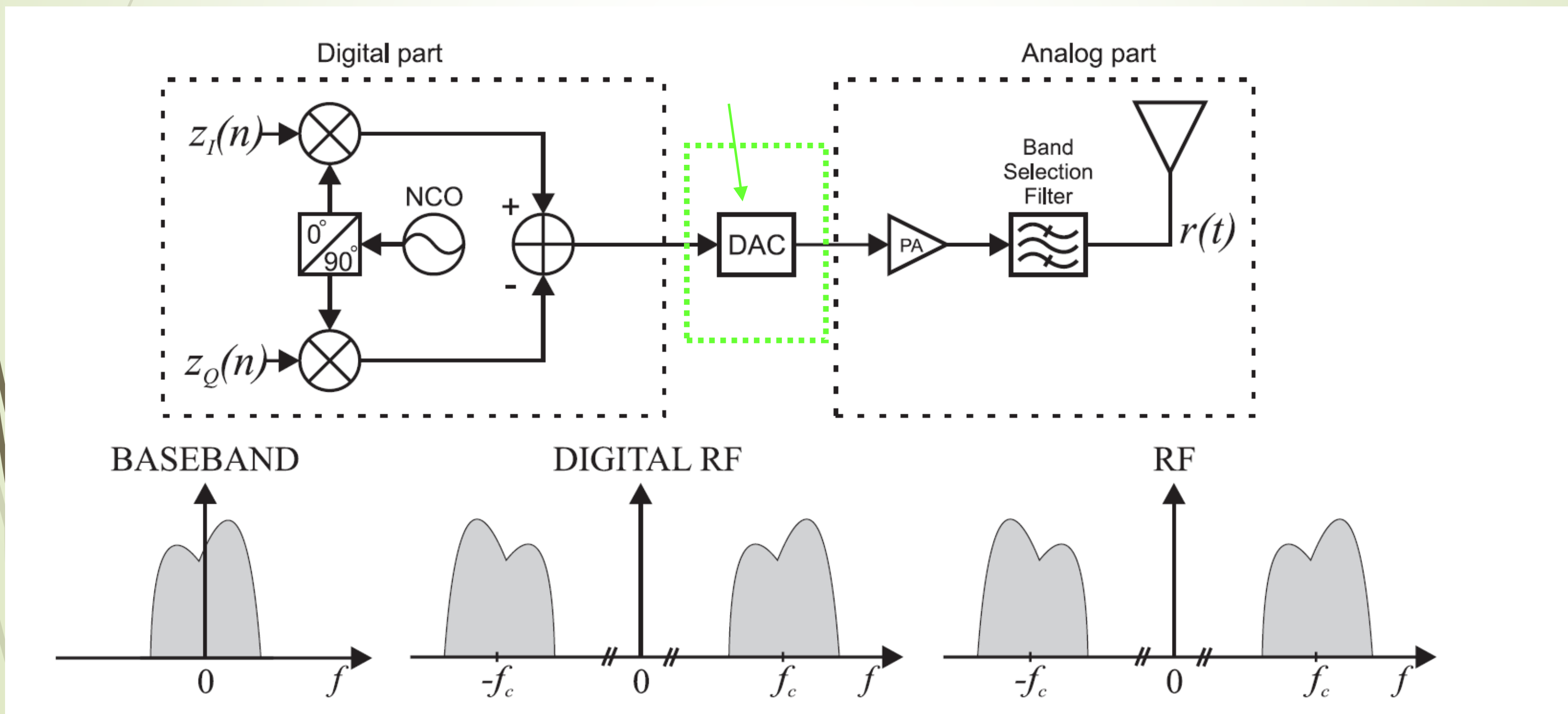
- Conversión directa



Implementación modulación IQ

- Conversión directa (all-digital)

El conversor debe operar a frecuencias de muestreo del orden de la frecuencia de portadora



OFDM

- Mas detalles en las próximas clases