

# Sistemas de comunicaciones II

Francesc Rey Micolau  
Javier Villares Piera

PID\_00197107

Material docente de la UOC


**Francesc Rey Micolau**

Ingeniero de Telecomunicaciones por la Escuela Técnica Superior de Telecomunicaciones de Barcelona (ETSETB) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) en 1997, y doctor en Telecomunicaciones por la UPC en el 2006. Actualmente es profesor agregado en el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones (TSC) de la UPC. Desde 1999 ha impartido docencia en los Estudios de Telecomunicaciones en la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Vilanova i la Geltrú (EPSVG), en la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones y Aeroespacial de Castelldefels (EETAC) y en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicaciones de Barcelona (ETSETB). Su experiencia docente está centrada en las temáticas de procesado de la señal, comunicaciones digitales y comunicaciones espaciales. Sus intereses en investigación se enmarcan también en el área de procesado de la señal aplicado a comunicaciones. Tiene una larga experiencia en proyectos de investigación nacionales e internacionales, y también contratos con empresas nacionales y con la Agencia Espacial Europea. Página personal: <http://gps-tsc.upc.es/comm/frey/>


**Javier Villares Piera**

Ingeniero de Telecomunicaciones por la Escuela Técnica Superior de Telecomunicaciones de Barcelona (ETSETB) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) en 1999, y doctor en Telecomunicaciones por la UPC en el 2005. Actualmente es profesor agregado en el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones (TSC) de la UPC. Desde el 2003 ha impartido docencia en los Estudios de Telecomunicaciones en la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones y Aeroespacial de Castelldefels (EETAC) y en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicaciones de Barcelona (ETSETB). Su experiencia docente está centrada en las temáticas de procesado de la señal, comunicaciones digitales y comunicaciones espaciales. Sus intereses en investigación se enmarcan también en el área de procesado de la señal aplicado a comunicaciones. Tiene una larga experiencia en proyectos de investigación nacionales e internacionales, y también contratos con empresas nacionales y con la Agencia Espacial Europea. La web del grupo de investigación, que incluye la página personal, es la siguiente: <http://spcom.upc.edu>

El encargo y la creación de este material docente han sido coordinados por la profesora: Eugènia Santamaría Pérez (2014)

Primera edición: febrero 2014  
 © Francesc Rey Micolau, Javier Villares Piera  
 Todos los derechos reservados  
 © de esta edición, FUOC, 2014  
 Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona  
 Diseño: Manel Andreu  
 Realización editorial: Oberta UOC Publishing, SL  
 Depósito legal: B-3-2014



Los textos e imágenes publicados en esta obra están sujetos –excepto que se indique lo contrario– a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 España de Creative Commons. Podéis copiarlos, distribuirlos y transmitirlos públicamente siempre que citéis el autor y la fuente (FUOC. Fundación para la Universitat Oberta de Catalunya), no hagáis de ellos un uso comercial y ni obra derivada. La licencia completa se puede consultar en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.es>

## Introducción

En la asignatura *Sistemas de comunicaciones I* (SC1) se explica el esquema general de un sistema de comunicaciones digital, formado por un transmisor, el canal y un receptor. En aquella asignatura ya se anuncian algunos de los temas que estudiaremos con detalle en *Sistemas de comunicaciones II* (SC2) y que en aquellos materiales se obvian para hacer más clarificadora la explicación. Estos temas son la **sincronización del receptor** y la compensación de la dispersión temporal introducida por el canal de comunicaciones, que se denomina **ecualización**.

Además, en esta asignatura introduciremos un concepto nuevo que es muy importante en comunicaciones inalámbricas: la diversidad. Para facilitar el salto de SC1 a SC2, recordemos brevemente a continuación cómo es el sistema de comunicaciones que se estudia en SC1 y cuáles son las piezas nuevas que añadiremos al puzle en esta asignatura.

### 1) Resumen previo

En la asignatura *Sistemas de comunicaciones I* se presentan las principales modulaciones digitales y se evalúan sus prestaciones (probabilidad de error) suponiendo dos cosas:

- Canal ideal.
- Sincronismo perfecto.

Que el canal sea ideal significa que la señal recibida es como la señal transmitida pero tiene menor amplitud (atenuación del canal), nos llega más tarde (retraso del canal) y está afectada por el ruido térmico que añade la electrónica del receptor. Como se ve en SC1, el ruido generado en el receptor tiene una amplitud aleatoria de media cero y distribución gaussiana, y espectralmente es blanco (constante) en toda la banda de la señal útil. Este ruido aparece en todos los sistemas de comunicaciones y se denota con la sigla AWGN (del inglés *additive white gaussian noise*). Por lo tanto, diremos que el canal es ideal si la señal que se recibe responde a la expresión siguiente, en la que  $\alpha$  es la atenuación del canal,  $t_0$  el retardo de propagación y  $n(t)$  el término de ruido AWGN:

Señal transmitida:  $s(t)$

Señal recibida:  $z(t) = \alpha \cdot s(t - t_0) + n(t)$

Lo primero que constatamos es que si el canal es ideal, la parte útil de la señal recibida  $\alpha \cdot s(t - t_0)$  mantiene la misma forma que tenía la señal transmitida. Es decir, si se transmite un pulso con forma rectangular, el pulso recibido será también un pulso con forma rectangular que solo habrá sido atenuado y retrasado por el canal. Cuando el canal no distorsiona la forma de la señal, es posible diseñar la señal transmitida  $s(t)$  de modo que el receptor pueda decidir la secuencia de símbolos transmitidos sin que se produzca interferencia intersimbólica (ISI).

Como se ve en SC1, la condición para que no haya ISI es que en los instantes de muestreo escogidos solo el pulso correspondiente al símbolo de interés sea diferente de cero. Para que esto sea posible hay que diseñar con mucho cuidado el pulso que se vaya a utilizar (criterio de Nyquist); el canal no tiene que distorsionar la forma de los pulsos transmitidos (canal ideal) y hay que escoger con mucha precisión los instantes de muestreo. La elección de los instantes de muestreos para evitar la ISI y minimizar la probabilidad de error es parte del sincronismo del receptor que estudiaremos en el módulo didáctico “Sincronización”.

En SC1 se calcula la probabilidad de error de las diferentes modulaciones digitales considerando que el canal es ideal, y el sincronismo perfecto. En aquellas situaciones en las que el canal distorsiona los pulsos transmitidos y/o el sincronismo del receptor no da los instantes de muestreo óptimos, aparece un término de ISI que incrementa la probabilidad de error del sistema. Si queremos que esta degradación sea pequeña, el receptor tiene que hacer dos cosas:

- **Garantizar un sincronismo preciso**, aunque el receptor tenga que sincronizarse usando como referencia una señal que es ruidosa: la señal recibida. La manera de hacerlo se estudia en el módulo didáctico “Sincronización”.
- **Reducir la distorsión** introducida por el canal tanto como sea posible. Para ello, el receptor tendrá que compensar la distorsión del canal mediante un **ecualizador**. En el módulo didáctico “Canal de comunicaciones” explicaremos cómo distorsionan el canal los pulsos transmitidos, y en el módulo didáctico “Ecuación de canal”, cómo hay que diseñar el ecualizador para combatir la distorsión generada por el canal de comunicaciones.

## 2) Sincronismo

Además del sincronismo explicado anteriormente, cuyo objetivo es muestrear la señal recibida en los instantes adecuados, el receptor tiene que sincronizar otros parámetros antes de que se puedan decidir con fiabilidad los símbolos de información transmitidos. En concreto, si se hace una transmisión paso banda, el receptor deberá sincronizar la fase y frecuencia de su oscilador local con la fase y frecuencia de la portadora sinusoidal recibida. Para hacerlo, el receptor tiene que procesar la señal de entrada para estimar la fase y la frecuencia de la portadora. Como la señal recibida es ruidosa, la sincronización que

### Reflexión

Hay canales de comunicaciones que son prácticamente ideales; en estos casos, no habrá que ecualizar el canal. Dos ejemplos importantes son las comunicaciones fijas por satélite y las comunicaciones por cable a baja velocidad. Sin embargo, aunque el canal sea ideal, siempre es necesario que el receptor se sincronice con la señal recibida antes de decidir qué datos son transmitidos. Cuando el canal no es ideal, la tarea del sincronizador la hace el propio ecualizador, que no solo reduce la distorsión del canal sino que también busca los instantes de muestreo óptimos.

se consiga no será perfecta y los errores de sincronismo de fase y frecuencia incrementarán la probabilidad de error de las modulaciones paso banda estudiadas en SC1.

En el módulo didáctico “Sincronización” estudiaremos en detalle cuáles son los parámetros que el receptor tiene que sincronizar y analizaremos cómo se degrada la probabilidad de error cuando hay errores de sincronismo. Asimismo, explicaremos brevemente la teoría matemática con la que se diseñan los algoritmos de sincronización más utilizados, y presentaremos algunos ejemplos de esquemas de sincronización prácticos.

### 3) Canal de comunicaciones

Aunque el modelo de canal ideal estudiado en SC1 es válido en algunos casos importantes, como son las comunicaciones fijas por satélite, en otros muchos sistemas de comunicaciones digitales, el canal impone importantes dificultades para la transmisión de la información, dificultades que todavía no hemos estudiado. Entre otras, en esta asignatura estudiaremos las dos que consideramos más importantes, que son la distorsión y los desvanecimientos o *fadings*:

**a) Distorsión.** Como hemos explicado anteriormente, cuando el canal distorsiona los pulsos transmitidos, aparece interferencia intersimbólica (ISI) en el receptor y la probabilidad de error aumenta. En muchos sistemas de comunicaciones, el origen de esta distorsión es la llamada *propagación multicamino* (o *multipath*). La propagación multicamino provoca la dispersión temporal de la señal transmitida porque hace que en recepción se superpongan múltiples réplicas de la señal transmitida que llegan con diferente retraso y amplitud. Por esta razón, los pulsos recibidos duran más tiempo y se interfieren los unos con los otros en los instantes de muestreo, y generan ISI.

En el dominio de la frecuencia, un canal dispersivo se puede modelizar como un filtro que deja pasar unas frecuencias mejor que otras. Por esta razón, los canales dispersivos en el tiempo también se denominan *canales selectivos en frecuencia*. En el módulo didáctico “Canal de comunicaciones” se explicarán todos estos conceptos con detalle y con mayor rigor matemático. Asimismo, en el módulo didáctico “Ecuación de canal” se explicarán algunas maneras de contrarrestar la distorsión del canal mediante un ecualizador. Cabe señalar que se denomina *ecualizador* porque idealmente tendría que invertir el efecto del canal de modo que el canal resultante tenga una respuesta frecuencial igual para todas las frecuencias.

**a) *Fadings* (desvanecimientos).** Debido a la propagación multicamino y los obstáculos que se puedan interponer entre el transmisor y el receptor, el nivel de la señal recibida puede ser mucho más bajo que el nivel que habría si la señal se propagara por un canal ideal. Cuando el nivel de la señal recibida se reduce considerablemente, se habla de un *fading* o desvanecimiento, y cuando esto ocurre, es muy difícil que se pueda demodular correctamente la señal.

Peor aún es, si este *fading* afecta a todas las frecuencias de la señal, ya que no se podrá hacer otra cosa que esperar que el nivel de la señal se recupere después de movernos unos cuantos metros o tras dejar pasar un cierto tiempo. En el módulo didáctico “Canal de comunicaciones” estudiaremos la variabilidad temporal y espacial del canal y aprenderemos cuánto nos tenemos que mover en el tiempo o en el espacio para que el canal se haya recuperado de un *fading*. Este planteamiento nos llevará al concepto de *diversidad*, que desarrollaremos en el módulo didáctico “Comunicaciones con diversidad”.

Por otro lado, si el *fading* es selectivo en frecuencia, aparecerá ISI, y tendremos que eliminar este ISI mediante un ecualizador (módulo didáctico “Ecuación de canal”) o mediante otros esquemas que exploten la diversidad frecuencial del canal (módulo didáctico “Comunicaciones con diversidad”). En todos estos casos nos interesa que la respuesta del canal varíe lentamente para tener tiempo de estimar con suficiente exactitud la distorsión y así poderla contrarrestar.

#### 4) Interferencia intersimbólica y ecualización

Nos detenemos aquí un momento en el problema de la distorsión que se produce cuando el canal es dispersivo en el tiempo, o equivalentemente, selectivo en frecuencia. Consideramos asimismo que el canal varía lentamente y es, por lo tanto, factible diseñar un filtro ecualizador que compense la distorsión del canal y reduzca el efecto de la ISI. La pregunta que se nos plantea entonces es cómo hay que diseñar este filtro ecualizador.

En el módulo didáctico “Ecuación de canal” se estudian dos criterios para el diseño de los coeficientes del filtro ecualizador. El primero de los criterios se denomina *forzador de ceros*, y pretende eliminar toda la ISI que se pueda. El problema de este criterio es que puede acabar amplificando demasiado el término de ruido si el canal tiene componentes frecuenciales muy atenuadas. Para evitar la amplificación del ruido, conviene diseñar los coeficientes del filtro ecualizador usando un criterio que tenga en cuenta cuál es el nivel de ruido del receptor. Este criterio se denota por la sigla MMSE (del inglés: *minimum mean squared error*) y se explicará en el módulo didáctico “Ecuación de canal”.

Los dos esquemas presentados hasta ahora son muy sencillos porque se pueden implementar mediante un filtro digital que reduzca la distorsión y a continuación un circuito decisor que funcione símbolo a símbolo. En escenarios complicados, si se quiere conseguir la mínima probabilidad de error, se tiene que usar el esquema de ecualización óptimo denominado MLSE (del inglés: *maximum likelihood sequence estimation*). Como su nombre indica, la ecualización no se hace aparte, sino que forma parte del proceso de decisión. Además, los símbolos no se deciden uno por uno, sino que se decide toda la secuencia de símbolos a la vez usando el algoritmo de Viterbi.

Todos estos algoritmos de ecualización, y algún otro, se explicarán con todo detalle en el módulo didáctico “Ecualización de canal”.

### 5) *Fadings* y diversidad

Por último, dedicaremos un tiempo a hablar de los *fadings* y de cómo los podemos combatir. Para simplificar al máximo la explicación, consideremos que el canal no es selectivo en frecuencia. Esto quiere decir que no hay distorsión, y que por lo tanto no es necesario ecualizar el canal. En esta situación, cuando se produce un *fading*, la *SNR* del receptor se reduce enormemente y no es posible tomar ninguna decisión fiable sobre el valor de los símbolos de información transmitidos.

Antes de buscar una solución contra los *fadings*, tenemos que saber por qué se producen. Si el *fading* se debe al hecho de que un receptor de radiofrecuencia se encuentra detrás de un obstáculo que le impide ver el transmisor, la única solución es esperar que el transmisor, el receptor o el obstáculo mismo se muevan y volvamos a tener visión directa entre el transmisor y el receptor. El problema es que esto puede tardar un buen rato.

En cambio, si el *fading* se ha producido porque las diferentes componentes del multicamino se han sumado en contrafase, solo con que el receptor se desplace una pequeña distancia, esta suma dejará de ser destructiva y la *SNR* del receptor volverá a ser aceptable. Ni siquiera hace falta que el receptor se mueva; si el receptor tiene dos antenas lo bastante separadas, es muy poco probable que las dos experimenten el *fading* al mismo tiempo.

En ambos casos, hemos aprendido que si me desplazo una pequeña distancia en el tiempo o en el espacio, lo más probable es que salga de la zona de *fadings*. Por lo tanto, para luchar contra los *fadings* puedo transmitir cada símbolo varias veces con la esperanza de que alguna de las copias del símbolo se reciba sin *fading*. Esta estrategia de transmisión recibe el nombre de *diversidad* y será explicada en el módulo didáctico “Comunicaciones con diversidad” con mayor detenimiento.

En el párrafo anterior hemos considerado dos formas de diversidad diferentes: la temporal y la espacial. Aunque hablamos del mismo canal físico, en el primer caso disponemos de una sola antena y tenemos que esperar un cierto tiempo para salir del *fading*. En cambio, en el segundo caso disponemos de dos antenas que ven simultáneamente atenuaciones independientes. Esta segunda forma de diversidad es muy interesante en escenarios con poca movilidad y es una de las soluciones adoptadas en el estándar IEEE 802.11n (wifi) para conseguir diversidad espacial en redes inalámbricas de área local.

La tecnología utilizada en este estándar IEEE 802.11n se conoce por la sigla MIMO (del inglés: *multiple input multiple output*) y ha sido la gran revolución de las últimas décadas en el diseño de la capa física de los sistemas de comu-

nicaciones digitales. Solo a modo de introducción, en nuestro contexto la palabra MIMO quiere decir que el transmisor y el receptor disponen de múltiples antenas. Tal como demostraremos en el módulo didáctico “Comunicaciones con diversidad”, el uso de múltiples antenas en transmisión y recepción no solo permite conseguir diversidad espacial para combatir los *fadings* sino que también permite aumentar la velocidad de transmisión del sistema sin necesidad de incrementar el ancho de banda.



## Objetivos

El objetivo general de la asignatura es profundizar en la comprensión del funcionamiento de los sistemas de comunicaciones digitales actuales, tomando como punto de partida los conocimientos básicos adquiridos en la asignatura *Sistemas de comunicaciones I*. Este objetivo general se desglosa en los objetivos siguientes, cada uno de ellos asociado principalmente a un módulo didáctico:

- 1.** Entender la necesidad de sincronizar el receptor antes de establecer la comunicación con el transmisor. Conocer qué parámetros se tienen que sincronizar y cuál es la degradación en la comunicación cuando esta sincronización no se hace suficientemente bien.
- 2.** Conocer cómo se modeliza matemáticamente el canal de comunicaciones. En concreto, entender que el canal de comunicaciones puede introducir *fadings* en el nivel de la señal recibida. Comprender que la respuesta del canal puede variar en el tiempo y dar lugar a *fadings* variantes en el tiempo. Del mismo modo, entender que estos *fadings* pueden afectar a todo el ancho de banda de la señal, o solo a algunas frecuencias (canal selectivo en frecuencia).
- 3.** Entender que cuando el canal es selectivo en frecuencia aparece interferencia intersimbólica (ISI) en el receptor, que este tiene que intentar eliminar mediante un ecualizador si se quiere mantener cierta fiabilidad en la comunicación. Es objetivo de la asignatura conocer también los esquemas de ecualización más habituales.
- 4.** Entender el concepto de *diversidad* y cómo se puede usar para mejorar la fiabilidad de un sistema de comunicaciones cuando el canal de comunicaciones introduce *fadings*. Conocer los diferentes tipos de diversidad: temporal, frecuencial y espacial (MIMO).

## Contenidos

### Módulo didáctico 1

#### **Sincronización**

Francesc Rey Micolau y Javier Villares Piera

1. Motivación
2. Técnicas de sincronización
3. Sincronismo de frecuencia de portadora
4. Sincronismo de símbolo
5. Sincronismo de fase de portadora
6. Sincronismo de trama
7. Conclusiones

### Módulo didáctico 2

#### **Canal de comunicaciones**

Francesc Rey Micolau y Javier Villares Piera

1. Respuesta impulsional y respuesta frecuencial del canal
2. Canales variantes en el tiempo
3. Características de los canales variantes en el tiempo
4. Modelización de los canales variantes en el tiempo
5. Mitigación de la distorsión del canal (ecualización y diversidad)

### Módulo didáctico 3

#### **Ecualización de canal**

Francesc Rey Micolau y Javier Villares Piera

1. Ecualización y tipo de ecualizadores
2. Ecualizadores lineales
3. Ecualizadores no lineales

### Módulo didáctico 4

#### **Comunicaciones con diversidad**

Francesc Rey Micolau y Javier Villares Piera

1. Motivación
2. Diversidad temporal
3. Diversidad frecuencial
4. Diversidad espacial
5. Conclusiones

## **Bibliografía**

**Mengali, U.; Andrea, A. N. de** (1997). *Synchronization techniques for digital receivers*. Nueva York, etc.: Plenum Press.

**Proakis, J. G.; Salehi, M.** (2002). *Communication systems engineering* (2.<sup>a</sup> ed.). Upper Saddle River: Prentice Hall.

**Proakis, J.** (2008). *Digital communications* (5.<sup>a</sup> ed.). Boston, etc.: McGraw Hill.

**Steele, R.** (1998). *Mobile radio communications* (2.<sup>a</sup> ed.). Chichester: John Wiley & Sons.

**Tse, D.; Viswanath, P.** (2005). *Fundamentals of wireless communications*. Cambridge: Cambridge University Press.

