

DETECCIÓN DE SEÑALES DE COMUNICACIONES

COMUNICACIONES DIGITALES

PRÁCTICA 1

Objetivos

La transmisión de información en sistemas de comunicaciones digitales, tanto en banda base como en paso banda, puede verse afectada por varios tipos de distorsión. Algunas fuentes de distorsión, como el ruido o el efecto de distorsión lineal del canal, son inherentes a la propia transmisión, mientras que otros pueden deberse a errores en algún módulo del sistema de comunicaciones.

En esta práctica, que se realizará en las dos primeras sesiones de prácticas del curso, se simularán en Matlab algunos de los efectos de distorsión que se producen durante la transmisión, de modo que el alumno aprenderá a simular a nivel básico un sistema digital de comunicaciones, y a analizar las consecuencias de algunos parámetros del mismo a través de las simulaciones realizadas.

Los materiales a entregar y los plazos para la entrega se especificarán en la plataforma Aula Global.

Funciones Matlab

Librería de Comunicaciones

Para la realización de la práctica se utilizarán algunas funciones disponibles en la librería de comunicaciones de Matlab (*Communications Toolbox*). A continuación se enumeran las funciones más importantes.

Nombre	Descripción breve
awgn	Suma ruido blanco y gaussiano a un vector de señal
qammod	Modula un señal de entrada utilizando una QAM con el orden de modulación M especificado
qamdemod	Demodula una señal QAM con el orden M especificado
biterr	Compara dos vectores binarios y calcula el número de errores y la tasa de error binaria (BER)
scatterplot	Dibuja un diagrama de dispersión

Para encontrar más información sobre estas funciones o sobre cualquier otra función, puede utilizar el comando `help` de Matlab.

El fichero “DemoP1.m”, disponible en Aula Global, realiza una simulación básica de un sistema digital de comunicaciones (simulado en tiempo discreto utilizando el modelo de canal discreto equivalente).

Otras funciones Matlab de interés

Algunas funciones de Matlab pueden ser interesantes para el desarrollo de la práctica. A continuación se describen algunas de ellas.

Nombre	Descripción breve
help	Proporciona información sobre cualquier función (help nombre.funcion)
rand	Genera números aleatorios con distribución uniforme
randn	Genera números aleatorios con distribución gaussiana
randi	Genera números enteros aleatorios en un rango especificado
plot	Representa una función continua en el tiempo
stem	Representa una función discreta en el tiempo
semilogy	Representa una función con una escala logarítmica en el eje de ordenadas
find	Encuentra los índices de los elementos de un vector que cumplen una condición
conv	Realiza la convolución de dos secuencias discretas
print	Permite guardar una figura en diferentes formatos gráficos
inv	Calcula la inversa de una matriz
pinv	Calcula la pseudo-inversa de Moore-Penrose de una matriz
transpose	Calcula la transpuesta de una matriz o vector
ctranspose	Realiza la operación de transposición y conjugado de una matriz (operador hermítico)
xlabel	Permite poner una etiqueta en el eje de abscisas de una figura
ylabel	Permite poner una etiqueta en el eje de ordenadas de una figura
title	Permite poner un título sobre una figura
legend	Permite etiquetar con una leyenda cada una de las curvas de una figura

Para encontrar más información sobre estas funciones o sobre cualquier otra función, puede utilizar el comando help de Matlab.

1. Efecto del ruido - Relación E_b/N_0

El ruido es uno de los principales factores que degradan las prestaciones en un sistema de comunicaciones. La magnitud de la degradación depende de la estadística y distribución de la señal de ruido, la potencia de la misma y de la potencia de la señal transmitida. En cuanto a la estadística y distribución del ruido, lo más común es modelar el ruido $n(t)$ que se suma a la señal modulada como un proceso aleatorio estacionario, blanco, gaussiano y con densidad espectral de potencia $N_0/2$. Cuando en el receptor se utiliza un filtro $f(t)$ cuya función de ambigüedad temporal, $r_f(t) = f(t) * f(-t)$, cumple el criterio de Nyquist para la ausencia de ISI a tiempo de símbolo T , esto implica que el ruido muestreado a la salida del demodulador, $z[n]$, es también blanco y gaussiano, y que su densidad espectral de potencia toma un valor constante, $S_z(e^{j\omega}) = \sigma_z^2$, que coincide con la varianza de la distribución gaussiana y con la potencia de la señal, siendo $\sigma_z^2 = \frac{N_0}{2}$ para transmisiones en banda base y $\sigma_z^2 = N_0$ para transmisiones paso banda¹.

En cuanto a las potencias de la señal transmitida y la potencia del ruido, la relación entre ambas se cuantifica con diferentes medidas. Cuando se trabaja en tiempo discreto, una de las más comunes es la denominada *relación energía de bit / N_0* , o relación E_b/N_0 . Esta relación se define como el cociente entre la energía media por bit transmitido y el valor de N_0 , que en este caso es

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{E_s}{m N_0},$$

donde $E_s = E[|A[n]|^2]$ es la energía media por símbolo de la constelación que se transmite, que tendrá M posibles valores, y $m = \log_2(M)$ es el número de bits por símbolo en dicha constelación.

¹Recuerde que en este caso el ruido es un proceso complejo, con la parte real modelando el ruido en la componente en fase, $z_I[n]$, y la parte imaginaria modelando el ruido en la componente en cuadratura, $z_Q[n]$, y que ambas componentes de ruido son independientes y con varianza $\sigma_{z_I}^2 = \sigma_{z_Q}^2 = \frac{N_0}{2}$.

Habitualmente, esta relación se suele expresar en decibelios, siendo este valor en decibelios

$$\frac{E_b}{N_0}(\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{E_b}{N_0}.$$

A medida que aumenta la potencia de la señal de ruido, se incrementa la probabilidad de cometer errores en la transmisión, ya que la observación recibida a la salida del demodulador, $q[n]$, se aleja más en media del valor del símbolo que se ha transmitido. La intensidad de ruido existente, en sistemas de comunicaciones en paso banda, puede visualizarse mediante los diagramas de dispersión, que representan la observación de componente en fase, $q_I[n]$, frente a la observación de la componente en cuadratura, $q_Q[n]$.

Se deberá representar el diagrama de dispersión para una modulación 16-QAM transmitida sobre un canal gaussiano, sin distorsión lineal, para varios valores de relación E_b/N_0 , en concreto para los siguientes valores

- 20 dB
- 15 dB
- 10 dB
- 5 dB

Para cada uno de los valores de relación E_b/N_0 , además, deberá proporcionar el valor de N_0 .

2. Efectos de la interferencia intersimbólica (ISI)

Uno de los efectos más habituales en los sistemas de comunicaciones digitales es la interferencia intersimbólica (ISI, *Inter-Symbol Interference*), que se produce debido a la distorsión lineal que introducen los canales de comunicaciones. Es bien conocido que el principal efecto de la interferencia intersimbólica es que se genera en el receptor una constelación expandida diferente a la constelación de símbolos que se ha transmitido. Este efecto se puede visualizar en sistemas de comunicaciones en paso banda también mediante los diagramas de dispersión.

La degradación introducida por la ISI en un sistema de comunicaciones depende de varios factores, como la longitud del canal discreto equivalente, la amplitud relativa de los términos del mismo respecto al término principal, y del orden de la constelación que se transmite. En este apartado se analizará el efecto de estos factores representando diagramas de dispersión obtenidos en la transmisión sobre distintos canales discretos equivalentes.

En primer lugar, para una modulación 4-QAM se obtendrá el diagrama de dispersión cuando se transmite con una relación E_b/N_0 de 40 dB a través del siguiente canal discreto equivalente con longitud 2 ($K_p = 1$)

$$p[n] = \delta[n] + a \delta[n - 1],$$

para varios valores de a , en concreto $a \in \{\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}\}$. Explique el efecto que supone incrementar el valor de a .

A continuación, se repetirá el apartado anterior con una modulación 16-QAM y se explicará la diferencia que se observa con respecto al caso anterior y las conclusiones que se extraen al respecto.

Finalmente, se probará el efecto de incrementar la longitud del canal discreto equivalente, para lo que se repetirán los apartados anteriores con el canal

$$p[n] = \delta[n] + a \delta[n - 1] + \frac{a}{4} \delta[n - 2].$$

3. Efecto del ruido en las probabilidades de error

El ruido afecta de forma distinta a las constelaciones en función de su tamaño, ya que para una misma relación E_b/N_0 la distancia relativa entre símbolos (o el nivel de ruido si esta distancia se mantiene fija) cambian. Además, a nivel de bit, es relevante el tipo de asignación binaria que se utilice. En esta sección se analizarán las diferencias existentes. Para ello, representará la tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*) como una función de la relación E_b/N_0 en dB para distintas constelaciones utilizando para la asignación binaria una codificación de Gray y una codificación secuencial².

Se representará la probabilidad de error de bit para valores relación E_b/N_0 en el rango entre 0 y 20 dB en pasos de 1 dB, utilizando una codificación de Gray, para los siguientes casos

- Modulaciones 4-QAM, 16-QAM, y 64-QAM en paso banda (representadas en una misma figura para facilitar la comparación).

Dada la evolución exponencial de la probabilidad de error, puede resultar de utilidad el comando de Matlab **semilogy**, que representa el eje de ordenadas en escala logarítmica.

También es interesante comprobar como evoluciona la relación entre la probabilidad de error de símbolo, P_e , y la probabilidad de error de bit, BER, a medida que aumenta la relación señal a ruido. Para ello, el alumno representará dicha relación, en función de E_b/N_0 , para las distintas modulaciones QAM.

Finalmente, se repetirán los apartados anteriores utilizando una asignación binaria secuencial, y se comentarán las diferencias observadas. Además, para la modulación 16-QAM, se compararán las asignaciones binarias utilizadas para cada símbolo (en una figura o en un listado).

4. Probabilidades de error con receptores no coherentes

Cuando en un sistema de comunicaciones digitales paso banda las fases de las portadoras en recepción están sincronizadas (con la misma fase) que la de las portadoras utilizadas en transmisión para la modulación, se dice que el receptor es un receptor coherente. Cuando hay una cierta diferencia de fase, se dice que el receptor no es coherente. El efecto de la diferencia de fase en un receptor no coherente es que la constelación recibida tiene un giro con un ángulo igual a la fase. Esto, naturalmente, se traduce en una degradación de las prestaciones en el receptor.

Para observar este efecto, para una modulación 16-QAM con una relación E_b/N_0 de 12 dB, el alumno representará la BER como una función del desfase entre las portadoras, dando valores a dicho desfase en el rango entre -180° y 180° en pasos de 5° .

5. Efecto de la ISI en las probabilidades de error

La interferencia intersimbólica también afecta a las prestaciones de un sistema. A la hora de determinar la afectación, son relevantes los valores relativos de los coeficientes del canal discreto equivalente y el retardo más adecuado para la decisión.

Para comprobarlo, se calculará la probabilidad de error para una modulación 16-QAM transmitiendo sobre el canal discreto equivalente

$$p[n] = -\frac{b}{2} \delta[n] + b \delta[n-1] + a \delta[n-2] + b \delta[n-3] - \frac{b}{2} \delta[n-4]$$

²Para que el valor de probabilidad de error obtenido sea relativamente fiable, habrá que haber observado un número mínimo de 100 errores a la hora de evaluar las prestaciones. No es necesario que considere probabilidades de error menores de 10^{-6} .

En particular:

1. Para $a = 1$ y $b = 1/16$, con una relación E_b/N_0 de 15 dB, represente la BER y la probabilidad de error de símbolo en función del retardo de decisión d , para $d \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$. Explique el resultado obtenido, comparándolo con el caso de transmisión sin ISI.
2. Repita el apartado anterior para $b = 1/4$.
3. Para $a = 1/2$ y $b = 1/32$, con una relación E_b/N_0 de 21 dB, repita el apartado anterior. Para que el sistema obtenga las mejores prestaciones en este caso, indique qué hay que hacer ahora en el receptor de comunicaciones diferente del caso en el que $a = 1$. Explique los resultados obtenidos, discutiendo el efecto de los valores de a , b y la relación E_b/N_0 .

6. Igualador de canal (Opcional)

Cuando en un sistema de comunicaciones la complejidad de un detector de secuencias de máxima verosimilitud hace inviable su implementación, una solución sub-óptima pero con una complejidad asumible es la utilización de un igualador de canal. En esta sección se va a comprobar el funcionamiento del sistema con un igualador de canal.

Considerando el canal discreto equivalente

$$p[n] = 0.47 \delta[n] + \delta[n - 1] + 0.47 \delta[n - 2],$$

se diseñará un igualador de canal con 11 coeficientes ($K_w = 10$), y con un retardo $d = 5$ utilizando los siguientes criterios de diseño:

- Criterio forzador de ceros
- Criterio de mínimo error cuadrático medio³

Se evaluarán las prestaciones de ambas soluciones para una modulación 16-QAM en función de la relación E_b/N_0 para un rango de la misma entre 0 y 25 dB (pasos de 5 dB), y se compararán con las obtenidas en el caso sin interferencia intersimbólica.

Es interesante ver cómo evolucionan los coeficientes del igualador MMSE (y de la respuesta conjunta canal-igualador) con la relación E_b/N_0 y compararlos con los del igualador ZF, que es independiente del ruido. Compare la respuesta del igualador ZF con las respuestas de los igualadores MMSE para relaciones E_b/N_0 de 0 dB, 15 dB y 25 dB.

Referencias

- *Comunicaciones Digitales*. A. Artés, F. Pérez González, J. Cid Sueiro, R. López Valcarce, C. Mosquera Nartallo y F. Pérez Cruz. Ed. Pearson Educación. 2007.
- *Communication Systems Engineering*. J. G. Proakis y M. Salehi. Prentice-Hall. 1994.

³Note que en este caso la solución del igualador será diferente para cada valor de E_b/N_0 .