

# Laboratorio 3: Modulación pasabanda de señales binarias

Profesor: Rodrigo Muñoz Lara  
Escuela de Informática y Telecomunicaciones  
Universidad Diego Portales

**Resumen**—En este laboratorio se estudian las técnicas de señalización pasabanda. Una señal pasabanda de comunicación se obtiene al modular una señal bandabase analógica o digital dentro de una portadora. Se utiliza la envolvente compleja debido a que puede representar cualquier tipo de señal pasabanda, que es la base para la comprensión de los sistemas de comunicación digitales y analógicos. Este laboratorio también describe los aspectos prácticos de los bloques de construcción empleados en los sistemas de comunicación, como filtros, mezcladores, moduladores y convertidores elevadores y reductores. Se concluye con descripciones de transmisores, receptores y radio definidas por software.

**Palabras Claves**—envolvente compleja, modulación pasabanda.

## I. INTRODUCCIÓN

Un sistema de comunicación consta de tres partes fundamentales: transmisor, canal y receptor. A su vez, el transmisor está compuesto por el codificador y el modulador. El canal es aquel que agrega atenuación, ruido, distorsión e interferencia que deben ser "compensadas" en el receptor mediante el proceso de detección (demodulación y decodificación) y posiblemente un proceso de filtrado (ecualización).

El concepto de comunicaciones digitales nace de la necesidad de transmitir información que no se encuentra como señales continuas sino como un mensaje binario. Cuando se habla de mensaje binario se hace referencia a una secuencia de dos tipos de pulsos de forma conocida ocurriendo en intervalos regulares de tiempo  $T$ . A pesar de que la forma de dichos pulsos es conocida a priori, la ocurrencia de ceros o unos es desconocida por lo que se consideran señales no determinísticas. La tasa a la que se muestrean los pulsos es  $R = 1/T$ , siendo  $T$  la duración de cada pulso.

El presente laboratorio tiene por objetivo, familiarizar a los alumnos en el envío de información en forma digital. Para lograr esto, el laboratorio se subdividirá en tres partes. La primera considera un trabajo previo donde el alumno debe construir un transmisor y receptor digital utilizando modulación binaria<sup>1</sup>. La segunda parte, considera el trabajo como tal en el laboratorio. Deberá medir una serie de parámetros desde el analizador de espectro basados en el transmisor construido en la actividad previa y los conocimientos adquiridos en la cátedra. Finalmente está el informe final de laboratorio. Este informe debe responder **todas** las preguntas que se realizan en las siguientes secciones.

<sup>1</sup>Se indica que es modulación binaria y no m-aria, la cual será tratada en el laboratorio 4

NOTA 1: Toda la información contenida en esta guía no es suficiente para adquirir el conocimiento requerido en el laboratorio. Deberá leer y estudiar los conceptos listados en la sección III (*Lectura Recomendada*) y complementarlos con lo aprendido en cátedra.

NOTA 2: La actividad previa es **obligatoria** y el grupo que no presente las actividades no tendrá autorizado el acceso a la experiencia y deberá asistir en una segunda sesión de laboratorio. Las actividades previas son grupales.

## II. ANTECEDENTES

Antes de explicar los conceptos de modulación digital es necesario definir algunos conceptos:

a) *Señal Banda base*: Una forma de onda de banda base tiene una magnitud espectral diferente de cero para las frecuencias alrededor del origen (es decir,  $f = 0$ ) y es despreciable en cualquier otro caso.

b) *Señal Pasa banda*: Una forma de onda pasabanda tiene una magnitud espectral diferente de cero para las frecuencias en cierta banda concentrada alrededor de una frecuencia  $f = \pm f_c$ , donde  $f_c \gg 0$ . La magnitud espectral es despreciable en cualquier otro caso. A la frecuencia  $f_c$  se le llama frecuencia portadora.

c) *Modulación*: La modulación es el proceso de plasmar la información fuente sobre una señal pasabanda con una frecuencia de portadora  $f_c$  mediante la introducción de perturbaciones en amplitud o fase, o quizás ambas. Esta señal pasabanda se conoce como modulada  $s(t)$  y a la señal fuente de banda base se le llama moduladora  $m(t)$ .

### A. Representación de la envolvente compleja

Todas las formas de onda pasabanda, independientemente de si provienen de una señal modulada, de señales interferentes o de ruido, pueden representarse en una forma conveniente dada por el siguiente teorema. Se utilizará  $v(t)$  para representar canónicamente una forma de onda pasabanda. Específicamente,  $v(t)$  puede representar la señal cuando  $s(t) = v(t)$ ; el ruido cuando  $n(t) = v(t)$ ; la señal filtrada con ruido a la salida del canal cuando  $r(t) = v(t)$ , o cualquier otro tipo de forma de onda pasabanda.

a) *Teorema*: Cualquier forma de onda pasabanda física puede representarse mediante

$$v(t) = \Re \left( g(t) \cdot e^{j\omega_c t} \right) \quad (1)$$

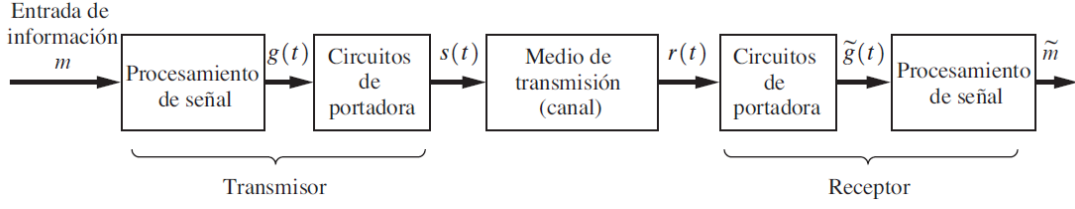


Fig. 1. Sistema de comunicaciones que representa la señal moduladora  $m(t)$ , la envolvente compleja  $g(t)$  y la señal modulada  $s(t)$

donde el operador  $\Re(*)$  denota la parte real del operando.  $g(t)$  se conoce como la **envolvente compleja** de  $v(t)$  y  $f_c$  es la frecuencia de la portadora asociada (en hertz) donde  $\omega_c = 2\pi f_c$ . Más aún, otras dos representaciones equivalentes son:

$$v(t) = R(t) \cdot \cos(\omega_c t + \theta(t)) \quad (2)$$

$$v(t) = x(t) \cdot \cos(\omega_c t) - y(t) \cdot \sin(\omega_c t) \quad (3)$$

donde:

$$\begin{aligned} g(t) &= x(t) + jy(t) = |g(t)| \cdot e^{j\angle g(t)} = R(t) \cdot e^{j\theta(t)} \\ x(t) &= \Re(g(t)) = R(t) \cdot \cos(\theta(t)) \\ y(t) &= \Im(g(t)) = R(t) \cdot \sin(\theta(t)) \\ R(t) &= |g(t)| = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \\ \theta(t) &= \angle g(t) = \tan^{-1} \left( \frac{y(t)}{x(t)} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Las formas de onda  $g(t)$  y, por consiguiente,  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $R(t)$  y  $\theta(t)$  son formas de onda de banda base y, a excepción de  $g(t)$ , todas son formas de onda reales.  $R(t)$  es una forma de onda real no negativa. La tabla I muestra el resumen de todas las señales involucradas en la representación de señales pasabanda por envolvente compleja.

Tabla I  
RESUMEN DE SEÑALES PARA LA REPRESENTACIÓN POR ENVOLVENTE COMPLEJA.

	Pasa banda	Banda base
Señal Real	$v(t)$	$R(t), x(t), y(t), \theta(t)$
Señal Compleja		$g(t)$

### B. Modulación en Fase y Cuadratura

Representando la envolvente compleja en términos de dos funciones reales en las coordenadas cartesianas se tiene que:

$$g(x) = x(t) + jy(t) \quad (5)$$

donde  $x(t) = \text{Reg}(t)$  e  $y(t) = \text{Img}(t)$ . Se dice que  $x(t)$  es la *modulación por fase* asociada con  $v(t)$  e  $y(t)$  está asociada con la *modulación en cuadratura* asociada con  $v(t)$ . La utilidad de la representación de la envolvente compleja para formas de onda pasabanda no puede dejar de enfatizarse. En los sistemas modernos de comunicación, la señal pasabanda a menudo se divide en dos canales, uno para  $x(t)$  llamado canal

$I$  (en fase, del inglés *in-phase*) y otro para  $y(t)$  llamado canal  $Q$  (fase en cuadratura, del inglés *quadrature-phase*). En las simulaciones digitales por computadora de señales pasabanda, la velocidad de muestreo empleada en la simulación puede minimizarse si se trabaja con la envolvente compleja  $g(t)$  en lugar de la señal pasabanda  $v(t)$ , ya que  $g(t)$  es la equivalencia en banda base de la señal pasabanda.

### C. Espectro de Señales Pasabanda

El espectro de una señal pasabanda se relaciona directamente con el espectro de su envolvente compleja.

a) *Teorema:* Si una forma de onda pasabanda se representa mediante la ecuación 1, entonces el espectro de la forma de onda pasabanda es:

$$V(f) = \frac{1}{2} [G(f - f_c) + G^*(-f - f_c)] \quad (6)$$

donde  $G(f)$  es la transformada de Fourier de  $g(t)$ .

### D. Modulación digital pasabanda

La modulación es el proceso de codificación de la información fuente  $m(t)$  (señal moduladora) dentro de una señal pasabanda  $s(t)$  (señal modulada). En consecuencia, la señal modulada es solamente una aplicación especial de la representación pasabanda de la ecuación 1. La señal modulada se obtiene de:

$$v(t) = s(t) = \Re(g(t) \cdot e^{j\omega_c t}) \quad (7)$$

donde  $\omega_c = 2\pi f_c$  es la frecuencia de la portadora en  $\text{rad/s}$ . La envolvente completa  $g(t)$  es una función de la señal modulante  $m(t)$  como muestra la ecuación 8. La figura 1 muestra un sistema de comunicaciones donde se utilizan los términos  $m(t)$ ,  $g(t)$  y  $s(t)$ .

$$g(t) = g[m(t)] \quad (8)$$

Las señales pasabanda digitalmente moduladas se generan utilizando las envolventes complejas para las señalizaciones AM, PM, FM o QM (modulación en cuadratura) expuestas en la figura 2. Para las señales moduladas digitalmente, la señal moduladora  $m(t)$  es del tipo digital, dado por los códigos de línea binarios o multinivel.

Las técnicas de señalización pasabanda binarias más comunes son las siguientes (ver figura 3):

- **Modulación de encendido-apagado (OOK)**, también llamada modulación por corrimiento de amplitud (ASK).

Tipo de modulación	Funciones de mapeo $g(m)$	Modulación en cuadratura correspondiente	
		$x(t)$	$y(t)$
AM	$A_c[1 + m(t)]$	$A_c[1 + m(t)]$	0
DSB-SC	$A_c m(t)$	$A_c m(t)$	0
PM	$A_c e^{jD_p m(t)}$	$A_c \cos[D_p m(t)]$	$A_c \sin[D_p m(t)]$
FM	$A_c e^{jD_f \int_{-\infty}^t m(\sigma) d\sigma}$	$A_c \cos \left[ D_f \int_{-\infty}^t m(\sigma) d\sigma \right]$	$A_c \sin \left[ D_f \int_{-\infty}^t m(\sigma) d\sigma \right]$
SSB-AM-SC <sup>b</sup>	$A_c [m(t) \pm j\hat{m}(t)]$	$A_c m(t)$	$\pm A_c \hat{m}(t)$
SSB-PM <sup>b</sup>	$A_c e^{jD_p m(t) \pm j\hat{m}(t)}$	$A_c e^{\mp D_p \hat{m}(t)} \cos[D_p m(t)]$	$A_c e^{\mp D_p \hat{m}(t)} \sin[D_p m(t)]$
SSB-FM <sup>b</sup>	$A_c e^{jD_f \int_{-\infty}^t [m(\sigma) \pm j\hat{m}(\sigma)] d\sigma}$	$A_c e^{\mp D_f \int_{-\infty}^t \hat{m}(\sigma) d\sigma} \cos \left[ D_f \int_{-\infty}^t m(\sigma) d\sigma \right]$	$A_c e^{\mp D_f \int_{-\infty}^t \hat{m}(\sigma) d\sigma} \sin \left[ D_f \int_{-\infty}^t m(\sigma) d\sigma \right]$
SSB-EV <sup>b</sup>	$A_c e^{\{ \ln[1+m(t)] \pm j\hat{m}(t) \}}$	$A_c [1 + m(t)] \cos \{ \hat{m}(t) \}$	$\pm A_c [1 + m(t)] \sin \{ \hat{m}(t) \}$
SSB-SQ <sup>b</sup>	$A_c e^{\{ (1/2) \{ \ln[1+m(t)] \pm j\hat{m}(t) \} \}}$	$A_c \sqrt{1 + m(t)} \cos \{ \frac{1}{2} \hat{m}(t) \}$	$\pm A_c \sqrt{1 + m(t)} \sin \{ \frac{1}{2} \hat{m}(t) \}$
QM	$A_c [m_1(t) + jm_2(t)]$	$A_c m_1(t)$	$A_c m_2(t)$

Fig. 2. Funciones de envolvente compleja para varios tipos de modulación

Consiste en la manipulación (conmutación) de una sinusoidal portadora a través de su encendido y apagado mediante una señal binaria unipolar. La OOK es idéntica a la modulación binaria unipolar en una señal DSB-SC<sup>2</sup>. La transmisión por radio en clave Morse es un ejemplo de esta técnica. La OOK fue una de las primeras técnicas de modulación empleadas y antecede a los sistemas analógicos de comunicación.

- **Modulación por corrimiento de fase binaria (BPSK).** Consiste en el corrimiento de la fase de una portadora sinusoidal a 0° o 180° con una señal binaria unipolar. La BPSK es equivalente a la señalización PM con una forma de onda digital y a la modulación de una señal DSB-SC con una forma de onda digital polar.
- **Modulación por corrimiento de frecuencia (FSK).** Consiste en el corrimiento de la frecuencia de una portadora sinusoidal desde una frecuencia de marca (correspondiente, por ejemplo, al envío de un 1 binario) a una frecuencia de espacio (correspondiente al envío de un 0 binario), de acuerdo con la señal digital de banda base. La FSK es idéntica a la modulación de una portadora de FM mediante una señal digital binaria.

### III. LECTURA RECOMENDADA

Con el objetivo de poder abordar de mejor manera este laboratorio se ha creado una lista de temas puntuales para su estudio. Esta lista no tiene por objetivo llenarlo de materia, sino de entregarle el material justo y preciso de donde poder estudiar y sacar el mejor partido del laboratorio. Lo anterior no quita que pueda buscar información por su cuenta.

- 1) *Modulación de encendido-apagado (OOK).* Sección 5-9 de [1].
- 2) *Modulación por corrimiento de frecuencia (FSK).* Sección 5-9 de [1].
- 3) *Basic Binary Carrier Modulations.* Sección 8-1 en [2].

<sup>2</sup>Double Sideband Suppressed Carrier

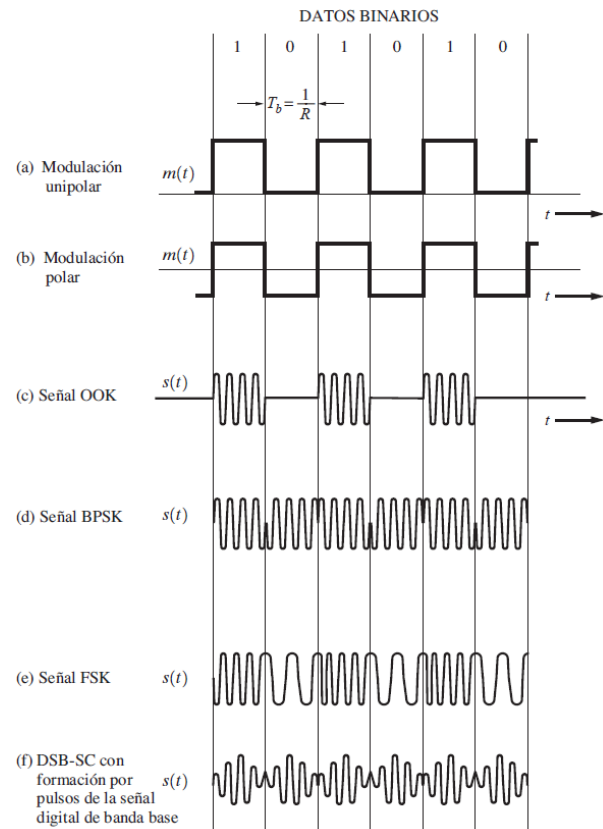


Fig. 3. Señales pasabanda digitalmente moduladas.

- 4) *Simulation example: FSK.* Ejemplos de Simulación GNU Radio. [https://wiki.gnuradio.org/index.php/Simulation\\_example:\\_FSK](https://wiki.gnuradio.org/index.php/Simulation_example:_FSK).

### IV. ACTIVIDADES PREVIAS

Para poder aprovechar de manera óptima el tiempo de laboratorio (80 minutos) se solicita que el día de la sesión

presencial **cada grupo** debe llegar con las siguientes actividades realizadas.

- Determine la ecuación para el cálculo del ancho de banda de una señal ASK.
- Determine la envolvente compleja  $g(t)$  (ver ecuación 1) para una señal modulada por ASK.
- Grafique la transformadas de Fourier de la envolvente compleja determinada en el punto anterior.
- En GNU Radio Companion (GRC), construya un transmisor OOK que tome como señal modulante<sup>3</sup> un tren de pulsos generados (onda cuadrada) con el bloque *Signal Source* ([https://wiki.gnuradio.org/index.php/Signal\\_Source](https://wiki.gnuradio.org/index.php/Signal_Source))
- En el informe final del laboratorio compruebe cada uno de los puntos solicitados anteriormente y además justifique la siguiente pregunta: ¿Se cumple el ancho de banda teórico para una señal modulada con OOK?

## V. LABORATORIO PRESENCIAL

Para el laboratorio presencial cada grupo contará con:

- Computador que tendrá instalada una versión de Matlab.

### A. Actividades

- Determine la ecuación para el cálculo del ancho de banda de una señal FSK.
- Determine la envolvente compleja  $g(t)$  (ver ecuación 1) para una señal modulada por FSK.
- Grafique la transformadas de Fourier de la envolvente compleja determinada en el punto anterior.
- En GNU Radio Companion (GRC), construya un transmisor FSK que tome como señal modulante<sup>4</sup> un tren de pulsos generados (onda cuadrada) con el bloque *Signal Source* ([https://wiki.gnuradio.org/index.php/Signal\\_Source](https://wiki.gnuradio.org/index.php/Signal_Source))
- En el informe final del laboratorio compruebe cada uno de los puntos solicitados anteriormente y además justifique la siguiente pregunta: ¿Se cumple el ancho de banda teórico para una señal modulada con FSK?
- IMPORTANTE: A diferencia de ASK, para FSK necesita justificar el ancho de banda utilizando el analizador de espectros.

## VI. INFORME FINAL

El informe final del laboratorio deberá contener todas las respuestas a las preguntas y gráficos solicitados en las secciones IV y V. El informe debe contener las siguientes secciones:

- Introducción
- Antecedentes
- Metodología
- Resultados
- Análisis de Resultados
- Conclusiones
- Referencias
- Anexos

## REFERENCIAS

- [1] L. Couch, *Sistemas de comunicacioon digitales y analogicos*. Mexico: Pearson/Prentice Hall, 2008.
- [2] B. P. Lathi, *Modern digital and analog communication systems*. New York: Oxford University Press, 2019.

<sup>3</sup>La señal modulante corresponde a la información que se desea transmitir

<sup>4</sup>La señal modulante corresponde a la información que se desea transmitir