

ESTUDIO Y ANALISIS POR SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE MODULACIÓN CONTINUA EN AMPLITUD Y FASE

E. Peralías, J.A. Prieto y A.J. Acosta

Departamento de Electrónica y Electromagnetismo, Universidad de Sevilla
Instituto de Microelectrónica de Sevilla, Centro Nacional de Microelectrónica
Avda. Reina Mercedes, s/n. Edificio CICA. 41012-Sevilla
Tel: (95) 423-99-23; Fax: (95) 423-18-32; e-mail: acojim@cnm.us.es

Resumen.- En esta comunicación se presenta la propuesta de una práctica asistida por ordenador de dos sistemas de comunicación continuos. El objetivo perseguido con la práctica es, por un lado, proporcionar al alumnado la posibilidad de realizar una simulación mediante ordenador de un sistema de comunicación completo. Por otro lado, se intenta proporcionar una visión profunda de los elementos más usuales en los sistemas de transmisión-recepción de señales continuas o analógicas. En concreto estudiamos un sistema de modulación en amplitud (AM) y otro de modulación en fase (FM). La práctica se ha llevado a cabo de modo experimental en este curso académico, y será incorporada en el curso siguiente al conjunto de prácticas de la asignatura.

1.- INTRODUCCIÓN

La mediana-alta complejidad de un sistema de modulación continua, tanto en la parte transmisora (modulador, filtros de transmisión, etc) como en la receptora (demodulador, filtros de recepción, etc) condiciona enormemente la realización de prácticas de laboratorio. Esto es debido a que el alumno no dispone del tiempo suficiente en el laboratorio para construir un sistema de comunicación completo a partir de componentes discretos. De la misma manera, si este sistema de comunicación se construyese a partir de placas de circuitos impresos, la participación del alumno se reduciría a la mera interpretación de las señales de entrada y salida de las placas, con pocas posibilidades de intervención. El compromiso entre los dos estilos de realización de prácticas pasaría por el uso de placas programables por parte del alumno, ya sea a través de lógica programable o mediante control software. Sin embargo, el alto coste de estos equipos hace muy interesante la búsqueda de alternativas de menor coste y que proporcionen una alta versatilidad. En tal sentido, la realización de prácticas mediante simulación por ordenador proporcionan un equilibrio entre estos requisitos bastante aceptable.

En el caso de los sistemas de modulación continuos, se hace indispensable una herramienta que combine adecuadamente aspectos de alta velocidad de simulación (para que el alumno obtenga rápidamente los resultados), precisión (para que el resultado de la simulación se asemeje lo más posible al comportamiento real del circuito) y facilidad de manejo. Este último punto requiere, por un lado, que el alumno esté familiarizado con la herramienta y el entorno y máquinas que la soporten y por otro, que sea capaz de construir rápidamente el sistema completo (mediante la interconexión de bloques) y de reconfigurarlo (variar parámetros característicos del sistema de comunicación). En tal sentido, y con el fin de cubrir estos requerimientos, se ha seleccionado PSPICE [1] como herramienta de simulación. Los alumnos ya la conocen

de cursos anteriores, presenta un buen compromiso entre velocidad y precisión y combina de forma muy eficiente el uso de primitivas (condensadores, dispositivos semiconductores, etc) y el macromodelado de bloques más complejos (multiplicadores, amplificadores, etc). Este último punto es de capital importancia en la descripción de la práctica. Asimismo, PSPICE permite algunas opciones de post-procesado, como son, por ejemplo, el cálculo de la transformada rápida de Fourier (FFT) de señales, la realización de operaciones aritméticas o el cálculo de funciones complejas como el valor cuadrático medio de señales (RMS), valores promedios (AVG), etc, que facilitan la tarea de adquisición e interpretación de los resultados.

2.- CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS Y ENTORNO DE REALIZACIÓN

La práctica desarrollada ha sido cursada este año por primera vez, por 55 alumnos de 5º curso de Física de la Universidad de Sevilla, dentro de la asignatura "Teoría de Comunicación" en la especialidad Electrónica. Organizados en parejas, han cubierto la práctica en unas 3 horas. Dada la actual dotación del laboratorio informático del Departamento de Electrónica y Electromagnetismo (8 ordenadores personales compatibles), en 4 sesiones se ha realizado la totalidad de la práctica. Asimismo, como bastantes alumnos tienen acceso a un ordenador propio, y PSPICE es de libre distribución en su versión de evaluación, tienen la posibilidad de trabajar sobre la práctica en casa, como complemento a la realización en el laboratorio.

La realización de esta práctica también ha servido al alumno para comprender mejor el funcionamiento de bloques básicos (por ejemplo filtros) tratados en otras asignaturas.

La forma de incluir la información topológica de los circuitos en PSPICE ha sido a través de subcircuitos que, o bien llaman a otros subcircuitos más simples o bien a otros bloques macromodelados y/o primitivas. Para agilizar la realización de la práctica, se proporciona al alumno los ficheros fuente de PSPICE que contienen la información sobre el interconexión de los elementos, así como las librerías que incluyen los modelos de los bloques. El alumno sólo debe variar ciertos parámetros en los ficheros fuente, previo cálculo teórico del valor de dichos parámetros para las especificaciones deseadas, realice las simulaciones con los patrones de entrada especificados, obtenga los resultados, los observe, interprete y compare con los esperados teóricamente. Se hará especial énfasis en el estudio de las señales, tanto en el tiempo como en la frecuencia. Asimismo se han aclarado, por parte del profesorado, las características introducidas por el programa de simulación que no aparecerían en el sistema real (ruido numérico, dispositivos y señales ideales, condiciones iniciales irreales, etc).

3.- ESTUDIO DE UN SISTEMA DE MODULACIÓN EN AMPLITUD AM

El sistema de comunicación bajo estudio [2] se muestra en la Figura 1. El modulador se compone de un rectificador de media onda acoplado a un filtro paso de banda-amplificador. El canal se modela como una línea de transmisión con atenuación y retraso. El ruido en el canal se incluye como una fuente de tensión aditiva en la salida del mismo, dependiendo del factor {Knoise} (véase el Ap. 5). El demodulador lo constituye un rectificador de media onda con un filtro paso de baja y un filtro paso de alta para eliminar componentes de continua en la salida.

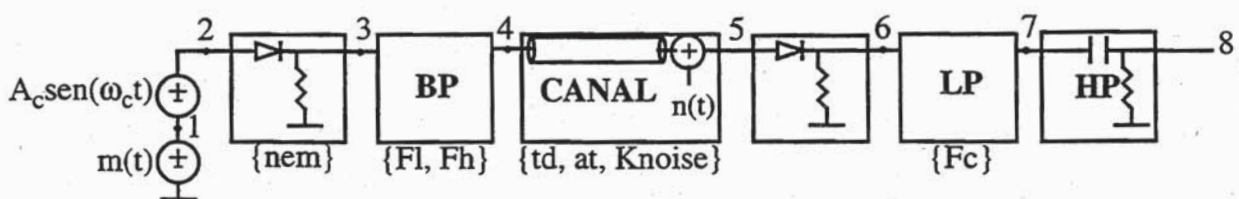


Figura 1. Modulador-Demodulador AM

3.1.- Estudio teórico a realizar por los alumnos

En primer lugar, el alumno deberá demostrar que, efectivamente, el diagrama de bloques de la Figura 1 obedece al esquema de un modulador-demodulador de señales AM. Para ello realizará un análisis teórico del circuito, considerando como señal mensaje $m(t)$ un tren de pulsos cuadrados de amplitud ± 0.5 voltios y periodo $250 \mu s$. La señal portadora es un seno de amplitud $A_c=10v$ y frecuencia $f_c = 0.5MHz$. Para analizar el comportamiento del sistema, el alumno determinará previamente el espectro de $m(t)$ y calculará su ancho de banda si sólo se consideran los 10 armónicos más significativos, con objeto de limitar en banda la señal de entrada. Asimismo, suponiendo que el diodo en el rectificador-modulador opera como un conmutador ideal, el alumno debe calcular el ancho de banda y la frecuencia central del filtro paso de banda para conseguir una señal AM en la salida del modulador. Posteriormente, deberá estudiar la acción del rectificador-demodulador sobre la señal AM, en combinación con el filtro paso de baja (al que deberá determinar el ancho de banda) y el filtro paso de alta.

3.2.- Realización práctica

Con los valores de los parámetros calculados previamente, los alumnos realizan una simulación en la que no se incluye los efectos de ruido en el canal ($\{Knoise\}=0$). Como ejemplo, a continuación mostramos el bloque rectificador-modulador incluido en el fichero de PSPICE:

```
.subckt rectf in out params: Rr=1k nem=1.0 Isat=10f
    Da in out Dmodel
    Ra out 0 {Rr}
.model Dmodel D (IS={Isat} N={nem})
.ends rectf
```

Del resultado de la simulación realizada, el alumno debe estudiar la característica espectral de la señal $m(t)+A_c \text{sen} \omega_c t$, de entrada al rectificador. Asimismo, debe analizar las características espectrales y temporales de la señal AM, así como calcular el índice de modulación de la misma. Posteriormente, debe observar el efecto del canal sobre la señal AM, tanto en retraso como en atenuación. Finalmente debe efectuarse una comparación entre la señal de salida del demodulador con la señal mensaje original, describiendo las similitudes y diferencias.

De los datos obtenidos, el alumno debe conservar los datos numéricos correspondientes, así como el número de gráficas que considere representativas. Los resultados cualitativos más interesantes que deben observar los alumnos corresponden a la acción de los diferentes bloques sobre el espectro y forma de onda temporal de las señales de entrada. En la Figura 2 mostramos la diferencia entre los espectros de la señal de entrada ($m(t)$) y la salida $v(8)$.

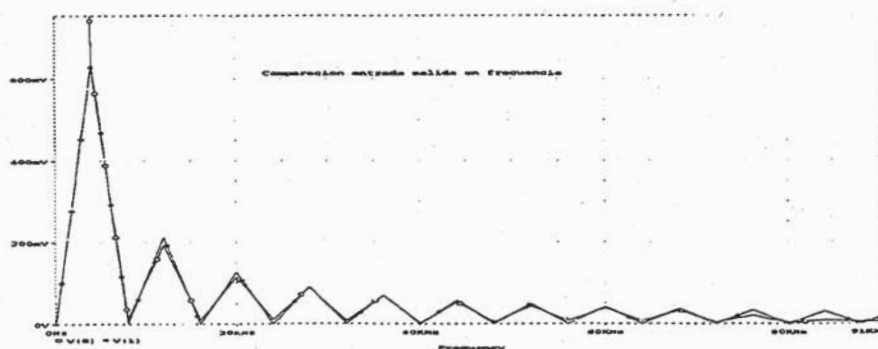


Figura 2. Espectros de la entrada ($m(t)$) y salida ($v(8)$) en el modulador-demodulador AM.

4.- ESTUDIO DE UN SISTEMA DE MODULACIÓN EN FASE FM

El sistema se muestra en la Figura 3. El modulador se compone de un oscilador controlado por tensión (VCO) acoplado a un filtro paso de banda-amplificador. El canal y el ruido en el mismo se modela de la misma manera que en el caso AM considerado anteriormente (véase el Ap. 5). El demodulador lo constituye un discriminador por desplazamiento de fase [2].

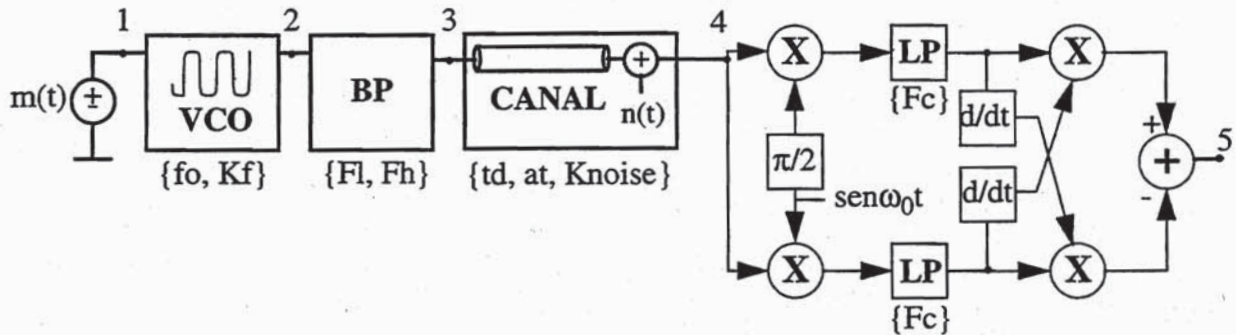


Figura 3. Modulador-Demodulador FM

4.1.- Estudio teórico a realizar por los alumnos

Para este apartado, el alumno debe mostrar que el sistema opera efectivamente como un modulador-demodulador de señales FM. Para ello debe considerar la misma señal mensaje $m(t)$ que en el caso AM. Además, debe determinar el ancho de banda y la frecuencia central del filtro paso de banda aplicando la regla de Carlson [3], [4], considerando que la sensibilidad del modulador $\{K_f\}$ es $160000 \text{ 1/volt.seg}$ y la frecuencia de portadora es $\{f_0\}=500\text{KHz}$. Estos datos han sido escogidos para conseguir que la señal FM generada sea equivalente a la AM del apartado anterior (igual ancho de banda y potencia de emisión), con vistas a una posterior comparación. Finalmente, el alumno debe estudiar la acción del demodulador sobre la señal FM y determinar el ancho de banda de los filtros paso de baja en el demodulador.

4.2.- Realización práctica.

Los alumnos realizan una simulación sin efectos de ruido en el canal ($\{K_{noise}\}=0$). A continuación mostramos un par de bloques de la librería usada en la simulación:

*Sumador ideal: Realizado con fuentes controladas de tensión

```
.subckt sum i1 i2 out params: Ks=1.0
    iz1 0 i1 DC 0
    iz2 0 i2 DC 0
    Esum out 0 VALUE={Ks*(v(i1)+v(i2))}
    iz3 0 out DC 0
.ends sum
```

*Multiplicador ideal: Realizado con fuentes controladas de tensión

```
.subckt multi i1 i2 out params: Km=1.0
    iz1 0 i1 DC 0
    iz2 0 i2 DC 0
    Emult out 0 VALUE={Km*v(i1)*v(i2)}
    iz3 0 out DC 0
.ends multi
```

Del resultado de la simulación realizada, el alumno debe estudiar la característica espectral de la señal FM a la entrada y a la salida del filtro paso de banda en el modulador. También debe observar el efecto del canal sobre la señal FM, tanto en retraso como en atenuación y finalmente efectuar una comparación entre la señal de salida del demodulador con la señal mensaje original, describiendo las similitudes y diferencias. Como resultado interesante, mostramos en la Figura 4 el espectro de la señal FM, antes y después de ser amplificada.

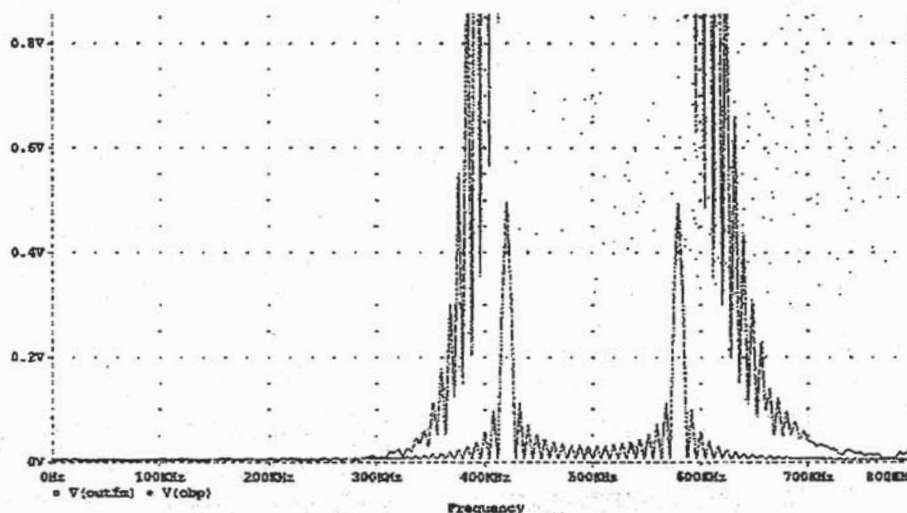


Figura 4. Espectro de la señal FM

5.- ANÁLISIS DE RUIDO EN SISTEMAS DE MODULACIÓN CONTINUA

Los efectos de ruido en el canal suelen modelarse como una fuente de ruido blanco, gaussiano y de media cero, que se suma a la señal modulada a la entrada del dispositivo demodulador [3], [4]. En este caso hemos considerado el ruido modelado por una fuente de tensión ideal $n(t)$, conectada en serie con la fuente de tensión controlada en la entrada al demodulador. Hemos empleado un método indirecto para generar el ruido, usando la herramienta MATLAB [5] para generar un conjunto de pares de puntos tiempo-tensión, correspondientes a una señal de ruido blanco. Con vistas a facilitar al alumno la realización de la práctica, les hemos proporcionado estos datos en un fichero fuente al que se invoca desde la fuente de tensión $n(t)$ mediante la forma PWL o función lineal a tramos. El nivel de ruido en la señal se controla mediante el factor $\{K_{noise}\}$ que escala el umbral de ruido, ($\{K_{noise}\}=0$, no hay ruido, $\{K_{noise}\}=1000$, potencia de 6.6 mW en un ancho de banda de 80 KHz, aproximadamente). Los efectos cualitativos los observan los alumnos a partir de las visualizaciones de las formas de ondas temporales y de los espectros de las señales de salida con y sin ruido, así como la inspección y estudio de la propia señal de ruido. Para cuantificar los efectos de ruido, hemos ideado una metodología de medida mediante simulación de las razones señal-ruido en la salida del demodulador $(SNR)_o$ y en el canal $(SNR)_c$. Dichas magnitudes expresan el comportamiento de los demoduladores frente al ruido y se definen como [3], [4]:

$$(SNR)_o = \frac{\text{Potencia de mensaje en la salida}}{\text{Potencia de ruido en la salida}}$$

$$(SNR)_c = \frac{\text{Potencia de la señal modulada en el canal}}{\text{Potencia de ruido en el canal (en el BW del mensaje)}}$$

Para los sistemas AM y FM tenemos que medir las magnitudes contempladas en las definiciones. La potencia se ha obtenido a través del cuadrado del valor cuadrático medio medido en el post-procesador gráfico PROBE de PSPICE. El método de medida es el siguiente:

1) Con una simulación que incluya señal mensaje, portadora y ruido, se mide la potencia de la señal modulada en la entrada del demodulador (numerador de $(SNR)_c$). Asimismo se mide la potencia total (P_T) de la salida del demodulador, incluyendo mensaje y ruido.

2) Con otra simulación que no incluya mensaje alguno, se calcula la potencia correspondiente al nivel de ruido en la salida del demodulador (denominador de $(SNR)_o$). Esta cantidad, restada a la potencia total (P_T) calculada en la simulación anterior nos da la potencia correspondiente a la potencia de la señal mensaje (numerador de $(SNR)_o$).

3) Con una tercera simulación que no incluya ni señal mensaje ni portadora, medimos el ruido en la salida del canal en el ancho de banda de $m(t)$. Para ello consideramos un filtro paso de baja adicional en la salida del canal con un ancho de banda equivalente al de $m(t)$, de forma que la medida de potencia en la salida del mismo nos da el denominador de $(SNR)_c$.

Los resultados obtenidos para los ejemplos considerados los resumimos en la Tabla I:

| | Pot. señal modulada | Pot. ruido en el canal | Pot. mensaje en la salida | Pot. ruido en la salida | $(SNR)_c$ | $(SNR)_o$ |
|----|---------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------|-----------|
| AM | 247.6 W | 6.6 mW | 241 mW | 3.6 mW | 37515 | 69 |
| FM | 245.5 W | 6.6 mW | 135 mW | 12.6 μ W | 37198 | 10723 |

Tabla I.- Relaciones señal-ruido para los sistemas AM y FM.

Como resultado más interesantes podemos destacar la mayor inmunidad frente al ruido del sistema FM, ya que, normalizando para la misma relación señal-ruido en el canal, la relación señal-ruido en la salida del demodulador FM es 157 veces mayor que la medida para el AM.

6.- RESULTADOS TRAS LA REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA. CONCLUSIONES

Los resultados más importantes conciernen a la innovación didáctica que supone para los alumnos la visualización mediante resultados de simulación de las formas de onda y espectros que han visto en la Teoría correspondientes a este tipo de circuitos. Asimismo cabe destacar el grado de conocimiento que han adquirido sobre el funcionamiento más o menos real de los bloques como dispositivos no ideales, y por supuesto, la destreza que han adquirido en el manejo de una herramienta de simulación y el entorno que la soporta. En relación al estudio del ruido, como resultado más interesante los alumnos han aprendido una forma de medir sus efectos, constatando una mayor inmunidad frente al ruido del sistema FM.

En función de la respuesta del alumnado tras la realización de la práctica, hemos decidido reorganizar la práctica para cursos posteriores. La idea es ampliar los contenidos de sus apartados fundamentales, generando tres prácticas distintas:

*Estudio y análisis de sistemas de modulación continua en amplitud: AM, DSBSC y SSB.

*Estudio y análisis de sistemas de modulación continua en fase: PM y FM

*Estudio y análisis de ruido en sistemas de modulación continua.

7.- REFERENCIAS

- [1] "Manual de PSPICE, versión 6.0". MicroSim Corporation, 1994.
- [2] Fink, D.G. y Christiansen, D. "Electronics Engineers' Handbook". McGraw-Hill, 1989.
- [3] Haykin, S. "Communication Systems". John Wiley & Sons, 1983.
- [4] Stremmer, F.G. "Introducción a los Sistemas de Comunicación". Addison-Wesley, 1993.
- [5] "MATLAB User's Guide", The Math Works, Inc., 1992.