

Modulador y demodulador en amplitud y cuadratura QAM para
la radio definida por software SDR

Por

Angel Osvaldo López Carrillo

Presentado al comité revisor del Instituto de Ingeniería y Tecnología de
la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
para obtener el título de

INGENIERO EN SISTEMAS DIGITALES Y COMUNICACIONES

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Mayo 2020

Declaración de originalidad

Declaro que el material contenido en este documento es original y no ha sido copiado de ninguna otra fuente, ni ha sido usado para obtener otro título o reconocimiento en otra Institución de educación superior.

Angel Osvaldo López Carrillo

Agradecimientos

Quisiera empezar por agradecer a mi asesor, el Dr. Garcés, por su continuo interés en mi formación (y demás compañeros) desde que tuve mi primera clase con él, además en la confianza que ha tenido en mis habilidades y en su continuo apoyo, motivación y paciencia para la revisión, guía y consejo durante el desarrollo de esta tesis.

Asimismo, quiero agradecer a mi familia, ellos han sido pilar en mi formación, modelo a seguir, soporte, fuente de inspiración y de conocimientos nuevos; es por mi familia y su gran amor por mí que he llegado hasta donde estoy, es por eso que dedico mi esfuerzo a ellos quienes me han brindado un gran hogar.

Por último, quiero dirigirle un agradecimiento a mi novia, a quién le admiro su enorme sentido de la responsabilidad y empeño, tenerla a ella de ejemplo me ha inspirado y motivado a seguir esforzándome. Su compañía y esmero han sido gran aliento y ayuda durante este tiempo.

Abstract

Current telecommunication technologies enable connections between multitudes of people and devices, giving way to previously unlikely activities such as working and studying remotely. One of the current challenges this activities evoke is maintaining an infrastructure capable of supporting the amount of traffic for current and future activities. The objective of this project was to explore software defined radio technology using the Notational Instrument module USRP by developing a 2, 3 and 4-bit QAM modulators for a more efficient use of the spectrum. This is done based on a communication system that uses a MPSK modulator developed in previous research by another UACJ's students.

Índice de Figuras

Figura 2.1 Ejemplos de constelaciones tipo I, II y III [1]	5
Figura 2.2 Demodulador coherente para QAM [1]	6
Figura 3.1 Transmisor QAM [1].....	Error! Bookmark not defined.
Figura 3.2 Varias constelaciones de distintos órdenes [10]	Error! Bookmark not defined.
Figura 3.3 Constelación (1,3).....	Error! Bookmark not defined.
Figura 3.4. Receptor QAM [1]	Error! Bookmark not defined.
Figura 3.5 Interfaz de usuario para el transmisor.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 3.6 Interfaz de usuario para el transmisor.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 3.7 Diagrama de flujo del modulador	Error! Bookmark not defined.
Figura 3.8 Diagrama de flujo del demodulador	Error! Bookmark not defined.
Figura 4.1 Gráfica de BER contra relación Bit a Ruido	Error! Bookmark not defined.

Índice de Tablas

Contenido

Declaración de originalidad.....	ii
Agradecimientos	iii
Abstract	iv
Índice de Figuras.....	v
Índice de Tablas.....	vi
Contenido.....	vii
Capítulo 1 Introducción.....	1
Capítulo 2 Marco teórico.....	3
2.1 Modulación en amplitud y cuadratura.....	3
2.1 Probabilidad de bits erróneos en QAM.....	7
2.2 Radio definida por software SDR	7
2.3 Módulo USRP.....	9
Capítulo 3 Metodología.....	Error! Bookmark not defined.
3.1 Transmisor y receptor	Error! Bookmark not defined.
3.2 Interfaces de usuario de transmisión y recepción	Error! Bookmark not defined.
3.3 Diagrama del modulador y el demodulador	Error! Bookmark not defined.
Capítulo 4 Resultados.....	Error! Bookmark not defined.
Capítulo 5 Conclusiones	Error! Bookmark not defined.
Referencias.....	Error! Bookmark not defined.
Apéndice.....	Error! Bookmark not defined.
Apéndice A Constelaciones utilizadas en el proyecto.....	Error! Bookmark not defined.
Apéndice B Código de Labview del modulador QAM.	Error! Bookmark not defined.

Capítulo 1 Introducción

El uso de las telecomunicaciones para realizar conexiones entre personas y entre dispositivos se ha mostrado como una actividad indispensable, por un lado, para afrontar los problemas y retos que surgen en la actualidad, y por otra parte para desarrollar nuevas posibilidades y escenarios que de otra forma no hubieran sido concebidos.

La situación actual que supone el COVID-19 ha presentado un poco de ambas partes, en primera instancia, ha creado una situación de distanciamiento, en la que las personas, dispositivos y empresas no pueden mantenerse en distancias cortas. En cambio, tampoco pueden detenerse todas las operaciones, porque de hacerlo así, tendría múltiples repercusiones negativas. El uso de las tecnologías de telecomunicación introduce la solución a esa problemática con múltiples posibilidades: servicios de entrega de productos y servicios basados en plataformas en línea, la modalidad de oficina en casa, el uso de plataformas colaborativas para juntas de trabajo, familiares, de recreación, clases, e inclusive reuniones sociales. También, presenta nuevos escenarios que antes no serían posibles, desde hace años se aprecian cambios en las tendencias de la movilidad del trabajo. Actualmente y gracias al acceso al internet, acceder a las mismas personas y la misma información a las que los trabajadores necesitan alcanzar si estuvieran trabajando en una oficina, es mucho más sencillo de realizar desde cualquier lugar. En consecuencia, esto podría significar el cambio de una labor presencial obligatoria a un ambiente más flexible en el que se puede optar por trabajar desde casa para muchos empleos. Esta tendencia se hace aún más evidente con la actual contingencia, en la que muchos trabajos han continuado normalmente al poder realizar las mismas actividades realizadas en la oficina, pese a trabajar desde casa.

Es por lo anterior, resulta imprescindible la búsqueda de alternativas para tener mejores sistemas de comunicación. Entre otras destaca la eficiencia del uso del espectro, ya que este es un recurso limitado. A causa de la contingencia, también se evidenció la

falta de capacidad en la infraestructura actual, para soportar las cargas de tráfico que se ocasionaron por toda la actividad generada. En este caso, se manifestó en ciertos horarios se tuvieron: conexiones lentas, falla de conexión y conferencias en línea con retrasos y distorsiones en el audio. Considerando lo anterior, el objetivo de este proyecto es explorar la tecnología USRP para el uso más eficiente del espectro, particularmente, se desarrolló un modulador y demodulador QAM de dos, tres y cuatro bits, esto es 4-QAM, 8-QAM y 16-QAM. El desarrollo de esta implementación se fundamenta en darle continuidad al trabajo realizado anteriormente en la UACJ, específicamente para el USRP desarrollado en [1]. Este es un sistema de comunicación que utiliza un modulador y un demodulador por desplazamiento de fase binario BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) y en cuadratura QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) en Labview. Dicho sistema fue modificado para la implementación de este proyecto.

En este documento se detalla, en conjunto con la teoría necesaria para la realización del proyecto, el diseño general del transmisor. Este está compuesto por la fuente, el conversor de bits a símbolos, un filtro y un conversor digital a análogo. Por otro lado el diseño del receptor que está compuesto por un conversor digital a análogo, una etapa de filtrado, una etapa de detección y el conversor de símbolos a bits. También en este escrito se detallan las constelaciones utilizadas, así como el proceso de modelado requerido para las mismas, se sigue la descripción de las interfaces requeridas para la configuración del USRP y la modulación deseada en la transmisión.

Además se presentan los resultados obtenidos con la validación de los mismos, que sin embargo, tan solo fue planeada pues desafortunadamente el desarrollo de este proyecto fue limitado por la contingencia. Por último están plasmadas las conclusiones de la realización de este proyecto

Capítulo 2 Marco teórico

2.1 Modulación en amplitud y cuadratura

Para señales digitales uno de los esquemas de comunicación más comunes es la modulación en amplitud y cuadratura QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). QAM es un esquema de envolventes de amplitud no constantes. En consecuencia, con QAM se puede lograr una mayor eficiencia de ancho de banda, en comparación con otros sistemas, usando el mismo promedio de potencia de señal. Con QAM se obtiene un arreglo al plasmar símbolos de k-bits de una secuencia de información en dos portadoras. Estas están desfasadas 90° y normalmente es una onda seno y otra coseno, y son moduladas cada una de forma independiente. Posteriormente son transmitidas con la misma frecuencia portadora.

Una señal de QAM matemáticamente puede ser representada como se muestra en la ecuación (2.1)

$$s_i(t) = A_i \cos(2\pi f_c t + \theta_i) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2.1)$$

donde A_i es la amplitud y θ_i es la fase de la i-esima señal en el conjunto de la señal M-aria.

Por lo general se utiliza pulsos de cimas redondeadas, en lugar de planas para mejorar el uso del espectro y para control de la interferencia entre símbolos ISI (*InterSymbol Interference*). De esta manera la ecuación (2.1) se puede reescribir como sigue

$$s_i(t) = A_i p(t) \cos(2\pi f_c t + \theta_i) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2.2)$$

donde $p(t)$ es un pulso definido en $[0, T]$. La señal de QAM también puede ser representada como una combinación de dos funciones orto normales seno y coseno

$$s_i(t) = s_{i1}\varphi_1(t) + s_{i2}\varphi_2(t) \quad (2.3)$$

donde

$$\varphi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{E_p}} p(t) \cos(2\pi f_c t), 0 \leq t \leq T \quad (2.4)$$

$$\varphi_2(t) = -\sqrt{\frac{2}{E_p}} p(t) \sin(2\pi f_c t), 0 \leq t \leq T \quad (2.5)$$

y también

$$s_{i1} = \sqrt{\frac{E_p}{2}} A_{i1} = \sqrt{\frac{E_p}{2}} A_i \cos \theta_i \quad (2.6)$$

$$s_{i2} = \sqrt{\frac{E_p}{2}} A_{i2} = \sqrt{\frac{E_p}{2}} A_i \sin \theta_i \quad (2.7)$$

siendo E_p la energía de la señal $p(t)$ [2].

Para describir un conjunto de señales QAM se utiliza una representación geométrica llamada constelación. Se delinea en un plano formado por los ejes que corresponden a las señales en cuadratura. El eje horizontal del plano se denomina “en fase” I (“*In phase*”) y es representado por $\varphi_1(t)$, el eje vertical es nombrado “en cuadratura” Q (“*Quadrature*”), se representa con $\varphi_2(t)$. La figura 2.1 muestra 3 tipos de constelación [2]. Cada uno de los valores de una señal QAM es representado por el fasor:

$$s_1 = (s_{i1}, s_{i2}) \quad (2.8)$$

cuya magnitud es:

$$|s_i| = \sqrt{s_{i1}^2 + s_{i2}^2} = \sqrt{E_i} \quad (2.9)$$

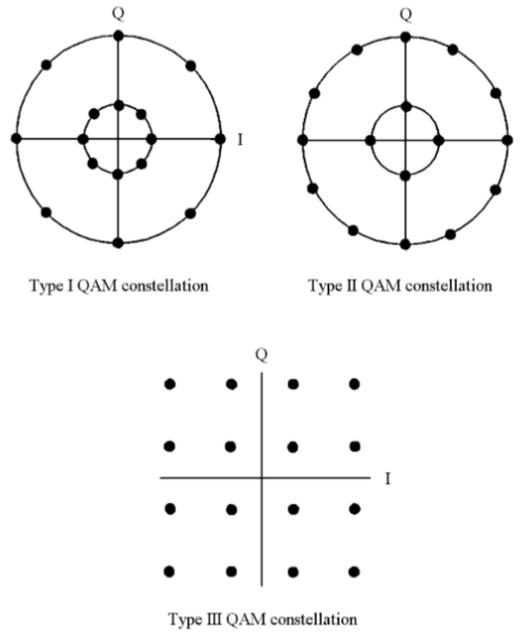


Figura 2.1 Ejemplos de constelaciones tipo I, II y III [1]

Para detectar y demodular la señal es necesario recuperar la frecuencia de la portadora, se utiliza la técnica de detección coherente con ambas señales en cuadratura. La señal recibida es:

$$r(t) = s_i(t) + n(t) \quad (2.10)$$

donde $n(t)$ es el ruido que la señal adquiere al ser transmitida. El detector compara los valores obtenidos con todos los pares de puntos de la constelación, según las coordenadas de la ec. 2.8 y elige la más cercana [2]. La figura 2.2 muestra el diagrama de bloques de un demodulador coherente para una señal QAM.

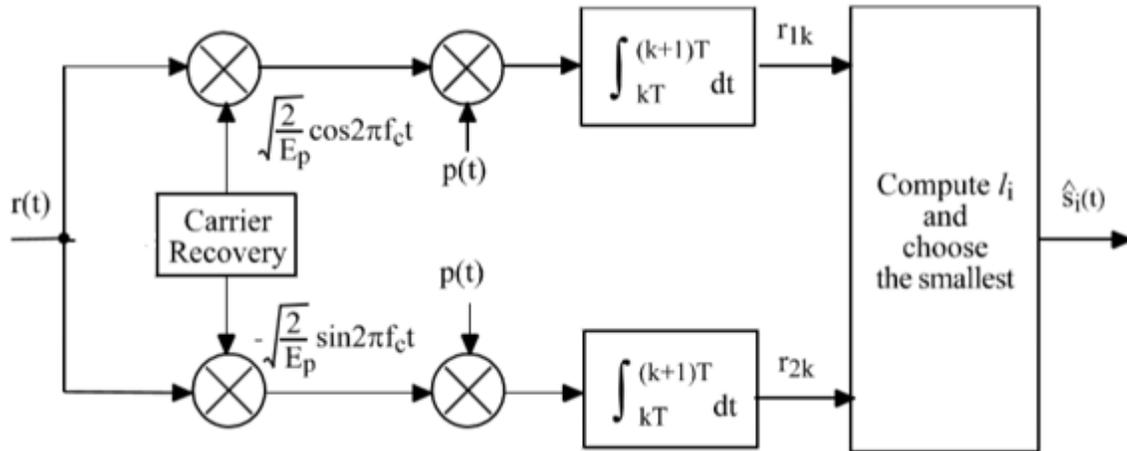


Figura 2.2 Demodulador coherente para QAM [1]

Eliminar flecha Para diseñar una constelación es necesario tener a consideración los siguientes factores. En primer lugar, la distancia Euclidiana mínima entre fasores para una mejor inmunidad al ruido. Además, la rotación mínima de fase entre puntos de la constelación para determinar la inmunidad contra una ligera variación de fase. Finalmente, la relación de pico a potencia promedio del fador, la cual es una medida de que tan resistente es a la distorsión no lineal causada por el amplificador de potencia del transmisor.

La distancia entre cada fador y el ángulo de un fador son dadas por las siguientes ecuaciones [2]:

$$d_{ij} = \sqrt{|s_i - s_j|^2} \quad (2.11)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{s_{i1}}{s_{i2}} \quad (2.12)$$

Para una señal QAM con constelación M-aria cuadrada la ecuación de la señal es la siguiente:

$$s_i(t) = I_i \sqrt{\frac{E_0}{2}} \varphi_1(t) + Q_i \sqrt{\frac{E_0}{2}} \varphi_2(t) \quad (2.13)$$

donde E_0 es la energía de la señal con menor amplitud y (I_i, Q_i) son un par de enteros independientes que determinan la posición que el punto de la señal tendrá en la constelación. Los valores mínimos de (I_i, Q_i) son de.

2.1 Probabilidad de bits erróneos en QAM

Una constelación QAM cuadrada con $M = 2^k$ en el que k es par es equivalente a dos señales de modulación por desplazamiento de amplitud M-arias (MASK), por lo que la probabilidad de error de símbolo es

$$P_s = 1 - (1 - P_{\sqrt{M}})^2 = 2P_{\sqrt{M}} - P_{\sqrt{M}}^2 \quad (2.14)$$

de la ecuación (2.14), $P_{\sqrt{M}}$ es la probabilidad de error para una señal MASK con la mitad de la potencia promedio de una señal QAM

$$P_{\sqrt{M}} = \frac{2(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} Q \left(\sqrt{\frac{3E_{prom}}{(\sqrt{M})N_o}} \right) \quad (2.15)$$

en la que E_{prom}/N_o es la relación señal a ruido (SNR) promedio por símbolo.

2.2 Radio definida por software SDR

Un sistema de radio definida por software SDR (Software-Defined Radio) es un transmisor de comunicación inalámbrica que utiliza software para implementar los algoritmos necesarios para establecer los enlaces digitales [3]. Se puede referir a un transceptor como una radio de software (SR) si sus funciones de comunicación se realizan como programas que se ejecutan en un procesador digital adecuado, una radio definida por software (SDR) es una versión práctica de un SR [4].

Con la explosión del tráfico vía inalámbrica, las aplicaciones y la diversidad de dispositivos, los futuros sistemas de comunicación inalámbrica deben adoptar el

procesamiento digital para hacer un uso más eficiente, debido a la escasez de espectro y recursos energéticos [5].

Una radio cognitiva (CR) es un SDR que además detecta su entorno, rastrea los cambios en el uso del espectro y reacciona ante sus hallazgos. Un CR es una unidad autónoma en un entorno de comunicaciones que frecuentemente intercambia información con las redes a las que puede acceder, así como con otros CR. [4] y esto toma importancia, pues los organismos reguladores de las telecomunicaciones han indicado que el espectro con licencia no se utiliza correctamente para varios periodos de tiempos, frecuencias y ubicaciones geográficas [6]. El concepto tradicional de SDR introduce la reconfiguración flexible de terminales al reemplazar radios implementados en su totalidad en hardware por otras que son configurables o incluso programables en gran medida por medio de software [7].

En [8] desarrollaron un transmisor de audio en tiempo real utilizando un esquema de modulación 64-QAM con la diferencia de ser implementado en un XSRP (a comparación de este proyecto) como plataforma para SDR, para validar la eficacia del modulador, compararon sus resultados al transmitir el mismo audio utilizando otros esquemas de modulación de menor orden como QPSK.

En el proyecto de [9] realizaron un sistema de comunicación en el que emplean dos tipos de modulación, PSK y QAM, implementando los casos de BPSK, 8-PSK, 4-QAM y 16-QAM. El proyecto fue realizado en un módulo USRP utilizando la herramienta de desarrollo GNU Radio como alternativa a LabView.

Utilizando también un USRP, en [10] Implementó un sistema de comunicación inalámbrica de 4-QAM, 8-QAM y 16-QAM y realiza un análisis de las características de la señal transmitida a diferentes distancias comparando el desempeño de las distintas modulaciones utilizadas.

2.3 Módulo USRP

Es una gama de SDR diseñados por Ettus Research y National Instruments, un USRP es un transceptor periférico de radio definido por software universal (*Universal Software Radio Peripheral*) para la generación de prototipos de sistemas de comunicación inalámbrica [17]. Los dispositivos NI USRP son radios definidas por software que combinan procesadores basados en FPGA para ayudar a diseñar, crear prototipos e implementar sistemas inalámbricos rápidamente [18].

El USRP puede adquirir señales de banda estrecha a frecuencias de muestreo mucho menores que la velocidad de digitalización completa (100 Mmuestras/s), reduciendo así la memoria requerida para almacenar una forma de onda; La frecuencia de muestreo efectiva del USRP (incluido DDC) varía desde 200 kmuestras/s hasta 25 Mmuestras/s y es configurable directamente por el usuario [1].

Como transmisor el USRP recibe formas de onda desde una computadora anfitrión con una resolución de 16 bits, muestreadas a 25 Mmuestras/seg. Estas señales para ser transmitidas son escaladas a radio frecuencia [1].

