

Primer practica transmisión de datos en radiofrecuencia empleando dispositivos de radio definida por software: Transmisión y recepción FM.

Autores

Cristian David Hurtado Rodriguez
Luis David Villada Coca



Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Electrónica
Bogotá D.C
2023

1. Objetivos

Objetivo general

Generar un acercamiento real a las transmisiones de tipo FM a partir de la implementación de un transmisor y receptor usando dispositivos de radio definida por software.

Objetivos específicos

- Contextualizar al lector acerca del funcionamiento y los principios de una transmisión y recepción FM.
- Implementar y realizar las respectivas modificaciones en los programas ubicados en el repositorio Github.
- Corroborar el correcto funcionamiento de una transmisión FM utilizando los dispositivos SDR Hack RF One y Nuand Blade RF con su respectiva interfaz en la aplicación GNU RADIO y MATLAB.

2. Materiales e insumos.

Componentes y dispositivos

- SDR Nuand bladerf 2.0 micro xa9
- SDR Hack RF One
- Dos ordenadores (Tx y Rx) con sistema operativo Windows o Linux
- Dos antenas compatibles con SDR
- Dispositivo de entrada de audio (Microfono)
- Dispositivo de salida de audio (Parlante o audifonos)

Software

- GNU Radio (versión superior a 3.10)
- MATLAB

3. Marco teórico

Espectro

Dada el cuadro nacional de atribución de bandas de frecuencia, para el territorio colombiano, las frecuencias asignadas a radiodifusión (donde se realizan las transmisiones FM) se encuentran comprendidas para las frecuencias de 76 MHz hasta 108 MHz teniendo tres distribuciones para este rango, listadas en la siguiente figura:

MHz	76-88 RADIODIFUSIÓN Fijo Móvil 5.185	76-88 RADIODIFUSIÓN 5.185	CLM 3 CLM 11 CLM 24
MHz	88 - 100 RADIODIFUSIÓN	88 - 100 RADIODIFUSIÓN	CLM 3 CLM 6 CLM 24
MHz	100 - 108 RADIODIFUSIÓN 5.192 5.194	100 - 108 RADIODIFUSIÓN 5.192 5.194	CLM 3 CLM 6 CLM 24

Tabla 1. Frecuencias asignadas a radiodifusión en Colombia. Fuente: Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias, Version 2021.

Las notas listadas en la columna ubicada más a la derecha de la figura son Notas Colombianas, para las cuales se listan a continuación las referenciadas en la figura.

CLM 3

Se establece la normatividad relacionada con los límites de las emisiones y las condiciones técnicas y operativas tanto generales como específicas de las aplicaciones permitidas para utilizar el espectro bajo la modalidad de uso libre dentro del territorio nacional.

CLM 6

Las bandas de frecuencias atribuidas al servicio de radiodifusión sonora se encuentran establecidas en la sección 3 “Atribución de Frecuencias” del Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (CNABF). Los planes técnicos nacionales de radiodifusión sonora vigentes hacen parte integral del CNABF y pueden ser consultados en la página web del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Se establecen las bandas de frecuencias de 227,500 – 228,250 MHz, 232,500 – 233,250 MHz y 245,450 – 246,950 MHz para la operación de los equipos transmóviles del servicio de radiodifusión sonora y la banda de frecuencias de 300 – 328,6 MHz para la operación de enlaces entre estudios y sistemas de transmisión de las estaciones de radiodifusión sonora, la canalización se encuentra dispuesta en los planes técnicos nacionales vigentes.

CLM 11

Las bandas de frecuencias atribuidas al servicio de radiodifusión de televisión se encuentran establecidas en la sección 3 “Atribución de Frecuencias” del Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (CNABF) y su plan de distribución de canales puede consultarse en la Tabla 3 del mismo documento.

CLM24

Se establecen frecuencias radioeléctricas para ser utilizadas en la realización de pruebas técnicas conforme a las condiciones establecidas por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en la normatividad que se referencia. [1].

Entendiendo así la distribución de frecuencias orientadas a radiodifusión se hace un énfasis especial en los rangos utilizados por las emisoras en frecuencia modulada, en este caso centrados en la zona centro de Colombia, la distribución para estas emisoras se encuentra en la siguiente tabla.

Frecuencia (MHz)	Código	Nombre
88.9	HJHR	Radio Uno
89.9	HJCK	Blu Radio
90.4	HJUD	LAUD Estéreo
90.9	HJYY	La Mega
91.9	HJKZ	Javeriana Estéreo
92.4	HJL77	Radio Policía Nacional
92.9	HJST	MIX
93.4	HJL78	Colombia Estéreo
93.9	HJVC	RCN Radio
94.9	HJMO	La FM
95.9	HJIN	Radio Nacional de Colombia
96.9	HJMD	La Kalle
97.4	HJL80	Bésame
97.9	HJJK	Radioactiva
98.5	HJUN	Radio UNAL
99.1	HJYM	Radiónica
99.9	HJLN	W Radio
100.4	HJL81	LOS40 Urban
100.9	HJGL	Caracol Radio
101.9	HJPU	Candela Estéreo
102.9	HJRX	Tropicana
103.9	HJVU	La X
104.4	HJL82	Radio Fantástica
104.9	HJVD	Vibra
105.4	HJL83	El Sol
105.9	HJIT	Olímpica Stereo
106.9	HJUT	Universidad Tadeo Lozano FM
107.9	HJVV	Emisora Minuto de Dios

Tabla 2. Distribución de frecuencias para emisoras de Bogotá. Fuente: Aplicativo Emisoras de Colombia MINTIC.

Las estaciones FM tienen una desviación máxima de frecuencia central de 75 kHz, esto permite la creación de bandas guardas tanto superiores como inferiores de 25 kHz, encargadas de minimizar el contacto con bandas de frecuencias adyacentes, esta distribución deja ciertos rangos de frecuencias sin usarse, esto puede tenerse en cuenta a la hora de realizar una transmisión FM para no interceder con las frecuencias asignadas a las emisoras.

Transmisión

En la transmisión de señales de FM, los transmisores directos generan una forma de onda en la que la desviación de frecuencia está en relación directa con la señal moduladora. Esto implica que

el oscilador de la portadora también debe desviarse directamente. Sin embargo, en los sistemas de FM de índice intermedio y alto, no se puede usar un oscilador de cristal debido a que su frecuencia no se puede variar mucho, lo que resulta en una falta de estabilidad en el oscilador. Para solucionar este problema, se utiliza el control automático de frecuencia (AFC), que compara la frecuencia del oscilador de la portadora con un oscilador de cristal de referencia y produce un voltaje de corrección proporcional a la diferencia entre las dos frecuencias. Este voltaje se retroalimenta al oscilador de la portadora para corregir automáticamente cualquier error que pueda presentarse. De esta manera, se garantiza una mayor estabilidad en los transmisores de FM y se cumplen las especificaciones de la FCC [2].

Un modulador que cumple características sencillas y que pueden ser implementadas incluso de una manera más optimizada es el modulador de FM basado en DPLL, el cual es un tipo de método de modulación angular para el cual la frecuencia instantánea de la señal portadora varía linealmente con la señal de mensaje modulada en la banda base. La arquitectura del modulador FM propuesto se muestra en la figura.

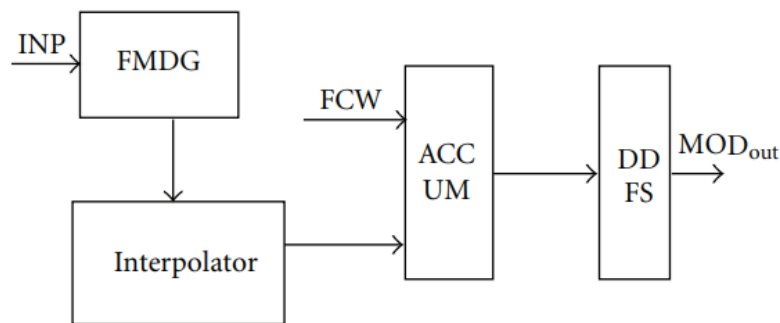


Figura 1. Diagrama de bloques de un modulador digital FM. Fuente: A New High-Performance Digital FM Modulator and Demodulator for Software-Defined Radio and Its FPGA Implementation

Este modulador FM consta de un generador de datos FM (se puede reemplazar por una fuente de sonido o datos), un interpolador con un factor de interpolación especificado, un acumulador (también buffer) y un bloque DDFS.

En primer lugar, el esquema de modulación FM es ampliamente utilizado para procesar señales de audio en los sistemas de transmisión de audio. Normalmente, la señal de audio se procesa en el rango de 44 Kbps a 320 Kbps. En los sistemas de FM, los datos de entrada se muestrean en cada reloj de símbolo FM y se almacenan en un registro para su posterior procesamiento. Luego, los datos digitalizados son convertidos de serie a paralelo a través de un convertidor para generar los datos de entrada FM de 8 bits. Este proceso es esencial para asegurar que la señal de audio sea transmitida de manera clara y precisa a través de la modulación FM. [3]

Mientras que el bloque interpolador se utiliza en el modulador de FM para obtener un mejor nivel de potencia para la transmisión de FM.

Por otro lado, el demodulador FM estará encargado de recibir las señales previamente moduladas y traducirlas, en este caso en audio escuchable y entendible para el oído humano, el diagrama de bloques del circuito demodulador está presentado a continuación

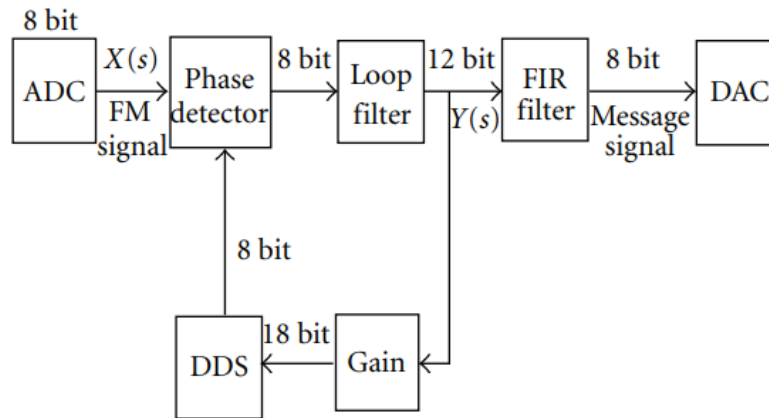


Figura 2. Diagrama de bloques de un demodulador digital FM. Fuente: *A New High-Performance Digital FM Modulator and Demodulator for Software-Defined Radio and Its FPGA Implementation*

Vale la pena recalcar que esta no va a ser la configuración final presentada en el trabajo de grado, pero sirve como guía y ejemplo para contextualizar al lector, los bloques del demodulador FM se explican en los siguientes párrafos.

El detector de fase es una herramienta esencial en el procesamiento de señales y en la transmisión de datos. Su función principal es detectar el error de fase entre la señal modulada en frecuencia entrante del ADC (Convertidor Analógico-Digital) y la frecuencia de salida generada por el DDS (Sintetizador Digital de Frecuencia Directa).

Para llevar a cabo esta tarea, el detector de fase requiere de un registro y un módulo multiplicador. El registro se encarga de almacenar temporalmente la información de la señal de entrada y la señal de referencia, mientras que el módulo multiplicador realiza el cálculo de la diferencia de fase entre ambas señales.

La detección de la fase es importante en muchos procesos, como la demodulación de señales, la sincronización de datos y la corrección de errores. Además, también se utiliza en sistemas de comunicación para evitar interferencias y distorsiones en la transmisión de la señal.

El DDS es una parte integral que ayuda en la generación y transmisión de señales de alta calidad y estabilidad. Los detectores de radio también utilizan la tecnología DDS para mejorar la precisión y la sensibilidad en la detección de señales débiles y señales de baja frecuencia.

En el campo de la guerra electrónica, el DDS se utiliza para la generación de señales de interferencia que pueden interrumpir la comunicación y el funcionamiento de dispositivos electrónicos enemigos. Además, en las aplicaciones biomédicas de alta precisión, el DDS se utiliza para la generación de señales de estimulación y diagnóstico en dispositivos médicos.

La arquitectura del DDS permite la generación de frecuencias arbitrarias a través de una palabra de control de frecuencia, lo que lo hace altamente personalizable y adaptable a diferentes aplicaciones. La tecnología DDS utiliza operaciones aritméticas como un acumulador de fase para generar la forma de onda coseno y un convertidor de fase a amplitud para la modulación de la señal.

La elección de esta arquitectura que justamente está diseñada para SDR permite una simplificación de los circuitos analógicos que se utilizaban antiguamente para la transmisión y recepción FM, dados los cambios orientados a una tecnología netamente digital se hace mucho más eficiente el uso de una arquitectura de este tipo. [3]

4. Procedimiento

a. Transmisión y recepción de audio en GNU Radio

Los archivos necesarios para realizar esta práctica se encuentran en el siguiente repositorio:
<https://github.com/CristianHurt/Practicas-de-Transmision-de-datos-en-SDR>

Ejecute los archivos “TX_HackRF_Audio.grc” y “RX_Blade.grc” y compruebe:

- Los espectros antes y después de la modulación para transmisor y receptor.
- El audio recibido
- Ancho de banda estimado de salida.

Realice cambios para el emisor en el bloque “rational resampler” y concluya que relación deben tener los valores de interpolación y decimación para que se consiga una correcta transmisión.

Con ayuda de la herramienta que se encuentra en el siguiente enlace:

<https://audio.online-convert.com/es/convertir-a-wav>

Haga cambios a la frecuencia de la pista musical, agregue el nuevo archivo descargado como fuente en el diagrama del transmisor y encuentre los valores de decimación e interpolación que le permitan recibir correctamente la muestra original de audio en el receptor.

Adjunte los espectros obtenidos y comente si fue posible recuperar la pista de audio.

Ejecute el archivo “TX_HackRF_Micro.grc” y con ayuda del receptor utilizado en el anterior inciso “RX_Blade.grc” compruebe:

- Los espectros antes y después de la modulación para transmisor y receptor.
- El audio recibido
- Ancho de banda estimado de salida.

Adjunte los resultados obtenidos y realice variaciones a la frecuencia central de transmisión teniendo en cuenta los posibles espacios en el espectro destinado a radio difusión, encuentre mínimo 2 frecuencias que le permitan transmitir el ancho de banda completo.

Sintonice el receptor a las nuevas frecuencias centrales y adjunte los resultados obtenidos para los espectros antes y después de la modulación y comente si fue posible recuperar el audio transmitido.

b. Transmisión y recepción de audio en MATLAB

Ubique los archivos “FMHackTX.slx” y “FM_Nuand_RX.slx” compruebe el correcto funcionamiento en la herramienta Simulink de Matlab a partir de:

- Los espectros antes y después de la modulación para transmisor y receptor.
- El audio recibido
- Ancho de banda estimado de salida.

Adjunte los resultados obtenidos y concluya si los resultados son correctos y esperados.

En caso de que todo funcione correctamente, realice variaciones a la frecuencia central de transmisión teniendo en cuenta las frecuencias sin utilización de la asignación de Radiodifusión, haga esta prueba para mínimo 2 frecuencias distintas a la frecuencia configurada inicialmente y adjunte los mismos resultados del inciso anterior.

Ahora haciendo uso solo del transmisor ejecute la consola GQRX y adjunte los resultados de espectro y diagrama de cascada para las 3 frecuencias centrales que utilizó en el transmisor.

5. Preguntas teóricas

A partir del marco teórico y el conocimiento adquirido en las clases de teoría, responda las siguientes preguntas.

1. ¿Qué es FM?
2. ¿Cuáles frecuencias están asignadas a Radiodifusión en el espectro nacional?
3. ¿Cuál es la separación entre canales adyacentes?
4. ¿Cuál es la desviación de frecuencias estándar para FM (Δf)?
5. ¿Cuál es el nivel de recepción para una buena calidad de señal FM (S/N)?
6. ¿Cuál es el rango de potencias de transmisión para las emisoras FM?
7. ¿Qué frecuencias de muestreo se utilizan usualmente para audio?

6. Referencias

- [1] Mintic, «Radioemisoras Colombia,» [En línea]. Available:
<https://www.mintic.gov.co/portal/maparadio/631/w3-channel.html>.
- [2] W. Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, Prentice Hall, 2001.
- [3] I. Hatai y I. Chakrabarti, «A New High-Performance Digital FM Modulator and Demodulator for Software-Defined Radio and Its FPGA Implementation,» *International Journal of Reconfigurable Computing*, p. 10, 2011.
- [4] C. D. Hurtado Rodriguez y L. D. Villada Coca, «Prácticas de transmisión en radiofrecuencia utilizando radio definida por software,» Bogotá, 2023.