

Diseño y pruebas de un RADAR Doppler

Alejandro Manuel López Gómez
201900998@alu.comillas.edu

Blanca María de Pedro Morejón
201900527@alu.comillas.edu

Resumen—Un RADAR Doppler emite continuamente una señal de alta frecuencia no modulada que es utilizada para medir la velocidad relativa de un objetivo. En este trabajo se describe una implementación práctica de un RADAR Doppler a partir de una tarjeta SDR y las pruebas realizadas con automóviles en una vía limitada a 100km/h. Se detallan las herramientas utilizadas, el diseño realizado y pruebas del mismo.

Index Terms—RADAR, Doppler, CW, Onda Continua

I. INTRODUCCIÓN

Un RADAR Doppler [1] es un tipo de RADAR de onda continua que aprovecha el efecto Doppler [2] para ofrecer una estimación de la velocidad relativa de un objetivo. La señal de sondeo enviada no está modulada y tiene frecuencia y amplitud constantes. La señal de eco recibida puede tener la misma frecuencia o desplazada si el reflector se mueve a una velocidad relativa al receptor no nula. Un radar que emite señales no moduladas sólo es capaz de medir la velocidad de un objeto debido al efecto Doppler. No puede medir el alcance de un objeto y no puede resolver objetivos en la misma dirección.

Uno de los casos de uso más comunes son los velocímetros o radares de tráfico [3], que miden la velocidad del tráfico entrante y saliente en el haz del RADAR. Este puede montarse en un vehículo o en un trípode y se suele utilizar una cámara de alta resolución para grabar la infracción. Este tipo de radares suelen operar en bandas de frecuencias muy elevadas (bandas X, K, Ka y Ku). En esta aplicación se basará el diseño realizado.

En este trabajo se ofrece una implementación práctica de una RADAR Doppler que permita reconocer de forma audible el efecto Doppler y medir la velocidad relativa a partir de la SDR ADALM PLUTO y empleando el MATLAB y GNU Radio Companion. Las pruebas se realizarán con automóviles en movimiento en una vía limitada a 100km/h

II. HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Como herramienta hardware se empleará la tarjeta SDR ADALM PLUTO [4]. Se trata de un dispositivo *Open Source* que permite la transmisión y recepción *full duplex* en un rango de frecuencias de 325MHz a 3,8GHz con un ancho de banda de 20MHz y ganancia de hasta 10dB.

El rango de frecuencias descrito anteriormente es el rango oficial dado por el fabricante. Sin embargo, es posible realizar modificaciones [5] a nivel software para aumentar este rango de frecuencias de 70MHz a 6GHz.

Para la realización de diferentes cálculos y gráficas de cara a la fase de diseño se utilizará MATLAB. Para la implementación del software del RADAR Doppler se utilizará el software basado en Python GNU Radio [6], el cuál está diseñado específicamente para aplicaciones radio.



Figura 1. Tarjeta SDR ADALM PLUTO

II-A. Limitaciones de las herramientas utilizadas

MATLAB no permite el trabajo multihebras o *multithreading*, por tanto no es posible trabajar con dispositivos *full duplex* sin complejidades añadidas. Es debido a esto que se emplea el otro software mencionado para la implementación del software de procesamiento RADAR (GNU Radio).

El rango de frecuencias permitido por la tarjeta ADALM PLUTO es inferior a las normalmente utilizadas en los radares Doppler convencionales, por lo que la implementación realizada carece de realismo en ese aspecto.

El rendimiento según parámetros S de las antenas utilizadas [8], como es de esperar, no es el mismo para todas las frecuencias, esto se observa en las medidas de la Figura 2. En la figura la herramienta realiza un barrido de 100kHz hasta 6GHz. Se observa que a partir de los 635MHz el rendimiento mejora de forma notable, por tanto aunque la tarjeta SDR pueda llegar hasta los 70MHz, las antenas utilizadas son menos compatibles con esa frecuencia de operación. Esto se tendrá en cuenta durante la fase de elección de valores para los parámetros del RADAR.

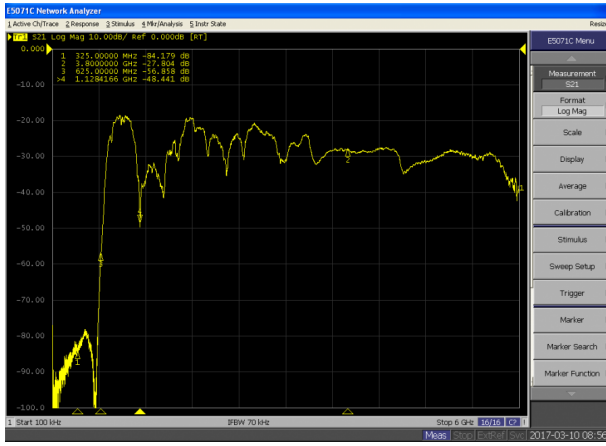


Figura 2. Medidas antenas [7]

III. CONSIDERACIONES DE LOS VALORES EN EL DISEÑO

En esta sección se indican y justifican los valores utilizados para los parámetros más importantes del diseño. Estos parámetros son los siguientes.

- Frecuencia central de operación.
- Offset de la frecuencia central.
- Frecuencia de muestreo.
- Máximo desplazamiento Doppler.
- Ganancia en recepción y transmisión.
- Atenuación en transmisión.
- Longitud de la FFT/IFFT.

III-A. Frecuencia central de operación

Respecto a la frecuencia central de operación para la transmisión del tono continuo, se ha escogido el valor de $5,8GHz$. Los motivos para usar esta frecuencia son los siguientes.

- El rendimiento de las antenas es adecuado a esta frecuencia (ver Fig. 2).
- Es la frecuencia más alta dentro del rango permitido por el hardware de la tarjeta que se encuentra dentro de la banda de frecuencias ISM [9], las cuales no requieren licencia para su uso.
- Este valor está alejado de interferencias de la banda Wi-Fi de $2.4GHz$. Una posible interferencia sería el Wi-Fi a $5GHz$, pero la baja penetración y potencia de transmisión de este hacen que su interferencia sea prácticamente nula.

III-B. Offset de la frecuencia central

El offset de la frecuencia de operación se emplea para que el desplazamiento Doppler sea audible. El ser humano posee un rango de audición de los $20Hz$ hasta los $20kHz$. Por lo que el offset de la frecuencia de operación debe encontrarse en estos valores para que el desplazamiento sea audible.

En un RADAR Doppler convencional este no sería un criterio de diseño, sin embargo, aparte del propio diseño del RADAR, este proyecto busca que sea perceptibles al oído humano las variaciones Doppler, por lo que es necesario utilizar frecuencias dentro del rango audible.

III-C. Frecuencia de muestreo

La frecuencia de muestreo debe ser un múltiplo de $48kHz$. Esto es debido a que en el esquema planteado se emplea un filtro paso bajo que diezma la señal por un factor D . Se debe cumplir que

$$F_s = 48kHz \cdot D \quad (1)$$

Siendo F_s la frecuencia de muestreo y D un factor entero de diezma. También debe cumplirse el teorema de Nyquist tal que

$$F_s > 2 \cdot BW_{max} \quad (2)$$

La señal tendrá un máximo ancho de banda en banda base de $20kHz$ (máxima frecuencia audible). El valor escogido como frecuencia de muestreo es $F_s = 2,4MHz$ y el valor de diezma es $D = 50$. Se cumplen las dos condiciones impuestas (ecuaciones 1 y 2).

III-D. Máximo desplazamiento Doppler

La frecuencia de muestreo afecta también al máximo Doppler detectable. La transformada de Fourier está limitada al rango de $-F_s/2$ a $F_s/2$, por lo que todos los desplazamientos Doppler que se tenga la intención de medir deben encontrarse dentro de este rango. El desplazamiento en frecuencia se relaciona con la velocidad según la siguiente expresión.

$$V = \frac{c}{2} \cdot \left(\frac{f_{RX} - f_{TX}}{f_{TX}} \right) \quad (3)$$

La división entre dos es debido al camino de ida y vuelta. Las pruebas van a realizarse con automóviles en movimiento en una vía limitada a $100km/h$, por lo que no interesa medir desplazamientos más grandes que los provocados a esta velocidad. El desplazamiento en frecuencia a $100km/h$ con el valor de frecuencia central establecido previamente es $\Delta f \approx 1074Hz$ (ver Fig. 3), por lo que el máximo desplazamiento a medir será de $\pm 1,1kHz$ para dejar un cierto margen. El desplazamiento será positivo si el objetivo se acerca al RADAR y negativo si se está alejando.

El máximo desplazamiento Doppler permitido lo impone la frecuencia de muestreo y es $F_s/(2 \cdot D) = 24kHz$ que implica una velocidad de $172,2945km/h$, lo cual excede la máxima velocidad que se espera medir, por lo que no existen limitaciones debido a la frecuencia de muestreo.

III-E. Ganancia y atenuación

En el diseño software realizado, las atenuaciones y ganancia se pueden variar durante la ejecución, por lo que estas deben ajustarse según el canal radio en cada momento.

III-F. Longitud de la FFT

Debido a la implementación software de la FFT, para mayor optimización esta debe tener un tamaño múltiplo de dos. Una mayor longitud permite mayor resolución, pero ralentizará la ejecución. Un valor de compromiso encontrado es 8192 muestras por FFT.

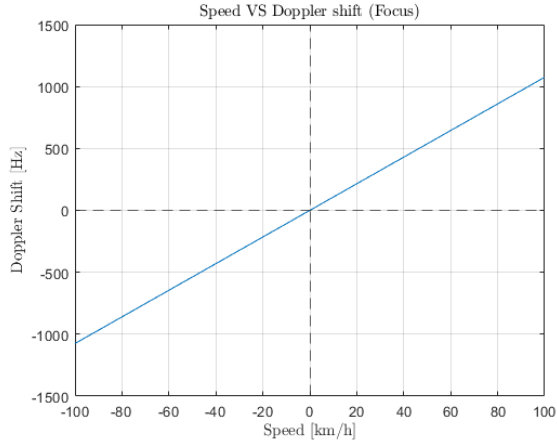


Figura 3. Doppler VS Velocidad

IV. DISEÑO REALIZADO

En la misma carpeta donde se encontraba este documento, se debe encontrar otro PDF nombrado *diseño-radar.pdf*. En este se muestra un diagrama de bloques con los diferentes componentes del procesado RADAR. Se recomienda mantener este archivo abierto mientras se realiza la lectura de esta sección. En este apartado se describe el propósito y funcionamiento de cada bloque mostrado en el esquema de diseño (PDF adjunto).

IV-A. Generación, transmisión y recepción del tono

El tono generado se trata de una exponencial compleja (en el esquema aparece que se está generando un coseno, pero esto es incorrecto como se observa en la Fig. 4) de una frecuencia audible. Esta señal es generada y transmitida por el canal Tx de la tarjeta Pluto en la frecuencia portadora especificada, por lo que la señal transmitida es un tono puro complejo centrado en la frecuencia $5,8\text{GHz} + \text{offset}$. El bloque encargado de escalar a la frecuencia de oscilación el tono complejo generado y transmitirlo se denomina en el esquema como *PlutoSDR Sink*.

La señal es recibida en el canal Rx y bajada a banda base, de forma que ahora se ve un tono centrado en la frecuencia de offset (Fig. 4), este proceso es realizado por el bloque denominado *PlutoSDR Source*.

IV-B. Filtrado paso-banda (Pass Band)

De la señal recibida, solamente interesa las frecuencias superior e inferior a la central hasta un valor máximo de Doppler que se busca medir. En la sección anterior se estableció un valor máximo de $1,1\text{kHz}$ para medir hasta 100km/h . Por tanto las frecuencias de corte superior e inferior del filtro paso banda deberán ser $\text{offset} \pm 1,1\text{kHz}$. El resultado de este filtro se observa en la Fig. 4.

Además de realizar el filtrado a las frecuencias Doppler de interés, este filtro realiza un diezmado de la señal por un factor de 50, con el objetivo de reducir la frecuencia de muestreo a 48kHz , que será la frecuencia utilizada para la reproducción del audio.

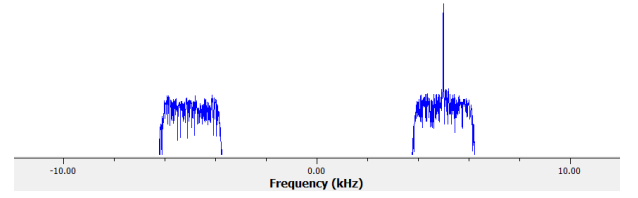


Figura 4. Salida filtro paso banda (tono de 5kHz)

IV-C. Filtrado elimina-banda (Reject Band)

De cara al procesado Doppler, el tono enviado originalmente no interesa mantenerlo en la señal por diversas razones.

- Se busca detectar las variaciones en frecuencia, un tono invariante no es de interés para la medición del desplazamiento Doppler
- Un tono de elevada amplitud perjudicaría la fase posterior de estimación de velocidad.
- De cara a la percepción auditiva del Doppler, podría enmascarar las variaciones que se busca escuchar (además de resultar muy molesto).

Para evitar esto, se emplea un filtro que elimine solamente este tono, la salida de este proceso se observa la señal de la Fig. 5. En este caso no se produce ningún diezmado.

Este filtro tiene un ancho de banda eliminada de 10Hz , por lo que no es posible medir velocidades que no generen un desplazamiento Doppler superior a los 5Hz .

IV-D. Detección y estimación de velocidad

Conocido el desplazamiento en frecuencia, es trivial calcular la velocidad relativa empleando la ecuación 3. Previo a este cálculo es necesario estimar el desplazamiento Doppler. Esto se realiza de la siguiente forma

1. Se analizan los máximos de la señal. Se calcula la potencia cuadrática de la señal a partir del bloque *Log Power FFT* y se extrae el valor máximo y el índice de este en el vector de la FFT. Conocida la posición se obtiene la frecuencia correspondiente según:

$$f_{RX} = \frac{F_s \cdot n}{L_{FFT}} \quad (4)$$

Siendo n el índice en el vector y L_{FFT} la longitud del mismo.

2. Una vez extraída la frecuencia recibida, se calcula la variación en frecuencia respecto al tono enviado $\Delta f = f_{RX} - f_{TX}$ y aplicando la ecuación 3 se calcula la velocidad en m/s .
3. Para evitar dar medidas falsas en ausencia de movimiento, se emplea el bloque denominado como *Threshold* que solamente permite pasar aquellas medidas que superen el fondo medio de ruido, que tras realizar diversas pruebas ha sido fijado en -80dBm , este puede ser variado de forma dinámica durante la ejecución del programa.

En la Fig. 6 se muestra un pantallazo de la aplicación funcionando, se pueden ajustar elementos como la ganancia en recepción y la atenuación del transmisor, el umbral de detección, el volumen del audio y la frecuencia de offset para escuchar el efecto Doppler en diferentes partes del espectro.

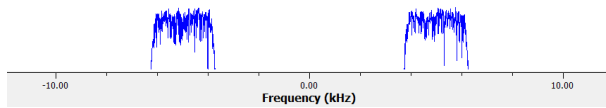


Figura 5. Salida filtro elimina-banda

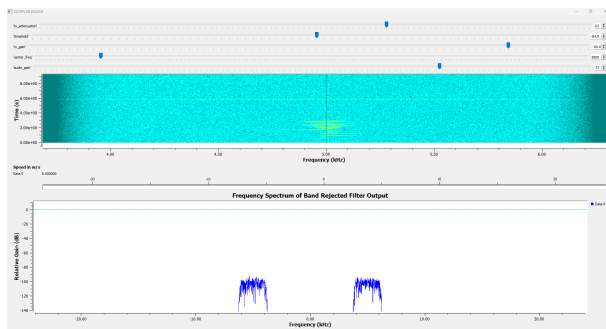


Figura 6. Aplicación funcionando

V. PRUEBAS REALIZADAS

Las pruebas realizadas han sido grabadas y pueden encontrarse en el siguiente enlace. La aplicación en funcionamiento se muestra en la Fig. 6 Se puede observar en el gráfico en cascada los diferentes desplazamientos. Aquellos inferiores a la frecuencia del tono (inferiores a $5kHz$ en el caso de la imagen) son desplazamientos que se alejan del RADAR, mientras que los movimientos a la derecha o superiores a la frecuencia del tono son desplazamientos que se acercan hacia el RADAR.

REFERENCIAS

- [1] Wikipedia: "RADAR Doppler". Accedido: Marzo 27, 2024.
- [2] Wikipedia: "Efecto Doppler". Accedido: Marzo 27, 2024.
- [3] Wikipedia: "RADAR de tráfico". Accedido: Marzo 27, 2024.
- [4] RTL-SDR: "ADALM PLUTO SDR". Accedido: Marzo 27, 2024.
- [5] RTL-SDR: "Hack PlutoSDR aumentar rango de frecuencias". Accedido: Marzo 27, 2024.
- [6] RTL-SDR: "GNU Radio". Accedido: Marzo 27, 2024.
- [7] Analog: "Medidas Antenas". Accedido: Marzo 27, 2024.
- [8] JINCHANGPS: "Antenas utilizadas en el proyecto". Accedido: Marzo 27, 2024.
- [9] BEMENS: "Frecuencias ISM". Accedido: Marzo 27, 2024.