

Universidad Nacional de Río Cuarto

Facultad de Ingeniería



Sistema VOR como radioayuda en aeronaves

Sistemas de Radionavegación (0065)

Integrantes:

- Bernardi Martín
- Remedi Augusto
- Rittano Ignacio

Introducción

El sistema de Very-High Frequency Omnidirectional Range (VOR) es una radioayuda muy importante utilizada en aeronaves para la navegación. Esta radioayuda trabaja en frecuencia del orden de los MHz, más precisamente en la banda de frecuencia de los 108 *MHz* a los 118 *MHz*. Este sistema consta de dos funciones principales:

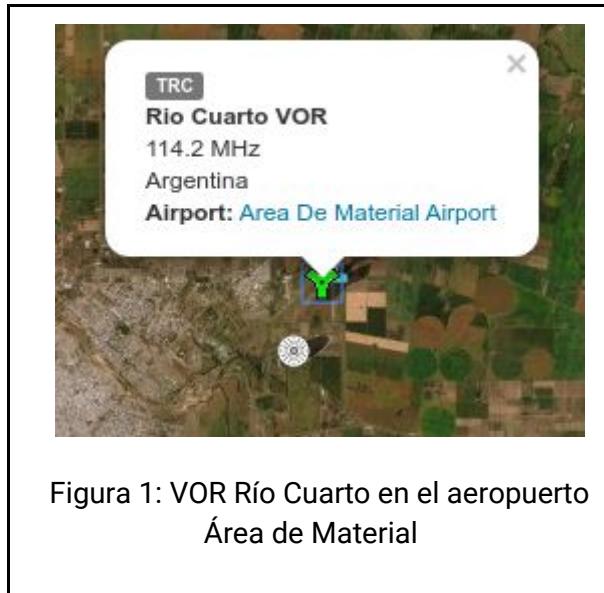
- Función de navegación: proporciona la información direccional, es decir, del azimut entre la aeronave y la estación terrena.
- Función de guiado: permite seguir un radial que pasa por encima de la estación VOR.

A su vez, el VOR es parte del conjunto de IFR (Instrument Flight Rules), y se considera obligatorio si se realiza un vuelo basado en instrumentos. Suele estar acompañado de otros sistemas como por ejemplo el DME que permite medir la distancia entre la aeronave con respecto a la estación.

Por ende, en este trabajo se realizarán mediciones con el fin de analizar el VOR situado en el Aeropuerto de Río Cuarto, también conocido como el Aeropuerto del Área Material. Posteriormente se determinará el radial correspondiente a la medición realizada y se comparará con la determinada mediante una imagen satelital.

Desarrollo

Lo primero que se realizó fue recibir la señal VOR en la Universidad Nacional de Río Cuarto, mediante la utilización de un equipo RTL-SDR. Se utilizó una antena dipolo de una longitud de 1,30 metros, apropiada para la recepción de la señal VOR de frecuencia 114.2 MHz .



Se realizaron tres mediciones en distintas ubicaciones conocidas mostradas en al Figura 2, determinando primero el radial correspondiente a cada lugar utilizando un mapa. La primera medición se realizó en la Universidad Nacional de Río Cuarto, ubicados en el radial 234° , la segunda medición fue en la localidad de Las Higueras a 293° y por último nos dirigimos al sur de la estación a un ángulo de 177° .



Figura 2: Ubicaciones de la estación terrena y de los puntos de medición

Se utilizó el software GQRX para la recepción y demodulación de la portadora AM de la señal. Como se puede ver en la figura 3, se pudo captar el espectro y detectar las bandas espectrales con la información necesaria del VOR.

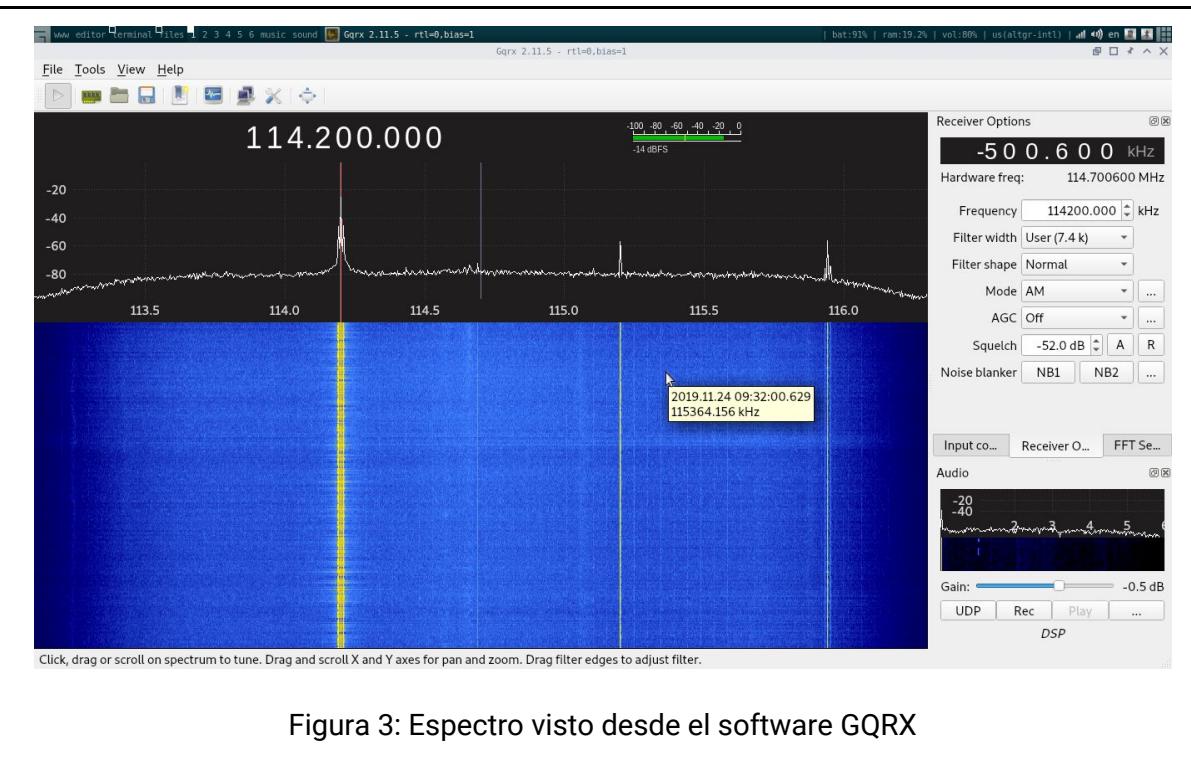


Figura 3: Espectro visto desde el software GQRX

Como podemos ver en la Figura 4, no se puede apreciar a simple vista el espectro que se quiere analizar. Al realizar un acercamiento (Figura 5) para mejorar la resolución se pueden diferenciar la información que contiene la señal.

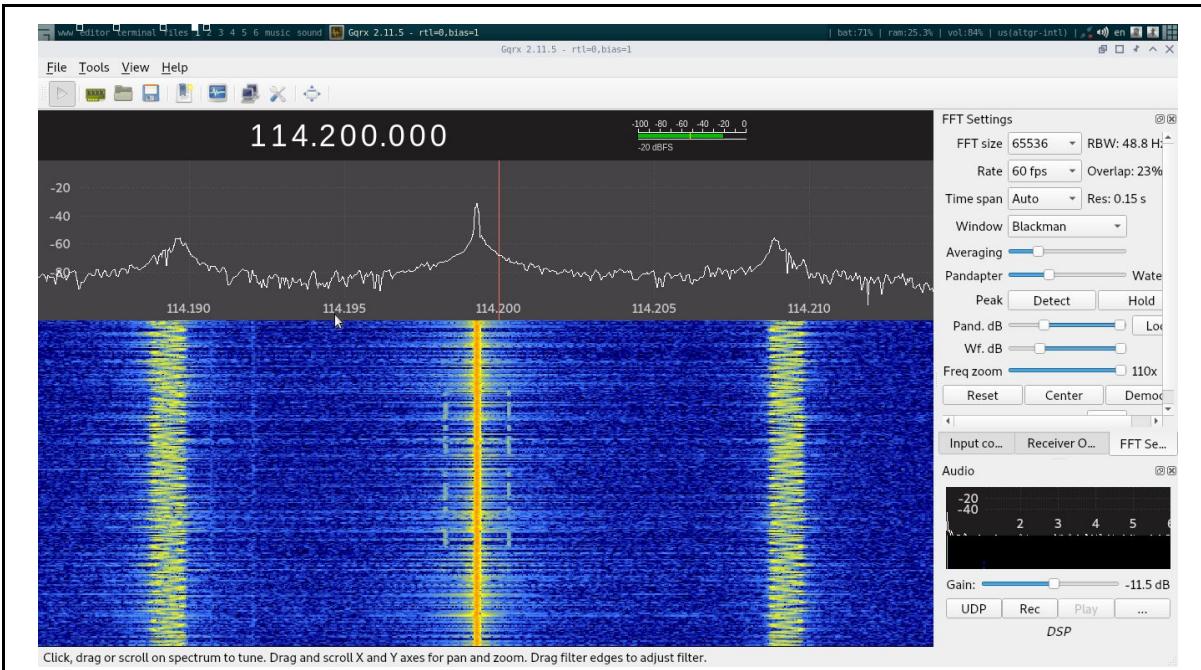


Figura 4: Espectro ampliado de la señal

La señal está compuesta de tres componentes principales:

- Una señal de referencia de $30\ Hz$ que representa el norte magnético, no es visible en la Figura 4 por ser muy cercana a la portadora.
- Una señal variable que nos indica el radial, modulada en FM sobre una subportadora de $9.96\ KHz$. Son las dos bandas laterales más alejadas que se observan en la Figura 4.
- Una señal de audio que contiene el código morse que identifica a la estación terrena mediante tonos de $1020\ Hz$. Se puede observar en la Figura 4 como líneas verticales discontinuas.

Inicialmente la grabación de la demodulación AM realizada por GQRX se introdujo en el software de edición de audio Audacity, allí es posible observar con mayor detalle la señal en el tiempo y su espectrograma. La Figura 5 muestra el espectrograma del código morse, mientras que la Figura 6 nos permite determinar de forma aproximada el desfase entre la señal de referencia y la variable.

Esta determinación mediante la observación de la señal en Audacity sólo nos permitió determinar con baja precisión nuestra ubicación relativa respecto a la antena de VOR. Por lo tanto luego desarrollamos un programa en Python que realiza los cálculos de manera automática y precisa a partir de la grabación.

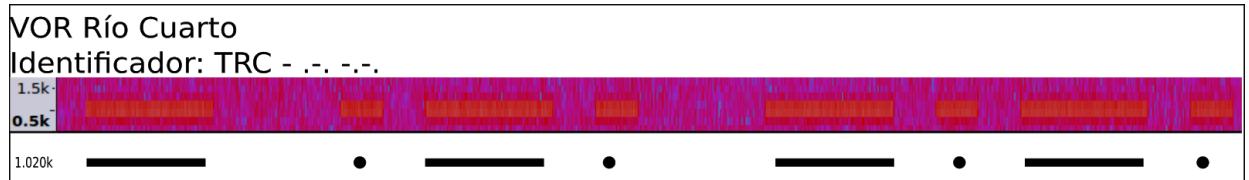


Figura 5: Visualización de espectrograma de código morse, comparado con el código de identificación de Río Cuarto

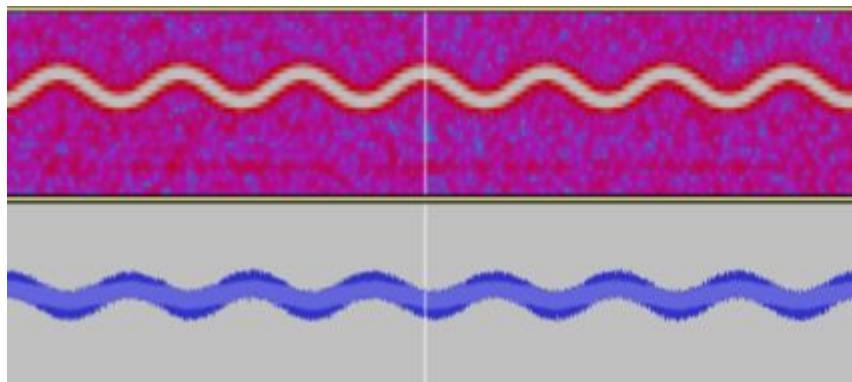
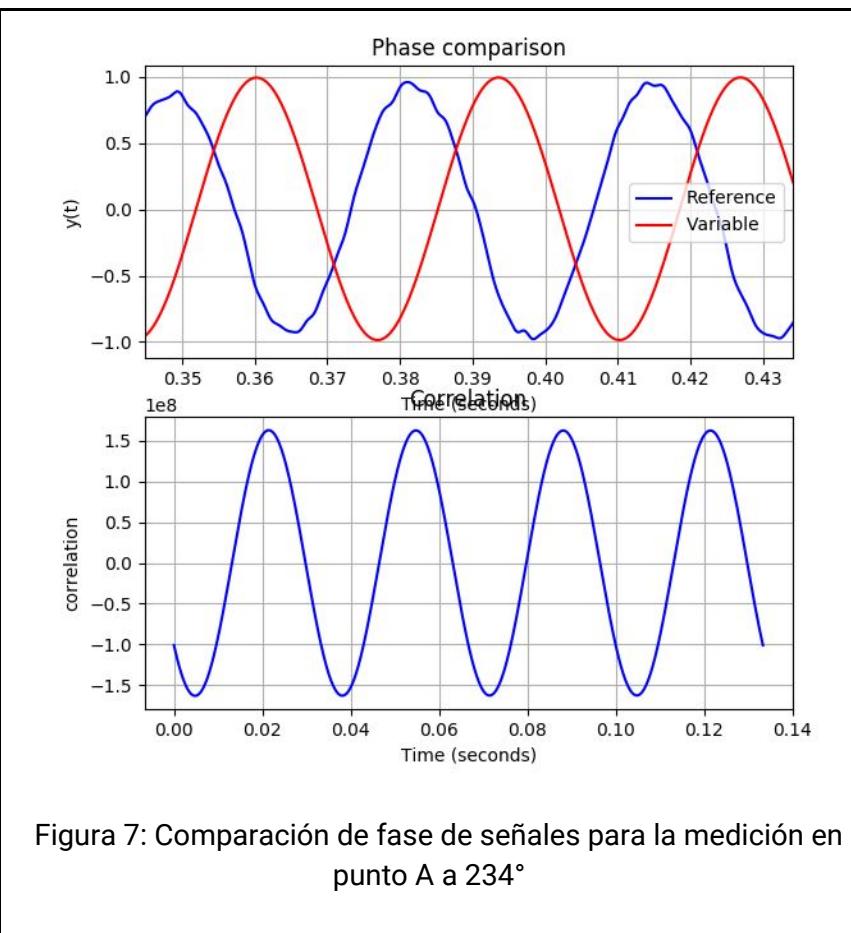


Figura 6: Arriba se muestra una ampliación del espectrograma para la subportadora FM, se observa cómo varía la frecuencia de ésta en función del tiempo. Debajo se observa la señal en el tiempo, siendo visible una baja frecuencia que se corresponde con la señal de referencia. Se puede observar que ambas están a contrafase, esta grabación fue realizada en el punto C

Se utilizaron las librerías de Numpy, Scipy y Matplotlib. Los pasos que realiza el software son:

- Aplicar a la entrada un filtro pasa bajos para obtener la señal de referencia
- Aislar de la señal de entrada con un filtro pasa banda, la subportadora FM
- Multiplicar esta señal FM por una exponencial compleja para realizar un corrimiento en frecuencia de ésta hasta los $0Hz$, de esta forma obtenemos la FM en banda base como una señal compleja
- Calcular el argumento (ángulo) de cada muestra compleja de la señal FM, para obtener la señal modulante que en este caso es la señal variable
- Finalmente, comparar la fase de la señal de referencia y de la señal variable para obtener el radial. Para obtener el desfase se utilizó una correlación cruzada entre ambas señales, ver Figura 7.



Un problema con el que nos encontramos al realizar el procesamiento digital de señales es que cada filtrado produce un retraso, en nuestro caso utilizamos filtros FIR cuyo retardo es igual a la mitad de la longitud de la ventana del filtro. Como se realizan filtrados diferentes para ambas señales es necesario tener en cuenta los retrasos que cada una de estas presentan antes de calcular la fase relativa entre ellas.

Al finalizar el procedimiento nos encontramos que la señal variable siempre se encontraba 114° retrasada respecto a lo que debería, consideramos que se debe a un error en el cálculo de los retardos provenientes de cada filtro pero no logramos determinarlo. Por lo tanto fue necesario calibrar nuestro programa por única vez mediante la medición desde una posición conocida, de esta forma determinamos que la corrección necesaria es de 114°. Una vez calibrado, el programa produce resultados correctos para cualquier medición.

Los resultados obtenidos para cada una de las mediciones fueron:

- Punto de medición A: 235.8°, siendo 234° el valor medido en el mapa.
- Punto de medición B: 291.6°, siendo 293° el valor medido en el mapa.
- Punto de medición C: 178.2°, siendo 177° el valor medido en el mapa.

Conclusión

A partir de las mediciones realizadas, se puede decir que es factible realizar una medición de un transmisor VOR a partir de un dispositivo accesible y de fácil obtención en el mercado tal como un SDR. Gracias a este dispositivo se pudo determinar el radial desde el punto de medición respecto de la estación terrena de VOR del Aeropuerto de Río Cuarto.

Por otro lado, se pudo realizar una recepción y aproximación del ángulo de la señal recibida del VOR, identificando las distintas señales que teóricamente se pueden observar en el espectro de la misma. Una excepción es la señal de $30\ Hz$ que por estar muy cerca de la portadora resulta difícil de ver en el espectro, pero sí pudo ser identificada en el dominio del tiempo con el software de Audacity. En un principio, se obtuvo una diferencia en ángulo respecto de lo medido a partir de imágenes satelitales, por lo que se debió calibrar el código de Python con una medición exacta, para establecer el offset que tiene que tener debido a los retardos producidos por el filtrado. Una vez calibrado el programa el error presente en las tres mediciones realizadas fue menor de 3° .

También se pudo obtener el código morse que posee la estación, que sirve como identificación para las aeronaves que sintonizan su frecuencia.

Referencias

1. <http://www.f4gkr.org/tag/vor/>
2. Trabajo final de grado. "[Modelo y Simulación de VOR en Entorno de Multitrayecto](#)", Carmen Cruz Bejarano Espada. Universidad de Sevilla, 2015.
3. <https://www.radiojitter.com/real-time-decoding-of-vor-using-rtl-sdr/>