



UNIVERSIDAD DE GRANADA

PROYECTO DE SISTEMAS ELECTRÓNICOS INTEGRADOS

Diseño de un sistema de captación de señales satélites NOAA con corrección de efecto Doppler

Recepción y procesamiento de imágenes APT.

Autores

Andrés Biedma Pérez
Javier Lobato Martín
Sergio Zapata Caparrós

Director

Javier Díaz Alonso



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS INFORMÁTICA Y DE
TELECOMUNICACIÓN

—
Granada, Enero de 2023

Índice

1. Introducción	2
1.1. Estándar APT	2
1.2. Efecto Doppler	2
2. Distribución del proyecto	3
3. Hardware	3
3.1. Antena dipolo en V	3
3.2. RTL-SDR	5
4. Software	7
4.1. Programa Gpredict	7
4.2. Diagrama de flujo en GNU Radio	7
4.3. Corrección del efecto Doppler	10
4.4. Método propuesto	11
5. Resultados	11
6. Dificultades en la realización del proyecto	11
7. Conclusiones y líneas futuras	13
8. Presupuesto	13

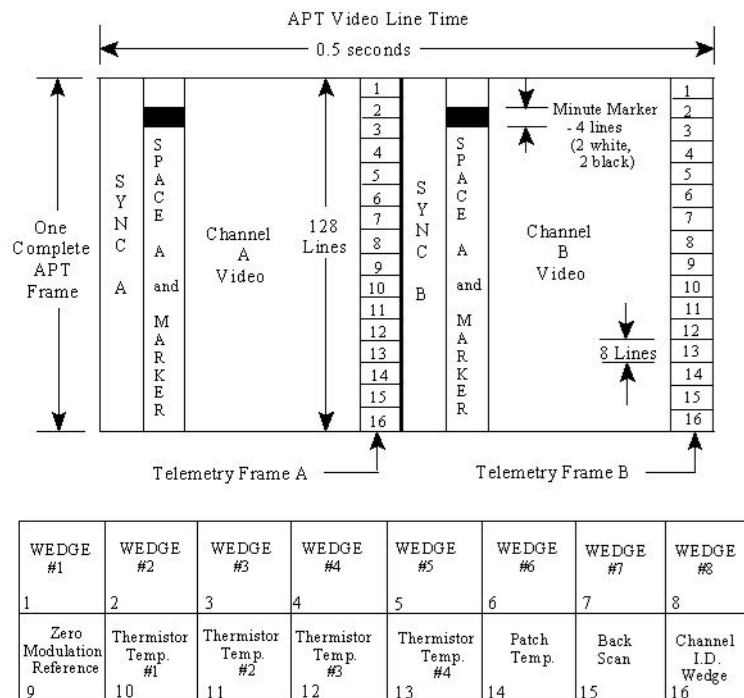
1. Introducción

El objetivo de este proyecto es el diseño de un sistema completo de recepción de imágenes de satélites NOAA. El sistema incluye la especificación y fabricación de una antena adaptada a la naturaleza de la señal que se desea recibir, así como el diseño del software que permita tanto la demodulación y obtención de la imagen como la corrección del efecto Doppler sobre la misma. En los siguientes apartados se realizará un análisis de los distintos apartados del proyecto.

1.1. Estándar APT

El estándar APT es un sistema analógico de transmisión de imágenes, introducido en la década de 1960 para su uso en satélites de meteorología. El objetivo del estándar era permitir a los usuarios recibir imágenes meteorológicas usando estaciones de bajo coste.

La información transmitida está compuesta por dos canales de imágenes, información de sincronización y telemetría, dispuestas en líneas horizontales de 2080 píxeles. La siguiente figura ilustra la disposición de las imágenes:



Notes:

- 1) Each telemetry frames consists of 16 points
- 2) Telemetry frame rate is 1 frame per 84 seconds
- 3) Each telemetry point is repeated on 8 successive APT video lines

Figura 1: Esquema del estándar APT

En concreto, para los satélites NOAA, las imágenes cuentan con una resolución espacial de 4 km/píxel, tomando imágenes del espectro visible e infrarrojo. La información de la imagen se modula AM con 256 niveles de amplitud, para luego modularse en FM en una portadora en la banda de 137 MHz. Esta decisión de modulación permite que con un receptor sencillo se puedan obtener las imágenes que transmite el satélite. La señal es difundida de manera ininterrumpida.

1.2. Efecto Doppler

El efecto Doppler es un fenómeno consistente en la variación de frecuencia observada por un receptor debido a un movimiento relativo entre emisor y receptor. Para la casuística de satélite-

estación receptora, se tiene que el receptor se encuentra estático, y existe cierta velocidad relativa al acercarse y alejarse el satélite al receptor. La consecuencia de este movimiento relativo se traduce en una variación de la frecuencia aparente recibida conforme a la nominal. Este desplazamiento de frecuencia tampoco es constante, ya que la velocidad del satélite con respecto a la estación receptora no es constante (aunque la velocidad orbital si lo sea). En la demodulación FM se puede hacer frente a este desplazamiento de frecuencia, ya que en el proceso de demodulación es común utilizar elementos como los PLL(Phase-Locked-Loop), que anulan estos efectos. Sin embargo, en la señal AM que contiene la información de la imagen, este efecto sigue presente, y se traduce en una imagen con un aspecto 'doblado', debido a la variación en frecuencia que modifica la longitud efectiva de cada línea. En este proyecto se propondrá un método para la corrección a posteriori de este efecto en las imágenes.

2. Distribución del proyecto

El proyecto se ha realizado durante los meses de Diciembre del año 2022 y Enero del año 2023. La distribución del mismo se muestra en la Fig.[2].

FASES	Diciembre				Enero			
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
Estado del arte	Documentación, lectura de papers	Iniciación en GNU y tutoriales de diseño de antena			Crimpado de SMA			
Construcción y caracterización de la antena	Compra de materiales	Construcción de la antena dipolo en V	Caracterización de la antena dipolo en V					
Captura de señales				Captura de señales	Captura de señales	Captura de señales	Captura de señales	
Implementación del algoritmo			Desarrollo del algoritmo en GNU.	Desarrollo del algoritmo en MatLab		Métricas de error		
Redacción y presentación del proyecto							Escritura del proyecto	Preparación de la presentación

Figura 2: Diagrama de Gantt en el que se recoge la distribución del proyecto.

3. Hardware

Desde el punto de vista del Hardware se ha utilizado una antena tipo dipolo en V y un RTL-SDR, ambos se describen a continuación.

3.1. Antena dipolo en V

Puesto que se pretende escuchar las imágenes APT transmitida por satélites NOAA, se ha de diseñar una antena que opere en la banda de frecuencia de los mismos, véase Tabla [1]. Además, se ha de tener en cuenta que los satélites transmiten señales RHCP. Si se pretende obtener el mejor rendimiento, es recomendable que la antena seleccionada esté polarizada de acuerdo a RHCP. Dentro de la literatura se encuentran antenas como: antena helicoidal end-fire (*helix antena*), antena helicoidal back-fire (*QFH helix*) o dipolos cruzados, mientras que rara vez se encuentran antenas tipo espiral o *lindelblad* antena, pese a que a priori se pensase en utilizar antenas circulares. Esto se debe a que construir *DIY* antenas con una relación axial igual a 1 (o polarización circular perfecta) resulta realmente difícil y cualquier pequeño error implica: una polarización elíptica y una reducción del ancho de banda de trabajo. Es por ello que para elegir

Satélite	Frecuencia de emisión [MHz]
NOAA - 15	137.630
NOAA - 18	137.9125
NOAA - 19	137.100

Cuadro 1: Tabla resumen con las frecuencias de emisión APT de cada satélite NOAA.

la antena que ideal: aquella que se adecuase a nuestras habilidades de construcción y garantizase la recepción de señales procedentes de satélites NOAA, se realizó un análisis de la polarización cruzada, véase Tabla [2].

Polarización	Vertical	Horizontal	RHCP	LHCP
Vertical	0dB	-20dB	-3dB	-3dB
Horizontal	-20dB	0dB	-3dB	-3dB
RHCP	-3dB	-3dB	0dB	-20dB
LHCP	-3dB	-3dB	-20dB	0dB

Cuadro 2: Tabla resumen de la relación de polarización cruzada entre las polarizaciones: vertical, horizontal, LHCP y RHCP.

La tabla 2 reafirma lo sensible que puede resultar un error que varíe la polarización en la construcción de la antena. Es por ello que se decidió sacrificar unos cuantos dB y optar por un diseño de antena más simple con polarización lineal. Entre las múltiples ventajas de las antenas de polarización lineal (vertical u horizontal) destacan: la facilidad del diseño, presentan patrones de radiación omnidireccionales, es fácil conseguir una impedancia de antena ($Z_{ant} = 50\Omega$), etc. El detalle que ha hecho que se opte por la polarización horizontal es que la inmensa mayoría de servicios de radio-televisión utilizan polarización vertical y de acuerdo a [2] esta se ve reducida en -20dB frente a la polarización horizontal.

Teniendo en consideración todos los factores mencionados hasta ahora se decidió construir una **antena tipo dipolo en V** con polarización horizontal que cumple con las especificaciones requeridas: fácil de construir y funcional en la ancho de banda de trabajo requerido, el único problema que presentan los dipolos son los nulos laterales, sin embargo, este inconveniente se soluciona doblando el dipolo un ángulo $\theta = 120$ de forma que el diagrama de radiación del conjunto de la antena en dirección ortogonal a la misma se vea reforzado. Un modelo 3D de la misma se muestra en Fig.[3], mientras que en Fig.[4] se muestra la perspectiva top-down.

Una vez establecida el tipo de antena y la banda de frecuencia de trabajo, se han calculado las medidas de los brazos de la antena de la siguiente forma:

$$L(m) = 147/f(MHz) \quad (1)$$

$$L(m) = 147/137,5 \quad (2)$$

$$L(m) = 1,068m = 106,8cm \quad (3)$$

Por tanto, cada uno de los brazos ha de medir:

$$L = 53,4cm$$

Una vez se construyó la antena, se hizo uso de un Vector Network Analyzer (VNA) para comprobar a través del parámetro S11 que la antena se comportaba de acuerdo a lo esperado. Los resultados tras la caracterización de dicho parámetro se muestra en la Fig. [5].

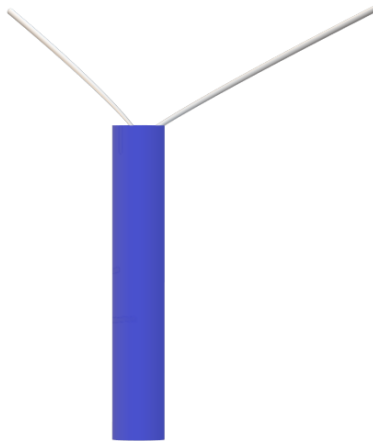


Figura 3: Modelo 3D de la antena dipolo en V construida.

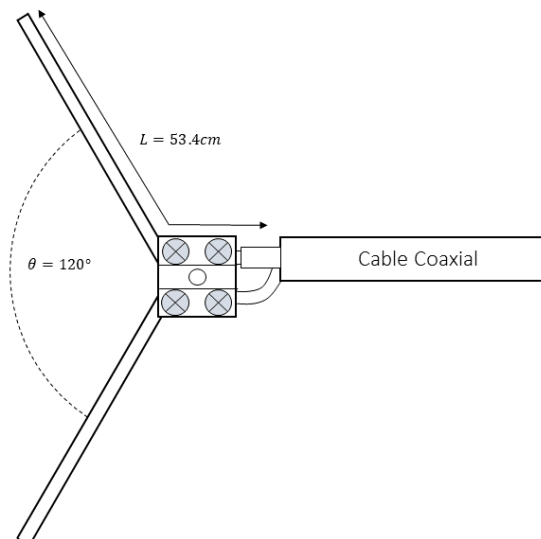


Figura 4: Perspectiva top-down de la antena dipolo en V construida.

3.2. RTL-SDR

Las siglas SDR (Software Defined Radio) en un sistema de comunicación hacen referencia a la implementación de componentes (tradicionalmente en hardware) por software. En la *Figura 6* se ejemplifica el comportamiento de un SDR.

Directamente se muestrea y se genera la señal en radio frecuencia (RF). Se consigue eliminar la inclusión de componentes en una frecuencia intermedia y se gana en flexibilidad, ya que todo el procedimiento se realiza en el dominio digital. También se obtiene una información más precisa al eliminar posibles mezcladores.

En concreto, el dispositivo RTL-SDR es un tipo de radio definida por software a la que se incorpora el chip "RTL832U". Este dispositivo es capaz de proporcionar las partes real y compleja de la señal en banda base, pudiendo abarcar gran parte del espectro de radio frecuencia. El sintonizador interno cubre un ancho de banda desde los 25 MHz hasta casi los 2 MHz. La frecuencia máxima de muestreo en este caso se sitúa en 2,4MHz.

Este tipo de dispositivos fueron pensados primeramente como receptores DVB-T para la

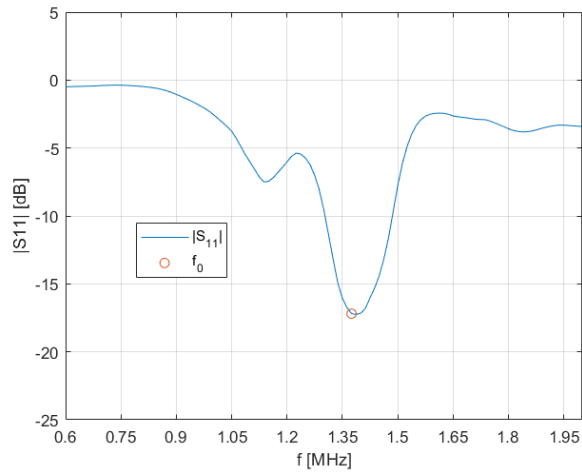


Figura 5: Módulo del parámetro S11 medido.

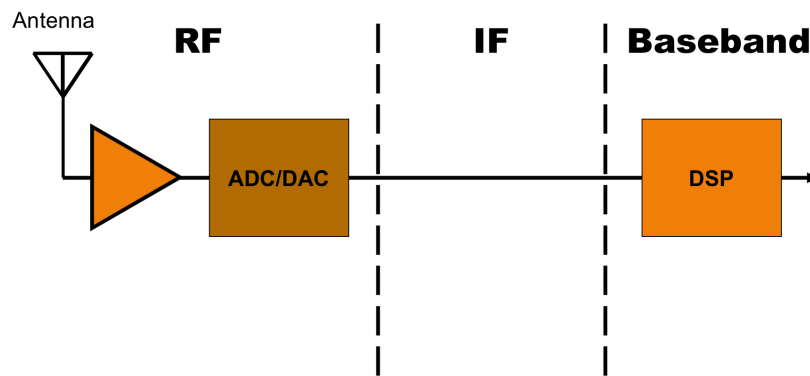
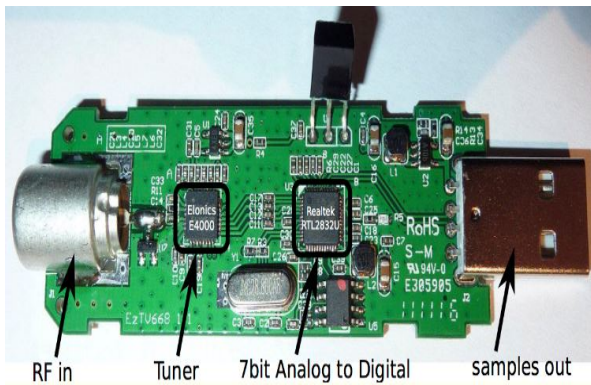


Figura 6: Software Defined Radio



(a) Interior RTL-SDR



(b) RTL-SDR utilizado

Figura 7: Esquema RTL-SDR

televisión, pero su gran versatilidad ha dado lugar a diferentes usos en FM, AM e incluso GPS. El RTL-SDR utilizado en el proyecto se muestra en la *Figura 7b* y su interior en la *Figura 7a*.

4. Software

4.1. Programa Gpredict

Se ha utilizado como herramienta de apoyo el programa *Gpredict*. Es un programa que llega a proporcionar información sobre una gran cantidad de satélites, así como su órbita, velocidad y frecuencia a la que emiten, tiempo en función de la posición...

Es necesario definir primero una estación base. En el caso de este proyecto, se han definido las coordenadas de Granada, España. Una vez definida la estación base, se seleccionan los satélites a los que les quieres realizar el seguimiento. En este caso serán los satélites NOAA activos (NOAA-18, NOAA-19 y NOAA-15). La interfaz del programa con la estación base y los satélites definidos se muestra en la *Figura 8*.

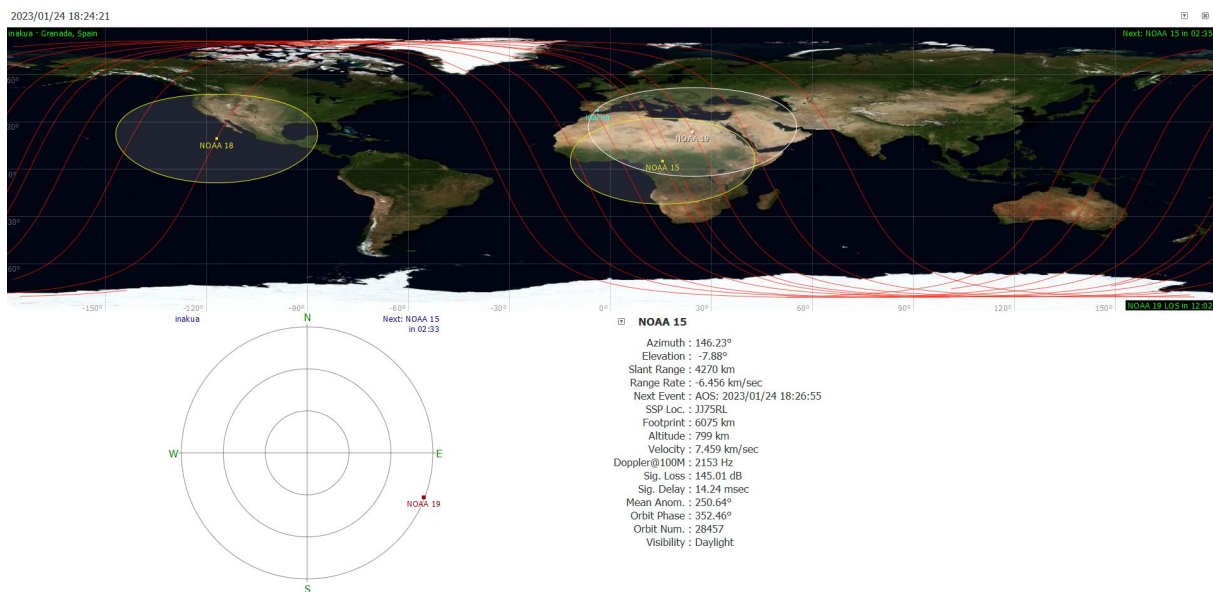


Figura 8: Gpredict satélites NOAA

En la parte inferior de la captura de pantalla se puede visualizar la posición en coordenadas del satélite y otros datos como la velocidad, altitud, fase, elevación y hasta una aproximación del efecto Doppler en unidades de frecuencia.

Más información sobre cada satélite se puede consultar mediante click derecho en el satélite en cuestión. Es de interés la información de *Future Passes*, la cual ayuda a saber a qué momento del día va a pasar el satélite cerca de nuestra ubicación de la estación base.

Dentro de esta misma opción, se puede visualizar gráficamente la trayectoria del satélite, como se observa en la *Figura 9*. Esta representación es de gran ayuda para saber el tiempo óptimo a la hora de captar la señal. Con los datos proporcionados por *Gpredict*, se ha logrado en este proyecto captar las señales de los satélites NOAA para los tiempos previstos, por lo que es de gran utilidad.

4.2. Diagrama de flujo en GNU Radio

Con el propósito de procesar la señal recibida del RTL-SDR a tiempo real se ha creado un diagrama de bloques en GNU Radio. Los pasos a realizar en el procesamiento de la señal se han realizado teniendo en cuenta el estándar APT y son los siguientes:

1. Filtrado paso baja y decimado

El bloque de "RTL-SDR Source" capta la señal directamente del dispositivo, con una tasa de muestreo de 2,4MHz, la frecuencia central la del satélite deseado y una ganancia

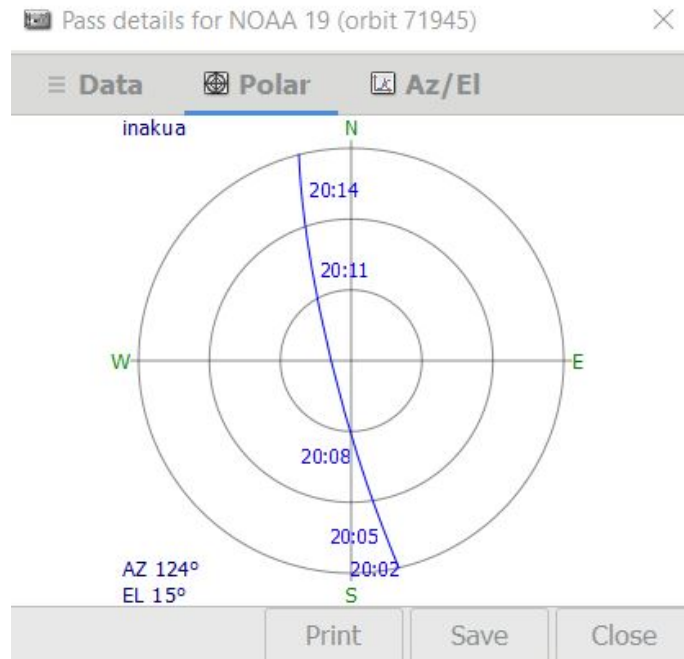


Figura 9: Trayectoria NOAA-19

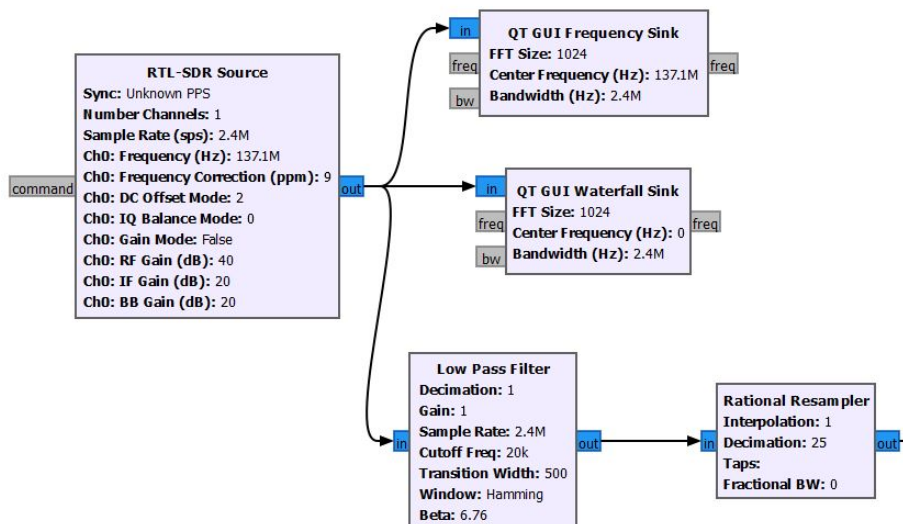


Figura 10: Filtrado y decimado

en RF bastante alta (unos 35-40 dB). Se filtra paso baja con una frecuencia de corte poco restrictiva de $20kHz$ para eliminar contribuciones ruidosas, ya que debido al efecto doppler, la frecuencia central de la señal del satélite podría variar y si se posee un ancho de banda restrictivo parte de la información podría perderse. Posteriormente se remuestra la señal para trabajar a $96kHz$.

Los bloques restantes no mencionados corresponden a *GUI*, es decir, el espectro de la señal mostrado por pantalla.

2. Demodulación FM

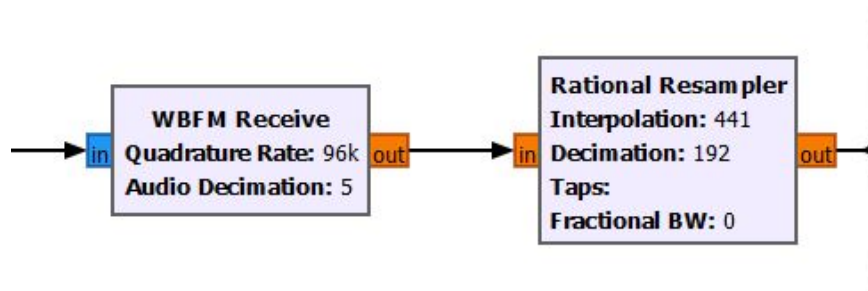


Figura 11: Demodulación FM

Para demodular en FM simplemente se ha utilizado el bloque *WBFM* el cual demodula la señal FM de banda ancha de entrada. Una vez con la señal demodulada, se adapta la frecuencia de muestreo a una típica de audio.

3. Demodulación AM y construcción de la imagen

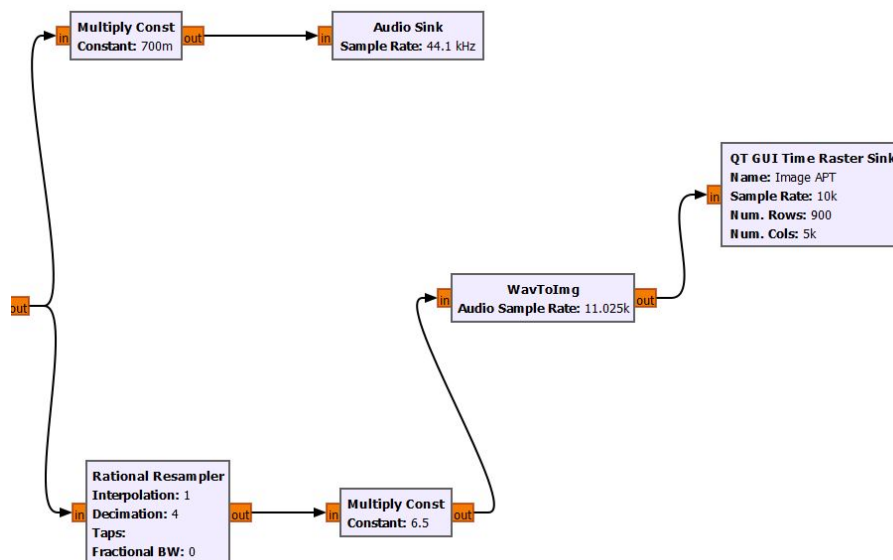


Figura 12: Demodulación AM

Después de obtener la señal de audio a la frecuencia de $11,025kHz$, se llega a un bloque jerárquico llamado *WavToImg* el cual realiza la correspondiente conversión de señal de audio a imagen APT. El interior de este bloque se muestra en la *Figura 13*.

El procedimiento se basa en una demodulación AM teniendo en cuenta que la información APT de interés se encuentra en una subportadora de $2,4kHz$. Según el estándar, se

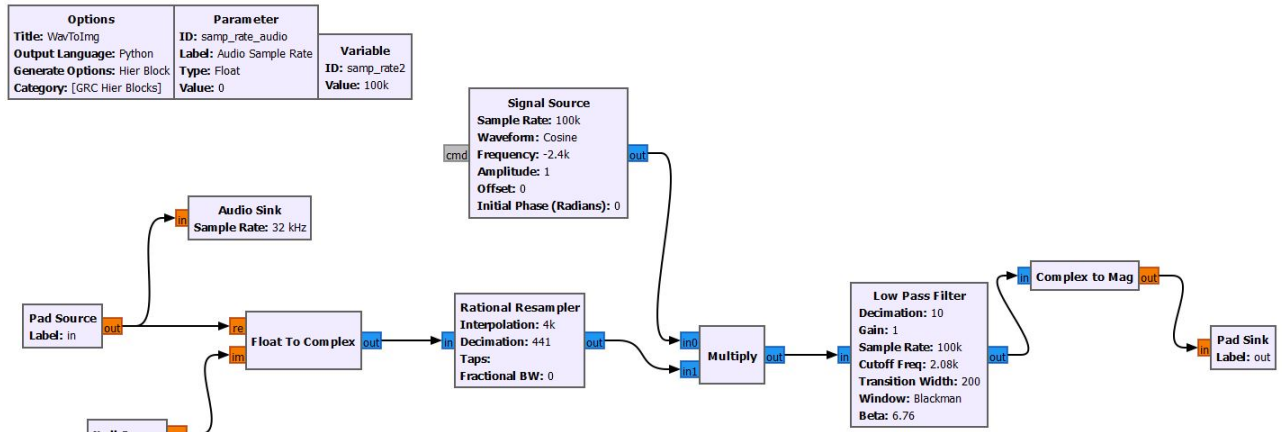


Figura 13: Bloque WavToImg

recomienda hacer un remuestreo a una frecuencia de 100kHz antes de hacer la demodulación. Para llevar la subportadora a banda base se ha utilizado un coseno a una frecuencia de $-2,4\text{kHz}$ y se ha hecho un filtrado posterior.

La salida del bloque "WavtoImg" proporciona la señal APT demodulada y se muestra la imagen por pantalla a tiempo real.

En la Figura 14 se aprecia el diagrama de flujo completo.

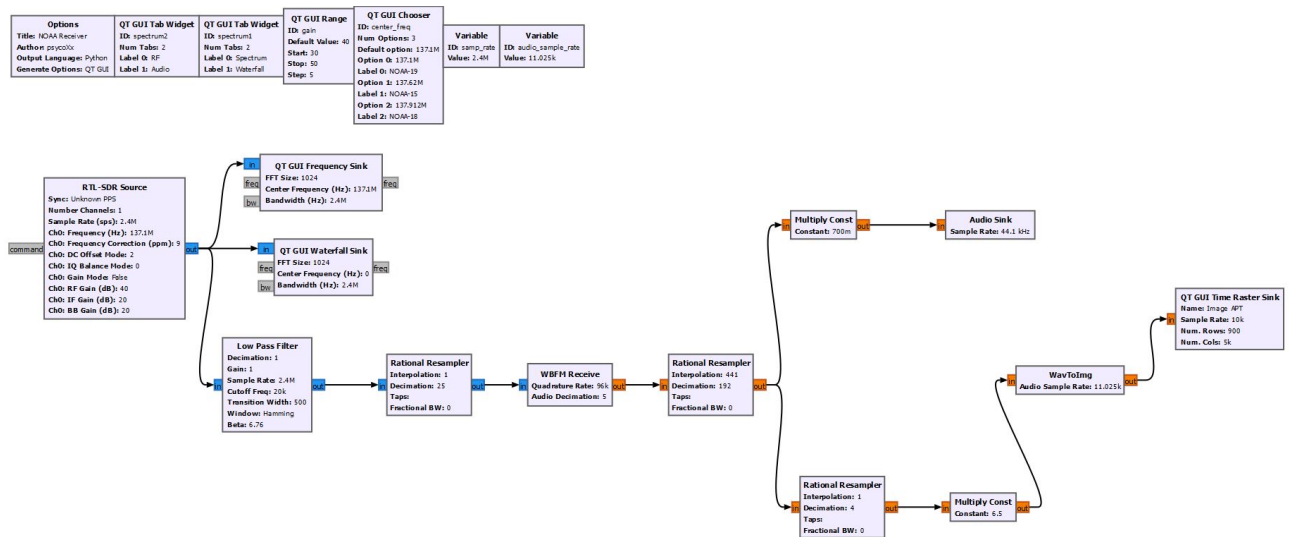


Figura 14: Diagrama de flujo

4.3. Corrección del efecto Doppler

Para la corrección del efecto Doppler que afecta a la imagen se pueden llevar a cabo dos aproximaciones distintas: en tiempo real y a posteriori:

- **En tiempo real:** Para realizar una corrección en tiempo real del efecto Doppler se debe contar con información en tiempo real de la órbita del satélite. Conociendo su posición, dirección y velocidad (así como la posición del receptor, asumiéndolo estático) se puede obtener fácilmente la variación de frecuencia causada por el efecto Doppler. El único problema de esta aproximación es que se tienen que exportar en tiempo real los datos de

la órbita de una aplicación de observación a la aplicación que se utilice para el procesamiento de la señal. Considerábamos que esta opción no era la idónea, por lo que nos centramos en una aproximación a posteriori.

- **A posteriori:** Bajo este esquema, se obtiene una señal afectada por el efecto Doppler, y se le aplica un algoritmo que elimina dicho efecto. Este ha sido el método elegido para este proyecto.

4.4. Método propuesto

Utilizando un método a posteriori, se puede corregir el efecto Doppler de cualquier imagen APT, con independencia del momento en el que se tomó la imagen y sin necesidad de contar con la información exacta de la órbita del satélite en el momento de paso. Se ha implementado un algoritmo en Matlab que lleva a cabo una corrección. Su funcionamiento está basado en la interpolación / decimado de las líneas de la imagen, en base a la información aportada por el estándar APT. La descripción del algoritmo:

- Se realiza un filtrado de la señal AM para eliminar posibles componentes indeseadas. La señal se sobremuestra para que la corrección del efecto Doppler pueda realizarse con una precisión 'sub-píxel' lo que nos dará los mejores resultados.
- Se crea el pulso de sincronización del primer canal de la imagen, con el que se practica la correlación con la señal recibida. El resultado de esta función de correlación nos dará una serie de picos que nos indicarán el comienzo de cada línea.
- Se analiza cada línea en un bucle, en la que se compara la longitud real de cada línea con la longitud que debería tener de acuerdo con el estándar (2080 píxeles). Si la longitud es la esperada no se realiza ninguna operación, si la longitud es menor o mayor de la esperada, se practica una interpolación o un decimado, respectivamente. Con este método, todas las longitudes de las líneas pasan a ser iguales, con un comienzo y un final equivalente. De esta manera se elimina el efecto sobre la imagen del efecto Doppler. La imagen se decima a su tamaño original y se representa.

5. Resultados

6. Dificultades en la realización del proyecto

Durante la realización del proyecto se han enfrentado diversas dificultades que se detallan a continuación:

- **Punto de partida:** Ninguno de los tres integrantes del grupo había trabajado o tenía experiencia previa en nada relacionado con comunicaciones satélites. Empezar a trabajar supuso una barrera de entrada importante, con la intención de superarla nos pusimos en contacto con: D. José Antonio Pérez Carrasco, profesor de la Universidad de Sevilla que nos proporcionó material con el que comenzar.
- **GNU-Radio y SDR:** Pese a que conocíamos ambas tecnologías, no habíamos desarrollado ningún proyecto utilizándolas y familiarizarnos con ellas requirió tiempo.
- **Diseño y montaje de la antena:** Tal y como se ha desarrollado anteriormente, la elección de la antena no fue una tarea fácil y aún menos lo fue el montaje. Tuvimos varios problemas a la hora de construirla:

- Compra de conectores SMA erróneos.
 - Rotura del montaje: la antena sufrió un pequeño accidente que hizo que tuvierámos que volver a conectar el cable coaxial a un nuevo SMA del que en aquel momento no se disponía.
- **Recepción y procesamiento de las señales:** Tuvimos que fracasar en muchos intentos hasta que fuimos capaces de recibir la señal de un satélite con un nivel de calidad suficiente. Entre los muchos factores que influyeron el proceso de recepción se destacan:
- Orientación de la antena: La antena ha de estar orientada Sur - Norte.
 - Tiempo de medida: Por cada medida se requiere de media unos 10 min.
 - No siempre existe LOS.
 - Errores de sincronización entre SharpSDR y GPredict.
 - Manejo del estándar APT: nunca antes se había trabajado con un estándar analógico. APT es un estándar antiguo y localizarlo en la web no fue fácil.
- **Planificación:** Debido a festivos este año los proyectos algo más tarde y debido a una cuestión organizativa de horario no se han podido disfrutar de 2h de clase seguidas para trabajar en los mismos lo cual ha dificultado el proceso.

7. Conclusiones y líneas futuras

Este proyecto se ha realizado durante dos meses y con una disponibilidad temporal de los integrantes limitada. A pesar de ello, se ha logrado avanzar relativamente rápido y se han logrado unos buenos resultados. Ha sido un proyecto con poco presupuesto, por lo que, seguramente, invirtiendo en una antena con mejores prestaciones o la incorporación de un empotrado hubiera mejorado notablemente los resultados. Ha sido un proyecto bastante completo, ya que se ha profundizado en diseño de antenas, a la hora de construir la antena de tipo dipolo en V y en el procesado de señal con la parte de radio definida por software. Además, los objetivos iniciales del proyecto se han abarcado sin problemas, ya que se ha logrado captar correctamente múltiples señales de satélites NOAA convirtiendo estas a imágenes perfectamente visibles, consiguiendo una corrección del efecto Doppler muy precisa.

Como futuras mejoras, se propone la construcción de una antena con polarización circular, ya que esta es independiente de la orientación y no haría falta un factor externo para optimizar la captación de la señal a medida que el satélite se desplaza. Otra mejora sería la inclusión de un sistema empotrado conectado al RTL-SDR. De esta manera, mediante alguna orden externa, se podría captar la señal sin la necesidad de tener conectado un hardware como puede ser el ordenador. Respecto a la corrección del efecto doppler, se ha propuesto una vía alternativa mediante la regresión lineal, la cual no depende de datos como la velocidad del satélite. Sin embargo, esta corrección que se ha realizado se realiza de forma asíncrona, por lo que una nueva mejora sería implementar una corrección del efecto doppler a tiempo real. De esta nueva forma serán necesarios datos como la velocidad del satélite en todo momento y la debida conexión a un software de seguimiento de satélites a tiempo real como puede ser *Gpredict*.

8. Presupuesto

Una vez completado el proyecto, el presupuesto asociado al mismo se detalla en la Tabla [3].

Material	Unidades	Coste/Unidad
Aluminio	2m	0.81€/m
Juntas	1	0.30€
Estructura Antena	1	5€
SDR	1	45.98€
Conectores SMA	10	1.1€/SMA
Cable Coaxial	3m	1.2€/m
Ordenador	1	800€
Coste total		867.49€

Cuadro 3: Tabla resumen del presupuesto del proyecto.