



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	2
3. Hardware	2
3.1. Antena	2
3.2. RTL-SDR	2
4. Software	5
4.1. Programa Gpredict	5
4.2. Diagrama de flujo en GNU Radio	5
4.3. Corrección del efecto Doppler	8
4.4. Método propuesto	9
5. Resultados	9
6. Dificultades en la realización del proyecto	9
7. Conclusiones y líneas futuras	10

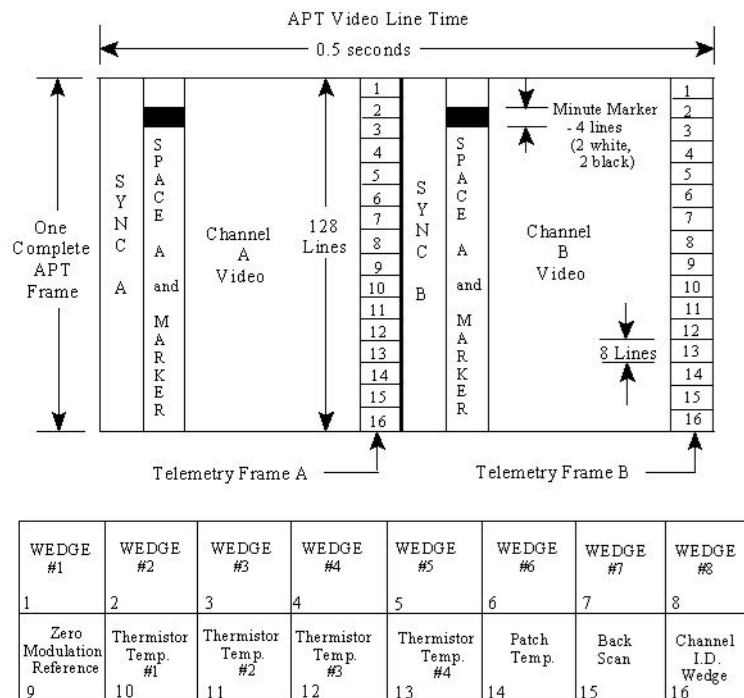
1. Introducción

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

3. Hardware

3.1. Antena

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 2* se ejemplifica el comportamiento de un SDR.

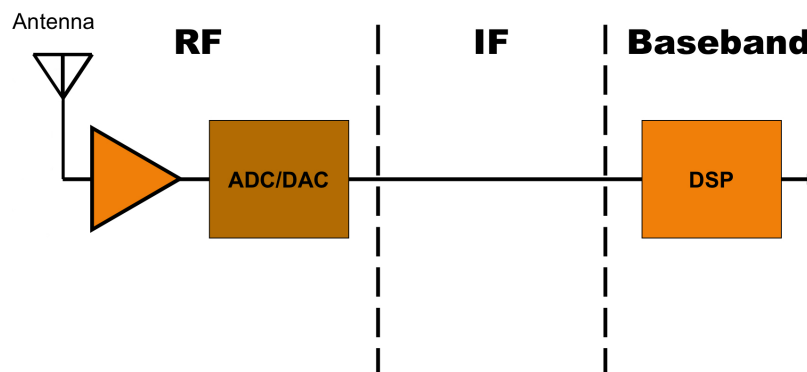
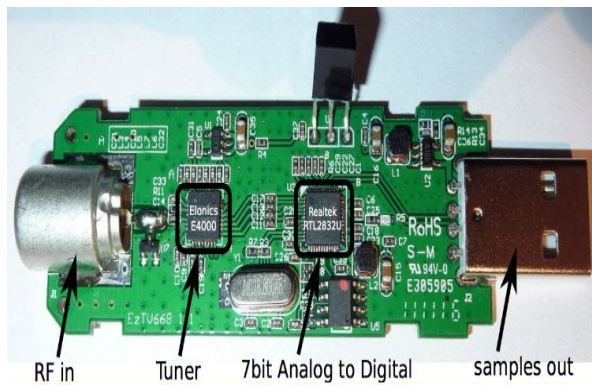


Figura 2: Software Defined Radio

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 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 3b* y su interior en la *Figura 3a*.



(a) Interior RTL-SDR



(b) RTL-SDR utilizado

Figura 3: Esquema RTL-SDR

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 4*.

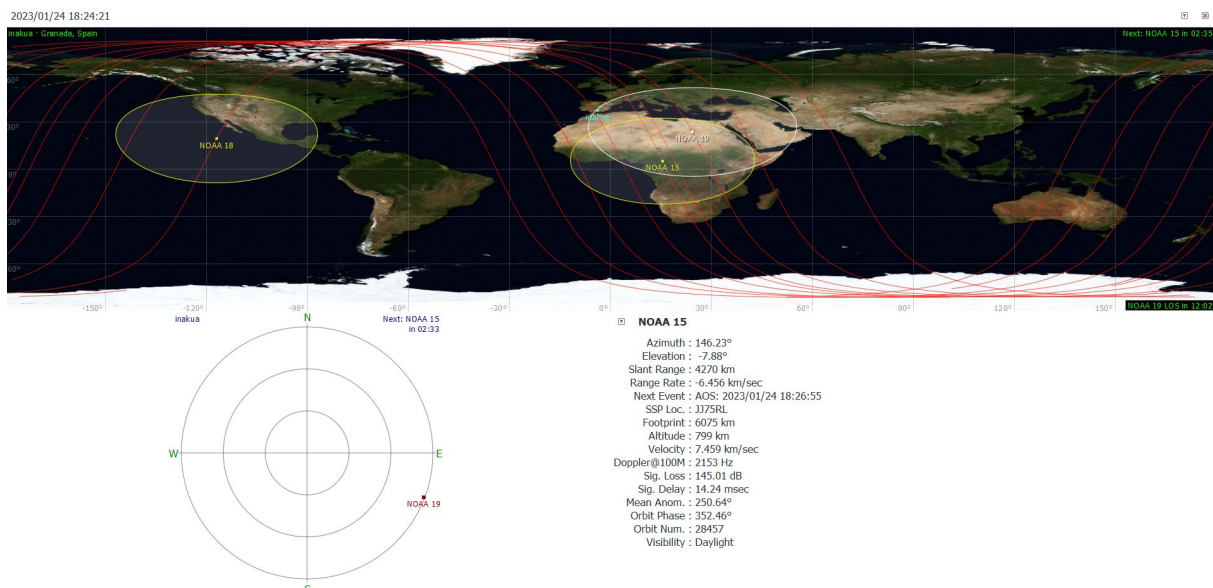


Figura 4: Gpredict satélites NOAA

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.

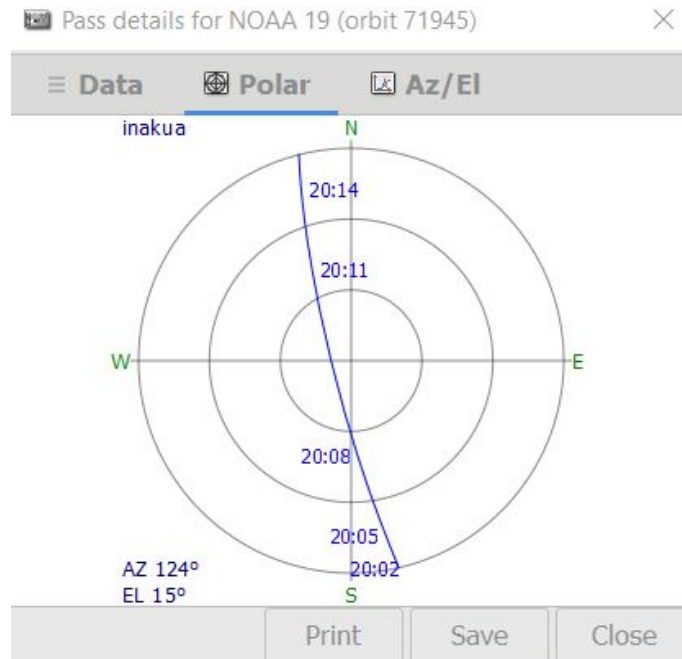


Figura 5: Trayectoria NOAA-19

Dentro de esta misma opción, se puede visualizar gráficamente la trayectoria del satélite, como se observa en la *Figura 5*. 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

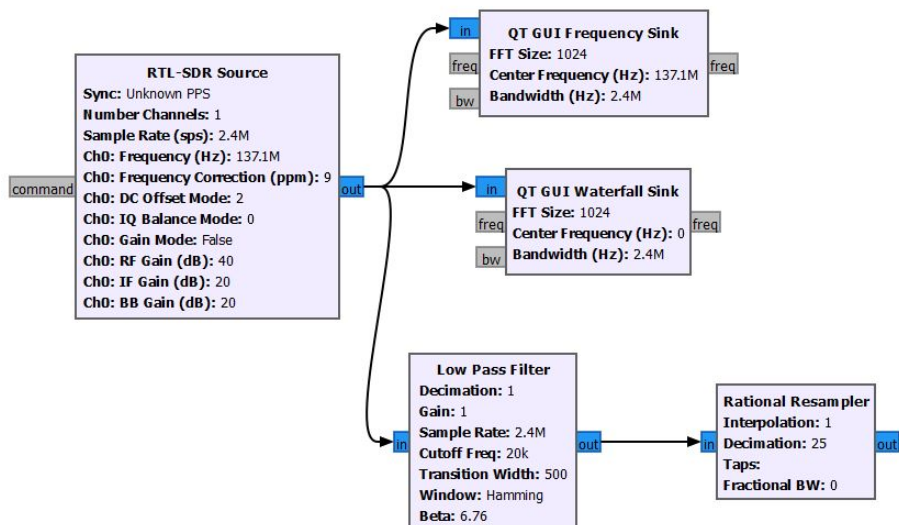


Figura 6: Filtrado y decimado

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

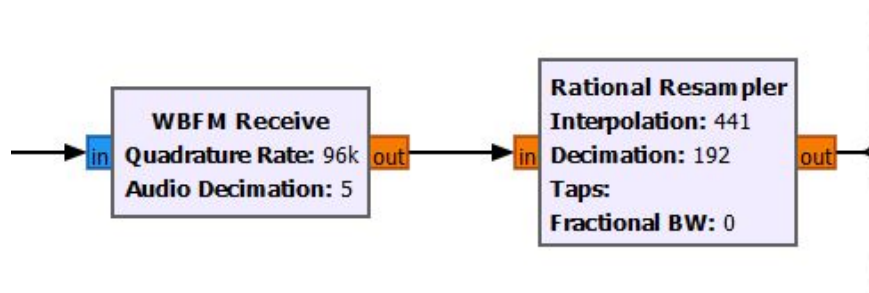


Figura 7: Demodulación FM

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

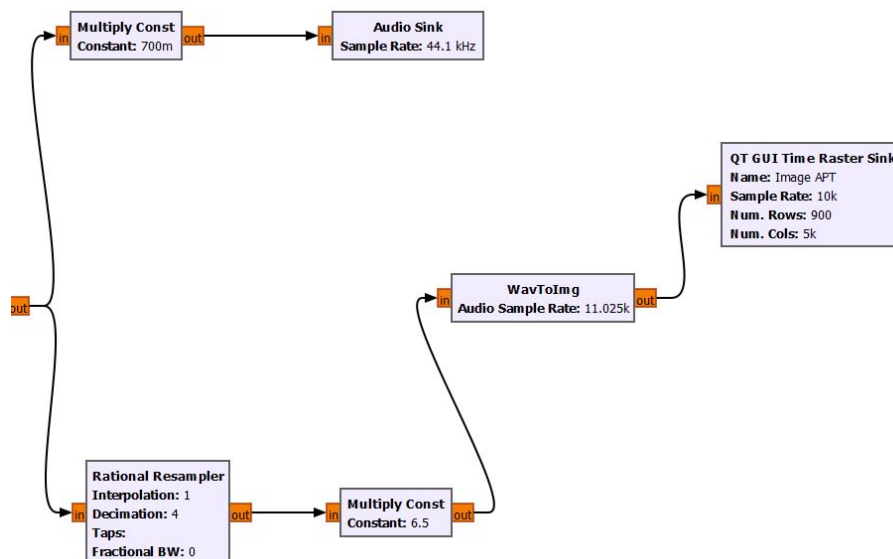


Figura 8: Demodulación AM

Después de obtener la señal de audio a la frecuencia de $11,025\text{kHz}$, 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 9.

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

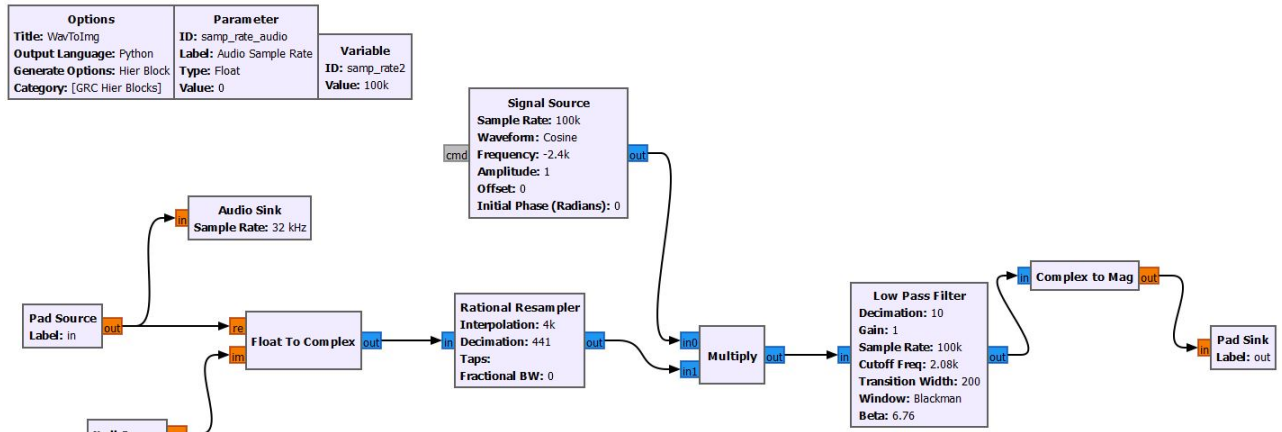


Figura 9: Bloque WavToImg

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 10 se aprecia el diagrama de flujo completo.

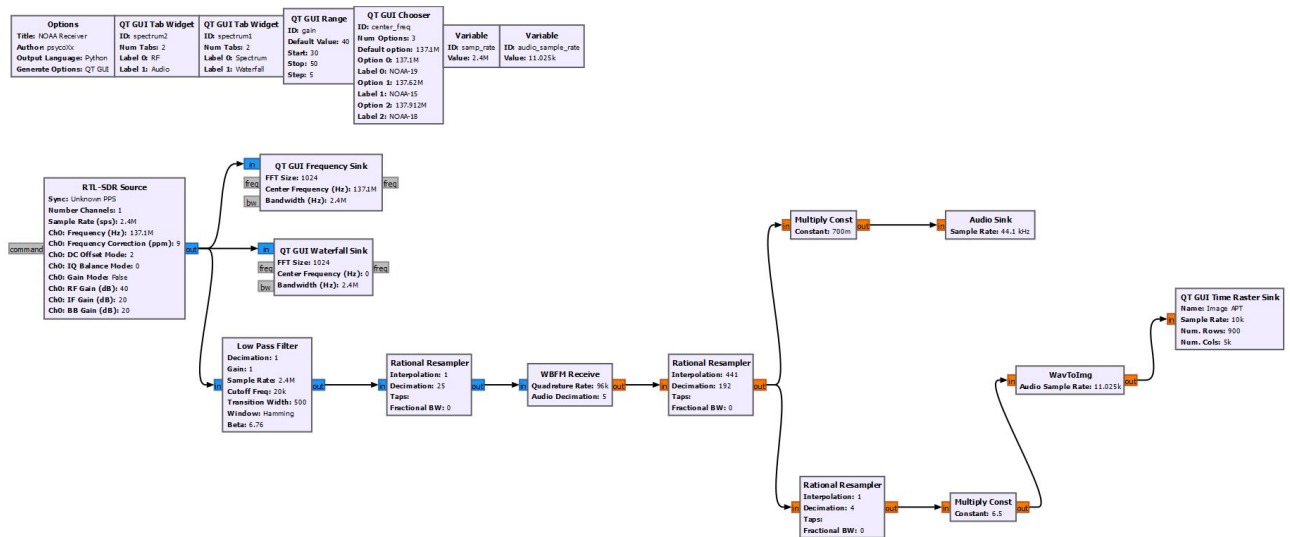


Figura 10: Diagrama de flujo

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

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*.