

E.T.S de Ingeniería Industrial, Informática
y de Telecomunicación

Acondicionamiento y calibración del sistema de
recepción de señales del radiotelescopio



Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación

Eduardo Gómez González

Rafael Ruiz Feliu

Silvia Díaz Lucas

Fecha: 13 de Mayo de 2022

Índice

1. Resumen	2
2. Radiotelescopio	2
2.1. Descripción general.....	2
2.2. Esquema	4
2.2.1. Parábola.....	5
2.2.2. Bocina	5
2.2.3. LNA.....	6
3. SDRs utilizados	7
3.1. RSPduo.....	7
3.2. BladeRF 2.0 micro xA4	8
4. Sistema de calibración con RSPduo.....	9
4.1. Analizador de espectros en GNU Radio.....	9
4.1.1. Sistema de calibración.....	10
4.2. Preparación del entorno de trabajo.....	12
4.2.1. RSPduo.....	12
4.2.2. Analizador de espectros	13
4.3. Modificación del analizador de espectros	14
4.3.1. Guardado de calibración.....	15
4.3.2. Utilización de calibración previa.....	16
4.3.3. Instrucciones de uso	17
4.4. Calibración del radiotelescopio.....	18
5. Sistema de calibración con BladeRF	23
5.1. Configuración.....	23
5.2. Observaciones	23
6. Automatización del sistema de movimiento	28
7. Vías de continuación	31
8. Referencias	32

1. Resumen

En este proyecto se han implementado distintas mejoras relacionadas con el Radiotelescopio Jocellyn Bell Burnell, propiedad de la Universidad Pública de Navarra. En concreto, se ha desarrollado un sistema de calibración y observación y automatizado parte del sistema existente de movimiento.

2. Radiotelescopio

2.1. Descripción general

El Radiotelescopio Jocellyn Bell Burnell, surgió en el año 2016 a través del interés en la radioastronomía por parte de un grupo de profesores e investigadores de la Universidad Pública de Navarra. Este se ubica en las instalaciones de prácticas de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y Biociencias, al ser este el lugar óptimo del campus para realizar las observaciones por el poco ruido electromagnético presente.

Para la correcta recepción de las señales, se decidió dotarlo de una antena parabólica de 4.5 metros de diámetro, siendo así el más grande instalado en una universidad española.



Ilustración 1: Radiotelescopio

Este, a diferencia de los telescopios ópticos, permite la captación de radiación de la región de radiofrecuencia del espectro electromagnético, lo que nos brinda la posibilidad de observar ciertos fenómenos no visibles habitualmente. Ejemplos pueden ser los púlsares o la presencia de átomos de hidrógeno neutro, lo que permite obtener imágenes de galaxias.

A través de este proyecto se desea fomentar el interés por la radioastronomía, acercándola al personal de la universidad y brindando la posibilidad a alumnos de realizar trabajos de fin de grado o fin de máster centrados en él.



Ilustración 2: Radiotelescopio en funcionamiento

2.2. Esquema

Un esquema representativo de todos los elementos necesarios para el funcionamiento del sistema sería el siguiente:

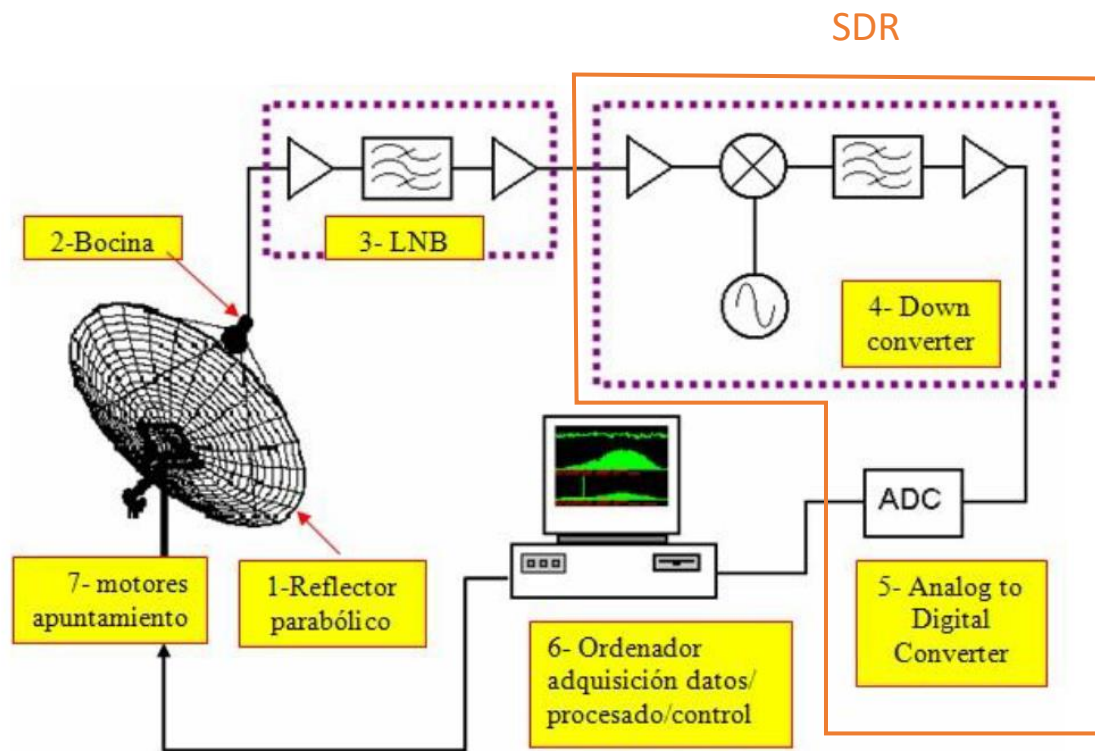


Ilustración 3: Esquema de elementos necesarios

En este se observan diferentes puntos a destacar:

1. Reflector parabólico: Elemento de captación de ondas de radio, se encarga de reflejar toda la radiación recibida sobre el mismo punto, consecuencia de las propiedades matemáticas de su forma parabólica. Este punto es la bocina.
2. Bocina: Recibe la radiación reflejada de la parábola y esta pasa al LNB.
3. LNB o Low Noise Block: Bloque encargado de amplificar y filtrar la señal obtenida. En este caso se encuentra integrado en la bocina y en su salida se tiene un cable coaxial.
4. Down Converter: Es el encargado de desplazar la señal desde la radiofrecuencia a un rango del espectro más cómodo para su manipulación, imprescindible en cualquier receptor de comunicaciones.
5. ADC o Conversor Analógico Digital: En este dispositivo se digitaliza la señal recibida para su posterior procesamiento.
6. Ordenador: Se recibe la señal digitalizada y se obtiene la información deseada mediante diversas técnicas de manipulación.
7. Motores de apuntamiento: Pueden ser controlados por el mismo ordenador.

Tras este análisis se destaca la necesidad de utilización de un dispositivo de Radio Definida por Software o SDR el cual, esencialmente, recibe una señal en la banda de radiofrecuencia y se encarga de desplazarla a otra menor y digitalizarla. De esta forma, en su salida se obtiene una señal adecuada para su manipulación mediante un ordenador.

Así, el SDR cumpliría las funciones de los elementos 4 y 5 del diagrama.

2.2.1. Parábola

Como se ha mencionado, se dispone de un reflector parabólico con un diámetro de 4.5 metros constituido por un plato de malla metálica:



Ilustración 4: Parábola antes de ser instalada

2.2.2. Bocina

Debido a que el principal objetivo por el momento es la detección de la Línea de Hidrógeno de 21 centímetros, tanto esta como el filtro paso banda presente en el LNB se encuentran diseñados específicamente para la frecuencia de emisión del hidrógeno neutro: 1420.41 MHz.

La bocina utilizada es la siguiente:

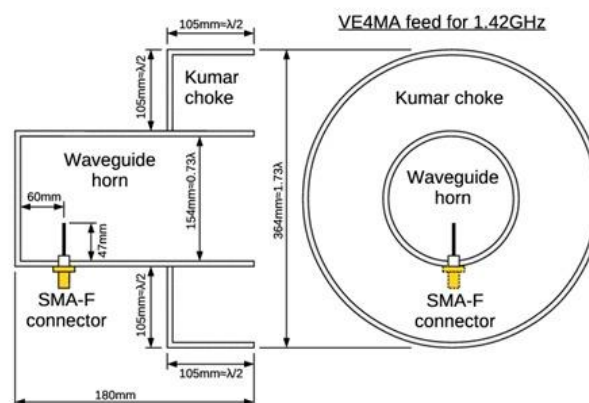


Figure 3: VE4MA feed design.

Ilustración 5: Bocina utilizada

2.2.3. LNA

El amplificador de bajo ruido que se utiliza es el siguiente:

<https://www.kuhne-electronic.com/funk/en/shop/industrial/prof-low-noise-ampli/KU+LNA+142+AH++Super+Low+Noise+Preamplifier/?card=353>

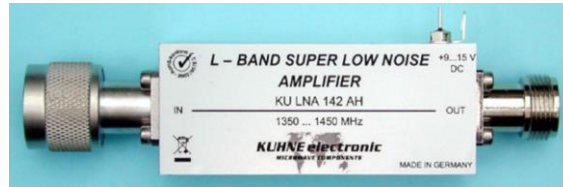


Ilustración 6: Amplificador de bajo ruido

Este, con una figura de ruido aproximada de 0.4 dB y una ganancia de 33 dB, es el primer elemento del LNB y por ello reduce en gran medida el ruido generado.

La justificación de lo mencionado se obtiene de la Fórmula de Friis para el cálculo del factor de ruido de una cadena de dispositivos, de la que se deduce que la mayor contribución reside en la figura de ruido y ganancia del primero:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots$$

Ilustración 7: Fórmula de Friis

3. SDRs utilizados

3.1. RSPduo

Este SDR, desarrollado por la compañía SDRplay, consta de un ADC de 14 bits y posibilidad de doble sintonización.

Cada uno de los sintonizadores puede operar de forma individual en un rango de frecuencias de 1KHz a 2GHz con un ancho de banda de 10 MHz, o bien ambos de forma simultánea con un ancho de banda de 2 MHz cada uno.

Además, cuenta con posibilidad de alimentación Bias-T y la conexión con el ordenador se realiza mediante puerto USB 2.0.



Ilustración 8: RSPduo

Este, junto al software SDRUno proporcionado por el fabricante, permite un completo manejo del espectro de radiofrecuencia desde 1KHz a 2GHz. Sin embargo, en este proyecto se adaptará el dispositivo para su funcionamiento con otro sistema.

Para obtener más información acerca del dispositivo, véase la [página del fabricante](#).

3.2. BladeRF 2.0 micro xA4

Desarrollado por la compañía Nuand, este SDR permite trabajar en un amplio rango frecuencial desde los 47 MHz hasta los 6 GHz con posibilidad de utilización de dos canales independientes tanto en transmisión como en recepción.



Ilustración 9: BladeRF

En su interior se encuentra el transceptor de radiofrecuencia AD9361, del fabricante de Analog Devices, el cual es capaz de operar desde simples transmisiones FM hasta las más actuales como 5G.

Por otra parte este consta de la FPGA Altera Cyclone V, de Intel, que junto al transceptor descrito forman el núcleo principal de funcionamiento del dispositivo.

La conexión con el ordenador se realiza mediante puerto USB 3.0 de última generación y todos sus puertos SMA cuentan con la tecnología bias-tee.

Para una más información, véase la [página del fabricante](#).

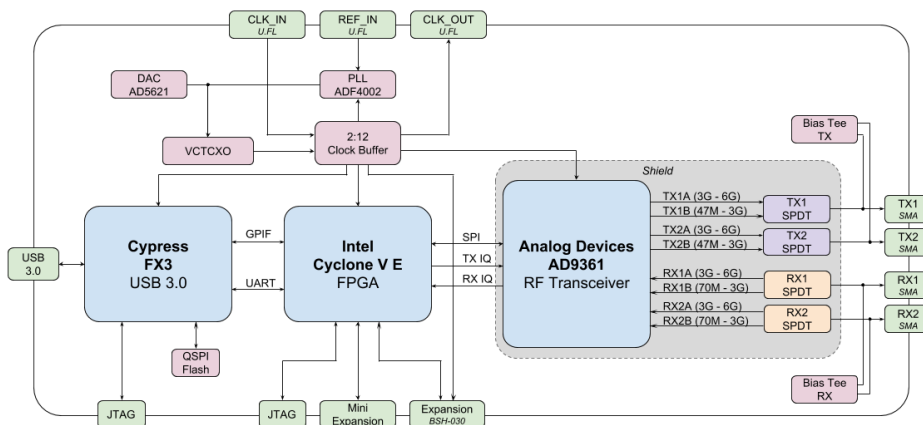


Ilustración 10: Diagrama de bloques de BladeRF

4. Sistema de calibración con RSPduo

4.1. Analizador de espectros en GNU Radio

Con el objetivo de la visualización de la línea de hidrógeno neutro, se ha utilizado el software *open-source* publicado en: <https://physicsopenlab.org/2020/07/26/gnuradio-software-for-the-21-cm-neutral-hydrogen-line/>

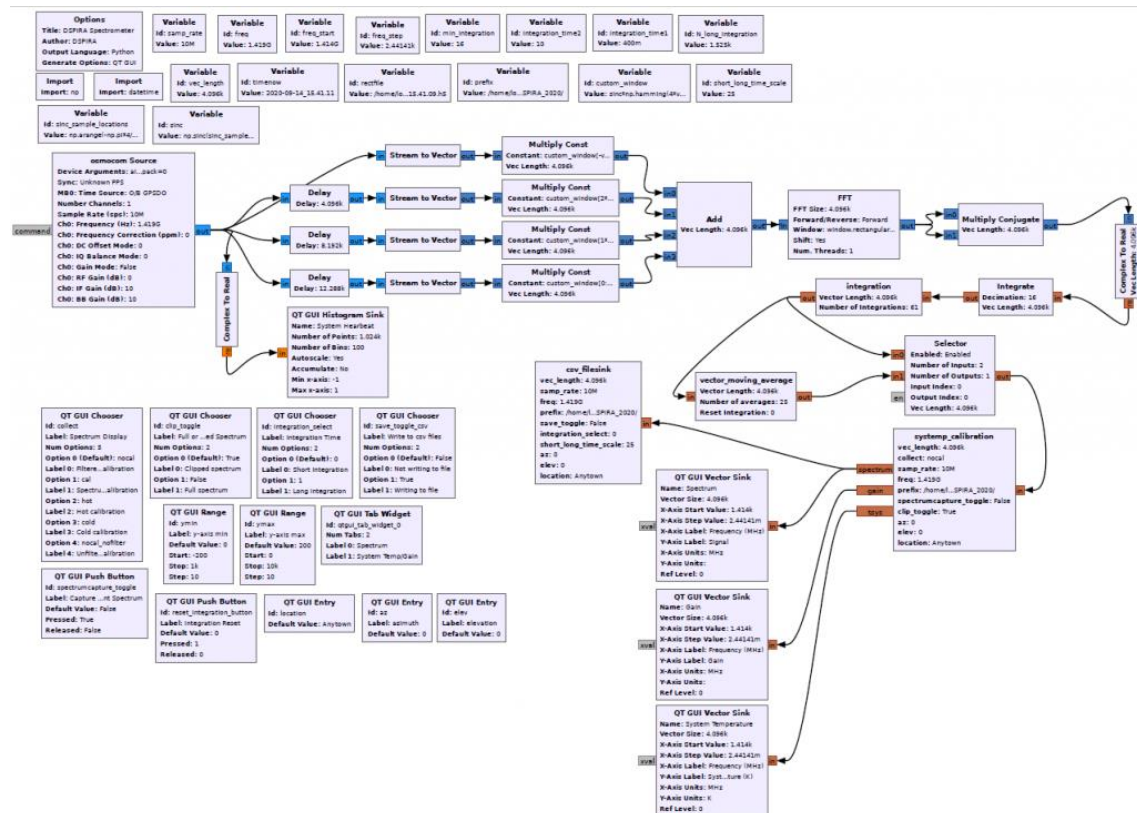


Ilustración 11: Diagrama de bloques del analizador de espectros

Cuyo interfaz en ejecución es:

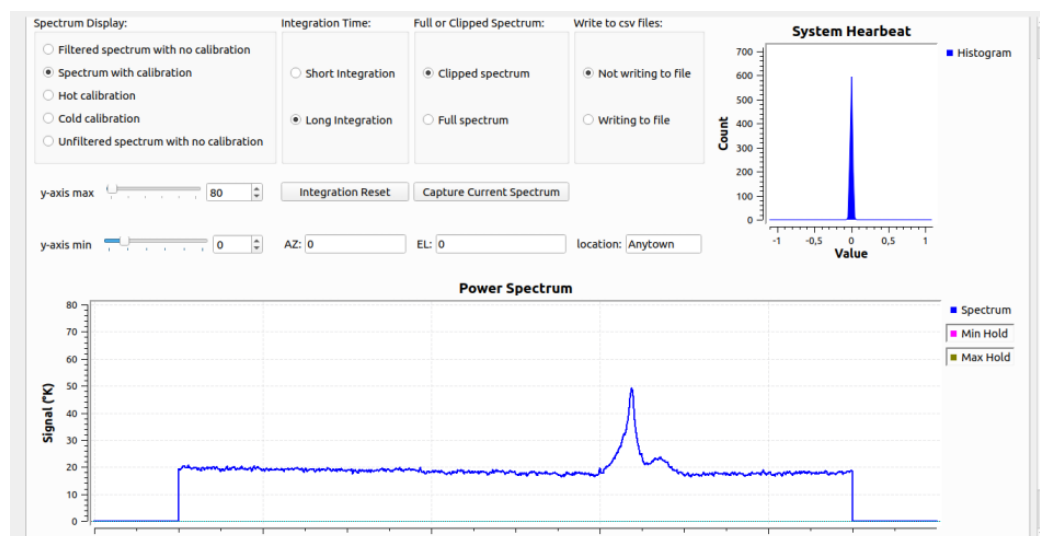


Ilustración 12: Interfaz original del analizador de espectros

Una breve explicación del funcionamiento sería:

En primer lugar se aplica a la señal un filtro polifásico, seguido de la FFT y una posterior multiplicación por ella misma conjugada. A continuación se integra la señal en un intervalo entre 0.1 y 10 segundos para minimizar el ruido y finalmente pasa por un bloque de ajuste de acuerdo a la calibración del radiotelescopio previo a la visualización de los resultados.

Por otra parte, se encuentran diferentes parámetros a configurar en el interfaz de usuario:

- “Spectrum Display”
 - “Filtered spectrum with no calibration”: Se muestra el espectro filtrado sin utilizar la calibración.
 - “Spectrum with calibration”: Se muestra el espectro filtrado y calibrado.
 - “Hot calibration”: Utilizado para calibración. Mantener seleccionado únicamente mientras se está apuntando al “punto caliente” en el proceso.
 - “Cold calibration”: Utilizado para calibración. Mantener seleccionado únicamente mientras se está apuntando al “punto frío” en el proceso.
 - “Unfiltered spectrum with no calibration”: Se muestra el espectro sin filtrado ni calibración.
- “Integration time”: Permite seleccionar el tiempo de integración del espectro. Se recomienda utilizar el corto para visualizar los resultados de forma rápida y el largo para obtener mediciones más precisas. Los valores por defecto son 400 milisegundos para el corto y 10 segundos para el largo, pero se pueden cambiar desde las variables *integration_time1* e *integration_time2*.
- “Full or Clipped Spectrum”: Permite ver el espectro completo o en un rango frecuencial determinado. Por defecto en “Clipped spectrum”.
- “Write to csv file”: Si está seleccionado guarda el espectro en un archivo .csv automáticamente una vez por cada tiempo de integración.
- “Capture current spectrum”: Guarda el espectro en un archivo .csv una sola vez cuando se pulsa el botón.

Para obtener más información acerca del sistema, véase la [página de publicación](#).

4.1.1. Sistema de calibración

El objetivo deseado es la separación de las contribuciones aportadas por el ruido y por el objeto observado. Se parte de que la potencia recibida es:

$$P_{measured} = G \cdot (T_{object} + T_{system})$$

Donde:

- $P_{measured}$ = Señal detectada por el radiotelescopio.
- G = Ganancia, relaciona la potencia medida y el brillo real.
- T_{object} = Señal recibida del objeto.
- T_{system} = Señal de ruido debida a otros parámetros.

Si se consigue hallar tanto la ganancia como la temperatura del sistema, es posible despejar la señal recibida por el astro observado. Para ello, se deben observar dos puntos distintos en el cielo, llamados “caliente” y “frío” por la señal recibida de ellos.

Si se utilizan el zenit en el momento en el que menos señales puedan recibirse como punto frío (con una temperatura arbitraria de 10K) y el suelo como punto caliente (con temperatura de 300K), se obtienen los parámetros deseados a partir de las siguientes expresiones:

$$G = (P_{hot} - P_{cold}) / (T_{hot} - T_{cold})$$

$$T_{system} = (T_{hot} - T_{cold}(P_{hot}/P_{cold})) / ((P_{hot}/P_{cold}) - 1)$$

Y finalmente, despejando de la primera ecuación:

$$T_{object} = P_{measured} / G - T_{system}$$

Este cálculo se realiza en el bloque de calibración continuamente a partir de una ganancia y temperatura del sistema dadas.

El proceso a seguir para realizar una calibración correcta es el siguiente:

1. Con la opción “*Filtered spectrum with no calibration*” seleccionada (ver [parámetros a configurar en el interfaz de usuario](#)), apuntar el radiotelescopio hacia el seleccionado como punto frío. Es válida cualquier ubicación en el cielo sin la presencia de astros.
2. Una vez que se ha llegado al destino, seleccionar la opción “*Cold calibration*” y observar los cambios en la ventana del interfaz en la que se muestran la ganancia y temperatura del sistema. Cuando se aprecie que las variaciones en estos son mínimas o han adquirido un valor fijo, pasar al siguiente paso.
3. Volver a seleccionar la opción “*Filtered spectrum with no calibration*” y apuntar el radiotelescopio hacia el punto caliente escogido. El procedimiento a seguir es análogo, con la diferencia de marcar la opción “*Hot calibration*” cuando se ha llegado al destino.

Es muy importante en este punto que, al observar que la ganancia y temperatura del sistema han dejado de variar, se seleccione la opción “*Spectrum with calibration*” antes de comenzar con las observaciones. Si se olvida este paso y continúa marcada la casilla de “*Hot calibration*”, el telescopio continuará variando los parámetros de calibración tomando como punto caliente la observación que se está realizando en cada momento y el proceso deberá volver a ser comenzado.

4. Generar y guardar los archivos de calibración en caso de que se desee partir de esta en posteriores observaciones. Para ello, seleccionar la opción “*save calibration*” cuando se observen una ganancia y temperatura del sistema constantes. Mientras esta se encuentre marcada, se realizarán guardados periódicos de los archivos cada tiempo de integración. Es importante deselegionarla cuando se considere que se han generado los archivos suficientes, de otra forma el programa los continuaría generando indefinidamente. (Ver [explicación más detallada](#)).

4.2. Preparación del entorno de trabajo

El sistema operativo sobre el que trabajan las herramientas utilizadas es Ubuntu 20.04, por lo que se ha optado por la opción de utilizar una máquina virtual con este.

Se ha optado por la versión 3.9 de GNU Radio por su compatibilidad con las versiones de los drivers del SDR y del analizador de espectros, lo que se desarrolla con mayor profundidad más adelante.

4.2.1. RSPduo

En primer lugar fue necesario instalar la API necesaria para utilizar el RSPduo en Ubuntu, se utilizó la versión 3.07 de esta, la cual se puede descargar desde el siguiente enlace: <https://www.sdrplay.com/downloads/>

Además de esta se instalaron las siguientes librerías mediante el gestor de paquetes de Ubuntu: *swig git cmake libboost-all-dev*

El siguiente paso fue instalar la librería *gr-sdrplay*, necesaria para el correcto funcionamiento del dispositivo en GNU Radio. El problema fue que la nueva versión de la API (3.07), no era compatible con la versión de la librería que ofrecía el fabricante, por lo que se utilizó la versión adaptada creada por el usuario de github *fventuri*: <https://github.com/fventuri/gr-sdrplay3>

Se siguieron las instrucciones para la compilación e instalación indicados en el repositorio, por lo que tras copiarlo se utilizaron los siguientes comandos:

```
cd gr-sdrplay3  
  
mkdir build && cd build && cmake .. && make  
  
sudo make install  
  
sudo ldconfig
```

Es importante no olvidar el último de estos, el cual se encarga de que el sistema sea capaz de encontrar la nueva librería instalada. Su no utilización puede dar lugar a problemas para la detección de esta.

Tras este proceso, se dispondrá del siguiente bloque para utilizar como fuente en GNU Radio nuestro RSPduo:

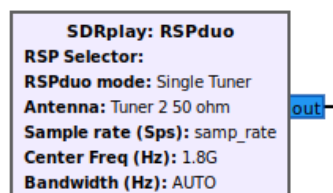


Ilustración 13: Bloque que representa el RSPduo

Para verificar el correcto funcionamiento, se han realizado escuchas de radio FM con el SDR y un diagrama de bloques de un receptor FM simple, obteniendo resultados favorables.

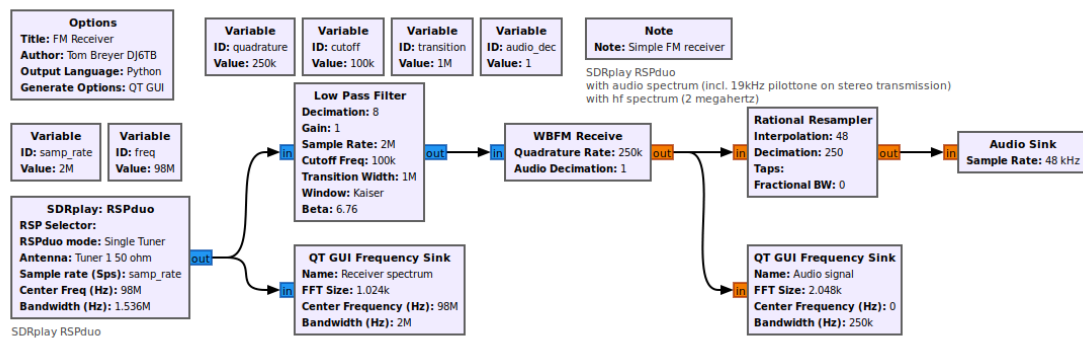


Ilustración 14: Receptor de radio FM

4.2.2. Analizador de espectros

El repositorio de descarga del software es el siguiente: https://github.com/WVURAIL/gr-radio_astro

Sin embargo, este trabaja con la versión 3.8 de GNU Radio, por lo que se ha optado por un fork realizado por el usuario *fventuri*, en el cual se adapta a la versión 3.9: https://github.com/fventuri/gr-radio_astro/tree/gnuradio-3.9

Los pasos seguidos para la instalación son análogos a los de la librería gr-sdrplay3.

En este punto, se tienen configuradas las herramientas necesarias para comenzar a trabajar con el radiotelescopio, de forma que solo es necesario cambiar el bloque fuente por defecto por el del RSPduo.

4.3. Modificación del analizador de espectros

Según el *modus operandi* del software descargado, es necesario realizar el proceso de calibración (ver apartado 4.1. *Sistema de calibración*) cada vez que se ejecuta este.

En nuestro caso, se desea poder guardar una calibración y reutilizarla más tarde con el objetivo de evitar el costoso proceso necesario cada vez que se inicie el programa, por lo que son necesarias ciertas modificaciones en el software.

Estas se realizan sobre el bloque *systemp_calibration*, modificando tanto su código interno en *systemp_calibration.py* como su apariencia en *radio_astro_systemp_calibration.block.yml*

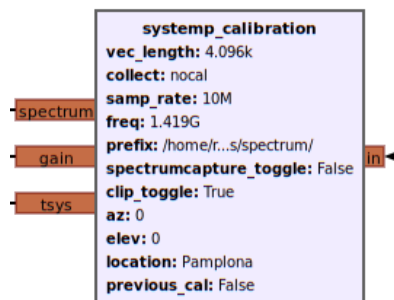


Ilustración 15: Bloque de calibración

La interfaz de usuario del programa modificado sería la siguiente:



Ilustración 16: Interfaz de usuario modificada

En ella, se aprecian dos nuevos selectores (para explicación del resto del funcionamiento, diríjase a la [explicación completa del programa](#)):

- Previous Calibration:
 - Cuando se encuentra marcada la opción “*Calibrate*”, el programa utiliza los valores de ganancia y temperatura del sistema que se observan en la pestaña correspondiente.
 - “*Previous Calibration*”: Al seleccionarse, se cargan los archivos de ganancia y temperatura del sistema indicados en las rutas. A continuación, se pueden observar estos en las gráficas correspondientes en la otra ventana. El sistema los utilizará para calibrar el espectro.
- Save Calibration:
 - “*Writing to file*”: Mientras esté seleccionada, se guardan los archivos de calibración en las rutas indicadas cada tiempo de integración. Importante tenerlo controlado, ya que si el tiempo de integración está marcado en “*Short Integration*”, la generación de archivos es muy rápida.
 - “*Not writing to file*”: Los archivos de calibración no se guardan.

4.3.1. Guardado de calibración

Como se puede observar en la imagen superior, las salidas de este bloque corresponden a los valores del espectro observado, la ganancia y la temperatura del sistema. En este caso nos centraremos en los dos últimos.

Para realizarlo, se optó por añadir un bloque de guardado csv en cada una de estas salidas, cuya actuación es controlada mediante el parámetro *save_calibration* controlado por el usuario.

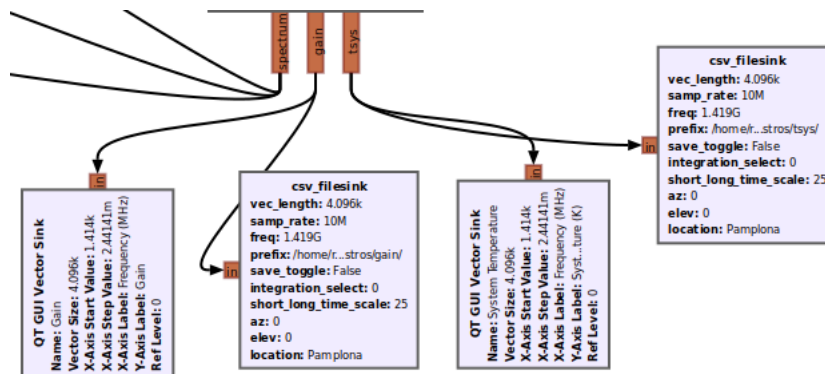


Ilustración 17: Bloques conectados en salidas de ganancia y temperatura del sistema

Así mismo, las rutas en las que se guardan dichos archivos vienen determinadas por las variables *path_gain* y *path_tsys*.

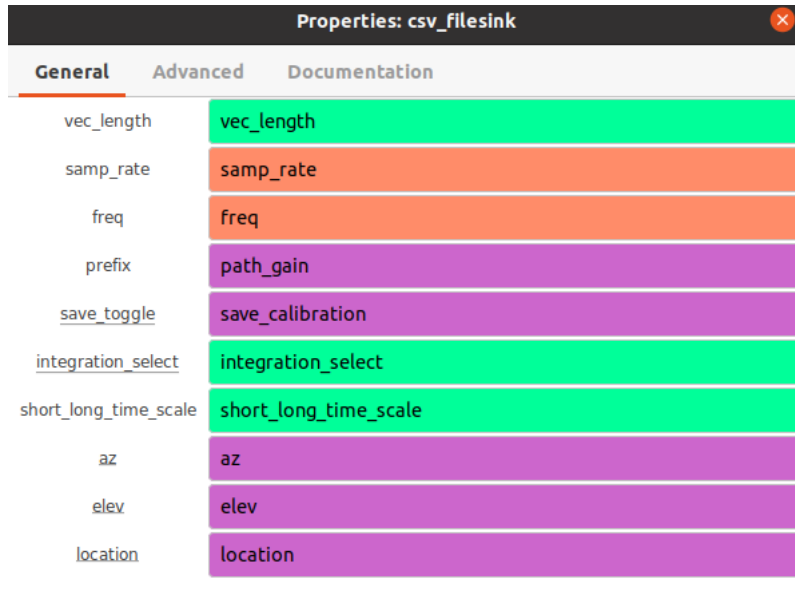


Ilustración 18: Propiedades del bloque de guardado csv

4.3.2. Utilización de calibración previa

Para ello se parte de que se disponen de sendos archivos de ganancia y temperatura del sistema en formato csv (guardados previamente siguiendo el procedimiento del apartado anterior).

En este caso, se añade un nuevo parámetro al bloque de calibración llamado *previous_cal*, el cual será controlado por el usuario y leerá los vectores de ganancia y temperatura del sistema de las rutas indicadas. Dichas rutas se introducirán en el diagrama de bloques a través de las variables *previous_gain* y *previous_tsys*.

El código python implementado es el siguiente:

```
if self.previous_cal == "True":
    tsys_cal= np.genfromtxt(self.previous_tsys, delimiter=',', skip_header=0)
    gain_cal= np.genfromtxt(self.previous_gain, delimiter=',', skip_header=0)
    self.tsys = tsys_cal[:,1]
    self.gain = gain_cal[:,1]
```

Ilustración 19: Implementación de parámetros para calibración

Así, el bloque detectará estos nuevos valores y realizará la calibración del espectro a partir de ellos siempre que el parámetro *previous_cal* se encuentre activado.

De la misma forma, se realizan las modificaciones necesarias en el archivo con extensión *.yaml* para añadir estos nuevos parámetros al bloque.

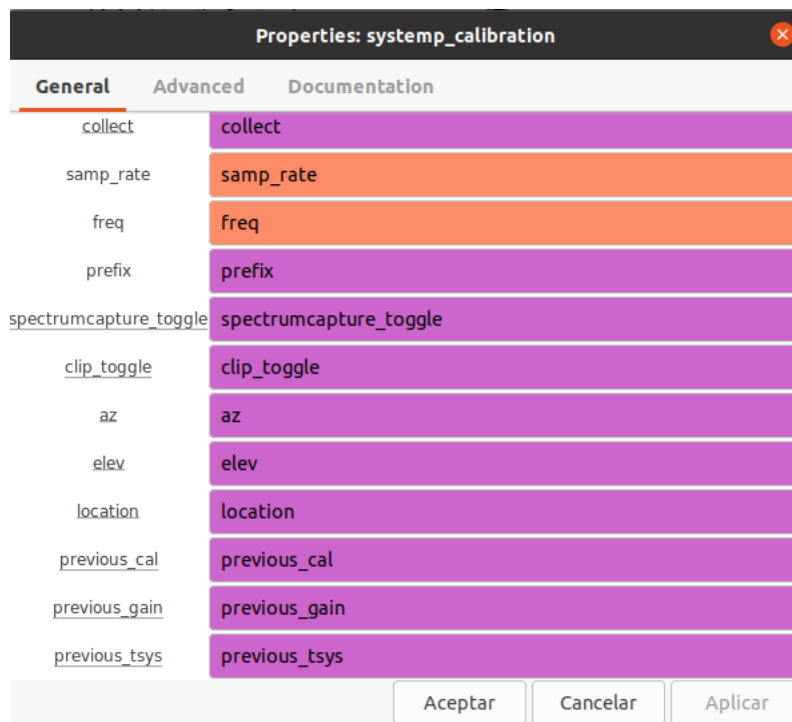


Ilustración 20: Nuevos parámetros para utilizar archivos de calibración previa

Si se desea realizar cualquier modificación en el código, es necesario ejecutar después los siguientes comandos dentro del directorio *build/*, en el que se encuentra instalado el sistema:

sudo make

sudo make install

sudo ldconfig

4.3.3. Instrucciones de uso

Para la correcta utilización del software desarrollado, se recomienda seguir las siguientes instrucciones:

1. Abrir el programa GNU Radio y el archivo correspondiente a nuestro diagrama.
2. Comprobar la correcta conexión al ordenador e inicialización (si fuera necesaria) del SDR a utilizar.
3. Configurar dónde se desean guardar los archivos generados mediante las variables indicadoras de las rutas de guardado de calibración (*path_gain* y *path_tsys*) y la de guardado del espectro (*prefix*).
4. En caso de que se vaya a utilizar una calibración previa, asegurarse de que las rutas desde las que se seleccionan los archivos de ganancia y temperatura del sistema son las correctas (variables *previous_gain* y *previous_tsys*).
5. Ejecutar el diagrama de flujo y comprobar que el sistema se ha inicializado correctamente.

4.4. Calibración del radiotelescopio

Tras el mencionado proceso de desarrollo, el día 3 de febrero de 2022 se procedió a probar el sistema en el radiotelescopio.



Ilustración 21: Disposición para el trabajo con el radiotelescopio

En primer lugar, se realizó la calibración siguiendo los pasos del [apartado 4.1.1](#), utilizando como punto frío uno arbitrario del cielo en el que no había presencia de astros y como punto caliente el Sol, debido a que se obtuvieron mejores resultados que apuntando hacia la ciudad de Pamplona, la idea inicial.

El espectro observado al apuntar hacia el Sol fue el siguiente:

2022-02-03_16.54.30.8_spectrum.png

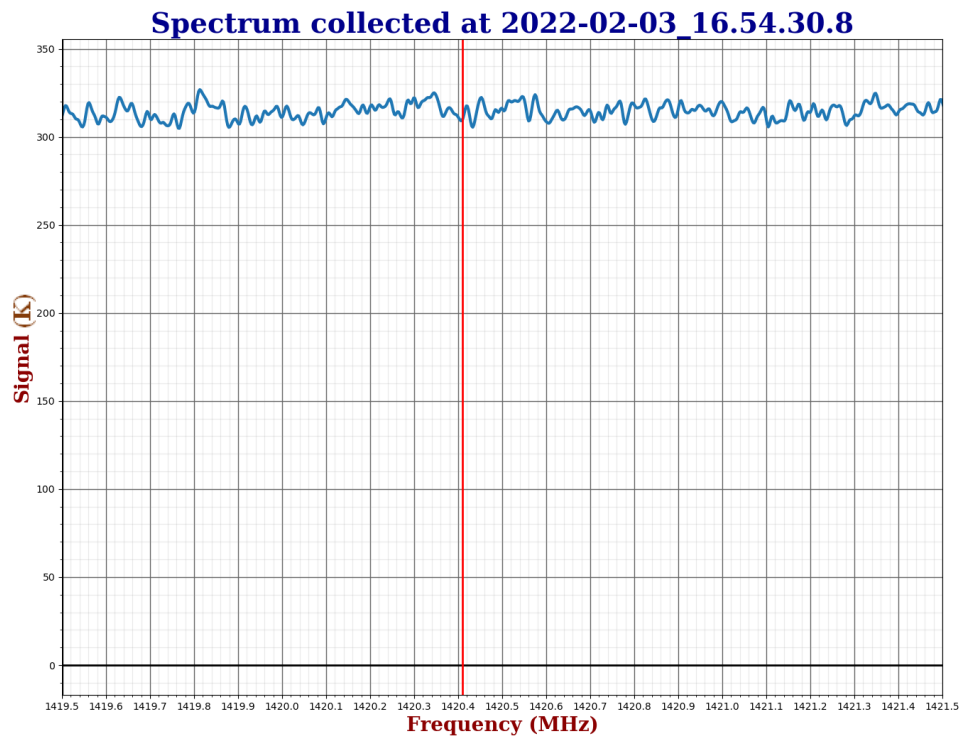


Ilustración 22: Observación apuntando al Sol

Con esto, se obtuvieron los siguientes valores de ganancia y temperatura de sistema para la banda de uso:

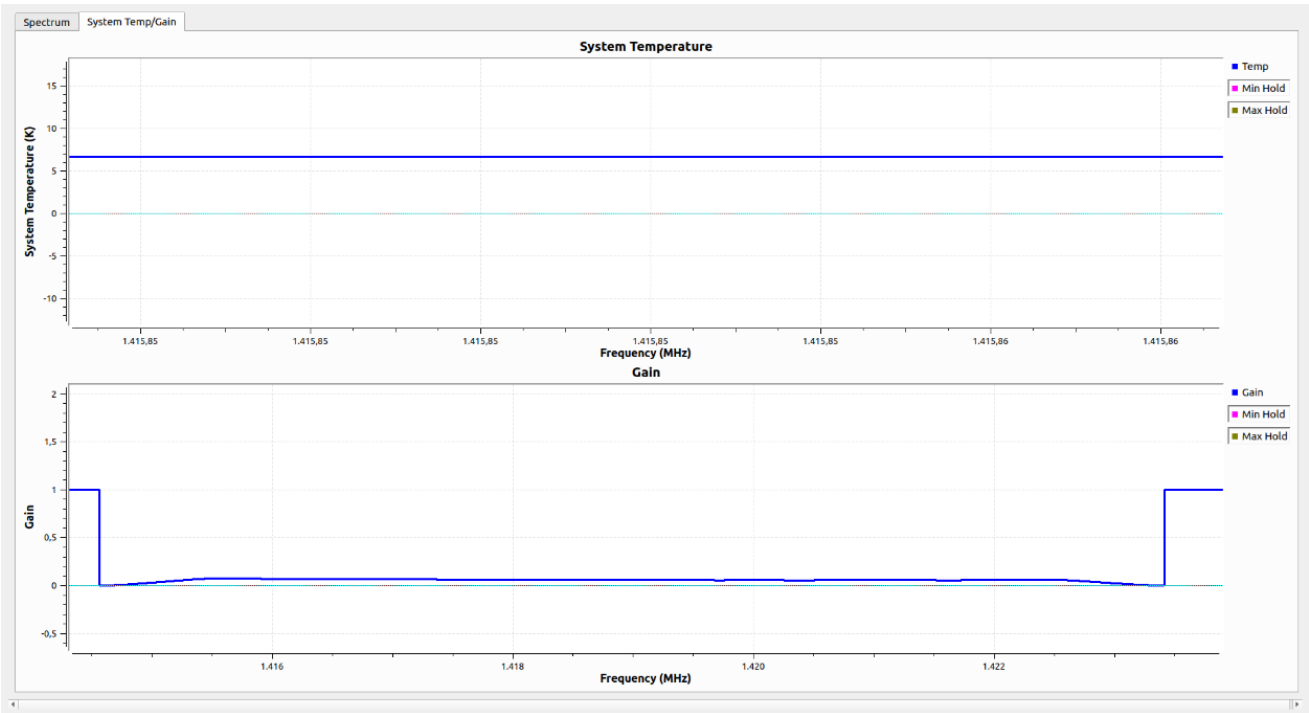


Ilustración 23: Parámetros de calibración: Ganancia y Temperatura del Sistema

A partir de este punto, se realizaron diferentes observaciones de la Línea de Hidrógeno de 21 cm con el objetivo de comprobar la mejora de los resultados:

En primer lugar, se apuntó hacia la Vía Láctea, permitiendo observarse dos “brazos” de esta. Se adjuntan capturas del sistema en funcionamiento con y sin utilizar la calibración, además de una representación ampliada del espectro.

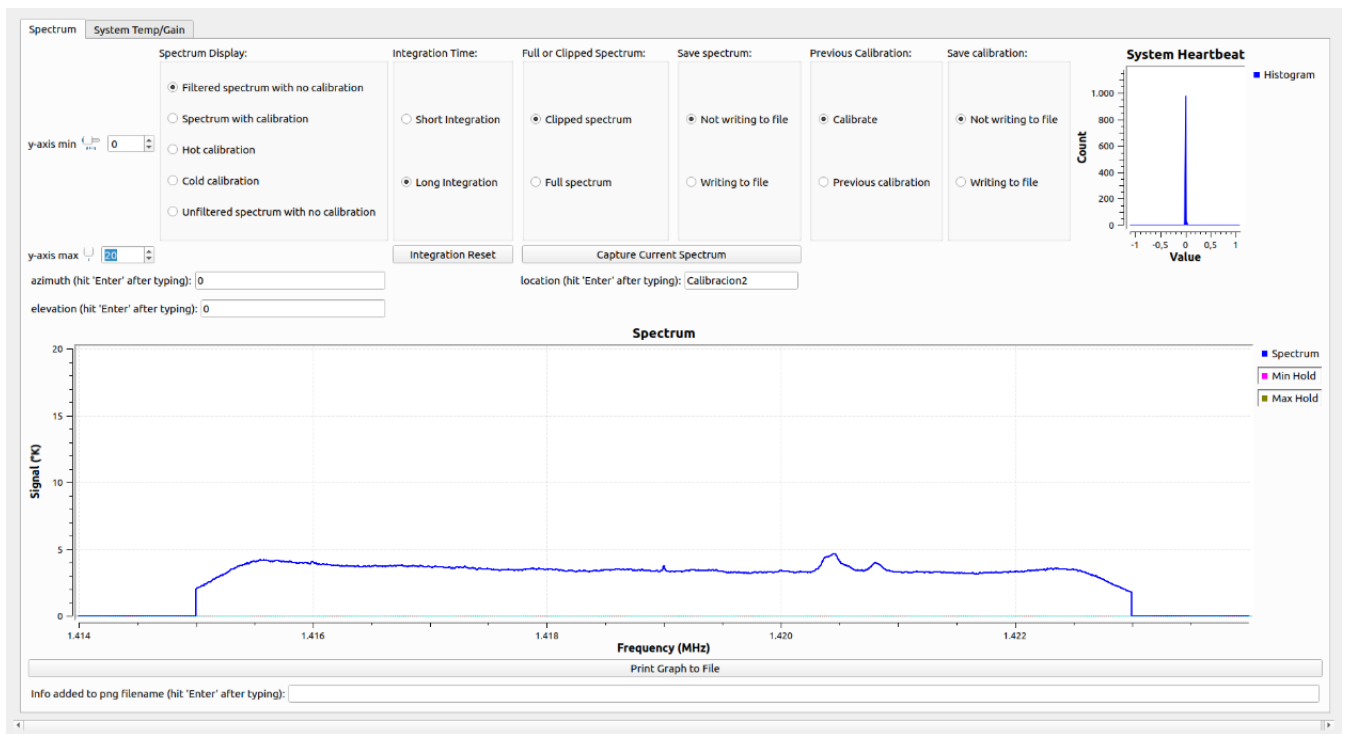


Ilustración 24: Observación sin calibración

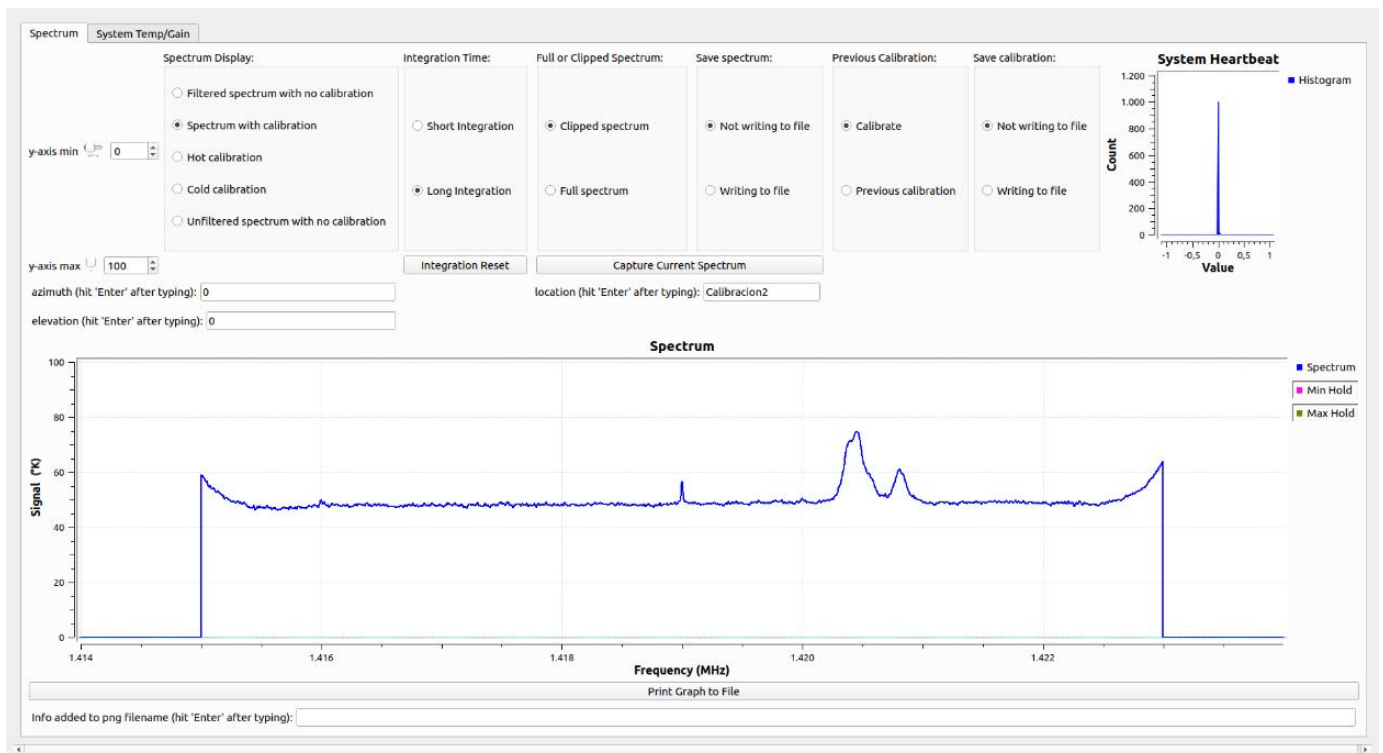


Ilustración 25: Observación con calibración

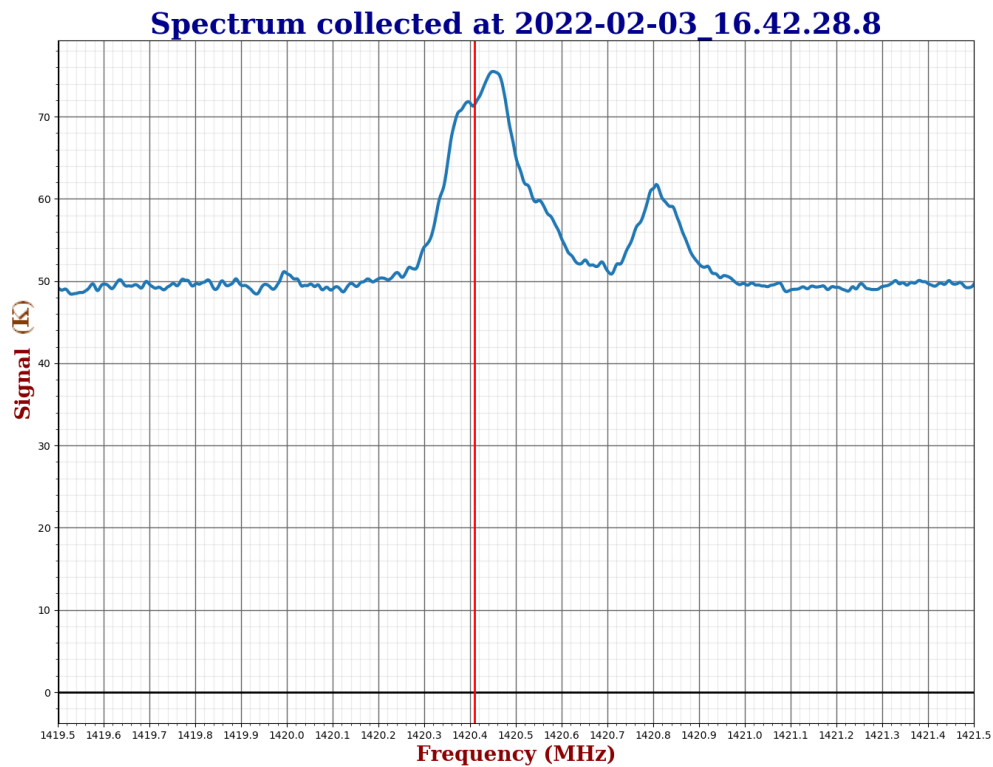


Ilustración 26: Observación de dos “brazos” de la Vía Láctea

Como se puede apreciar, existe una notable mejora al utilizar la calibración obtenida, por lo que se dio esta por exitosa.

A continuación, se procedió a la observación de la Línea de Hidrógeno apuntando hacia las estrellas Deneb y Navi. Igualmente se adjuntan las respectivas capturas.



Ilustración 27: Sistema en funcionamiento apuntando a Deneb

2022-02-03_16.44.23.6_spectrum.png

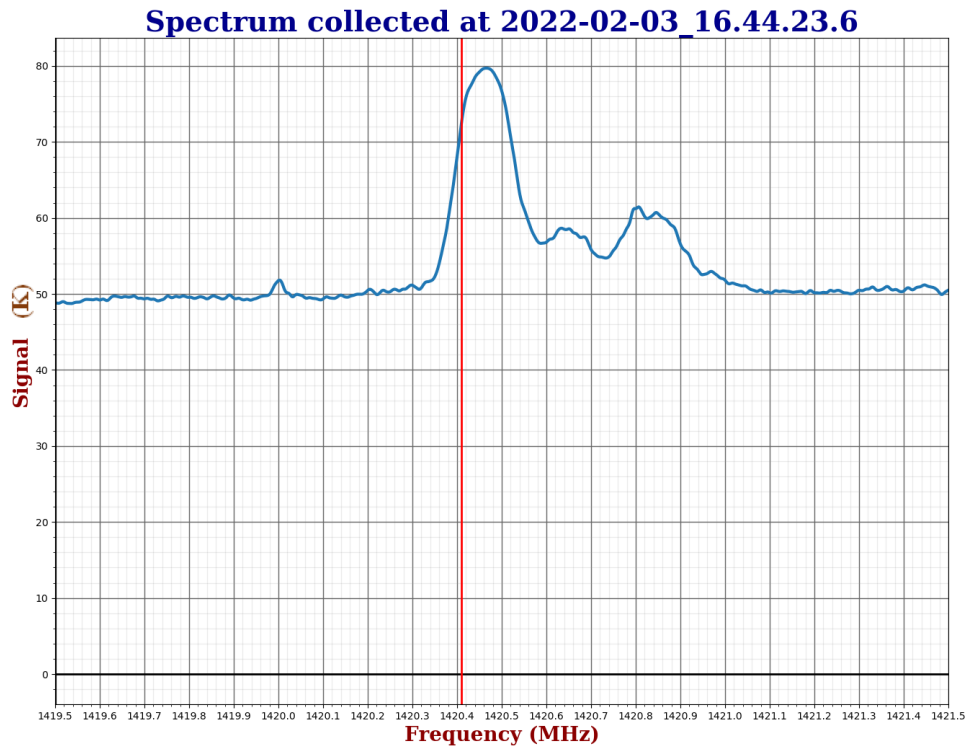


Ilustración 28: Observación de tres “brazos” de la Vía Láctea apuntando a Deneb

2022-02-03_16.48.38.4_spectrum.png

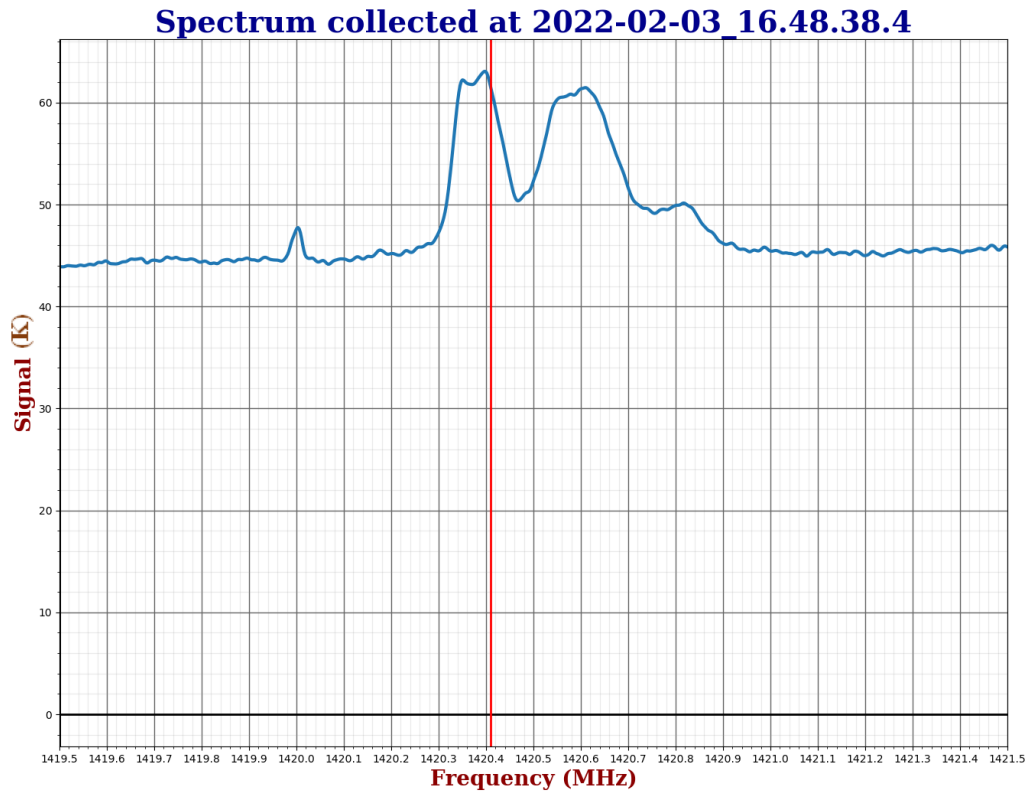


Ilustración 29: Observación de tres “brazos” de la Vía Láctea apuntando a Navi

5. Sistema de calibración con BladeRF

5.1. Configuración

Tras el éxito en las observaciones con el RSPduo, se decidió adaptar el sistema para realizar nuevas mediciones con el dispositivo BladeRF con el objetivo de obtener una mejor calidad.

Para ello, se trató de realizar la instalación de las librerías necesarias en la máquina virtual con la que se venía trabajando, siguiendo las instrucciones dadas por el fabricante en <https://github.com/Nuand/bladeRF/wiki>. Sin embargo, se decidió cambiar de vía tras no lograr solucionar el siguiente error, recibido al ejecutar el analizador de espectros:

*swig/python detected a memory leak of type 'gr::basic_block_sptr *', no destructor found*

La solución por la que se optó fue utilizar una máquina virtual con todas las librerías necesarias para el funcionamiento del SDR preinstaladas junto a GNU Radio (versión 3.8) y migrar el analizador de espectros desarrollado a esta.

En primer lugar, se realizaron pruebas de funcionamiento del dispositivo con un detector FM sencillo, obteniendo resultados favorables. Tras esto, se procedió a la prueba del analizador de espectros, siendo el diagrama de bloques idéntico al citado en el [apartado 4.1.](#) con la salvedad de la utilización del siguiente bloque como fuente.

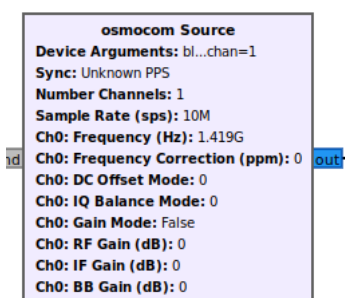


Ilustración 30: Bloque utilizado para detectar el dispositivo BladeRF

5.2. Observaciones

El día 23 de marzo de 2022, se procedió a la prueba del nuevo sistema en el Radiotelescopio Jocellyn Bell Burnell. A continuación se detalla lo realizado.



Ilustración 31: Conexión de BladeRF entre ordenador y radiotelescopio

En primer lugar, se decidió realizar una nueva calibración utilizando el mismo *modus operandi* que el descrito para el RSPduo (ver [apartado 4.4](#)). Los registros de ganancia y temperatura del sistema obtenidos fueron los siguientes:

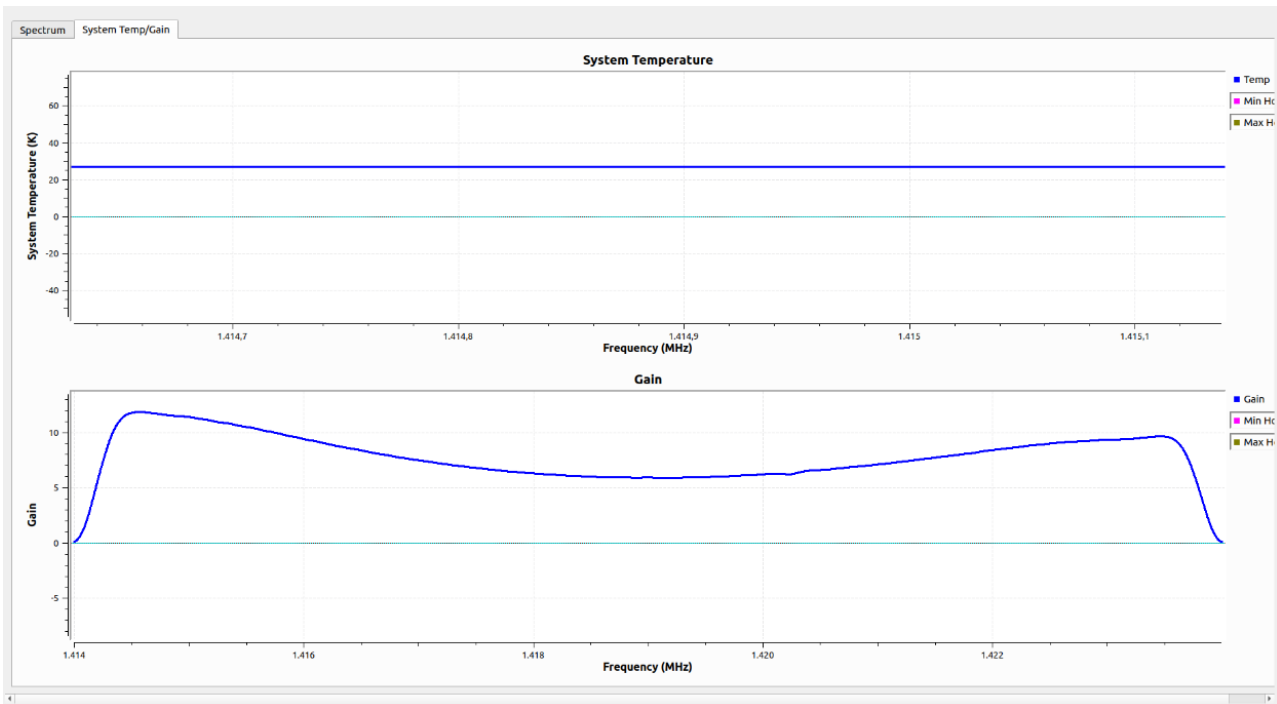


Ilustración 32: Ganancia y temperatura del sistema obtenidos para el dispositivo BladeRF

Tras ello, se procedió a realizar algunas mediciones de la Línea de Hidrógeno de 21 cm, con el objetivo de compararlas con las ya obtenidas con el SDR RSPduo.

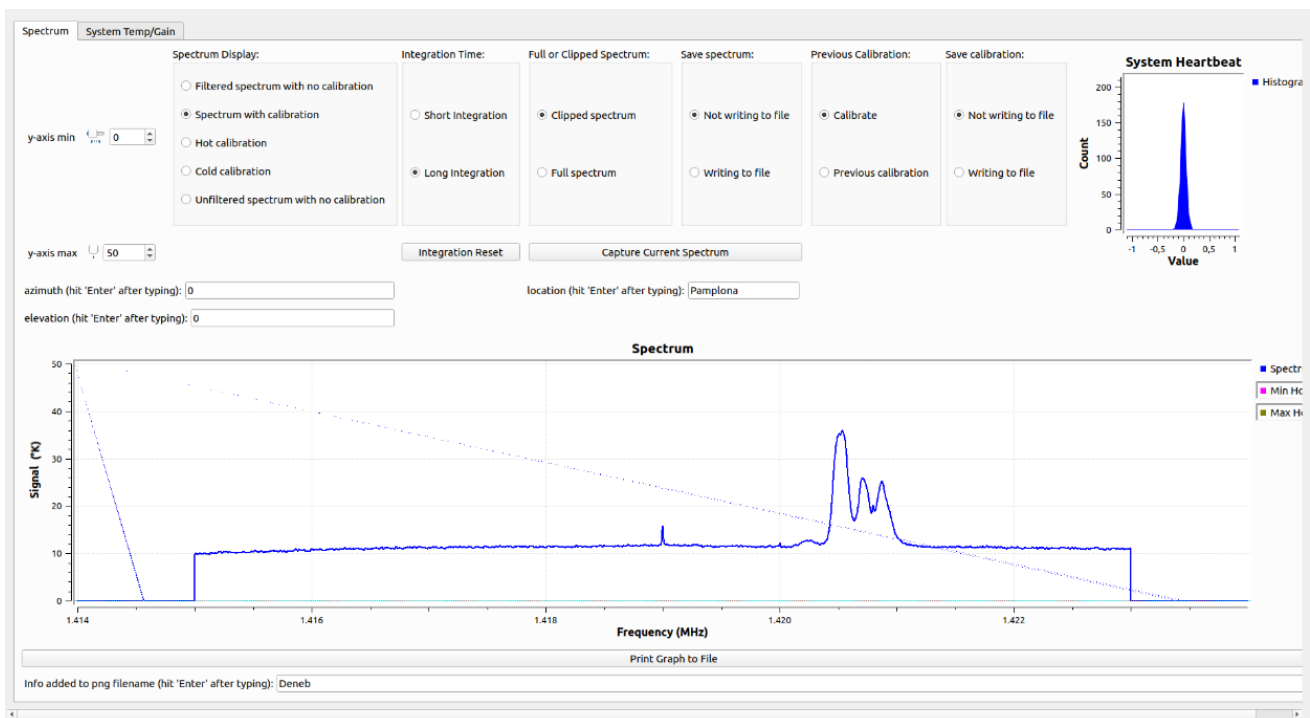


Ilustración 33: Sistema en funcionamiento apuntando a Deneb

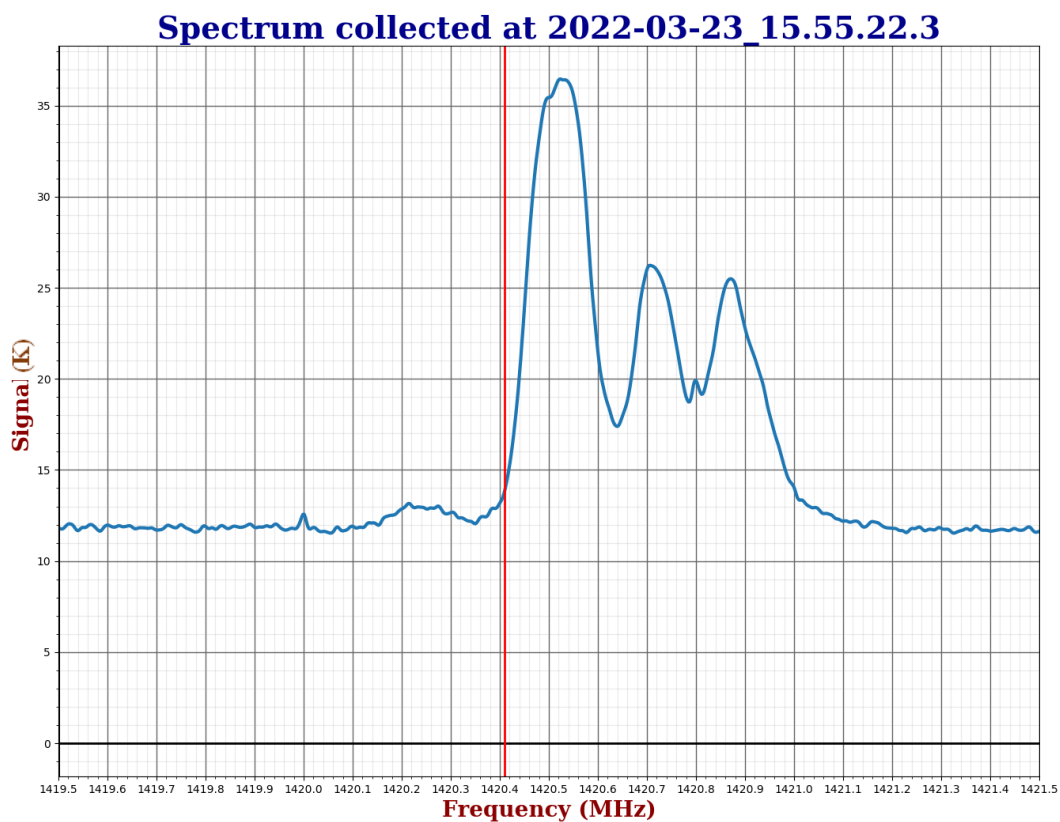


Ilustración 34: Observación apuntado a Deneb



Ilustración 35: Sistema en funcionamiento apuntando a Navi

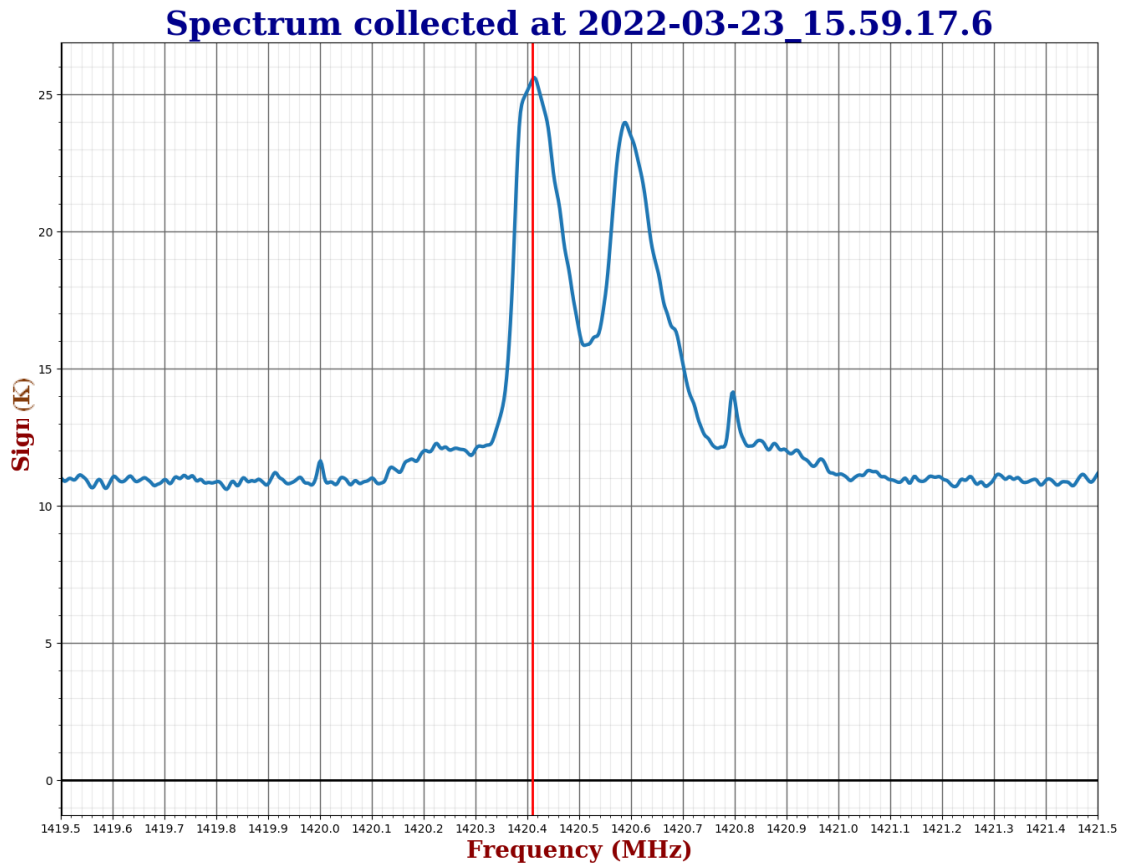


Ilustración 36: Observación apuntando a Navi

Tras la comparación de las observaciones con ambos SDR, se aprecia una mejora considerable con este último. Esto es principalmente por la diferencia entre señal y ruido así como por la capacidad de discernir entre los diferentes “brazos” de la Vía Láctea observados.

Cabe destacar que las medidas fueron tomadas con más de un mes de diferencia y a distintas horas. Esto, acompañado por las diferentes condiciones meteorológicas, puede derivar en diferencias entre ellas no relacionadas con el dispositivo utilizado. Sin embargo, sirven para realizar una valoración aproximada.

A continuación, se presentan las observaciones apuntando a Deneb y Navi con ambos dispositivos, RSPduo a la izquierda y BladeRF a la derecha:

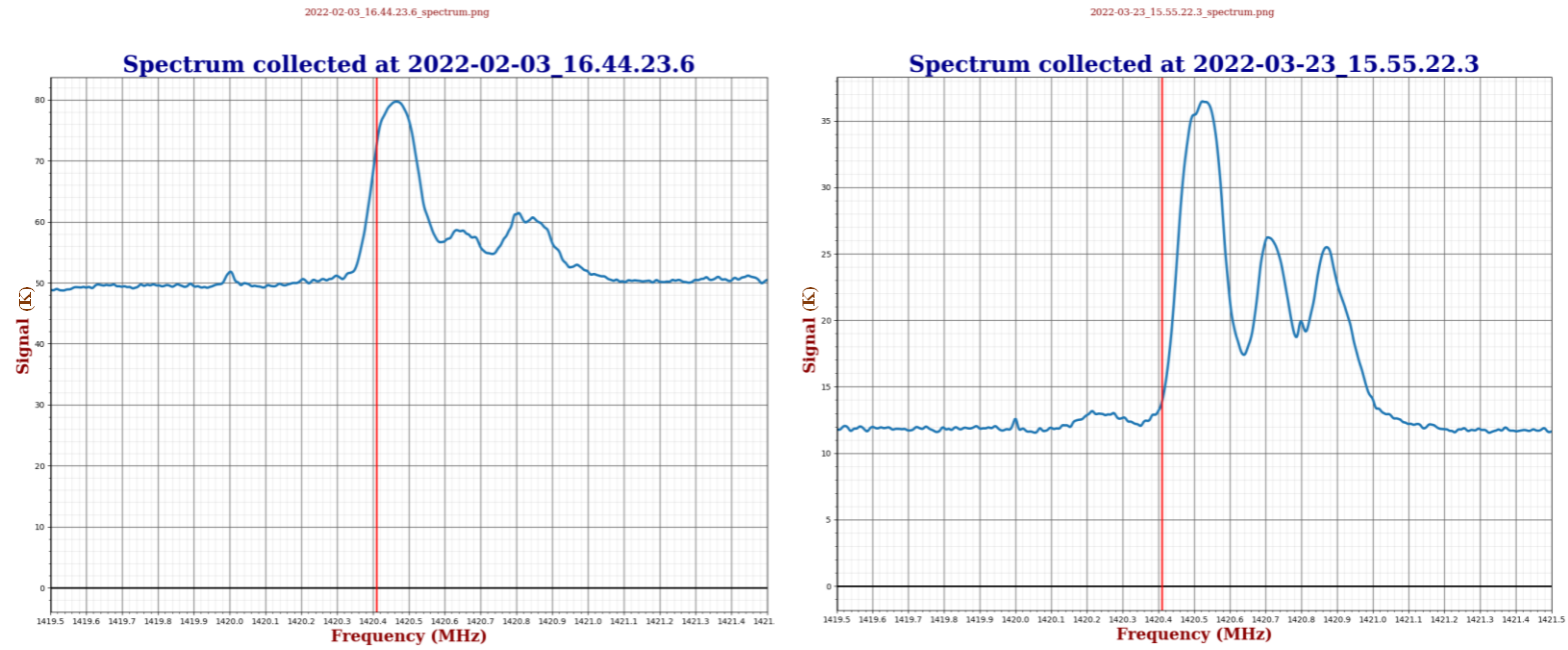


Ilustración 37: Observaciones apuntando a Deneb

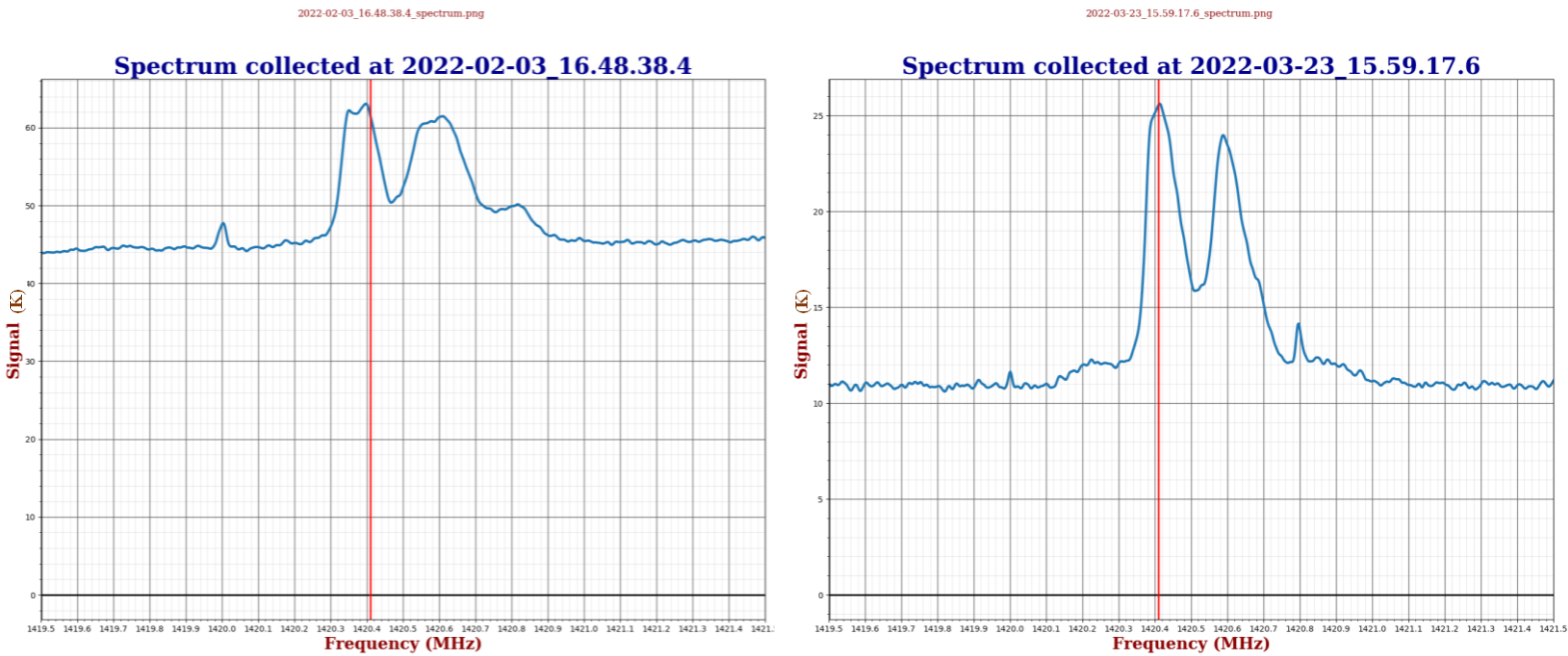


Ilustración 38: Observaciones apuntando a Navi

6. Automatización del sistema de movimiento

Otra de las mejoras que se decidió implementar en el Radiotelescopio fue la posibilidad de que siguiera un recorrido de posiciones en las que observar sin intervención humana, además de esperar el tiempo deseado en cada una de estas.

Para ello, se parte del programa desarrollado por Diego Chocarro Álvarez. Este utiliza una conexión cliente-servidor entre el ordenador del usuario y el radiotelescopio con la siguiente interfaz gráfica de control.

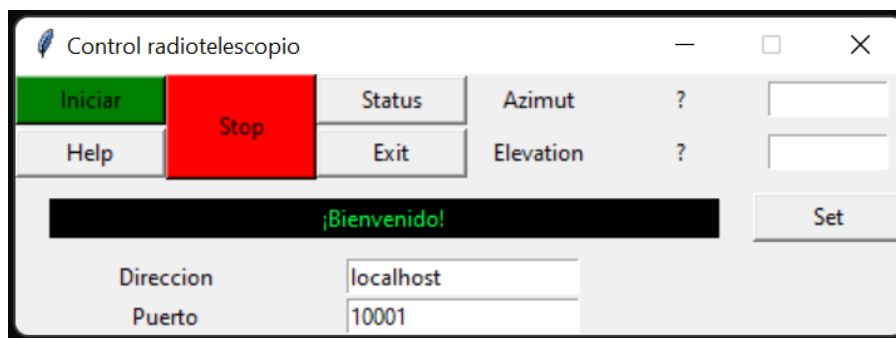


Ilustración 39: GUI del programa de control de movimiento

En ella se debe en primer lugar iniciar la conexión con el servidor y existen dos principales acciones a realizar:

- Botón “Status”: Pide al radiotelescopio su posición actual y muestra los valores de azimut y elevación en las posiciones de los interrogantes.
- Botón “Set”: Permite apuntar a las coordenadas indicadas en los cuadros de texto.

En nuevo modo de funcionamiento, se importará un archivo csv con tres columnas: azimut, elevación y tiempo que debe estar en cada posición. El radiotelescopio irá recorriendo cada una de las posiciones y deteniéndose el tiempo indicado para realizar la observación hasta llegar al final del archivo, regresando finalmente a la posición inicial.

Un ejemplo de archivo csv funcional sería el siguiente:

```
Azimut(°),Elevation(°),Tiempo(segundos, minimo = 5)
90,60,30
110,80,30
45,65,10
```

Ilustración 40: Ejemplo de archivo csv

Se implementan el proceso de selección del archivo y obtención de los datos de este. Para ello se añaden dos nuevos botones, uno para cargar el archivo y otro para comenzar a trabajar en modo automático.

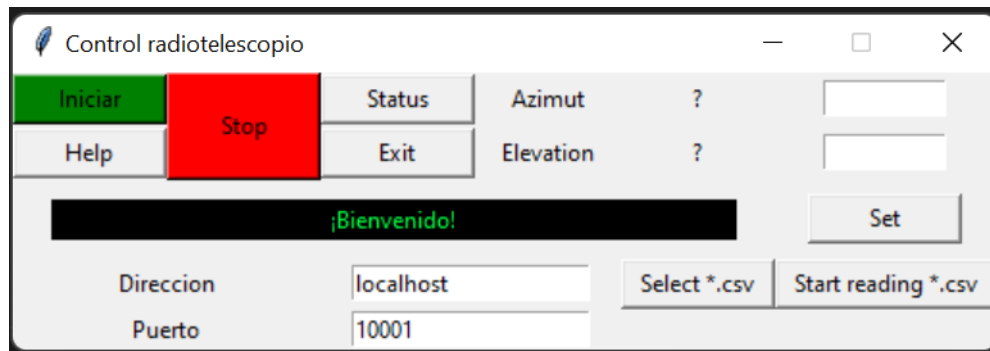


Ilustración 41: GUI modificada del programa de movimiento

De esta forma, los pasos a seguir para su utilización serían:

1. Pulsar botón “Inicio” para establecer conexión entre el cliente y el servidor en el radiotelescopio.
2. Pulsar el botón “Select *.csv” para cargar el archivo de posiciones. Importante seguir la sintaxis indicada en la [Ilustración 30](#).
3. Si el archivo se ha cargado correctamente, pulsar el botón “Start Reading *.csv” y el sistema comenzará a trabajar de forma automática. Se recomienda mantener en primer plano el terminal para seguir el estado del radiotelescopio.

A continuación, se detallan las estrategias seguidas para el desarrollo:

La carga del archivo se realiza mediante el siguiente código:

```
filename=askopenfilename() #pido archivo
boton13.configure(text=filename)
data = np.genfromtxt(filename,delimiter=',',skip_header=1) #lectura del csv
try:
    azimut_csv=data[:,0] #guardamos vector de azimut
    elevation_csv=data[:,1] #guardamos vector de elevacion
    tiempo=data[:,2] #guardamos el vector de tiempos
    print("Archivo .csv seleccionado correctamente")
    print(".csv seleccionado: ",boton13['text'])
```

Ilustración 42: Código implementado para la carga de archivos csv

La lectura de las diferentes posiciones se realiza mediante un bucle en el que, en primer lugar, se envía el azimut y la elevación deseadas para a continuación pedir periódicamente la posición en la que se encuentra el radiotelescopio. En el momento en el que la posición en la que se encuentra es igual a la solicitada, se comienza a esperar el tiempo indicado y así sucesivamente.

Este proceso se refleja en el siguiente fragmento de código:

```
for i in range(0,len(azimut_csv)):
    az = azimut_csv[i]
    el = elevation_csv[i]
    c=0

    enviar(az,el,c) #se envian las coordenadas
    x = pide_status()
    print("Estamos en azimut: {} y elevacion: {}".format(x[4],x[5]))
    diferencia_az = abs(az-x[4])
    diferencia_el = abs(el-x[5])

    while (diferencia_az>1 or diferencia_el>1):
        print("Radiotelescopio en movimiento...")
        time.sleep(10) #ajustar cada cuanto se comprueba
        x = pide_status()
        diferencia_az = abs(az-x[4])
        diferencia_el = abs(el-x[5])

    #salida de bucle: ya hemos llegado
    print("El Radiotelescopio ha llegado al destino")
    if (tiempo[i]<5): #Observacion minima de 5s
        print("Esperando 5 segundos")
        time.sleep(5) #tiempo de espera
    else:
        print("Esperando {} segundos".format(tiempo[i]))
        time.sleep(tiempo[i]) #tiempo de espera
print("Trabajo con archivo .csv terminado")
```

Ilustración 43: Código implementado para control de movimiento

Cabe destacar que, al probar el sistema desarrollado con el radiotelescopio, se detectó un desfase entre la posición de este y la posición recibida por el programa cada vez que se solicitaba el status. Sin embargo, no se consideró crítico al solamente influir en que este se añade al tiempo de espera del radiotelescopio en cada posición.

7. Vías de continuación

A continuación, se presentan diferentes mejoras a implementar en el futuro:

- En el sistema de calibración desarrollado, se desea que el usuario indique las rutas en las que se desean guardar los diferentes archivos generados por el programa desde el GUI, no que vengan determinados por variables en el diagrama de bloques (ver [apartado 4.3.1](#)).
- Calibrar el radiotelescopio en potencia, de forma que las unidades de señal sean dBm. Esto se podría realizar hallando la densidad de flujo solar recibida (en Janskys) a partir de las [observaciones apuntando al Sol](#) realizadas y comparándolas con las referencias brindadas por el Gobierno Australiano en la siguiente página: https://www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre/1/10.
- Migrar todos los sistemas a Ubuntu 20.04, con el objetivo de trabajar únicamente con este sistema operativo en todo lo relacionado al radiotelescopio.
- Establecer una comunicación entre los sistemas de observación y movimiento. Se trataría de sincronizar ambos para que en el momento en el que se indica al radiotelescopio su detención apuntando a unas coordenadas, este comience a guardar la potencia recibida, realizándose todo de forma autónoma. Con esto, se podría ir creando un archivo en el que se guarden la posición, tiempo, fecha y potencia recibida sucesivamente.
- Integrar el programa de control del movimiento en el desarrollado para la calibración y observación en GNU Radio. De esta forma, se obtendría un solo interfaz compacto desde el que se controlarían ambos sistemas.

8. Referencias

Xabier Cía Valencia, Rafael Ruiz Feliú y Francisco Falcone Lanas. *Detección y análisis de datos de radioastronomía y fenómenos atmosféricos con tecnología SDR*. (Trabajo de fin de grado). Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación. Universidad Pública de Navarra.

Jorge Gayarre Martínez de Lahidalga, Pedro Dieguez Elizondo y Silvia Díaz Lucas. *Radiotelescopio*. (Trabajo de fin de grado). Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación. Universidad Pública de Navarra.

https://www.unavarra.es/digitalAssets/242/242935_100000Memoria.pdf

<https://www.sdrplay.com/docs/gr-sdrplay-workflow.pdf>

<https://www.sdrplay.com/downloads/>

<https://github.com/fventuri/gr-sdrplay3>

https://github.com/WVURAIL/gr-radio_astro

<https://physicsopenlab.org/2020/07/26/gnuradio-software-for-the-21-cm-neutral-hydrogen-line/>

<https://www.nuand.com/bladerf-2-0-micro/>

<https://www.nuand.com/product/bladerf-xa4/>

<https://www.sdrplay.com/rspduo/>

<https://www.unavarra.es/sites/actualidad/contents/noticias/2020/11-1/20-11-06/la-upna-inaugura-en-las-semanas.html>

https://www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre/3/1/46