

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO DE UN RADIOTELESCOPIO PARA
EL ESTUDIO DE TORMENTAS SOLARES CON
EL RECEPTOR DE RADIOFRECUENCIA
CALLISTO**



Autor: Javier Díaz Rubio

Director: D. José Luis Gómez Tornero

Mayo de 2017



Autor	Javier Díaz Rubio
E-mail del autor	jadiru@gmail.com
Director	José Luis Gómez Tornero
E-mail del director	Josel.gomez@upctl.com
Título del TFC	Diseño de un radiotelescopio para estudio de las tormentas solares usando el receptor de radiofrecuencia Callisto
Resumen	En este TFG se lleva a cabo el diseño y montaje de un radiotelescopio para la observación de las tormentas solares. Se parte del estudio de los tipos de radiación solar en espectro radio durante las tormentas solares y sus principales características, y se realiza el diseño, cálculos teóricos, montaje físico del sistema para finalizar con la testificación y obtención de datos finales. El proyecto aborda la búsqueda y compra de los dispositivos necesarios, la integración de estos y la justificación teórica del sistema.
Titulación	Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación
Intensificación	Teoría de la Señal y Comunicaciones
Departamento	Tecnología de la Información y las Telecomunicaciones
Fecha de presentación	Julio de 2017

A mi familia...

Agradecimientos

Cómo no podía ser de otra forma, no puedo poner fin a ésta carrera de fondo en la que tanto he aprendido, no sólo en lo profesional sino también en lo personal, sin dar las gracias a todas aquellas personas que me han acompañado en este tiempo y que han hecho que esto sea posible.

En primer lugar a mis padres y mi abuela, son ellos los que siempre han estado a mi lado haciendo posible que en unos pocos días sea titulado universitario en Grado de Sistemas de Telecomunicaciones. No sólo me lo han permitido económicamente, lo que ha supuesto un gran esfuerzo, sino que también han estado tanto en los buenos como en los no tan buenos momentos para apoyarme, por ello y por mucho más, gracias.

En segundo lugar, y no por ello menos importante, mi pareja. Siempre ha sido un apoyo incondicional a lo largo del periodo en el que desarrollado este proyecto. Las personas que han estado a mi alrededor saben que no me ha sido fácil y sobre todo ella que ha tenido que aguantarme día a día.

No quiero extenderme más, pero no puedo cerrar este fragmento de agradecimientos sin nombrar a mis hermanos que me han apoyado y entendido a lo largo de la carrera, así como a la gran familia de compañeros que me llevo de estos años.

Para finalizar, agradezco a la Escuela Superior de Ingeniería de Telecomunicación por los conocimientos adquiridos, y en particular a mi Director de Proyecto Dr. José Luis Gómez Tornero por adentrarme con él en este apasionante proyecto, por apoyarme en el desarrollo del cual, y por luchar porque saliera adelante. También, como no puede ser de otra forma a los técnicos de laboratorio sin los que éste TFG no hubiera sido posible: David Henarejos, Margarita Galindo González y Juan. Ellos son los máximos partícipes del desarrollo de la caja de amplificación que conoceremos a lo largo de la memoria. Sin su colaboración y buen hacer no sería posible pensar en este proyectos.

Índice General

1. Introducción	1
1.1 Objetivos y justificación del proyecto	1
1.2 Introducción a la Radioastronomía	2
1.2.1 Origen y descubrimientos de la Radioastronomía	3
1.2.2 Mecanismos de radiación y fuentes que los provocan	5
1.3 Radioastronomía solar y <i>radio burst</i>	9
1.4 Red e-Callisto	12
1.4.1 Radiotelescopios de la red e-Callisto	14
2. Radiotelescopio Solar UPCT	19
2.1 Presentación del radiotelescopio.	19
2.2 Sistema de recepción de señal radio	20
2.2.1 Antena Logoperiódica LP-22eV	21
2.2.2 Etapa preamplificadora	23
2.2.3 Línea de transmisión	31
2.2.4 El espectrómetro Callisto	32
2.2.5 Software Callisto	36
2.3 Sistema de <i>tracking</i> solar	43
2.3.1 Sistema de motores BIG-RAS AZ&EL	43
2.3.2 Controlador RAS ROT2PROG	45
2.3.3 Software Orbitron y driver SpidAlfa	48
2.4 Justificación teórica del sistema	49
2.4.1 Parámetros de radiación	49
2.4.2 Temperatura de Ruido del sistema de recepción	51
2.4.3 Sensibilidad del radiotelescopio	53

3. Medidas previas, testeo del radiotelescopio y representación de datos	55
3.1 Espectro de frecuencias en I+D+I	55
3.2 Configuración del espectro de recepción	57
3.3 Representación e interpretación de datos	60
4. Conclusión y líneas futuras	63

Capítulo 1

Introducción

En este primer capítulo del proyecto se abordará tanto la justificación de la realización de dicho proyecto y los objetivos que persigue, cómo una breve introducción a la radioastronomía, la particularización de esta ciencia cuando se trata de observar el sol, y dar a conocer la red e-Callisto de radiotelescopios solares, a la cual se pretende incorporar el radiotelescopio abordado en este proyecto.

1.1 Objetivos y justificación del proyecto

Tras haber aprobado todas las asignaturas del Grado de Sistemas de Telecomunicación a los estudiantes se nos presenta y exige la realización de un proyecto de finalización de estudios. En este proyecto se nos da la oportunidad de trabajar en cualquier ámbito que nos interese relacionado con los conocimientos adquiridos durante nuestra carrera. De hecho estamos en el momento en el que de verdad podemos decantarnos por la especialidad que más nos atraiga, ya que durante los distintos cursos se dan asignaturas y se adquieren conocimientos sobre diversas ramas, cómo electrónica, comunicaciones móviles, microondas, fibra óptica, etc, sin profundizar exclusivamente en ninguno de ellos.

Pues bien, yo siempre me he decantado por el ámbito de todo lo relacionado con campos electromagnéticos, antenas, microondas y sus aplicaciones, por lo que traté de enfocar mi proyecto en esa dirección contactando con el Dr. José Luis Gómez Tornero, profesor de Aplicaciones de las Microondas. Así se me presentó la oportunidad de desarrollar, junto a un compañero, Santiago Roca Conesa, la puesta en marcha del Radiotelescopio de la UPCT.

La propuesta consistía en reanudar la instalación y habilitación de un radiotelescopio en la línea de hidrógeno, del cual se encargó Santiago Roca Conesa, y la instalación del Radiotelescopio Solar de la UPCT, caracterizado por su bajo coste y basado en el receptor Callisto, haciendo uso de la estructura de la antena parabólica del Radiotelescopio de la Línea de Hidrógeno, que ya estaba instalada en la azotea del edificio I+D+I. La idea de realizar un proyecto real y poner los conocimientos adquiridos en práctica junto con la idea de indagar en radioastronomía, un área hasta entonces desconocida para mí, me hizo interesarme en éste proyecto y llevarlo a cabo.

Una vez que teníamos la idea general del proyecto se barajaron muchas opciones en cuanto a objetivos se refiere, y con el paso del tiempo se fijaron aquellos que fueran viables y realizables en un plazo de tiempo determinado, ya que en este tipo de proyectos prácticos no solo dependemos del trabajo realizado, sino también del material del que dispongamos, el presupuesto, y el tiempo de realización y recepción de un pedido. Todos estos factores suponían un alto factor de riesgo en el compromiso entre los objetivos y el tiempo de realización. De hecho, para alcanzar unos objetivos básicos el proyecto se ha demorado en tiempo en torno a 6 meses, según la fecha final esperada al comienzo.

Los principales objetivos fijados del proyecto fueron la instalación del radiotelescopio desde el principio, la justificación teórica del diseño del sistema y la obtención y su correspondiente interpretación de datos finales. Todo esto conlleva realizar diversas fases a lo largo del proyecto, que pueden ser divididas en: búsqueda y pedido de componentes necesarios y adecuados para el diseño; testeo de éstos; instalación física de equipos; instalación y configuración de software; puesta en marcha de sistema de seguimiento solar y recepción e interpretación de resultados obtenidos analizando el nivel de calidad y de funcionalidad del Radiotelescopio Solar.

A lo largo de la memoria, me ha parecido más conveniente seguir una estructura diferente a la seguida en el desarrollo real del proyecto, puesto que si la memoria la organizara según las fases se extendería demasiado y no aportaría claridad sobre el sistema instalado requerida. Pienso que esto es así, porque me supondría hablar de cada componente en tres apartados distintos: búsqueda, configuración e instalación.

La organización seguida en la memoria ha sido comenzar realizando una introducción a la radioastronomía necesaria para entender que es lo que podemos medir con un radiotelescopio. Continuar en un segundo punto a presentar el radiotelescopio, en el cual se aborda cada parte del sistema por separado, explicando en que consiste, cómo se ha instalado y se ha realizado su configuración (en el caso de que exista), justificando teóricamente en un apartado final el diseño completo realizado. Por último, en un tercer capítulo se recogen todas las medidas realizadas con el receptor Callisto desde las medidas previas a la instalación hasta las medidas realizadas mediante el sistema final pasando por medidas intermedias necesarias para la configuración. Además en este último punto se interpretan los datos recibidos, se analizan los errores y también se explica cómo interpretar los datos que muestra el espectrograma final.

1.2 Introducción a la Radioastronomía

La radioastronomía es una importante rama de la astronomía que estudia los objetos celestes y los fenómenos astrofísicos midiendo su emisión de radiación electromagnética en la región de radio del espectro. Por lo tanto, la única diferencia con

la astronomía en el rango visible es la longitud de las ondas electromagnéticas observadas.

En esta región del espectro se encuentra la ventana radio atmosférica que comprende al rango de frecuencias desde cerca de 5 MHz a más de 300 GHz (longitudes de onda de casi 100 m hasta alrededor de 1 mm). El extremo de baja frecuencia de esta ventana está limitado por la absorción de la señal en la ionósfera, mientras que el límite superior está determinado por la atenuación de la señal causada por el vapor de agua y el dióxido de carbono en la atmósfera. Esta región junto a la región del espectro de las ondas visibles son las principales ventanas atmosféricas a la radiación electromagnética, por lo que desde la superficie terrestre sólo se puede observar el espacio exterior en dichas bandas, cómo se muestra en la Figura 1.1.

En dicha figura se muestra cómo las ondas electromagnéticas fuera de la ventana óptica, una pequeña parte del espectro infrarrojo y la ventana radio, son disipadas por distintas zonas de la atmósfera, por lo que para la observación de espacio profundo en esas longitudes de onda hay que trabajar desde satélites en órbita.

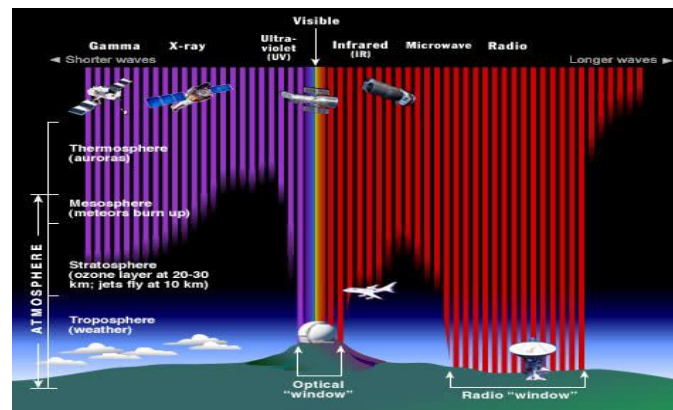


Figura 1.1: Ventanas de transmisión atmosféricas

1.2.1 Origen y descubrimientos de la Radioastronomía

La radioastronomía es una ciencia relativamente nueva cuyo nacimiento se atribuye al descubrimiento en 1931, del físico Karl Jansky, de ondas radio provenientes del espacio exterior. Este descubrimiento se produjo cómo resultado del trabajo de investigación sobre las fuentes de ruido que afectaban a las comunicaciones por ondas cortas entre Estados Unidos e Inglaterra. Karl Jansky era el ingeniero de los Laboratorios de Telefonos Bell encargado de realizar dicho trabajo.

Para tal investigación, Jansky construyó una antena diseñada para recibir ondas de radio a una frecuencia de 20.5 MHz (longitud de onda de cerca de 14.5 metros). La antena se montó en una plataforma giratoria que le permitiera rotar, de forma que pudiera

encontrar la dirección de cualquier señal radio. A esto se le dio el nombre de "carrusel de Jansky".

Tras la fabricación del sistema de la antena, Jansky estuvo estudiando las posibles fuentes de interferencias durante varios meses concluyendo que la principal fuente era debida a las tormentas. Pero, además de las tormentas, había un ruido electromagnético que permanecía aun cuando la atmósfera estaba tranquila y aumentaba durante un instante cada día, lo que llevó a pensar a Jansky que quizás estaba relacionado con la radiación del Sol. Pero tras un cuidadoso estudio de la señal durante varios meses, Jansky concluyó que la señal tenía un periodo de 23 h y 56 min, es decir, el periodo de rotación de la Tierra (lo que se denomina un día sidéreo). Esto indicaba que la fuente de interferencias estaba situada en un punto de la esfera celeste que era fijo respecto de las estrellas. Estudiando los mapas estelares, Jansky pronto concluyó que esa misteriosa señal procedía de la Vía Láctea, y que era particularmente intensa hacia la dirección del centro de nuestra Galaxia.

Jansky deseaba continuar investigando con más detalle las ondas de radio de la Vía Láctea por lo que propuso a los Laboratorios Bell que construyeran una antena con un disco de 100 pies (30 metros) de diámetro pero los Laboratorios Bell no dieron importancia al descubrimiento, más allá de conocer que las interferencias no afectaban a las comunicaciones transatlánticas. Jansky fue asignado a otro proyecto y nunca terminó su investigación en Radioastronomía

Sin embargo, hubo dos hombres que oyeron del descubrimiento de Jansky en 1933, y ejercieron una gran influencia en el desarrollo subsiguiente de la Radioastronomía. El primero fue Grote Reber, quien en 1937 construyó sin ninguna ayuda un radiotelescopio parabólico de 9 metros de diámetro, en el patio trasero de su casa, y publicó en 1944 primer mapa sistemático de las ondas de radio del cielo. El segundo fue John Kraus, quien, después de la Segunda Guerra Mundial, creó un radioobservatorio en la Universidad de Ohio State, y escribió un libro sobre Radioastronomía, que, hasta hoy, se considera la biblia de los radioastrónomos.

El desarrollo de las telecomunicaciones y de las técnicas de radar durante la Segunda Guerra Mundial propició el progreso de la radioastronomía de manera decisiva. Pronto se constató la gran ventaja que suponía la transparencia de la atmósfera terrestre para las ondas de radio

En cuanto a la aportación de la radioastronomía a la ciencia y conocimiento del universo, caben destacar los siguientes descubrimientos de enorme importancia: los cuásares, los pulsares, las galaxias activas, el fondo cósmico de microondas, la mayor parte de las moléculas complejas interestelares y la interferometría. El impacto de todos estos descubrimientos se ve reflejado en los siguientes cinco premios Nobel: M Ryle (en 1974 por el desarrollo de la síntesis de apertura, técnica que hace posible la interferometría), A. Hewish (en 1974 por el descubrimiento de los pulsares), A. Penzias y R. Woodrow (en 1978 por el descubrimiento de la radiación de fondo), R. Hulse y J.

H. Taylor (en 1993, por el descubrimiento de los pulsares de milisegundo) y, más recientemente, J. Mather y G. Smooth (en 2006, por las medidas del fondo cósmico que apoyan la teoría del big bang).

1.2.2 Mecanismos de radiación y fuentes que los provocan

Por otra parte, para cumplir con el objetivo del estudio de los cuerpos celestes y espacio profundo, es necesario conocer qué mecanismos generan la radiación electromagnética. Existen tres mecanismos principales de dicha radiación que podemos clasificar según sean de *emisión continua* (emiten una región ancha del espectro) o de *emisión espectral* (emiten en líneas espectrales centradas en frecuencias específicas). Los que emiten en continuo a su vez se distinguen en otros dos, dependiendo de si su origen es térmico o no. De esta forma en continuo se encuentra la *radiación de cuerpo negro* (origen térmico) y la *radiación de sincrotrón* (origen no térmico).

La radiación de cuerpo negro se basa en que dicho cuerpo absorbe toda la energía electromagnética que recibe, y la reemite debido a que se encuentra en equilibrio termodinámico, la radiación está en equilibrio con la materia. La *Ley de Planck* determina la intensidad de radiación, I_ν , para un cuerpo negro como se muestra en la ecuación 1.1.

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (1.1)$$

Debido a que por lo general la radiación no se encuentra en equilibrio con la materia, y por lo tanto la intensidad no viene dada por una función de Planck, se introduce el concepto de temperatura de brillo, T_B . Se trata de una temperatura definida para cada ν , de tal forma que la intensidad a esta frecuencia tenga el valor de la plackiana a esta temperatura T_B .

$$I_\nu = B_\nu(T_B) \quad (1.2)$$

Para completar la caracterización de la radiación existen otras dos leyes. La *ley de desplazamiento de Wein* nos dice que la longitud de onda para el pico de radiación disminuye linealmente con el incremento de la temperatura, y la *ley de Stefan-Boltzman* la cual indica que el flujo emitido aumenta de forma proporcional a la temperatura a la cuarta, es decir la energía radiada aumenta si aumenta la temperatura.

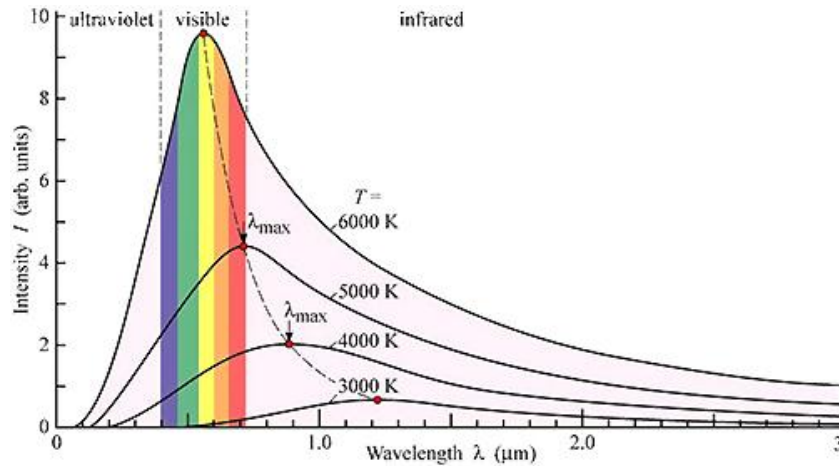


Figura 1.2: Ley de Planck

En astronomía, la emisión de las estrellas se aproxima a la de un cuerpo negro ya que a efectos de radiación se comportan de forma similar. Por lo tanto, según la *ley de Wien* el máximo de emisión de una estrella únicamente depende de la temperatura efectiva de esta lo que nos indica que estrellas extremadamente grandes (con gran energía) tendrán su máxima a altas frecuencias, incluso en el ultravioleta y las menos energéticas tendrán su máxima cercano al rojo o incluso en el infrarrojo. Esto conlleva a que la observación de las estrellas se centre en el espectro óptico, donde tienen su máximo de radiación, aunque una estrella por el hecho de poseer una cierta temperatura radie en todo el espectro como se muestra en la ecuación 1.1.

Centrando el objeto de estudio en espectro radio, las principales fuentes de emisión son el gas interestelar y los cuerpos o fenómenos celestes que provocan movimientos de electrones o partículas cargadas, mecanismo de *radiación de sincrotrón*, como pueden ser el campo magnético de las galaxias, púlsars, supernovas y núcleos de galaxias activas.

En cuanto al estudio del gas interestelar por medio de radiotelescopios, se centra en el estudio de *nubes de hidrógeno neutro* y de *nubes de gas molecular* en las que predomina la molécula H_2 . Para dicho estudio se observan la línea espectral de emisión del hidrógeno para el primer tipo, y la línea espectral de emisión del CO para el segundo. Las líneas espectrales provienen de que cada elemento químico emite o absorbe energía a una determinada longitud de onda, siguiendo las leyes de la mecánica cuántica.

La línea de hidrógeno proviene de la línea superfina de transición del hidrógeno atómico. Esto es que el hidrógeno está formado por un protón y un electrón que cuando tienen diferente sentido de rotación, diferente espín, confieren al átomo su menor nivel de energía. Por diferentes fenómenos, como la colisión de átomos, el hidrógeno puede adquirir energía y provocará que el electrón gire en el mismo sentido que el protón confiriendo al átomo un nivel inestable por lo que éste tenderá a liberar la energía adquirida y lo hará mediante una onda radio, equivalente a un fotón en espectro visible,

con una longitud de onda de 21,11 cm. Observando mediante un radiotelescopio sintonizado a dicha longitud de onda, se puede realizar el seguimiento de la *nubes de hidrógeno* y conocer debido a la frecuencia Doppler el movimiento de esta. Con este tipo de estudio se ha podido determinar la existencia de brazos espirales de la galaxia y su dinámica.

Las *nubes de gas molecular* son otra importante estructura para observar en radio. Se trata de regiones extensas en el interior de una galaxia con millones de masas solares en forma de gas y con una densidad de materia y temperatura suficientemente baja (10 K) para la existencia de dihidrógeno (H_2). Estas condiciones hacen a estas regiones privilegiadas para la formación estelar, y no son observables de forma óptica por su extremadamente baja temperatura, condición suficiente y necesaria para estudiarlas en radio. El hecho de estudiarlas mediante el seguimiento de monóxido de carbono (CO) es debido a que el H_2 frío no radia fácilmente, y que el CO aparece en diversas moléculas y radia a 2.6 mm de longitud de onda.

Para conocer cómo emiten los cuerpos y estructuras celestes debido *al mecanismo de sincrotrón*, hay que conocer en qué consiste dicho mecanismo. La emisión de ondas radio debidas a él se produce por la aceleración que sufren las partículas cargadas al encontrarse con un campo magnético. Dichas partículas viajan a velocidades muy altas, comparables a la de la luz, siguiendo las líneas de campo magnético, formando un camino en espiral alrededor de estas y emitiendo en longitudes de onda radio. Cuanta más alta es la velocidad de las partículas más corta es la longitud de onda.

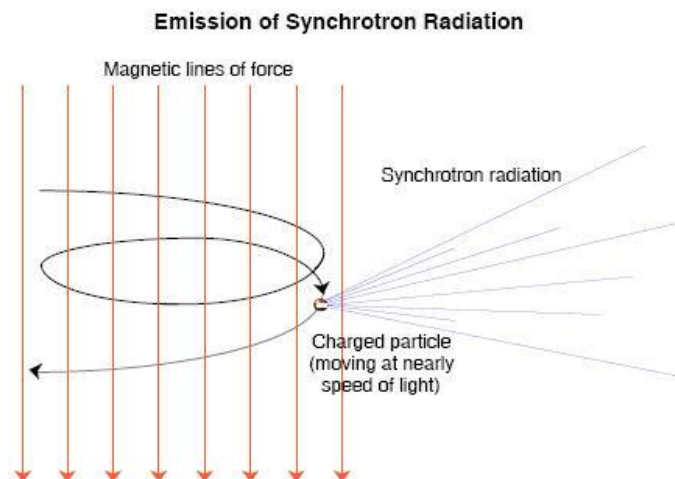


Figura 1.3: Radiación de Sincrotrón

Cómo se mencionaba anteriormente hay diversos cuerpos y formaciones celestes en los que se produce dicho tipo de emisión electromagnética. Uno de ellos son los pulsares, estrellas de neutrones que se producen tras la explosión de una estrella (supernova). Las capas exteriores de la estrella se alejan del núcleo de la estrella tras la explosión y el núcleo se conoce como pulsar. Se le llama así por su característica emisión periódica de

ondas radio debido al gran campo magnético que poseen, y a su gran velocidad de rotación.

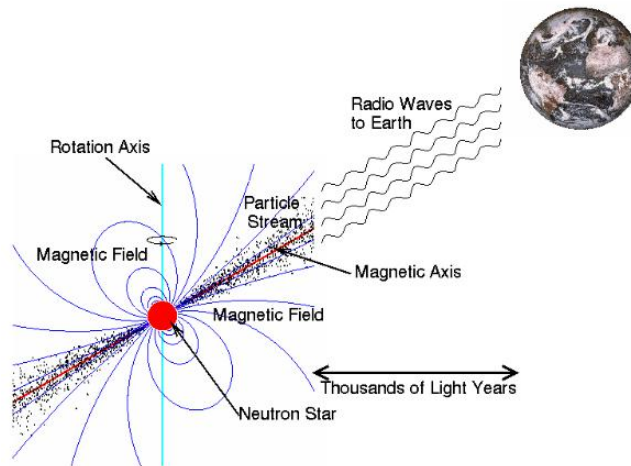


Figura 1.4: Emisión de un pulsar

Otros ejemplos de emisión de sincrotrón que se puede observar con un radiotelescopio son las *radiogalaxias*, cuasares radio-intensos y blazars, que son galaxias de núcleo activo (AGN) con alta intensidad de emisión en el espectro radio. Dichas galaxias poseen un agujero negro supermasivo, de entre 10^6 y 10^9 masas solares, situado en su centro y que absorbe material de la galaxia formando un disco de acreción debido a la conservación del momento angular. El material se transforma en plasma por el calentamiento del material a causa de la fricción y se genera un campo magnético, responsable de la emisión.

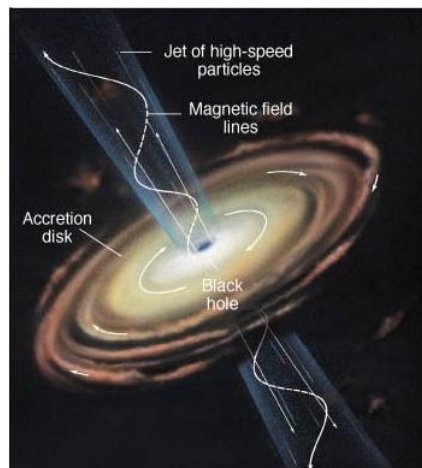


Figura 1.5: radio-loud AGN.

Para finalizar éste repaso de mecanismos de radiación y los cuerpos que los producen es necesario analizar qué tipo de radiación produce el Sol y de qué forma radia en longitudes de onda radio, ya que el principal objetivo de éste proyecto es el diseño y montaje de un radiotelescopio para la observación del Sol y principalmente para la monitorización de tormentas solares. Para ello es necesario dedicar un apartado de este

capítulo en describir en que forma emite, y a su vez hacer una clasificación de los distintos tipos de *radio-burst* que se generan en él.

1.3 Radioastronomía solar y *radio burst*

El Sol, como es bien conocido, es la estrella que nutre de luz a nuestro Sistema Solar y por lo tanto a la Tierra, pero además es la mayor fuente de energía electromagnética en el espectro radio que se puede ver desde la Tierra. Dicha estrella está compuesta por tres zonas: la Fotosfera, la Cromosfera y la Corona. La primera es la zona central, la más densa y la responsable de la mayor parte de emisión de luz visible. La Corona, en cambio, es la atmosfera exterior, es mucho menos densa que la fotosfera y prácticamente invisible para el ojo humano. Sin embargo, en la Corona solar es donde se producen la mayoría de tormentas solares que dan lugar a emisión en radio. Por último, la frontera entre ambas es la Cromosfera, mucho más fría y oscura que la Fotosfera.

La radiación en espectro radio del Sol puede ser debido a procesos térmicos, radiación de cuerpo negro, que como se explica en el apartado 1.2, se produce en un cuerpo por el hecho de poseer una determinada temperatura. Por este motivo, independientemente de la actividad solar, el Sol radiará una determinada intensidad en radio. En cambio la radiación no térmica está relacionada con las partículas que se desplazan a lo largo de líneas de campo magnético, radiación de gyrosynchrotron, que se generan principalmente en la corona solar debido a tormentas solares. El sol tiene un ciclo de actividad de 10 u 11 años en los que se aumentan notablemente las tormentas solares, a la vez que aparecen una mayor concentración de manchas solares en la Fotosfera. Estas manchas solares se ven más oscuras en el Sol debido a que se encuentran a una temperatura de 4000° C frente a los 5750° C de la superficie solar, y están relacionadas con las líneas de campo magnético que aparecen en la Corona durante las tormentas solares.

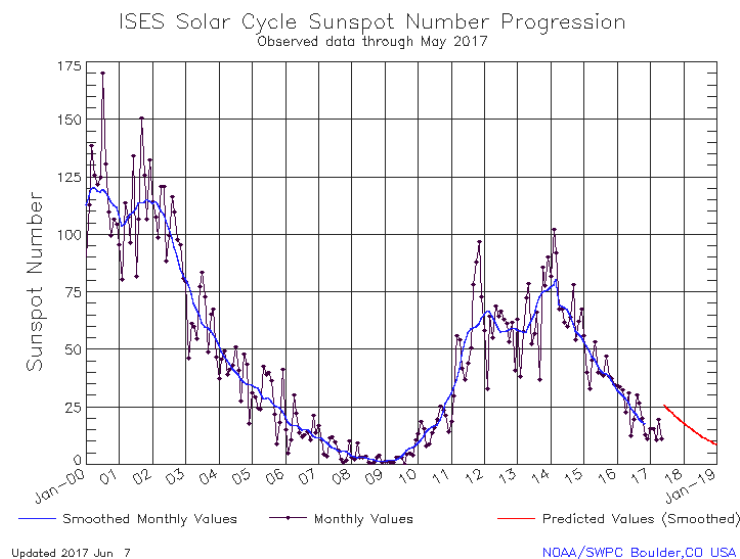


Figura 1.6. Ciclo Solar [2]

Para frecuencias radio se puede obtener la intensidad de radiación debida a la temperatura del cuerpo, mediante la aproximación Rayleigh-Jeans para la función de Planck. Teniendo en cuenta que para longitudes de onda radio se cumple la ecuación 1.3, la ecuación de Planck queda simplificada como aparece en la ecuación 1.5 ya que se reduce el término que aparece dividiendo en la función de Planck como muestra la ecuación 1.4.

$$\frac{h\nu}{kT_B} \ll 1 \quad (1.3)$$

$$e^{\frac{h\nu}{kT_B}} - 1 \approx \frac{h\nu}{kT_B} \quad (1.4)$$

$$I_\nu \approx \frac{2\nu^2 k}{c^2} T_B \quad (1.5)$$

Por lo tanto, la intensidad de radiación del Sol en estado de reposo, en el cual su emisión es principalmente debida a procesos térmicos, queda caracterizada por la ecuación de Rayleigh-Jeans. La intensidad de radiación es el flujo de energía por unidad de ángulo sólido cuyas unidades son $\frac{W}{m^2 Hz sr}$ o $\frac{Jy}{sr}$.

Por otra parte, las emisiones en espectro radio del Sol de mayor intensidad se producen debido a erupciones o llamaradas solares producidas en los distintos niveles de la atmosfera solar, donde las partículas energéticas son aceleradas, y por la eyección de masa coronal, CME. Debido a estos fenómenos se producen estallidos de ondas radio que llegan a la Tierra con diferentes patrones en cuanto a su duración y a la frecuencia que abordan. Dichos patrones se deben al fenómeno físico que causa la radiación, y se pueden definir cinco principales tipos de *radio burst*. A continuación se muestran las principales características de cada tipo.

Las emisiones Tipo I tienen una componente continua y otra componente en forma de ráfaga. A la componente continua se le llama también *tormenta de ruido* y consiste en una larga serie de cortas ráfagas de radio de gran ancho de banda, que se extienden desde los 100MHz a los 400MHz [2][3], aunque raramente se observan por encima de los 350MHz, y que en la escala de tiempo se alargan durante horas o incluso días. Las ráfagas que conforman el espectro continuo de radiación tienen un tiempo de vida de entre 0.1s a 1s, y tienen polarización circular. El hecho de que posean una larga duración junto con la polarización circular indica que el fenómeno físico que los produce sean partículas energéticas atrapadas en las líneas cerradas de campo magnético producidas durante explosiones o en zonas activas en la corona solar.

Las ráfagas Tipo II se caracterizan por un desplazamiento lento hacia frecuencias más bajas con el paso del tiempo. Se asume que aparecen por una emisión plasma ya que

aparecen el armónico principal de la frecuencia del plasma y el secundario, separados en dos trazas. Son fenómenos de baja frecuencia que se pueden situar entre los 20 y los 150MHz, aunque rara vez se encuentran por encima de los 100MHz. Debido al desplazamiento en frecuencia de la ráfaga recibida, se puede conocer la velocidad de la perturbación solar una vez conocida la variación de la densidad de electrones n_e con la altura en la corona solar. La velocidad típica es del orden de 1000 km/s que corresponde con la velocidad de las *superalfvenic shock* generadas en los estallidos solares o en las eyecciones de masa coronal, moviéndose a través de la corona.

En contraposición al aspecto de las radiaciones de Tipo II se encuentran las de Tipo III, ya que presentan un desplazamiento rápido hacia frecuencias más bajas con respecto al tiempo. Este desplazamiento puede ser de decenas de MHz/s y será mayor a frecuencias más altas. Este tipo de emisión radio se origina por la aceleración de haces de electrones durante una explosión en la corona solar. Las ráfagas de radio siguen al haz de electrones que viaja a través de la corona solar siguiendo las líneas abiertas de campo electromagnético, dando lugar a los vientos solares. La emisión se desplaza a frecuencias menores según se desplace el haz de partículas, ya que la densidad de la corona es menor en las capas más altas. Este haz de electrones alcanza velocidades relativistas $0.2c - 0.6c$ con energías de decenas de keV hasta 100 keV . Se pueden encontrar ráfagas aisladas con tiempos de 1-3s, aunque es habitual encontrarlas en grupos de más de 10 *radio burst*. El Tipo V aparece como una difusa emisión continua tras algunos Tipos III. Poseen un periodo de vida normalmente menor que 1 minuto, y pueden detectarse en frecuencias desde 10 a 200 MHz. Su fuente es el haz de electrones que genera el Tipo III a mayor altitud en la corona donde el haz se difumina.

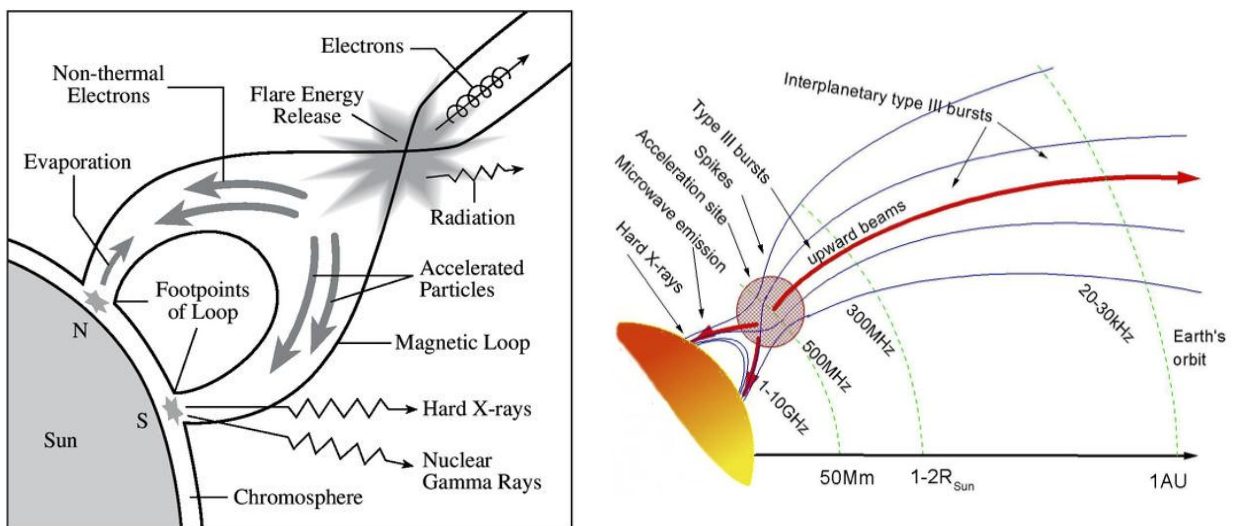


Figura 1.7. Modelo típico de *solar flare* y emisión de *radio burst Type III*

Las emisiones Tipo IV se caracterizan por una radiación continua que se puede extender en el tiempo desde unos minutos hasta días y abarcar frecuencias desde los 10MHz a los 2 GHz. Un rasgo característico son los llamados *patrones cebra*, pulsaciones finas en frecuencia que pueden ser detectadas con instrumentos de alta resolución. Se asocian en la mayoría de los estudios con la fase de decadencia de las prominencias solares y

con las CMEs. El gran ancho de banda y el hecho de que sean estáticos en frecuencia les asigna como fuente electrones atrapados en las líneas de campo magnético. El fenómeno de la estructura de finas pulsaciones conlleva a que se deban producir repetidas inyecciones de electrones, los cuales a su vez liberan energía debido a la aceleración que sufren por la reconexión de las líneas de campo superiores que se producen en llamaradas de larga duración. Además de esta radiación de sincrotron, se han observado numerosas emisiones HXR que indican que los electrones parecen ser acelerados además por erupción de plasma [4]. Se puede dividir este grupo en el subtipo *static Tipo IV*, ya definido, y el subtipo *moving Tipo IV*. Este último suele tener una duración de 30 minutos a 2 horas, y se caracteriza por un desplazamiento lento hacia frecuencias menores. Suele aparecer entre 20 y 400 MHz. Aunque su origen está en estudio, existen observaciones recientes que lo relacionan con radiación de gyrosincrotron [4][5] asociada a filamentos que, y otras anteriores mantienen que la fuente puede ser parte de lazos de campo expandidos.

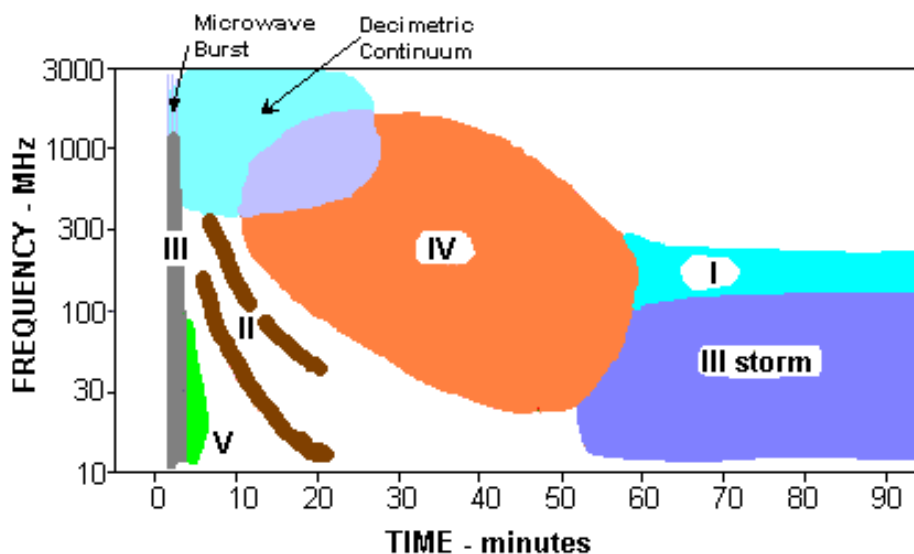


Figura 1.8. Resumen de tipos de *radio burst*

Tras la introducción a los diversos fenómenos que radian en un rango de frecuencias menor a 1 GHz en el Sol, conocido aproximadamente el aspecto de las señales que se pueden recibir y a qué frecuencia, se puede hacer el diseño del radiotelescopio acorde a dichos parámetros. En la Figura 1.8 se muestra de forma general el aspecto que cada tipo de emisión, proporcionando información resumida sobre los rangos de frecuencias y tiempos que ocupan. Para una información más exhaustiva consultar [2], donde se realiza un estudio de diversos *radio burst*, así cómo se analizan patrones de señal interferencia captados por equipos de la Red e-Callisto.

1.4 Red e-Callisto

En este capítulo se presenta la Red Internacional de Radiospectrómetros Solares, e-Callisto, la cual permite monitorizar la actividad solar durante 24 horas diarias a lo

largo de todo el año. El principal objetivo es la observación de radio burst solares para contribuir a estudios astronómicos, investigaciones sobre el *space weather* o cómo instrumento educacional. La red está formada por espectrómetros CALLISTO (Compound Astronomical Low cost Low frequency Instrument for Spectroscopy and Transportable Observatory) distribuidos internacionalmente. Actualmente cuenta con más de 60 radiotelescopios que proporcionan datos diariamente, aunque son más de 75 los que han proporcionado datos alguna vez y más de 136 equipos repartidos alrededor del mundo [7]. La distribución de equipos a lo largo de la superficie terrestre permite monitorizar la actividad solar a cualquier hora del día [8]. En la Figura 1.9 se representa la distribución de equipos de la red en el mundo (aplicación en la web de la red e-Callisto), distinguiendo entre los que han proporcionado datos en los dos últimos días, los que están proporcionando datos en ese mismo momento y los que no incorporan información a la red.

Los espectrómetros guardan la información obtenida en archivos FIT, uno cada 15 minutos de observación, y envían estos a un servidor central de libre acceso en Suiza. Es decir, la información de todos los radiotelescopios es guardada en la nube y de forma que cualquiera pueda tener acceso a toda la información recopilada desde 2002 en la dirección [9]. Además del archivo FIT se proporciona una imagen del espectrograma, representado a partir de los datos recogidos en el archivo, como aparece en la Figura 1.10.

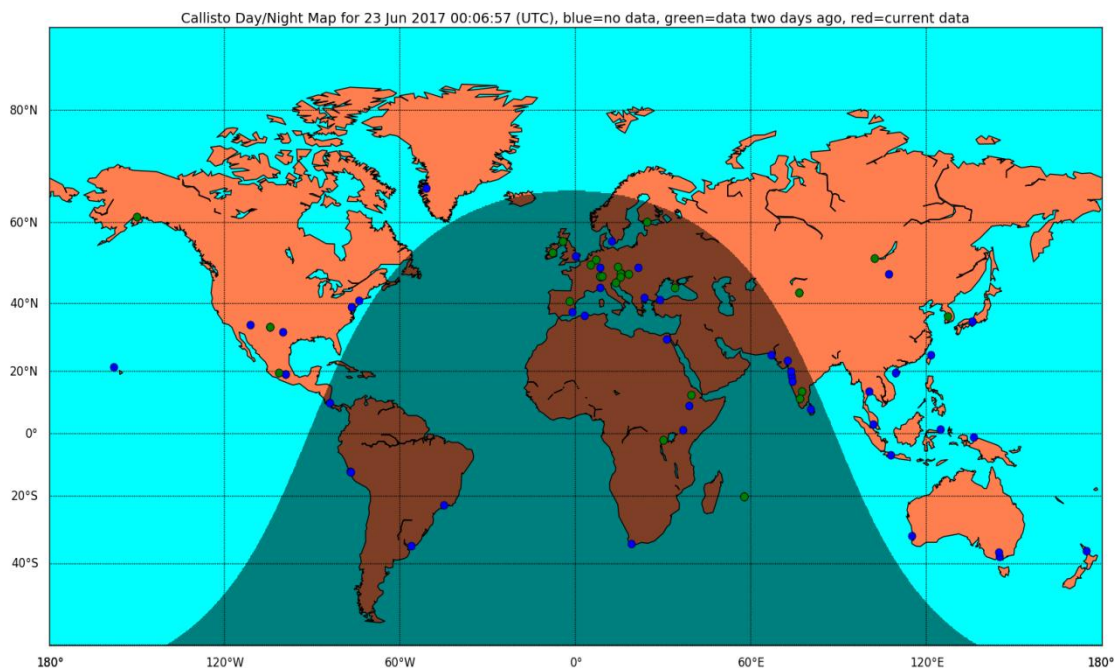


Figura 1.9. Distribución de equipos Callisto a lo largo del mundo.

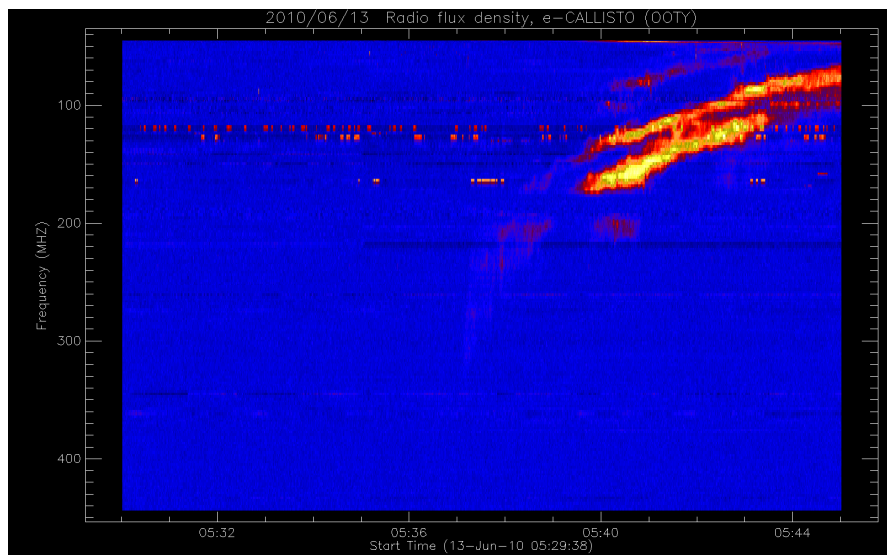


Figura 1.10. Espectrograma típico que se muestra junto al archivo FIT. En este caso, radio burst Type II, observado por radiotelescopio OOTY, India.

En cuanto al principal elemento que hace posible la red, el espectrómetro Callisto, es un receptor heterodino desarrollado por el *Radio and Plasma Physics Group* dirigido por Christian Monstsein en la ETH de Zurich, Suiza. Su banda de operación nativa se encuentra entre 45 y 870 MHz (longitud de onda de 34.5 cm a 6.7 m), aunque puede ser extendida empleando un convertidor hacia altas o bajas frecuencias. El ancho de banda de un canal es de 300kHz, y el máximo número de canales por barrido es de 400. Tanto el número de canales como la resolución temporal es programable, pudiéndose establecer el número de barridos por segundo. La configuración más habitual es fijar una resolución temporal de 0.25 segundos estableciendo 4 barridos por segundo y 200 canales de frecuencia, obteniendo 800 píxeles por segundo. Se aborda la explicación en mayor detalle en el Capítulo 3.1.

Otros datos de interés que proporciona la red son gráficas en las que se recoge el nivel de interferencia en el rango completo de recepción de Callisto para muchos de los emplazamientos, se pueden ver en [10]. A partir de ellos, en la página principal de e-Callisto se muestran gráficos con los lugares de mayor nivel de señal interferente medio, así como se realiza la comparación entre estos niveles el nivel de señal que aporta el sol en estado de reposo, aportando información orientativa de cuál ha de ser la ganancia que tiene que aportar nuestra antena al sistema para poder detectar la señal del sol en reposo.

Para finalizar la presentación de la red e-Callisto, a la cual este proyecto tiene como objetivo adherirse, se va a realizar un repaso de diversos radiotelescopios que aportan información a la red con objeto de analizar la diversidad de sistemas de antena instalados, centrándonos en si poseen o no sistema de seguimiento y en el tipo de polarización que reciben.

1.4.1 Radiotelescopios de la red e-Callisto

La mayor parte de los radiotelescopios en funcionamiento de la red no poseen sistemas de seguimiento del Sol, así como también la mayoría de ellos no utiliza polarización circular, aunque hay varios sistemas que incorporan dicha polarización incluyendo dos LDPA con diferente orientación o una LDPA de polarización cruzada, así como también ciertos radiotelescopios que incluyen la monitorización del seguimiento solar.

Ambas características son importantes en cuanto a la potencia que capte el radiotelescopio, ya que un buen apuntamiento permite recibir la máxima potencia posible en el tránsito de tiempo en que haya visión solar, y la polarización circular, de igual modo mejora la potencia captada por el sistema puesto que la radiación debido a procesos no térmicos suele tener una alta polarización circular. Si la antena es capaz de únicamente recibir en una polarización solo podrá obtener aproximadamente la mitad de la potencia que llega a la antena.

A continuación se muestran una serie de antenas o sistemas de antenas que forman parte de la red e-Callisto, indicando sus principales características.

Observatorio de Bleien, Suiza

Consta de dos antenas parabólicas de 5 y 7m de radio, además de una antena LWA. Las tres antenas proporcionan polarización circular. La parabólica de 5m recibe de 300 MHz a 5 GHz, y además cuenta con una LDPA adjunta a su estructura cubriendo el rango de 45 a 870 MHz. La de 7 m abarca un rango de 100 MHz a 4 GHz , tiene cómo foco una LDPA de polarización cruzada. Por último, la LWA (Long Wavelength Array) con polarización cruzada trabaja a frecuencias de 45 a 100 MHz y no emplea sistema de seguimiento ya que radia omnidireccionalmente por encima del plano de tierra y además tiene incorporado un preamplificador de 35 dB.



Figura 1.11. Parabólica de 7m de diámetro con LPDA de doble polarización en su foco.



Figura 1.12. LWA.

Humain, Bélgica

Parabólica de 6m de diámetro y LPDA adjunta a su disco. La LPDA cubre el rango de 45-450MHz y el foco de la parabólica cubre de 275-1495 MHz. El sistema incorpora dos espectrómetros más además de Callisto (45-450 MHz), HSRS (275-1495 MHz) y ARCAS (45-450 MHz). El sistema realiza seguimiento solar.



Figura 1.13. Parabólica de 6m y LPDA fijada al borde del disco.

MRO (Metsähovi Radio Observatory), Finlandia

Parabólica de 1.8 m de diámetro para observación del Sol a 11.2 GHz. LPDA adjuntas a la parabólica para captar señal en la banda nativa de Callisto. Dos antenas para polarización vertical y una para polarización horizontal, con lo que consigue recibir en polarización horizontal. Las LPDA son las que se conectan a los equipos Callisto, y emplean el sistema de *tracking* solar de la parabólica.



Figura 1.14. Parabólica de 1.8 m y tres LPDA adheridas a su estructura.

Karachi, Pakistan.

El sistema de recepción en este caso es una LDPA con polarización lineal, instalada de forma fija sobre un mástil apuntando al cenit. Incorpora una caja de amplificación tras la antena, mejorando el nivel de señal a ruido ya que se reduce la figura de ruido del sistema.



Figura 1.15. LDPA apuntando al cenit.

ACCMT, Sri Lanka

La antena logoperiódica es diseñada y desarrollada por el Arthur C Clarke Institute for Modern Technologies (ACCMT). Está formada por 18 dipolos, tiene una ganancia de 7dBi y cubre el rango de frecuencias de 45 MHz a 600MHz. Además cuenta con un amplificador diseñado también por ACCMT con una ganancia de 31.5 dBi a 100MHz.



Figura 1.16. Antena logoperiódica de 18 dipolos.

Ulaan Baatar, Mongolia

En este caso la antena es un LDPA fijo apuntando a la zona donde el Sol tiene una mayor altura respecto al emplazamiento de la antena.



Figura 1.17. LDPA polarización lineal sin seguimiento del Sol

Para concluir este capítulo, es necesario resaltar que aunque el apuntamiento y la polarización de la antena son características importantes, no lo son menos su ganancia, el sistema de amplificación de señal del sistema, las pérdidas por línea de transmisión, cable coaxial, y el espectro de señales interferentes del entorno. Estos aspectos serán tratados a lo largo del siguiente capítulo, en el que se presenta y explica en detalle el Radiotelescopio de la UPCT.

Capítulo 2

Radiotelescopio Solar UPCT

En este capítulo se presenta el Radiotelescopio Solar de la UPCT, proporcionando la ubicación del sistema, su diagrama general de bloques y describiendo todas las partes que lo constituyen. Con respecto a estas partes, se divide en el sistema de captación de señal radio proveniente del Sol y en el sistema de seguimiento del Sol. Dentro de cada una de estas ramas se explican todos los dispositivos que las forman así como el software necesario para su funcionamiento.

2.1 Presentación del radiotelescopio

El Radiotelescopio solar UPCT se encuentra instalado en la azotea del edificio I+D+I de la UPCT, junto a un radiotelescopio para la observación de la línea de hidrógeno de nuestra Galaxia desarrollado y puesto en funcionamiento por alumnos de la UPCT en sus PFC y TFG [1][11]. La principal ventaja y funcionalidad de instalar el sistema junto a dicho radiotelescopio es utilizar la estructura de la antena ya existente y el sistema de motores con el que cuenta, para instalar la nueva antena y realizar el seguimiento del Sol. Dicha antena es un reflector parabólico de 3m de diámetro montada sobre un mástil de hormigón de 2.75 metros, se muestra en la Figura 2.1. Las coordenadas geográficas del emplazamiento son $37^{\circ}36'06.7''\text{N}$ $0^{\circ}58'45.9''\text{W}$, se muestra en la Figura 2.2 el entorno en que se encuentra instalada la antena.



Figura 2.1: Parabólica para observación de la línea de hidrógeno

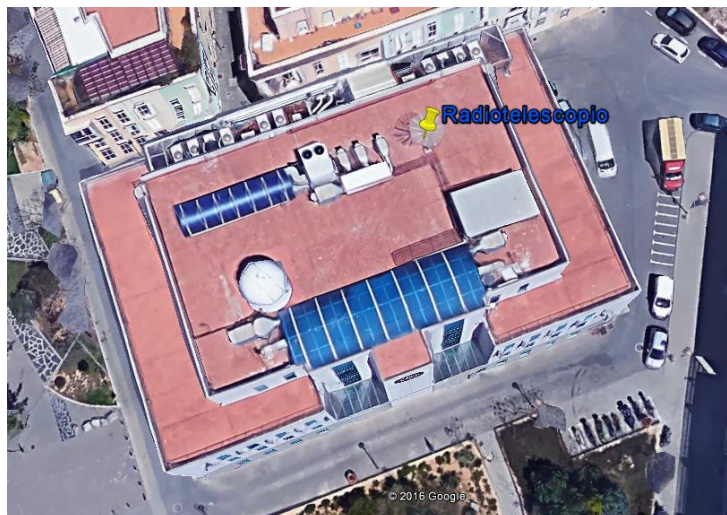


Figura 2.2. Terraza I+D+I. Emplazamiento del radiotelescopio.

Una vez presentada la ubicación del radiotelescopio, es conveniente proporcionar una breve descripción del sistema general antes de explicar cada una de las partes. El radiotelescopio cuenta con una antena LDPA de 22 dipolos de gran ancho de banda, una caja preamplificadora montada con dispositivos de MiniCircuits cuyo principal dispositivo es un LNA, el espectrómetro Callisto como principal elemento del sistema, un sistema de motores para mover la antena en acimut y elevación, un controlador para estos motores y un PC en el que se encuentra el software Callisto, el software Orbitron para el seguimiento del Sol y diversos programas para la representación de la información proporcionada por Callisto. En la Figura 2.3 se muestra el diagrama general del sistema.

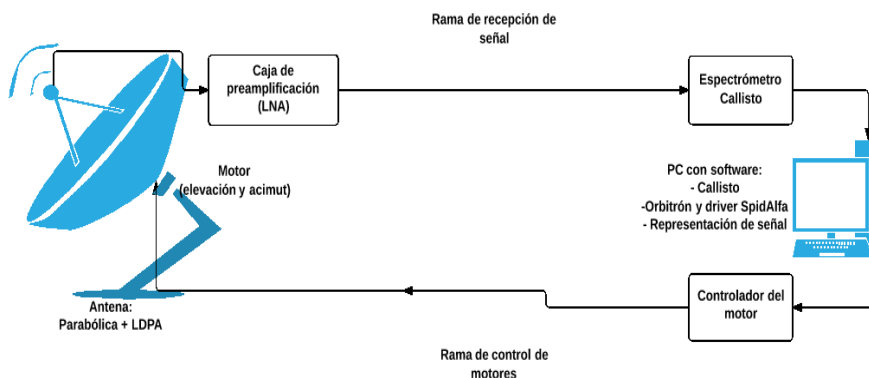


Figura 2.3: Esquema general del radiotelescopio solar

A continuación en el punto 2.2 se describen los equipos que influyen directamente en el nivel de señal recibido, y en el 2.3 se explican los motores, el controlador y el software instalado para el *tracking* del Sol.

2.2 Sistema de recepción de señal radio

En este apartado se pretende dar una explicación detallada de los dispositivos que conforman el radiotelescopio, desde la antena hasta el software, pasando por el sistema

de acondicionamiento de señal y por el espectrómetro Callisto. Con sistema de acondicionamiento de señal me refiero a todos los dispositivos empleados para adaptar la señal recibida de forma que llegue al espectrómetro la señal más óptima posible. En la Figura 2.4 se presenta un diagrama más en detalle del sistema, aunque en cada uno de los apartados que sigue se explique cada elemento en profundidad.

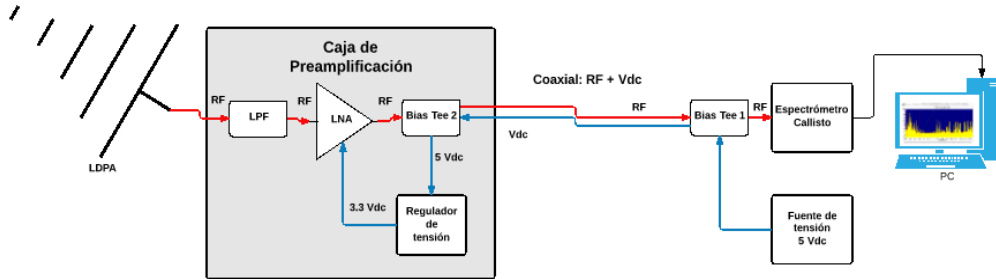


Figura 2.4: Diagrama de recepción detallado.

2.2.1 Antena log-periódica LP-22eV

La antena empleada para el radiotelescopio es una logoperiódica de 22 dipolos, LPDA (log-periodic dipole array). Consiste en un conjunto de antenas dipolos unidas y alimentadas de forma alterna mediante una línea de transmisión común. Para cada frecuencia existe una zona activa formada por uno o dos dipolos a $\lambda/2$ la frecuencia de trabajo, funcionando los dipolos posteriores a estos, de mayor longitud, como reflectores y los dipolos anteriores, de menor longitud, como directores. Esto proporciona a la antena un funcionamiento similar a un único dipolo a $\lambda/2$ con una cierta ganancia para cada frecuencia. El hecho de que esté formada por un gran número de elementos permite cubrir un gran ancho de banda de forma cuasi independiente de la frecuencia, aunque su patrón característico presenta un leve rizado debido a la separación entre dipolos que será menor cuanto más próximos estén estos. Su gran ancho de banda es su principal ventaja, ya que en cuanto a ganancia presenta un valor bajo con respecto a su tamaño.

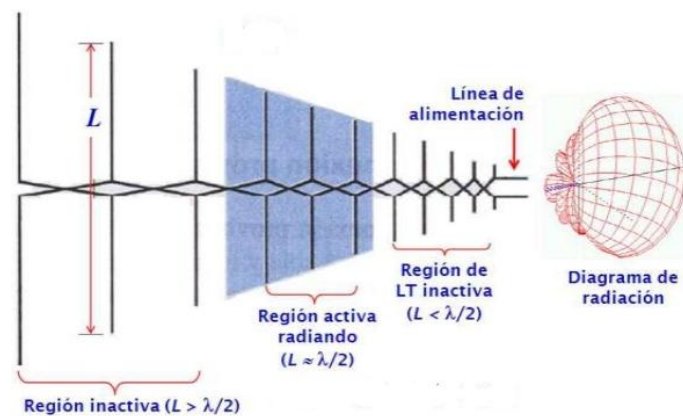


Figura 2.5: Esquemático de antena logoperiódica de dipolos.

Hay mucha información referente a cómo diseñar este tipo de antenas [12][13][14] y es relativamente sencillo, sin embargo debido al tiempo disponible para la realización del proyecto y carecer de un laboratorio adecuado para la fabricación de este tipo de dispositivos, nos hizo decantarnos por comprar la antena. La antena elegida fue la PKW LP22eV [15] de la empresa Reset Comunicacions, que presenta una ganancia de 8.5dBi y un ancho de banda de 130 MHz a 1300 MHz. El patrón de radiación típico aportado por el fabricante para el plano E y H está en la Figura 2.6. Además de los datos del fabricante, se realizó la medida del parámetro de adaptación de entrada, S_{11} , con el analizador de redes ZVL de ROHDE&SWARZ¹ que se añade en la Figura 2.7. En este se aprecia que en el ancho de banda de trabajo (130-1300MHz) de la antena el $S_{11} < -10$ dB, aunque cómo se verá en el Capítulo 3, el ancho de banda en que trabaja la antena se reduce a 220-385 MHz.

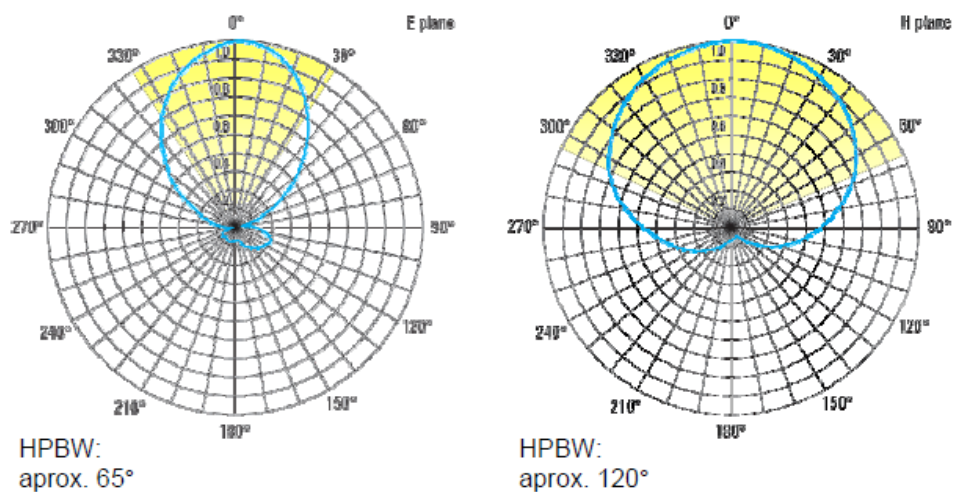


Figura 2.6: Diagrama antena LP-22eV

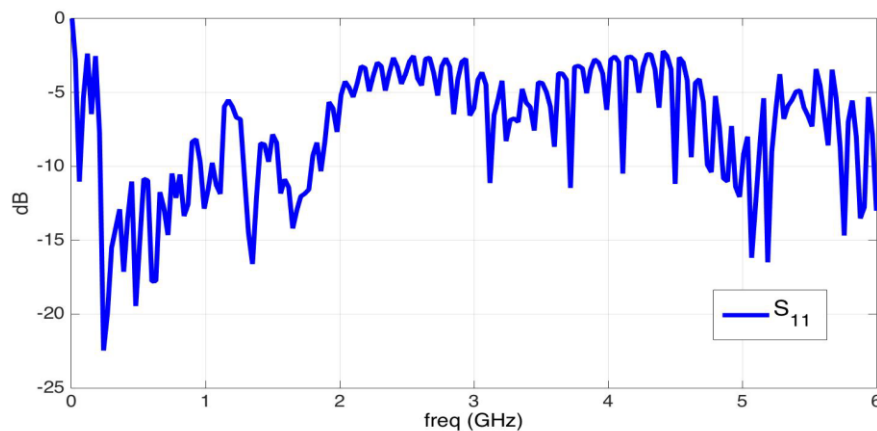


Figura 2.7. Parámetro S_{11} de la logoperiódica.

En cuanto a la instalación de la antena junto al disco de la parabólica, se ha instalado un mástil de 1.5 m de longitud [16] sujeto a una de las doce patas de la estructura de la

parabólica. Sobre dicho mástil y aprovechando la estructura del disco se realizó la sujeción de la antena, instalándola con los dipolos en orientación vertical, polarización vertical. En la Figura 2.8 aparece la antena ya instalada junto al disco parabólico, en la que se puede observar el mástil de la antena.



a)



b)

Figura 2.8: En a) se aprecia principalmente el mástil. En b) principalmente la LDPA.

2.2.2 Etapa Preamplificadora

El segundo elemento que aparece en la Figura 2.4, desde que la señal llega al radiotelescopio, es la caja de preamplificación, la cual he montado desde el inicio hasta su instalación final junto a la antena, basándome en el trabajo desarrollado por el Reeve Observatory, en Anchorage, Alaska [17]. A continuación explico los dispositivos que conforman la caja y muestro el testeo de los equipos comprados así como el del resultado final de la caja, explico cómo se realiza la alimentación del LNA, y además

trato de exponer los pasos seguidos en la fabricación de la caja hasta su instalación en la antena.

Los elementos que conforman la caja se presentan en la siguiente lista:

1. Filtro paso bajo ZX75LP-900+ de Mini-Circuits [18], con frecuencia de corte a 990 MHz cómo se muestra en los parámetros de scattering representados en la Figura 2.10.
2. Amplificador de bajo ruido ZX60-33LN+ de Mini-Circuits [19] que presenta una figura de ruido típica de 1.1dB, cuya banda de funcionamiento se extiende desde 50 MHz a 3 GHz, aunque es la zona hasta 1 GHz donde presenta ganancia superior a 18.8 dB. Concretamente, a 300 MHz según el testeo del dispositivo que se muestra en la Figura 2.11, proporciona una ganancia de 19.5 dB, y 0.9 dB de figura de ruido según el datasheet del fabricante.
3. Bias-Tee de Mini-Circuits ZFBT-4R2G+. Un bias-tee es un dispositivo con tres puertos, uno de ellos permite incorporar una señal de continua, el otro una señal de radiofrecuencia y el tercero, permite sacar ambas señales juntas, no dejando pasar la continua hacia la rama de radiofrecuencia ni a la inversa.
Las pérdidas típicas de este es de 0.15 dB y el parámetro de aislamiento típico es de 32 dB para la banda de interés (45MHz-870MHz, banda nativa de Callisto) según su datasheet [20].
4. Limitador de tensión VLM-33+ también de Mini-Circuits que introduce unas pérdidas típicas para la banda de interés de 0.08dB y limita la potencia de salida a 11.5 dB [21].
5. Pequeña placa en la que se ha implantado un regulador de tensión ajustable, LM1117-ADJ de National Semiconductor [22]. Se ha configurado para obtener una tensión de salida de 3.3 V_{DC} cuando tiene una tensión de 5V_{DC} de entrada.
6. Los cables utilizados para interconexión de los dispositivos de radiofrecuencia en la caja son coaxiales RG174 de 16.7 mm de longitud e impedancia característica de 50 Ω [23].
7. Adaptadores SMA hembra a SMA hembra, SMA macho a SMA macho y adaptadores SMA hembra a SMA macho de noventa grados, todos ellos adquiridos en RS Components. Son necesarios para las interconexiones de dispositivos en la caja.
8. Dos adaptadores N hembra a SMA macho. Estos adaptadores son los que realizan la transición entre el interior de la caja al coaxial exterior que comunica la caja con el espectrómetro Callisto y la antena logoperiódica.

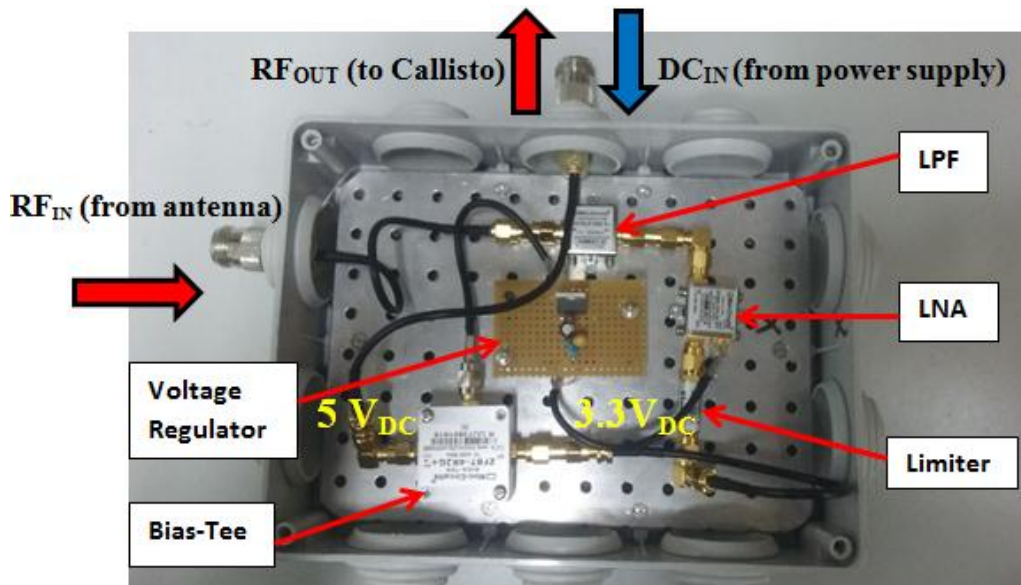


Figura 2.9. Caja Preamplificadora.

En la Figura 2.9 se muestra el estado de la caja lista para su instalación, en dicha imagen se han añadido etiquetas para identificar cada uno de los componentes que se acaban de explicar. El objetivo principal de la caja es realizar la amplificación de la señal captada lo más próximo posible a la antena y con una figura de ruido baja para mejorar el nivel de señal a ruido del sistema cómo explicaré en el apartado 2.2.5. Por lo tanto el principal elemento de la caja es el LNA, que amplifica la señal que previamente ha sido filtrada por el LPF con el que se elimina la señal fuera de la banda de interés. En la Figura 2.12 se representan los parámetros S_{11} y S_{21} del amplificador junto al filtro y el limitador antes de instalarse en la caja, y en la Figura 2.13 se muestran los mismos parámetros para testear la caja finalizada, de ambas se extrae que en la fabricación de la caja sólo se pierde 1 dB aproximadamente, por lo que el diseño ha sido bastante óptimo, proporcionando una ganancia de aproximadamente 18.5 dB en torno a 300 MHz.

El bias-tee, el regulador de tensión y el limitador no se emplean para el tratamiento de la señal si no para alimentar el LNA. Los dispositivos más importantes para la alimentación del LNA son los dos bias-tee empleados, que permiten llevar la corriente de alimentación necesaria para el funcionamiento del amplificador por el mismo coaxial que se recibe la señal radio, permitiendo instalar la fuente de alimentación junto al PC y al espectrómetro Callisto y no cerca de la caja de amplificación. El primer bias-tee se incorpora justo antes del espectrómetro Callisto, con el puerto RF conectado al espectrómetro, el puerto DC conectado a la fuente de alimentación de 5 V_{DC} y el puerto RF&DC conectado al coaxial, cómo se puede ver en la Figura 2.4. El coaxial llega a la caja y se conecta al segundo bias-tee por el puerto RF&DC, y el puerto DC se conecta al regulador de tensión proporcionando a éste una tensión de entrada de 5 V_{DC} que transforma a 3.3 V_{DC} a su salida, la cual por último llega a alimentar el LNA. El limitador se conecta entre el bias-tee y el LNA para evitar que cualquier posible pico de tensión que pueda producirse pase a través del bias-tee y dañe el LNA. Para una mejor comprensión ver la Figura 2.9.

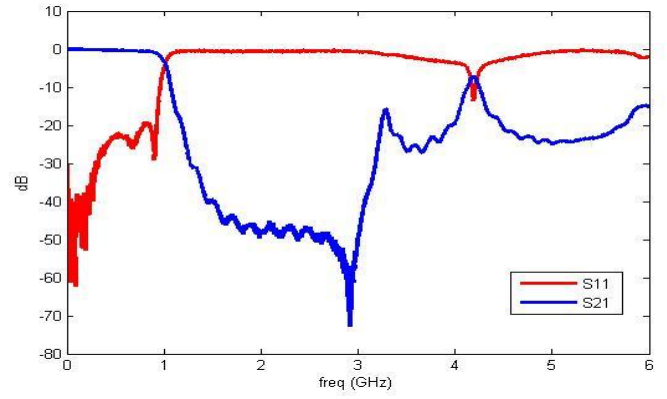
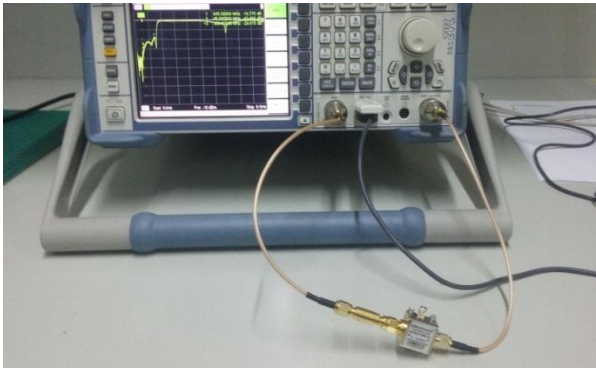


Figura 2.10. Testeo LPF ZX75LP-900+. Parámetros de scattering (S_{11} y S_{21}).

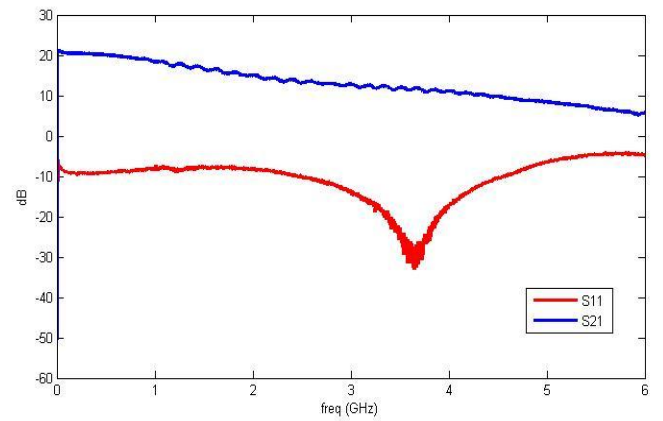
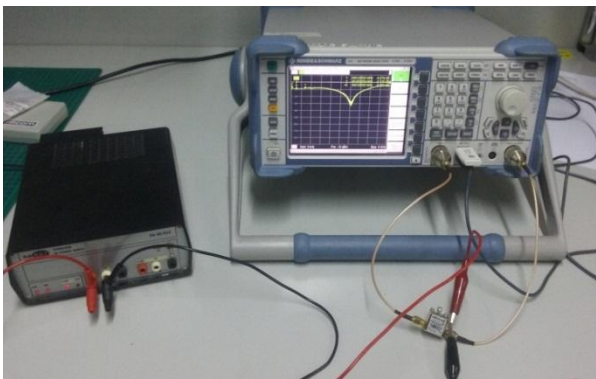
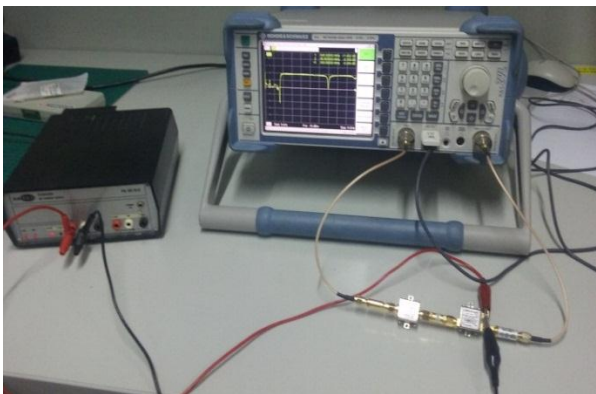
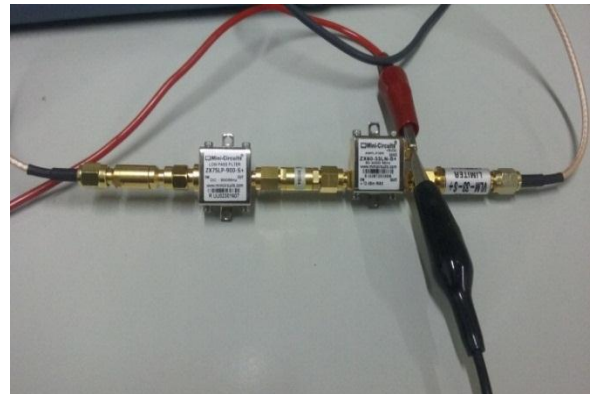


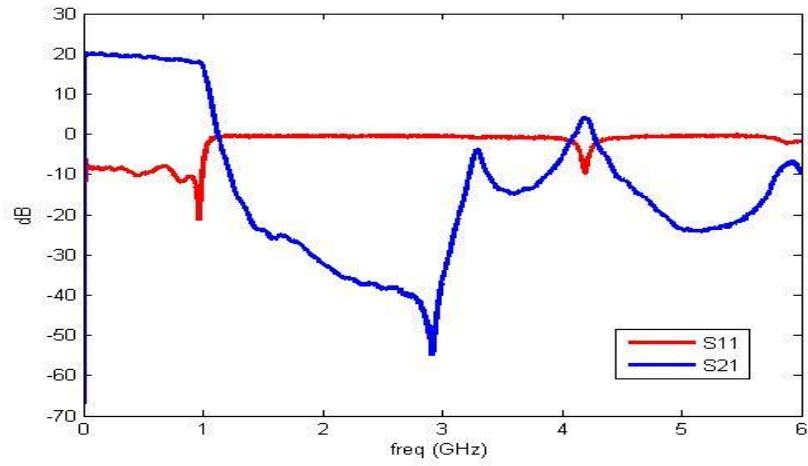
Figura 2.11: Testeo LNA ZX60-33LN+. Parámetros de scattering (S_{11} y S_{21}).



a)

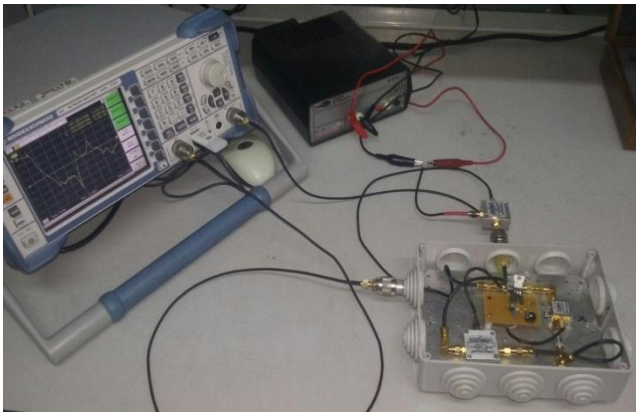


b)

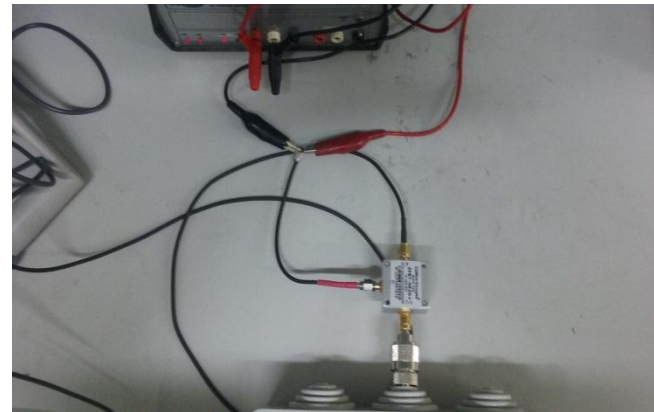


c)

Figura 2.13. En a) y b) montaje para la medida. En c) parámetros S del LNA junto al LPF y al limitador (S_{11} y S_{21})



a)



b)



c)

Figura 2.14: Montaje para testeo de la caja en a) y b). Parámetro S21 en c).

Hasta el momento he explicado cómo está formada la caja de preamplificación, la ganancia que proporciona al sistema y la forma de llevar corriente de alimentación al LNA. Por último, queda por explicar el proceso de fabricación e instalación de la caja junto a la antena. Para ello se adquirió una caja estanca para exteriores a la que el departamento técnico de la UPCT añadió una pequeña estructura para poder anclarla al mástil de la antena, así como también incorporó una lámina de aluminio con una cuadrícula de agujeros para poder atornillar los dispositivos de Mini-Circuits. La imagen de la Figura 2.15 muestra la caja con dichas mejoras.



Figura 2.15. Caja estanca con estructura para fijación en mástil y lámina de aluminio.

A partir de aquí, y una vez hecho el pedido de todos los componentes necesarios, tanto los dispositivos de Mini-Circuits, como los cables, las transiciones, la placa con pistas de RS componentes y el regulador de potencia, se procedió a crear la placa del regulador de tensión, ya que éste requiere unos ciertos condensadores a su entrada y salida, así como una resistencia fija y otro variable según se indica en su datasheet [22]. La placa creada se puede ver en la Figura 2.16. El siguiente paso fue montar todos los dispositivos en la lámina de aluminio, Figura 2.17, y tras esto se añadieron las transiciones N hembra a SMA macho a la caja y se sellaron con silicona para aislar de la humedad.

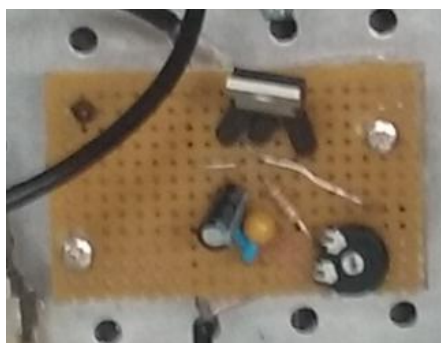


Figura 2.16. Regulador de tensión

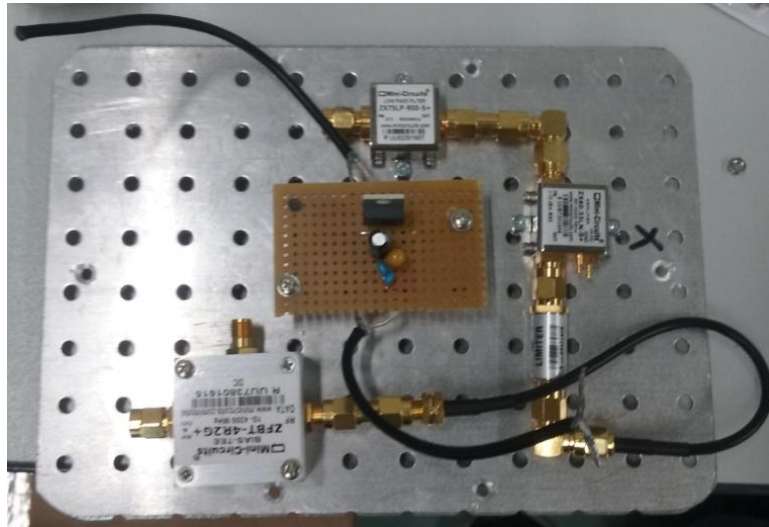


Figura 2.17. Proceso de montaje de dispositivos sobre la lámina.

Una vez terminado el montaje realicé el ajuste y la medida de la tensión que había a la salida del regulador. Para ello conecté la fuente de alimentación al puerto DC de un bias-tee exterior a la caja, a este le conecté una carga adaptada en el puerto RF y el puerto RF&DC lo conecté a la conexión N de la caja a la que va el coaxial que conecta con el Callisto. A la otra conexión N de la caja, la que conecta la caja con la salida de la antena, también conecté una carga adaptada. De esta forma alimentando con 5 V_{DC} a través del bias-tee y ajustando la resistencia variable conseguí los 3.3 V_{DC} para alimentar al LNA. Este proceso queda reflejado en la Figura 2.18.

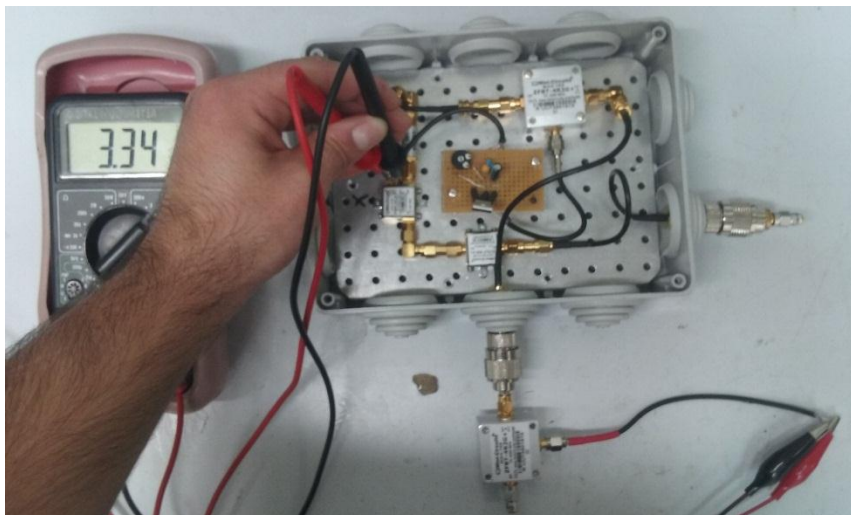


Figura 2.18. Configuración y medida de tensión de alimentación del LNA

Por último antes de conectar la caja a la estructura de la antena, se realizó la medida de los parámetros de scattering cuyas medidas ya he presentado y comentado al principio de este capítulo. Aun así veo necesario explicar la forma de abordar el montaje para realizar la medida con el analizador de redes. Dicho montaje aparece en la Figura 2.14 a) y b), en el que la alimentación se realiza igual que en el proceso descrito por la Figura 2.18 y el puerto RF del bias-tee se conecta al segundo puerto del analizador, puerto de

salida, y la conexión de entrada de RF a la caja se conecta al puerto uno del analizador de redes.

Para cerrar este apartado, se añaden algunas imágenes que muestran cómo se ha realizado la instalación de la caja inmediatamente después de la antena. Al conector de la antena se le añade un adaptador N-hembra a N-macho de 90 grados para orientar la salida del cable coaxial conectado a la antena en la dirección del eje de esta cómo se muestra en la Figura 2.19. Este primer cable es de tan solo 1 metro de longitud, para conectar la antena a la caja de amplificación, que se fija al eje de la antena en el extremo en el que terminan los dipolos. En las imágenes de las Figuras 2.20 se aprecia la posición e instalación de la caja.



Figura 2.19. Adaptador de 90°



Figura 2.20. Instalación de la caja en la antena.

2.2.3 Línea de transmisión

El cable es un elemento importante en el montaje del radiotelescopio ya que podría introducir grandes pérdidas con lo que se reduciría la potencia de la señal que tratamos que sea la mayor posible para tener una mejor sensibilidad. Por este motivo se optó por el cable ECOFLEX 15, que se caracteriza por sus bajas pérdidas, típicas de cables con un conductor central no flexible formado por rígidos cables, combinado con una alta flexibilidad. Además cuenta con un factor de apantallamiento electromagnético superior a 90dB. Todos los datos técnicos se encuentran en [24], aunque en la Figura 2.21 se aporta la tabla de pérdidas del cable, ya que es el factor determinante para el diseño.

Typ. attenuation	(dB/100m@20°C)	dB/100ft @20°C
5 MHz	0,6	0,18
10 MHz	0,86	0,26
50 MHz	1,96	0,60
100 MHz	2,81	0,86
144 MHz	3,4	1,04
200 MHz	4,05	1,23
300 MHz	5,0	1,52
432 MHz	6,1	1,86
500 MHz	6,7	2,04
800 MHz	8,6	2,62
1000 MHz	9,8	2,99
1296 MHz	11,4	3,48
1500 MHz	12,4	3,78
1800 MHz	13,8	4,21
2000 MHz	14,7	4,48
2400 MHz	16,3	4,97
3000 MHz	18,7	5,70
4000 MHz	22,3	6,80
5000 MHz	25,7	7,84
6000 MHz	28,8	8,78

Figura 2.21. Pérdidas típicas ECOFLEX 15.

Para el sistema en cuestión explicado en esta memoria, nos serán útiles los datos entre 200 y 400 MHz atendiendo a las medidas del espectro radioeléctrico de la terraza del I+D+I que se exponen en el Capítulo 3 con el objetivo de configurar el receptor en una banda con bajo nivel de señales interferentes. Se toma por lo tanto que para este rango de frecuencias las pérdidas típicas del cable son de 5 dB/100m.

La instalación del sistema se ha realizado con una longitud de 13 m de cable desde la salida de la caja de amplificación hasta el Callisto, lo que supone unas pérdidas de aproximadamente 0.65 dB. Además ha sido necesario instalar un 1 m de cable entre la conexión de la antena y la caja de preamplificación para poder realizar el correcto montaje de esta, lo que aporta unas pérdidas de 0.05 dB.

La compra del cable se realizó en la empresa Reset Comunicacions del Grupo RadioStock, cuyo pedido incorporaba la instalación de los conectores tipo N-hembra (Figura 2.22) en el cable de 13 m de longitud. Además se pidieron 10 m de cable sobrante para posibles imprevistos a lo largo de la instalación, cómo podría ser la instalación de una caseta o armario de comunicaciones cómo emplazamiento fijo y estable de los equipos en la azotea, que podría variar el lugar provisional de estos hasta el momento. De este cable sobrante se obtuvo el cable de 1m al cual, con la ayuda del servicio técnico del Grupo de Electrónica, se le instalaron las dos terminaciones tipo N-hembra necesarias. En la figura 2.20 se aprecia perfectamente el cable de 1 m además de las conexiones a la caja, y en la Figura 2.24 se muestra la conexión del cable al Callisto a través del bias-tee, empleando diversos adaptadores, para realizar el acoplamiento y división de las señales de RF y DC cómo ya expliqué en el apartado 2.2.2.



Figura 2.25. Conectores tipo N-hembra.

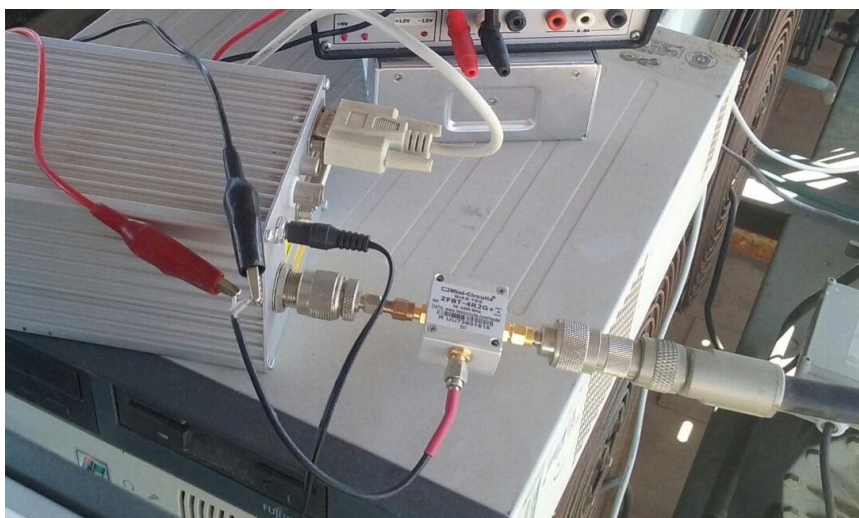


Figura 2.26. Conexión de coaxial a Callisto.

2.2.4 El espectrómetro Callisto

El principal elemento del sistema cómo dije anteriormente en la introducción de la Red e-Callisto, es el espectrómetro Callisto. Aunque ya he comentado algunas características de este, cómo la banda de funcionamiento nativa o la resolución de los datos obtenidos, en este apartado se describe el dispositivo en profundidad, aportando sus principales características así como su principio de funcionamiento, los parámetros configurables

aunque no se entre en detalle y se aportan enlaces al testeo de los equipos y otras posibles configuraciones.

Las especificaciones generales del receptor superheterodino de doble conversión, e-Callisto, aparecen en el capítulo 17 del Manual eCallisto [25] que viene incorporado en la carpeta del software Callisto al descargarlo. No obstante, las principales características son un rango de frecuencias que abarca desde 45 a 870 MHz dividido en tres bandas de radiofrecuencia (171 MHz, 450MHz y 863 MHz), figura de ruido típica máxima de 10 dB, ancho de banda de observación de 300 kHz, resolución en frecuencia de 62.5 kHz, rango dinámico típico comprendido entre -120 dBm y -10 dBm, sensibilidad típica del detector logarítmico de 25.4 mV/dB, SFDR (rango dinámico libre de espurios) mayor de 40 dB, tiempo de integración de 1 milisegundo y 800 muestras/segundo como máxima velocidad de medida.

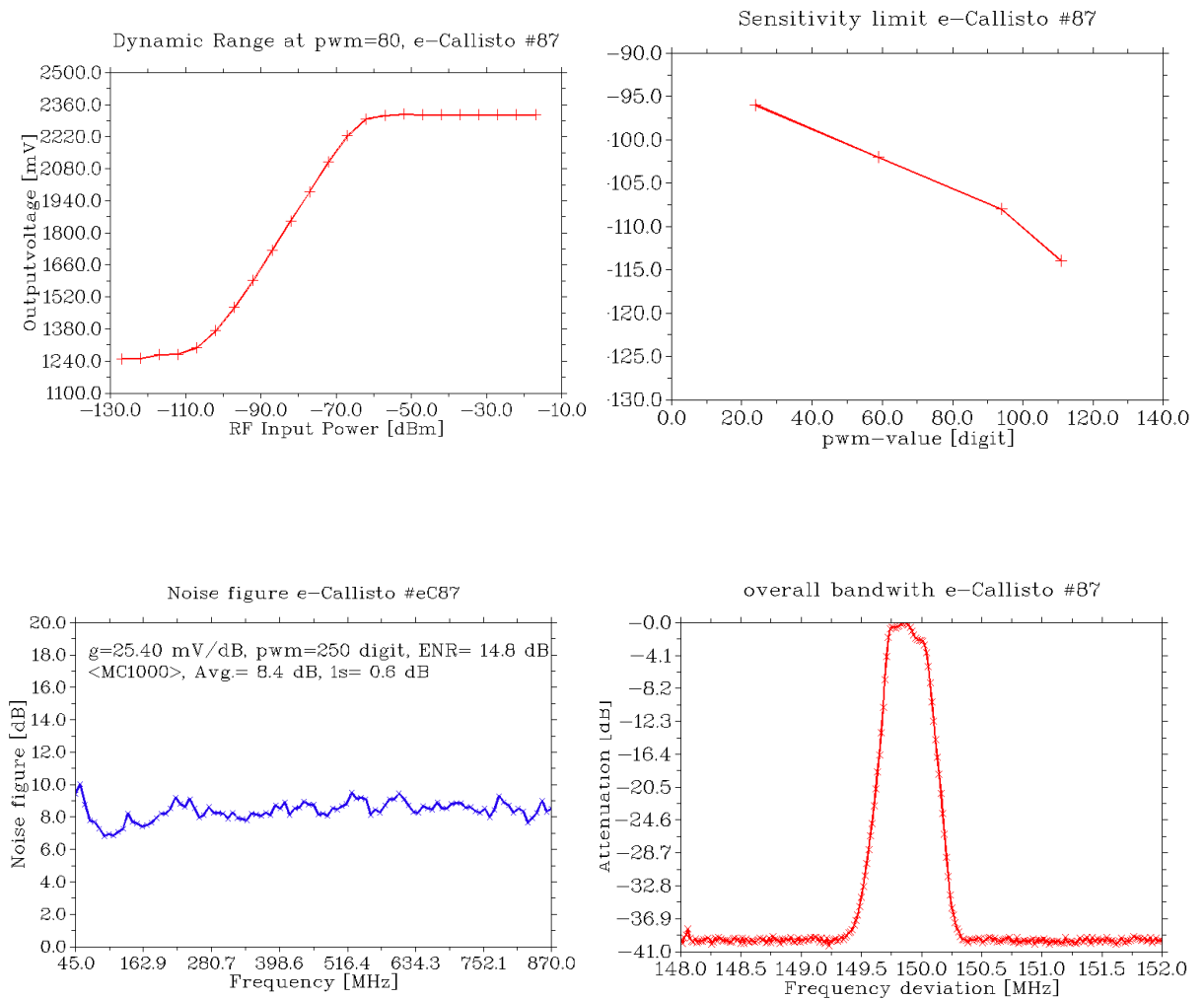


Figura 2.27. Testeo de equipo e-Callisto #87.

Las características indicadas son valores típicos en torno a las cuales deben estar la de todos los espectrómetros Callisto. Para obtener mayor exactitud sería necesario realizar el testeo de nuestro dispositivo aunque no ha sido necesario, ya que los datos obtenidos

en el proceso de testeo por el propio fabricante tras la fabricación del receptor se encuentran disponibles en la sección de *Qualification* de la web de Callisto [26].

Partiendo de las gráficas del testeo del equipo, mostradas en la Figura 2.27 para una mejor comprensión, cabe destacar que el rango dinámico para un PWM (*Pulse Width Modulation*) establecido es de en torno a 50 dBm, comprendido para un PWM = 80 entre -100 dBm y -60 dBm. Cuanto mayor sea el PWM menor será la sensibilidad y menor también será el valor de potencia de señal de radiofrecuencia máximo detectable sin saturación, y a la inversa [27]. El valor que aparece en las especificaciones del manual de Callisto hace referencia al rango dinámico total teniendo en cuenta las diferentes configuraciones de PWM.

Según la explicación del anterior párrafo, a través de la modificación del PWM se puede controlar la ganancia del espectrómetro. Este valor es programable así como el número de muestras que el espectrómetro toma en cada medida, el número de medidas que realiza en un segundo, el modo de medida en cada momento o el espectro de frecuencias a medir. La configuración de estos parámetros se realiza a través de tres archivos de entrada, *callisto.cfg*, *scheduler.cfg* y *frqXXXXXX.cfg* (XXXXXX será sustituido por un número para cada archivo de frecuencias) que son explicados en el siguiente capítulo.

En cuanto al principio de funcionamiento, cómo he indicado al principio del apartado, se trata de un receptor superheterodino con dos conversiones en frecuencia, una llevada a cabo por el sintonizador Philips CD1316LS/IV-3 [28], el cual recibe la señal de radiofrecuencia y la divide en tres bandas de frecuencia mediante filtros paso bajo y tras ello realiza la bajada de frecuencia, un filtrado de ancho de banda 7MHz a dicha frecuencia y aplica un control de ganancia mediante una PWM externa, proporcionando a su salida una frecuencia intermedia 36.13 MHz. La segunda bajada en frecuencia se lleva a cabo por un oscilador local de cristal de cuarzo sintonizado a 25.43 MHz, provocando una última frecuencia intermedia de 10.7 MHz. Por último se aplica un filtrado paso banda de 300 kHz de ancho de banda, otra amplificación a la frecuencia intermedia última, se pasa por un detector logarítmico para ampliar el rango dinámico y por último se realiza la conversión analógico-digital. El diagrama de bloques del equipo se muestra en la Figura 2.28 para ayudar a comprender el funcionamiento general de éste.

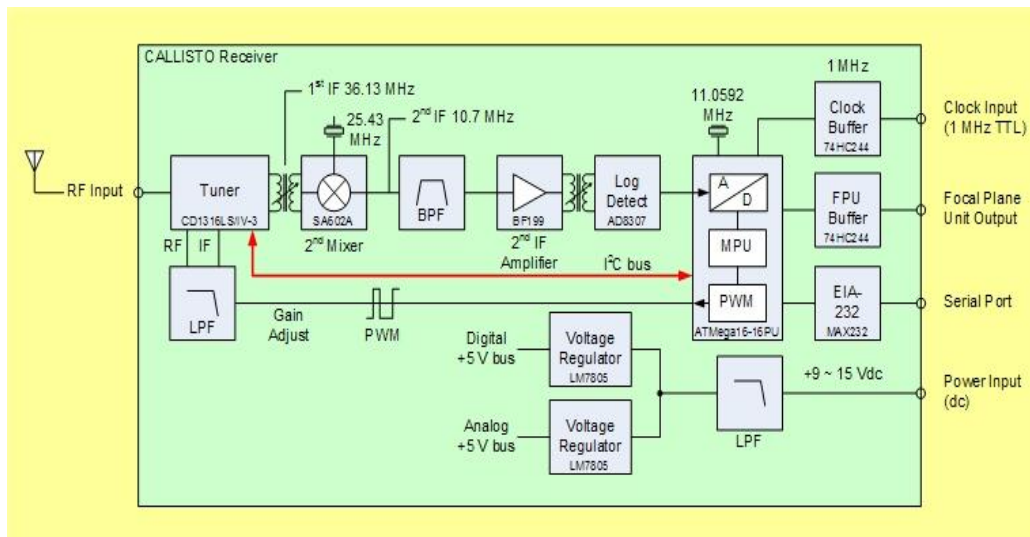


Figura 2.28. Diagrama de bloques del receptor Callisto.

Atendiendo a la Figura 2.28 se pueden observar las salidas y entradas del receptor, entre las que se encuentra un conector para una señal de reloj de entrada TTL de 1 MHz que permitiría obtener hasta 1000 muestras/seg con respecto a las 800 muestras/seg que se consiguen con el reloj interno del receptor de 800 KHz, una conexión de salida para el control de FPU, opcional, un conector puerto serie RS-232 para la transmisión de datos entre el microprocesador del receptor y el PC, el conector para la fuente de alimentación así como un conector N-female para la señal de radiofrecuencia. En la configuración del sistema instalado en este proyecto solo son de interés estos tres últimos conectores, ya que se ha implementado una configuración básica con acondicionamiento de señal mediante la caja de preamplificación basada en LNA cómo expliqué al inicio del Capítulo 2. Una configuración más avanzada se contempla en [29] con un FPU (Focal Plane Unit) con sistema de calibración, preamplificación y control de polaridad.

Por último hay que resaltar que se adquirieron dos equipos eCallisto donados a la UPCT por el PI de la red eCallisto, Christian Andreas Monstein, con propósitos científicos y educativos. En este proyecto, hasta el momento se ha trabajado con uno de ellos, aunque la idea final por la que se adquirieron dos equipos era realizar la configuración de un sistema con polaridad circular para lo que son necesarios los dos, de forma que uno reciba en polaridad lineal vertical y otro en horizontal. No se ha realizado aún, puesto que la principal prioridad es conseguir tener en funcionamiento y adherido a la red eCallisto el sistema básico. En la Figura 2.29 se muestra uno de estos espectrómetros.



Figura 2.29. Espectrómetro eCallisto

2.2.5 Software Callisto

En el anterior apartado he explicado en que consiste básicamente el receptor eCallisto y cuáles son sus características, principalmente las características hardware. En este apartado se aborda todo lo referente al software, desde los archivos de configuración de entrada hasta los archivos generados por el software Callisto así como los datos que proporciona dicho software en tiempo real a través de su interfaz gráfica.

En primer lugar, tras descargar la carpeta que contiene el software Callisto es necesario configurar los tres archivos de entrada que emplea Callisto para realizar las medidas. El archivo principal de configuración es `callisto.cfg` en el cual aparece una lista de parámetros programables que permite personalizar el sistema según nuestro interés. Uno de los parámetros de este archivo es el archivo de frecuencia, `freqXXXXX.cfg`, a partir del cual se configura el espectro de frecuencias de interés de observación y el número de canales de frecuencia y de muestras por segundo que produzca a su salida Callisto. Se comentarán a continuación los principales parámetros del archivo `callisto.cfg` y `freqXXXXX.cfg`. Por último, el software requiere de un archivo para la automatización de las medidas a realizar a lo largo del día, `sheduler.cfg`, cuyas principales características también se explican a continuación, partiendo de los archivos ya configurados para el Radiotelescopio Solar de la UPCT. No obstante, la explicación de configuración e instalación software de eCallisto se explica detalladamente en la Callisto Software Setup Guide [30].

En el archivo `callisto.cfg` además de configurar el archivo por defecto de frecuencias que tome el software Callisto para realizar las medidas al arrancarlo, cabe resaltar el valor del parámetro `[agclevel]`, que cómo ya he dicho en el apartado anterior fija la ganancia del espectrómetro. Otros parámetros que requieren ser modificados son las rutas donde guardar los archivos de datos creados por Callisto, `[datapath]`, `[logpath]`,

[lcpath] y [ovspath]. En ellas se guardan los cuatro tipos de archivos de datos, FITS data, Logfile, LC (lightcurves) y OVS (spectral overviews) respectivamente. También se modifican los parámetros referentes a la localización geográfica del receptor así como el nombre del receptor, etc. Un parámetro importante que también aparece en este archivo es el [mmode], que establece el modo de funcionamiento por defecto que tendrá Callisto, en esta configuración aparece el modo 3, el cual indica que el dispositivo captará datos de forma continua según lo establecido en el archivo de frecuencia. Para mayor información sobre los modos de funcionamiento y la configuración de callisto.cfg visitar el Capítulo 10 y 12.4 respectivamente de Manual eCallisto [25]. En la Figura 2.30 se muestra el archivo con la explicación básica de cada parámetro.

```

/*-----*/
/* (C) Copyright Institute of Astronomy ETHZ 8092 Zuerich Switzerland */
/*-----*/
/* Programname: callisto.cfg */
/* Revision: v1.5      Date: 05.05.2003      Autor: Chr. Monstein */
/* Purpose: Configuration file Radiospectrometer CALLISTO */
/* Editor: Notepad or any other ASCII-Editor */
/*-----*/

// Created by: Chr. Monstein 05.05.2003
// Updated by: Chr. Monstein 20.10.2006 e-Callisto
// Updated by: Chr. Monstein 20.11.2010 new autostart and new path (LC, OVS)
// Updated by: Chr. Monstein 26.06.2013 new priority selection
// Updated by: Chr. Monstein 27.12.2014 insert common parameter, instead of private ones

// Do NOT insert white spaces in the parameter below!

[rxcomport]=COM1           // COM1 ... COM18
[observatory]=12          // CALLISTO=12, fixed
[instrument]=RadiotelescopioUPCT // instrument code -> filename_
[titlecomment]=bandabasica // Title of API
[origin]=Cartagena        // Place of instrument
[longitude]=E,0.979422    // Antena I+D+I geographical longitude in decimal degree
[latitude]=N,37.601864    // Antena I+D+I geographical latitude in decimal degree
[height]=47.0             // default altitude [m] above sealevel
[clocksource]=1          // RISC-level: 0=software, 1=internal, 2=external, default 1
[filetime]=900            // time periode for one single FIT-file (in seconds)
[frqfile]=frq00300.cfg   // default frequency program
[focuscode]=59          // default focuscode 59
[mmode]=3                 // default continuous recording 2=calibrated, 3=raw data
[fitenable]=1            // 0=no FITSfile, 1=FITS write on
[datapath]=c:\Callisto\Data\ // datafile path
[logpath]=c:\Callisto\log\ // logfile path
[lcpath]=c:\Callisto\lc\ // light curve path (LC*.txt)
[ovspath]=c:\Callisto\ovs\ // spectral overview path (OVS*.prn)
[chargepump]=1           // charge pump: 0=false=off, 1=true=on, default 1
[agclevel]=150           // PWM level for tuner AGC 50...255, default 120
[detector_sens]=25.4     // detector sensitivity mV/dB, default 25.4
[db_scale]=6             // dB per division in XY-plot, default 6
[autostart]=1            // autostart: 0=false, 1=true
[priority]=2             // 0=NORMAL_PRIORITY, 1=ABOVE_NORMAL_PRIORITY, 2=HIGH_PRIORITY,
                        // 3=REALTIME_PRIORITY
|

```

Figura 2.30. callisto.cfg con comentarios explicativos.

El proceso de creación del archivo frq00300.cfg, en el que se ha configurado el rango de observación de interés para el emplazamiento del radiotelescopio atendiendo a los niveles de frecuencias interferentes se ha llevado a cabo mediante la herramienta Frequency Genie y es explicado en el Capítulo 3. El archivo se muestra en la Figura 2.31 en la que se puede ver que se ha configurado este para que Callisto realice la medida de 200 canales de frecuencia en cada barrido y 4 barridos por segundo, lo que proporciona una resolución de 800 canales/segundo. En la tercera columna, se pueden establecer el número de muestras promediadas para un cierto canal de frecuencia para la creación del archivo LC (lightcurve), que recoge la información para determinadas frecuencias a lo largo del periodo de medida. Se han elegido 5 canales para producir sus

light curve promediando 40 muestras, lo que supone que el resultado para cada canal de frecuencia es el producido tras el promediado durante 10 segundos para representar cada muestra.

Por último, el archivo `scheduler.cfg`, como ya he indicado anteriormente permite automatizar las medidas realizadas por el receptor a lo largo del día, definiendo el tipo de medida a realizar a partir de un instante determinado. Para ello es necesaria una lista de tareas conformadas por el instante de inicio de la medida, el código *focus* (necesario para configuraciones más avanzadas), el modo de medida y opcionalmente el archivo de frecuencias. Añadir un archivo de frecuencias supone sustituir el archivo de frecuencias puesto por defecto en el archivo `callisto.cfg`, para realizar medidas de otros rangos espectrales que nos puedan interesar en diferentes momentos del día. En la configuración actual todas las medidas son realizadas según el archivo de `freq00300.cfg` pero también se introducen en varios momentos del día tareas con modo de medida 8, lo que significa que Callisto realiza una medida instantánea del espectro completo, con una resolución de 62.5 kHz. Esta medida produce dos tipos de archivos OVS de salida `.prn` y `.csv`, que se suelen emplear para determinar el ruido en el rango de frecuencias de interés y para seleccionar el rango de frecuencias en el que menor nivel de potencia de señales de interferencia haya, empleando la herramienta Frequency Genie. Otro objetivo de realizar este tipo de medida es determinar las variaciones de nivel de señales interferentes a lo largo del día.

Por último, el tiempo de inicio y final es aproximadamente la hora en que sale el sol y en la que se pone, puesto que sería absurdo realizar medidas si no hay observación solar. En la Figura 2.32 muestro la configuración actual del archivo `scheduler.cfg`.

```

/* (C) Copyright Institute of Astronomy ETHZ 8093 Zurich */
/*-----*/
/* Programname: FRQ00300.cfg [minimum of a spectral overview]*/
/*-----*/
/* Revision: v2.2 Date: 30/09/2016 Autor: Javier Díaz */
/*-----*/
/* Purpose: Frequencyprogram for Callisto spectrometer */
/* all entries may be edited manually using Notepad... */
/*-----*/
[target]=CALLISTO

[on_line_testpoint_number]=100 // channel to be used by default in the lightcurve
// window displayed

[number_of_measurements_per_sweep]=200 // number of channel/frequency combinations in a single sweep
[number_of_sweeps_per_second]=4 // number of sweeps per second

[external_lo]=0.000000 // offset frequency in MHz. It is used only when CALLISTO is
// connected to an external up- or down- converter.

/* 1. column: channel counter, use always 4 digits */
/* 2. column: frequency/MHZ */
/* 3. column: number of integrated sweeps in light curve */
/* up to 5 light curves possible */

[0001]=0049.625,0
[0002]=0049.625,0
[0003]=0049.625,0
[0004]=0049.625,0
[0005]=0049.625,0
[0006]=0049.625,0
[0007]=0049.625,0
[0008]=0049.625,0
[0009]=0049.750,0
[0010]=0051.313,0
[0011]=0052.375,0
...
[0022]=0063.125,0
[0023]=0208.563,0
[0024]=0209.938,0
...
[0100]=0285.813,40
...
[0192]=0377.188,0
[0193]=0378.250,0
[0194]=0379.500,0
[0195]=0380.875,40
[0196]=0381.938,0
[0197]=0383.000,0
[0198]=0383.438,0
[0199]=0385.000,0
[0200]=0386.063,0

```

Figura 2.31. Archivo de frecuencias freq00300.cfg

```

/*-----*/
/* (C) Copyright Institute of Astronomy ETHZ 8092 Zuerich Switzerland */
/*-----*/
/* File: SCHEDULER.CFG Revision: 04, 26.11.2004 Chr. Monstein */
/*-----*/
/* Time-scheduler describes what has when to be done on CALLISTO */
/*-----*/

/* Created by: Chr. Monstein 29.10.2002 initial experiments
/* Updated by: Chr. Monstein 07.11.2002 reviewd version
/* Updated by: Chr. Monstein 03.02.2002 reviewd version
/* Updated by: Chr. Monstein 19.09.2003 some minor text changes & focuscode added
/* Updated by: Chr. Monstein 26.11.2004 integration deleted
/* Updated by: Chr. Monstein 30.12.2009 allow load frequency file

/* Each schedule-entry is composed of:
/* - Starttime hh:mm:ss (UT) + delimiter
/* - focuscodes decimal (63..01) to be applied + delimiter
/* - Planned measurement-mode (0, 2, 3 or 8)
/* - optional a new local frequency-program to be loaded
/* - additional comment
/* each entry will be repeated automatically every day
/* empty lines are allowed to separate diffent tasks

06:00:00,59,8 // spectral overview for radio monitoring
06:30:00,59,3 // start with default frequency program
10:00:00,59,3 // re-start just for security reasons
13:55:00,59,8 // spectral overview for radio monitoring
16:00:00,59,3 // re-start just for security reasons
19:00:00,59,3 // re-start just for security reasons
21:00:00,59,8 // spectral overview for radio monitoring
21:05:00,59,0 // stop

```

Figura 2.32. Archivo scheduler.cfg.

Además de los archivos OVS y LC de salida, Callisto produce el principal archivo FIT de datos cada 15 minutos de medición, si la medida se realiza de forma continua. Este archivo es el que permite representar el espectrograma medido, que se muestra en el Capítulo 3 en el que se abordan las representaciones de las medidas. También genera el archivo de salida *logfile* que consiste en un histórico de todas las señales de comunicación entre el host y el receptor Callisto durante el periodo en que el software Callisto esté en funcionamiento. La comunicación entre el Pc y el receptor Callisto se realiza mediante la interfaz EIA-232, mediante la cual los parámetros de configuración son transmitidos al microprocesador del receptor desde el Pc.

Para finalizar el apartado software, ya que han quedado explicados los archivos de entrada y configuración, y que archivos produce el software, es de interés mostrar el funcionamiento básico del software en tiempo real y comentar que datos nos puede aportar y la forma correcta de realizar las medidas. Una vez más, toda la información referente a este tema está recogida en la Guía de Instalación Software Callisto [30], por lo que solo explicaré los aspectos más relevantes.

La interfaz gráfica nos permite realizar medidas de forma manual y de forma automática, por defecto en nuestro caso al ejecutar Callisto comienza a medir de forma automática ya que el parámetro [autostart] del *callisto.cfg* tiene valor 1. En el modo de trabajo automático la interfaz de Callisto muestra cuando realizará la próxima tarea o instrucción, definida en el archivo *scheduler.cfg*, y las medidas realizadas a lo largo del día serán aquellas definidas en ese archivo. En cambio, si seleccionamos el modo manual, se habilitan las opciones de elegir el archivo de frecuencia deseado, además de la opción de realizar una medida del espectro completo, un OVS. En la Figura 2.33 se muestra el aspecto típico de Callisto trabajando de forma automática, observando en la imagen de la izquierda la comunicación inicial entre el Pc y el receptor para configurar el receptor según los archivos de entrada. En la imagen de la derecha se muestra el software realizando las medidas.

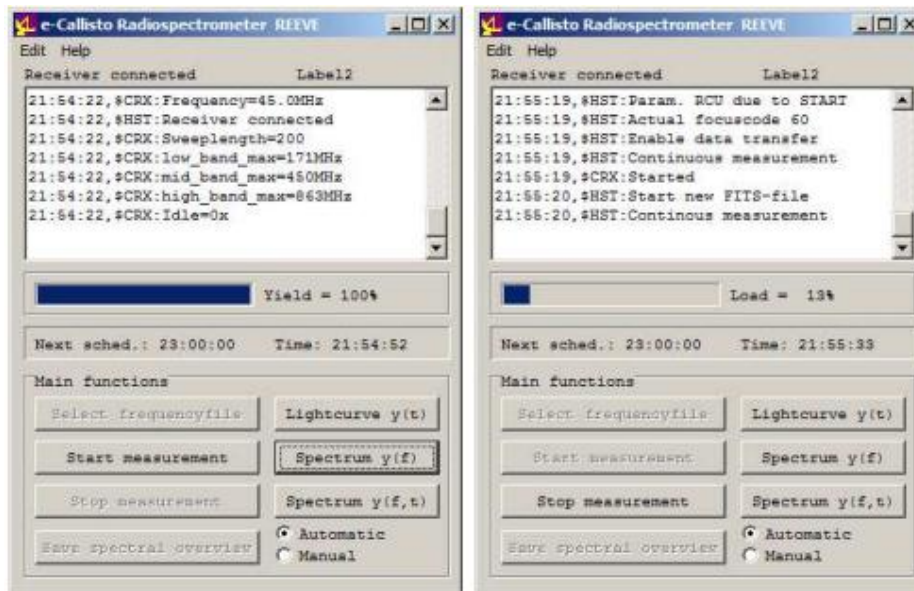


Figure 2.33. Interfaz gráfica de software Callisto

Las opciones de medida en tiempo real que ofrece son Lightcurve $[y(t)]$, que representa la salida instantánea del canal seleccionado, el aspecto típico se observa en la Figura 2.34, Spectrum $[y(f)]$ el cual muestra la amplitud con respecto a la frecuencia para un barrido completo del espectro como se observa en la Figura 2.35, y por último, Spectrum $[y(f,t)]$ cuya representación es un espectrógrafo en el que se muestra la amplitud frente a la frecuencia y el tiempo, su aspecto típico se muestra en la Figura 2.36. Estas opciones aparecen en la parte inferior derecha de la interfaz gráfica como se ve en la Figura 2.33.

Un aspecto a tener en cuenta en el Spectrum $[y(f)]$, es que la representación está en términos de la salida digital del convertor analógico-digital del receptor, por lo que tendrá un valor máximo de 256 ya que el convertor es de 8 bits. Debido a que se emplea un detector logarítmico en el receptor, el valor es proporcional al logaritmo de la potencia de la señal a frecuencia intermedia (10.7 MHz). Además de esta opción, el espectro con respecto a la frecuencia se puede representar en dB respecto al ruido de fondo. Para ello hay que realizar una pseudocalibración que consiste en realizar una medida de 5 segundos con una carga adaptada de 50 Ω en la opción Digits, pasar a la opción dB con lo que se realiza la substracción del nivel de ruido y por último conectar de nuevo la antena. La imagen de la derecha de la Figura 2.35 muestra una medida en dB sobre el nivel de ruido de fondo, que aporta una información más realista sobre la potencia de señal detectada que la imagen de la izquierda.

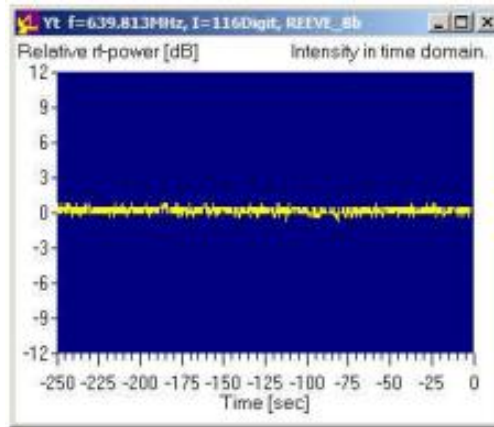


Figura 1.34. Lightcurve $y(t)$

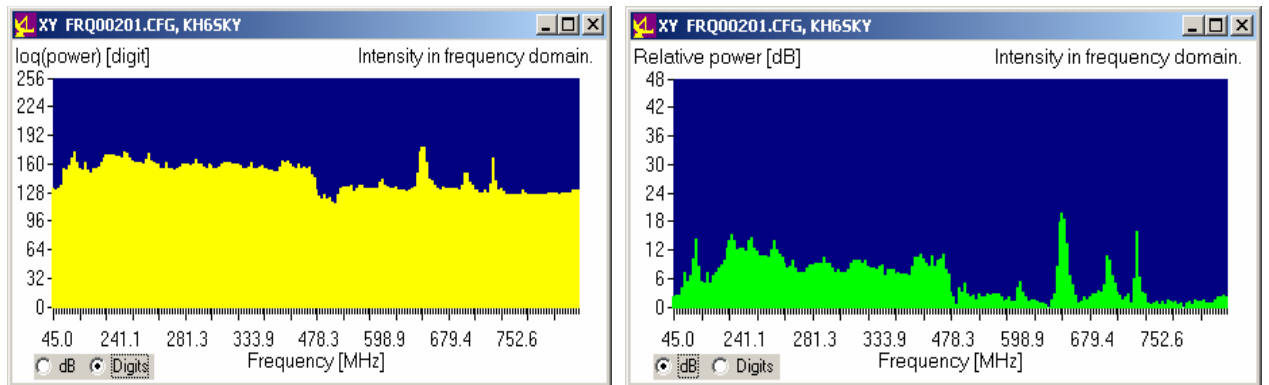


Figura 2.35. Spectrum $y(f)$.

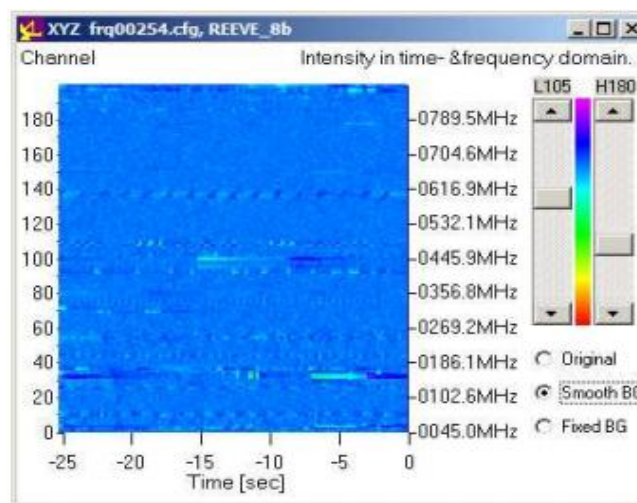


Figura 3.36. Spectrum $y(f)$ opción dB tras pseudocalibración

Para concluir este apartado quiero destacar que la medición en tiempo real es una herramienta que ayuda en la instalación y configuración del sistema, pero que no es útil en el objeto final del proyecto, que no olvidemos es el montaje del radiotelescopio para

detectar tormentas solares y poder medir su intensidad., ya que no podemos estar físicamente observando los datos captados todo el tiempo. Lo realmente útil por lo tanto son los archivos FITs de duración 15 minutos, y las curvas de canales específicos que se pueden representar a partir de los archivos de salida LC. A partir de los archivos FITs, mediante el empleo de una herramienta software proporcionada en el repositorio software de la red eCallisto, se representarán espectrogramas que permitirán, según lo explicado en el Capítulo 1, conocer qué tipo de radioemisión se ha producido en caso de que se detecte alguna. En el Capítulo 3 se muestran espectrogramas típicos realizados a partir de archivos FITs elaborados por el Radiotelescopio de la UPCT.

2.3 Sistema de tracking solar

Llegado a este punto queda explicar en qué consiste el sistema de apuntamiento o de seguimiento solar y que elementos forman parte de él. En cuanto a esto último puedo decir que hay tres elementos que constituyen y hacen posible el apuntamiento al sol a lo largo del día. El primero de ellos es el sistema de motores, el segundo es el controlador de éstos y el último es el software gratuito Orbitron.

Cómo expliqué al principio de este capítulo, en la presentación general del radiotelescopio en cuestión, los motores ya estaban instalados para dotar a la parabólica de movimiento, lo que ha facilitado el trabajo. Solo ha sido necesaria la correcta conexión del controlador con los motores, la configuración del controlador y la configuración de Orbitron, además del perfecto conocimiento de las características de cada uno de estos elementos y de su funcionamiento. Abordamos por lo tanto en los siguientes apartados las características, configuración y posibilidades que cada elemento aporta al sistema con el objetivo de esclarecer el principio de funcionamiento de la rama de *tracking*.

2.3.1 Sistema de motores BIG-RAS AZ&EL

El sistema de motores instalado sobre el mástil de hormigón de la antena parabólica es el BIG-RAS AZ & EL, que fue adquirido por la UPCT en el año 2009 a la empresa RF HAMDESIGN, mostrado en la Figura 2.37. Se trata de un motor paso-paso, es decir un tipo de motor que responde con cortos y precisos movimientos a impulsos eléctricos. La resolución de estos pasos para el motor en cuestión es de 0.5 grados tanto en elevación como en azimut.

La resolución angular es importante para un buen apuntamiento, aunque para el objetivo perseguido no es necesario tener una gran precisión, ya que únicamente tratamos de recibir el mayor nivel de potencia de señal de radiofrecuencia proveniente del sol y no realizar el mapeado de la superficie solar para lo cual la resolución angular de la antena tendría que ser muy grande. En este sistema el ancho de haz de la antena es de 120 grados para el plano H y de 60 grados para el E, por lo que la resolución es muy pobre.

Este hecho permite que el apuntamiento no tenga que ser demasiado fino para que sea válido, aunque cuanto más preciso sea el apuntamiento más ganancia obtiene el radiotelescopio.



Figura 2.37. Motor BIG-RAS EL&AZ

Otra característica que podría comprometer el buen apuntamiento es la velocidad de movimiento, aunque no es el caso ya que el motor presenta una velocidad de giro de 4 grados/segundo que en ningún caso es mayor que la velocidad de movimiento del Sol respecto a la Tierra. Este parámetro puede ser un valor crítico en la elección de este tipo de motores en el tracking de satélites.

Aclarados estos dos parámetros, la principal característica que debe cumplir el sistema de motores es tener un rango de movimiento suficientemente amplio para poder apuntar al sol a cualquier hora del día. Para esto es suficiente con un rango de 360 grados en azimut (AZ) y 90 grados en elevación (EL). Con el fin de comprender mejor el apuntamiento a un cuerpo celeste desde la Tierra, explico a continuación en que consiste el *sistema de coordenadas altazimutal* empleado en astronomía.

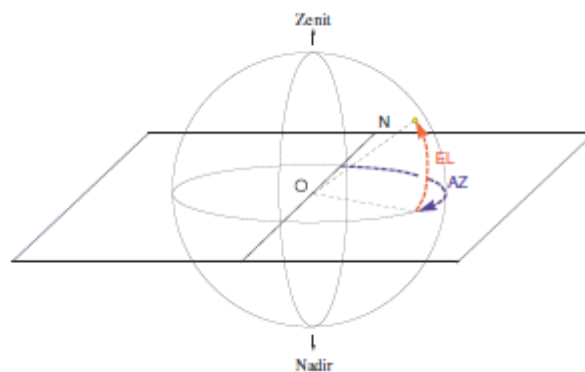


Figura 2.38. Sistema de coordenadas *altazimutal*.

Dicho sistema describe la posición de un objeto a partir de las coordenadas de altura o elevación (EL) y de acimut (AZ). La coordenada acimut es el ángulo medido desde el

punto cardinal Norte hasta el objeto en dirección Este para el hemisferio Norte y dirección Oeste para el hemisferio Sur. La coordenada de elevación (EL) se mide con respecto al horizonte visible local, por lo que es el ángulo entre el objeto observado y el plano del horizonte local. Para posiciones del objeto por debajo del horizonte visible local se tienen elevaciones negativas. La Figura 2.38 aclara aún más la explicación.

Una vez explicado es trivial entender que con un rango de movimiento de 90 grados en elevación y 360 en acimut se puede apuntar a toda la bóveda terrestre. Aun así los motores instalados poseen un rango de movimiento de $180^{\circ} \pm 20^{\circ}$ en elevación y de $360^{\circ} \pm 180^{\circ}$ en acimut, por lo que cumplen con los requerimientos básicos. Otro posible parámetro que podría comprometer el funcionamiento del sistema es el peso que los motores son capaces de mover, que según el fabricante es de 390 Kg, por lo que una vez más el sistema de motores cumple sobradamente con los requisitos, ya que la entre la parabólica (39 Kg) y la LDPA (5 Kg) no se superan los 45 Kg.

2.3.2 Controlador RAS ROT2PROG

Para manejar el movimiento de los motores es necesario un controlador que se encargue de generar los impulsos de DC requeridos por el usuario o por el programa de tracking para posicionar la antena apuntando hacia el lugar deseado.

El controlador empleado es el RAS ROT2PROG que fue adquirido para este objetivo en la misma empresa en la que se realizó la compra de la antena parabólica de 3 metros de diámetro y el sistema de motores. Sus distintos modos de funcionamiento, manual, híbrido y automático, además de su posible conexión por puerto serie RS-232 al Pc, permite realizar el apuntamiento y seguimiento del sol.



Figura 2.38. Controlador RAS ROT2PROG.

Antes de explicar el proceso llevado a cabo para conseguir un seguimiento autónomo del sol, quiero indicar los parámetros configurados en el controlador. Dicho controlador está diseñado para poder sacar el máximo partido al motor BIG-RAS AZ&EL por lo que permite una resolución angular máxima de 0.5 grados y permite configurar el rango dinámico tanto en azimut como en elevación para abordar el máximo movimiento que es capaz de realizar el motor.

La resolución ha sido configurada al máximo permitido, 0.5 grados como ya he comentado, para ello hay que acceder al menú configuración a través del botón S del panel frontal del controlador y en la opción P del menú fijar el valor 0.5 para elevación y para acimut. En cuanto al rango de movimiento, en las opciones PH y PL se han configurado los valores máximos y mínimos permitidos, de forma que el controlador no limite el máximo ángulo de movimiento posible de los motores.

Una vez configurado el equipo se conecta a cada motor (uno para movimiento acimutal y otro para elevación) mediante cuatro cables, y se procede a realizar el apuntamiento. Para ello se puede proceder de dos formas distintas que detallo a continuación.

La primera de ellas consiste en:

1. Apuntar de forma manual la antena hacia el Norte y en cuanto a elevación debe apuntar al horizonte. Para ello es necesario una brújula y un giroscopio. Se puede utilizar una app de un Smartphone para realizar este proceso.
2. Con la antena en dicha posición resetear el controlador. Para ello solo es necesario encenderlo con el botón F pulsado. Haciendo esto el controlador tendrá la posición 0 en azimut y en elevación cuando la antena apunta al Norte y hacia el horizonte.
3. Mediante el software de tracking Orbitron, que explico en el próximo apartado, se envían las instrucciones de seguimiento al motor a través del controlador. El software emplea el sistema de coordenadas *altazimutal* ya explicado, por lo que es necesario realizar el punto 1 y 2.
4. Tras esto, el apuntamiento debe ser más o menos bueno, pero si existe visión directa del Sol, es decir, hay buenas condiciones atmosféricas, se puede afinar más el apuntamiento. Para ello hacemos uso de la opción PP dentro del menú configuración del controlador, que permite variar los valores de acimut y elevación en el controlador sin mandar pulsos a la antena, es decir sin que esta se mueva. La forma de proceder es realizar el ajuste del apuntamiento de forma manual y por inspección visual, y tras esto fijar en el controlador las coordenadas AZ y EL que marca el driver de Orbitron cómo la posición real del Sol, utilizando la función PP. En la Figura 2.39 aparece la interface del driver SpidAlfa en el que en el apartado Data aparecen las coordenadas del Sol según Orbitron. Se explica en detalle en el siguiente apartado de la memoria.

La segunda forma de proceder para realizar el apuntamiento parte de la idea de la primera. Procediendo de la forma anterior, si la posición geográfica que se configura en Orbitron cómo la posición del emplazamiento de la antena y si el apuntamiento al Norte y al horizonte realizado antes del reseteo fueran exactas, no habría que realizar el paso 4 puesto que el apuntamiento sería correcto, pero siempre hay pequeños errores que provocan desalineación. Partiendo de esto, podemos realizar el apuntamiento realizando solamente el punto 4 sin antes realizar el apuntamiento y el reseteo. Es decir la segunda forma de hacerlo es:

1. Realizar el apuntamiento al Sol de forma manual.
2. Modificar los valores de coordenadas del controlador haciendo uso de la opción PP, fijando estos según marque el driver SpidAlfa, al igual que el punto 4 anterior.

Para realizar directamente el apuntamiento cómo indico en la segunda opción debe haber visión directa del Sol. Si no la hubiera la forma de realizar el apuntamiento sería según la primera opción y sin realizar el punto 4 de esta. No se consigue un apuntamiento tan fino pero si suficiente teniendo en cuenta el gran ancho del haz principal del diagrama de radiación de la antena LDPA.

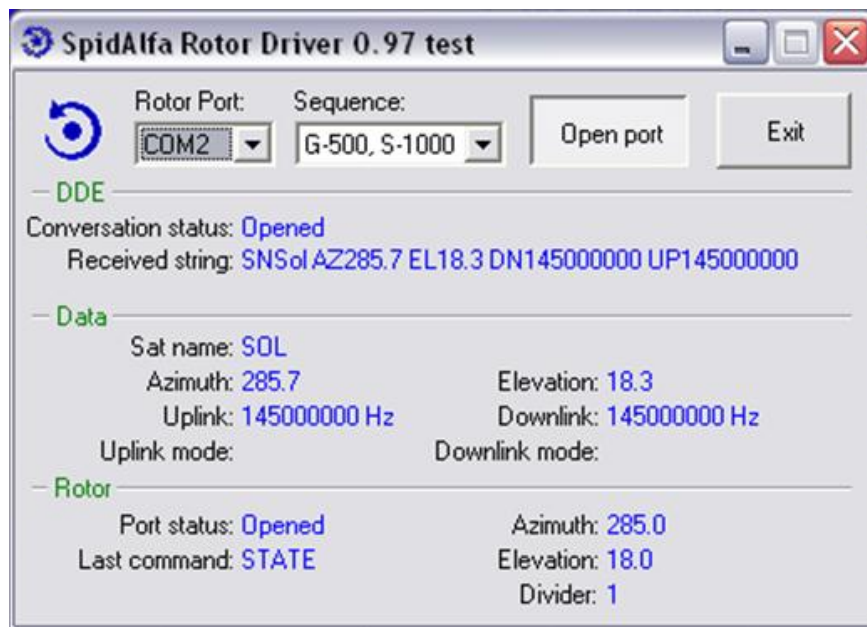


Figura 2.39. Driver SpidAlfa.

Leyendo la explicación al lector le puede parecer que el proceso es muy engorroso, pero cabe destacar que este proceso sólo debe realizarse una vez, puesto que a partir de aquí el software Orbitron se encarga de realizar el seguimiento. Aun así el apuntamiento de la antena debe ser reajustado periódicamente ya que a lo largo de los días pequeñas variaciones pueden provocar grandes desajustes.

Por último, tras realizar el apuntamiento el controlador debe ponerse en modo automático pulsando el botón F del panel frontal y seleccionando el modo indicado con una A en la pantalla. A partir de aquí ejecutar el driver SpidAlfa desde Orbitrón para que este sea el encargado de enviar las instrucciones de coordenadas al controlador, a través del puerto serie. Para que la comunicación entre el Pc y el controlador sea efectiva, hay que configurar el protocolo de comunicación en la opción PS. Hay que seleccionar el valor SP, que se corresponde con el protocolo de comunicación (GS232 protocol, 600 baud N, 1, 8 bits) que emplea el driver SpidAlfa.

Para finalizar la explicación del sistema de tracking del radiotelescopio, es necesario explicar la configuración del software de seguimiento Orbitrón y la forma de proceder

para enviar las instrucciones hacia el controlador. Se explica en el siguiente capítulo, aunque aquí ya se ha introducido el driver que permite la comunicación.

2.3.3 Software Orbitron y driver SpidAlfa

Orbitron es un software de tracking de satélites gratuito. Es capaz de predecir la órbita de gran cantidad de satélites con el objetivo de realizar su seguimiento mediante un sistema de antenas con motores, cómo el Radiotelescopio Solar UPCT, o simplemente nos permite conocer las características de las órbitas de estos o cuando son visibles desde un emplazamiento concreto. En el sistema de seguimiento solar del radiotelescopio presentado a lo largo de esta memoria, Orbitón tiene un papel muy importante, ya que es el encargado de enviar al controlador las coordenadas a las que se encuentra el Sol en cada momento.

Su funcionamiento es muy sencillo, únicamente hay que configurar la posición del emplazamiento de la antena, descargar además el driver del que he hablado en el apartado anterior, SpidAlfa 0.97, disponible en la página web de Orbitrón [31] y guardarlo en la carpeta de Orbitron.

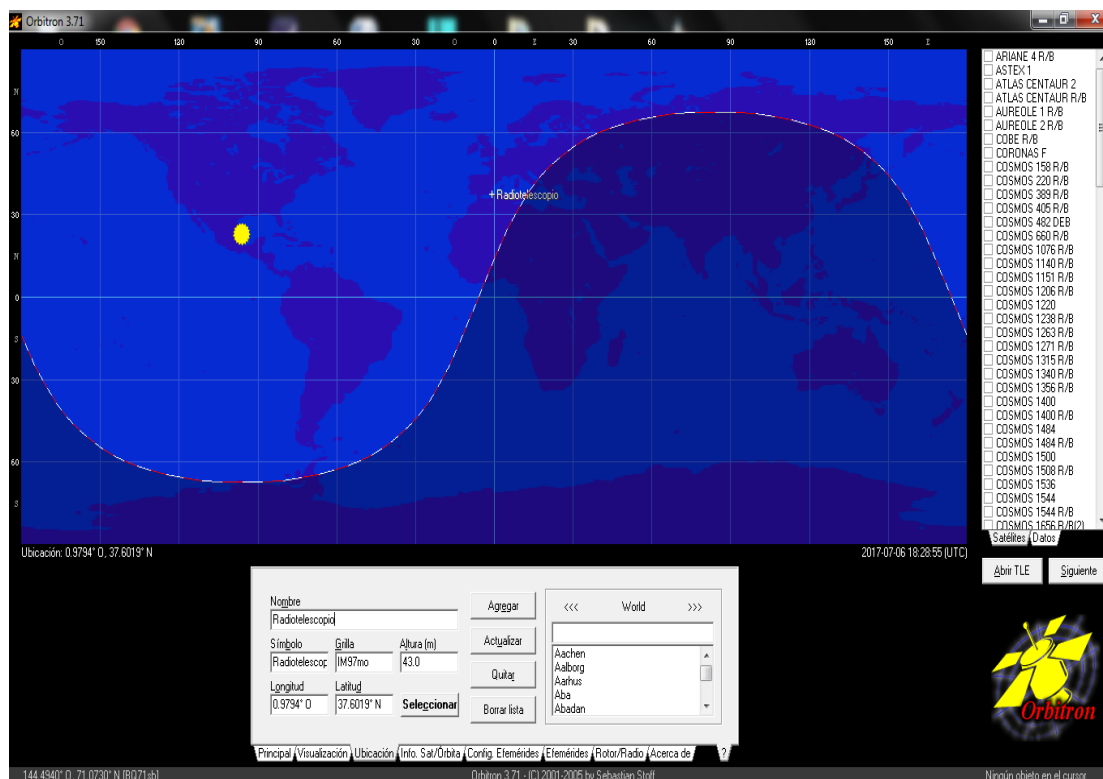


Figura 2.40. Software de seguimiento Orbitron.

Las coordenadas se introducen en la pestaña Ubicación del menú inferior de Orbitron, junto a la altura en la que se encuentra la antena sobre el nivel del mar. En la Figura 2.40 se muestra el aspecto típico de la interfaz gráfica de Orbitron y la pestaña Ubicación.

Para realizar el tracking del Sol se accede a la pestaña Rotor/Radio en la cual hay que seleccionar el driver SpidAlfa y el objeto Sol. A partir de este momento Orbitron enviará las coordenadas de la localización del Sol al controlador a través del driver. En la ventana del driver, Figura 2.39, aparece el estado de la comunicación y la información que el driver transmite al controlador. Además muestra en la sección Data los datos que le proporciona Orbitron y en la sección Rotor las coordenadas actuales del controlador. Si las coordenadas enviadas por Orbitron y las del Rotor no coinciden, estas últimas aparecerán en rojo informando de que existe algún tipo de error y no se está realizando el seguimiento de forma adecuada.

2.4 Justificación teórica del sistema

En este capítulo realizo los cálculos teóricos necesarios para conocer, según la configuración del radiotelescopio, el nivel de densidad de flujo de *radio burst* a partir del cual serán estos detectables por nuestro sistema. Además se hará una breve comparación para determinar cómo de determinante es el hecho de montar la etapa de amplificación.

Para una mayor comprensión de los cálculos se realiza al principio una explicación de en qué consisten las magnitudes con las que se trabaja en los cálculos y se abordan estos en varios apartados. Primero es necesario conocer el área efectiva de la antena empleada, por otra parte se requiere conocer la temperatura de ruido del sistema y calcular la sensibilidad del sistema como la densidad de flujo mínima detectable. Finalmente realizo los cálculos necesarios para conocer qué valor de ganancia debería tener la antena para ser capaz de detectar la densidad de flujo del sol en reposo, y explico posibles variantes para alcanzar esos niveles de ganancia

Cabe destacar que se asume que para la validez de los cálculos que se realizan el rango espectral de funcionamiento del sistema está libre de frecuencias interferentes.

2.4.1 Parámetros de radiación

En el Capítulo 1 he hablado en distintas ocasiones de la intensidad de radiación para caracterizar la cantidad de energía emitida por un cuerpo celeste, pero debe quedar claro que información aporta esta magnitud. Por definición, es la cantidad de potencia que atraviesa un área unidad, transportada por la radiación que se propaga dentro de un ángulo solido unidad, en una unidad de intervalo de frecuencia. Para las frecuencias de interés, la intensidad de radiación queda definida por la función de Rayleigh-Jeans como indique en el capítulo de introducción.

$$I_\nu = \frac{2\nu^2 k}{c^2} T_B \left(\frac{W}{m^2 Hz sr} \right) \quad (2.1)$$

La intensidad de radiación también suele aparecer en radioastronomía como temperatura de brillo, que también se definió en su momento en la introducción. De esta forma la intensidad de radiación puede tener unidades equivalentes de Kelvin. La interpretación del valor de la temperatura de brillo consiste en que un cuerpo negro a dicha temperatura emite la misma intensidad que el objeto en estudio. En general la temperatura de brillo no coincidirá con la temperatura real del objeto, ya que este no tiene por qué ser un cuerpo negro. Se tiende a utilizar este tipo de medida por su simplicidad.

En cuanto a la densidad de flujo indica la cantidad de energía que atraviesa el área unidad por intervalo de frecuencia. Esta magnitud puede verse, a rasgos generales, cómo la cantidad de potencia total que recibe el receptor, es decir cómo la cantidad de potencia emitida por la fuente que es captada por el área efectiva de la antena. Se obtiene como la integral de la intensidad a lo largo del ángulo sólido subtendido por la fuente.

$$S_v = \int I_v d\Omega \quad \left(\frac{W}{m^2 Hz} \right) \quad (2.2)$$

Las unidades en el sistema internacional son las que aparecen junto a la ecuación 2.2, sin embargo como ya dije en el Capítulo 1 en el apartado de historia de la astronomía, en esta rama suele utilizarse el Jansky y más en concreto, en el estudio solar, se emplea la Solar Flux Unit (SFU). La equivalencia entre ellas es la que aparece en la ecuación 2.3.

$$1 SFU = 10^{-22} \frac{W}{m^2 Hz} = 10^4 Jy \quad (2.3)$$

Por último, para fuentes no resueltas, esto es cuando el tamaño angular de la fuente, dado por su ángulo sólido Ω_S , es mucho menor que el haz principal del radiotelescopio, $\Omega_S \ll \Omega_M$, la densidad de flujo de la fuente es el producto de la intensidad de pico, que no es más que la máxima intensidad observada, por el ángulo sólido del haz completo:

$$S_v = I_v \Omega_A \quad (2.4)$$

Para nuestro sistema se cumplen las últimas condiciones por lo que se puede suponer el Sol cómo una fuente puntual desde el punto de vista del haz de la antena. Partiendo de esto, ecuación 2.4, y de la ecuación que define el ángulo sólido del haz de la antena, ecuación 2.5, se llega a la ecuación 2.6 que relaciona la densidad de flujo con la temperatura de la antena.

$$\Omega_A = \frac{\lambda^2}{A_{eff}} \quad (2.5)$$

$$S_v = \frac{2kT_A}{A_{eff}} \quad (2.6)$$

La temperatura de la antena, T_A es la convolución de la temperatura de brillo de la fuente, T_B , con la respuesta espacial del telescopio, es decir, con el ángulo sólido del diagrama principal de la antena. Según la ley de Nyquist la temperatura de la antena es la temperatura que una resistencia ha de tener para proporcionar en sus bornes la potencia espectral térmica w_v , definida por la ecuación 2.7, donde $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K (constante de Boltzman).

$$w_v = kT_A(\text{W/Hz}) \quad (2.7)$$

En los dos siguientes apartados se hace uso de los parámetros de radiación explicados en este apartado para realizar los cálculos teóricos de la temperatura de ruido equivalente del sistema, a partir de la cual se obtiene la sensibilidad del radiotelescopio cómo la densidad de flujo mínima que es capaz de recibir.

2.4.2 Temperatura de Ruido del Sistema de Recepción

La temperatura de ruido del sistema, T_{Sys} está formada por la suma de la temperatura de ruido de la antena T_a , compuesto por todas las componentes de ruido captadas por la antena, y por la temperatura de ruido equivalente del sistema de recepción T_{Rx} , formada por las contribuciones de ruido de los dispositivos de recepción.

$$T_{\text{Sys}} = T_a + T_{\text{Rx}} \quad (2.7)$$

La temperatura de ruido de la antena engloba fuentes de ruido galáctico, ruido atmosférico y ruido artificial producido por sistemas electrónicos. La temperatura de ruido de la antena se puede obtener de una gráfica proporcionada por la ITU, en la recomendación UIT-R P.372-7 [32] para Ruido Radioeléctrico. Esta gráfica se muestra en la Figura 2.41, de la cual he asumido una $T_a = 300$ K, para 300 MHz. En la gráfica se observa cómo el nivel mínimo de temperatura de ruido es menor que 300 K, pero existen fuentes de ruido que pueden aumentar considerablemente ese nivel mínimo. Por ello es razonable escoger un valor considerablemente superior al mínimo para realizar los cálculos de ruido. Por último, cómo he mencionado en varias ocasiones y muestro en el Capítulo 3, el radiotelescopio está configurado para trabajar en el rango espectral 208-386 MHz, motivo por el cual los cálculos se han realizado para la frecuencia de 300 MHz.

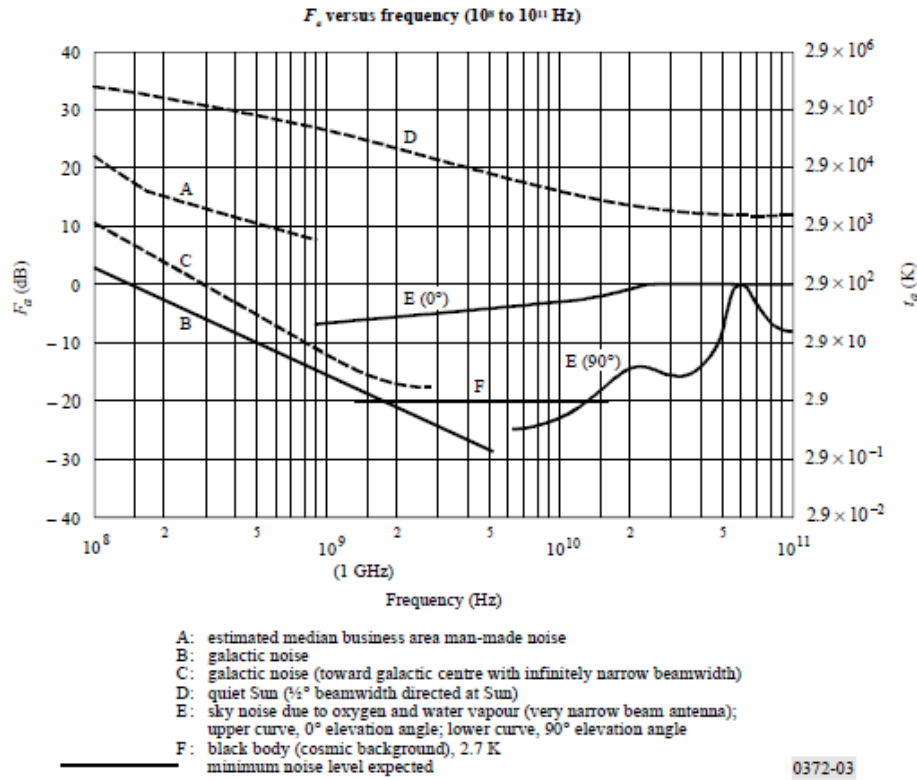


Figura 2.41. Caracterización de la temperatura de ruido de antena.

Para el cálculo de T_{RX} se ha calculado el factor de ruido total de la cadena de dispositivos que forman el sistema de recepción mediante la *fórmula de Friss* para el factor de ruido, ecuación 2.8. Partiendo de este se ha obtenido T_{RX} mediante la ecuación 2.9 que relaciona la figura de ruido con la temperatura equivalente de ruido. La representación de los dispositivos y líneas de transmisión considerados para el cálculo está representado en el esquema de la Figura 2.43.

$$F_T = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \frac{F_5 - 1}{G_1 G_2 G_3 G_4} \quad (2.8)$$

$$T_e = T_o(F_T - 1) \quad (2.9)$$

Con el fin de aportar una mayor claridad a los cálculos, a continuación se recogen en una tabla los factores de ruido de los componentes del sistema así como sus ganancias:

	F (dB)	G (dB)
Cable 1	0.05	- 0.05
LPF	0.2	- 0.2
LNA	0.9	19.5
Cable 2	0.65	- 0.65
Callisto	9	--

Figura 2.42. Tabla de factores de ruido y ganancias.

El factor de ruido total obtenido es $F_T = 1.46$ dB y la temperatura de ruido equivalente del sistema de recepción asociada a dicho factor de ruido es $T_e = T_{Rx} = 116$ K, tomando como temperatura de referencia $T_o = 290$ K. Para finalizar los cálculos de este apartado, se sustituyen los valores de T_{Rx} y T_a en la ecuación 2.7 obteniendo que la temperatura total de ruido del radiotelescopio es $T_{Sys} = 416$ K.

Tras los resultados obtenidos y atendiendo a la ecuación 2.8, queda clara la importancia de la localización del LNA lo más próximo a la antena posible con el fin de reducir la figura de ruido total del sistema. Vemos cómo los elementos situados tras el LNA no influyen prácticamente en el factor de ruido total, debido a que todos los términos van divididos por la ganancia del amplificador.

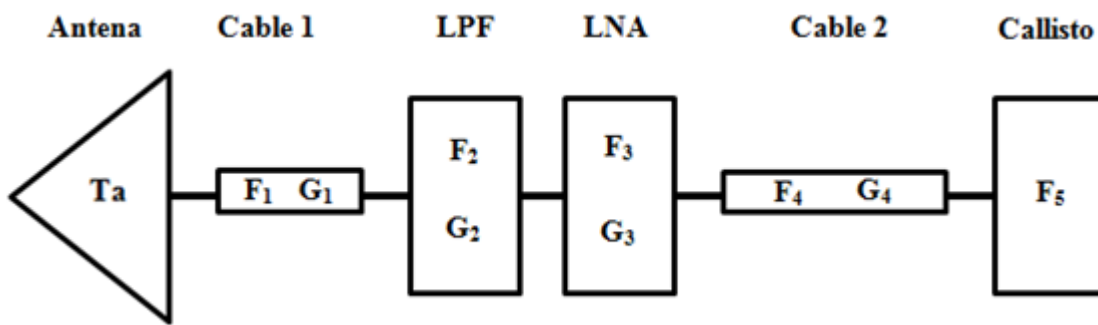


Figura 2.42. Esquema de bloques para cálculo de la figura de ruido total, F_T .

Para concluir nuestro caso sería el resultado de F_T y T_{Sys} si en el montaje y configuración del sistema se hubiera optado por no introducir la etapa de preamplificación. Los cálculos y resultados aparecen a continuación:

$$F_T = F_4 + \frac{F_5 - 1}{G_4} = 1.161 + \frac{7.943 - 1}{0.861} = 9.22 = 9.65 \text{ dB}$$

$$T_{Rx} = T_e = T_o(F_T - 1) = 290(9.22 - 1) = 2383.8 \text{ K}$$

Como podemos ver la instalación de la etapa preamplificadora mejora notablemente el factor de ruido del sistema y por lo tanto también la temperatura de ruido de este. En el siguiente apartado se calcula la sensibilidad del receptor tomando como punto de partida para ello el nivel del ruido que presenta el sistema. Además se mostrará cual es la diferencia de sensibilidad del sistema entre la configuración con la incorporación de LNA y la configuración básica sin dispositivos de acondicionamiento de señal.

2.4.3 Sensibilidad del Radiotelescopio

El objetivo de este apartado es demostrar que teóricamente la configuración e integración de equipos llevada a cabo para la puesta en marcha del Radiotelescopio Solar UPCT, debe ser capaz de recibir *radio burst* y a partir de qué nivel de densidad de

flujo podrá el espectrómetro Callisto aportar información con calidad suficiente para distinguir de qué tipo de radiación se trata.

La ecuación 2.7 permite a partir de la temperatura de ruido del sistema obtener la densidad espectral de potencia de ruido. Los cálculos y resultados en unidades lineales y en logarítmico se muestran aquí:

$$w_{S_{ys}} = kT_{S_{ys}} = 5.74 \times 10^{-21} \text{W/Hz}$$

$$W_{S_{ys}} = 10 \log (k T_{S_{ys}}) = -202.41 \text{dB/Hz}$$

Una vez conocida la densidad espectral de potencia de ruido de fondo se fija un umbral sobre esta para definir así la mínima densidad de flujo que el sistema es capaz de recibir. Fijando el umbral 10 dB por encima de $W_{S_{ys}}$, de tal forma que pequeñas variaciones de señales de ruido no influyan en la detección, la densidad de flujo espectral mínima debida a una emisión radio solar es $W_{Burst} = -192.41 \text{ dB/Hz}$. Calculando dicho valor en lineal y haciendo uso de la ecuación 2.6 obtenemos la densidad de flujo mínima detectable:

$$w_{Burst} = 10^{\frac{W_{Burst}}{10}} = 5.741 \times 10^{-20} \text{ W/Hz}$$

$$S = \frac{2 w_{Burst}}{A_{eff}} = 2.05 \times 10^{-19} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{Hz}}$$

$$S = \frac{2.05 \times 10^{-19}}{1 \times 10^{-22}} = 2050 \text{ sfu}$$

Donde A_{eff} es el área efectiva o superficie equivalente definida cómo la relación entre la potencia recibida por la antena y la densidad de potencia que incide sobre ella. Para el cálculo de esta se ha empleado la ecuación 2.10, donde la frecuencia de trabajo definida ha sido $f = 300 \text{ MHz}$, c es la constante de velocidad de la luz en el vacío y G la ganancia de la antena.

$$A_{eff} = \frac{G}{4\pi} \lambda^2 \quad (\text{m}^2) \quad (2.10)$$

Finalizados los cálculos se obtiene que la sensibilidad del radiotelescopio, o la densidad de flujo mínima que el receptor es capaz de detectar, para un umbral sobre el nivel de ruido de fondo de 10 dB es de 2050 sfu. Por otra parte, si se realizan los mismos cálculos tomando cómo partida la temperatura de ruido si no se instala el preamplificador, se obtiene un valor de sensibilidad de $S = 11748.73 \text{ sfu}$. Conclusión principal de esto es que es necesaria la instalación de un preamplificador de bajo ruido cómo acondicionador de señal, ya que mejora la sensibilidad en un factor próximo a 5.

Capítulo 3

Medidas previas, testeo y representación de datos.

A lo largo de este capítulo se presenta una campaña de medidas, previas a la instalación, del espectro radioeléctrico que abarca la banda nativa de Callisto, con el fin de estudiar cuanto de óptimo es el emplazamiento para la realización de observaciones radioastronómicas. Dichas medidas permiten configurar el espectro de trabajo del radiotelescopio, seleccionando este cómo el rango frecuencial en el que el nivel de señal interferente sea mínimo.

Tras la explicación de la configuración, se presentan nuevas medidas del nivel de señal interferente obtenida por el sistema una vez que el radiotelescopio está totalmente instalado, a falta de poder reconfigurar cualquier parámetro que el espectrómetro permita programar, cómo el PWM (Pulse Width Modulation), para conseguir el mejor nivel de sensibilidad tratando de no saturar el receptor. El principal objetivo de estas medidas es conocer qué nivel de sensibilidad posee el radiotelescopio.

Por último se explica cómo y con qué herramientas software se pueden representar los datos proporcionados por Callisto, principalmente los datos de los archivos FITs que dan lugar a los espectrogramas en función del tiempo y la frecuencia. Se realiza un ejemplo para comprender que aportan los datos y cómo con ellos se puede detectar la densidad de flujo de la fuente.

3.1 Espectro de frecuencias en I+D+I

Antes de la instalación fue necesaria la realización de varias medidas con un receptor Callisto y un dipolo $\lambda/2$, para determinar si existía algún rango de frecuencias en el que el radiotelescopio pudiera trabajar. Las medidas se realizaron con polarización vertical y con polarización horizontal permitiéndonos conocer si había una polarización con menos nivel de señal interferente. Cómo se aprecia en las distintas imágenes de la Figura 3.1, en ambas polarizaciones el nivel de señal captado era similar.

Las imágenes a) de la Figura 3.1 muestran el nivel de señal recibido por el dipolo sobrepuesto a la señal recibida por Callisto cuando se conecta a su salida una carga adaptada de 50Ω . En esta medida obtenemos picos de señal por debajo de 100 MHz y en torno a 350 MHz cuando el Callisto está conectado a la carga adaptada. Estas señales

podrían deberse a ruido artificial electrónico debido a diversos ventiladores y motores que se encuentran en el entorno provisional y actual de los equipos.

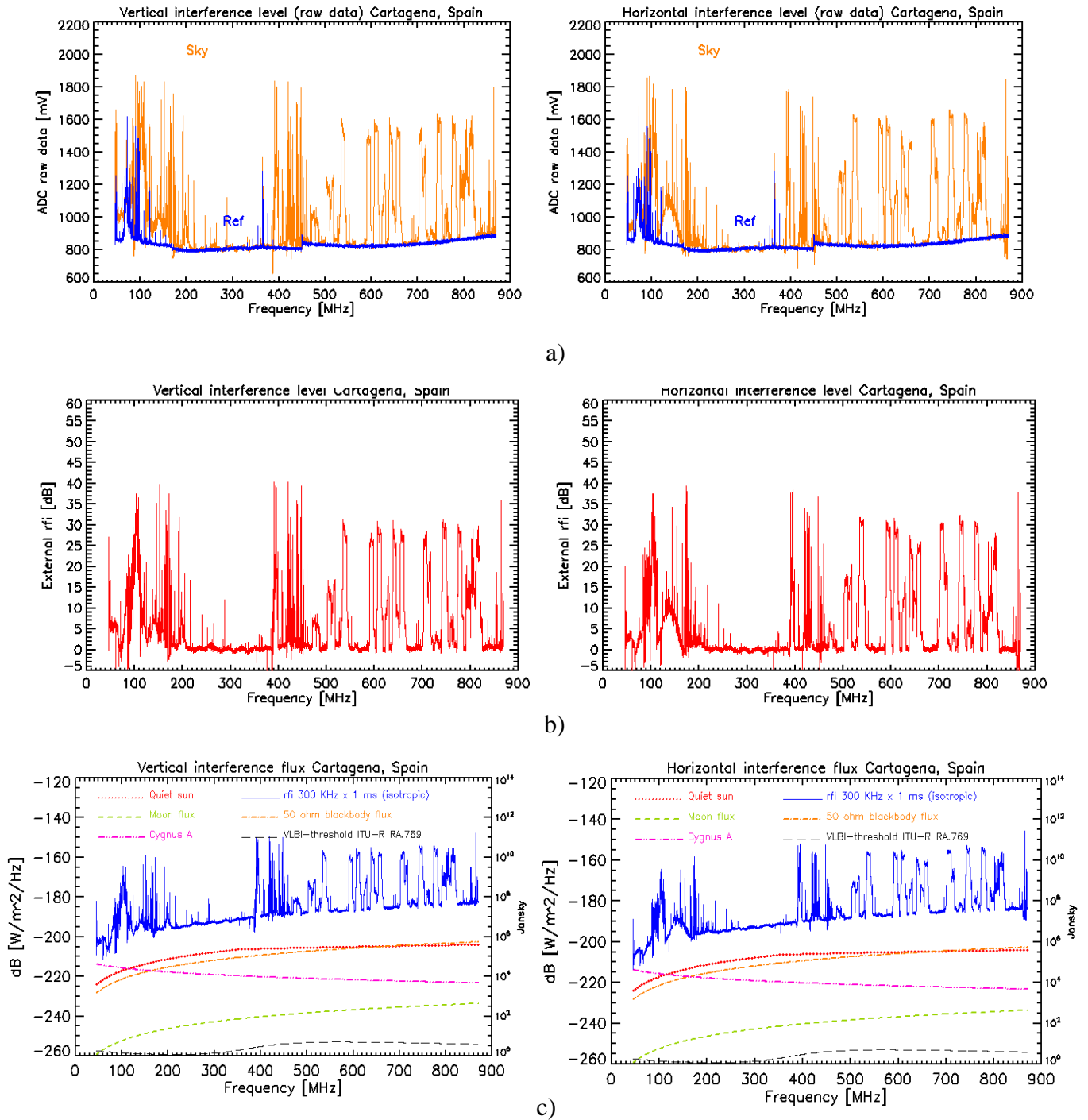


Figura 3.1. Medidas previas a la instalación.

En cuanto a la imagen b) de la Figura 3.1 es simplemente la representación de la señal captada por la antena en dB. Se obtiene mediante un simple procesamiento de la señal

naranja de a), ya que es conocida la respuesta ante una potencia de entrada del detector logarítmico, que queda definida por el gradiente del detector 25.4 mV/dB.

En las imágenes c) es donde medimos la sensibilidad del sistema de recepción representando la densidad de flujo de ruido que recibe Callisto. En esta gráfica, por lo tanto, la traza azul nos aporta la información calculada en el Apartado 2.4.2. Además se muestran referencias de radiación conocidas como el Sol en reposo o la Luna.

Tras la realización de esta campaña de medidas fue cuando se tomó la decisión de llevar a cabo la instalación del radiotelescopio expuesto en esta memoria, puesto que se observa una banda aproximadamente de 210 MHz a 380 MHz en la cual parece no haber ninguna señal de interferencia.

3.2 Configuración del espectro de recepción

En el apartado 2.2.5 donde se explica la configuración de los archivos de entrada a Callisto, quedó pendiente explicar cómo se generaban las frecuencias del archivo freq00300.cfg. Dichas frecuencias pueden ser modificadas manualmente pero es una tarea tediosa. Para la generación de este archivo de frecuencias se puede emplear el software *Frequency Genie Software Tool* disponible en el repositorio software de e-Callisto.

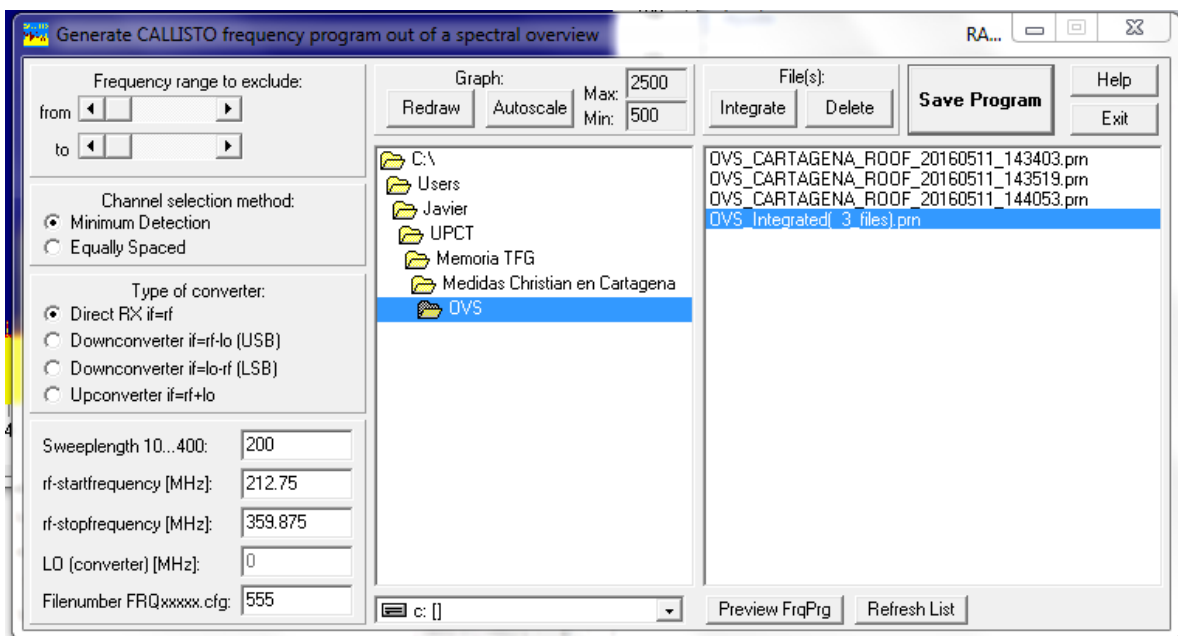


Figura 3.2. Interfaz gráfica de Frequency Genie Software Tool

El programa permite crear el archivo de frecuencias seleccionando las frecuencias de inicio y fin del rango que quiera ser observado. Para saber a qué frecuencias hay menor nivel de señal interferente o ruido, permite cargar archivos OVS. Además permite integrar varios archivos OVS para obtener una visión más realista del espectro de

frecuencias interferentes, ya que se pueden integrar archivos tomados en distintas horas del día. Otra característica que aporta es la capacidad de eliminar partes del espectro mediante la selección en el espectrograma con cursores de las zonas de mayor nivel de interferencias. En la Figura 3.2 aparece el aspecto típico de esta herramienta.

El primer archivo de frecuencias se creó tras realizar una primera instalación básica del radiotelescopio que consistía en la antena LPDA, el cable coaxial Ecoflex 15 de 13 metros cómo guía de transmisión que unía la antena con el espectrómetro. Se realizaron varios OVS a lo largo del día para obtener los datos suficientes para conocer el espectro libre de interferencias. En la Figura 3.3 se observa el OVS formado por la integración de tres de los OVS tomados. En este hay que destacar que ya aparecen frecuencias interferentes en el rango que parecía estar libre de interferencias. Estas interferencias aparecen en 259 MHz y 302 MHz.

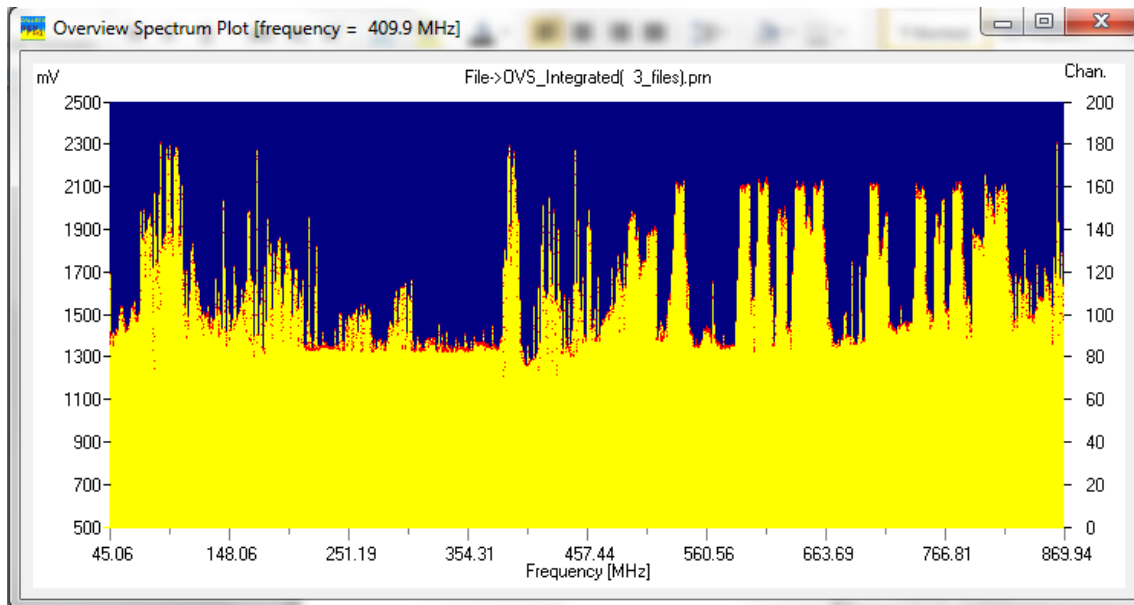


Figura 3.3. OVS para configuración básica.

En principio las interferencias se achacaban a posibles señales provenientes del entorno contaminante en cuanto a señales eléctricas que puedan provenir de los motores y sistemas de ventilación del emplazamiento. De hecho, el desarrollo del proyecto ya se encontraba en fase de elaboración de la caja de la etapa preamplificadora, por lo que se prosiguió hasta su finalización e instalación.

Llegados a este punto, y con todos los cálculos teóricos realizados, hay que comprobar el nivel de señales indeseadas y la sensibilidad del sistema de forma práctica. Para ello se realizan unas gráficas similares a las de la Figura 3.1, realizando uno o varios OVS con la antena recibiendo señal y otro OVS con una carga adaptada conectada a la posición en la cual se conecta la antena. Las imágenes resultantes se presentan en la

Figura 3.4. Se pretendía que con estas imágenes concluir con la configuración y puesta en marcha del radiotelescopio aportando a este un correcto funcionamiento. Sin embargo en las imágenes se pueden gran cantidad de picos negativos lo que indican que el receptor, o incluso es posible que el LNA, saturen. No obstante, aunque no saturasen, no hay ningún rango del espectro libre para realizar observaciones astronómicas correctas.

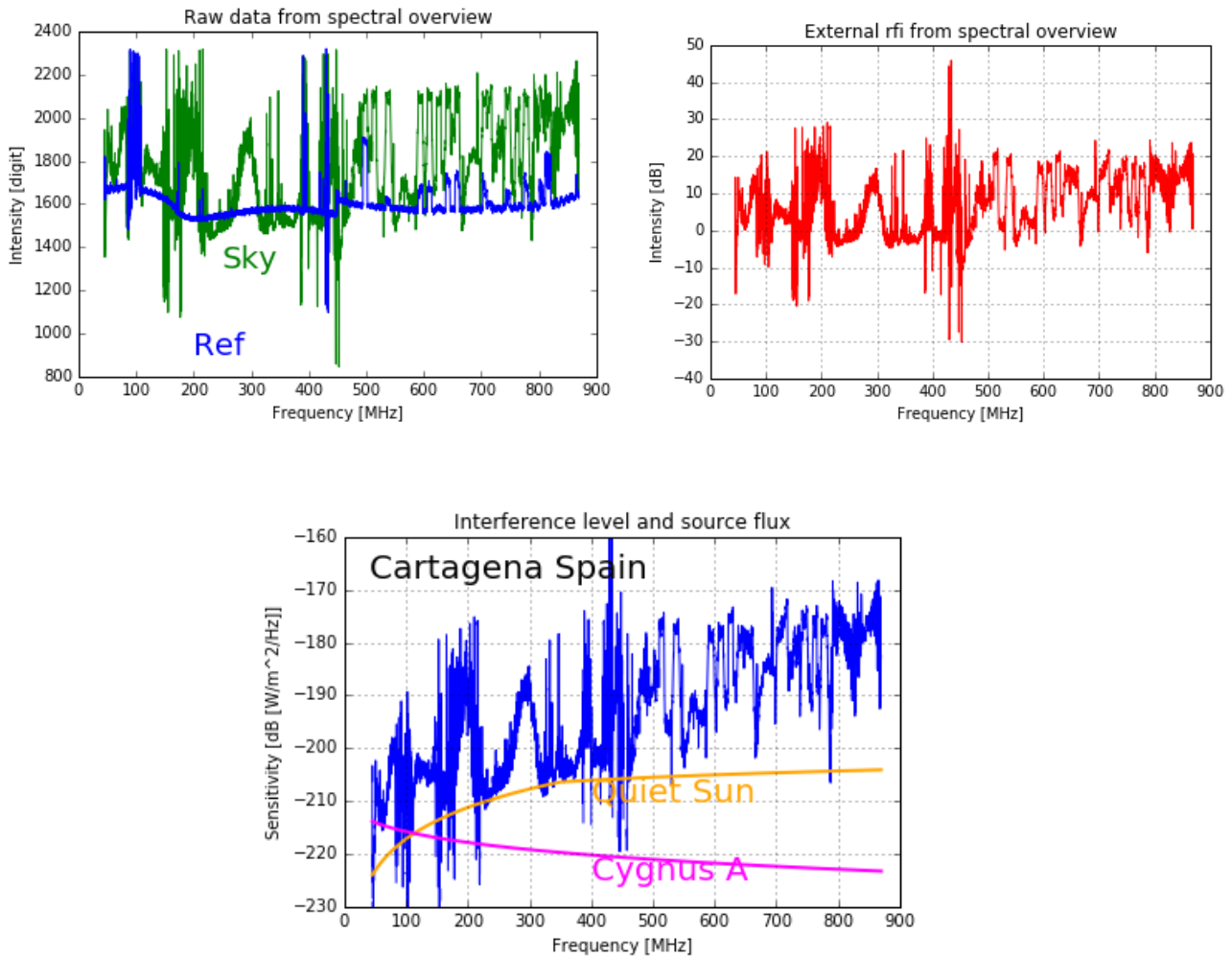


Figura 3.4. Medidas radiofrecuencias interferentes y sensibilidad.

Retomando el tema de las señales interferentes comentado en los anteriores párrafos, gracias a la información que proporcionan los gráficos se puede asegurar que no se debidas a ruido artificial eléctrico, ya que las medidas de OVS con la conexión de la antena y con la conexión de la carga se han realizado de forma consecutiva y sin embargo la medida con la carga adaptada no presenta a las frecuencias en cuestión ningún tipo de intensidad de ruido.

Otro tema importante es la saturación. Esta es posible que pueda evitarse, o en el peor de los casos reducirse considerablemente reduciendo el control de ganancia del receptor Callisto mediante la reconfiguración del parámetro [agclevel] del archivo callisto.cfg.

Dicho parámetro está fijado actualmente a 150. No se ha modificado aún este valor, el proyecto se encuentra en este momento en esa precisa etapa. Por falta de tiempo para cumplir con los plazos de presentación de esta memoria, esta tarea queda pendiente para próximos estudios.

Concluyo este apartado sacando a contexto una idea primordial en el montaje o construcción de un radiotelescopio, cómo lo es la instalación de este en un entorno en el cual exista un vacío considerable de ondas electromagnéticas en la banda de trabajo del sistema. Si no es así, el diseño puede ser perfecto y el proyecto puede abarcar muchos ámbitos de trabajo y tiempo, pero no se conseguirá el objetivo de obtener un sistema sensible a las pequeñas potencias de las señales astronómicas.

3.3 Representación e interpretación de datos

Lo ideal hubiera sido poder proporcionar en este capítulo la captura de algún *radio burst*, pero no se ha podido obtener ninguno, principalmente porque el radiotelescopio no ha estado capturando datos de forma continuada ya que aún no se ha conseguido un centro de datos estable en el cual instalar los equipos de forma segura y estable. Además de esto no olvidemos los problemas comentados en el apartado anterior.

Aun así es necesario mostrar el aspecto del espectrograma obtenido a partir de los archivos FITS. En la Figura 3.5 se aporta un espectrograma obtenido por el Radiotelescopio de la UPCT antes de que este incorporara la etapa de amplificación. Para representarlo se ha empleado la herramienta software RAPP Viewer disponible una vez más en el repositorio software de la web e-Callisto.

Las principales características a resaltar de la visualización del espectrograma con esta herramienta son la cabecera que incorpora el programa que informa de la fecha, hora, resolución temporal y resolución completa de la imagen, así como el ajuste de contraste de color para una correcta visualización de la intensidad de los píxeles y el indicador de la intensidad de pixel que aparece en la esquina inferior derecha. Este último indicador muestra la intensidad del pixel sobre el que se sitúe el ratón en el espectrograma.

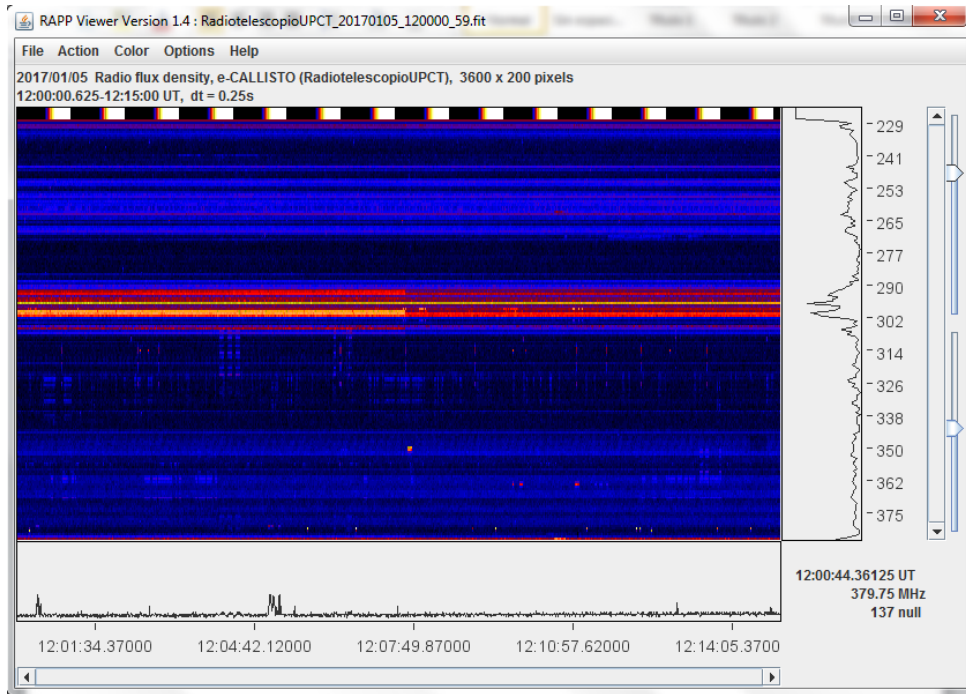


Figura 3.5. Espectrograma obtenido por Radiotelescopio Solar UPCT.

En el espectrograma mostrado se pueden observar señales interferentes, correspondientes a las señaladas en el anterior apartado. Partiendo de estas pretendo desarrollar un ejemplo de cómo obtener el Factor-Y, o ratio sobre el ruido de fondo, de una señal de radio obtenida tras una tormenta solar. Para ello muestro realizo zoom en el espectrograma para escoger una señal interferente en la que basar los cálculos. En la Figura 3.6 muestro el espectrograma ampliado sobre una zona en la cual se observan diversas señales interferentes. Escogemos por ejemplo la de la esquina inferior derecha para realizar los cálculos.

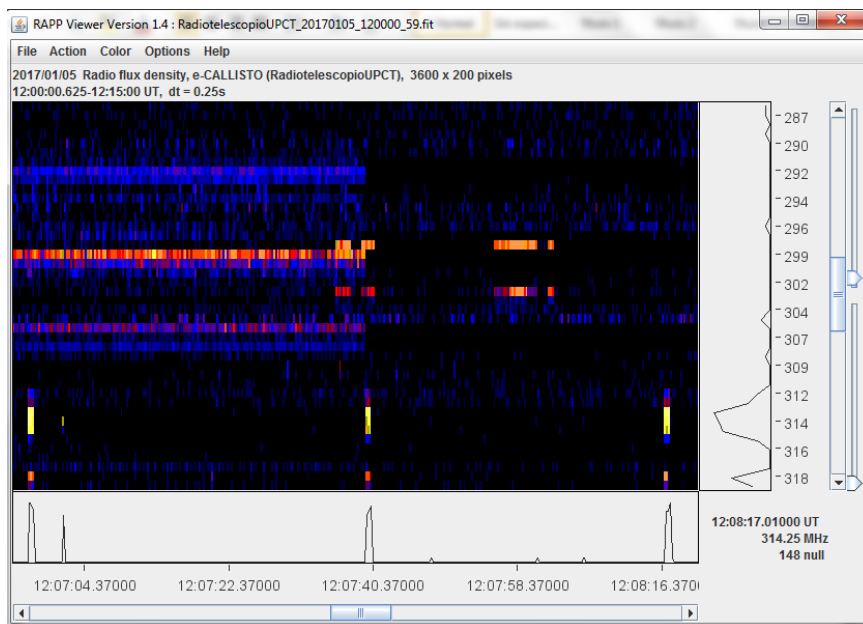


Figura 3.6. Señales interferentes.

La ecuación 3.1 es la empleada para calcular el ratio sobre el nivel de ruido de fondo en dB. Para calcularlo hay que tener en cuenta que VoltRange es el rango de tensión máximo que proporciona el receptor a la salida que según el testeo del receptor llevado a cabo por el fabricante (Figura 2.27) es VoltRange = 2360 mV. Además g es el gradiente del detector logarítmico con valor $g = 25.4$ mV/dB, DigitRange es el rango de niveles del conversor ADC, en nuestro caso DigitRange = 256 ya que el ADC es de 8 bit, y DigitHot y DigitCold es el valor de intensidad en dígitos de la señal que se quiera medir y del ruido de fondo respectivamente.

$$Y(\text{dB}) = \frac{\text{DigitHot} - \text{DigitCold}}{\text{DigitRange}} \cdot \frac{\text{VoltRange}}{g} \quad (3.1)$$

La medida de la intensidad de la señal sobre el espectrograma proporciona un valor máximo de DigitHot = 150 dígitos y el ruido de fondo DigitCold = 136. Para estos valores se obtiene $Y(\text{dB}) = 5.08$ dB. Conocido este valor se puede hallar el valor de la densidad espectral de la señal ya que el ruido de fondo se puede conocer y de hecho fue calculado en el apartado 2.4 de esta memoria. Cabe destacar que no será una medida muy ajustada puesto que el ruido calculado es aproximado desde el momento en que se toma una temperatura de ruido de la antena de una gráfica desarrollada de forma experimental. Sin embargo si nos da una buena idea del nivel de señal detectado. Los cálculos para obtener esta densidad de flujo se desarrollan a continuación:

$$W_{rfi} = W_{sys} + Y = -202.41 + 5.08 = -197.33 \frac{\text{dB}}{\text{Hz}}$$

$$S_{rfi} = \frac{2 W_{rfi}}{A_{eff}} = 5.47 \cdot 10^{-20} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{Hz}} = 546.9 \text{ sfu}$$

De esta forma se puede obtener la densidad de flujo de los *radio burst* que capte el radiotelescopio. Ya he comentado que el cálculo no es muy preciso pero válido para proporcionar información sobre la intensidad de la señal. Para comprobar la interpretación de los datos y de los resultados lo más recomendable es acceder al *Solar and Geophysical Activity Summary (SGAS)* del *Space Weather Prediction Center (SWPC)* el cual proporciona medidas de *radio burst* diariamente a una frecuencia de 245 MHz.

Por último, para una explicación más exhaustiva tanto del cálculo del Factor-Y cómo del manejo de RAPP Viewer y las opciones que este oferta consultar el Apéndice E de [30].

Capítulo 4

Conclusiones y líneas futuras.

En relación a las conclusiones finales se pueden diferenciar estas en dos: las que se extraen directamente del propio proyecto y los aspectos técnicos de este, y conclusiones personales referentes a que he podido aprender gracias al desarrollo del proyecto.

Las principales conclusiones técnicas extraídas del proyecto, aunque se han ido aportando diversas conclusiones en los correspondientes apartados a lo largo de la memoria, son la facilidad en cuanto a nivel económico y a nivel de acondicionamiento previo de señal para desarrollar un radiotelescopio capaz de monitorizar radiaciones solares provenientes de explosiones y tormentas solares, combinadas con la principal dificultad de conseguir unas buenas condiciones en cuanto a espectro libre de frecuencias interferentes. De hecho este es en el caso de este proyecto el parámetro que hasta el momento, no permite al radiotelescopio trabajar con fines radioastronómicos,

Además de esto, este proyecto me ha permitido conocer y lidiar con los problemas que aparecían diariamente por el hecho de consistir en un proyecto 100% real en el sentido de que no consiste en realizar ningún tipo de estudio ni simulación, si no que se basa en el pedido y compra de los dispositivos adecuados, su configuración e instalación física. Esta idea se aleja bastante de lo que un estudiante está acostumbrado a desarrollar en sus prácticas o clases a lo largo del año.

Estos problemas surgen desde el retraso en el pedido de dispositivos hasta la rotura de algún dispositivo o falta de disponibilidad de técnicos para la instalación de la antena. Todo ello ha supuesto la dedicación de un gran número de horas, seguramente muy por encima a lo que el lector pueda pensar al ver lo recogido en esta memoria.

Por otra parte, abordando el tema personal, he podido aprender gran número de conceptos sobre radioastronomía que hasta ahora eran totalmente desconocidos para mí. Además, se extrae de la propia memoria, que el diseño y fabricación de un radiotelescopio así como su mantenimiento y desarrollo de mejoras es un campo en el que el principal dominador es el Ingeniero de Telecomunicaciones, incluso más que los Radioastrónomos. Esto es debido a que todo el sistema de acondicionamiento de señal o de diseño de antenas es totalmente similar a un sistema de comunicaciones radio, o similar a técnicas de radar, etc.

En relación a la aportación del proyecto a la UPCT, se llega a la conclusión de que podría ser una herramienta de trabajo para desarrollo de prácticas de radiocomunicaciones o de cursos de radioastronomía para alumnos de toda la UPCT. Este Radiotelescopio Solar junto al Radiotelescopio para la Línea de Hidrógeno desarrollado por alumnos y profesores durante varios años, aporta un gran potencial para el desarrollo de actividades radioastronómicas fomentadas por la UPCT.

Para que esto último sea posible se debe proporcionar un centro de datos en el cual se puedan instalar los equipos de recepción de forma segura y permanente. Para ello, en el desarrollo de este proyecto se han mantenido reuniones con el Vicerrectorado de la UPCT y con el director de la Escuela de Telecomunicaciones, haciéndoles llegar la propuesta de instalar un rack de exteriores en el que disponer los equipos. Dicha propuesta fue aceptada pero aún no ha sido realizada su instalación.

Enlazando con esto último, y en vista de los problemas de los problemas con la gran cantidad de señales interferentes cómo se han analizado en el Capítulo 3 de la memoria, es obvio que el proyecto no está finalizado. Podemos aportar una serie de trabajos a realizar para el correcto funcionamiento del radiotelescopio que se podría definir cómo líneas futuras necesarias para el correcto funcionamiento:

1. Instalación de un rack de exteriores en el que instalar de forma permanente y segura los receptores y ordenadores necesarios tanto para el Radiotelescopio Solar cómo para el Radiotelescopio de la Línea de Hidrógeno. Dicho armario debe estar dotado de punto de acceso ethernet para que Callisto pueda proporcionar datos de forma constante a la red, además de para permitir un control remoto del sistema.
2. Búsqueda y configuración del sistema de forma que se puedan observar otros rangos de frecuencias libres de interferencias. Es decir, primeramente encontrar una zona del espectro libre de interferencias y por último desarrollar el sistema de acondicionamiento de señal basado en mezcladores para obtener una señal final que pueda ser procesada por el espectrómetro Callisto.

Otras líneas futuras que quedan abiertas para nuevos TFGs y TFMs aunque no sean estrictamente necesarias, pueden ser:

3. Configuración del sistema de forma que reciba con polarización circular. Para ello es necesario la instalación de dos antenas linealmente polarizadas, una con polarización vertical y otra horizontal, y dos receptores Callisto.
4. Calibración de Callisto [34].
5. Desarrollo de sistema de apuntamiento al Sol autónomo, basado en un nivel de señal recibido del cual se conozcan sus coordenadas. Para ello es necesario desarrollar un software que recoja datos de Callisto y del Controlador, y proporcione al controlador las señales necesarias para que realice el apuntamiento.
6. Calibración del diagrama de radiación del radiotelescopio con drones [35].

Para finalizar quiero destacar que el objetivo era la instalación y puesta en marcha del Radiotelescopio Solar de la UPCT para formar parte de la red e-Callisto y, por lo tanto, no se ha conseguido satisfactoriamente. Para completar el objetivo es necesario que se

lleve a cabo principalmente las tareas descritas en la línea de futuro 1, además de la 2. La 1 es responsabilidad de la UPCT, por lo que lo único achacable al alumno es no haber conseguido configurar el radiotelescopio para funcionar en una banda libre de interferencias.

Cartagena, Julio de 2017

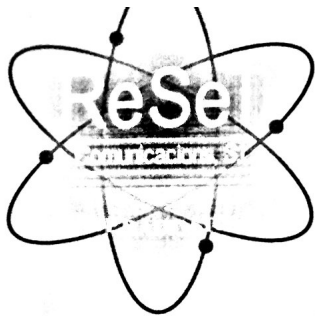
Bibliografía

- [1] Jesús Mora Rodríguez. “Instalación y puesta en marcha de un equieño radiotelescopio en la Universidad Politecnica de Cartagena”.
- [2] Space Weather Prediction Center. <http://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>
- [3] Christian Monstein. “Catalog of dynamic electromagnetic spectra observed with Callisto, Phoenix-3 and Argos”.
- [4] Rico Behlke. “Solar radio bursts and low frequency radio emissions from space”. INSTITUTET FÖR RYMDFYSIKSWEDISH INSTITUTE OF SPACE PHYSICS.
- [5] Bain, H.M., S. Krucker, P. Saint-Hilaire, and C.L. Raftery. “Radio imaging of a type IVM radio burst on the 14th of August 2010”. *Astrophys. J.*, **782**, 43, 2014.
- [6] Tun, S.D., and A. Vourlidas. “Derivation of the magnetic field in a coronal mass ejection core via multi-frequency radio imaging”. *Astrophys. J.*, **766**, 130, 2013.
- [7] Distribución de equipos Callisto en Mayo de 2017. http://www.e-callisto.org/Callisto_DataStatus_Vwww.pdf
- [8] Cobertura mundial de Callisto. <http://www.e-callisto.org/coverage/coverage.html>
- [9] Observations of generation AOS, Argos, Phoenix-3, Phoenix-4 and e-Callisto. <http://soleil.i4ds.ch/solarradio/callistoQuicklooks/>
- [10] e-Callisto Spectrometer Network Worldwide Spectral Overview. <http://www.e-callisto.org/OVS/Spectral%20Overview.html>
- [11] Santiago Roca Conesa. “Diseño de un radiotelescopio para estudio de la línea de hidrógeno de nuestra Galaxia usando el receptor de SpectraCyber”.
- [12] Do it yourself DIY LPDA, online calculator. <http://www.changpuak.ch/electronics/lpda.php>
- [13] Victor Cruz Ornetta. “Diseño y Fabricación de una Antena Log- Periódica 200-1000 MHz”.
- [14] Thomas A. Milligan. “Modern Antenna Design, Second Edition”.
- [15] Antena logoperiódica PKW LP22eV. <http://radiostock.es/es/base-tribanda/140-antena-tribanda-pkw-lp22ev.html>
- [16] Mástil de 1,5 metros de largo x 35 mm de diámetro x 1,5 mm de espesor, de Televes. <https://www.tdtprofesional.com/es/mastil-de-1-5-m-carraqueado-35-mm-o-1-mm-de-espesor.html>
- [17] e-Callisto TMA(Tower Mounted Amplifier) <http://www.reeve.com/Solar/e-CALLISTO/e-callistoTMA.htm>
- [18] Filtro paso banda, ZX75LP-900+. <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX75LP-900+.pdf>
- [19] Amplificador de bajo ruido, ZX60-LN+. <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX60-33LN+.pdf>
- [20] Bias-Tee, ZFBT-4R2G+<https://www.minicircuits.com/pdfs/ZFBT-4R2G+.pdf>
- [21] Limitador de voltaje, VLM-33+. <https://www.minicircuits.com/pdfs/VLM-33+.pdf>

- [22] Regulador de tensión, LM1117-ADJ. <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/8604/NSC/LM1117T-ADJ.html>
- [23] Latiguillos coaxiales RG174. <http://es.rs-online.com/web/p/products/783-9644/>
- [24] ECOFLEX 15. <http://www.wimo.de/download/ecoflex15.pdf>
- [25] Manual eCallisto. <http://www.e-callisto.org/Software/eCallistoManual.pdf>
- [26] Callisto Qualification. <http://www.e-callisto.org/Qualification/applidocs.htm>
- [27] Rango dinámico con diferentes PWM.
http://www.ecallisto.org/Qualification/DynamicRange_ec07.gif
- [28] CD1300LS/IHP-3.
http://www.ecallisto.org/Hardware/CD%28M%291300L_MK3%2005-09-01.pdf
- [29] “Reeve Callisto Hardware, 2012 SARA Western Regional Conference”.
http://www.reeve.com/Documents/CALLISTO/Reeve_CallistoHardware_SARAWestPaper1_2012_bw.pdf
- [30] Callisto Software Setup Guide.
<http://www.reeve.com/Documents/CALLISTO/CALLISTOSoftwareSetup.pdf>
- [31] Orbitron-downloads. <http://www.stoff.pl/downloads.php>
- [32] Recomendación UIT-R P.372-7. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-7-200102-S!!PDF-S.pdf
- [33] Whitham D. Reeve and Christian Monstein. “Planning for the 2017 Solar Eclipse at VHF and UHF”.
http://www.reeve.com/Documents/Articles%20Papers/Reeve-Monstein_2017SolarEclipse_VHF.pdf
- [34] Calibración del receptor Callisto
http://www.ecallisto.org/GeneralDocuments/CalibrationUnitCallisto_DirectionalCoupler.pdf
- [35] Chihway Chang, Christian Monstein, Alexandre Refregier, Adam Amara Adrian Glauser, Sarah Casura. “Beam Calibration of Radio Telescopes with Drones”. Institute for Astronomy, Department of Physics, ETH Zurich.

Anexo 1

**Facturas de equipos Callisto (donados),
antena LP-22eV, cable Ecoflex 15 y
conectores N.**



COMUNICACIONS
CENTRALETES TELEFÒNIQUES
INFORMÀTICA
RÀDIO-TELÈFON PER A
ENLLAÇOS COMERCIALS
RADIOAFECCIÓ
XARXES

Antiga N-152, Km.70,4
Tel. 93 885 41 66 - Fax 93 881 40 08
08503 GURB
www.radiostock.es

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CARTAGENA
MURALLA DEL MAR S/N (DPTO. TECNOLOGÍAS DE
30202 CARTAGENA
MURCIA

CODI CLIENT	DATA FACTURA	NÚM. FACTURA	FULL
3006724	10/05/16	152	1

NIF/CIF: Q-8050013-E

CODI ARTICLE	DENOMINACIÓ	QUANTITAT	PREU	DTE.	IMPORT
ALBARÁN 04-173 FECHA 10/05/16					
C-PKWANTLP22EV	ANTENA PKW LP-22EV	1.00	215.00		215.00
C-NOCABECOF15	CABLE COAX. ECOFLEX15 B/P 52 Ohms	23.00	4.90		112.70
C-VAONECOF15	CONECTOR N MASCLE PER ECOFLEX15	16.00	8.35		133.60
C-INADAMA*SMAN	ADAPTADOR SMA MASCLE A N FAMELLA	10.00	7.30		73.00
	TRABAJO SOLDADURA CONECTORES	1.00	18.00		18.00
	COBRADO WEB				
* PORTES 7.80 EURO ANTES DE P.P					
BASE IVA		560.10	21.00%	IVA	117.62
				TOTAL FRA.:	677.72
F. Pag.: Comptat		Vencim.:		10/05/16	

677.72

% PP: P. Pag.:

D'acord amb la nova Llei Orgànica 15/12/1999 de Protecció de Dades espanyola, li comunicuem que les seves dades formen part d'un fitxer automatitzat que pertany a l'empresa emissora d'aquest document, amb la finalitat de tractar-los en les nostres tasques d'administració i gestió. Les seves dades seran d'ús exclusiu de l'empresa emissora d'aquest document. Si no vol que se li comuniqui aquestes dades, pot contactar amb el responsable de les seves dades.

Jose Luis Gomez Tornero
 Departamento de Tecnologías
 Universidad Politecnica de Cartagena
 Edificio de Antigones
 CP 30202, Cartagena
 Spain

Christian Monstein
 Institute for Astronomy
 ETH Zürich, HIT G13.2
 Wolfgang-Pauli-Strasse 27
 CH-8093 Zürich
 Switzerland

Donation for Science and Education

No.	Description	Qty	List Price (CHF)	Total Price (CHF)
1	e-CALLISTO Frequency Agile Radio Spectrometer eC86 and eC87	2	35.00	70.00
2	RS-232 cable f/m 1:1	2	7.60	15.20
3	Power Supply 12 Volt for CALLISTO spectrometer	2	9.50	19.00
4	Adapter USB-RS232, Win7 Compatible	2	13.20	26.40
5	1 Termination N-Connector with 50 ohm for calibration	1	5.00	5.00
6	Shipping & Handling (For Set of Callisto)	1	45.00	45.00
TOTAL PRICE (USD)				184.60

Authorized Signature:

