



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PUESTA EN MARCHA DE LA ETAPA ANALÓGICA DE UN INTERFERÓMETRO DE
DOS ANTENAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

PABLO ANDRÉS TAPIA UGARTE

PROFESOR GUÍA:
RICARDO FINGER CAMUS

SANTIAGO DE CHILE
ABRIL 2013



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PUESTA EN MARCHA DE LA ETAPA ANALÓGICA DE UN INTERFERÓMETRO DE
DOS ANTENAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

PABLO ANDRÉS TAPIA UGARTE

PROFESOR GUÍA:
RICARDO FINGER CAMUS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PATRICIO MENA
MARCOS DÍAZ

SANTIAGO DE CHILE
ABRIL 2013

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: PABLO ANDRÉS TAPIA UGARTE
FECHA: ABRIL 2013
PROF. GUÍA: RICARDO FINGER CAMUS

PUESTA EN MARCHA DE LA ETAPA ANALÓGICA DE UN INTERFERÓMETRO DE DOS ANTENAS

La presente memoria describe la continuación del desarrollo de un interferómetro de dos antenas para observar la línea espectral del hidrógeno neutro (HI), realizando la puesta en marcha e integración del sistema hasta la etapa analógica. El proyecto realizado consistió en: realizar observaciones astronómicas para comprobar el buen funcionamiento de los radiotelescopios como unidades singulares; implementar un interferómetro sumador simple, realizando la integración del sistema y observaciones astronómicas que permitan comprobar su buen funcionamiento; diseñar e implementar herramientas computacionales para la reducción y análisis de los datos recopilados; idear y redactar experiencias docentes que pueden llevarse a cabo con los radiotelescopios y el interferómetro en su estado actual.

Las mediciones para comprobar el buen comportamiento singular se dividieron en dos partes: pruebas de desempeño y observaciones astronómicas. Las primeras tuvieron como finalidad determinar el ancho de haz de la antena y los sectores del cielo que se encontraban libres de interferencias. Las segundas, comprobar la detección de la línea espectral del hidrógeno neutro sobre regiones estándar en la observación de HI.

Después de implementar el interferómetro sumador, se procedió a realizar el experimento para obtener las primeras franjas ("*first fringes*"). Luego se procedió con la primera observación astronómica interferométrica para medir el diámetro angular del sol en HI.

Las pruebas de desempeño determinaron un ancho de haz cercano al valor teórico y gran parte del cielo observable contaminado con interferencia. Las observaciones astronómicas determinaron una correcta medición e identificación de la línea espectral HI, sin embargo, la amplitud del espectro no fue la esperada.

La obtención de las primeras franjas resultó exitosa, esto dio paso a la medición del diámetro angular del sol, donde se obtuvo resultados muy cercanos a los esperados de manera teórica. El éxito de esta prueba comprobó que todo el sistema del interferómetro hasta esa etapa se encuentra funcionando correctamente, lo que constituía el objetivo principal de esta memoria.

Tanto las experiencias docentes como las herramientas computacionales fueron realizadas de manera paralela, cumpliendo los objetivos deseados.

Índice general

1. Introducción	9
1.1. Motivación	9
1.2. Objetivos	10
1.2.1. Objetivo general	10
1.2.2. Objetivos específicos	10
1.3. Estructura de la memoria	11
2. Antecedentes	12
2.1. Radio Astronomía	12
2.1.1. Radiación de Cuerpo Negro y Temperatura de Brillo	12
2.1.2. Línea Espectral del Hidrógeno	13
2.1.3. Efecto Doppler en la Astronomía	13
2.2. Antenas	14
2.2.1. Ancho de Haz	14
2.2.2. Eficiencia de Antena y dilución del haz (<i>beam dilution</i>)	14
2.3. Receptores	15
2.3.1. Receptor Heterodino	15
2.3.2. Temperatura de Sistema	15
2.4. Descripción del Sistema Instalado	16
2.5. Interferometría	16

3. Desempeño del Radiotelescopio	17
3.1. Problemas de Interferencia	17
3.1.1. Descripción	17
3.1.2. Objetivos	17
3.1.2.1. Objetivo General	17
3.1.2.2. Objetivos específicos	18
3.1.3. Desarrollo	18
3.1.4. Resultados	19
3.1.5. Discusión	21
3.2. Medición del Ancho de Haz de la Antena	22
3.2.1. Descripción	22
3.2.2. Resultados	22
3.2.3. Discusión	24
4. Observaciones Astronómicas	25
4.1. Regiones Estándar de Observación en H1	25
4.1.1. Descripción	25
4.1.2. Objetivos	26
4.1.2.1. Objetivo General	26
4.1.2.2. Objetivos Específicos	26
4.1.3. Desarrollo	26
4.1.3.1. Ingreso de las Fuentes al Software del SRT	26
4.1.3.2. Determinación del Horario de Medición	26
4.1.3.3. Medición de las Fuentes	26
4.1.3.4. Reducción, Filtrado y Gráfica de los Datos	27
4.1.4. Resultados	27
4.1.4.1. Región S6	28

4.1.4.2.	Región S8	29
4.1.4.3.	Región S9	30
4.1.5.	Discusión	31
4.2.	Primeras Franjas Interferométricas	35
4.2.1.	Descripción	35
4.2.2.	Objetivos	35
4.2.2.1.	Obejtivo General	35
4.2.2.2.	Objetivos Específicos	35
4.2.3.	Desarrollo	36
4.2.4.	Resultados	37
4.2.5.	Discusión	37
4.3.	Diámetro Angular del Sol	38
4.3.1.	Descripción	38
4.3.2.	Objetivos	39
4.3.2.1.	Objetivo General	39
4.3.2.2.	Objetivos Específicos	39
4.3.3.	Desarrollo	39
4.3.4.	Resultados	40
4.3.5.	Discusión	41
4.3.5.1.	Línea de Base del Interferómetro	41
4.3.5.2.	Diámetro Angular del Sol en H1	42
4.3.5.3.	Longitud de Onda	43
4.3.5.4.	Efecto de los errores en el ajuste de la curva de visibilidad	43
5.	Trabajos Futuros	45
5.1.	Script para la observación en espacio limpio	45
5.2.	Continuar con la Implementación Analógica	46

5.3. Problemas de Interferencia	48
5.4. Calibración de los Radiotelescopios	48
5.5. Regiones Estandar de Observación en H1	49
5.6. Curva de Rotación Galáctica	50
5.6.1. Descripción	50
5.6.2. Objetivo General	51
5.6.3. Desarrollo	52
5.7. Gráfico de velocidad-longitud del plano galáctico	53
5.7.1. Descripción	53
5.7.2. Objetivo General	53
5.7.3. Desarrollo	53
5.8. Funcionamiento de los Radiotelescopios	54
5.8.1. Antena Oriente	54
5.8.2. Cámaras de Seguridad	54
6. Conclusiones	56
6.1. Conclusión General	56
6.2. Conclusiones Específicas	57
6.2.1. Resumen de Resultados	57
6.2.1.1. Mapa de Interferencia	57
6.2.1.2. Medición Ancho de Haz de la Antena	58
6.2.1.3. Observación de las Regiones Estandar S6, S8 y S9	59
6.2.1.4. Medición del Diametro Angular del Sol	60
6.2.2. Reducción y Análisis de los Datos Recopilados por los SRT	61
6.2.3. Experiencias para el Laboratorio de Radioastronomía	62
Bibliografía	65
Anexos	I

A. Desempeño del Radiotelescopio	I
A.1. Script SRT para Mapa de Potencia del Cielo	I
A.2. Script en Python para la Reducción y Gráfica de los Datos	II
A.3. Archivo de Configuración SRT	V
A.4. Mapas de potencia SRT	VII
A.4.1. Antena Poniente	VII
A.4.2. Antena Oriente	VIII
A.5. Informe Final Sobre Medición Beamwidth	VIII
 B. Observaciones Astronómicas	 XXV
B.1. Librería de Python con Funciones Generales para la Reducción de los Datos Recopilados por el SRT	XXV
B.2. Script en Python para la Reducción y Gráfica de Pruebas de Seguimiento	XXVII
B.3. Script en Python para la Reducción y Gráfica Diámetro Angular del Sol	XXXII
B.4. Enunciados para el Laboratorio de Radio-Astronomía	XXXV

Índice de figuras

2.1. Factor de dilución de haz (<i>Beam Dilution Factor</i>). Fuente: [9].	15
3.1. Mapa de potencia logarítmico antena oriente.	19
3.2. Mapa de potencia logarítmico antena poniente.	19
3.3. Estado del cielo y horizonte antena oriente.	20
3.4. Estado del cielo y horizonte antena poniente.	20
3.5. Patrón de radiación de una antena estándar.	22
3.6. Potencia promedio en función del ángulo azimutal. Fuente: [1].	23
4.1. Espectro de la región S6.	28
4.2. Espectro de la región S6 de D. Williams. Fuente: [2] [3].	28
4.3. Espectro de la región S6 del MIT. Fuente: [3].	28
4.4. Espectro de la región S8.	29
4.5. Espectro de la región S8 de D. Williams. Fuente: [2] [3].	29
4.6. Espectro de la región S8 del MIT. Fuente: [3].	29
4.7. Espectro de la región S9.	30
4.8. Espectro de la región S9 de D. Williams. Fuente: [2] [3].	30
4.9. Espectro de la región S9 del MIT. Fuente: [3].	30
4.10. Espectro de la región S9. $T_{sys} = 208[K]$	32
4.11. Espectro de la región S9. $T_{sys} = 82[K]$	33
4.12. Espectro de la región S9. $T_{sys} = 62[K]$	33
4.13. Espectro de la región S9 de J. Donoso. Fuente: [4].	34

4.14. Diagrama de bloques de la interconexión para la obtención de las primeras franjas interferométricas.	36
4.15. Primeras franjas interferométricas DIE.	37
4.16. Gráfico potencia promedio de una sola antena en paralelo a la prueba interfeferométrica.	37
4.17. Distribución rectangular uniforme. Fuente: [5].	38
4.18. Gráfico de la función de visibilidad. Fuente: [5].	38
4.19. Ajuste de función de visibilidad V con los datos de potencia promedio en valor absoluto, en función de la apertura del interferómetro.	40
4.20. Ajuste de función de visibilidad V con los datos de potencia promedio, en función de la apertura del interferómetro.	41
4.21. Evolución de la apertura, azimut y elevación del interferómetro en función del tiempo [UTC-4].	41
4.22. Medición online de la distancia entre las bases de las antenas.	42
4.23. Medición online referencia para cálculo de error.	42
4.24. Geometría de un interferómetro elemental. Fuente: [5].	42
4.25. Variación del radio del disco solar respecto de la frecuencia.. Fuente: [6].	42
4.26. Rango de error en la determinación del punto de inflexión para muestras experimentales.	44
4.27. Rango de error en la determinación del cero para curva teórica.	44
5.1. Curva de rotación galáctica tomada con el nuevo SRT en el MIT. Fuente: [3].	50
5.2. Modelo teórico aproximado para la observación del plano galáctico desde la tierra. Fuente: [7].	50
5.3. Espectro acumulado ejemplo para longitud $l = 30$. Fuente: [7].	52
6.1. Mapa de potencia logarítmico antena poniente.	57
6.2. Potencia promedio en función del ángulo azimutal. Fuente: [1].	58
6.3. Espectro de la región S6	59
6.4. Espectro de la región S8	59
6.5. Espectro de la región S9	59

6.6. Ajuste de función de visibilidad V con los datos de potencia promedio en valor absoluto, en función de la apertura del interferómetro.	60
A.1. Mapa de potencia escala normal antena poniente.	VII
A.2. Mapa de potencia saturado escala normal antena poniente.	VII
A.3. Mapa de potencia saturado escala logarítmica antena poniente.	VII
A.4. Mapa de potencia escala normal antena oriente.	VIII
A.5. Mapa de potencia saturado escala normal antena oriente.	VIII
A.6. Mapa de potencia saturado escala logarítmica antena oriente.	VIII

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Esta memoria busca la puesta en marcha de un interferómetro, mediante la integración y extensión de proyectos relacionados, con el fin de servir como herramienta de formación para ingenieros y astrónomos, y dada la necesidad de profesionales capacitados en estas materias.

La segunda región de Chile ha sido históricamente uno de los territorios más importantes para la observación astronómica. La llegada de importantes proyectos internacionales como ALMA (“Atacama Large Millimeter/submillimeter Array”) y E-ELT (“European Extreme Large Telescope”), ha generado una fuerte demanda de profesionales especializados en distintas ramas de la ingeniería, para el desarrollo, mantenimiento y operación de estos observatorios.

En este contexto es que el Departamento de Ingeniería Eléctrica decide diseñar e implementar un interferómetro de dos antenas, con el propósito de ser utilizado en la formación de futuros ingenieros y astrónomos.

Al momento de iniciar la memoria se contaba con dos radiotelescopios instalados, pero no operativos, y tres memorias de ingeniería, en las que se diseñaron e implementaron componentes del interferómetro. Éstas son:

- **José D.** (2005): Implementación de un Radiotelescopio para la Escuela de Ingeniería y Ciencias [12].
- **Jaime F.** (2010): Diseño y Construcción de la Etapa Analógica de un Interferómetro de Dos Antenas [11].
- **Mauricio C.** (2010): Diseño de un Sistema de Procesamiento para Correlación y Espectrometría en Radio Astronomía Basado en ASIC y FPGA [25].

Lo que motivó esta memoria fue la necesidad de integración y puesta en marcha de todo el sistema, para darle uso docente en el corto plazo. Esto implicó realizar los arreglos necesarios para el correcto funcionamiento de los componentes, e iniciar la integración de éstos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Realizar la puesta en marcha del proyecto de interferometría con dos antenas del Departamento de Ingeniería Eléctrica, hasta la etapa analógica.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar las observaciones astronómicas que permitan comprobar el buen funcionamiento del radiotelescopio como antena singular.
- Implementar un interferómetro sumador simple, realizando la integración del sistema y observaciones astronómicas que permitan comprobar su buen funcionamiento.
- Diseñar e implementar herramientas computacionales para la reducción y análisis de los datos recopilados.
- Idear y redactar experiencias docentes que pueden llevarse a cabo con los radiotelescopios y el interferómetro en su estado actual.

1.3. Estructura de la memoria

La estructura del trabajo realizado es la siguiente:

- **Capítulo 2. Antecedentes:** Se entregan los conceptos necesarios para entender el contexto y desarrollo del trabajo.
- **Capítulo 3 y 4. Desempeño del Radiotelescopio y Observaciones Astronómicas:** Descripción, desarrollo, resultados y análisis de las pruebas de observación astronómicas, necesarias para la implementación de la etapa analógica del interferómetro.
- **Capítulo 5. Trabajos Futuros:** Descripción y desarrollo de los lineamientos para continuar con el trabajo de implementación del interferómetro.
- **Capítulo 6. Conclusiones:** Conclusiones respecto de los objetivos planteados y resumen de los resultados obtenidos.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Radio Astronomía

2.1.1. Radiación de Cuerpo Negro y Temperatura de Brillo

Un cuerpo negro es la representación ideal de un cuerpo que absorbe toda la radiación electromagnética que incide sobre el, sin importar su frecuencia o ángulo de incidencia. En equilibrio termodinámico con su entorno, su espectro de emisión depende solo de su temperatura según la ecuación de radiación de *Plank*. El trabajo en la banda de radio permite realizar una aproximación de la ecuación, de donde se obtiene la expresión conocida como la ley de *Rayleigh-Jeans*, en donde el brillo y la temperatura son estrictamente proporcionales. La temperatura en esta expresión se conoce también como temperatura de brillo y constituye una manera útil de aproximar la temperatura de los cuerpos observados.

Referencias: *Tools of Radioastronomy* (1.5) [8], *Radio Astronomical Tutorial* (5.2) [9], *Essential Radio Astronomy* (2.C) [10], memoria J. Fariña (2.1.2) [11] y memoria J. Donoso (2.3.2) [12].

2.1.2. Línea Espectral del Hidrógeno

Corresponde a la radiación electromagnética emitida por el hidrógeno neutro cuando el espín relativo cambia de orientación antiparalela a paralela o viceversa. Esta radiación corresponde a una frecuencia de $\nu = 1420.405751[MHz]$ o longitud de onda $\lambda = 21.11[cm]$.

El hidrógeno corresponde al elemento mas abundante del universo que se encuentra en la banda de radio, es por esto que es muy utilizado para todas las pruebas básicas de radioastronomía. Los radiotelescopio del Departamento de Ingeniería Eléctrica están fabricados para observar esta emisión y la banda se encuentra reservada para la radioastronomía.

Referencias: *Tools of Radioastronomy* (12.1) [8] y *Essential Radio Astronomy* (7.E) [10].

2.1.3. Efecto Doppler en la Astronomía

Es el cambio en la frecuencia de las ondas electromagnéticas, debido al movimiento relativo de la fuente respecto del observador.

Dado que en general la velocidad radial $v_r \ll c$, es posible utilizar la expresión no relativista del efecto Doppler para calcular esta velocidad, para una línea de frecuencia observada (ver ecuación 2.1).

$$\frac{v_r}{c} = \frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0} \quad (2.1)$$

La velocidad radial de una fuente astronómica está sujeta a distintos efectos de proyección. Estos incluyen:

- La rotación y traslación de la Tierra.
- La traslación del Sol respecto del centro de la galaxia.
- La traslación de la galaxia en el grupo local.

Con el fin de poder comparar las mediciones realizadas por distintos observatorios y en distintas frecuencias se determina un punto estándar de reposo local (LSR). Todos los efectos mencionados anteriormente son incluidos dentro de una velocidad de referencia llamada "Velocidad respecto del Estándar de Reposo Local" (VLSR). De esta forma la velocidad radial observada de una fuente estará dada por:

$$v_r = v + VLSR \quad (2.2)$$

con v la velocidad de la fuente respecto al LSR y $VLSR$ la suma de las proyecciones de traslación del observador respecto del LSR. Luego:

$$v = \frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0} \cdot c - VLSR \quad (2.3)$$

Referencias: *Velocity Reference Frames Used in Radio Astronomy* [13], *Radio Astronomical Tutorial* (5.2.3) [9] y *Essential Radio Astronomy* (7.E) [10].

2.2. Antenas

2.2.1. Ancho de Haz

El ancho de haz (“*beamwidth*”) corresponde al tamaño angular del lóbulo principal en el diagrama de radiación de una antena. La medida a nivel de potencia media (HPBW “*half power beam width*”) es la referencia más utilizada y a la que se hará referencia cada vez que se mencione el ancho de haz.

Referencias: memoria J. Donoso (2.4.2) [12], *Tools of Radioastronomy* (7.1.2) [8] y *Essential Radio Astronomy* (3.B, 3.C) [10].

2.2.2. Eficiencia de Antena y dilución del haz (*beam dilution*)

En términos simples, la “*eficiencia de antena*” se define como la razón de la temperatura recibida sobre la temperatura de la fuente y es por definición, una función del tamaño angular y forma de la fuente¹. Un parámetro más útil, y que será utilizado en esta memoria, corresponde al *beam dilution*. Se define de la misma forma que la “*eficiencia de antena*” pero como función del diámetro de una fuente circular en donde este diámetro esta medido en *beamwidths* de la antena.

El gráfico de la fig. 2.1 muestra de manera aproximada como se comporta el *beam dilution* a medida que el diámetro de la fuente aumenta en *beamwidths* de la antena que la observa. En palabras simples, mientras mas pequeño sea el *beamwidth* respecto del diámetro de la fuente que observa, mejor será la razón entre la potencia de la fuente y la recibida.

Referencias: *Radio Astronomical Tutorial* (5.3.3) [9].

¹Existen definiciones más precisas pero menos útiles para las aplicaciones de esta memoria.

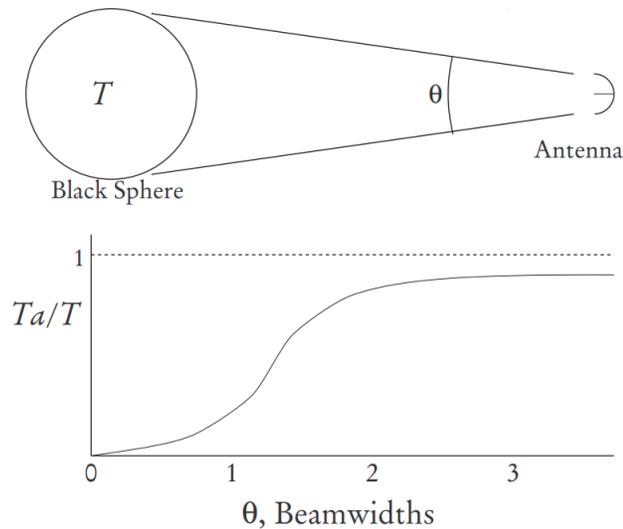


Figura 2.1: Factor de dilución de haz (*Beam Dilution Factor*). Fuente: [9].

2.3. Receptores

2.3.1. Receptor Heterodino

Dispositivo que permite desplazar en frecuencia el espectro observado, obteniéndose representaciones del mismo centradas en frecuencias superiores o inferiores. En particular para las aplicaciones de radioastronomía, se utiliza para llevar el espectro a una frecuencia menor donde sea posible utilizar la electrónica corriente, para el muestreo y transmisión digital de la señal.

Referencias: memoria J. Fariña (2.4) [11], memoria J. Donoso (2.5.1) [12] y *Radio Astronomical Tutorial* (6.3) [9].

2.3.2. Temperatura de Sistema

Corresponde a la combinación lineal de las fuentes de ruido asociadas a todas las partes del sistema del radiotelescopio y que constituye así el piso de ruido en las observaciones. Las fuentes de ruido corresponden a: el receptor, el “*spillover*”², la atmósfera y las líneas de transmisión.

Referencias: memoria J. Donoso (2.5.3) [12] y *Radio Astronomical Tutorial* (6.3) [9].

²Radiación no deseada que se acopla al sistema a través de lóbulos secundarios.

2.4. Descripción del Sistema Instalado

El Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile cuenta con dos radiotelescopios pequeños (SRT “small radio telescopes”)³ instalados en la azotea del mismo departamento.

Citando a José D. [12]:

“El SRT (*Small Radio Telescope*) consiste en una antena de televisión satelital estándar movida por una montura altazimut motorizada y un receptor capaz de realizar observaciones en el continuo y de línea espectral en la banda L (1400-1440 MHz). Este arreglo permite al observador realizar seguimiento de fuentes astronómicas y mapas de contorno del cielo de baja resolución ($\sim 7^\circ$).”

Referencias: memoria J. Donoso (3) [12] y memoria J. Fariña (3.2) [11].

2.5. Interferometría

Proceso mediante el cual se utiliza un arreglo de dos o más antenas para realizar una observación con **mayor detalle angular** de la emisión de radio proveniente del cielo. Este procedimiento además resuelve algunos problemas prácticos de la medición con un solo disco, tales como: vulnerabilidad a las fluctuaciones atmosféricas y ganancia del receptor, interferencia en la banda de radio frecuencia y correcciones en la localización debido a refracción atmosférica.

Referencias: *Interferometry and Synthesis* (1.1, 1.2, 1.3) [5], *Essential Radio Astronomy* (3.F) [10], memoria J. Fariña (2.3) [11] y *Tools of Radioastronomy* (9) [8].

³Los radiotelescopios fueron fabricados por el “Massachusetts Institute of Technology” (MIT) para ser utilizados como herramientas docentes en astronomía y radio-tecnología.

Capítulo 3

Desempeño del Radiotelescopio

3.1. Problemas de Interferencia

3.1.1. Descripción

La existencia de interferencia en la banda estudiada es supuesta en principio por: la variabilidad con respecto a los resultados esperados de las pruebas de observación y mapas de potencia *npoint* [14]; el errático estado del espectro instantáneo de frecuencia *Discrete Spectrum* [14]; los antecedentes aportados por José Donoso en su “*Manual de Supervivencia para el Radiotelescopio de la Escuela de Ingeniería y Ciencias*” [4].

Se propone realizar mediciones equi espaciadas del cielo observable por el radiotelescopio (*Small Radio Telescope* y en adelante SRT) con el mismo instrumento. Luego reducir los datos y graficar un mapa de potencia¹, que permita discriminar las regiones con emisiones fuera del rango normal.

3.1.2. Objetivos

3.1.2.1. Objetivo General

- Realizar un mapa de potencia para la emisión del hidrógeno neutro de todo el cielo observable por el SRT, mediante la reducción y gráfica de los datos obtenidos por el mismo instrumento.

¹Esta potencia corresponde a un promedio de la potencia del espectro capturado por el SRT y depende del ancho de banda predeterminado para la prueba.

3.1.2.2. Objetivos específicos

- Programar un script que de la orden al SRT de recorrer y tomar una muestra del cielo observable en intervalos de 5° , tanto en elevación como azimut. Se debe además ajustar la frecuencia central a $1420.4 [MHz]$ correspondiente a la emisión del hidrógeno.
- Programar un script en Python para la reducción y análisis de los datos recopilados.
- Realizar un levantamiento del horizonte de ambas antenas para poder identificar posibles fuentes de interferencia.

3.1.3. Desarrollo

El script desarrollado para manejar el SRT puede ser consultado en el anexo A.1. Para el correcto desarrollo de esta actividad se debe considerar lo siguiente:

- Revisar el manual de usuario [14] para entender como ejecutar un script en el software del SRT.
- Con el fin de que el software detecte el script el nombre debe ser *"srt.cmd"*.
- La extensión de los archivos donde se almacenan las mediciones es *".rad"*.
- Si el nombre del archivo ya existe cuando se ejecuta el script, el software **no** guardará información alguna y se mantendrá el archivo anterior.
- Tomar en cuenta los límites físicos del radiotelescopio.
- Antes de comenzar las mediciones: seleccionar una frecuencia central y modo de observación², ubicar una región con baja interferencia del cielo y calibrar el radiotelescopio. Todas estas instrucciones están incorporadas en el script y su funcionamiento debe ser comprobado. De no funcionar es posible comentar esas líneas de código y realizarlas manualmente en el software antes de ejecutar el script.

El script en python desarrollado para la reducción y gráfica de los datos puede ser consultado en el anexo A.2. En términos generales el script lee el archivo de extensión *".rad"*, almacena de manera temporal los datos en una matriz, obtiene el promedio de potencia para cada medición y finalmente grafica este promedio en su correspondiente coordenada de azimut y elevación.

El levantamiento del horizonte consiste en realizar una estimación de la cobertura angular de edificios, antenas u otros elementos que puedan ser fuente de interferencia o interrupción de las señales espaciales. Incluyendo caracteres del estilo *" . _ |"* en el archivo de configuración del SRT (ver anexo A.3) es posible dibujar una estimación de este horizonte.

²Se mantiene la notación del software. El modo de observación corresponde al ancho de banda seleccionado.

3.1.4. Resultados

Los resultados muestran potencias en el horizonte entre $6000[K]$ a $7000[K]$ lo que corresponde a un orden de magnitud superior a lo esperado. Debido a esto se realizan cuatro gráficos: escala normal, escala normal saturada (el valor máximo permitido son $2000[K]$), escala logarítmica y escala saturada logarítmica. Esta prueba se realizó varias veces en un periodo de tiempo prolongado. Las figuras 3.1 y 3.2 corresponden al mapa de escala logarítmico de una prueba realizada el 4 de mayo del 2012 de las antenas oriente y poniente respectivamente. El estado del cielo, así como su horizonte pueden apreciarse en las figuras 3.3 y 3.4.

Los gráficos de escala normal y saturada, se encuentran en el anexo A.4.

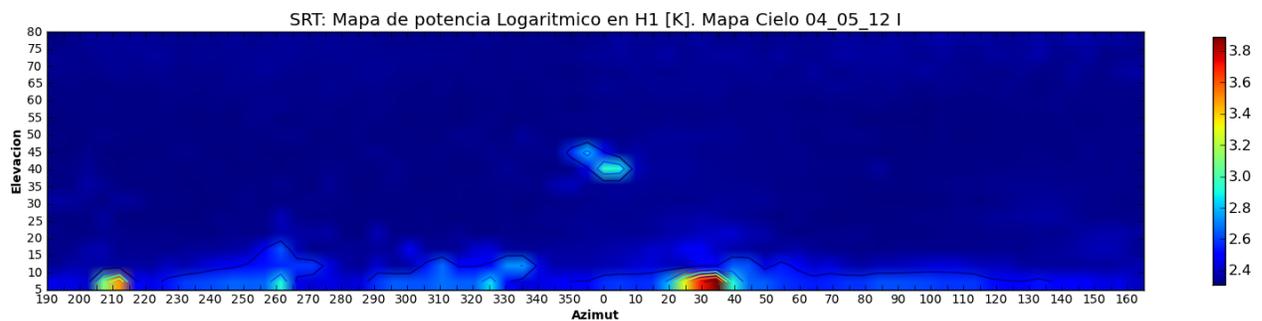


Figura 3.1: Mapa de potencia logarítmico antena oriente.

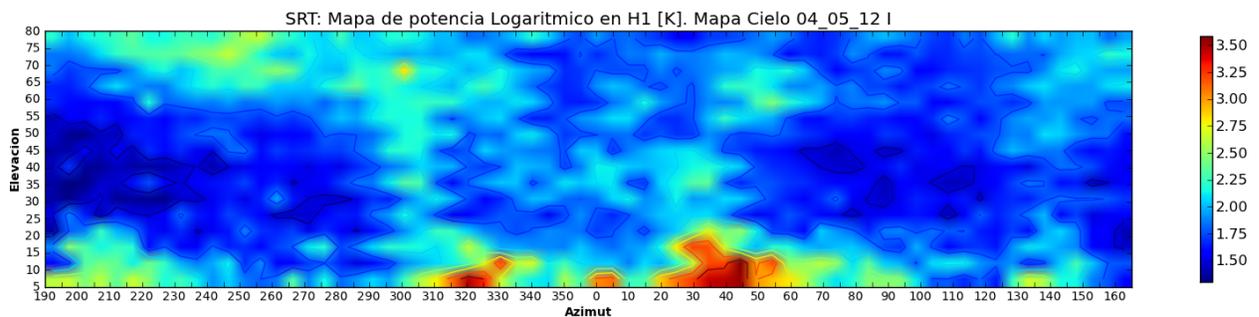


Figura 3.2: Mapa de potencia logarítmico antena poniente.

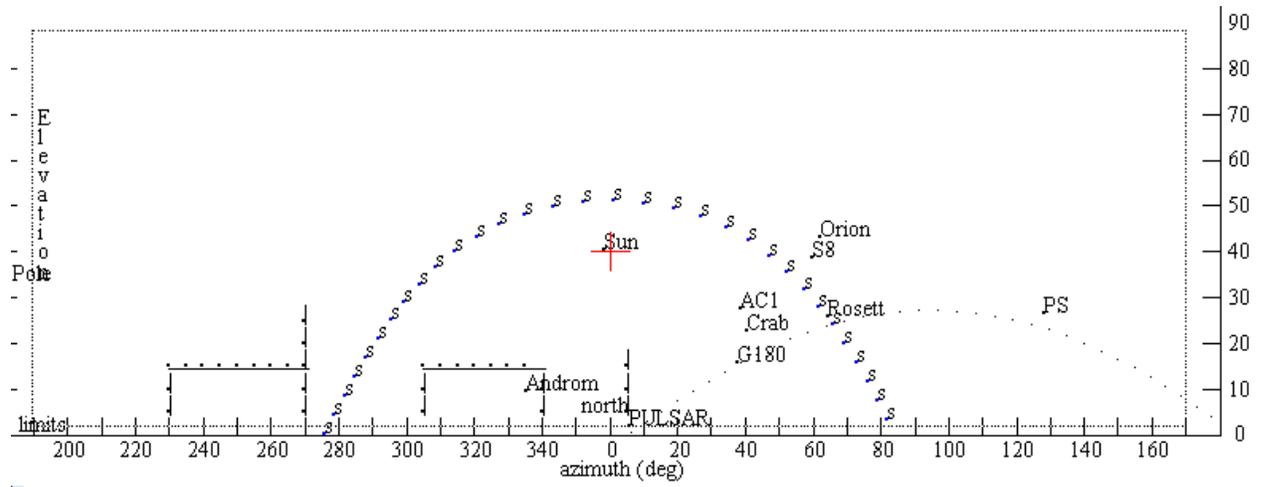


Figura 3.3: Estado del cielo y horizonte antena oriente.

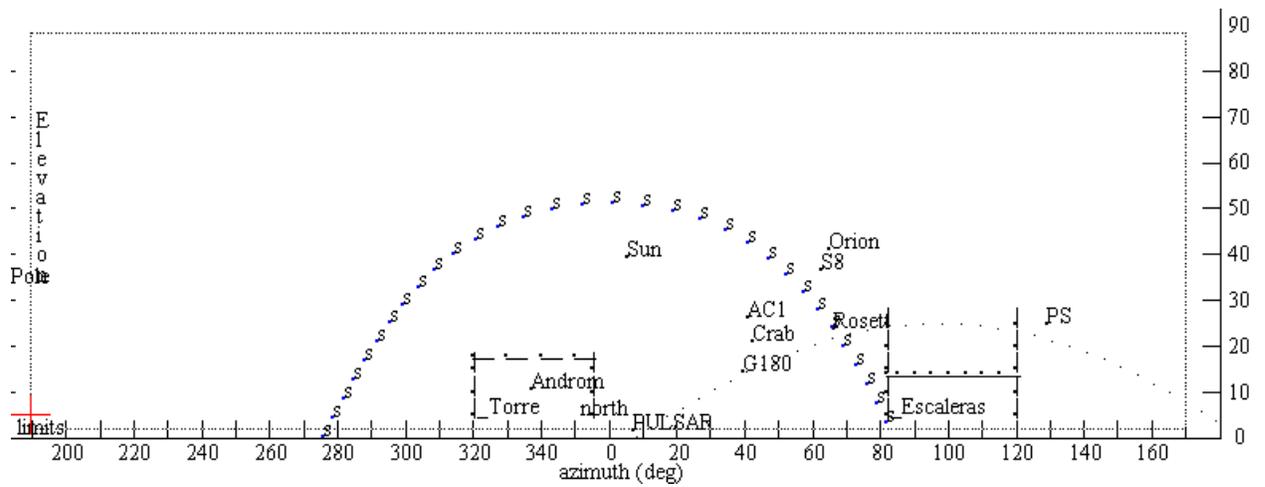


Figura 3.4: Estado del cielo y horizonte antena poniente.

3.1.5. Discusión

Los mapas mostrados en la sección anterior corresponden, por experiencia propia del autor de esta memoria, a una muestra representativa de los resultados obtenidos. Sin embargo estas pruebas fueron realizadas en su mayoría con la antena poniente. Las pruebas de la antena oriente por tanto son escasas y no han sido analizadas profundamente.

Se identifican zonas de contaminación permanente de distintos niveles de potencia. Los sectores rectangulares principales son: interferencia fuerte $Az = \{300^\circ - 100^\circ\}$, $El = \{5 - 25\}$ (sector rojo en el centro del mapa de la fig. 3.2) e interferencia media $Az = \{300^\circ - 60^\circ\}$, $El = \{25^\circ - 80^\circ\}$ y $Az = \{190^\circ - 300^\circ\}$, $El = \{55^\circ - 80^\circ\}$ (sector calipso/amarillo en el centro y sector superior izquierdo del mapa de la fig. 3.2).

La fuente de interferencia fuerte no ha sido identificada, sin embargo, en principio no representa un gran problema. Se recomienda realizar las observaciones por sobre los 25° de elevación para evitar cualquier intrusión en la banda en estudio desde esta fuente o el entorno cívico cercano.

La fuente de interferencia media tampoco ha sido identificada. La idea de que esta emisión fuese de nuestra galaxia fue descartada por la estaticidad de la fuente en las diferentes pruebas y los niveles de potencia muy por sobre lo esperado [15]. La última hipótesis que se maneja al respecto se relaciona con la interferencia fuerte del horizonte (sector rojo de la fig. 3.2) entrando por lóbulos secundarios de la antena.

Se identifican zonas frías del cielo que coinciden con los sectores donde se obtuvieron buenos resultados de las pruebas básicas de *npoint* [14]. Los sectores rectangulares son $Az = \{190^\circ - 280^\circ\}$, $El = \{25^\circ - 60^\circ\}$ y $Az = \{60^\circ - 120^\circ\}$, $El = \{25^\circ - 55^\circ\}$. En lo sucesivo solo se utilizarán estos sectores para realizar todo tipo de observación astronómica.

De manera anexa a este estudio se han identificado dos fuentes de interferencia intermitente:

- Contaminación por radares presentes en los aeropuertos de la región metropolitana. Se puede revisar un estudio detallado al respecto en el “*Manual de Supervivencia*” de José D. [4].
- Contaminación por emisión de teléfonos celulares. Se produce cuando estos equipos abren el canal de transmisión a una distancia de algunos metros a la redonda del radiotelescopio. Los niveles de potencia introducidos están muy por sobre el rango de estudio, distorsionando toda la medición.

3.2. Medición del Ancho de Haz de la Antena

3.2.1. Descripción

Como se referenció en la sección 2.2, el ancho de haz de una antena (“*beamwidth*”) corresponde al ángulo sólido entre los puntos de media potencia del lóbulo principal de su patrón de radiación (ver fig.3.5).

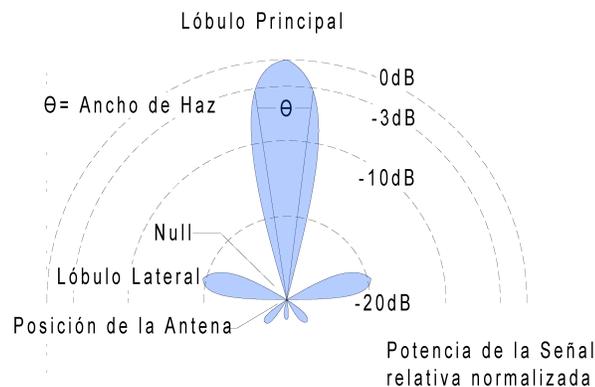


Figura 3.5: Patrón de radiación de una antena estándar.

Esta experiencia fue implementada a modo de prueba dentro del curso “EL7026 - Sistemas de Instrumentación Astronómica” del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile dictado por el profesor Ernest Michael en los semestres de primavera 2011 y primavera 2012. Esta fue desarrollada correctamente por un grupo de estudiantes y se adjunta como anexo a esta memoria (ver anexo A.5). Por lo anterior, esta sección se remitirá solo a un resumen de la misma.

3.2.2. Resultados

El procedimiento original para realizar este experimento consiste en, para una elevación constante, mover el eje focal de la antena sobre la dirección azimutal en un rango aproximado de -30° a $+30^\circ$ con la fuente en la posición cero y a un paso de 1° , esta prueba toma aproximadamente cinco minutos y acumula un total de sesenta y un datos. Debido a la presencia de interferencia y la poca cantidad de mediciones que recopila esta prueba, los resultados son erráticos y no entregan información suficiente. Lo anterior motiva a cambiar a una prueba de posición fija que se resume en:

- Seleccionar una región fría del cielo, es decir, con baja interferencia (ver sección 3.1).
- Definir el intervalo de tiempo disponible para la medición.
- Estimar la posición del sol durante el intervalo de tiempo y con esto el rango azimutal a recorrer.
- Ubicar el radiotelescopio a la mitad de dicho intervalo.

Esta prueba en comparación a la anterior toma cerca de seis horas y registra alrededor de ochocientos datos, lo que entrega una mayor precisión.

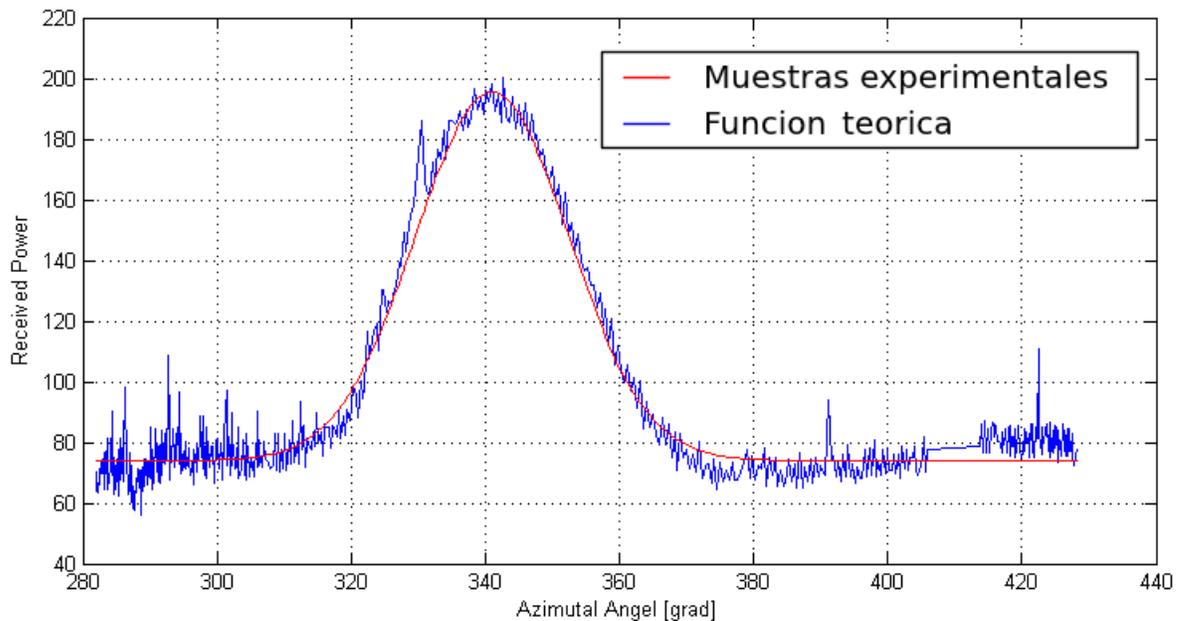


Figura 3.6: Potencia promedio en función del ángulo azimutal. Fuente: [1].

La fig. 3.6 muestra la potencia promedio del espectro observado en función del ángulo azimutal del sol. Debido a que el sol no varía de forma uniforme en esta dirección es necesario realizar una corrección de coordenadas.

Los puntos de potencia media obtenidos del gráfico de la fig. 3.6 son $Az = 357.74^\circ$ $El = 78.1^\circ$ y $Az = 325.24^\circ$ $El = 75.8^\circ$. Realizando el cambio de coordenadas respectivo, los ángulos corregidos son $Az = 73.56^\circ, 79.78^\circ$. El ancho de haz corresponde a la diferencia de estos y es de 6.22° . Teóricamente el HPBW (del inglés *Half Power Beam Width*) para antenas parabólicas es de aproximadamente $70\frac{\lambda}{d}$, con λ la longitud de onda (en este caso $21[cm]$ para la emisión del Hidrógeno) y d el diámetro del disco (en este caso $2.3[m]$) lo que entrega un resultado de 6.39° . El resultado medido recientemente (verano 2012) por el MIT Haystack Observatory corresponde a 6.5° [3].

3.2.3. Discusión

Esta experiencia fue resuelta de manera adecuada logrando resultados cercanos a los teóricos por lo que no merece una discusión al respecto. Una solución alternativa puede revisarse en los proyectos sugeridos por el MIT Haystack Observatory [16].

Capítulo 4

Observaciones Astronómicas

4.1. Regiones Estándar de Observación en H1

4.1.1. Descripción

En 1973 David R. Williams del laboratorio de radioastronomía de la Universidad de California, realizó un estudio de cuatro regiones para ser usadas como estandar en la observación en 21-cm [2].

Como una manera de comprobar el buen funcionamiento de los radiotelescopios se decide realizar mediciones de estas regiones y compararlas con la bibliografía. Se cuenta además con dos referencias adicionales de la medición de estas regiones con el SRT:

- Medición de la región S9 con el SRT. “*Manual de Supervivencia*” de José D. [4]
- Medición de las regiones S6, S7, S8, S9 con el SRT. “*Development of a New Generation Small Radio Telescope* por el MIT. [3].

4.1.2. Objetivos

4.1.2.1. Objetivo General

- Realizar mediciones con el SRT para $21 - cm$ en las regiones estandar de observación y compararlas con los resultados de la bibliografía, verificando el correcto funcionamiento del radiotelescopio.

4.1.2.2. Objetivos Específicos

- Tomar mediciones por intervalos de tiempo entre 20 y 30 minutos, de las regiones que sean visibles en el periodo destinado al experimento y fijando la frecuencia central en la emisión del hidrógeno neutro.
- Realizar un script en python para la reducción, filtrado y gráfica de los datos recopilados.
- Comparar los resultados con la bibliografía existente.

4.1.3. Desarrollo

4.1.3.1. Ingreso de las Fuentes al Software del SRT

Se modifica el archivo de configuración *srt.cat* (ver anexo A.3) incluyendo las coordenadas galácticas de las regiones a estudiar [2] [14].

4.1.3.2. Determinación del Horario de Medición

Se modifica el archivo de configuración del software del SRT para ejecutar una simulación con las regiones de interés. Se toma nota de los horarios en los que las fuentes estarán disponibles dentro de zonas con baja interferencia (ver sección 3.1).

4.1.3.3. Medición de las Fuentes

Utilizando un mapa de las interferencias presentes en el cielo del SRT (ver sección 3.1) se ubica una zona fría para realizar la calibración.

Se selecciona la fuente a medir y se comienza el registro de los datos [14].

4.1.3.4. Reducción, Filtrado y Gráfica de los Datos

Se realiza con un script de python escrito para estos efectos (ver anexo B.2). El procedimiento es el siguiente:

- El script lee el archivo de extensión “.rad” generado por el software del SRT y almacena temporalmente los datos en una matriz.
- Se genera un vector con los promedios de potencia de cada espectro y se grafica en función del tiempo.
- El gráfico de potencia versus tiempo se utiliza para revisar la medición. Se identifican periodos de interferencia, así como mediciones puntuales fuera de rango. Se realizan dos tipos de filtrado manual a las muestras:
 1. **Filtro de sección:** Se seleccionan los periodos de tiempo donde las mediciones fueron regulares.
 2. **Filtro de amplitud:** Se establece una potencia máxima en relación a las muestras regulares.
- Se integran¹ los espectros de las mediciones seleccionadas y se grafican los resultados.

4.1.4. Resultados

Debido a la época del año en el que se realizaron las mediciones, no fue posible medir la región S7. Se presentan a continuación los resultados obtenidos para las regiones S6, S8 y S9.

¹En este caso la integración corresponde al promedio simple de cada franja de frecuencia de entre todos los espectros instantáneos.

4.1.4.1. Región S6

Tabla 4.1: Datos S6.

Región:		S6	
Coordenadas		$l = 1^{\circ}.91$	$b = +41^{\circ}.42$
	V. del Peak	Peak de T. ^o	
D. Williams	$-0.5[km/s]$	$45[^{\circ}K]$	
MIT	$-5[km/s]$	$33[^{\circ}K]$	
Propio	$+0.72[km/s]$	$16[^{\circ}K]$	

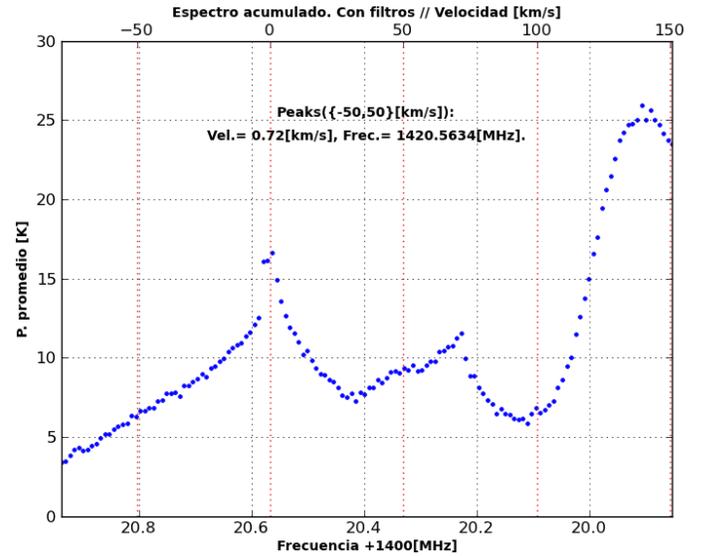


Figura 4.1: Espectro de la región S6.

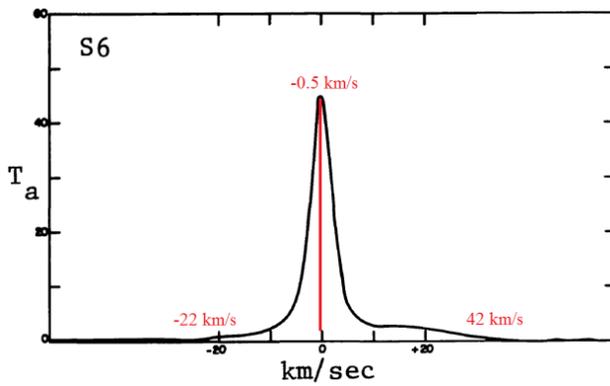


Figura 4.2: Espectro de la región S6 de D. Williams. Fuente: [2] [3].

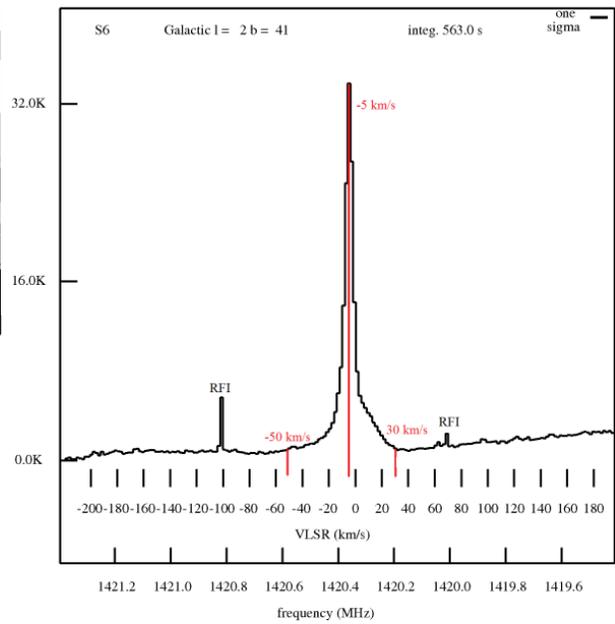


Figura 4.3: Espectro de la región S6 del MIT. Fuente: [3].

4.1.4.2. Región S8

Tabla 4.2: Datos S8.

Región:	S8	
Coordenadas	$l = 207^{\circ}.00$	$b = -15^{\circ}.00$
	V. del Peak	Peak de T. ^o
D. Williams	+7[km/s]	63[°K]
MIT	+6[km/s]	52[°K]
Propio	+7.7[km/s]	18[°K]

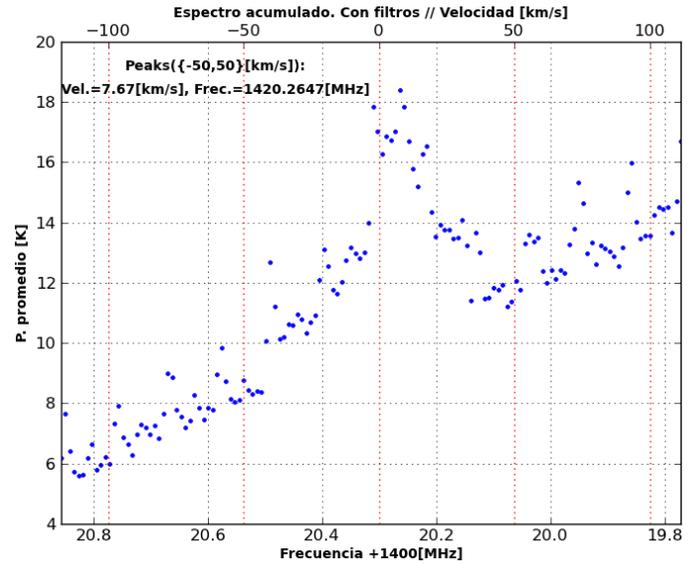


Figura 4.4: Espectro de la región S8.

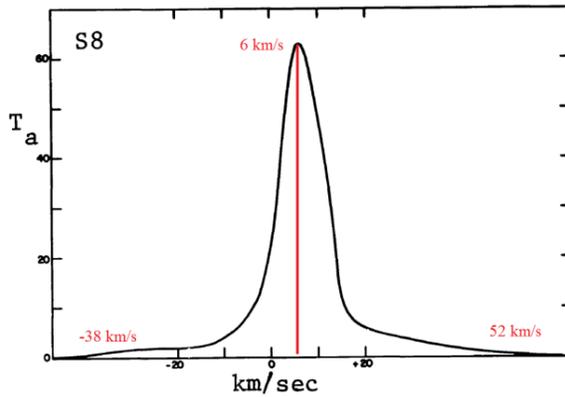


Figura 4.5: Espectro de la región S8 de D. Williams. Fuente: [2] [3].

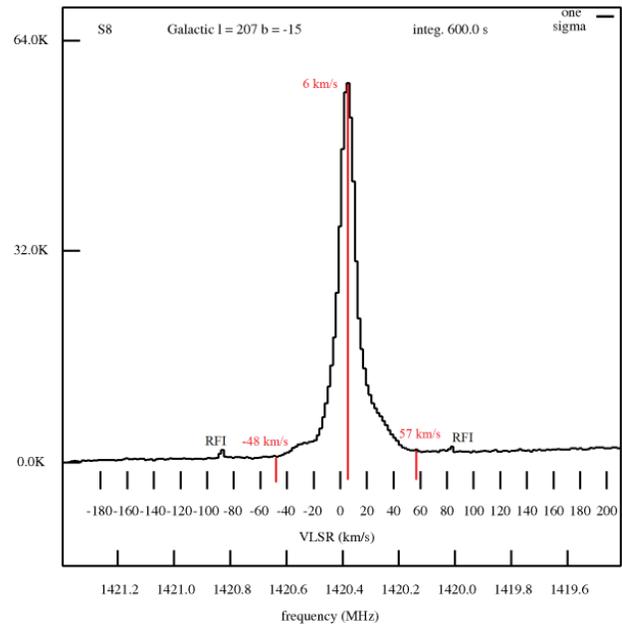


Figura 4.6: Espectro de la región S8 del MIT. Fuente: [3].

4.1.4.3. Región S9

Tabla 4.3: Datos S9.

Región:	S9	
Coordenadas	$l = 356^{\circ}.00$	$b = -4^{\circ}.00$
	V. del Peak	Peak de T. ^o
D. Williams	+6[km/s]	74[°K]
MIT	+1[km/s]	60[°K]
Propio	+3.17[km/s]	21[°K]

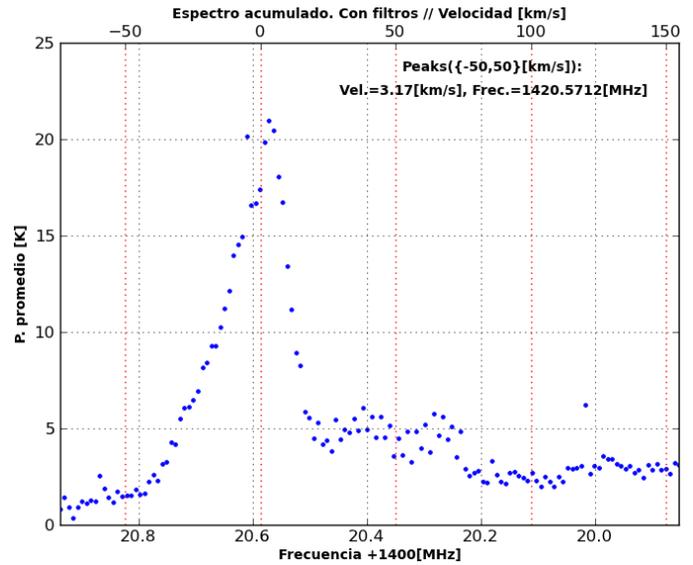


Figura 4.7: Espectro de la región S9.

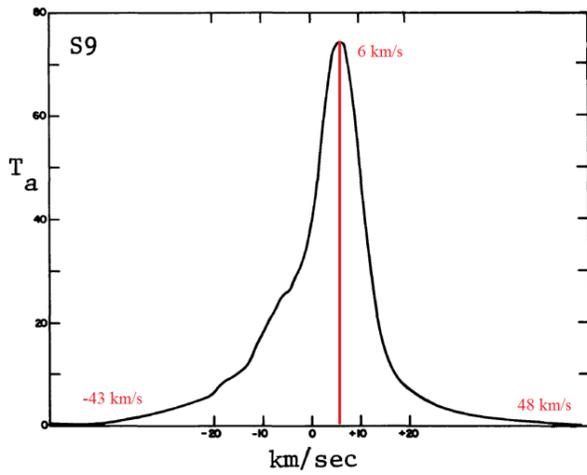


Figura 4.8: Espectro de la región S9 de D. Williams. Fuente: [2] [3].

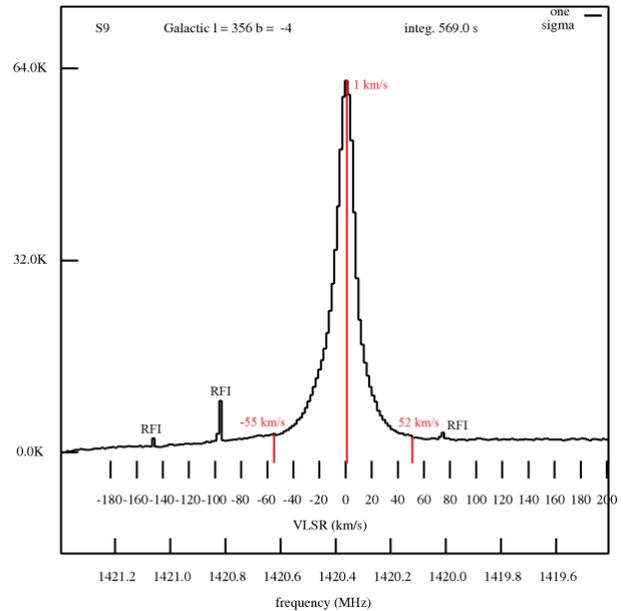


Figura 4.9: Espectro de la región S9 del MIT. Fuente: [3].

4.1.5. Discusión

Dado el propósito académico para el cual fue construido el SRT, solo la forma y ubicación de algunas características espectrales pueden ser comparadas con los resultados de D. Williams [2]. La principal diferencia radica en que el disco del SRT tiene un diámetro de $2.3[m]$, mientras que el radiotelescopio “*Hat Creek 85-foot*” uno de $26[m]$. Esto incide directamente en el ancho de haz de la antena siendo el HPBW de 6.22° para el SRT (ver capítulo 3.2) y 0.58° para el “*Hat Creek 85-foot*” [3]. Suponiendo que el HPBW del SRT es mayor que el tamaño angular de las regiones, las temperaturas serán consecuentemente mas bajas, que las obtenidas por D. Williams debido al factor de dilución de haz (“*beam dilution factor*” 2.2.2).

Respecto de la posición de las formas en el eje de velocidad, es posible notar que las medidas son correspondientes. Las diferencias con la bibliografía son mínimas y se encuentran dentro de los rangos de error esperados. El ancho de una ventana de frecuencia es de $7.8125[KHz]$ para las mediciones del SRT. Esto produce un error de $\pm 1.65[km/s]$. Uno de los proyectos del MIT propone una estimación del error en la velocidad de $\pm 10[km/s]$ [7], aunque sin referencia o cálculo alguno en el documento.

Tomando como referencia los resultados del MIT, la amplitud obtenida corresponde, en el mejor de los casos (región S9 4.1.4.3), a un 30 % de lo esperado. Considerando que los equipos utilizados para esta memoria son esencialmente los mismos que los del MIT, es posible reconocer dos factores que podrían incidir en el problema: interferencia y calibración². La interferencia, sin embargo, solo podría contribuir a aumentar la temperatura de antena pues la integración de regiones frías del espacio captadas por el *beamwidth* es esencialmente lo que disminuye la temperatura de antena.

Por otra parte, una calibración inadecuada incide directamente en una escala errónea de temperatura. Las diferencias entre las temperaturas de sistema medidas (entre $60[K]$ y $90[K]$) versus la expuesta por el MIT en su reporte final [3] de $171[K]$, muestran en definitiva que la calibración es inadecuada dado que los equipos son esencialmente los mismos.

Con el objetivo de tener una medida adecuada de la temperatura de sistema, se realizó una calibración manual al radiotelescopio obteniendo los resultados de la tabla 4.4. Esta operación es complicada y requiere de mucho tiempo, razón por la cual solo se obtuvieron cinco muestras. El promedio de las temperaturas obtenidas (sin considerar el valor más alto y el más bajo) corresponde a $197[K]$. El no considerar este valor como una temperatura de sistema válida (dado el reducido número de muestras) no impide suponer que el valor final debería ser cercano en $\pm 30[K]$ considerando la dispersión de los datos. Este valor esta aproximadamente a $100[K]$ de diferencia con los valores utilizados para las pruebas.

²El efecto de la resolución del radiotelescopio ya ha sido considerado en las diferencias entre las medidas de D. Williams y el MIT.

Tabla 4.4: Resultados calibración manual.

Coordenadas $az = 220^\circ$ $el = 30^\circ$			
Medición	$T_{sys}[K]$	$T_{cielo}[K]$	$T_{absorver}[K]$
1	273	244	679
2	150	139	354
3	181	170	473
4	178	156	344
5	233	212	-

Como una forma de comprobar la hipótesis de que la calibración esta influyendo de manera negativa sobre las mediciones, se decide realizar nuevamente la medición de la región S9. Para esta medición se modifica el parámetro “NoiseCal” del archivo de configuración A.3 para obtener una temperatura de sistema cercana al promedio antes calculado. Las figuras 4.10, 4.11 y 4.12 muestran los resultados para tres mediciones de la región S9 a diferentes temperaturas de sistema. La tabla 4.5 resume las diferencias entre el valor máximo y mínimo de cada gráfico versus la temperatura de sistema.

Tabla 4.5: Diferencia Max/Min en la región S9 v/s temperatura de sistema.

Región: S9		
Fecha	$T_{sys}[K]$	Dif. Max/Min. [K]
27/12/12	82	7.5
27/12/12	62	9.5
20/03/13	208	21

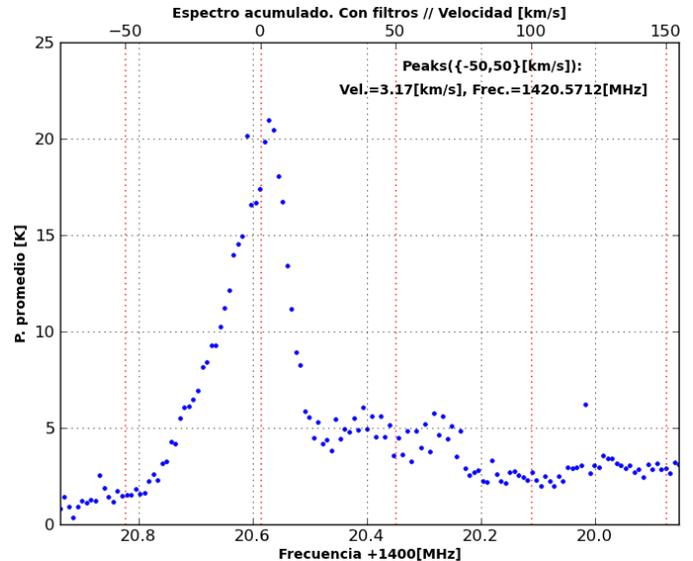


Figura 4.10: Espectro de la región S9.
 $T_{sys} = 208[K]$.

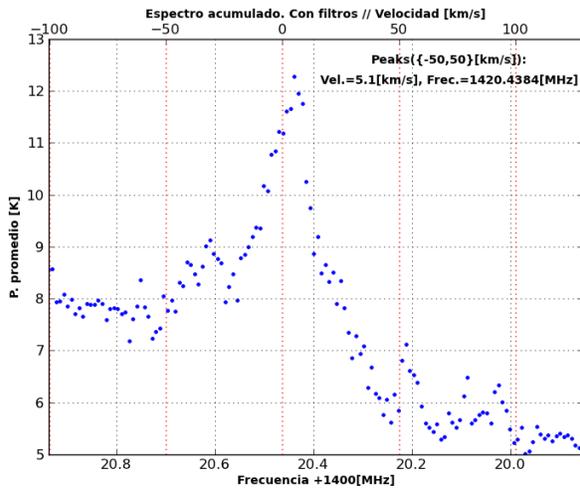


Figura 4.11: Espectro de la región S9.
 $T_{sys} = 82[K]$.

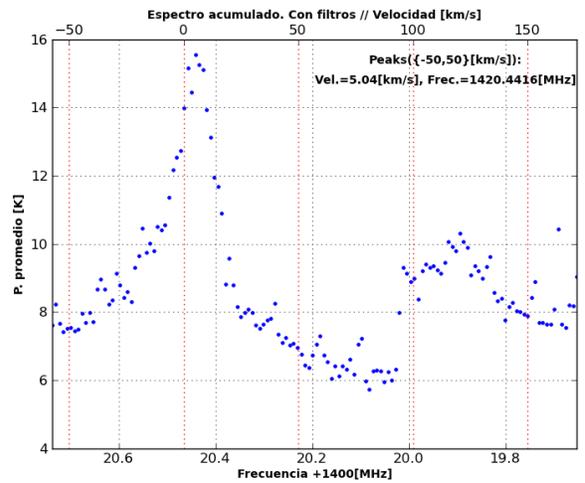


Figura 4.12: Espectro de la región S9.
 $T_{sys} = 62[K]$.

Es posible apreciar una mejora sustancial en la amplitud de la región S9 con la temperatura de sistema cercana al promedio calculado desde la calibración manual. Por lo anterior se decide utilizar esta última medición como el resultado final para la región S9 expuesto en la sección 4.1.4. Esta nueva amplitud, de todas formas, sigue siendo insuficiente para los resultados esperados (en comparación al MIT [3]). Se propone como trabajo futuro realizar una calibración definitiva que permita conocer la real temperatura de sistema.

Es importante destacar que estas pruebas solo fueron realizadas con el radiotelescopio poniente, y debieran realizarse también con el radiotelescopio oriente. Las diferencias entre ambos pueden contribuir con ideas sobre el origen del problema con la amplitud.

Como última referencia a este tema, la fig. 4.13 muestra el resultado de la medición de la región S9 por José D. [12]. Es posible reconocer el mismo problema con la amplitud. En esa oportunidad la diferencia no fue explicada y solo se mencionó la diferente dispersión, atribuida al mayor ancho de haz del SRT.

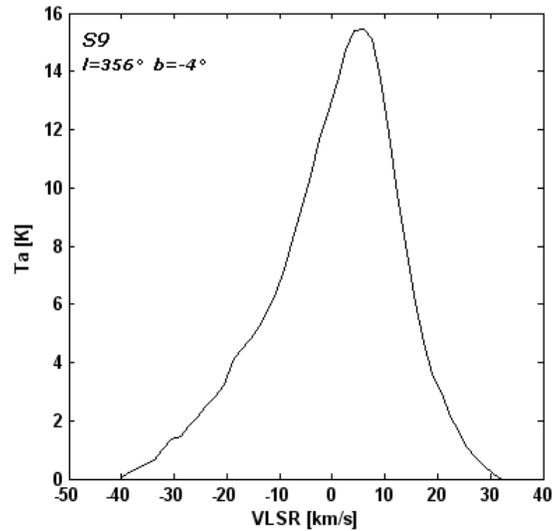


Figura 4.13: Espectro de la región S9 de J. Donoso. Fuente: [4].

4.2. Primeras Franjas Interferométricas

4.2.1. Descripción

Las primeras franjas (*“first fringes”*) corresponden a la prueba más básica que puede realizarse con un interferómetro. Para uno de dos antenas, esta prueba consiste en utilizar ambas antenas como un solo radiotelescopio. Luego observar la potencia promedio de un espectro acotado sobre una fuente particular.

Debido a que la fuente proviene del espacio, la señal recibida se aproxima a un frente de onda plano. Lo anterior produce un desfase en la recepción de la señal entre ambas antenas y un consecuente patrón de interferencia en la potencia total recibida.

Se decide realizar esta prueba utilizando ambos SRT y tomando al sol como fuente por sus especialmente favorables condiciones de emisión y cercanía. Se describe a continuación el desarrollo y resultado del experimento³.

4.2.2. Objetivos

4.2.2.1. Obejtivo General

- Obtener las primeras franjas interferométricas con dos SRT.

4.2.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar una interconexión de ambos SRT de manera de utilizar ambas antenas como una sola.
- Observar en modo de seguimiento al Sol. Elegir un horario y tiempo de medición adecuados.
- Analizar el gráfico de potencia promedio que entrega el software del SRT.
- Comprobar el correcto funcionamiento conjunto de las partes actuales del interferómetro.

³Un experimento básico similar puede ser consultado en la sección de interferometría con SRT del MIT [17]. Este proyecto utiliza un arreglo entre un SRT y una antena *Yagi-Uda*.

4.2.3. Desarrollo

La interconexión de las antenas se realiza en base a la memoria de Jaime F. [11], utilizando las placas diseñadas para llevar la señal desde las antenas a la placa principal. Este proceso incluye: divisores semi-activos, cable de transmisión e inyectores de corriente [11]. Se agregan adicionalmente un combinador análogo simple y un atenuador.

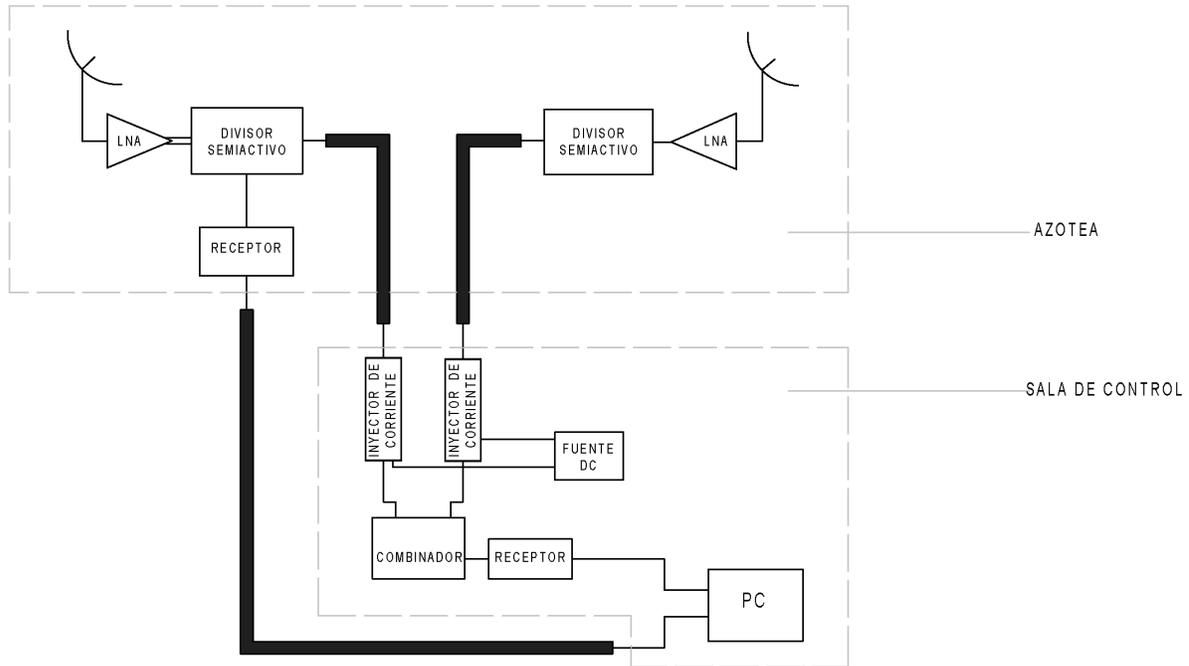


Figura 4.14: Diagrama de bloques de la interconexión para la obtención de las primeras franjas interferométricas.

El diagrama de bloques de la interconexión (ver fig. 4.14) realiza el siguiente procedimiento: el divisor semi-activo se encarga de dividir la señal proveniente de la antena y preamplificada por el LNA; un cable de transmisión lleva la señal desde el lugar donde se encuentran los radiotelescopios hasta el cuarto de control; al final de cada cable, un inyector de corriente envía la potencia necesaria al divisor semi-activo para evitar pérdidas por transmisión; se utiliza un atenuador para equilibrar las potencias recibidas y luego se conectan a un combinador análogo simple; la señal combinada es dirigida inmediatamente al receptor original y este a su vez entrega la señal digitalizada al computador.

4.2.4. Resultados

El resultado de esta sección corresponde a una captura de pantalla del experimento (ver fig. 4.15). En este caso el receptor contiene la combinación de las señales de ambos radiotelescopios. Los puntos azules con forma de sinusoide representan la potencia promedio recibida por el receptor. Esta forma en la recepción de la potencia corresponde al patrón de interferencia esperado por el desfase en la llegada del frente de onda a las antenas.

Como una forma de mantener una referencia a la prueba realizada se registró de manera paralela la información entregada por una de las señales de manera individual (ver fig. 4.16).

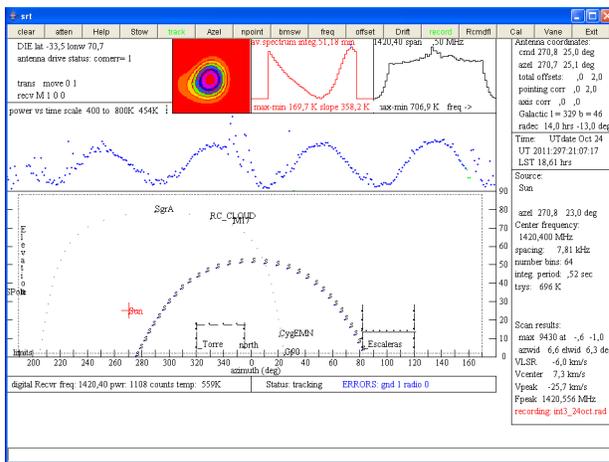


Figura 4.15: Primeras franjas interferométricas DIE.

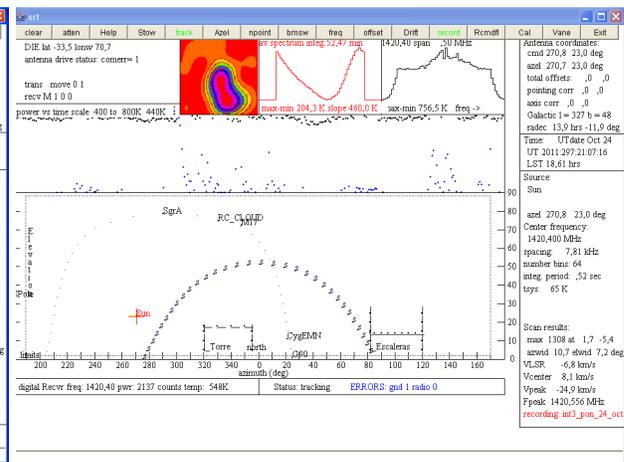


Figura 4.16: Gráfico potencia promedio de una sola antena en paralelo a la prueba interferométrica.

4.2.5. Discusión

Los resultados mostrados en la sección anterior corresponden a la prueba básica de que efectivamente: se tienen dos radiotelescopios que observan una fuente común durante un periodo determinado, no existe desfase entre las señales entregadas y los voltajes correspondientes son similares. La prueba se considera exitosa y no merece mayor análisis.

4.3. Diámetro Angular del Sol

4.3.1. Descripción

Como una manera de profundizar la prueba básica de la obtención de las primeras franjas interferométricas, se propone realizar una medición interferométrica del diámetro angular del sol.

Esta prueba es esencialmente la misma que para las primeras franjas. La diferencia radica en el periodo de medición y el análisis posterior de los datos. Un desarrollo alternativo de esta actividad puede ser consultado en los proyectos “*An SRT Interferometer at MIT Haystack Observatory*” [18] y “*Development and testing of the new SRT receiver and modeling the Sun*” [19].

Considerando al sol como una fuente rectangular uniforme (ver fig. 4.17) entonces su función de visibilidad V , estará dada por la ecuación 4.1 (ver fig. 4.18), donde a es el tamaño angular de la fuente y u la apertura medida en longitudes de onda. La apertura corresponde a la distancia perpendicular entre los ejes focales de las antenas, en la fig. 4.24 esta distancia corresponde a $D\cos(\theta)$ con θ la posición de la fuente.

$$V = \left| \frac{\sin(\pi au)}{\pi au} \right| \quad (4.1)$$

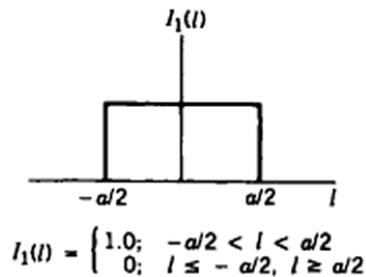


Figura 4.17: Distribución rectangular uniforme. Fuente: [5].

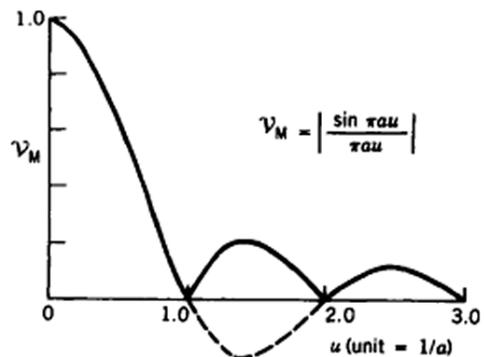


Figura 4.18: Gráfico de la función de visibilidad. Fuente: [5].

La función de visibilidad V corresponde a la envolvente de la respuesta del interferómetro en función de la apertura del interferómetro medida en longitudes de onda.

La idea central de esta experiencia es ajustar la curva de visibilidad a los resultados obtenidos, variando el tamaño angular de la fuente. Se determina así el diámetro angular del sol para la frecuencia del hidrógeno.

4.3.2. Objetivos

4.3.2.1. Objetivo General

- Medir el diámetro angular del sol en $21[cm]$, utilizando los SRT del Departamento de Ingeniería Eléctrica como un interferómetro sumador simple.

4.3.2.2. Objetivos Específicos

- Registrar las mediciones de un seguimiento al Sol con el interferómetro por un periodo de tiempo prolongado.
- Realizar un script en python para la reducción y análisis de los datos obtenidos.
- Ajustar la función de visibilidad teórica a los resultados obtenidos y estimar de esta forma el diámetro angular del sol.

4.3.3. Desarrollo

La interconexión de este experimento es idéntica a la del experimento anterior 4.2.3.

Después de obtener los datos de una medición entre las 11 y 19 hrs. se ejecuta un script en python para la reducción y gráfico de los datos (ver anexo B.3).

Como primer paso este script realiza dos filtros a los datos obtenidos:

1. **Validación de horario:** Se selecciona el periodo de mediciones hasta la puesta de sol (13 a 18 hrs. [UTC-4]).
2. **Filtro pasabajos:** Elimina las componentes continuas y de baja frecuencia que se encuentran montadas sobre la señal.

La ecuación 4.2 muestra la relación entre la apertura $D \cos(\theta)$ (ver fig. 4.24) y las coordenadas de azimut y elevación. Esta relación es necesaria para graficar los datos de potencia promedio en función de la apertura.

$$D \cos(\theta) = D \sqrt{1 - \cos(Az - \alpha)^2 * \cos(El)^2} \quad (4.2)$$

Con α la diferencia entre azimut 0° teórico (paralelo a la línea de base) y azimut 0° del SRT.

4.3.4. Resultados

Las figuras 4.20 y 4.19 muestran el ajuste final de la función de visibilidad teórica. Los parámetros utilizados pueden consultarse en la tabla 4.6. La fig. 4.21 muestra la evolución de las coordenadas azimut/elevación y apertura en el tiempo que se realizó la prueba.

Tabla 4.6: Parámetros experimento V.

Parámetro	Valor
Diámetro angular sol	0.62°
Línea de base interferómetro	37.8543[m]
Longitud de onda central λ_0	21.1[cm]

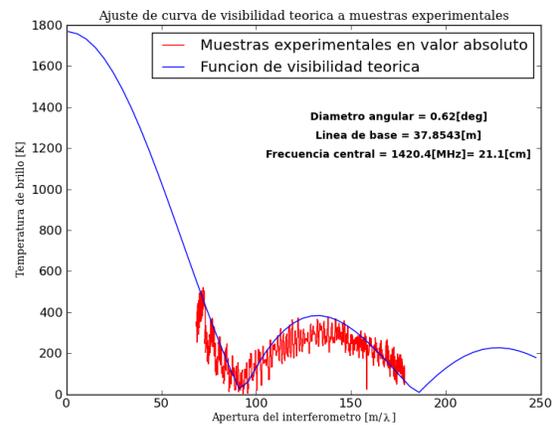


Figura 4.19: Ajuste de función de visibilidad V con los datos de potencia promedio en valor absoluto, en función de la apertura del interferómetro.

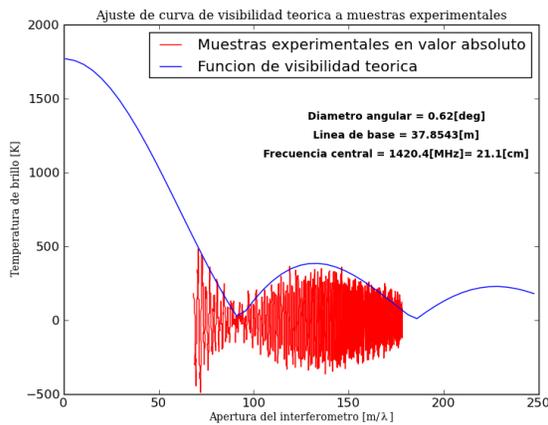


Figura 4.20: Ajuste de función de visibilidad V con los datos de potencia promedio, en función de la apertura del interferómetro.

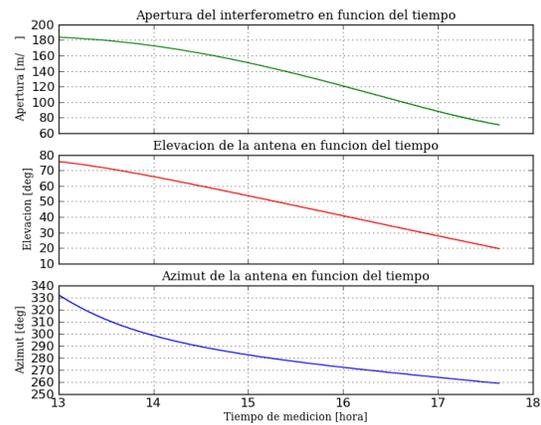


Figura 4.21: Evolución de la apertura, azimut y elevación del interferómetro en función del tiempo [UTC-4].

4.3.5. Discusión

Es de importancia para entender este resultado, las variables manipuladas y su influencia en el ajuste de la curva de visibilidad. Estas variables corresponden a: línea de base del interferómetro, diámetro angular del sol en H1 y longitud de onda.

4.3.5.1. Línea de Base del Interferómetro

Corresponde a la distancia entre las bases de las antenas (parámetro D fig. 4.24).

Para tomar esta medición se utiliza la aplicación web Google Maps [20]. Utilizando la herramienta para medir se toma la distancia entre la base de ambas antenas además de una distancia conocida cercana a la antena y paralela a la línea de base (para disminuir distorsiones respecto de la perspectiva de la imagen). Las distancias medidas corresponden a línea de base $37.8543[m]$ (ver fig. 4.22) y referencia $4.9334[m]$. (ver fig. 4.23). La medida real de la referencia, medida en el lugar con un flexómetro, es de $4.9[m]$ lo que propone un error estimado de $\pm 0.1[m]$.

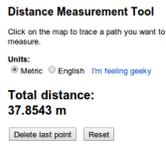


Figura 4.22: Medición online de la distancia entre las bases de las antenas.



Figura 4.23: Medición online referencia para cálculo de error.

4.3.5.2. Diámetro Angular del Sol en H1

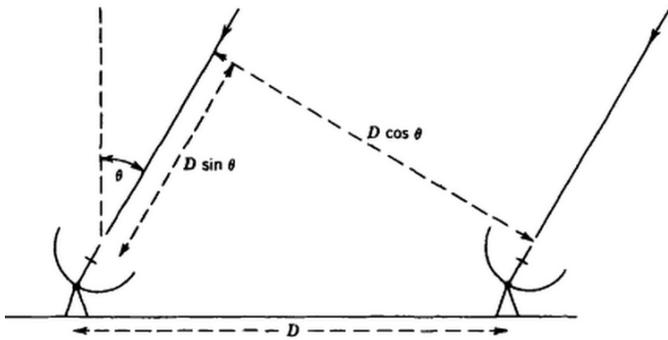


Figura 4.24: Geometría de un interferómetro elemental. Fuente: [5].

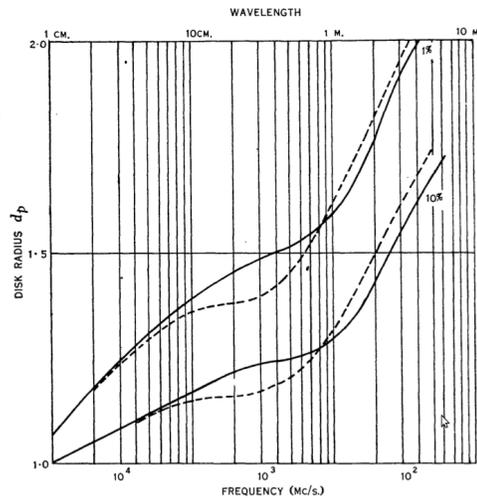


Figura 4.25: Variación del radio del disco solar respecto de la frecuencia.. Fuente: [6].

El diámetro óptico del sol medido desde la tierra es $D_{Sol} = 2 \cdot 959'' \cdot 63 = 0.5331278^\circ$ [21]. De la fig. 4.25 y utilizando el parámetro D_{Sol} es posible aproximar (de manera gráfica) el diámetro del sol a $21[cm]$ por $D_{SolH1} = 0.6482 \pm 0.0061^\circ$ ⁴, considerando el radio d_p ⁵ como el valor al cual la razón entre la temperatura efectiva cae a un 10% de la temperatura aparente [6].

⁴El error se deriva de la propagación del error estimado, al obtener el valor proporcional de la línea de $21[cm]$ que se considera está en $1.216 \pm 0.011 \cdot R_0$ del gráfico de la fig. 4.25.

⁵El radio, d_p (en unidades de R_0), del disco está especificado por la razón de la temperatura efectiva en el extremo y: (a) la temperatura aparente (línea continua), (b) temperatura máxima efectiva (línea punteada)

4.3.5.3. Longitud de Onda

La longitud de onda considerada para el cálculo corresponde a la frecuencia central del ancho de espectro medido por el SRT. Para este experimento en particular corresponde a $0.5[MHz] = spacing \cdot bins$, con espaciado ($spacing$) = $0.007125[MHz]$ y número de muestras de cada espectro ($bins$) = 64. Por esta razón es lógico la pregunta sobre la influencia de considerar todas las longitudes de onda como una sola. La longitud de onda central y su error asociado tiene un valor de $\lambda_0 = 21.1 \pm 0.01[cm]$. Debido a la naturaleza de las operaciones utilizadas, este error será siempre sumado a los demás errores relativos [22] [23]. Considerando lo anterior y dado que el error relativo de lambda en comparación a las otras dos variables es pequeño (ver tabla 4.7), es que su efecto sobre el experimento es despreciable y es posible considerar que se está observando solo la línea espectral del hidrógeno.

Tabla 4.7: Variables del experimento y sus errores asociados.

Parámetro	Valor	Error Absoluto (δx)	Error Relativo ($E_R = \frac{\delta x}{ x }$)
Lambda $\lambda[m]$	0.211	0.0001	0.0005
Línea de base $[m]$	37.8543	0.1	0.0026
Diámetro angular $D_{SolH1}[^{\circ}]$	0.6482	0.0061	0.0094

4.3.5.4. Efecto de los errores en el ajuste de la curva de visibilidad

Recordando la función de visibilidad 4.1, es posible notar que el diámetro angular influye sólo en la posición de los ceros. En tanto que las mediciones obtenidas solo poseen un cero (debido a que la línea de base es muy pequeña), el ajuste estará enfocado en este punto.

Para la curva teórica el valor de diámetro angular $D_{SolH1} = 0.6482^{\circ}$ y el rango de variación de su primer cero considerando su error absoluto $\delta D_{SolH1} = 0.0061$ puede verse en la fig. 4.27 entre las barras de cian y negro. Se mantiene el gráfico de los datos experimentales para efectos de referencia.

Para los valores experimentales no es posible determinar con exactitud el punto de inflexión. Sin embargo, suponiendo por ejemplo que este punto está ubicado en $D_{inflexion} = 90.5$ el rango en que se encontraría debido al error en la medición de la línea de base puede verse en la fig. 4.26. Como es de apreciar, despreciable.

La tabla 4.8 resume los rangos en la determinación del cero o punto de inflexión para ambas gráficas.

Tabla 4.8: Rangos en la determinación del cero o punto de inflexión incluyendo influencia de los errores de línea de base y diámetro teórico del Sol en H1.

Parámetro	Cero o inflexión [m/λ]	Cero o inflexión [m/λ]			
		Mínimo	Central	Máximo	Rango
Línea de base	$37.8543 \pm 0.1[m]$	90.261	90.5	90.74	0.48
Diámetro angular	$0.6482 \pm 0.0061^\circ$	87.13	88.39	89.69	2.56

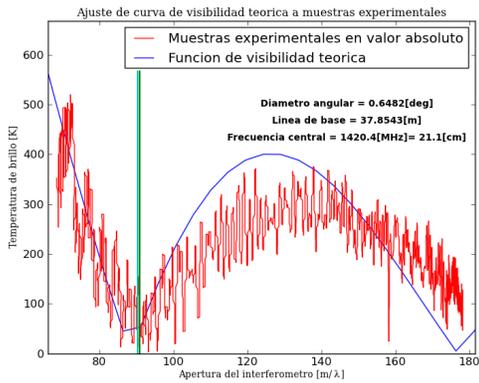


Figura 4.26: Rango de error en la determinación del punto de inflexión para muestras experimentales.

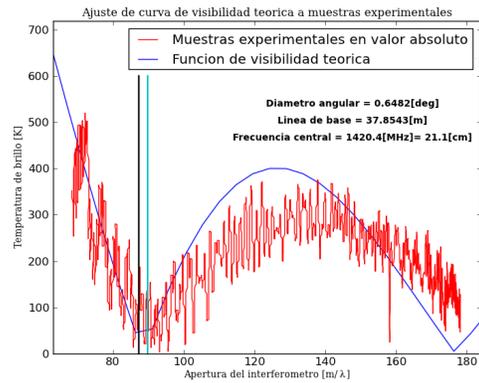


Figura 4.27: Rango de error en la determinación del cero para curva teórica.

En definitiva, después de ajustar una curva ficticia a los valores experimentales, y despreciando los efectos del error en la medición de la línea de base, el valor del diámetro del sol para H1 es de aproximadamente 0.62° mientras que el valor teórico corresponde a $0.6482 \pm 0.0061^\circ$.

Esta primera medición interferométrica permite conocer que es posible resolver fuentes de aproximadamente un orden de magnitud menores que el *beamwidth* (6.22°) del SRT.

Capítulo 5

Trabajos Futuros

5.1. Script para la observación en espacio limpio

A consideración propia, este script es el trabajo más urgente y necesario que se necesita realizar en el proyecto. Las fuentes astronómicas se mueven del cielo que observamos, debido a los efectos de rotación y traslación de la tierra. Por otra parte, el cielo disponible actualmente para la observación se reduce a dos sectores acotados, tal como se expone en el capítulo 3.1. Dado lo anterior es de vital importancia planificar las mediciones de estas fuentes tanto en el horario como en la fecha, de manera de poder observarlas dentro de las regiones con baja interferencia con las que se cuenta. Se proponen a continuación algunos de los requerimientos con los que debería cumplir esta función:

- Recibir: uno o más sectores del espacio disponibles para la observación; una o más fuentes en coordenadas galácticas; tiempo mínimo de observación; plazo disponible para planificación (días, meses o años).
- Entregar: fecha; periodo de tiempo en el que estarán disponibles las fuentes; coordenadas de azimut y elevación.

Con la realización de este script es posible actualizar todas las experiencias con resultados anómalos y las próximas experiencias que se necesiten, minimizando el factor de la contaminación por interferencia terrestre en las muestras.

5.2. Continuar con la Implementación Analógica

El paso inmediato a esta memoria corresponde a la puesta en marcha de la placa analógica diseñada por Jaime F. [11]. Esta culmina toda la etapa analógica del interferómetro. Citando a Jaime:

“...en este trabajo se diseñaron, construyeron y se probaron los circuitos que corresponden a los dos últimos bloques de la etapa analógica. El primero es el divisor semi-activo que se encarga de separar en dos la señal capturada de forma de mantener el sistema de adquisición original de la antena. El segundo corresponde al receptor interferométrico que está compuesto de dos receptores heterodinos con separación de banda lateral, que trasladan el espectro de las señales capturadas a una frecuencia de mayor acceso digital.”

El proyecto de puesta en marcha de esta placa puede dividirse en dos secciones:

- Programación del oscilador local.
- Idear procedimiento para digitalización y captura de los datos obtenidos.

El oscilador local es el encargado de proveer la referencia para el traslado del espectro en frecuencia. Este oscilador está incluido dentro del sintonizador de frecuencia “*ADF4106-PLL Frequency synthesizer*” y es programable mediante el protocolo SPI [24]. Actualmente el proyecto cuenta con los dispositivos necesarios para la comunicación SPI - PC.

La digitalización de los datos presenta un desafío mayor. La primera opción es la puesta en marcha de una placa digital diseñada y construida por Mauricio Cuevas [25] especialmente para este proyecto. Citando a Mauricio:

“Dos señales analógicas traducidas a 10 bits serán enviadas (provenientes de una placa dotada con dos conversores analógico-digital) al circuito que constituye el trabajo principal de esta memoria, denomino “Correlacionador”. Este sistema está inmerso en una “Placa Digital” que contiene los circuitos configurables que realizarán el proceso de Correlación del Interferómetro en cuestión. Esta placa está compuesta esencialmente por cinco FPGA (“*Field Programmable Gate Array*”) y cuatro ASIC (“*Application-Specific Integrated Circuit*”) denominado “ALMA1”. Cada ASIC está compuesto por miles de compuertas lógicas que hacen la labor misma de Correlación dentro del interferómetro. Mientras que las FPGA realizan procedimientos anexos (principalmente de módulos de entrada/salida y acumulación) para obtener las llamadas funciones de correlación y enviarlas a un computador para obtener la función de visibilidad de la Interferometría.”

Esta placa como se puede apreciar realiza la correlación a tiempo real antes de enviar los datos al pc.

Una segunda opción es conseguir algún dispositivo disponible en el mercado, capaz de muestrear la señal a una frecuencia adecuada que permita digitalizar los datos analógicos entregados por la placa de Jaime. Una vez ingresados los datos al pc, es posible realizar la correlación computacionalmente.

Si bien la segunda opción no es el ideal para la implementación final del interferómetro, es una solución que puede ser mucho más rápida y que permitirá realizar una serie de nuevas mediciones interferométricas.

5.3. Problemas de Interferencia

Sobre la interferencia detectada y acotada en la sección 3.1 se propone continuar con la investigación acerca del origen de las interferencias presentes sobre las elevaciones $El = 25^\circ$, puesto que son críticas en cuanto a la disponibilidad de cielo para observar. Se recomienda analizar el efecto de la intrusión de interferencia por los lóbulos laterales de la antena, puesto que estos podrían estar absorbiendo la fuerte interferencia presente en el horizonte terrestre.

El mapa de interferencia debe realizarse con periodicidad (se propone una vez al mes) con el fin de mantenerlo actualizado y continuar con el registro de información al respecto, que puede ser de utilidad en el futuro para concluir acerca del origen de las interferencias.

5.4. Calibración de los Radiotelescopios

Como se discutió en la experiencia de medición de las regiones estandar 4.1.5, la calibración no es la adecuada.

La acción propuesta más sencilla consiste en realizar un mejor procedimiento del proceso de calibración manual. En este momento consta de lo siguiente:

1. Subir a la azotea del edificio, donde se encuentran las antenas, y conectarse de manera remota al computador que controla la antenas.
2. Colocar un absorber flexible en el cuerno de alimentación de la antena y alejarse del equipo.
3. Posicionar la antena en un lugar dentro de las regiones frías del espacio y comenzar la prueba. Utilizar siempre una misma posición, para eliminar variables en el análisis.
4. Se solicitará poner la carga frente a la antena. Esto ya se ha realizado y se debe seguir al siguiente paso.
5. Se solicitará sacar la carga de la antena. Para esto el operador debe acercarse a la antena y sacar la carga cuidando de no cambiar la posición de la antena.

De realizar la calibración manual de manera efectiva, se podría concluir acerca de la real temperatura de sistema. Con este resultado es posible modificar el parámetro de temperatura del diodo en el archivo de configuración (ver anexo A.3). El parámetro debe modificarse de manera que la calibración por diodo de ruido entregue la misma temperatura de sistema que la calibración manual.

Dado que por su naturaleza el SRT entrega algunos datos fuera de los rangos esperados, es de suponer que este efecto debe estar incluido dentro de los procesos interno del software a la hora de calcular la temperatura de sistema. Por lo anterior se propone revisar los procedimientos del mismo sobre calibración (manual y por diodo de ruido), verificando que se utilicen suficientes datos y que, en caso de existir, se estén eliminando aquellos que sean comparativamente altos o bajos.

5.5. Regiones Estandar de Observación en H1

Una vez realizados los trabajos 5.1 y 5.4 se recomienda realizar nuevamente la observación de las regiones estandar. Dentro de los desafíos pendientes en estas experiencias se propone:

- Incluir la región S7 dentro de las mediciones.
- Obtener amplitudes del peak de velocidad de mayor intensidad.
- Obtener espectros con menor contaminación y distinguir claramente los decaimientos de la intensidad en la velocidad.

Por otra parte, se recomienda obtener de la bibliografía un mapa de latitud-longitud galáctica detallado de la emisión del hidrógeno para estas regiones. Con estos mapas es posible tener una estimación del tamaño angular de las regiones y luego concluir certeramente acerca del factor en la intensidad y dispersión asociado a "*Beam Dilution*".

5.6. Curva de Rotación Galáctica

La curva de rotación galáctica corresponde a una de las experiencias en las que no se lograron resultados positivos. Se documenta a continuación el trabajo realizado hasta el momento y las sugerencias de como continuar.

5.6.1. Descripción

La línea de $21[cm]$ producida por el hidrógeno neutro provee a los radio astrónomos de una poderosa herramienta para estudiar la rotación de las galaxias espiral. Observando las distintas líneas del hidrógeno a través del plano galáctico es posible mostrar que la velocidad angular decrece a medida que se mira más cerca al centro galáctico.

Lo que se pretende medir es la velocidad de rotación de la galaxia $V(R)[km/s]$ en función de la distancia al centro de esta $R[kpc]$ obteniendo de esta forma la curva rotacional (ver fig. 5.1). Los resultados de esta actividad pueden consultarse en el reporte final del nuevo SRT desarrollado por el MIT [3]. Un desarrollo detallado de esta actividad también puede revisarse en [26].

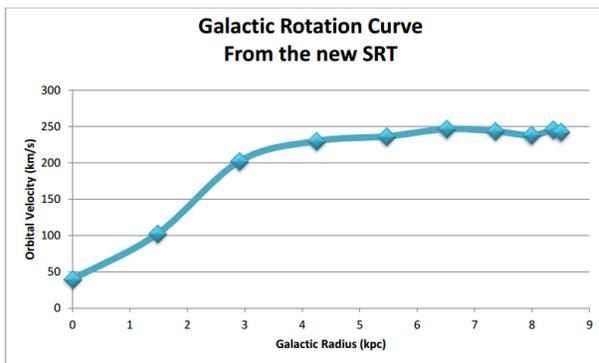


Figura 5.1: Curva de rotación galáctica tomada con el nuevo SRT en el MIT. Fuente: [3].

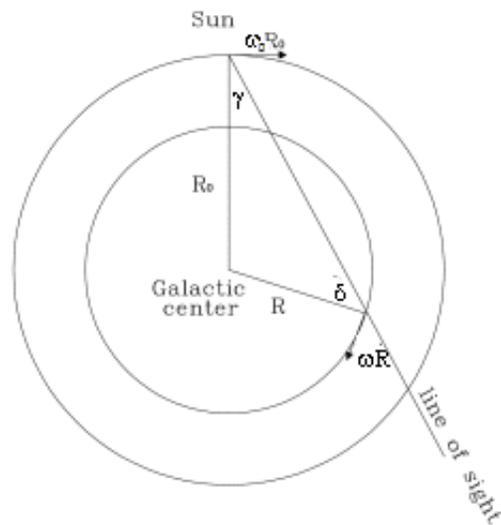


Figura 5.2: Modelo teórico aproximado para la observación del plano galáctico desde la tierra. Fuente: [7].

Considerando el modelo teórico aproximado para la observación del plano galáctico desde la tierra (ver fig. 5.2), donde:

- ω : Velocidad angular a una distancia R respecto del centro galáctico.
- ω_0 : Velocidad angular del sol respecto del centro galáctico.

- R_0 : Distancia del sol al centro galáctico.
- γ : Longitud galáctica.

La velocidad observada por el SRT¹ (ver ec. 5.1) corresponde a la diferencia de las proyecciones de las velocidades tangenciales del sol y de la fuente, sobre la línea de visión (ver fig. 5.2).

$$V_{obs} = \omega R \sin(\delta) - \omega_0 r_0 \sin(\gamma) \quad (5.1)$$

Utilizando la identidad trigonométrica

$$\frac{\sin(\gamma)}{R} = \frac{\sin(\delta)}{R_0} \quad (5.2)$$

la ecuación para la velocidad observada queda como:

$$V_{obs} = (\omega - \omega_0) R_0 \sin(\gamma) \quad (5.3)$$

La máxima velocidad se obtiene cuando la línea de visión es tangencial al movimiento circular de la fuente alrededor del centro galáctico. En este caso $\delta = 90^\circ$ luego, reemplazando y evaluando en la identidad 5.2, $R = \sin(\gamma) R_0$.

Finalmente es posible despejar la velocidad de la fuente respecto al centro de la galaxia,

$$\omega R = V_{obs \ max}(R) + \omega_0 R \quad (5.4)$$

con $\omega_0 R_0 = 220[km/s]$ y $R_0 = 8.5[kpc] = 2.6 \cdot 10^{17}[km]$.

5.6.2. Objetivo General

- Graficar la curva de rotación galáctica para la vía lactea usando las líneas espectrales en $21[cm]$ observadas por el SRT.

¹Se entiende como velocidad observada, la velocidad radial medida con el SRT menos la velocidad respecto al estándar de reposo (ver sección 2.1.3).

5.6.3. Desarrollo

Se propone de manera general, realizar los siguientes pasos para el desarrollo de esta actividad.

- Planificar y realizar mediciones sobre el plano galáctico. Se recomienda utilizar las mismas longitudes que el proyecto del "Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics" [26], de manera de tener una referencia en los resultados.
- Reutilizar el código de las mediciones estandar de la región H1 (ver sección 4.1.1), para la gráfica de cada longitud seleccionada del plano galáctico.
- Seleccionar de manera visual y aproximada la velocidad máxima de emisión (ver fig. 5.3).
- Calcular la distancia $R = \sin(\gamma) \cdot R_0$.
- Calcular la velocidad tangencial de rotación de la galaxia $\omega R = V_{obsMax} + \omega \cdot R$ y graficar los resultados.

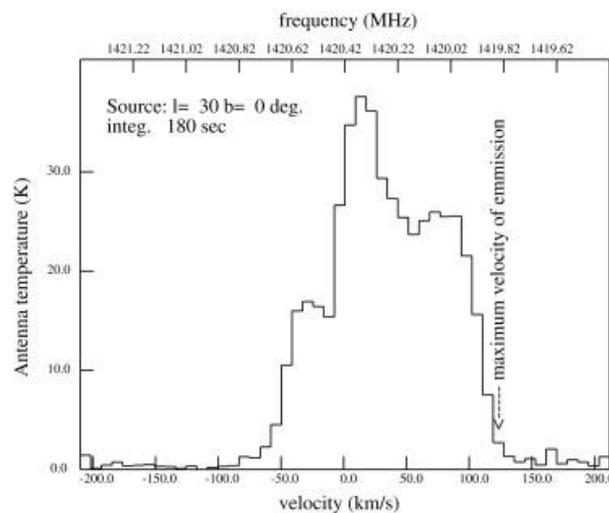


Figura 5.3: Espectro acumulado ejemplo para longitud $l = 30$. Fuente: [7].

5.7. Gráfico de velocidad-longitud del plano galáctico

5.7.1. Descripción

Una experiencia de interés para realizar con el SRT corresponde a la construcción de un mapa velocidad-longitud sobre el plano galáctico. Esta prueba es de mayor complejidad y requiere un tiempo de medición extenso. Sin embargo, con una planificación adecuada y mediciones automáticas es posible obtener buenos resultados. Un ejemplo del resultado de este experimento realizado por un SRT puede ser consultado en el reporte final de la elaboración de un nuevo SRT por el MIT [3].

5.7.2. Objetivo General

- Construir un mapa de velocidad-longitud para H1 sobre el plano galáctico, utilizando las mediciones realizadas por un SRT.

5.7.3. Desarrollo

Se propone de manera general, realizar los siguientes pasos para el desarrollo de esta actividad:

- Programar las mediciones de las regiones del espacio en zonas libres de interferencia. Idealmente esto debería ser realizado por el script propuesto en A.6.
- Tomar mediciones de al menos diez minutos cada dos grados en latitud galáctica.
- Realizar un script en base a los desarrollados anteriormente que:
 - Tome los datos recopilados y los lleve a una matriz. Esta función ya existe y se encuentra dentro de la librería de python generada para esta memoria (ver anexo B.1).
 - Obtenga un espectro acumulado por cada set de mediciones realizadas sobre cada longitud observada. Se debe comparar por posición de azimut y elevación, cuidando el rango de error de $\pm 0.1^\circ$ que estos presentan para una misma posición.
 - Generar una nueva matriz que guarde en orden desde 180° a -180° en longitud galáctica. Se debe guardar un encabezado por longitud, pues este contiene la información sobre fecha, posición, frecuencia inicial temperatura de sistema, VLSR, etc. Revisar, por ejemplo, anexo B.2 para el detalle de la información contenida en el encabezado.

- Graficar la matriz. Reutilizar en esta sección el código empleado para el mapa de interferencias (ver anexo A.2). Es posible que se deban realizar ajustes en la matriz, tales como realizar una transposición. La librería “*numpy*” proporciona una función para la transposición.
- Ajustar ejes del gráfico. Se debe realizar una transformación del “*eje y*” a velocidad relativa. Para esto se debe utilizar la velocidad relativa al estándar de reposo (VLSR) así como el ancho de banda observado , la frecuencia inicial y su paso. Para el “*eje x*” es posible reutilizar el código empleado para el mapa de interferencias (ver anexo A.2).

5.8. Funcionamiento de los Radiotelescopios

5.8.1. Antena Oriente

Desde enero del 2013 la antena oriente ha comenzado a presentar problemas intermitentes de comunicación. Estos errores no han sido identificados aunque su origen se deduce de un acontecimiento en particular. En diciembre de 2012 personas sin autorización ataron el cable coaxial de margen a la base de la antena. Se supone que una operación normal con la antena pudo forzar los cables provocando rupturas internas. Se recomienda, sin embargo, realizar pruebas cruzadas con los equipos de la antena poniente (LNA y Receptor) antes de reemplazar o reparar el cable.

5.8.2. Cámaras de Seguridad

En la actualidad se encuentran instaladas dos cámaras IP con alimentación POE (“*Power Over Ethernet*”) en la azotea del Departamento de Ingeniería Eléctrica. Estas cámaras son utilizadas para monitorear los radiotelescopios y cada una posee una dirección IP fija asignada por el Departamento. La información respectiva a las cámaras puede verse en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Datos cámaras de vigilancia.

Cámara	Dirección IP	User Name	Pass
Oriente	172.17.72.112	root	oriente
Poniente	172.17.72.111	root	poniente

Dentro de las propuestas de trabajo futuro se propone:

- Instalar solo un alimentador POE para ambas antenas. En la actualidad existen dos en estado de préstamo por el laboratorio de electrónica del Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- Impermeabilizar la conexión de las cámaras con el cable de red en la azotea del edificio. El primer intento de impermeabilizar se realizó con caucho. Esto no funcionó pues la humedad logró penetrar la conexión y oxidar los conectores. Actualmente se maneja una solución temporal consistente en la inclusión de papel absorbente antes de sellar con caucho.
- Instalar un software definitivo que permita la grabación continua de las cámaras y que actualice/borre los datos después de un periodo predeterminado.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Conclusión General

Se han realizado las observaciones necesarias para concluir que al momento de las últimas pruebas, toda la implementación actual del interferómetro se encuentra operativa y funcionando adecuadamente¹.

Es posible continuar el trabajo desde este punto hacia la implementación completa del interferómetro, añadiendo la placa análoga que realiza el traslado del espectro en frecuencia, así como la etapa que permitirá muestrear (y opcionalmente correlacionar) los datos obtenidos para luego entregarlos al computador.

Otra rama en la continuación de este trabajo es avanzar en la mejora sucesiva de los resultados ya obtenidos, mejorando las prácticas y procedimientos.

Sobre los trabajos futuros mencionados en la sección 5 existe prioridad en dos tareas: 5.1 y 5.4. Estas labores son fundamentales para los próximos pasos en la implementación final, puesto que permitirán estandarizar los resultados y minimizar de manera considerable los efectos de la interferencia en las mediciones.

¹Excepto por los problemas actuales de la antena oriente mencionados en la sección 5.8.1.

6.2. Conclusiones Específicas

6.2.1. Resumen de Resultados

Se resume a continuación los principales resultados de las experiencias desarrolladas en esta memoria.

6.2.1.1. Mapa de Interferencia

Se identifican zonas frías del cielo que coinciden con los sectores donde se obtubieron buenos resultados de observación. Los sectores rectangulares son $Az = \{190^\circ - 280^\circ\}$, $El = \{25^\circ - 60^\circ\}$ y $Az = \{60^\circ - 120^\circ\}$, $El = \{25^\circ - 55^\circ\}$ (ver fig. 6.1). En lo sucesivo se recomienda utilizar estos sectores para realizar todo tipo de observación astronómica.

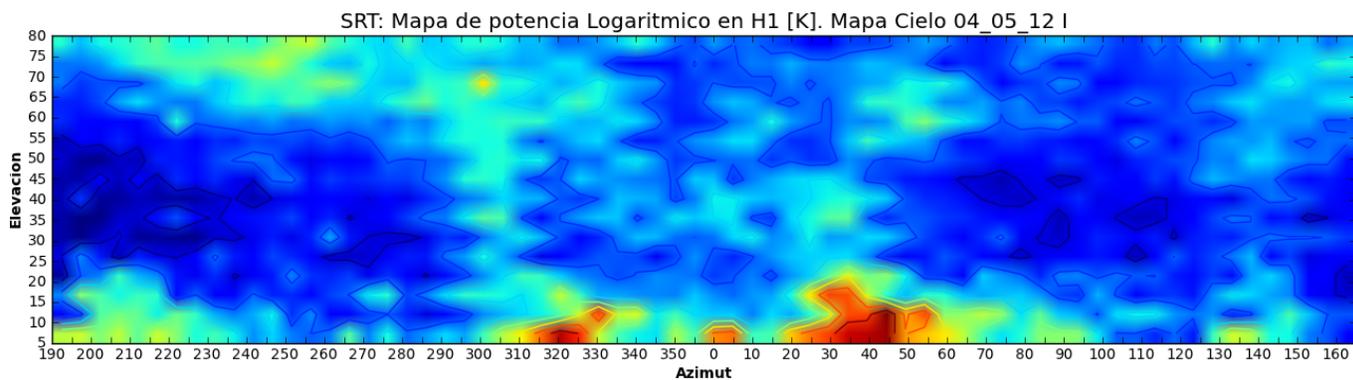


Figura 6.1: Mapa de potencia logarítmico antena poniente.

6.2.1.2. Medición Ancho de Haz de la Antena

La fig. 6.2 muestra la potencia promedio del espectro observado en función del ángulo azimutal del sol. Debido a que el sol no varía de forma uniforme en esta dirección es necesario realizar una corrección de coordenadas.

Los puntos de potencia media obtenidos del gráfico de la fig. 3.6 son $Az = 357.74^\circ$ $El = 78.1^\circ$ y $Az = 325.24^\circ$ $El = 75.8^\circ$. Realizando el cambio de coordenadas respectivo, los ángulos corregidos son $Az = 73.56^\circ, 79.78^\circ$. El ancho de haz corresponde a la diferencia de estos y es de 6.22° . La tabla 6.1 muestra una comparación entre el resultado obtenido y las referencias con las que se cuenta.

Tabla 6.1: Comparación de resultados para medición de ancho de haz del SRT.

Referencia	Valor [°]
Experimental	6.22°
Teórica para diámetro $d = 2.3[m]$	6.39°
Experimental desde el MIT	6.5°

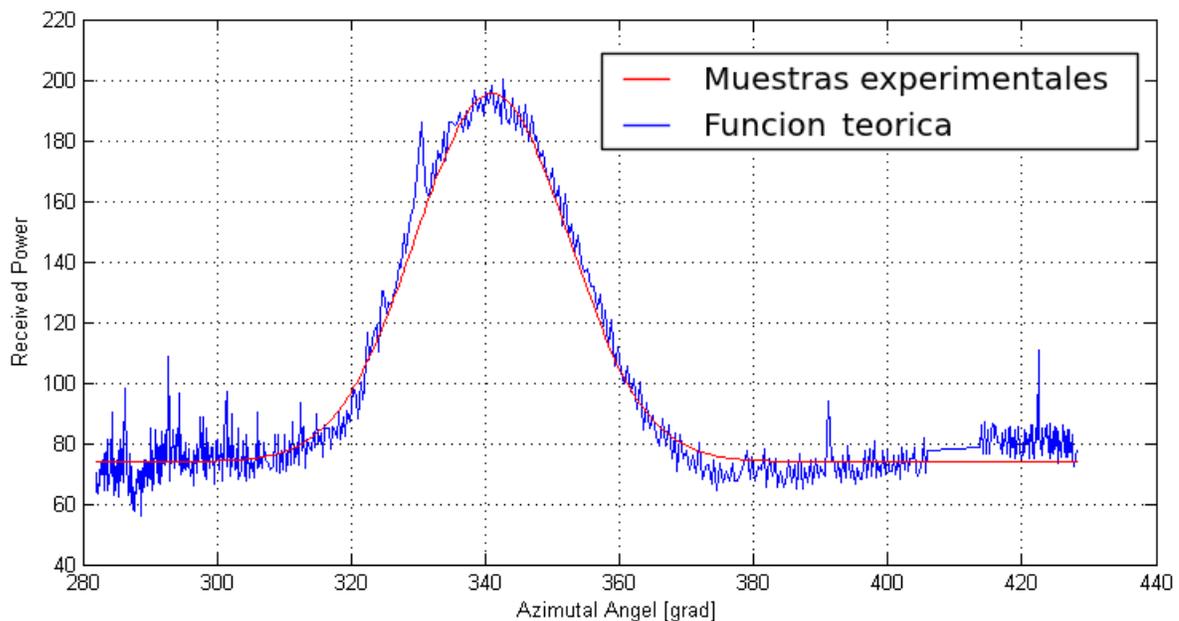


Figura 6.2: Potencia promedio en función del ángulo azimutal. Fuente: [1].

6.2.1.3. Observación de las Regiones Estandar S6, S8 y S9

Tabla 6.2: Datos S6.

Región:	S6	
Coordenadas	$l = 1^{\circ}.91$	$b = +41^{\circ}.42$
	V. del Peak	Peak de T. ^o
D. Williams	$-0.5[km/s]$	$45[^{\circ}K]$
MIT	$-5[km/s]$	$33[^{\circ}K]$
Propio	$+0.72[km/s]$	$16[^{\circ}K]$

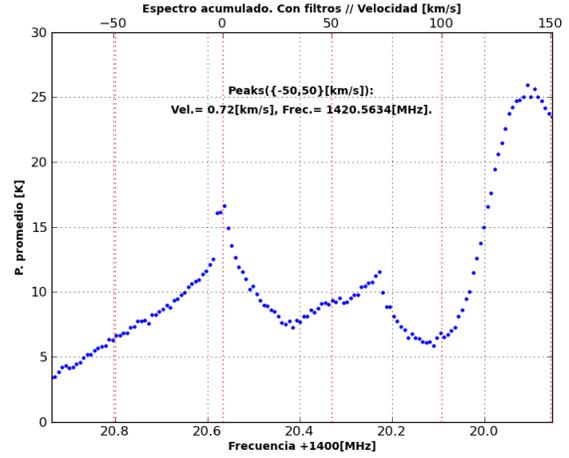


Figura 6.3: Espectro de la región S6

Tabla 6.3: Datos S8.

Región:	S8	
Coordenadas	$l = 207^{\circ}.00$	$b = -15^{\circ}.00$
	V. del Peak	Peak de T. ^o
D. Williams	$+7[km/s]$	$63[^{\circ}K]$
MIT	$+6[km/s]$	$52[^{\circ}K]$
Propio	$+7.7[km/s]$	$18[^{\circ}K]$

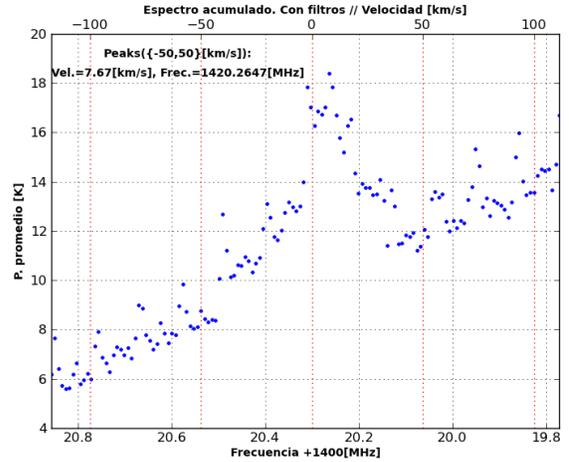


Figura 6.4: Espectro de la región S8

Tabla 6.4: Datos S9.

Región:	S9	
Coordenadas	$l = 356^{\circ}.00$	$b = -4^{\circ}.00$
	V. del Peak	Peak de T. ^o
D. Williams	$+6[km/s]$	$74[^{\circ}K]$
MIT	$+1[km/s]$	$60[^{\circ}K]$
Propio	$+3.17[km/s]$	$21[^{\circ}K]$

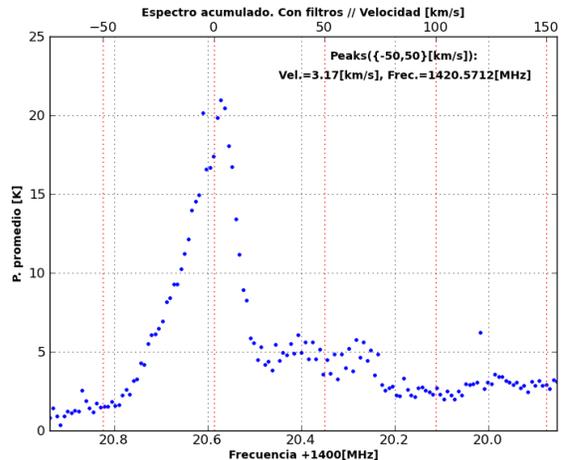


Figura 6.5: Espectro de la región S9

6.2.1.4. Medición del Diámetro Angular del Sol

Después de ajustar una curva ficticia a los valores experimentales, y despreciando los efectos del error en la medición de la línea de base, el valor del diámetro del sol para H1 es de aproximadamente 0.62° mientras que el valor teórico corresponde a $0.6482 \pm 0.0061^\circ$.

Tabla 6.5: Parámetros experimento V .

Parámetro	Valor
Diámetro angular sol	0.62°
Línea de base interferómetro	$37.8543[m]$
Longitud de onda central λ_0	$21.1[cm]$

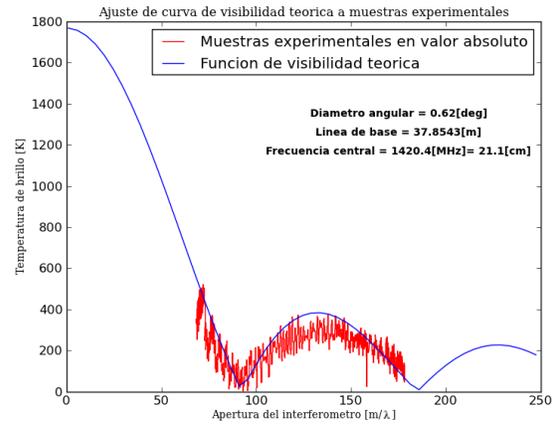


Figura 6.6: Ajuste de función de visibilidad V con los datos de potencia promedio en valor absoluto, en función de la apertura del interferómetro.

6.2.2. Reducción y Análisis de los Datos Recopilados por los SRT

Se ha modificado el código del software que maneja los SRT de manera que los archivos de extensión “.rad” (responsables de almacenar los datos de las mediciones) agreguen a su encabezado: coordenadas galácticas (l , b), temperatura de sistema (T_{sys}) y velocidad respecto del estándar de reposo de la fuente observada (V_{LSR}).

Se ha desarrollado un conjunto de scripts en el lenguaje de programación Python versión 2.7.2+ (Octubre 4 2011), para cada una de las experiencias documentadas en esta memoria. Todos se encuentran operativos y documentados en los anexos de esta memoria. Se puso especial énfasis en que los códigos fueran escalables, así como en los comentarios que faciliten el entendimiento y posterior modificación de estos.

Existe además una librería (`libRad.py` ver anexo B.1) con funciones generales que son utilizadas por todos los scripts. En particular la función `getMatrixFromRad`, como su nombre lo dice, toma todas las mediciones de un archivo `.rad` de colección de datos del SRT y los coloca en una matriz temporal para su reducción y análisis con mayor facilidad.

6.2.3. Experiencias para el Laboratorio de Radioastronomía

Como resultado de este trabajo se han desarrollado también cuatro experiencias con fines académicos para ser utilizadas dentro de los cursos de instrumentación astronómica o de un futuro Laboratorio de Radioastronomía para el Departamento de Ingeniería Eléctrica. Los enunciados de estas se encuentran en el anexo B.4 de esta memoria.

Cabe destacar que las primeras dos experiencias han sido reformuladas en cuanto al método de enseñanza y puestas a prueba frente a cuatro grupos de estudiantes en el contexto del curso “EL7026 - Sistemas de Instrumentación Astronómica” dictado por el profesor Ernest Michael en los semestres primavera 2011 y primavera 2012. Los resultados han sido variables obteniendo en algunos casos muy buenos resultados, como los citados en esta memoria para la medición del ancho de haz de la antena.

La importancia de desafiar a los estudiantes en la realización de estas pruebas, a diferencia de escribir una pauta de lo que deben realizar, abre las posibilidades de mejorar continuamente las prácticas y procedimientos de las pruebas básicas. En este sentido la persona encargada del laboratorio debería mantener pautas actualizadas de la mejor manera de realizar cada experiencia, así como de las calibraciones o mantenimientos necesarios.

Bibliografía

- [1] J. Álvares, C. Gonzáles, T. Opazo, and F. Reyes, “Informe final laboratorio sistemas de instrumentación astronómica,” Universidad de Chile, Santiago, Chile, Informe pregrado, 2012.
- [2] D. R. W. Williams, “Studies of four regions for use as standards in 21 CM observations,” *aaps*, vol. 8, p. 505, 1973. [Online]. Available: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1973A%26AS....8..505W>
- [3] D. Johnson and A. Rogers. (2012) Development of a new generation small radio telescope. MIT Haystack Observatory. Último acceso a la url en Abril-2013. [Online]. Available: <http://www.haystack.mit.edu/edu/undergrad/srt/pdf%20files/FinalReport.pdf>
- [4] J. R. Donoso, “Manual de supervivencia para el radiotelescopio de la escuela de ingeniería y ciencias,” Universidad de Chile, Santiago, Chile, Texto complemento a la memoria “Implementación de un Radiotelescopio para la Escuela de Ingeniería y Ciencias”, 2005.
- [5] R. Thompson, J. Moran, and G. Swenson, *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. Wiley-Interscience, 1976, ch. 1 and 2.
- [6] S. F. Smerd, “Radio-Frequency Radiation from the Quiet Sun,” *Australian Journal of Scientific Research A Physical Sciences*, vol. 3, p. 34, Mar. 1950. [Online]. Available: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1950AuSRA...3...34S>
- [7] (2002) Measurement of galactic rotation curve. MIT Haystack Observatory. Último acceso a la url en Abril-2013. [Online]. Available: <http://www.haystack.mit.edu/edu/undergrad/srt/SRT%20Projects/rotate.pdf>
- [8] T. Wilson, K. Rohlf, and S. Hüttemeister, *Tools of Radio Astronomy*. Springer, 2008, ch. 1, 7, 8 and 9.
- [9] Radio astronomy tutorial. MIT Haystack Observatory. Último acceso a la url en Abril-2013. [Online]. Available: http://www.haystack.edu/edu/undergrad/materials/RA_tutorial.html
- [10] Essential radio astronomy. National Radio Astronomy Observatory. Último acceso a la url en Abril-2013. [Online]. Available: <http://www.cv.nrao.edu/course/astr534/ERA.shtml>

- [11] J. E. Fariña, "Diseño y construcción de la etapa analógica de un interferómetro de dos antenas," Memoria (Título Ingeniero Civil Electricista), Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile, Noviembre 2010.
- [12] J. R. Donoso, "Implementación de un radio telescopio para la escuela de ingeniería y ciencias," Memoria (Título Ingeniero Civil Electricista), Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile, Junio 2005.
- [13] Velocity reference frames used in radio astronomy. MIT Haystack Observatory. Último acceso a la url en Abril-2013. [Online]. Available: <https://blogs.nrao.edu/askanastronomer/2012/09/18/velocity-reference-used-in-radio-astronomy/>
- [14] (2002) Old small radio telescope operator's manual. MIT Haystack Observatory. Último acceso a la url en Abril-2013. [Online]. Available: <http://www.haystack.mit.edu/edu/undergrad/srt/SRT%20Software/SRTManual.pdf>
- [15] F. J. Kerr, P. F. Bowers, P. D. Jackson, and M. Kerr, "Fully sampled neutral hydrogen survey of the southern milky way," *aaps*, vol. 66, pp. 373–504, Dec. 1986, provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System. [Online]. Available: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1986A%26AS...66..373K>
- [16] (2002) Measure antenna beamwidth using the sun as a signal source. MIT Haystack Observatory. Último acceso a la url en Abril-2013. [Online]. Available: <http://www.haystack.mit.edu/edu/undergrad/srt/SRT%20Projects/chautbeam.PDF>
- [17] (2002) On performing interferometry on the sun utilizing a yagi-uda array and an srt at mit haystack observatory. MIT Haystack Observatory. Último acceso a la url en Abril-2013. [Online]. Available: <http://www.haystack.mit.edu/edu/undergrad/srti/SRT-yagi-web.pdf>
- [18] An interferometer at mit haystack observatory. MIT Haystack Observatory. Último acceso a la url en Abril-2013. [Online]. Available: <http://www.haystack.mit.edu/edu/undergrad/srti/SRTI.pdf>
- [19] A. R. Divyanshu Vats. Development and testing of the new srt receiver and modeling the sun. MIT Haystack Observatory. Último acceso a la url en Abril-2013. [Online]. Available: http://www.haystack.mit.edu/edu/undergrad/srti/paper_deebu.pdf
- [20] (2013) Google maps. Google. Último acceso a la url en Abril-2013. [Online]. Available: <http://maps.google.com>
- [21] C. W. Allen, *Astrophysical Quantities*. Springer, 1973, ch. 9.
- [22] M. L. Varas, "introducción al cálculo numérico. apunte para el curso de ma33a," Universidad de Chile, Santiago, Chile, Apunte para el curso de MA33A de la Facultad de Ingeniería, 2000.

- [23] J. Z. Román. Técnicas experimentales en física general, propagación de errores. Univerisad de Valencia. Último acceso a la url en Abril-2013. [Online]. Available: http://www.uv.es/zuniga/3.2_Propagacion_de_errores.pdf
- [24] Serial peripheral interface bus. Wikipedia. Último acceso a la url en Abril-2013. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus
- [25] M. C. Salvatierra, "Diseño de un sistema de procesamiento para correlación y espectrometría en radioastronomía basado en asic y fpga," Memoria (Título Ingeniero Civil Electricista), Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile, Diciembre 2010.
- [26] S. Ballard, R. Harris, L. Lanz, B. Maruca, and D. Muñoz. (2008) Astronomy 218 haystack observatory project report. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. Último acceso a la url en Abril-2013. [Online]. Available: http://www.haystack.mit.edu/edu/undergrad/pdf/haystack_FINAL_2_8.pdf

Anexo A

Desempeño del Radiotelescopio

A.1. Script SRT para Mapa de Potencia del Cielo

```
: record MapaCieloPon05_09_12 /File name
: freq 1420.4 4 /Frequency selection and observing mode
: azel 190 30 /Select position for calibration
: calibrate /Start Calibration
* Scan
: azel 190 80
: azel 195 80
: azel 200 80
*...
: azel 160 80
: azel 165 80
: azel 165 75
: azel 160 75
*...
: azel 200 75
: azel 195 75
: azel 190 75
: azel 190 70
: azel 195 70
: azel 200 70
*...
: roff
```

A.2. Script en Python para la Reducción y Gráfica de los Datos

```
from pylab import *
from string import *

for i in range(4):

    muestras=[]
    promedio=[]

    #archivo=raw_input('Nombre Archivo: ')
    archivo='III.rad'
    nombre='Mapa Cielo 03_05_12 III'

    datos_entrada=open(archivo,'r')

    for linea in datos_entrada:
        if (linea[0]!='*'):
            continue
        linea=linea.replace(' ',' ')
        linea=linea.replace(' ',' ')
        linea=linea.replace(',','.')
        try:
            datos=linea[linea.index('64')+3:]
            muestras.append(datos.split(' '))
        except:
            continue
    datos_entrada.close()

    for linea in muestras:
        dato=0.0
        i=0.0
        for datos in linea:
            dato=dato+atof(datos)
            i+=1;
        promedio.append(dato/i)

    x=promedio
    filas=16
    columnas=68

    z=zeros((filas,columnas))

    tipo=input('Escoja tipo de grafico, 1-Normal; 2-Log; 3-Saturado; 4-SaturadoLog: ')

    if tipo==1:
        for i in range(filas):
            for j in range(columnas):
                if i%2==0:
                    z[i][j]=x[j+columnas*i]
                else:
                    z[i][j]=x[columnas*(i+1)-1-j] #de atras para adelante
    else:
```

```

if tipo==2:
    for i in range(filas):
        for j in range(columnas):
            if i%2==0:
                z[i][j]=log10(x[j+columnas*i])
            else:
                z[i][j]=log10(x[columnas*(i+1)-1-j]) #de atras para adelante
else:
    if tipo==3:
        saturacion=input('Ingrese temperatura de saturacion: ')
        for i in range(len(x)):
            if x[i]>saturacion:
                x[i]=saturacion
        for i in range(filas):
            for j in range(columnas):
                if i%2==0:
                    z[i][j]=x[j+columnas*i]
                else:
                    z[i][j]=x[columnas*(i+1)-1-j] #de atras para adelante
    else:
        for i in range(len(x)):
            if x[i]>saturacion:
                x[i]=saturacion
        for i in range(filas):
            for j in range(columnas):
                if i%2==0:
                    z[i][j]=log10(x[j+columnas*i])
                else:
                    z[i][j]=log10(x[columnas*(i+1)-1-j]) #de atras para adelante

fig = plt.figure(figsize=(20,5))
ax = fig.add_subplot(1,1,1)
im = ax.imshow(z,aspect='equal')
colorbar(im,shrink=0.7)
contour(z)

ax.xaxis.set_major_locator(LinearLocator(numticks=columnas))
ax.yaxis.set_major_locator(LinearLocator(numticks=filas))

ejey=range(80,0,-5)
ejex1=range(190,360,5)
ejex2=range(0,170,5)
ejex1.extend(ejex2)

for i in range(len(ejex1)):
    if i%2!=0:
        ejex1[i]=''

ax.set_yticklabels(ejey, size='small')
ax.set_xticklabels(ejex1, size='small')

```

```
xlabel('Azimut', size='small', weight='heavy', family='sans-serif' )
ylabel('Elevacion', size='small', weight='heavy', family='sans-serif' )
if(tipo==1):
    title('SRT: Mapa de potencia Normal en H1 [K]. '+nombre )
    savefig('Normal '+nombre)
if(tipo==2):
    title('SRT: Mapa de potencia Logaritmico en H1 [K]. '+nombre )
    savefig('Log '+ nombre)
if(tipo==3):
    title('SRT: Mapa de potencia Saturado en '+ str(saturacion) + ' en H1 [K]. '+nombre )
    savefig('Saturado '+nombre)
if(tipo==4):
    title('SRT: Mapa de potencia Logaritmico Saturado en '+str(saturacion)+' en H1 [K]. '+nombre )
    savefig('SaturadoLog '+nombre)
```

A.3. Archivo de Configuración SRT

```
* SIMULATE RECEIVER 1
* SIMULATE ANTENNA 1000
* STATION: latitude longitude west in degrees
* SOU: source ra, dec, name, epoch
* SAT: satellite ID then longitude west
STATION -33.4582 70.6619 DIE

* source coords epoch 1950 unless specified
*SOU 05 31 30 21 58 00 Crab
*SOU 05 32 48 -5 27 00 Orion
*SOU 23 21 12 58 44 00 Cass
SOU 00 00 00 00 00 00 Sun
*SOU 17 42 54 -28 50 00 SgrA
*SOU 06 29 12 04 57 00 Rosett
*SOU 18 17 30 -16 18 00 M17
*SOU 20 27 00 41 00 00 CygEMN
*SOU 00 00 00 00 00 00 Moon
*SOU 21 12 00 48 00 00 G90
*SOU 05 40 00 29 00 00 G180
*SOU 12 48 00 28 00 00 GNpole
*SOU 00 39 00 40 30 00 Androm
*SOU 05 14 12 18 44 00 AC1
*SOU 03 29 00 54 00 00 PULSAR
*SOU 08 30 00 -45 00 00 PS

*GALACTIC 10 1 RC_CLOUD
GALACTIC 356 -4 S9
GALACTIC 207 -15 S8
GALACTIC 132 -1 S7
GALACTIC 1.91 41.42 S6

*south pole
AZEL 180 33.4582 SPole

AZLIMITS 190.0 170.0
ELLIMITS 2 88.0

CASSIMOUNT
COMM 3 /* COM 1 */
CALCONS 1.0 /* gain correction constant to put power in units of K */
BEAMWIDTH 7.0 /* 3 dB antenna beamwidth in degrees - used to set offsets for scans */
MANCAL 1 /* 0 or absence indicates automated cal vane */
NOISECAL 108.5 /* initial value for noise diode calibration */
DIGITAL /* needed for digital receiver */
TOLERANCE 1 /* optional max error in counts */
* COUNTPERSTEP 50 /* optional stepped antenna motion */
* RECORDFORM TAB VLSR /* optional tabs between fields and VLSR in output */
*ELBACKLASH 3.0 /* optional correction for elevation backlash */

*****

* near buildings
```

*** Torre Central**

AZEL 320 5 |_Torre
AZEL 320 10 |
AZEL 320 15 |
AZEL 320 18 —
AZEL 330 18 —
AZEL 340 18 —
AZEL 350 18 —
AZEL 355 15 |
AZEL 355 10 |
AZEL 355 5 |

Caja Escaleras

AZEL 82 5 |_Escaleras
AZEL 82 10 |
AZEL 82 15 |
AZEL 82 20 |
AZEL 82 25 |

AZEL 82 14 —
AZEL 85 14 —
AZEL 90 14 —
AZEL 95 14 —
AZEL 100 14 —
AZEL 105 14 —
AZEL 110 14 —
AZEL 115 14 —
AZEL 120 25 |
AZEL 120 20 |
AZEL 120 15 |
AZEL 120 10 |
AZEL 120 5 |

*** end near building**

*** Satelites (geostationary)**

SSAT s 0
SSAT s 5
SSAT s 10
SSAT s 15
...
SSAT s 340
SSAT s 345
SSAT s 350
SSAT s 355

*** End Satelites**

A.4. Mapas de potencia SRT

A.4.1. Antena Poniente

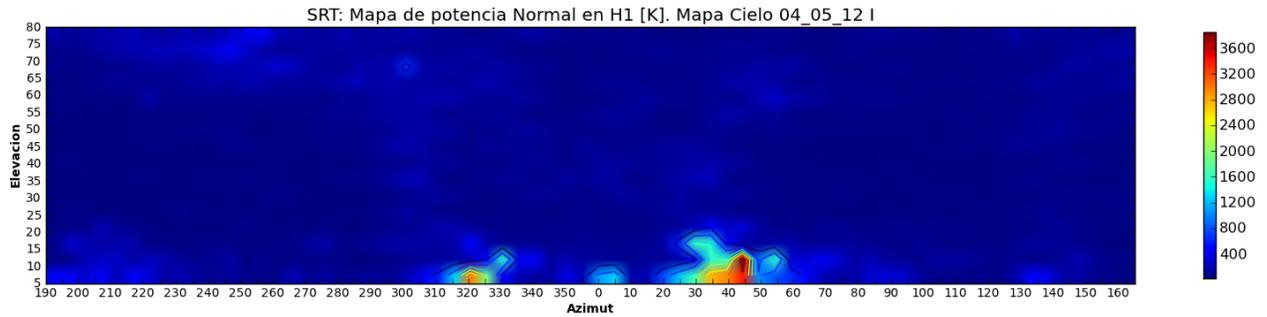


Figura A.1: Mapa de potencia escala normal antena poniente.

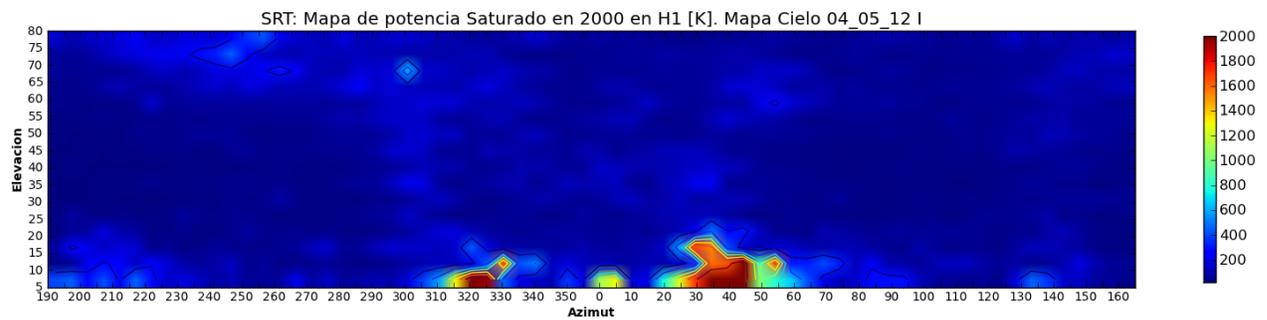


Figura A.2: Mapa de potencia saturado escala normal antena poniente.

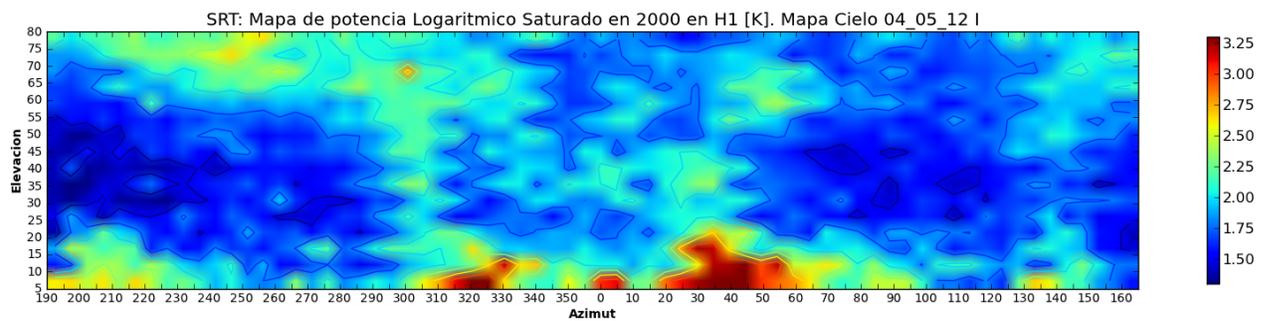


Figura A.3: Mapa de potencia saturado escala logarítmica antena poniente.

A.4.2. Antena Oriente

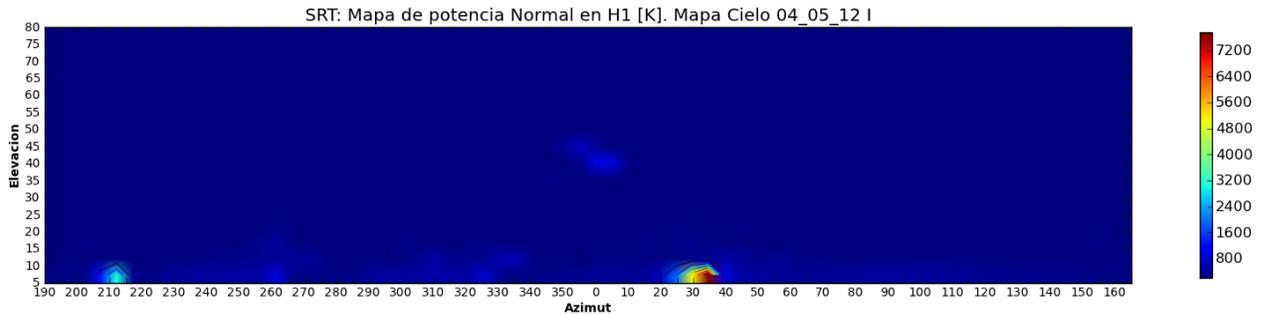


Figura A.4: Mapa de potencia escala normal antena oriente.

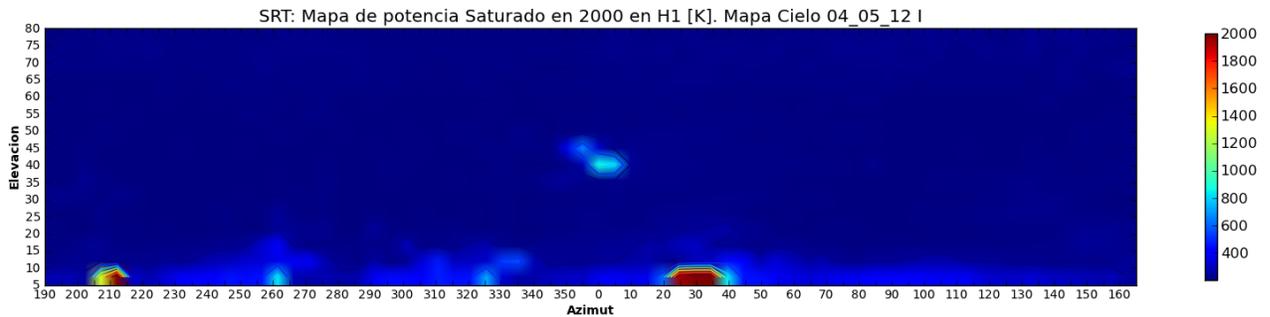


Figura A.5: Mapa de potencia saturado escala normal antena oriente.

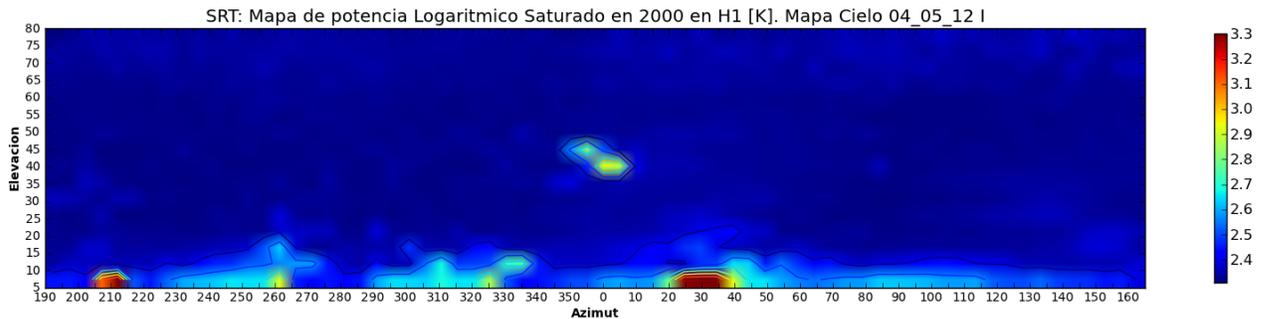


Figura A.6: Mapa de potencia saturado escala logarítmica antena oriente.

A.5. Informe Final Sobre Medición Beamwidth



fcfm

Universidad de Chile
Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Eléctrica
EL7026 - Sistemas de Instrumentación Astronómica

Laboratorio 1

Informe final

Equipo: Jaime Álvares B.
Carlos González C.
Tomás Opazo T.
Francisco Reyes A.
Profesor: Ernest Michael
Auxiliar: Pablo Tapia
Domingo 15 de Enero del 2012
Santiago, Chile.

1. Introducción

El presente documento corresponde al informe final del Laboratorio 1, que detalla las experiencias que se realizaron. Se detallarán los resultados obtenidos, su análisis así como los pasos seguidos y si estos concordaron o no con lo previsto en el 'plan de trabajo' antes entregado.

Las experiencias tuvieron lugar los días Lunes 9 y Miércoles 11 de Enero del 2012. Originalmente la experiencia debía desarrollarse solo el día Lunes, sin embargo, debido a errores en 2 de las tres experiencias requeridas obligaron al equipo a realizar una segunda sesión que las corrigió finalmente.

Además, se tuvo acceso a las memorias de título de JR Donoso y JE Fariñas, que permitieron tener un mayor conocimiento tanto teórico como práctico del SRT. Tanto estas como las otras fuentes empleadas están debidamente documentadas en la bibliografía al final del presente informe

2. Experiencias desarrolladas

Hubo 4 experiencias encargadas de realizar, las dos primeras de calibración para obtener T_{sys} y T_{rec} , la tercera consistió en determinar el beamwidth de la antena, y finalmente determinar posibles errores en las mediciones. Esta última experiencia encargada esta incorporada dentro de cada uno de los 3 puntos anteriores, dado que los errores cometidos en las mediciones son dependientes de la actividad realizada, y son comentados dentro de ellas.

Respecto a la temperatura equivalente T_{sys}

Cuando se recibe una señal proveniente del espacio, esta contiene una cierta densidad de flujo, que para señales cosmológicas es muy bajo. Analizando la FFT de esta señal sobre cierto rango de frecuencia, es posible determinar su intensidad como función de la longitud de onda. En el rango de ondas de radio, generalmente estos espectros recibidos se asemejan a los que tendría un cuerpo negro que cumpla con la aproximación $h\nu \ll kT$, es decir, las longitudes de onda observadas son pequeñas comparadas con la temperatura del objeto que las emite. Esta clase de espectros es plana en frecuencia y su intensidad B_0 dependiente solo de la temperatura del emisor, así se tendría 1 .

$$B_0 = \frac{2KT}{\lambda^2} \quad (1)$$

Integrando B_0 en frecuencia se obtendría su densidad de flujo en unidades de $[Wm^{-2}Hz^{-1}]$. Por lo que existe una equivalencia entre potencia recibida por la antena y la temperatura del emisor.

Con esto en mano, se habla de la temperatura equivalente del sistema T_{sys} , igual al aporte de la fuente espacial y el resto de los ruidos del sistema, expresados en °K, así 2.

$$T_{sys} = T_{receiver} + T_{spillover} + T_{sky} + T_{otros} \quad (2)$$

Donde $T_{receiver}$ es la temperatura equivalente a la potencia del ruido blanco introducido por el dispositivo (en la frecuencia de la antena), T_{sky} es la temperatura del emisor en el cielo y $T_{spillover}$ es la temperatura equivalente a la potencia captada por el resto de los lóbulos de la antena (aquellos distintos al beamwidth). Finalmente T_{otros} corresponde a ruidos introducidos por dispositivos varios, como las guías de onda, las líneas de transmisión, y será despreciado para las calibraciones explicadas mas adelante.

Respecto a la calibración y determinación de T_{sys}

Calibrar un radiotelescopio sirve para determinar que parte de la temperatura equivalente recibida, es producto de ruidos del sistema, y que parte es producto de la fuente observada. Esto se puede ver en la figura 1. En este ejemplo se aprecia como es necesario conocer T_{sys}, para poder determinar cual es la temperatura equivalente del emisor.

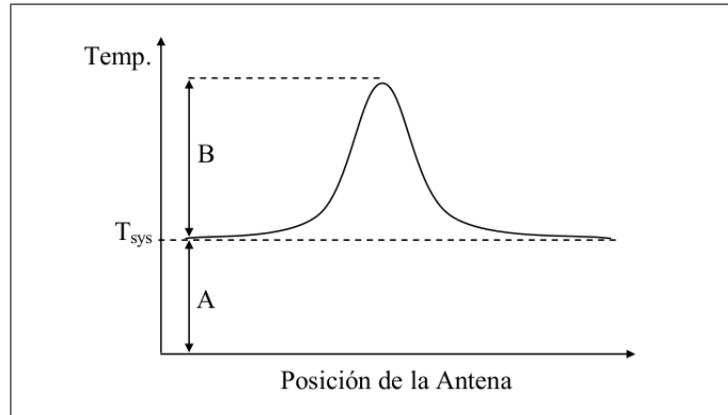


Figura 1: A: Temperatura del sistema, B: Temperatura de la fuente

2.1. Realizar calibración manual del radiotelescopio

El SRT actualmente posee dos formas de calibrar sus mediciones. Una forma manual utiliza un *absorber* para realizar la comparación entre la potencia de la señal recibida con la entrada a la antena receptora tapada por el *absorber* y la señal recibida de forma normal. Esto permite al sistema calcular los parámetros de operación como la temperatura del sistema y del receptor. Otro método –que se analizará en la sección siguiente– consiste en utilizar un diodo de ruido directamente en el receptor del radiotelescopio para realizar estas mediciones de forma automática.

2.1.1. Consideraciones

La calibración del SRT es la razón entre la potencia medida por el receptor con el *absorber* bloqueando completamente la entrada del receptor y la potencia medida directa de la señal proveniente del espacio según la ecuación 3.[1]

$$\frac{P_{vane}}{P_{sky}} = \frac{T_{receiver} + T_{vane}}{T_{receiver} + T_{spillover} + T_{sky}} \quad (3)$$

En esta ecuación se identifican las siguientes variables: [2]

P_{vane} Es la potencia recibida con el *absorber* bloqueando la antena.

P_{sky} Es la potencia recibida con la antena despejada.

$T_{receiver}$ Es la temperatura del receptor.

T_{vane} Es la temperatura del *absorber* que al radiar como cuerpo negro se asume igual a 300 K.

$T_{spillover}$ Es la temperatura del *spillover* que se asume igual a 20 K.

T_{sky} Es la contribución de temperatura del cielo.

Con estos parámetros el software del SRT es capaz de obtener la temperatura de sistema y del receptor. En la cuadro 1 se observan mediciones de referencia realizadas en un SRT [2]. Estas mediciones se pueden utilizar para compararlas con las obtenidas durante el desarrollo de la actividad, pues se observa que la temperatura del sistema debería rondar entre los 230 K y 250 K. Si se observan temperaturas mucho mayores significaría que el sistema, por ejemplo el amplificador y el receptor, estarían introduciendo demasiado ruido lo cual es indeseable y por lo demás improbable, de modo que en realidad sería un signo de una calibración mal realizada.

P_{vane}	P_{sky}	T_{vane}	$T_{spillover}$	$T_{receiver}$
505.33	242.33	300	20	238
549.25	264.08	300	20	239
563.83	269.25	300	20	236
570.83	279.67	300	20	249
562.67	274.83	300	20	247

Cuadro 1: Calibración manual del SRT. Resultados de referencia

2.1.2. Procedimiento

Para realizar la calibración manual del SRT el equipo debe proceder según las siguientes indicaciones:

- Seleccionar una fuente para realizar las mediciones, por ejemplo el Sol.
- Utilizar el comando `aze1` para posicionar la antena algo desajustada en elevación y en azimutal de la fuente. Por ejemplo 1 grado en elevación y 10 grados en azimutal (usar 40 grados en azimutal en caso de medir el sol [1]).
- Presionarle botón 'Vane' en la interfaz. El software indicará que se debe posicionar el **absorber** en la entrada del receptor.
- Se debe coordinar con un miembro del equipo que esté en el lugar de la antena para que manualmente bloquee la entrada del receptor con el *absorber*.
- Se presiona el botón 'Vane' que iniciará la toma de datos para obtener P_{vane} . [3].
- Después de diez segundos se debe indicar al personal en el lugar de la antena para que retire el *absorber*.
- Al presionar el botón 'Vane' nuevamente se iniciará la toma de datos para obtener P_{sky} .
- El sistema automáticamente calculará los valores de T_{sys} y T_{rec} y los desplegará en la sección de información como se muestra en la figura 2. [3]

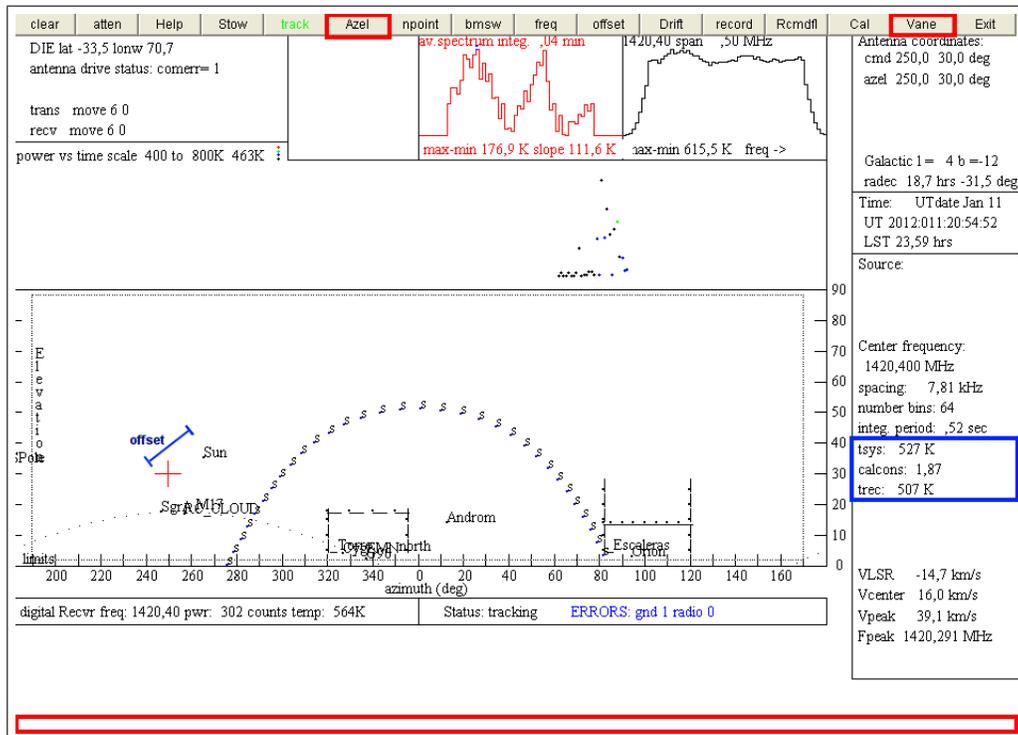


Figura 2: Interfaz del software del SRT

2.1.3. Resultados

Considerando la hora en que se realizaron las mediciones y la posición del sol en ese momento se decidió agregar un offset para la calibración que dejara al telescopio apuntando a una zona del espacio libre de interferencias. Basado en la figura 3 se llevó a la antena a la posición (250,30) una zona muy fría en la imagen.

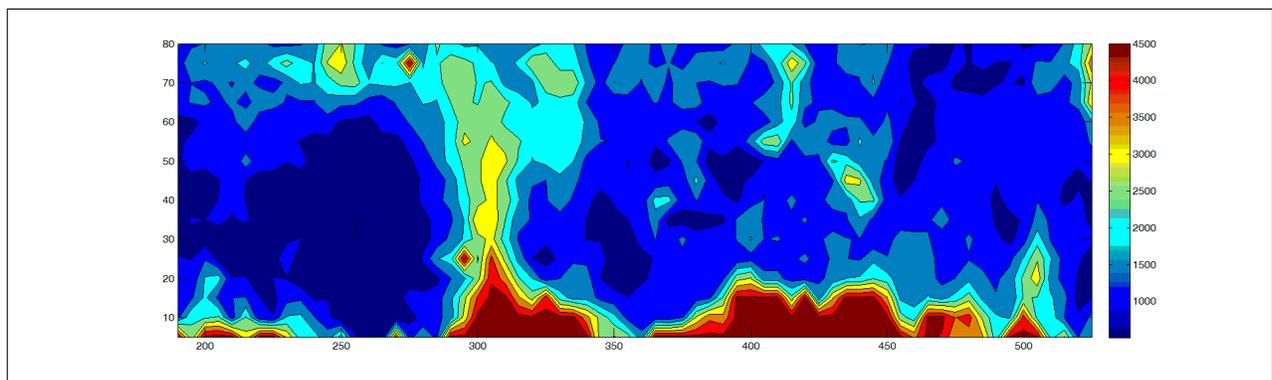


Figura 3: Mapa de interferencia del cielo sobre el SRT

Luego se procede a realizar 2 calibraciones, detallados en las primeras filas de la tabla 2. Estos valores no se acercan a los resultados esperados según el cuadro 1 por lo que se concluye que la calibración no se está efectuando de manera óptima. Entre las conclusiones generadas se considera que el material que se está utilizando (*absorber*) puede no funcionar adecuadamente debido a que es demasiado poroso y

puede ingresar potencia extra a través de él. El equipo decide buscar otro *absorber* que no sea poroso, para esto utiliza una maleta dentro de la cual se agrega el *absorber* original. La tercera medición en la tabla 2 hacen sospechar que se alcanzan mejores resultados, salvo porque las siguientes mediciones resultan peores.

Medición	T_{sys}	T_{rec}
1	527	507
2	619	599
3	437	417
4	778	758
5	1065	1045
6	577	557

Cuadro 2: Resultados de la calibración manual

2.2. Realizar una calibración por diodo de ruido en el radiotelescopio

La actividad realizada y aquí expuesta tiene por objetivo medir la temperatura de ruido del sistema. La calibración se define como la razón de la potencia medida por el receptor cuando se usa un calibrador de ruido electrónico y la potencia medida cuando el calibrador electrónico está apagado. En ambos casos la potencia medida tiene contribuciones desde el spillover y el cielo. La razón de potencia está definida por la siguiente ecuación:[1]

$$\frac{P_{on}}{P_{sky}} = \frac{T_{spillover} + T_{noise} + T_{receiver} + T_{sky}}{T_{receiver} + T_{spillover} + T_{sky}} \quad (4)$$

Para realizar esta calibración la antena debe ser dirigida hacia un sector del cielo cercana a una fuente luminosa conocida. En esta actividad el sol será seleccionada como fuente. Para llevar a cabo la medición usando el diodo de ruido, y la instrucción NOISECAL debe ser incluida en el archivo SRT.CAT.

2.2.1. Introducción

Como se mencionó más arriba, la calibración de los receptores utilizados en radioastronomía es necesaria para contar con una escala absoluta de temperatura de antena. La calibración debe ser revisada frecuentemente debido a las posibles variaciones de ganancia y temperatura de ruido del receptor. Por lo tanto es conveniente realizar el procedimiento de calibración justo antes de hacer una observación.

2.2.2. Calibración utilizando diodo de ruido

Así, se le agrega al sistema una fuente de ruido de banda ancha con un valor de temperatura conocido. En este caso se utiliza el dispositivo de calibración de diodo de ruido del SRT el cual está formado por un circuito electrónico para la generación de ruido gaussiano de banda ancha y una pequeña antena del tipo dipolo. Este sistema se encuentra localizado en la base del plato del SRT. El circuito tiene como principal componente el diodo Noise/Com NC302L, se conecta a una fuente de alimentación de 24 V_{DC} y dos resistencias en serie (1 $k\Omega$ y 1.5 $k\Omega$) son conectadas en cada borne. El circuito y su diagrama se muestran en la figura 1 y 2. Una corriente de 6 mA circula por el circuito produciendo una señal de un

amplio espectro de frecuencia, la cual es radiada por la antena dipolo y posteriormente detectada por el receptor. El dipolo es fabricado para ser $\frac{\lambda}{2}$ (10.5 cm). ver figura 4 y 5.

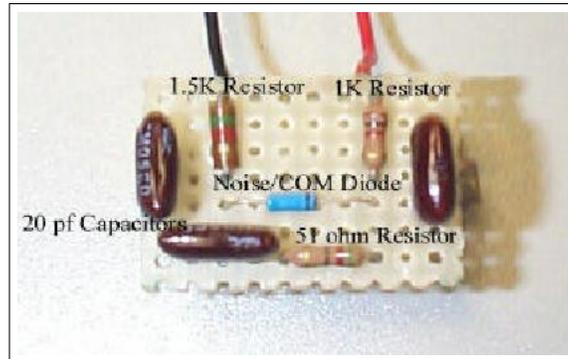


Figura 4: Imagen del circuito del diodo de ruido

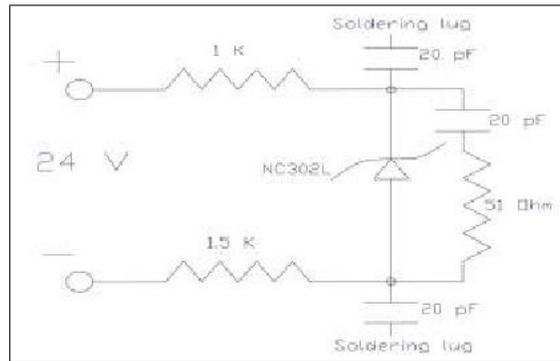


Figura 5: Circuito del diodo de ruido

En este método de calibración se considera que la temperatura del diodo de ruido $T_{noisecal}$ es 115 °K aproximadamente, por lo tanto se debe modificar el archivo `srt.cat` con la sentencia "NOISECAL 115" y en este caso también se debe considerar la temperatura de 'spillover' de 20 °K. Durante el proceso de calibración y como resultado del comando `noisecal`, el SRT realizará dos tipos de mediciones. En la primera medición se activará el diodo de ruido, donde se tendrán las siguientes contribuciones de temperatura: T_{sky} , $T_{spillover}$, $T_{noisecal}$ y T_{rec} , y durante la segunda medición el diodo de ruido estará en off y por lo tanto las contribuciones de temperaturas serán: T_{sky} , $T_{spillover}$ y T_{rec} . La relación de potencia cuando el diodo está en estado on y off (sky) está dado por:

$$\frac{P_{on}}{P_{sky}} = \frac{T_{spillover} + T_{noise} + T_{receiver} + T_{sky}}{T_{receiver} + T_{spillover} + T_{sky}} \quad (5)$$

Finalmente el programa realiza los cálculos de temperatura e imprime los resultados en la línea de comentarios:

$$T_{rec} = (T_{noisecal} * pwr_0 pwr_1) - pwr_0 - T_{spillover} \quad (6)$$

$$T_{sys} = T_{rec} + T_{spillover} \quad (7)$$

Procedimiento:

1. Se eligió el sol como fuente luminosa conocida.
2. Se activa la instrucción "NOISECAL" del archivo srt.cat
3. Se posiciona la antena en la posición en que se encuentra el sol.
4. Luego se eligen 4 puntos de calibración en torno al sol utilizando el diodo de ruido. Estos puntos se encuentran a +40 y -40 grados de offset en las coordenadas azimutal y de altitud.

El script utilizado en esta actividad fue el siguiente:

```
:record filename /Comenzar la grabación de los datos, la salida filename es opcional
:azel 130 45 /Posición de calibración
:1420 5 0.0 /Frecuencia scaneda 5 bins (muestras), sin incremento de la frecuencia
:noiseocal /La calibración se realiza usando un diodo de ruido
:Sun /Source command
:offset -40 0 /Esperar por 30 seg.
:offset 0 0 /Esperar por 30 seg.
:offset 40 0 /Esperar por 30 seg.
:offset 0 0 /Esperar por 30 seg.
:offset 0 -40 /Esperar por 30 seg.
:offset 0 0 /Esperar por 30 seg.
:offset 0 40 /Esperar por 30 seg.
:offset 0 0 /Esperar por 30 seg.
:roff /Fin de almacenamiento
```

2.2.3. Resultados

Los cuatro puntos de calibración obtenidos en torno al sol de acuerdo al script ejecutado son los que se muestran en la siguiente tabla 3

Calibración	T_{sys} °K	T_{rec} °K
1	139	119
2	98	78
3	116	96
4	81	61

Cuadro 3: Resultados calibración por diodo de ruido

2.2.4. Comentarios

La variabilidad de los resultados se puede explicar a que los cuatro puntos seleccionados se encuentran a 80 grados de distancia tanto en la coordenada azimutal como de altitud, por lo cual se podría estar calibrando el sistema en zonas del cielo con distintas intensidades de interferencias. Para tener un

valor más representativo se podría seleccionar una zona del cielo donde la interferencia sea mínima, para esto habría que estudiar los distintos mapas de radiación que se encuentran a disposición.

2.3. Medir el beam width de la antena

Es posible caracterizar toda antena por su diagrama de radiación, en particular, un parámetro importante es el beam width, correspondiente al ángulo (definiendo ángulo nulo centrado en el lóbulo principal) en el que la potencia captada es la mitad de la máxima. Esta es la llamada *half-power beam width*, siendo una de las definiciones más utilizadas y la que se buscó medir en esta experiencia.

Para idear esta experiencia, es necesario recordar que los radiotelescopio realizan sus observaciones en base a mediciones de intensidad proveniente de una dirección. Situándose en este contexto y además considerando que la antena radia (capta) un haz gaussiano, es claro que la mayor medida de intensidad de una fuente lejana (en donde la emisión de la fuente puede considerarse paraxial), se da cuando la dirección de la dicha fuente se encuentra en el ángulo 0 del diagrama de radiación (eje focal). Al mover dicho eje (rotar la antena), la intensidad captada se comportaría aproximadamente como una distribución gaussiana en función del ángulo. Un esquema de esto se muestra en la figura 6.

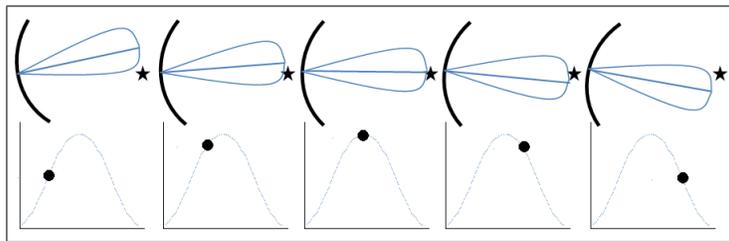


Figura 6: Estrategia medición beam width

Una vez hechas las mediciones, se puede encontrar los 2 ángulos en que la intensidad corresponde a la mitad de la máxima, siendo la diferencia de estos el beam width.

Para lograr una buena aproximación con la estrategia a emplear, se requiere una fuente de tamaño pequeño respecto al beam width y de gran intensidad respecto a su alrededor. Dada las características del SRT, el sol cumple dichas características por lo que se usara como el objetivo a medir.

En base al procedimiento, inicialmente se consideró que la toma de datos sería realizada en primer lugar calibrando, luego apuntando la antena al sol para posteriormente hacer mediciones variando el ángulo azimutal en intervalos de 1 grado entre -30 y 30, y luego repetir el proceso para la elevación. Para esto se generó un script en un archivo .cmd el que se muestra esquemáticamente (fue cortado) a continuación.

Listing 1: Ejemplo script para medir beam width (subconjunto de medbw.cmd)

```

1 *Medicion el beam width
2 *
3 *Etapa de calibracion
4 : record medbeamwidth.rad /comienza grabacion
5 : azel 130 45 /posicion de calibracion. Debe modificarse
6 * /tal que elevacion del sol y 40 grados offset
7 : 1415 5 0.0 /5 bins y sin salgod e freq
8 : calibrate /calibracion
9 *Etapa de medicion
10 : Sun

```

```

11 : offset -30 0           /comienza offset az de -30 hasta +30
12 : offset -29 0
13 : offset -28 0
14 : offset -27 0
15 * cortado para efectos de muestra (sigue en intervalos de 1 hasta 30 0
16 : offset 29 0
17 : offset 30 0           /Fin medicion az
18 : offset 0 30          /comienzo medicion el
19 : offset 0 29
20 : offset 0 28
21 : offset 0 27
22 * cortado para efectos de muestra (sigue en intervalos de 1 hasta 0 -30
23 : offset 0 -29
24 : offset 0 -30         /Fin medicion el
25 : roff                 /Fin grabacion
26 : stow                 /retorna a stow

```

Una vez en el laboratorio, al tratar de realizar las mediciones se encontraron inconvenientes tanto en la intensidad de las medidas (las cuales resultaron en extremo erráticas) como en la ejecución del script. Ante esto, por recomendación del cuerpo docente, se planificaron nuevas mediciones.

Las mediciones se realizaron con la antena en una posición estática, durante un extendido intervalo de tiempo, para así obtener el mismo movimiento relativo que el de usar un offset a partir de la elevación y ángulo azimutal del sol. Previo a esto, fue necesario definir que el intervalo de tiempo en el que se realizaría la experiencia el cual fue de entre las 12:00 hrs y las 18:00 hrs. Luego, dentro de este intervalo, se estimó usando el software del SRT las coordenadas (az y el) del sol cada media hora y así estimar los puntos en la esfera celeste por los cuales el sol pasaría en el momento de las mediciones. Así, se obtuvo un rango de ángulo azimutal que el sol recorrería, permitiendo fijar la posición inicial de la antena en el centro de dicho intervalo.

2.3.1. Procesamiento de datos

Los datos obtenidos durante el desarrollo de la experiencia se encuentra en un archivo .rad que guarda en cada línea la información de las muestras tomadas. Esta línea tiene un formato que sigue el siguiente estándar:

```
[hora] [Az] [El] [a] [b] [Freq] [c] [d] [n datos] [dato 0] [dato 1] .... [dato n]
2012:012:15:10:59 349,4 76,1 3,9 -2,6 1420,15 ,00781250 1 64 2,0 2,4 ...
```

Lamentablemente el archivo mezcla espacios dobles y triples para separar los campos y las mediciones utilizan coma (,) para números reales lo que lo hace poco útil para trabajar en programas como Matlab. Además revisando los datos tomados se observa que durante algunos instantes se introduce gran ruido a las mediciones con valores sobre 1000 K. Por último se observa que sólo se tiene la medida del tiempo en que se realiza la medición y no del ángulo que se encuentra la antena o la fuente dado que la medición se realiza de forma estática.

Para solucionar estos problemas se implementó un programa en Python que procesa los datos obtenidos de la siguiente manera:

- Elimina dobles y triples espacios, reemplaza comas por puntos.

- Toma las 64 muestras de cada medición y las promedia.
- Para cada hora en que se realizó una medición calcula el ángulo azimutal del sol.
- Elimina líneas con valores fuera de determinado rango y mediciones contiguas con datos muy dispares ($>50\%$)
- Genera un archivo de salida con el tiempo, al ángulo y la potencia promedio separada por un punto y coma.

Cabe destacar que para obtener el ángulo del sol se tomó la posición del mismo cada media hora utilizando el mismo software del SRT pero cambiando la hora del computador. Con estos datos se realizó un ajuste en Matlab para obtener la curva que estima la posición dado cualquier hora del día en UT. La figura 7 refleja el ajuste realizado para obtener esta medida.

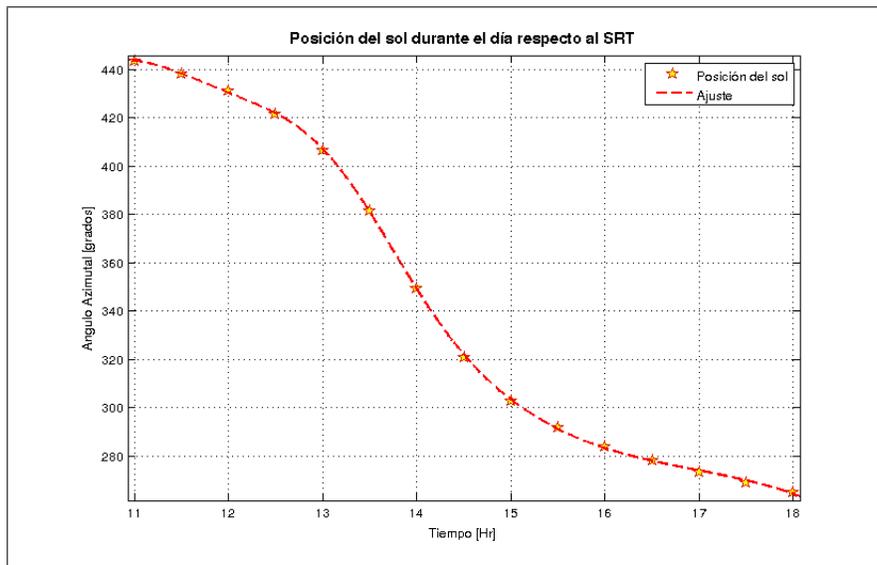


Figura 7: Estimación de la posición del sol durante el día

El código de este programa se puede revisar en el anexo A.

2.3.2. Resultados

Luego del procesamiento de datos descrito en la sección anterior, se logró obtener los resultados de mediciones en función del ángulo azimutal del sol (no corregido). Esto se muestra en la siguiente figura:

Como se puede apreciar, se incluyó además una función gaussiana de color rojo ajustada a los datos, en base a esta, se lograron obtener los parámetros de importancia para la medición del beam width, los cuales son la intensidad máxima de 195.4 K, una mínima de 74 °K. Por lo tanto, se puede obtener los ángulos a los cuales se registra el valor medio de estos valores, los cuales son 357.74 y 325.24, siendo la diferencia de estos 2 ángulos los que definen el beam width. Para obtener el valor final de este, se debe recordar que la variación del ángulo azimutal del sol no representa un desplazamiento uniforme de este, por lo que se debe corregir multiplicando por el coseno de la elevación. Luego, se utilizaron las estimaciones previas de las coordenadas del sol en el intervalo de tiempo de interés, de donde se obtiene que la elevación a los 357.74 (az) es de 78.1 mientras que a los 325.24 (az) la elevación es de 75.8. Con esto, se obtiene que los ángulos corregidos a los cuales se logra medir al mitad de la potencia máxima

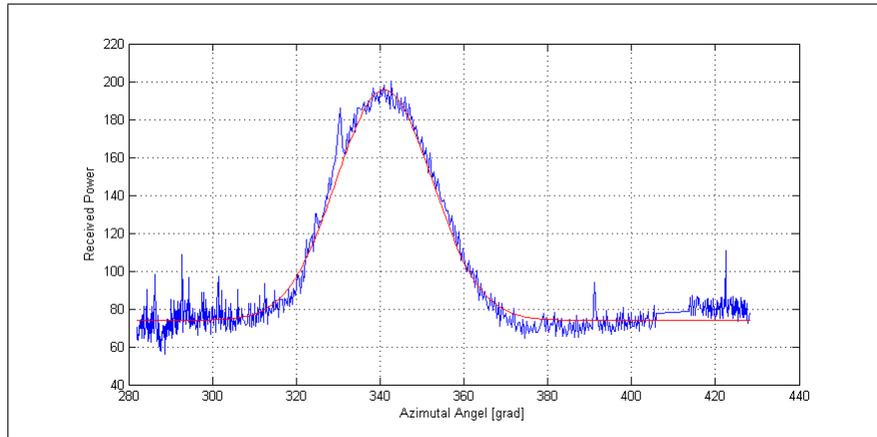


Figura 8: Resultados mediciones temperatura vs angulo azimutal

son $357,74\cos(78,1) = 73,56$ y $325,24 * \cos(75,8) = 79,78$. Por lo tanto, el beam width estimado de las mediciones es de la diferencia de estos ángulos, o sea 6.22. Se sabe que el valor teórico del HPBW para una antena parabólica es aproximadamente $70\left(\frac{\lambda}{d}\right)$ con λ el longitud de onda (0.21 m) y d el diámetro del disco (2.3 m) lo que da un beam width de 6.39. Por lo tanto, dada la cercanía de los resultados experimentales y teóricos, se puede ratificar el procedimiento y las mediciones.

3. Conclusiones de las experiencias desarrolladas

Respecto a la calibración manual se puede concluir que en sí no es un buen método para calibrar el SRT. Posee la desventaja de ser sumamente lento y poco preciso en cuanto se puede ver afectado por la misma presencia de las personas que realizan el trabajo de calibración, por fuentes cercanas como celulares o por estar apuntando a un lugar del cielo que presenta alta interferencia para la banda de interés. El equipo considera que el material utilizado para la calibración manual no es el más adecuado y por eso se intentó sustituirlo por otro. El problema de haber utilizado un material dieléctrico como la maleta es que esta podría haber radiado a mayor temperatura que la supuesta en los cálculos que es 300 K.

No obstante la calibración manual es necesaria para poder utilizar el método más recomendado de calibración basado en el diodo de ruido, pues la temperatura de ruido equivalente que introduce el diodo puede variar a lo indicado por el fabricante, por lo que determinarla por medio del método manual, para luego solo usar la calibración por diodo sería el óptimo en este caso. Es decir, obtener cierta certeza de que las calibraciones manuales están correctas para luego obtener una medida del ruido del diodo que se pueda utilizar para luego realizar principalmente calibraciones utilizando el diodo de ruido. Se deberían probar varias calibraciones manuales apuntando a lugares identificados como de bajo ruido, en cada lugar realizar varias medidas para obtener el promedio. Se sabe que durante el día varía la calidad de las mediciones por lo cual deberían compararse los resultados obtenidos en diferentes instantes de tiempo.

Respecto a la calibración por diodo, esta resulta satisfactoria en cuanto a valores de T_{sys} y T_{rec} así como en comodidad simplicidad y rapidez. Por lo que la consideramos la recomendada.

Referencias

- [1] Haystack Observatory SRT. *Measure System Temperature using Vane Calibration*. [Documento Web] URL <http://www.haystack.mit.edu/edu/undergrad/srt/SRT%20Projects/srtsystemp.PDF> (Visitado el 7 de enero de 2012).
- [2] Rodolfo Montez Jr. *Electronic Noise Calibrator for the Small Radio Telescope*. [Documento Web] URL web.mit.edu/8.13/www/calibrator_report.pdf (Visitado el 7 de enero de 2012)
- [3] Haystack Observatory SRT. *Operator's Manual*. [Documento Web] URL <http://www.haystack.mit.edu/edu/undergrad/srt/SRT%20Software/SRTManual.pdf> (Visitado el 7 de enero de 2012).
- [4] Haystack Observatory SRT. *Supplement to the SRT Operator's Manual*. [Documento Web] URL <http://web.mit.edu/8.13/www/supplement.pdf> (Visitado el 7 de enero de 2012).
- [5] JR Donoso, memoria de título. *IMPLEMENTACIÓN DE UN RADIO TELESCOPIO PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS*.
- [6] JR Donoso. *Radiotelescopio de la Escuela de Ingeniería y Ciencias. Manual de Supervivencia*.
- [7] JE Fariñas. *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN INTERFERÓMETRO DE DOS ANTENAS*.

A. Procesamiento de datos

Listing 2: Programa en Python para procesar datos obtenidos

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  #
3
4
5  #          PROCESADOR DE DATOS OBTENIDOS CON EL SRT
6  #
7  #  Ordena la informacion promediando las muestras obtenidas y guardando en
8  #  un archivo de salida 'datos_salida.txt' el tiempo y el promedio de las
9  #  muestras obtenidas. Lee archivos con el formato de linea:
10 #
11 #  "2012:012:15:10:08 349,4 76,1 3,9 -2,6 1420,15 ,00781250 1 64
12 #  2,0 2,4 4,0 8,1 15,8 28,0 41,7 [.. mas datos ..] "
13 #
14 #  @Autor: Carlos Gonz lez Cort s [carlgonz@ug.uchile.cl]
15 #  @Date: Enero 2012
16 #
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46

```

```

15
16 from math import *
17 from string import *
18
19 ###
20 #  Retorna la hora ingresada como "hh:mm:ss" en formato decimal
21 ###
22 def get_hora(linea):
23     hms = linea[9:].split(':')
24     h=atof(hms[0])+atof(hms[1])/60.0+atof(hms[2])/3600.0
25     return h
26
27 ###
28 #  Esta funci n retorna el ngulo azimutal del sol respecto al
29 #  SRT a cualquier hora del d a
30 ###
31 def get_azimut_sun(hora):
32
33     ###
34     #  Coeficientes vienen del siguiente ajuste:
35     #  General model Gauss3:
36     #   $f(x) = a1*exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2*exp(-((x-b2)/c2)^2) +$ 
37     #   $a3*exp(-((x-b3)/c3)^2)$ 
38     #  Coefficients (with 95% confidence bounds):
39     #  Goodness of fit:
40     #  SSE: 5.501
41     #  R-square: 0.9999
42     #  Adjusted R-square: 0.9998
43     #  RMSE: 0.9575
44     ###
45
46     a1 = 121.6

```

```

47     b1 =      13.7
48     c1 =      2.706
49     a2 =      44.69
50     b2 =      16.17
51     c2 =      1.446
52     a3 =      -7.89
53     b3 =      17.36
54     c3 =      0.8199
55     a4 =      441.8
56     b4 =      -13.85
57     c4 =      48.74
58     x = hora
59
60     #return a1*exp(-((x-b1)/c1)**2.0) + a2*exp(-((x-b2)/c2)**2.0) + a3*exp(-((
        x-b3)/c3)**2.0)
61     return a1*exp(-((x-b1)/c1)**2) + a2*exp(-((x-b2)/c2)**2) + a3*exp(-((x-b3)
        /c3)**2) + a4*exp(-((x-b4)/c4)**2)
62
63 def procesar_datos(archivo , maximo , diferencia):
64
65     tiempo=[]
66     angulo=[]
67     muestras=[]
68     promedio=[]
69
70     ###
71     # Preprocesamiento de las lineas de texto.
72     # Se borran multiples espacios , reemplazan
73     # comas por puntos y se borran campos extra.
74     ###
75     datos_entrada = open(archivo , 'r')
76
77     for linea in datos_entrada:
78         if linea[0]=='*':
79             continue
80         linea=linea.replace('___','_')
81         linea=linea.replace('..','.')
82         linea=linea.replace(',','.')
83
84         hora=get_hora(linea[0:linea.index('_')])
85         datos=linea[linea.index('64')+3:]
86
87         muestras.append(datos.split('_'))
88         tiempo.append(hora)
89         angulo.append(get_azimut_sun(hora))
90
91     datos_entrada.close()
92
93     ###
94     # Procesando la serie de datos , se promedian
95     # las muestras de cada toma.
96     ###
97     for linea in muestras:
98         dato = 0.0

```

```
99         i = 0.0
100
101     for datos in linea:
102         dato = dato + atof(datos)
103         i+=1;
104
105     promedio.append(dato/i)
106
107     ###
108     # Se escribe el archivo de salida.
109     # Se eliminan lineas con datos fuera de rango.
110     ###
111     datos_salida = open('datos_salida.txt', 'w')
112     dato_prev = promedio[0]
113
114     for i in range(0, len(tiempo)):
115         if (promedio[i] > maximo or fabs(promedio[i]-dato_prev)/100.0 >
116             diferencia):
117             continue
118             datos_salida.write(str(tiempo[i])+';'+str(angulo[i])+';'+str(promedio[
119                 i]))+'\n')
120             dato_prev=promedio[i]
121
122     datos_salida.close()
123
124     ===== MAIN CODE =====
125     archivo = raw_input('Ingrese archivo para procesar (Ej: datos_entrada.rad): ')
126     if len(archivo)>0:
127         maximo = input('Maximo valor permitido (Ej: 500): ')
128         dif = input('Maxima diferencia entre valores consecutivos (Ej: 0.5): ')
129         procesar_datos(archivo, maximo, dif)
130     else:
131         procesar_datos('data_in.rad', 500, 0.5)
```

Anexo B

Observaciones Astronómicas

B.1. Librería de Python con Funciones Generales para la Reducción de los Datos Recopilados por el SRT

Esta librería cuenta con las siguientes funciones:

- **createRad**(radName, matrix): Escribe un archivo con nombre “radName” en el mismo formato “.rad” a partir de una matriz “matrix”.
- **filterRowByCoordinates**(row): Recibe una fila y determina si ésta se encuentra o no, dentro del rango de coordenadas adecuado. Esta función se implementó para eliminar aquellas mediciones que fueron tomadas fuera de los sectores fríos del cielo determinados en la sección 3.1. Esta función debe ser modificada para recibir como parámetro solo las coordenadas.
- **getMatrixFromRad**(radName): Lee el archivo “radName.rad” generado por el software del SRT. Entrega una matriz con todos los datos accesibles de manera individual. Esta matriz es el paso previo indispensable para la reducción, análisis y gráfica de los datos. Cada línea del archivo (y luego la matriz) contiene al comienzo, la siguiente información de cada espectro instantáneo: año, día, hora, minuto, segundo, posición azimutal [grados], posición en elevación [grados], elevación galáctica, longitud galáctica, offset en azimut, offset en elevación, frecuencia inicial del espectro, delta de frecuencia, modo digital de observación, número de medidas. Luego de lo anterior se escriben las potencias medidas para cada delta de frecuencia.

Para utilizar esta librería se debe agregar la siguiente instrucción en el preámbulo del código:

```
from libRad import *
```

Donde “*” puede ser intercambiado por la función específica que se necesita. En caso de mantener el asterisco se importarán todas las funciones de la librería.

```
from string import *
from math import *
from datetime import date, datetime, time

def createRad(radName, matrix=None):
    temp = open(radName, 'w')
    if(matrix!=None):
        for row in matrix:
            temp.write(' '.join([str(x) for x in row]) + '\n')
    temp.close()

##esta funcion recibe una fila -row- y le aplica un filtro segun
##su az y el.
##las coordenadas que delimitan los rectangulos validos se definen en
##la lista -validCoords-, donde cada item es [minAz,maxAz,minEl,maxEl],
##lo que define 1 rectangulo
def filterRowByCoordinates(row):
    validCoords = [ [190,290,30,65] , [80,160,30,65]]
    az = row[5]
    el = row[6]

    #para cada rectangulo,definido por sus cordenadas
    for rectCoord in validCoords:
        minAz = rectCoord[0]
        maxAz = rectCoord[1]
        minEl = rectCoord[2]
        maxEl = rectCoord[3]

        #las coordenadas de -row- pertenecen al rectangulo?
        if(minAz < az < maxAz and minEl < el < maxEl):
            return True

    #ya se recorrieron todos los rectangulos, sin encontrar coincidencia
    return False

#Esta funcion toma los datos del .rad y los deja en una matriz.
def getMatrixFromRad(radName):
    matrix=[]

    text=open(radName, 'r') #open radName file in read mode

    for linea in text:
        if (linea[0]=='*'):
            continue
        linea=linea.replace(' ','')
        linea=linea.replace(' ','')
        linea=linea.replace(' ','')
```

```

linea=linea.replace(' ',' ')
linea=linea.replace(',','.')
try:
    endDateIndex = linea.index(' ')

    fecha=linea[:endDateIndex] #substring All to index spaceIndex (included)
    datos=linea[endDateIndex+1:len(linea)-1] #substring index spaceIndex (not included) to All
    row = fecha.split(':')+datos.split(' ')
    matrix.append([float(x) for x in row])
except:
    continue

text.close()
return matrix

# TESTING
#m = getMatrixFromRad("archivo.rad")
#createRad("archivo2.rad",m)

```

B.2. Script en Python para la Reducción y Gráfica de Pruebas de Seguimiento

```

#Script para la reduccion de datos en rad y grafico en frecuencia y velocidad.
from libRad import *
from numpy import *
from pylab import *
from datetime import date, datetime, time
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import sys

#Posiciones de los parametros en la fila
#AZ=azimuth, EL=elevation, B=Galactic Latitude(+90), L=Galactic Longitude, vlsr=velocity of local standard
of rest, tsys= system temperature, H0=First Frecuency,SPACING=frecuency spacing (delta), DIG=digital,
BINS=number bins, DATA= Data start

#La seleccion de lo siguiente depende de la antiguedad del .rad.
#YEAR,DAY,HOUR,MIN,SEC,AZ,AZOFFSET,ELOFFSET,H0,SPACING,DIG,BINS,DATA=range(0,14)
#YEAR,DAY,HOUR,MIN,SEC,AZ,EL,B,L,AZOFFSET,ELOFFSET,H0,SPACING,DIG,BINS,DATA=range(0,16)
YEAR,DAY,HOUR,MIN,SEC,AZ,EL,B,L,AZOFFSET,ELOFFSET,VLSR,TSYS,H0,SPACING,DIG,BINS,DATA=range(0,18)

#Algunos parametros de mediciones realizadas.
#"s6_28_12_12.rad" // tsys=45 // matrixRad= list(matrixRadOr[14:58]+matrixRadOr[100:110]) // amplitud=65 //
vlsr=-34
#"s8_27_12_12.rad" // tsys=70 // matrixRad= list(matrixRadOr[:88]) // amplitud=80 // vlsr=22.1
#"s9_20_03_13.rad" // tsys=140 // matrixRad= list(matrixRadOr[:140]) // amplitud=160 // vlsr=-38.1
#"s9_27_12_12.rad" // tsys=80 // matrixRad= list(matrixRadOr[:300]) // amplitud=100 // vlsr=-12
#"s9_27_12_12II.rad" // tsys=80 // matrixRad= list(matrixRadOr[20:120]) // amplitud=100 // vlsr=-12.6

#tsys=80 #Temperatura de sistema
#vlsr=-12

```

```

#Parametros del codigo
radName = "s9_20_03.13.rad"
matrixRadOr = getMatrixFromRad(radName) #Matriz rad original
matrixRadFull = list(matrixRadOr[:]) #Matriz para los graficos sin filtros
matrixRad = list(matrixRadOr[:140]) #Matriz con posibilidad de seleccionar ciertas secciones
#matrixRad = list(matrixRadOr[100:187]+matrixRadOr[434:])#Esta instruccion selecciona uno o mas intervalos de
    medicion. En este problema se utiliza para escoger los mas regulares. matrixRadOr[:] selecciona todo el
    intervalo disponible.

    #Numero de muestras de cada lado que se encuentran atenuadas y que por lo tanto se deciden quitar de la
    grafica. Ud puede mover este numero a 0 para apreciar su efecto.
num=8

    #Extraccion de parametros fijos del rad. Todas las filas tienen los mismos parametros.
h0=matrixRad[0][H0] #Frecuencia inicial de medicion
h0_fixed=matrixRad[0][H0]-1400 #Frecuencia inicial de medicion de manera que el software grafico de pylab
    tenga precision con el mouse
spacing=matrixRad[0][SPACING] # delta de frecuencia obtenido directamente del rad
bins=int(matrixRad[0][BINS])-num*2 #-num*2 por los datos num que deben quitarse a cada lado
vlsr=matrixRad[0][VLSR]
tsys=matrixRad[0][TSYS]

#Verificar que el .rad tenga la cantidad de datos que se especifico en la seccion anterior: posiciones de los
    parametros en la fila
try:
    matrixRad[0][156+DATA-1]
except:
    print 'Su archivo .rad contiene menos informacion de la que Ud. ha especificado'
    sys.exit(1)

    #Declaracion de variables
eje = [] # Potencia promedio sin filtros
ejeFil = [] #Potencia promedio filtrada
ejeInt = [] #Espectros integrados
ejeIntFil = [] #Espectros filtrados integrados

#Potencia promedio sin filtros
for row in matrixRadFull:
    auxRow = row[DATA:]
    eje.append(average(auxRow))

#Integracion de los espectros sin filtros, promedio por columna de frecuencia
for col in range(DATA,len(matrixRadFull[0])):#Recorrer por columna desde DATA hasta largo de la fila (se toma
    la fila 0 porque si)
    auxCol = [] #Lista auxiliar
    for row in matrixRadFull: #Ahora recorriendo por fila, recopilando el dato en la posicion col
        auxCol.append(row[col])#Cuando termina en auxCol esta guardada la columna de indice col
    ejeInt.append(average(auxCol[:]))

#Filtro de nivel de potencia en el .rad. Eliminar las filas contaminadas
    #Este eje se construye para poder mas tarde filtrar por amplitud la matriz matrixRad. Esto se debe a que
    si se ocupa la misma matriz para referencia se generan problemas de indices.
ejeaux = []
for row in matrixRad:
    auxRow = row[DATA:]
    ejeaux.append(average(auxRow))

```

```

#Esta matriz se construye por el mismo problema anterior. La idea es mantener matrixRad con los indices
originales y modificar matrixRadFil utilizando el contador como corrector.
matrixRadFil = list(matrixRad[:])

amplitud=160# Amplitud maxima permitida. Cuidado con este valor. Si esta muy bajo el software se caera
alegando un list index out of range, pues porsusuesto, ningun valor pasara el filtro.
i=0
contador=0
while i<len(matrixRad):
    if ejeYaux[i]>=amplitud:
        matrixRadFil.pop(i-contador)
        contador=contador+1
    i=i+1
#Cada vez que saco un valor de la matriz RadFil los indices entre matriz Rad y matriz RadFil se desfasan
en 1. Es por lo anterior que se utiliza contador para hacer la correccion posterior.

#Potencia promedio filtrada
for row in matrixRadFil:
    auxRow = row[DATA:]
    ejeYFil.append(average(auxRow))

#Integracion de los espectros con filtros, promedio por columna de frecuencia
for col in range(DATA,len(matrixRadFil[1])):#Recorrer por columna desde DATA hasta largo de la fila (se toma
la fila 1 porque todas miden lo mismo)
    auxCol = [] #Lista auxiliar
    for row in matrixRadFil: #Ahora recorriendo por fila, recopilando el dato en la posicion col
        auxCol.append(row[col])#Cuando termina en auxCol esta guardada la columna de indice col
    ejeYIntFil.append(average(auxCol)-tsys)#Fila 0 porque en principio se asume que la tsys no varia en las
mediciones.

#Preparacion de Grafica
#Quitar muestras atenuadas en los ejes
ejeYInt=ejeYInt[num:len(ejeYInt)-num]
ejeYIntFil=ejeYIntFil[num:len(ejeYIntFil)-num]

#Eje de frecuencia

ejeXInt=range(bins)
ejeXIntFil=range(bins)

for i in range(len(ejeXInt)):
    ejeXInt[i]=double(h0_fixed+(i+num)*spacing) #eliminar las primeras num medidas.
    ejeXIntFil[i]=double(h0_fixed+(i+num)*spacing)

#Eje de velocidad
c=299792.458 #velocidad de la luz km/s
f0=1420.40575177 #frecuencia de emision del hidrogeno
#vlsr=input('Enter Vlsr: ') #velocity of observer relative to local standard of rest. En caso de utilizar .
rad antiguos que no lo incluyan dentro de sus parametros.

ejeXVel=range(bins)
for i in range(len(ejeXVel)):
    f=h0+(i+num)*spacing # frequency of channel
    ejeXVel[i]=double((f0-f)*c/f0-vlsr) #(+num) elimina las primeras num medidas.

#Grafica de los datos

```

```

fig=plt.figure()
graficos=input('Todos los graficos?(0=no/1=si) ')
#graficos=1
if (graficos==1):
    ax1=fig.add_subplot(414)
#Grafico de potencia total despues de filtro versus tiempo (numero de la medicion)
    graf1=fig.add_subplot(413)
    graf1.plot(ejeyFil,',')
    graf1.set_xticklabels([])
    graf1.set_ylabel("P. promedio [K]", size='small',weight='heavy', family='sans-serif')
    title('Potencia promedio v/s tiempo. Con Filtros', size='small',weight='heavy', family='sans-serif')
    fig.subplots_adjust(hspace=.5)
    grid(True)
#Grafico de potencia total sin filtros versus tiempo (numero de la medicion)
    graf2=fig.add_subplot(411)
    graf2.plot(ejey,',')
    graf2.set_ylabel("P. promedio [K]", size='small',weight='heavy', family='sans-serif')
    title('Potencia promedio v/s tiempo. Sin filtros', size='small',weight='heavy', family='sans-serif')
    fig.subplots_adjust(hspace=.5)
    grid(True)
#Grafico de espectro acumulado sin filtros directo de las muestras totales
    graf3=fig.add_subplot(412)
    graf3.plot(ejexInt,ejeyInt)
    graf3.set_xlim(max(ejexInt),min((ejexInt)))
    graf3.set_ylabel("Potencia [K]", size='small',weight='heavy', family='sans-serif')
    title('Espectro acumulado. Sin filtros', size='small',weight='heavy', family='sans-serif')
    fig.subplots_adjust(hspace=.5)
    grid(True)
else:
    ax1=fig.add_subplot(111)

#Velocidad y frecuencia del peak coherente
minVelPeak=-50
steps= 65 # para un rango de velocidad de 100 aprox. es decir 50 a -50 km/s
frecMaxRange=f0*(1-(minVelPeak+vlsr)/c)-1400
frecMaxPeak=0
velMaxPeak=0

for i in range(len(ejexIntFil)):
    if ejexIntFil[i]>frecMaxRange:
        frecMaxPeak=1400+ejexIntFil[ejeyIntFil.index(max(ejeyIntFil[i-steps:i]))]
        velMaxPeak=double((f0-frecMaxPeak)*c/f0-vlsr)
        break

print 'Velocity of peak '+str(velMaxPeak)
print 'Frequency of peak '+str(frecMaxPeak)

#Detalles grafico principal
ax1.plot(ejexIntFil,ejeyIntFil,',') # ejes a graficar y tipo de marcador
ax1.set_xlabel("Frecuencia +1400[MHz]", size='small',weight='heavy', family='sans-serif')
ax1.set_xlim(max(ejexIntFil),min(ejexIntFil)) # seteo de los limites reales del eje x. Se coloca la
    frecuencia en esta seccion de manera que, al agregar un segundo eje mas abajo, este ultimo quede con la
    opcion de seguimiento en la venta del grafico. Ademas permite setear el sentido decreciente en la
    frecuencia.
ax2=ax1.twinx() # permite crear un segundo eje

```

```

ax2.set_xlabel("Espectro acumulado. Con filtros // Velocidad [km/s]", size='small',weight='heavy',family='
    sans-serif')
ax1.set_ylabel("P. promedio [K]", size='small',weight='heavy', family='sans-serif')

fmax=max(ejexIntFil)+1400 # En este punto se necesita el valor real de la frecuencia inicial por eso se le
    agregan los 1400
fmin=min(ejexIntFil)+1400
maxVel=double((f0-fmin)*c/f0-vlsr) # calculo de la velocidad maxima de la medicion. Parametros definidos mas
    arriba.
minVel=double((f0-fmax)*c/f0-vlsr)

ax2.set_xlim(minVel,maxVel) # seteo real del los limites del nuevo eje x
ax2.grid(color='r', linestyle='dotted', linewidth=1)
ax1.grid(color='k', linestyle='dotted', linewidth=.5)

text(0.75,.95,"Peaks({-50,50}[km/s]):",horizontalalignment='center',verticalalignment='center',transform=ax1.
    transAxes,size='small',weight='heavy')
text(0.75,.9,"Vel.="+str(round(velMaxPeak,2))+"[km/s], Frec.="+str(round(frecMaxPeak,4))+"[MHz]",
    horizontalalignment='center',verticalalignment='center',transform=ax1.transAxes,size='small',weight='
    heavy')

ejeAx2=range(int(minVel),int(maxVel),5) # creacion de un eje ficticio para las etiquetas del grafico. Se
    toman las partes enteras de los valores maximos y minimos. El paso es de 5
ejeAx2Label=ejeAx2[:] #[:] permite hacer una copia independiente, de lo contrario tendremos dos variables
    para un mismo espacio de memoria.
for i in range(len(ejeAx2Label)): # Dejar solo una de cada cuatro etiquetas para liberar de informacion el
    grafico y hacerlo legible. Notar que la grilla mantiene su division con un paso de 5.
    if i%2!=0:

        ejeAx2Label[i]=''

#Peaks de velocidad y frecuencia de todo el grafico, desplegados en la consola.
f=h0+(ejeIntFil.index(max(ejeIntFil))+num)*spacing # frecuencia del peak
f1= 1400+ejexIntFil[ejeIntFil.index(max(ejeIntFil))] # otra manera de calcular la misma frecuencia
print 'Velocity of peak '+str(double((f0-f)*c/f0-vlsr)) #(+num) elimina las primeras num medidas.
print 'Frequency of peak '+str(f)

#Mostrar los graficos
show()

```

B.3. Script en Python para la Reducción y Gráfica Diámetro Angular del Sol

```
#Script para analizar las mediciones interferometricas y guardar los resultados en un nuevo rad.

from libRad import *
from numpy import *
from pylab import *
from scipy.special import jv
from datetime import date, datetime, time

#Posiciones en la fila de los parametros
#AZ=azimuth, EL=elevation, B=Galactic Latitude(+90), L=Galactic Longitude, vlsr=velocity of local standard
    of rest, tsys= system temperature, H0=First Frecuency,SPACING=frecuency spacing (delta), DIG=digital,
    BINS=number bins, DATA= Data start
#YEAR,DAY,HOUR,MIN,SEC,AZ,EL,B,L,AZOFFSET,ELOFFSET,vlsr,tsys,H0,SPACING,DIG,BINS,DATA=range(0,18)
#YEAR,DAY,HOUR,MIN,SEC,AZ,EL,B,L,AZOFFSET,ELOFFSET,H0,SPACING,DIG,BINS,DATA=range(0,16)
YEAR,DAY,HOUR,MIN,SEC,AZ,EL,AZOFFSET,ELOFFSET,H0,SPACING,DIG,BINS,DATA=range(0,14)

#Leer matriz
radName = "interferometria.rad"
matrixRad = getMatrixFromRad(radName)

#Parametros
b=37.8543 #linea de base en tierra [metros]
bError=0.1 #error en medicion linea de base
#diamSol=0.6482*pi/180 # in deg
diamSol=0.62*pi/180 # in deg
diamSolError=(0.0094+0.0)*pi/180 #error diametro teorico
c=299792.458 #velocidad de la luz km/s
#f0=1420.40575177 #frecuencia de emision del hidrogeno
f0=matrixRad[0][H0]+matrixRad[0][SPACING]*matrixRad[0][BINS]/2
wavelength=c*10**3/(f0*10**6) #in meters

ejeY = [] #Potencia
ejeX = [] #Linea de base 'd'
ejeAz = [] #Azimut
ejeEl = [] #Elevacion

alpha=90 #Diferencia entre Azimut 0 teorico (paralelo a la linea de base) y Azimut 0 del SRT.

for row in matrixRad:
    auxRow = row[DATA:]
    prom = float(sum(auxRow))/len(auxRow)#promedio de potencia
    d = (b-bError)/wavelength * sqrt(1-cos((row[AZ]-alpha)*pi/180)**2*cos(row[EL]*pi/180)**2)#apertura del
        radiotelescopio en funcion de su elevacion y azimut.
    ejeY.append(prom)
    ejeX.append(d)
    ejeAz.append(row[AZ])
    ejeEl.append(row[EL])

#Filtro pasa banda
ejeYfft=fft(ejeY)
ejeYfft[:100]=0
ejeYfft[660:]=0
```

```

ejey=ifft(ejeyfft)

#Filtro visual
inicio=3000
final=9500

horainicio=matrixRad[inicio][HOUR]+matrixRad[inicio][MIN]/60
horafin=matrixRad[final][HOUR]+matrixRad[final][MIN]/60

ejex=ejex[inicio:final]
ejey=ejey[inicio:final]
ejeAz=ejeAz[inicio:final]
ejeEl=ejeEl[inicio:final]

#escribir vector en archivo
rad=open("vector.rad",'w')
for i in range(len(ejey)):
    print>>rad, str(ejex[i])+" "+str(ejey[i])

#Aproximacion sol como fuente rectangular. Sinc
amp=52000    #amplitud
start=1
stop=250.0
step=1/wavelength

lbWavelength=arange(start,stop,step)
sinc=amp*abs(sin(lbWavelength*diamSol*pi)/lbWavelength)

##Aproximacion como disco. funcion de bessel
#ampb=70000
#bR=[i*diamSolBessel*pi for i in lbWavelength]
#jv=jv(1,bR)

#bessel=[]

#for i in range(len(bR)):
#    bessel.append(ampb*abs(2*jv[i]/lbWavelength[i]))

#Graficos
fig=plt.figure()

#Graficos de Linea de base, Azimut y Elevacion

#tiempo=range(int(round(horainicio))-4,int(round(horafin)+1)-4,1)

#ax1=fig.add_subplot(311)
#plot(ejex,'g-')
#ax1.set_ylabel("Apertura [m/      ]", size='small',weight='normal', family='serif')
#title('Apertura del interferometro en funcion del tiempo', size='medium',weight='normal', family='serif')
#ax1.xaxis.set_major_locator(LinearLocator(numticks=len(tiempo)))
#ax1.set_xticklabels([])
#grid(True)

#ax2=fig.add_subplot(312)
#plot(range(0,len(ejex)), ejeEl,'r-')
#ax2.set_ylabel("Elevacion [deg]", size='small',weight='normal', family='serif')
#title('Elevacion de la antena en funcion del tiempo', size='medium',weight='normal', family='serif')

```

```

#ax2.xaxis.set_major_locator(LinearLocator(numticks=len(tiempo)))
#ax2.set_xticklabels([])
#grid(True)

#ax3=fig.add_subplot(313)
#plot(range(0,len(ejex)), ejeAz, 'b-')
#ax3.set_ylabel("Azimut [deg]", size='small',weight='normal', family='serif')
#title('Azimut de la antena en funcion del tiempo', size='medium',weight='normal', family='serif')
#ax3.set_xlabel("Tiempo de medicion [hora]", size='small',weight='normal', family='serif')
#ax3.xaxis.set_major_locator(LinearLocator(numticks=len(tiempo)))
#ax3.set_xticklabels(tiempo)
#grid(True)

#Grafico de la curva de visibilidad versus datos medidos
ax1=fig.add_subplot(111)

plot(lbWavelength, sinc, 'b-')
plot(ejex, abs(ejey), 'r-')

#Rango de cero para error en diametro angular teorico. Lineas verticales que identifican el rango
#sin(lbWavelength*diamSol*pi)=0
#lbWavelength*diamSol*pi=pi
#lbWavelength=1/diamSol
cero1=1/(diamSol+diamSolError)
cero2=1/(diamSol-diamSolError)
#plot([cero1,cero1],[0,600], 'k-', linewidth=1.7)
#plot([cero2,cero2],[0,600], 'c-', linewidth=1.7)

#Rango de error para datos experimentales dado por el error en la linea de base. Lineas verticales que
    identifican el rango

#elijiendo el valor del cero de manera grafica y aproximada en 90.5
#consideremos el aporte de la elevacion y azimut constantes para la comparacion
fazel=90.5*wavelength/b
#ahora podemos calcular los valores para esa distancia considerando el error de b
d1=fazel/wavelength*(b+bError)
d2=fazel/wavelength*(b-bError)
#plot([d1,d1],[0,600], 'g-', linewidth=1.7)
#plot([d2,d2],[0,600], 'c-', linewidth=1.7)

ax1.set_ylabel("Temperatura de brillo [K]", size='small',weight='normal', family='serif')
title('Ajuste de curva de visibilidad teorica a muestras experimentales', size='medium',weight='normal',
    family='serif')
ax1.set_xlabel("Apertura del interferometro [m/ ]", size='small',weight='normal', family='serif')
text(0.7,0.75,"Diametro angular = "+str(diamSol*180/pi)+"[deg]",horizontalalignment='center',
    verticalalignment='center',transform=ax1.transAxes,size='small',weight='heavy')
text(0.7,0.7,"Linea de base = "+str(b)+"[m]",horizontalalignment='center',verticalalignment='center',
    transform=ax1.transAxes,size='small',weight='heavy')
text(0.7,0.65,"Frecuencia central = "+str(round(f0,2))+"[MHz]= "+str(round(wavelength,3)*100)+"[cm]",
    horizontalalignment='center',verticalalignment='center',transform=ax1.transAxes,size='small',weight='
    heavy')
#legend(('Muestras experimentales en valor absoluto','Funcion de visibilidad teorica'),loc=0)
#plot(lbWavelength, bessell, 'g-')

show()

```

B.4. Enunciados para el Laboratorio de Radio-Astronomía

EL7026 - Sistemas de Instrumentación Astronómica

Etapa Cero: Manejo del Equipo y Software del SRT

I. Antecedentes

La información inicial con la que cuenta es la siguiente:

- Los SRT (*Small Radio Telescope*) fueron comprados al MIT (*Massachusetts Institute of Technology*).
- A la fecha de noviembre de 2012, existen instalados dos SRT en la terraza del edificio de Ingeniería Eléctrica. El acceso a la terraza está restringido y vigilado por cámaras de seguridad. Para esta experiencia se utilizará la antena poniente.
- Ambos SRT están cableados al Laboratorio de Comunicaciones Avanzadas, ubicado en el quinto piso del edificio Ingeniería Eléctrica, donde se encuentra la oficina de control.

II. Objetivos de la experiencia

El equipo deberá investigar y crear un plan de trabajo que le permita lograr los siguientes objetivos:

1. Modificar el catálogo de configuración considerando lo siguiente:
 - Comunicación con el Pc: Puerto 3.
 - Ubicación física de la antena a utilizar.
 - Rango de movimiento horizontal en sentido creciente: $190^\circ - 170^\circ$.
 - Rango de movimiento vertical en sentido creciente: $2^\circ - 88^\circ$.
 - Receptor en modo simulación.
 - Incluir la fuente S9 al mapa de coordenadas.
2. Apuntar la antena al sol y mantenerla en estado de *tracking* durante dos minutos guardando los datos de la medición en un archivo con nombre “exp0grupoX”, donde ‘X’ corresponde al número de su equipo.
3. Verificar calibración espacial de la antena.
4. Realizar una medición *npoint* del sol centrada en la línea espectral de 21 cm.
5. Realizar diagrama de bloques del *Small Radio Telescope*, referenciando cada elemento a una fotografía real tomada por el equipo.

III. Evaluación

Previa a la experiencia

Entregar un documento con el plan de trabajo, detallando las experiencias que se pretenden realizar y su tiempo estimado de ejecución. La evaluación de este documento por parte del profesor auxiliar, determinará si el equipo cuenta con la preparación suficiente para desarrollar su experiencia y corresponderá a un 20 % de la nota final de la experiencia.

Posterior a la experiencia

Entregar informe conciso sobre el cumplimiento de los objetivos planteados en este enunciado mediante la experiencia diseñada y ejecutada por el equipo de trabajo. La evaluación de este informe corresponderá al 80 % de la nota final de la experiencia.

EL7026 - Sistemas de Instrumentación Astronómica

Etapa Uno: Calibración y Realización de Experiencias con el Radiotelescopio.

I. Objetivos de la experiencia

El equipo deberá investigar y crear un plan de trabajo que le permita lograr los siguientes objetivos:

1. Realizar una calibración manual del radiotelescopio.
 - Verificar que los resultados entregados por el software corresponden a valores esperados (T_{sys} , T_{rec} y otros).
2. Realizar una calibración por diodo de ruido en el radiotelescopio.
 - Ajuste el parámetro del catálogo de configuración correspondiente a esta calibración.
 - Verificar que los resultados entregados por el software corresponden a valores esperados (T_{sys} , T_{rec} y otros).
3. Medir el *beam width* de la antena.
 - Después de diseñar su experiencia, programe un script para realizarla.
 - El manejo de los datos para su posterior análisis debe realizarlo con Python o Matlab.
4. Identificar posibles fuentes de error en sus mediciones.
 - Apóyese en experimentos concretos.

II. Consideraciones

Ud. y su grupo deben tener en cuenta lo siguiente:

- Planifique una estrategia que en lo posible tenga más de un experimento por problema. De esta manera podrá aumentar la cantidad de datos recolectados y tendrá la posibilidad de realizar comprobaciones cruzadas.
- Para la calibración manual puede disponer de un *absorber* y dos comunicadores de radio.
- Los códigos que realice debe adjuntarlos a su informe final. Deben estar comentados y ordenados.
- Puede utilizar libremente la documentación existente en la web y memorias del departamento, realizando las referencias correspondientes.

III. Evaluación

Previa a la experiencia

Entregar un documento con el plan de trabajo, detallando las experiencias que se pretenden realizar y su tiempo estimado de ejecución. La evaluación de este documento por parte del profesor auxiliar, determinará si el equipo cuenta con la preparación suficiente para desarrollar su experiencia y corresponderá a un 20 % de la nota final de la experiencia.

Posterior a la experiencia

Entregar informe conciso sobre el cumplimiento de los objetivos planteados en este enunciado mediante la experiencia diseñada y ejecutada por el equipo de trabajo. La evaluación de este informe corresponderá al 80 % de la nota final de la experiencia.

EL7026 - Sistemas de Instrumentación Astronómica

Etapa Dos: Introducción a la Electrónica del SRT para la Obtención de una Señal de Microondas en la Banda L

I. Conocimiento Previo

Se espera investigación y documentación acerca de las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las principales consideraciones de diseño que se debe tener al trabajar con electrónica de alta frecuencia?
- ¿Qué es un LNA (Low Noise Amplifier)? ¿Cuáles son las principales características de su electrónica?
- ¿Qué factores influyen en la calidad de la señal de salida del LNA?
- ¿Que representan y como pueden medirse los parámetros S? ¿Que es la temperatura de ruido?
- Interrogantes propias del grupo

II. Experiencia Dos

Ud. y su grupo deben planificar esta práctica con el fin de adquirir el conocimiento posterior solicitado en esta etapa.

Se sugiere realizar mediciones con el VNA que se encuentra en el laboratorio de electrónica. Para la autorización correspondiente para utilizar el equipo su grupo debe conversar con el encargado Sr. Miguel Patiño.

En caso de que necesite realizar pruebas y/o mediciones, posteriores al laboratorio, deberá documentarlas y presentarlas al equipo docente para su autorización. Luego debe comunicarse con el profesor auxiliar o encargado de laboratorio, para la coordinación de estas.

III. Conocimiento Posterior

Se espera que el grupo sea capaz de:

- Verificar el correcto funcionamiento del proceso de obtención de la señal de microondas hasta el receptor del SRT.
- Caracterizar un LNA.

EL7026 - Sistemas de Instrumentación Astronómica

Etapa Tres: Introducción a la Interferometría

I. Conocimiento Previo

Se espera investigación y documentación acerca de las siguientes preguntas:

- ¿Qué es la interferometría? ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de este método de observación?
- ¿Cuáles son las etapas, a nivel de diagrama de bloques, que permiten obtener una medición interferométrica?
- Para comenzar con el proceso, ¿Cuáles son las primeras pruebas que deberían realizarse a las dos antenas, por separado o en conjunto, que permitan verificar un correcto funcionamiento inicial?
- Interrogantes propias del grupo

II. Experiencia Tres

Ud. y su grupo deben planificar esta práctica con el fin de adquirir el conocimiento posterior solicitado en esta etapa.

Se sugiere utilizar el hardware desarrollado por el Sr. Jaime Fariña en su memoria de título “Diseño y construcción de la etapa analógica de un interferómetro de dos antenas”, para realizar pruebas básicas con ambas antenas de manera simultánea.

En caso de que necesite realizar pruebas y/o mediciones, posteriores al laboratorio, deberá documentarlas y presentarlas al equipo docente para su autorización. Luego debe comunicarse con el profesor auxiliar o encargado de laboratorio, para la coordinación de estas.

III. Conocimiento Posterior

Se espera que el grupo sea capaz de:

- Entender el proceso de interferometría general y su caso particular con dos antenas.
- Realizar pruebas básicas de funcionamiento que le permitan verificar el correcto funcionamiento de las antenas de manera conjunta.
- Dadas las limitaciones de los equipos y el estado de avance del proyecto, plantear las directrices para lograr una medición interferométrica completa.