Universidad Nacional de La Plata (UNLP) Facultad de Ingeniería Departamento de Electrotecnia Cátedra de Proyecto Final Electrónica





Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Informe Final

Autores:

Alan Szeinfeld (60876/1) Ariel Saidman (63251/4)

Directores:

Guillermo Gancio Leandro García

La Plata, año 2020



Cátedra de Proyecto Final – Electrónica

-modalidad con Director-**Departamento de Electrotecnia Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata**



Denominación del Trabajo Final: Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento

Grupo de trabajo:

N° de alumno

Nombre y Apellido

Calificación

63251/4 60876/1 Ariel Matías Saidman

Alan Szeinfeld

Lugar(es) de realización: Director (es): Gancio Guillermo García Leandro

Colaborador (es)

Integrantes de la mesa examinadora (Firma y Aclaración):

Comentarios sobre el trabajo

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Dedicatorias

Lleno de regocijo, de amor y de esperanza, dedico este proyecto, a cada uno de mis seres queridos, quienes han sacrificado algunos de sus sueños, para que yo pueda cumplir el mío. Eternamente agradecido.

Ariel

A mi familia, mi hogar, quienes fueron los principales artífices de que este logro, pensado como un sueño, se vuelva realidad.

Alan

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Agradecimientos

En primera instancia quiero agradecer profundamente a mi madre Sara, porque ella es la motivación de mi vida, y el orgullo de ser lo que soy y lo que seré. A la memoria de mi padre Luis, por el tiempo que compartimos juntos, por tu amor a la vida, y que, a pesar de haberte perdido a una temprana edad, has estado siempre cuidando de mí, y guiándome desde el cielo. Con lágrimas entre los ojos y la garganta seca, les digo, gracias a los dos, les debo todo.

Para mí es una gran satisfacción poder agradecerles a ellos. Porque con su contención y mi esfuerzo, esmero y trabajo, he logrado finalizar esta meta.

Por otro lado, también quiero dar mi agradecimiento a mis queridas hermanas Julia y Melisa, porque siempre han estado junto a mí, brindándome su apoyo, y muchas veces poniéndose en el papel de madre.

A mis amigos, porque si, porque son mis amigos, me quieren y eso es lo único que me importa.

Y sin dejar atrás, a toda mi familia por confiar en mí en esta etapa. Por eso, quiero agradecer a mi abuelita, a mis tíos y primos, y a la memoria de mis otros abuelos. Gracias por ser parte de mi familia, y por permitirme ser parte de su orgullo.

A mi compañero Alan, por trabajar codo a codo junto a mí, y así formar un equipo de trabajo con metas compartidas. Alan, te deseo mucho éxito en esta nueva etapa, vas a ser un gran ingeniero!

A mis directores Guillermo y Leandro, por haber sido parte de IAR y disfrutar de esta experiencia única. También le agradezco al personal del área de electrónica, por compartir el laboratorio con nosotros.

Y por último, a mis profesores y a la educación pública. Por preocuparse por los alumnos y darles la posibilidad de formarse profesionalmente.

Ariel

A todos mis seres queridos, quienes formaron parte de este camino y, de distintas maneras, aportaron su granito de arena para que pueda llegar a concluirlo.

Gracias Guille por abrirme la puerta del IAR desde el primer día, como si fuera un colega de toda la vida, y por estar siempre presente cuando con Ariel lo necesitamos.

A Ariel, por aceptar mi invitación a formar parte de este proyecto, a pesar de las largas distancias recorridas en colectivo. Sos joven y no tengo dudas que te depara un gran futuro, solo depende de vos; con la humildad que te caracteriza vas a conseguir todo lo que te propongas.

A los amigos universitarios que me acompañaron en este trayecto, quienes son más que simples compañeros, Fede, Fran, Dano, Pampa, Lucas, Popo, Nico, Charly, Juan, Cipo, Elias, Simon, Gaby, Mauro, Pedro, Santi, quienes entienden la locura que significa estudiar esta carrera.

A los amigos que me dio la vida, los amigos de la escuela, los amigos evertonianos, quienes se han bancado malhumores y desapariciones por tener que estudiar; gracias por ser siempre una fortaleza, un sostén, un apoyo, tanto en los buenas como en las malas.

Y principalmente gracias a mi familia. Gracias a mi mama, a la abuela Susana y a mi hermana Verónica, quienes me han brindado todo, siempre, para que no me falte nunca nada y pueda haber transcurrido este camino a mi manera, sin juzgar mis elecciones, siendo desde siempre el motor de mi felicidad. Ojalá algún día pueda devolverles todo lo que me dieron y me siguen dando día a día. Gracias a mi papa y a mi hermana Sofía, quienes a la distancia siempre estuvieron presentes y son una parte muy importante en mi vida.

No quiero dejar de mencionar a la Baby Coca y al Zeide, quienes hace un tiempo no se encuentran físicamente presentes, pero a quienes siempre recuerdo y, donde sea que estén, espero sonrían sabiendo el lugar a donde llegue. Y, por último, al abuelo Raúl, quien me conoció cuando me encontraba en la panza y ya no estaba entre nosotros al salir de ella; sé que tu bondad fue uno de tus valores más fuertes, quiero que sepas que la tomo como ejemplo de vida.

Alan

RESUMEN

Desde hace unos años el Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR) se encuentra bajo una serie de actualizaciones de su instrumental. Parte de esta actualización incluye receptores digitales o back-ends digitales de última generación, equipos que a su vez son utilizados en los observatorios radioastronómicos más importantes del mundo.

Por consiguiente, a lo largo de este trabajo se describen las características, diseño y la implementación del software para un receptor digital denominado ROACH 2, cuyos desarrolladores son el grupo CASPER. Inicialmente se comenzará describiendo a esta plataforma de hardware, para luego continuar con la descripción de las herramientas de software, describiendo los pasos para trabajar con señales lógicas, hasta llegar a algo tan complejo, como el desarrollo de un espectrómetro para pulsares.

Actualmente, el IAR se encuentra en diálogo con otras instituciones para poder adquirir dicha plataforma, y se espera obtenerla en el corto plazo por medio de una donación. Por ello es de gran importancia contar con la experiencia previa en el hardware que la compone y el desarrollo del software, parte crítica de su integración a los radiotelescopios del IAR. Con la finalidad de validar los conceptos teóricos/prácticos, se utilizará una placa de desarrollo de bajo costo denominada Red Pitaya, con ella se podrán validar y comprobar algunos de los aspectos tecnológicos que se desarrollan en el presente trabajo.

ABSTRACT

Since some years the Argentine Institute of Radioastronomy (IAR) is initiating a series of updates that involve all its in instrumental. Part of this update it includes of state-of-theart digital receivers or digital back-ends, equipment that is currently used in the most important radio astronomy observatories in the world.

Therefore, throughout this work the characteristics, design and implementation of the software for a digital receiver called ROACH 2, whose developers are the CASPER group. Initially, we will begin by describing and characterizing this hardware platform, and then continue with the description of the software tools, developing the steps to work with logical signals, until reaching something as complex as the development of a pulsar spectrometer.

At the moment, the IAR is in dialogue with other institutions in order to acquire such platform, and it is expected to obtain it in the short term through a donation. Therefore, it is of great importance to have previous experience in the hardware and in the use of its development software tools, a critical part for its integration into IAR radio telescopes. In order to validate the theoretical/practical concepts, a low-cost development board called Red Pitaya will be used, with this board it can be validated and verified some of the technological aspects that are described in this work.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Índice

INTRODUCCIÓN		10	
	1. Radiotelescopios		
	2. RECORRIDO POR EL IAR		
	3. IMPORTANCIA DE LA RADIOASTRONOMÍA		
	4. Breve historia sobre radioastronomía		
	5. HIDROGENO NEUTRO: HISTORIA E IMPORTANCIA		
	6. RADIACIÓN Y ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICOS		
	7. Ley del cuadrado inverso de la distancia	20	
	8. Polarización		
	8.1. Parámetros de Stokes		
	9. Radiación térmica y no térmica		

DESARROLLO		
CAPITULO 1. RECEPTORES RADIOASTRONÓMICOS. GENERALIDADES.	26	
1.1. Tipos de receptores		
1.1.1. Bolómetro		
1.1.2. Receptor homodino	27	
1.1.3. Receptor heterodino	28	
1.2. Parámetros	29	
1.2.1. Haz de la antena	29	
1.2.2. Temperatura de ruido y temperatura de antena		
1.2.3. Spillover	33	
CAPITULO 2. TIPOS DE OBSERVACIÓN	34	
2.1. Formas de observación	34	
2.1.1. Medición de potencia		
2.1.2. Frecuencia de conmutación	35	
2.1.3. Imágenes de radio	35	
2.2. Espectrometría	36	
2.2.1. Espectro continuo	37	
2.2.2. Espectro de línea de emisión o líneas espectrales	37	
2.2.3. Espectros de líneas de absorción	39	
2.3. Métodos de observación	40	
2.3.1. Espectrómetro de banco de filtros	40	
2.3.2. Espectrómetro digital	41	
CAPITULO 3. ESPECTRÓMETROS PARA PULSARES	45	
3.1. Estrellas de neutrones	45	
3.2. Técnicas de observación	48	
3.2.1. Técnica de dedispersion coherente	50	
3.2.2. Técnica de dedispersion incoherente	50	
3.3. Espectrómetros	51	
CAPITULO 4.CASPER	54	
4.1. Grupo CASPER		
4.2. FPGA		
4.2.1. Características		

4.2.2. Aplicaciones	55
4.2.3. Fabricantes	55
4.2.4. Familia de FPGA's	55
4.3. CASPER Hardware	56
4.3.1. ROACH	56
4.3.1.1. PowerPC 440	57
4.3.2. ROACH 2	58
4.3.3. Virtex-6 SX475T	60
4.3.4. Módulos ADC	62
4.3.5. CASPER, herramientas y bibliotecas	63
CAPITULO 5. RED PITAYA STEMLAB 125-14	65
5.1 Hardware	65
5.2 Software	68
E 2 Anlicacionas	00
5.5. Aplicationes	09
5.3.1. Usciloscopio.	69
5.3.2. Generador de senates	70
5.3.5. Analizador de espectro	70
5.4. KEU PILOYO VS KUALH Z	/2
5.5. Lugar de trabajo	/3
CAPITULO 6. PRÁCTICAS DE SIMULINK PARA ROACH 2	75
6.1. Practica O	75
6.1.1. Introducción	75
6.1.2. Conversor analógico digital	76
6.1.2.1. Tasa de muestreo	76
6.1.2.2. Resolución	76
6.1.2.3. Relación señal a ruido	77
6.1.2.4. Número efectivo de bits	77
6.1.2.5. Rango dinámico libre de espurias	77
6.1.3. Banco de filtros polifásicos*	78
6.1.4. Transformada de Fourier	80
6.1.5. Correlación	81
6.1.6. Acumulación	81
6.2. Practica 1: Introduction to Simulink	82
6.2.1. Introducción	82
6.2.2. Configuración de bloques generales Xilinx y CASPER	83
6.2.3. Flashing LED	85
6.2.4. Uso de registros de software	86
6.2.5. Sistema sumador	87
6.2.6. Simulaciones	88
6.3. Practica 2: 10 GbE ROACH2	89
6.3.1. Introducción	89
6.3.2. Generalidades 10 GbEthernet (10 GbE)	90
6.3.3. Control con registros de software	91
6.3.4. Implementación de bloque transmisor 10 GbE	92
6.3.5. Generación de datos y límite de velocidad	95
6.3.6. Sistema tinal	98
6.4. Practica 3: Wideband Spectrometer	102
6.4.1. Introducción	102
6.4.2. Parámetros principales para diseño de un espectrómetro	103
6.4.3. Conversor ADC	104
6.4.4. Banco de filtros polifásicos (PFB)	105
6.4.4.1. Bloque FIR	105
6.4.4.2. Bloque FFI_wideband	107

6.4.5. Cálculo de potencia	110
6.4.7. Memorias BRAM. Acumulación	111
6.4.8. Sistema final	114
CAPITULO 7. PRACTICAS: SIMILITUDES Y DIFERENCIAS ENTRE RED PITAYA Y ROACH2	
7.1. Practica 1: Flashing LFD	
7 2 Practica 2: 10 GhF	117
7.3. Practica 3: Wideband Spectrometer	
CAPITULO 8. RESULTADOS	
8.1. Ensavos con una señal de -20dBm	
8.1.1. Ensavo con una señal sinusoidal de 5MHz	123
8.1.2. Ensayo con una señal sinusoidal de 25MHz	
8.1.3. Ensayo con una señal sinusoidal de 40MHz	127
8.1.4. Ensayo con una señal sinusoidal de 45MHz.	129
8.2. Ensayos con una señal de -23dBm	
8.3. Ensayos con una señal de -30dBm	133
8.4. Tabla de resultados	135
	127
1. CONCLUSIONES	137
2. TRABAJOS FUTUROS	138
BIBLIOGRAFIA	140
GLOSARIO	142

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

INTRODUCCIÓN

El Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR) es un instituto perteneciente al CONICET, y a su vez el CONICET es triple dependiente, ya que depende del CONICET, del CIC PBA, y de la UNLP. El IAR fue inaugurado en el año 1966 con la finalidad de estudiar y desarrollar la radioastronomía en la Argentina. Durante los últimos 5 años ha estado en un proceso de actualización de su instrumental, el cual fue desarrollado para su inauguración, y posteriormente actualizado en los ´80 y ´90. Parte de esa actualización consistió en renovar las distintas etapas que componen a los dos radiotelescopios que están presentes en el Instituto, únicos en Sudamérica, tanto la parte de radiofrecuencia y la adquisición de datos, como así también la del procesamiento de los mismos.

En la actualidad, está focalizado en la observación de las famosas estrellas de neutrones conocidas como pulsares. La necesidad de mejorar estas observaciones derivó en la realización de este trabajo, ya que implica una modernización en las tecnologías utilizadas. Esta actualización es la principal motivación para el estudio y desarrollo de las herramientas CASPER para radioastronomía de alto rendimiento. Sin embargo, esta implementación está limitada por el hardware, ya que el IAR no cuenta con ninguna plataforma de CASPER. Aun así, es muy importante tener conocimientos acerca de sus plataformas y sobre radioastronomía, para que, una vez que se adquiera el hardware por medio de una donación, se cuente con un desarrollo inicial para su posterior integración al sistema.

Las partes que faltan en este trabajo, como la parte de radiofrecuencia y los nuevos sistemas de adquisición de datos, han sido desarrolladas en otras oportunidades, por lo tanto no se profundizará demasiado respecto a estos temas. En fin, este trabajo final solo se concentrará en las herramientas de CASPER.

En primer lugar, se debe entender el contexto del campo de estudio, y de esto se trata esta primera etapa del trabajo. En esta introducción del presente trabajo se pretende entender la motivación del mismo, en conjunto con la explicación de distintos conceptos referidos a la radioastronomía que son importantes ya que conforman la base de este trabajo, debido a que se pretende trabajar con señales radioastronómicas. Por lo tanto, se podrá ver un breve recorrido desde los orígenes de esta ciencia hasta la explicación de los pulsares que hoy en día se encuentran en estudio en el IAR.

Luego de la introducción, le sigue el "DESARROLLO", y se encuentra dividido en distintas secciones. En las primeras, se avanzará en el entendimiento sobre receptores radioastronómicos, los dispositivos que se encargan de recibir e interpretar las señales estudiadas en la introducción, hasta llegar a los espectrómetros para pulsares.

Estudiados estos conceptos, el trabajo continuó con el desarrollo de las herramientas CASPER, haciendo un recorrido por el hardware que CASPER ofrece hasta llegar a las distintas practicas realizadas a través de Simulink, las cuales permitieron realizar el espectrómetro digital de alto rendimiento. En la última sección del DESARROLLO, se

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados utilizando la plataforma Red Pitaya.

Por último, en el capítulo final se pueden apreciar las Conclusiones del proyecto y los trabajos a futuro. También se incluyen un Glosario y la Bibliografía utilizada para que este proyecto haya podido ser realidad

1. Radiotelescopios

Un concepto básico, pero muy importante, es comenzar definiendo a un radiotelescopio, ya que es la principal herramienta que se utiliza en este campo tan particular como es la radioastronomía. Este sofisticado instrumento está diseñado para observar y estudiar radiofuentes que emiten ondas de radio. Se compone por una antena, un receptor o front-end, y el back-end (Imagen 1). La antena consta de una gran estructura metálica, por lo general de forma parabólica, cuyo fin es captar la mayor cantidad de ondas electromagnéticas, para luego concentrarlas a todas en un punto común. Luego, otro elemento del radiotelescopio es el receptor o front-end. El receptor no es tan voluminoso como la antena, pero cumple un papel fundamental: transformar las ondas electromagnéticas en energía eléctrica y luego reducir la frecuencia de esta energía eléctrica, para poder manipularlas con mayor efectividad.

Por último, otro componente fundamental de los radiotelescopios es el back-end. El backend está a continuación del front-end, y cumple la importante tarea de: procesar, acumular y registrar datos. Se puede hallar distanciado de la antena, y hasta podría realizarse con una adecuada computadora. A lo largo de este informe se profundizara sobre los elementos que componen un radiotelescopio, explicando sus especificaciones y características.



Imagen 1. Esquema representativo de un radiotelescopio.

2. Recorrido por el IAR

Este trabajo se realizó en su totalidad de tiempo dentro del Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR). A continuación, la siguiente imagen representa un mapa ilustrativo del Instituto, en donde figuran sitios en los que se hacen referencia indicativa enumerándolos. (Imagen 2).



Imagen 2. Mapa ilustrativo del IAR.

- 1) Departamento de Electrónica
- 2) Sala de Control
- 3) Antena I
- 4) Antena II
- 5) Laboratorio de Transferencia

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

6) Edificio Principal

Desde el punto de vista territorial, en donde se desempeñó este trabajo, se realizó principalmente en el Departamento de Electrónica (1), más precisamente en uno de sus laboratorios más concurridos. Por otro lado, no se dejó de asistir a la Sala de Control (2), en donde se encuentran los dos receptores de cada antena (3 y 4). Siguiendo con el recorrido del sitio en donde se obró, se encuentra con otro de los espacios importantes de esta institución, el Laboratorio de Transferencia (5), en donde se elaboran investigaciones exhaustivas, con la cooperación cooperativa de la cámara anecoica. Para concluir con el recorrido, se halla con el espacio administrativo y biblioteca, situado en el Edificio Principal (6).

Por último, en la siguiente imagen se logra apreciar las imponentes dos antenas parabólicas de 30 metros de diámetro que posee el Instituto, ideales para trabajar en la banda de frecuencia entre 1 GHz y 2 GHz. (Imagen 3).



Imagen 3. Antena I, y al fondo la antena II.

3. Importancia de la radioastronomía

La radioastronomía desempeña un papel fundamental en el estudio de los problemas de la física fundamental y la cosmología. Muchos de los fenómenos considerados no pueden estudiarse en otras partes del espectro electromagnético, por ejemplo, la emisión del hidrógeno atómico neutro; la radiación cósmica del fondo de microondas y su estructura angular, de enorme importancia en cosmología; las inmensas regiones de radiación de

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

sincrotrón asociadas a las galaxias radioeléctricas; y las regiones de formación de estrellas ocultas por el polvo en las frecuencias ópticas. En las frecuencias radioeléctricas se puede lograr la mayor resolución angular y efectuar las mediciones más exactas de la posición angular y de las rayas espectrales, así como de sus desplazamientos Doppler. Por este motivo, la radioastronomía, lejos de ser un mero aditamento de los métodos ópticos tradicionales, desempeña un papel clave en la investigación de muchos campos de la astronomía y la astrofísica. Aparte de eso, la radioastronomía, como cualquier ciencia fundamental, estimula el desarrollo de otras ramas. A ella se debe el desarrollo de receptores de bajo ruido y de antenas que permiten utilizar un único elemento para capturar señales con polaridades diferentes. Los métodos desarrollados en la radioastronomía para combatir el eco radioeléctrico se utilizan actualmente con éxito en los sistemas de comunicaciones móviles de tipo Wi-Fi. Las bases teóricas de la radionavegación que se utilizan hoy en día en toda una serie de sistemas, se elaboraron y confirmaron su validez gracias a la radioastronomía. La necesidad de procesar ingentes cantidades de datos radioastronómicos ha dado lugar a una increíble mejora del procesamiento automatizado de datos y, en particular, al desarrollo de métodos para el procesamiento de datos en paralelo y de nuevos lenguajes de programación. En el campo de la medicina, se han derivado de la radioastronomía el diagnóstico por rayos X y la tomografía computarizada.

Todo lo anterior subraya la importancia del reconocimiento internacional del espectro utilizado por la radioastronomía y de la protección que debe otorgársele.

Además de las importantes aportaciones a la propia astronomía, el servicio de radioastronomía (SRA) ha contribuido de modo fundamental a otros ámbitos de la ciencia y la tecnología con subproductos de su propia actividad. Por ejemplo, ha determinado la absorción atmosférica de las ondas radioeléctricas, que es de particular interés para las telecomunicaciones. Sus necesidades vanguardistas continúan inspirando el desarrollo de receptores de bajo ruido. De este modo, continúa contribuyendo a la base tecnológica sobre la que se han desarrollado otros servicios, tales como la industria de las comunicaciones por satélite. La gran necesidad de potencia computacional del SRA ha impulsado el desarrollo de muchos de los computadores electrónicos de las primeras generaciones, y la búsqueda de una mayor sensibilidad ha inspirado importantes contribuciones tanto para el diseño de sistemas de alimentación como para el de antenas orientables de gran tamaño. No cabe duda de que el deseo permanente de mejorar los instrumentos continúa impulsando el progreso en campos tan diversos como la electrónica, la ingeniería mecánica y la informática.

4. Breve historia sobre radioastronomía

El estudio de la radioastronomía tiene sus orígenes en los inicios del siglo XX. Previo a esto, los astrónomos estudiaban el universo únicamente en las longitudes de onda

visibles, por lo que su rango de investigación se encontraba muy acotado. Es necesario mencionar que el estudio de la electricidad y magnetismo en el siglo XIX ayudo a lograr el descubrimiento de lo que hoy se denomina radioastronomía. En primer lugar, el desarrollo de las ecuaciones de Maxwell revelo que cualquier longitud de onda de luz es posible y que aquellas que se encuentran dentro de la ventana visible corresponden solo a una pequeña fracción de la gama completa. De esta manera, los investigadores se encontraron con un mundo nuevo por descubrir y varios científicos especularían que los objetos celestes tales como el sol y las estrellas podrían generar ondas de radio. A finales del siglo XIX se hicieron varios intentos para detectar emisiones de radio del Sol realizados por diferentes grupos, entre los que podemos citar al propio Nikola Tesla, Thomas Alva Edison el inventor norteamericano, Sir Oliver Lodge en Inglaterra y los alemanes J. Wilsing y J. Scheiner, pero esos intentos no fueron capaces de detectar emisión alguna, debido a las limitaciones técnicas de sus instrumentos. Hoy en día se puede advertir que estas limitaciones se debían principalmente a que las observaciones se realizaban a muy baja frecuencia, motivo por el cual no se lograba visualizar correctamente el espectro de radio, y a que estos instrumentos no tenían la sensibilidad suficiente para lograr los resultados que hoy en día es posible obtener.

Todo cambio cuando en diciembre de 1932, Karl Jansky, un ingeniero americano de Bell Labs hizo la primera detección exitosa de emisión radioastronómica. Jansky se encontraba trabajando en la investigación de la estática que interfería con las transmisiones transatlánticas de voz para comunicaciones de onda corta. Construyó una antena formada por una estructura metálica en forma de jaula y la suspendió sobre las ruedas de un viejo Ford, de manera que un motor pudiera hacerla girar en diferentes direcciones.

Luego de esto, comenzó una ardua tarea de recopilación de datos, registrando los diversos tipos de ruidos captados en diferentes longitudes de onda, pero sobre todo en longitudes de onda corta y desde varias direcciones del cielo, donde se encontró un ruido de fondo con periodo de 23 horas y 56 minutos, lo que es un día estelar.

Los resultados de estas observaciones indicaron la existencia de tres tipos de interferencias, de las cuales nos interesa mencionar una, la cual consistía en silbidos persistentes desde una misteriosa fuente en movimiento regular a través del cielo.

Jansky finalmente analizó que la fuente de radiación alcanzó su punto máximo cuando su antena apuntaba a la parte más densa de la Vía Láctea, en la constelación de Sagitario; además, evidenció que, ya que el Sol no era un gran emisor de ruido de radio, estas interferencias extrañas podían ser generadas por el gas y el polvo interestelar de la galaxia. El joven ingeniero había hecho el descubrimiento de la primera fuente radioastronómica por casualidad. Sus esfuerzos pioneros en el campo de la radioastronomía fueron reconocidos, ya que en la actualidad se ha nombrado a la unidad fundamental de la densidad de flujo espectral como Jansky (Jy) en honor a él.

Años más tarde, Grote Reber, un ingeniero profesional muy interesado en la astronomía fue inspirado por el trabajo de Jansky, y construyó un radiotelescopio parabólico de 9 m de diámetro en su propia casa en 1937. Comenzó repitiendo las observaciones de Jansky, y pasó a realizar el primer estudio del cielo en las frecuencias de radio.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Reber no obtuvo señales extraterrestres con su primer receptor, que operaba a 3300 MHz, ni con el segundo, operado a 900 MHz. Su tercer intento, a 160 MHz (1938), fue exitoso, confirmando el hallazgo de Jansky. En 1944 publicaría el primer mapa de radio de la Vía Láctea. Su actividad cartográfica durante la postguerra fue el disparador de la explosión en el interés por la radioastronomía.

Por último, es importante incluir que, en febrero de 1942, J. S. Hey, un oficial de la investigación del Ejército británico, hizo la primera detección de las ondas de radio emitidas por el sol.

A partir de estas primeras investigaciones en el campo de la nueva ciencia denominada radioastronomía, se abrió una fuente inacabable de estudios que hasta el día de hoy siguen sorprendiendo, y que permiten ilusionar al hombre con la posibilidad de descubrir los maravillosos misterios que presenta el universo dentro del cual, los seres humanos, existen.

5. Hidrogeno neutro: Historia e importancia

Dentro de la radioastronomía es posible el estudio de emisión del hidrogeno neutro. El estudio de este elemento se originó a mediados del siglo XX, el Profesor Jan Hendrik Ort fue uno de los pocos astrónomos que entendió el potencial científico de los datos de radiofrecuencia, hasta entonces considerados como una curiosidad en el campo de la ingeniería. Su visión progresista lo impulsó a postular la idea de poder observar líneas de emisión de cierto elemento que habita el espacio interestelar. Al contar con las herramientas necesarias para determinar la cantidad de energía que provoca la excitación de dicho elemento se podrían obtener los suficientes datos con que calcular las velocidades radiales (a lo largo de la visual) y los movimientos dinámicos de la Galaxia. Hasta entonces, la astronomía había dado a conocer la forma y una aproximada distribución del volumen de las estrellas en la galaxia, la Vía Láctea. Sin embargo, nada se sabía acerca de la estructura y cinemática interna de la misma. Ort encomendó a Hendrick Van de Hulst, un joven estudiante de doctorado, estimar las probabilidades de poder observar la emisión de líneas en ondas de radio. Luego de estudiar el tema, este joven ultimó que el elemento con más posibilidades de ser detectado en el espacio interestelar era el hidrógeno neutro (HI), en la zona de las microondas a una frecuencia de 1420 MHz (21 cm de longitud de onda aproximadamente) y factible para la tecnología electrónica de entonces. La predicción fue publicada en una publicación holandesa, en 1945. Concluida la 2a Guerra Mundial, la teoría fue conocida, originando una carrera entre varios países para detectar la línea de 21 cm. del HI. El descubrimiento se produjo casi a la par (diferencias de un par de semanas) en 1951 en tres lugares: Harvard, Leiden y Sídney.

Desde entonces, la radioastronomía logró gran importancia a nivel científico lo cual se tradujo en diversos proyectos de radiotelescopios en el mundo y un crecimiento exponencial en la cantidad de información que se fue recogiendo y que permitió ver que

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

la línea de HI podía detectarse prácticamente en cualquier dirección del cielo a que el radiotelescopio apuntara.

A partir de los primeros mapas del hidrógeno neutro en la galaxia, se han hecho importantes aportes al conocimiento astronómico como lo son: la estructura, rotación galáctica y tamaño de la vía Láctea, se consiguió ubicar el centro de la misma, la distribución de las regiones HI en la galaxia, el estudio de cúmulos y supercúmulos de galaxias en la frecuencia de 1420 MHz para evidenciar la presencia de materia en el espacio galáctico, además, una invaluable información sobre el campo magnético galáctico y sobre las propiedades del medio magneto-iónico. La imagen a continuación (Imagen 4) muestra la distribución de hidrógeno atómico en todos los lugares en el cielo; todo lo que se ve de hidrógeno disponible en la galaxia. El color rojo indica las direcciones de alta densidad del elemento, mientras que el azul y negro muestran áreas con poca densidad. Estos datos proceden de las mediciones de la línea de 21cm de hidrógeno mediante radiotelescopios. Algunos de los lazos de hidrógeno esbozan viejos remanentes de supernova.



Imagen 4. Distribución del hidrogeno atómico en el cielo

6. Radiación y espectro electromagnéticos

Una vez entendido de donde proviene y que significa el concepto de **radioastronomía**, es importante ahondar más profundamente el origen de esta ciencia. Bien se sabe que esta se trata, en líneas generales, de la observación y el estudio de ondas radio, pero ¿a qué se denominan ondas? Y más aún, ¿que son las ondas de radio? Al hablar de ondas, se estará

haciendo referencia a las ondas electromagnéticas y se explicara un poco el origen de las mismas.

Para la física, el termino campo hace referencia a una región la cual se encuentra bajo la influencia de alguna fuerza que puede actuar sobre la materia que se encuentra dentro de dicha región. Por esto mismo, se dice que cargas eléctricas estacionarias producen campos eléctricos, mientras que cargas eléctricas en movimiento producen tanto campos eléctricos como magnéticos. El conjunto que producen estos campos mencionados es lo que se denomina campo electromagnético y produce la ya mencionada radiación electromagnética, la cual transporta energía de un punto a otro a velocidad de la luz, de donde se desprende que la luz es, justamente, una forma de radiación electromagnética.

Otros modos de radiación electromagnética pueden ser rayos X, microondas, radiación infrarroja, radiación ultravioleta u ondas de radio. La característica más importante y que define el tipo de radiación es la **frecuencia**. En resumen, la frecuencia es la velocidad a la cual un campo radiante oscila y tiene unidades de Hertz (Hz), siendo un Hz equivalente a un ciclo por segundo.

¿Por qué es tan importante esta característica? La frecuencia define a la onda electromagnética. A medida que la radiación se propaga a una frecuencia dada tiene una longitud de onda asociada. Se puede imaginar que la onda se propaga con forma de sinusoide perfecta; en este caso, la longitud de onda corresponderá a la distancia que hay entre crestas o depresiones sucesivas de la onda y, por lo general, se da en unidad de metros o Angstroms.

Se pueden poner algunas de estas cuestiones en simples fórmulas matemáticas. Dado que toda la radiación electromagnética viaja a la misma velocidad (en un vacío), el número de crestas que pasan por un punto dado en el espacio en una unidad de tiempo dada (por ejemplo, un segundo), varía con la longitud de onda. Como todas las formas de energía electromagnética viajan a la velocidad de la luz, la longitud de onda es igual a la velocidad de la luz dividida por la frecuencia de oscilación (movimiento de cresta a cresta o de canal a canal).

Dado que se habla de la frecuencia de la radiación electromagnética en términos de oscilaciones por segundo y la velocidad de la luz en términos de distancia recorrida por segundo, se plantean las siguientes expresiones:

Velocidad de la luz= Longitud de onda x Frecuencia

c = λf

Longitud de onda = Velocidad de la luz/Frecuencia

Frecuencia = Velocidad de la luz/Longitud de onda

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 5. Onda electromagnética con sus parámetros

Anteriormente se nombraron distintos tipos radiación electromagnética existentes en el universo. Estos se encuentran distribuidos dentro del denominado espectro electromagnético, el cual se puede entender perfectamente a partir del siguiente grafico (Imagen 6):



Imagen 6. Espectro electromagnético

La radiación electromagnética con rango de frecuencia entre los 5 KHz hasta 30 GHz refiere a las radiofrecuencias. A su vez, esta se encuentra dividida en las denominadas "bandas" de frecuencias denominadas "banda S", "banda X" y otras que se pueden ver en la siguiente tabla:

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

	Range of		
Band	Wavelengths (cm)	Frequency (GHz)	
L	30 -15	1 – 2	
S	15 –7.5	2 – 4	
С	7.5 – 3.75	4 – 8	
Х	3.75 – 2.4	8 – 12	
К	2.4 – 0.75	12 - 40	

Es importante recalcar que las antenas disponibles en el instituto están diseñadas para realizar observaciones únicamente en la banda L de frecuencias, más específicamente preparadas para estudiar la radiación del hidrogeno neutro en el espacio. Esta cuestión será profundizada cuando más adelante se trate sobre los receptores astronómicos.

7. Ley del cuadrado inverso de la distancia

Existe una ley denominada ley del cuadrado inverso de la distancia, la cual se refiere a algunos fenómenos físicos cuya intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del centro donde se originan. En lo que concierne al estudio realizado para este trabajo, es responsable de las denominadas 'perdidas del espacio' que hacen referencia a la perdida de intensidad de señal en el espacio propiamente dicho. Esta ley es importante en el estudio del universo debido a que implica que la concentración de la radiación electromagnética disminuye rápidamente al aumentar la distancia del emisor; por lo tanto, cuanto más lejos se encuentre la fuente emisora de radiación, se tendrán menos posibilidades de captar su señal.



Imagen 7. Ilustración de la ley de la inversa del cuadrado. Las líneas representan el flujo que emana de una fuente puntual. La densidad de líneas de flujo disminuye a medida que aumenta la distancia.

Por ejemplo, (Imagen 7) si se tiene un determinado área (A) a una distancia precisa (r) de una fuente que emite una cierta radiación (S); por medio de la siguiente expresión matemática, se puede determinar que parte de la radiación proveniente de la fuente atraviesa dicho área. Esta radiación recibida se denomina I.

$$I = \frac{S}{4\pi r^2}$$

En cambio, si se hace el mismo ensayo, solo que ahora al doble de la distancia anterior (2r), para un mismo valor de área (A), la radiación recibida seria la cuarta parte que la recibida que cuando estaba a una distancia r. Este acontecimiento se debe a la ley del cuadrado inverso.

Lo mismo que sucede al doble de la distancia, también ocurre para cualquier distancia. Si el mismo ensayo se practica al triple de la distancia (3r), para la misma área, la intensidad de radiación I se reduce unas nueve veces.

8. Polarización

Si las ondas electromagnéticas viajan a través de un espacio vacío ideal, lo harán en línea recta. Como fue dicho anteriormente, las cargas estáticas producen campos eléctricos mientras que las cargas en movimiento producen campos magnéticos. Por este motivo, las ondas electromagnéticas tendrán dos componentes que serán los campos previamente mencionados. Si la onda viaja por el espacio libre, la dirección de los campos está en ángulo recto con la dirección de propagación de la onda.



El campo magnético se denomina vector magnético mientras que el eléctrico, vector eléctrico. Un campo vectorial tiene una dirección y una amplitud dada en cualquier punto del espacio. La **polarización** de una onda electromagnética está definida por la dirección

del vector campo eléctrico. Si este vector se mueve a un ángulo constante de 90° respecto del vector campo magnético, se dice que la onda esta polarizada linealmente (Imagen 8). En la transmisión de ondas de radio, si la polarización es paralela al plano de tierra, se dice que la onda tiene polarización horizontal. Si la onda emite radiación en un plano vertical, decimos que tiene polarización vertical. Las ondas también pueden estar polarizadas circularmente; en este caso, el ángulo del vector eléctrico (o magnético) rota alrededor de la "línea" que se encuentra en la dirección de propagación de la onda. La rotación puede ser hacia la izquierda o hacia la derecha (polarización circular izquierda o a derecha). La radiación de radiofrecuencia de fuentes extraterrestres puede tener polarización lineal, polarización circular o puede no estar polarizada. La polarización de las ondas da a los astrónomos información adicional sobre su fuente, motivo por el cual es un dato de crucial importancia.



Imagen 9. Polarización lineal, circular y elíptica.

8.1. Parámetros de Stokes

En el año 1852, el señor George Stokes desarrollo cuatro parámetros con la idea de cuantificar la polarización de una manera más útil. Estos se denominan parámetros de Stokes. A continuación, se pueden apreciar, resumidamente, sus definiciones matemáticas, su explicación física y el porqué de su utilidad.

El primer, parámetro, etiquetado como 'l', es igual a la intensidad total de toda la radiación. Por lo tanto, 'l' es igual a la suma de todas las polarizaciones ortogonales. Para entender mejor, si se asume que la dirección de la onda electromagnética se encuentra en el eje z, se dice que el vector campo eléctrico se encuentra en el plano xy y lo podemos descomponer en dos bases ortogonales. Por lo tanto, se puede escribir el parámetro 'l' en función de estas dos bases independientes (las cuales pueden significar polarización horizontal o vertical, o polarización circular a derecha o izquierda) y se define:

$$I = I_x + I_y \quad \acute{O} \quad I = I_R + I_L$$

El segundo parámetro, etiquetado como 'Q', es igual a la diferencia en las intensidades de las dos polarizaciones lineales, lo que matemáticamente seria:

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

$$Q = I_X - I_Y$$

El tercer parámetro, 'U', es muy similar al segundo, con la diferencia de que implica una rotación de 45º del eje x y del eje y. Si se llama a estos nuevos ejes rotados, eje 'a' y eje 'b', entonces 'U' será la diferencia entre las intensidades que hay ahora con los ejes rotados, y matemáticamente se representa como:

$$U = I_a - I_b$$

El cuarto parámetro, 'V', es igual a la diferencia en las intensidades entre polarización circular derecha e izquierda, quedando:

$$V = I_R - I_L$$

Este último parámetro, por sí solo, es una medida de la cantidad de polarización circular neta.

9. Radiación térmica y no térmica

Luego de haber realizado una explicación sobre ondas electromagnéticas y la radiación que emiten, se profundizara sobre el origen de estos conceptos.

La radiación electromagnética puede ser producida por mecanismos térmicos o no térmicos. Antes de explicar en qué consisten estos mecanismos, se pueden citar algunos ejemplos de ambos.

Radiación térmica:

- Emisiones continuas de espectro relacionadas con la temperatura del objeto o material.
- Emisiones de frecuencia específicas de hidrógeno neutro y otros átomos y moléculas.

Radiación no térmica:

- Emisiones debidas a la radiación de sincrotrón.
- Emisiones amplificadas debidas a los máseres astrofísicos.

Para poder explicar de qué se trata la radiación térmica se dará un ejemplo ilustrativo. Se propone imaginar la situación de gente acampando frente a una fogata. Si se coloca una piedra cualquiera sobre el fuego y luego se saca, la roca emitirá la energía que ha absorbido como radiación, que se puede sentir como calor si se coloca la mano a poca distancia de la misma. Los físicos llamarían entonces al objeto radiante como "cuerpo negro", porque absorbe toda la energía que lo alcanza para luego emitirla en todas las

frecuencias (aunque no igual) a la misma velocidad que absorbe la energía. Toda la materia en el universo conocida se comporta de esta manera.

Como fue mencionado, algunos objetos astronómicos emiten principalmente radiación infrarroja, otros en su mayoría luz visible, otros radiación ultravioleta o radio ondas. La propiedad individual más importante que determina la radiación que emiten es la temperatura.

Un cuerpo negro tiene tres características principales:

- Un cuerpo negro con una temperatura superior al cero absoluto emite algo de energía en todas las longitudes de onda
- Un cuerpo negro a una temperatura más alta emite más energía en todas las longitudes de onda que uno más frio (que uno a menos temperatura).
- Cuanta más alta sea la temperatura, más corta será la longitud de onda a la que se emite la máxima energía.

A pesar de su temperatura, no todas las estrellas visibles son buenas emisoras de radiofrecuencias. Pueden detectarse estrellas solo en la frecuencia de radio si se emiten por mecanismos no térmicos (explicados luego), o si se encuentran dentro del sistema solar, o si hay gas más allá de la estrella que está emitiendo radiación (por ejemplo, un viento estelar).



Imagen 10. Variación de la radiación térmica respecto a la distancia.

La radiación no térmica se produce por mecanismos que no se encuentran relacionados con la temperatura del objeto, sino con el efecto de las partículas cargadas que interactúan con campos magnéticos. Cuando una partícula cargada ingresa en un campo magnético, este la obliga a moverse en una trayectoria circular o en espiral alrededor de las líneas magnéticas de fuerza. De esta manera, la partícula se acelera e irradia energía. Este proceso se denomina radiación ciclotrónica. Si la partículas se encuentra bajo condiciones no relativistas (cuando las velocidades de las partículas se encuentran muy por debajo de la velocidad de la luz), esta radiación no es lo suficientemente fuerte como para tener mucha importancia en la astronomía. Sin embargo, cuando la velocidad de la partícula alcanza casi la velocidad de la luz, emite una forma mucho más fuerte de radiación ciclotrónica llamada sincrotrón (radiación sincrotrónica). Este fenómeno fue mencionado como ejemplo anteriormente, como también la emisión relacionada con los máseres astrofísicos.

A modo de ejemplo, los quásares son una fuente de radiación sincrotrón en las longitudes de onda de radio como también en las longitudes de rayos x, o visibles. Una diferencia importante en la radiación de los mecanismos térmicos frente a los no térmicos es que, si bien la intensidad de la radiación térmica aumenta al hacerlo la frecuencia, la intensidad de la energía no térmica suele disminuir con el aumento la frecuencia, como se ve claramente en la siguiente gráfica (Imagen 11).



Imagen 11. Radiación térmica vs radiación no térmica.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

DESARROLLO

En la introducción, se realizó una detallada explicación sobre el origen de la radioastronomía, que tipo de señales se estudian, y cuáles de ellas se trabajan con la utilización de los radiotelescopios del IAR. Esta explicación es fundamental para entender el contexto en el que se va a desarrollar este trabajo, y también para saber las señales que se pretenden procesar a lo largo esta segunda parte.

CAPITULO 1. Receptores radioastronómicos. Generalidades.

Este primer capítulo está enfocado acerca de los receptores utilizados en la radioastronomía y a todo lo relacionado con ellos. Comenzará con una breve introducción, definiéndolos y luego se explicarán los distintos tipos de receptores que se utilizan en esta rama. Por último, se detallarán los parámetros de dichos receptores.

Para comenzar, se debe definir que es un receptor y para qué sirve. Un receptor es un dispositivo diseñado con el objetivo de transformar en energía eléctrica a las ondas electromagnéticas, provenientes desde el espacio libre. En el caso de la radioastronomía, estas ondas electromagnéticas provienen de radiofuentes situadas a millones de kilómetros.

1.1. Tipos de receptores

En la actualidad existen una gran cantidad de receptores que se utilizan, estos varían según sus usos y necesidades. A continuación, se describirán los receptores más utilizados en esta ciencia.

1.1.1. Bolómetro

El **bolómetro** es un receptor que por lo general se utiliza a altas frecuencias, también puede ser usado como un detector. Estos dispositivos son de banda ancha inherente y por lo general sólo se utilizan para detectar la emisión continua y líneas no espectrales a longitudes de onda cortas (menos de un milímetro); a su vez, estos receptores son los más sensibles para observaciones astronómicas. En pocas palabras, un bolómetro es un termómetro para la radiación y consta de dos componentes, un absorbente y un termistor.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

La radiación de las ondas electromagnéticas que incide sobre el material absorbente, produce un aumento de la temperatura en el absorbente de forma proporcional a la cantidad de energía mediante un termistor muy sensible.

Aunque conceptualmente son simples, pueden ser bastante complicados de realizar. La cantidad de potencia de radiación que llega desde una fuente astronómica distante es pequeña, produciendo que el cambio de temperatura del absorbente sea minúsculo. Por lo tanto, el termistor debe ser extremadamente sensible para evitar las fluctuaciones térmicas del absorbente, por lo cual este debe ser enfriado a una temperatura cercana al cero absoluto. Los primeros bolómetros utilizaban termistores semiconductores para medir el cambio de temperatura, mientras que bolómetros más recientes utilizan materiales superconductores que son muy sensibles a los pequeños cambios de temperatura.

Una distinción importante entre bolómetros y los sistemas heterodinos, es que el primero sólo detecta la energía de la onda y no tiene en cuenta su fase

1.1.2. Receptor homodino

El siguiente tipo de receptor a nombrar es el **receptor homodino**, el cual fue uno de los primeros radio-receptores que existieron, aunque hoy en día el receptor superheterodino lo supera ampliamente en todas sus prestaciones y características técnicas. Estos equipos operan sin cambiar de frecuencia, lo cual significa que solo trabaja con la frecuencia de entrada y no la transforma a una frecuencia inferior como lo hacen los receptores sucesores.

La sensibilidad y la selectividad de este receptor no son muy buenas en ondas cortas, y ultracortas. La sensibilidad del circuito sintonizado depende de su resistencia de pérdida, que a su vez, el valor de esta resistencia aumenta con la frecuencia. Por otra parte, la selectividad disminuye con los aumentos de frecuencia.

Se debe tener en cuenta que utilizando los amplificadores sintonizados a altas frecuencias, aparece el indeseado efecto Miller. Este efecto produce que la ganancia del amplificador sea menor, y que su sensibilidad disminuya.

El receptor está compuesto por un circuito oscilante, un demodulador y un amplificador de baja frecuencia. En la siguiente imagen (Imagen 12) se muestra un diagrama en bloques del receptor homodino.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 12. Esquema de un receptor homodino.

1.1.3. Receptor heterodino

Otro tipo de receptor utilizado es el **receptor heterodino**. Estos receptores se caracterizan por utilizar un mezclador para sintonizar cualquier frecuencia que se desee. También existe el receptor súper-heterodino, que a diferencia del heterodino, cuentan con dos o más etapas mezcladoras.

En el proceso de recepción y obtención de datos, se distinguen dos bloques principales: front-end y back-end. Este receptor representa al front-end, y además, se caracteriza por estar muy cerca del foco del telescopio. Por otra parte, los componentes del back-end son ubicados a la salida del telescopio y podría ser situados a cierta a distancia. En la siguiente imagen (Imagen 13) se ve el conexionado del front-end.



Imagen 13. Esquema de un receptor heterodino.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Los componentes del front-end realizan variadas funciones de procesamiento de las señales. La primera tarea es filtrar todo tipo de ruido fuera del rango a estudiar, mientras que la segunda tarea es aumentar la amplitud de las ondas de radio de entrada. Por lo tanto, los primeros elementos en el receptor generalmente son un filtro y un amplificador. Idealmente, un amplificador sólo aumenta la amplitud de la onda electromagnética, pero también introduce algo de ruido no deseado.

Después de la amplificación inicial es esencial convertir la señal a una frecuencia diferente (y por lo general mucho más baja) tan temprano en el proceso como sea posible. Las ondas de altas frecuencias electromagnética experimentan una mayor pérdida de energía en la línea de transmisión, además de que los componentes de altas frecuencias son más difíciles de obtener y también más costosos de construir. Por otra parte, si se requiere amplificación adicional, a menudo es conveniente introducir esta amplificación en una frecuencia diferente, para mejorar la estabilidad del sistema. Esta conversión a otra frecuencia se logra mediante un dispositivo llamado mezclador, este mezclador crea otra señal de frecuencia ligeramente diferente a partir del oscilador local (LO). El termino heterodino se refiere a la idea de combinar o mezclar dos señales diferentes para lograr una conversión en frecuencia.

Las frecuencias de radio a la entrada del receptor (frecuencia de la fuente) se abrevian comúnmente como RF. La salida del mezclador es una frecuencia más baja que la llamamos frecuencia intermedia, o FI. Por lo tanto, el mezclador combina las señales LO con RF, produciendo una señal FI, que lleva la misma información que la señal de RF, pero a una frecuencia diferente, dada por la siguiente ecuación:

Durante el transcurso del proyecto, la frecuencia RF fue de 1420 MHz, siendo esta la frecuencia de radiación que emite el hidrógeno neutro. El oscilador local estará seteado a una frecuencia de 1570 MHz, comportándose como la componente LO. Una vez definidos los valores de las frecuencias anteriores, se obtendrá como resultado una frecuencia FI de 150 MHz.

1.2. Parámetros

Los receptores mencionados anteriormente, se caracterizan principalmente por sus variados parámetros, estos parámetros son el patrón de haz, temperatura de antena y de ruidos, y spillover. Estos parámetros serán descriptos a continuación.

1.2.1. Haz de la antena

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Un parámetro fundamental es el **haz de la antena**, es una medida de la sensibilidad del telescopio a las señales de radio entrantes en función del ángulo en el cielo (θ). Idealmente, se busca que este valor sea lo más pequeño posible de modo que cuando se apunta el radiotelescopio en una dirección específica, la potencia detectada a través de cada observación corresponda a la radiación proveniente solamente de ese punto en el cielo.

En la siguiente figura se observa el patrón de sensibilidad del telescopio en función del parámetro θ , también denominado patrón de Airy. Se utiliza para definir la resolución angular de un telescopio de un solo plato.





A partir de la figura se deduce el FWHM, (son las iniciales en inglés de ángulo del ancho total a la mitad de la máxima potencia, del haz principal), esto se logra midiendo el ancho en donde la potencia recibida cae a la mitad del valor de la máxima. La FWHM del haz se considera que es el intervalo en el que el telescopio puede detectar la emisión de radio. Dentro de este ángulo se pueden detectar objetos, aunque con sensibilidad reducida. Este ángulo se define de la siguiente manera.

$$\Theta_{\text{FWHM}} = \frac{1.15 * \lambda}{L} \text{ [rad]}$$

En la ecuación anterior el único parámetro que se puede modificar es el diámetro de la antena (L). Este parámetro es el encargado de la sensibilidad, la misma aumenta a medida que el diámetro se incrementa. En caso de que se requiera una gran sensibilidad, se deberá contar con una extensa antena. En muchas situaciones resulta incómodo utilizar

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

una gran antena debido a su enorme estructura, mantenimiento, entre otros factores, siendo más efectivo realizar interferometria, mediante arreglos de pequeñas antenas.

Las antenas del instituto son de treinta metros de diámetro, y como se quiere observar la radiación proveniente del hidrogeno neutro, que es de 1420 MHz, el haz de la antena será de:

$$\theta_{\text{FWHM}} = \frac{1.15 * \lambda}{L} = \frac{1.15 * c}{f * L} = \frac{1.15 * 300.000.000 m/s}{1420 Mhz * 30m} = 0,00805 \text{ rad} = 0,46^{\circ}$$

Este valor de resolución permite principalmente crear mapas de grandes estructuras, como por ejemplo inmensas nubes de helio neutro, y también estudiar el comportamiento de fuentes puntuales.

En el patrón de Airy se observa que a medida que el ángulo aumenta, la respuesta del telescopio pasa por una serie de picos y valles en la que hay interferencia constructiva parcial e interferencia destructiva. Estas respuestas fuera del eje se llaman lóbulos laterales, estos lóbulos son indeseables ya que pueden añadir confusión a las observaciones.

1.2.2. Temperatura de ruido y temperatura de antena

Los siguientes parámetros que se mencionaran son la temperatura de ruido y temperatura de la antena. Surgen a partir de la potencia que recibe la antena. Parte de la energía detectada se debe a la fuente astronómica, que fue convertida por el receptor a energía eléctrica, esta energía proveniente de una fuente radioastronómica tiene asociada una temperatura, denominada temperatura de la antena (T_a). Sin embargo, la gran mayoría de la potencia detectada proviene de otros fenómenos del universo y también de los componentes del receptor, denominado "ruido". Esta potencia está relacionada con la temperatura de ruido (T_n). El ruido es un efecto indeseado, y se espera que el receptor este diseñado de manera que pueda minimizarlo tanto como sea posible.

La potencia en un circuito puede ser descrita en términos de una temperatura equivalente, T_{equiv}, dada por la siguiente ecuación.

$$T_{\rm equiv} = \frac{P}{k\,\Delta\nu}$$

En donde P es la potencia total recibida, k la constante de Boltzmann, y Δv es el ancho de banda

Ahora, se debe discutir cómo la potencia final medida en la salida del receptor se relaciona con la temperatura de la antena y la temperatura del ruido de cada uno de los componentes. Hay que tener en cuenta que tanto las señales de origen, como el ruido se

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

ven incrementados por una amplificación o reducida por una pérdida (como en una línea de transmisión o en el mezclador).

En el momento en que solo la señal proveniente del espacio ingresa en el receptor, la energía debido a la radiación se amplifica por una ganancia neta, G.

$$P = Gk \Delta v T_A$$

La ecuación anterior se deduce a partir de la temperatura equivalente, y también se diferencia en que los parámetros son para la potencia de la señal astronómica.

Si se tiene una señal proveniente de una fuente astronómica, su potencia es afectada por los procesos en el receptor. A modo de entender estas temperaturas, se hará un ejemplo respecto al tema. Se necesita determinar cómo calcular la ganancia total de cada uno de los componentes, y también se debe mostrar cómo calcular la potencia de ruido total de los componentes.

Si se tienen dos amplificadores sucesivos, como el lazo caracterizado por G1 y T_n1 , y el segundo por G2 y T_n2 , descripto de la siguiente manera.



Entonces la potencia de ruido será:

$$P_{\rm N} = G_2 G_1 \ k \ \Delta \nu \ T_{\rm N1} + G_2 \ k \ \Delta \nu \ T_{\rm N2}$$

La ganancia total es G = G1*G2. Por lo tanto, se puede descifrar la temperatura total del ruido (T_n)

$$P_{\rm N} = Gk \Delta v T_{\rm N}$$

Por lo que la temperatura de ruido total se relaciona con las temperaturas de ruido individuales como:

$$T_{\rm N} = T_{\rm N1} + \frac{T_{\rm N2}}{G_{\rm I}}$$

Para una sucesión de etapas amplificadoras la temperatura de ruido equivalente será:

$$T_{\rm N} = T_{\rm N1} + \frac{T_{\rm N2}}{G_1} + \frac{T_{\rm N3}}{G_1 G_2} + \cdots$$

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

A esta última ecuación también se la conoce como fórmula de Friss para la temperatura.

1.2.3. Spillover

Otro tipo de parámetro a tener en cuenta es el **spillover**. Este efecto ocurre cuando la señal que se refleja en la antena se diluye más allá de la zona del reflector físico, generando un efecto de "desborde". A su vez, este efecto es mucho mayor si la iluminación es bastante grande en el borde del reflector, combinado con un pequeño borde alrededor del área reflectiva. En cambio, con un borde más grande se optimiza la eficiencia del derrame.

La superficie máxima de recolección es el resultado entre la eficiencia de los derrames y de la iluminación. El borde que maximiza esta área del telescopio es uno en el que la potencia por área de unidad transmitida al centro del reflector sea 10 veces mayor que la del borde; esto se llama una aleta de 10dB.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

CAPITULO 2. Tipos de observación.

Hasta el momento solo se mencionaron los receptores a utilizar, que son los encargados de detectar la información. En este segundo capítulo se presentarán los métodos existentes para la obtención de la información.

2.1. Formas de observación

En esta parte del capítulo se engloban algunos de los de tipos de observación más utilizados en la radioastronomía.

2.1.1. Medición de potencia

El tipo de observación más simple que se puede hacer es medir la **potencia** de la radiación proveniente de una fuente, en un ancho de banda determinado. Sin embargo, el proceso real no es tan simple, hay muchos detalles y factores que lo complican.

La cantidad de energía detectada no es solo la potencia debida a esa radiofuente, sino que también la potencia medida por el detector incluye otros factores. Estos factores son: el ruido de los componentes eléctricos del mismo receptor, el ruido producido por la longitud de onda, ruido producido por la radiación de fondo del cielo, ruido producido por la radiación térmica de la tierra, entre otros factores. Por lo tanto, la potencia que se desea apreciar, que es la de la fuente radioastronómica, es una pequeña porción de la potencia que devuelve el receptor.

Para determinar la cantidad de potencia detectada que se debe únicamente a la fuente astronómica, se le debe restar a la energía medida la producida por el ruido del receptor y otras fuentes de radiación no deseada. Para lograr la sustracción de la señal de ruido se hace mediante un proceso conocido como "traspuesta", en el que también se mide la potencia cuando se observa una porción del cielo que no contiene ninguna fuente astronómica.

La potencia medida cuando se señala hacia la fuente es generalmente llamada "on", En cambio cuando apunta libremente es "off". La temperatura de la antena está asociada con la potencia de la fuente radioastronómica, mientras que la temperatura del sistema está asociada con el ruido propio del receptor. Luego se procede restando ambas potencias medidas, dando como resultado la energía proveniente, dependiendo de la temperatura de la antena, y eliminando el ruido producido por el receptor.

$$V_{on} \alpha (T_a + T_{sys})$$

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

$V_{off} \alpha T_{sys}$

A partir de estas dos relaciones se puede deducir lo siguiente:

Tanto la temperatura de la antena como la del receptor se pueden conocer por medio de un diodo de ruido, este es un dispositivo que produce una cantidad conocida de potencia de radio-frecuencia en un ancho de banda, y, por lo tanto, estos diodos de ruido tienen una temperatura equivalente conocido, que se llama temperatura de calibración (T_{cal}), y es un valor conocido.

$$T_{\text{sys}} = \frac{V_{\text{off}}}{V_{\text{cal}} - V_{\text{off}}} T_{\text{cal}}$$
$$T_{\text{A}} = \frac{V_{\text{on}} - V_{\text{off}}}{V_{\text{off}}} T_{\text{sys}}$$

Todo esto es válido si la ganancia del receptor se mantiene constante, pero puede ocurrir que esto no suceda y conllevaría a errores muy grandes. Para evitar las variaciones de ganancia y evitar producir tales errores, deben realizarse observaciones regularmente sobre y fuera de las fuentes radioastronómica. Esta técnica se desarrolló a mediados del siglo XX, y se conoce como cambio de Dicke, en honor a su inventor Robert Dicke.

2.1.2. Frecuencia de conmutación

Otra técnica de observación es la de la **frecuencia de conmutación**, que es una alternativa en caso posible que no se pueda medir en el espectro de la banda ancha. Puesto que la señal de una línea espectral sólo está presente en un rango estrecho de frecuencias, a diferencia de mover el radiotelescopio abarcando o no la fuente de radio, esta técnica consiste en desplazar ligeramente la frecuencia de la observación cuando se observa en la línea espectral. Como el desplazamiento de frecuencia no es demasiado grande, todas las fuentes contribuyen de igual manera a ambos ajustes de la frecuencia.

Además, mover el telescopio para cambiar la dirección a la que apunta llevaría tiempo, mientras que la frecuencia de conmutación es un método muy rápido.

Por otra parte, mediante una cuidadosa selección de la banda de paso y la frecuencia de desplazamiento, se puede duplicar el tiempo en la fuente.

2.1.3. Imágenes de radio

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Por el momento solo se mencionó maneras de obtener la información proveniente del espacio. El próximo paso es representar de alguna manera visible esa información, recreando **imágenes de radio.**

Para obtener un mapa estelar a partir de un radiotelescopio, se debe emprender un proceso de apuntar en una dirección particular, y realizando una observación conmutada, registrar la temperatura medida por la antena. Luego se debe mover el telescopio a una nueva posición y repetir el procedimiento, continuando hasta que se cubra el área del cielo deseado. Las temperaturas de la antena en todas las posiciones se pueden convertir en un mapa de la fuente de radio.

Para hacer un mapa, se debe obtener la temperatura de la antena como función de la posición. El mapa que se produce es la correlación de la distribución de la luz normalizada y la intensidad de la fuente. Los radioastrónomos suelen decir que el mapa que se observa es el patrón del haz convolucionado con la distribución verdadera de intensidad de brillo del cielo. Para lograr una mejor representación de la verdadera estructura de la fuente se puede deconvolucionar para deshacer la convolución, ya que es importante conocer la forma de la distribución de la luz.

2.2. Espectrometría

Hay otros tipos de observaciones que se realizan, incluidos dentro del campo de la técnica denominada **espectroscopía**. Estas observaciones son las que refieren a líneas espectrales, espectro continuo y espectro de líneas de absorción.

Brevemente, la espectroscopia es una técnica que se utiliza para analizar el espectro irradiado por una fuente de observación, entendiéndose por espectro a la gráfica que relaciona potencia de la fuente de observación contra la frecuencia o longitud de onda de la misma.

Para realizar espectroscopia se utilizan los denominados espectrómetros, los cuales pueden ser analógicos o digitales. Para el presente trabajo, se hará foco en el análisis de estos espectrómetros, para más adelante introducir los denominados espectrómetros para pulsares. De lo dicho anteriormente, se puede entender que los espectros van a ser distintos según el tipo de observación que se quiera realizar.

Estudiar el espectro de una fuente tiene un valor importante, ya que permite conocer y entender características físicas de la misma. Para el estudio del mismo, se tienen tres distintos tipos de espectros descriptos por las reglas de Kirchoff. Este nombre viene dado por el aclamado físico alemán Gustav Kirchoff, quien junto a Robert Bunsen, dio inicio al estudio de la espectroscopia por la década de 1860. Los tres tipos básicos de espectro son los nombrados anteriormente y se explican a continuación.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.
2.2.1. Espectro continuo

Cuando una fuente de radiación emite en todas las frecuencias dentro de un rango de forma continua, el espectro se llama **espectro continuo**, y el objeto emisor se llama **fuente continua**. Un ejemplo clásico de una fuente continua es una lámpara incandescente. Una gráfica de un espectro continuo, por ejemplo, mostrará intensidades en un amplio rango de frecuencias, aunque la intensidad de la emisión puede variar significativamente. Este tipo de espectro se encuentra explicado en detalle en el apartado referido a observaciones de Potencia. En la siguiente imagen (Imagen 15), se puede ver un ejemplo de espectro continuo de una observación realizada con el tubo de ruido de la antena del instituto.



Imagen 15. Espectro continuo con inyección periódica del tubo de ruido.

2.2.2. Espectro de línea de emisión o líneas espectrales

Cuando un objeto radiante emite radiación en algunas frecuencias (o longitudes de onda) muy específicas, el espectro contiene un conjunto de líneas brillantes. Estas líneas de luz se llaman **líneas de emisión**. El motivo por el cual una fuente emite radiación únicamente en algunas frecuencias específicas, se debe a la cantidad física de estructuras moleculares y atómicas que posee. Un átomo o molécula puede estar excitado en un estado de energía y luego, espontáneamente, caer a un estado de energía más bajo. Para conservar la energía, la fuente emite un fotón que transporta exactamente la cantidad de energía que el átomo o molécula pierde. Sin embargo, debido a las leyes de la mecánica cuántica, los niveles de energía interna de los átomos y las moléculas están restringidos a un conjunto

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

de valores discretos. Así, los cambios en la energía (y, por tanto, la energía o frecuencia de fotones emitida) solo puede tener ciertos valores.

En una representación gráfica, las líneas de emisión aparecen como picos en el gráfico de intensidad vs frecuencia (Imagen 16).



Imagen 16. Observación de una línea espectral utilizada para calibración.

Diferentes átomos y moléculas emiten diferentes conjuntos de frecuencias, por lo que la composición de una fuente de radiación se puede identificar mediante la determinación de las frecuencias de las líneas de emisión. Este es un ejemplo de cómo la espectroscopia es una herramienta tan poderosa en la astronomía.

Hay tres parámetros importantes del espectro que hay que tener en cuenta a la hora de realizar una observación espectral. Estos son: el ancho de banda total, la frecuencia de radio, RF, y la resolución espectral. La frecuencia central se determina por la combinación de oscilador local (LO) y de frecuencia intermedia (IF), mientras que el ancho de banda total y resolución espectral se determinan por el diseño del espectrómetro. El espectrómetro de radiofrecuencia crea un espectro producto de dividir la señal en muchos canales diferentes mediante el procesamiento digital de la señal de entrada en función de la frecuencia.

La clave para las observaciones de la línea espectral es asegurar que el espectro observado cuente con suficiente resolución y ancho de banda para cumplir con los objetivos del proyecto. Tanto resolución y ancho de banda tienen un costo. Para obtener un mayor ancho de banda, es necesario aceptar una resolución más baja, o viceversa. Por ejemplo, si el ancho de banda es demasiado estrecho, la línea espectral puede ser demasiado amplia como para caber en ella. Por otro lado, si la resolución es demasiado gruesa, la línea caerá en un solo canal, y perderá la información sobre su anchura y forma.

Como pauta general, se busca tener, al menos, cinco canales a través de una línea espectral. Con menos canales no es imposible, pero si difícil determinar parámetros de la línea tales como la amplitud, centro, y la anchura. En algunas aplicaciones, puede ser necesario contar con decenas de canales a través de la línea, para rastrear su perfil espectral con gran detalle.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

2.2.3. Espectros de líneas de absorción

Este es un caso más complicado e interesante, y sucede cuando la radiación de una fuente continua intensa pasa a través de <u>un gas frío y transparente de átomos o moléculas</u>. Algunos de los átomos o moléculas en el gas pueden absorber fotones del continuo para elevarlos a un nivel de energía más alto permitido. Los fotones que absorben deben tener exactamente la misma cantidad de energía que el átomo o la molécula, por lo que solo los fotones de ciertas frecuencias específicas serán eliminados del continuo. Para un observador ubicado más allá del gas frio, el espectro se mostrará como el de una fuente continua de fondo pero con la radiación a las frecuencias específicas oscurecidas. En un gráfico de intensidad versus frecuencia, esto se verá como saltos o disminuciones en la intensidad.

Las frecuencias de absorción atómica o molecular son las mismas que las correspondientes frecuencias de emisión, y así, una vez más, la composición química de una nube de gas puede ser Identificado por las frecuencias de las líneas de absorción que produce.

En la siguiente imagen (Imagen 17) se pueden ver los distintos espectros a modo de comparación:



Imagen 17. Diferencia entre espectro continuo, de absorción y de emisión.

Ya conocidos los diferentes tipos de espectro que se pueden observar y estudiar, resta explicar cómo se pueden obtener para su estudio. Quienes se encargan de esta tarea son los espectrómetros ya nombrados anteriormente por lo que, a continuación, se hará un desarrollo referido a los espectrómetros digitales y analógicos.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Existen muchas líneas espectrales de longitud de onda de radio que pueden revelar información valiosa acerca de las condiciones físicas de fuentes astronómicas, por lo que otro componente importante de un telescopio de radio es el espectrómetro. Estos pueden ser de banco de filtros analógicos o digitales. En cualquiera de los casos, dos parámetros importantes que caracterizan a un espectrómetro son su ancho de banda, Dv, y su resolución espectral, dv. El ancho de banda determina la gama de frecuencia total sobre la que se mide el espectro, y se busca que este sea lo más amplio posible. La resolución espectral determina la capacidad del espectrómetro para distinguir las líneas espectrales muy próximas entre sí y para revelar los detalles de las formas de cada línea; en general, se requiere que esto sea lo más estrecho posible.

2.3. Métodos de observación

2.3.1. Espectrómetro de banco de filtros

El **Espectrómetro de Banco de filtros** (Imagen 18) es una serie de filtros pasa banda, cada uno centrados en una frecuencia ligeramente diferente de IF, pero con idénticos anchos de banda estrechos.

La salida de señal de IF del receptor heterodino se amplifica y luego se envía a un divisor de potencia, que difunde la señal en cientos de canales, cada uno conteniendo uno de los filtros en el banco de filtros. Cada filtro es seguido por un detector de ley del cuadrado, que a la salida da un voltaje para ser enviado a la computadora. El ancho de banda de los filtros determina la resolución de frecuencia del espectrómetro

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 18. Diagrama en bloques de espectrómetro de banco de filtros.

La división de la señal en los canales reduce la potencia de la señal de la fuente en cada canal. Pero, con que haya suficiente ganancia en cada canal para que el ruido no sea notable al aumentar la temperatura de ruido global, se puede entender que no hay ruido adicional añadido por este proceso. Por lo tanto, la sensibilidad a las fuentes astronómicas débiles no se reduce.

2.3.2. Espectrómetro digital.

A diferencia del espectrómetro de banco de filtros, un espectrómetro digital hace uso del procesamiento digital de señales para poder capturar el espectro de potencia. Básicamente, consiste en utilizar la relación matemática entre el campo eléctrico expresado como una función del tiempo y el campo eléctrico como una función de la frecuencia. Los dos dominios están relacionados por una teoría matemática fundamental, la Transformada de Fourier. De esta manera, con el procesamiento digital de señales, se logra evaluar el campo eléctrico tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo.

Para empezar a entender esto, se puede imaginar a la radiación electromagnética en una única radiofrecuencia. Si bien es algo astronómicamente poco realista, es una buena manera de ilustrar la relación que hay entre ambos dominios. Con una sola frecuencia, E(v) es cero en todas partes excepto en una frecuencia, mientras que E(t) se describe con una simple sinusoide. Si se agrega radiación a una frecuencia ligeramente diferente, de

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

modo que E(v) sea distinto de cero a dos frecuencias cercanas, el comportamiento en el tiempo del campo eléctrico total es un poco más complicado. Si de esta manera se añaden más y más componentes en frecuencia, y con diferentes amplitudes entre sí, E(t) se volverá más y más complicada, pero la información de que frecuencias están involucradas y sus amplitudes individuales todavía están contenidas en estas variaciones en el tiempo. La base de un espectrómetro digital es utilizar la relación matemática entre el campo eléctrico expresado como una función del tiempo (el dominio del tiempo, el cual se observa) y el campo eléctrico como función de la frecuencia (el dominio de frecuencia, que es el espectro de potencia que se quiere medir/obtener). Como se dijo anteriormente, esta relación matemática es la siguiente:

E(v) = F[E(t)], donde F representa al símbolo de la transformada.

En esencia, la transformada de Fourier deconstruye las variaciones del tiempo del campo eléctrico como la suma de muchas funciones sinusoidales, cada una con una frecuencia y amplitud específicas. Las componentes individuales en esta suma tienen amplitudes y frecuencias específicas, y esto es lo que es la función E(v).

Para el ejemplo previo de espectro en una sola frecuencia, la variación de tiempo es una función sinusoidal única y su transformada de Fourier contiene una sola componente que define la amplitud del campo eléctrico a la frecuencia de esa función sinusoidal. En este sencillo caso, E (v) es cero en todas las frecuencias distintas de la sinusoide única.

Para obtener el espectro de potencia, la amplitud del campo eléctrico es muestreada y digitalizada a medida que entra en el espectrómetro para medir E(t). Esta serie temporal de datos digitales se transforma a Fourier, para producir E(v), y luego al cuadrado, para producir el espectro de potencia, P(v) α [E(v)]².

Hay varias diferencias importantes entre espectrómetros digitales y analógicos, que surgen de la digitalización de la señal FI; tratar con ellos requiere componentes adicionales en el espectrómetro. Se muestra, a continuación, un diagrama de bloques de un espectrómetro digital genérico (Imagen 19).



Imagen 19. Diagrama en bloques de un espectrómetro digital

Esta conversión consiste en dos pasos: muestreo de la señal a intervalos periódicos y cuantización de la señal muestreada. La señal muestreada es todavía un valor analógico. Lo que hace el espectrómetro es digitalizar este valor representándolo en términos de bits. Si **n** bits están disponibles para representar el valor, entonces el rango de voltaje

permitido será dividido en 2ⁿ niveles. La cuantización de la señal es el proceso de seleccionar el nivel más cercano al valor muestreado. La pequeña diferencia entre el valor muestreado y el valor asignado en la cuantización es una fuente de ruido en la medición, llamada ruido de cuantización. La salida del digitalizador es un flujo de datos digitales que se envía a una computadora donde se recoge en bloques de intervalos de tiempo que son muchos órdenes de magnitud más largos que el periodo de una onda; cada uno de estos intervalos de tiempo es entonces transformado por Fourier y elevado al cuadrado para producir el espectro de potencia.

Hay dos parámetros importantes que caracterizan a un espectrómetro digital: la tasa de muestreo y la longitud del intervalo de tiempo de los bloques de datos utilizados en la transformada de Fourier. Para recuperar toda la información en un ancho de banda Dv, el campo eléctrico debe ser muestreada a una tasa de al menos dos veces Dv, este método se denomina teorema de Nyquist. Por ejemplo, si se quiere un ancho de banda de 25 MHz, comparable al espectrómetro de banco de filtros, el campo eléctrico debe ser muestreado a una velocidad de 50 MHz. Por lo tanto, la tasa de muestreo determina el ancho de banda del espectrómetro.

Como se dijo previamente, el flujo de datos resultante muestrea en intervalos de tiempo mucho más largos que el período de las ondas, y cada intervalo de tiempo es transformado por Fourier para producir un espectro; luego los espectros de todos los diferentes intervalos de tiempo se promedian juntos para, de esta manera, producir el espectro final.

Los intervalos de tiempo largos contienen más cantidad de muestras, lo que hace que la transformada de Fourier requiera de mayor costo computacional, pero a su vez trae aparejada una mejor resolución espectral. En general, si los datos son muestreados en intervalos de tiempo Δt , la resolución espectral δv es aproximadamente:

$$\delta v \sim \frac{1}{\Delta t}$$

De esta manera el intervalo de tiempo Δt determina la resolución espectral del espectrómetro.

Dado que cada intervalo de tiempo se transforma en Fourier, y se necesitan muchos intervalos para producir un espectro razonable con un nivel de ruido suficientemente bajo, la potencia de procesamiento disponible es a menudo un factor limitante para la resolución del espectrómetro.

Aparte de los bancos de filtros y los espectrómetros digitales, existen muchos otros diseños de espectrómetros, que no se detallaran en este proyecto. La decisión de qué tipo de espectrómetro usar depende de los detalles del telescopio y objetivos observacionales; por este motivo, a continuación se estudiara los denominados espectrómetros para

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

pulsares, ya que dicha fuente de radiación en la que el IAR está concentrando todos sus estudios en la actualidad.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

CAPITULO 3. Espectrómetros para pulsares

Hasta el momento, solo se hizo énfasis en base a conceptos generales relacionados con la astronomía. Su objetivo fue crear una firme noción de dichos conceptos.

Por otra parte, también se desarrolló acerca de los receptores y espectrómetros. Estas bases fueron fundamentales para proseguir con el siguiente concepto, que es referente a los espectrómetros para pulsares.

3.1. Estrellas de neutrones

Para comenzar, antes de hablar sobre los espectrómetros para pulsares, es necesario saber que son los pulsares, como se forman y la manera de lograr su detección.

Las estrellas transforman su hidrógeno en helio, y por lo tanto brillan. Con el correr del tiempo, más precisamente a mitad de su vida (varios millones de años), las estrellas se quedan sin hidrógeno, y lentamente el núcleo se convierte en helio. Finalmente, como consecuencia de distintos procesos, las estrellas se vuelven más frías y brillantes.

Estos diferentes procesos que les ocurren a las estrellas dependen de su masa. Si la masa de la estrella es pequeña, aproximadamente la décima parte del Sol, ocurre que a medida que agota el hidrógeno remanente, genera que las capas exteriores se expandan producto del calor y de la presión, originando que la estrella colapse. En esta fase, la estrella se convierte en una **gigante roja**. Las gigantes rojas son lo bastante calientes como para convertir el helio de su núcleo, en elementos pesados como el carbono. Pero no son lo bastante masivas como para crear la presión y calor necesarios para generar la combustión de estos elementos pesados, por lo que la fusión y la producción de calor se detienen, originándose finalmente en las distinguidas: **enanas blancas**. Lo más probable de estas estrellas es que su destino sea enfriarse y perder brillo. Debido a que las enanas blancas tienen una tenue luminosidad, pierden energía lentamente, por lo que pueden permanecer en esta etapa miles de millones de años. Una vez que se enfrían (la mayoría de las enanas blancas observadas poseen una temperatura superficial relativamente elevada, entre 8.000 K y 40.000 K), se vuelven rocas que se quedan vagando por el Universo, y tristemente este es el destino del Sol.

En cambio, si la estrella es muy voluminosa, aproximadamente 10 o más masas solares, se producen las **supergigantes rojas**, que a diferencia de las **gigantes rojas**, poseen una mayor cantidad de masa.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Luego, si la masa es enorme, será capaz de elevar la temperatura de su núcleo hasta los mil millones de grados. Estas son las destacadas: **supergigantes azules**, y son entre 20 y 50 veces más grandes que el Sol. Estas viven varios miles de años porque consumen mucha energía, y como consecuencia, viven menor tiempo que las supergigantes rojas y que las enanas blancas.

Para concluir, en cualquiera de los dos últimos casos anteriores, tanto en las <u>supergigantes</u> <u>rojas</u>, como en las <u>supergigantes azules</u>, debido a la gran cantidad de masa que poseen, se crea la presión y calor necesarios para quemar el carbono transformándolo en silicio y azufre, poniéndole fin a su evolución en una explosión cósmica masiva, denominada **supernova**. La estrella terminará explotando y todas las capas exteriores se contraerán con velocidades de hasta 70.000 kilómetros por segundo, y es justo en este momento cuando se crean muchos de los elementos químicos más pesados presentes en la naturaleza terrestre, como, por ejemplo: cobre, platino, oro, entre otros.

Cuando una estrella se convierte en supernova todo lo que queda después de este proceso violento son dos sucesos.

Si la estrella es masiva, de al menos diez veces el tamaño del Sol, generara un núcleo muy grande. Debido a que este núcleo no tiene energía suficiente para fusionarse, ni tampoco produce presión hacia el exterior, es atrapado por su propia gravedad y se convierte en un agujero cósmico de energía y materia, denominado: **agujero negro**.

En caso contrario, el resultado de este fenómeno daría como consecuencia una nube de gas en expansión y el pequeño remanente de material extremadamente denso de solo unas pocas decenas de kilómetros de diámetro. La implosión de la supernova es tan intensa que los protones y electrones en los átomos de la estrella quedan compactados de manera tal, que sus cargas eléctricas se anulan, formando neutrones. Tendrá campos magnéticos extremadamente potentes, y debido a que el eje magnético puede no corresponder con el eje de rotación, podrá girar muy rápidamente (del orden de los milisegundos), emitiendo un rayo de radiación por los polos magnéticos, dando lugar a que se asemeje a un reflector giratorio pulsante. Por esta razón, dentro de la astronomía, se denomina a estas <u>estrellas de neutrones</u> giratorias como: **púlsares**, (Imagen 20). Normalmente los pulsos son detectados como emisiones de radio, pero también pueden ser detectados en el campo de onda visual, en las ondas de: rayos x y rayos gamma.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 20. Imagen ilustrativa de un pulsar con sus respectivos campos magnéticos.

En la siguiente ilustración (Imagen 21) se puede observar la evolución estelar de cada uno de los eventos nombrados anteriormente



Imagen 21. Evolución estelar para los diferentes casos.

A partir de 1967, cuando la prestigiosa astrofísica norirlandesa Jocelyn Bell detectó el primer púlsar, cientos de púlsares han sido descubiertos, como el <u>púlsar Cangrejo</u>, que gira a 30 veces por segundo, el <u>púlsar B1937+21</u> situado en Cygnus, que rota 642 veces por segundo. Se recibe esta emisión en la Tierra como si fuera una señal producida por un reloj cósmico. Durante el breve período que son observados, todos ellos parecen estar disminuyendo gradualmente su velocidad de rotación, y su energía se está disipando con el correr del tiempo. Luego de corregir este efecto, algunos púlsares son tan precisos en el

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Alan Szeinfeld, Ariel Saidman

cronometraje como los mejores relojes atómicos, inclusive obteniendo mejor precisión de tiempo. Gracias a esto, la velocidad a la que los púlsares se desaceleran ha sido útil para confirmar aspectos de la teoría de la relatividad general del destacado físico alemán: Albert Einstein. Asimismo, la sincronización de los púlsares puede ser útil para determinar las propiedades del medio interestelar.

3.2. Técnicas de observación

La ciencia posee un gran interés acerca de lo ocurrido en el fenómeno del Big Bang; este interés se debe a que quedan pocas evidencias de este acontecimiento histórico y fundamental para la humanidad. Se cree que tanto el nacimiento del Universo en el Big Bang, como la colisión de agujeros negros supermasivos en el centro de las galaxias, pueden producir: **ondas gravitacionales** (parte de la teoría de la relatividad de Einstein) que continúan hoy en día, propagándose hasta el Universo cercano.

Para detectar estas ondas gravitacionales, entran en juego los pulsares, porque conociendo su precisión, pueden ser utilizados como relojes cósmicos, y combinarlos de manera tal, que se sincronicen con otros pulsares. De esta manera, facilitará la oportunidad de encontrar estas impredecibles ondas gravitacionales a longitudes de onda que ningún otro instrumento será capaz de detectar.

La mayoría de los púlsares emiten señales que son descriptivamente débiles. Además, los pulsos se mezclan con en el ruido producido por el mismo Universo, con el ruido generado por los receptores, entre otros. Por lo tanto, es toda una hazaña ingeniosa la extracción de esta débil señal a partir de datos ruidosos.

En la siguiente imagen (Imagen 22) se puede observar el grafico de rotación en función del tiempo del pulsar PSR B0301+19, en donde el período (P) de los pulsos se muestra estable. Dando como resultado un tiempo de 1,38 segundos. Por consiguiente, las amplitudes individuales y sus formas pueden ir variando de acuerdo a la radiación que emiten. Por otra parte, aumentando la imagen en ciertas zonas se puede observar como el ruido interfiere en los datos de una forma no deseada.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 22. Periodo del pulsar PSR B0301+19 en función del tiempo reconstruido. Haciendo un aumento de 140 ms en cada pulso individual se logra ver cómo afecta el ruido.

Muchas técnicas se han inventado para señales periódicas débiles en conjuntos de datos; la periodicidad delas señales emitidas por los púlsares es lo que ha hecho posible que los astrónomos puedan descubrir miles de púlsares, en la mayoría de los cuales son demasiado débiles para producir pulsos de formas individuales y distinguibles. Esta periodicidad, sin embargo, permite observar con relativa facilidad púlsares conocidos. Si se conoce el período de un pulsar en particular, y si es que están grabados en un conjunto de datos en el dominio del tiempo, y en función del periodo, es posible determinar la forma de pulso promedio del pulsar.

Esta técnica se conoce como "plegado" (porque los datos se están plegando repetidamente sobre sí mismo, en el período del púlsar), y es utilizado habitualmente por los astrónomos cuando se observan pulsares conocidos. Mientras que los pulsos individuales de los púlsares pueden ser muy variables, el pulso bajo esta técnica de plegado suele dar como resultado estabilidad periódica.

En resumen, esta técnica posibilita observar pulsares a partir de un espectrómetro digital, esto es posible siempre que los espectros que genera los haga a una velocidad adecuada en el cual permita ver el periodo y ancho de pulsar. Por lo tanto, esta velocidad está dada por el criterio de Nyquist en función del periodo del pulsar.

Hasta el momento, se realizó un análisis ignorando el efecto que el medio interestelar (ISM) tiene sobre las señales de los púlsares mientras los pulsos viajan hacia la tierra. El medio interestelar es un plasma ionizado que interactúa con la radiación electromagnética de los púlsares, en una variedad de maneras. Existe un efecto indeseado conocido como **dispersión**, que cuenta con importante influencia sobre cómo construir instrumentos eficaces para realizar observaciones de pulsares.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

La dispersión tiene el efecto de retrasar un pulso de un pulsar como una función de la frecuencia.

Gran parte del trabajo de análisis después de una observación de pulsares consta en: **la dedispersion** de los datos. La dedispersion intenta, literalmente, revertir los efectos dispersivos.

Existen dos métodos dedispersivos, dedispersion incoherente y coherente. La técnica de **dedispersion incoherente** es un método computacionalmente barato que no elimina completamente la dispersión, mientras que la **dedispersion coherente** es una técnica computacionalmente costosa que da resultados muy exactos invirtiendo totalmente los efectos dispersivos (limitados solamente por la precisión numérica).

3.2.1. Técnica de dedispersion coherente

La técnica **dedispersion coherente** reconoce que la dispersión efectivamente puede ser considerada como un filtro. Por tanto, todo lo que se requiere para devolver los datos recibidos a su forma dedispersada, es aplicar la inversa de ese filtro. En la práctica, es más eficiente aplicar el filtro inverso en el dominio de la frecuencia, ya que es simplemente una multiplicación, mientras que en el dominio del tiempo es una convolución. Sin embargo, la transformada de Fourier discreta, requiere el tamaño de la cantidad de puntos muestreados a lo largo de la observación, que a menudo es del orden del millón. Por lo tanto, la dedispersion coherente es una técnica cara de aplicar, y es ampliamente utilizada en aplicaciones de temporización pulsar, donde la precisión que proporciona es útil, y por consecuencia necesaria.

La necesidad de canalización es obvia, ya que la técnica opera canalizando datos. En la práctica, a veces no es computacionalmente factible dedispersar coherentemente todo el conjunto de datos a la vez. Por lo tanto, primero se realiza una canalización gruesa para producir canales, que individualmente pueden ser dedispersados de manera coherente

3.2.2. Técnica de dedispersion incoherente

La técnica de la **dedispersion incoherente** funciona cambiando los diferentes canales en un conjunto de datos para que el tiempo se retrase. La inexactitud del método resulta que en el proceso de canalización se produzcan innumerables canales. Por lo tanto, existe una dispersión de datos dentro de cada canal que no se corrige. Sin embargo, la dedispersion incoherente todavía se usa ampliamente debido a su eficiencia, y también a que proporciona la precisión suficiente para distintas aplicaciones en diferentes telescopios.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

En la siguiente imagen (Imagen 23) se encuentra un pulso de PSR B1937+21 dedispersado coherente e incoherentemente. El grafico superior es el dedispersado coherente, mientras que el inferior es incoherente. Puede notarse claramente como varía la calidad de la dedispersion.



Imagen 23 Pulsos dedispersados coherentemente e incoherentemente.

3.3. Espectrómetros

Es así que independientemente de la técnica de dedispersion, un **espectrómetro para pulsares** es necesario, ya que digitaliza una muestra y la canaliza. Las grandes velocidades de datos requeridas para los espectrómetros en la ciencia del púlsar son un resultado directo del deseo de los astrónomos de observar anchos de banda cada vez mayores. Los anchos de banda para los estudios de pulsar varían de 50MHz a 1GHz.

En los últimos años se ha desplegado una gama de espectrómetros basados en FPGA para radioastronomía con gran éxito. Los fabricantes de FPGA están a la vanguardia de crear dispositivos decididos a mejorar la densidad de transistores que contienen en sus núcleos. Hay dos parámetros principales que los astrónomos desean mejorar utilizando los nuevos recursos: ancho de banda y canales de frecuencia. Específicamente a los astrónomos les gustaría observar anchos de banda más grandes, y una canalización más fina (es decir, más canales).

Se desean anchos de banda más grandes porque mejora la sensibilidad. Aumentar el ancho de banda es una de las únicas formas de mejorar dicha característica en los telescopios existentes. Un aumento en el número de canales generalmente también es útil por varias razones; si se aumenta el ancho de banda, manteniendo el mismo ancho de cada canal, se generará un aumento en el número de canales.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

En el caso de los espectrómetros para aplicaciones de dispersión incoherente, generalmente es deseable disminuir el ancho de banda por canal, ya que significa que una menor cantidad del ancho de banda total, menos dispersión hay dentro de cada canal.

Debido a las técnicas de observación, existen dos tipos de espectrómetros para pulsares, **espectrómetros incoherentes y coherentes**. Ambos producen un espectro de potencia utilizando un banco de filtros polifásico.

Los **espectrómetros para aplicaciones de dedispersion incoherente** (Imagen 24) tienen entre 128 y 4096 canales, la resolución de tiempo ronda desde algunos microsegundos, hasta los milisegundos, con anchos de bandas que varían desde varias decenas de MHz hasta los GHz.



Imagen 24. Diagrama en bloques de un espectrómetro de dedispersion incoherente.

El **espectrómetro de dedispersion coherente** (Imagen 25) es conceptualmente más simple: canaliza los datos de entrada (en fragmentos que normalmente tienen anchos de banda entre1MHz y 50MHz), y luego envía la salida del banco de filtros polifásicos sin procesar a un clúster. Debido a que la velocidad de datos es demasiado alta para que una computadora la procese, la salida está equilibrada de carga, y los canales se dividen entre varias máquinas.

Por ejemplo: en un sistema de 32 canales, puede haber 8 computadoras de procesamiento, por lo que el espectrómetro enviará 4 canales de frecuencia a cada computadora de procesamiento.



Imagen 25. Diagrama en bloques de un espectrómetro de dedispersion coherente.

El espectrómetro que se utilizará en el IAR será el espectrómetro de dedispersion incoherente, ya que es computacionalmente más barato que el coherente. Además, el

porcentaje de error para esta técnica es depreciable para los fines de la aplicación a realizar. Como se mencionó anteriormente, este tipo de espectrómetros requiere de hasta 1 GHz de ancho de banda para un eficaz funcionamiento. Funcionalmente, es una medida con un ancho de banda importante, y requiere de un instrumental sumamente sofisticado para manipular semejante canal.

Por consiguiente, para estar a la altura de los requerimientos solicitados, sería ideal utilizar la plataforma de procesamiento ROACH 2, producida por el grupo de colaboración CASPER. Lamentablemente, el Instituto aun no dispone de esta plataforma, sin embargo, posee otra plataforma, pero con menores prestaciones denominada Red Pitaya. Si bien esta plataforma no es la ideal para la magnitud de este proyecto, es una gran alternativa para demostrar que lo diseñado es válido y funcional. En consecuencia, el siguiente paso será describir ambas plataformas.

Ambas plataformas, tanto la ROACH 2 como la Red Pitaya son el back-end del receptor digital, y se encuentra a continuación del front-end, y alejado de la antena. En la siguiente imagen se puede ver el esquemático del radiotelescopio con todas sus partes.



Imagen 26. Diagrama en bloques de un receptor.

CAPITULO 4. CASPER.

4.1. Grupo CASPER

El Centro de Procesamiento de Señales astronómicas e Investigación Electrónica, de la Universidad de California, Berkeley, denominado: **CASPER** (Collaboration for Astronomy Signal Processing and Electronics Research), ha desarrollado un conjunto de herramientas de hardware y software para la construcción de instrumentación digital radioastronomía. En el transcurso de este proyecto se hizo un amplio uso de su tecnología.

Este conjunto de herramientas fue creado con tecnología de hardware de procesamiento de señal digital, en el que los FPGA han llegado a un punto en que es posible la construcción de casi toda la instrumentación digital requerida en un radiotelescopio.

El objetivo principal de CASPER es racionalizar y simplificar el flujo de diseño de la instrumentación de radioastronomía promoviendo la reutilización del diseño a través del desarrollo de hardware y software de código abierto independiente de la plataforma.

CASPER proporciona bibliotecas de "gateware" parametrizadas e independientes de la plataforma en que se ejecuten, otorgando bloques de construcción de hardware modulares y reconfigurables de bajo nivel. Esta biblioteca permite a los astrónomos diseñar e implementar rápidamente nuevos instrumentos, incluyendo espectrómetros, correlacionadores, conformadores de haz, entre otros.

4.2. FPGA

Para continuar con el análisis acerca de CASPER, es necesario sumergirse previamente en el mundo de los FPGA, ya que es un elemento fundamental en las bases de CASPER.

FPGA (del inglés, Field Programmable Gate Array), o, en otras palabras, arreglo de compuertas programables, es un dispositivo programable que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada en el momento. Permiten describir un circuito digital usando un lenguaje específico (los dos más comunes son VHDL y Verilog) y que, tras cargarlo en el integrado, se crea físicamente dentro del mismo.

4.2.1. Características

Una FPGA posee una arquitectura programable, se compone principalmente de cables, puertas lógicas, biestables, y puertos de entrada y salida. Todo ello sin conectar, como un boceto en blanco, hasta que se les carga un bit-stream (archivo generado a partir de la

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

descripción del circuito). Una virtud acerca de las FPGA es que se puede reprogramar tantas veces como se necesite.

Dado que los FPGA's son más sencillos a nivel lógico, las compañías son capaces de traer nuevos productos al mercado de forma más rápida, ya que los FPGA's evolucionan y ofrecen mejores recursos.

Los FPGA's actuales incluyen procesadores en el integrado, sistemas de entrada y salida de datos y mucho más. Más funciones dentro del FPGA significan menos dispositivos en la placa de circuitos, lo que aumenta la fiabilidad al reducir el número de fallos de los dispositivos.

4.2.2. Aplicaciones

Cualquier circuito puede ser implementado en una FPGA, siempre y cuando esta disponga de los recursos necesarios. Las aplicaciones donde más comúnmente se utilizan las FPGA's incluyen a los DSP (procesamiento digital de señales), estos son: radio definido por software, sistemas aeroespaciales y de defensa, prototipos de ASIC, sistemas de imágenes para medicina, sistemas de visión para computadoras, reconocimiento de voz, bioinformática, emulación de hardware de computadora, entre otras. Cabe notar que su uso en otras áreas es cada vez mayor, sobre todo en aquellas aplicaciones que requieren un alto grado de complejidad.

4.2.3. Fabricantes

Aproximadamente desde hace una década, el mercado de las FPGA's se ha colocado en un estado en el que se encuentran dos grandes productores de propósito general de estas plataformas, estos productores son: Xilinx y Altera. También se debe considerar que existen un conjunto de otros competidores que ofrecen dispositivos con características específicas. Estos fabricantes son: Lattice Semiconductor, QuickLogic, Atmel, Achronix Semiconductor, MathStarInc, Tabula, entre otros.

4.2.4. Familia de FPGA's

Tanto Xilinx, como Altera posen diferentes tipos de FPGA's. Xilinx incluye las siguientes familias lógicas: la serie Virtex (alto rendimiento), Kintex (rango medio), y Artix (bajo costo), y la retirada Spartan (bajo costo). Mientras tanto, Altera por su parte posee las siguientes familias: Stratix series (alto rendimiento), Arria (bajo costo), Cyclone (bajo costo), MAX (CPLD).

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

4.3. CASPER Hardware

Durante la última década CASPER se enfocó en diseñar y desarrollar numerosas placas para el procesamiento de datos, con fines astronómicos y de investigación. En la siguiente tabla (Imagen 27) se pueden observar las distintas placas que existen en el mercado, con sus principales características técnicas.

	CASPER Pr	ocessing P	latform Co	mparison Ma	trix	
Platform	iBOB	ROACH	ROACH-2	SKARAB	SNAP	SNAP-2
Status	OBSOLETE	Deprecated	Current	Current	Current	Current
FPGA	Virtex-II Pro XC2VP50	Virtex-5 V5SX95T	Virtex-6 XC6VSX475T	Virtex-7 XC7VX690T	Kintex-7 XC7K160T	Kintex Ultrascale XCKU115
Auxiliary processor	PPC	PPC	PPC	microblaze	Raspberry Pi	Zynq XC7Z010 ARM
Logic Cells	53k	94k	476k	693k	162k	1160k
DSP Slices	232	640	2016	3600	600	5520
BRAM	4.2 Mb	8.8 Mb	38 Mb	53 Mb	11 Mb	76 Mb
SRAM	2x18 Mb	2x36 Mb	4x144Mb	8x 32 Gb	-	4x36 Mb
SRAM BW	9 Gbps	43 Gbps	200 Gbps	8x30 Gbps	-	40 Gbps
DDR		1x8 Gb	1x16 Gb	HMC replaces	-	1x 1GB DDR3
DDR BW	-	38 Gbps	50 Gbps	SRAM and DDR		8 bit interface
High-speed Ethernet	2x10G	4x10G	8X10G	< 16x40G	2x10G	4x40G, 16x10G
Low-speed Ethernet	1x10 Mbps	1x100 Mbps	2*1 Gbps	1x1 Gbps	1x1G on R-PI	2x 1G
Expansion Bus	2*ZDOK	2*ZDOK	2*ZDOK	4x Mega array 16x10 Gbps	1x ZDOK	2x HPC FMC, 1 ZD+
ADCs	-			-	3x HMCAD1511 (12 inputs)	
Xilinx Tools Required	ISE	ISE	ISE	Vivado	Vivado	Vivado

Imagen 27. Tabla de placas de CASPER.

Actualmente el IAR posee grandes posibilidades de adquirir en un futuro no muy lejano la plataforma de desarrollo: **ROACH 2**, por medio de una donación. Es por esta razón, que la institución necesita personal calificado para desarrollar laboriosos programas en su software.

Previamente, se deberá analizar y estudiar su versión antecesora, nombrada: **ROACH**. Es fundamental comprender el funcionamiento de esta plataforma, ya que estos conocimientos son necesarios para volcarlos en su versión mejorada, ROACH 2.

4.3.1. ROACH

ROACH (en sus siglas en inglés, Reconfigurable Open Architecture Computing Hardware) es una placa de procesamiento. Su pieza central es una FPGA Xilinx Virtex 5 Pro VP50, que incluye dos núcleos PowerPC incorporado (de los cuales sólo uno se utiliza), ejecuta Linux y se usa para controlar la placa.

El procesador PowerPC tiene una memoria DRAM propia para ejecutar los procesos y una versión especial de Linux llamada BORPH14 (Berkeley Operating system for Re Programmable Hardware).

BORPH es un sistema operativo diseñado para sistemas reconfigurables basados en FPGA.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Corresponde a una extensión de un Linux que maneja FPGAs como si fueran CPUs. Este sistema operativo también introduce el concepto de un "hardware process", que consiste en un diseño de hardware (circuito digital) que corre en un FPGA pero que se comporta de la misma forma que un programa de usuario normal.

El hardware incluye una plataforma Xilinx Virtex 5 Pro VP70 FPGAs, que a su vez tienen dos núcleos PowerPC 440 embebidos. Una FPGA: "FPGA Control", ejecutada en una versión modificada de Linux, BORPH. Cada FPGA tiene al menos dos puertos de 10 GbE disponibles, y cuatro zócalos DIMM DDR2. Esto, combinado con la alta velocidad entre las FPGAs en el tablero, hace que sea una plataforma ideal para aplicaciones que requieren un ancho de banda de memoria de gran tamaño o ancho de banda I/O.

En resumen, la **ROACH** (Imagen 28) es el primer procesador de la nueva generación de CASPER, construida en colaboración con el Telescopio Karoo Array y NRAO Socorro. El procesador ROACH está pensado como un reemplazo de plataformas obsoletas. Cuenta con un solo Xilinx Virtex 5 FPGA (ya sea SX95, LX110T o LX155T), cuatro puertos de 10 GbE, un PowerPC externo para control y seguimiento, 72Mbit QDR SRAM y dos DDR2 DIMM ranuras. Incluye dos conectores ZDOK, que le permiten conectar los módulos ADC, de modo que también se puede utilizar con hasta dos tarjetas de CID.



Imagen 28. Plataforma ROACH.

4.3.1.1. PowerPC 440

El PowerPC 440 se utiliza para ayudar a mejorar la optimización del rendimiento. Para generar esta mejora posee una gran caché de datos de 32 Kbytes de instrucciones (64 vías asociativa en conjunto). Para obtener un rendimiento adicional del sistema, el núcleo PowerPC 440 incluye predicción dinámica, que consiste en multiplicar y acumular instrucciones (MAC)

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Además de su potente núcleo 440, el PowerPC 440EPx incluye un FPU (unidad de coma flotante) de alto rendimiento. Este FPU soporta operaciones tanto individuales, como de doble precisión, ofreciendo una mejora de ciclo único en la mayoría de instrucciones. El resultado es un rendimiento excepcional en imágenes y otras aplicaciones intensivas de cálculo. Posee velocidades de hasta 667 MHz, soporte para operaciones de punto flotante, USB 2.0, Gigabit Ethernet, seguridad e interfaces Flash NAND, y baja disipación de potencia. Este procesador embebido es ideal para una amplia gama de aplicaciones de alto rendimiento, incluyendo formación de imágenes, control industrial y redes.

Características del PowerPC 440:

- Velocidad (frecuencia): 400 MHz a 667 MHz.
- Rendimiento: 2,0 DMIPS / MHz
- FPU 5-etapa con 2,0 MFLOPS / MHz; soporte de hardware para IEEE 754.Precisión simple y funcionamiento de doble precisión con 32 registros de coma flotante de 64 bits.
- Controlador de flash NAND. Es compatible con uno a cuatro bancos de dispositivos de memoria Flash NAND.
- Doble velocidad de datos (2 DDR1)
- Soporte para dos bancos de memoria DDR SDRAM de hasta 1 GB cada uno, con capacidad máxima de 2 GB.
- Soporte para 256, 512 Mbit y 1 Gbytes para dispositivos DDR, con latencias CAS de 2 o 3.
- USB controlador 2,0 dispositivo, USB 2.0 controlador Host y uno en el chip USB PHY 2.0. Un segundo PHY USB se puede conectar fuera de chip por medio de una interfaz de UTMI.
- Ethernet 10/100/1000-Mbit / s, MACs de dúplex completo de apoyo GMII / las interfaces MII, TBI, RTBI, RGMII, SMII. Capa de acceso de memoria (MAL) proporciona la capacidad de DMA a ambos canales Ethernet.
- Soporte para hasta 6 ROM, RAM, o dispositivos de E / S de esclavos periférico.
- 4-canal de soporte de DMA para los periféricos externos.
- Hasta cuatro UART's (1x 8-pin, o 2x 4-pin, o 4x 2-pin, o 1x4-pin y 2x 2-pin).
- Dos IIC (con un controlador de la correa de arranque integrado).
- Una interfaz en serie SPI.

4.3.2. ROACH 2

Luego de explicar todo acerca de la ROACH, el próximo tema de interés a desarrollar será sobre las especificaciones técnicas de la ROACH 2. Previo a esto, en el siguiente mapa se localizan los diferentes laboratorios distribuidos alrededor del mundo, dedicados a la radioastronomía, que emplean sus trabajos con esta plataforma.



Imagen 29. Mapa ilustrativo de los laboratorios que utilizan la ROACH 2.

Como se puede observar, en el mapa se logra apreciar la ausencia de laboratorios dedicados a la radioastronomía situados en Latinoamérica, que emplean este tipo de plataforma para producir avances y descubrimientos científicos, como lo es la ROACH 2. Por consiguiente, tener la oportunidad de ser el primer centro en obtener y obrar con esta plataforma es una gran virtud, ya que, será posible trabajar en conjunto y en simultáneo con otros laboratorios, aportando mediciones y resultados desde un lugar geográfico distante, y con la misma tecnología.

Prosiguiendo con el análisis, la **ROACH 2**(Imagen 30) es una actualización de la plataforma ROACH, posee una FPGA Xilinx Virtex 6 con un mayor procesamiento que su sucesor. Los principales recursos en el FPGA Virtex 6 son: mayor rendimiento general en términos de potencia de procesamiento, mayor rendimiento de entrada/salida, mayor disponibilidad de ancho de banda de memoria y nuevas funciones de DSP (digital signal processing) a los diseños, tales como multiplicación y suma. La ROACH2 mantiene la arquitectura del procesador de control de su predecesor, lo que permite a los usuarios aumentar la capacidad de sus sistemas con poco o ningún cambio en su control y software de monitoreo. Utiliza el mismo PowerPC 440EPx presente en el ROACH inicial, pero agrega una interfaz JTAG unificada provista a través de un puerto USB 2.0 denominado FTDI FT4232H IC.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 30. Plataforma ROACH 2.

El esquemático de la plataforma se encuentra en el siguiente enlace: https://casper.berkeley.edu/wiki/images/a/a5/Roach2_rev1_schematics.pdf

El diseño de la ROACH-2 incluye las siguientes características notables:

- Virtex-6 SX475T FPGA (XC6VSX475T-1FFG1759C)
- PowerPC 440EPx procesador independiente para proporcionar funciones de control
- 2 ranuras para tarjetas de ruptura de transceptor Multi-gigabit, que admiten hasta 8x10Ge enlaces que pueden ser CX4 o SFP+
- 4 x 36 * 2M QDR II + SRAM conectadas al FPGA
- Una única ranura DDR3 RDIMM de 72 bits conectada al FPGA
- 2 x ZDOKs (conectores para módulo ADC)
- Un FTDI FT4232H USB a JTAG, serial e IIC

4.3.3. Virtex-6 SX475T

La siguiente lista está compuesta por las características más significativas de la Virtex 6 SX475T FPGA (XC6VSX475T-1FFG1759C):

• Virtex-6 SXT FPGAs: Mayor capacidad de procesamiento de señal con conectividad en serie avanzada.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

•Potentes gestores de reloj de modo mixto (MMCM): bloques que proporcionan buffering sin retardo, desplazando la fase del reloj, filtrando fluctuaciones de fase y división reloj.

•36-Kb bloque RAM / FIFOs. Con anchos de hasta 36 bits. De doble puerto, anchos de hasta 72 bits.

- Lógica FIFO programable mejorada
- Tecnología de alto rendimiento en paralelo
- SPI y una interfaz flash paralela
- Soporte multi-flujo de bits con la lógica de reconfiguración de respaldo dedicada
- Detección de ancho de bus automática
- Capacidad de Monitor del sistema en todos los dispositivos
- Monitoreo dentro y fuera del chip de tensión térmica y suministro
- Acceso JTAG a todas las cantidades monitorizadas
- Bloques de interfaz integrados para diseños PCI Express

• Soporte con transceptores GTX de Gen1 (2,5 Gb/s) y Gen2 (5 Gb/s).Un transceptor es un dispositivo que cuenta con un transmisor y un receptor que comparten parte de la circuitería o se encuentran dentro de la misma caja.

- Puerto de punto final y Root capaces
- GTX transceptores: hasta 6,6 Gb / s
- Transceptores GTH: 2.488 Gb / s hasta más allá de 11 Gb / s
- Tecnología de proceso CMOS de cobre 40 nm

	ace est	Configurable Logic Blocks (CLBs)			Block RAM Blocks		168	Interface	12125070-0	Maximum Transceivers		Total	Max	
Device	Cells	Slices ⁽¹⁾	Max Distributed RAM (Kb)	Slices ⁽²⁾	18 Kb ⁽³⁾	36 Kb	Max (Kb)	MMCMs ⁽⁴⁾	PCI Express ⁽⁵⁾	MACs(6)	GTX	GTH	I/O Banks ⁽⁷⁾	User VO(8)
XC6VLX75T	74,496	11,640	1,045	288	312	156	5,616	6	1	4	12	0	9	360
XC6VLX130T	128,000	20,000	1,740	480	528	264	9,504	10	2	4	20	0	15	600
XC6VLX195T	199,680	31,200	3,040	640	688	344	12,384	10	2	4	20	0	15	600
XC6VLX240T	241,152	37,680	3,650	768	832	416	14,976	12	2	4	24	0	18	720
XC6VLX365T	364,032	56,880	4,130	576	832	416	14,976	12	2	4	24	0	18	720
XC6VLX550T	549,888	85,920	6,200	864	1,264	632	22,752	18	2	4	36	0	30	1200
XC6VLX760	758,784	118,560	8,280	864	1,440	720	25,920	18	0	0	0	0	30	1200
XC6VSX315T	314,880	49,200	5,090	1,344	1,408	704	25,344	12	2	4	24	0	18	720
XC6VSX475T	476,160	74,400	7,640	2,016	2,128	1,064	38,304	18	2	4	36	0	21	840
XC6VHX250T	251,904	39,360	3,040	576	1,008	504	18,144	12	4	4	48	0	8	320
XC6VHX255T	253,440	39,600	3,050	576	1,032	516	18,576	12	2	2	24	24	12	480
XC6VHX380T	382,464	59,760	4,570	864	1,536	768	27,648	18	4	4	48	24	18	720
XC6VHX565T	566,784	88,560	6,370	864	1,824	912	32,832	18	4	4	48	24	18	720

Tabla del fabricante de la Virtex 6 SX475T FPGA (Imagen 31):

Imagen 31. Tabla del fabricante de la Virtex 6.

La primera columna corresponde con los modelos de FPGAs, y se detallara solamente el XC6VSX475T, debido a que la ROACH2 utiliza ese modelo. Esta FPGA consta de 476.160

celdas lógicas, distribuidas en 74,400 fragmentos, con una RAM de 7,640 Kb, además de 18 bloques que no proporcionan retardo y 21 puertos de entrada/salida.

4.3.4. Módulos ADC

Un componente indispensable en este sistema son los módulos ADC. Estos módulos se utilizan para muestrear los datos adquiridos, y luego, estas muestras se envían a la ROACH 2.

Estas plataformas de desarrollo son compatibles con diferentes modelos de módulos ADC's. Durante el transcurso de este proyecto los convertidores que se utilizaron fueron el: AT84AD001B (Imagen 32). El motivo por el cual se emplearán estos y no otros, es porque estos están anexados en conjunto a la placa donada. Además, estos módulos se adaptan de manera óptima a las antenas, ya que tienen dos entradas con mayor ancho de banda, del orden del Gsps, dicho de otra manera, 500 Msps por cada canal.



Imagen 32. Módulo ADC AT84AD001B

El AT84AD001B es un convertidor monolítico dual de 8 bits flash, analógico a digital, que ofrece bajo consumo de energía de 1.4W y una excelente precisión de digitalización. Integra una doble pista en el encapsulado, que proporciona un rendimiento dinámico mejorado con una tasa de muestreo de hasta 1 Gsps y un ancho de banda de frecuencia de entrada de más de 1,5 GHz. La idea del concepto dual genera que el demultiplexor integrado y el modo fácil de entrelazar sean fáciles de usar en este dispositivo para todas las aplicaciones de doble canal, como la conversión directa de RF o la adquisición de datos. La función inteligente de la interfaz serie de 3 hilos elimina la necesidad de componentes externos, que normalmente son necesarios para la ganancia y ajuste de compensación de otros parámetros, lo que conduce a la reducción de espacio y potencia, así como la flexibilidad del sistema.

Las entradas y salidas con las que cuenta el dispositivo son las siguientes:

Entradas:

- Clock: 10MHz-1GHz 50Ohm 0dBm
- Signal (con un ancho de banda de hasta 1,5 GHz)

• Sync: LVTTL (5V tolerant, (SN65LVDS1)

Salidas:

- 1x Tyco Z-DOK+ 40 differential pair connector
- 8x (1x8 or 2x4) 8-bit offset binary data
- 2x digital clocks to CASPER standard Z-DOK clock pins

Esta demás en decir que las características mencionadas acerca del módulo ADC AT84AD001B son suficientes para afrontar este proyecto. Pero también se debe aclarar que existen otros detalles minuciosos que no se nombraron, ya que exceden el interés de este trabajo. En el siguiente enlace se encuentra de forma detallada las hojas de datos del convertidor para una mayor información:

https://www.teledyne-e2v.com/resources/account/download-datasheet/1679

Otros modelos de módulos ADC´s útiles se encuentran en el siguiente enlace: <u>https://github.com/casper-astro/casp er-hardware/blob/master/README.md</u>

4.3.5. CASPER, herramientas y bibliotecas

Las plataformas de CASPER en general se desarrollaron de manera tal, para que sus softwares sean compatibles con el programa de flujo Simulink de MATLAB y con el producto de Sistema Generador de Xilinx, que permite diseñar el desarrollo de la FPGA desde dentro de Simulink.

La herramienta de flujo Simulink proporciona el concepto de programación visual generando modelar, simular y analizar sistemas dinámicos multidominio, a partir de diagramas, para luego volcarlo al software de la placa. Todas estas cualidades hacen que Simulink sea un programa eficaz, con un entorno de programación de alto nivel de abstracción que posee MATLAB. Es ampliamente usado en el campo de las ingenierías, en temas relacionados con el procesamiento digital de señales, involucrando temas específicos de ingeniería biomédica, telecomunicaciones, entre otros. También es muy utilizado en ingeniería de control y robótica.

Una vez que un usuario ha desarrollado un diseño en el entorno Simulink, un comando generará un archivo de programación listo para ser cargado en una plataforma de CASPER, logrando que se pueda interactuar de una manera extremadamente sencilla e intuitiva en tiempo real.

Además de soporte de hardware en Simulink, también existe una biblioteca CASPER DSP que se ha construido específicamente para proporcionar las funciones necesarias DSP (digital signal processor) que se necesitan para construir de forma rápida y fácil,

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

instrumentos de radioastronomía que utilicen las juntas IBOB, Bee2 y ROACH, sin ser responsable de los detalles de implementación de bajo nivel, como las interfaces de ADC, o implementaciones de Ethernet, que son manejados automáticamente.

Los instrumentos típicos tales como espectrómetros, conformadores de haz, correladores, adquisición de datos del ADC, y generadores de señal DAC se construyen de esta biblioteca de bloques DSP. Estos bloques se basan en las unidades lógicas de bajo nivel, proporcionados por la biblioteca Xilinx Simulink y las bibliotecas de Simulink genéricos. Los bloques Configurables DSP de bajo nivel se utilizan para la construcción, en cambio los bloques DSP de alto nivel, para estructuras más complejas.

La biblioteca CASPER DSP incluye los siguientes componentes básicos:

- 1. Transmisión de FFT en paralelo.
- 2. Filtro polifásico de filtros FIR.
- 3. Convertidor digital descendente.
- 4. Reordenación arbitraria y transposición.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

CAPITULO 5. Red Pitaya STEMLab 125-14

En un principio, la idea del proyecto era consolidar su finalización llevando a cabo simulaciones mediante Simulink debido a que no se cuenta en el instituto con la placa ROACH 2. A medida que se desarrollaba este proyecto, surgió la posibilidad de adquirir un prototipo de placa, denominada Red Pitaya (Imagen 33), que, si bien posee menores prestaciones que la ROACH2, a los fines de este trabajo es suficientemente para poner en práctica los programas que se harán en Simulink, y realizar un ensayo completo del diseño del software, su síntesis y posteriormente la implementación en la placa, la cual va a permitir medir señales reales.



Imagen 33. Vista de la placa Red Pitaya.

Por consiguiente, esta sección del trabajo se enfocará completamente sobre la Red Pitaya. Esta plataforma es un hardware de código abierto destinado a ser una alternativa para muchos instrumentos caros de medición y control de laboratorio. Además de su gran flexibilidad y de sus instrumentos, permite que el usuario realice sus propios programas por medio de Simulink.

5.1. Hardware

La plataforma Red Pitaya STEMLab 125-14 cuenta con dos canales de entrada de RF, cada uno de 125MS / s (Megasamples/segundos). Por otro lado, también posee dos canales de salidas de RF, de 125MS / s cada uno, con un ancho de banda analógico de hasta 50 MHz y convertidores flash analógico-digital y digital-analógico de 14 bits. Ambos canales de salida están diseñados y adaptados para manejar cargas de 50 Ω .

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Además, cuenta con tres puertos USB 2.0, con conexión a través de Wifi, y un puerto Ethernet para conectarse a internet con la utilización de cable. El dispositivo de almacenamiento masivo dedicado al sistema operativo es una tarjeta micro-SD de hasta 32 Gb. Otra de sus características es que posee una memoria RAM DDR3 de 512 MB (4 Gb), y cuenta con un microprocesador FPGA Xilinx Zynq 7010 SoC (Imagen 34).

Respecto a los parámetros que puede manejar, posee una tensión nominal de entrada máxima absoluta de hasta 30 V, con una potencia de salida de 10 W.



Imagen 34. Diagrama de la Red Pitaya.

Es importante mencionar, a modo informativo, que existe otra versión de la plataforma, denominada Red Pitaya STEMLab 125-10, la cual posee mismas funciones y características que la versión 125-14, pero con una marcada diferencia en sus especificaciones técnicas, motivo por el cual su uso se encuentra dirigido a universidades, estudiantes, entre otros, mientras que la Red Pitaya STEMLab 125-14 es capaz de obtener resultados precisos para entornos profesionales.

En sus especificaciones técnicas, Red Pitaya otorga cuadros de especificaciones, los cuales se mostraran a lo largo de esta sección.

La primera tabla aborda los elementos básicos (Imagen 35), en la que se encuentra información sobre el procesador, FPGA, RAM, memoria, consumo de corriente y conexiones.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

		STEMLAB 125-14
	Processor	Processor DUAL CORE ARM CORTEX A9 DUAL CORE ARM CORTEX A9
	FPGA	FPGA Xilinx Zynq 7010 SOC Xilinx Zynq 7010 SOC
sic	RAM	512MB (4Gb)
Ba	System memory	Micro SD up to 32GB
	Console connection	micro USB
	Power connector	Micro USB
	Power consumption	1,5A

Imagen 35. Composición básica de la Red Pitaya STEMLab 125-14

La segunda tabla hace referencia a las especificaciones sobre la conectividad a internet (Imagen 36), es de fundamental importancia ya que sin internet la plataforma sería completamente inútil.

ity		STEMLAB 125-14
ectivi	Ethernet	1Gbit
Conn	USB	USB 2.0
	WIFI	requires WIFI dongle
	Synchronisation	Daisy chain connector (up to 500 Mbps)

Imagen 36. Conectividad a internet de la Red Pitaya STEMLab 125-14

El próximo cuadro hace alusión a las características y alcances que tienen las dos señales de entradas RF (Imagen 37), incluyendo valores pico de frecuencia, amplitud, tasa de muestreo, impedancia de adaptación, entre otros.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

		STEMLAB 125-14
	RF input channels	2
	Sample rate	125 MS/s
uts	ADC resolution	14 bit
۲ inp	Input impedance	1M0hm/10pF
LE.	Full scale voltage range	+-20 V
	Absolute max. Input voltage range	30V
	Input ESD protection	Yes
	Overload protection	Protection diodes

Imagen 37. Señales de entradas RF de la Red Pitaya STEMLab 125-14

Así como el cuadro anterior fue dedicado a las señales de entrada RF, el siguiente cuadro es para las dos señales de salida RF (Imagen 38). En dicha tabla se muestra los valores pico de frecuencia, amplitud, tasa de muestreo, impedancia de adaptación, entre otros.

		STEMLAB 125-14
	RF output channels	2
ы	Sample rate	125 MS/s
utput	DAC resolution	14 bit
RF ou	Load impedance	50 Ohm
	Voltage range	+-1V
	Ouput slew rate	200V/us
	Short circut protection	Yes
	Connector type	SMA

Imagen 38. Señales de salidas RF de la Red Pitaya STEMLab 125-14

5.2. Software

A diferencia de otras plataformas, el software de la Red Pitaya STEMLab 125-14 puede ser dado por el fabricante, como así, ser desarrollado por el usuario mediante Simulink.

El fabricante otorga una amplia gama de instrumentos y aplicaciones que incluye osciloscopio, analizador de espectro, generador de señal, medidor LCR y controlador PIM MIMO 2x2 de 50 MHz.

Todos los puertos entrada/salida están conectados a una matriz de compuerta programable de campo (FPGA) común, permitiendo que el usuario lo pueda reprogramar para convertirse en otros dispositivos, como en una estación transmisora o receptora de radio definido por software, entre otras aplicaciones de radiofrecuencia, producto del amplio ancho de banda del ADC y DAC. El ADC proporcionado por la plataforma es de 125MHz.

Esta placa se utilizará como una alternativa a la espera de la ROACH 2, para desarrollar y crear programas mediante Simulink. Más adelante, se hará mención respecto a este tema. A continuación, se describirá el software del fabricante.

5.3. Aplicaciones

A continuación explicaran algunas de las distintas aplicaciones que posee la plataforma Red Pitaya, las cuales fueron utilizadas en su mayoría con el objetivo de conocer y descubrir los diferentes recursos y prestaciones que ofrece la misma.

Los distintos instrumentos ensayados se enumerarán, describirían y analizarán a continuación: osciloscopio, generador de señal y analizador de espectro.

Aunque inicialmente en este trabajo no se pensó en la utilización de los instrumentos de medición dados por el fabricante, el hecho de contar con herramientas útiles, y con el objetivo de sacar el mayor provecho a la plataforma, se hizo uso del analizador de espectro.

5.3.1. Osciloscopio.

Una de las prestaciones que ofrece esta plataforma es el osciloscopio de dos canales. Mide señales eléctricas hasta 50 MHz, y de ±20v. Los usuarios pueden acceder a las aplicaciones a través de cualquier navegador web, usando su teléfono inteligente, tablet o una PC que contenga cualquier sistema operativo.

Entre las características más interesantes del osciloscopio digital se encuentra el canal "matemático", que se caracteriza por las siguientes configuraciones posibles:

- Sumar los canales seleccionados.
- Restar los canales seleccionados.
- Multiplicar canales seleccionados.
- Calcular valor absoluto de la señal seleccionada.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

- Derivación con respecto al tiempo de la señal seleccionada.
- Proporciona una integración de tiempo de la señal seleccionada.
- Invertir una señal.

5.3.2. Generador de señales

Esta plataforma también ofrece un generador de señales de dos canales, logrando generar hasta dos señales distintas a la vez. Estas señales pueden contener diversas formas: sinusoidal, triangular o rectangular. El generador puede producir señales eléctricas con una amplitud de $\pm 1v$, y una frecuencia de hasta 50 MHz.

Tanto los dos canales del osciloscopio, como los dos canales del generador de señales se pueden visualizar en la misma pantalla. Como si fuera poco se puede realizar alguna operación matemática, y además graficarla junto a las cuatro señales mencionadas anteriormente (Imagen 39).



Imagen 39. Osciloscopio, generador de señales y función matemática.

5.3.3. Analizador de espectro

Esta aplicación convierte la placa en un analizador de espectro DFT (transformada de Fourier discreta) de dos canales. La aplicación del analizador de espectro DFT, permite un análisis de espectro rápido y potente, utilizando un algoritmo DFT. El rango de frecuencia

es de CC (corriente continua) hasta 62.5MHz, donde el rango de frecuencia puede seleccionarse arbitrariamente, logrando medir con precisión las señales, armónicos, espurios y potencia.

Esta herramienta se la utilizó en el laboratorio de electrónica, inyectándole señales sinusoidales a distintas frecuencias. Una de las tantas frecuencias fue a 30MHz, obteniendo como resultado: una componente a 30MHz, y otro de menor amplitud a 60MHz, producto de los armónicos del generador, mientras que en el resto del espectro solo se visualiza ruido (Imagen 40).



Imagen 40. Analizador de espectro de una señal sinusoidal de 30MHz.

En el siguiente cuadro figuran las especificaciones técnicas del analizador de espectro (Imagen 41):

	STEMlab 125 - 14
Canales de entrada	2
Banda ancha	0 - 62MHz
Resolución	14 bit
Tampón DFT	16384
Gama dinámica	• 80 dBm
Nivel de ruido de entrada	<-119 dBm / Hz
Rango de entrada	10dBm
Impedancia de entrada	1 MΩ / 10 pF
Acoplamiento de entrada	corriente continua
Componentes de frecuencia espurios	<-90 dBFS normalmente

Imagen 41. Especificaciones del analizador de espectro.

Las características, prestaciones y las demás aplicaciones de esta plataforma pueden hallarse en el siguiente enlace:

https://redpitaya.readthedocs.io/en/latest/appsFeatures/apps-featured/apps-featured.html

5.4. Red Pitaya vs ROACH 2

Antes de finalizar con el desarrollo de la Red Pitaya, se la comparará con la plataforma ROACH 2, ya que con esta placa excepcional se trabajará en un futuro.

La plataforma ROACH 2 se diseñó antes que la Red Pitaya, por lo tanto, su tecnología es más antigua, poniéndose en desventaja, por un lado, por su memoria RAM, y por otro, por su capacidad de almacenamiento. Aun así, la Red Pitaya no puede competir frente al poderoso FPGA Xilinx Virtex 6 de la ROACH 2, tampoco con su ancho de banda, mucho menos con su tasa de muestreo, que es ocho veces mayor que la suya. En la siguiente tabla se aprecian las diferencias entre ambas plataformas (Imagen 42).

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.
	Red Pitaya	ROACH 2
FPGA	Xilinx Zynq 7010 SoC	Xilinx Virtex6 SX475T
Procesador	DUAL CORE ARM CORTEX A9	Power PC
Memoria RAM	DDR3 de 512 MB (4 Gb)	DDR de 256, 512 Mbit y 1 Gbytes
Reloj	Hasta 125MHz	10MHz-1GHz
Ancho de banda	Hasta 50 MHz	Hasta 1,5 GHz
ADC	125 Msps	2x500 Msps (AT84AD001B, modelo del ADC)
Bits ADC	14 bits	dual de 8 bits
memoria	Micro sd de hasta 32 Gb	NAND flash de 256Mb
Entradas/ Salidas	2xExtencion Conector, cada uno de 26 puertos	2x Z-DOK, cada uno con 40 conectores diferenciales

Imagen 42. Tabla comparativa entre la Red Pitayay ROACH 2.

5.5. Lugar de trabajo

Como se mencionó en la introducción, este proyecto se efectuó en su totalidad de tiempo en las oficinas del Laboratorio de Electrónica. Desde allí, mediante el uso de las computadoras que posee en sus instalaciones, se enlazaba a través de servidores, y por medio de Linux, a la planta central de la sala de control, donde se encuentra la computadora dedicada al desarrollo de back-ends digitales, esta PC cuenta con las herramientas de desarrollo CASPER. Con todo lo previo realizado, se operó sobre la PC de sala de control, y se accedió al software de la Red Pitaya mediante la conexión de red local. La conexión a internet era fundamental, pues esta plataforma no se encontraba en la sala de control, sino que se estaba situada en el departamento de electrónica, en un sector junto al lugar de trabajo, donde se accedió para operar un generador de señales, el cual se utilizó para inyectar las señales de referencia de las medidas de verificación.

Volviendo al departamento de electrónica, más precisamente al laboratorio (Imagen 43), sobresalen dos lugares de trabajo. El primero es el escritorio con la computadora (1), de donde se operó y se tuvo acceso a los servidores, tanto a la de la sala de control, como a la de la Red Pitaya. El segundo lugar, en donde también se obró durante el último tramo de este proyecto, fue sobre las mesadas del laboratorio. En ellas se ubicaban el generador de señales y el dispositivo Red Pitaya (2).

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 43. Laboratorio de Electrónica

- 1) Computadora de donde se operó.
- 2) Escritorio en donde se halla Red Pitaya y generador de señales.

Debió ser de suma importancia que el generador de señales y la plataforma Red Pitaya se hallen lo suficientemente cerca de la computadora, para lograr efectuar las mediciones con mayor rapidez, y también por la simple razón de una mayor comodidad. En la siguiente imagen, (Imagen 44) se contempla dicho instrumental durante un ensayo con una señal sinusoidal de 10MHz.



Imagen 44. Ensayo con el analizador de espectro, conectado a un generador de señales a 10MHz

CAPITULO 6. Prácticas de Simulink para ROACH 2

En esta sección del informe, se detallará toda la información correspondiente a las practicas realizadas de Simulink, las cuales tuvieron como principal objetivo lograr la síntesis de la placa ROACH 2, logrando obtener muy buenas aproximaciones de las aplicaciones que se pretenden realizar con la FPGA misma. La idea es lograr la simulación de un espectrómetro para luego comparar los resultados obtenidos con un prototipo de la placa, de menores prestaciones, pero que a los fines de este proyecto alcanza para poder comparar una simulación con la práctica real.

A lo largo de las practicas se mencionarán algunos programas escritos en lenguaje Python, en particular los scripts de KATCP, los cuales se usan específicamente para comunicarse con el hardware de CASPER, programar la FPGA y ver el estado de los registros y ejecución del programa de observación. Estos mismos son los encargados de realizar ciertas operaciones y de la configuración de parámetros de los distintos bloques que serán mencionados a lo largo del capítulo.

Por último y no menos importante, se indica que se respetaran muchos nombres y palabras en inglés por distintos motivos: uno de ellos es que no hay una traducción real o coherente por lo que se optó por mantener algunos conceptos en su idioma original; por otro lado, algunos parámetros de entrada/salida de los bloques como parámetros de configuración se mantuvieron en su idioma original para que tengan la correlación correspondiente con el programa y con los gráficos que se van a mostrar.

En el siguiente enlace se encuentran disponibles las practicas originales desarrolladas: <u>https://casper-tutorials.readthedocs.io/en/latest/index.html</u>

6.1. Practica 0

6.1.1. Introducción

La idea de la practica 0 es iniciar a aquellas personas que no tienen conocimientos sobre el proceso de señales en radioastronomía. Lo que se busca es ponerse en contacto con teorías fundamentales sobre el procesamiento de señales y como se trabaja con señales astronómicas, haciendo un seguimiento y una explicación de algunos bloques fundamentales que serán utilizados constantemente en las simulaciones que se harán de la plataforma ROACH 2. Estos bloques son:

• Conversor analógico digital (Conversor ADC)

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

- Banco de filtros polifásicos
- Transformada de Fourier
- Correlación
- Acumulación

6.1.2. Conversor analógico digital

Un conversor analógico digital (ADC) es un dispositivo electrónico que se encarga de convertir una señal (de entrada) analógica en un valor numérico digital (salida) el cual es proporcional, según algún criterio, a la magnitud de la señal analógica que ingresó. En las plataformas CASPER, todas las señales astronómicas analógicas se convierten en señales digitales para su posterior análisis. Existen distintas variantes según el tipo de aplicación que se quiera realizar y es importante saber realizar la elección correcta para el buen funcionamiento del dispositivo. Pero previo a esto, se explicarán algunos parámetros de los ADC que son importantes para astronomía y que se detallan a continuación.

6.1.2.1. Tasa de muestreo

El ancho de banda de un ADC se encuentra caracterizado, en primer lugar, por su tasa de muestreo. Basándonos en el teorema de Nyquist, una tasa de muestreo de al menos 2B [muestras/segundo] (siendo B el ancho de banda del ADC) es suficiente para lograr una reconstrucción perfecta de la señal, al igual que si tenemos una frecuencia de muestreo f_s, se garantiza una reconstrucción perfecta para un ancho de banda B < f_s. Se recuerda, brevemente, que el teorema de Nyquist indica justamente lo dicho anteriormente: para poder reconstruir una señal correctamente, es necesario muestrearla al doble de su ancho de banda.

6.1.2.2. Resolución

La resolución de un conversor indica la cantidad de valores discretos que el mismo puede generar sobre el rango de valores analógicos. Los valores generalmente se almacenan electrónicamente en forma binaria, por lo que la resolución suele expresarse en bits. En consecuencia, se supone que la cantidad de valores discretos disponibles, o "niveles", es una potencia de dos. Por ejemplo, un ADC con resolución de 8 bits puede codificar una entrada analógica con 256 niveles diferentes, ya que 2^8 =256. Dependiendo de la aplicación, los valores podrían tomarse desde 0 a 255 o desde -127 a 127.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

La resolución también puede definirse en términos de voltaje. El mínimo cambio en el voltaje requerido para garantizar un cambio en el nivel del código de salida se denomina voltaje de bit menos significativo (LSB por sus siglas en inglés). La resolución de voltaje de un ADC es igual a su rango de medición de voltaje global dividido por el número de intervalos.

En la práctica, la resolución útil de un conversor está limitada por la mejor relación señalruido (SNR) que se puede lograr para una señal digitalizada. Un ADC puede resolver una señal solo con un cierto número de bits de resolución, llamado el número efectivo de bits (ENOB). Estos términos mencionados serán explicados a continuación.

6.1.2.3. Relación señal a ruido

La relación señal a ruido (SNR por sus siglas en inglés) es la relación de la potencia de la señal de entrada con la potencia de ruido (excluyendo la distorsión armónica), expresada en decibeles (dB), como se muestra en la siguiente ecuación, en función del voltaje:

SNR [dB] = 20 log $\left(\frac{Vseñal}{Vruido}\right)$

6.1.2.4. Número efectivo de bits

El número efectivo de bits (ENOB por sus siglas en inglés) es una medida del rango dinámico de un ADC. La resolución de un ADC se encuentra especificada por el número de bits utilizado para representar un valor analógico. Un ADC ideal tiene un ENOB igual a su resolución, situación que no se da en la realidad, por lo que una definición utilizada usualmente está dada por:

 $\mathsf{ENOB} = \frac{SINAD}{6.02} \cdot .76$

Donde todos los valores se encuentran en dB; SINAD es la relación que indica la calidad de la señal, el termino 6.02 en el denominador convierte los decibeles en bits y el termino 1.76 está relacionado con el error de cuantificación en un ADC ideal.

6.1.2.5. Rango dinámico libre de espurias

El rango dinámico libre de espurias (SFDR por sus siglas en inglés) es la diferencia entre la magnitud de la señal medida (máxima) y su pico más alto de espuria en la salida. El SFDR de un ADC se encuentra influenciado por varios factores, incluyendo la resolución, linealidad y exactitud (los niveles de cuantización también coinciden con la verdadera señal analógica). El SFDR, en general, se mide en dBFS con respecto a la escala completa del ADC.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

El entorno de radiofrecuencia está empeorando cada vez más, especialmente en la banda de frecuencia más baja (<12 GHz). Para evitar la saturación al realizar una investigación en radioastronomía, se recomienda utilizar un ADC que tengan un rango dinámico más amplio, de por lo menos 16 bits.

6.1.3. Banco de filtros polifásicos*

Un banco de filtros es simplemente una serie de filtros pasa banda diseñados para dividir una señal de entrada en múltiples componentes, o de manera similar, para combinar múltiples componentes. Con esta breve definición, podemos definir un banco de filtros polifásicos (PFB por sus siglas en inglés, Polyphase Filter Banks) como una implementación/estructura computacional de un banco de filtros; la parte esencial de esta técnica consiste en realizar la descomposición de una señal en múltiples 'fases' o 'ramas'.

Estos bancos de filtros constan de dos partes: la primera denominada 'front-end', se encarga de convertir el conjunto de ramas o fases polifásicas, en un conjunto de señales 'sub-filtradas'. La siguiente etapa es la encargada de realizar el cálculo de la FFT, la cual será explicada en el siguiente ítem. Con estas dos partes trabajando en conjunto, obtenemos el denominado banco de filtros polifásicos.

Esta técnica se utiliza ya que brinda una muy buena aislación entre canales consecutivos, evitando así que la señal de un canal se acople con otros, mejorando la respuesta del sistema. Para entender esto, se muestran a continuación dos imágenes, en la primera se puede ver la respuesta de un canal de frecuencia el cual no fue procesado con el uso de un PFB, mientras que en la segunda imagen se ve como mejora la respuesta utilizando un espectrómetro con PFB:

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



*Digital Signal Processing, de BoazPorat.

Si comparamos ambas imágenes, podemos ver que, en la primera (Imagen 45), la diferencia de atenuación que hay entre la máxima amplitud (en el canal 8) y sus canales consecutivos es de 20 dB, mientras que con el uso del banco de filtros se logra una atenuación de aproximadamente 70 dB (Imagen 46), permitiendo ver la información en dicho canal de forma mucho más pura, y con menor influencia del resto de los canales, entendiéndose la importancia del uso de los PFB.

6.1.4. Transformada de Fourier

La Transformada de Fourier es probablemente el concepto más importante utilizado para instrumentación astronómica. Expresa la relación entre una función y su espectro, o entre la autocorrelación de dicha función y su espectro de potencia. En la instrumentación astronómica, la "función" es siempre el campo electromagnético o una representación equivalente del mismo, como una corriente, voltaje, modulación de una señal portadora, entre otras. Si la variable independiente de la función es el tiempo, tendremos por lo tanto el espectro de la función en frecuencia.

Su contraparte discreta, la Transformada Discreta de Fourier (DFT), que normalmente se calcula utilizando la llamada Transformada Rápida de Fourier (FFT), ha revolucionado la sociedad moderna, ya que está presente en la electrónica digital y en el procesamiento de señales.

Las ecuaciones que definen la transformada de Fourier son las siguientes:

- Transformada de Fourier:

 $F[f(t)](f) = F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j2\pi f} dt$

- Transformada de Fourier Inversa:

 $F^{-1}[F(f)](t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{j2\pi ft}$

Como en este trabajo se utilizará esta herramienta matemática en el campo digital, con datos en el dominio discreto, a continuación se define la Transformada Discreta de Fourier mencionada:

- Transformada Discreta de Fourier:

TDF{ x[n] } = X[k] = $\sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi}$ /N k= 0;1; ...; N-1

- Transformada Discreta de Fourier Inversa

TDF⁻¹{ X[k] } = $\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j2\pi kn/N}$ n= 0; 1; ...; N-1

Se muestra a continuación una imagen a modo de ejemplo que como se ve ilustrativamente la transformada de Fourier de una función con forma senoidal, de este modo se puede apreciar como se ve el contenido en frecuencia de dicha función:

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 47. Función senoidal y su correspondiente Transformada de Fourier. Utiliza el parámetro ω , el cual es equivalente a $2\pi f$.

6.1.5. Correlación

El algoritmo de correlación se usa ampliamente en el área de procesamiento de señales astronómicas, por ejemplo: imágenes de síntesis de apertura, cálculo de los parámetros de Stokes en un receptor de polarización dual, y otras aplicaciones. Por lo general, en todos estos sistemas donde se utiliza el algoritmo de correlación, se requiere la utilización de un arreglo de antenas (como se utiliza en interferometria). Esto excede a este trabajo, ya que en el instituto se realizan mediciones con una única antena. Por este motivo no se explayara respecto a este tema, y simplemente se menciona porque es de crucial importancia para otro tipo de estudio de procesamiento de señales radioastronómicas.

6.1.6. Acumulación

La acumulación (o integración) es una manera sencilla para eliminar las señales débiles del ruido y es el método más utilizado en astronomía. Si la señal es coherente, entonces al ruido se lo puede integrar a través del tiempo. La mayor parte del cálculo de integración ocurre al final del procesamiento de la señal, como después de realizada la correlación o

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Transformada de Fourier. A continuación se realizara un ejemplo explicativo: se tienen 1024 canales de FFT, y se inyecta un pulso de señal en uno de estos canales, pero que no es lo suficientemente fuerte como para verse. Luego de realizada la acumulación (o integración), la señal inyectada se verá perfectamente como se muestra en la figura a continuación:



Imagen 48. Señal con ruido antes y después de que se realice una acumulación.

6.2. Practica 1: Introducción al Simulink

6.2.1. Introducción

Luego de haber introducido los conceptos importantes sobre los que se trabajaran en Simulink, explicados en la Practica O, llego el momento de iniciarse con el uso del software y empezar a utilizar las herramientas del mismo. Para esto, el primer paso fue realizar sistemas sencillos y fáciles. Es por este motivo que las tareas en esta etapa consistieron en armar un sistema para lograr el parpadeo de un LED y en la realización de un contador. Se explica en los capítulos a continuación la información detallada de cómo se trabajó, haciendo hincapié en los bloques y herramientas utilizados.

A modo de ilustración, se muestra un diseño general de los sistemas que se realizarán:

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.





Imagen 49. Modelo general de los sistemas a diseñar.

6.2.2. Configuración de bloques generales Xilinx y CASPER

En esta práctica lo que se hizo fue crear un diseño en Simulink utilizando tanto el conjunto de bloques del generador estándar del sistema Xilinx, como los bloques de biblioteca específicos para las placas CASPER (denominados "bloques amarillos"). Al final de la práctica, se logró generar un archivo fpg para ser programado en una placa CASPER FPGA e interactuar con el diseño de hardware. En caso de querer hacerlo, esto se realiza a través del lenguaje Python como fue mencionado anteriormente.

Dentro de las librerías de Simulink, se necesita incluir las correspondientes a Xilinx Blockset (para poder incluir los bloques correspondientes a Xilinx, los cuales son los denominados bloques azules) y a CASPER DSP/XPS (los mencionados bloques amarillos son los CASPER XPS, que encapsulan interfaces a hardware, mientras que los CASPER DSP son bloques verdes que implementan funciones DSP como filtros, FFTs, etc.). Estas librerías fueron mencionadas previamente en el final del capítulo 4.

El primer paso realizado fue colocar el denominado System Generator (Sistema generador) de Xilinx, que permite lograr la asociación con el software de Xilinx para la síntesis del código de FPGA, y luego un bloque de la librería CASPER que simula la plataforma en la cual estamos trabajando (en nuestro caso la ROACH2, utilizando un bloque llamado <u>XSG core config</u>, y configurándolo para la placa mencionada

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

anteriormente). Si ninguno de estos bloques es colocado, los esquemas realizados posteriormente nunca lograran compilar. Se pueden ver a continuación imágenes de cómo se realiza la elección de los bloques mencionados.

🙀 S	imulink Libr	ary Browser			
<u>F</u> ile <u>E</u> dit <u>V</u> iew <u>H</u> elp					
🗅 😅 🔹 Enter search t	erm 👻 🎮	1			
therefore Libraries transmoster (Library: Xilir	x Blockset/Basi	ic Elements	Search Results:	
Robust Control To Signal Processing SimPowerSystems		System Generator	x d x adde	Addressable Shift Register	•
🕀 駴 Simulink 3D Anim 🕀 駴 Simulink Design O	> Assert >	Assert		BitBasher	
⇒ 🙀 Simulink Extras 🙀 Simulink Verificati	8.	Black Box	>CEProbe>	Clock Enable Probe	
🙀 Stateflow 🙀 System Identificati	×74 20	Concat	1>	Constant	888
Xilinx Blockset	> cast>	Convert	ene C	Counter	
Control Logic		Delay		Down Sample	
Data Types Index	2 a	Expression	> In	Gateway In	
Math Memory	> Out >	Gateway Out	* Tool *	Inverter	
Shared Memory Tools	acute .	LFSR		Logical	
Xilinx Reference		Mux		Parallel to	•

Imagen 50. Elección del bloque System Generator de la librería Xilinx Blockset



Imagen 51. Selección de la plataforma a partir de la librería CASPER XPS Blockset

La primera parte de esta práctica consiste en distintos pasos, distintas estructuras a realizar con bloques de Simulink, para empezar a comprender este lenguaje. Por este

motivo es que cumple el rol de ser una introducción. Como ya se mencionó, en primer lugar, se realizó una simulación de un "LED intermitente", diseñándose un software de control para el mismo y por último un bloque aritmético sumador, poniendo en práctica los conocimientos adquiridos a través de la práctica.

6.2.3. Flashing LED

Para la primera parte, el 'flashing LED', se hizo uso de interfaces de hardware básicas, como contadores y registros de desplazamiento. La idea general del sistema consistió en hacer un pequeño circuito que conecte el bit más significativo de un contador a uno de los LED's de la placa a utilizar, en el caso de la ROACH2, con la idea de que cuando se compile, el programa debería hacer que el LED parpadee con un ciclo de trabajo del 50%, aproximadamente una vez por segundo.

Para lograr esto, se utilizó un contador de la librería Xilinx y se configuró para la cantidad de bits que se requiere que tenga, otorgando a la salida de este el más significativo. Para que esto se realice correctamente, a la salida del mismo se conectó un registro de desplazamiento, también de la librería Xilinx, el cual se encarga de seleccionar dicho bit (MSB). La manera de lograr esto es configurar el registro con la característica mencionada, ya que también podría ser utilizado para tomar el bit menos significativo en caso de ser necesario.

El siguiente paso fue conectar la salida de señal del bit seleccionado al pin de salida correcto de la FPGA, para lo cual se utilizó un bloque amarillo de la librería CASPER XPS denominado bloque GPIO (General Purpose Input/Output). Este bloque permite lograr la conexión de una señal de Simulink a una selección de pines de la FPGA, la cual tiene nombres muy intuitivos y fáciles de usar. Como todos los bloques, se puede seleccionar desde el GPIO a que pin acceder, por lo que se debe seleccionar alguno de los correspondientes a los leds. Para no tener un error a la hora de compilar, se debe enviar el tipo de dato correcto al bloque. Por ejemplo, si está configurado para recibir un dato tipo 'Boolean', debe enviarle este tipo de datos, y no uno de tipo fijo ('Fixedpoint'). De esta manera, al registro de desplazamiento en la salida tomara cada él bit más significativo de valor entregado por el contador, logrando el encendido del LED con un ciclo de trabajo del 50%.

La última tarea en esta etapa consistió en colocar un bloque de Simulink denominado 'Terminator', para prevenir 'warnings' del MATLAB, y utilizado en general para colocarlo en las salidas que quedan sin uso. A continuación, se puede ver una imagen del sistema final:

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 52. Sistema final de Flashing Led

6.2.4. Uso de registros de software

El siguiente diseño tendrá como foco de atención el uso de registros de software para realizar el control de la FPGA, de la siguiente manera. Se agregó uno de estos para que el contador en el diseño pueda iniciarse, detenerse y restablecerse desde el software. También se agregó un registro a la salida para poder monitorear el valor actual que otorga el contador. Por lo tanto, se utilizaron dos registros de software en este sistema. La parte más importante por configurar de estos registros es 'de donde' y 'hacia donde' realizan el envío de información. Las opciones a elegir son dos, FromProcessor y ToProcessor; el primero se utiliza en caso de guerer habilitar un valor, un dato y enviarlo desde el software al procesador mientras que el segundo caso es a la inversa, cuando se quiere habilitar un valor para ser enviado desde la FPGA al software. Desde ya que hay otras variables que se pueden configurar, siendo esta la de mayor relevancia. El nombre que se le dio al registro es de importancia, ya que este fue utilizado para acceder al mismo desde el software. Durante la simulación se pudo ir teniendo un registro del valor actual colocando un osciloscopio al final del sistema. Es importante hacer una aclaración en este punto. Si se coloca un osciloscopio, el mismo es un bloque que provee Simulink desde su librería (no lo otorga ni Xilinx, ni CASPER) por lo cual solo puede ser utilizado para realizar una simulación y no para ser compilado en hardware; los únicos blogues que pueden ser compilados de esta manera son los que corresponden a Xilinx.

Se debieron usar bloques denominados "de enlace" cada vez que se realizó la conexión de un bloque provisto por Simulink a un bloque de Xilinx; este se encarga de muestrear y cuantificar las señales de enlace del primer bloque para que sean compatibles con el mundo de Xilinx. Algunos bloques (como el registro de software) proporcionan una puerta de enlace internamente, por lo que se puede alimentar la entrada de un registro de software con una señal de Xilinx y monitorear su salida con un alcance Simulink. Sin embargo, en general, se deben insertar estas puertas de acceso manualmente cuando sea

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

apropiado. Simulink emitirá advertencias para cualquier conexión directa entre los mundos de Simulink y Xilinx.

Luego de agregados los registros de software, se colocó un contador similar al utilizado en el diseño anterior. En este caso lo configuramos con puertos para señales de 'reset' y 'enable'. De alguna manera se deben controlar estos puertos, podría haberse realizado utilizando dos registros de software, lo cual hubiera sido un desperdicio. En cambio, lo que se hizo fue colocar un registro de software, y a la salida de este, dos registros de desplazamiento, uno para cada puerto (reset y enable), es decir, uno para habilitar el contador y otro para resetearlo. Estos registros son similares a los usados en el diseño visto anteriormente. Tanto el puerto de habilitación como el de reseteo requieren como entrada valores booleanos.

Luego de realizar todo el conexionado, el sistema queda de la siguiente manera:



Imagen 53. Sistema contador con registros de software

6.2.5. Sistema sumador

La última parte de la práctica, con respecto al diseño de sistemas, consistió en realizar un sumador. La idea fue demostrar la realización de alguna operación matemática simple en Simulink. El sistema agrega dos números pedidos y envía el resultado a otro registro de software. Se utilizaron dos registros para la entrada de los números a sumar y uno a la salida del sumador. Los primeros dos fueron configurados *FromProcessor*, mientras que el tercero fue configurado como *ToProcessor*. Luego se colocó un bloque sumador/restador correspondiente a la librería de Xilinx; como lo dice su nombre, este bloque puede ser utilizado para hacer una suma o una sustracción (resta).

El registro de software es de 32 bits, pero la suma de dos números con esta cantidad de bits, resultara en un número de 33 bits. Para no tener problemas con esto, se configuro al sumador de manera que sature en caso de que suceda un 'overflow'. Ahora, si se suma dos números muy grandes, simplemente devolverá 2²² -1.

Finalmente se agregó un osciloscopio para la simulación, y dos constantes a la entrada las cuales son los números por sumar (en el ejemplo ilustrativo se colocaron como entradas las constantes 10 y 20), resultando de esta manera el diseño final:

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 54. Sistema sumador final

6.2.6. Simulaciones

La parte final de la práctica consistió en realizar la simulación y compilación. Respecto a la simulación, se puede ver a través del osciloscopio los resultados obtenidos.

En caso del contador, se puede ver que el osciloscopio muestra la siguiente imagen, demostrando el correcto funcionamiento del bloque completo:



Imagen 55. Resultado obtenido por el osciloscopio a la salida del contador con registros de software.

Para el sumador, se puede ver que la suma realizada da la constante correcta:



Imagen 56. Resultado obtenido del osciloscopio a la salida del sistema sumador.

Una vez obtenida la correcta simulación, la FPGA está en condiciones para compilar.

6.3. Practica 2: 10 GbE ROACH2

6.3.1. Introducción

En esta práctica se creó un simple diseño en Simulink en el cual se utilizaron los puertos 10 GbE de la plataforma ROACH2 para enviar información a alta velocidad hacia otro puerto similar. Esto podría hacerse igual de fácil utilizando otra placa FPGA o una computadora con una tarjeta de interfaz de 10 GbE. También se controló el diseño en forma remota (a través de una biblioteca de Python para KATCP).

Para la tarea a realizar, en líneas generales, se utilizó un contador con el fin de transmitirlo a través de un puerto SFP+, y regresarlo hacia otro similar. Esto permitió realizar una prueba del enlace de comunicaciones. Esta prueba se puede utilizar para probar la conexión entre las placas y poder ver el efecto de diferentes longitudes de cable en la solidez de la comunicación.

A continuación, a modo de ilustración, se muestra una imagen donde se presenta un diagrama de bloques del modelo del sistema final diseñado:



Imagen 57. Diagrama en bloques del modelo final.

6.3.2. Generalidades 10 GbEthernet (10 GbE)

La placa ROACH 2 tiene cuatro puertos SFP + en una sola tarjeta intermedia de 10GbE. La interfaz Ethernet está controlada por oscilador de cristal incorporado de 156.25 MHz. Este reloj se multiplica en la FPGA por un factor de 66. Por lo tanto, es fácil notar que la velocidad en el cable es en realidad:

156.25 MHz x 66 = 10.312 Gbps.

Sin embargo, los conectores 10GbE sobre SFP + de un solo carril ('single-lane') utilizan codificación 66b, lo que significa que, por cada 66 bits enviados, se transmiten realmente 66 bits. Por este motivo es que obtenemos una velocidad de datos utilizables de 10 Gbps.

Muchas de las implementaciones de hardware dentro de la FPGA, son provistas por el fabricante Xilinx. Estas implementaciones o librerías dentro del mundo de las FPGA se denominan IP Cores, por Núcleo con Propiedad Intelectual, y son las que describen los módulos de hardware completos, como ser interfaces de comunicación, bloques de proceso de datos, procesadores etc.

El core de Simulink de 10 GbE de CASPER envía y recibe paquetes UDP sobre IPv4. UDP es un protocolo sin conexión que tiene dos funcionalidades básicas: demultiplexado y chequeo de errores en los datos. Estos paquetes IP se encuentran en tramas Ethernet. Cada trama requiere un encabezado de 38 bytes, IPv4 requiere otros 20 bytes y UDP otros 16. Por lo tanto, por cada paquete de datos que se envíe se incurrirá en un costo de al menos 74 bytes. Se dice 'al menos' porque el core pondrá en cero algunos encabezados para que estén en un límite de 64 bits. Por lo tanto, nunca se alcanzará 10 Gbps de rendimiento utilizable, aunque puede acercarse. Es importante mencionar que vale la pena enviar paquetes más grandes si se está tratando de obtener un rendimiento mayor.

La longitud máxima de carga útil del core CASPER 10 GbE_v2 es de 8192 bytes (implementados en BRAM) más otros 512 (implementados en RAM distribuida) que es útil para un encabezado de aplicación. Estos puertos (y, por lo tanto, parte del core de 10 GbE) corren a 156.25 MHz, mientras que la interfaz de este diseño se ejecuta a la velocidad del reloj de la FPGA (sys_clk, adcX_clk, etc.). La interfaz es asíncrona, y se requieren memorias intermedias en el límite del reloj. Por este motivo, incluso si se envían datos entre dos placas ROACH2 que se están ejecutando con el mismo reloj cableado, habrá fluctuaciones, denominadas JITTER, en los datos. Una segunda consideración es a la frecuencia con la que el reloj registra los valores en el core cuando intenta enviar datos. Si la FPGA se ejecuta más rápido que el core, e intenta registrar los datos en cada ciclo de reloj, las memorias intermedias eventualmente se desbordaran. Del mismo modo para recibir, si se envían demasiados datos a una placa y la misma no puede sacarlos del búfer de recepción lo suficientemente rápido, estos se desbordarán y se perderán datos. En este diseño, se utilizó la FPGA a 100 MHz, con los núcleos funcionando

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

a 156.25MHz. De este modo, se registraron datos en el búfer transmisor continuamente sin preocupación por desbordamientos.

6.3.3. Control con registros de software

Luego de la explicación sobre las características sobre el puerto 10 GbE y las cuestiones a tener en cuenta para realizar él envió de información entre dos placas, se hará hincapié en la explicación del diseño correspondiente realizado en Simulink.

En primer lugar, como se mencionó en el Practica 1, se colocaron los bloques System Generator de Xilinx y el bloque amarillo de CASPER correspondiente a la placa ROACH2. Es importante mencionarlo en cada aplicación a realizar ya que sin estos bloques es imposible realizar la compilación; ambos son requeridos para todos los diseños de CASPER. Para este diseño se utilizó la FPGA a 100 MHz, por lo cual seseteo el clock de la misma manera, ya que por default se encuentra a otra frecuencia y de no cambiarla el sistema no compilara por los problemas de desborde antes mencionados.

Una lógica muy importante que se tuvo que tener en cuenta al diseñar el sistema fue cómo, cuándo y qué sucede durante el reinicio. En este diseño lo que se hizo fue controlar los reinicios a través de un registro de software. En este caso se configuro de manera diferente al caso introductorio de la sección anterior, ya que existe la necesidad de tener una mayor cantidad de entradas. A su vez, se colocaron dos restablecimientos independientes, uno para el core 10 GbE que se utiliza inicialmente y otro para restablecer la lógica del usuario, que se puede utilizar con más frecuencia para reiniciar esta parte del sistema. Se muestra a continuación una imagen del registro a utilizar:



Imagen 58. Registro de software con dos entrada y dos salidas.

Suele suceder que cada registro que se inserte, por default, es de 32 bits y, así, uno debe ser responsable de dividir estos 32 bits en diferentes señales en caso de querer controlar múltiples banderas (flags). El último bloque permite dividir implícitamente los registros de 32 bits en señales de nombres separadas. La gran desventaja de esto es que hay muchas configuraciones para realizar, desde los nombres hasta los tipos de datos de los

subcampos del registro. Esto es importante, ya que en caso de no coincidir el tipo de dato esperado el sistema no compila. Para ROACH2, tenemos que tomar el bloque predeterminado, configurar la dirección de entrada/salida para que sea desde el procesador (*FromProcessor*) y luego cortar (slice) manualmente el bit inferior de la salida para hacer la señal cnt_rst (reset del contador), y el bit 1 para hacer la señal core_rst (reset del core) del bloque simulador de la placa, tarea que fue realizada en este diseño.

El paso siguiente fue colocar dos bloques denominados *GoTo*, los cuales sirven para hacer la conexión de la señal y, así, evitar cableado que podría ser molesto para la visión y el entendimiento del sistema. Estos bloques funcionan como referencia: se colocó un *GoTo* a la salida del reset del core y otro a la salida del reset del contador, y siempre que se necesitó usar estas señales de reset, simplemente hubo que colocar un bloque *From* con el nombre correspondiente a la señal que se desea llamar. De esta forma se logra evitar el uso de cables a través de todo el diseño, reduciendo el desorden en este y facilitando la conectividad para las señales que tienen múltiples destinos, aunque no es recomendable utilizarlas mucho para las señales de datos.

6.3.4. Implementación de bloque transmisor 10 GbE

A continuación, se agregó el bloque 10 GbE para transmitir un contador a una velocidad programable. Para esto se selecciona el bloque amarillo denominado ten_GbE_V2 de la librería CASPER XPS System Blockset, que se muestra en la siguiente figura:



Imagen 59. Bloque 10 GbE

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Se utilizó para realizar la transmisión datos; luego se agregó otro bloque similar para la recepción de la información enviada. Este bloque de transmisión se configuró para que este asociado con el puerto 0 de SFP+. Si la aplicación puede garantizar que podrá usar los datos recibidos de inmediato, se pueden usar buffers de recepción para guardar recursos. Esta optimización no fue necesaria en este caso, ya que se utilizó una pequeña fracción de recursos de la FPGA. El siguiente paso fue configurar que señales ingresarán y saldrán del bloque de transmisión. Para esto, se agregaron registros para proporcionar la dirección IP de destino y el número de puerto:



Imagen 60. Bloque 10 GbE con registros para dirección IP y puerto de destino

Lo primero a destacar es que se puede ver como en el reset del puerto 10 GbE se utilizó un bloque *From*, conectando el reset del core al bloque ya mencionado.

Para la dirección IP de destino y el número de puerto se utilizaron dos registros de software, configurados para recibir información *FromProcessor*. Como se ve en la figura, en el registro 'dest_port' se colocó un slice, esto fue para poder utilizar los 16 bits inferiores del registro. Las constantes de valor '0' que se ven en la entrada de los registros fueron utilizadas como señales constantes para la simulación y compilación. El diseño del transmisor con todas sus conexiones fue realizada de la siguiente manera:

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 61. Esquema del transmisor

Así como se confecciono el transmisor con toda su lógica, también se diseñó al receptor de la siguiente manera:



Imagen 62. Esquema del receptor

A continuación, se implementó la lógica para generar un contador para transmitir como datos. Se construyó un 'Subsistema' para la mencionada generación lógica de datos.

Los subsistemas heredan variables de su sistema "padre". Simulink permite crear una variable cuyo alcance es solo un subsistema particular. Para hacer esto, hay que elegir la opción 'Crear máscara'. La máscara creada para ese subsistema en particular permite agregar parámetros que aparecen cuando se selecciona el ícono asociado con el subsistema.

La máscara también permite asociar un script de inicialización con un subsistema particular. Este script se llama cada vez que se modifica un parámetro de la máscara. Es especialmente útil si la estructura interna de un subsistema debe cambiar según los parámetros de la máscara. La mayoría de los bloques más interesantes en la biblioteca CASPER usan estos scripts de inicialización. El subsistema final diseñado se podrá ver en el apartado siguiente.

6.3.5. Generación de datos y límite de velocidad

Ahora sí, se colocó un bloque contador para generar una determinada cantidad de datos. El mismo será del tipo que se mostró en las practicas anteriores, con alguna pequeña diferencia. Se puede ver a continuación el modelo de contador final:



Imagen 63. Contador final para generación de datos.

Este contador se configuro para ser sin signo, "free-running" (de conteo libre), de 32 bits incrementando de a uno. Se puede ver que posee un bloque comparador ("Relational Block") y un bloque constante a la entrada del registro de software correspondiente. En la simulación, se buscó que este circuito genere un contador que cuente desde 0 hasta 49 y

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

deje de contar. Esto sirve para generar 50 elementos de datos antes de que deje de funcionar.

El siguiente paso fue colocar otro contador, con la misión de limitar la velocidad de los datos. Como se mencionó previamente, es imposible suministrar datos al bloque de transmisión 10 GbE a la velocidad de reloj total. Esto significaría transmitir una palabra de 64 bits a 200MHz, y el estándar 10 GbE solo admite transmisión de datos de hasta 156.25MHz. Por lo tanto, se está ante el deseo de generar datos en ráfagas para que los FIFO de transmisión no se desborden. Por este motivo, se agregaron circuitos para limitar la velocidad de datos como se muestra en la imagen a continuación (Imagen 62). La lógica agregada a la izquierda genera un reinicio en un período fijo determinado por el registro del software. Esto se encargará de activar la generación de un nuevo paquete de datos como antes. En la simulación, esto permite limitar la velocidad de datos a:

$$\frac{50}{200}$$
X 200MHz = 50MHz.

El uso de estos valores en el hardware real limitaría la velocidad de datos a:



Imagen 62. Circuito para la limitación de velocidad de transmisión de datos.

Se finalizó la lógica de generación de datos como se muestra en la imagen a continuación. El contador llamado "Counter" en la ilustración genera los datos reales a transmitir y el registro de habilitación permite que este flujo de datos al core de transmisión 10 GbE se apague y encienda. La lógica vinculada al puerto de salida "eof" proporciona una indicación al core de 10 GbE de que se está enviando la palabra de datos final para la trama. Esto activará el core para comenzar la transmisión del marco de datos utilizando la dirección IP y el número de puerto especificado.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 63. Subsistema final para generación de datos y limitación de velocidad en la transmisión.

La imagen superior (Imagen 63) es el modelo final de la generación de datos, que formara parte del subsistema final. Se puede ver que hay mucha lógica incluida al final del circuito que no fue mencionada anteriormente. La lógica adicional permite lograr la correcta funcionalidad del sistema. Si bien la explicación de esta parte escapa a los objetivos del presente trabajo, se puede decir brevemente que esta lógica se encarga de sincronizar las señales para la generación de datos, ya que las mismas tienen distintos tiempos de retrasos o "delays", de manera que el programa pueda ser compilado correctamente.

Para finalizar este apartado, a continuación, en la imagen se muestra como toda la generación de datos mostrada anteriormente se simplifica en un simple bloque, el denominado subsistema, correspondiéndose las tres salidas de este con las tres señales que salen del bloque llamado "Subsystem" a continuación.



Imagen 64. Bloque subsistema que encapsula el circuito de la Imagen 61.

6.3.6. Sistema final

Una vez configurado el bloque de transmisión 10 GbE y la lógica para la generación de datos, resta colocar el bloque encargado de la recepción de datos que consiste en otro bloque similar al de transmisión, pero con las entradas de la interfaz de transmisión todas conectadas a 0, para que solo cumpla su rol de receptor. Sin embargo, Simulink requiere que todas las entradas estén conectadas. Conectarlos a 0 debería garantizar que durante la síntesis se elimine la lógica de transmisión para este bloque 10 GbE. Por último, se debe configurar el bloque para que se asocie con el puerto 1 de SFP +, el mismo es el que se encargara de recibir los datos.

El sistema final para la transmisión de datos utilizando bloques 10 GbE se muestra a continuación:

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 65. Sistema final de transmisión de datos a través de bloques 10 GbE con subsistema

En este punto del trabajo es importante mencionar los problemas que surgieron para lograr la correcta compilación del sistema mostrado en la imagen anterior. Luego de intentar solucionar los continuos errores enviados por el software, pudimos notar que únicamente hacían referencia al conexionado remoto de las señales, es decir, en la utilización de los bloques GoTo, y que al compilar, se modificaba el tipo de datos enviado derivando en un error, ya que el puerto que debía recibir dicho dato se encontraba con un tipo de variable distinta al esperado. Para solucionar este problema, se decidió realizar la tediosa tarea de conectar todas las señales, entradas y salidas de los bloques utilizando cableado; esto modifico los planes de utilizar un subsistema para que el diseño sea más agradable a la vista, pero con la ventaja de que se logró la correcta compilación, ya que con este método de diseño las variables no sufrieron ningún tipo de cambio. El sistema final con las modificaciones mencionadas se muestra en la imagen 66.

Al no disponer de la plataforma ROACH2, no se pudo realizar una prueba del funcionamiento de este sistema. Se entiende que a los fines de este trabajo, lograr la compilación del mismo ya es suficiente para poder ser probado el día que en el instituto puedan hacer uso de la misma. De ser así, se podría probar con la utilización de este diseño la transmisión de datos a alta velocidad entre dos puertos 10 GbE, junto con la utilización de diferentes longitudes de cables para analizar la solidez de la comunicación.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 66. Sistema final de transmisión de datos a través de bloques 10 GbE sin subsistema.

6.4. Practica 3: Espectrómetro de ancho de banda

6.4.1. Introducción

Un espectrómetro es un sistema que toma una señal en el dominio del tiempo y la convierte al dominio de frecuencia. En sistemas digitales, generalmente se logra utilizando el algoritmo denominado FFT (Fast Fourier Transform). Sin embargo, con algún esfuerzo, es posible lograr un mayor rendimiento en la relación señal a ruido, pudiéndola aumentar enormemente realizando un espectrómetro con un enfoque basado en el uso de banco de filtros polifásicos. Esto es importante ya que la FFT por si sola brinda un resultado sumamente "ruidoso", algo indeseado para este proyecto.

Cuando se diseña un espectrómetro para aplicaciones astronómicas, es importante considerar la ciencia detrás de él. Por ejemplo, la investigación del tiempo de arribo de pulsares necesita un espectrómetro que pueda otorgar un espectro en escalas de tiempos cortos, para que se pueda observar la tasa de cambio de estos. En contraste, una medida de líneas espectrales acumulara múltiples espectros para aumentar la relación señal a ruido. También es importante tener en cuenta que "más grande" no significa "mejor", ya que cuanto mayor sea la resolución espectral y temporal de un espectrómetro, más datos tendrá que manejar la computadora (y el científico en el otro extremo). Por el momento, se dejaran de lado estas cuestiones para realizar el estudio de un espectrómetro general como ejemplo.

En esta práctica, primero se estudiaron los parámetros principales a tener en cuenta a la hora de diseñar un espectrómetro, los cuales serán distintos según el tipo de aplicación que se desee realizar. Como esta parte del trabajo es la más esencial, ya que posee el contenido más importante, se trabajó de una manera distinta: se explicarán paso a paso cada uno de los bloques que se utilizaron, detallando en cada uno que señales de entradas y salidas utilizan, así como cuáles son sus principales parámetros para configurar, y de esta manera poder mostrar al final un modelo completo del sistema diseñado.

A modo de ilustración, se muestra un diagrama en bloques del sistema que se realizó:



Imagen 67. Diagrama en bloques del sistema final.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

6.4.2. Parámetros principales para diseño de un espectrómetro

Cuando se diseña un espectrómetro hay algunos parámetros principales que se deben tener en cuenta:

- **Ancho de banda:** el ancho del espectro de frecuencia, en Hz. Esto depende de la frecuencia de muestreo; para datos complejos se calcula de la siguiente manera:

BW = samplingrate = $\frac{1}{samplingperiod}$

En contraste, para datos reales o muestreados por Nyquist, la tasa es la mitad:

$$BW = \frac{samplingrat}{2} = \frac{1}{2 x sampling period}$$

Es decir, se requieren dos muestras para reconstruir una forma de onda dada.

- **Resolución en frecuencia:** la resolución en frecuencia de un espectrómetro, Δf , viene dada por:

$$\Delta f = \frac{BW}{number of cha}$$

Es el ancho de cada canal de frecuencia. En consecuencia, Δf es una medida de cuan preciso se puede medir una muestra de frecuencia dada.

- **Resolución temporal:** la resolución temporal es simplemente la tasa de envío de cada espectro obtenido por el instrumento. Generalmente, se acumulan múltiples espectros para promediar el ruido. Cuantas más acumulaciones se hagan, menor será la resolución de tiempo. Para observar eventos cortos en la escala de tiempo, como las ráfagas de pulsares, es necesario tener una resolución en el tiempo alta; por el contrario, si se quiere observar una señal débil de HI, se requiere un tiempo de acumulación largo, por lo que la resolución temporal es menos importante.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

6.4.3. Conversor ADC

El primer paso para crear un espectro de frecuencia es digitalizar la señal. Esta tarea se realiza con un ADC (Analogue to Digital Converter). En Simulink, se representa al ADC con un bloque amarillo. Este bloque convierte señales de entrada analógicas en señales de salida digitales. En cada ciclo del reloj, las entradas se muestrean y digitalizan a números binarios de 8 bits en el rango de -1 a 1 y luego son emitidas como salida del ADC. Esto se logra utilizando representación de complemento a dos, es decir que se puede representar números desde -128 a 127, incluido el 0. Los ADC´s a menudo se sesgan internamente a la mitad entre -1 y 0. Esto significa que normalmente se verá la salida de este variar entre dichos valores cuando no existe una entrada. Además, esto significa que, a menos que se calibre de otro modo, el ADC tendrá un offset negativo. Por último, el reloj del conversor tiene que ser cuatro veces mayor que el de la FPGA. En este diseño, el ADC se sincroniza a 800 MHz por lo que la ROACH2 se sincronizara a 200 MHz, lo que da un ancho de banda de 400 MHz, ya que el muestreo por Nyquist requiere de dos muestras (o más) por segundo.

A continuación, se muestra una imagen del bloque ADC, viéndose con claridad cuáles son sus entradas y sus salidas, junto con su menú de configuración:

sim_in	i0 > i1 > i2 > i3 >	adc (mask) The ADC block com are sampled and dig then output by the a	arameters: add verts analog input: itized to 8 bit binar dc.	:0 s to digital outputs y point numbers in	Every clock cy the range of [-1	cle, the inputs , 1) and are
>sim_sync	q0 > q1 > q2 > q3 > outofrangei0 > outofrangei1 > outofrangeq0 >	Parameters ADC board adc0 ADC clock rate (MH 800	z]			
sim_data_valid	outofrangeq1 > sync0 > sync1 > sync2 > sync3 > data_valid >	Sample period				_
edo	0		<u>D</u> K	Cancel	<u>H</u> elp	Apply

Imagen 68. Bloque conversor ADC

ENTRADAS:

-sim_in: entrada para datos simulados. Es útil conectar una fuente de Simulink, como "ruido blanco de banda limitada" o una onda sinusoidal.

- **sim_sync**: entrada de pulso de sincronización simulada. En este diseño, se conectó una constante de valor '1'.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

- **sim_data_valid**: se puede establecer en '0' (invalida) o en '1' (valida).

<u>SALIDAS</u>

El ADC emite dos señales de salida principales: i y q, las cuales corresponden a las entradas coaxiales de la placa ADC. En este diseño solo se utilizó la entrada i. Como el conversor funciona a cuatro veces la velocidad de la FPGA, hay cuatro salidas muestreadas en paralelo: i0, i1, i2, i3; estas son de 8 bits como se mencionó anteriormente.

6.4.4. Banco de filtros polifásicos (PFB)

Luego de pasar por el ADC, las salidas de este se envían como entrada al banco de filtros polifásicos. Hay dos bloques principales necesarios para un banco de filtros polifásicos en estos diseños en Simulink. El primero es el bloque pfb_fir_real, que divide la señal en **'taps'** (etapas o pasos) paralelos, y luego aplica filtros de respuesta de impulso finito (FIR). La salida de este bloque sigue siendo aún una señal en el dominio del tiempo. Cuando se combina con el bloque FFT_wideband_real, finalmente constituye el bloque completo que representa un banco de filtros polifásicos.

6.4.4.1. Bloque FIR

A continuación, se muestra una imagen del primer bloque mencionado, llamado por el software pfb_fir_real (bloque FIR), junto con una imagen del menú para su configuración. Luego de la imagen se explicarán las entradas/salidas del bloque y algunos de sus parámetros más importantes que deben estar bien configurados para lograr el correcto funcionamiento del mismo:

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

	Function Block Parameters: pfb_fir_real	×
-	ofb_fir_real (mask)	-
F (Fold adders into DSPs: Causes adders to be absorbed into DSP blocks (supported in Virtex5)	Н
1	Adder implementation: Cores using Fabric or DSP48 or behavioral HDL	
- 8	Parameters	- 1
	Size of PFB: (2^? pnts)	
	12	
	Total Number of Taps:	
	4	
	Windowing Function: hamming	
	Number of Simultaneous Inputs: (2^?)	
	2	
	Make Biplex	
	0	
	Input Bitwidth:	
	8	
	Output Bitwidth:	
	18	
	Coefficient Bitwidth:	-
4		0
	OK Cancel Help Apply	,

Imagen 69. Primer bloque del PFB, denominado bloque FIR.

ENTRADAS

- sync: de tipo booleano. A esta entrada se le debe conectar un pulso de sincronización.

- **pol_in1, pol_in2, pol_in3, pol_in4:** las secuencias reales en el dominio del tiempo.

<u>SALIDAS</u>

Como el ADC tiene cuatro salidas paralelas muestreadas en el tiempo: i0, i1, i2 e i3, se necesitan cuatro entradas paralelas para esta implementación de PFB.

PARAMETROS DE IMPORTANCIA

- **Size of PFB:** hace referencia a cuantos puntos tendrá la FFT. El número de canales de frecuencia será la mitad. En este diseño, se seleccionaron 2¹² = 4096 puntos, por lo que se obtuvo un banco de filtros de 2¹¹= 2048 canales.

- **Number of taps:** el número de 'taps' en el filtro FIR del PFB. Cada tap utiliza dos núcleos multiplicadores reales y requiere el almacenamiento en el búfer de las secuencias reales e imaginarias. Generalmente, más taps significan menos "fugas" espectrales entre canales, pero se utiliza más lógica. Hay rendimientos decrecientes después de aproximadamente 8 taps.

- Number of simultaneous inputs: el número de muestras en paralelo que se presentan al núcleo FFT en cada ciclo de reloj. El número de puertos de salida se establece en este mismo valor. Se tienen cuatro entradas desde el ADC, se configuró en 2.

- **Inputs bit width:** el número de bits en cada muestra, real e imaginaria, de entrada, al PFB. El ADC genera datos de 8 bits, por lo que el ancho de bits de entrada debe establecerse en ocho en este diseño.

- **Output bit width:** es el número de bits en cada muestra, real e imaginaria, de salida del PFB. Esto debería coincidir con el ancho de bit a la entrada de la FFT que sigue. Se recomiendan 18 bits para la ROACH (multiplicadores de 18x25).

- **Bin Width Scaling:** Los PFB ofrecen un control mejorado sobre el ancho de los canales de frecuencia. Al ajustar este parámetro, se pueden escalar los canales para que sean más anchos (para valores mayores que 1) o más estrechos (para valores menores que 1).

- Share coefficients between polarisations: cuando el bloque PFB procesa simultáneamente más de una polarización, puede ahorrar RAM utilizando el mismo conjunto de coeficientes para cada stream (flujo de datos). Sin embargo, esto puede empeorar el rendimiento de tiempo del diseño.

6.4.4.2. Bloque FFT_wideband

A continuación, se debe colocar el segundo bloque del PFB, el ya mencionado FFT_wideband_real (bloque FFT). Este bloque es la parte más importante por entender del diseño.

Si se quiere analizar la conformación del mismo, se encontraran complejos mecanismos de los algoritmos que se utilizan para realizar la FFT, lo cual no se explica en el informe ya que excede los propósitos del presente trabajo. El detalle de estas funciones se puede ver en*. Para el caso de estudio, alcanza con saber qué tipo de variable debe ingresar y cual debe salir, y que configuración debe tener el bloque para lograr obtener el correcto funcionamiento del mismo.

Se muestra una imagen del bloque junto con su menú de configuración:

^{*}The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, por Steven W. Smith.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

		Function Block Parameters: fft_wideband_real	×
		fft_wideband_real (mask)	
		A real-sampled wideband FFT.	
		Basic Latency Implementation	
		Number simultaneous streams	
		1	
_		Size of FFT: (2 ² pts)	111
sync	sync.out >	12	
shift		Number of Simultaneous Inputs: (2^?)	
inco	ou 100 >	2	
in01	ou 101 >	Input Bit Width	
in02		18	
123	et >	Input binary point	
	fft_wideband_real	17	
B	(18,18) ound (unbiased: +/- Inf)	Coefficient Bit Width	
	Saturate	18	
		Unscramble output (ie. put channels in canonical order)	
		Asynchronous operation	
		OK <u>Cancel</u> <u>Help</u> <u>Apply</u>	

Imagen 70. Segundo bloque del PFB, denominado bloque FFT.

<u>ENTRADAS</u>

- **sync:** como bloques anteriores, el de la FFT necesita también una señal de sincronización.

- **shift** : El bit 0 especifica el comportamiento de la etapa 0, el bit 1 el de la etapa 1 y así sucesivamente. Si una etapa está configurada para cambiar (con bit = 1), cada muestra se divide por dos a la salida de esa etapa. En este diseño, se configuro Shift en 2¹³⁻¹ - 1, que cambiara los datos en 1 en cada etapa para evitar desbordes.

- in0, in1, in2, in3: Cuatro entradas para los flujos de datos paralelos que provienen del ADC, a través del bloque de filtro pfb_fir_real, y que finalmente llegan al bloque FFT al cual simplemente hay que conectarlos.

<u>SALIDAS</u>

- **out0**, **out1**: esta FFT produce dos salidas simultaneas. Debido a que la señal en el tiempo es real, las mitades derecha e izquierda del espectro se encuentran espejadas, por lo que no hay que molestarse en generar las imágenes imaginarias. Por lo tanto, para una FFT de 1024 puntos, se tendrán 512 canales útiles. Es por eso que se tiene la mitad del número de salidas paralelas (dos rutas de salidas complejas a cuatro entradas reales). Cada una de estas salidas paralelas de FFT producirá canales secuenciales en cada ciclo de reloj. Entonces, en el primer ciclo de reloj (después de un pulso de sincronización, que denota el inicio), se obtendrá el canal de frecuencia cero y el canal de frecuencia uno. Cada uno de esos son números complejos. Luego, en el segundo ciclo, se tendrán los canales dos y tres, seguidos por el cuarto y el quinto, y así sucesivamente. De modo que se eligió separar estos canales en "pares" e "impares", para diferenciar los canales 0, 2, 4, 6,, N-1, de los otros canales que serán 1, 3, 5, 7, ..., N. Para recrear el espectro completo hubo que intercalar estos caminos y producir la secuencia 0, 1, 2, 3,..., N-1, N. Más adelante,

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.
siguiendo las líneas de lo que será el modelo final, se verá que estas dos salidas terminan en un bloque BRAM compartido en "par" e "impar". Estos se intercalan en el script tutr.py para formar un espectro completo.

PARAMETROS DE IMPORTANCIA

- **Size of FFT:** hace referencia a la cantidad de puntos de FFT que se tendrán; el número de canales de FFT será la mitad. Si se seleccionan 2^{12} = 4096 puntos, se tendrá un banco de filtros de 2^{11} = 2048 canales. Esto debe coincidir con el bloque pfb_fir (y lo hace!).

- Input/output bit widht: el número de bits por cada muestra (real e imaginaria) a medida que se transmiten a través de la FFT. Cada etapa de FFT redondeará los números a este número de bit después de realizar un butterfly computation. Esto tiene que coincidir con lo entregado por el bloque pfb_fir. El valor predeterminado es 18 y no debería ser modificado.

- Number of simultaneous inputs: el número de muestras en paralelo (en el dominio del tiempo) que se presentan al núcleo FFT en cada ciclo de reloj. Se tienen 2²= 4 flujos de datos en paralelo, por lo que el parámetro debería setearse en 2.

- Unscramble output: es necesario realizar un reordenamiento para que los canales de frecuencia se emitan en orden canónico. Si se tiene la necesidad de ahorrar la mayor cantidad de lógica y RAM posible se puede desactivar este proceso, pero hay que asegurarse de tener en cuenta la codificación de los canales en el software posterior. Como este diseño se ajustará de manera cómoda a la FPGA, se hará uso del procesamiento.

- Architecture: establecida en Virtex5, la arquitectura usada FPGA en ROACH. Lo que hace esto es cambiar parte de la lógica interna para optimizar mejor el funcionamiento de algunos bloques.

- **Use less:** este parámetro afecta la implementación de la multiplicación compleja en la FFT, de modo que se utilizan menos multiplicadores o lógica/sumadores. Para los multiplicadores complejos de la FFT se pueden utilizar cuatro multiplicadores y dos sumadores, o tres multiplicadores y un grupo (**bunch**) o sumadores. De esta manera, se pueden intercambiar **DSP slices**(son bloques importantes dentro de la librería DSP) por lógica o viceversa. Se debe establecer esto en los multiplicadores.

A continuación, se muestra el conexionado del conversor ADC con ambos bloques de filtros polifásicos mencionados anteriormente y con ellos, toda la lógica que conlleva:

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 71. Esquema de conexionado entre el conversor ADC con los filtros polifásicos.

6.4.5. Cálculo de potencia

El siguiente bloque en el diseño corresponde al cálculo de potencia. Este bloque se encarga de calcular la potencia de un numero complejo. Por lo general, tiene una latencia de 5 y calculara la potencia de su entrada tomando la suma de los cuadrados de sus componentes reales e imaginarias. En este diseño, hay dos bloques de potencia, que calculan la potencia de las componentes pares e impares de la FFT. La salida del bloque es de 36 bits; la siguiente etapa del diseño (el cuantificador) vuelve a cuantificar esto a una tasa de bits más baja.

A continuación, se muestra el bloque, la lógica que lleva dentro y su configuración:

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

> o power >	Disabled Link: untitled/power2* _□× Ele Edit View Simulation Figmat Tools Help _□ □ □
power2 Function Block Parameters: power2 power (mask) Squares real and imaginary components of complex input and adds them. Parameters Bit Width 18 QK Cancel Help Apply	Ready 100%



ENTRADA

- c: un numero complejo cuyos bits de mayor orden son la parte real, mientras que los bits menos significativos son su parte imaginaria.

<u>SALIDA</u>

- Power: potencia calculada del número complejo de la entrada.

PARAMETRO

- Bit Width: el número de bits en la entrada.

6.4.6. Memorias BRAM. Acumulación

El siguiente bloque en el diseño lleva el nombre de simple_bram_vacc, y se utiliza para la acumulación de vectores. El crecimiento del vector es de aproximadamente 28 bits por segundo, por lo que si se requiere una acumulación realmente larga (por ejemplo, de algunas horas), se tendría que usar un bloque del tipo qdr_vacc o dram_vacc. Como su nombre indica, el simple_bram_vacc es más simple, por lo que está bien para este espectrómetro de demostración. El bloque FFT genera 1024 valores de coseno (impar) y 1024 valores de seno, lo que serían 2048 valores en total. Se utilizan dos de estos bloques en el diseño, uno para los canales de frecuencia impar y otro para los canales de frecuencia par. La longitud del vector se establece en 1024 para ambos.

Se muestra una imagen del bloque:

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

	Function Block Parameters: vacc0	×		
	simple_vacc (mask)			
	This simple vector accumulator is based on a shift register. It outputs its previous accumulated vector after a new_acc pulse is received.			
,	Parameters	5		
>new_acc dout >	Vector Length			
	1024			
Ann valid P Number of output bits				
vacc0	32			
	Binary point (output)	-		
	lo lo	- 11		
	QK Cancel Help Apply			

Imagen 73. Bloque de acumulación

ENTRADAS/SALIDAS

 - new_acc: se debe enviar un pulso de tipo booleano a este puerto para iniciar una nueva acumulación. No se puede usar el pulso de sincronización, de lo contrario, este parámetro se restablecería después de cada espectro. Por lo tanto, se conecta a un bloque acc_ctrl, el cual permite establecer el periodo de acumulación.

- din/dout: entrada y salida de datos.

- **valid:** la salida de este bloque solo será válida cuando haya terminado la acumulación (será señalado por un pulso booleano enviado a new_acc). Esto generará un booleano '1' mientras se está emitiendo el vector; en caso contrario, será un '0'.

PARAMETROS

- Vector length: se refiere a la longitud del vector de entrada/salida. El bloque FFT produce dos flujos de largo 1024 (valores pares e impares), por lo que se configura en 1024.

- **Number of output bits:** como se produce un crecimiento de bits debido a la acumulación, se necesita establecer esto en un número más alto que los bits de entrada. La misma es de 6 bits, proveniente del bloque cuantificador, por lo que se configura este parámetro en 32 bits. No esta demás aclarar que se podría establecer esto en 64 bits y omitir el bloque cuantitativo.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Los bloques finales, pares e impares, son BRAM compartidos, de los cuales se lee los valores del uso del script tut3.py.

El bloque se muestra en una imagen a continuación:



Imagen 74. Bloque de memoria BRAM.

ENTRADAS/SALIDAS

- **addr:** es la dirección en la cual se guarda el valor data_in, en ese ciclo de reloj, si se encuentra habilitada la escritura de la misma.

- data_in: entrada de datos.
- we: puerto de habilitación de escritura.
- data_out: se escriben los datos en un registro.

PARAMETROS

- Output data type: sin signo.

- Address width: 2^x, con x= address width, es el número de palabras de 32 bits de la BRAM implementada. No hay un máximo teórico para la Virtex5, pero habrá problemas de sincronización significativos en anchos de 13 bits. QDR o DRAM pueden usarse para espacios de direcciones más grandes. Se estableció este valor en 11 bits para este diseño.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

- **Data width:** Shared BRAM puede tener un ancho de entrada/salida de datos de 8, 16, 32,64 o 128 bits. Dado que el acumulador vectorial alimenta el puerto de datos bram compartido con valores de ancho de 32 bits, esta configuración estableció en dicho valor para este diseño.

- **Data binary point:** El punto binario debe establecerse en cero. Los datos que van al procesador se convertirán a un valor con este punto binario y el tipo de datos de salida.

En resumen, el esquemático entre las memorias BRAM y acumulaciones, queda definido de la siguiente manera:



Imagen 75. Esquemático de memorias BRAM y acumuladores.

6.4.7. Sistema final

Finalmente, con los bloques que ya fueron mencionados y explicados en las practicas anteriores, y con lógica no mencionada, se realizó el diseño final. Estos bloques utilizados son los distintos registros de software imprescindibles para el correcto funcionamiento del programa completo.

A continuación se muestra la imagen del sistema final:

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 76. Sistema final del espectrómetro de ancho de banda.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Una vez explicadas cada una de las partes del espectrómetro de ancho de banda y mostrado el sistema final, será necesario realizar una breve explicación del funcionamiento del mismo. En primer lugar, la señal analógica de datos ingresa al conversor analógico digital, el cual entrega los datos que ingresaron al mismo convertidos al mundo digital. Estos datos, en forma digital, serán procesados a continuación. En primer lugar ingresan al banco de filtros polifásicos, el cual primero separa los datos en los ya mencionados 'taps' a los cuales se los pasa por filtros de respuesta finita. La salida de este bloque se encuentra conectada con el bloque FFT, el cual se encarga de llevar los datos digitales al dominio de la frecuencia de la manera ya explicada. Estos datos, que se encuentra separados en tramas de "pares" e "impares", se les aplica la operación fundamental para poder obtener su espectro, y que es el cálculo de su potencia a través de los bloques correspondientes. Una vez obtenida la potencia, queda realizar la correspondiente acumulación a través de los bloques BRAM para poder obtener el espectro deseado, siendo esta la parte final del sistema completo.

Finalmente, a través del uso del script de Python tut3.py, se pueden obtener las gráficas de espectro que se apreciaran en la sección Resultados de este Informe, en el Capítulo 8.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

CAPITULO 7. Practicas: Similitudes y diferencias entre Red Pitaya y ROACH2

Como se explicó en las secciones anteriores, existen importantes diferencias entre las dos plataformas estudiadas. Esta diferencia en la tecnología de ambas placas implicó que la forma de trabajar en Simulink sea distinta, principalmente para la realización del espectrómetro de ancho de banda. Además, la Red Pitaya no posee puertos de 10 GbEthernet, motivo por el cual la practica 2 no pudo ser realizada. A pesar de esto, los resultados que se lograron obtener son satisfactorios a los fines del presente trabajo. De esta manera, a continuación, se explicara la síntesis realizada en Simulink con la Red Pitaya 2.

7.1. Practica 1: Flashing LED

Se recuerda brevemente que para el practica 1, solamente se necesitaba disponer de bloques básicos para lograr el funcionamiento del sistema, los cuales se mencionan a continuación: registros de software, bloque gpio, sumadores, registros de desplazamiento, entre otros. De esta manera, este se pudo correr sin problemas en la plataforma Red Pitaya, obteniendo no solo los resultados de simulación mostrados en el octavo capítulo correspondiente, sino que también permitió ver el resultado en la placa, observando el parpadeo del LED.

La gran diferencia con la practica realizada en el software para ROACH2, es que luego de colocar el bloque System Generator, se debe colocar el bloque correspondiente a la plataforma a utilizar, entendiendo que para este caso se debe hacer uso del bloque que permite simular la Red Pitaya, y no la ROACH2 como se hizo en las secciones anteriores.

7.2. Practica 2: 10 GbE

Como se explicó en la sección 5, la plataforma Red Pitaya posee un hardware con menores prestaciones que la placa ROACH2. Una de estas diferencias significativas es que la primera no posee puertos 10 Gb Ethernet, de manera que la practica 2 no pudo llevarse a cabo. Sin embargo, se cree de importancia la explicación del mismo ya que fue importante en el aprendizaje del uso de las herramientas de Simulink.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

7.3. Práctica 3: Wideband Spectrometer

Sabiendo esto, se adentrará en el espectrómetro que es realmente lo que interesa, en donde existe la posibilidad de encontrar diferencias. Es importante entender las mismas, porque a pesar de ellas, el diseño realizado sigue siendo funcional a los requerimientos.

Utilizando la imagen del sistema final para la ROACH 2 (Imagen 76), se recuerda que los bloques esenciales para el funcionamiento del espectrómetro son: el bloque ADC, el filtro de bancos polifásico el cual se encontraba dividido en dos: el filtro fir y el bloque FFT y luego los bloques de potencia, cuantificadores y memorias finales para la acumulación. Como se explicó anteriormente, la Red Pitaya no posee la misma capacidad de procesamiento y por este motivo no se tiene la posibilidad de usar todos los bloques que dispone la ROACH 2.

Como se puede ver, la diferencia más notoria es que no se dispone del banco de filtros polifásicos. La señal del ADC posee dos salidas que se conectan directamente a los bloques FFT, los cuales hacen la conversión a frecuencia de la señal. Luego estos bloques se conectan con los bloques de potencia y, finalmente, al acumulador.



Imagen 77. Esquemático del ADC junto a los bloques de la FFT y de potencia

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 78. Esquemáticos de los bloques acumuladores.

La escala del dato entregado a la salida de los acumuladores es un número representativo de las operaciones realizadas (ADC, FFT, acumulación), por lo tanto, no tiene una relación de escala directa con el valor de la intensidad de potencia inyectado a la entrada. Esto se debe a que la función FFT devuelve un valor de cuentas en función del rango de entrada, y la función de acumulación dará un valor diferente en función del tiempo o cantidad de muestras que se vayan acumulando.

Para obtener un factor de escala correcto, se deberá inyectar un valor de señal conocido y para una configuración de adquisición, evaluar el dato resultante.

A continuación se muestra la imagen del sistema final:

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 79. Diseño del espectrómetro para la Red Pitaya.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

CAPITULO 8. Resultados

Para comenzar con el análisis de los resultados, se recuerda que los mismos se obtuvieron por medio de la plataforma Red PitayaSTEMLab125-14, aunque lo ideal sería utilizar la plataforma ROACH2, la cual se emplearía como el back-end digital del receptor de una de las antenas parabólicas del IAR.

Esta plataforma se utilizó mediante el software previamente diseñado en Simulink, como así, por medio del software del fabricante. Con estos métodos de análisis, se debería llegar a resultados similares, o iguales en el mejor de los casos para una misma señal, corroborando que el software realizado a través de Simulink fue correctamente diseñado.

Al igual que la ROACH 2, la Red Pitaya cumple el papel de ser el back-end digital del receptor de alguna de las dos antenas. Debido a que ambas antenas están realizando observaciones de forma casi continua, se contó con poco tiempo para realizar ensayos o cambios de hardware sobre las mismas, por ello no se logró a coordinar el tiempo de uso de las antenas. Por lo tanto, para demostrar el correcto funcionamiento de los programas realizados, a esta plataforma se le inyectó un generador de señales sinusoidales de frecuencia variable, seleccionadas por el usuario. Las frecuencias seleccionadas fueron las siguientes: 1MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 20MHz, 25MHz, 30MHz, 35MHz, 40MHz, 45MHz y 50MHz.

Esta plataforma de desarrollo consta con un conversor ADC de 125MHz, tanto el analizador espectro dado por Red Pitaya, así como el diseñado por Simulink, operan hasta los 62.5MHz y 50MHz respectivamente, (debido a su diseño de software), ambos se desempeñan adecuadamente, ya que durante la práctica se utilizaron en la primera zona de Nyquist, zona en la que el ADC se desempeña de forma correcta debido a su ancho de banda de señal, por lo que **no se presentaron señales de aliasing.** Las frecuencias en las que se trabajaron fueron las siguientes: 5MHz, 25MHz, 40MHz, 45MHz

Antes de proseguir con los gráficos de los resultados, se debe dejar en claro una particularidad de este instrumento para evitar todo tipo de malinterpretaciones. El analizador de espectro provisto por el fabricante viene calibrado en dBm (decibeles), de manera tal, que la señal inyectada corresponde con lo que indica el eje de las ordenadas. Por otra parte, el software realizado mediante el uso de Simulink, está diseñado para ser utilizado con señales astronómicas, y no para ser conectado a un generador de señales. Esto provoca que los valores del eje de las ordenadas de este instrumento no coincidan con los valores inyectados. Por consiguiente, ambos espectros serán muy similares en cuanto a su forma, pero los valores indicados serán muy variados entre sí. Este software realizado por medio de Simulink brinda resultados en unidades, pero mediante una adecuada calibración, estos valores pueden obtenerse en dBm.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Para culminar, las medidas realizadas con los radiotelescopios no son señales de comunicación, sino que es ruido. El valor obtenido es calibrado con radio fuentes calibradoras, obteniendo así el factor de escala entre el objeto bajo estudio y una fuente calibradora. Esto se realiza para cada configuración o cada observación.

En cambio, el valor indicado de los datos a la salida de Simulink es un valor determinístico, y será calibrado en función de la potencia inyectada por el generador de señales, de ahí se obtiene para esta configuración en particular un factor de escala. Las potencias introducidas fueron de -20dBm, -23dBm y -30dBm.

8.1. Ensayos con una señal de -20dBm.

En la práctica, una de las potencias inyectadas fue de -20dBm. Como consecuencia, las amplitudes de las componentes resultaron muy semejantes para cada una de las distintas frecuencias evaluadas. Esta amplitud resulto ser aproximadamente 1,350x10⁸unidades a 5MHz.

De esta manera, podemos asociar la potencia de -20dBm con 1,350x10⁸ unidades por medio de un factor de escala. Este factor se determinará de la siguiente manera:

Inicialmente la potencia debe pasar de una escala no lineal (dB) a una lineal (W), esto se logra mediante la siguiente conversión.

$$pot(W) = 10^{\frac{pot(dB)}{10}} \iff pot(dB) = 10xLog_{10}(pot(W))$$

En cambio, si la potencia está en dBm, se relaciona con w de la siguiente manera:

$$pot(W) = \frac{1}{1000} x 10^{\frac{pot(dBm)}{10}} \quad \leftrightarrow \quad pot(dBm) = 10 x Log_{10}(1000x pot(W))$$

Entonces, -20 dBm equivalen en la escala lineal a 0.00001w ($1x10^{-5}w$), que también está asociado con 1,350x10⁸ por medio del factor de escala. A partir de estos resultados se puede determinar el factor de escala (f_e), y el mismo será:

$$f_{e} = \frac{1,350 \times 10^{8} \text{unidades}}{0,00001 \text{ W}} = 13,5 \times 10^{12} \frac{\text{unidades}}{\text{W}}$$

El factor de escala relaciona el valor otorgado por el grafico (V) con la potencia en W. El siguiente paso consiste en obtener la relación ente el factor de escala con la potencia en dBm.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

$$V = Pot(W) x fe$$
$$V = 10^{\frac{pot(dB)}{10}} x fe$$
$$V = \frac{1}{1000} x 10^{\frac{pot(dBm)}{10}} x fe$$

8.1.1. Ensayo con una señal sinusoidal de 5MHz



Imagen 80. Espectro de la señal sinusoidal a 5MHz arrojado por Simulink.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.







Imagen 82. Espectro de la señal sinusoidal a 5MHz arrojado por la aplicación de Red Pitaya.

Los gráficos anteriores corresponden a los espectros ubicados a 5MHz (Imagen 80, Imagen 81 e Imagen 82), los dos superiores fueron provistos por Simulink, mientras que el inferior se obtuvo mediante la aplicación dada por el fabricante. Ambos espectros son muy similares, y no se pueden apreciar grandes diferencias visibles. A bajas frecuencias ambos métodos son efectivos.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

8.1.2. Ensayo con una señal sinusoidal de 25MHz

En este caso, al igual que el anterior, estos instrumentos están diseñados para manipular sin ninguna complicación señales situadas en estas frecuencias. Los gráficos (Imagen 83, Imagen 84 e Imagen 85), demuestran espectros semejantes, corroborando el correcto funcionamiento de los softwares.



Imagen 83. Espectro de la señal sinusoidal a 25MHz otorgado por Simulink.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 84. Espectro de la señal sinusoidal a 25MHz otorgado por Simulink, y posteriormente calibrado en dBm.



Imagen 85. Espectro de la señal sinusoidal a 25MHz dado por Red Pitaya.

En el espectro de la imagen inferior (Imagen 85) aparece una irregularidad a 50MHz, que se puede dar debido a los armónicos del generador o producto de la intermodulación del ADC. Es interesante saber la existencia de esta singularidad, pero no es de importancia a los fines de este trabajo.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

8.1.3. Ensayo con una señal sinusoidal de 40MHz

Operando a la frecuencia de 40MHz ambos instrumentos se comportaron según lo esperado, dando como resultado una componente en esa frecuencia, (Imagen 86, Imagen 87 e Imagen 88).



Imagen 86. Espectro de la señal sinusoidal a 40MHz obtenido a través de Simulink.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 87. Espectro de la señal sinusoidal a 40MHz obtenido a través de Simulink, calibrado en dBm.



Imagen 88. Espectro de la señal sinusoidal a 40MHz otorgado por Red Pitaya.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

8.1.4. Ensayo con una señal sinusoidal de 45MHz.

A 45 MHz se puede observar en todos los gráficos una componente situada en esa frecuencia. La similitud entre ambos resultados deja en claro la efectividad y exactitud de los instrumentos utilizados. Los resultados obtenidos fueron los siguientes gráficos.



Imagen 89. Espectro de la señal sinusoidal a 45MHz obtenido a través de Simulink.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 90. Espectro de la señal sinusoidal a 45MHz obtenido a través de Simulink y calibrado en dBm



Imagen 91. Espectro de la señal sinusoidal a 45MHz realizado por Red Pitaya

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

En el grafico realizado por Simulink (Imagen 89), se observa que la componente en vez de valer 1,350x10⁸, vale 1,120x10⁸. Esta cifra se la relaciona con la unidad dBm de la siguiente manera:

 $1,120 \times 10^8 = \frac{1}{1000} \times 10^{\frac{\text{pot}(\text{dBm})}{10}} \times \text{fe} \rightarrow \text{pot}(\text{dBm}) = -20,81$

8.2. Ensayos con una señal de -23dBm.

Prosiguiendo con el análisis, además de la señal de -20 dBm aplicada, también se le inyecto una señal con una potencia de -23dBm a 25MHz. El grafico superior (Imagen 92) le corresponde al realizado por Simulink, el cual arrojo como resultado una componente situada en 25MHz con una amplitud de 0,620x10⁸, el segundo grafico corresponde con el calibrado en dBm (Imagen 93), mientras que el inferior (imagen 94) al obtenido por el software de Red Pitaya.



Imagen 92. Espectro de la señal sinusoidal a 25MHz obtenido a través de Simulink.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 93. Espectro de la señal sinusoidal a 25MHz obtenido a través de Simulink ajustada en dBm.



Imagen 94. Espectro de la señal sinusoidal a 25MHz realizado por Red Pitaya

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

El motivo por la cual se inyecto -23 dBm es porque en una escala lineal la potencia se reduciría a la mitad que cuando se le inyecto -20 dBm. Entonces -23 dBm pasado a una escala lineal, resulta ser 5x10⁻⁶ W.

Por consiguiente, si 1x10⁻⁵ W está asociado con 1,350x10⁸ unidades por medio del factor de escala, a 5x10⁻⁶w le corresponde 0.675x10⁸ unidades. Sin embargo, esto no sucede ya que el grafico devolvió 0,620x10⁸ unidades, producto a los errores de los instrumentos y medición, que será explicado al final del capítulo.

8.3. Ensayos con una señal de -30dBm.

Por último, a esta plataforma se la ensayó a -30 dBm con una frecuencia de 25 MHz para demostrar que lo realizado a -20dBm y -23dBm es válido. La primera imagen corresponde con el ensayo realizado en Simulink (Imagen 95), la segunda imagen con el calibrado en dBm (Imagen 96), mientras que el último grafico se obtuvo mediante la Red Pitaya (Imagen 97).



Imagen 95. Espectro de la señal sinusoidal a 25MHz obtenido a través de Simulink.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.



Imagen 96. Espectro de la señal a 25MHz obtenido a través de Simulink, luego de haber sido calibrado en dBm



Imagen 97. Espectro de la señal sinusoidal a 25 MHz otorgado por Red Pitaya.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

Esta medición se llevó a cabo por dos métodos, el primero se realizó observando el grafico, mientras que el segundo por medio de la ecuación anterior. Ambos métodos deberían proporcionar resultados semejantes.

Por medio del gráfico, el valor obtenido resulto ser de 0,137x10⁸, mientras que por la ecuación fue:

$$V = \frac{1}{1000} x 10^{\frac{-30}{10}} x \, f_e = 0,135 x 10^8$$

Como se logra apreciar, ambos resultados son muy semejantes entre sí, corroborando que todo lo planteado es válido.

8.4. Tabla de resultados.

A partir de los resultados anteriores, tanto los valores esperados, como los resultados obtenidos, se realizó la siguiente tabla comparativa:

Potencia inyectada	Frecuencia	Valor esperado (ecuación)	Valor obtenido (grafico)	Potencia medida (valor obtenido)
-20dBm	5MHz	1,350x10 ⁸	1,350x10 ⁸	-20,00dBm
	25MHz	1,350x10 ⁸	1,220x10 ⁸	-20,44dBm
	40MHz	1,350x10 ⁸	1,210x10 ⁸	-20,47dBm
	45MHz	1,350x10 ⁸	1,120x10 ⁸	-20,81dBm
-23dBm	25MHz	0,675x10 ⁸	0,620x10 ⁸	-23,38dBm
-30dBm	25MHz	0,135x10 ⁸	0,137x10 ⁸	-29,94dBm

Además de ser un elemento útil para estudiar y comparar los resultados, también permite visualizar las clases de errores que se cometen al medir, es decir, si estos errores son aleatorios o sistemáticos. Para comenzar, la Red Pitaya posee un pequeño error aleatorio, que, para la envergadura de este proyecto, puede considerarse despreciable. Luego, el generador de señales también tiene un error aleatorio considerable, que, a diferencia de la Red Pitaya, este no se puede despreciar. Este error es aleatorio, ya que difiere de forma impredecible para cualquier valor de potencia entregado por el instrumento, y por lo tanto no se puede desafectar (los errores aleatorios son los errores propios del instrumento, y no se pueden eliminar).

Los resultados obtenidos a -20dBm dejaron en evidencia que la diferencia entre el valor medido y el valor real es muy semejante para todos los casos, como así también negativa, determinando que el error cometido por el ADC es sistemático (el error sistemático es

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

aquel que se produce de igual modo en todas las mediciones. Puede estar originado por un defecto del instrumento o durante el proceso de medición).

Por otro lado, al igual que para -20dBm, los valores obtenidos a -23dBm y -30dBm están sujetos al error aleatorio del generador y al error sistemático del ADC.

Se debe dejar en claro que todos los valores obtenidos surgen a partir de utilizar como referencia la señal de 5MHz a -20dBm, por lo tanto al valor 1,350x10⁸ se lo asocia con -20dBm. Es de total importancia destacar esto, ya que la ecuación que relaciona la amplitud de la componente con la potencia inyectada en dBm vincula al factor de escala. A su vez, el factor de escala involucra a 1,350x10⁸, siendo esta la referencia para todos los casos.

Por último, en la tabla se logra visualizar que la potencia medida en dBm difiere de la potencia inyectada con un error menor a un dBm. Esto significa que, a pesar de sus escasos recursos, esta plataforma brinda resultados confiables.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

1. Conclusiones

En primera instancia, podemos concluir que lo desarrollado en este informe logró demostrar la realizabilidad del trabajo propuesto, que consistió en desarrollar y diseñar un espectrómetro digital. Además de diseñarlo correctamente, en las pruebas realizadas a través de un barrido de frecuencia se corroboró que los resultados adquiridos a la salida correspondieron con los resultados esperados.

No se debe olvidar que objetivo principal es realizar un espectrómetro para pulsares. Por consiguiente, la diferencia entre un espectrómetro digital con uno para pulsares, es que un espectrómetro para pulsares está compuesto por un equipo de hardware y software, que procesa una inmensa cantidad espectros de forma rápida y continua, en donde cada uno de estos espectros es realizado por un espectrómetro digital.

Por esta razón, la parte inicial del trabajo consistió en profundizar y asimilar conceptos en base a los pulsares y a la radioastronomía, temas que para nosotros eran completamente desconocidos, y que posteriormente, luego de haber entendido estos conocimientos, quedamos sorprendidos acerca de lo interesante que pueden llegar a ser los pulsares.

Sin embargo, en este trabajo por falta de instrumental (ROACH 2) no se logró concretar este espectrómetro para pulsares, ya que la Red Pitaya no posee la capacidad de trabajar con una gran transferencia de datos, además de no estar conectado al back-end del radiotelescopio.

De igual consideración, es importante mencionar que el mismo se logró utilizando una herramienta inusual para nosotros. Por lo tanto el estudio realizado en la plataforma Simulink, concluyó en la correcta implementación y funcionamiento de los programas realizados. Este broche es una conclusión importante para quienes realizaron este trabajo, y por eso se debe mencionar.

Otra conclusión importante a considerar surge a partir de la correcta implementación de la plataforma Red Pitaya a lo largo de este trabajo. Esta adecuada ejecución brindó dar un cierre completo al ciclo de tareas y trabajos realizados en el IAR, ya que previo a la realización de este trabajo, los autores realizaron la PPS (Practica Profesional Supervisada) en el instituto.

Por este motivo y en base a la capacitación recibida en la PPS, lograr realizar y diseñar un espectrómetro de forma exitosa, fue clave para comprender y dar un cierre a todos los conceptos adquiridos a lo largo de nuestro transcurso en el IAR.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

De esta manera, se deja asentado que estuvimos en contacto con señales reales y entendimos la manera de trabajar con estas, durante el trabajo realizado en la PPS. Esto se relaciona con el hecho de que no pudimos implementar pruebas con señales reales sobre la Red Pitaya. El hecho por el cual no fue posible utilizar señales reales en este trabajo resulta de la necesidad de diseñar y construir un módulo de adaptación apropiado para la Red Pitaya, lo cual se escapaba a los objetivos principales de este trabajo, que solo consistía en la realización digital del mismo.

El trabajo a realizado en la PPS consistió en desarrollar un programa para un receptor digital. El fin de este programa era determinar la densidad espectral de potencia y la potencia de cada tiempo de integración (subtiempos de observación) y la de observación total proveniente de alguna radiofuente.

Hoy día, a partir de la situación actual, el Instituto se encuentra con las puertas cerradas, por lo tanto, es imposible compartir con los evaluadores los procedimientos de lo realizado, ya que la forma adecuada para demostrarlo, tendría que ser en el laboratorio de electrónica del IAR (Imagen 43). Esta demostración se llevaría a cabo por medio de un generador de señales, el cual inyectaría señales sinusoidales con distintos valores de frecuencia y potencia a la plataforma Red Pitaya (imagen 44). Por otro lado, y distante a unos metros, a través de una computadora, se analizaría los espectros recreados, tanto el generado por software del mismo instrumento, como así también el diseñado por nosotros por medio de la herramienta Simulink.

2. Trabajos futuros

En esta sección se explicara brevemente los trabajos que se pueden llegar a desarrollar a partir este, que, por cuestiones de tiempo y falta de instrumental no se lograron concretar.

 En primer lugar, un futuro trabajo a realizar sería diseñar y construir un módulo de adaptación entre el front-end y el back-end. Esta adaptación consiste en la disminución de la frecuencia IF del front-end a banda base. En este trabajo por la ausencia de este módulo, por la extensión del trabajo y por falta de tiempo, no se logró ensayar la Red Pitaya con señales reales provenientes de alguna de las radiofuentes.

Sin embargo, por más que no suene complicado realizar el módulo de adaptación, requiere de un gran trabajo, y tal es así, que podría originar un trabajo final.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

- Otro futuro trabajo a realizar consistiría en compilar y corroborar las prácticas realizadas en este trabajo cuando se adquiera la tan ansiada plataforma, ya que hoy en día el IAR no cuenta con la ROACH 2.
- Otro trabajo que se puede desarrollar a partir de este es: continuar con el resto de las practicas brindadas por CASPER, para la plataforma ROACH 2. Al igual que en este trabajo, dichas prácticas se pueden compilar por medio de una simulación para verificar su correcto desempeño, y sin necesidad de utilizar la plataforma.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

BIBLIOGRAFIA

[1] Acerca de la ROACH 2. Consultado en: https://casper.ssl.berkeley.edu/wiki/Main_Page

[2] Practicas ROACH 2. Obtenido de: <u>https://casper.ssl.berkeley.edu/wiki/Tutorials#Introduction</u>

[3] Hoja de datos del módulo ADC AT84AD001B. Obtenido de: <u>https://www.teledyne-e2v.com/products/semiconductors/adc/at84ad001b/</u>

[4] Acerca de la Red Pitaya. Obtenido de: https://redpitaya.readthedocs.io/en/latest/

[5] Practicas Red Pitaya. Obtenido de: <u>https://casper-</u> toolflow.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/tutorials/redpitaya/red_pitaya_setup .html

[6] Jesús López (2007). Técnicas de radioastronomía. Obtenido de: <u>http://www.astro-udec.cl/nagar/lopezlocal.html</u>

[7] Acerca de receptores radioastronómicos. Consultado en: https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias y tecnologia/020001.pdf

[8] Peter L. McMahon (2008). Adventures in Radio Astronomy Instrumentation and Signal Processing.

[9] JPL- Jet Propulsion Laboratory & Diane Fisher Miller (1998). Basics of Radio Astronomy. Obtenido de:

https://www2.jpl.nasa.gov/radioastronomy/

[10] Richard Porcas. Introduction to Radio Astronomy. Obtenido de: <u>https://www.mpifr-bonn.mpg.de/1041051/Porcas_Intro_Radio.pdf</u>

[11] Acerca sobre Estrellas de neutrones consultado en: <u>https://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/qu-ocultan-las-</u> <u>estrellas-de-neutrones-765/el-interior-de-las-estrellas-de-neutrones-17432</u>

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

[12] Trabajo final de ingeniería - Diseño de un esquema para la adquisición y procesamiento de señales radioastronómicas en la banda 1420 MHz - Urrego & Cano – 2015.

[13] UIT -Unión Internacional de Telecomunicaciones (2013). Manual sobre Radioastronomía 3° edición.

[14] CASPER, Collaboration for Astronomy Signal Processing and Electronics Research (2016). A Decade of Developing Radio-Astronomy Instrumentation using CASPER Open-Source Technology.

[15] Trabajo final de ingeniería - Diseño e implementación de un espectrómetro de alta resolución basado en FPGA para el análisis de señales radioastronómicas - Sapunar – 2015.

[16] Jonathan M. Marr, Ronald I. Snell, Stanley E. Kurtz. (2016).Fundamentals of Radio Astronomy, Observational Methods.

[17] Trabajo final de master - Espectrómetros digitales de banda ancha con FPGA - Cortes - 2014.

REFERENCIAS:

- Prácticas profesionales supervisadas (PPS's) realizadas por los integrantes de este trabajo previo a este proyecto.
- Trabajo de reunión de astronomía: http://www.astronomiaargentina.org.ar/b61b/BAAA_61B_2020.pdf

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

GLOSARIO

- <u>Amplificador</u>: es un circuito electrónico capaz de incrementar la intensidad de corriente o tensión de una señal aplicada en su entrada, dando como resultado la señal aumentada a la salida.
- <u>Antena</u>: es un dispositivo metálico con formas muy diversas, diseñado con el objetivo de emitir y/o recibir ondas electromagnéticas hacia el espacio libre.
- <u>Back-end</u>: elemento que le sigue al front-end, en caso de ser receptora, su función es procesar los datos digitalmente.
- <u>Espectro</u>: se refiere al rango completo de todas las frecuencias de radiación electromagnéticas y también a la distribución característica de la radiación electromagnética emitida o absorbida por un objeto en particular.
- <u>Espectrómetro</u>: instrumento que se usa para medir las propiedades sobre una porción específica del espectro electromagnético, además de medir sus longitudes de onda e intensidades.
- <u>Filtro</u>: es un circuito o elemento que selecciona o atenúa una frecuencia o rango de frecuencias.
- <u>Front-end o receptor</u>: elemento que se encuentra a continuación de la antena, en caso de ser receptora, su función es transformar las ondas electromagnéticas en energía eléctrica.
- <u>Jansky</u>: es una unidad de potencia del brillo aparente de una radiofuente. La correspondencia de densidad es: 1 Jy = 10^{-26} W/(m²×Hz).
- <u>MATLAB</u>: plataforma de software de computo numérico con un entorno de desarrollo integrado, con lenguaje de programación propio.
- <u>Onda</u>: perturbación o agitación que se desplaza en un ambiente determinado, transmitiendo energía sin desplazamiento.
- <u>Polarización</u>: es una propiedad de las ondas, que especifica la orientación geométrica de las oscilaciones.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

- <u>Pulsar</u>: estrella de neutrones que emite por sus polos intensos campos de radiación magnética en intervalos regulares de tiempo, relacionados con el periodo de rotación de la estrella.
- <u>Python</u>: lenguaje de programación de código abierto, muy popular entre programadores.
- <u>Radiación</u>: es un fenómeno asociado a la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material.
- <u>Radioastronomía</u>: rama de la astronomía que estudia los objetos celestes y los fenómenos astrofísicos midiendo su emisión de radiación electromagnética en la región de radio del espectro.
- <u>Radiofrecuencia</u>: es un término que se aplica a la porción menos energética del espectro electromagnético, situada entre los 3 Hz y 300 GHz.
- <u>Radiofuente</u>: objeto del espacio exterior que emite radiación en la región de la radiofrecuencias, por lo general son objetos celestes.
- <u>Radiotelescopio</u>: sofisticado instrumento utilizado en la radioastronomía, compuesto por tres elementos principales: una antena, el front-end y el back-end.
- <u>Red Pitaya</u>: es una plataforma de hardware de código abierto destinado a ser una alternativa para muchos instrumentos caros de medición y control de laboratorio.
- <u>ROACH</u>: es una plataforma de procesamiento de software, con FPGA independiente, y diseñada exclusivamente para usos radioastronómicos.
- <u>Ruido</u>: se denomina ruido a toda señal no deseada que se mezcla con la señal útil, y que por lo general no se puede desafectar.
- <u>Señal</u>: tensión, corriente o potencia que se desea analizar debido a que contiene toda la información sobre algún fenómeno a estudiar.
- <u>Simulink</u>: es un entorno de programación visual de alto nivel diseñado por MATLAB, con el objetivo de programar a partir de bloques.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.

LISTA DE ABREVIATURAS:

- IAR: Instituto Argentino de Radioastronomía.
- SRA: servicio de radioastronomía.
- Hz: hertz.
- RF: frecuencia de radiofrecuencia.
- OL: oscilador local.
- IF o FI: frecuencia intermedia.
- ISM: medio interestelar.
- FPGA: del ingles field-programmable gate array. Arreglo de campos programables.
- VHDL: very high-level design language. Lenguaje de diseño de muy alto nivel
- ADC: del inglés analog-digital converter. Conversor analógico digital.
- Gsps: del ingles giga samples per second. Giga muestras por segundo.
- SNR: del inglés signal-to-noise ratio. Relación señal/ruido.
- LSB: del ingles Least Significant Bit. Voltaje de bit menos significativo.
- PFB: banco de filtro polifásico.
- FFT: del ingles Fast Fourier Transform. Transformada rápida de Fourier.
- GbE: gigabit Ethernet.
- FWHM: del ingles Full Width at Half Maximum. Angulo del ancho total a la mitad de la máxima potencia.
- dB: decibel.
- PPS's: práctica profesional supervisada .
- CASPER: del ingles Collaboration for Astronomy Signal Processing and Electronics Research. Centro de Procesamiento de Señales astronómicas e Investigación Electrónica.
- V: volt.
- ENOB: del ingles Effective Number Of Bits. Número efectivo de bits.
- W: watt.
- A: ampere.
- DFT: transformada de Fourier discreta.
- SFDR: rango dinámico libre de espurias.
- Dbfs: decibel full scale.
- BW: ancho de banda.
- ROACH: Reconfigurable Open Architecture Computing Hardware.

Desarrollo de las herramientas CASPER para diseño de instrumentación radioastronómica de alto rendimiento.