

Synthetic FRB generator

Bruno Pollarolo

Departamento de Astronomía e Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

22 de Abril, 2025



Contenido

1 Motivación

- Definiciones básicas
- Objetivos
- Resumen del proyecto CHARTS

2 Metodología

- Modelado de pulsos con `fitburst`
- Diseño en PL
- Inyección en ARTE y configuración experimental

3 Resultados

4 Conclusiones y pasos futuros

5 References

Contenido

1 Motivación

- Definiciones básicas
- Objetivos
- Resumen del proyecto CHARTS

2 Metodología

- Modelado de pulsos con `fitburst`
- Diseño en PL
- Inyección en ARTE y configuración experimental

3 Resultados

4 Conclusiones y pasos futuros

5 References

FRBs

⚡ Fast Radio Bursts (FRBs)

Los **FRBs** son estallidos de emisión de radio coherente extremadamente energéticos breves (de solo milisegundos), provenientes de distancias cosmológicas. Las observaciones indican que algunos provienen de fuentes repetitivas, probablemente **magnetares**, objetos con los **campos magnéticos más intensos** del Universo (Zhang 2023).

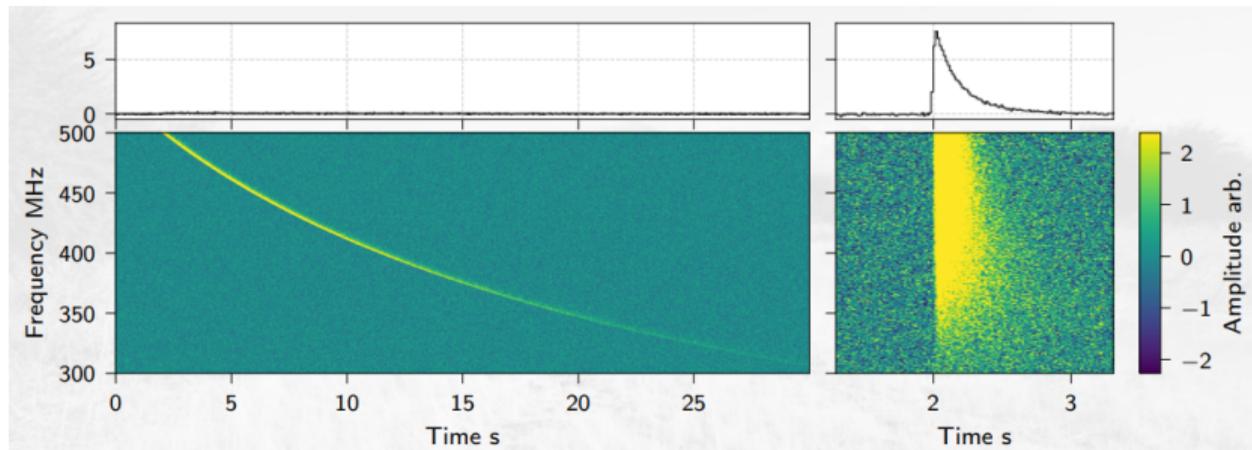


Fig.: Simulación de pulso en el rango $\Delta\nu = 300\text{--}500$ MHz usando una $DM = 1000 \text{ pc cm}^{-3}$ con fitburst (Fonseca et al. 2023)

Digitalizador: RFSoc 4x2

- **Zynq UltraScale+ RFSoc:** Sistema en chip altamente integrado para radiofrecuencia (RFSoc).
- Combina convertidores de datos RF y puertos QSFP+ de alta velocidad.
- Incorpora matriz FPGA (Field Programmable Gate Array).
- Incluye procesadores ARM Cortex para procesamiento embebido.

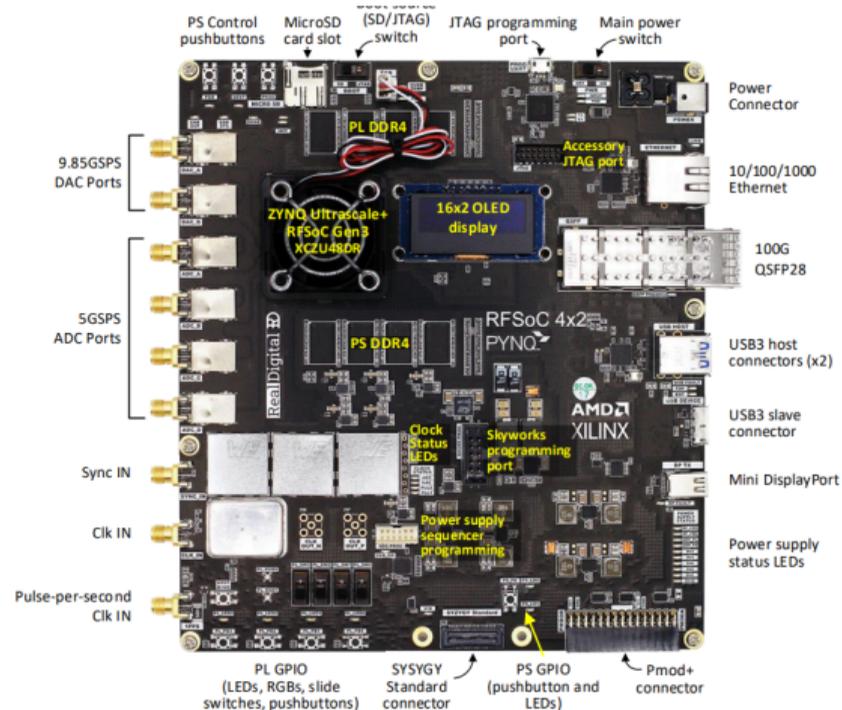


Fig.: Componentes principales de la placa RFSoc 4x2.

¿Qué es una FPGA?

- **FPGA** = Field Programmable Gate Array.
- Circuito integrado reconfigurable: puedes "reprogramar" su hardware.
- Ideal para tareas paralelas y procesamiento de señales en tiempo real.
- Actúa como un laboratorio de hardware en una sola pieza de silicio.

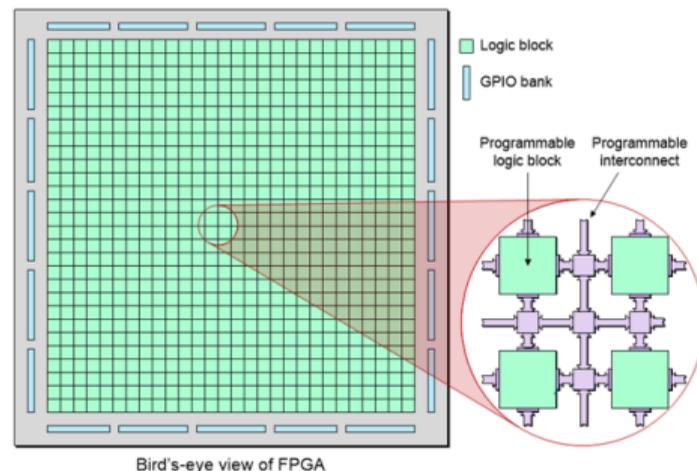


Fig.: Arquitectura interna: bloques lógicos y rutas reconfigurables.

"No es software corriendo sobre hardware... es hardware que tú defines con software."

FPGAs en Radioastronomía

¿Por qué FPGAs?

- Señales débiles → se requiere **procesamiento en tiempo real**.
- Espectroscopía, correlación y formación de haces.
- Requiere baja latencia y alta eficiencia energética.

CASPER:

- Plataforma colaborativa para instrumentación astronómica.
- Usa FPGAs y hardware reutilizable.
- Telescopios: HERA, CHIME, MeerKAT...



Fig.: Plataforma CASPER para radioastronomía digital.

Comparación: FPGA vs CPU, GPU, ASIC

Característica	CPU	GPU	FPGA	ASIC
Velocidad	●	✓	✓	✓✓
Flexibilidad	✓	✓	✓✓	✗
Consumo energético	✗	●	✓	✓✓
Costo inicial	✓	✓	●	✗
Tiempo de diseño	✓	✓	●	✗

✓✓= excelente, ✓= bueno, ●= medio, ✗= malo

💡 Conclusión

FPGAs ofrecen el equilibrio perfecto entre **velocidad**, **adaptabilidad** y **eficiencia**, ideal para sistemas embebidos y procesamiento en tiempo real.

Motivación y objetivos

- Generador sintético de FRB capaz de transmitir una secuencia de voltaje correspondiente a un pulso simulado de FRB.
- Desarrollar un sistema de inyección capaz de probar las antenas de CHARTS (CHARTS-8) en etapas tempranas.
- Desarrollar un espectrómetro de alto ancho de banda capaz de digitalizar 8 antenas por ADC (Analog to Digital Converter).



Fig.: Pruebas del sistema generador de FRB sintéticos.

CHARTS

CHARTS: *Canadian Chilean Array for Radio Transient Studies*

- Objetivo del proyecto: Construir un interferómetro de apertura con 256 elementos.
- Filosofía: Optimizar el costo y la tasa de detección de FRBs.
- Digitalización de señales desde 32 antenas en un solo digitalizador \Rightarrow 8 digitalizadores para toda la matriz.
- **Objetivo de la tesis:** Diseño e implementación del F-engine (Fourier transform).

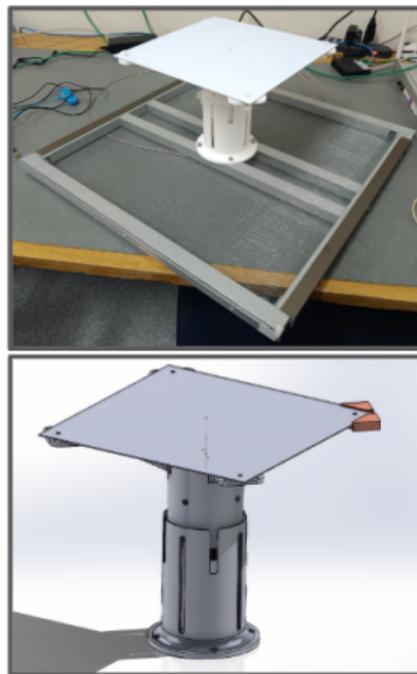


Fig.: Antena desarrollada en Cerro Calán por el MSc. Diego Gallardo y construida por la interna Sophie Terán.

Espectrómetro CHARTS

- FFT única con 8192 canales (desde DC hasta 2457.6 MHz)
- 667 canales por antenna ($\Delta\nu = 200$ MHz)
- Ancho de banda efectivo de 2.4576 GHz
- Ancho de canal de 300 kHz
- Resolución temporal por trama de 3.33 μ s

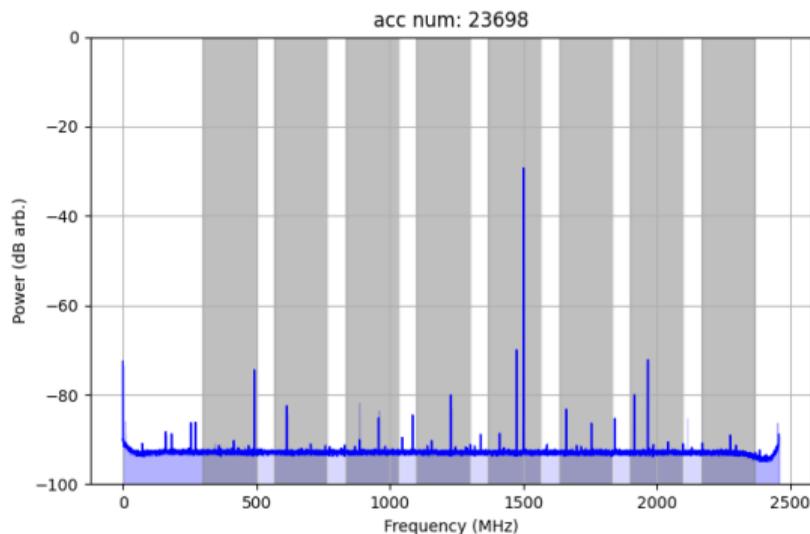


Fig.: Espectrómetro de 18 bits operando con un tono inyectado de -30 dBm a 1.5 GHz.

Tabla de contenidos

1 Motivación

- Definiciones básicas
- Objetivos
- Resumen del proyecto CHARTS

2 Metodología

- Modelado de pulsos con fitburst
- Diseño en PL
- Inyección en ARTE y configuración experimental

3 Resultados

4 Conclusiones y pasos futuros

5 References

Modelado de pulsos con fitburst (Fonseca et al. 2023)

■ Componentes del modelo:

- Distribución espectral de energía dependiente de frecuencia (F_k)
- Forma temporal dispersa (T_{kn})
- Amplitud global (A)

■ Modelo completo: Superposición de pulsos individuales

$$M_{kn} = \sum_{l=1}^N A_l F_{k,l} T_{kn,l}$$

donde:

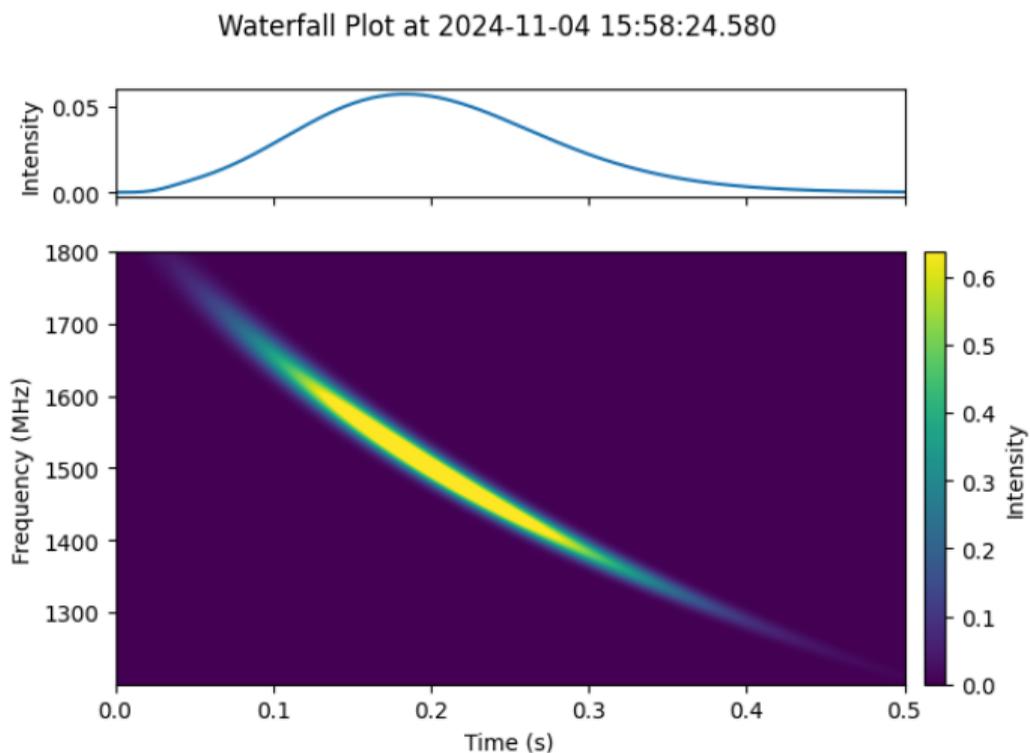
- $F_{k,l} = \left(\frac{\nu_k}{\nu_r}\right)^{\gamma_l + \beta_l \ln\left(\frac{\nu_k}{\nu_r}\right)}$
- $A_l = 10^{\alpha_l}$
- $T_{kn,l} = \left(\frac{\nu_k}{\nu_r}\right)^{-\delta} \exp\left(\frac{-\sigma_l^2}{2\tau_k^2} - \frac{(t_{kn} - t_{0,l})}{\tau_k}\right) \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{t_{kn} - (t_{0,l} + \sigma_l^2/\tau_k)}{\sigma_l\sqrt{2}}\right)\right]$
- $\tau_k = \tau_r \left(\frac{\nu_k}{\nu_r}\right)^\delta$

Ejemplo de parámetros del pulso

Table: Parámetros del pulso y valores de ejemplo para pulso inyectado en ARTE

Parámetro	Descripción	Valor
α_l	Exponente base-10 de la amplitud para el componente l	0.0
t_0	Tiempo medio de llegada al detector	0.15 s
σ_l	Ancho temporal del componente l	0.01 s
DM	Medida de dispersión	300 pc cm ⁻³
ν_r	Frecuencia electromagnética de referencia (“pivot”)	1500 MHz
δ	Exponente de dependencia en frecuencia para scattering	-4
τ_r	Tiempo característico de scattering en ν_r	0 s
γ_l	Índice espectral del componente l	0.0
β_l	Derivada espectral (spectral running) del componente l	-100.0
N_ν	Número de canales de frecuencia electromagnética	2048
$\Delta\nu$	Ancho de banda total del receptor	1200–1800 MHz
t_{tot}	Tiempo total de la observación	0.5 s
S	Tamaño del arreglo de voltaje	1.86 GB

Pulso canalizado



Configuración de prueba en loopback con RFSoc

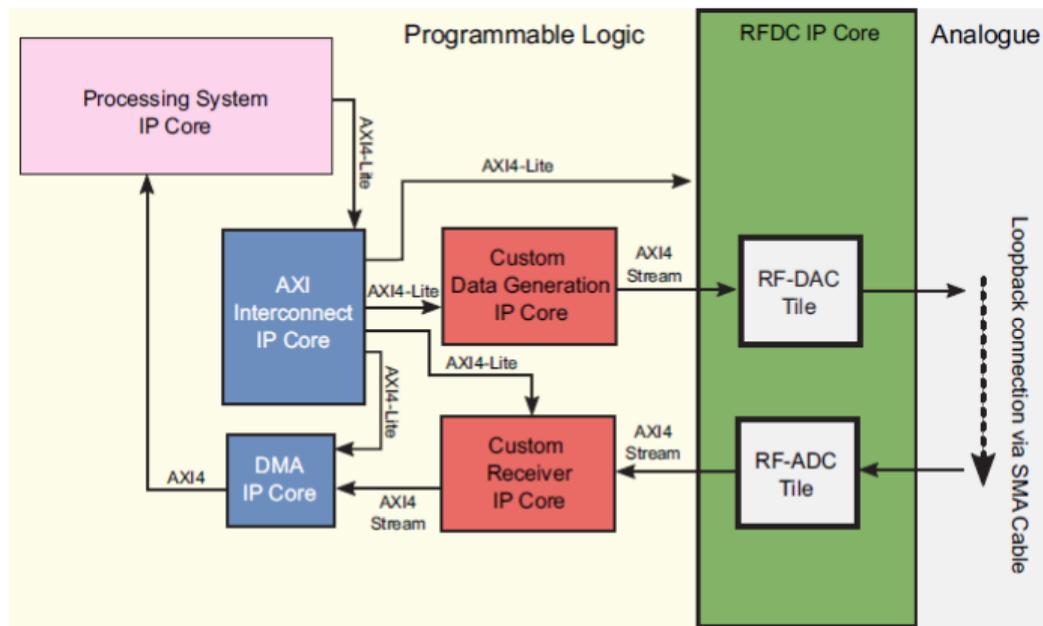


Fig.: Vista general de alto nivel de un diseño simple en IP Integrator para transmisión y recepción de datos (Crockett et al. 2023).

Diseño en bloques

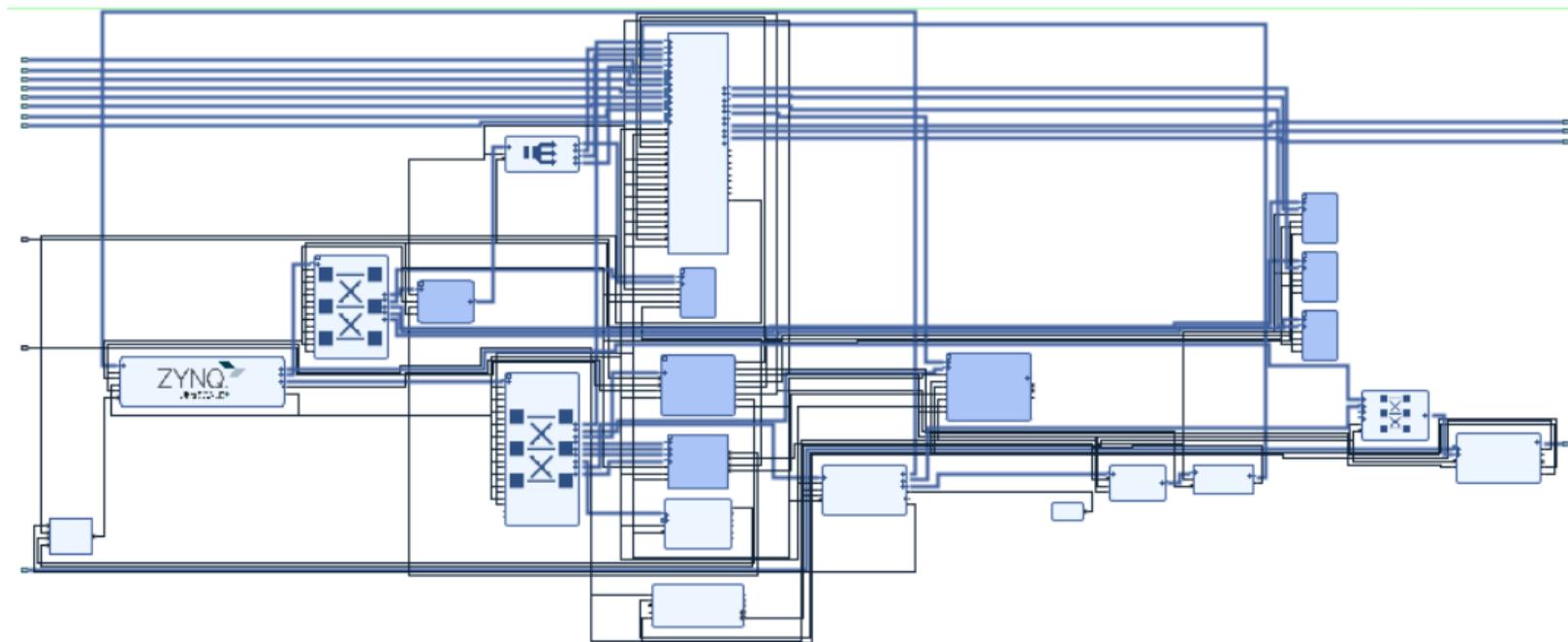


Fig.: Vista general del diseño en bloques en Vivado.

Aumentando la memoria

- El núcleo DMA por defecto está limitado a 64 MB por transacción.
- La mejor y más simple solución fue usar DMA en modo Scatter-Gather.
- Esto permite transferir datos desde ubicaciones fragmentadas o discontinuas de memoria. El modo Scatter-Gather puede habilitarse en el DMA para permitir transferencias mayores a 64 MB (desde buffers contiguos) ¹.

Component Name: axi_dma_dac

Enable Asynchronous Clocks (Auto)

Enable Scatter Gather Engine

Enable Micro DMA

Enable Multi Channel Support

Enable Control / Status Stream

Width of Buffer Length Register (8-26): 26 bits

Address Width (32-64): 40 bits

Enable Read Channel

Number of Channels: 1

Memory Map Data Width: 512

Stream Data Width: 256

Max Burst Size: 64

Allow Unaligned Transfers

Enable Write Channel

Number of Channels: 1

Memory Map Data Width: 32

Stream Data Width: 32

Max Burst Size: 16

Allow Unaligned Transfers

Use Plength In Status Stream

Fig.: Pantalla de configuración del DMA.

¹https://github.com/cathalmccabe/PYNQ_tutorials.git

Clocking del sistema en el RFDC

AXI4-Lite Interface Configuration

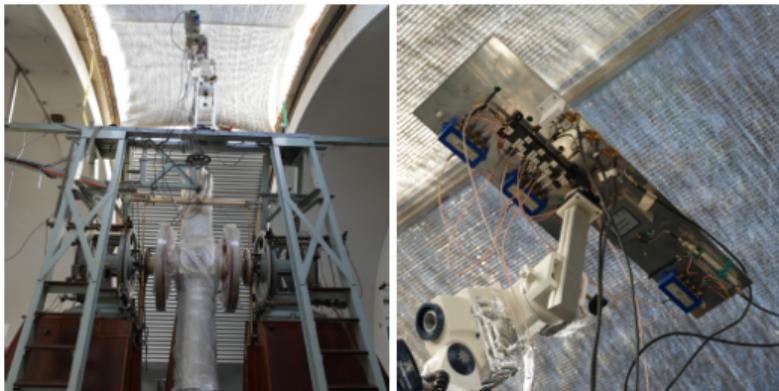
AXI4-Lite Clock (MHz)

Tile Clocking Settings

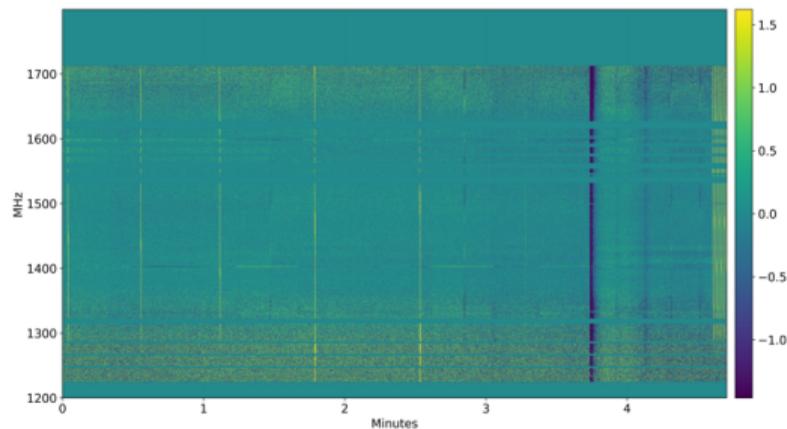
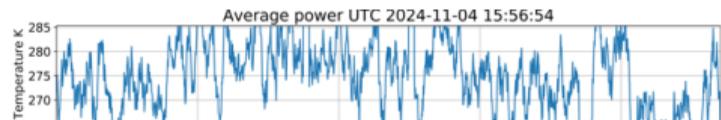
Tile	Sampling Rate (GSPS)	Max Fs (GSPS)	PLL	Reference Clock (MHz)	PLL Ref Clock (MHz)	Ref Clock Divider	Fabric Clock (MHz)	Clock Out (MHz)	Clock Source	Distribute Clock
ADC 224	1.6	5.000	<input type="checkbox"/>	1600.000	-	1	0.0	100.000	Tile224	Off
ADC 225	1.6	5.000	<input type="checkbox"/>	1600.000	-	1	0.0	100.000	Tile225	Off
ADC 226	2	5.000	<input checked="" type="checkbox"/>	500.000	500.0	1	250.000	15.625	Tile226	PLL output
ADC 227	1.6	5.000	<input type="checkbox"/>	1600.000	-	1	0.0	100.000	Tile227	Off
DAC 228	1.6	10.000	<input type="checkbox"/>	1600.000	-	1	0.0	200.000	Tile228	Off
DAC 229	1.6	10.000	<input type="checkbox"/>	1600.000	-	1	0.0	200.000	Tile229	Off
DAC 230	2	7.000	<input checked="" type="checkbox"/>	500.000	500.0	1	250.000	62.500	Tile230	PLL output
DAC 231	1.6	10.000	<input type="checkbox"/>	1600.000	-	1	0.0	200.000	Tile231	Off

Fig.: Pantalla de configuración de clocking del convertor de datos RF para 2 GSPS operando en la segunda zona de Nyquist.

Inyección en ARTE



(a) Ubicada en el edificio Meridiano del Observatorio Astronómico Nacional, la antena ARTE está diseñada para observar constantemente el centro galáctico y capturar eventos FRB locales.



(b) Inyecciones de 5 minutos variando la potencia de salida y la atenuación.

Configuración experimental



(a) RFSoc transmitiendo el pulso (filtro analógico de 1200-1800 MHz entre medio).



(b) Antena log-periódica en el techo del edificio Meridiano.

Tabla de contenidos

1 Motivación

- Definiciones básicas
- Objetivos
- Resumen del proyecto CHARTS

2 Metodología

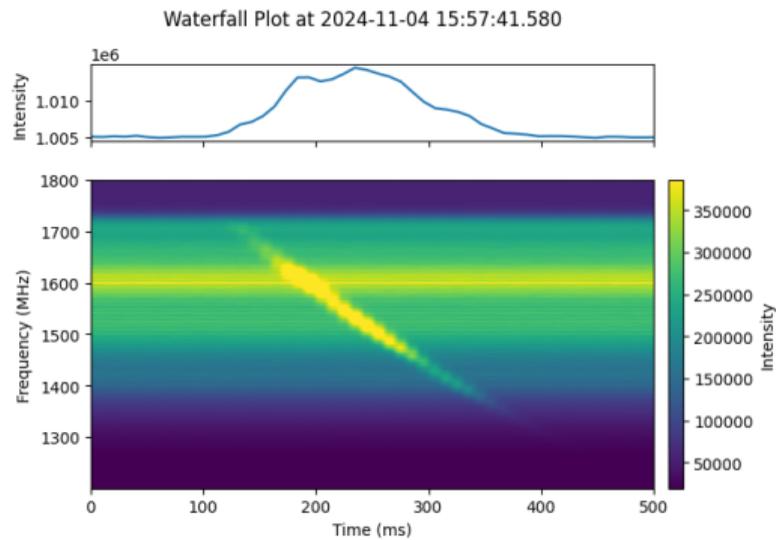
- Modelado de pulsos con `fitburst`
- Diseño en PL
- Inyección en ARTE y configuración experimental

3 Resultados

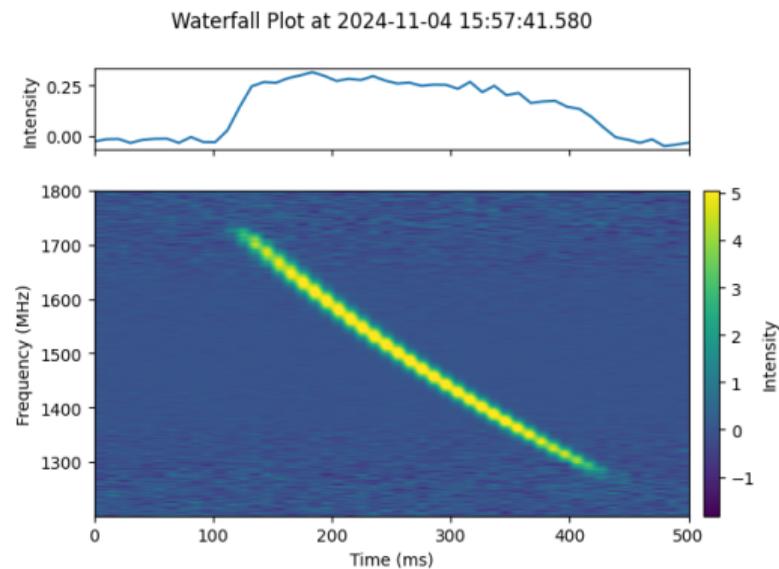
4 Conclusiones y pasos futuros

5 References

Pulso recibido



(a) Datos crudos.



(b) Normalizado por canales de frecuencia.

Dedispersión incoherente

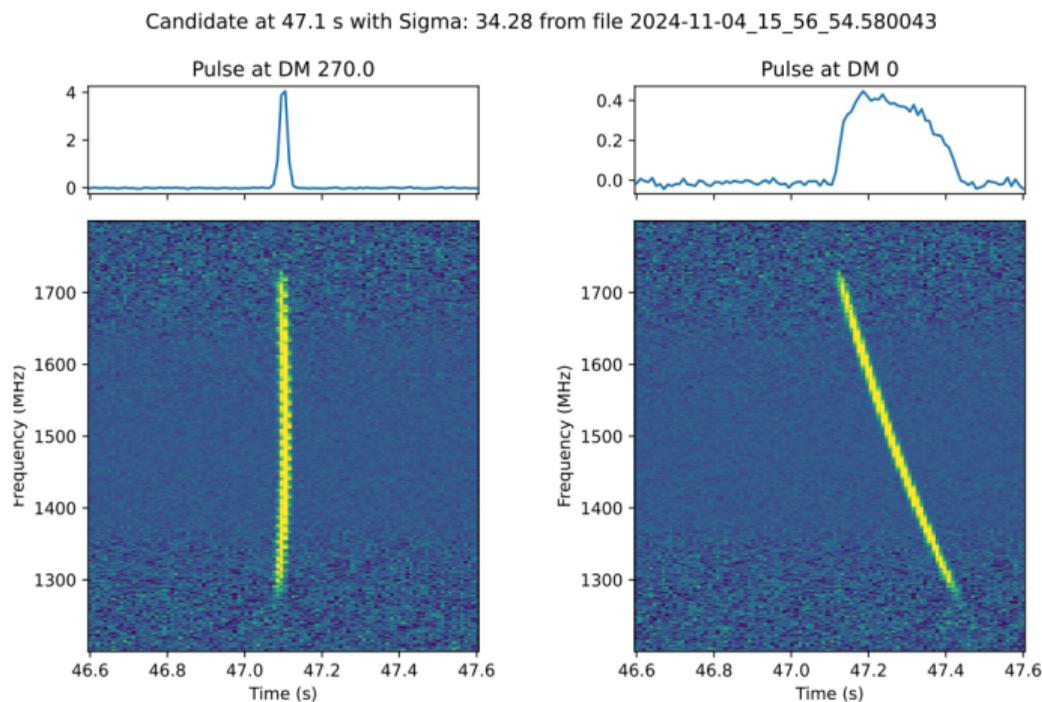


Fig.: Dedispersión incoherente aplicada al pulso recibido, con un DM resultante de 260 pc cm^{-3} (el valor simulado fue fijado en 300 pc cm^{-3}).

Diferencia

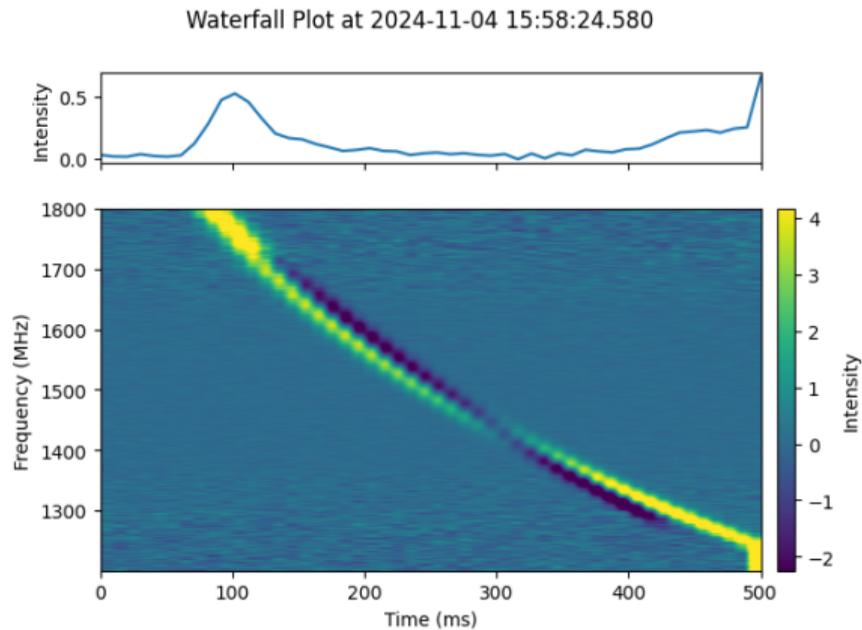


Fig.: Diferencia entre el pulso enviado y el recibido (con el mismo ancho temporal).

Conclusión y próximos pasos

- Realizar inyecciones directas en el nuevo espectrómetro CHARTS.
- Probar el sistema en el ancho de banda de CHARTS con CPT (espectrómetro de una antena) y CHARTS-8 que pronto será desplegado.
- Explorar otras combinaciones de parámetros del pulso y verificar cómo se traducen estas diferencias al analizar los pulsos recibidos.



Fig.: Telescopio Path Finder CHARTS (CPT).

References

Crockett, L. H., Northcote, D., & Stewart, R. W. 2023, Software Defined Radio with Zynq UltraScale+ RFSoc, ed.

U. o. S. Department of Electronic & Electrical Engineering (Glasgow, Scotland, UK: Strathclyde Media)

Fonseca, E., Pleunis, Z., Breitman, D., et al. 2023, arXiv e-prints, arXiv:2311.05829, doi: [10.48550/arXiv.2311.05829](https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.05829)

Zhang, B. 2023, Reviews of Modern Physics, 95, 035005, doi: [10.1103/RevModPhys.95.035005](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.95.035005)