

# Tabla de Contenido

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Marco Teórico y Estado del Arte</b>	<b>3</b>
1.1. Arreglos y Filtros Espaciales . . . . .	3
1.1.1. Arreglo lineal uniforme . . . . .	5
1.1.2. Giro de la dirección de máxima respuesta . . . . .	6
1.1.3. Arreglos planares . . . . .	7
1.2. Antenas . . . . .	9
1.2.1. Conceptos y parámetros básicos . . . . .	9
1.2.2. Antenas tipo parche . . . . .	10
1.3. Mezcladores como convertidores hacia abajo . . . . .	11
1.4. Divisores de potencia de Wilkinson . . . . .	11
1.5. Procesamiento digital en el dominio de la frecuencia . . . . .	12
1.5.1. Transformada de Fourier Discreta . . . . .	12
1.5.2. Espectrometría . . . . .	13
1.6. Estado del arte . . . . .	14
1.6.1. Técnicas modernas de <i>beamforming</i> . . . . .	14
1.6.2. Parámetros de desempeño . . . . .	14
<b>2. Experimento y <i>hardware</i> desarrollado</b>	<b>16</b>
2.1. Descripción general del experimento . . . . .	16
2.1.1. Coherencia de fase en el sistema . . . . .	17
2.1.2. Pruebas del sistema . . . . .	18
2.2. Arreglo de Antenas . . . . .	18
2.3. Electrónica de Down-Conversion . . . . .	19
2.3.1. Implementación de tarjetas de <i>down-conversion</i> en base al integrado <i>MAX2851</i> . . . . .	20
2.3.2. <i>Software</i> de control . . . . .	20
2.3.3. Calibración de ganancias . . . . .	22
2.3.4. Consumo energético . . . . .	23
2.4. Otros componentes y alternativas de bajo costo . . . . .	23
2.4.1. Down-convertidores no programables . . . . .	23
2.4.2. Divisor de potencia 1:4 . . . . .	24
2.5. Electrónica digital . . . . .	25
2.5.1. ROACH2 . . . . .	25
2.5.2. Convertidor A/D de 16 canales . . . . .	25

<b>3. Diseño del sintetizador e implementación digital</b>	<b>27</b>
3.1. Arquitectura del sintetizador de haces . . . . .	27
3.1.1. Conversión A/D y transformación al dominio de la frecuencia . . . . .	28
3.1.2. Calibración de fases . . . . .	30
3.1.3. Procesador del arreglo . . . . .	31
3.2. Instrumentos: adquisición de datos y controles . . . . .	33
3.2.1. Espectrómetros . . . . .	33
3.2.2. Integradores de potencia . . . . .	34
3.2.3. Oscilogramas en la entrada . . . . .	35
3.2.4. Registros accesibles por el usuario . . . . .	37
3.3. Cálculo de fasores de síntesis de haces . . . . .	39
3.4. Resumen de recursos utilizados . . . . .	40
<b>4. Resultados y Discusión</b>	<b>41</b>
4.1. Caracterización del sistema . . . . .	41
4.1.1. Comportamiento del sistema alimentado con señal sintética . . . . .	41
4.1.2. Comportamiento del sistema con arreglo montado . . . . .	43
4.2. Mejoras propuestas . . . . .	46
4.2.1. Optimización de configuraciones . . . . .	46
4.2.2. Añadir más <b>beamformer</b> . . . . .	46
4.3. Potencialidades del sistema . . . . .	47
4.3.1. Potencialidades para <i>imaging</i> . . . . .	47
4.3.2. Potencialidades para comunicaciones . . . . .	47
<b>Conclusión</b>	<b>49</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>50</b>
<b>Anexos</b>	<b>52</b>
<b>A. Instrucciones de uso</b>	<b>52</b>
<b>B. Excentricidad de Patrones</b>	<b>53</b>
<b>C. Rutinas en Python</b>	<b>55</b>
C.1. Rutina <code>main.py</code> . . . . .	55
C.2. Rutina <code>measure_psf.py</code> . . . . .	58
<b>D. <i>Software</i> de tarjetas de <i>down-conversion</i></b>	<b>61</b>
D.1. Tabla de calibración de <code>vga_gain</code> . . . . .	61
D.2. Clase <code>Mixer</code> . . . . .	61
D.3. Runtina de inicialización . . . . .	65
<b>E. Reporte de utilización de recursos</b>	<b>66</b>
<b>F. Modelo completo en Simulink</b>	<b>68</b>
<b>G. Esquemáticos y Gerbers de la etapa de <i>down-conversion</i></b>	<b>70</b>

# Índice de Tablas

2.1. Medidas relevantes del arreglo. . . . .	19
2.2. Frecuencias de resonancia, en GHz, de cada elemento del arreglo. . . . .	19
2.3. Modos de operación adc16x250-8 . . . . .	25
3.1. Registros configurables por el usuario. . . . .	37
3.2. Registros para gatillar adquisición de datos y aplicar cambios de parámetros. . . . .	38
D.1. Valores de <code>vga_gain</code> (dB) para calibración. . . . .	61

# Índice de Ilustraciones

1.1. Diagrama general de un arreglo para procesar señales. . . . .	3
1.2. Ejemplo simple de un arreglo arbitrario que recibe un frente de onda plano. .	4
1.3. Ejemplo de arreglo lineal uniforme. . . . .	6
1.4. Ejemplo de función de transferencia para un arreglo de 21 elementos . . . . .	7
1.5. Patrón de radiación girado del arreglo . . . . .	8
1.6. Arreglo planar rectangular uniforme. . . . .	8
1.7. Ejemplo de antena tipo parche . . . . .	10
1.8. Mezclador y conversión de frecuencia. . . . .	11
1.9. Divisor de Wilkinson . . . . .	12
1.10. Ejemplo de un espectro . . . . .	13
2.1. Esquema general del experimento. . . . .	16
2.2. Montaje completo del <i>hardware</i> de recepción. . . . .	17
2.3. Diseño del arreglo de 16 antenas tipo parche. . . . .	19
2.4. Parámetro $S_{11}$ medido de una de las antenas del arreglo. . . . .	19
2.5. Patrón de radiación del arreglo simulado. . . . .	20
2.6. Tarjetas de down-conversion . . . . .	21
2.7. Conexiones de la placa de distribución. . . . .	21
2.8. Efecto de la calibración de ganancias en tarjetas de <i>down-conversion</i> . . . . .	22
2.9. Alternativa analógica. . . . .	23
2.10. Divisor de potencia de dos etapas . . . . .	24
2.11. Parámetros de dispersión del divisor de dos etapas. . . . .	24
2.12. ROACH 2 utilizada. . . . .	26
3.1. Arquitectura del sistema. . . . .	27
3.2. Transformada rápida de Fourier y filtro polifásico implementados. . . . .	28
3.3. Efecto de la retención de muestras en los espectros. . . . .	29
3.4. Esquema del cálculo de desfases. . . . .	30
3.5. Bloque <i>beamformer</i> para sintetizar haces. . . . .	32
3.6. Multiplicador conjugado implementado para el cálculo de desfases para una señal. . . . .	34
3.7. Cálculo de potencia implementado para una señal. . . . .	34
3.8. Implementación de acumuladores y memorias compartidas para dos señales. .	35
3.9. Implementación de los integradores de potencia. . . . .	35
3.10. Implementación de oscilogramas. . . . .	36
3.11. Visualización de oscilogramas. . . . .	36

3.12. Lógica para almacenar un fasor, dentro del banco de fasores. . . . .	39
3.13. Sistema de coordenadas del arreglo. . . . .	40
4.1. PSF del sistema en alimentado con una señal sintética. . . . .	42
4.2. Espectro de un <b>beamformer</b> alimentado con una señal sintética . . . . .	42
4.3. Espectro medido en la sala de pruebas. . . . .	43
4.4. PSF para fuente en distintas posiciones. . . . .	44
4.5. Cortes de planos $\theta$ y $\phi$ de las figuras 4.4a-4.4i. . . . .	45
B.1. Cortes de planos $\theta$ y $\phi$ de las figuras 4.5a-4.5i. . . . .	54