

Desarrollo de un Radar FM-CW en banda C para detección y caracterización de aves en parques eólicos

Daniel Colás Sánchez¹, Salvador Andrés Salueña¹, Carlos Heras Vila¹, Íñigo Salinas Áriz¹

¹ Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF), Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)
Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.
Tel. +34-976762707, e-mail: dcolas@unizar.es

Resumen

La colisión de aves con aerogeneradores es un reto ambiental creciente en España. Este trabajo presenta un radar FM-CW en banda C sobre plataforma SDR-FPGA reconfigurable para la detección y caracterización de aves en parques eólicos mediante análisis de la firma micro-Doppler generada por el aleteo.

Introducción

La proliferación de parques eólicos plantea un reto ambiental crítico: la colisión de aves protegidas con aerogeneradores. Los sistemas actuales basados en visión artificial fallan en condiciones nocturnas o de baja visibilidad. El radar opera de forma continua e independiente de las condiciones atmosféricas, y el aleteo periódico de las aves genera una firma micro-Doppler característica [1,3] que permite diferenciarlas de otros blancos. Este trabajo, desarrollado dentro del Grupo de Tecnologías Fotónicas de la Universidad de Zaragoza [4], presenta un radar CW-FM en banda C sobre plataforma RFSoc con análisis micro-Doppler en entornos reales de parque eólico.

Firmware del sistema

El generador de señal chirp se implementa como una IP personalizada en una FPGA Zynq UltraScale+ RFSoc mediante Vitis HLS, codificada en C/C++. La IP genera una secuencia de Frequency Tuning Words (FTW) que alimenta un sintetizador digital directo (DDS), controlando la frecuencia instantánea de la señal. La configuración de los parámetros del chirp se realiza en tiempo real desde Python/PYNQ a través de una interfaz AXI-Lite, sin necesidad de resintetizar el hardware en Vivado.

Arquitectura hardware

El sistema adopta una arquitectura homodina en banda C [Figura 1]. La señal chirp ($B = 50$ MHz, rampa de $60 \mu\text{s}$, frecuencia central 5 GHz, resolución en rango $c/2B = 3$ m) se genera a $2,5$

GHz en el DAC y se traslada a 5 GHz mediante un multiplicador $\times 2$. La cadena analógica integra cuatro etapas: generación, transmisión mediante amplificador GaN, recepción, y adquisición mediante mezcla coherente con la señal transmitida como referencia local, obteniendo la señal de frecuencia intermedia que se digitaliza en el ADC del RFSoc.

Pruebas de campo y resultados

El sistema fue desplegado en un parque eólico de Aragón (Figura 2), donde el entorno con aerogeneradores activos ofrece un escenario de evaluación exigente: clutter intenso procedente de las palas rotatorias, terreno llano y condiciones atmosféricas variables. La plataforma, alimentada desde red y montada sobre un mástil de medida, demostró su operatividad en condiciones reales sin modificaciones hardware.

La Figura 3 muestra el waterfall obtenido durante una medida de campo. Las trazas diagonales en la zona izquierda de la imagen corresponden a las palas del aerogenerador cercano, con una firma periódica claramente identificable. En la zona central se aprecia la trayectoria lineal de un blanco móvil, que corresponde con el paso de un dron a distancia media. La zona derecha muestra retornos periódicos asociados a un segundo aerogenerador más lejano.

Por otra parte, la firma micro-Doppler del aleteo se manifiesta como modulaciones periódicas en torno al Doppler principal del blanco (Figura 4). A diferencia del clutter de las palas rotatorias, que presenta una cadencia regular y amplitud elevada, el aleteo de las aves genera componentes de menor amplitud y frecuencia variable según la especie, lo que permite su diferenciación. El sistema desarrollado, con su capacidad de análisis tiempo-frecuencia en tiempo real y resolución en rango está preparado para capturar estas firmas en escenarios reales, constituyendo la base para la clasificación de blancos mediante técnicas de aprendizaje automático.

Conclusiones

Se ha diseñado, implementado y validado en campo un radar FM-CW en banda C reconfigurable por software, capaz de detectar blancos móviles en un entorno real de parque eólico con clutter intenso. El sistema demuestra la viabilidad del análisis micro-Doppler para discriminar aves de otros blancos. El tratamiento de estas señales incluye la clasificación automática mediante técnicas de aprendizaje automático aplicadas a las firmas MDS y la incorporación de procesamiento Doppler con mitigación activa de clutter.

Referencias

- [1]. CHEN, V.C., LI, F., HO, S.-S., and WECHSLER, H. Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon, model, and simulation study. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 2006, 42(1), 2-21.
- [2]. STOVE, A.G. Linear FMCW radar techniques. *IEE Proceedings, Part F: Radar and Signal Processing.* 1992, 139(5), 343-350.
- [3]. HOFFMANN, F., RITCHIE, M., FIORANELLI, F., CHARLISH, A., and GRIFFITHS, H. Micro-Doppler based detection and tracking of UAVs with multistatic radar. *Proceedings of IEEE Radar Conference.* 2016.
- [4]. ANDRÉS, S., HERAS, C., OCABO, A., LANZUELA, J., et al. FMCW radar for 3D tracking based on MLBI interferometer and MDS estimation. Submitted to *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2024.

Figuras

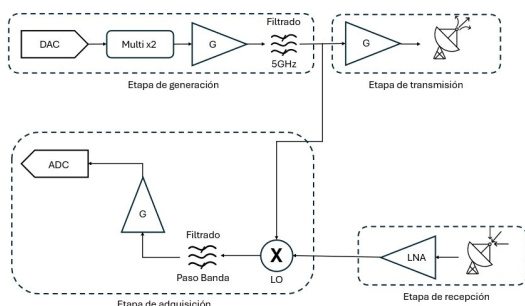


Fig. 1. Esquema hardware del sistema radar FM-CW homodino en banda C.

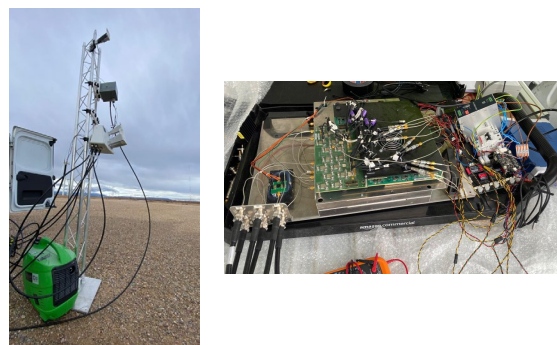


Fig. 2. Montaje de la torre de antenas (izquierda) y sistema radar (derecha) en el parque eólico.

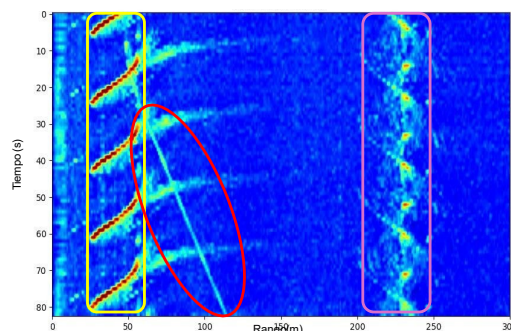


Fig. 3. Waterfall obtenido en campo: aerogenerador cercano (amarillo), blanco móvil (rojo) y aerogenerador lejano (rosa).

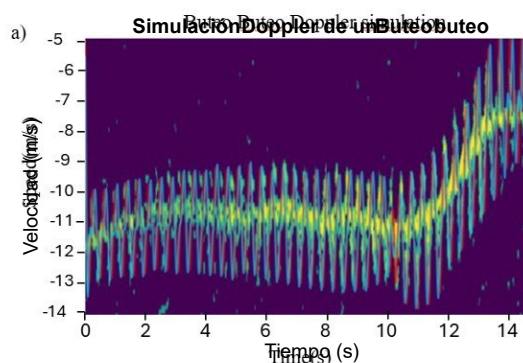


Fig. 4. Firma micro-Doppler de un Buteo buteo (ave rapaz de tamaño medio) con aleteo en vuelo de ~ 3 Hz.