

Caracterización de la capa superficial del manto nivoso mediante la reflectancia compleja en microondas. Estimación de densidad y contenido de agua líquida con un radar SFCW

Adrián Subías Martín, Iñigo Salinas, Víctor Herráiz-López, Rafael Alonso

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

Resumen

Se presenta un método para estimar la densidad y el contenido de agua líquida en la capa superficial del manto nivoso a partir de la amplitud y fase del coeficiente de reflexión. Se valida mediante simulaciones y medidas experimentales, mostrando alta coherencia física y potencial para monitorización continua no invasiva.

Introducción

El manto nivoso constituye un elemento clave en el ciclo hidrológico de regiones de montaña, actuando como un reservorio temporal cuya evolución condiciona la disponibilidad de recursos hídricos [1]. En particular, la capa superficial desempeña un papel fundamental, ya que controla los intercambios de energía con la atmósfera y regula procesos como la fusión, la recongelación o la infiltración de agua líquida.

Las variables que describen el estado físico del manto nivoso son la densidad y el contenido de agua líquida (LWC). La presencia de agua líquida modifica de forma significativa las propiedades electromagnéticas del medio, introduciendo pérdidas dieléctricas significativas. Sin embargo, la estimación simultánea y no invasiva de estas variables sigue siendo un reto, debido a su fuerte interdependencia y a la complejidad del problema inverso asociado.

Modelo electromagnético

En el rango de frecuencias considerado (0.6-6 GHz), el aire y el hielo pueden considerarse no dispersivo y sin pérdidas, con índices de refracción reales y con valores constantes de 1 y de 3.2, respectivamente. Por el contrario, el agua líquida tiene un valor de índice de refracción real de aproximadamente 8.9 y valores significativos en la parte imaginaria, siendo el principal responsable de la atenuación de la señal

electromagnética [2]. Esta diferencia permite, en principio, desacoplar las contribuciones de densidad y contenido de agua líquida a partir de la respuesta electromagnética. La construcción del índice efectivo del manto nivoso se calcula como la fracción volumétrica de cada material por su índice de refracción complejo [3] (Ecuación 1).

$$n = \phi_{Ag}n_{Ag} + (1 - \phi_{Ag})(\phi_{Ai}n_{Ai} + \phi_Hn_H) \quad (1)$$

Metodología

El coeficiente de reflexión complejo en la interfaz aire-nieve se obtiene a partir de la señal medida en frecuencia por un radar SFCW (Stepped-Frequency Continuous-Wave) [4]. Mediante la aplicación de la transformada inversa de Fourier (IFT) se calcula el reflectograma en el dominio espacial, en el que se identifica el pico asociado a dicha interfaz. La amplitud de este pico se normaliza respecto a la amplitud obtenida de una capa con coeficiente de reflexión igual a 1 (Figura 1). La fase se corrige eliminando la contribución asociada a la propagación de la onda electromagnética, de modo que únicamente se conserva la fase intrínseca del coeficiente de reflexión en la interfaz. A partir de estas dos magnitudes se reconstruye el coeficiente de reflexión complejo, que se invierte para obtener el índice de refracción efectivo de la capa superficial del manto nivoso (Ecuación 2).

$$\Gamma = \frac{1 - n_{superficial}}{1 + n_{superficial}} \quad (2)$$

Validación sintética

En primer lugar, se simula una monocapa de nieve en la que se incrementa progresivamente el contenido de agua líquida, manteniendo controladas el resto de propiedades físicas. Aplicando el procedimiento descrito en la metodología, los resultados reproducen las mismas curvas que las obtenidas mediante el cálculo numérico directo del índice complejo efectivo (Figura 2).

En segundo lugar, se analiza una estructura sintética compleja (3 capas). El método se aplica de forma idéntica, identificando la interfaz aire–nieve en la reflectancia y extrayendo sus propiedades asociadas. En este caso, el objetivo es analizar la posible influencia de la estratigrafía subyacente sobre la respuesta superficial, evaluando la interacción entre capas y los límites de aplicación del método en estructuras más complejas. Esta prueba permite comprobar la robustez inicial del enfoque antes de su aplicación a medidas experimentales reales.

Tabla 1. Recuperación propiedades multicapa

	LWC (%)	Density (Kg/m ³)
Capa simulada	10	307
Capa estimada	11	324

Validación experimental

Los resultados experimentales presentados corresponden a una intercomparación preliminar entre medidas adquiridas durante las campañas de observación realizadas a lo largo de esta temporada invernal y las medidas radar de esos días. El contenido en agua líquida se mide con un sensor tipo Snow Fork y la densidad con una cuña extractora.

Tabla 2. Comparación datos experimentales

Date	Snowpit measurement		Estimations based on Radar measurement	
	LWC (%)	Density (Kg/m ³)	LWC (%)	Density (Kg/m ³)
06/12/2025	2.75	235	2.9	204
30/12/2026	0	155	0	100
06/01/2026	1.1	416	2.5	426

Conclusiones

Se presenta un método novedoso basado en el análisis conjunto de la amplitud y la fase de la reflectancia obtenida mediante la IFT aplicada a

señales radar SFCW. El enfoque muestra una alta coherencia física, permitiendo interpretar de forma consistente las propiedades electromagnéticas de la capa superficial del manto nivoso. Este trabajo constituye un primer paso hacia la resolución del problema de inversión electromagnética completo. Los resultados experimentales preliminares muestran un elevado potencial del método.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado en parte por los proyectos PID2021-124451OB-I00 y TED2021-131180B-I00, cofinanciados por MICIU/AEI/10.13039/50110001103, por FEDER UE, por la Unión Europea Next Generation EU/PRTR, y en parte por el proyecto T20-23R DGA-FSE. Los autores desean agradecer a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), especialmente al equipo de observación de la Delegación Territorial de AEMET en Aragón, así como a la estación de esquí Aramón-Formigal.

REFERENCIAS

- [1] N. J. Kinar y J. W. Pomeroy, «Measurement of the physical properties of the snowpack», *Rev. Geophys.*, vol. 53, n.º 2, pp. 481-544, jun. 2015, doi: 10.1002/2015RG000481.
- [2] U. Kaatze, «Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature», *J. Chem. Eng. Data*, vol. 34, n.º 4, pp. 371-374, oct. 1989, doi: 10.1021/jc00058a001.
- [3] H. He y M. Dyck, «Application of Multiphase Dielectric Mixing Models for Understanding the Effective Dielectric Permittivity of Frozen Soils», *Vadose Zone J.*, vol. 12, n.º 1, pp. 1-22, feb. 2013, doi: 10.2136/vzj2012.0060.
- [4] R. Alonso, J. M. García del Pozo, S. T. Buisán, y J. A. Álvarez, «Analysis of the Snow Water Equivalent at the AEMet-Formigal Field Laboratory (Spanish Pyrenees) During the 2019/2020 Winter Season Using a Stepped-Frequency Continuous Wave Radar (SFCW)», *Remote Sens.*, vol. 13, n.º 4, p. 616, 2021, doi: 10.3390/rs13040616.

Figuras/Leyendas

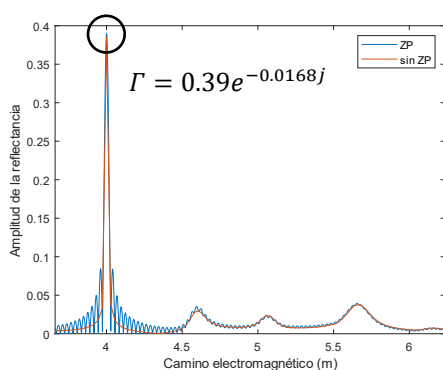


Figura 1: Identificación de la interfaz aire-nieve con sus valores de reflectancia compleja en una estructura multicapa.

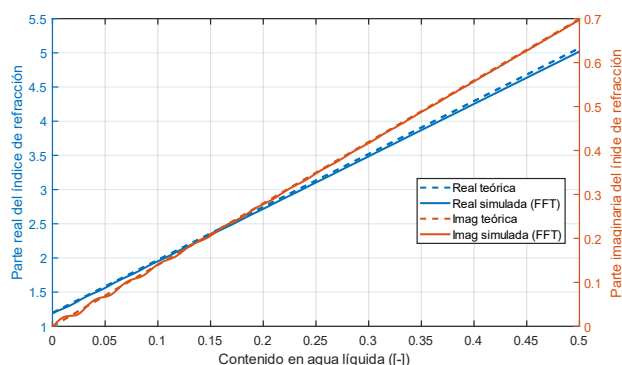


Figura 2: Comparación entre el índice de refracción teórico y el estimado mediante reflectancia compleja para una monocapa con una composición inicial de 25% de hielo y 75% de aire.