

Implementación de estrategia de blanqueo en el procesamiento de datos de Radares Meteorológicos Argentinos

Santiago Elián Mallerman
CNEA
Instituto Balseiro
Universidad Nacional de Cuyo
S. C. Bariloche, Argentina
santiago.mallerman@ib.edu.ar

Juan Pablo Pascual
CONICET
Instituto Balseiro
Universidad Nacional de Cuyo
S. C. Bariloche, Argentina
juanpablo.pascual@ib.edu.ar

Jorge Cogo
Universidad Nacional de Río Negro.
CITECCA
S. C. Bariloche, Argentina
jcogo@unrn.edu.ar

Resumen—En este trabajo se implementan distintas estrategias para estimar los momentos espectrales sobre datos adquiridos por Radares Meteorológicos Argentinos. Las estrategias utilizadas operan sobre las muestras en fase y cuadratura de los ecos en rango, obtenidas a una frecuencia mayor que el ancho de banda del pulso transmitido, que determina la resolución en rango, lo que se conoce como sobremuestreo. En conjunto a la transformación de blanqueo, la cual permite descorrelacionar la señal sobremuestreada para cada celda de rango y combinarla apropiadamente, se obtiene una disminución significativa de la varianza de las estimaciones. Esta mejora se logra especialmente cuando existe una buena relación señal a ruido.

Palabras clave—sobremuestreo, estimaciones Doppler, radar meteorológico, función de peso

I. INTRODUCCIÓN

La observación y comprensión de los fenómenos atmosféricos desempeñan un papel fundamental en la predicción del clima y la mitigación del impacto de eventos meteorológicos extremos. Los radares meteorológicos son herramientas esenciales en esta tarea, permitiendo la detección, seguimiento y análisis de precipitaciones, vientos y otros eventos meteorológicos. Sin embargo, debido a la naturaleza estocástica de estos procesos y las limitaciones inherentes de las mediciones, la precisión y la confiabilidad de los resultados obtenidos pueden verse afectadas.

En este contexto, es de práctica habitual la utilización de señales provenientes de muchos pulsos para reducir incertezas estadísticas en las estimaciones. Tal reducción, depende de la cantidad de pulsos utilizados en el procesamiento, para el cual las señales están descorrelacionadas y de la resolución angular requerida por la aplicación, ambas contempladas en el período de repetición de pulso (PRP) [1].

La compresión de pulsos puede utilizarse para incrementar el número de muestras independientes en las estimaciones, sin embargo, no es común utilizar dicha técnica en esta aplicación debido a la necesidad de mayor ancho de banda. Como

alternativa, el sobremuestreo en rango y posteriormente una transformación lineal de las muestras, denominada blanqueo, surgen como técnicas valiosas para apartarse de esta relación de compromiso y abordar las limitaciones planteadas [2]–[4]. Estas técnicas permiten incrementar el número de muestras independientes sin incrementar el ancho de banda y la consecuente degradación de la resolución en rango.

En el año 2009 en la Argentina se lanzó el Sistema Nacional de Radares Meteorológicos (SINARAME), con el objetivo principal de desplegar una red de radares meteorológicos con un sistema de centralización de la información en tiempo real, el cual es operado por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). La empresa INVAP es la encargada del diseño y la fabricación de los Radares Meteorológicos Argentinos (RMA), los cuales se han desplegado a lo largo del país en tres etapas y se prevé que la red cuente con un total de 30 radares [5].

Los RMA habitualmente adquieren la señal recibida a una tasa mayor a la que establece su resolución en rango. Con esa motivación en este trabajo se indaga en las técnicas existentes para aprovechar el sobremuestreo en la estimación de las variables meteorológicas. Cabe destacar que la novedad del trabajo no se encuentra en las técnicas, las cuales fueron seleccionadas de referencias sobre el tema, sino en su implementación y en el procesamiento de las mediciones reales de los RMA con este tipo de estrategias.

En la Sección II se presenta una descripción de la metodología utilizada en el estudio y los beneficios del sobremuestreo y blanqueo en este contexto. Luego, en la Sección III se estudia el desempeño de los métodos en primera instancia por medio de simulaciones numéricas considerando un pulso ideal perfectamente rectangular y se analiza el comportamiento de las técnicas bajo los efectos de distinta relación señal a ruido (SNR). Posteriormente, se utilizan estas técnicas sobre datos reales adquiridos con radares de la serie RMA y los resultados se presentan en la Sección IV. Finalmente, en la Sección V se discuten estas técnicas en la mejora de las capacidades de observación de los fenómenos meteorológicos.

II. ESTIMACIÓN DE MOMENTOS CON SOBREMUESTREO

En general, los radares meteorológicos transmiten un pulso simple sin modulación. Con lo cual su resolución en rango se encuentra determinada por la duración del pulso. Sin embargo, la tecnológica actual permite muestrear a tasas mayores a las que establece la resolución en rango, lo que permite aprovechar dicha información en el procesamiento. Teniendo en cuenta que al muestrear más rápido que lo que establece la resolución las muestras estarán correlacionadas, con el propósito de explotar completamente el sobremuestreo, una de las estrategias de procesamiento propone realizar el blanqueo de las muestras previo a la estimación de las variables meteorológicas. Los métodos implementados en este trabajo se basan en los algoritmos presentados en [2].

La estrategia de blanqueo utiliza L muestras de acuerdo a la relación de sobremuestreo existente entre el ancho de banda del pulso transmitido de duración τ y la frecuencia de muestreo para cada celda de rango. Se puede modelar que el pulso transmitido ilumina en dirección radial a un arreglo de centroides independientes separados uniformemente, dicho espaciado es grande comparado con la longitud de onda del radar pero chico comparado con la extensión de la celda de rango. Cada uno de estos centroides contribuye a la señal compleja de voltaje en un diferencial de ancho $c\tau/2L$, donde c es la velocidad de la luz. Se asumen muestras discretas en sus componentes en fase (I) y en cuadratura (Q) en banda base siendo $V(l\tau_0, nT_s) = V(l, n) = I(l, n) + jQ(l, n)$ para un determinado tiempo nT_s con n incrementos en la dimensión temporal o de tiempo lento (siendo T_s el período de repetición de pulso) y l incrementos en la dimensión en rango o de tiempo rápido (siendo τ_0 la separación en rango de los centroides). Cada una de las L contribuciones de los centroides contiguos se puede modelar como variables aleatorias con distribución Gaussiana Compleja. La envolvente compleja del pulso transmitido p afecta a la contribución de cada centroide. La señal en banda base, contemplando todos los filtros del receptor hasta su digitalización, puede ser obtenida haciendo la convolución de la forma de onda de entrada y la respuesta al impulso del receptor. Luego, el coeficiente de correlación de las muestras en rango es

$$\rho_V^{(R)}(l) = \frac{p_m(l) \star p_m^*(-l)}{\sum_{i=0}^{L-1} p_m^2(i)}, \quad (1)$$

donde p_m es la envolvente compleja del pulso modificado por la respuesta al impulso h de acuerdo a la expresión $p_m(l) = p(l) \star h(l)$, donde \star denota la operación convolución y el superíndice $*$ el complejo conjugado, respectivamente.

La estrategia de la transformación de blanqueo utiliza la matriz de correlación

$$\mathbf{C}_V^R = \begin{bmatrix} 1 & \rho_V^{(R)}(1) & \cdots & \rho_V^{(R)}(L-1) \\ \rho_V^{(R)}(1)^* & 1 & \cdots & \rho_V^{(R)}(L-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_V^{(R)}(L-1)^* & \rho_V^{(R)}(L-2)^* & \cdots & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Dado que esta matriz es definida positiva [6], puede descomponerse como $\mathbf{C}_V^R = \mathbf{H}^* \mathbf{H}^T$, donde el superíndice T indica la operación transpuesta. La matriz de transformación de blanqueo corresponde a la matriz inversa de \mathbf{H} , esto es $\mathbf{W} = \mathbf{H}^{-1}$, la cual se aplica a las muestras en rango para producir L muestras descorrelacionadas de igual potencia [7].

La secuencia de muestras blanqueadas a partir de $V(l, n)$ se obtiene como

$$X(l, n) = \sum_{j=0}^{L-1} w_{l,j} V(j, n), \quad l = 0, 1, \dots, L-1, \quad (3)$$

donde $w_{l,j}$ son los elementos de la matriz de blanqueo.

La presencia de ruido propia de cualquier sistema de comunicación debe ser tenida en cuenta al aplicar la transformación de blanqueo de la señal, debido a que éste se ve afectado por el proceso inverso, es decir el ruido que habitualmente es independiente, termina correlacionado luego de esta etapa. Por este motivo, introduce un factor de corrección, que se lo conoce por sus siglas en inglés NEF, (Noise Enhancement Effect) y se calcula como [2]

$$\text{NEF} = \frac{1}{L} \text{tr}\{\mathbf{C}_V^{-1}\}, \quad (4)$$

donde $\text{tr}\{\cdot\}$ denota la operación traza de una matriz.

La estimación de los momentos espectrales se siguen en [8]. Para cada celda de rango se estiman en tiempo lento las autocorrelaciones con retardo cero y uno de las muestras sobremuestreadas y blanqueadas $X(l, n)$, luego los L estimados son promediados en rango (WTB) para reducir la varianza. Finalmente, se utilizan estos valores para calcular la potencia $\hat{S}_{(\text{WTB})}$ como

$$\hat{S}_{(\text{WTB})} = \frac{1}{LM} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} |X(l, m)|^2 - N(\text{NEF}), \quad (5)$$

siendo M la cantidad de pulsos en un intervalo de procesamiento coherente (CPI), N la potencia de ruido y NEF definida por (4). Por otro lado, la velocidad Doppler $\hat{v}_{(\text{WTB})}$ se calcula como

$$\hat{v}_{(\text{WTB})} = -\frac{v_a}{\pi} \arg \left[\hat{R}_X^{(T)}(1) \right], \quad (6)$$

donde $\arg[\cdot]$ denota la operación argumento de un número complejo, v_a es la velocidad máxima no ambigua y $\hat{R}_X^{(T)}(1)$ es el estimado de la autocorrelación con retardo uno que se obtiene como

$$\hat{R}_X^{(T)}(1) = \frac{1}{L(M-1)} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-2} X^*(l, m) X(l, m+1). \quad (7)$$

III. SIMULACIONES NUMÉRICAS

En primera instancia, se realizó el análisis del desempeño de esta técnica con datos generados sintéticamente, con los mismos parámetros de los datos reales de la sección IV: $M = 54$, $\tau = 1 \mu\text{s}$, $\text{PRP} = 1 \text{ ms}$ y $L = 5$. Para la generación de las muestras se siguió el modelo descrito en [9], combinado con el algoritmo presentado en [10].

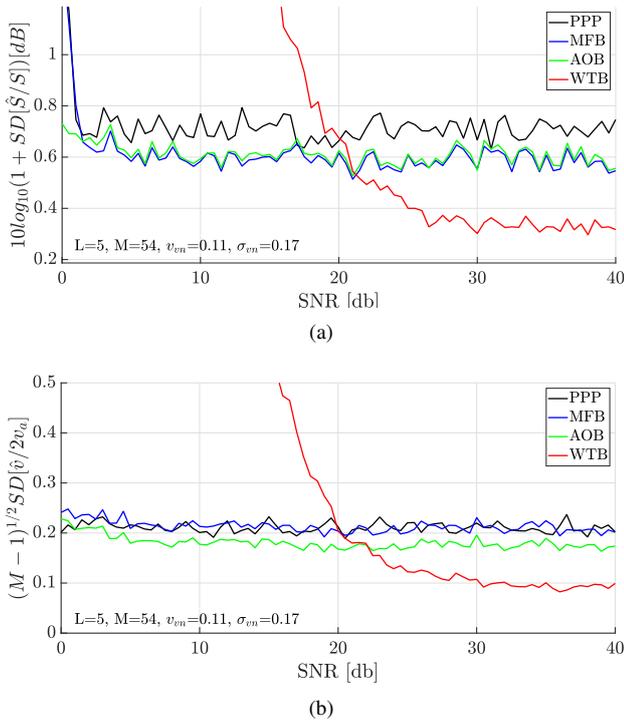


Figura 1. Desviación estándar en función de la SNR. (a) Potencia estimada. (b) Velocidad Doppler.

Las simulaciones consisten en generar realizaciones de los datos, aplicar el método de blanqueo y estimar potencia y velocidad Doppler, para evaluar media y desviación estándar a partir de los estimados obtenidos. Este procedimiento se repitió para diferentes SNRs. Se ejecutaron 1000 realizaciones de datos sintéticos sobremuestreados con factor L para cada valor de SNR.

Análogamente, se evaluó el desempeño de tres estrategias de estimación de momentos espectrales con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con la estrategia de blanqueo. Se utilizaron el método denominado por sus siglas en inglés PPP (Pulse Pair Processing) [8], para el cual se sintetizó una única muestra por celda de rango, el método MFB (Matched Filter Based), el cual propone promediar las muestras IQ a la salida del filtro receptor y el método denominado por sus siglas en inglés OAB (Oversampling and Average Based), el cual propone el promediado en rango de las estimaciones a nivel autocorrelación. Al igual que para WTB (Whitening Transformation Based), con estas técnicas también se ejecutaron 1000 realizaciones de datos sintéticos sobremuestreados con factor L .

La Fig. 1 muestra la desviación estándar de la potencia estimada \hat{S} y de la velocidad Doppler \hat{v} con los diferentes métodos PPP, WTB, MFB y OAB en función de la SNR. Se consideró un objetivo meteorológico con velocidad Doppler $v_v = 0,11 v_a$ y ancho espectral $\sigma_v = 0,17 v_a$.

El método WTB presenta un mejor desempeño para valores de SNR mayores a 20 dB, respecto a los métodos MFB, OAB y PPP. Sin embargo, para valores de SNR menores a dicho

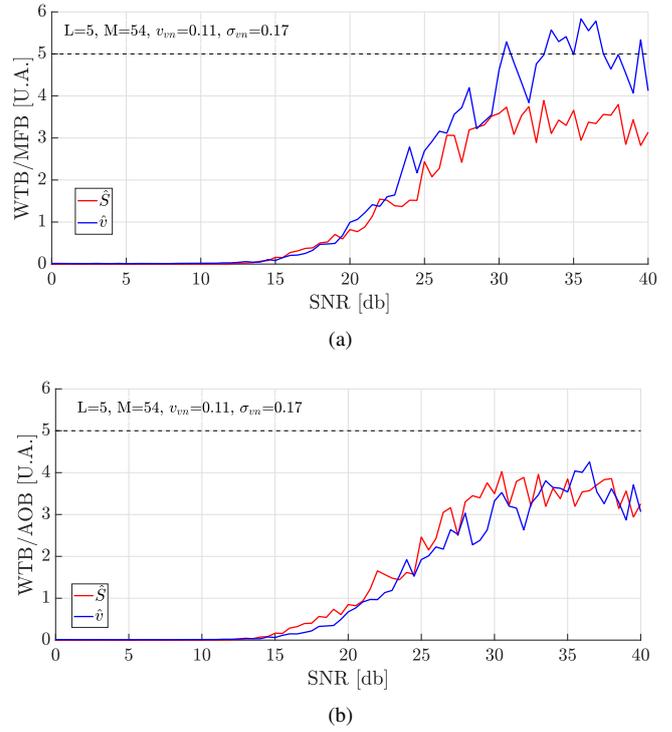


Figura 2. Reducción de la varianza en función de la SNR del método WTB. (a) Respecto al método MFB. (b) Respecto al método OAB.

umbral, se observan los efectos del factor de corrección NEF.

La Fig. 2(a) muestra la reducción de la varianza del método WTB respecto al método MFB, para las estimaciones de potencia estimada \hat{S} y velocidad Doppler estimada \hat{v} en función de la SNR para los mismos datos sintéticos, mientras que en la Fig. 2(b) se observa el mismo parámetro respecto al método OAB.

La reducción de varianza del método WTB respecto a MFB para SNR grandes tiende al factor de sobremuestreo $L = 5$, la comparación respecto al método implementado con OAB, si bien evidencia una reducción, es menor a este factor.

IV. PROCESAMIENTO DE MEDICIONES REALES

A continuación, se realizó el análisis del desempeño con las estrategias descritas procesando mediciones reales del radar RMA6, ubicado en la ciudad de Mar del Plata, tomados el día 28 de junio de 2021, durante una tormenta cuya precipitación es lluvia. De acuerdo a la configuración del radar se tiene que $M = 54$, $\tau = 1 \mu s$, PRP = 1 ms y $L = 5$. Las mediciones corresponden a un barrido de 360° en azimut para una elevación de $1,5^\circ$ y no presenta contaminación significativa debida a *clutter* terrestre o interferencia electromagnética.

En la construcción de la matriz de blanqueo para el procesamiento se utilizaron dos formas de pulso transmitido. Por un lado, se empleó el pulso ideal rectangular utilizado en las simulaciones con datos sintéticos y dado que se cuenta con las muestras correspondientes a cada pulso transmitido, se repitió el procesamiento con el pulso modificado p_m suponiendo h como el filtro adaptado a cada pulso transmitido.

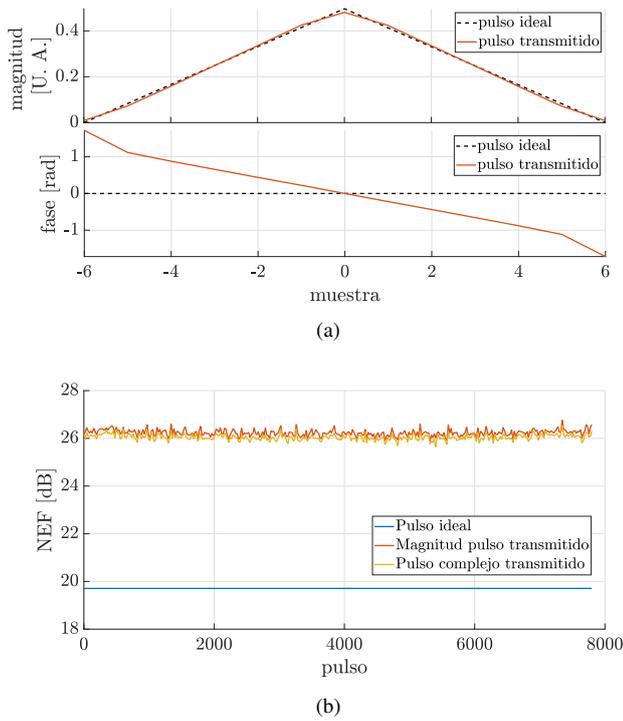


Figura 3. (a) Valor absoluto y fase del pulso modificado p_m utilizado en una transmisión. (b) Factor NEF en escala logarítmica para distintos pulsos transmitidos del barrido completo .

Para evaluar la potencia del objetivo meteorológico es necesario descontar la potencia de ruido. Por este motivo, la estimación de la potencia de ruido N se realiza empleando el algoritmo propuesto en [11], teniendo en cuenta las consideraciones para la implementación desarrolladas en [12].

En la Fig. 3(a), se muestra en rojo el valor absoluto y fase de uno de los pulsos transmitidos modificado p_m y se superpone el pulso ideal modificado con línea punteada negra. Por otro lado, en la Fig. 3(b) se observa el factor NEF en escala logarítmica, calculado de acuerdo a la ecuación (4), para distintos pulsos transmitidos del barrido completo. La curva en azul corresponde al factor obtenido haciendo uso del pulso ideal, la roja al utilizar el valor absoluto del pulso transmitido y, finalmente, la naranja es el NEF para el pulso transmitido complejo.

Si bien la discrepancia entre el pulso ideal y el auténtico transmitido no es demasiado significativa, la variación en el NEF resulta notoria, mayor a 6 dB. Adicionalmente, al comparar el resultado con el pulso transmitido, con y sin contemplar su fase, se advierte que dicha fase no repercute significativamente en los resultados. Las diferencias en el NEF parecieran deberse exclusivamente al efecto de la magnitud.

En las Figs. 4(a) y 4(b) se presentan los indicadores de posición planos (PPI, por sus siglas en inglés) de la reflectividad, que consiste de un producto meteorológico proporcional a la potencia de la señal recibida, y de la velocidad Doppler, respectivamente, utilizando el método MFB. Cabe aclarar que para el caso de la velocidad se observa el efecto de replicado

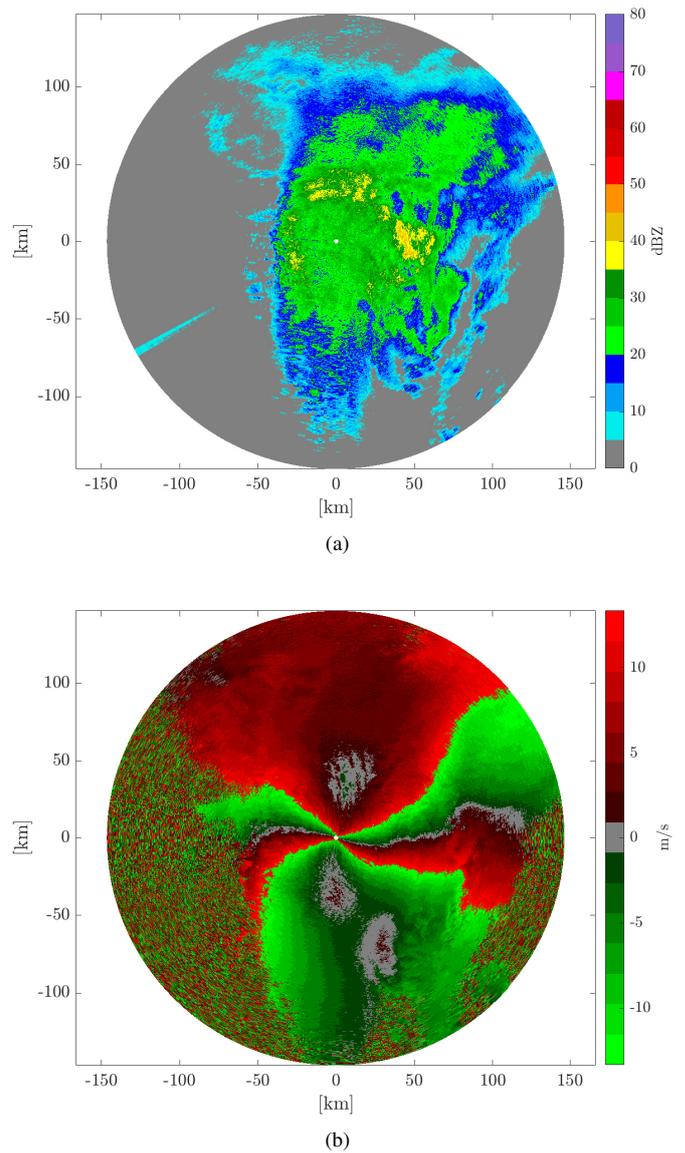


Figura 4. PPIs obtenidos utilizando el método MFB. (a) Reflectividad. (b) Velocidad Doppler.

debido a que v_a es menor a la máxima velocidad del fenómeno meteorológico. Esto es propio de la configuración utilizada y no depende del método de estimación utilizado.

En las Figs. 5, 6 y 7 se presentan respectivamente los resultados obtenidos con el método OAB, con el método WTB considerando el pulso ideal rectangular y con el método WTB con los pulsos complejos transmitidos.

Cualitativamente, en las regiones centrales (donde la SNR es buena) las gráficas de reflectividad presentan una mayor suavidad u homogeneidad para el caso de utilizar WTB frente a los demás métodos. Esto también se observa para el caso de la velocidad, siendo más notable en la región de la línea gris cercana a la horizontal. Esta mayor suavidad se corresponde con la reducción de la varianza esperada en la estimación.

Además, al apartarse del centro (donde la SNR empeora),

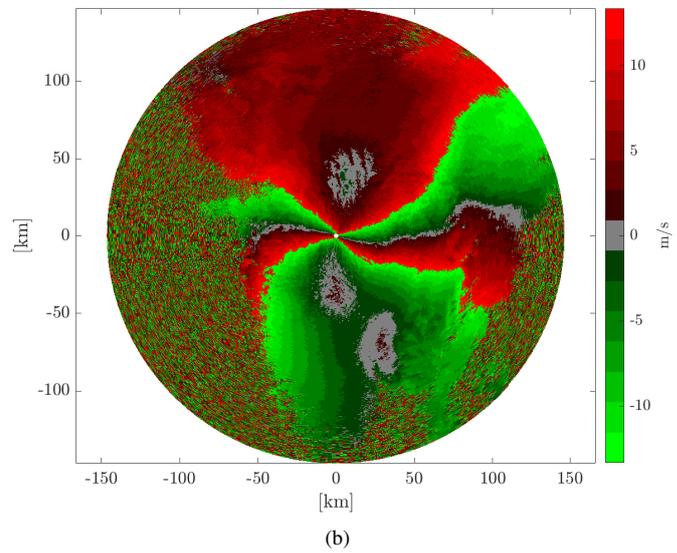
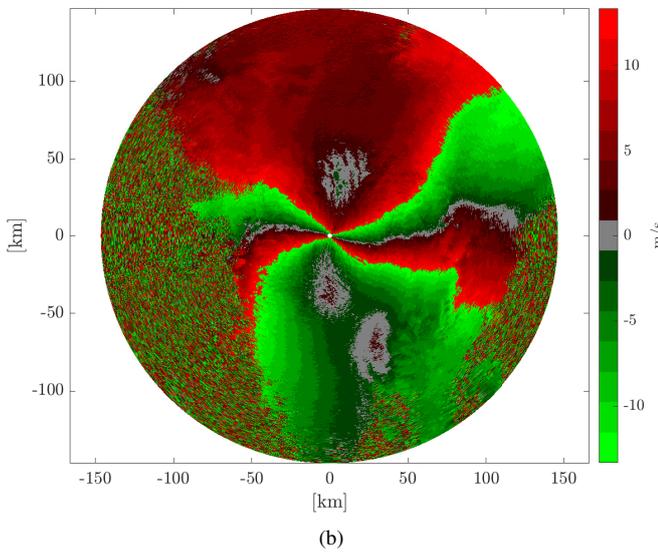
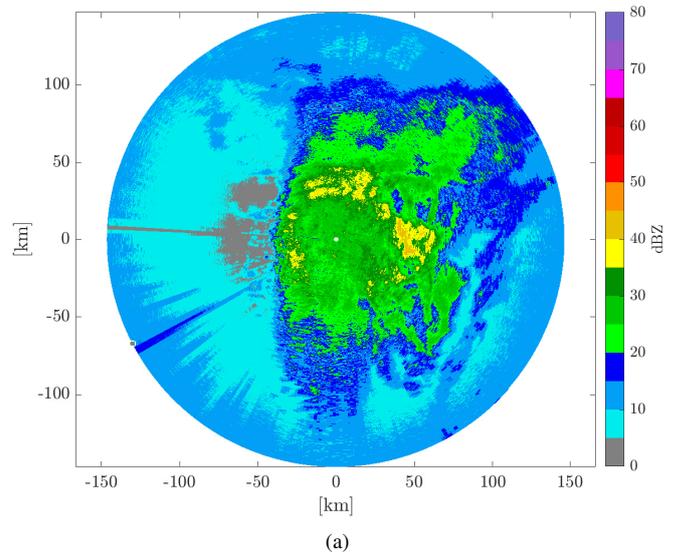
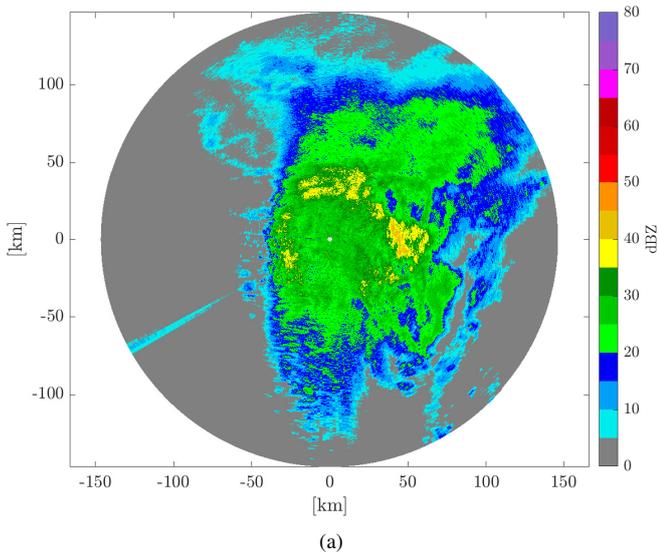


Figura 5. PPIs obtenidos utilizando el método OAB. (a) Reflectividad. (b) Velocidad Doppler.

Figura 6. PPIs obtenidos utilizando el método WTB con el pulso ideal. (a) Reflectividad. (b) Velocidad Doppler.

la situación se invierte: se aprecia una mayor suavidad de los gráficos en los métodos MFB y OAB frente a WTB, lo que también se corresponde con el aumento de varianza esperado para WTB. Finalmente, en las regiones exteriores del gráfico, en las que prácticamente sólo hay ruido, se observa el incremento de potencia (y en consecuencia, valores mayores de reflectividad) propios del efecto del NEF en los métodos WTB. Este aumento es más notable para el caso de usar el pulso transmitido frente a utilizar el pulso ideal, lo cual se condice con lo observado en la Fig. 3.

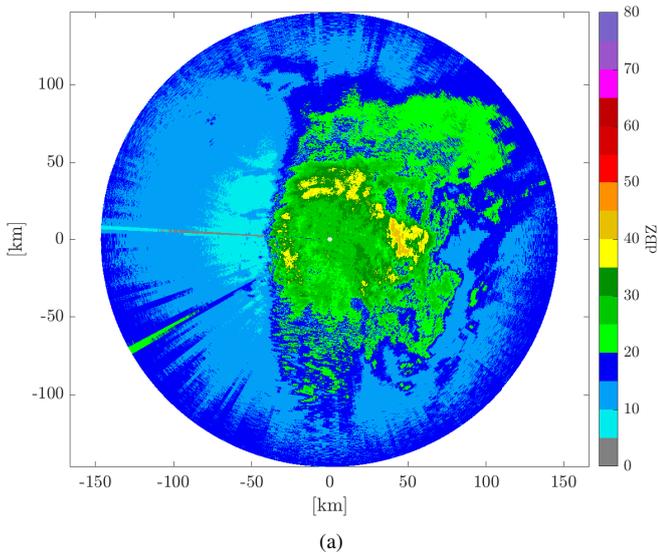
Para complementar el análisis, en la Fig. 8 se expone un corte radial para el azimutal $\theta = 201^\circ$ (medido desde el Norte en sentido horario) de la reflectividad en escala logarítmica para los distintos métodos utilizados en función del rango. Se reconoce la notoria disminución en la dispersión

del estimado con el método WTB respecto a los obtenidos con los métodos restantes, adicionalmente como es afectado por el factor NEF para valores menores a 15 dBZ en concordancia con lo mostrado en la Fig. 3.

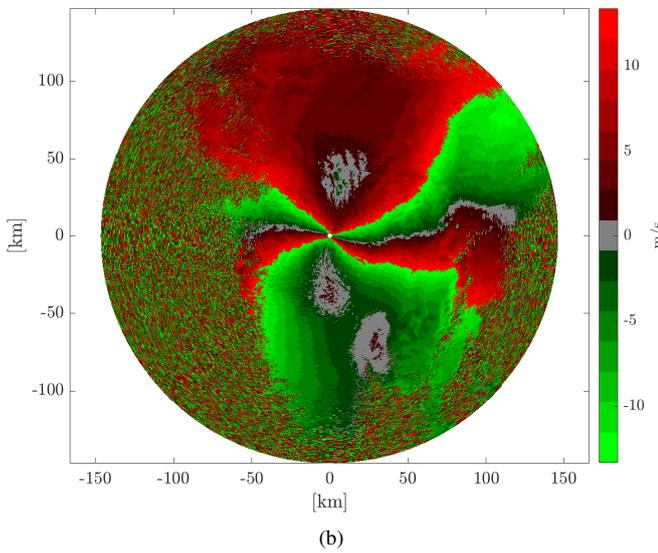
V. CONCLUSIÓN

En este trabajo se analiza la utilización de técnicas de blanqueo que aprovechan el sobremuestreo en rango para mejorar la calidad de las estimaciones, aplicadas a datos reales de radares RMA.

Se compara la aplicación de la técnica WTB considerando tanto una versión idealizada (rectangular) del pulso transmitido como la versión auténtica de pulso transmitido por el radar. Se observó que si bien los pulsos no son muy disímiles, al considerar el pulso real se obtuvo un incremento en el NEF



(a)



(b)

Figura 7. PPIs obtenidos utilizando el método WTB con el pulso transmitido. (a) Reflectividad. (b) Velocidad Doppler.

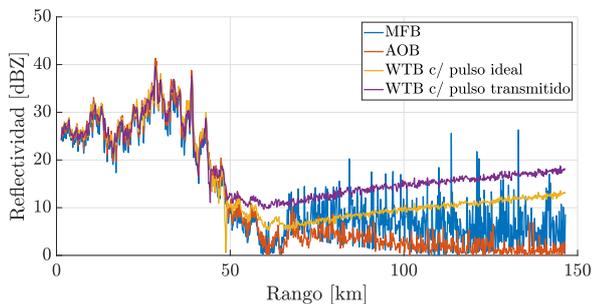


Figura 8. Corte radial a $\theta = 201^\circ$ de la reflectividad para los distintos métodos utilizados en función del rango.

mayor a 6 dB. Esto puede explicarse debido a cuestiones

numéricas en el cálculo de C_V^{-1} , pero requiere un mayor análisis a futuro. Cabe mencionar que desde el punto de vista teórico, al utilizar el pulso ideal, se hace un blanqueo aproximado de los datos reales, mientras que el blanqueo completo se logra con el pulso auténtico transmitido.

Cualitativamente, los estimadores realizados sobre los datos reales con la estrategia WTB muestran reducción de la desviación estándar, respecto a las estimaciones realizadas con las estrategias MFB e inclusive OAB para una buena relación señal a ruido. Esto es consistente con la mejora observada para datos simulados en los que se consideró la misma configuración. Es importante aclarar que los datos simulados corresponden a un caso particular típico de ancho espectral, mientras que en los datos reales se tiene una variedad de anchos espectrales.

Asimismo, para SNR bajas, el desempeño de los estimadores realizados con WTB se ven fuertemente afectados por el factor NEF, como se aprecia en la periferia de los PPI de reflectividad, tanto en el procesamiento con el pulso ideal como con el pulso transmitido.

Del desempeño en función de la relación señal a ruido, es posible seleccionar que técnica utilizar para cada situación en las estimaciones de \hat{S} y \hat{v} , lo que daría lugar a una estrategia mixta que debe explorarse con mayor profundidad a futuro.

REFERENCIAS

- [1] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*. New York: McGraw-Hill, 2005.
- [2] S. M. Torres and D. S. Zrnić, "Whitening in range to improve weather radar spectral moment estimates. part I: Formulation and simulation," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 20, pp. 1422–1448, Nov. 2003.
- [3] —, "Whitening in range to improve weather radar spectral moment estimates. part II: Experimental evaluation," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 20, pp. 1449–1459, Nov. 2003.
- [4] C. Curtis and S. M. Torres, "Real-time measurement of the range correlation for range oversampling processing," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 30, pp. 2885–2895, Dec. 2013.
- [5] A. Rodríguez, C. Lacunza, J. Serra, C. Saulo, H. Ciappesoni, G. Caranti, J. Bertoni, and A. Martina, "SiNaRaMe: Integración de una red de radares hidro-meteorológicos en latinoamérica," *Rev. Fac. Ciencias Exac., Fís. y Nat.*, vol. 4, no. 1, pp. 41–48, Mar. 2017.
- [6] C. W. Therrien, "Discrete random signals and statistical signal processing," *Prentice Hall*, p. 727, 1992.
- [7] S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Estimation Theory*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1993.
- [8] R. J. Doviak and D. S. Zrnić, *Doppler Radar and Weather Observations, 2nd Ed.* San Diego Cal.: Academic Press, 1993.
- [9] S. M. Torres and C. Curtis, "The impact of signal processing on the range-weighting function for weather radars," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 29, pp. 796–806, Jan. 2012.
- [10] D. Zrnić, "Simulation of weatherlike Doppler spectra and signals," *J. Appl. Meteor.*, vol. 14, pp. 619–620, Jan. 1975.
- [11] I. Ivić, C. Curtis, and S. Torres, "Radial-based noise power estimation for weather radars," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 30, p. 2737–2753, Dec. 2013.
- [12] M. Hurtado, "A method for efficient implementation of a radial-based noise power estimator for weather radars," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 38, pp. 1395–1398, Jun. 2021.