

TÉCNICA DE INVERSIÓN TEMPORAL PARA LA MEJORA DEL ENFOCADO DE IMÁGENES SAR EN ENTORNOS URBANOS

I. de Arriba-Ruiz ⁽¹⁾, F. Pérez-Martínez ⁽¹⁾, J.M. Muñoz-Ferreras ⁽²⁾

{imanol, felix}@gmr.ssr.upm.es, jm.munoz@uah.es

⁽¹⁾ Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. Universidad Politécnica de Madrid
Avda. Complutense s/n, 28040 Madrid

⁽²⁾ Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Universidad de Alcalá.
Ctra. Madrid-Barcelona, 28805 Alcalá de Henares, Madrid

Abstract – Conventional SAR (Synthetic Aperture Radar) techniques only consider a single reflection of transmitted waveforms from targets. Nevertheless, today's new applications force SAR systems to work in much more complex scenes such as urban environments. As a result, multiple-bounce returns are additionally superposed to direct echoes. We refer to these as *ghost images*, since they obscure true target image and lead to poor resolution. By applying *Time Reversal* concept to SAR imaging (TR-SAR), it is possible to reduce considerably –or almost mitigate– ghosting artifacts, recovering the lost resolution due to multipath effects. Furthermore, some focusing indicators such as entropy (E), contrast (C) and Rényi entropy (RE) provide us a good focusing criterion when using TR-SAR.

I. INTRODUCCIÓN

La técnica SAR (*Radar de Apertura Sintética*) permite obtener un mapa de reflectividad de la escena iluminada en el dominio bidimensional de distancia-acimut. Etimológicamente, su propio nombre hace alusión al concepto de síntesis de señal, consiguiendo una notable mejora de la resolución acimutal [1-4]. A su vez, puesto que el producto final de un sistema SAR es una imagen, se requiere una resolución en distancia comparable. Para tal propósito, se apuesta por el uso de pulsos modulados linealmente en frecuencia (*LFM*) con objeto de aplicar técnicas de compresión en recepción.

El mero hecho de trabajar en la banda de microondas les convierte en sistemas *todo tiempo*, puesto que no se ven afectados por las condiciones climáticas ni por el momento del día en el que son utilizados. Sin embargo, existen otros efectos a los que las técnicas SAR no son capaces de hacer frente de forma tan eficiente, los cuales están relacionados con una serie de factores externos e internos del propio sistema SAR –entre ellos, cabe destacar el fenómeno del multitrayecto, el conocido ruido speckle o el ruido de fase. Aunque todos ellos pueden poner en entredicho la calidad y la resolución de la imagen, este trabajo se centrará exclusivamente en la mitigación del multitrayecto.

Los sistemas SAR convencionales son diseñados para iluminar blancos en situaciones en las que existe línea de visión entre ambos terminales. Sin embargo, en entornos donde el blanco en cuestión está oculto o rodeado por muchos dispersores, la imagen resultante constará tanto de la señal reflejada de forma directa desde el blanco como de las

múltiples señales provenientes de dichos dispersores, lo cual degrada la resolución de la imagen de forma considerable [5].

En este artículo, se presenta una técnica innovadora destinada a mitigar los efectos del multitrayecto, en la que se aplica el concepto de *Inversión Temporal* (*Time Reversal*, TR) a aquellas imágenes SAR en las que el blanco está contaminado de clutter, dando lugar a la técnica TR-SAR [6-7]. Nuestra motivación proviene del hecho de que la mayoría de las técnicas destinadas a la reducción de los efectos del multitrayecto, citadas en la literatura, están relacionadas con el diseño del sistema radiante. Por ese motivo, creemos en la necesidad de desarrollar o mejorar técnicas de procesado de señal enfocadas a la mitigación de este fenómeno nocivo.

En pocas palabras, a partir de una estimación aproximada de la posición del blanco deseado, extraída de una imagen SAR convencional, TR-SAR es capaz de enfocar en el blanco con una resolución más fina, reduciendo así (o incluso eliminando) las imágenes fantasma. Para tal fin, este algoritmo procesa la historia de fase utilizando de forma constructiva la respuesta multitrayecto de un entorno con alta densidad de clutter.

Esta es la razón por la que la técnica TR-SAR es utilizada para detectar la presencia de blancos, expresamente para entornos con mucho multitrayecto. Explotando esta peculiaridad, es posible hacer uso de ella para monitorizar bosques o entornos urbanos, incrementando así la probabilidad de detección del blanco [8]. En resumen, su objetivo final es la mejora del reconocimiento automático de blancos (*ATR*) en entornos con mucho multitrayecto [6]. Para ello, tal y como se mostrará en este trabajo, los indicadores de enfocado pueden ser de gran utilidad [9-11].

II. TIME REVERSAL (TR)

El multitrayecto es considerado un fenómeno perjudicial cuyos efectos deben ser minimizados. Sin embargo, Time Reversal presenta un punto de vista completamente opuesto: el multitrayecto resulta ventajoso, y cuanto más haya mejores serán las prestaciones [12]. De hecho, TR es en esencia una técnica basada en el multitrayecto puesto que se aprovecha de la dispersión y de la diversidad temporal inducida por este fenómeno, en canales no homogéneos, con el fin de

incrementar la resolución. Si existe el suficiente multitrayecto, la propia dispersión del canal será capaz de enfocar la señal invertida temporalmente en la antena receptora [13].

Un importante inconveniente a la hora de mitigar este fenómeno es la falta de información *a priori* acerca de los dispersores, como por ejemplo sus verdaderas posiciones o sus características físicas. Como consecuencia, este tipo de técnicas se ven obligadas a trabajar *a ciegas* ya que no tienen conocimiento de la geometría. Esto provoca que la tarea de distinguir blancos de entre una serie de imágenes fantasma sea realmente complicada puesto que la única información de la que se dispone es una imagen SAR convencional contaminada de multitrayecto. Una vez identificado al blanco en cuestión, será posible examinar su forma o su tamaño con una mejor resolución.

III. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE TR-SAR

La señal transmitida $s(t)$ es de banda ancha –pulsos LFM–, con una frecuencia de repetición de pulsos (PRF) de $1/T$. Con respecto a la configuración empleada, se trata de un sistema monoestático (Fig. 1). El sensor SAR se encuentra embarcado a una altura de $z = h$, x e y son las coordenadas de acimut (cross-range) y distancia (ground-range), respectivamente, ψ es el ángulo de grazing, L representa la longitud de la apertura sintetizada y W es la anchura de la franja iluminada.

A diferencia de los trabajos realizados en [6] y [7], es importante destacar que el algoritmo TR-SAR ha sido desarrollado para el modo *stripmap* [1]. La razón es que el algoritmo de formación de imagen SAR elegido –*RMA, Range Migration Algorithm*– requiere la preservación de la información de chirp acimutal para funcionar correctamente.

A su vez, los autores de [6] y [7] llevan a cabo dos exploraciones de la misma escena durante la recopilación de datos. La diferencia entre ambas es que la primera se hace en ausencia de blancos con el fin de caracterizar el clutter del entorno. De esta manera, sustrayendo esta medida a la efectuada durante la segunda exploración, es posible eliminar la mayor parte de la contribución de los dispersores que rodean a los blancos deseados.

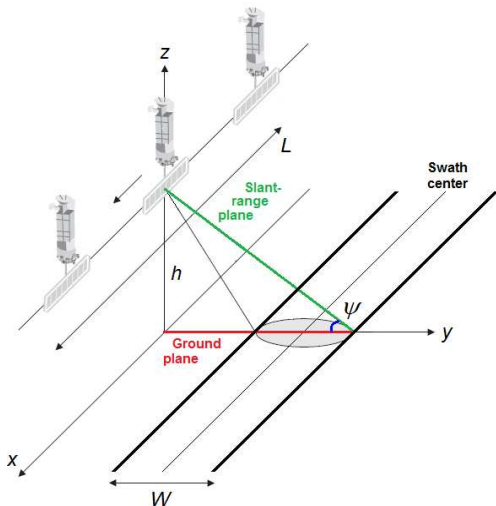


Fig. 1. Stripmap SAR: sistema monoestático

En nuestro caso, se lleva a cabo una única exploración de la escena de interés, asumiendo que el nivel de clutter no es tan elevado como el correspondiente a los ecos directos provenientes de los blancos deseados. Consideramos que esta elección constituye un caso más realista, puesto que en la mayoría de los escenarios reales no es posible extraer, y posteriormente insertar, a los blancos bajo estudio.

En consecuencia, la señal resultante contendrá no sólo los ecos directos sino también los múltiples rebotes debidos tanto a los blancos deseados como a los dispersores de las proximidades de dichos blancos –un estudio exhaustivo de la caracterización del multitrayecto fue llevado a cabo por los autores en [14]. Puesto que se están empleando pulsos LFM, los retornos del radar son sometidos a un proceso conocido como *stretch*, que permite comprimirlos y transforma el dominio de distancia a frecuencia espacial [6].

El algoritmo TR-SAR puede resumirse en los siguientes pasos [6-8, 12-13, 15]:

- La señal recibida es almacenada y retardada.

$$s(t) \rightarrow s(t - T_c). \quad (1)$$

- La señal resultante es invertida en el tiempo, lo cual se traduce en una conjugación de la fase en el dominio frecuencial [16].

$$s(t - T_c) \rightarrow s(T_c - t) \xrightarrow{\text{Fourier}} e^{j\omega T_c} \cdot S^*(\omega). \quad (2)$$

Debido a ese retardo, aparece un término de fase lineal –un desplazamiento de fase $e^{j\omega T_c}$ –, el cual puede ser despreciado.

$$e^{j\omega T_c} \cdot S^*(\omega) \approx S^*(\omega). \quad (3)$$

- La señal es normalizada en energía.
- Seguidamente, es retransmitida matemáticamente a la escena bajo estudio a través del mismo canal. Si éste es recíproco y altamente dispersivo –si presenta mucho multitrayecto–, la señal retransmitida es enfocada en la fuente que la originó.
- Finalmente, se lleva a cabo un proceso de enfocado con el fin de reconstruir la imagen –*dechirping* TR-SAR. A partir de una estimación aproximada de la localización del blanco, extraída de una imagen SAR convencional, TR-SAR es capaz de enfocar en los patrones dominantes –en los blancos deseados– con una resolución más fina. De este modo, se reduce considerablemente (o incluso se elimina) el efecto del multitrayecto. Sin embargo, si el punto en el que se está enfocando no se trata de un blanco, los detalles serán poco nítidos y aleatorios. Por este motivo, resulta imprescindible desarrollar un algoritmo capaz de detectar con precisión los puntos prominentes de la imagen –estos puntos se corresponderán con los ecos directos procedentes de los blancos deseados. Pueden obtenerse mediante una búsqueda de los puntos que excedan un cierto umbral.

En resumen, este algoritmo procesa la historia de fase utilizando de forma constructiva la respuesta multitrayecto de un entorno con alta densidad de clutter.

IV. RESULTADOS

A. Definiciones

El fenómeno del multitrayecto puede llegar a ser muy pernicioso, puesto que las imágenes fantasma pueden llegar a enmascarar completamente al blanco. Sin embargo, la existencia de algún rasgo que permita diferenciar al eco directo de los retornos causados por el multitrayecto podría dar solución al problema. En [14], algunos parámetros como el *ISLR* (*Integrated Sidelobe Ratio*), el *PSLR* (*Peak Sidelobe Ratio*) y el *QPE* (*Quadratic Phase Error*) nos proporcionaron las herramientas necesarias para conseguir nuestro objetivo. Sin embargo, en este trabajo se ha simulado un entorno altamente dispersivo con muchos ecos reflejados, además de los propios ecos directos. En este tipo de casos en los que los retornos están tan próximos entre sí, los lóbulos secundarios – e incluso los lóbulos principales– tienden a interferirse unos con otros. En consecuencia, los valores resultantes de *ISLR*, *PSLR* y *QPE* serán erróneos. Por esta razón, nos hemos decantado por el uso de indicadores de enfocado como la Entropía (E), el Contraste (C) y la Entropía de Rényi (RE) de orden $\alpha = 0.5$ [9-11]:

$$E = -\sum_i \sum_j \bar{I}_{i,j} \cdot \ln \bar{I}_{i,j}, \quad (4)$$

$$C = \frac{\sqrt{A\{|I_{i,j}|^2 - A(|I_{i,j}|^2)\}^2}}{A(|I_{i,j}|^2)}, \quad (5)$$

$$RE = \frac{1}{1-\alpha} \ln \left(\sum_i \sum_j \bar{I}_{i,j}^\alpha \right), \quad (6)$$

donde $I_{i,j}$ es la imagen SAR, i y j son las coordenadas espaciales, el operador $A(\cdot)$ representa la media espacial y $\bar{I}_{i,j}$ es la imagen SAR normalizada, dada por la expresión:

$$\bar{I}_{i,j} = \frac{|I_{i,j}|^2}{\sum_i \sum_j |I_{i,j}|^2}. \quad (7)$$

En cuanto a las características del multitrayecto, los rayos son reflejados en una superficie lisa (multitrayecto especular) empleando un modelo de Tierra plana. No obstante, se asume que son retrodispersados desde cada uno de los puntos de incidencia y que recorren, en su camino de vuelta, el mismo camino que siguieron hasta llegar al dispersor en su camino de ida. En otras palabras, no verifican la ley de Snell y, hasta cierto punto, se está imitando un comportamiento difuso. De lo contrario, sólo se podría tener en cuenta un único rayo reflejado.

B. Resultados de las simulaciones

Para generar imágenes SAR de escenarios que presentan multitrayecto, se ha hecho uso de uno de los algoritmos de formación de imagen más eficientes: *RMA* (*Range Migration Algorithm*), que destaca por su capacidad de compensar la curvatura en distancia de forma precisa. Los parámetros de simulación más importantes del radar empleado son: frecuencia de operación (242.2 MHz), ancho de banda transmitido (133.5 MHz), *PRF* (320 Hz), frecuencia de muestreo (192 MHz).

Nuestra contribución consiste en demostrar la robustez de TR-SAR. Para tal fin, se ha creado un escenario constituido por tres blancos puntuales ubicados en las posiciones

[0m,0m,100m], [-200m,0m,100m] y [-200m,200m,100m]. Cada blanco tiene asociados 20 retornos multitrayecto, además del propio eco directo (entorno urbano). La imagen SAR resultante se muestra en la Fig. 2. Cabe destacar que los blancos simulados están a una cierta altura sobre el terreno, por consiguiente, aparecen ligeramente desplazados en la dirección slant-range debido a su proyección en el plano slant-range [1]. Si no estuviesen a una cierta altitud, aparecerían ubicados en las posiciones mencionadas.

Tal y como se mencionó anteriormente, el proceso de enfocado es un paso esencial en TR-SAR para reconstruir la imagen. La Fig. 3 muestra la imagen obtenida tras enfocar justamente en los blancos deseados –este es el caso en el que el algoritmo de puntos prominentes ha sido capaz de detectar los patrones dominantes con exactitud. La eficiencia de este algoritmo cuando es utilizado correctamente es evidente, puesto que no hay lugar a dudas a la hora de distinguir a los verdaderos blancos en la imagen. En otras palabras, se ha recuperado la resolución perdida por efecto del multitrayecto. Incluso en el caso de tener dos de los tres blancos en la misma posición acimutal (-200m), donde los ecos del blanco de la izquierda enmascaran al blanco de la derecha, TR-SAR es capaz de proporcionar excelentes resultados.

Por otro lado, si la estimación de las posiciones de los blancos es inexacta, no se estará enfocando correctamente – esto podría ocurrir cuando el algoritmo de puntos prominentes considera que un punto de gran nivel de la imagen se corresponde con un blanco, pero en realidad no lo es. En consecuencia, la calidad de la imagen empeora puesto que el nivel de los blancos es un poco menor y su resolución es ligeramente peor. En la Fig. 4, el algoritmo TR-SAR ha enfocado en las posiciones [250m,-250m,100m], [50m,-250m,100m] y [50m,-50m,100m].

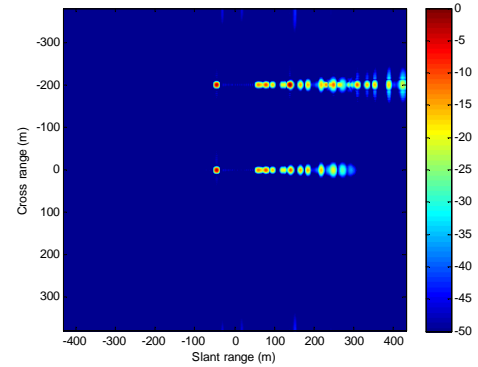


Fig. 2. Tres blancos puntuales con 20 ecos multitrayecto

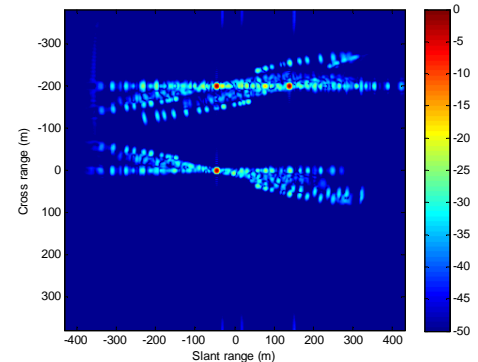


Fig. 3. Imagen tras TR-SAR: enfocando justamente en los blancos deseados

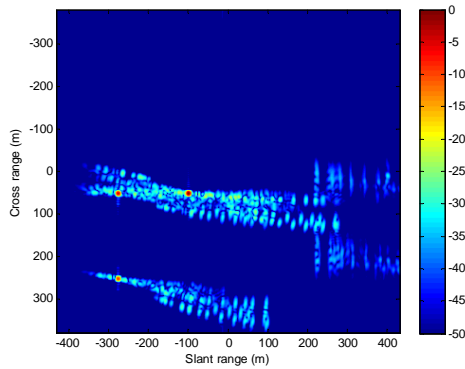


Fig. 4. Imagen tras TR-SAR: no enfocando en los blancos deseados

Analizando los indicadores de enfocado, la mayoría de ellos tienden a empeorar a medida que la estimación de las posiciones de los blancos es más imprecisa (Tabla 1). En conclusión, proporcionan un buen criterio de enfocado al utilizar TR-SAR. Por ejemplo, en una situación en la que hay varios patrones dominantes pero solamente uno de ellos se corresponde con el verdadero blanco puntual, pueden surgir serias dudas a la hora de decidir cuál es el blanco deseado. En ese caso, se aplicará el proceso de enfocado en cada uno de ellos, y el que proporcione el mínimo valor de entropía tras aplicar TR-SAR será el verdadero blanco.

De hecho, a partir de todas las simulaciones llevadas a cabo, se puede concluir que la entropía es el parámetro más fiable. Se puede apreciar cómo evoluciona antes y después de usar TR-SAR (Tabla 1). Cuando la imagen está contaminada de multitrayecto, E es mayor que después de aplicar TR-SAR. Efectivamente, el mejor valor de E tiene lugar cuando se enfoca exactamente en los blancos deseados. Es decir, cuanto más imprecisa sea la estimación de las ubicaciones reales de los blancos, mayor será E . Con respecto al contraste, tras enfocar con precisión durante el proceso de dechirping TR-SAR, su valor mejora considerablemente. No obstante, tiende a dar un resultado confuso cuando no se enfoca correctamente ya que en ocasiones decrece y otras veces aumenta, por lo que su interpretación no es nada obvia. Finalmente, la entropía de Rényi empeora mucho cuando se enfoca justamente en los blancos deseados, pero también crece a medida que la estimación de las posiciones de los blancos es más imprecisa. Resulta útil para enfocar mejor ya que ofrece una información adicional que el contraste no es capaz de proporcionar.

	E	C	RE
Imagen con multitrayecto antes de TR-SAR (Fig. 2)	7.9386	29.7826	9.4192
Después de TR-SAR con enfocado preciso (Fig. 3)	7.4089	44.7956	10.3049
Después de TR-SAR con enfocado impreciso (Fig. 4)	7.6678	51.1072	10.6008

Tabla 1. Evolución de los indicadores de enfocado

V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha mostrado la eficiencia de la técnica TR cuando es aplicada a imágenes SAR en entornos con mucho multitrayecto. Lo más destacable es que TR-SAR se comporta como una modulación de amplitud (AM). En el caso de considerar un único rayo reflejado, la portadora

equivaldría al eco directo –el patrón dominante sobre el que enfoca TR-SAR– y las bandas laterales al eco multitrayecto. Cuando hay muchos ecos, la estructura de la modulación es mucho más variable –su envolvente tiene una apariencia ruidosa. Por lo tanto, aunque la contribución de las bandas laterales sea mayor que en el caso previo, su nivel es menor –su espectro es de banda ancha y parece que han sido sometidas a un promediado. En un contexto SAR, se traduce en que la contribución del multitrayecto se reduce claramente. Esta es la razón por la que TR-SAR ofrece mejores resultados en un entorno con mucho multitrayecto. A su vez, el algoritmo desarrollado puede ser extrapolado a blancos extensos, los cuales estarán constituidos por un conjunto de puntos reflectores. Finalmente, cabe destacar que la entropía, el contraste y la entropía de Rényi proporcionan un buen criterio de enfocado a la hora de utilizar TR-SAR.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto TEC2008-02148 del Ministerio de Ciencia e Innovación.

REFERENCIAS

- [1] W.G. Carrara, R.S. Goodman, R.M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture. Signal Processing Algorithms*, Artech House, 1995.
- [2] C.A. Wiley, *Synthetic Aperture Radars*, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-21, No. 3, pp. 440-443, May 1995.
- [3] D.L. Mensa, *High Resolution Radar Imaging*, Norwood, MA, Artech House, 1981.
- [4] I.G. Cumming, F.H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data. Algorithms and Implementation*, Artech House, 2005
- [5] Y. Jin, J.M.F. Moura, N. O'Donoghue, *Experimental Study of Extended Target Imaging by Time Reversal SAR*, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP '09), pp. 2109-2112, Taipei, Taiwan, April 2009.
- [6] Y. Jin, J.M.F. Moura, M.T. Mulford, N. O'Donoghue, A. Samuel, *Time Reversal Synthetic Aperture Radar Imaging in Multipath*, Proc. 41st Annual Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers (Asilomar '07), pp. 1812-1816, Pacific Grove, CA, November 2007.
- [7] Y. Jin, J.M.F. Moura, *TR-SAR: Time Reversal Target Focusing in Spotlight SAR*, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP '07), Honolulu, Hawaii, April 2007.
- [8] N. O'Donoghue, J.M.F. Moura, Y. Jin, *Signal-Domain Registration for Change Detection in Time-Reversal SAR*, Proc. 42nd Annual Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers (Asilomar '08), Pacific Grove, CA, October 2008.
- [9] L. Xi, L. Guosui, J. Ni, *Autofocusing of ISAR Images based on Entropy Minimization*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 35, No. 4, pp. 1240-1252, October 1999.
- [10] F. Berizzi, G. Corsini, *Autofocusing of Inverse Synthetic Aperture Radar Images using Contrast Maximization*, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 32, No. 3, pp. 1185-1191, July 1996.
- [11] J.M. Muñoz-Ferreras, F. Pérez-Martínez, M. Datcu, *Generalisation of Inverse Synthetic Aperture Radar Autofocusing Methods Based on the Minimisation of the Rényi Entropy*, IET Radar, Sonar and Navigation, Vol. 4, Iss. 4, pp. 586-594, 2010.
- [12] J.M.F. Moura, Y. Jin, *Detection by Time Reversal: Single Antenna*, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 55, No. 1, January 2007.
- [13] J.M.F. Moura, Y. Jin, D. Stancil, J. Zhu, A. Cepni, Y. Jiang, and B. Henty, *Single Antenna Time Reversal Adaptive Interference Cancellation*, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP '05), Philadelphia, March 2005.
- [14] I. de Arriba-Ruiz, F. Pérez-Martínez, J.M. Muñoz-Ferreras, *Multipath Reflectivity Estimation in Urban Environments for Synthetic Aperture Radar Images*, Military Communications Conference (MILCOM 2010), pp. 273-278, San Jose, California, November 2010.
- [15] Y. Jin, J.M.F. Moura, *Time-Reversal Detection Using Antenna Arrays*, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 57, No. 4, April 2009.
- [16] A.V. Oppenheim, A.S. Willsky, S.H. Nawab, *Signals and Systems*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1996.