

ESTIMACIÓN DE LA REFLECTIVIDAD DEL MULTITRAYECTO EN ENTORNOS URBANOS EN RADARES DE APERTURA SINTÉTICA

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

{imanol, felix, jmmunoz}@gmr.ssr.upm.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- Synthetic Aperture Radar (SAR) images a target region reflectivity function in the multi-dimensional spatial domain of range and cross-range. SAR synthesizes a large aperture radar in order to achieve finer azimuth resolution than the one provided by any on-board real antenna. Conventional SAR techniques assume a single reflection of transmitted waveforms from targets. Nevertheless, today's new scenes force SAR systems to work in urban environments. Consequently, multiple-bounce returns are added to direct-scatter echoes. We refer to these as ghost images, since they obscure true target image and lead to poor resolution. By analyzing the quadratic phase error (QPE), this paper demonstrates that Earth's curvature influences the defocusing degree of multipath returns. In addition to the QPE, other parameters such as integrated sidelobe ratio (ISLR), peak sidelobe ratio (PSLR), contrast and entropy provide us with the tools to identify direct-scatter echoes in images containing undesired returns coming from multipath.

I. INTRODUCCIÓN

La técnica SAR (Radar de Apertura Sintética) permite obtener una gran resolución en distancia, y sobre todo en acimut [1-2], con el objetivo de conseguir imágenes de la zona explorada con un detalle que permita no sólo detectar, localizar y reconocer objetos de interés, sino también generar una representación espacial y visual de la reflectividad de la escena iluminada [3].

El nombre de la técnica hace alusión al concepto de síntesis de señal, e implica la suma coherente de las señales recibidas desde posiciones equiespaciadas de la propia trayectoria de la aeronave [4]. El movimiento de la plataforma es necesario para poder sintetizar un array lo suficientemente largo como para cumplir con la especificación de resolución acimutal. La captación de señales fuera de estas posiciones ideales genera errores que provocan una pérdida de coherencia del radar y una degradación de la calidad de la imagen.

El uso de longitudes de onda centimétricas o milimétricas presenta múltiples ventajas frente a los sistemas de captación de imágenes ópticos e infrarrojos. Entre ellas, la posibilidad de obtener imágenes en condiciones climáticas adversas y de operar tanto de día como de noche, lo que les convierte en sistemas "todo tiempo".

Las dimensiones de toda imagen SAR son distancia (range) y acimut (cross range, relacionada con el efecto

Doppler), de tal forma que los dispersores situados en la misma celda de distancia podrán ser discriminados en acimut. La resolución en distancia (ρ_r) mejora con un mayor ancho de banda transmitido (B), mientras que la resolución en acimut (ρ_a) mejora si el cambio en el ángulo de aspecto del blanco durante el tiempo de iluminación ($\Delta\theta$) es grande [1]:

$$\rho_r = \frac{c}{2 \cdot B} \quad (1)$$

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2 \cdot \Delta\theta} \quad (2)$$

donde c es la velocidad de la luz y λ es la longitud de onda.

Este tipo de sistemas suelen trabajar a bordo de aeronaves y satélites apuntando en direcciones aproximadamente perpendiculares a la dirección de vuelo. El concepto de SAR abarca diferentes modos de operación, así como numerosas aplicaciones, no sólo en el ámbito militar sino también en el plano civil, lo que le ha convertido con el paso de los años en una técnica de detección, localización y reconocimiento de reconocido prestigio.

No obstante, a pesar de ser sistemas "todo tiempo", existen otros efectos a los que las técnicas SAR no son capaces de hacer frente de forma tan eficiente. Se trata de una serie de factores externos e internos del propio sistema SAR cuyo cometido es degradar la imagen obtenida, pudiendo poner en entredicho su precisión y calidad. El objetivo de este artículo consiste en el modelado y simulación del fenómeno de multitrayecto, consecuencia del comportamiento de los blancos y la propagación. No se entrará en las técnicas de mitigación, aunque sí se establecerán ciertas ligaduras que permitirán al lector familiarizarse con las más relevantes.

II. CARACTERIZACIÓN DEL MULTITRAYECTO EN SAR

El fenómeno de multitrayecto, debido a la superposición de un rayo directo y de uno o varios rayos reflejados, se manifiesta en un sistema radar como una variación de la potencia recibida del blanco debido a interferencias constructivas y destructivas que se dan en recepción [5-6].

Adicionalmente, puede incluir una componente ruidosa como consecuencia de la reflexión difusa (incoherente con la señal deseada), que se produce cuando un rayo incide sobre una superficie rugosa (no especular), lo que da lugar a una

cantidad importante de rayos reflejados en varias direcciones del espacio. Puede ser considerada como un ruido aditivo que será sumado al ruido térmico del sistema.

Los nuevos escenarios de hoy en día obligan a los sistemas SAR a trabajar en entornos urbanos en los que se produce un número elevado de reflexiones que se suman a la señal correspondiente al blanco deseado. Como consecuencia, en la imagen SAR resultante aparecen ecos adicionales en las proximidades del blanco (“imágenes fantasma”), que en el caso de que sus amplitudes sean comparables a la del blanco, y si además aparecen completamente enfocados en la imagen, pueden surgir serias dudas a la hora de discernir entre el verdadero blanco y los falsos blancos. Por lo tanto, además de oscurecer la imagen y de empeorar la resolución, pueden llegar a enmascarar al blanco, siendo prácticamente imposible su detección.

Estas reflexiones se caracterizan por tener una naturaleza aleatoria, y pueden producirse tanto en puntos del terreno que separa al sistema SAR del blanco, como en dispersores situados en las proximidades del blanco. El estudio analítico del multitrayecto varía en función de las características del escenario a explorar (curvatura de la superficie, rugosidad...), al igual que los resultados que se obtendrán en cada caso. Por este motivo, se distinguirá entre multitrayecto especular y difuso para los casos de Tierra curva y Tierra plana.

A. Multitrayecto especular

El multitrayecto es especular cuando el terreno es lo suficientemente liso, de forma que en el radar se recibe un conjunto de rayos reflejados finito, lo que permite analizar el multitrayecto con un modelo de rayos. En este caso, se toma un modelo de dos rayos: el directo y el reflejado en un punto comprendido en la recta que une al SAR y al blanco.

La Fig. 1 muestra la geometría del multitrayecto para Tierra curva, que será válida para cada una de las posiciones acimutales que recorrerá el SAR embarcado durante su vuelo. El modelado del multitrayecto en SAR no es más que un problema puramente geométrico, puesto que, a partir de las alturas del SAR embarcado (h_t) y del blanco (h_r), así como de la distancia que los separa (d), es posible hallar la distancia que recorre tanto el rayo directo (R_d) como el reflejado (R_r), y por consiguiente, el retardo asociado a cada uno de ellos. El resto de parámetros de la Fig. 1 son: el ángulo de grazing (ψ), la distancia del SAR al punto de reflexión (d_1), la distancia del blanco al punto de reflexión (d_2), la altura equivalente del vuelo de la aeronave (h_t') y la altura equivalente del blanco (h_r').

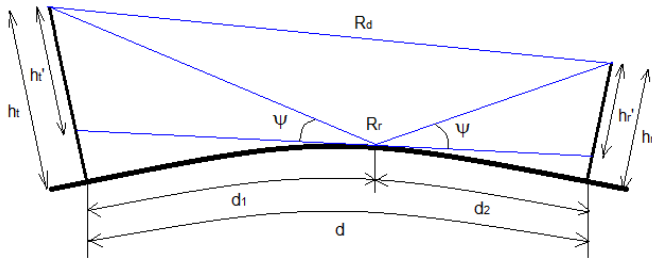


Fig. 1. Geometría del multitrayecto para Tierra curva [5]

Es muy importante hacer una puntualización: en este artículo, se está estudiando la posible reflexión en un punto comprendido entre el radar y el blanco, y no las posibles reflexiones de dispersores situados en las proximidades del

blanco. Por lo tanto, el punto entre ambos terminales que verifica que el ángulo con el que el rayo incide en el terreno (ψ) es igual al ángulo con el que se refleja (la conocida ley de Snell) es único, de ahí la razón de que sólo se contemple un único rayo reflejado. Podrían existir otros posibles rayos reflejados entre el SAR y el blanco que también verificarían la ley de Snell, sin embargo, no incidirían en el blanco.

Como es lógico, el rayo reflejado experimenta una atenuación mayor, no sólo debido a que recorre una distancia mayor (compuesta por dos tramos: incidencia en el suelo y posterior reflexión) sino también a que pierde parte de su potencia al incidir en la superficie terrestre o marítima. Simultáneamente, presenta una fase diferente respecto a la del rayo directo, lo que provoca que en recepción tenga lugar una interferencia constructiva o destructiva en función de si el rayo llega en fase o en contrafase.

Conocidas las características intrínsecas del medio (mar, tierra húmeda, tierra seca...) y los parámetros del sistema SAR empleado (frecuencia, polarización...), se determinará el coeficiente de reflexión especular efectivo (Γ_s), que indicará la cantidad de rayo incidente en la superficie que es reflejado. Está constituido por tres factores diferentes: el coeficiente de reflexión de la superficie plana ($\Gamma_{h,v,c}$), el factor debido a la divergencia por curvatura de la Tierra (D) y el factor debido a la rugosidad del terreno (ρ_s).

$$\Gamma_s = \Gamma_{h,v,c} \cdot D \cdot \rho_s \quad (3)$$

El multitrayecto en Tierra plana supone una simplificación respecto al anterior puesto que no se tiene en cuenta la curvatura intrínseca de la Tierra, lo que facilita los cálculos tanto de las distancias que recorren el rayo directo y el reflejado, así como la obtención del coeficiente de reflexión especular efectivo, en el que no será necesario incluir el factor D .

$$\Gamma_s = \Gamma_{h,v,c} \cdot \rho_s \quad (4)$$

La diferencia más destacable entre ambos casos radica en los resultados, tal y como se analizará en la sección III.

B. Multitrayecto difuso

La incidencia de la señal en una superficie rugosa dispersa la energía en otras direcciones, produciendo multitud de reflexiones no coherentes que llegarán al receptor. El problema se resolvería de la misma manera que en los casos anteriores, tanto para Tierra curva como para Tierra plana. La diferencia estriba en que será necesario sumar a la señal recibida un ruido gaussiano, cuya varianza vendrá dada por el producto de la potencia recibida del blanco y el cuadrado del coeficiente de reflexión difuso efectivo (Γ_d). La obtención de este último será prácticamente igual que en los casos anteriores, con la salvedad de que ahora el factor debido a la rugosidad del terreno (ρ_s) es sustituido por el coeficiente de rugosidad por reflexión difusa (ρ_d), el cual contempla una rugosidad del terreno bastante mayor que en el caso especular. Para Tierra curva (5) y para Tierra plana (6), se obtiene de la siguiente manera:

$$\Gamma_d = \Gamma_{h,v,c} \cdot D \cdot \rho_d \quad (5)$$

$$\Gamma_d = \Gamma_{h,v,c} \cdot \rho_d \quad (6)$$

Dada la dependencia de Γ_d con el ángulo de grazing, el ruido afectará más a la señal cuando la distancia entre el radar y el blanco sea pequeña (ángulos de grazing elevados).

C. Técnicas de mitigación del multitrayecto

Son varias las técnicas existentes en la actualidad destinadas a la reducción del multitrayecto en SAR, entre las cuales destacan algunas innovadoras como la técnica *Time Reversal SAR* [7] y el algoritmo *IRAMS* (*Image Reconstruction Algorithm for Multipath Scattering*) [8].

III. RESULTADOS

Para generar imágenes SAR teniendo en cuenta un escenario con multitrayecto especular (los resultados obtenidos pueden extrapolarse al caso difuso), 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.

El fenómeno del multitrayecto puede llegar a ser muy pernicioso, puesto que los “ecos fantasma” pueden llegar a enmascarar completamente al blanco. Sin embargo, la existencia de algún rasgo que permita diferenciar al eco multitrayecto del eco deseado podría dar solución al problema. Dos aspectos importantes a tener en cuenta son: el nivel de amplitud del eco multitrayecto y su grado de desenfoque en la imagen. Este último vendrá dado por el error cuadrático de fase (*QPE*, *Quadratic Phase Error*), que será estimado comparando la historia de fase del dispersor del rayo multitrayecto con la de un dispersor ideal ubicado a una distancia igual a la recorrida por el rayo multitrayecto en el punto central de la apertura sintética.

El *QPE* provoca un ensanchamiento de la respuesta impulsional del sistema SAR en la dirección acimutal, por lo tanto, será interesante medir parámetros como el *ISLR* (*Integrated Sidelobe Ratio*) y el *PSLR* (*Peak Sidelobe Ratio*) en dicha dirección, los cuales empeoran ante la presencia de *QPE*. A su vez, otra forma de medir el grado de enfocado de las imágenes SAR obtenidas es a través de la entropía (*E*) y del contraste (*C*), resultando un mayor enfocado a menor entropía y a mayor contraste.

$$ISLR = \frac{\text{Energía lóbulos laterales}}{\text{Energía lóbulo principal}} \quad (7)$$

$$PSLR = \frac{\text{Intensidad de pico máximo lóbulo lateral}}{\text{Intensidad de pico lóbulo principal}} \quad (8)$$

$$E = -\sum_i \sum_j \bar{I}_{i,j} \cdot \ln \bar{I}_{i,j} \quad (9)$$

$$C = \frac{\sqrt{A\{[|I_{i,j}|^2 - A(|I_{i,j}|^2)]^2\}}}{A(|I_{i,j}|^2)} \quad (10)$$

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:

$$\bar{I}_{i,j} = \frac{|I_{i,j}|^2}{\sum_i \sum_j |I_{i,j}|^2} \quad (11)$$

Los parámetros de simulación más importantes del radar empleado son: frecuencia de operación (242.2 MHz), ancho de banda transmitido (133.5 MHz), frecuencia de repetición de pulsos (320 Hz), frecuencia de muestreo (192 MHz).

A. Multitrayecto en Tierra plana

Se analiza un caso de reflexión en un punto del terreno que separa al sistema SAR del blanco, en el que el eco reflejado recorre, en su camino de vuelta, el mismo camino que siguió hasta llegar al dispersor en su camino de ida (R_r). El resultado obtenido para un blanco puntual se muestra en la Fig. 2, en la que se aprecia el blanco deseado, y a su derecha, un falso blanco como consecuencia del multitrayecto. La Fig. 3 muestra el *QPE* del eco multitrayecto.

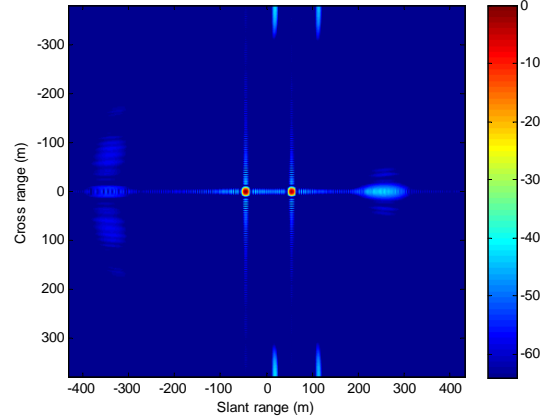


Fig. 2. Imagen SAR con multitrayecto en Tierra plana

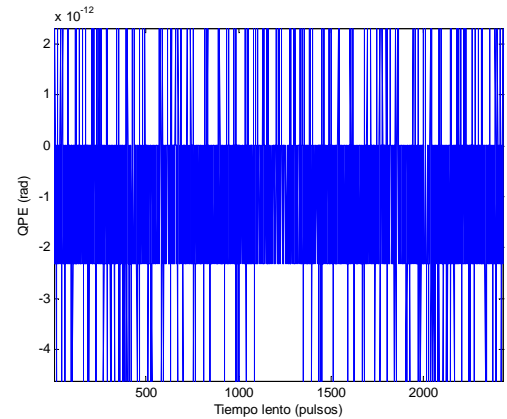


Fig. 3. QPE del eco multitrayecto en Tierra plana

Lo más significativo es que el eco multitrayecto está completamente enfocado en la imagen (*QPE* prácticamente nulo), por lo que podrían surgir serias dudas a la hora de discernir entre el verdadero blanco y el falso blanco. En términos geométricos, puede afirmarse que el origen del multitrayecto es un punto conocido. Para corroborar lo anterior, la Tabla 1 demuestra que el *ISLR* y el *PSLR* son prácticamente iguales para ambos ecos.

	<i>ISLR</i>	<i>PSLR</i>	<i>E</i>	<i>C</i>
Eco directo	-34.3800	-42.6200	5.7783	66.8756
Eco multi.	-34.3761	-42.6193		

Tabla 1. Parámetros imagen SAR con multitrayecto en Tierra plana

B. Multitrayecto en Tierra curva

Repetiendo el caso anterior pero teniendo ahora en cuenta la curvatura terrestre, se llega a una diferencia importante con respecto al caso de Tierra plana: el eco multitrayecto deja de estar completamente enfocado en la imagen, o lo que es lo mismo, aparece un ligero *QPE* debido a la no existencia de

un punto origen del multitrayecto (Fig. 4). Por lo tanto, queda demostrado que la curvatura de la Tierra influye en el grado de desenfoque del eco multitrayecto en la imagen SAR obtenida.

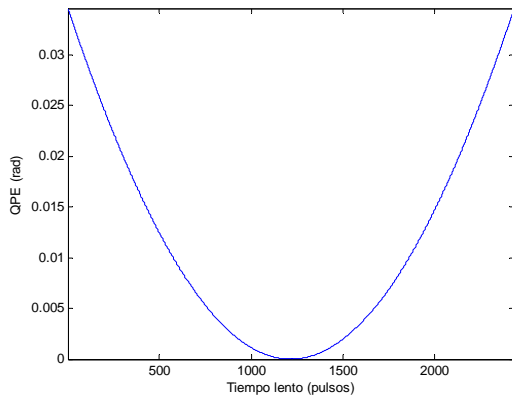


Fig. 4. QPE del eco multitrayecto en Tierra curva

Comparando los resultados obtenidos (Tabla 2) con el caso de Tierra plana (Tabla 1), se comprueba que son coherentes ya que, debido a la existencia de un ligero QPE , el $PSLR$ del eco multitrayecto empeora, es decir, aumenta ya que el nivel del lóbulo principal es menor y el de los lóbulos laterales es mayor. A su vez, E y C también empeoran con respecto al caso de Tierra plana: la entropía aumenta y el contraste disminuye (mayor desenfoque).

	$ISLR$	$PSLR$	E	C
Eco directo	-34.3799	-42.6200	5.7796	66.8526
Eco multi.	-34.3763	-42.6183		

Tabla 2. Parámetros imagen SAR con multitrayecto en Tierra curva

C. Otros casos de estudio

A continuación, se estudia un caso para Tierra plana en el que el eco reflejado recorre, en su camino de vuelta, el mismo camino que recorre el eco directo (R_d). Nuevamente, se presenta el QPE del eco multitrayecto (Fig. 5) así como los valores de los parámetros más significativos (Tabla 3).

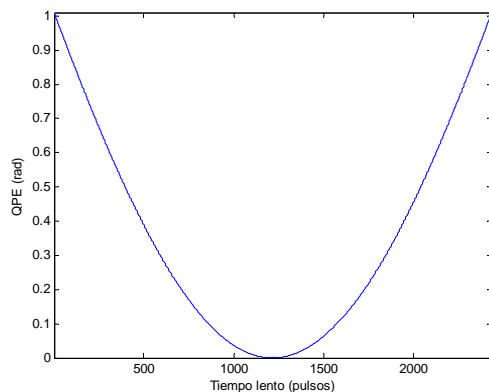


Fig. 5. QPE del eco multitrayecto en Tierra plana (ejemplo 2)

	$ISLR$	$PSLR$	E	C
Eco directo	-34.3798	-42.6197	5.7712	67.1710
Eco multi.	-34.3679	-42.6187		

Tabla 3. Parámetros imagen SAR con multitrayecto en Tierra plana (ejemplo 2)

El eco multitrayecto está mucho más desenfoqueado que en la geometría propuesta anteriormente. Muestra de ello es que el QPE es bastante mayor. La causa vuelve a ser la no existencia de un punto origen del multitrayecto, aún en el caso de Tierra plana (solamente el caso de multitrayecto explicado anteriormente para Tierra plana conlleva un QPE nulo). Para Tierra curva, el resultado es muy similar pero con un desenfoque ligeramente mayor (E y C empeoran, se vuelve a comprobar que el desenfoque en Tierra curva es mayor).

Simulando otros escenarios multitrayecto de interés, como es el caso de un entorno urbano en el que los rayos pueden reflejarse más de una vez en dispersores próximos al blanco, se ha comprobado que el grado de desenfoque es considerable, con lo que sería más fácil diferenciar en la imagen al verdadero blanco de los falsos blancos.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se ha mostrado la influencia de la curvatura terrestre en el desenfoque de los ecos multitrayecto. Para el primer caso estudiado, en Tierra plana el origen del multitrayecto es un punto conocido, y por lo tanto, no existe QPE en la imagen. En Tierra curva, el origen del multitrayecto no existe, con lo cual sí aparecerá un QPE que aumentará con un incremento de la diferencia entre la altura del sistema SAR embarcado y la del blanco, de la longitud de la apertura sintetizada y de la frecuencia. No obstante, en ningún caso se tratará de un desenfoque desmedido, por lo tanto, este tipo de multitrayecto puede llegar a ser muy problemático ya que puede dar lugar a un falso blanco muy parecido y muy cercano al eco deseado. El resto de infinitos posibles ecos multitrayecto aparecen considerablemente más desenfocados, siendo mucho más sencilla su detección (por ejemplo, en entornos urbanos).

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 and 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] F.H. Whon and I.G. Cumming, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data. Algorithms and Implementation*, Artech House, 2005.
- [5] J.M. Hernando-Rábanos, *Transmisión por Radio*, Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, S.A. Madrid, 1998.
- [6] B.R. Mahafza, *Introduction to radar analysis*, CRC Press, 1998.
- [7] Y. Jin, J.M.F. Moura and N. O'Donoghue, *Time Reversal Synthetic Aperture Radar Imaging In Multipath*, Department of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2007.
- [8] D.A. Garren, J.S. Goldstein, D.R. Obuchon, R.R. Greene and J.A. North, *SAR Image Formation Algorithm with Multipath Reflectivity Estimation*, 2004.