

## IDENTIFICACIÓN DE BLANCOS DE RADAR MEDIANTE LA SÍNTESIS DE E-PULSOS EXPONENCIALES

Juan D. Morales(\*), Diego P. Ruiz(\*\*) y María C. Carrión(\*\*)

[druiz@ugr.es](mailto:druiz@ugr.es); [mcarrion@ugr.es](mailto:mcarrion@ugr.es)

(\* *Centro Nacional de Supervisión y Operaciones, Dpto. Gestión de Tráfico. Telefónica. Madrid.*  
(\*\*) *Dpto. Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Campus Fuentenueva, 18071 Granada*

### RESUMEN.

En esta comunicación se realizan nuevas aportaciones al campo de la discriminación de blancos de radar a través únicamente de la respuesta dispersada de objetos conductores. En este caso se presentan aportaciones a la técnica del pulso de extinción (E-pulso) que usa las resonancias electromagnéticas del blanco como figura de discriminación. Se propone la síntesis de E-pulsos utilizando como funciones base exponenciales complejas, obteniéndose pulsos con características totalmente distintas a los creados con funciones base rectangulares ó polinómicas usadas anteriormente para este fin. Debido a un mayor número de parámetros que se pueden controlar, se puede diseñar un espectro más adaptable a las características buscadas y cuyo fin último es la mejora de la discriminación. Concretamente, se ha introducido un factor de ponderación que consigue modificaciones en el espectro de los E-pulsos que ayudan a maximizar parámetros tales como el área de discriminación (DBS) y el parámetro de discriminación (DP). Los resultados numéricos obtenidos para la discriminación entre hilos delgados de diferentes longitudes muestran que los E-pulsos exponenciales propuestos en este trabajo, mejoran los resultados obtenidos por otros tipos de E-pulsos existentes en la bibliografía.

### ABSTRACT.

New contributions to non-cooperative radar target discrimination using only the scattered response of conducting objects are presented in this communication. The studied technique here is the extinction-pulse (E-pulse) technique which makes use of the concept of target natural resonances as discrimination figures. It is proposed to expand the E-pulses using complex exponential functions as basis functions, thus obtaining new pulses with completely different characteristics to those ones produced from the expansion using rectangular or polynomial basis functions previously reported in the bibliography. Due to the increase in the number of free parameters, an adjustable spectrum can be designed to achieve our goal, i.e. to improve discrimination figures. Specifically, a weighting factor in the E-pulse spectrum design has been introduced and tested, helping us to maximize some discrimination parameters such as the discrimination area (DBS) or the discrimination parameter (DP). Numerical results obtained in the discrimination between thin cylinders of different lengths, show that the proposed exponential E-pulses improve the discrimination results obtained with other types of E-pulses studied in the bibliography.

**Palabras clave:** radar, discriminación de blancos, E-pulsos, funciones base.

### INTRODUCCIÓN.

Las experiencias realizadas sobre blancos conductores excitados por ondas electromagnéticas transitorias de amplio espectro, junto con el método de expansión en Singularidades (SEM), han mostrado que la respuesta de blancos conductores  $r(t)$  se puede modelar en el dominio del tiempo por una suma de exponenciales complejas amortiguadas cuyas frecuencias complejas se denominan resonancias naturales o polos del blanco (Baum *et alii*.1992), (Mooney, Ding and Riggs 2000). Según lo anterior, la

respuesta tardía del blanco ó 'late-time'  $r(t)$ , se puede expresar como:

$$r(t) = \sum_{n=1}^N A_n e^{\sigma_n t} \cos(\omega_n t + \phi_n) \quad t > T_L, \quad (1)$$

donde  $s_n = \sigma_n + j\omega_n$  es la frecuencia natural compleja del n-ésimo modo,  $A_n$  y  $\phi_n$  son la amplitud y la fase del modo n-ésimo, respectivamente y  $T_L$  describe el comienzo del 'late-time'. El número de modos en la respuesta  $N$  está determinado por el contenido en frecuencia finito de la onda que excita el blanco. Las

frecuencias naturales sólo dependen de la geometría y características electromagnéticas del blanco y son independientes tanto de la orientación del mismo como de la excitación utilizada. Esta cualidad de las resonancias naturales las hace de gran utilidad para la identificación del blanco, por lo que se les denomina firma electromagnética del blanco.

Existen distintas técnicas de identificación basadas en el concepto y propiedades de las resonancias naturales del blanco, nos centramos en este trabajo en la técnica del pulso de extinción (E-pulso). Un E-pulso,  $e(t)$ , se define como una onda de duración finita  $T_e$ , transitoria, que aniquila o extingue la contribución de un número preseleccionado de resonancias complejas naturales en el Late-time de la respuesta del blanco  $T_L$ .

En general una forma muy útil de representar el E-pulso es como una suma de funciones base de la forma:

$$e(t) = \sum_{m=1}^M \alpha_m f_m(t) \quad (2)$$

donde  $f_m(t)$  es la m-ésima función base de un conjunto apropiado de funciones linealmente independiente y  $\alpha_m(t)$  es la amplitud de dicha función base.

Varios conjuntos de funciones base se han propuesto y utilizado en la representación del E-pulso (Rothwell *et alii.* 1985), (Carrión, *et alii.* 1993). El objetivo del presente trabajo es el estudio de las funciones base exponenciales complejas. Se muestra cómo los E-pulsos sintetizados con estas funciones base mejoran a los obtenidos con cualquiera de los otros conjuntos base. Ello se consigue mediante la introducción del concepto de factor de ponderación (Weighting Factor, WF) que va a permitir crear un espectro "a medida" con el que se logra una discriminación óptima. A través de este parámetro se propone la síntesis de una familia de nuevos E-pulsos, de entre los cuales, se escoge el conjunto base que más interese para obtener una discriminación óptima. El análisis de la capacidad de discriminación se realiza en ausencia de ruido y en ambientes ruidosos, comparándose los nuevos E-pulsos con los generados con funciones base rectangulares, ya que son los más utilizados hasta ahora en la bibliografía por su simplicidad de cálculo, y los generados con funciones coseno.

#### E-PULSOS EXPONENCIALES.

Según el SEM, es posible caracterizar el campo dispersado por un blanco conductor en el Late-time, simplemente por una suma de exponenciales complejas o sinusoides amortiguadas tal como se ha expresado en (1). Dada esta situación, parece lógico que este tipo de funciones base puedan ser adecuadas para la síntesis de E-pulsos. Se definen estas funciones base por la expresión:

$$f_m(t) = e^{\tilde{\sigma}_m t} \cos(\tilde{\omega}_m t + \tilde{\phi}_m) \quad (3)$$

de modo que el E-pulso en el dominio temporal tiene la forma:

$$e(t) = \sum_{m=1}^m \alpha_m e^{\tilde{\sigma}_m t} \cos(\tilde{\omega}_m t + \tilde{\phi}_m) \quad (4)$$

La elección de las frecuencias complejas  $\tilde{s}_m = \tilde{\omega}_m t + \tilde{\phi}_m$  y de las fases  $\tilde{\phi}_m$  usadas en la expansión determina la utilidad de este conjunto de funciones base. Como se puede ver en (3) estas funciones base tienen tres parámetros sobre los que se puede actuar, lo que va a dotarlas de una gran versatilidad, ya que se pueden modificar dichos parámetros para obtener una discriminación óptima.

Otros tipos de funciones base carecen de estas características. Las funciones base rectangulares debido a su simplicidad no presentan parámetros sobre los que actuar y las funciones base polinómicas están definidas a trozos. En ellas los parámetros que se podrían modificar vienen dados por la imposición de continuidad a la función y su derivada, por tanto no se puede actuar sobre ellos para optimizar la eficacia de los E-pulsos resultantes.

Los E-pulsos sintetizados con funciones base exponenciales son suaves y continuos, sin necesidad de imponer condiciones adicionales. Tienen por tanto los beneficios de la reducción de ruido aportados por otros tipos de E-pulsos.

Las funciones base que se propone utilizar tienen los siguientes parámetros:

$$\tilde{\sigma}_m = 0; \quad \tilde{\omega}_m = WF * \left( \frac{\text{imag}(s_m)}{m} \right) + (m-1) \frac{\pi}{T_e}; \quad \tilde{\phi}_m = 0$$

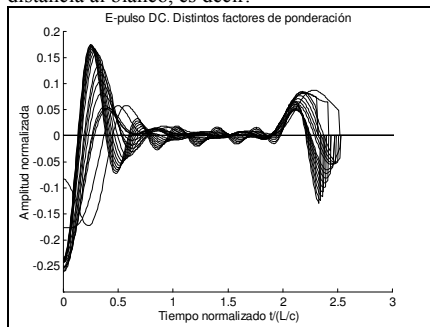
donde  $s_m$  es la m-ésima frecuencia de resonancia del blanco, m es por tanto el orden del modo y WF es el factor de ponderación. Lo que se propone es maximizar la capacidad de discriminación variando WF.

Se ha elegido como blanco patrón un hilo delgado de longitud  $L$  y radio  $a$ ,  $L/a=200$ ,

iluminado por una onda incidente con un ángulo  $\vartheta = 60^\circ$ . En la Figura 1 representamos los E-pulsos naturales DC (Rothwell *et alii.* 1985) generados a partir de funciones exponenciales con distintos factores de ponderación (desde WF=0,1 hasta WF=1), sintetizados para aniquilar los cinco primeros modos de la respuesta del hilo. Vemos en esta figura cómo las duraciones de estos E-pulsos, son distintas (aunque próximas a las de los E-pulsos generados con funciones coseno/rectangulares).

#### DISCRIMINACIÓN DE BLANCOS.

Se define el área de discriminación DBS (Backscatter Discrimination Area, DBS) (Rothwell *et alii.* 1985) como el cociente entre la energía del campo dispersado en el Late-time  $E_{bs}$  en una dirección particular, y la energía de la onda incidente  $E_e$ , multiplicado por el cuadrado de la distancia al blanco, es decir:

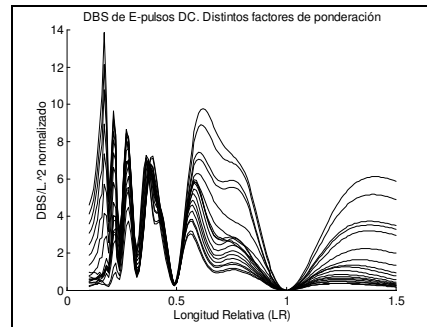


**Figura 1.-** E-pulsos DC sintetizados mediante funciones base exponenciales para el eliminar los 5 primeros modos del hilo delgado.

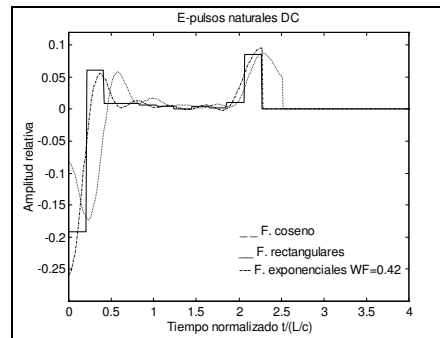
$$D_{bs} = 4\pi \cdot \lim_{r \rightarrow \infty} r^2 \frac{\int_{T_E + r/c}^{\infty} \frac{1}{r^2} |E_{bs}(r, t)|^2 dt}{\int_0^{T_E} e(t)^2 dt} = 4\pi \cdot \lim_{r \rightarrow \infty} r^2 \frac{\mathcal{E}_{bs}}{\mathcal{E}_e}$$

El parámetro DBS tiene dimensiones de área, aunque en nuestro caso representaremos  $DBS/r^2$  que será adimensional. El DBS se anulará cuando el blanco sea el esperado e interesa que su valor sea elevado para blancos distintos al esperado para así lograr mayor discriminación. En la figura 2 se muestra el DBS, para diferentes longitudes relativas LR, siendo  $LR=L/L_{esperada}$ ,  $L_{esperada}$  la longitud del blanco esperado o patrón y L la longitud del blanco a identificar. Como se observa en la figura existe gran diferencia en la capacidad de discriminación de unos pulsos y otros. El pulso

que presenta una mejor capacidad de discriminación es el generado con funciones exponenciales con un factor de ponderación  $WF=0,42$ , que es el que corresponde a la curva con mayor pendiente en torno a  $LR=1$ . A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la comparación entre los E-pulsos naturales DC generados con funciones exponenciales optimizadas, es decir con WF óptimo, con los E-pulsos que provienen de funciones base coseno y rectangulares (referencia). En la Figura 3 se presentan estos tres tipos de E-pulsos. Es de destacar que los rectangulares y coseno son muy similares, mientras que los obtenidos con funciones exponenciales conducen a un E-pulso con una forma bastante diferente.



**Figura 2.-** DBS normalizado frente a LR para E-pulsos exponenciales con distinto WF.



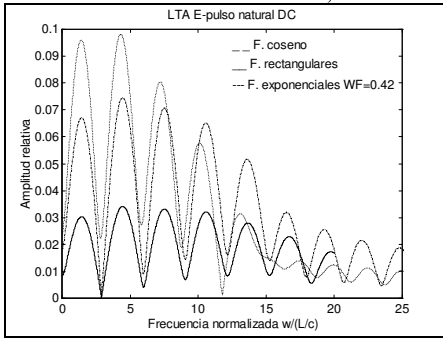
**Figura 3.-** E-pulsos naturales DC para aniquilar 5 modos del hilo delgado.

En la Figura 4 se muestra el comportamiento en frecuencia de los E-pulsos de la figura 3. Para ello se ha representado la transformada de Laplace (LTA) frente a la frecuencia  $\omega$  para  $\sigma = -0,2601 c/L$ . Vemos como las tres curvas tiene un cero en la primera resonancia natural del hilo esperado o blanco patrón, es decir

en  $s_1 = -0,2601 + j2,906 c/L$ . Se observa también cómo la curva que corresponde a funciones exponenciales discrimina mejor, ya que los valores de LTA son muy superiores, lo que implica que frecuencias distintas a las de resonancia no serán aniquiladas y nos permitirá una mejor discriminación.

En la Figura 5 se presentan los resultados obtenidos de la comparación entre los diferentes tipos de E-pulso, mediante el DBS normalizado. En ella se puede ver la mejora obtenida con los nuevos E-pulsos.

Para cuantificar la capacidad de discriminación en ambiente ruidoso, se define el



**Figura 4.-** LTA de E-pulsos naturales DC para  $\sigma = -0.2601 c/L$ .

parámetro de discriminación DP como el cociente de la energía en el 'late-time' de la respuesta ruidosa del blanco esperado  $E_e$  y la energía del blanco no esperado  $E_{ne}$ , es decir:

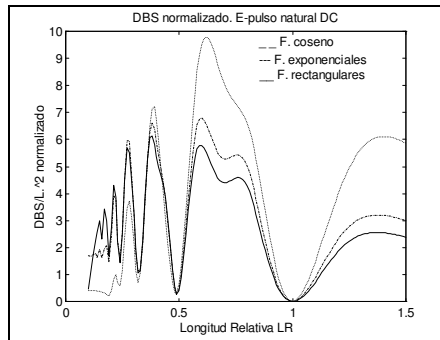
$$DP = \frac{E_e}{E_{ne}}$$

En ausencia de ruido,  $DP=0$ , indicando una identificación perfecta del blanco. Cuando tenemos ruido, se obtendrá mejor discriminación cuanto menor sea el valor de DP. Se trata por tanto, de utilizar funciones base que sinteticen E-pulsos que minimicen DP. Los resultados del estudio en presencia de ruido blanco gaussiano se muestran en la Figura 6 para un hilo un 5% más corto que el esperado y para distintos valores de la relación señal ruido (SNR). Se puede observar como los resultados obtenidos utilizando E-pulsos exponenciales mejoran de nuevo los que se obtienen con funciones base coseno y rectangulares.

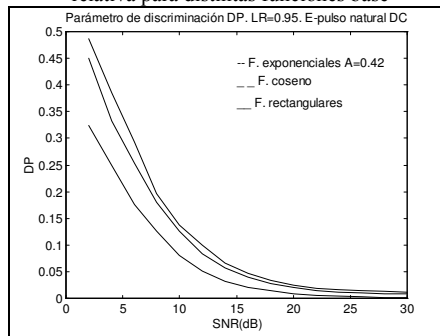
#### CONCLUSIONES.

En este trabajo se ha propuesto una nueva familia

de E-pulsos, sintetizados utilizando funciones base exponenciales. Se han presentado los resultados obtenidos para la discriminación entre hilos delgados de longitud tan solo un 5% más cortos que el hilo patrón, obteniéndose que los nuevos E-pulsos tienen mayor capacidad de discriminación que los rectangulares y los de tipo coseno. Se ha confirmado la validez de estos nuevos E-pulsos en ausencia de ruido y en ambientes de ruido aditivo blanco gaussiano. A través de la introducción del factor de ponderación se ha conseguido modificar el espectro de los E-pulsos y adaptarlo para optimizar parámetros de discriminación tales como el DBS y el DP.



**Figura 5.-** DBS normalizado frente a la longitud relativa para distintas funciones base



**Figura 6.-** DP frente a la relación señal-ruido SNR.

#### BIBLIOGRAFÍA.

Baum, *et alii* 1991 "The singularity expansion method and its application to target identification", *Proc. IEEE*, vol. 79, n°10, pp. 1481-1492.

Carrión, *et alii*. 1993, Subsectional-Polinomial E-Pulse Synthesis and Application to Radar Target Discrimination, *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, vol 44, 859-862.

Mooney, Ding and Riggs 2000, Performance

analysis of an automated E-pulse target discrimination scheme, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 48, pp. 619 – 628.

Rothwell *et alii*. 1985, Radar target discrimination using the extinction-pulse technique”, *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, vol AP-33, pp. 929-937.

Ruiz, *et alii* 1999, E-pulse and RAF: two methods for radar target discrimination, *Radio Science*, vol. 34, no. 1, pp: 93-102.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente financiado por el proyecto TIC 2001-2902.