

PREDICCIÓN DE RCS DE AVIONES DE BAJA DETECTABILIDAD: NUEVAS TÉCNICAS DE PROCESADO GRÁFICO¹

Juan M. Rius, Mercè Vall-Ilossera, Angel Cardama
Grupo A.M.R., Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Universidad Politécnica de Cataluña
Apdo. Postal 30002, 08080 Barcelona
Tel. 93-4017219

Radar cross section (RCS) of complex targets can be obtained in real time using the hardware capabilities of a high performance graphic workstation. Target geometry is modelled by a computer-aided design package. First order contribution to RCS is computed under physical optics high-frequency approximation and method of equivalent currents. Radar absorbent coatings are considered through impedance boundary condition (IBC) and the Fresnel reflection coefficients in the physical optics surface integral. Real time computation is achieved through graphical processing of an image obtained with local illumination modeling of the target.

INTRODUCCION

Para calcular los campos electromagnéticos difractados por objetos eléctricamente grandes deben utilizarse aproximaciones de alta frecuencia. Sin embargo, su aplicación a la predicción de sección recta (RCS) de blancos radar complejos es computacionalmente muy costosa cuando se modela el blanco mediante un número muy elevado de facetas poligonales planas.

Recientemente se ha desarrollado un método de "procesado gráfico" que permite obtener resultados en tiempo real con una estación de trabajo dotada de acelerador gráfico hardware. El procesado gráfico se basa en el modelado del blanco con superficies paramétricas NURB y la visualización de una imagen del mismo en la estación gráfica. El procesado de la imagen en la pantalla permite obtener la sección recta según la aproximación de óptica física de primer orden [1]. Las reflexiones múltiples entre superficies se consideran generando la imagen con un método de iluminación global [2].

Como la aproximación de óptica física predice únicamente la reflexión en superficies perfectamente conductoras, pero no efectos de segundo orden como difracción en aristas, el método se ha validado con blancos radar en los que predomina la reflexión superficial (Boeing 727, misil, ect.) [1] [3]. Sin embargo, no es aplicable a aviones de baja detectabilidad "stealth", en los que la sección recta se optimiza minimizando la reflexión en superficies, con lo que la difracción en aristas se convierte en un efecto de primer orden. Además, debe considerarse la presencia de recubrimientos absorbentes radar (RAM).

DIFRACCION EN ARISTAS

La aproximación de alta frecuencia que permite obtener la contribución de la arista de forma más rigurosa es la formulación del método de las corrientes equivalentes (MEC) con los coeficientes de difracción de longitud incremental (ILDC) de Mitzner, válidos para direcciones de observación arbitrarias. Sin embargo, para la predicción de sección recta de blancos radar complejos es una práctica habitual la utilización de los coeficientes de la teoría física de la difracción (PTD) en la integral del MEC [5]. Esta última es válida únicamente para dirección de observación en el cono de Keller, que solamente coincide con la dirección monoestática cuando la incidencia es perpendicular a la arista.

¹ Este trabajo ha sido subvencionado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT), ACCION ESPECIAL PRONTIC "Programa de investigación aplicada para el desarrollo y validación de métodos de cálculo numérico para la predicción y análisis de las características de los ecos radar (RCS) y su reducción", TIC 88-288E, Gestor: Dirección General de Telecomunicaciones (D.G.Tel), Coordinador: empresa CASA

Tras estudiar la conveniencia de utilizar uno u otro tipo de coeficientes, se ha decidido implementar los coeficientes de PTD en el algoritmo de procesado gráfico. La razón estriba en que en el caso monoestático ambos tipos de coeficientes difieren únicamente en el acoplo de polarización incidente perpendicular a la arista a polarización difractada paralela al plano de reflexión, efecto que sólo se manifiesta con incidencia oblicua respecto a la arista pero que responde fielmente a la realidad física. Sin embargo, suele despreciarse en la práctica debido a la complejidad que introduce su análisis. Además, en blancos radar complejos la contribución monoestática de las aristas se produce principalmente para incidencia perpendicular, situación en que son válidos los coeficientes de PTD.

La integral de línea del método de las corrientes equivalentes para la componente copolar -paralela al campo eléctrico incidente- del campo eléctrico difractado en la dirección monoestática puede expresarse de la forma:

$$\vec{E}^r \cdot \hat{e}^i = E_0 \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} \int [f \sin^2 \gamma - g \cos^2 \gamma] e^{2jkr \cdot \vec{r}} d\vec{r} \quad (1)$$

donde γ es el ángulo que forma el campo eléctrico incidente con la dirección normal al plano de incidencia, mientras que f y g son los coeficientes de difracción de Ufimtsev (PTD) válidos para las direcciones paralela y perpendicular al plano de incidencia, respectivamente.

La formulación de los coeficientes de difracción de PTD es muy conocida e incluye varias funciones trigonométricas. Como el método de procesado gráfico calcula para cada pixel de las aristas el valor de los coeficientes de difracción, se puede reducir el coste computacional si se evitan las funciones trigonométricas con la siguiente aproximación lineal, válida para dirección de observación monoestática:

1 cara visible $0 \leq \phi \leq \pi - \alpha_i$	2 caras visibles $\pi - \alpha_i \leq \phi \leq \pi - \alpha_i/2$	
$f \approx -\frac{\phi}{\pi}$	$f \approx -(n-1)$	(2)
$g \approx -\left(\frac{n}{2} - \frac{\phi}{\pi}\right)$	$g \approx 0.2$	(3)

donde $n = \alpha/\pi$ es el ángulo exterior de la cuña normalizado respecto a π , α_i es el ángulo interno y ϕ es el ángulo entre una cara de la cuña y la proyección de la dirección de incidencia en el plano perpendicular a la arista. Si se desea una mejor aproximación de g cuando las dos caras son visibles, puede utilizarse el valor exacto de g para incidencia en la bisectriz de la cuña:

$$\phi = \frac{\alpha}{2} \Rightarrow g = \tan \frac{\alpha}{2} - \frac{2}{n} \cot \frac{\pi}{n} \quad (4)$$

El error introducido por las aproximaciones (2) a (4) es pequeño, en general inferior a 1 dB, y en todo caso muy inferior a los errores debidos a las aproximaciones de alta frecuencia cuando se aplica el método a la predicción de sección recta de blancos radar complejos.

Algoritmo de procesado gráfico

La idea en que se basa el algoritmo de procesado gráfico es la detección en una imagen del blanco de los pixel que pertenecen a una arista, en los que la discontinuidad en la dirección de la normal a la superficie se traduce en una discontinuidad de la luminosidad. Si para cada pixel se calculan los ángulos característicos de la cuña a la que pertenece la arista, y de ellos los coeficientes de difracción, resulta que la suma coherente de los coeficientes de difracción de todos los pixel de la arista equivale a la integral de línea (1) del método de las corrientes equivalentes. La principal ventaja que presenta este método sobre las técnicas clásicas reside en que procesa únicamente las aristas visibles, evitando el problema de la detección de eclipses.

El algoritmo se ha implementado en cuatro pasos:

- 1- Visualización del blanco con las fuentes de iluminación adecuadas y cálculo gráfico de la normal a la superficie en cada pixel. Para ello se utilizan tres fuentes de luz de colores rojo, verde y azul (R,G,B) que iluminan el blanco en las direcciones de los ejes coordenados, de forma que las tres componentes (R,G,B) de la luminosidad de cada pixel coinciden con los tres cosenos directores de la normal a la superficie en este punto.

- 2- Detección gráfica de aristas como discontinuidades en la normal a la superficie. Para discriminar las discontinuidades de la normal debidas a aristas de las debidas a eclipses se comprueba si existe discontinuidad en el *z-buffer*, porción de memoria de pantalla que contiene la distancia de cada pixel al observador.
- 3- Para cada pixel de las aristas, se calculan los ángulos α y ϕ . Para ello se procesan las tres componentes de las normales a la superficie a ambos lados de la arista, que se han obtenido en el primer paso. Posteriormente, se calculan los coeficientes de difracción con las aproximaciones (2) a (4) en función de los ángulos α y ϕ .
- 4- Cálculo de la integral de línea (1) del método de las corrientes equivalentes como la suma coherente de los coeficientes de difracción de todos los pixel de las aristas. La fase de la contribución de cada pixel se obtiene a partir de la distancia al observador, que se lee del *z-buffer*.

Resultados con blancos radar complejos

Se han obtenido resultados para blancos radar complejos con la versión simplificada del algoritmo de procesado gráfico utilizada en la fase de validación, que no trata correctamente aristas oblicuas e inclinadas y que no discrimina los eclipses de las aristas. A pesar de ello, se obtienen excelentes resultados para perfiles de ala de longitud eléctricamente grande, en los que la principal contribución de las aristas se produce con incidencia perpendicular.

En la figura 1 se muestra la sección recta de un perfil de ala bidimensional. Se comparan los resultados del procesado gráfico de óptica física (PO), los del procesado gráfico de aristas (PO+PTD) y los obtenidos con el método de momentos (MoM) por la empresa Aerospaziale [4]. Obsérvese como el MEC mejora la aproximación de óptica física cuando la difracción en aristas predomina sobre la reflexión en superficies.

La figura 2 presenta la contribución de aristas a la sección recta de un misil genérico, comparando los resultados del procesado gráfico con los del programa TOTAL [5]. Este último ha sido desarrollado conjuntamente por la Universidad Politécnica de Madrid y la Universidad de Cantabria. El código TOTAL se basa en un modelo de facetas planas y su implementación en un CRAY-XMP obtiene excelentes resultados. Puede observarse que ambos resultados coinciden en el nivel de "ruido de fondo" y la magnitud y posición del pico de RCS causado por borde de ataque del ala (en 30°). Sin embargo, el código TOTAL obtiene otro pico de RCS en 90° , debido probablemente a la contribución de las aristas ficticias que aparecen al facetizar la superficie curvada del fuselaje. Como estas aristas no son reales, su contribución no aparece en los resultados de procesado gráfico.

Aunque no se ha implementado el coeficiente de acoplo de polarización cruzada de Mitzner, los resultados obtenidos con coeficientes de PTD (fig. 2) proporcionan correctamente el orden de magnitud, nivel del "ruido de fondo" y picos de sección recta debidos a la contribución de aristas. Aunque los resultados de óptica física son bastante buenos con blancos radar no "stealth", el algoritmo de procesado gráfico de aristas los mejora considerablemente (fig. 1) en aquellas direcciones en las que la difracción en aristas es significativa.

Se ha dejado para el futuro la validación final del algoritmo de procesado gráfico completo, para la cual es necesario analizar aparatos "stealth" en los que no existen aristas ni superficies perpendiculares a la dirección de observación y, por tanto, la difracción de aristas oblicuas es significativa y el coeficiente de acoplo de polarización cruzada de Mitzner puede ser importante.

REFLEXION EN SUPERFICIES CON RECUBRIMIENTOS ABSORBENTES (RAM)

La formulación de la aproximación de óptica física realizada en [1] es válida únicamente para superficies perfectamente conductoras. Ello constituye un inconveniente importante para analizar blancos radar reales, debido a la creciente utilización de recubrimientos absorbentes radar (RAM) y materiales *composites* en la industria aeronáutica actual.

Dadas las dificultades en el análisis exacto de la reflexión en superficies dieléctricas y/o magnéticas, se plantea una condición de contorno aproximada: la IBC o condición de contorno de impedancia, basada en la definición de una impedancia superficial equivalente. La teoría de alta frecuencia en combinación con la IBC da lugar a una formulación muy simple de la aproximación de óptica física, basada en ponderar la contribución de cada diferencial de superficie con los coeficientes de reflexión de Fresnel, que se calculan para un plano tangente de impedancia igual a la impedancia superficial equivalente. Esta última puede obtenerse fácilmente en el dominio de la frecuencia a través de un modelo de circuito equivalente.

Para incluir la IBC en el algoritmo de procesado gráfico de óptica física, basta calcular por técnicas gráficas los coeficientes de reflexión de Fresnel para cada pixel de la imagen en función de su luminosidad. Teniendo en cuenta que la aproximación de óptica física sólo considera la reflexión superficial y que la IBC es válida únicamente para direcciones de incidencia próximas a la normal a la superficie, cabe esperar que el algoritmo resultante sea válido solamente cuando exista algún punto de reflexión especular sobre la superficie. Si bien esta es la situación más habitual con blancos radar, no lo es en el caso particular de los aparatos *stealth*, en los que se minimiza la sección recta evitando deliberadamente la aparición de puntos de reflexión especular. Por este motivo, en rigor no es aplicable a este tipo de aparatos la teoría de óptica física con la IBC, de forma que para analizar correctamente la difracción en aristas con materiales RAM sería necesario el desarrollo de un método de corrientes equivalentes combinado con una condición de contorno de orden superior.

En la figura 3 se muestra la sección recta del mismo perfil de ala bidimensional, ahora con un recubrimiento absorbente de $\epsilon_r = 7.4 - j1.11$, $\mu = 1.4 - j0.672$ y espesor $d = 0.06\lambda_0$. Se comparan los resultados del procesado gráfico (PO+IBC) con los obtenidos con el método de momentos (MoM) por la empresa Aerospaciale [4]. Puede observarse que el procesado gráfico (PO+IBC) es correcto en direcciones en las que predomina la reflexión superficial, mientras que no es capaz de predecir correctamente la difracción en aristas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J.M.Rius, M.Vall-Ilossera, M.Ferrando, "Sección recta de blancos radar complejos en tiempo real: aproximación de óptica física", V Simposium nacional de la URSI, Vigo, septiembre 1990.
- [2] M.Vall-Ilossera, J.M.Rius, M.Ferrando, "Aplicación de algoritmos gráficos de iluminación global al cálculo de interacción electromagnética entre superficies metálicas", V Simposium nacional de la URSI, Vigo, septiembre 1990.
- [3] J.M.Rius, M.Vall-Ilossera, L.Jofre, "Diseño interactivo de formas de baja detectabilidad radar", VI Simposium nacional de la URSI, Cáceres, septiembre 1990.
- [4] Workshop: "RCS of perfectly conducting or coated bodies", organizado por Dassault Aviation, Société Mothesim y CNET-PAB La Turbie, Niza, 16 de noviembre de 1990
- [5] M.Domingo, F.Rivas, M.F.Cátedra, R.Abad, J.I.Casado, P.L.Primo del Val, R.Torres, "Programa base de GTD-PTD para el cálculo de la RCS de cuerpos conductores modelados por parches planos y teniendo en cuenta simple y doble reflexión, difracción en aristas y eliminación de zonas ocultas" V Symposium Nacional del Comité Español de la URSI, pág. 185-189, Vigo, 26-28 Septiembre 1990

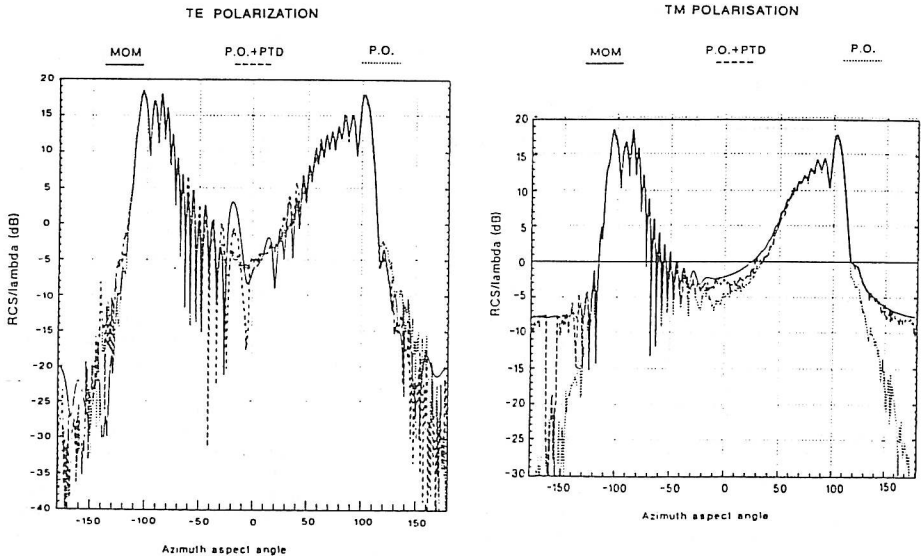


Figura 1: Sección recta de un perfil de ala bidimensional. Comparación de óptica física (PO) con el procesado gráfico de aristas (PO+PTD) y el método de los momentos (MoM).

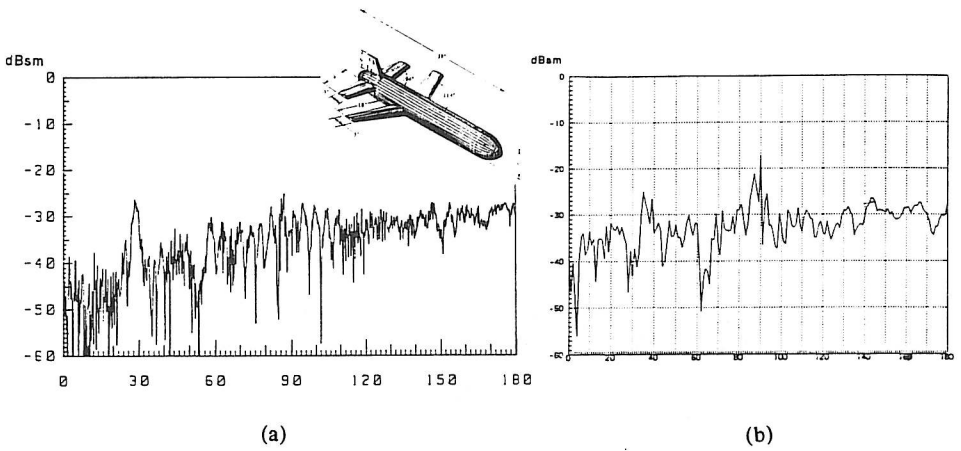


Figura 2: Contribución de las aristas a la RCS de un misil de longitud 1 metro a 12 GHz y con polarización vertical. Comparación del procesado gráfico (a) con el código TOTAL (b)

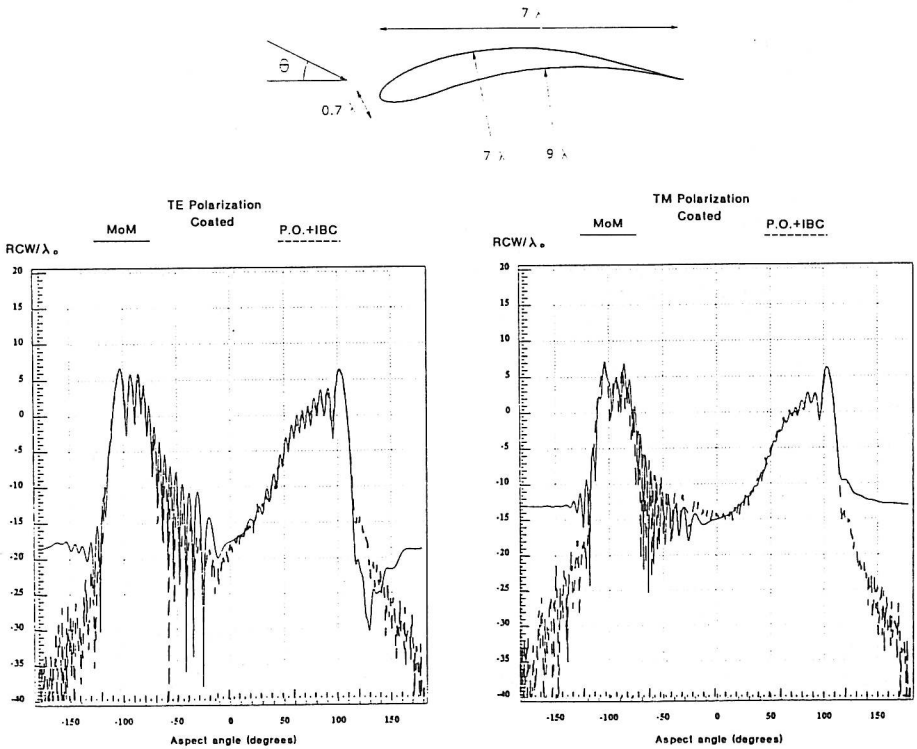


Figura 3: Sección recta de un perfil de ala bidimensional con recubrimiento absorbente. Comparación del procesado gráfico (PO+IBC) con el método de los momentos (MoM).