

## Tema 4

# Simulador Electromagnético Planar de ADS: Momentum

*El objetivo de esta práctica es servir de Introducción a los simuladores electromagnéticos, basados en la resolución numérica de las Ecuaciones de Maxwell que caracterizan cualquier propagación de una onda electromagnética. Son conocidas algunas de estas rutinas de cálculo numérico, como las de elementos finitos, diferencias finitas o método de los momentos, ... todas ellas tienen en común la aproximación de las soluciones de manera discretizada, en base a celdas básicas en las que se computa las ecuaciones en forma de sumatorias o incrementos.*

### **1. TEORÍA DE OPERACIÓN**

Momentum es un simulador electromagnético aplicado a las tecnologías planares multicapa: microstrip, strip lines, coplanar, etc. Se basa en uno de los múltiples algoritmos numéricos que existen para aproximar la solución de las Ecuaciones de Maxwell: el Método de los Momentos (MoM).

Todos los simuladores electromagnéticos tienen una misma idea básica → subdividir la estructura planar por la que se propaga la señal (básicamente pistas o strips, vías y slots o ranuras) en celdas elementales, pequeñas en tamaño respecto a la longitud de onda ( $\lambda/10$ ,  $\lambda/20$ ), donde podremos aplicar aproximaciones de las ecuaciones integro-diferenciales por un sumatorio de productos con coeficientes y funciones básicas.

La diferencia entre el Método de los Momentos y el de Elementos Finitos o Diferencias Finitas, es que estas últimas parten de las Ecuaciones de Maxwell en formato diferencial, que aproximadas en las celdas básicas por incrementos finitos y utilizando las condiciones de contorno dan lugar a la solución numérica de los campos. Sin embargo, el Método de los Momentos utiliza las Ecuaciones de Maxwell en forma integral y las sustituye por sumatorias válidas en cada celda básica.

Veamos la teoría básica del Método de los Momentos.

#### **1.1 Método de los Momentos**

Lo que se trata es de buscar soluciones a ecuaciones funcionales tipo  $L(f)=g$ , donde  $L$  es un operador,  $g$  es la excitación o fuente conocida y  $f$  es el campo o respuesta, función desconocida a hallar. Se trata de una ecuación determinística, donde sólo una  $f$  es asociada a una  $g$  dada. Este tipo de ecuaciones y su tratamiento está en la base del análisis numérico de las ecuaciones de Maxwell.

Algo más de nomenclatura: el *dominio* del operador  $L$  es el rango de funciones  $f$  sobre el que se opera y su *rango*, las funciones  $g$  que resultan de la operación. Si se dan ciertas propiedades de un espacio lineal, existirá un operador inverso  $L^{-1}$  que cumpla  $f = L^{-1}(g)$ , y podremos hallar a través de él la solución a nuestra ecuación original.

**Práctica 4 –Simulador Electromagnético Planar de ADS: Momentum**

La especificidad del método de los momentos está en reducir estas ecuaciones a ecuaciones matriciales, donde podemos aplicar rutinas conocidas como la de la Reducción de Gauss-Jordan. Este método lo tenemos con más detalle en el apéndice A de la referencia [1].

Si la función  $f$  la expandimos en una serie de funciones  $f_1, f_2, f_3, \dots$ , podremos poner

$$f = \sum_n \alpha_n f_n, \text{ donde los coeficientes } \alpha \text{ son constantes y a las } f_n \text{ las denominamos como}$$

funciones de expansión o funciones de base (basis functions).

Si aplicamos el operador  $L$  al sumatorio anterior,

$$\sum_n \alpha_n L(f_n) = g, \text{ e insertamos lo que denominamos como Funciones de Ponderación o}$$

Peso (weighting functions)  $w_1, w_2, w_3, \dots$ , por medio de un operador producto interno de escalares (puede ser una multiplicación, integración, etc.),

$$\sum_n \alpha_n \langle w_m, Lf_n \rangle = \langle w_m, g \rangle, \text{ con } m = 1, 2, 3, \dots$$

Este conjunto de ecuaciones, que darán una solución exacta si  $m, n$  son infinitos y aproximada si son series truncadas, lo podemos escribir de forma matricial:

$$[l_{mn}] \cdot [\alpha_n] = [g_m], \text{ donde}$$

$$[l_{mn}] = \begin{bmatrix} \langle w_1, Lf_1 \rangle & \langle w_1, Lf_2 \rangle & \dots \\ \langle w_2, Lf_1 \rangle & \langle w_2, Lf_2 \rangle & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad [\alpha_n] = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \end{bmatrix}, \quad [g_m] = \begin{bmatrix} \langle w_1, g \rangle \\ \langle w_2, g \rangle \\ \dots \end{bmatrix}$$

Por tanto, podremos conocer la solución para la función  $f$  si la matriz de los productos internos es invertible (no singular) y, por tanto,  $[l^{-1}]$  existe:

$$f = [\tilde{f}_n] \cdot [\alpha_n] = [\tilde{f}_n] \cdot [l^{-1}] \cdot [g_m] = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ \dots] \cdot [l^{-1}] \cdot [g_m]$$

Ya hemos dicho que la solución será exacta o aproximada, dependiendo de si las series que utilizamos son infinitas o finitas y también de la elección concreta de las funciones de base  $f_n$  y de las funciones de ponderación  $w_m$ . Un caso particular es elegir  $f_n = w_m$ , conocido como Método de Galerkin.

Vemos que la elección de las funciones de base y ponderación es fundamental a la hora de que el método sea exacto y de que las matrices resultantes sean fáciles de trabajar numéricamente, es decir que converjan rápidamente. Dos ejemplos de estas funciones:

- Función de ponderación en forma de Delta de Dirac o Point-Matching Method, en el que la integral que evalúa los términos  $\langle w_1, Lf_1 \rangle$  de la matriz  $[l_{mn}]$  se calcula sólo en puntos discretos del dominio.
- Función de base Sub-Seccional, donde se utilizan funciones  $f_n$ , cada una de las cuales sólo existe en una parte del dominio y, por tanto, cada  $\alpha_n$  de la expansión en serie sólo afecta en una sub-sección del dominio. Este tipo de funciones facilita la evaluación de la matriz  $[l_{mn}]$ , y suelen ser usualmente sencillas: pulsos, triángulos. Veremos que Momentum utiliza una función tipo “tejado” o rooftop-function.

De hecho, muchos métodos usan una combinación de diferentes métodos básicos para conseguir la mejor convergencia, rapidez, minimización del tiempo de cálculo y exactitud del resultado.

## 2. EL PROCESO DE SOLUCIÓN DE MOMENTUM

Basándose en la anterior teoría básica, el simulador planar de ADS parte de la formulación denominada como MPIE (Mixed Potential Integral Equation) que se basa en las expresiones del campo eléctrico y magnético de la onda que se propaga, como función de una combinación de un potencial escalar (eléctrico) y un potencial vectorial (magnético).

- Potenciales retardados o ecuación de ondas de los potenciales, ver referencias [2] y/o [3]-.

Para el caso concreto de la tecnología planar multicapa, las incógnitas o respuestas desconocidas son las corrientes eléctricas y magnéticas superficiales y los campos eléctrico y magnético serían las excitaciones o fuentes conocidas. Bajo ese prisma y de forma muy general podemos denotar la ecuación MPIE, como:

$$\iint dS \bar{\bar{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') = \mathbf{E}(\mathbf{r})$$

, donde  $\mathbf{J}(\mathbf{r})$  son las desconocidas corrientes superficiales y  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$  es la excitación conocida. El núcleo de la integral lo constituye la función de Green diádica (función binaria o en dos dimensiones) del medio dieléctrico multicapa. Esta función caracteriza al medio dieléctrico como interface y explicita la relación entre las corrientes superficiales y los campos en el interior del dieléctrico.

Veamos un pequeño resumen de lo que es la **Función de Green**, basado en la ref. [1] y en el artículo <http://www.boulder.nist.gov/div853/greenfn/tutorial.html?html>. Siguiendo la notación del apartado anterior la función de Green sería aquella que, para la ecuación  $L(f)=g$  y  $f = L^{-1}(g)$ , nos da la solución en forma de núcleo (kernel) de una integral, de la forma:

$$f = L^{-1}(g) = \int G(x, x') g(x') dx'$$

Vamos a ver un ejemplo de funciones de Green de operadores concretos.

**EJEMPLO 1:** para la operación  $-\frac{d^2 f}{dx^2} = g(x)$ , tendríamos una  $G(x, x') = \begin{cases} x(1-x') & x < x' \\ (1-x)x' & x > x' \end{cases}$ .

En el ejemplo del apartado 1.2 de la ref. [1], vemos que para el intervalo  $0 \leq x \leq 1$  y, sin necesidad de conocer las condiciones de contorno, podemos demostrar que diferenciando dos veces la integral anterior obtenemos precisamente el operador derivada segunda.

Es, por tanto, una función perfecta para sustituir ecuaciones diferenciales como las de los campos electromagnéticos que se propagan, por ecuaciones integrales.

**EJEMPLO 2:** Otro ejemplo, lo tenemos en el enlace anterior, donde vemos que (ojo con el cambio de notación), para una ecuación diferencial lineal escrita de forma general:

$$L(x)u(x) = f(x) \quad u(x) = L^{-1}(x)f(x)$$

Si definimos el operador inverso como resultado de la integral de la función de Green:

$$L^{-1} f = \int G(x; x') f(x') dx'$$

Vemos que la función G depende tanto de x como de x'. La explicación física sería que, la función de Green da el potencial en el punto x debido a una carga puntual en x'; la función sólo depende de la distancia entre la fuente y los puntos de campo. Se intuye que esta función esté involucrada en la solución de la ecuación general  $f = L^{-1}(g)$ , tal y como la planteábamos en la sección anterior.

Sabemos que el operador inverso será un operador integral y que se cumplirán las relaciones generales entre ellas:

$$LL^{-1} = L^{-1}L = I$$

Asociamos el operador identidad con la función Delta, con propiedades conocidas:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - x') f(x') dx' = f(x)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x') dx' = 1$$

, y si aplicamos la propiedad de identidad, podemos poner que:

$$L(x)G(x; x') = \delta(x - x')$$

, y podremos escribir la solución a la ecuación diferencial como:

$$u(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x; x') f(x') dx'$$

Para demostrarlo basta con aplicar las propiedades anteriores:

$$\begin{aligned} Lu(x) &= L \int_{-\infty}^{\infty} G(x; x') f(x') dx' \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} LG(x, x') f(x') dx' \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - x') f(x') dx' \\ &= f(x) \end{aligned}$$

, donde hemos supuesto la linealidad en la aplicación de los operadores. Otro ejemplo de función conocida de Green es la que da origen a la ecuación de dos dimensiones de Laplace:

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2}$$

, donde  $\Delta$  es el operador Laplaciana;  $\Delta = \nabla \cdot \nabla =$  Divergencia del gradiente (escalar) o divergencia de la divergencia (vectorial).

La ecuación de Laplace tiene como solución basada en la función de Green:

$$G(x; x') = -\frac{1}{2\pi} \ln r, \text{ con } r = \sqrt{(x_1 - x_1')^2 + (x_2 - x_2')^2}$$

Como hemos dicho, la función nos da el potencial en el punto  $x$  debido a la carga puntual en la fuente  $x'$ . Vemos que depende sólo de la distancia  $r$  entre fuente y campo. Hay más interpretaciones físicas de esta función: representaría, p. ej., el desplazamiento de un sólido debido a la aplicación de una fuerza puntual; también la temperatura en un punto debido a una fuente puntual en el origen.

Si volvemos a la función diádica de Green del campo eléctrico en dieléctricos multicapa, basada en los potenciales retardados:

$$\bar{\bar{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = j\omega G^A(\mathbf{r}, \mathbf{r}')\bar{\bar{I}} - \frac{1}{j\omega} \nabla[G^V(\mathbf{r}, \mathbf{r}')\nabla']$$

Como se ve, la relación entre corrientes superficiales y campos en el medio se conforma a través de un núcleo de integral con dos contribuciones: una del escalar potencial eléctrico  $V(r)$  y otra del vector potencial magnético  $\mathbf{A}(r)$ . El primero se origina con la distribución de carga dinámica que se da debido a las corrientes en la superficie, y se relaciona con el 2º a través del criterio de Lorentz, de la divergencia del vector potencial magnético:

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = -j\omega\mu\epsilon V$$

Más información detallada de la Teoría Electromagnética en las referencias conocidas de Microondas en 4º.

Ya, para avanzar en cómo se llega al cálculo numérico en Momentum, lo que hacemos para ir hacia la solución numérica de la ecuación MPE es discretizar las corrientes superficiales, dividiendo las metalizaciones en celdas y aplicando el mismo tipo de expansión en base a funciones que hemos visto en el apartado anterior. Así,

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) \approx \sum_{j=1}^N I_j \mathbf{B}_j(\mathbf{r})$$

Las funciones de base estándar que se usan en los simuladores planares son las denominadas como rooftop o tejado, como se ve en la figura,

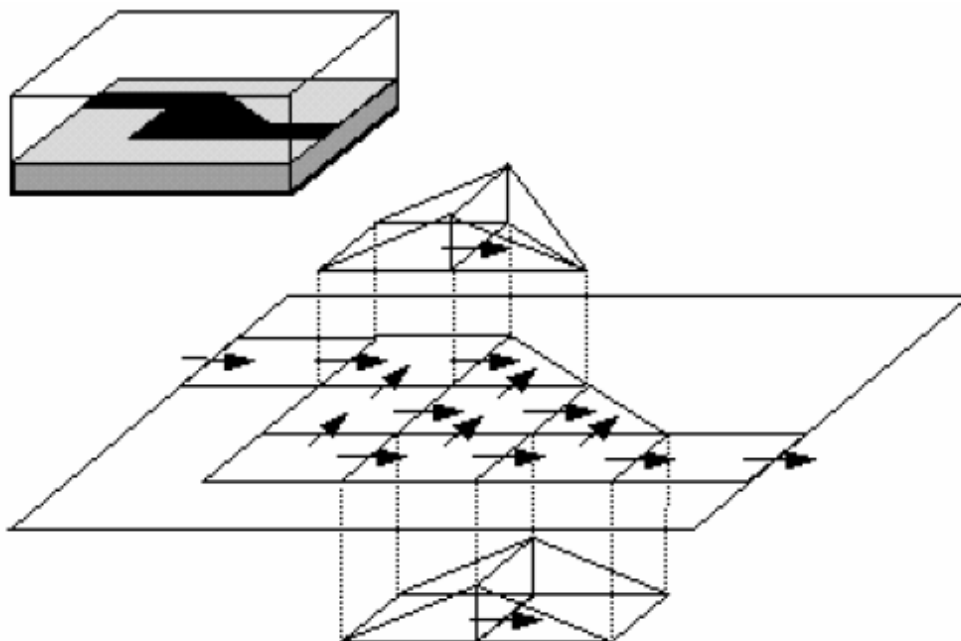


Figure A-1. Discretization of the surface currents using rooftop basis functions.

**Práctica 4 –Simulador Electromagnético Planar de ADS: Momentum**

En la misma interpretamos que cada función de base está asociada a un borde de celda y representa una corriente de densidad constante fluyendo a través de ese borde. Introduciendo esta expansión en serie en la ecuación integral anterior, discretizamos ésta convirtiéndola en una ecuación matricial:

for  $i=1,\dots,N$

$$\sum_{j=1}^N Z_{i,j} I_j = V_i \quad \text{or} \quad [Z] \cdot [I] = [V]$$

with

$$Z_{i,j} = \iint_S dS \mathbf{B}_i(\mathbf{r}) \cdot \iint_{S'} dS' \bar{\bar{\mathbf{G}}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{B}_j(\mathbf{r}')$$

$$V_i = \iint_S dS \mathbf{B}_i(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r})$$

[Z]: es la matriz de interacción, cada elemento de esta matriz describe la interacción electromagnética entre cualesquiera dos funciones rooftop. La dimensión N será el n° total de funciones de base

[V]: representa la contribución –discretizada- de las excitaciones aplicadas en los accesos del circuito

[I]: son las amplitudes desconocidas que debemos calcular

Si en la matriz [Z] sustituimos la función de Green diádica, tendremos lo siguiente:

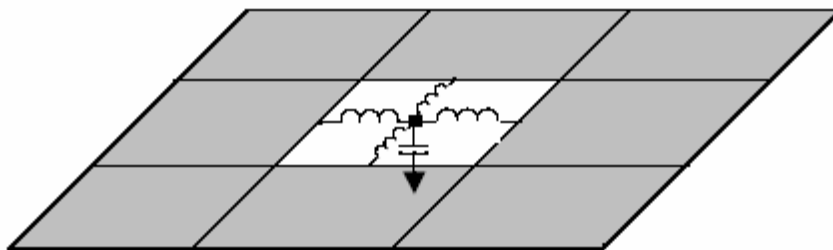
$$Z_{i,j} = j\omega L_{i,j} + \frac{1}{j\omega C_{i,j}}$$

with

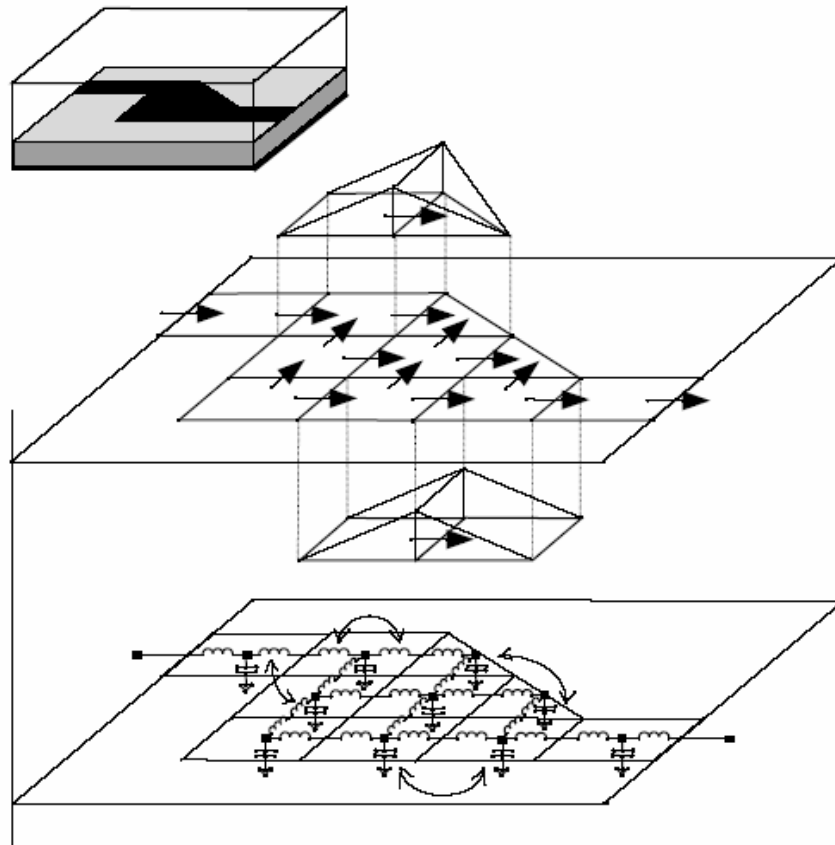
$$L_{i,j} = \iint_S dS \mathbf{B}_i(\mathbf{r}) \cdot \iint_{S'} dS' G^A(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{B}_j(\mathbf{r}')$$

$$\frac{1}{C_{i,j}} = \iint_S dS \nabla \cdot \mathbf{B}_i(\mathbf{r}) \iint_{S'} dS' G^V(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \nabla \cdot \mathbf{B}_j(\mathbf{r}')$$

La notación, que no es casual, nos indica el objeto de todo el desarrollo anterior → hemos reducido cada celda de nuestro problema a un equivalente circuital con los valores de L y C anteriores, función de los potenciales escalar y vector.



Cada celda se sustituye por un condensador a tierra y por bobinas a las celdas colindantes. El nodo representa la carga almacenada en cada celda y las bobinas dan el camino para las corrientes entre celdas y sus inductancias mutuas. Todas las C y L son complejas, dependientes de la frecuencia y mutuamente acopladas como se ve en la figura.



Esta sería la representación en circuito equivalente discretizado del Método de los Momentos, y de la resolución de las leyes de Kirchoff se derivaría la matriz de interacción  $[Z]$ . La solución de la ecuación matricial para diferentes excitaciones serían las corrientes del circuito, que son las amplitudes de las funciones de base.

Por lo tanto, y como **CONCLUSIÓN**, la resolución de problemas planares en base al MoM seguiría los siguientes pasos:

## 2.1 Cálculo de la Función de Green del sustrato

Hemos dicho que esta función enlaza las fuentes con las respuestas y, por lo tanto, estará caracterizando el medio de propagación, en este caso el dieléctrico. Se calcula para cada par de conductores de señal (vías, pistas, ranuras) mapeados al nivel del sustrato (sin considerar el espesor, por tanto).

Como, una vez realizado el mallado, las geometrías concretas desaparecen para dar paso a celdas básicas que se caracterizan por su respuesta impulsional espacial, las funciones de Green se pueden precalcular para cada sustrato y guardar en una base de datos de sustratos diferentes.

Estas funciones se calculan para distancias radiales sustancialmente mayores que el layout analizado y para el rango de frecuencias y el n° de puntos especificado. El resto de frecuencias se interpolan de forma adaptativa por el programa, con lo que cobra especial importancia a la hora de minimizar tamaño de memoria en uso y velocidad de simulación.

Ya en esto se distinguen dos modos de simulación en Momentum:

- Microondas: las funciones que se discretizan son “full-wave”, es decir sin aproximación
- RF: las funciones se utilizan con su aproximación “quasi-estática”, campo cercano y baja frecuencia.

## 2.2 Mallado de los perfiles conductores

Las metalizaciones (pistas y vias) y las ranuras (slots) se descomponen en celdas básicas en base a un mallado que tendrá, como es de suponer, una importancia fundamental sobre la exactitud y velocidad de las simulaciones. El modo de Microondas utiliza celdas de tipo rectangular y triangular exclusivamente, mientras que el modo RF combina estas celdas en otras poligonales de forma que se reduce el tiempo de cálculo y la memoria necesarias.

El algoritmo de mallado es muy flexible y permite configurar todo bajo nuestro criterio (nº de celdas por longitud de onda, mallado del borde, ...), aunque lo habitual es usar el que por defecto adjudica ADS a la geometría presente.

## 2.3 Cálculo y Resolución de la Matriz de Interacción

Para el cálculo de la matriz deberemos tener en cuenta todas las interacciones entre celdas, con lo que tendremos una matriz de interacción realmente densa. Evidentemente, habrá interacciones fuertes o débiles dependiendo de la cercanía o lejanía entre las celdas y sus tamaños relativos. Si tenemos  $N$  celdas en nuestro mallado, la matriz de interacción será de orden  $N^2 \rightarrow$  el tiempo de computación aumentará en proporción al cuadrado del nº de incógnitas.

En la resolución de la ecuación de la matriz de interacción  $[V] = [Z] \cdot [I]$ , el proceso de cálculo de  $[Z]^{-1}$  da lugar al cálculo numérico de las amplitudes de las funciones de base roof-top que representan a las corrientes superficiales en los metales (corrientes eléctricas) y en los huecos o slots (corrientes magnéticas). Una vez conocidas las corrientes, todos los campos asociados se pueden calcular basándose en éstas.

La ecuación matricial se resuelve por técnicas estándares de cálculo matricial (factorización – proceso de resolución orden  $N^3$  -, métodos iterativos más rápidos – orden  $N^2$  -, etc.).

## 2.4 Calibración y De-Embedding de los parámetros S

Una vez que se tiene caracterizado el sustrato y definido el layout, y los puntos donde se debe excitar la estructura, *Momentum* pasa a caracterizar los accesos externos, lo cuál implica una Calibración de los mismos en el caso de los accesos denominados como *Single Port*. *Momentum* ejecuta un calibrado de los accesos añadiendo longitudes de línea que hagan que la impedancia del acceso no influya en los parámetros S resultantes. Es el mismo criterio que se utiliza en los instrumento de medida.

El cálculo de la longitud e impedancia característica necesarias, lo realiza internamente el simulador y el efecto de las líneas de transmisión es eliminado a posteriori (de-embedding).

En el caso de los accesos internos (*Internal Ports*), éstos se pueden definir en cualquier posición de la geometría, sea un punto o una línea de alimentación. Así se pueden conectar elementos concentrados pasivos o activos en los puntos necesarios e incorporarlos a la simulación en ADS.

## 2.5 Modelado de Orden Reducido mediante AFS (Adaptative Fequency Sampling)

Esta tecnología es la llave para conseguir mayor rapidez en el cálculo y menor uso de memoria del ordenador. La idea es que, en lugar de usar un sobre-muestreo con interpolación lineal entre las diferentes frecuencias en las que se va a simular, se utiliza un modelo de orden reducido de tipo polo/cero para el cálculo racional de los parámetros S  $\rightarrow$  el algoritmo decide en



qué zona se necesita de una interpolación densa (donde los parámetros S varían mucho) y donde no.

En prácticamente todas las geometrías y casuísticas el AFS produce una reducción en el uso de los recursos de computación.

### **3. COMENTARIOS A LAS TRANSPARENCIAS DEL SEMINARIO DE MOMENTUM DE AGILENT.**

Ficheros del Seminario de Agilent sobre Momentum,  
[http://eesof.tm.agilent.com/applications/momentum\\_seminar.html](http://eesof.tm.agilent.com/applications/momentum_seminar.html):

momentum\_01\_02

momentum\_01\_03

momentum\_02\_01

momentum\_03\_01

momentum\_03\_02

momentum\_03\_03

#### **momentum\_01\_02 Page1 y 2**

Se trata de ir explicando el funcionamiento del programa siguiendo las diferentes funciones que aparecen cuando despliego la pestaña de Momentum en ADS

#### **momentum\_01\_02 Page3 a 10: Momentum versus MomentumRF**

- La principal diferencia entre Momentum y MomentumRF está en el cálculo de las funciones de Green: en el 1er. caso se calcula la diádica de Green completa, basada en las ecuaciones de Maxwell sin simplificar, lo que da lugar a elementos L y C que son de valor complejo y dependientes de la frecuencia; en el 2º caso se usan potenciales cuasi-estáticos de forma que L y C son independientes de la frecuencia y reales.
- En la versión 2003C y posteriores ambos modos permiten la reducción del mallado en base a combinar las celdas rectangulares y triangulares en celdas poligonales más complejas. Eso acelera la simulación.
- Si tenemos en cuenta el circuito equivalente basado en L y C, se intuyen problemas cuando me acerco a las frecuencias bajas, donde las L serán cortocircuitos y las C circuitos abiertos. Los valores de la matriz de interacción tienden a dificultar la resolución del algoritmo de inversión de la misma, con lo que se produce el fenómeno denominado como Ruptura en Baja Frecuencia: son puntos en los que los parámetros S se ven como erróneos.
- La solución que tiene esto es utilizar otro tipo de funciones de base: las denominadas como de lazo y estrella que, mediante dos tipos de funciones, tratan de sintetizar mejor las corrientes completas en las frecuencias más bajas (ver Tr 01\_03 pags. 9 y 10)
- En cuanto a las funciones rooftop, aparecen en la necesidad de evaluación de la Integral exponencial generalizada de dos dimensiones, que hemos visto en el apartado 2, a la hora de evaluar las corrientes superficiales y los campos asociados. Esta integral es del tipo, para el caso concreto de un hilo conductor de una dimensión y radio a:

$$I_1 = \int_{-x}^x \frac{e^{-jk\sqrt{x'^2+a^2}}}{\sqrt{x'^2+a^2}} dx'$$

Si pasamos a dos dimensiones:

$$I_2 = \int_{x_1 < 0}^{x_2 > 0} \int_{y_1 < 0}^{y_2 > 0} \frac{e^{-jk\sqrt{x'^2+y'^2+a^2}}}{\sqrt{x'^2+y'^2+a^2}} dy' dx'$$

, sería la integral a evaluar en el caso de funciones de base en forma de pulso. Si pasamos a funciones rooftop nos basaríamos en pares de funciones de base de expansión triangulares, una de subida y otra de bajada, de la forma:

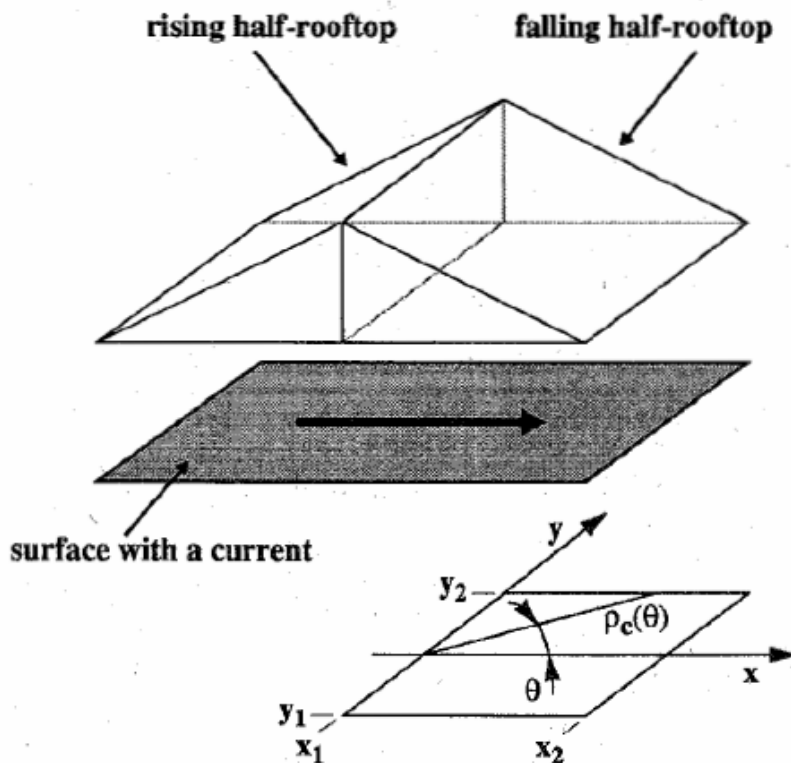


Fig. 1. A pair of rising and falling half rooftops representing a surface current, and the rectangular integration region of the falling half rooftop in the Cartesian coordinate system.

$$I_3 = \int_0^{x_2} \int_{-y_2}^{y_2} \left(1 - \frac{x'}{x_2}\right) \frac{e^{-jk\sqrt{x'^2+y'^2+a^2}}}{\sqrt{x'^2+y'^2+a^2}} dy' dx'$$

, que es la integral correspondiente a la parte de bajada del rooftop.

- R es la parte real de los elementos de la matriz de interacción, que se relacionan directamente con la amplitud con la que los campos penetran en el interior del conductor.

**momentum\_01\_02 Page10 a 16: Definición del Sustrato**

- En la creación del sustrato y metalizaciones, definimos cuáles son los elementos y capas que conducen la señal, que pueden ser metalizaciones o ranuras, como en el caso da la tecnología Coplanar Slot Line

- Evidentemente, el tiempo del cálculo de las funciones de Green dependerá de la cantidad de capas que tengamos
- En vuestro caso puede ser muy útil la instrucción *Update From Schematic* para definir rápidamente la estructura y valores de vuestro sustrato.
- Las pérdidas debidas a la conductividad no infinita se asocian a las pérdidas sin relacionarse con el espesor de la metalización → se tratan, en principio, los conductores como de espesor cero
- Las pérdidas se introducen en la matriz de interacción por medio de la impedancia superficial, que será compleja y sigue un modelo por división en tres zonas de frecuencia: altas (skin depth), bajas (resistencia mínima e inductancia interna) y medias (transición suave entre ambas zonas)

#### **momentum\_01\_02 Page17 a 44: Port Setup**

- Tenemos diferentes tipos de accesos o puertos, para poder modelar las diferentes situaciones que vamos a tener de inyección y extracción de señal en nuestro circuito.
- Single Port o Puerto Individual: funciona con una tierra implícita y se coloca en los bordes de los conductores o huecos. Se calibran en el proceso de simulación, para evitar que las reflexiones en el punto de excitación perturben la medida de los parámetros S.
- La tierra implícita es una capa de metal infinito: cubierta de la caja, plano de tierra,..
- El método de calibración es introducir una línea de longitud  $\lambda/2$ , de forma que se aleja el puerto del plano de medida y se evitan los efectos reactivos en el punto de inyección. Visto desde el punto de vista del tiempo, debemos alejar lo suficiente el acceso, para poder discriminar la reflexión en el punto de medida de la reflexión en el punto de calibración. El efecto de la línea se elimina ejecuta un proceso de calibración análogo a los de instrumentación, y un cálculo interno permite hacer el proceso de de-embedding.
- Como resultado de este proceso de calibración se eliminan: las desadaptaciones del modo fundamental, las excitaciones de modos superiores y todos los parásitos debidos a la presencia del acceso
- Los puertos Internos se ven desde otro punto de vista: permiten, al no calibrarlos, introducir sus efectos parásitos y desadaptaciones de conexión en los parámetros medidos. Ejemplos de uso: hilo de bonding en la mitad de un pad, emulación de la presencia virtual de un elemento como un componente o transistor.

#### **momentum\_01\_03 Page1 a 7: Generación de la Malla**

- Ya la versión 2003C permite una opción denominada como Mesh Reduction que permite usar celdas poligonales no sólo triangulares o rectangulares

#### **momentum\_01\_03 Page8 a 10: Algoritmos de resolución (Planar Solve)**

- También se ha obviado el problema de cálculo numérico no estable que había en baja frecuencia en las versiones anteriores, debido al uso de funcione rooftop, que provocan una indefinición en el proceso de cálculo. La solución es utilizar otras funciones de base, las Star-Loop que si permiten la síntesis en bajas frecuencias

**momentum\_01\_03 Page11 a 25 y momentum\_02\_01 Page1 a 12: Visualizando los Resultados**

- La precisión de las medidas en frecuencias directamente calculadas está en los -60 dB (0.000001). A esto también se le denomina como Ruido Numérico: será la precisión sobre una medida teórica por inexactitudes en el cálculo
- Podemos visualizar Parámetros S, Corrientes superficiales y Potencias Radiadas. Parece adecuado para antenas microstrip y superficies irregulares, como planos de tierra no uniformes.
- Las corrientes siguen reglas sencillas de colores (del azul como mínimo al rojo como máximo), se presentan a una frecuencia determinada y es posible animar la visualización visualizando la variación de la fase de los vectores de corriente entre 0 y 360°
- La selección de la frecuencia en la que se presentan se hace por medio de una tabla en la que se le asignan Pesos a los diferentes puertos en cada frecuencia. El Peso es la contribución de cada puerto a la propagación y representa la amplitud del generador equivalente que se coloca en el acceso para visualizar las corrientes.

**momentum\_03\_02 Page1 a 36: Simulación con Conductores con Espesor**

- Las nuevas versiones permiten calcular las funciones de Green teniendo en cuenta el espesor de las metalizaciones, con lo que se mejora la exactitud en las simulaciones, a costa de una mayor lentitud.
- 

**4. BIBLIOGRAFIA Y ENLACES**

Field Computation by Moment Methods. Roger F. Harrington. Ed. Macmillan Company	[1]
Apuntes Electromagnetismo 3°. Iñaki Sancho	[2]
Foundations for Microwave Engineering. Robert E. Collin. 2 <sup>nd</sup> . Edition. Wiley-Interscience	[3]
<a href="http://eesof.tm.agilent.com/applications/momentum_seminar.html">http://eesof.tm.agilent.com/applications/momentum_seminar.html</a>	
<a href="http://www.boulder.nist.gov/div853/greenfn/tutorial.html?.html">http://www.boulder.nist.gov/div853/greenfn/tutorial.html?.html</a>	
<a href="http://eesof.tm.agilent.com/docs/adsdoc2004A/mom/index.html">http://eesof.tm.agilent.com/docs/adsdoc2004A/mom/index.html</a>	