

Compatibilidad electromagnética

Avances recientes en Física aplicada a la Ingeniería



Dpto. Física Aplicada III

Curso 2009/2010

Joaquín Bernal Méndez
Grupo de Microondas

1

Índice

- Introducción
- Motivaciones para el diseño EMC
 - Normativa sobre EMC
- Elementos de un problema de EMC
 - Supresión de problemas de EMC
 - Subproblemas de EMC
- Fuentes de interferencias: clasificación
- Condicionantes y ventajas del diseño para EMC
- EMC en circuitos impresos



Introducción (I)

- **Problema:** incremento en el uso de equipos eléctricos y electrónicos



contaminación electromagnética

- **Interferencia (EMI):** transferencia de energía electromagnética entre equipos
 - **Ejemplo:** recepción no deseada en equipos de radio



Introducción (II)

- **Compatibilidad electromagnética (EMC):** un dispositivo es electromagnéticamente compatible con su entorno cuando cumple tres reglas:
 - No provoca interferencias con otros sistemas
 - No es susceptible a las emisiones de otros sistemas
 - No provoca interferencias consigo mismo

Motivaciones para el diseño EMC

- Existencia de directivas legales
 - Límites de emisión
 - Límites de inmunidad
- Satisfacción del consumidor
- Prevención de desastres
- Objetivos militares



1982: Hundimiento del destructor HMS Sheffield

Normativa sobre EMC

- Organismo regulador internacional:
 - CISPR (International Special Committee on Radio Interference)
- Europeos
 - CENELEC (European Committee for Electrotechnical standards)
 - ETSI (European Telecommunications Standards Institute)
- USA:
 - FCC (Federal Communications Commission)
- VDE en Alemania, BSI en UK, DOC en Canadá...



Normativa sobre EMC

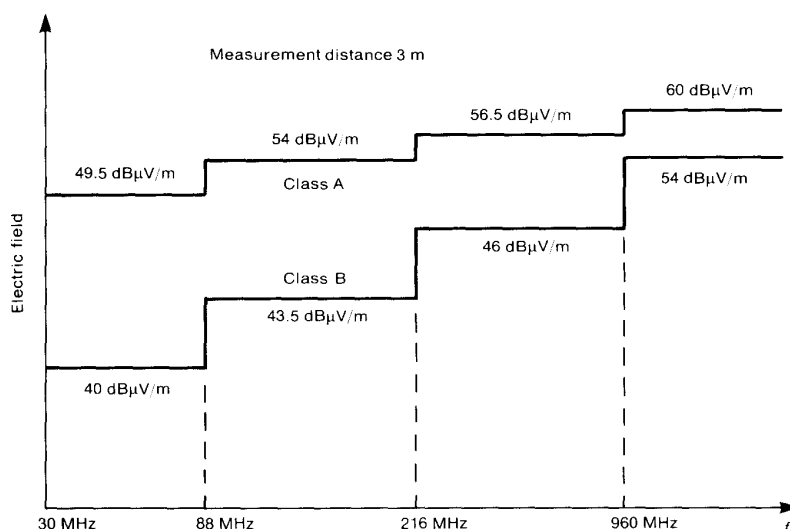
- En Europa (desde 1996): **normativa 89/336/EEC**
- Se derogó el *20 de julio de 2007*, fecha en que entró en vigor la nueva directiva **2004/108/CE** sobre Compatibilidad Electromagnética
- El plazo de coexistencia de ambas directivas finalizó el *20 de julio de 2009*.
- La directiva **2004/108/CE** establece límites de emisión e inmunidad
 - Objetivos:
 - Eliminar barreras comerciales dentro de la CEE debidas a diferentes normativas
 - Incrementar control sobre la contaminación electromagnética



Normativa sobre EMC

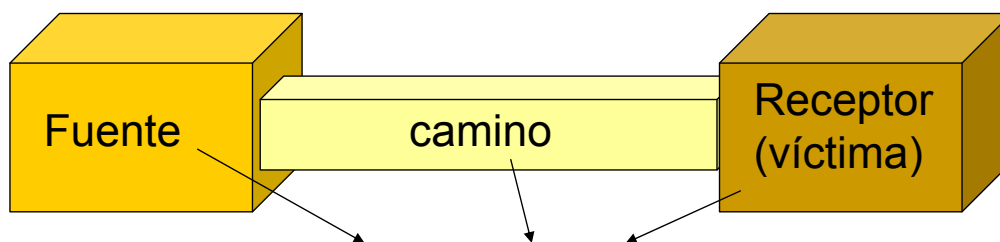
- La directiva **2004/108/CE** define el concepto de **Compatibilidad electromagnética** del siguiente modo:
- *Capacidad de que un equipo funcione de forma satisfactoria en su entorno electromagnético sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables para otros equipos en ese entorno.*

Ejemplo: gráfica límite emisiones



A comparison of the FCC Class A and FCC Class B radiated emission limits for a measurement distance of 3 m.

Elementos de un problema EMC



- **Camino:** no siempre fácilmente identificables
 - **Conducción**
 - **Acoplo inductivo:** campo magnético
 - **Acoplo capacitivo:** campo eléctrico
 - **Radiación:** campo electromagnético



Supresión de problemas de EMC

- Identificar al menos dos de los elementos
- Eliminar o atenuar uno de ellos
- **Ejemplo:** planta nuclear con fallos en las válvulas de control de la turbina
 - **Víctima:** las válvulas de la turbina
 - **Fuente:** “walkie talkies” usados por los empleados
 - **Camino:** desconocido
 - **Solución:** eliminar la fuente



Supresión de problemas de EMC

- Orden recomendable de actuación:
 - Supresión de la emisión de la **fuentes**
 - **Ejemplo:** aumento de tiempos de subida en circuitos digitales
 - Disminución de la eficiencia del **camino**
 - **Ejemplo:** apantallamientos metálicos
 - Disminución susceptibilidad del **receptor**
 - **Ejemplo:** códigos de corrección de errores ó redundancias en circuitos electrónicos



Subproblemas de EMC

- Cualquier problema de EMC puede incluirse en uno o varios de estos:
 - Emisiones radiadas
 - Susceptibilidad a emisiones radiadas
 - Emisiones conducidas
 - Susceptibilidad a emisiones conducidas



Fuentes de interferencias

- Fuentes naturales
 - Rayos
 - Solar y cósmico
- Fuentes de origen humano
 - Descargas electrostáticas (ESD)
 - Explosiones nucleares
 - Subsistemas eléctricos y electrónicos
 - Variaciones en la tensión de alimentación
 - Transmisiones de radio y TV



Fuentes naturales: rayos

- Caída directa de rayos: sobretensiones
 - Difícil protección para equipos cercanos
- Efectos indirectos: El canal del rayo transporta una corriente (≈ 50000 A) rápidamente variable que actúa como una **antena: *ruido atmosférico***
 - Acoplo directo con los campos EM **radiados**
 - Interferencias **conducidas** por la red de alimentación



Fuentes naturales: origen solar y cósmico

- Significativo a partir de 20 MHz
- **Ruido térmico**: 3-30 GHz
- **Ruido galáctico**: 150-200 MHz
 - Procede mayoritariamente de Sagitario
- **Ruido solar**
 - Procede de las manchas solares
 - Cambios en las condiciones de reflexión y transmisión en la ionosfera
 - Problemas en las transmisiones de radio (2-35 MHz) y satélites (150-500 MHz)




Descargas electrostáticas (ESD)

- Acumulación de carga estática que se transfiere a un dispositivo electrónico. Efectos:
 - **Pulso de corriente:** puede dañar al equipo.
 - **Onda EM** que proviene del arco voltaico: fenómenos de interferencia.
- **Ejemplos** de fenómenos debidos a ESD:
 - Explosiones en superpetroleros durante limpieza de los tanques
 - Explosiones en repostado de coches y aviones



Pulso electromagnético nuclear (EMNP)

- Una explosión nuclear genera una onda electromagnética muy intensa y de corta duración (pulso electromagnético).
- Provoca destrucción de dispositivos semiconductores
- Imposibilita acciones defensivas o de represalia
- Problema de susceptibilidad a emisiones radiadas
- Muy importante desde el punto de vista estratégico y militar



Subsistemas eléctricos y electrónicos

- Son la **fuentes más común de interferencias** tanto radiadas como conducidas
- Causas más comunes:
 - **Sistemas digitales**: trenes de pulsos de alta frecuencia
 - **Sistemas analógicos**: circuitos osciladores de alta frecuencia
- Circuitos de conmutación e interruptores electromecánicos: arco voltaico



Variaciones en la tensión de alimentación

- Variaciones de baja frecuencia
 - Sobrevoltajes y valles
- Distorsiones de la onda sinusoidal
 - **Ejemplo**: Normas para electrodomésticos permiten 6% distorsión
- Caídas de tensión
- Transporte de señales de alta frecuencia por:
 - Conmutaciones en el sistema de acondicionamiento de potencia
 - Interferencia de señales de radio frecuencia: **Los cables de alimentación actúan como antenas**



Índice

- Introducción
- Motivaciones para el diseño EMC
 - Normativa sobre EMC
- Elementos de un problema de EMC
 - Supresión de problemas de EMC
 - Subproblemas de EMC
- Fuentes de interferencias: clasificación
- **Condicionantes y ventajas del diseño para EMC**
- EMC en circuitos impresos



Ventajas del diseño EMC

- Minimiza costes adicionales
 - Elementos de corrección
 - Rediseño
- Mantiene el tiempo de desarrollo
- Asegura el correcto funcionamiento del dispositivo
- **Ejemplo:** inclusión de conexiones para posibles dispositivos correctores (R,C) en el “layout” de un circuito impreso



Condicionantes en el diseño EMC

- Coste económico del producto
- Aceptación del producto
 - Cuestiones prácticas (peso, manejabilidad,...)
 - Cuestiones estéticas
- Fácil manufactura del producto
- Tiempo de desarrollo del nuevo producto

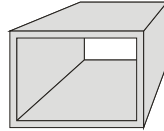


EMC en circuitos impresos

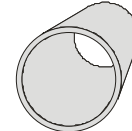
Avances recientes en Física aplicada a la Ingeniería

Estructuras de guiado de campos

■ Guías de onda



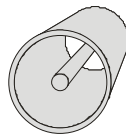
Guía rectangular



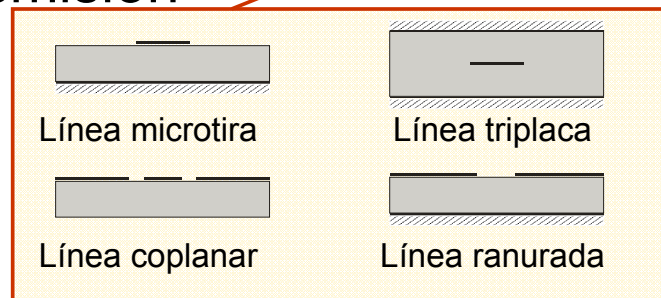
Guía circular

■ Líneas de transmisión

Líneas planas



Cable coaxial



Línea microtira

Línea triplaca

Línea coplanar

Línea ranurada

Líneas de transmisión planas



Línea microtira



Línea coplanar



Línea triplaca



Línea ranurada

■ Ventajas

- Ligeros
- Pequeños: miniaturización
- Fáciles de fabricar: baratos

■ Inconvenientes:

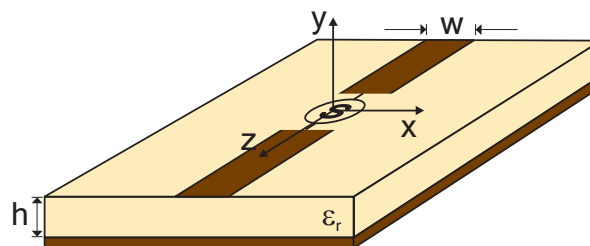
- Pérdidas relativamente altas
- Susceptibilidad a campos externos
- Posible emisión de radiación (especialmente microtira)

Líneas de transmisión planas

- Ventajas muy interesantes para:
- **Circuitos de microondas:** 300MHz - 300GHz
 - Longitud de onda comparable a las dimensiones de los circuitos
- **Circuitos digitales:** tiempos de subida y bajada muy cortos
 - La señal contiene armónicos de alta frecuencia

Teoría de circuitos no es válida para análisis:
teoría de líneas de transmisión – análisis de onda completa

Breve descripción del método

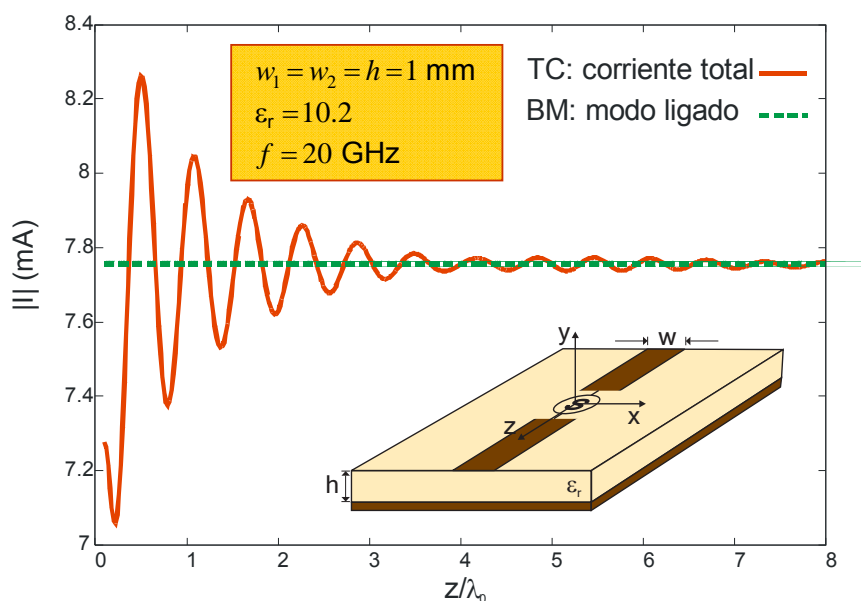


- Análisis de **onda completa**: no modelo de circuitos
- Método de la **ecuación integral**:
 - Expresar los campos a partir de funciones de Green
 - Imponer condición de contorno sobre conductor
 - Aproximar las corrientes como suma de funciones base
 - Resolver ecuación para los coeficientes del desarrollo

Problema de partida

- El análisis de onda completa de circuitos tipo microstrip muestra la existencia de soluciones radiantes
 - Modos “leaky” ó modos de fuga
 - Onda residual
- La interferencia de estos modos radiantes con los propagativos provoca oscilaciones y atenuación de la señal en la línea a altas frecuencias (efectos espurios)
- La influencia real de las soluciones radiantes no puede deducirse de un análisis bidimensional
- **Idea:** incluir modelo realista de la fuente en el análisis

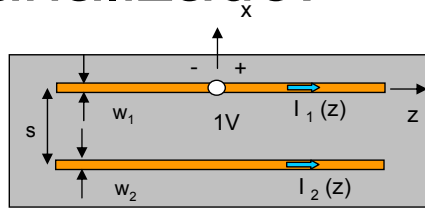
Resultado



Predicción de efectos espurios

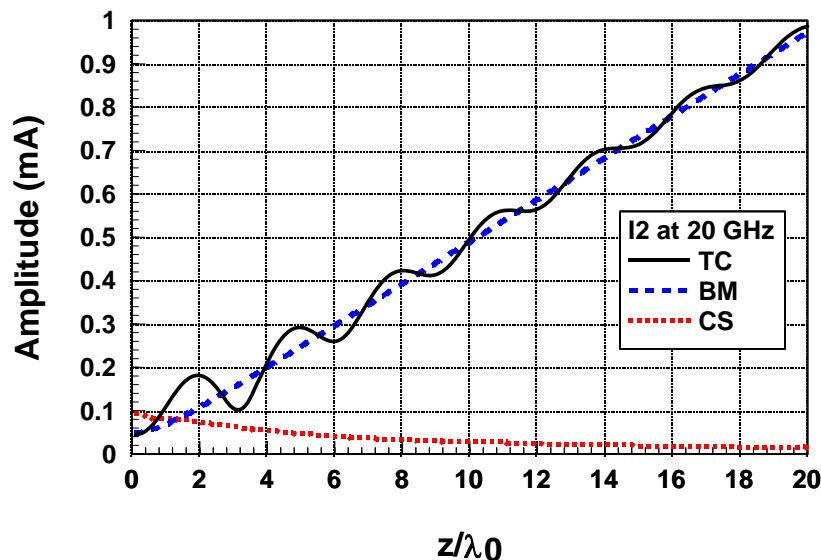
Crosstalk

problema analizado:



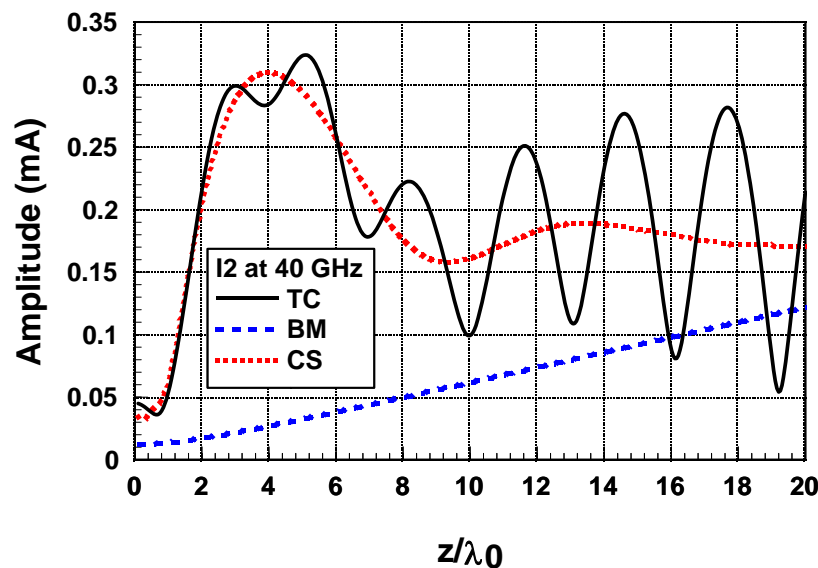
- Cuando hay una línea adyacente a la línea excitada se puede inducir una corriente de acoplo ó “crosstalk”
- La teoría de líneas de transmisión (TLT) no tiene en cuenta los efectos radiativos
- **Idea:** analizar la corriente de acoplo para tratar de determinar la importancia relativa de la contribución de los fenómenos de radiación

Resultados: componentes de I_2



Contribución de los efectos radiativos a una frecuencia **20 GHz**

Resultados: componentes de I_2



Contribución de los efectos radiativos a una frecuencia 40 GHz

Conclusión

- Los fenómenos debidos a la radiación son importantes a frecuencias altas
 - Provocan efectos espurios en la corriente de la línea
 - Aparecen también en las corrientes de acoplo
- Estos efectos no pueden predecirse usando la teoría de líneas transmisión
- El programa desarrollado permite estudiar su importancia en función de diferentes parámetros: permitividad del dieléctrico, anchura de las líneas, separación...

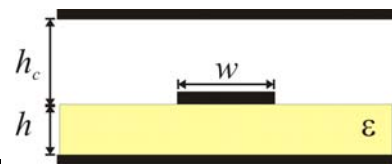
Utilidad en el diseño de circuitos digitales y analógicos de alta velocidad

Propagación de un pulso

- Se trata de estudiar la distorsión de la señal en el dominio del tiempo
- Exige hallar la corriente en la línea de transmisión para un gran número de frecuencias y usar después un algoritmo de transformada rápida de fourier (FFT) para calcular la transformada inversa.

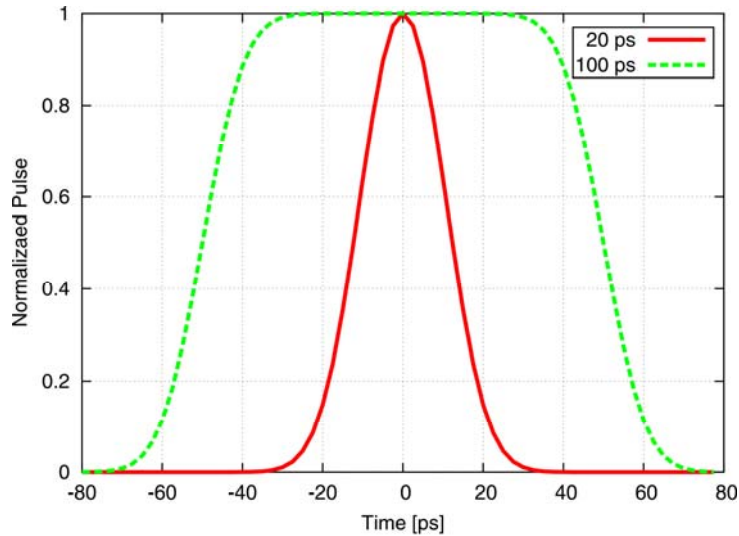
Covered microstrip

- El *packaging* de los circuitos introduce planos de masa sobre las estructuras microstrip.
- Su efecto es reducir la frecuencia a la que aparecen modos de fuga.
 - Se espera entonces que los efectos espurios debidos a radiación sean más importantes
- En efecto, la energía se divide y es transmitida por el modo ligado y por el modo de fuga, pero a distinta velocidad: el pulso se “desmorona”



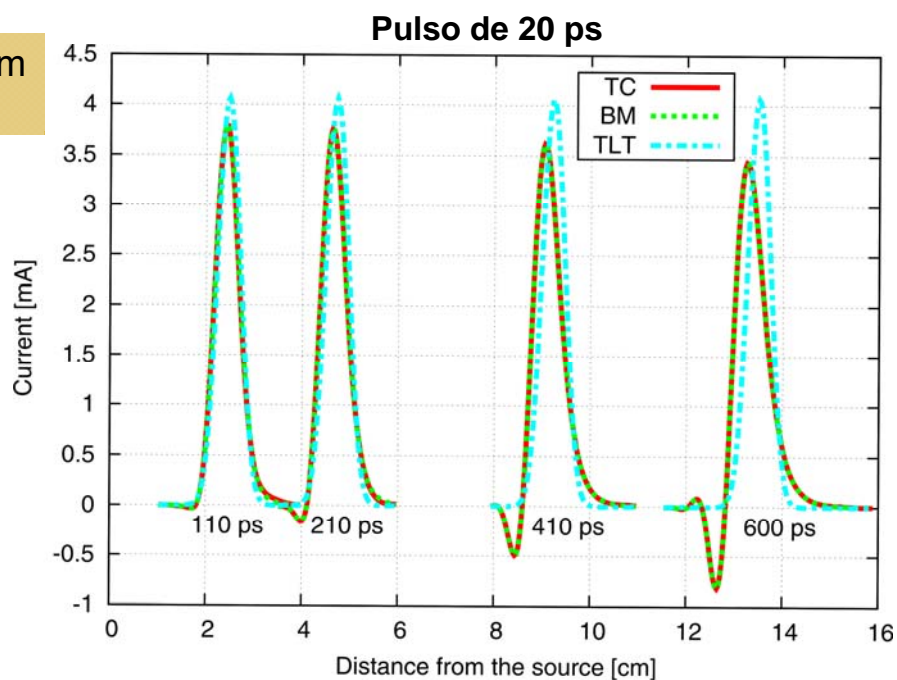
Resultados para *covered microstrip*

- Señal de entrada: pulso Gaussiano



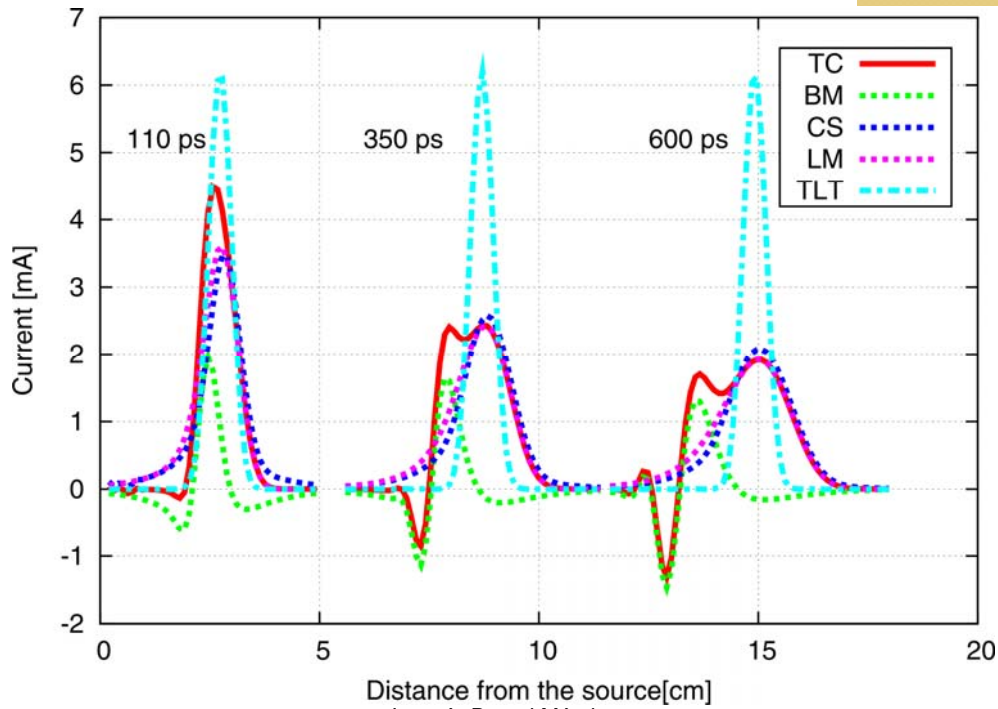
Microstrip normal (sin *top cover*):

$W=h=1$ mm
 $\epsilon_r=2.2$



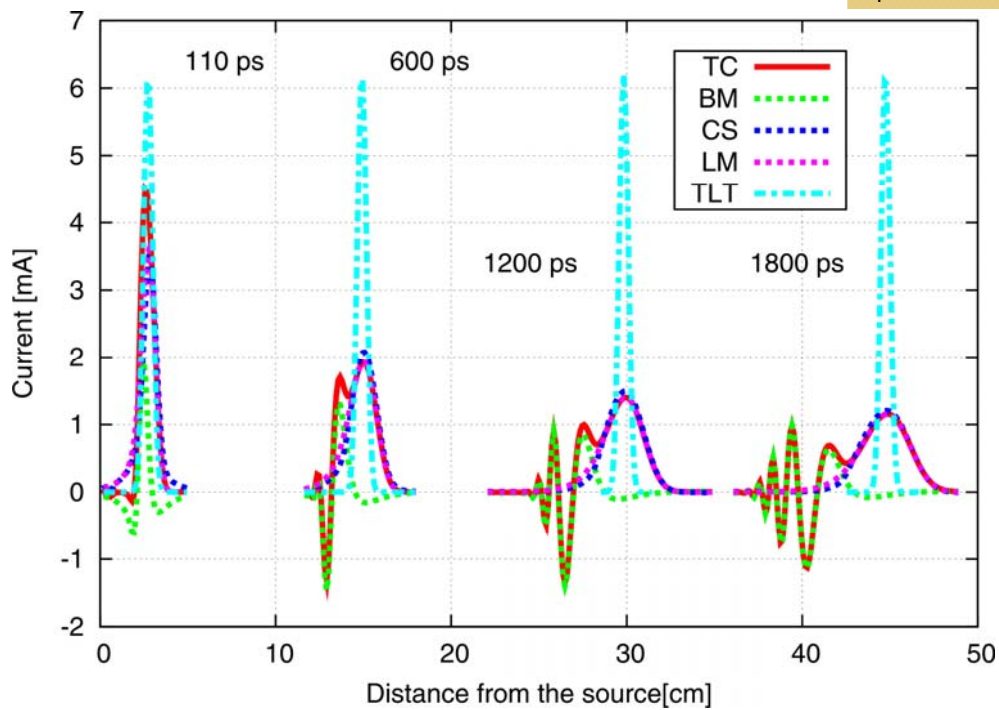
Covered microstrip (I)

$W=h=1$ mm
 $h_c=0.455$ mm
 $\epsilon_r=2.2$



Covered microstrip (II)

$W=h=1$ mm
 $h_c=0.455$ mm
 $\epsilon_r=2.2$





Publicaciones

- J.Bernal, F.Mesa, F.Medina; *2-D analysis of leakage in printed circuit lines using discrete complex-image technique.*; **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**; Vol.50, pp.1895-1900, Agosto 2002
- J.Bernal, F.Mesa, D.R.Jackson; *Crosstalk between two microstrip lines excited by a gap voltage source.*; **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**; Vol.52, pp.1770-1780, Agosto 2004
- J. Bernal, F. Mesa, D.R. Jackson, *Effects of Dielectric and Conductor Losses on the Current Spectrum Excited by a Gap Voltage Source on a Printed-Circuit Line,* **2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium**, (San Francisco, CA, EEUU), June 11-16, 2006, pp. 1307-1310.
- J.Bernal, F.Mesa, D.R.Jackson, *Effects of Losses on the Current Spectrum of a Printed-Circuit Line;* **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**; Vol.55, pp.1511-1519, Agosto 2007



Trabajos propuestos

- Conceptos básicos en integridad de la señal:
 - Dispersión, atenuación, reflexiones, *ringing*, crosstalk...
- Comportamiento no ideal a altas frecuencias de componentes pasivos: resistencias, condensadores y autoinducciones.
- Apantallamiento: mecanismos de apantallamiento y efectividad de apantallamiento (*shielding effectiveness*)
- Estudio y resumen de la directiva 2004/108/CE
<http://www.ffii.nova.es/puntoinfomcyt/Directivas.asp?Directiva=2004/108/CE>



Bibliografía

- *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, **C.R. Paul**, John Wiley Interscience, NY, second edition, 2006.
- *Electromagnetic compatibility: principles and applications*, **David A. Weston**, New York, Marcel Dekker, 1991
- *Fundamentos de Compatibilidad electromagnética*, **J.L. Sebastián**, Addison-Wesley, 1999
- *Engineering Electromagnetic Compatibility* **V. Prasad Kodali**, IEEE Press, 1996.
- *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, second edition, **H.W. Ott**, John Wiley Interscience, NY, 1988.
- **E. Bogatin**, *Signal Integrity Simplified*, NJ:Prentice-Hall, 2004.
- **D. Brooks**, *Signal integrity Issues and Printed Circuit Board Design*, NJ:Prentice-Hall, 2003.
- **S.H. Hall**, *Advanced Signal Integrity for High-Speed Digital Designs*, Wiley 2009.