

El mito de las conexiones de los cables apantallados

Artículo cedido por Cemdal



Introducción

www.cemdal.com

Autor: Francesc Daura Luna, Ingeniero Industrial, experto en compatibilidad electromagnética. Director de CEMDAL

Los diseñadores de hardware, los diseñadores de máquinas y los instaladores e integradores de sistemas, a menudo, se hacen una pregunta que su respuesta dudosa frecuentemente es confusa y por ello se ha convertido en un mito que conviene aclarar. Cuando debemos conectar un cable apantallado o blindado entre dos equipos, el dilema de siempre es: ¿dónde debemos conectar a masa el blindaje del cable apantallado?. Seguramente, si se preguntara a los compañeros, obtendríamos múltiples respuestas. La figura 1 muestra el diagrama de las posibles conexiones de un cable apantallado conectando dos equipos. Es una situación minimizada en la que tenemos 64 combinaciones, lo cual es demasiado. Si consideráramos con más detalle la realidad más compleja de la conexión entre dos equipos, en la que tuviéramos en cuenta las variaciones posibles con los filtros, los transformadores, los optoaisladores, las ferritas, los conectores, las fuentes de alimentación, los tipos de cable y las co-

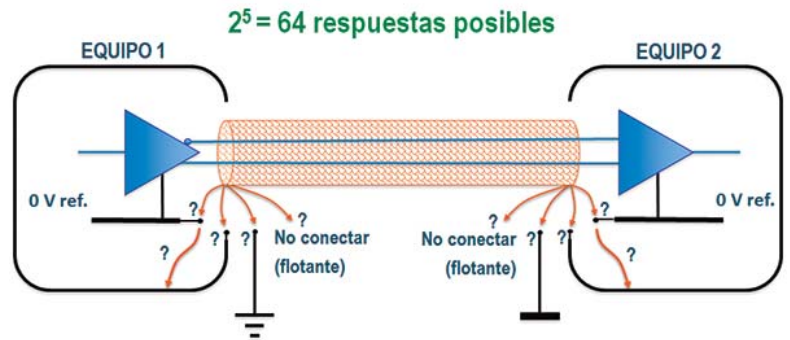


Figura 1: El típico dilema de cómo conectar el blindaje del cable apantallado a masa. Tenemos dos conexiones a masa a realizar en el blindaje del cable y una en el circuito de cada equipo y por tanto, cinco posibilidades en cada extremo. Las combinaciones posibles son $2^5 = 64$ combinaciones.

nexiones entre las masas, los chasis, las tierras y los 0 V de referencia, podríamos llegar a tener un mínimo de $2^{29} = 536.870.912$ combinaciones. Ello demuestra la dificultad del control de las interferencias (EMI) en las conexiones entre equipos.

El análisis de las respuestas no puede estar basado en recetas memorizadas dependiendo simplemente de la experiencia pasada. No existe una simple receta para estas conexiones que sea óptima en todo

el espectro de frecuencias. Sólo se puede tomar una buena decisión si confrontamos el cable apantallado con todo el rango de frecuencias de interés en nuestro sistema. Algunas recetas aplicadas correctamente en casos específicos pueden causar mayores problemas que soluciones en aplicaciones generales. Se trata de un tema realmente complejo.

Es evidente que un cable coaxial debe conectarse en ambos extremos a sus masas respectivas para establecer el circuito de señal y su retorno, actuando éste como una línea de transmisión. No se va a entrar aquí en el detalle de los tipos de blindaje en los cables apantallados desde el punto de vista de su fabricación como los materiales, las pantallas trenzadas, laminadas, en espiral y sus combinaciones. Tampoco se va entrar en el estudio de la teoría de los blindajes. En las referencias se puede encontrar extensa documentación. Nos vamos a centrar en los métodos y geometría de la conexión, los efectos del blindaje ante los campos eléctrico y magnético y los tipos de cables según la disposición de sus blindajes. Vamos a considerar aquí los tipos de cables como el cable triaxial, el cuadraxial y el twinaxial. De ellos se podrán derivar conclusiones para los cables multipar apantallados y los cables planos apantallados. Si los cables

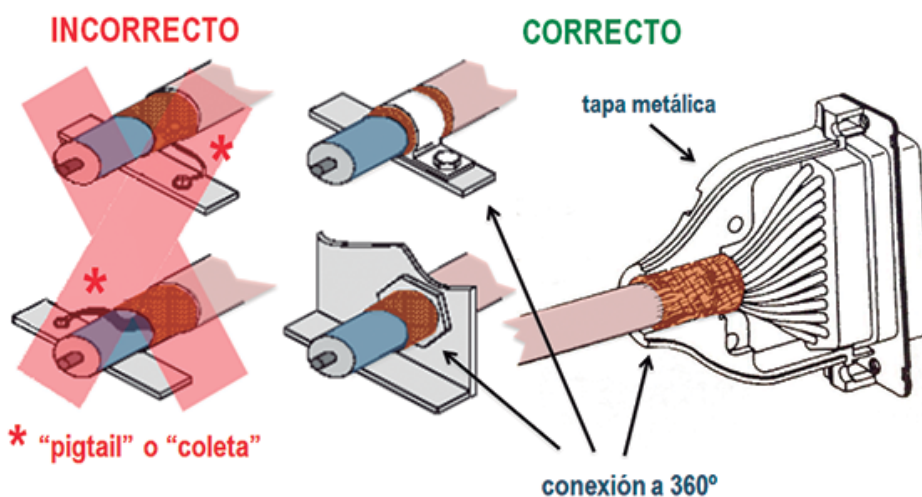


Figura 2: conexión del blindaje de un cable apantallado. Hacerlo en forma de "pigtail" o "coleta" siempre degrada las prestaciones intrínsecas del blindaje a alta frecuencia. Una conexión correcta también se puede realizar con su correspondiente conector, con conexión del blindaje a 360° (Aquí en un conector DB25). También es buena en conectores BNC, N, SMA o SMB o con una buena brida con una baja resistencia.

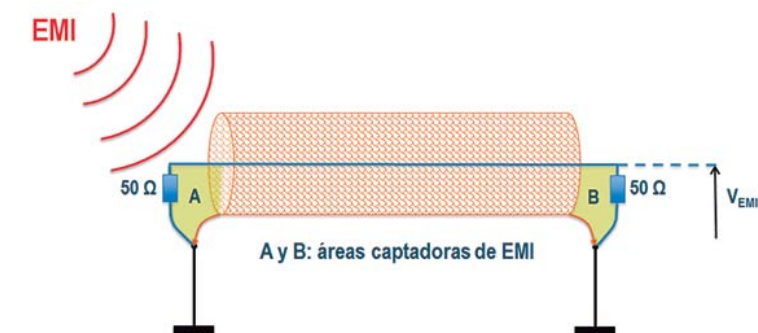
son largos o llevan altas corrientes de interferencia debido a la diferencia de potencial entre las dos tierras de los dos equipos, pueden haber problemas de interferencias (EMI) y esto es a menudo la razón dada para desconectar el blindaje del cable de la caja metálica.

Métodos de conexión del blindaje

Cuando un cable apantallado se debe conectar entre dos equipos con recintos conductores, la pantalla debe ser pensada como una extensión de los recintos. Por lo tanto, la conexión a tierra más eficaz es cuando uno o ambos recintos están aislados del chasis. Esto es poco práctico porque por razones de seguridad, las cajas deben estar conectadas a tierra en ambos extremos.

Donde y como un blindaje se conecta a masa puede cambiar radicalmente sus prestaciones, independientemente de sus características intrínsecas de fabricación. La conexión a masa del blindaje puede ser el punto más débil de la cadena, especialmente a altas frecuencias. Debido a que es muy difícil conectar un blindaje con un conector con una buena abrazadera o con la típica conexión en forma de "coleta" o "pigtail", con una impedancia mucho menor que la del material del blindaje, la conexión del blindaje es siempre el factor limitativo de sus prestaciones reales. La figura 2 muestra algunas formas correctas e incorrectas de conectar un blindaje a masa. Un conector que pueda unir el blindaje a 360° es una buena forma de conectar un blindaje (por ejemplo, con conectores BNC, N, SMA y SMB para cables coaxiales). La forma de "pigtail" o "coleta" siempre degrada las prestaciones intrínsecas del blindaje a alta frecuencia. Es decir, la unión o método de conexión a masa del blindaje, en el mejor de los casos, aporta prestaciones casi similares a las prestaciones generales del cable apantallado. Nunca las mejora.

Consideremos por ejemplo 75 cm de un cable con un blindaje en forma de trenza muy densa, con una impedancia de 3 mΩ/m para conectar dos equipos con racks metálicos. Una resistencia típica de unión de la



FRECUENCIA MHz	Nivel de referencia: tensión inducida con 2,5 cm de "pigtail" x 2	5 cm de "pigtail" x 2	10 cm de "pigtail" x 2	20 cm de "pigtail" x 2
40	0 dB	+ 16 dB	+ 30 dB	+ 40 dB
100	0 dB	+ 16 dB	+ 18 dB	+ 34 dB
200	0 dB	+ 18 dB	+ 24 dB	+ 30 dB
400	0 dB	+ 14 dB	+ 24 dB	+ 26 dB

trenza con una pinza dentada en los racks es de 0,5 mΩ, si la superficie no está pintada. Un conector típico tiene una resistencia de contacto de unos 3 mΩ. Y la resistencia de contacto al rack de una base de conector con 4 tornillos puede ser de 0,5 mΩ. Como tenemos dos extremos de cable, la impedancia de conexión final es:

$$Z_{con} = 2 (0,5 + 3 + 0,5) = 8 \text{ m}\Omega$$

Si la comparamos con la impedancia del blindaje es:

$$Z_{blind} = 0,75 \times 3 \text{ m}\Omega/\text{m} = 2,25 \text{ m}\Omega < 8 \text{ m}\Omega$$

Vemos que la contribución de las conexiones a la resistencia total es 3,5 veces la resistencia del blindaje solo. Sería factible mejorar la situación llegando a 2 mΩ con un mejor conector y con un mayor apriete. La conexión del cable no solo puede empeorar la eficiencia del blindaje del cable. También puede ser la fuente de mecanismos secundarios

que pueden provocar más interferencias, comparativamente a si no se usara blindaje.

La figura 3 muestra la degradación relativa debida al incremento de la longitud del "pigtail" o "coleta". El incremento de la interferencia (VEMI) es un efecto combinado del incremento de la impedancia de blindaje más el incremento de las áreas A y B formadas entre el conductor de la señal no apantallado y la masa. La figura 4 es una vista conceptual de la radiación de EMI hacia el interior del equipo cuando el "pigtail" o "coleta" se conecta incorrectamente en el interior del equipo y la interferencia externa se radia hacia el interior del equipo. La clave para prevenir estos problemas es identificar el camino de las corrientes, tanto para problemas de susceptibilidad como de emisiones, reconociendo donde se origina la corriente en el blindaje, donde va y

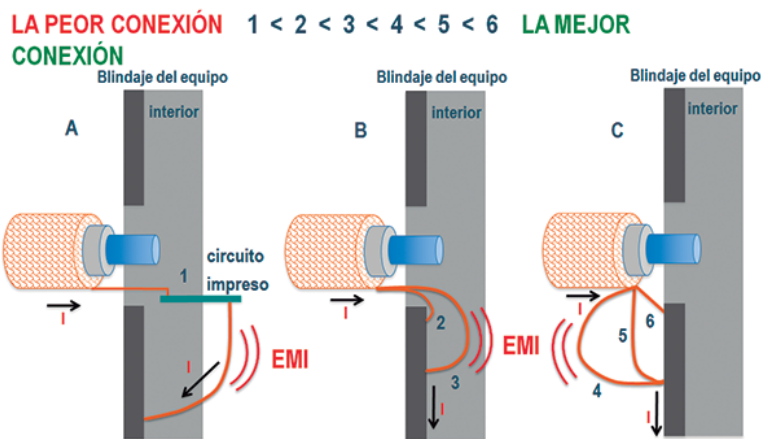


Figura 3: Degradación relativa debida al incremento de la longitud del "pigtail" o "coleta". El incremento de la interferencia (VEMI) es un efecto combinado del incremento de la impedancia de transferencia Zt más el incremento de las áreas A y B formadas entre el conductor de la señal no apantallado y la masa.

Figura 4: Conexiones del "pigtail" o "coleta": vista conceptual de la radiación de EMI hacia el interior del equipo cuando el "pigtail" o "coleta" se conecta incorrectamente. A) es el caso peor. La EMI entra en el equipo, pasando por el circuito impreso susceptible. B) es algo mejor que A) porque la EMI se re-radia hacia el interior y C) es la mejor configuración, donde la EMI no entra en el equipo.

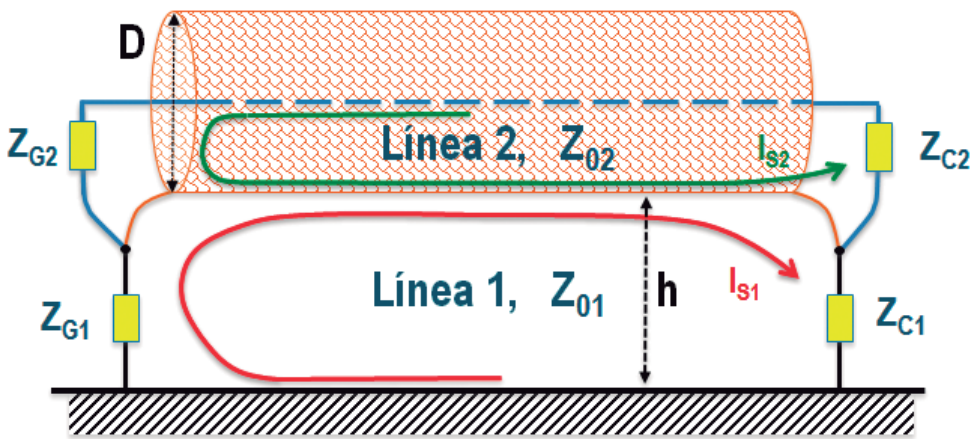


Figura 5: Un cable blindado es un conjunto de dos líneas de transmisión, siendo el blindaje el medio de transferencia entre las dos líneas.

como retorna a su fuente (incluyendo todos los caminos parásitos). A menudo se interrumpe el blindaje cuando de hecho es el flujo de corriente en circuitos sensibles el que necesita ser interrumpido.

La geometría de instalación del cable apantallado

Un cable blindado puede considerarse como la conjunción de dos líneas de transmisión con el blindaje siendo el medio de transferencia entre las dos. Esto se presenta en la figura 5. Los dos circuitos en paralelo son: 1) el circuito exterior de la línea 1, la cual tiene parámetros débilmente controlados ya que cada impedancia de conexión a masa puede variar desde cero a infinito y su impedancia característica Z_{01} , depende del ratio h/D (h : altura por encima del plano de masa con respecto al diámetro del cable, D). Y 2) el circuito de la línea 2, con parámetros controlados, conside-

rando las impedancias Z_{G2} y Z_{C2} y la impedancia característica Z_{02} . La efectividad del blindaje es de hecho la medida del porcentaje de la energía transferida desde la línea 2 a la línea 1, en el caso de emisiones, o la transferencia de la línea 1 a la línea 2 en el caso de susceptibilidad. La impedancia característica de la línea 1 tiene un gran efecto en esta transferencia de energía, especialmente en los múltiplos de $\Delta/4$, siendo Δ la longitud de onda del armónico de mayor frecuencia de la señal circulante. Por ello un cable blindado con unas conexiones a masa determinadas tendrá un comportamiento diferente dependiendo de su longitud y su altura por encima del plano de masa.

Efecto del blindaje en el acoplo capacitivo (eléctrico)

El acoplo capacitivo es debido a un acoplo de campo eléctrico, debido a capacidades parásitas. Un blindaje

daje eléctrico no es efectivo a menos que esté debidamente conectado a masa. De nuevo, muchas veces la efectividad de la conexión del blindaje a masa es más importante que la efectividad del propio blindaje. Para tener una buena efectividad de blindaje contra campos eléctricos es necesario minimizar la longitud de los conductores internos de señal que sobresalen más allá del blindaje y realizar una buena conexión a masa del blindaje. La conexión del blindaje en un solo lado aporta un buen apantallado eléctrico si la longitud del cable no sobrepasa $\Delta/20$, siendo Δ la longitud de onda del armónico de mayor frecuencia de la señal circulante. Para cables más largos es necesario proveer múltiples conexiones a masa. En la práctica, una buena conexión sería proveer buenas conexiones a masa cada $\Delta/4$.

Efecto del blindaje en el acoplo inductivo (magnético)

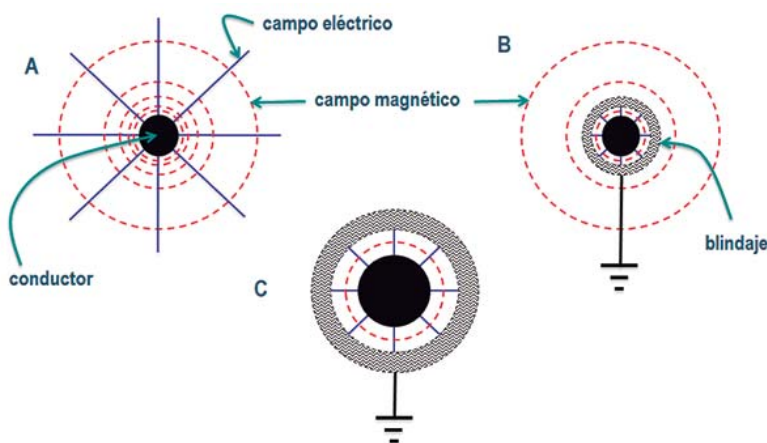
El acoplo inductivo es debido a un acoplo de campo magnético o acoplo debido a inductancias parásitas. La conexión del blindaje no magnético (realizado solo con cobre o aluminio) de un cable blindado coaxial en un solo lado no tiene efecto contra campos magnéticos.

Sin embargo, si el blindaje se conecta en los dos lados a masa, la tensión inducida en el blindaje causará que circule corriente por el blindaje. Esta corriente inducida causará una tensión sobre-inducida en el conductor interno (debido a la inductancia mutua), que puede ser perjudicial.

La inductancia mutua entre el blindaje y el conductor interno en un cable es igual a la inductancia del blindaje si su forma es cilíndrica y la densidad de corriente es uniforme alrededor de la circunferencia del cable. No es necesario que el conductor interno sea coaxial al blindaje y también es válido para cables multiconductor.

A bajas frecuencias, un blindaje, aunque se conecte en ambos lados a masa, no protege contra campos magnéticos. A frecuencias por encima de la frecuencia de corte del cable blindado, la captación de EMI deja de crecer y permanece

Figura 6: A) Campos alrededor de un conductor en el que circula corriente. B) Campos alrededor de un cable apantallado con el blindaje conectado en un solo lado. C) Campos alrededor de un cable apantallado con el blindaje conectado en los dos lados llevando una corriente igual al conductor central, pero en sentido opuesto.



constante. Para minimizar la EMI acoplada en el conductor interno, la impedancia del blindaje debe ser mínima para que la corriente en el blindaje sea mínima y así también lo sea la inducción entre el blindaje y el conductor interno. Esta impedancia del blindaje incluye la resistencia de las conexiones a masa de los extremos del blindaje y las dos deben ser mínimas.

Prevención de la radiación magnética en los cables apantallados

Para prevenir la radiación puede apantallarse la fuente de interferencia. La figura 6A muestra los campos magnético y eléctrico que rodean un conductor localizado en el espacio libre por el que circula una corriente eléctrica. Si se dispone un blindaje no magnético (de Cu o Al) alrededor del conductor interno, entonces las líneas de campo eléctrico quedarán bloqueadas por el blindaje, pero tendrá muy poco efecto en las líneas de campo magnético, como se puede ver en la figura 6B. Si se hace circular una corriente igual y opuesta a la corriente que circula por el conductor central por el blindaje, se generará un campo magnético externo igual y opuesto. Este campo anulará el campo magnético causado por la corriente en el conductor central, lo que resulta en la condición de la figura 6C, sin campos externos al blindaje.

La figura 7A muestra un circuito conectado a masa en ambos lados, circulando una corriente I . Para prevenir la radiación de campo magnético de este circuito, el blindaje se debe conectar a masa en ambos lados y la corriente (I) debe ser igual a la corriente circulante por el conductor interno, en lugar de circular por el plano de masa (I_M). Si la frecuencia decrece por debajo de $5f$, siendo f la frecuencia de corte del blindaje, el cable tendrá menos y menos eficiencia de apantallado porque más y más corriente retornará por el plano de masa (I_M). Esta reducción de radiación de campo magnético no es debido a las propiedades magnéticas del blindaje, si no que es debido a que la corriente de retorno en el blindaje genera un campo magnético que cancela el

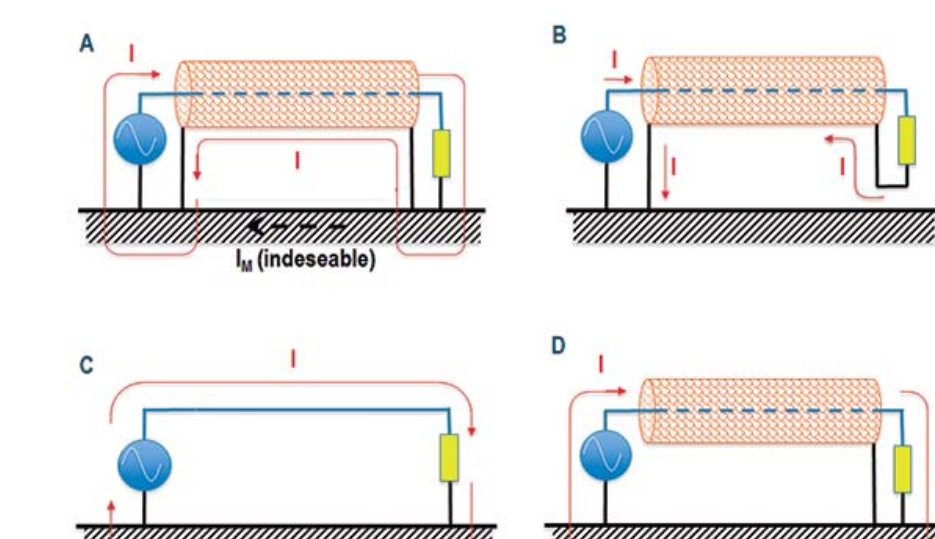


Figura 7: A) Con la conexión a masa del blindaje en los dos lados se reduce el área del bucle de corriente. B) Sin conexión a masa en un lado la corriente de retorno circula por el blindaje. C) Cable sin blindaje tenemos un bucle de corriente muy grande. D) Con la conexión del blindaje en un solo lado, el área del bucle de corriente es también grande, similar a B).

campo magnético del conductor central. Si la masa del circuito se desconecta de masa (o tierra) en uno de los lados del circuito, como en la figura 7B, entonces el blindaje no debe conectarse a tierra en ese lado porque toda la corriente de retorno debe ahora circular por el blindaje. Esto es especialmente verdad a frecuencias por debajo de la frecuencia de corte del blindaje. Conectando en este caso ambos lados a masa, se reduciría la efectividad del blindaje porque parte de la corriente retornaría por el plano de masa.

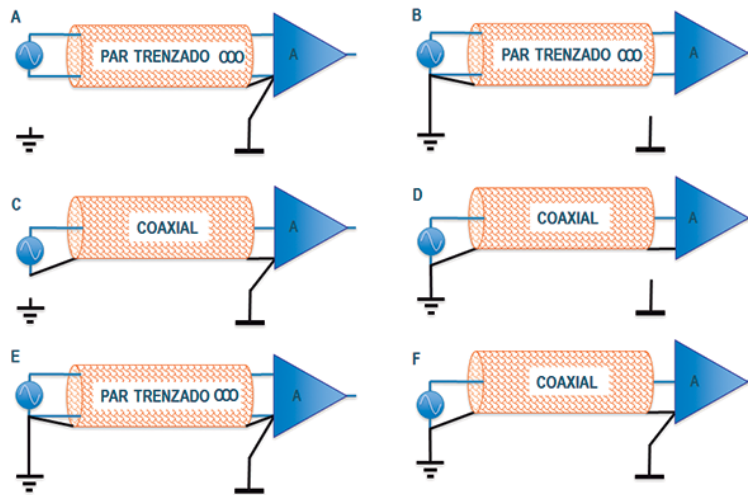
Apantallando un receptor de EMI contra los campos magnéticos

El mejor modo para protegerse contra campos magnéticos externos en un circuito que actúe como receptor de EMI es reducir el área del bucle receptor. El área de interés es el área total incluida en el flujo de corriente en el circuito receptor. Siempre es importante considerar el camino de retorno de la corriente hacia su fuente. A menudo, la corriente retorna por un camino distinto del que el diseñador había previsto y por ello el área del bucle de corriente cambia. Si se dispone un blindaje no magnético (de Cu o Al) alrededor de un conductor causa que el retorno de corriente tenga un área de bucle menor y entonces se

obtiene algo de protección contra los campos magnéticos externos. Esta protección, sin embargo, está causada por el área menor del bucle y no por cualquier propiedad magnética del blindaje.

La figura 7 ilustra el efecto de un blindaje en el área del bucle de un circuito. En la figura 7C la fuente se conecta a la carga con un simple conductor usando el camino de retorno a través de la masa. El área incluida por la corriente es el rectángulo entre el conductor y el plano de masa. En la figura 7A se dispone un blindaje alrededor del conductor y se conecta a masa en ambos lados. Si la corriente retorna a través del blindaje y no por el plano de masa, entonces el área del bucle se reduce y se obtiene un cierto grado de protección contra los campos magnéticos externos. La corriente retornará a través del blindaje si la frecuencia es mayor que $5f$, siendo f la frecuencia de corte del blindaje. Un blindaje dispuesto alrededor del conductor y conectado a masa solo en un lado, como la figura 7D, no cambia el área del bucle de corriente y por ello no aporta protección magnética. A bajas frecuencias el circuito de la figura 7A también tiene dos problemas. Primero, debido a que el blindaje es uno de los conductores del circuito, cualquier corriente de EMI, producirá una caída de tensión en el blindaje y aparecerá en el circuito de la señal como tensión

Figura 8: Conexión a masa preferida a baja frecuencia de los cables apantallados para cables coaxiales y pares trenzados apantallados. A: amplificador



de interferencia y segundo, si hay una diferencia de potencial en la masa entre los dos lados del blindaje, entonces aparecerá tensión de interferencia en el circuito de señal.

Para un cable blindado típico la eficiencia del blindaje para el campo magnético es de unos 16dB a 100 kHz y 36 dB a 1MHz. Si la señal es diferencial, entonces la tensión inducida en los conductores centrales es de modo común y se reducirá gracias al rechazo de modo común del receptor. Un receptor diferencial también es útil para rechazar el potencial de continua o el potencial de alterna entre masas.

¿Donde conectar el blindaje a masa?

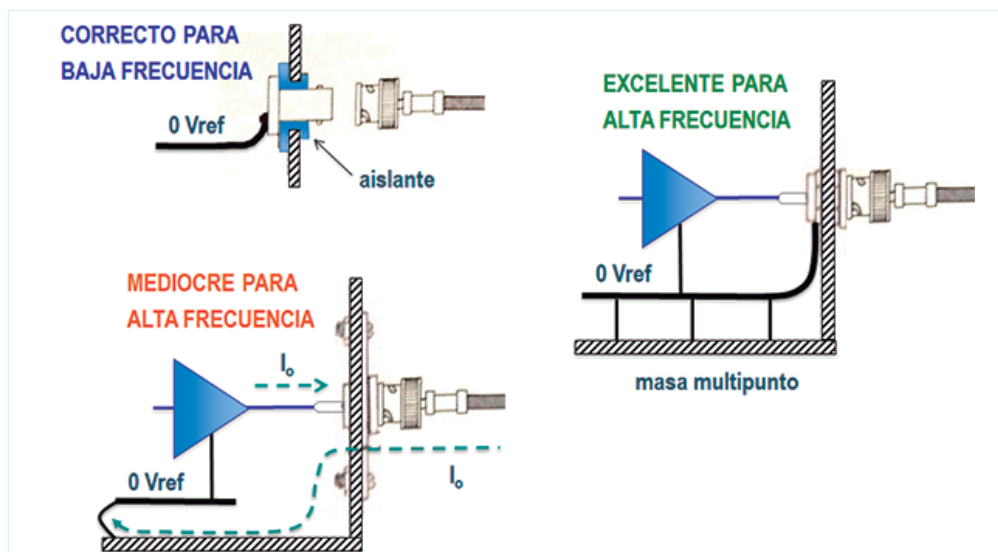
Si las corrientes de EMI en el blindaje son de corriente continua o de bajas frecuencias (Hz), con una conexión capacitiva entre la caja y la tierra, la derivación de corrientes de EMI presentan una alta impedancia a las frecuencias bajas. La aplicación correcta de la capacidad o capacidades y su conexión a tierra es importante para lograr una baja impedancia.

La razón principal para usar un cable blindado a baja frecuencia es protegerlo contra los campos eléctricos, principalmente campos de 50 Hz debidos a la red eléctrica. Como ya se dicho, un blindaje no tiene protección magnética a baja frecuencia. Por ello, es conveniente usar pares trenzados a baja frecuencia. Así, el par trenzado protege contra el acoplo de campo magnético y el blindaje contra el acoplo de campo eléctrico. Muchos circui-

tos de baja frecuencia tienen altas impedancias que son susceptibles a campos eléctricos y por ello conviene usar cables blindados. A baja frecuencia, los cables apantallados multiconductores, donde el blindaje no es el conductor de la señal de retorno, a menudo la pantalla se conecta en un solo lado. Si el blindaje se conecta a masa en los dos lados, entonces la corriente de EMI puede circular por el blindaje debido a la diferencia de potencial entre las masas de los dos lados.

En el caso de un cable coaxial, la corriente de EMI en el blindaje produce una tensión igual a la corriente de EMI multiplicado por la resistencia del blindaje. En el caso de un par trenzado apantallado, la corriente de EMI del blindaje puede acoplarse inductivamente con tensiones diferentes en los diferentes pares. Pero si debemos conectar el blindaje a masa en un solo lado, ¿en cual?. Usualmente es mejor conectar el blindaje a masa en el lado de la fuente de señal, al ser la referencia de tensión de la señal. Pero si la fuente es flotante, no conectada a masa, es mejor conectar a masa el lado de la carga. La figura 8 presenta los esquemas más usuales de conexión a masa del blindaje a baja frecuencia. Los esquemas A a D son casos donde el generador de señal o el amplificador está conectado a masa, pero no ambos a la vez. En estos cuatro casos, el blindaje del cable también está conectado en un solo lado y es el mismo lado en el cual el circuito amplificador también está conectado a masa. En los esquemas E y F, la masa está conectada en ambos lados y por ello el ruido de EMI queda determinado por la diferencia de potencial entre las dos masas y por la susceptibilidad del bucle de masa a los campos magnéticos externos. En el caso E, el par trenzado apantallado está conectado a masa por ambos lados para forzar a que parte de la corriente circule a través de la baja impedancia del blindaje, mejor que a través del conductor de retorno de la señal. En el esquema F, el blindaje del cable coaxial debe conectarse a masa en ambos lados porque también es el camino de retorno de la señal. En este caso, el acoplo de EMI puede disminuirse reduciendo

Figura 9: Como conectar un conector coaxial con el chasis y los 0Vref



la resistencia del blindaje del cable, al reducir el acoplo por impedancia común. Si se necesita una mayor inmutabilidad, entonces el bucle de masa debe abrirse. Esto puede realizarse usando transformadores, optoaisladores o choques de modo común.

Conectando el blindaje del cable en un solo lado a masa para eliminar las EMI, se hace actuar al cable como una antena de alta frecuencia y puede ser vulnerable a la captación de campos externos como los debidos a radiotransmisores de AM y FM. Al conectar el blindaje a masa, estas corrientes de EMI pueden entrar en el equipo y causar interferencias. Por ello, el modo adecuado para conectar el blindaje a masa es conectarlo directamente al chasis del equipo y no a la masa del circuito. Esta conexión debe tener la menor impedancia posible y debe realizarse por el exterior el chasis (figura 4C). De esta forma, cualquier corriente de EMI en el blindaje circulará por la superficie externa de la caja metálica y desde esta caja metálica a masa a través de la capacidad parásita, desviándose del circuito electrónico interno. Se debe pensar que el blindaje es una extensión del chasis de los equipos y debe conectarse al chasis y no a la masa del circuito.

La conexión a masa en un solo lado es efectiva a bajas frecuencias (kHz) porque previene corrientes circulantes por el blindaje, con la posibilidad de introducir ruido en el circuito de señal. También elimina el bucle de masa asociado a la posible captación de campo magnético. A medida que la frecuencia aumenta se reduce la efectividad del blindaje conectado a masa en un solo lado y aumenta su efectividad como antena y por ello es mejor conectar el blindaje en los dos lados. En equipos con referencia de señal flotante, a frecuencias por debajo de algunos kHz, la conexión a masa del chasis causada por el conector resulta en un rechazo de modo común de sólo unos 6 dB. Este rechazo mejora con la frecuencia debido al incremento de la impedancia del bucle de masa, mientras que la impedancia del blindaje se mantiene constante. Si se usa un conector coaxial aislado (BNC u otro) o si el conector se monta directamente en el circuito impreso en lugar del chasis, se mantiene el

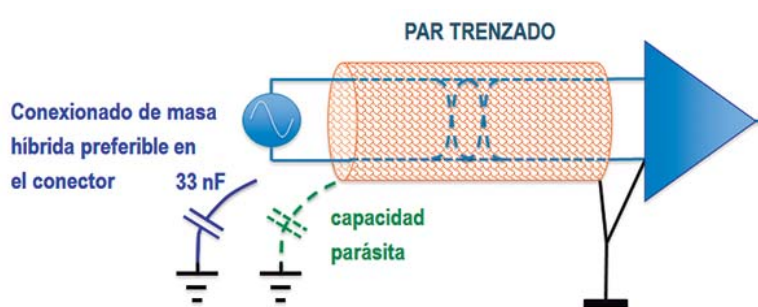


Figura 10: A alta frecuencia, la capacidad parásita cierra el bucle de masa. Para el conexionado de masa híbrida se puede usar un condensador de 33 nF.

bucle de masa abierto, aportando una mejora a bajas frecuencias (figura 9). Esta mejora disminuye cuando la frecuencia aumenta y se anula en la región de 1 a 10 MHz. Aquí las masas de simple punto o en estrella no funcionan y deben sustituirse por las masas multipunto.

En equipos con las referencias de masa internas (0 Vref) conectadas al chasis como masas multipunto no es necesario intentar aislar el blindaje del chasis. Aunque la masa de la señal se conecte al chasis, si esta conexión es físicamente remota desde el conector coaxial, debe establecerse un camino directo entre la referencia de señal y la carcasa trasera del conector. Esto es para prevenir que el retorno de corriente circule por todo el chasis. Entre 100 kHz y 10 MHz, los cables coaxiales con una trenza de alta calidad tienden a segregar las corrientes de interferencia, las cuales circulan por la parte externa del circuito de la corriente que circula por la parte interna por el efecto pelicular.

Conexión De Los Cables Apantallados A Alta Frecuencia

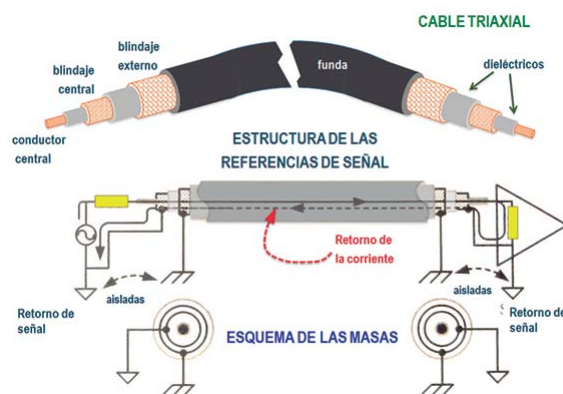
A frecuencias por encima de los 100 kHz o cuando el cable excede la longitud de $\lambda/20$, se hace necesario conectar el blindaje a masa en ambos lados. Esto es válido tanto en cables coaxiales como en cables multiconductor. A alta frecuencia aparece otro problema debido a la capacidad parásita que tiende a cerrar el bucle de masa, como se ve en la figura 10, lo que hace difícil o casi imposible mantener el aislamiento de masa en el lado del blindaje no conectado a masa. Por ello es común una práctica en aplicaciones de alta frecuencia y con circuitos digitales consistente en conectar a masa el blindaje en ambos

lados. Cualquier pequeña tensión de interferencia causada por la diferencia de potencial entre las masas que puede acoplarse al circuito de señal no afecta a los circuitos digitales y puede ser filtrada gracias a la gran diferencia de frecuencia entre el ruido y la señal. A frecuencias por encima de 1 MHz, el efecto pelicular reduce el acoplo por impedancia de modo común. Como se ha dicho, el efecto pelicular causa que la corriente de ruido circule por la superficie externa del blindaje y la corriente de señal circule por la superficie interna del blindaje. Las conexiones múltiples a masa (aconsejable cada $\Delta/4$) facilitan el blindaje contra el campo magnético a frecuencias por encima de la frecuencia de corte de blindaje.

Conexión Híbrida De Los Cables Apantallados

La masa multipunto es efectiva a alta frecuencia y la conexión a masa en estrella o de un solo punto es efectiva a baja frecuencia. Pero, ¿qué hacer cuando tenemos señales de baja y alta frecuencia al mismo tiempo?. En esta situación el circuito de la figura 10 puede ser ventajoso

Figura 11: Conexión a masa de un cable triaxial



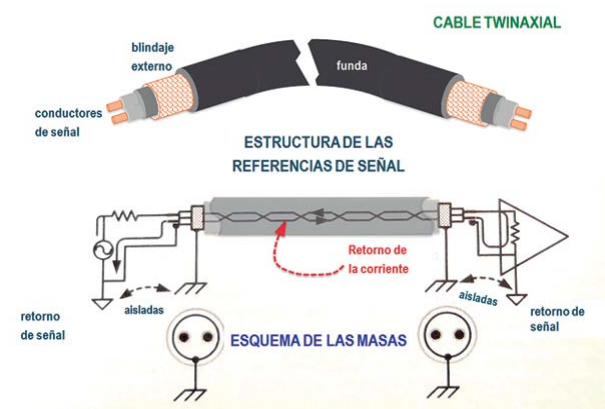


Figura 12: Conexión a masa de un cable twinaxial

reemplazando la capacidad parásita con un condensador real de, por ejemplo, 33 nF. Esto forma una combinación de masa híbrida. A baja frecuencia se tiene una masa de simple punto porque la impedancia del condensador es grande. Sin embargo, a alta frecuencia, el condensador tiene baja impedancia, lo cual convierte el circuito en un blindaje conectado en ambos lados a masa. Pero cualquier inductancia parásita en serie con el condensador reducirá su efectividad. Por ello conviene que el condensador esté prácticamente integrado en el conector. Así, este sistema puede llegar a ser efectivo hasta 1 GHz.

Tipos de cables

Veamos los cables más importantes desde el punto de vista de la configuración de sus blindajes y sus conexiones.

Cables Coaxiales

Los cables coaxiales son líneas de transmisión con bajas pérdidas e impedancia controlada. Los cables coaxiales se deben conectar a masa en los dos lados ya que el blindaje externo actúa como retorno de la señal. A altas frecuencias, por encima de la frecuencia de corte del blindaje, el conductor externo, cuando se conecta en ambos lados, lleva la mayoría de la corriente de retorno. Sus principales aplicaciones incluyen datos de alta frecuencia y circuitos de vídeo. Los cables coaxiales deben conectarse usando conectores coaxiales.

Cables Triaxiales

Un cable triaxial consiste en dos blindajes aislados entre sí más un conductor central para la señal. El

blindaje externo sirve como auténtico blindaje y se conecta al chasis, mientras que el blindaje interno actúa solo como conductor de retorno de la señal y se conecta al circuito de retorno de la señal. Así, un cable triaxial funciona como línea de transmisión balanceada (figura 11). Los cables triaxiales se usan principalmente en circuitos de vídeo y circuitos sensibles. Los cables triaxiales son más inmunes a campos externos que los cables coaxiales (sobre unos 30 dB de mejora). Deben conectarse usando conectores triaxiales.

El uso de un doble blindaje provoca el incremento de la efectividad del blindaje a alta frecuencia y mejora el comportamiento cuando se tiene señales de alta y baja frecuencia a la vez en el mismo cable. En el primer caso los dos blindajes pueden conectarse entre sí y en el segundo caso los dos blindajes deben mantenerse aislados para comportarse como un verdadero cable triaxial. Así, el blindaje interno es para bajas frecuencias, conectado en un solo lado, mientras que el externo es para altas frecuencias, conectado en ambos lados. Otra posibilidad es conectar los blindajes en un solo lado cada uno, pero en lados opuestos. Así no existe bucle de masa a baja frecuencia pero la capacidad parásita del blindaje interno cierra el bucle a alta frecuencia. Esta solución es especialmente efectiva en el caso de tener cables muy largos ($L > \lambda/20$), donde se puede tener altas diferencias de potencial entre las masas y donde se puede tener una alta capacidad parásita debido a la gran longitud del cable.

Si el doble blindaje lo conectamos a masa a la vez mejora su resistencia típica de 2 a 3 mΩ/m. Pero si la frecuencia aumenta, el aislamiento natural debido al efecto pelicular aparecerá entre los dos blindajes. Si dejamos el doble blindaje aislado, el blindaje externo debe conectarse al chasis y el interno a la señal de retorno en ambos lados manteniendo flotante la masa. A altas frecuencias el doble blindaje todavía aporta una mejora de 30 dB debido al desacople entre las inductancias de los dos blindajes (bajo acoplamiento entre blindajes). Si se añade un tercer blindaje se puede tener un cable cuadraxial con todas sus variaciones.

Cables Twinaxiales

Los cables twinaxiales contienen dos líneas de señal balanceadas que pueden ser, o no, un par trenzado, con un buen control de su impedancia característica. La limitación de un cable twinaxial es su frecuencia de funcionamiento, al estar limitada a unos 10 MHz. El blindaje aporta una buena protección contra los campos externos, mientras que los conductores internos constituyen una línea de transmisión balanceada. Deben usarse conectores adecuados para mantener la impedancia característica de la línea. Si ello no es un problema, pueden usarse conectores comunes. La forma de conectarlo se puede ver en la figura 12.

Reducción de la corriente en el blindaje

Si se necesita una gran inmunidad, entonces el bucle de masa debe abrirse. Esto puede realizarse usando transformadores, optoaisladores o fibras ópticas. Si ello no es posible se puede reducir la corriente en el blindaje sin interrumpirlo gracias a varios métodos seguidamente expuestos. Se puede dejar flotante una de las dos cajas en lugar de dejar flotante el blindaje como en la figura 13A. Esto sólo se puede realizar en concordancia con las reglas de seguridad, esto es, para tensiones menores de 42 V.

Se puede usar una caja con doble blindaje como en la figura 13B. El blindaje se conecta a la parte metálica que rodea el circuito a apantallar. Esta parte metálica se mantiene flotante con respecto a la caja principal del equipo, la cual se conecta a tierra por razones de seguridad. Dado que no puede haber conexión entre la parte externa y la interna, al menos a bajas frecuencias, la alimentación y las interfaces de señal deben también aislarse.

Se puede usar un choque de ferrita en las conexiones a tierra, como en la figura 13C. Por último, se puede usar un choque toroidal de ferrita alrededor de todo el cable blindado como en la figura 13D. A alta frecuencia, la impedancia añadida debido a la ferrita incrementa la impedancia del bucle, reduciendo la circulación de corriente en modo común.

Conclusiones

Resumimos lo explicado en 5 reglas que ayudarán al diseñador o instalador a conectar correctamente los blindajes de los cables apantallados:

Regla 1: Con un sistema de referencia de masa flotante (sistema de masa simple) los cables coaxiales deben conectarse vía conectores aislados si se prevén problemas a baja frecuencia. Por encima de algunos MHz, esta precaución es inútil y son mejores los conectores coaxiales unidos al chasis. Por ello, un cable coaxial no es el mejor medio para aplicaciones de baja frecuencia. Los pares trenzados apantallados aportan unas mejores prestaciones en estas aplicaciones.

Regla 2: Con una referencia de señal conectada a masa (sistemas multipunto a masa) los cables coaxiales deben usar conectores estándar unidos al chasis con el plano de 0 Vref o con pistas trazadas lo más directas que sea posible al conector coaxial.

Regla 3: Los verdaderos cables triaxiales deben tener el blindaje interno conectado a la masa de la señal en ambos lados y el blindaje externo conectado al chasis en ambos lados. Para tener el máximo beneficio del concepto triaxial se deben usar conectores especiales N con sus conexiones a los blindajes aisladas entre el blindaje interior y el exterior.

Regla 4: Si el blindaje del cable es sólo un blindaje de Faraday contra el acoplo de campos eléctricos (capacitivo) y se desea evitar las corrientes de masa circulando por el blindaje del cable, el blindaje se puede conectar a masa solo en un lado.

Regla 5: Dado un cierto objetivo de efectividad de apantallado, un cable blindado se debe seleccionar con un blindaje con igual o mejor efectividad. Entonces, sabiendo que la conexión de blindaje a masa empeora la efectividad del blindaje, el método de conexión se seleccionará de tal forma que su contribución a la pérdida de efectividad de blindaje sea tolerable.

Como información adicional, la tabla 1 muestra las longitudes máximas de los "pigtaills" o "coletas" en función de la frecuencia de las EMI, la resistencia del blindaje y su longitud. Y la tabla 2 muestra un resumen de las conexiones idóneas para los cables no coaxiales.

Figura 13: Algunas alternativas para decrecer las corrientes en el blindaje sin interrumpir el blindaje

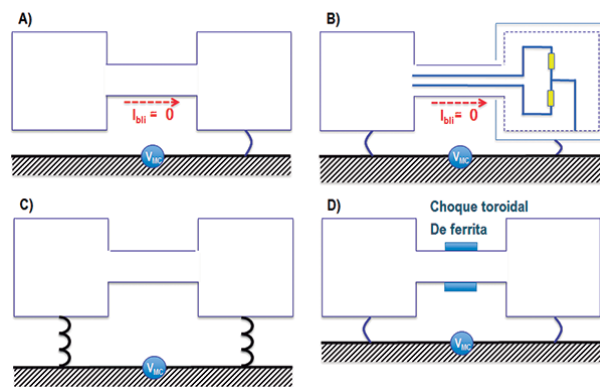


TABLA 1: Longitud máxima para una conexión del blindaje a masa en función de la frecuencia de la EMI y del tipo de cable

IMPEDANCIA EN CONTINUA DEL BLINDAJE	LONGITUD TOTAL DEL CABLE	EFICIENCIA PARA < 100 kHz	LONGITUD MÁXIMA TOLERABLE DEL "PIGTAIL" O "COLETA" A LA MAYOR FRECUENCIA DE EMI DE:				
			1 kHz	10 kHz	100 kHz	1 MHz	10 MHz
Alta (mediocre) 50 mΩ / m	1 m	60 dB	15 cm	7,5 cm	0,75 cm		
	10 m	40 dB	1,50 m	75 cm	7,5 cm	0,75 cm	
	100 m	20 dB	sin límite	7,50 m	75 cm	7,5 cm	0,75 cm
Buena 16 mΩ / m	1 m	70 dB	5 cm	2,5 cm			
	10 m	50 dB	50 cm	25 cm	2,5 cm		
	100 m	30 dB	sin límite	2,50 m	25 cm	2,5 cm	
Baja (excelente) 5 mΩ / m	1 m	80 dB	1,50 cm	0,75 cm			
	10 m	60 dB	15 cm	7,5 cm	0,75 cm		
	100 m	40 dB	1,50 m	75 cm	7,5 cm	0,75 cm	

PROPÓSITO DEL BLINDAJE	L <= λEMI / 16	L > λEMI / 16
Para reducir la susceptibilidad (EMI fuera del blindaje)	Blindaje eléctricamente corto. El sistema debe tener una masa de simple punto con conexión del chasis a los 0 Vref en el lado del receptor. El blindaje debe conectarse a masa en este punto. Una trenza normal con un pigtail corto es aceptable	Blindaje eléctricamente largo. El blindaje debe conectarse a masa a ambos lados. Debe una buena trenza con Z muy baja Sin pigtaills y con buena conexión a 360°
	Blindaje eléctricamente corto. El sistema debe tener una masa de simple punto con conexión del chasis a los 0 Vref en el lado del receptor. El blindaje debe conectarse a masa en este punto. Una trenza normal con un pigtail corto es aceptable	Blindaje eléctricamente largo. El blindaje debe conectarse a masa a ambos lados. Debe una buena trenza con Z muy baja Sin pigtaills y con buena conexión a 360°

TABLA 2: Recomendaciones conexionado para cables no coaxiales

Opciones disponibles: blindaje no conectado, conectado en el lado de la carga o en el generador o en los dos lados
 Conexión del blindaje: uso del "pigtail" o "coleta" (barato, práctico pero ineficiente) o conexión a 360° (caro)
 Material del blindaje: Alta impedancia (barato, flexible y ligero) o baja impedancia (caro, rígido y pesado)

REFERENCIAS

- J. Balcells / F. Daura / R. Pallàs / R. Esparza, *Interferencias Electromagnéticas En Sistemas Electrónicos*, 1992, Boixareu Editores
- Henry W. Ott, *Electromagnetic Compatibility engineering*, 2009, John Wiley & Sons
- Michel Mardiguian, *Grounding and Bonding, Volume 2, A Handbook Series on Electromagnetic Interferencia and Compatibility*, 1988, Interference Control Technologies, Inc,
- Donald R.J. White and Michel Mardiguian, *Electromagnetic Shielding, Volume 3, A Handbook Series on Electromagnetic Interferencia and Compatibility*, 1988, Interference Control Technologies, Inc,
- Michel Mardiguian, *EMI Control Methodology and Procedures, Volume 8, A Handbook Series on Electromagnetic Interferencia and Compatibility*, 1989, Interference Control Technologies, Inc,
- Elya B. Joffe and Kai-Sang Lock, *Grounds for Grounding*, IEEE Press, 2010, Wiley & Sons Inc.