

El mito de las interferencias en modo común

Artículo cedido por Cemdal

CEMDAL
www.cemdal.com



Francesc Daura Luna, Ingeniero Industrial. Director de la Consultoría CEMDAL, Representante de Austria Mikro Systeme (ams AG) para España y Portugal

Encontrar la solución de los problemas de compatibilidad electromagnética (CEM) relacionados con las interferencias electromagnéticas (EMIs) en modo diferencial o en modo común no resulta fácil en muchos casos. Principalmente, entender cómo gestionar los problemas de las EMIs en modo común es un mito para muchos profesionales de la electrónica y las instalaciones. Estos problemas pueden surgir a nivel de tarjeta de circuito impreso (TCI), a nivel de cableado interno y externo al equipo o a nivel de la instalación de un sistema en general. Las EMIs en modo común son debidas muchas veces a razones poco evidentes como la inestabilidad de la masa del circuito; los acoplamientos por capacidades parásitas; por falta de desacoplo suficiente en la alimentación; o por desequilibrios en los caminos de las señales diferenciales. Se trata pues de circuitos parásitos que no son evidentes, al no quedar reflejados en los esquemas. Pero debemos tener en cuenta que siempre existen en mayor o menor medida.

Generalmente, un problema de EMIs no se puede resolver fácilmente usando ecuaciones, porque éstas pueden llegar a ser demasiado complejas para reproducir cuantitativamente el problema. Además, en muchos casos reales nos faltarán datos, como el valor de los componentes parásitos, usualmente difíciles de localizar y medir. Así, es difícil calcular con el razonamiento siguiente: necesito añadir 250 nF de capacidad distribuida entre estos cuatro puntos de mi TCI para reducir las EMIs en modo común en 50 dB, para cumplir con los límites de las emisiones conducidas que me impone la norma. Usualmente la situación es mucho más ambigua y la solución será más bien del tipo: debo mejorar el desacoplo, reducir la impedancia de masa y añadir un choque en modo común en las señales de E/S, además de añadir un filtro de red en la entrada de la alimentación general. Por ello siempre es importante comprender bien los conceptos electromagnéticos antes de intentar aplicar cualquier cálculo que probablemente

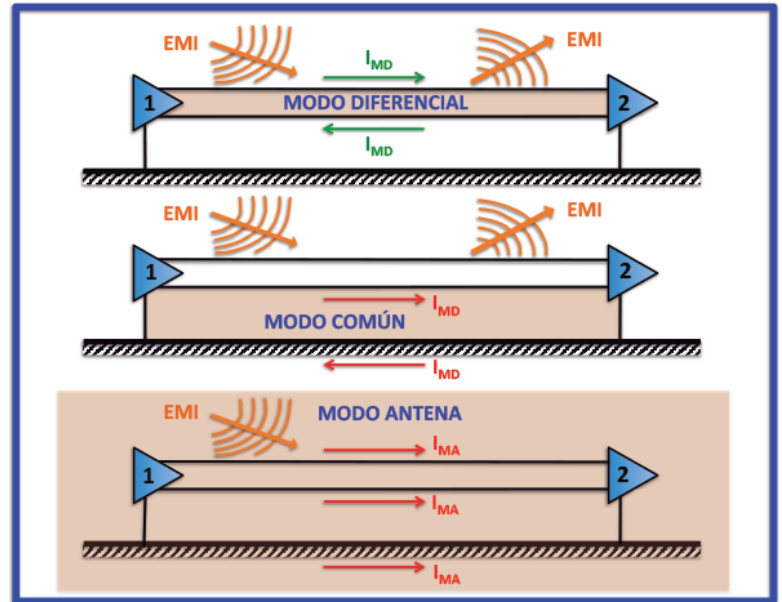


Figura 1: Acoplamiento radiado en Modo Diferencial, en Modo Común y en Modo Antena

será impreciso por la falta de los datos de los componentes parásitos de los circuitos involucrados en el problema de compatibilidad electromagnética (CEM).

Los modos de acoplamiento radiado

Es importante comprender como funcionan los modos de acoplamiento radiado en modo diferencial, en modo común y en modo antena. En la figura 1 se presentan los tres modos de acoplamiento en un circuito. En el circuito superior, el cable lleva las corrientes de señal en modo diferencial (ida y vuelta) en los dos cables próximos entre si, conectando los elementos del circuito 1 y 2. Un campo radiado externo puede acoplarse a este circuito e inducir EMIs en modo diferencial (I_{MD}) entre los dos cables. Pero también la corriente diferencial interna de la señal puede inducir un campo radiado hacia fuera del circuito. El plano de referencia de masa, (puede ser externo al equipo o puede estar formado por su estructura de soporte o caja) no juega ningún papel en este tipo de acoplamiento. En el circuito central, el cable también

puede llevar corrientes en modo común (I_{MC}), es decir, las corrientes que fluyen en la misma dirección en cada cable. Estas corrientes indeseadas, muy a menudo, no tienen nada que ver con las corrientes propias de la señal. Las corrientes en modo común pueden ser inducidas por un acoplamiento de campo externo radiado al bucle formado por el cable, el plano de masa y las diferentes impedancias de las conexiones del equipo a masa, y a continuación, pueden provocar corrientes diferenciales internas para las que el equipo es susceptible. Alternativamente, las corrientes en modo común pueden ser generadas por las tensiones de ruido interno entre los puntos de referencia de masa y la conexión del cable y ser responsables de emisiones radiadas hacia el exterior. Debemos observar que las capacidades parásitas e inductancias asociadas al cableado y el recinto (caja) de cada unidad son una parte integral del circuito de acoplamiento en modo común y juegan un papel importante en la determinación de la amplitud y la distribución espectral de las corrientes en modo común. En el circuito inferior, las corrientes en modo de antena (I_{MA}) circulan en

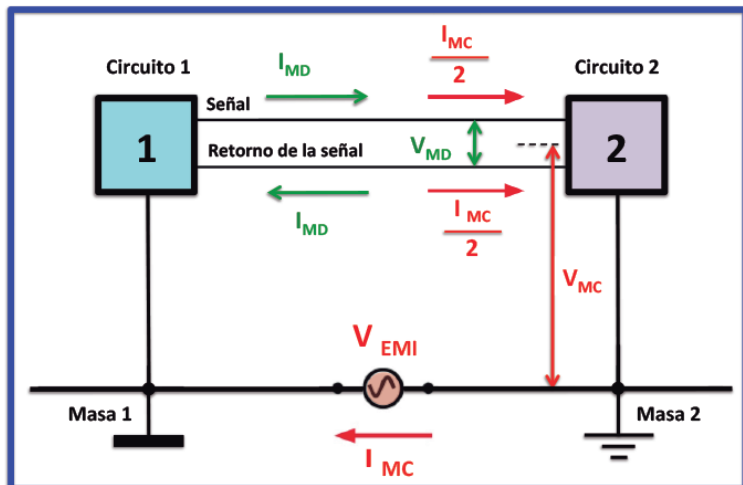


Figura 2: Cualquier diferencia de potencial entre dos masas (V_{emi}) provocará corrientes de Modo Común (I_{mc}) en el bucle de masa entre la señal y los conductores de retorno de la señal

la misma dirección por los dos cables y por el plano de referencia de masa. Estas corrientes no son debidas al ruido generado internamente en el circuito.

Aparecen cuando todo el sistema, incluido el plano de masa, se expone a un campo radiado externo. Un ejemplo sería cuando un vehículo circula cerca de una antena de un transmisor potente de radio-difusión; la estructura del vehículo, que sirve como el plano de masa para su equipamiento interior, lleva las mismas corrientes que el cableado interno.

Las corrientes en modo de antena solo se convierten en un problema para la susceptibilidad de campo radiado de los sistemas autónomos cuando se convierten en corrientes en modo diferencial o en modo común circulando por las diferentes impedancias en los diferentes circuitos de corriente. Nos vamos a centrar en los acoplamientos en modo común y en modo diferencial. Uno de los aspectos más importantes es saber distinguir entre estos dos posibles modos de acoplamiento. La base de esta distinción es la idea de que los dos caminos de estos dos modos coexisten al mismo tiempo en un mismo conjunto de conductores.

Uno de estos caminos es el circuito pensado por el diseñador: las señales y sus retornos, o la alimentación y su retorno, a lo largo del cual fluyen las corrientes deseadas de señal, en modo diferencial, estando en oposición entre sí. Es el circuito en modo diferencial deseado en el proceso de

su diseño. El otro camino es el circuito parásito que se forma entre el circuito deseado y la estructura (rack, armario o caja), dentro de la cual se encuentra el mismo circuito. A este camino se le llama circuito en modo común, debido a que las corrientes indeseadas en los conductores fluyen en la misma dirección.

Para verlo en detalle, en la figura 2 la señal en modo común es la que aparece en fase y con la misma amplitud en las dos líneas ($I_{mc}/2$) de un cable de dos hilos con respecto a la referencia común local o masa. La corriente de retorno I_{mc} circula por la masa.

Estas corrientes no son deseadas, pero en la práctica siempre están presentes en los circuitos o los equipos. La señal deseada en modo diferencial (I_{md}) circula por los dos hilos en sen-

tidos contrarios. La tensión en modo diferencial V_{md} es la tensión de la señal deseada. La tensión en modo común (V_{mc}) es la mitad de la suma vectorial de las tensiones entre cada conductor de un circuito equilibrado y la masa cercana. Tales señales pueden ser debidas a la captación de EMIs radiadas captadas por igual en ambas líneas (acoplamiento por radiación en modo común o en modo antena) o debidas a una diferencia de potencial V_{emi} entre las masas del circuito 1 y del circuito 2.

Veamos ahora en la figura 3 el significado de los dos tipos de corriente en las emisiones radiadas desde un par de conductores, que pueden ser cables o pistas en un TCI. Los campos eléctricos radiados, debidos a cada corriente se superponen para obtener el campo eléctrico radiado total. En primer lugar consideremos los campos radiados debido a las corrientes en modo diferencial, como se ilustra en la figura 3(A).

Las corrientes en modo diferencial circulan en sentido opuesto. Por lo tanto, los campos eléctricos correspondientes también serán opuestos (E_1 y E_2). Sin embargo, dado que los dos conductores no están yuxtapuestos, los campos no se pueden cancelar exactamente, pero se restan y emiten un pequeño campo eléctrico neto, E_{md} . Las corrientes en modo común circulan en la misma dirección y su campo radiado se suma, aportando una contribución mucho más grande al campo radiado total, E_{mc} en comparación a las corrientes en modo diferencial, como se ilustra en la figura 3(B).

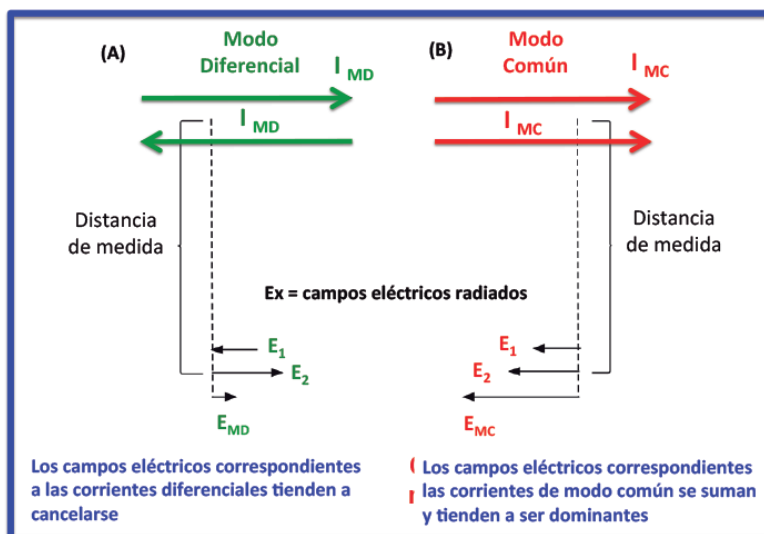
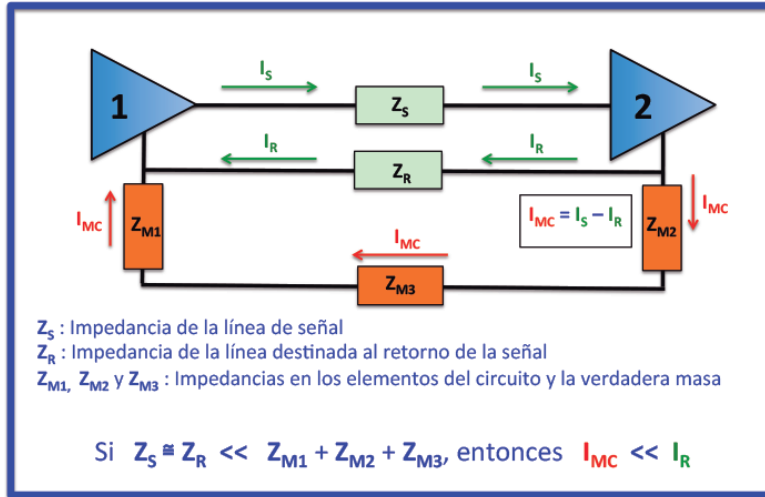


Figura 3: Ilustración del potencial relativo de las emisiones radiadas de (A) las corrientes de Modo Diferencial y (B) las corrientes de Modo Común.

Figura 4: Diagrama simplificado de un circuito típico. El flujo de corriente es diferencial y está casi todo contenido en el circuito formado por los conductores



Por lo tanto, una pequeña corriente en modo común puede producir el mismo nivel de campo eléctrico radiado que un valor mucho más grande de corriente en modo diferencial. En resumen, las corrientes en modo común tienen un potencial mucho mayor para la generación de emisiones radiadas que las corrientes en modo diferencial, como se comprueba en los equipos reales. Dados los límites establecidos por las normas de emisiones radiadas, simplemente con corrientes en modo común del orden de los μA los sobrepasaremos fácilmente, mientras que son necesarias corrientes en modo diferencial del orden de los mA para sobrepasar los mismos límites, es decir un ratio de 1000 veces. Por tanto, se necesita alrededor de tres órdenes de magnitud más corriente en modo diferencial que corriente en modo común para producir el mismo campo radiado. En otras palabras, el mecanismo de radiación en modo común es mucho más eficiente que el mecanismo de radiación en modo diferencial.

Es más probable que la emisión en modo común sea un problema a bajas frecuencias y que la emisión en modo diferencial sea un problema a altas frecuencias. Para tiempos de subida de conmutación de una señal digital en el rango de 1 a 10 ns, la mayor parte de las emisiones radiadas en modo común se producirá en la banda de frecuencias de 30 a 300 MHz. Para un cable largo (longitud $> \lambda/4$) la intensidad de la radiación en modo común no depende de su longitud ni de la frecuencia. Sólo depende de la corriente en modo común en el cable.

Impedancias y corrientes en modo común

Veamos el detalle de las impedancias y corrientes en la conexión entre dos circuitos típicos. En la figura 4, el circuito de conexión es de parámetros concentrados y el flujo de corriente diferencial está casi todo contenido en el circuito formado por los conductores o pistas de una TCI. Su diferencia ($I_S - I_R$) es la corriente de modo común IMC. También se presentan las relaciones entre las impedancias y las corrientes. Si las impedancias del camino de la corriente en modo diferencial Z_s y Z_r son mucho menores que la suma de impedancias del camino de la corriente en modo común Z_{M1} , Z_{M2} y Z_{M3} la corriente en modo común IMC será mucho más

pequeña que la corriente de retorno IR y se puede esperar que no surgirán problemas de emisiones en modo común. En la figura 5, el circuito de conexión es de parámetros distribuidos, destacando las capacidades distribuidas entre la línea de señal y su línea de retorno. El flujo de corriente diferencial está también casi todo contenido en el circuito formado por los conductores de conexión. Aquí, si la impedancia de retorno de la señal Z_r es mucho mayor que las impedancias del camino de la corriente en modo común Z_{M1} , Z_{M2} y Z_{M3} la corriente de modo común IMC será mucho mayor que la corriente de retorno IR y podrá haber problemas de emisiones de modo común.

EMIs conducidas en modo diferencial

La figura 6 ilustra como ejemplo los diferentes circuitos en los dos modos en un aparato o equipo genérico, con su conexión a la red eléctrica de alimentación general y una línea de señal que comunica con otro equipo. Las flechas en la figura son corrientes de emisión; su dirección podría ser fácilmente invertida para entender como podrían funcionar los mismos caminos de corriente a nivel de susceptibilidad electromagnética (EMS) a los campos externos. Es simple entender el acoplamiento en modo diferencial de la conexión del equipo a la red eléctrica. La interferencia (EMI) aparece entre la fase (F) y el neutro (N)

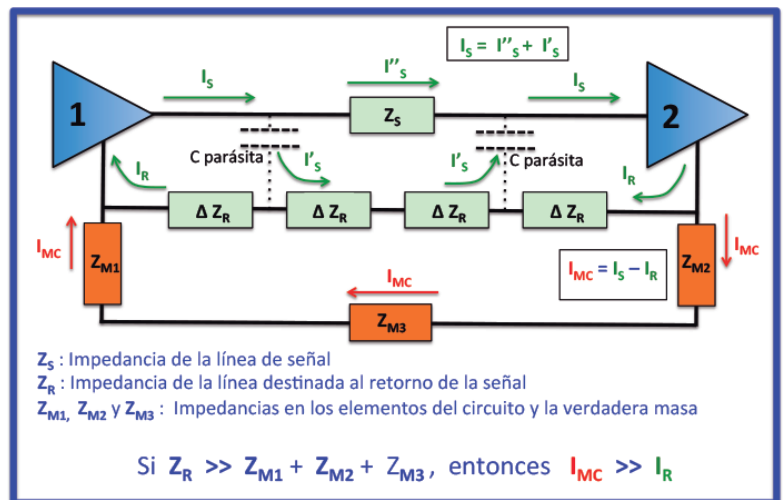


Figura 5: Diagrama simplificado de un circuito típico con la impedancia de retorno distribuida, destacando las capacidades distribuidas entre la línea de señal y la línea de retorno. El flujo de corriente es diferencial y está casi todo contenido en el circuito formado por los conductores.

de la red eléctrica y luego se podría reproducir entre el terminal (+) y el (-) de la fuente de alimentación interna del equipo. La colocación de un filtro en línea con estos conductores es la forma convencional de atenuar esta EMI. Las fuentes típicas de emisiones son la fuente de alimentación conmutada o la interferencia entrante, o los fallos de tensión o las sobrecargas inducidas por rayos son las más comunes a nivel de inmunidad conducida (Ems conducida). Las pruebas de emisiones realizadas en la conexión de la red miden la mitad de la componente diferencial en cada fase. El comportamiento electromagnético de las EMIs en modo diferencial es similar tanto a nivel de emisiones como de inmunidad conducida.

Un mecanismo similar opera en las líneas de señal, aunque en este caso la amenaza y el método de gestionar las EMIs es diferente. Debido a que, en general, las conexiones de señal son punto a punto (salvo en el caso de las conexiones que usan los buses de datos), no tienen la oportunidad de afectar a una gran área, como es el caso con las conexiones de alimentación de la red eléctrica. Las corrientes diferenciales en las líneas de señal son principalmente las propias señales. Si se trata de corriente continua o de baja frecuencia (por ejemplo sensores de respuesta lenta), entonces su capacidad de interferir es muy baja, el filtrado es sencillo y está dirigido principalmente a mejorar la inmunidad a las EMIs externas inducidas. Si

las señales son de banda ancha (datos de alta velocidad o señales de video), entonces tendremos problemas de EMIs emitidas y problemas de inmunidad y el filtrado será más difícil. Se necesita entonces el uso de cables apantallados o medidas especiales de protección. En sus conexiones, sin embargo, el principal problema con este tipo de líneas de señal son las emisiones radiadas, más que las emisiones conducidas (ver más adelante).

EMIs conducidas en modo común

Siguiendo en la figura 6, los cables de la red eléctrica de alimentación (fase F y neutro N) y los conductores de la línea de señal, también llevan perturbaciones conducidas en modo común. En este caso, las EMIs no aparecen entre los conductores (F y N o la señal y su retorno) sino que las EMIs aparecen en cada conductor referenciadas a un tercer punto. Las corrientes de las EMIs en modo común circulan en un bucle que incluye este tercer punto. En el caso de la red eléctrica, existen dos posibilidades para el tercer punto: puede ser el cable de tierra de seguridad (modo común (A)) o puede ser la estructura externa (modo común (B)). Aunque la tierra de seguridad está por lo general conectada a la estructura externa en algún punto, hay diferencias entre estos dos modos. La diferencia más notable es que en el primer caso (A), las corrientes se mantienen dentro

del propio cable de alimentación, circulando por los conductores de fase (F) y neutro (N) y regresa a través de la tierra de seguridad T, mientras que en el segundo caso (B), todos los conductores, incluyendo la tierra de seguridad llevan las corrientes en modo común y retornan a través de un camino independiente. Es evidente que para los aparatos de Clase de Protección II, al no tener la conexión del conductor de tierra de seguridad, es solo aplicable el modo común (B).

Las fuentes de las emisiones en modo común son mucho más difíciles de visualizar, predecir y controlar que las fuentes de las emisiones en modo diferencial. Por lo general, son generadas por las funciones internas de alta frecuencia dentro del equipo (por ejemplo, los relojes de los microcontroladores, así como las conmutaciones en la fuente de alimentación conmutada o en convertidores CC/CC). Estas corrientes en modo común no son intencionalmente o directamente acopladas a la toma de corriente eléctrica, pero aparecen debido a los acoplamientos parásitos. Del mismo modo, las EMIs en modo común externas (típicamente ruido de transitorios rápidos y señales de radiofrecuencia) se acoplan a los circuitos internos a través de estos caminos parásitos. El simple filtrado diferencial entre los conductores de la fase F y el neutro N no tiene ningún impacto sobre este modo de interferencia. El acoplamiento en modo común (A) se puede filtrar con un choque inductivo en modo común y con condensadores en paralelo entre fase y tierra (lo que empeora las fugas hacia la tierra), como en los filtros de red más comunes. Los ensayos de emisiones conducidas miden las tensiones F-T y N-T por separado. El acoplamiento en modo común (B) no puede ser tratado con un filtro capacitivo porque no hay ningún lugar para conectar los condensadores en paralelo. Los choques en modo común en todas las líneas, incluyendo la tierra de seguridad T pueden ayudar, pero por lo demás, las buenas soluciones implican remedios estructurales en el propio equipo.

Las EMIs en modo común en las líneas de señal pueden ser significativas. Los comentarios anteriores en relación al filtrado son igualmente aplicables, con el problema añadido

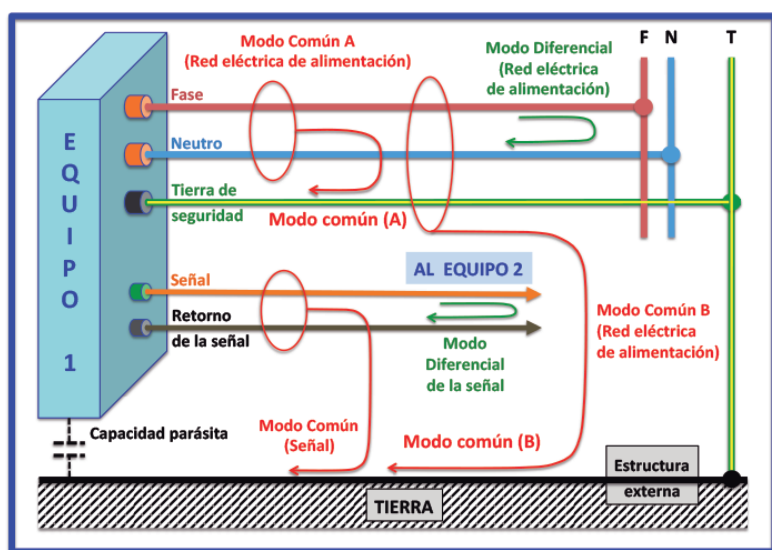


Figura 6: Los conceptos del Modo Común y el Modo Diferencial. Señal: señal de datos, sensores o comunicaciones entre equipos

para las señales de banda ancha consistente en que los filtros capacitivos afectarán a la señal deseada tanto como a las EMIs. Además del acoplamiento parásito dentro del equipo, en las señales de banda ancha se produce otra fuente de emisiones: a través de las fugas entre el cable y su entorno, algo de corriente de la señal "escapa" del circuito diferencial y retorna a través de la estructura, lo que resulta en una componente indeseada de la señal en modo común.

Las EMIs conducidas en modo común son en general más problemáticas que las en modo diferencial, porque sus caminos de acoplamiento incluyen estructuras físicas que normalmente no están diseñadas para este fin. En consecuencia:

- Su efecto es difícil de predecir y controlar;
- Pueden cambiar con el tiempo debido a los cambios estructurales no controlados;
- Pueden contaminar una variedad de equipos independientes de nuestro sistema;
- Las corrientes pueden circular dentro de un gran bucle de corriente no controlado, aumentando su potencial para generar emisiones radiadas.

EMIs radiadas en modo diferencial

Los mismos circuitos conceptuales de la figura 6 se pueden utilizar para visualizar el acoplamiento de emisiones radiadas. Debido a que la eficiencia de una estructura de acoplamiento tiene puntos máximos cuando la longitud del cable o de la pista o de la estructura está cerca de un $1/4$ o $1/2$ de la longitud de onda λ de las señales que circulan, en las frecuencias más bajas, el principal mecanismo para el acoplamiento de emisiones radiadas es a través de los cables, que son generalmente más largos que otros elementos del equipo. Por ejemplo, a 10 MHz, $\lambda/2 = 15$ m las EMIs son típicas en los cables largos, a 100 MHz, $\lambda/2 = 1,5$ m son típicas en cables cortos y armarios de tipo medio y a 1 GHz, $\lambda/2 = 0,15$ m son típicas en circuitos impresos y cajas pequeñas. A partir de estos datos, está claro que en los recintos de equipos el mecanismo radiante tiende a dominar por encima de los 100-200MHz y la radiación de los

cables largos dominará por debajo de los 30MHz. Si el acoplamiento es entre dos estructuras muy próximas, las capacidades e inductancias parásitas dominarán, la longitud de onda jugará un papel menos importante y la radiación tendrá un amplio rango de frecuencias.

En los cables, el camino del retorno de la corriente en modo diferencial es conocido y estará muy próximo a su señal (a menos que el circuito haya sido mal diseñado). Esto significa que los campos magnéticos debidos a las corrientes de cada conductor tenderán a anularse entre sí, y los campos eléctricos de las tensiones en los conductores tenderán a concentrarse entre ellos. Por lo tanto, el acoplamiento de emisiones radiadas se minimiza cuando los pares de conductores se mantienen lo más cerca posible y el mejor ejemplo es un par trenzado. Sin embargo, a altas frecuencias el área pequeña que queda entre los conductores es todavía capaz de tener acoplamiento de emisiones radiadas y esto pone un límite en la amplitud y la frecuencia de las señales de banda ancha que pueden ser transportadas a lo largo de los cables.

Frecuentemente es difícil mantener una geometría óptima en todos los circuitos dentro de los equipos. El cableado interno y las limitaciones de diseño de las TCIs tienden a comprometer la regla de tener las áreas de los bucles de corriente al mínimo. Por ello el acoplamiento diferencial radiado de los circuitos internos es más importante, por lo general por encima de 100-200MHz, sobre todo para las frecuencias donde las estructuras pueden ser resonantes. Si se usa una caja o un armario apantallado crea una barrera intencional para que este modo de acoplamiento quede reducido.

EMIs radiadas en modo común

El camino de la corriente en modo común, por su propia naturaleza, incumple el requisito de diseño óptimo de asegurar siempre la proximidad entre la señal y su retorno. A menudo, no hay un buen control en la instalación y la colocación de los cables y por lo tanto, no hay suficiente control sobre el área de los bucles en modo común, pudiendo llegar

a ser muy grande. Sólo cuando los cables se instalan a lo largo de toda su longitud tocando a una estructura (chasis, conducto, bandeja, etc) que lleva intencionalmente la corriente de retorno en modo común, el área del bucle de acoplamiento es mínima. En otras circunstancias, si el cable no se instala cercano al chasis o bandeja, el cable actúa como una antena razonablemente eficiente, con la máxima eficiencia situada en su frecuencia de resonancia. Peor aún, es muy posible (y de hecho es lo más usual) que las corrientes en modo común circulen por las pantallas de los cables blindados. En el diseño de las pantallas de los cables debe asegurarse que las corrientes en modo común generadas internamente no se transfieren a la parte exterior de la pantalla y que, por el contrario, las corrientes de EMIs entrantes que, inevitablemente circulan por el exterior, no se transfieren a los circuitos internos. La buena calidad de la pantalla (Z_t baja) y su terminación en los extremos (sin coletas o "pigtailes" que deterioren la Z_t , aumentándola), son factores cruciales para evitar estos problemas.

El acoplamiento en modo común de emisiones radiadas no se limita a los cables, aunque debido a su longitud es de gran importancia. Cualquier estructura metálica (chasis, bandeja, armario, etc) llevará corrientes en modo común y actuará como un emisor o un receptor de EMIs radiadas. La corriente circula y las diferencias de tensión se producen en el exterior de los recintos de metal y la emisión radiada será más eficiente en las frecuencias de resonancia. Dado que las estructuras de metal no se pueden evitar en la mayoría de los sistemas e instalaciones, un buen diseño de CEM requiere tener el cuidado de que no circulen corrientes de EMIs generadas por el sistema y que las corrientes captadas debidas a fuentes de EMIs externas no se transfieran a los circuitos internos del equipo.

Respuesta caso ideal/real

La figura 7 muestra la respuesta ideal y la del mundo real de un receptor de señal en modo diferencial a una señal entrante en modo común. Claramente en el circuito ideal de la figura 7(A) la salida del receptor es in-

dependiente de la corriente en modo común de la entrada sin importar si el circuito es totalmente diferencial (balanceado) o si solo tiene una entrada balanceada. En la figura 7(B) el receptor real exhibe respuestas distintas a la corriente en modo común, dependiendo de si el circuito es de tipo balanceado o no balanceado. Si en la práctica, en el mundo real, la línea de señal diferencial no está perfectamente balanceada, aparecerá una señal diferencial indeseada como resultado de la señal en modo común, debido a las diferencias en los caminos de la señal diferencial en amplitud y fase. Los circuitos balanceados son superiores a los circuitos no balanceados debido a su mayor inmunidad a las EMIs en modo común. Los términos "circuito diferencial" y "circuito balanceado" no deben tratarse como sinónimos. Un circuito balanceado debe ser diferencial, mientras que un circuito diferencial puede no ser balanceado. Sólo los circuitos balanceados pueden garantizar todas las ventajas de un circuito de señal diferencial. El grado de balance de un circuito está limitado por la capacidad parásita entre cada línea diferencial a la referencia común (masa).

Los campos electromagnéticos y los modos

En la teoría de campos electromagnéticos, el campo eléctrico E es el resultado directo de la fluctuación de la tensión (dV/dt) y el campo magnético H es el resultado directo de cambios en la corriente circulante (dI/dt). Las características de un campo están determinadas por su generador, su frecuencia, el medio de propagación y por la distancia entre el generador y el receptor. En un punto cercano a la fuente del campo, las propiedades del mismo están determinadas principalmente por las características de la fuente. Lejos de ésta, las propiedades las determina el medio de propagación. Por ello se divide el espacio en dos regiones en función de la distancia entre la fuente del campo y el punto de observación. Cerca de la fuente está el llamado campo cercano. A una distancia mayor de la longitud $l/2\pi$ se sitúa el llamado campo lejano o campo electromagnético. l es la longitud de onda de la frecuencia mayor del espectro de

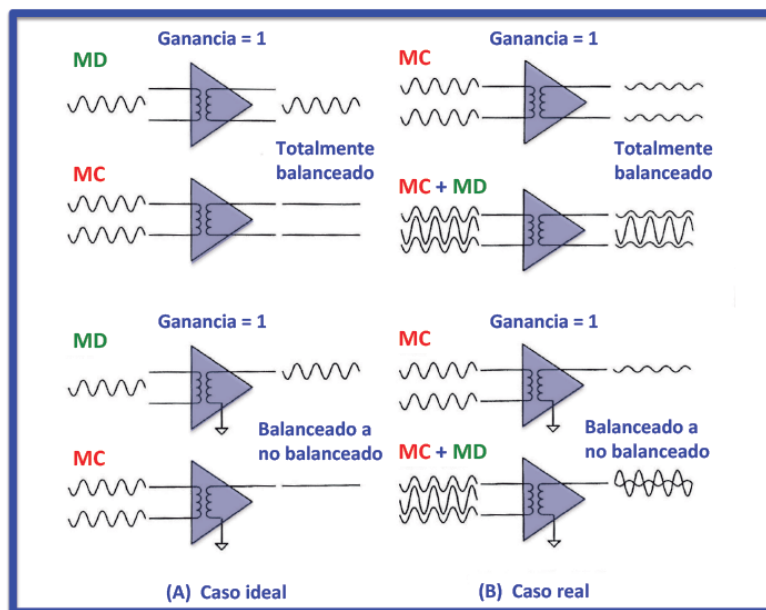


Figura 7: Respuesta de un receptor en Modo Diferencial (MD) a las señales en Modo Común (MC)

la señal. El cociente E/H determina la impedancia de onda, que en el campo lejano vale $E/H = 377\Omega$. Si el generador tiene una fuerte intensidad eléctrica y baja tensión ($E/H < 377\Omega$), el campo cercano es predominantemente magnético. Contrariamente, si el generador tiene una alta tensión y baja intensidad ($E/H > 377\Omega$), el campo cercano será principalmente eléctrico.

Es deseable que los campos electromagnéticos generados por nuestros circuitos sigan dentro de los cables y conductores de los circuitos, en lugar de radiarse al espacio libre. Si la longitud de onda de una señal es significativamente menor que la longitud física del conductor, o la señal circula por un par trenzado o un cable coaxial, entonces la señal está confinada en el conductor. Si no es así, el conductor se puede convertir en una antena indeseada.

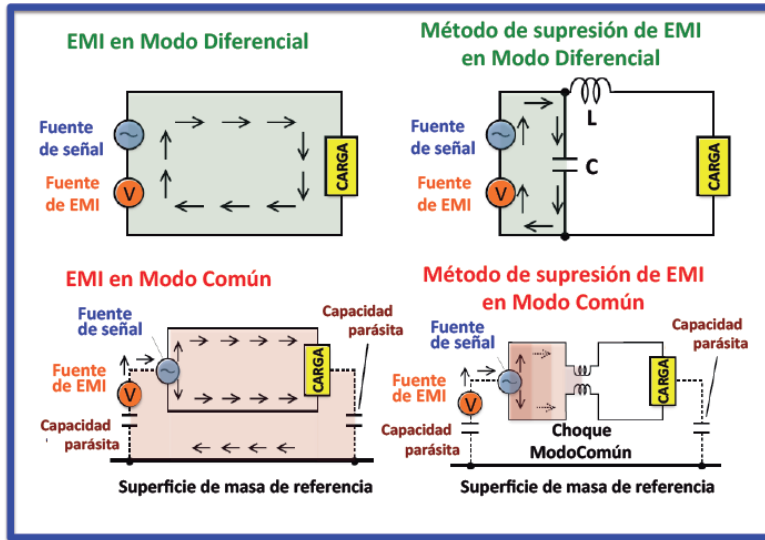
Los problemas relacionados con las corrientes y los campos magnéticos normalmente están asociados a situaciones en modo diferencial. Igualmente, los problemas relacionados con las tensiones y los campos eléctricos normalmente estarán asociados a situaciones en modo común. Incorrectamente, a menudo se prueban soluciones antes de comprender que tipo de emisión genera el problema de CEM. Desafortunadamente, las soluciones efectivas para los problemas de EMIs en modo diferencial son rara-

mente efectivas contra los problemas de EMIs en modo común. Por ello, es esencial conocer la impedancia del campo antes de intentar probar varias soluciones infructuosas.

Aunque un cambio de tensión causará un cambio de corriente y viceversa, uno de estos vectores será predominante. La impedancia de la fuente radiante determinará el campo predominante.

Usando sondas de campo cercano, normalmente es más fácil medir las señales en modo diferencial, al tener valores mayores que en modo común. El valor del campo magnético H será significativamente más alto que el valor del campo eléctrico E. Al mismo tiempo, el campo magnético H se reducirá más rápidamente que el campo E al alejarnos del equipo con la sonda. Es más difícil medir las EMIs en modo común por tener valores muy pequeños. A menudo, el mejor indicador es la amplitud relativa entre los campos E y H. Aquí, el campo E será mucho mayor que el campo H y la reducción de E con la distancia será mayor que la reducción de H. Sin embargo, el campo E es mucho más susceptible a las perturbaciones y por ello es muy sensible a la posición de los cables y a la posición de la persona que realiza las medidas con respecto al equipo. Estos efectos nos demostrarán que el campo proviene de una fuente de tensión, con una relativa alta impedancia.

Figura 8: supresión de las EMI en Modo Diferencial y en Modo Común



Supresión y control de las emisiones

La figura 8 muestra un primer nivel sencillo de supresión de las EMI en modo diferencial con un circuito LC y otro para las EMI en modo común con un choque en modo común, reduciendo el área de emisión en ambos casos. Veamos más posibilidades de suprimir y controlar las emisiones en los dos modos. En el modo común no llegaremos aquí a proponer el establecimiento de un aislamiento galvánico. Sería una solución drástica para evitar el problema de modo común.

A nivel de equipo, la principal forma de controlar las emisiones radiadas en modo diferencial es realizar un buen diseño de la TCI, con un buen plano de masa en un circuito multicapa de cómo mínimo 4 capas y una buena arquitectura de alimentación con un adecuado desacoplo. Además debemos reducir la corriente en modo diferencial, reducir la frecuencia o el contenido armónico de la corriente, reducir el área de los bucles de corriente (principalmente en las TCIs), filtrar la línea de señal radiante, reducir las oscilaciones de tensión de la señal debido a una excesiva inductancia en la línea y/o añadir un blindaje a todo el circuito radiante, si no es suficiente todo lo anterior. Las emisiones radiadas en modo diferencial son proporcionales al cuadrado de la frecuencia y por ello son más probables a frecuencias mayores de los 200-300 MHz.

La forma más común de las emisiones radiadas en modo común

emana principalmente de los cables del sistema. Las frecuencias radiadas se determinan por las corrientes en modo común, por lo general debidas a la diferencia de potencial en la masa (Vemi en la figura 2). No importa cuál sea el propósito funcional del cable, sólo importa que está conectado al equipo y que de alguna manera está referenciado a su masa. Las frecuencias radiadas en modo común no están relacionadas con las señales intencionales circulantes en el cable. La emisión en modo común puede ser modelada como una antena dipolo, o un monopolo (el cable), excitada por la tensión ruidosa de la masa (Vemi). La emisión en modo común es proporcional a la frecuencia y por ello es más probable a frecuencias menores de los 200-300 MHz.

Para reducir las emisiones en modo común debemos reducir la corriente en modo común, reducir la frecuencia o el contenido armónico de la corriente seleccionándola tecnología más lenta posible y reducir la longitud de los cables. Para reducir las corrientes en modo común podemos reducir las impedancias de transferencia de la masa o los cables y reducir así la diferencia de potencial entre puntos de masa.

Es deseable aumentar el tiempo de conmutación y reducir la frecuencia de la señal. En la práctica, la longitud del cable está dictada por la distancia entre los componentes o los equipos que están interconectados. Cuando la longitud del cable alcanza una longitud de $\lambda/4$, la emisión ya no continúa aumentando con la longitud

del cable, debido a la presencia de corrientes fuera de fase. A nivel de TCI, muchas veces, el único parámetro que podemos retocar es el área de los bucles porque los demás parámetros vienen impuestos por la tecnología de los circuitos que previamente hemos seleccionado.

Cuanto más lejos esté la conexión a masa de la TCI al chasis, más probable será que haya una gran tensión de ruido entre los dos puntos. Por tanto, el circuito de masa en el área de E/S de la TCI debe estar al mismo potencial que el recinto o caja. Para lograr esto, los dos puntos deben conectarse muy bien entre sí en esta área. Para ser eficaz, la impedancia (inductancia) de esta conexión debe ser extremadamente baja, lo que generalmente requiere múltiples conexiones en paralelo. Incluso cuando se minimiza la tensión de masa, por lo general no es suficiente para controlar la emisión radiada en modo común. Adicionalmente, se requieren técnicas de control de las emisiones en modo común adicionales como filtros y blindajes.

Se deben tener en cuenta los resultados desconcertantes que surgen cuando se aplican soluciones en modo diferencial a problemas en modo común. Muchas de las técnicas útiles en el contexto del modo diferencial resultarán totalmente ineficaces en problemas de EMI en modo común, como por ejemplo:

- La reducción del área del bucle del circuito. La señal radiante está en la señal y el supuesto camino de retorno será ineficaz. Soluciones como el uso de pares trenzados o incluso cables coaxiales serán poco eficaces en la reducción de la radiación en modo común.
- La reducción de la variación de tensión de la señal. Esto puede ayudar. Pero en otras ocasiones, será demasiado ineficaz; Por ejemplo, cuando el potencial radiante no se desarrolla en el conductor de la señal de salida, si no que está situado más profundamente en el circuito. A veces, el potencial radiante se acumula en la alimentación o en el sistema de masa a través del efectos aditivos de una serie de circuitos. Por lo tanto, la supresión aislada de cualquiera de estos circuitos no contribuirá mucho a la reducción de la radiación.
- El blindaje de todo el bucle del circuito. Surge un problema cuando se

intenta decidir dónde conectar a masa el blindaje. El potencial radiante está en la masa. Si se conecta el blindaje a masa, todo lo que se hace es añadir más antena radiante al sistema.

- El filtrado de la línea de señal. ¿A qué masa se debe conectar el filtro?. Usando la masa de la señal será totalmente ineficaz ya que el filtro simplemente flotará con el potencial radiante.

Algunas técnicas tradicionales en modo común no trabajan bien en los problemas en modo diferencial. Por ejemplo, incrementando la cantidad de desacoplo entre la alimentación y la masa no será eficaz porque las EMIs están en las líneas de señal. Reducien-


do la inductancia de la masa y con ello su impedancia no será suficiente porque éste no es el problema. Cambiando las conexiones a masa de los blindajes de los cables será inefectivo si el cable apantallado por sí mismo es insuficiente.

Conclusiones

La solución de los problemas de compatibilidad electromagnética (CEM) relacionados con las interferencias electromagnéticas (EMIs) en modo diferencial o en modo común no resulta fácil. Estos problemas pueden surgir a nivel de tarjeta de circuito impreso (TCI), a nivel de cableado

interno y externo al equipo o a nivel de la instalación de un sistema en general. Antes de aplicar soluciones se debe entender de que tipo de modo es el problema de EMI.

Los problemas de EMIs en modo común neta en un cable puede reducirse con las siguiente técnicas:

- Reducir al mínimo de la tensión en modo común de la fuente (normalmente es la tensión ruidosa de la masa);
- Proporcionar una alta impedancia en modo común con un choque en serie con los cable de E/S;
- Reducir la inductancia de los conductores o pistas, reduciendo su longitud, haciéndolos más anchos;
- Minimizar la impedancia de masa, usando de planos de masa o rejillas de masa en las TCIs;
- Derivar la corriente fuera del cable;
- Aumentar del desacoplo entre la alimentación y la masa en toda la TCI;
- Añadir blindajes usando una masa separada de la masa de la señal;
- Reubicación los cables de E/S para bajar el área y la impedancia en la estructura de masa; 

REFERENCIAS

- Elya B. Joffe, Kai-Sang Lock, "Grounds for Grounding, A Circuti-to-System handbook", IEEE Press, Wiley 2010.
- Tim Williams, Keith Armstrong, "EMC for Systems and Installations", Newnes, 2000
- Henry W. Ott, "Electromagnetic Compatibility engineering, 2009, John Wiley & Sons
- Clayton R. Paul, "Introduction to Electromagnetic Compatibility", 2nd edition, Wiley, 2006
- Francesc Daura, "Campos electromagnéticos para "ingenieros digitales", Revista española de Electrónica, Marzo 2014
- Jim Sherwin, "Understanding Common-mode Signals", EDN April 17, 2003
- Diversos catálogos y notas de aplicación de Murata