El reto de asegurar la integridad de la señal

Artículo cedido por Cemdal

CEMDAL

www.cemdal.com

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

Introducción

Cuando debemos diseñar una nueva tarjeta de circuito impreso multicapa compleja con cuatro o más capas, con frecuencias de reloj muy altas, con comunicaciones de alta velocidad, con tensiones de alimentación bajas, con alta complejidad de conexionado, con memorias de alta velocidad (DD3 por ejemplo) y con circuitos integrados con muchas patillas, se nos presenta un reto: asegurar la integridad de la señal.

Para estar al día en el mundo de la electrónica en continuo cambio, cada vez con circuitos integrados más densos operando cada vez con mayores velocidades, un ingeniero de diseño tiene que ser consciente de los continuos nuevos retos de diseño. Los efectos como las líneas de transmisión, la falta de adaptación de impedancias, la diafonía y los rebotes de masa ("ground bounce") pueden impedir que el producto funcione correctamente. Del mismo modo, estos efectos pueden crear problemas difíciles de encontrar y difíciles de resolver que pueden retardar el inicio de la producción del nuevo producto.

Los diseños digitales han sido tradicionalmente bastante más inmunes a los problemas más comunes en los sistemas analógicos. Las interferencias electromagnéticas (EMI) o el trazado de la tarjeta de circuito impreso (TCI) no han representado grandes problemas en los circuitos digitales de baja velocidad. Desde hace un tiempo, la tecnología ha cambiando y no para facilitar el proceso del diseño electrónico. La comprensión y el control de la integridad de la señal (calidad de señal) son aspectos esenciales para el diseñador para realizar su diseño tal como se espera. Hay varios aspectos importantes en la integridad de la señal a considerar: la miniaturización, la alta densidad de los encapsulados, la disminución de los anchos de pista, la disminución de la separación entre pistas, las tecnologías incompatibles cerca unas de otras, las bajas tensiones de alimentación, las altas corrientes de alimentación, los niveles lógicos bajos, los bajos márgenes de ruido, las señales digitales de alta frecuencia, las altas velocidades de los datos, los componentes rápidos con altas corrientes de conmutación, los encapsulados con muchas patillas de E/S, los efectos de las líneas de transmisión, y el número de capas y su funcionalidad en las TCIs.

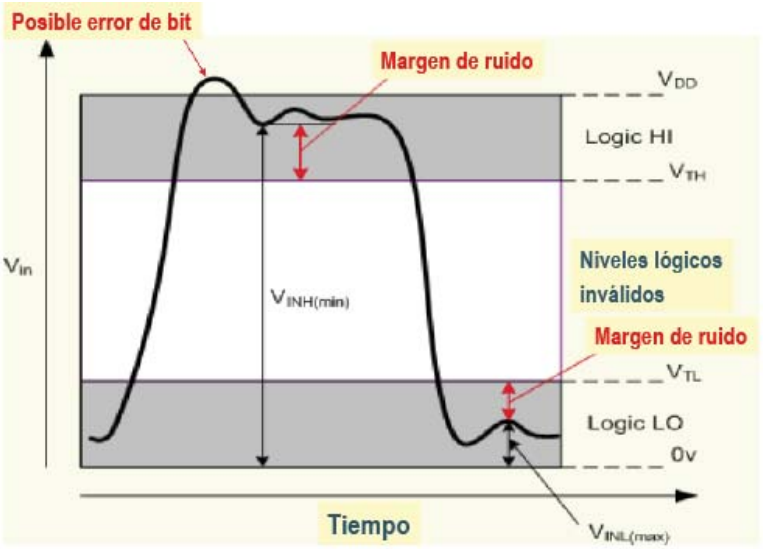


Figura 1: Le tensión de la señal debe estar en la zona de seguridad sin sobrepasar los límites del margen de ruido durante

La miniaturización de los componentes obliga a los diseñadores electrónicos a colocar uno muy cerca del otro. Simplemente no hay espacio adicional disponible en las TCIs. La alta densidad de componentes requiere disminuir el ancho de las pistas y la separación entre ellas, con lo que se propicia tener problemas de diafonía. Como el nivel de integración de sistemas se hace mayor día a día, provoca que diferentes tecnologías y funciones (como la fuente de alimentación, los circuitos digitales, los subsistemas analógicos o los módulos de RF) se deban disponer cerca de las demás. Las frecuencias de operación, los niveles de impedancia, así como los niveles de tensión y corriente varían en gran medida entre ellas y pueden interferir entre las diferentes tecnologías cercanas. Los niveles de tensión de alimentación disminuyen debido a los cambios en los procesos productivos de los semiconductores. Hoy en día, las tensiones como 5V, 3.3V, 2.8V, 2.5V, 1.8V, 1.5V son comunes en los sistemas electrónicos.

Los dispositivos de bajo tensión utilizan niveles lógicos bajos, y como resultado, los márgenes de ruido del sistema también son bajos (figura 1). En los sistemas de alto rendimiento, el consumo de energía es alto, tienen bajas tensiones de alimentación y en consecuencia circulan corrientes de alimentación muy altas.

Los dispositivos rápidos no toleran largas pistas en las TCI sin las adaptaciones de impedancia adecuadas, debido a las reflexiones en las líneas de transmisión, que pueden reducir la calidad de la señal. A bajas velocidades, la respuesta en frecuencia de la pista tiene poca influencia sobre la señal, a menos que la pista sea excesivamente larga.

Conforme aumenta la velocidad, el número de efectos de alta velocidad es más y más importante. La inductancia de las pistas conectadas a los circuitos integrados (CIs) con encapsulados con muchas patillas de E/S puede introducir nuevos retos como los efectos del rebote de masa ("ground bounce").

Problemas debidos a la alta velocidad

Los problemas y efectos comunes a los que se enfrenta el diseñador durante el diseño de alta velocidad digital y sus pruebas son típicamente:

- Efectos de línea de transmisión
- Desadaptación de impedancia
- Diafonía
- Rebotes de masa ("ground bounce")
- Atenuación de la señal

Estos efectos pueden obstaculizar seriamente la integridad, la calidad y la respuesta de la señal. Sólo se puede superar estos problemas primero entendiendo la base de sus síntomas, en segundo lugar estudiando cuidadosamente el diseño a realizar para identificar las áreas más problemáticas y en tercer lugar siguiendo unas buenas técnicas de diseño. Descuidar estos efectos y simplemente cerrar los ojos durante la fase de diseño no ayudará a evitar y resolver los problemas de integridad, propiciando retardos en el desarrollo y en la llegada del producto al mercado.

Localizar el origen de los problemas que puedan existir en el prototipo, por no mencionar su solución puede ser difícil. Soldar hilos o unos componentes al aire en una TCI problemática no suele solucionar prácticamente nada, sino que simplemente puede crear todavía más problemas. En los diseños de alta velocidad, el conocimiento y la previsión son los factores clave para evitar que estos problemas aparezcan.

El modelo de circuito en alterna

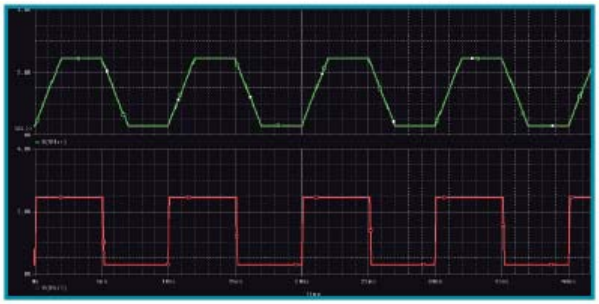
La fuente de señal y la carga se conectan entre sí por medio de un medio conductor. Estas conexiones son hilos, cables y pistas de TCI. A bajas frecuencias, una pista de circuito impreso puede ser considerada ideal desde el punto de vista de la transmisión de señales. La resistencia, inductancia y capacidad de la pista física pueden ignorarse, porque no afectan a la señal en absoluto.

Cuando aumenta la frecuencia de la señal, el modelo de circuito en alterna comienza a dominar. Las limitaciones físicas, resistencia, inductancia y capacidad entran en juego, y devienen importantes en la pista. La inductancia serie del conductor debe ser la mayor preocupación del diseñador para garantizar la calidad de la señal en los sistemas digitales. La inductancia serie limita la velocidad de subida de la señal y genera picos de tensión ("glitches") debido a los cambios bruscos de corriente (Ley de Lenz: dV= -Ldi/dt). Del mismo modo, las capacidades parásitas (en la entrada de la carga, entre la pista y la masa y entre las pistas afectan también al comportamiento de la TCI. Como resultado, a altas frecuencias, la impedancia de la pista no es constante, sino que se vuelve dependiente de la frecuencia.

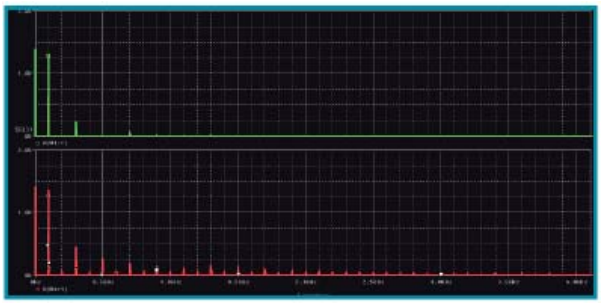
A frecuencias más altas, la inductancia y la capacidad de la pista tienden a atenuar la señal. Cuando la velocidad de la señal se incrementa, las pérdidas dieléctricas del sustrato de la TCI se incrementan. El tradicional material FR-4 tiene un buen comportamiento con señales de hasta 2-3 GHz, pero no es la mejor solución para aplicaciones de más alta frecuencia. Algunos sustratos para alta frecuencia son: PTFE, Rogers 4350, Getek, Arlon, Nelco, epoxy y teflón.

Los dominios del tiempo y la frecuencia

Hoy en día, la mayoría de los diseños de sistemas electrónicos principalmente son digitales. Las señales analógicas se convierten normalmente al mundo digital tan pronto como es posible porque así es más fácil procesarlas. El ancho de banda de una señal digital depende de la forma de la señal, tiempos de subida y bajada, los métodos de modulación, etc. Sin embargo, el ancho de banda de la señal se propaga a través de un amplio espectro que excede la frecuencia de su banda base (frecuencia fundamental) debido a los flancos verticales de la señal digital. La figura 2 muestra dos señales de reloj y sus espectros de frecuencia. Las frecuencias de las señales son iguales (100 MHz), pero los tiempos de subida son diferentes (2 ns y 100 ps). Cuando los tiempos de conmutación de las señales son más rápidos, el espectro de frecuencia de sus armónicos se extiende a mayores frecuencias (señal y espectro rojos en la figura). Cuanto más alta es la frecuencia, más probable es tener problemas de integridad y compatibilidad electromagnética.



Señales de reloj de 100 MHz con 2 ns y 100 ps de tiempos de conmutación



Espectro de frecuencia de las señales de reloj de 100 MHz. La señal de 2 ps tiene armónicos de mayor frecuencia.

Figura 2: espectro frecuencial de señales de reloj con distintos tiempos de conmutación.

Efectos de línea de transmisión

Conforme aumenta la velocidad de la señal, se deben considerar los efectos de línea de transmisión en la pista. Estos efectos entran en juego cuando la longitud de la pista de circuito impreso (o cualquier otro cable o conductor que lleve la señal) es tan larga que el retardo de la señal hacia atrás y hacia adelante por la pista es mayor que el tiempo de conmutación de la señal.

Las diferencias entre la impedancia característica de la pista y la impedancia de salida del conductor o la impedancia de entrada de la carga crean reflexiones de la señal. Estas reflexiones, a su vez distorsionan la forma de onda de la señal (figura 2). Las reflexiones reducen los márgenes de ruido del sistema y pueden causar fallos no deseados en las señales. Los efectos de líneas de transmisión dependen del tiempo de conmutación de la y no de la frecuencia de la señal. La figura 3 muestra gráficamente la diferencia entre las oscilaciones y las reflexiones. Nótese el alisamiento de la señal entre cada transición; lo cual es característico de las reflexiones.

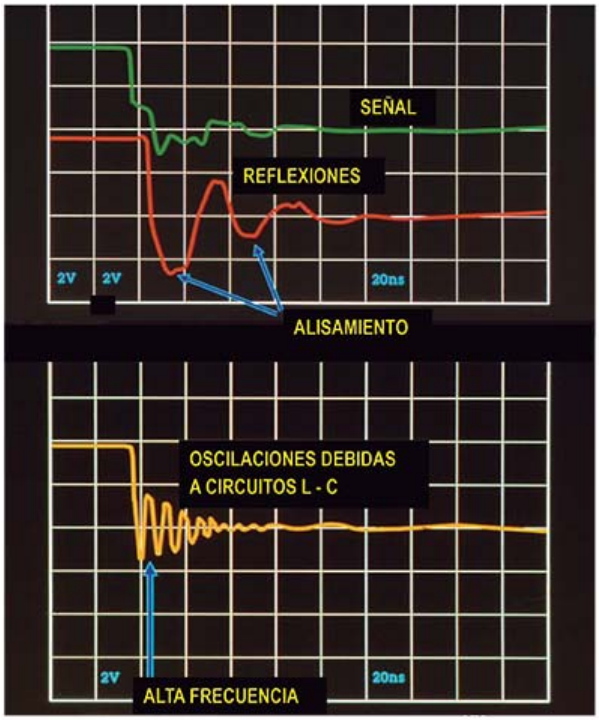


Figura 3: Diferenciación gráfica entre reflexiones y oscilaciones L-C en una pista de circuito impreso

Esta parte lisa o llana puede dar una idea del retardo de propagación de la línea de transmisión. Las oscilaciones se muestran mayormente como el comportamiento típico de un circuito estándar L-C con una mayor frecuencia. Se puede optar por utilizar un solo dispositivo rápido (con señales de flancos rápidos) en un sistema de baja velocidad. En este caso, los efectos de líneas de transmisión pueden dar problemas inesperados. Los efectos de línea de transmisión deben tenerse en cuenta en todos los sistemas que contienen señales rápidas, sin importar la frecuencia de la señal de reloj.

La figura 4 muestra señales de reloj (verdes arriba y abajo) que tienen frecuencias idénticas, pero diferentes tiempos de conmutación. Notar que la señal con tiempos lentos de conmutación resulta en señales de buena calidad en la carga (roja superior), pero los tiempos rápidos de subida generan una gran distorsión en la carga (roja inferior). El material dieléctrico de la TCI afecta al retardo de propagación de la señal. Cuanto mayor es la constante dieléctrica del sustrato, el retardo de propagación es más alto. Como regla general, el retardo de propagación TPD de una pista con un dieléctrico FR-4 típico de una TCI es de aproximadamente 5,5 ns/m. La longitud de una pista de TCI en la que se deben considerar los efectos de línea de transmisión (oscilaciones y sobre-impulsos) depende del retardo de propagación y del tiempo de subida del flanco. La longitud máxima de una línea de transmisión, sin necesitar adaptación de impedancia es Lmax=tr/4tpd, donde Lmáx es la longitud máxima de la pista, tr es el tiempo de subida de la señal y tPD es el retardo de propagación de la señal. Por ejemplo, si el tiempo de subida/bajada de la señal (tr) es de 2 ns, y el retardo de propagación de la señal es de 5,5 ns/m, la longitud máxima de una pista trazada sin terminaciones es de 90 mm. Si hay múltiples cargas conectadas a la pista, la capacidad de estas cargas aumentan aún más el retardo de propagación. Por lo tanto, como un resultado, una pista muy cargada requiere adaptación de impedancias, incluso con pistas más cortas que una pista ligeramente cargada.

Impedancia característica adaptación de impedancia

Cada conductor tiene una impedancia característica, que depende de sus limitaciones físicas. La impedancia característica ZO se refiere a la línea de transmisión equivalente si el conductor fuese infinitamente largo. Un conductor uniforme adaptado con su impedancia característica no tiene ondas estacionarias (reflexiones). Por lo tanto, tiene una relación constante de tensión a corriente a una frecuencia dada, en cada punto del conductor. La impedancia característica de cada tipo de conductor depende de su construcción: las dimensiones, la forma de la ruta de retorno de la señal, las propiedades dieléctricas, etc. Los circuitos impresos normalmente contienen pistas tipo microstrip y stripline (figura 5). Al igual que con todos los tipos de conductores, la impedancia característica de estas pistas dependen de las dimensiones de la pista y de la construcción del circuito impreso. Típicamente, la impedancia de una pista "microstrip" está en un intervalo de 50 a 150 Ω, y la de una "stripline" en una gama de 30 a 80 Ω, debido a la mayor proximidad al plano de masa. Se necesita la conexión de una fuente de señal (generador) a una carga para que la transferencia de la señal tenga lugar.

Si las impedancias de la fuente y de la carga son distintas inevitablemente habrán en reflexiones y pérdidas de señal. Ajustando las impedancias (adaptación de impedancias) de las distintas partes del sistema, el diseñador puede minimizar estas reflexiones y garantizar la calidad de la señal adecuadamente. Por ejemplo, un sistema de distribución de vídeo requiere el uso de conexiones de 50 o 75 Ω con el fin de conectar varios sistemas juntos.

Con el vídeo, las reflexiones debido a la desadaptación de impedancias puede causar ruido y efecto de doble imagen en el monitor. En los sistemas digitales, las desadaptaciones de impedancia pueden dar como resultado una señal distorsionada de reloj, interrupciones espureas, o incluso datos erróneos leídos desde un dispositivo periférico. Esto puede provocar un mal funcionamiento grave del sistema. En los sistemas digitales, se utili-

Figura 4: La señal en la carga es más distorsionada (roja abajo) si el tiempo de subida es menor aunque las frecuencias de las dos señales sea la misma (señales verdes)

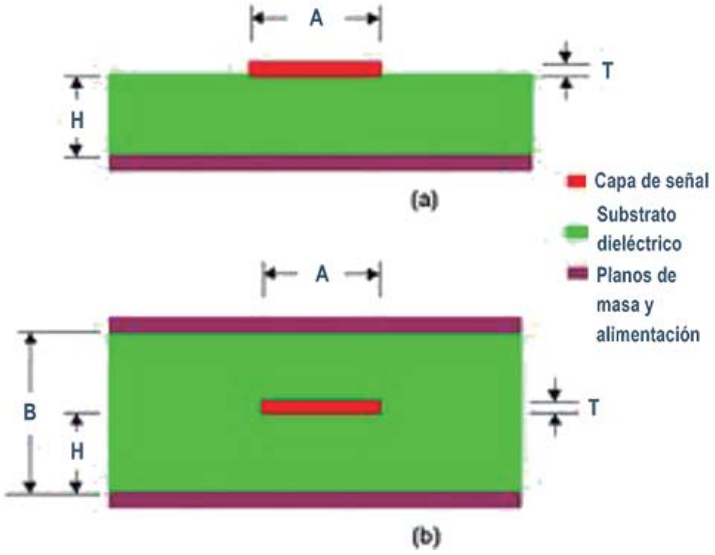


Figura 5: a) pista microstrip y b) pista stripline

zan diversos métodos de adaptación de impedancias para la adaptación de impedancia (figura 6).

Diafonía

La diafonía es un problema en las TCIs con CIs con encapsulados con muchas patillas. Los dispositivos empotrados contienen sistemas de señales mixtas, todo en un área pequeña de una TCI. Algunos sistemas contienen sistemas analógicos sensibles como amplificadores y convertidores A/D, y otros pueden contener electrónica de potencia (control de motor DC o AC, drivers de solenoides o similares). Los mecanismos típicos de interferencia en sistemas empotrados son: acoplamiento de la fuente de alimentación (por impedancia común), diafonía capacitiva y diafonía inductiva.

Varias partes del diseño comparten las fuentes de alimentación, por lo que, la parte digital del diseño pueden interferir la parte analógica o viceversa. Las transiciones rápidas de tensiones tienden a acoplarse a otras partes de la circuitería a través de la capacidad mutua entre los circuitos. En algunos sistemas, las corrientes de retorno pueden compartir la misma trayectoria, que se traduce en diafonía debido a la impedancia mutua: los cambios en la corriente que fluye a través de la impedancia son acopladas al otro subsistema

Los diseños de alta densidad tienen componentes y pistas muy cercanas. Como cada parte o pista está conectado realmente otros circuitos alrededor, con capacidad parásita, es propensa a la diafonía a través de la capacidad. Las señales de alta velocidad con flancos muy rápidos trazadas cerca de un circuito de alta impedancia (por ejemplo, un circuito CMOS o analógico) son ejemplo de sistemas susceptibles a la diafonía capacitiva. Las señales que se circulan en pistas de la TCI estrechamente adyacentes pueden perturbar las señales que circulan por otras pistas si la longitud de pistas paralelas es lo suficientemente larga, provocando picos te tensión o "glitches" (figura 7). En los sistemas digitales de alta velocidad, las inductancias de los cables o pistas desempeñan un papel importante. Las corrientes de retorno retornan a masa a través de una impedancia distinta de cero. La impedancia existe debido principalmente a los efectos resistivos e inductivos de las pistas de la TCI. La inductancia de la pista genera diferencias de tensión entre varios puntos de la masa de la TCI. Desde el punto de vista de la alta frecuencia del potencial de masa de referencia no es homogéneo y no tiene el mismo potencial en toda su superficie. Diferencias de tensión generados por las señales de alta frecuencia causan fácilmente problemas de integridad de la señal. Con demasiada frecuencia, los síntomas de un diseño inadecuado pueden ser detectados durante las mediciones de compatibilidad electromagnética como altas emisiones o un nivel de inmunidad deficiente.

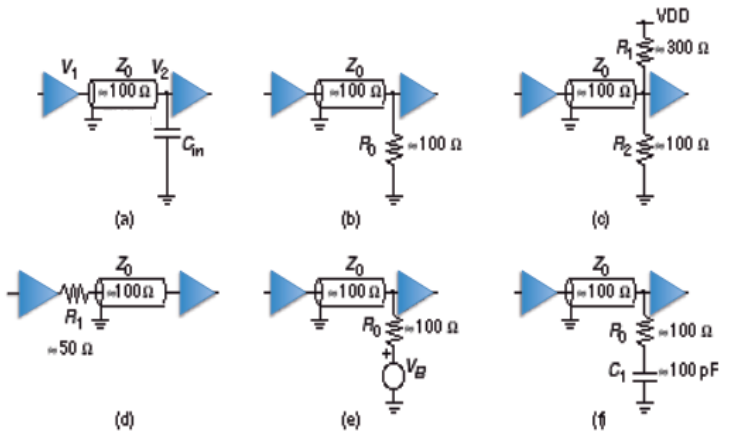


Figura 6: Métodos de adaptación de impedancias. (a) circuito abierto o capacitiva adaptación (b) adaptación resistiva en paralelo (c) Adaptación Thévenin (d) Adaptación en serie en la fuente (e) Adaptación en paralelo usando una tensión de polarización (f) Adaptación en paralelo con un condensador en serie.

El rebote de masa y las conmutaciones simultaneas

Cuando los dispositivos digitales son más rápidos, los tiempos de conmutación disminuyen. Para conmutar rápido, las salidas de los dispositivos deben cargar o descargar las capacidades de carga con altas corrientes. Como las pistas, las conexiones internas en los encapsulados de los CIs (pequeños hilos unidos a las patillas del chip real) no son conductores ideales y su inductancia no es siempre pequeña.

Las altas corrientes de conmutación generan diferencias de tensión en estas inductancias de las patillas de alimentación y masa del CI (Ley de

Figura 7: La diafonía entre pistas puede provocar "glitches" no deseados

Lenz). Este fenómeno se conoce como rebote de masa ("ground bounce") y puede afectar a la TCI completa. El rebote de masa es debido a múltiples factores y no hay métodos estándar para la predicción de los problemas que genera.

Hoy en día, los diseños contienen dispositivos integrados de gran escala de integración y dispositivos lógicos programables que pueden tener encapsulados con muchas patillas. Basta pensar, por ejemplo, en un dispositivo FPGA con 1020 patillas en un encapsulado FBGA. Cuando varias salidas conmutan simultáneamente, inducen una caída de tensión en la distribución de alimentación del dispositivo. Al mismo tiempo, la corriente de conmutación aumenta momentáneamente la tensión de masa interna del dispositivo en relación a la masa del sistema.

Cuanto mayor es la inductancia de las conexiones de masa del dispositivo, mayor es la tensión del rebote de masa. Controlar el rebote de masa depende en gran medida del diseño de la TCI, ya que no queda mucho más por hacer a nivel de la arquitectura del diseño. Las altas corrientes transitorias debido a la conmutación simultánea de los CIs digitales pueden generar excesiva cantidad de ruido de masa (figura 8). Los altos niveles de ruido de masa hacen que el sistema sea propenso al aumento de las emisiones (EMI). Además de esto, el sistema puede sufrir falta de fiabilidad y fallos funcionales.

Trazado de las pistas de señal

Para evitar problemas de funcionamiento es esencial realizar el trazado cuidadosamente de la TCI cuando se tiene CIs alta velocidad. Los efectos de línea de transmisión establecen los límites de la longitud de una pista de TCI sin adaptación de impedancias.

Las reflexiones de señal en las pistas largas pueden arruinar la integridad de la señal y provocar muchos fallos funcionales. Un grupo de señales rápidas a menudo tienen que llegar a la carga dentro de un intervalo de tiempo muy estrecho, para procesar la información en paralelo correctamente. La variación de la longitud de las pistas provoca variaciones de tiempo que pueden ser difíciles de corregir. El retardo de propagación de una pista depende de su trazado y de la carga conectada a la pista.

Así las señales conectadas a las pistas cortas llegan mucho antes de las señales conectadas a las pistas largas. La diferencia a menudo se establece por el tiempo de la señal de reloj en comparación con las demás señales. Hay otras consideraciones a tener en cuenta además de las longitudes de las pistas. La impedancia de la pista depende de las limitaciones físicas de la pista (anchura y espesor), así como de la construcción de la TCI (dimensiones, material dieléctrico, número y asignación de capas, etc.). La impedancia de la pista está relacionada también con la adaptación de impedancias y sus los requisitos. Debe diseñarse cuidadosamente la distribución de la señal de reloj para reducir al mínimo los retardos y el "jitter", y para garantizar que la señal de reloj pueda ser utilizada con seguridad en las diferentes partes de la placa de la TCI. Puede haber otras señales de control, además de las señales de reloj que requieran especial cuidado en su trazado. El pequeño espaciado entre pistas permite una alta densidad de trazado en la TCI, pero al disponer múltiples pistas en paralelo puede provocar interferencias entre las señales debido a una diafonía capacitiva excesiva. Del mismo modo, el uso de pistas estrechas para aumentar el espacio de trazado disponible en la TCI aumenta la inductancia de la pista y puede hacer que la señal tenga peores problemas de integridad.

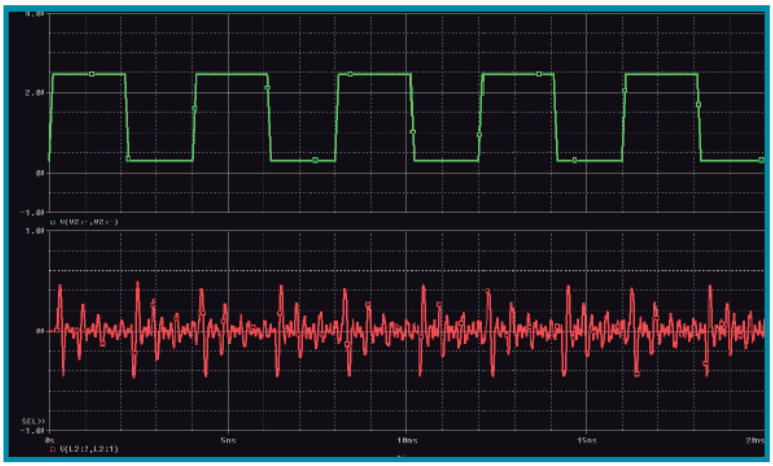


Figura 8: Rebote de masa ("ground bounce"): Ruido de masa debido a la inductancia serie en las conexiones de masa de los circuitos integrados

Asignación de capas y selección del sustrato

La construcción de la tarjeta de circuito impreso deseada depende de los encapsulados de los componentes utilizados en el diseño, de la requerida densidad de pistas de señal, de los requisitos de adaptación de impedancias, de la asignación funcional y número de capas, etc. Las TCIs tradicionales de dos capas usan pistas de alimentación y masa (no planos).

Este tipo de TCI no debe utilizarse con circuitos de alta velocidad, porque proporcionar un nivel de referencia sólido (masa) para estas señales es imposible. Para las TCIs de alta velocidad, es obligatorio usar cuatro o más capas con planos de masa y alimentación. Los planos sólidos de cobre permiten al diseñador mantener cortas las conexiones de masa y alimentación de los componentes. Además, el plano de masa ofrece conexiones de masa de baja inductancia para las señales de alta velocidad. Conviene disponer el plano de masa y el plano de positivo muy juntos en el interior de la TCI para obtener la menor impedancia característica.

Hoy en día, el material laminado FR-4 se utiliza ampliamente en las TCIs, siendo una solución económica para la mayoría de los diseños digitales, siempre y cuando las frecuencias puedan mantenerse por debajo de un rango de 2,5 a 3 GHz. A altas velocidades, la señal digital puede verse afectada por los parámetros del sustrato de la TCI. Los sustratos para alta velocidad tienen mejores propiedades que el FR-4 en las frecuencias más altas.

El uso de materiales adecuados puede ayudar a los diseñadores a llegar a su objetivo de diseño más sencillo y más fiable que con el material FR-4. Una señal que viaja a través de la TCI tiene una velocidad que depende de la constante dieléctrica relativa de la TCI. Por ejemplo, cuando la frecuencia de la señal va más allá de 5 GHz, la constante dieléctrica típica de FR-4 (ronda 4.7) cae cerca de 4. Sin embargo, la constante dieléctrica relativa del material Rogers 4350 es constante (aproximadamente 3,5) de 0 hasta 15 GHz. Si la constante dieléctrica de la TCI cambia en función de la frecuencia, las diferentes componentes de frecuencia de la señal (armónicos) tendrán diferentes velocidades.

Esto significa, que estas componentes llegan a la carga en diferentes momentos. Como resultado, esto es la causa de la distorsión de la señal digital. En segundo lugar, las pérdidas de señal debido al material de la TCI aumentan con la frecuencia. Una vez más, cada armónico de la señal digital será atenuado de acuerdo con su frecuencia. El aumento de las pérdidas de las componentes de la señal se sumará a la distorsión de la señal digital.

Conclusiones

Los problemas de integridad de señal ganan importancia día a día debido al aumento de las velocidades y densidades de los CIs. Tras seguir unas buenas reglas de diseño, el uso de herramientas apropiadas ayudan al diseñador de sistemas digitales de alta velocidad y garantiza buenos resultados de alta calidad. Estos son los principios básicos a seguir para evitar problemas de integridad de la señal:

1. La clave para un diseño eficiente de sistemas de alta velocidad es usar herramientas de análisis que permitan predecir su comportamiento preciso para validar el proceso de diseño y la reducción del riesgo.
2. La única manera de separar el mito de la realidad es usar números utilizando reglas generales, aproximaciones, herramientas de simulación o mediciones.
3. Cada interconexión es una línea de transmisión con una señal y un camino de retomo, independientemente de su longitud, forma o tiempo de conmutación de la señal. Una señal ve una impedancia instantánea en cada paso a lo largo de su camino en la interconexión. La calidad de la señal mejora dramáticamente si la impedancia instantánea es constante, como en una línea de transmisión con una sección transversal uniforme.
4. Olvidar por un momento la palabra "masa". Se crean más problemas que solventa si se usa esta palabra. Es mejor tener presente que cada señal tiene un camino de retomo. Pensar solo en el "camino de retorno" y trázalo con tanto cuidado como las pistas de señal.
5. La corriente fluye a través de un condensador siempre que cambia la tensión en sus extremos. En una conmutación rápida, incluso el espacio de aire entre el borde de una TCI y un cable colgante puede tener una baja impedancia a través de una capacidad parásita. Esto provoca un acoplamiento capacitivo indeseado.
6. La inductancia está fundamentalmente relacionada con el número de anillos de líneas de campo magnético alrededor de una corriente circulando en un conductor.

Si el número de anillos de líneas de campo cambia por el cambio de la corriente, se creará una tensión en el conductor (Ley de Lenz). Cuanto más brusco sea el cambio, mayor tensión se creará. Este es el origen del ruido de reflexión, los problemas de diafonía, el ruido de conmutación, los rebotes de masa, el ruido de alimentación y las interferencias electromagnéticas.

7. El rebote de masa es la tensión creada en el conductor de retorno a masa debido al cambio de las corrientes a través de la inductancia total del camino de retorno a masa. Es la causa principal del ruido de conmutación y EMI.
8. El ancho de banda de una señal es igual a la componente de frecuencia significativa (armónico) más alta de la señal.
9. No olvidar nunca, con pocas excepciones, que cada fórmula utilizada en la integridad de la señal es o bien una definición o una aproximación. Si la precisión es importante, no utilizar la aproximación.
10. El problema causado por las líneas de transmisión con pérdidas es la degradación del tiempo de subida. Las pérdidas aumentan con la frecuencia debido a la profundidad del efecto pelicular y las pérdidas dieléctricas.

Si las pérdidas fueran constantes con la frecuencia, el tiempo de subida no cambiaría y las pistas con pérdidas serían sólo un pequeño inconveniente.

REFERENCIAS

- *Eric Bogatin, "Signal and Power Integrity: Simplified" (Prentice Hall Modern Semiconductor Design) (2009)*
- *Vishram S. Pandit, Woong Hwan Ryu y Myoung Joon Choi, "Power Integrity for I/O Interfaces: With Signal Integrity/Power Integrity Co-Design" (Prentice Hall Modern Semiconductor Design) (2010)*
- *Signal Integrity Characterization Techniques, Tektronix*
- *Fundamentals of Signal Integrity, Tektronix*
- *Andreas Cangellaris, Jose Schutt-Aine, Umberto Ravaioli, Alina Deutsch, "Interactive Tutorial on Fundamentals of Signal Integrity for High-Speed/High-Density Design", ECE Department, University of Illinois at Urbana-Champaign (2001)*
- *Howard Johnson, Martin Graham "High Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic", Prentice Hall (1993)*
- *Stephen H. Hall, Howard L. Heck, "High-Speed Digital Designs", IEEE Wiley & Sons (2009)*