



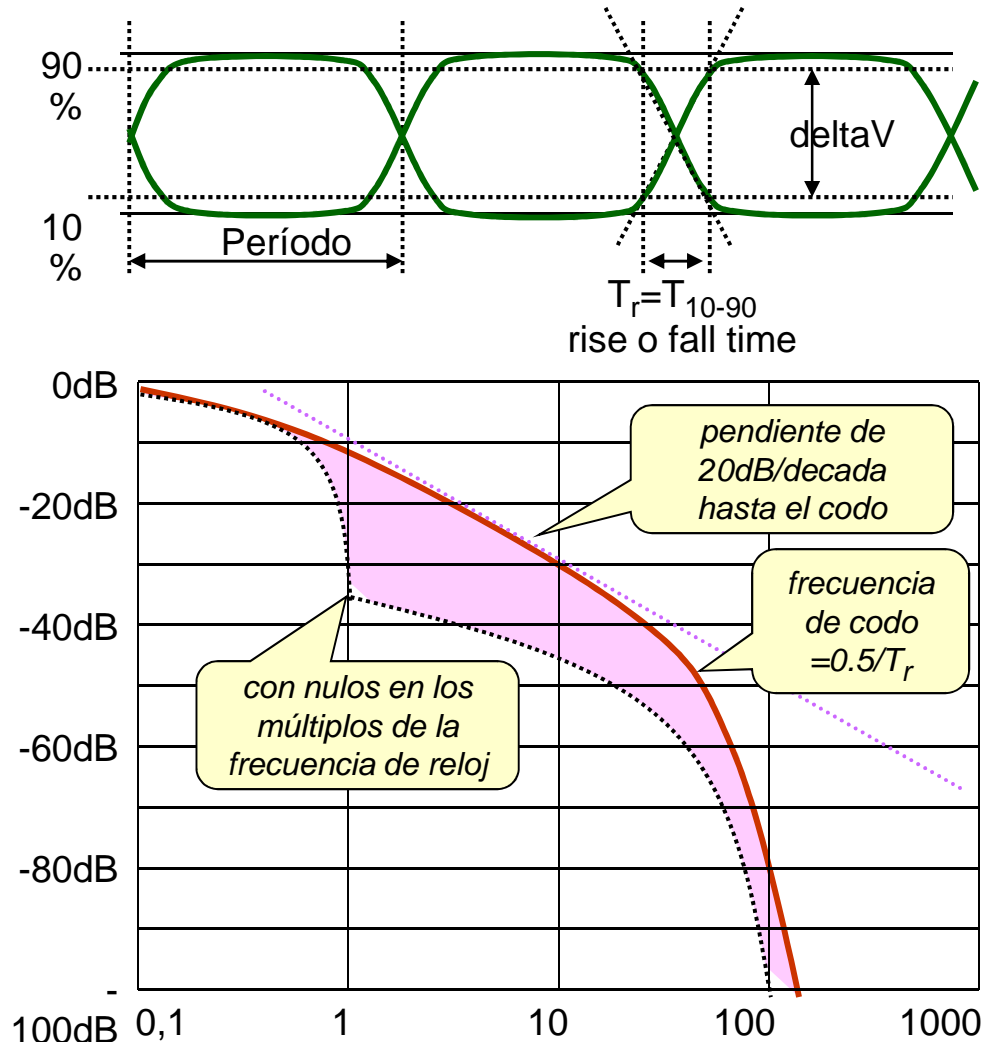
Módulo 9: Propagación de señales digitales

Contenidos del módulo 9

- Componentes espectrales de las señales digitales: influencia del rise-time y del fall-time
- Qué es una línea de transmisión. impedancia característica, atenuación, retardo de propagación, reflexiones y desadaptación.
- Propagación de señales en un PCB: su análisis como propagación de ondas electromagnéticas en una línea de transmisión.
- Realización física de líneas de transmisión en un PCB: *stripline* y *microstrip*

Integridad de la señal en las interfases: espectro

- ❑ Toda señal digital es de hecho una analógica con características típicas
 - ❑ Una es la frecuencia de reloj ($f_{clk}=1/\text{Período}$) que define el máximo régimen de cambio
 - ❑ Otra es el tiempo que tarda la señal en pasar de un nivel lógico al opuesto (*rise time* T_r y *fall time* T_f)
 - ❑ Y la tercera es la amplitud de dicho cambio ΔV
- ❑ En una señal digital aleatoria el espectro presenta máximos en $(f_{clk}/2) \times (2N+1)$ y nulos en $f_{clk} \times N$, para $N=0,1,2,\dots$
- ❑ En aplicaciones donde se requiere reducir la EMI es posible hacer un “*dithering*” de f_{clk} de modo de espaciar el espectro y reducir los máximos

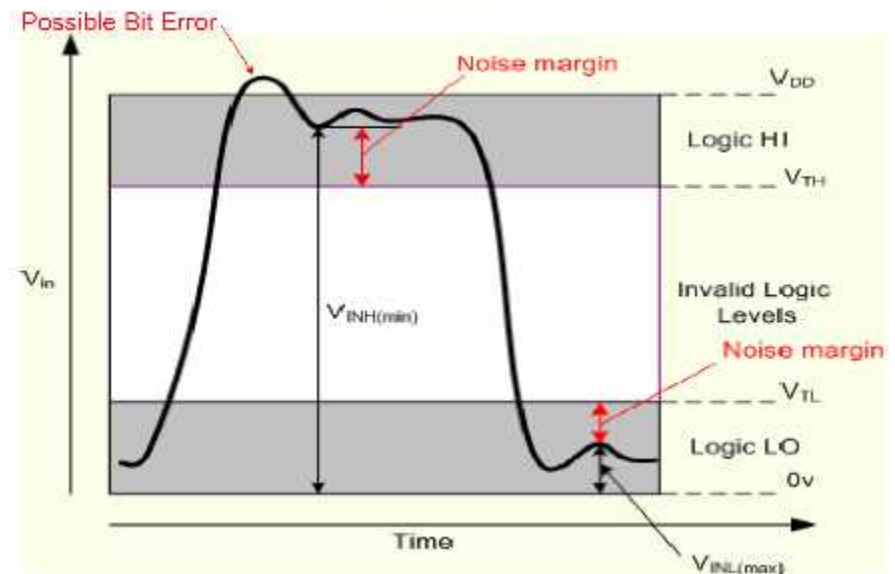
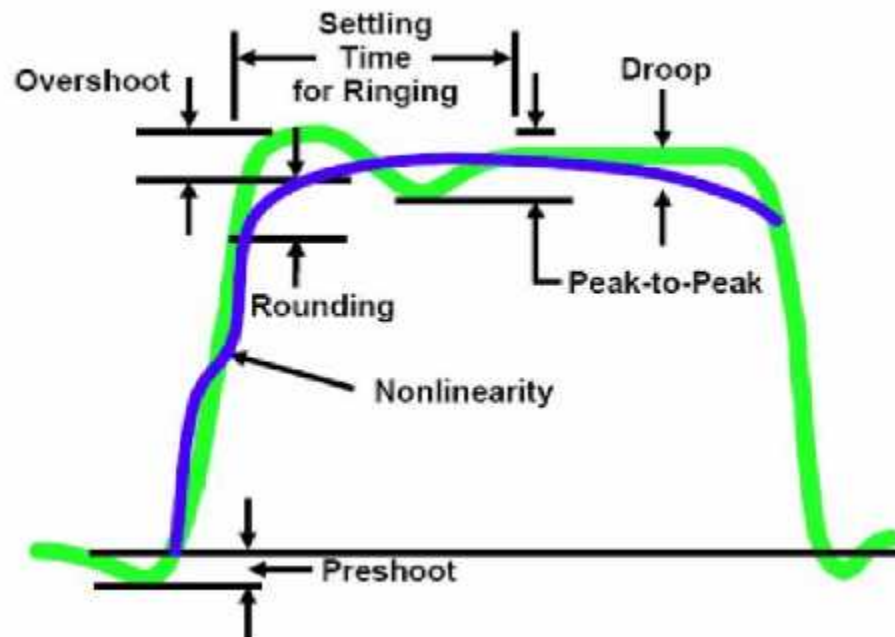


Basic Principles of Signal Integrity. ALTERA White paper. February 2004, v.1.1.

Parámetros analógicos de las señales digitales

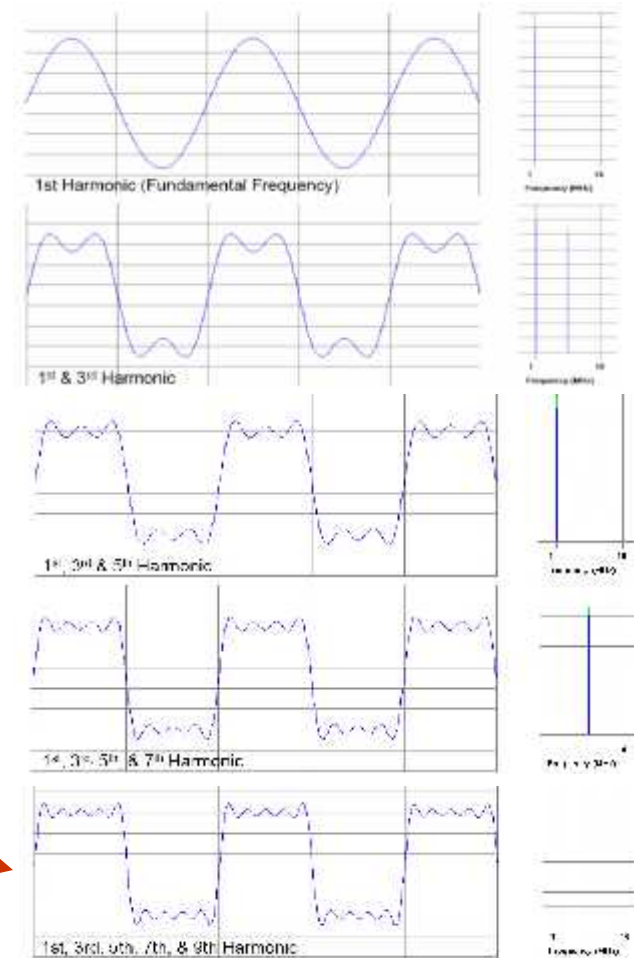
Los elementos definitorios son de tipo eléctrico y temporal

- Los de tipo eléctrico definen la correcta polarización de los componentes activos
- Los de tipo temporal determinan la operación entre fronteras entre valores lógicos, la respuesta en frecuencia y el ancho de banda



Parámetros analógicos de las señales digitales

- El tiempo de conmutación (risetime / falltime) crece a medida que se considera el efecto de sucesivas armónicas de una señal ideal
- Más allá de la 9a armónica, las ventajas son mínimas
- Por ello las líneas deben tener una frecuencia de corte de alrededor de 10 veces la fundamental ($\text{DataRate}/2$)
- Ello se debe a que el tiempo de conmutación es crítico en la detección de transiciones y valores lógicos, y por tanto en la tasa de errores
- En general, debe usarse
 - $\text{Bandwidth} \sim 0.35 / \text{Risetime}_{\text{typ}}$



Integridad de la señal: velocidad de propagación

- ❑ La forma de propagación de una señal por un conductor depende fuertemente de características geométricas y eléctricas del conductor y su entorno.
- ❑ La velocidad de propagación (respecto a la velocidad de la luz), decrece proporcionalmente a la raíz cuadrada de la constante dieléctrica y en los PCB también de la geometría del circuito, porque el campo eléctrico está parcialmente en el aire.
- ❑ En el caso de los cables coaxiales suelen usarse separadores helicoidales o en espuma de modo de bajar esa constante a valores entre 1.8 y 2.3
- ❑ En el caso de los circuitos impresos en FR4, una pista externa “ve” una constante de 2.8 a 4.5, en tanto una interna (Ej: en un *multilayer*) ve los 4.5. Y si el soporte es alúmina, una pista interna puede llegar a ver una constante dieléctrica de 8 a 10.

Medio	r	Vel ($\times 10^8 \text{m/s}$)
Aire	1	3.0
Coaxil 1	1.8	2.25
Coaxil2	2.3	1.97
FR4, externa	2.8-4.5	1.82-1.42
FR4, interna	4.5	1.42
Alumina, interna	8-10	1.06-0.94

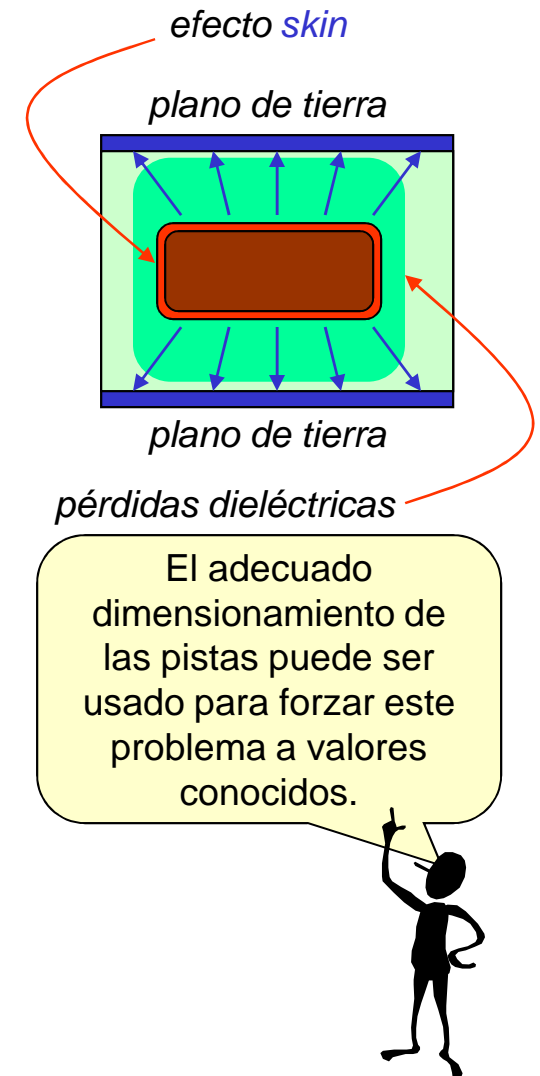
Notar que en un PCB típico doble faz (pistas externas en FR4) es razonable estimar una velocidad de $1.6 \times 10^8 \text{m/s}$, lo que significa 63 picosegundos de retardo por cada centímetro de pista!!! Y de usar alúmina casi se duplica!!!

Atenuación selectiva en señales de alta velocidad

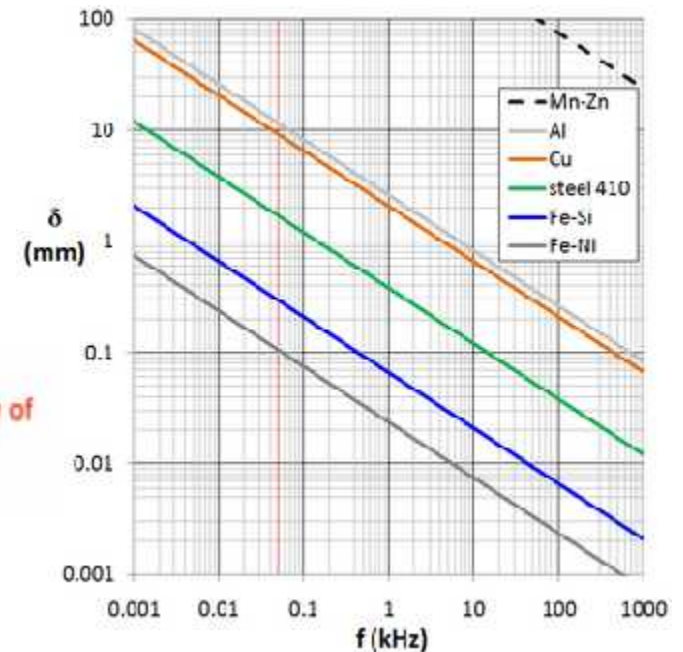
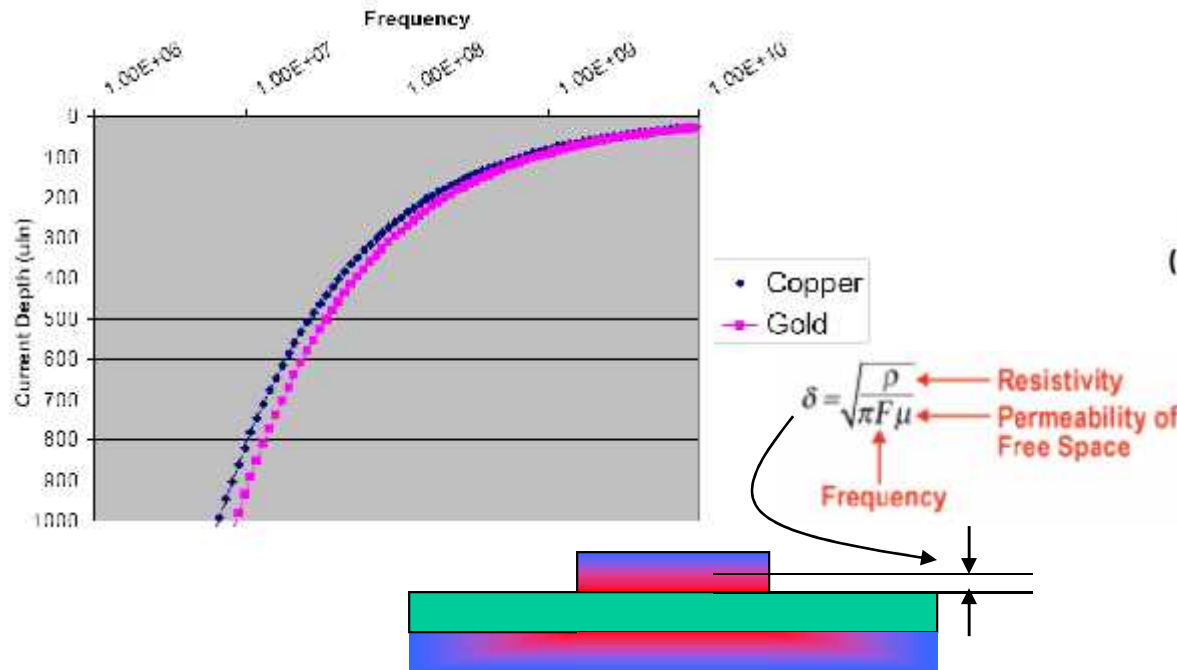
Las pérdidas en las líneas de transmisión dificultan la correcta recepción de datos. Estas pérdidas se deben fundamentalmente a dos efectos:

- ❑ **Absorción dieléctrica:** los campos de alta frecuencia agitan las moléculas del dieléctrico, que absorben energía, reduciendo entonces la energía de la señal.
- ❑ **Efecto pelicular (*Skin effect*):** por auto-inductancia, las corrientes circulantes tienden a concentrarse en la superficie, y dado que los electrones circulan por una sección menor la resistencia efectiva aumenta.

Estos efectos generan mayor atenuación a las componentes de alta frecuencia. Todas estas razones producen una atenuación selectiva con la frecuencia y además *con retardo de grupo variable*



Efecto pelicular (Skin effect)



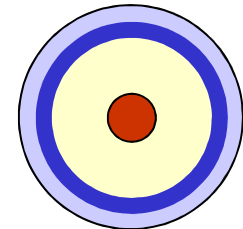
- El espesor efectivo del efecto skin se define como aquella profundidad a la que la densidad de corriente ha disminuído a $1/e$ de la densidad de corriente de superficie ($1/e = 0,37$)
- El efecto Skin incrementa la resistencia efectiva de los conductores en las frecuencias más altas, y por tanto la atenuación a esas frecuencias

Líneas de parámetros concentrados o distribuidos

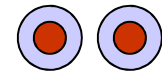
- ❑ La respuesta eléctrica de un conductor a una señal depende del tiempo de propagación de la señal y de las características temporales de la señal
- ❑ El “***largo efectivo***” de una característica temporal de una señal es la distancia que la señal recorre por el conductor en ese tiempo. Por ejemplo, dada una señal con un rise-time $T_r=0.1\text{ns}$ en una pista externa de un conductor en un PCB hecho en FR4, el “***largo efectivo del rise-time***” será 1.6cms ($1.6 \times 10^{10}\text{cm/seg} \times 10^{-10}\text{seg}$).
 - ❑ Si la longitud geométrica de una pista es bastante menor (de 1/3 a 1/6 según quien opine) que el “largo efectivo” de un evento temporal, se comportará como si sus parámetros estuvieran concentrados, y puede modelarse mediante componentes aislados (R, L y C)
 - ❑ Pero si la longitud geométrica de una pista es mayor, se comportará como si sus parámetros estuvieran distribuidos a lo largo del conductor, conformando una ***línea de transmisión***
- ❑ El comportamiento de una línea de transmisión difiere mucho del de una línea de parámetros concentrados, porque el tiempo de propagación de una señal es notable en relación a ella, y también depende de la inductancia distribuida de esa línea.

Líneas de transmisión: algunos tipos usuales

- ❑ Dado un conductor con una dada inductancia por unidad de longitud (distribuida, $L_D = nH/m$) y una dada capacidad por unidad de longitud (también distribuida, $C_D = pF/m$)
 - ❑ El tiempo de propagación de la señal es de $4 \times 10^{11} \times (L_D \times C_D)^{1/2}$, medido en pseg/cm
 - ❑ La impedancia característica de la línea de transmisión, que relaciona voltaje y corriente, es $Z_0 = (L_D / C_D)^{1/2}$
- ❑ En un cable coaxil, donde un conductor cilíndrico central transporta una señal desbalanceada respecto a un conductor cilíndrico externo, son usuales valores de Z_0 de 50 ohms (RG58) o 75 ohms (RG59)
- ❑ Un cable balanceado lleva señales de polaridad opuesta respecto a tierra y es usual $Z_0 > 100$ ohms (uno de antena de TV tiene 300 ohms)



Cable coaxil

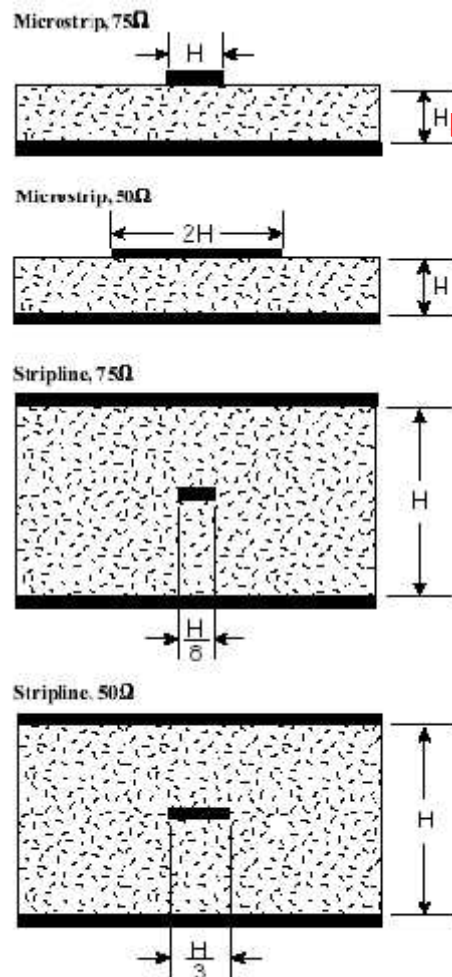


Cable balanceado
(twisted pair)

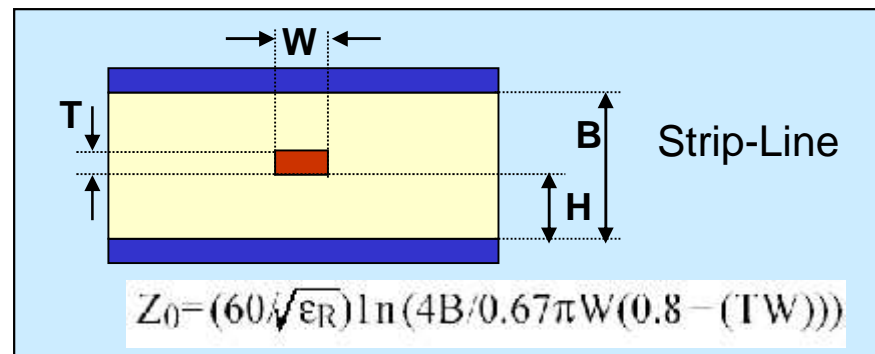
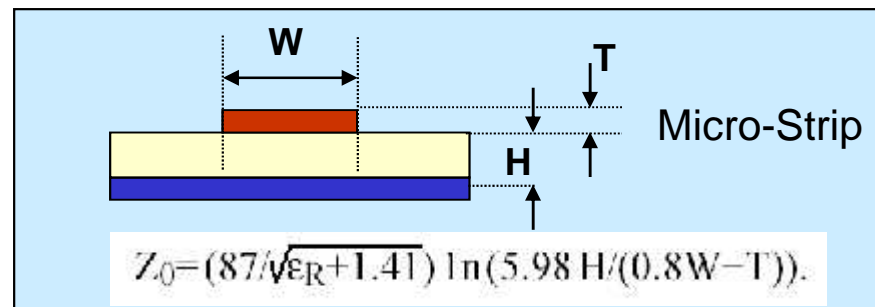
Microstrip y strip-lines

- Un caso importante son las pistas de circuito impreso, donde para obtener $Z_0 = 50 \text{ ohms}$ en un FR4, una relación aproximada es $W/2 < H \leq W/1.6$ para *microstrip* y $H = 3W$ para un *strip line*

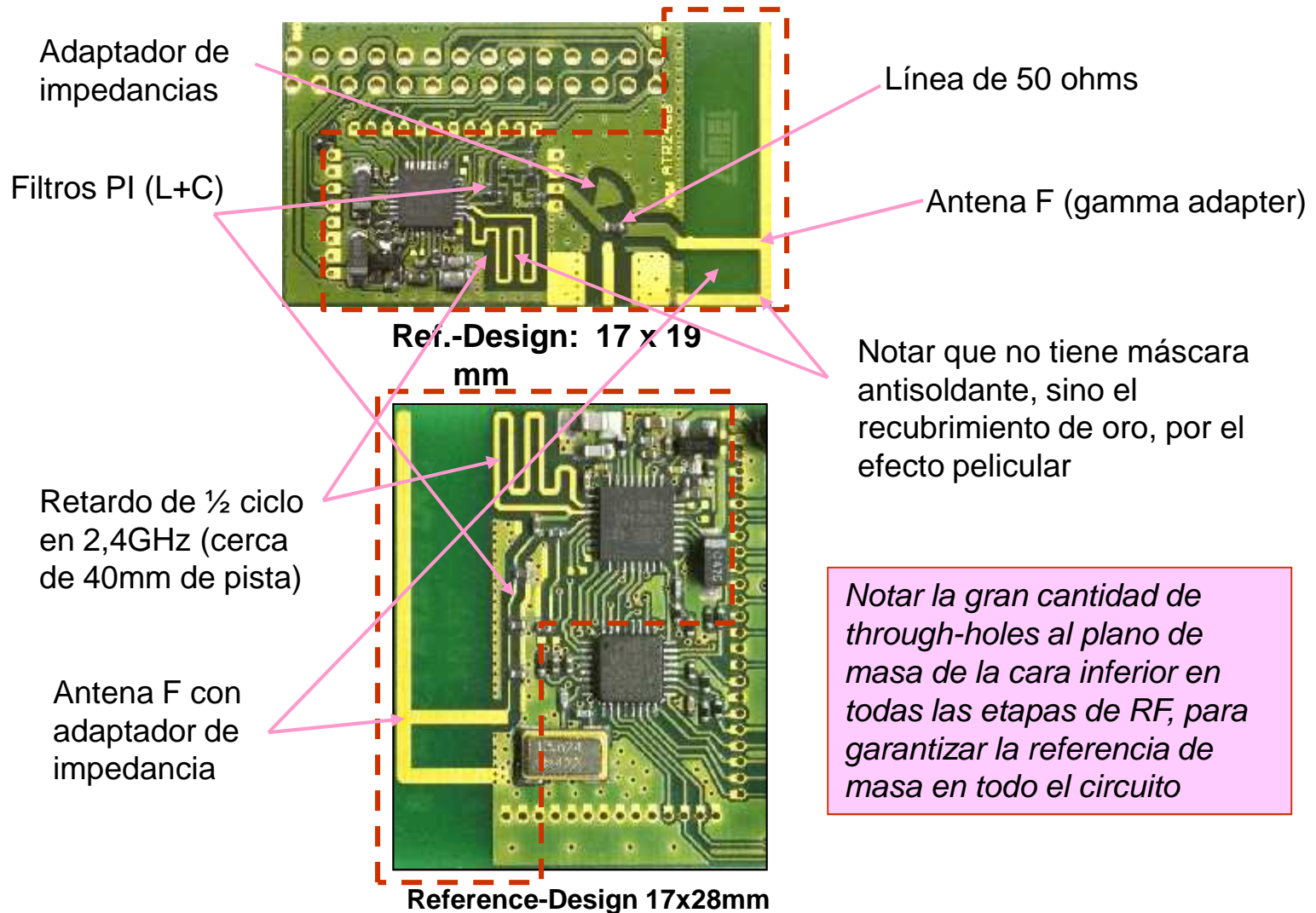
- En ciertos casos es necesario diseñar líneas de transmisión de impedancia distinta a 50 ohms. Las formulas muestran como calcular los distintos valores de Z_0 obtenidos para distintos espesores de substrato y distintos anchos de pista (todos en *mils*).



All Substrates
FR-4: $\epsilon_r = 4.5$
 Z_0 accuracy $\pm 30\%$



Trabajando en 2.4 GHz



Líneas de transmisión: adaptación y reflexiones

- ❑ La fórmula de la impedancia característica supone un conductor de largo geométrico muchísimo mayor que el largo eléctrico de cualquier evento, cuya geometría no cambia.
- ❑ En ese caso Z_0 es resistiva y define la relación entre tensión y corriente en cada punto de la línea, donde la energía almacenada en forma de esa tensión+corriente se propaga “hacia adelante” con la velocidad indicada
- ❑ Si en un dado punto la línea se interrumpe y en su lugar se coloca una resistencia R de valor Z_0 toda esta energía se disipa en la resistencia
- ❑ Pero si $R \neq Z_0$ la relación tensión/corriente en la línea y tensión/corriente sobre la R son distintas, y mientras una parte de la energía se disipa en R (donde la relación tensión/corriente la fija la ley de Ohm) otra parte es reflejada “hacia atrás”, y en cada punto de la línea se observará entonces la suma de las señales incidente y reflejada.
- ❑ La señal reflejada “hacia atrás” llega al generador, y si este no tiene una impedancia de generador Z_0 “rebota” nuevamente hacia adelante.
- ❑ Lo mismo pasa si cambia la geometría y con eso el valor de Z_0 de la línea de transmisión

Líneas de transmisión: reflexiones con el final abierto

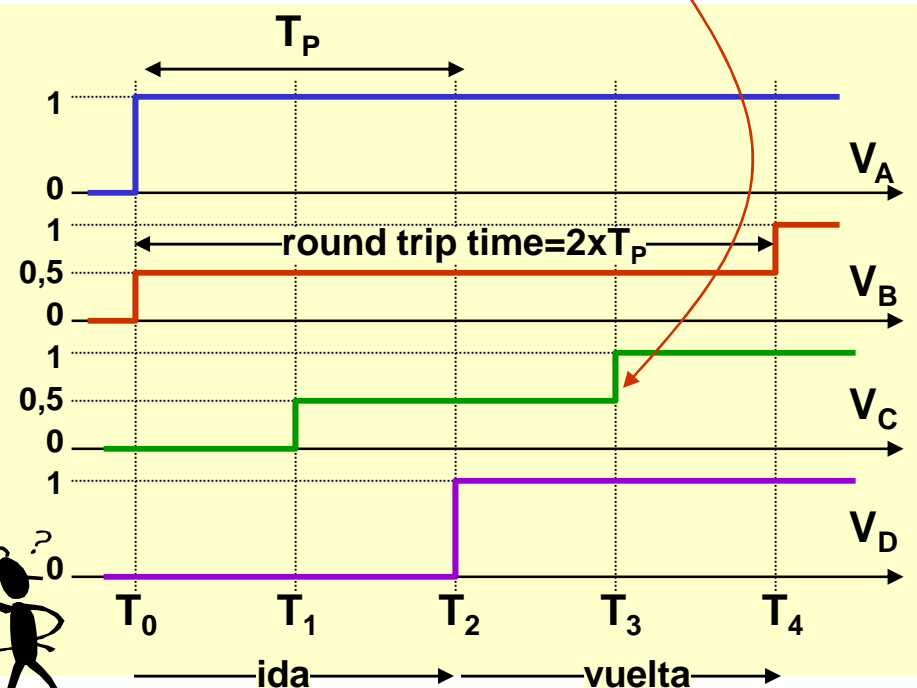
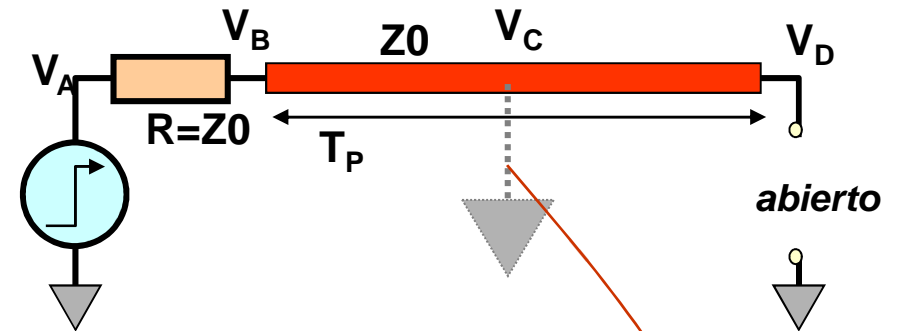
Un caso usual es una línea con un extremo abierto (caso del bus PCI)

Sea un generador de impedancia $R_{Th}=Z_0$ que aplica un escalon V_A a la línea

- ❑ En ese instante V_B es exactamente la mitad de V_A , por el divisor $R+Z_0$
- ❑ La señal se propaga, pasando por C para luego de T_P llegar en T_2 a V_D
- ❑ Como allí la corriente es nula se genera un reflejo de igual amplitud de campo eléctrico y campo magnético opuesto, que se propaga hacia atrás
- ❑ Los voltajes incidentes y reflejados se suman con lo que primero en C (tiempo T_3) y luego de T_P en B (tiempo T_4) vale V_A

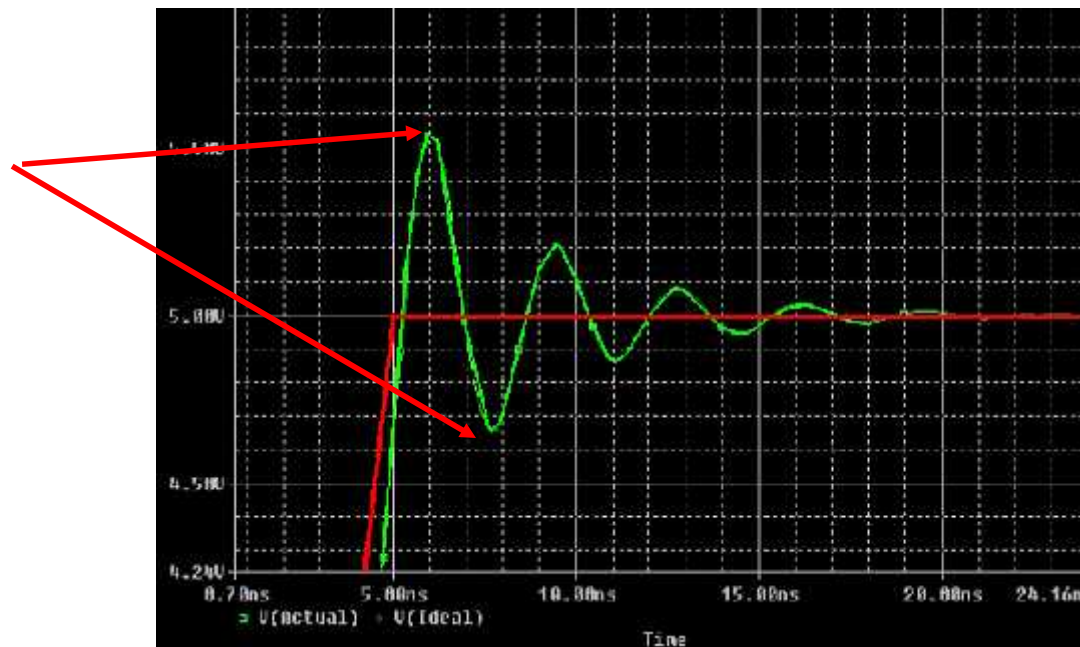
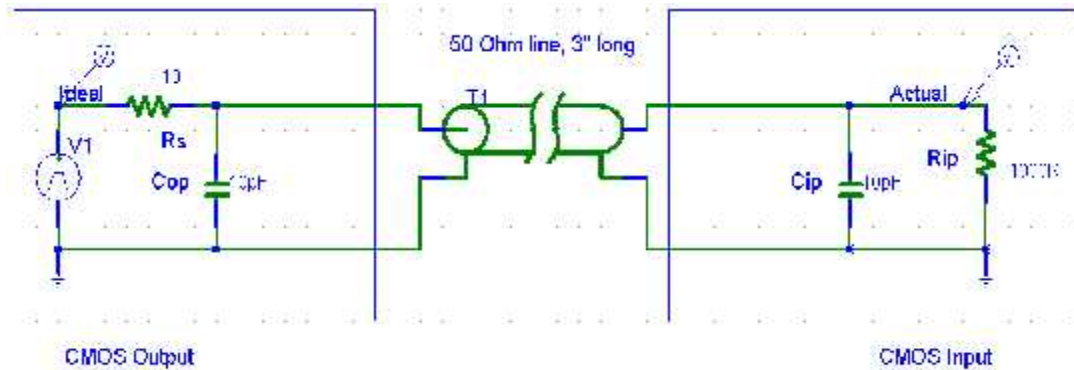
Un eventual receptor colocado en C detecta la amplitud completa recién en T_3 (*reflected wave switching*)

qué ventaja puede tener que no esté adaptada?



Ejemplo de los efectos asociados a las líneas de transmisión

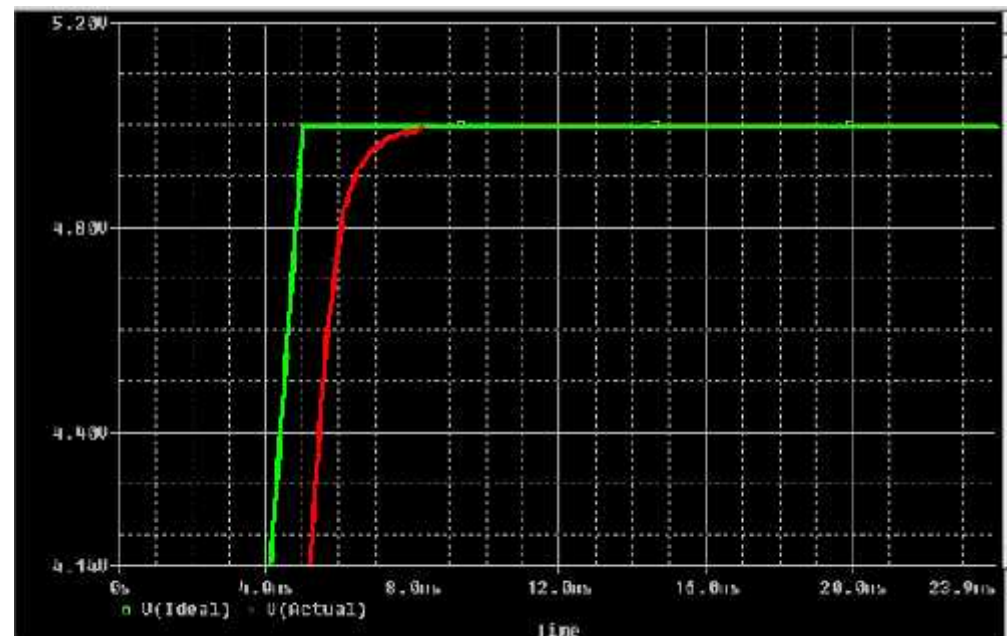
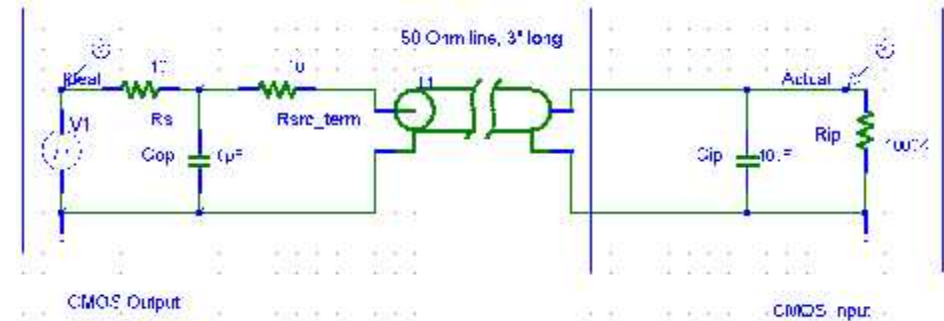
- Cuando en el modelo simulado se incluye la inductancia distribuida de la línea de transmisión, aparecen fenómenos pseudo oscilatorios (reflexiones de energía) entre la línea y las terminaciones
- Este efecto se nota más cuando mayor es el rise time (en este caso, rise time = 5 ns).



Terminación (stub) en el transmisor

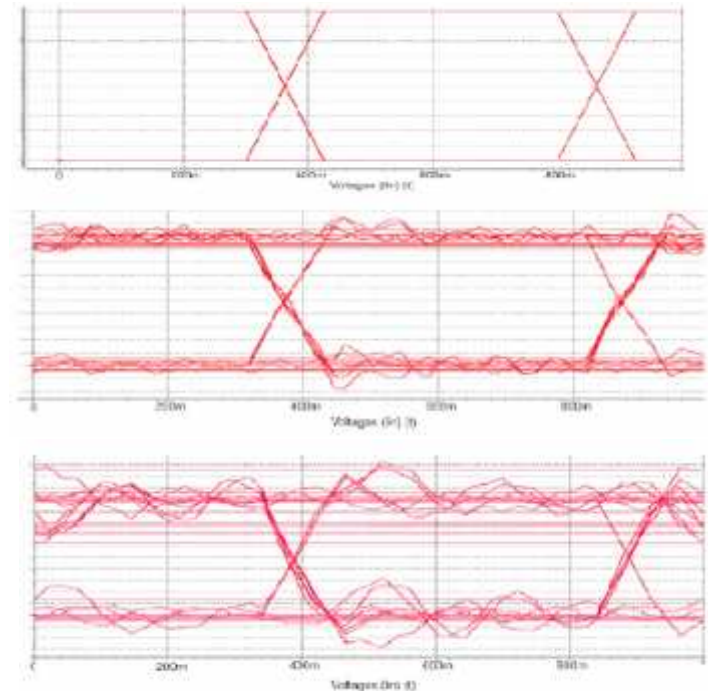
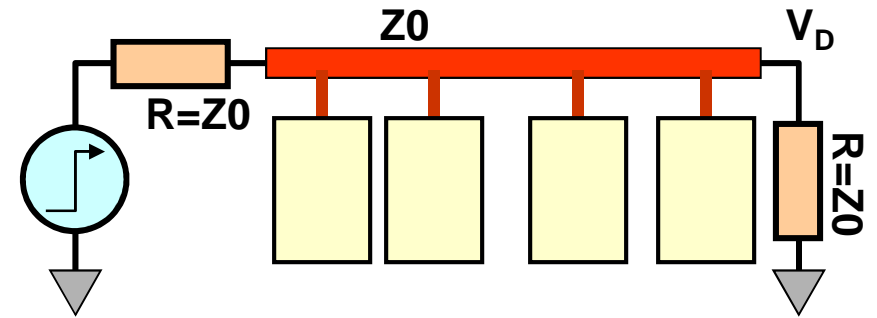
- Un resistor en serie con el excitador al mejorar la adaptación entre éste y la línea
- Por una parte llevando la resistencia efectiva a un valor próximo a la impedancia característica de la línea

$$R_s + R_{term} = Z_0$$
- Y a la vez reduciendo el efecto reactivo de la capacidad parásita de ese extremo de la línea
- La simulación muestra el resultado, en condiciones similares a la anterior



Líneas de transmisión: efecto de las derivaciones

- Es habitual que ciertas señales de alta velocidad (clock, por ejemplo) que se propagan por una línea adaptada deban ser usadas para excitar más de un dispositivo de alta impedancia.
- En los puntos de derivación la onda electromagnética se deriva hacia un camino adaptado y otro más corto de final abierto, que genera una reflexión.
- El largo de esa derivación afecta de forma importante la distorsión de la señal.
- Las imágenes muestran la simulación SPICE para una línea con derivaciones de largo cero, 6mm y 12mm



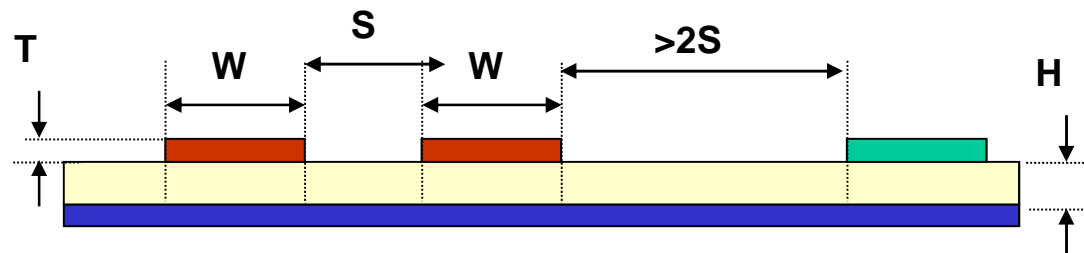
Interfases diferenciales

Características eléctricas

- ❑ Una línea diferencial se basa en un par de conductores físicamente adyacentes que transmiten señales de igual amplitud y polaridad opuesta
 - ❑ En el caso de cables pueden emplear cables trenzados (twisted), coaxiales balanceados (dos conductores con un blindaje común)
 - ❑ En el caso de circuitos impresos se realizan mediante dos pistas stripline o microstrip que corren en paralelo, donde es crítico que el largo eléctrico de ambas líneas sea lo más parecido posible
- ❑ Requieren un transmisor que genera este par de señales y un receptor que decide el valor lógico de la señal recibida en función de la diferencia de voltaje entre ambas.
- ❑ Una línea diferencial emite poca interferencia (RFI o EMI) dado que las corrientes opuestas generan campos electromagnéticos que se cancelan mutuamente
- ❑ Por igual razón es menos afectada por señales externas, que generan en ambas líneas idéntica interferencia (modo común). Esto es sumamente importante en el caso de interfases de ultra-alta velocidad, donde permiten mantener un margen de ruido aceptable con excursiones de señal pequeñas, evitando la necesidad de flancos con valores de dV/dT elevadísimos.

Algo sobre microstrip balanceadas

- ❑ En el caso de necesitar transmitir una señal por una línea balanceada pasa también a ser crítica la separación entre las líneas, siendo deseable que sea pequeña para que las interferencias de modo común afecten a ambas de igual modo
- ❑ Y esto, además, permite obtener longitudes físicas parecidas, con lo que el tiempo de tránsito de las señales es muy similar, minimizando el *skew* de recepción
- ❑ Para un PCB de espesor $H=10$ mils, se puede obtener una impedancia diferencial de 100 ohms (2 líneas de 50 ohms) usando pistas de ancho $W=12.5$ mils y espesor $T=0.35$ mils separadas entre sí $S=10$ mils.
- ❑ Es importante separar cada par diferencial de otras señales muy próximas, que podrían generar interferencia diferencial



Microstrip Lines and Slotlines, K. C. Gupta , Ramesh Garg , I. J. Bahl. Artech House, June, 1979, ISBN 0890060746

Multi-Drop LVDS with Virtex-E FPGAs, XILINX Application Note XAPP231

Analysis of board layout helps cure jitter problems. E.Bogatin & G.Garat. EDN(www.edn.com), August 5, 2004, pp.77-80

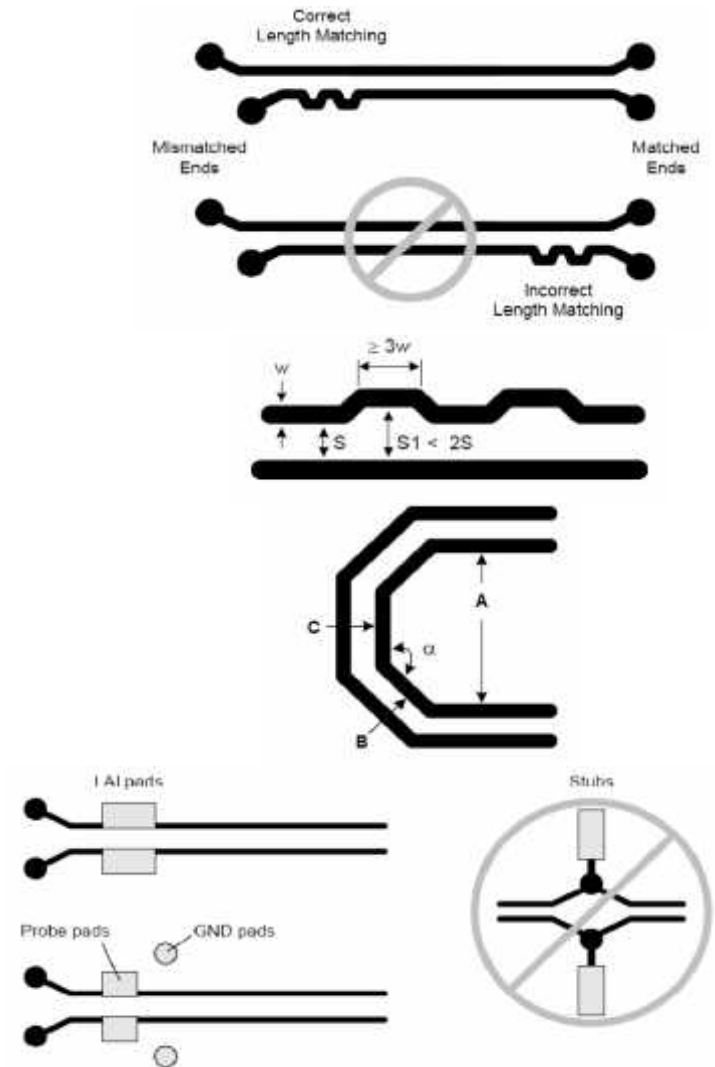
Rutas de circuito impreso aspectos básicos del análisis

- En un circuito impreso, zonas de baja resistencia son usadas para interconectar componentes entre sí
- La interconexión suele ser de provisión de energía (alimentación, GND) y de múltiples señales
- Cada una de estas interconexiones emplea caminos de conducción individuales
- Estos caminos están sobre/dentro de un soporte estructural
- Cada camino posee características geométricas propias (ancho, largo, espesor) de elevada complejidad
- Cada camino posee características eléctricas propias, propias del material conductor, de las características geométricas, y del soporte
- En cada camino la energía se propaga como energía electromagnética, e interactúa con los otros caminos
- Este efecto es más notable cuanto mayor es la frecuencia y más las señales

Microstrip balanceadas: criterios de diseño

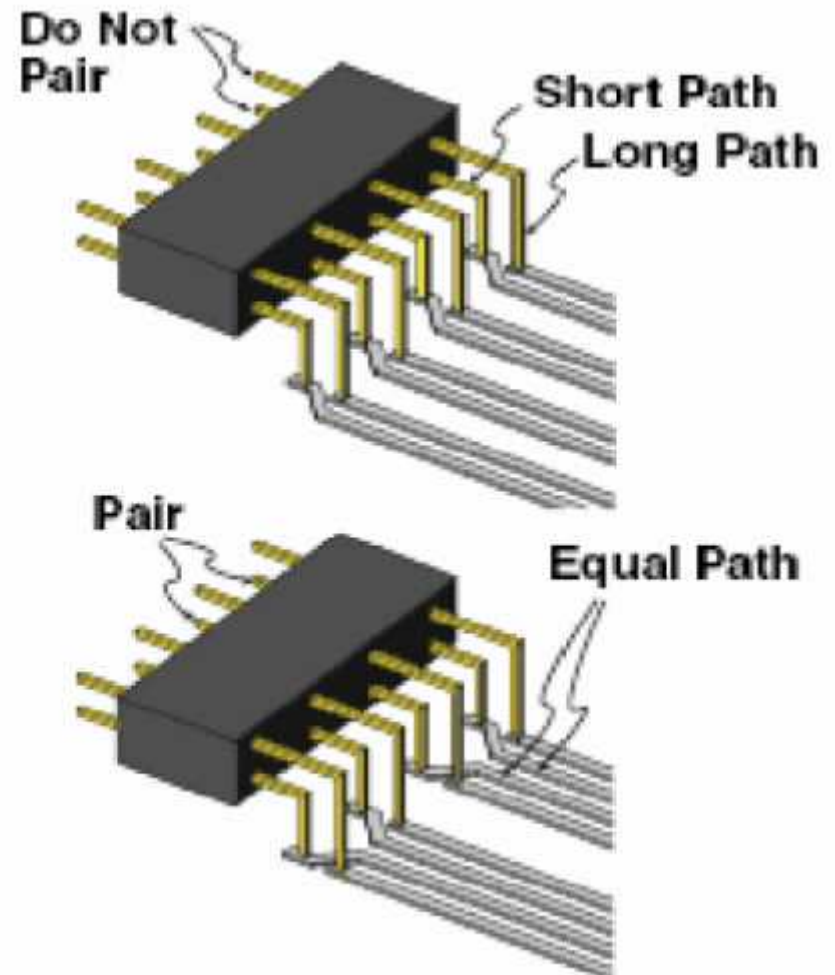
La nota de aplicación AN10798 de NXP es una posible fuente de referencia:

- Mantener las impedancias dentro de una tolerancia de $\pm 15\%$
- Minimizar la diferencia de longitud de las pistas, y al ecualizar la longitud usar la “serpentina” cerca del extremo donde está el desapareamiento
- Respetar las dimensiones mínimas de las serpentinas para no afectar la autoinductancia
- Evitar las curvas. Cuando no se pueda mantener ángulos de 135° o más, usar segmentos (B o C) de más de 2 a 3 veces el ancho de pista, y separar de 4 o más anchos de pista los caminos internos (A). Usar similar cantidad de giros horarios/antihorarios
- Al colocar pads o puntos de prueba hacerlo de modo simétrico, sobre las pistas, evitando derivaciones (stubs)



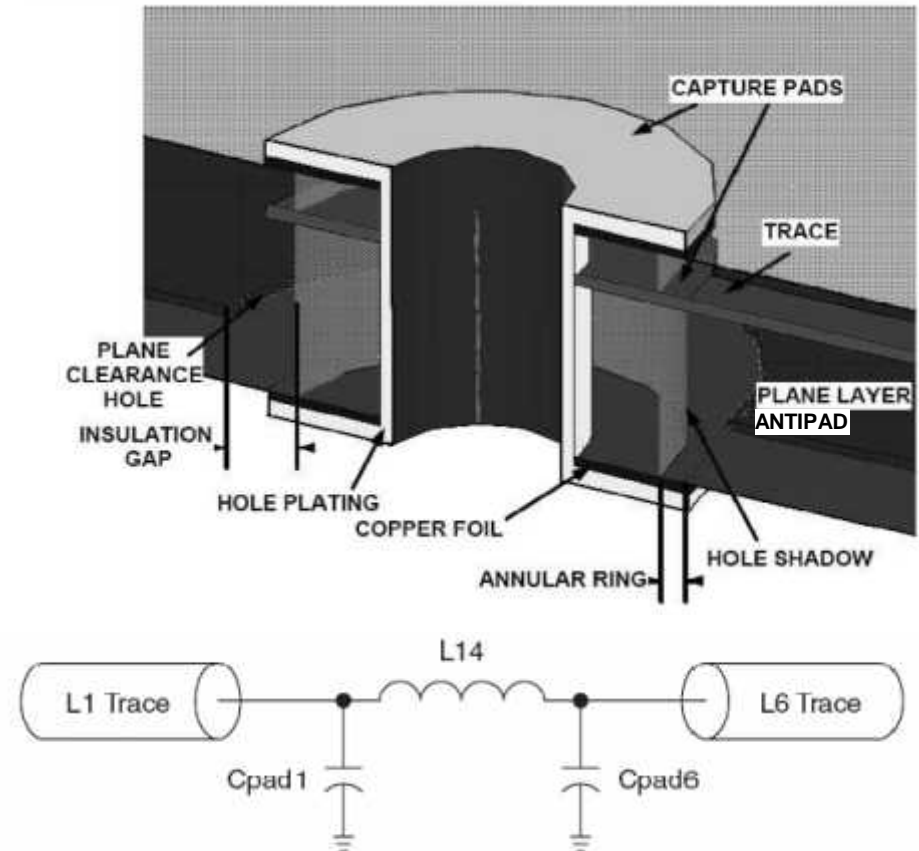
Generación de Skew por ruteado

- Skew es la diferencia entre retardos de propagación de varios caminos de señales
- Es importante en las redes de distribución de reloj, porque afecta directamente a los tiempos de setup, hold y clock_to_output
- Pero también en el caso de señales diferenciales: en este caso afecta la pérdida de inserción (S21), la variación de impedancia característica, el Crosstalk y la EMI.
- Y en el caso de caminos múltiples (multi-lane paths) también es importante



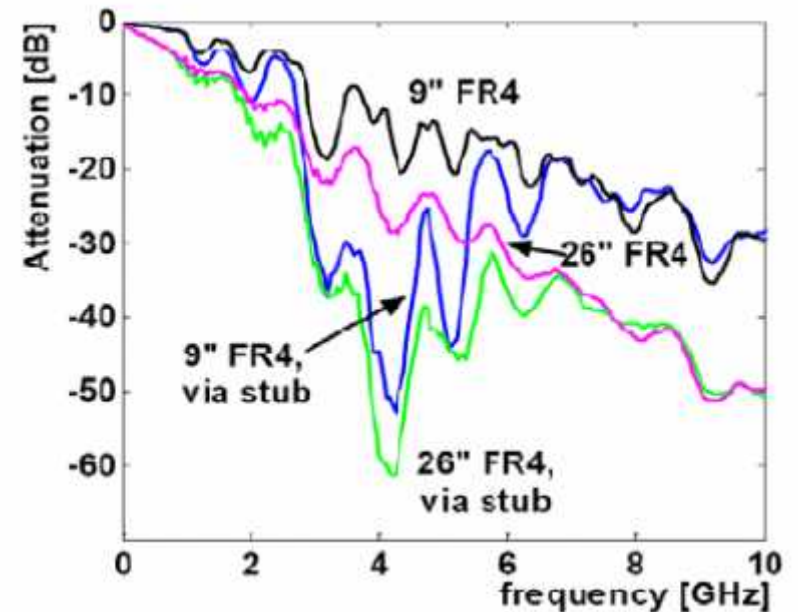
Desadaptación en las vías entre caminos en distintas capas

- Algo tan simple como una vía entre capas de PCB puede afectar notablemente la eficacia de una conexión
- De hecho, una vía opera como tres componentes concentrados que unen entre sí a dos líneas de transmisión (un filtro PI)
- Las capacidades dependen de los Capture Pads, del AntiPad, y del material y espesor del soporte
- La inductancia depende del diámetro y longitud del orificio
- Esto genera inevitablemente distorsiones de fase, variación de impedancias y reflexiones



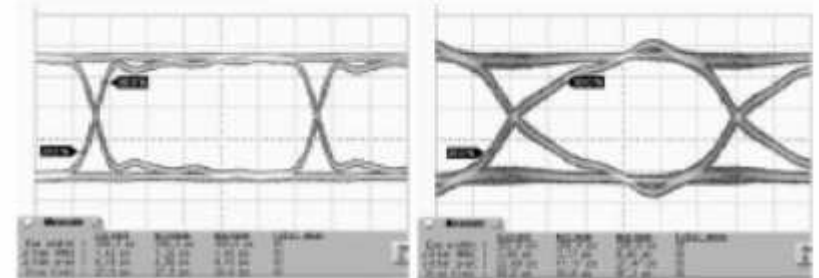
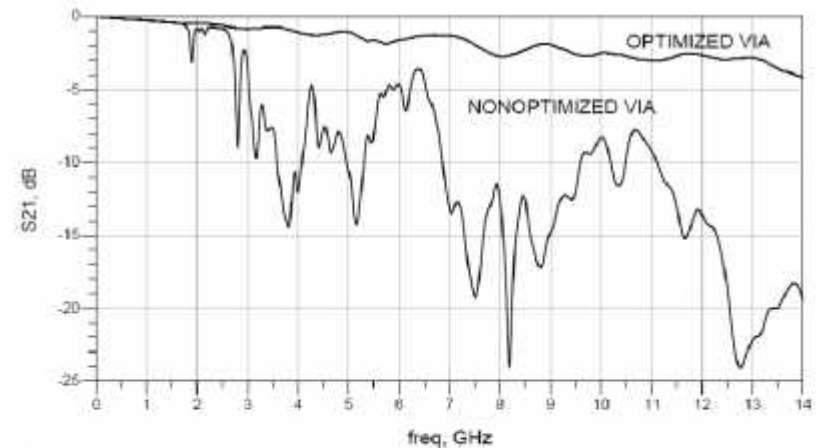
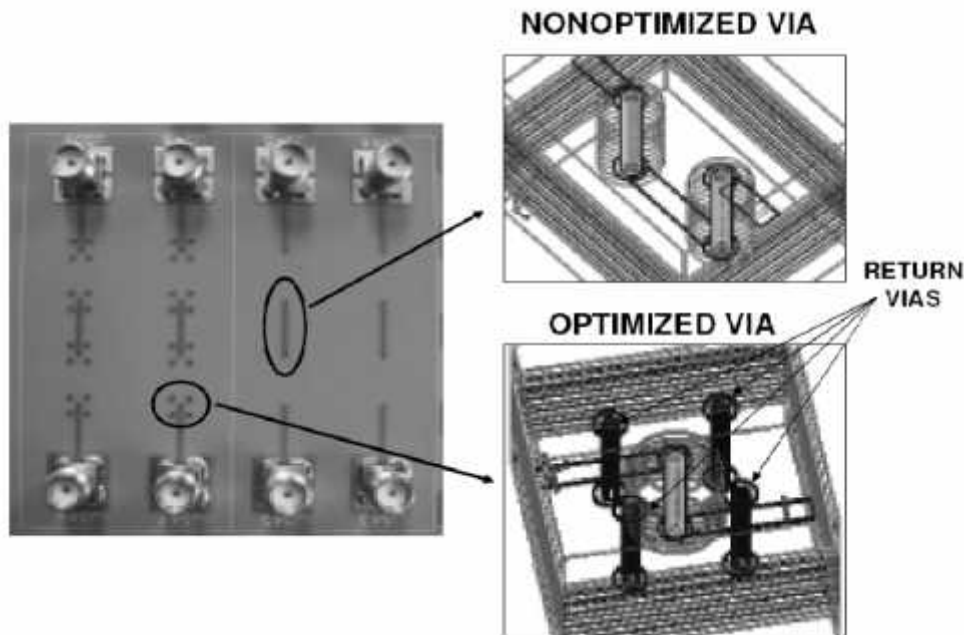
Problemas cuando no se mantiene la impedancia

- En una traza, cuando hay una vía de conexión (through hole), un cambio de ancho, una curva o una derivación, la impedancia característica se altera, y los efectos de atenuación son más notables y difíciles de modelar, pues surgen de la interacción de multiples reflexiones
- La figura muestra dos trazas, de 9" y 26", sin derivaciones o con derivaciones por una vía
- Los picos de atenuación pueden provocar resultados críticos (por ejemplo, una señal de 2.5Gbps tiene multiples impares de 1.25GHz, y la 3er armónica puede ser atenuada más de 30 dB en un caso respecto al otro)



Efecto de las vías en la impedancia

- Las variaciones de impedancia pueden mejorar mediante el agregado de vías de retorno, que son caminos paralelos a de la vía pero conectados a GND
- Las imágenes muestran la diferencia de comportamiento entre un camino de 4 vías simple, y otro donde cada vía está rodeada de 4 vías de retorno, en frecuencia y tiempo, para una señal (excitada con PRBS $2^{31}-1$ a 3.25 Gbps, rise time de 12 ps).



Efectos no deseados en un circuito impreso

- Capacitores parásitos: el empleo de un plano de masa por debajo de ciertas trazas, con la intención de blindarlas, a la vez genera capacidades no deseadas. Cuando deben evitarse la solución es abrir el plano de masa por debajo
- Una pista de circuito tiene una inductancia que es función de su geometría. Puede ser usada para diseñar adaptadores de impedancia, pero nunca debe ser ignorada, sobre todo en líneas de transmisión de alta velocidad

Example: Pad of SOIC

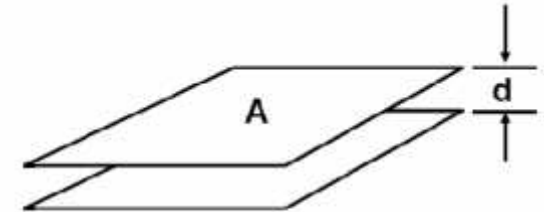
$L = 0.2\text{cm}$ $W = 0.063\text{cm}$

$K = 4.7$

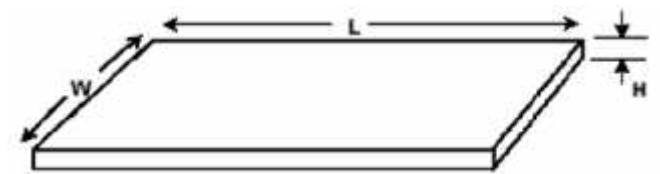
$A = 0.0126\text{cm}^2$

$d = 0.073\text{cm}$

$C = 0.072\text{pF}$



$$C = \frac{kA}{11.3d}$$



$$\text{STRIP INDUCTANCE} = 0.0002L \left[\ln \left(\frac{2L}{W+H} \right) + 0.2235 \left(\frac{W+H}{L} \right) + 0.5 \right] \mu\text{H}$$

Example

$L = 25.4\text{mm}$

$W = .25\text{mm}$

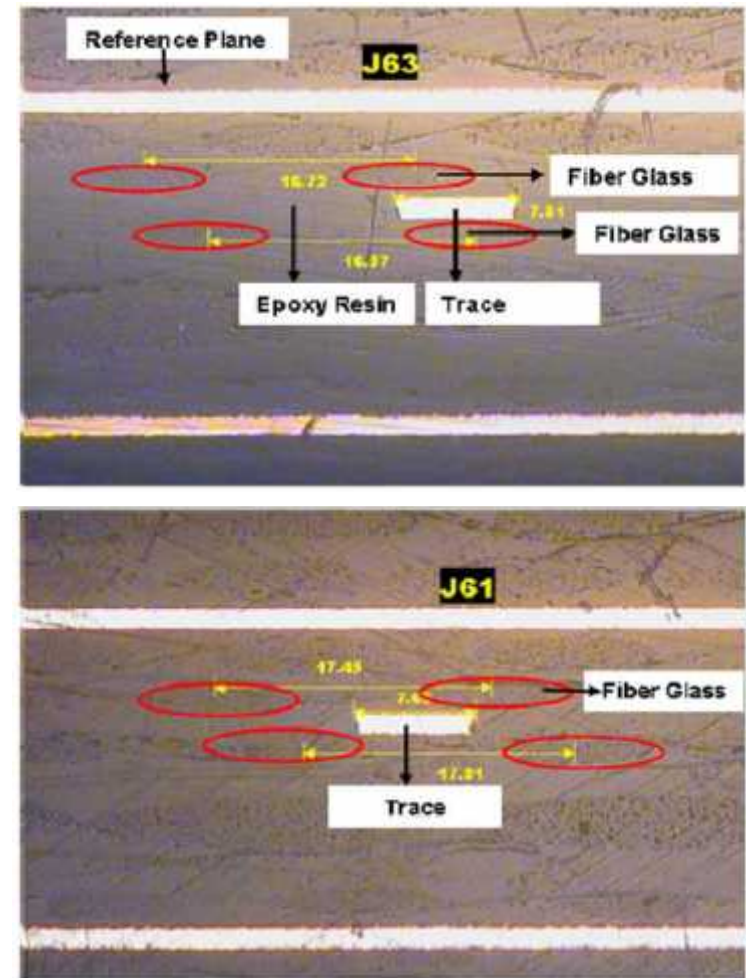
$H = .035\text{mm}$ (1oz copper)

Strip Inductance = 28.8nH

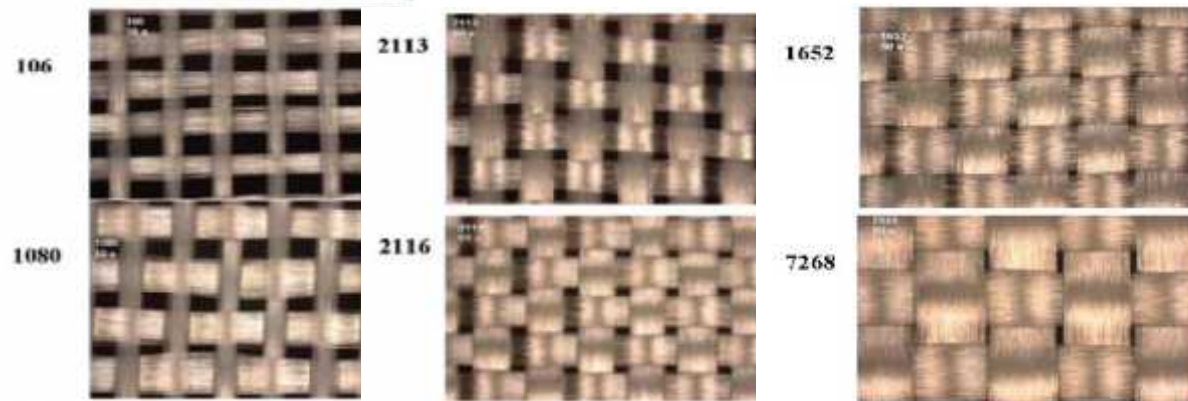
At 10MHz $Z_L = 1.86 \Omega$ a 3.6% error in a 50Ω system

Otras causas que afectan la propagación de señales

- En muchos PCB las pistas corren en ángulos de 0° o 90° , similares a los ángulos del mallado de la fibra de vidrio
- Esto también puede afectar a la señal, como se nota en los dos cortes
- Como la fibra y la resina tienen diferente constante dieléctrica cada pista tiene una velocidad de propagación diferente
- Y por tanto, de ser una señal diferencial se genera skew.
- Esto se llama wave effect, y una forma de compensarlo es usando un camino en zigzag en vez de uno recto (ver AN528.pdf)
- O emplear multicapas con fibras de distinta trama ... o cosas parecidas



La estructura del soporte en el wave effect



El circuito impreso se compone de un soporte mecánico

- La fibra de vidrio es un tejido de hilos de vidrio (que dan la resistencia mecánica) embebidos en una resina epoxi (que da la cohesión y rigidez)
- El vidrio usado puede ser de distintos tipos (E, S, NE) y en cada caso tiene distintas características dieléctricas (entre 5.6 y 4.4)
- La resina epoxi también tiene otra constante dieléctrica (cerca de 3.2)
- Eso produce discontinuidades dieléctricas que afectan a los fenómenos de propagación, más notorios cuanto menor es la longitud de onda de la componente de frecuencia (sólo 20mm a 10 GHz)

Ejemplo de sugerencias de ruteado diferencial en High Speed USB

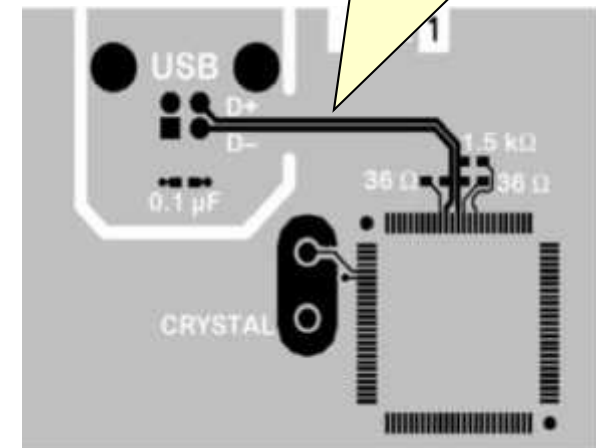
- Colocar al chip en la capa más próxima a la del plano de masa.
- Rutear D+,D- en la capa más próxima a la del plano de masa.
- Rutear D+,D- antes que las demás señales.
- Mantener un plano de masa sólido bajo D+,D-. Toda interrupción de este plano genera desadaptación de impedancia y aumenta la EMI.
- Evitar el uso de vías en D+ y D- pues generan desadaptaciones. Si son imprescindibles (ej: al usar un conector mini-B) usar vías pequeñas (25-mil pad, 10-mil hole) siempre manteniendo D+ y D- en la misma capa.
- Emplear rutas cortas en D+ y D-: lo ideal es menor a una pulgada, nunca mayor a 3 pulgadas.
- Ecualizar las longitudes de D+ y D- dentro de 50 mils (1.25 mm) para evitar problemas de skew..
- mantener el espaciado entre D+ y D- constante, para evitar desadaptaciones.

High-speed USB PCB Layout Recommendations

Ejemplo de sugerencias de ruteado diferencial en High Speed USB

- Mantener una distancia de 250-mil (6.5-mm) entre D+ y D- y toda otra traza no estática (crosstalk).
- Usar curvas de 45° en vez de 90°.
- Mantener una distancia de al menos CINCO anchos de traza entre D+, D- y los planos de masa en la misma capa (copper pour), para no alterar la impedancia.
- Si el chip USB requiere terminaciones serie y pullups en D+, D- ubicar sus pads sobre las pistas (no hacer derivaciones) y lo más cerca posible al chip.
- Evitar en lo posible el uso de filtros (chokes) de modo común en D+ and D-, a no ser que sean imprescindibles por razones de EMI.

La pista D- parece más corta, pero luego es más larga adentro del conector!!



High-speed USB PCB Layout Recommendations