



Signal integrity in high speed design vereist kennis van de onderliggende fysica.

Dit artikel is een introductie op de technology white paper 'Signal Integrity'. De white paper kunt u downloaden op www.technolution.nl/objective.

Back to basics voor een goed signaal

De ontwerper van high speed designs loopt regelmatig tegen fysische beperkingen aan. Door de alsmaar toenemende frequenties gaan de printplaat en de interconnect een rol spelen bij de signaalkwaliteit (signal integrity). Om toch tot een goed ontwerp te komen, is grondige kennis van analoog signaalgedrag nodig. Eén fout in een 10 Gb design en er blijft geen signaal meer over.

Bij hoge signaalsnelheden op een print treden natuurkundige verschijnselen op die de zaak flink in de war kunnen schoppen. De lengte en impedantie (weerstand, inductie en capaciteit) van de kopersporen en (door)verbindingen beïnvloeden het signaal. Daarmee is de print zelf ook een component geworden en is de fabrikant van printplaten nu ook componentleverancier. Hij moet zijn productieproces heel goed beheersen. Een klein ontwerp- of productiefoutje kan bij hoge frequenties een kortsluiting vormen of een onterechte extra puls (spike) veroorzaken, wat door de logica verkeerd geïnterpreteerd kan worden.

Het maken van een high speed digitaal ontwerp vereist een grondige kennis van het analoge signaalgedrag. Want hoewel de software met enen en nullen werkt, is het gedrag van deze signalen op de print puur analoog. De Schotse natuurkundige Maxwell stelde vier wetten op die alle elektrische en magnetische beïnvloedingen beschrijven. Ontwerpers kunnen hiermee de signaalkwaliteit waarborgen. Een signaal is een potentiaalverandering die zich voortplant door het koperspoor. De lading nodig voor die potentiaalverandering loopt door het spoor met een snelheid die ongeveer de helft is van de lichtsnelheid: 150.000 km/s of 15 cm/ns. De tijd die de lading nodig heeft om een bepaalde afstand te overbruggen wordt looptijd genoemd. De tijd waarin een signaal van potentiaal verandert is de flanktijd.

Behalve door reflecties worden de signalen ook verzwakt door demping.

Wanneer de looptijd van een signaal meer is dan een zesde van de flanktijd, moet het spoor worden beschouwd als een transmissielijn en zijn rekenregels voor hoge frequenties noodzakelijk.

Reflecties

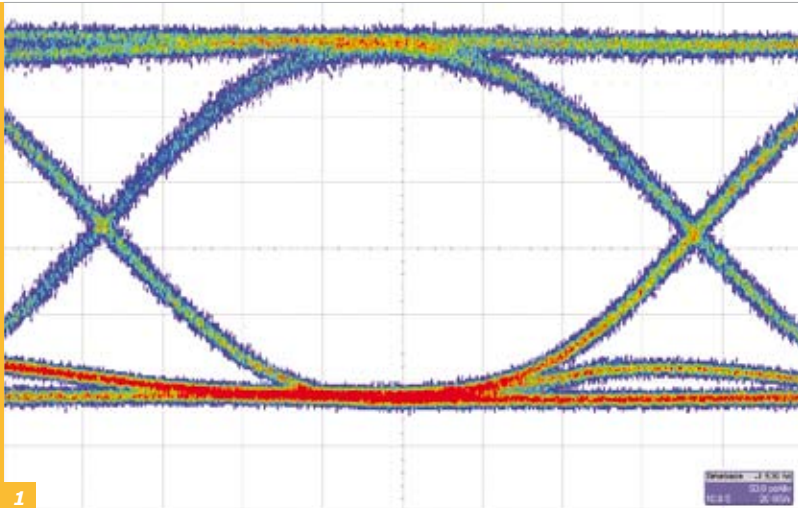
Voor een ideaal signaaltransport moet het signaal over het hele traject dezelfde impedantie 'zien'. Een verschil of overgang in impedantie veroorzaakt reflecties, te zien als een dip of piek in het signaal. Een capacitieve reflectie geeft een dip in het signaal. Een inductieve reflectie leidt tot een piek bovenop het signaal.

Het klinkt eenvoudig om de impedantie gelijk te houden over de hele lengte. Maar een signaalpad zit vol storende elementen zoals bonddraden (verbindingen in de chip), pads, stubs en bochten (capacitieve storing), connectoren (inductief) en via's (inductief en capacitief). Een perfecte oplossing is niet altijd te geven. De ontwerper zal vaak met compromissen moeten werken.

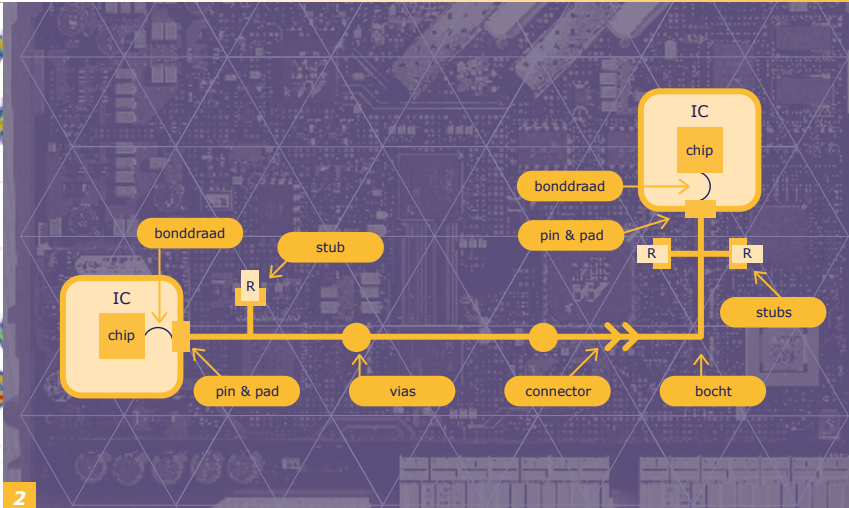
Demping

Behalve door reflecties worden de signalen ook verzwakt door demping. De ideale transmissielijn is verliesvrij en heeft overal dezelfde impedantie. Begin en eind worden met de karakteristieke impedantie afgesloten om reflecties te voorkomen. Uit de wet van Ohm blijkt dat slechts de helft van het signaal dan aan de uitgang komt: zet een spanning over twee identieke weerstanden (de bronimpedantie en de doelimpedantie), dan staat daartussen de halve spanning. Dit verlies van 50% heet termination loss of afsluitverlies.

In werkelijkheid heeft een koperspoor een ohmse weerstand die onafhankelijk is van de frequentie. Maar met toenemende frequentie gaat de stroom steeds meer langs de buitenkant van het koperspoor lopen. Dit is het skineffect. Dezelfde stroom moet door een kleiner oppervlak van de koperbaan en dat geeft extra weerstand. Vanaf ongeveer



1



2

1. Oscilloscoopbeeld: oogpatroon t.b.v. beoordeling signaalkwaliteit. 2. Signaalpad van chip tot chip.

75 MHz speelt het skineffect al een niet te verwaarlozen rol.

Het printplaatmateriaal tussen de geleiders bevat ook lading die zich verplaatst als er een signaal passeert en dat kost energie. Hoe sneller het signaal, hoe meer energie de ladingsverplaatsing kost. Alleen door een ander en duurder materiaal voor de print te kiezen, zijn deze diëlektrische verliezen te verminderen. Bij 10 Gbps wordt nog steeds het standaard FR4 printmateriaal gebruikt, als de af te leggen afstanden dat toestaan.

Overspraak

Een elektrisch signaal in een geleider genereert een elektromagnetisch veld rondom die geleider. Als dat elektromagnetisch veld bij een andere geleider komt, induceert het daarin een elektrische verstoring. Dit is het werkingsprincipe van een radiozender en ontvanger, maar op printniveau heet dit ongewenste fenomeen overspraak. Elk koperspoor zendt een veld uit, dat door naastliggende sporen wordt opgepikt en daar het signaal verstoort. De ruimte tussen de sporen vergroten is een effectieve manier om overspraak te reduceren, omdat het verschijnsel kwadratisch afneemt met de afstand tussen de twee geleiders. Andere manieren om overspraak te bestrijden zijn het aanbrengen van een kopervlak tussen de geleiders en het gebruik van differentiële verbindingen. Hierbij moet zowel de elektrische als de magnetische component van het storende veld beschouwd worden.

Jitter

Jitter is een variatie in de tijd en amplitude van het signaal, veroorzaakt door onder andere signaalinhoud en ruis op de voeding. De invloed van zowel tijd- als amplitudefouten kunnen bepaald worden met behulp van eye patterns oftewel oogpatronen. Hoe groter de vrije ruimte binnen het oog, des te beter is de kwaliteit van het signaal (zie figuur 1).

Simulatie

Voordat een ontwerper een PCB-design maakt, voert hij simulaties uit. Zo kan hij ideeën testen, zonder dure ontwerpen te verspillen. Bijvoorbeeld met diverse SPICE-varianten, simulatiesoftware voor analoge verschijnselen. Signal integrity simulatiepakketten speciaal voor prints vormen nog een relatief onontgonnen terrein. Zonder kennis van zaken zijn ze niet te gebruiken. Zo kan een pakket nooit het totaal van print plus IC's simuleren. De gebruiker moet dus weten waar hij mee bezig is. Een simulatie vertaalt alle fysische verschijnselen die op een print optreden naar elektrische equivalenten (weerstand, inductie of capaciteit). Daarnaast leveren chipfabrikanten simulatiemodellen van hun producten. Helaas zijn er veel soorten modellen die niet altijd goed uitwisselbaar zijn. Soms is een model niet meer dan een rijtje (grof afgeronde) getallen, dat het gedrag van een component beschrijft in een specifieke situatie. Als de ontwerper andere situaties wil simuleren, heeft hij niet genoeg aan een paar getallen. Hij wil de wiskundige functie weten die het componentgedrag beschrijft. Soms zit er niets anders op dan zelf met reverse engineering de functie af te leiden uit de getallen.

Simulatiepakketten voor analoge designs bewijzen goede diensten in het digitale domein. Immers, een signaal in een digitaal circuit is een analogo verschijnsel. Signal integrity in high speed design vereist dan ook verstand van de onderliggende analoge representatie. Om precies te achterhalen wat er op printniveau allemaal gebeurt, met de hoogfrequente digitale signalen, blijft kennis van fysische fenomenen essentieel.

Dit artikel is een introductie op de technology white paper 'Signal Integrity'. De white paper kunt u downloaden op www.technolution.nl/objective.

Jitter is een variatie in de tijd en amplitude van het signaal, veroorzaakt door onder andere signaalinhoud en ruis op de voeding.