

Samenvatting

Er is een grens aan de snelheid waarmee (digitale) gegevens in de vorm van elektrische stromen via koperkabels en printplaten kunnen worden verzonden. Het zogenaamde huideffect en de diëlectrische verliezen veroorzaken signaaldemping en -dispersie, die de maximaal haalbare transmissiesnelheid beperken. Tevens kunnen er signaalreflecties optreden als er discontinuïteiten zitten in de elektrische impedantie. Als gevolg van al deze effecten ontstaat er intersymbool-interferentie: naburige symbolen interfereren met elkaar.

Het doel van dit promotieonderzoek is het vinden van nieuwe egalisatie- en modulatietechnieken die kunnen worden ingezet om de maximaal haalbare transmissiesnelheid over koperkanalen te verhogen. Voorwaarde daarbij is wel dat foutenkans (dat symbolen incorrect worden ontvangen) niet omhoog gaat. De nieuwe technieken moeten tevens goed aansluiten bij toekomstige generaties van technologieën voor het maken van geïntegreerde circuits (ICs).

In Hoofdstuk 2 wordt een praktisch simulatiemodel besproken voor koperkabels en printplaten. Dit model kan gebruikt worden voor tijddomeinsimulaties met een hoge tijdsresolutie. Zowel het huideffect als de diëlectrische verliezen worden gemodelleerd. Een causale impulsresponsie wordt gegarandeerd doordat de complexe impedanties van het huideffect en van de diëlectrische verliezen voldoen aan de Kramers-Kronig relaties. De juiste modelparameters worden gevonden door de modelvoorspelling gelijk te stellen aan de resultaten van metingen aan drie coaxiale koperkabels, een gevlochten aderpaar en een koperspoor op een printplaat.

In Hoofdstuk 3 wordt een analoge implementatie van een OFDM-systeem ('Orthogonal Frequency Division Multiplexing') beschreven. Deze analoge implementatie is gebaseerd op analoge vermenigvuldigers en integreer-schakelingen. Zo'n systeem is gevoelig voor onnauwkeurigheden in de synchronisatie, zoals fluctuaties in de signaalfase ('jitter') en afwijkingen in de duty-cycle. De invloed hiervan wordt geanalyseerd. De bevindingen zijn:

- Jitter veroorzaakt overspraak tussen het in-fasekanaal en het kwadratuurkanaal in een gegeven OFDM-subband. Gegeven een zekere RMS-variantie in de jitter kunnen, voor gelijke bitfoutenkans, op laagfrequente subbanden meer bits gemoduleerd worden dan op hoogfrequente subbanden. De oorzaak hiervan is dat eenzelfde tijdsverschuiving een grotere fasefout geeft bij hogere frequenties.
- Onnauwkeurigheden in de duty-cycle veroorzaken overspraak tussen subbanden op verschillende frequenties omdat de OFDM-orthogonaliteit verloren gaat.
- Harmonischen ten gevolge van de schakelende vermenigvuldigers maken het gebruik van veel subbanden onmogelijk door spectrale overlap.

De conclusie is dat dit analoge OFDM-systeem, door de hoge gevoeligheid voor onnauwkeurigheden in de synchronisatie, momenteel niet haalbaar is en dat traditionele PAM systemen beter haalbaar zijn (en eenvoudiger te implementeren). De laatste genieten dus de voorkeur voor koperkanalen met een monotoon afnemende overdrachtsfunctie, zonder diepe nulpunten in de frequentieoverdrachtsfunctie.

In Hoofdstuk 4 wordt beschreven hoe een egalisatieschakeling voor koperkabels en printplaten gemaakt kan worden door de zender te laten schakelen tussen slechts twee

spanningen. In het geval dat een '1'-bit verstuurd moet worden, wordt gedurende één bittijd eerst een positieve spanning op de lijn gezet en vervolgens een negatieve spanning. Het omgekeerde wordt gedaan wanneer een '0'-bit moet worden verzonden. Door het instellen van de verhouding tussen de positieve en negatieve spanning (de duty-cycle), kan het filter aangepast worden aan het kanaal. Dit zogenaamde 'pulsbreedtemodulatiefilter' (PWM-filter) heeft dus slechts één knop (instelparameter) nodig.

Deze techniek is een alternatief voor de veel toegepaste FIR-filters (lineaire filters met een eindige impulsresponsie). De PWM-filteertechniek doet zijn voordeel met de tijdsnauwkeurigheid die inherent aanwezig is in nieuwe technologieën voor geïntegreerde schakelingen. We zien steeds hogere schakelsnelheden (en een steeds hogere tijdsnauwkeurigheid). FIR-filters echter vereisen een meer nauwkeurige amplitude, iets dat steeds lastiger wordt in de nieuwe technologieën. Met elke technologiegeneratie wordt namelijk de spanningsruimte kleiner en neemt de relatieve amplitudenaauwkeurigheid af.

De overdrachtsfunctie van het PWM-filter past zeer goed op die van de koperkanalen. Het PWM-filter past beter op de kanalen dan een 2-taps FIR-filter, zowel één met een tapafstand van een hele symbooltijd (SSF) als één met een tapafstand van een halve symbooltijd. Het PWM-filter kan gezien worden als een filter van een hogere orde met slechts één instelparameter. Tijddomeinsimulaties van een theoretisch kanaal met uitsluitend huideffect, laten zien dat ongeveer tweemaal de transmissiesnelheid behaald kan worden als met een 2-tap SSF filter, bij gelijke piekdistortie.

Aan de uitgang van het kanaal is een normaal pulsamplitudegemoduleerd (PAM) signaal beschikbaar. Uit berekeningen blijkt dat de oogopening aan de ontvangstkant hetzelfde is als die bij een 2-taps FIR-filter (aangenomen dat zowel het FIR-filter als het PWM-filter dezelfde spanningsruimte kunnen benutten). De ontvangtcircuits kunnen dus ongewijzigd blijven.

Twee 0.13µm CMOS-chips en een 90nm CMOS-chip zijn gemaakt om het PWM-filter te testen. Metingen met deze prototypes laten het volgende zien: een succesvolle ontvangst van de gegevens is mogelijk met een bitfoutenkans (BER) van 10^{-12} . Dit is gemeten over coaxiale en gevlochten-paar koperkabels, met tot 30dB verlies op de Nyquist frequentie. Deze gemeten verliescompensatie is aanzienlijk hoger dan de maximaal haalbare 20dB voor een 2-tap SSF-filter (en 30dB voor meer complexe egalisatiecircuits met meer instelparameters). Een bitsnelheid van 5Gb/s werd bereikt op alle kanalen. De verschillende kabels hebben elk een andere verhouding van huideffect-verlies t.o.v. dielectrisch verlies, en alle kanalen hebben 30dB totaal verlies (beide effecten tezamen) op een frequentie van 2.5GHz. Op een FR4-printspoor werd 25dB aan verliescompensatie behaald.

In Hoofdstuk 5 wordt besproken hoe de PWM-filteertechniek kan worden uitgebreid naar een versie met meerdere filtertaps. De duty-cycle van dit multitap PWM-filter is een functie van meerdere bits. Zo kunnen meer complexe overdrachtsfuncties gemaakt worden, zoals dat ook kan met multitap FIR-filters. De zender hoeft nog steeds slechts te schakelen tussen twee spanningen, zodat het weer mogelijk is om een implementatie te maken die gebruik maakt van de hoge tijdsresolutie die beschikbaar is in de nieuwe generaties CMOS-technologieën. Om de juiste timing van de schakelmomenten te vinden, wordt de methode van het gelijke oppervlak gebruikt. M.b.v. tijddomein simulaties wordt geïllustreerd dat de oogopeningen vrijwel gelijk zijn aan die bij het equivalente 3-taps SSF filter.

De vermogensspectraaldichtheidsfuncties (PSD-functies) van de 3-taps PWM-filters laten bij frequenties rondom de Nyquist frequentie een hogere vermogensdichtheid zien dan die van het FIR-filter. De aanwezigheid van harmonischen is inherent aan PWM. Een systeemontwerper zal deze bijwerking van PWM moeten afwegen tegen het eerder genoemde voordeel van het gebruik van een egalisatietechniek waarbij de zender slechts hoeft te schakelen tussen twee spanningen. Zolang het kanaal het karakter heeft van een laagdoorlaatfilter, zal het hoogfrequente gedeelte van het spectrum uitgefilterd worden.

