HET KARAKTERISEREN EN MODELLEREN VAN OPTO-ELEKTRONISCHE COMPONENTEN

Ir. Rob F.M. van den Brink
PTT Research, Leidschendam

THE CHARACTERIZATION AND MODELING OF OPTO-ELECTRONIC COMPONENTS

The increasing bandwidth of telecommunication networks is making increasingly stringent demands with regard to the design of broadband electronic circuits. This has resulted in a new specialism (broadband opto-electronics) composed of analog electronics, microwave electronics and optics.

The characterization of laserdiodes, photodiodes and transistors has become a vital aspect of broadband circuit design. This report describes some methods to measure electrical impedance, transfer of amplifiers, transfer of optical receivers and transmitters, noise of optical receivers and the FM-response of laserdiodes.

Bij de ontwikkeling van digitale en analoge glasvezeltransmissiesystemen is de beschikbaarheid van breedbandige schakelingen een voorwaarde, denk hierbij aan lasermodules, ruisarme optische ontvangers, en modulatie/demodulatie circuits. Dit soort schakelingen dienen signalen te kunnen verwerken tot in het GHz-gebied, met een bandbreedte van enige decaden.

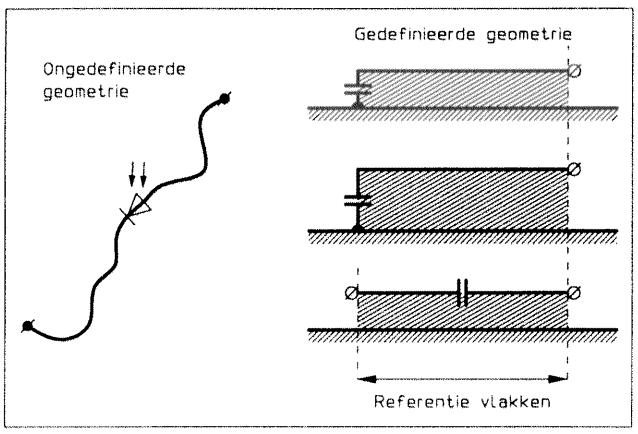
Om deze circuits te kunnen ontwerpen dienen vele component eigenschappen door meting bepaald te worden, hetzij om daaruit een model te extraheren, hetzij door de metingen in tabelvorm rechtstreeks te gebruiken in een circuitsimulator.

Aan de hand van een aantal voorbeelden van elektrisch-elektrische metingen (E/E) en optisch-elektrische metingen (O/E of E/O) zal een indruk gegeven worden van de ontwikkelomgeving zoals die op dit moment operationeel is bij PTT-Research.

1. ELEKTRISCHE IMPEDANTIE METINGEN

Een eerste voorbeeld is het bepalen van de impedantie van een laserdiode of een fotodiode. Bij lage frequenties is een fotodiode goed te benaderen door een capaciteit en heeft de wijze waarop deze in een schakeling gemonteerd is weinig invloed op die impedantie. Breedbandig gezien is de 'impedantie' zomaar ergens tussen de twee aansluitdraden een volstrekt ongedefinieerd begrip.

In figuur 1 zijn drie verschillende geometrieën getekend die allen verschillende impedanties bezitten bij gebruik van dezelfde condensator. Zowel de dikte van het printmateriaal als de keuze de condensator te aarden danwel te laten zweven heeft invloed. Om die reden is het zaak eenduidig vast te leggen op(tussen) welk(e) referentie vlak(ken) de impedantie bepaald moet worden. Wanneer de gekozen geometrie en het gebruikte printmateriaal niet lijkt op de wijze waarop straks de component gebruikt gaat worden, is de meting van beperkte waarde.



Figuur 1 Voor een breedbandige impedantiemeting dient de geometrie en de plaats van de meetvlakken eenduidig vastgelegd te worden.

Hoe is zoiets nu in praktijk te meten? De verbinding (coax kabel) tussen referentie vlak en een impedantie meter zal immers altijd de meting verstoren.

De foto in figuur 2 laat een praktijksituatie zien van een impedantiemeting aan een fotodiode die tegen de rand van een epoxy print is gemonteerd. Gevraagd de impedantie van de fotodiode precies ter plekke van de rand van het printmateriaal.

De impedantiemeter zal een (verkeerde) waarde aanwijzen die dominant beïnvloed wordt door de printbaan, de aansluitkabel en de coaxiale connector. Wanneer de meting herhaald wordt met een andere impedantie in dezelfde configuratie zal wederom een systematische meetfout gemaakt worden. Wanneer dit minimaal met drie bekende impedanties gedaan wordt (bijvoorbeeld 0 Ω, 50 Ω en ∞) is het mogelijk die systematische fout te reconstrueren uit hetgeen de impedantiemeter heeft aangewezen. Door de gehele meting onder computerbesturing te plaatsen kan met die gegevens de gevraagde fotodiode impedantie gereconstrueerd worden.

Figuur 3 toont het resultaat van een dergelijke impedantie meting tot 3 GHz. Aan de amplitude en fase karakteristiek is te zien dat de impedantie zich over een groot frequentie interval capacitief heeft gedragen. Bij hoge frequenties zijn er resonantie effecten waar te nemen die zich goed laten beschrijven met het ernaast getekende empirische model. Doordat in figuur 3 twee grafieken over elkaar heen getekend zijn (van het empirische model en van de gemeten data) die zeer goed blijken samenvallen, is te zien dat het empirische model in staat is het gedrag van de fotodiode te beschrijven.

2. E/E IMPEDANTIE METINGEN IN BIJZONDERE GEVALLEN

In het voorgaande voorbeeld is er gebruik gemaakt van een universeel toepasbaar printplaatje met bijbehorende referentie impedanties waarop verschillende componenten gemonteerd kunnen worden voor meetdoeleinden. In veel gevallen is dit bruikbaar, maar in sommige gevallen is dit onmogelijk.

De foto in figuur 4 toont zo'n situatie: een laser module, waarbij de laserchip tweezijdig optisch toegankelijk is, een elektrische (microstrip) aansluiting heeft en waarvan de temperatuur met een Peltier element en voeler geregeld kan worden. Om deze laserchip tot boven 5 GHz te kunnen moduleren is het zaak de chipimpedantie over die bandbreedte aan te passen aan de microstrip transmissielijn.

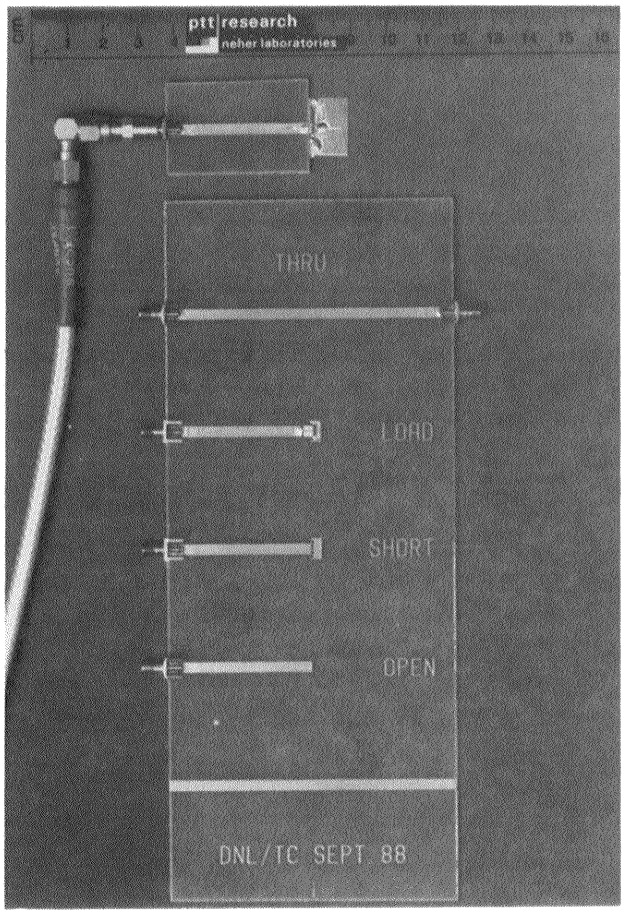


Foto 2 De impedantie van een fotodiode, gemonteerd tegen de rand van de bovenste printplaat kan bepaald worden door deze te vergelijken met drie bekende impedanties. De onderzijde is voorzien van een egaal aardvlak (Microstrip layout).

Om nu de chipimpedantie te meten *in deze specifieke configuratie* was het nodig, op basis van drie identieke printen de referentie impedanties te monteren op de plaats waar de laserchip gemonteerd is (zie foto in figuur 5). Op basis van een dergelijke impedantie meting kon een aanpasnetwerk berekend worden om de 50 ohm microstrip transmissielijn over de gewenste frequentieband lopend af te sluiten.

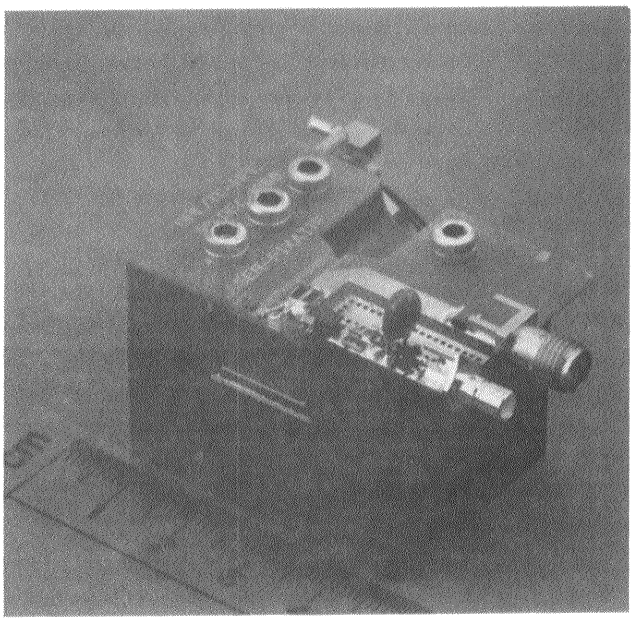
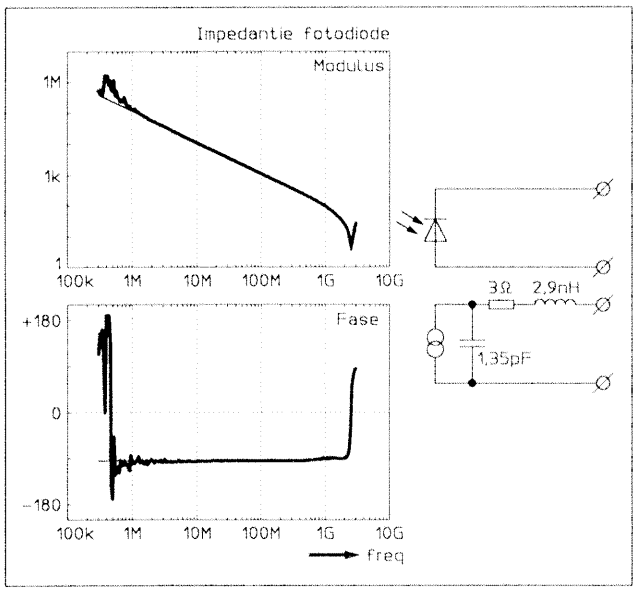


Foto 4 Voorbeeld van een breedbandige lasermodule.



Figuur 3 Twee impedantie grafieken over elkaar heen getekend, de gemeten impedantie en die van een empirisch model.

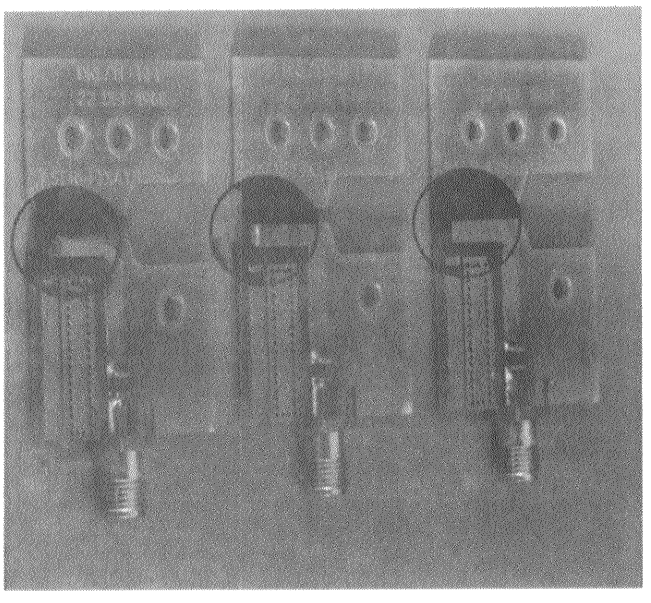


Foto 5 Op basis van de printlayout van een lasermodule is een calibratie set op maat geconstrueerd, met drie verschillende impedanties: een kortsluiting, een weerstand en een open uiteinde.

3. E/E TWEEPOORT OVERDRACHTSMETINGEN

Op dezelfde wijze als hiervoor beschreven kunnen in- en uitgangsimpedanties gemeten worden van bijvoorbeeld transistoren, en versterker IC's. De invloed van het meetsysteem op de meting van versterking en terugwerking kan eveneensrekenkundig geëlimineerd worden zodra de systematisch fout bekend is. Deze afwijking is te meten met behulp van een ideale doorverbinding, met lengte nul. Alles wat het meetsysteem anders aanwijst dan een versterking van 1 maal is dan te wijten aan de meetopstelling en hieruit kan de bijbehorende systematische afwijking gereconstrueerd worden.

Wanneer de foutcorrectie volledig wordt uitgevoerd zijn er vier onafhankelijke (complexe) getallen per frequentie te meten die tezamen het lineaire gedrag van de transistor *volledig* kunnen beschijven tussen twee goed gedefinieerde referentie vlakken. Dit heten tweepoortparameters.

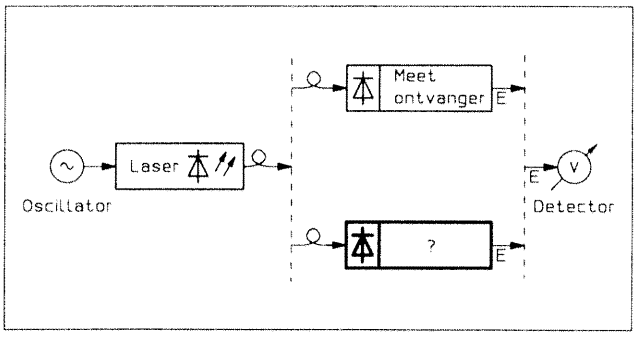
Een dergelijke volledige set tweepoortparameters is binnen een circuit simulator goed te combineren met modellen van eenvoudiger componenten zoals weerstanden, capaciteiten en transmissielijnen. Het gedrag van een te ontwerpen schakeling is dan goed te voorspellen.

Wanneer de invloed van de printlayout van een schakeling veroorzaakt dat simulatie en werkelijkheid onvoldoende overeenkomst vertonen dan kan, in hardnekkige gevallen, circuit stripping een uitkomst bieden (zie foto in figuur 6). In dat voorbeeld is een komplete optische ontvanger (breedbandig tegengekoppeld over drie trappen tegelijk) in vier stukken geknipt. Vervolgens zijn de afzonderlijke versterker trappen en het tegenkoppelnetwerk tussen goed gedefinieerde referentievlakken gekarakteriseerd. In de simulator is er daarna weer een komplete ontvanger van gemaakt. Door successievelijk steeds meer delen in de simulator stap voor stap te vervangen door modellen, en net zolang door te gaan totdat de simulatie teveel van de werkelijkheid blijkt te verschillen, is het probleem te localiseren.

4. O/E OVERDRACHTSMETINGEN

Zodra de elektronische zijde van een optische ontvanger gerealiseerd is, is het wenselijk de totale overdracht te meten, gerekend vanaf de optische ingang tot en met de elektrische uitgang. Wanneer deze wordt aangestuurd vanuit een optische zender (laser diode) met een frequentie onafhankelijke overdracht, is het probleem te reduceren tot een E/E overdrachtsmeting. Bij een paar GHz aan bandbreedte is dit vrijwel onmogelijk en kan de meetopstelling in figuur 7 gebruikt worden. De gevraagde karakteristiek kan gereconstrueerd worden door de totale gemeten E/E overdracht met de onbekende ontvanger te vergelijken met een identieke meting op basis van een meetontvanger met bekende frequentiekarakteristiek.

Deze methode is handig in gebruik, doch vereist een (eenmalige) karakterisatie van de meetontvanger. Figuur 8 toont twee methoden waarbij de E/O overdracht van de lasers geen rol meer spelen, en daardoor zeer geschikt zijn voor eenmalige calibratie van meetontvangers.



Figuur 7 Een overdrachtsmeting van optische ontvangers gebaseerd op een vergelijkende meting aan een meetontvanger met bekende overdracht.

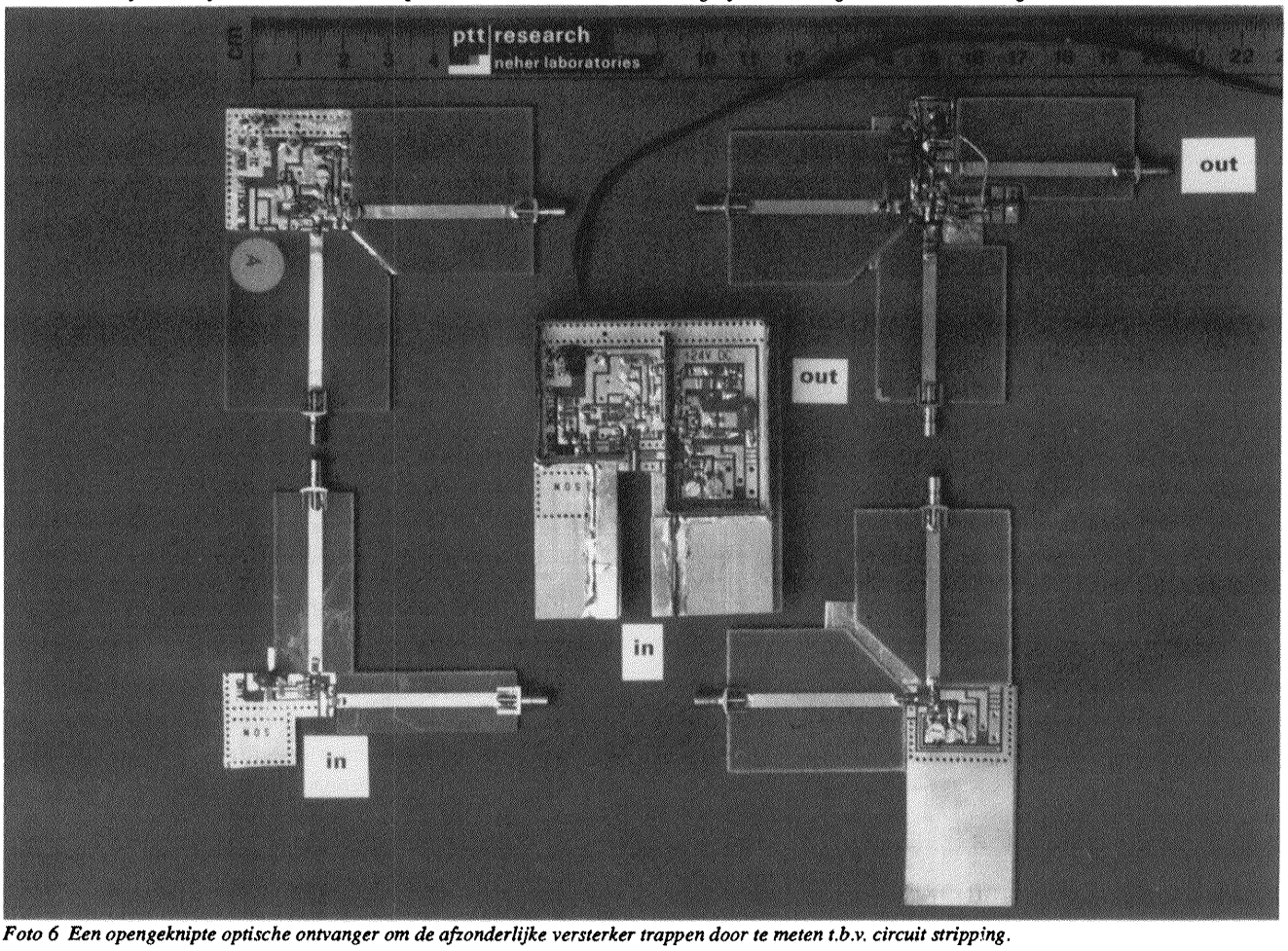
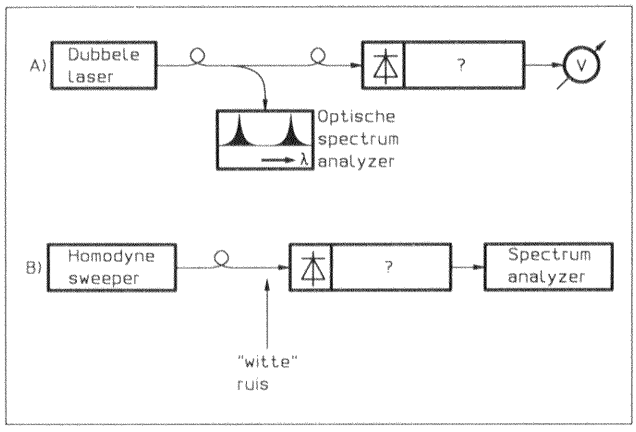


Foto 6 Een opengeknipte optische ontvanger om de afzonderlijke versterker trappen door te meten t.b.v. circuit stripping.



Figuur 8 Twee verschillende meetprincipes om de overdracht van een optische ontvanger te bepalen zonder dat de frequentie karakteristiek van de lasers relevant zijn. (A = heterodyne methode, B = homodyne methode).

Bij een heterodyne overdrachtsmeting (figuur 8a) worden er twee lasers gebruikt die een constant optisch vermogen afgeven, doch met iets verschillende optische frequentie. Beide optische signalen komen bij de te meten ontvanger aan en de fotodiode ter plaatse geeft een stroom af die recht evenredig is met het opvallend optische vermogen. Die overdracht is dus kwadratisch evenredig met de opvalende optische veldsterkte en derhalve niet-lineair.

Ten gevolge van deze niet-lineaire overdracht is de fotodiode op te vatten als een mixer met optische ingangen en een elektrische middenfrequent uitgang. De som frequentie van beide optische signalen is zo hoog dat deze waarschijnlijk alleen in een gedachte experiment zal bestaan, doch een stroom met de optische verschilfrequentie kan gemakkelijk de fotodiode verlaten en door de optische ontvanger versterkt worden. Door de temperatuur van een der lasers iets te veranderen is hun verschil frequentie verstembaar van nul tot een paar honderd GHz zonder dat de amplitude ervan merkbaar verandert (ongeveer 100 GHz per Kelvin variatie).
Op deze wijze is een optische ontvanger door te meten bij meerdere (verschil) frequenties en kunnen alle geregistreerde frequentie afhankelijke amplitude variaties aan de uitgang toegeschreven worden aan de frequentie karakteristiek van de ontvanger.

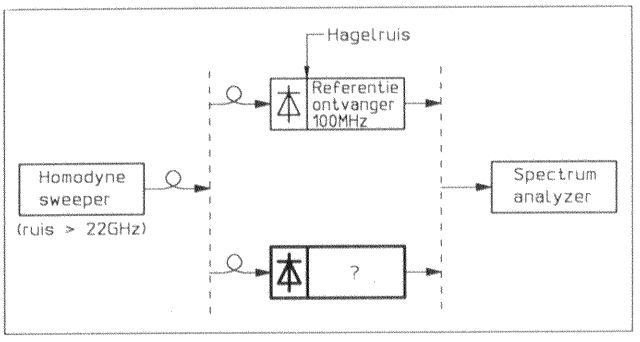
Bij een homodyne meting (figuur 8b) wordt er eveneens gebruik gemaakt van coherente menging, doch is een enkele laser al voldoende. Deze dient dan (zwak) in optische frequentie gemoduleerd te worden met een frequentie zwaai, minimaal ter grootte van de doorlaatband van de te meten optische ontvanger. Denk bijvoorbeeld aan 10 MHz modulatie frequentie en 50 GHz frequentiezwaai.

Wanneer vervolgens het licht in twee glasvezels gesplitst wordt van ongelijke lengte en daarna weer samengevoegd wordt, dan zijn twee FM gemoduleerde optische signalen het gevolg die niet gelijktijdig dezelfde optische frequentie zullen bezitten. Zodra dit samengestelde signaal aangeboden wordt aan de te karakteriseren meetontvanger zal er wederom coherente menging optreden. Het ontvangen signaal lijkt afkomstig te zijn van een zwaaigenerator, doch met, voor elektrische begrippen, ongekend grote frequentie zwaai en repeteer frequentie. Wanneer de spectrale zuiverheid van de laser voldoende gering is lijkt het alsof alle frequenties aanwezig zijn en zal het ontvangen signaal niet meer van echte witte ruis te onderscheiden zijn. Alle afwijkingen van een vlak spectrum die een elektrische spectrumanalyzer aan de uitgang registreert kunnen dan toegeschreven worden aan de frequentiekarakteristiek van de optische ontvanger.

5. O/E RUISMETINGEN

Een ander belangrijk kwaliteitsaspect van optische ontvangers is het ruisgedrag. Wanneer deze alleen voor een specifiek digitaal transmissiesysteem wordt gebruikt is het vaak voldoende te meten bij welk optisch vermogen er een bitfoutkans van BER=10^{-9} optreedt, en zo een indruk te krijgen van de ontvanger gevoeligheid. Algemener toepasbaar is een spectrale meting van de equivalente ingangsruis, gespecificeerd in bijvoorbeeld pW/$\sqrt{\text{Hz}}$. Hierbij wordt de totale ruis in gedachte voorgesteld door een onafhankelijk optische bron, gemoduleerd met ruis, waarvan de spectrale componenten frequentie afhankelijk kunnen zijn.
Bij elektrische versterkers spreekt men van de equivalente ruisstroom (bijvoorbeeld in pA/$\sqrt{\text{Hz}}$) en zijn er vele meetmethoden beschikbaar. Een veel gebruikte meetmethode is gebaseerd op een verhoudingsmeting van de onbekende versterker ruis met de bekende ruis afkomstig van een gecalibreerde witte ruisbron. Figuur 9 toont een optische variant op die methode.

Als witte (optische) ruisbron kan de homodyne sweeper dienen die tijdens de voorgaande meting besproken is. De ruis kan wit zijn tot ver boven de 20 GHz en via een glasvezel aan iedere willekeurige optische ontvanger aangeboden worden. Door de optische bron aan en uit te schakelen, en met een spectrumanalyzer de relatieve toename van de uitgangsruis van de ontvanger te meten, is het spectrale verloop van de equivalente ingangsruis rekenkundig te reconstrueren. De frequentiekarakteristiek van de ontvanger speelt bij deze verhoudingsmeting geen enkele rol.
Voor schaling naar absolute waarden dient de spectrale ruisdichtheid van de optische bron bekend te zijn. Doordat de opgewekte synthetische ruis wit is, is het voldoende deze te ijken binnen een smal frequentie bandje en bij relatief lage frequenties. Hiervoor wordt een tweede (referentie) ontvanger gebruikt met ingebouwde elektrische ruisbron (hagelruis opgewekt in een aparte fotodiode belicht door een gloeilamp).



Figuur 9 De te meten ruis van een optische ontvanger kan vergeleken worden met witte optische ruis die vooraf gecalibreerd is in een aparte referentie ontvanger.

6. E/O METING VAN LASER FM RESPONSIE

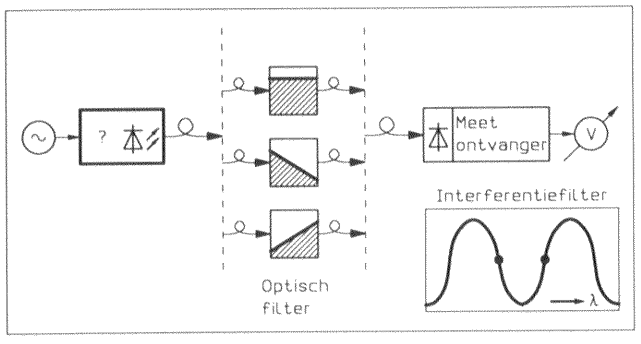
Naast intensiteitsmodulatie van het licht is het ook mogelijk de optische frequentie of de fase van het licht te moduleren voor de transmissie van informatie. Deze modulatievorm is ongeschikt voor de huidige directe detectie glasvezelsystemen doch biedt een aantal voordelen in toekomstige coherente detectie systemen.

De optische frequentie van een laserdiode is te verstemmen door de chip temperatuur en/of de gelijkstroom instelling iets te wijzigen (een frequentie zwaai in de orde van 100 GHz per Kelvin of 500 MHz per mA variatie).

Met de instelstroom is een laser tot een paar GHz in frequentie te moduleren doch de responsie is sterk afhankelijk van de modulatie frequentie. Wanneer deze responsie door meting nauwkeurig bekend is, kan er, in samenhang met de gemeten laserimpedantie, een egaliserend elektrisch netwerk ontworpen worden die dit effect teniet doet.

In figuur 10 is het meetprincipe getekend. De te meten frequentie variatie (FM) wordt met behulp van optische filters omgezet in een intensiteits variatie (IM) die gedetecteerd wordt met een meetontvanger. De meetopstelling detecteert echter ook de parasitaire intensiteitsvariaties (im) van de laser die gepaard gaan met zijn frequentiemodulatie. Om dit effect te kunnen elimineren wordt de meting tweemaal uitgevoerd, eenmaal met een optisch filter met positieve helling (im+IM) en eenmaal met een optisch filter met negatieve helling (im-IM). De gewenste (FM) component die gerelateerd is aan de (IM) component is naderhand rekenkundig uit beide metingen te reconstrueren.

In praktische gevallen is het alleen mogelijk optische filters te maken die binnen een beperkt frequentie interval de gewenste hellingeigenschap bezitten. In de inzet van figuur 10 staat de overdracht van een interferentie filter getekend waarmee de gewenste helling in een band van een paar GHz te realiseren is.



Figuur 10 Met een optisch filter kan een FM responsie meting gereduceerd worden door een overdrachtsmeting.

7. SABEL-CAE ONTWIKKEL OMGEVING

De combinatie van breedbandig en hoogfrequent maakt dat een gevoelsmatige, hoofdzakelijk empirische ontwerpaanpak van opto-elektronische circuits niet meer voldoende is. Systematisch gestructureerd ontwerpen is in die gevallen een vereiste.

Om deze ontwerpaanpak goed in praktijk te kunnen brengen is het zaak diverse eigenschappen van de te gebruiken componenten door meting te bepalen. Uit de voorgaande voorbeelden blijkt dat veel breedbandige metingen alleen uitvoerbaar zijn in combinatie met (computer) signaalbewerking, bijvoorbeeld om systematische meetfouten te kunnen elimineren.
In eenvoudige gevallen wordt de computer alleen gebruikt om gemeten data te transformeren in de gewenste vorm. Bij zeer routinematige metingen, zoals impedantie en overdrachtmetingen, wordt de benodigde signaalbewerking zelfs geheel binnen het meetinstrument uitgevoerd (bijvoorbeeld in Network Analyzers).

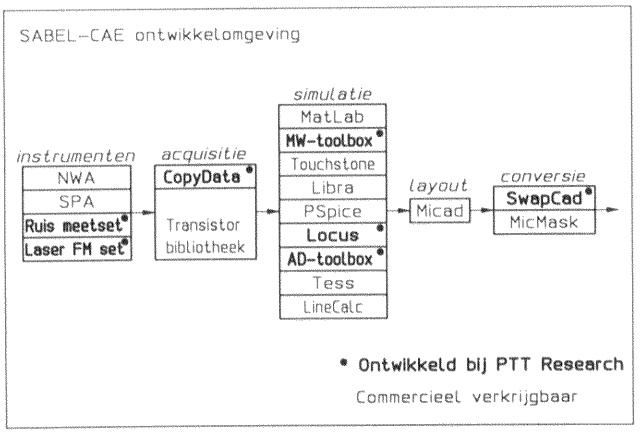
In gecompliceerde gevallen is een aparte computer nodig, met handmatige begeleiding. Het iteratief terugwinnen van transistorparameters uit gemeten data en het in paragraaf 3 beschreven circuit strippen zijn daarvan goede voorbeelden. Wanneer modellen van bijvoorbeeld transistoren ontbreken, kunnen sommige circuitsimulatoren de meetresultaten rechtstreeks in tabelvorm combineren met modellen van andere componenten.

Dankzij uitvoerige metingen kunnen circuitsimulaties veel doelmatiger en volledige zijn, en kan een ontwerpcyclus zich geheel concentreren rond een klein en kritisch fragment van de schakeling. Hierdoor is het mogelijk geworden schakelingen te realizeren met specificaties nabij het fysisch haalbare. Het intensief gebruik van metingen heeft een dimensie toegevoegd aan de bestaande ontwerp methodieken:

- (1e): alleen handmatig rekenen
- (2e): computer simulatie: alleen (geschatte) modellen
- (3e): computer simulatie: modellen en gemeten tabellen

Een 3e generatie ontwerpaanpak is in praktijk alleen uitvoerbaar indien de ontwerper de beschikking heeft over een uitvoerige ontwikkelomgeving. Bij PTT-Research is daartoe het SABEL-CAE systeem ontwikkeld, voor de Synthese en Analyse van Breedbandige ELektronica op basis van Computer Assisted Engineering.

Figuur 11 laat zien dat het geheel geconcentreerd is rond een verzameling meetinstrumenten (waaronder Network en Spectrum Analyzers) en een assortiment simulatoren. Met data acquisitie software zijn de meetinstrumenten onder computer besturing gebracht en kunnen hun meetresultaten aangeboden worden aan diverse simulatie programma's. Doordat het vakgebied breedbandige opto-elektronica nog volop in ontwikkeling is en de aangekochte simulatoren onderling verre van compatibel zijn is een groot deel van de hard- en software geheel ontwikkeld binnen PTT-Research.



Figuur 11 Blokschema van de SABEL-CAE ontwikkelomgeving.

8. CONCLUSIES

Intensief meten heeft een 3e generatie ontwerpaanpak mogelijk gemaakt. Hierdoor kunnen computer simulaties veel volledig en doelmatiger zijn en kan de ontwerper zich geheel toespitsen op de kritische fragmenten van een schakeling. Een uitgebreide ontwikkelomgeving waarin meten, data-acquisitie en computersimulatie gecombineerd zijn is daarvoor vitaal.
Bekende elektrische meetprincipes blijken geschikt te zijn voor nieuwe optische meetmethoden. Doordat een bandbreedte van een paar GHz voor optische componenten relatief gering is, zijn sommige optische principes zelfs beter geschikt voor breedbandige elektrische metingen dan traditionele elektrische oplossingen.

Hoewel er steeds meer en meer elektro/optische meetinstrumenten commercieel verkrijgbaar zijn is de ontwikkeling van nieuwe E/O meetinstrumenten nog in volle gang.

Voordracht gehouden tijdens de 400e werkvergadering.

NEDERLANDS ELEKTRONICA- EN RADIOGENOOTSCHAP
AUDIO ENGINERING SOCIETY
397e werkvergadering

UITNODIGING voor de lezingen- en demonstratieavond op woensdag 11 maart 1992 in vergadercentrum 'Hoog Brabant' in het Radboudkwartier van 'Hoog Catherijne' te Utrecht.

THEMA: DIGITAL COMPACT CASSETTE (DCC)

Dit is een herhaling van werkvergadering 392 in november 1991, waarvoor veel aanmeldingen niet gehonoreerd konden worden.

PROGRAMMA:

19.00 - 19.15 uur: Ontvangst, koffie en thee

19.15 - 19.45 uur: Commerciële uitgangspunten van DCC
IR. R. ROTH, Philips Consumer Electronics

19.45 - 20.15 uur: Technische aspecten van DCC
IR. G. C. P. LOKHOFF, Philips Consumer Electronics

20.15 - 20.30 uur: **DEMONSTRATIE DCC**

20.30 - 21.00 uur: **RONDVRAAG EN SLUITING.**

Aanmelding voor deze avond dient te geschieden vóór 4 maart aanstaande door middel van de aangehechte kaart, gefrankeerd met een postzegel van 60 cent.

Het aantal deelnemers is beperkt tot 180. Tijdstip van ontvangst van aanmelding is beslissend voor deelname. Als blijkt dat u wegens overtekening niet kunt deelnemen, ontvangt u hierover van ons bericht.

Leden van NERG alsmede AES en studenten hebben gratis toegang. De kosten van deelname voor niet-leden bedragen f 15,00. Betalingen dienen vóór 4 maart te zijn ontvangen op girorekening 94746 t.n.v. Penningmeester NERG, Postbus 39, 2260 AA Leidschendam.
Deelnemers dienen de uitnodigingskaart mee te nemen en op verzoek te tonen bij de toegang tot de zaal.

Namens de samenwerkende verenigingen,
Dr. Ir. J. W. M. Bergmans, NERG
Tel. 040 - 743689
Ir. P. R.J. M. Smits, NERG
Tel. 070 - 332 36 00

Eindhoven, februari 1992.