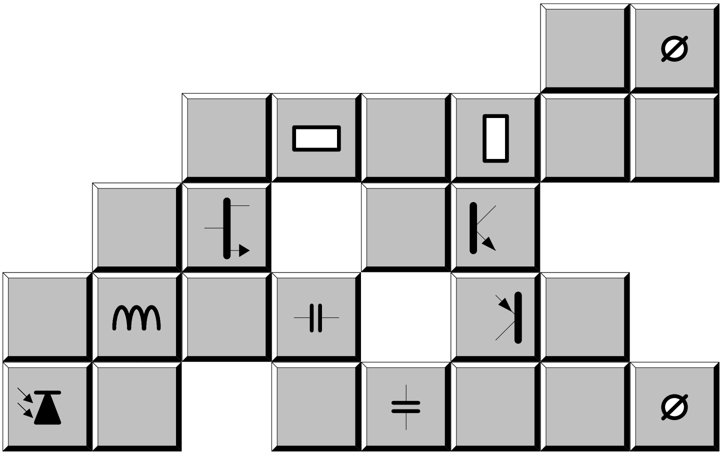
Rob van den Brink

Low-noise Wideband Feedback Amplifiers

an integrated approach to
characterization and design using
microwave and lightwave techniques



Low-noise Wideband Feedback Amplifiers

an integrated approach to characterization and design using microwave and lightwave techniques

ruisarme, breedbandig tegengekoppelde versterkers
een geïntegreerde aanpak van karakteriseren en ontwerpen
op basis van microgolf en optische technieken

Proefschrift

ter verkrijging van de graad van doctor
aan de Technische Universiteit Delft
op gezag van de Rector Magnificus Prof. ir. K.F. Wakker
in het openbaar te verdedigen ten overstaan van een commissie,
door het College van Dekanen aangewezen,
op dinsdag 22 november 1994 te 16.00 uur.

door

Robertus Franciscus Maria van den BRINK

elektrotechnisch ingenieur,
geboren te Oegstgeest

Dit proefschrift is goedgekeurd door de promotor:
Prof. dr. ir. R.G.F. Baets

Als toegevoegd promotor treedt op: :
J.L. Tauritz, M.Sc.

CIP-DATA KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Brink, Robertus Franciscus Maria van den

Low-noise wideband feedback amplifiers: an integrated approach to characterization and design using microwave and lightwave techniques / Robertus Franciscus Maria van den Brink - Leidschendam: PTT Research.
Thesis Technische Universiteit Delft. - With ref. - With summary in Dutch.
ISBN 90-72125-48-7 bound
Subject headings: analog electronic systems / amplifiers.

copies of this thesis can be ordered from the secretary of:

PTT Research
P.O. Box 421
2260 AK Leidschendam
The Netherlands

Contents

Summary

Summary in English

The design of wideband amplifiers with ultimate performance requires a radical change of approach. The cumulation of all minor imperfections of individual devices often causes a dramatically reduction of the overall performance. These imperfections (parasitics) are taken into account from the very beginning; so definitely not marginally as it is commonly done.

This thesis introduces innovative methods and tools to facilitate the application of *higher-order* feedback, over *several* amplifying stages, in the presence of deleterious parasitics. Much attention is paid on (1) formal descriptions of transfer, feedback and noise, (2) characterization methods of devices and sub-circuits and (3) design methods for compensation networks in feedback loops.

Formal description of transfer, feedback and noise

The formal descriptions provide unambiguous definitions of (a) multi-port y-, z- and s-parameters, (b) superposition parameters of feedback loops, such as loopgain and aperture, (c) noise spectra and (d) noise parameters. Signal representations, in terms of voltages, currents or waves, are discussed simultaneously.

The concept of virtual circuits is formalized for transfer as well as noise to simplify parameter extraction of device models. Algorithms are described for analyzing transfer and noise properties of arbitrary linear networks. We illustrate, for instance, how to calculate the thermal noise levels in *multi-port* networks from transfer measurements.

Characterization of transfer

Characterization enables the quantification of parasitic effects in terms of (a) multiport transfer parameters, (b) equivalent circuit models, and (c) poles and zeros. This thesis describes methods for measuring these device parameters between well-defined reference planes. A structured method is discussed for tracing relevant parasitics using these measurements (circuit stripping).

Algorithms have been developed for (a) extracting poles and zeros from transfer functions, and (b) reconstructing equivalent circuit models from full one- or two-port measurements.

These algorithms demonstrate that adequate (linear) modeling of transistors does not necessarily result in exotic and complicated transistor models. This approach has, for instance, resulted in a new (small-signal) bipolar transistor model, that is more appropriate to wideband analysis and synthesis than the well-known hybrid-Π model.

Characterization of noise

The development of a new instrument, a lightwave *synthetic noise generator*, has facilitated the application of new methods of noise characterization. Our source generates white noise using *lightwave* principles, and has many advantages with respect

to conventional 50 Ω noise sources. The noise bandwidth of this source can be varied simply, exceeding 10 GHz in bandwidth (hundreds of GHz are feasible).
Novel instruments, principles and algorithms have been developed for (a) calibration of noise sources, (b) noise measurement of electrical and *optical* receivers, and (c) measurement of transistor noise parameters. The feasibility of our measurement methods is demonstrated in practice.

Feedback design
Parasitic effects degrade the dominant behavior of feedback loops. Characterization supplies the parameters for analyzing this degradation, e.g. in a circuit simulator. Adequate compensation networks can minimize this degradation. There is, however, in general no all-embracing answer to the question of how to design these compensation networks, particularly not in combination with harmful parasitics.
This thesis study resulted in robust algorithms for predicting the frequency response of these compensation networks, in terms of poles and zeros. These algorithms are suitable for implementation in (future) circuit simulators. Realistic examples up to 3 GHz demonstrate the effectiveness of our approach.

An integrated approach
All of these methods and tools have contributed to a closer integration of the fields of analog electronics and microwave techniques. The need for an integrated approach to characterization and design finds its origin in the fact that well-known suppression methods of parasitic effects become ineffective in the case of wide bandwidths. It required an in-depth *return to the basics* to combine various methods.
We have carried out an in-depth study of wideband lightwave receivers, resulting in various low-noise receivers using discrete 'low-cost' components. Overall feedback loops spanning two and even three amplifier stages, have been realized with bandwidths exceeding 1 GHz. The applicability of the methods proposed in this thesis have hereby been proven in practice.

(328 pages)

Summary in Dutch

Het ontwerpen van breedbandige versterkers tot op de rand van hetgeen fysisch haalbaar is vereist een radicale verandering van aanpak. De optelsom van alle kleine onvolkomenheden in individuele componenten veroorzaakt vaak een dramatische reductie van de totale kwaliteit. Deze onvolkomenheden (parasitieten) dienen vanaf het eerste begin volledig in rekening gebracht te worden; dus zeker niet marginaal zoals meestal gedaan wordt.
Dit proefschrift ïntroduceert innovatiove methoden en gereedschappen om *hogere-orde* tekenkoppeling in praktijk te brengen, dus over meerdere versterker trappen tegelijk, onder invloed van hinderlijke parasieten. Veel aandacht is besteed aan (1) formele beschrijvingen van overdracht, tegenkoppeling en ruis, (2) karakterisatie methoden van componenten en sub-circuits, en (3) ontwerp methoden voor compensatie netwerken in tegenkoppellussen.

Formele beschrijving van overdracht, tegenkoppeling en ruis
De formele beschrijvingen leveren ondubbelzinnige definities op van (a) multipoort y-, z- en s-parameters, (b) superpositie parameters van tegenkoppellussen, waaronder lusversterking en apertuur, (c) ruisspectra en (d) ruisparameters. Signaal representaties, in termen van spanningen, stromen en golven zijn simultaan besproken.
Het concept van virtuele circuits is geformaliseerd voor zowel overdracht als ruis om parameter extractie van transistormodellen te vereenvoudigen. Algoritmen zijn ontwikkeld voor het analyseren van overdracht- en ruiseigenschappen van willekeurige lineaire netwerken. Zo laten we bijvoorbeeld zien hoe thermische ruisniveaus in multi-poort netwerken berekend kunnen worden uit overdrachtsmetingen.

Karakterisatie van overdracht
Karakterisatie maakt het mogelijk parasitaire effecten te kwantificeren in termen van (a) multipoort overdrachts parameters, (b) equivalente circuit modellen, en (c) polen en nulpunten. Dit proefschrift beschrijft methoden voor het meten van deze parameters tussen goed gedefinieerde referentievlakken. Een gestructureerde methode is besproken voor het opsporen van relevante parasieten op basis van deze meetmethoden (circuit stripping).
Er zijn algoritmen ontwikkeld voor (a) het extraheren van polen en nulpunten uit overdrachtsfuncties, en (b) voor het reconstrueren van equivalente circuit modellen uit volledige een- of tweepoort metingen. Deze algoritmen laten zien dat een goede (lineaire) modelering van transistoren niet noodzakelijk resulteert in exotische en gecompliceerde transistor modellen. Deze aanpak heeft bijvoorbeeld een nieuw (klein-signaal) bipolair transistor model opgeleverd, dat veel beter geschikt is voor breedbandige analyse en synthese dan het bekende hybride-Π model.

Karakterisatie van ruis
De ontwikkeling van een nieuw instrument, een *synthetische ruisgenerator*, heeft de toepassing van nieuwe ruiskarakterisatie methoden mogelijk gemaakt. Onze bron genereert witte ruis op basis van *optische* principes, en heeft vele voordelen ten opzichte van conventionele 50 Ω ruisbronnen. Zo is de ruisbandbreedte van deze bron eenvoudig te varieren, tot meer dan 10 GHz bandbreedte (vele honderden GHz zijn mogelijk).

Nieuwe instrumenten, principes en algoritmen zijn ontwikkeld voor (a) het calibreren van ruisbronnen, (b) ruismetingen aan elektrische en *optische* ontvangers, en (c) het meten van transistor ruisparameters. De toepassing van onze meetmethoden is in de praktijk getoetst.

Ontwerp van tegenkoppelingen
Parasitaire effecten degraderen het dominante gedrag van tegenkoppellussen. Karakterisatie levert de parameters voor het analyzeren van deze degradatie, bijvoorbeeld met een circuitsimulator. Goede compensatie netwerken kunnen deze degradatie minimaliseren. Er bestaat echter geen alomvattend antwoord op de vraag hoe deze compensatie netwerken ontworpen moeten worden, met name niet in combinatie met hinderlijke parasieten.
Dit promotieonderzoek heeft robuste algoritmen voortgebracht voor het voorspellen van de frequentiekarakteristiek van compensatie netwerken, in termen van polen en nulpunten. Deze algoritmen zijn geschikt voor implementatie in (toekomstige) circuitsimulatoren. Realistische voorbeelden tot 3 GHz tonen de kracht van onze aanpak aan.

Een geïntegreerde aanpak
Al deze methoden en gereedschappen hebben de vakgebieden van analoge elektronica en microgolftechniek dichter bij elkaar gebracht. De noodzaak van een geïntegreerde aanpak van karakteriseren en ontwerpen komt voort uit het feit dat bekende onderdrukkings principes van parasitaire effecten tekort schieten bij het ontwerpen van zeer breedbandige schakelingen. Het vereiste een grondige *terug-naar-het-begin* aanpak om verschillende methoden te kunnen combineren.
We hebben veel onderzoek verricht naar breedbandige optische ontvangers, hetgeen geresulteerd heeft in verschillende ontvangers op basis van goedkope discrete componenten. Algehele tegenkoppeling, over twee tot drie versterkertrappen tegelijk, is gerealiseerd voor bandbreedtes tot voorbij 1 GHz. De methoden die ontwikkeld zijn in het kader van dit proefschrift hebben zich hiermee in de praktijk bewezen.

(328 pagina's)