

KATHOLIEKE UNIVERSITEIT LEUVEN
FACULTEIT TOEGEPASTE WETENSCHAPPEN
DEPARTEMENT ELEKTROTECHNIEK
Kasteelpark Arenberg 10, 3001 Leuven (Heverlee)

SUBBAND AND FREQUENCY–DOMAIN ADAPTIVE FILTERING TECHNIQUES FOR SPEECH ENHANCEMENT IN HANDS–FREE COMMUNICATION

Promotor:
Prof. dr. ir. M. Moonen

Proefschrift voorgedragen tot
het behalen van het doctoraat
in de toegepaste wetenschappen

door

Koen ENEMAN

Maart 2002

©Katholieke Universiteit Leuven – Faculteit Toegepaste Wetenschappen
Arenbergkasteel, B-3001 Heverlee (Belgium)

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotocopie, microfilm, elektronisch of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

All rights reserved. No part of the publication may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm or any other means without written permission from the publisher.

D/2002/7515/03

ISBN 90-5682-337-X

Korte Inhoud

De telecommunicatiesector wordt gekenmerkt door een toenemende vraag naar gebruiksvriendelijkheid en interactiviteit. Dit verklaart de interesse in handenvrije communicatiesystemen vandaag de dag. In de meeste handenvrije systemen is de signaalkwaliteit echter ontoereikend. Om hieraan te verhelpen wordt een beroep gedaan op geavanceerde signaalverwerkingstechnieken zoals het subband- en het frequentiedomeingebaseerde adaptieve filter. Deze algoritmen zijn gekend om hun lage rekencomplexiteit en maken gebruik van frequentie–afhankelijke en adaptieve technieken. Bijgevolg zijn ze uitermate geschikt voor de verwerking van systemen en signalen met sterk variërende karakteristieken, zoals akoestische impulsresponsies en spraak.

In dit proefschrift worden subband- en frequentiedomeingebaseerde adaptieve filtertechnieken bestudeerd voor de kwaliteitsverbetering van handenvrije systemen. De tekst bestaat uit vier delen. Het eerste deel handelt over het ontwerp van DFT–gemoduleerde filterbanken die voldoen aan een voorwaarde van perfecte of quasi–perfecte reconstructie. In deel II worden subband- en frequentiedomeingebaseerde adaptieve filters bestudeerd. Het subbandadaptieve filter en het PBFDAF–algoritme worden achtereenvolgens besproken. Het verband tussen beide technieken wordt onderzocht en een nieuw adaptatieschema voor subbandadaptieve filters wordt voorgesteld. Deel III handelt over het PBFDRAP–adaptieve filter, dat een uitbreiding is van het PBFDAF–algoritme. Het PBFDRAP–algoritme wordt geanalyseerd en enkele snelle varianten worden afgeleid. In het laatste deel van het proefschrift wordt aangetoond dat de algoritmen uit deel I–III succesvol kunnen toegepast worden in een reële akoestische–echo–onderdrukkingssetup.

Samenvatting

Subband- en frequentiedomeingebaseerde adaptieve filtertechnieken voor de kwaliteitsverbetering van handenvrije systemen

Hoofdstuk 1 : Inleiding

De telecommunicatiesector is gedurende de voorbijgaande jaren uitgegroeid tot een van de belangrijkste economische actoren. Zo werd het jaarlijkse revenu van de globale telecommunicatiemarkt in 1996 geschat op 645 miljard US–dollar. In 2002 hoopt men de kaap van 1000 miljard dollar te overstijgen [85]. De enorme expansie van deze sector is mede te danken aan een voortdurend streven naar innovatie en optimalisatie, wat zich onder andere weerspiegelt in de vraag naar meer gebruiksvriendelijkheid en interactiviteit. Dit verklaart de interesse in *handenvrije systemen* vandaag de dag. Gezien de economische impact en de interesse in deze technieken mogen we ons in de nabije toekomst verwachten aan een stijgende belangstelling in handenvrije telecommunicatiesystemen en aan een toenemende vraag naar vernieuwend en productgericht onderzoek in dit domein. Men verwacht dat de wereldwijde markt van handenvrije communicatie kan groeien van 3 miljard dollar vandaag de dag tot meer dan 9 miljard dollar in de volgende vijf jaren [151].

In de meeste handenvrije communicatiesystemen is de signaalkwaliteit ontoereikend. Hiervoor kunnen verschillende oorzaken worden aangeduid. Om hieraan te verhel-

pen werden de laatste jaren allerhande signaalverwerkingstechnieken ontwikkeld. Hoewel deze algoritmen aanleiding geven tot een verhoogde signaalkwaliteit, is hun performantie veelal beperkt.

Onder "handenvrije communicatie" ressorteert een veelheid aan toepassingen. Het meest in het oog springend is wellicht *handenvrije telefonie*. In vele landen is mobiel bellen vanuit de wagen namelijk verboden tenzij men gebruik maakt van een handenvrije set. De motivatie voor de regelgeving hieromtrent steunt op de vaststelling dat de aandacht van de bestuurder wordt afgeleid wanneer hij of zij mobiel belt. Hoewel zowat 65 percent van alle mobiele telefoongesprekken in de Verenigde Staten gevoerd worden vanuit de wagen of een ander transportmiddel [25] gebruikt slechts 15 percent van hen een handenvrije set. Men verwacht dan ook dat de vraag naar handenvrije sets in de nabije toekomst sterk zal toenemen.

Hierbij moet men wel de volgende kanttekening maken. Het blijkt namelijk dat slechts 1,5 percent van de ongevallen in de Verenigde Staten veroorzaakt wordt door mobiel bellen in de wagen. Daarentegen is bijna 30 procent te wijten aan een verslapte aandacht door allerhande uitwendige factoren, wat het belang van handenvrije systemen misschien enigszins relativeert. Men moet daarbij wel bedenken dat in tegenstelling tot de Verenigde Staten, handmatig schakelen nog steeds erg populair is in Europa. Het is duidelijk dat veranderen van versnelling, sturen en het hanteren van een klassieke mobiele telefoon in de wagen moeilijk combineerbaar zijn. Dit verantwoordt wel degelijk de wijzigingen die verschillende EU–landen recent hebben aangebracht in hun wetgeving, waardoor het gebruik van handenvrije sets in de wagen verplicht werd.

Handenvrije technieken worden behalve in de telefonie ook in *teleconferentiesystemen* gebruikt. Teleconferentie is erg populair in de zakenwereld, waar meerdere mensen tegelijkertijd met elkaar wensen te interageren vanuit verschillende, geografisch verspreide locaties. Ieder neemt hierbij vanuit zijn eigen kantoor deel en staat via een telecommunicatieverbinding met de anderen in contact. Op deze wijze worden nodeloze verplaatsingen vermeden, wat leidt tot tijdswinst en een aanzienlijke kostenbesparing.

Spraakgestuurde systemen vinden meer en meer ingang in ons dagelijks leven, zowel thuis als op het werk. We denken dan bijvoorbeeld aan de automatische conditionering van een woonkamer (licht, verwarming, gordijnen), stemgestuurde huishoudelijke apparaten, HiFi–installaties of computersoftware, een stemgecontroleerde bediening van de radio en telefoon in de wagen, ... Ook deze spraakgestuurde systemen maken veelal gebruik van handenvrije technieken.

In dit proefschrift worden *subband- en frequentiedomeingebaseerde adaptieve filtertechnieken* bestudeerd. We zullen aantonen dat deze signaalverwerkingsalgoritmen gebruikt kunnen worden om de signaalkwaliteit in handenvrije communicatiesystemen te verbeteren en een vlottere communicatie toe te laten.

Dit proefschrift is onderverdeeld in vier delen. In deel I, II en III worden een aantal subband- en frequentiedomeintechnieken bestudeerd. Een van de oorzaken voor de slechte signaalkwaliteit bij handenvrije communicatie, is het ontstaan van zogenaamde akoestische echo's. In deel IV wordt aangetoond hoe de algoritmen uit deel I, II en III kunnen worden ingepast in een akoestische–echo–onderdrukkingssetup.

In hoofdstuk 1 wordt vooreerst het kader geschetst waarbinnen dit proefschrift tot stand kwam. Vervolgens wordt een algemene definitie gegeven van een handenvrij systeem, zoals weergegeven in figuur 1.2, en wordt aangegeven waarom de signaalkwaliteit veelal ontoereikend is. Hiervoor kunnen een drietal oorzaken worden aangeduid, namelijk de aanwezigheid van akoestische echo's, achtergrondruis en reverberatie.

Akoestische echo's ontstaan wanneer (zie ook figuur 1.3) signalen gaan rondcirkelen in het communicatienetwerk. Zo hoort de spreker zijn eigen stem met een zekere vertraging, wat de communicatie bemoeilijkt. Indien de lusversterking te groot is, kan de echo onstabiel worden en ontstaat een luide fluittoon. *Achtergrondruis* wordt veroorzaakt door ventilatoren of computers of door mensen die in de opnameruimte aanwezig zijn en zo op een of andere manier aanleiding geven tot achtergrondlawaai. Tenslotte merkt men op dat alle geluidssignalen propageren doorheen de opnameruimte. Op deze manier wordt nagalm of *reverberatie* aan de signalen toegevoegd, wat een nadelige invloed uitoefent op de spraakverstaanbaarheid.

Mogelijke signaalverwerkingsalgoritmen die hieraan verhelpen, moeten enerzijds rekening houden met de aard van het signaal en anderzijds met de omstandigheden en de omgeving waarin deze signalen voorkomen. Daarom worden in het inleidende hoofdstuk enkele basisprincipes van akoestiek en spraak toegelicht. Meer in het bijzonder wordt aandacht besteed aan die eigenschappen die doorslaggevend zijn bij het bepalen van het geschikte algoritme voor dit soort toepassingen en die een weerslag hebben op de wijze waarop deze algoritmen worden geïmplementeerd.

Zo is *spraak* een breedbandig signaal waarvan zowel de tijdsomhullende als de spectrale eigenschappen sterk kunnen variëren als functie van de tijd. Om hiermee optimaal rekening te kunnen houden, zijn de gebruikte signaalverwerkingsalgoritmen best subband- of frequentiedomeingebaseerd. Verder blijkt dat spraak een signaal is met een groot dynamisch bereik. Dit vereist dat de algoritmen genormaliseerd zijn, wat wil zeggen dat ze hun gedrag aanpassen aan de actuele grootte van de energie in de ingangssignalen.

In een handenvrij systeem propageren de signalen doorheen een opnameruimte, wat aanleiding geeft tot verzwakking en distortie. Het blijkt dat dit fenomeen vrij nauwkeurig kan beschreven worden met behulp van lineaire filtertechnieken. Het lineaire filter dat de *akoestiek* van een kamer modelleert, wordt akoestische impulsresponsie genoemd. Men stelt vast dat akoestische impulsresponsies systemen zijn van hoge orde, die bovendien erg tijdsvariant zijn. Om het hoofd te kunnen bieden aan deze tijdsafhankelijkheid en aan de hoge systeemorde, moet een beroep

gedaan worden op efficiënte adaptieve filtertechnieken.

Verder wordt verwezen naar een aantal signaalverwerkingstechnieken die gekend zijn uit de literatuur en waarmee akoestische echo's, achtergrondruis en reverberatie kunnen worden onderdrukt.

In de laatste paragraaf van het inleidende hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de verschillende hoofdstukken en de opbouw van dit werk en wordt ook aangegeven welke de eigen bijdragen zijn in dit proefschrift.

Hoofdstuk 2 : Algemene concepten

In hoofdstuk 2 worden een aantal basisbegrippen en signaalverwerkingstechnieken toegelicht, die de toegankelijkheid en het lezen van dit werk kunnen vergemakkelijken.

De meeste algoritmen die in dit proefschrift aan bod komen, zijn zogenaamde blokgebaseerde adaptieve filters. Vaak steunen dergelijke algoritmen op het herbemonsteren van de verschillende signaalbuffers, met als bedoeling een complexiteitswinst en een verhoogde performantie te bekomen. Zulke systemen met wisselende bemonsteringsfrequentie worden in het Engels "multirate"–systemen genoemd. In **paragraaf 2.1** worden daarom enkele basisbegrippen van *signaalverwerking* en "multirate"–signaalverwerking in het bijzonder, besproken.

Deel I van dit proefschrift handelt over filterbankontwerp. Verder maken ook subbandadaptieve filters, die het onderwerp vormen van deel II, gebruik van filterbanktechnieken. In **paragraaf 2.2** worden daarom enkele fundamenten van *filterbanktheorie* besproken.

De algoritmen die in deel II en III behandeld worden, zijn zogenaamde adaptieve filters. Een overzicht van bestaande *adaptieve filtertechnieken* vindt men terug in **paragraaf 2.3**.

Voor de meeste algoritmen die in het vervolg van dit werk aan bod komen, zal een kostenanalyse doorgevoerd worden. In **paragraaf 2.4** worden hieromtrent een aantal bemerkingen geformuleerd en sommen we de veronderstellingen op die we zullen maken bij het bepalen van de rekencomplexiteit.

Deel I : Ontwerp van DFT–gemoduleerde Filterbanken voor Overbemonsterde Subbandsystemen

Dit deel handelt over het ontwerp van overbemonsterde, DFT–gemoduleerde filterbanken die voldoen aan een voorwaarde van perfecte of quasi–perfecte reconstructie.

In hoofdstuk 3 worden enkele eigenschappen van overbemonsterde subbandsystemen aangehaald en een voorwaarde voor perfecte reconstructie afgeleid. Verder handelt dit hoofdstuk over het ontwerp van DFT–gemoduleerde, overbemonsterde filterbanken waarvoor een voorwaarde van perfecte reconstructie vervuld is. In hoofdstuk 4 daarentegen worden twee ontwerpstrategieën voorgesteld voor DFT–gemoduleerde filterbanken die voldoen aan een voorwaarde van quasi–perfecte reconstructie.

Hoofdstuk 3 : Ontwerp van overbemonsterde, DFT–gemoduleerde filterbanken die voldoen aan een voorwaarde van perfecte reconstructie

Filterbanken vindt men terug in allerhande digitale–signaalverwerkingstoepassingen, meestal in combinatie met "multirate"–technieken, wat aanleiding geeft tot zogenaamde *subbandsystemen*. Een typisch subbandsysteem is voorgesteld in figuur 2.1. Merk op dat het ingangssignaal in de analysefilterbank wordt opgesplitst in M subbanden. Vervolgens verlaagt de bemonsteringsfrequentie van de inkomende signaalstromen met een factor N (decimatie) en worden intermediaire bewerkingen op de gedecimeerde signalen uitgevoerd. Het synthesegedeelte bestaat in een verhogen van de bemonsteringsfrequentie met een factor N (interpolatie), gevolgd door de synthesefilterbankoperatie. De combinatie van filterbank- en "multirate"–technieken leidt tot een reductie van de implementatiekost en een verhoging van de systeemperformantie.

Men spreekt van een *uniformgespatieerde filterbank* wanneer alle filters een gelijke bandbreedte hebben. In sommige toepassingen geeft men echter de voorkeur aan niet–uniformgespatieerde filterbanken. Dergelijke filterbanken hebben vaak een logaritmische spreiding en zijn bijvoorbeeld gebaseerd op wavelets. In dit proefschrift beperken we ons tot uniformgespatieerde FIR–filterbanken.

Uniformgespatieerde filterbanken worden bekomen door een goedgekozen prototypefilter in het frequentiedomein te verschuiven. Dit verschuiven in het frequentiedomein wordt moduleren genoemd, vandaar de naam *gemoduleerde filterbanken*. Gemoduleerde FIR–filterbanken kunnen efficiënt geïmplementeerd worden door het prototypefilter in polyfasecomponenten te ontbinden en gebruik te maken van snelle signaaltransformaties.

De discrete Fouriertransformatie ligt aan de basis van *DFT–gemoduleerde filterbanken*. De verschillende filters zijn hierbij frequentieverschoven versies van elkaar, zoals geïllustreerd in figuur 2.2. De filters hebben echter complexe coëfficiënten. Met behulp van de discrete cosinustransformatie bekomt men *DCT–gemoduleerde filterbanken*. Een voorbeeld hiervan wordt getoond in figuur 2.3. De verschillende filters hebben in dit geval reële coëfficiënten.

Indien de decimatiefactor N groter is dan het aantal subbanden M, wordt een

aanzienlijke hoeveelheid vouwvervorming aan de subbandsignalen toegevoegd, wat nefast is voor de intermediaire bewerkingen die op de subbandsignalen worden uitgevoerd. Bijgevolg neemt men N in de praktijk kleiner of gelijk aan M. Wanneer $M = N$, spreekt men van een *kritischgedecimeerd* subbandsysteem, indien $M > N$, van een *overbemonsterd* of niet–kritischgedecimeerd subbandsysteem. Overbemonsterde subbandsystemen wegen distortie ten gevolge van vouwvervorming en complexiteitswinst ten opzichte van elkaar af. Ze maken daarbij overwegend gebruik van DFT–gemoduleerde filterbanken. Niet–kritischgedecimeerde, DCT–gemoduleerde filterbanken introduceren namelijk te veel vouwvervorming. Vouwvervorming heeft een nadelige invloed op de performantie van intermediaire subbandoperaties zoals adaptieve filters.

In het ideale geval, in de afwezigheid van intermediaire bewerkingen komt het ingangs–uitgangsgedrag van een subbandsysteem overeen met een vertragingsoperatie : de uitgang van het subbandsysteem is een exacte, vertraagde kopie van de ingang. Men spreekt dan van een systeem met *perfecte reconstructie*. In dit hoofdstuk worden ontwerptechnieken besproken voor overbemonsterde, DFT–gemoduleerde filterbanken waarvoor de voorwaarde van perfecte reconstructie vervuld is.

Vooreerst wordt aangegeven in **paragraaf 3.1** hoe *overbemonsterde, DFT–gemoduleerde subbandsystemen* efficiënt geïmplementeerd kunnen worden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de polyfaseontbinding van de prototypefilters en van snelle signaaltransformaties. Zo blijkt dat de polyfasematrix van de analysefilterbank $\mathbf{H}(z)$, zoals gedefinieerd in vergelijking 2.17, kan ontbonden worden in een DFT–matrix $\mathbf{F}$ en een gestructureerde polynomiale prototypematrix $\mathbf{B}(z)$, zoals weergegeven in vergelijking 3.1 [22]. In paragraaf 3.1.1 worden enkele eigenschappen van de prototypematrix $\mathbf{B}(z)$ besproken. Een analoge decompositie is geldig voor de polyfasematrix van de synthesefilterbank $\mathbf{G}(z)$, die volgens vergelijking 3.8 kan geschreven worden als functie van een DFT–matrix $\mathbf{F}$ en een gestructureerde polynomiale prototypematrix $\mathbf{C}(z)$. De vorm van de prototypematrix $\mathbf{C}(z)$ hangt af van de aard van de synthesefilterbank. In paragraaf 3.1.2 worden twee varianten beschouwd: de IDFT–gemoduleerde synthesefilterbank en de gewijzigde DFT–gemoduleerde synthesefilterbank. Het is deze laatste variant die in het vervolg van dit proefschrift verder aan bod zal komen. In paragraaf 3.1.3 wordt aangetoond dat de ontbinding van analyse- en synthesefilterbank zoals hierboven beschreven, tot een aanzienlijke kostenreductie leidt.

In **paragraaf 3.2** wordt een voorwaarde voor *perfecte reconstructie* afgeleid en in wiskundige vorm neergeschreven. We bespreken vervolgens in paragraaf 3.2.1 een algemene ontwerpmethode voor FIR–filterbanken met perfecte reconstructie. Deze methode is gebaseerd op de Smith–McMillan–ontbinding en laat toe voor een gegeven analysefilterbank een gepaste synthesefilterbank te bepalen zodat aan de voorwaarde van perfecte reconstructie voldaan is. Hoewel de methode krachtig lijkt op het eerste zicht, is niet gegarandeerd dat de synthesefilterbank die men bekomt, voldoende frequentieselectief is en voor implementatie in aanmerking komt. In paragraaf 3.2.2 worden daarom para–unitaire filterbanken voorgesteld als alternatief.

Een filterbank is para–unitair indien de prototypematrix $\mathbf{B}(z)$ een para–unitaire polynomiale matrix is. Men garandeert dan op eenvoudige wijze perfecte reconstructie door de prototypematrix $\mathbf{C}(z)$ gelijk te kiezen aan $\tilde{\mathbf{B}}(z) = \mathbf{B}_*^T(z^{-1})$. In **paragraaf 3.3** bespreken we een *ontwerpmethode voor para–unitaire DFT–gemoduleerde filterbanken die voldoen aan een voorwaarde van perfecte reconstructie* [22]. Hoewel minder algemeen dan de methode gebaseerd op de Smith–McMillan–ontbinding, is deze aanpak robuuster en heeft de frequentiekarakteristiek van de synthesefilters typisch een hogere selectiviteit. In paragrafen 3.3.1–3.3.3 wordt aangetoond hoe het para–unitair–zijn van de prototypematrix $\mathbf{B}(z)$ kan vertaald worden naar een para–unitaire voorwaarde, opgelegd aan een set van polynomiale matrices, die uit $\mathbf{B}(z)$ worden afgeleid. Deze matrices kunnen geparametriseerd worden met behulp van para–unitaire ladderstructuren [24]. De parameters die deze para–unitaire ladderstructuren karakteriseren, worden zo gekozen en ingesteld dat men een hoge frequentieselectiviteit bekomt. Hiertoe maakt men gebruik van een optimalisatieprocedure die de stopbandenergie van het analyseprototypefilter minimaliseert. Een goede parameterinitialisatie is echter niet voor de hand liggend. Daarom kiest men de initiële parameters meestal willekeurig. Om hieraan te verhelpen stellen we een methode voor die gebaseerd is op de inverse ontbinding van de para–unitaire ladderstructuren. Dit geeft typisch aanleiding tot een betere convergentie van het optimalisatie–algoritme en een verkorte ontwerpduur. Een belangrijk nadeel van de ontwerpmethode die in paragrafen 3.3.1–3.3.3 wordt besproken, is de beperkte vrijheid die de ontwerper heeft bij het kiezen van de filterorde. In paragraaf 3.3.4 stellen we een uitbreiding voor, waarmee het aantal van nul verschillende filtercoëfficiënten nauwkeuriger kan worden ingesteld. Deze uitbreiding is gebaseerd op het verder opsplitsen van de polynomiale matrices. Op deze manier worden bepaalde filtercoëfficiënten op 0 of 1 gefixeerd en kan de effectieve lengte van het filter, namelijk het aantal van nul verschillende coëfficiënten, naar wens worden ingesteld. Het blijkt nochtans dat de procedure enkel convergeert naar een voldoende frequentieselectieve oplossing indien het aantal filtercoëfficiënten dat gefixeerd wordt op 0 of 1, relatief klein is. Dit wordt geïllustreerd in paragraaf 3.3.5 waar een aantal *ontwerpvoorbeelden* besproken worden.

Hoofdstuk 4 : Ontwerp van DFT–gemoduleerde filterbanken die voldoen aan een voorwaarde van quasi–perfecte reconstructie

In hoofdstuk 3 worden subbandsystemen bestudeerd waarvoor de voorwaarde van perfecte reconstructie is voldaan. Perfecte reconstructie garandeert een distortievrij ingangs–uitgangsgedrag : signalen passeren doorheen het subbandsysteem zonder kwaliteitsverliezen. Wanneer nu intermediaire bewerkingen op de subbandsignalen worden uitgevoerd (codering, filteroperaties), zoals schematisch weergegeven is in figuur 2.1, verliest het systeem de eigenschap van perfecte reconstructie. Verder wordt perfecte reconstructie in de praktijk ook teniet gedaan door niet–lineaire vervormin-

gen in het signaalpad (A/D–convertoren, luidsprekers), door ruis die geïnjecteerd wordt in het systeem en door allerhande algoritmische tekortkomingen (residuele ruis bij adaptief filteren bijvoorbeeld). Men kan daarom de voorwaarde van perfecte reconstructie relaxeren tot een voorwaarde van *quasi–perfecte reconstructie*, door een zekere hoeveelheid vouwvervorming, amplitude- en fasedistortie toe te laten. Dit is aanvaardbaar zolang de vervorming niet merkbaar is of voldoende klein blijft. Het hangt uiteraard van de toepassing en de inherente vervorming (niet–lineariteiten, ruis, ...) af hoe ver het systeem mag afwijken van de ideale voorwaarde van perfecte reconstructie.

Een van de nadelen van subbandsystemen met perfecte reconstructie is de beperkte stopbandonderdrukking die kan gerealiseerd worden. Indien de stopbandonderdrukking niet voldoende hoog is, wordt een aanzienlijke hoeveelheid vouwvervorming in de subbanden geïntroduceerd, wat een nadelige invloed uitoefent op de performantie van de intermediaire algoritmen die op de subbandsignalen worden uitgevoerd. Vaak lijkt daarom een filterbank die quasi–perfecte reconstructie garandeert, meer aangewezen. Een subbandsysteem met quasi–perfecte reconstructie zal aanleiding geven tot betere perceptuele resultaten aangezien de extra stopbandonderdrukking die men bekomt, de hoeveelheid toegevoegde vouwvervorming vermindert en een verhoogde performantie van de intermediaire algoritmen bewerkstelligt.

Voorts hebben de analyse- en de synthesefilterbank steeds dezelfde spectrale karakteristieken indien men de aanpak volgt die besproken wordt in paragraaf 3.3. Indien we afstappen van de voorwaarde van perfecte reconstructie hoeven de analyse- en de synthesefilterbank niet dezelfde frequentiekarakteristiek te hebben en kan de filterorde verschillend zijn. In dit hoofdstuk bespreken we een frequentiedomein- en een tijds/frequentiedomeingebaseerde ontwerpmethode voor filterbanken met quasi–perfecte reconstructie.

In **paragraaf 4.2** wordt een *frequentiedomeingebaseerde ontwerpprocedure* voorgesteld voor DFT–gemoduleerde filterbanken met quasi–perfecte reconstructie. Perfecte reconstructie impliceert het uitblijven van drie soorten vervorming : amplitudedistortie, fasedistortie en distortie ten gevolge van vouwvervorming. In sommige toepassingen, zoals handenvrije communicatie, kan een zekere hoeveelheid fasedistortie getolereerd worden, op voorwaarde dat abrupte fasesprongen vermeden worden. Verder merkt men op dat de signaalkwaliteit vrijwel behouden blijft indien slechts een beperkte hoeveelheid amplitudedistortie wordt toegelaten. Wanneer tenslotte de frequentieselectiviteit van de filterbanken voldoende hoog is, zal ook de distortie ten gevolge van vouwvervorming beperkt blijven. In plaats van een voorwaarde van perfecte reconstructie op te leggen, wordt daarom een eenvoudiger criterium in rekening gebracht. Hierbij worden de frequentieselectiviteit van het analyse- en/of syntheseprototypefilter en de algehele amplitudedistortie ten opzichte van elkaar afgewogen. Op deze manier bekomt men een filterbankset dat de eigenschap van perfecte reconstructie benadert. Een verdere vereenvoudiging van deze frequentiedomeingebaseerde ontwerpprocedure bestaat erin enkel de amplitudedistortie van naburige subbanden in rekening te brengen. De kostfunctie die met

deze procedure overeenstemt, is terug te vinden in vergelijking 4.4.

Een tweede ontwerpprocedure voor filterbanken met quasi–perfecte reconstructie wordt voorgesteld in **paragraaf 4.3**. Hierbij vertrekt men van de relatie in het tijdsdomein tussen de subbandsignalen aan de ene kant en de ingang van de analysefilterbank en de uitgang van de synthesefilterbank anderzijds. Deze *tijds/frequentiedomeingebaseerde ontwerpprocedure* brengt een voorwaarde van perfecte reconstructie in rekening en maakt geen gebruik van een vereenvoudigd criterium zoals dit het geval is bij de frequentiedomeingebaseerde methode. De tijds/frequentiedomeingebaseerde procedure weegt daarom perfecte reconstructie af ten opzichte van frequentieselectiviteit, zoals beschreven door de kostenfunctie weergegeven in vergelijking 4.17. Ontwerpvoorbeelden bekomen op basis van deze procedures zijn terug te vinden in paragrafen 4.2 en 4.3 in figuren 4.2 en 4.6. Beide methodes geven aanleiding tot bevredigende resultaten.

In **paragraaf 4.4** tenslotte wordt het belang aangetoond van filterbanken die voldoen aan een voorwaarde van quasi–perfecte reconstructie. Zo blijkt dat intermediaire subbandoperaties zoals subbandadaptief filteren gebaat zijn bij een verbeterde stopbandonderdrukking. De residuele foutuitgang van het subbandadaptieve filter blijkt te verkleinen wanneer we gebruik maken van een filterbankset waarvoor de voorwaarde van perfecte reconstructie gerelaxeerd werd tot quasi–perfecte reconstructie.

Deel II : Subband- en Frequentiedomeingebaseerde Adaptieve Filtertechnieken

In het tweede deel van het proefschrift worden subband- en frequentiedomeingebaseerde adaptieve filters bestudeerd. Deze "multirate"–systemen zijn een goedkoper alternatief voor het LMS–algoritme indien lange FIR–filters geadapteerd worden. Door subband- of frequentie–afhankelijke stapgroottes te combineren met "multirate"–technieken kan de performantie verhoogd worden en bekomt men een lagere rekenkost. Hoofdstuk 5 handelt over subbandadaptieve filters. We bespreken enkele eigenschappen en schatten de te verwachten kostenreductie. Voorts definiëren we drie ontwerpcriteria voor subbandadaptieve filters. In hoofdstuk 6 komen frequentiedomeingebaseerde adaptieve filters aan bod. Zo wordt aangetoond dat het frequentiedomeinadaptieve filter kan aanzien worden als een subbandadaptief systeem met enkele aantrekkelijke eigenschappen. Tenslotte wordt in hoofdstuk 7 een alternatief adaptatieschema voorgesteld, in een poging de "overlap–save"–correctie op de foutuitgang van het frequentiedomeinadaptieve filter uit te breiden naar een meer algemene klasse van subbandadaptieve filters.

Hoofdstuk 5 : Subbandadaptieve filters

"Multirate"–systemen zoals het subbandadaptieve filter zijn reeds verscheidene jaren gekend [142]. Zij worden typisch gebruikt om FIR–systemen van hoge orde te identificeren en zijn een veelbelovend alternatief voor het LMS–algoritme. Voor dit soort toepassingen is het LMS–algoritme minder aangewezen gezien de hoge complexiteit en minder gunstige convergentie–eigenschappen.

Een schematische voorstelling van het *subbandadaptieve filter* is weergegeven in figuur 5.1. Twee identieke analysefilterbanken splitsen beide ingangssignalen x en d op in subbanden. Ingang d is hierbij gelijk aan $w \star x + s$ en is dus een gefilterde versie van x door het ongekende systeem w, waarbij een lokale signaalbron s opgeteld wordt. Het uiteindelijke doel is $w \star x$ aan de uitgang van het adaptieve filter te onderdrukken en een niet–vervormde versie van s over te houden. Na decimatie wordt een adaptieve filteroperatie op de subbandsignalen uitgevoerd. Zowat elk gekend klassiek adaptatie–algoritme komt hiervoor in aanmerking. Meestal wordt echter het (N)LMS–algoritme gebruikt. Merk op dat hier, in tegenstelling tot klassieke adaptieve filterstructuren, een set van parallelle filters $f_m[k]$ geadapteerd worden. De uitgang e wordt bekomen na verhogen van de bemonsteringsfrequentie en de synthesefilterbankoperatie.

Door de signalen in subbanden te verwerken aan een verlaagde bemonsteringsfrequentie hoopt men een *verbeterd convergentiegedrag* te bekomen. Klassieke adaptatieschema's zoals het LMS–algoritme hebben namelijk een lage convergentiesnelheid indien gekleurde signalen met een grote eigenwaardespreiding zoals spraak, aangeboden worden. Wanneer de signalen in subbanden verwerkt worden, hebben de ingangssignalen van de subbandadaptieve filters typisch een vlakker frequentiespectrum en kunnen de stapgroottes van de adaptieve filters per subband worden ingesteld, wat in het algemeen aanleiding geeft tot een verbeterd convergentiegedrag.

Afgezien van een te verwachten verbetering in convergentiegedrag zijn subbandschema's te verkiezen boven klassieke adaptatie–algoritmen omwille van hun lage rekencomplexiteit : dankzij het gebruik van "multirate"–technieken kunnen zowel de filterbank- als de adaptieve–filteroperaties aan een lage bemonsteringsfrequentie uitgevoerd worden. De grootste *complexiteitswinst* valt dan ook te verwachten wanneer de signalen kritisch gedecimeerd worden. Wel moet men bedenken dat de kostenreductie die men met subbandschema's bekomt, vaak kleiner is dan men initieel verwacht. Voorts blijken subbandadaptieve filters een aantal bijverschijnselen te hebben, die in sommige toepassingen ongewenst zijn.

In **paragraaf 5.1** wordt een algemene beschrijving gegeven van het *standaard subbandadaptieve filter*. Vooreerst wordt een vergelijking gemaakt met klassieke adaptieve filterstructuren, die geen gebruik maken van subbanden. Daarna lichten we kort toe hoe men een geschikte filterbankset kiest. Zo blijkt dat DFT–gemoduleerde FIR–filterbanken te verkiezen zijn. Door de filters op te splitsen in polyfasecomponenten kunnen de filterbankoperaties aan de lage bemonsteringssnelheid uitgevoerd

worden, wat een aanzienlijke kostenreductie met zich meebrengt.

In **paragraaf 5.2** worden enkele *ontwerpcriteria* geformuleerd voor subbandadaptieve filters, die een goed convergentiegedrag moeten garanderen en toelaten de performantie van het frequentiedomeinadaptieve filter te benaderen. We zullen aantonen in hoofdstuk 6 dat frequentiedomeinadaptieve algoritmen kunnen aanzien worden als een soort subbandadaptieve filters, die gebruik maken van eenvoudige filterbanken en typisch tweevoudige overbemonstering. De meeste subbandschema's scoren beter op dit vlak aangezien hun overbemonsteringsfactor meestal kleiner is dan 2 en ze meer geavanceerde filterbanken gebruiken. Men zou dan ook een lagere implementatiekost en een betere performantie verwachten. Spijtig genoeg is dit meestal niet het geval : dankzij hun specifiek foutencorrectiemechanisme blijken frequentiedomeinalgoritmen de standaard subbandschema's gemakkelijk te overtroeven. We trachten in dit werk dan ook verbeterde subbandadaptieve filterschema's te bekomen door de ideeën achter de subband- en frequentiedomeingebaseerde adaptieve filters samen te brengen in een soort "hybride" aanpak en de principes van het frequentiedomeinalgoritme uit te breiden naar een meer algemene klasse van subbandadaptieve filters. In deze paragraaf worden daartoe drie ontwerpcriteria geformuleerd voor subbandadaptieve filters, die een aanvaardbare performantie moeten garanderen :

1. Om de hoeveelheid vouwvervorming te beperken die aan de subbandsignalen wordt toegevoegd, moeten de filterbanken voldoende *frequentieselectief* zijn. Vouwvervorming heeft immers een nadelig effect op de convergentie van de subbandadaptieve filters.

2. Beide ingangssignalen x en d (zie figuur 5.1) passeren doorheen het subbandsysteem. In het ideale geval wordt x volledig onderdrukt en verschijnt de gewenste component van d, namelijk het lokale bronsignaal s, onvervormd aan de uitgang van het subbandadaptieve filter. Om dit te kunnen bewerkstelligen beroept men zich op filterbanken die voldoen aan een voorwaarde van *(quasi–)perfecte reconstructie*.

3. Indien perfecte onderdrukking van het ingangssignaal x nagestreefd wordt, moet de onderste tak van figuur 5.1 het ongekende systeem w *exact modelleren*. Dit kan alleen indien de onderste tak beschreven wordt door een pseudo–circulante polynomiale matrix (zie vergelijking 5.6). Typisch is slechts aan deze voorwaarde voldaan indien de subbandadaptieve filters oneindig lang zijn.

Een poging tot uitbreiding van het foutencorrectiemechanisme van het frequentiedomeinalgoritme naar een meer algemene klasse van subbandadaptieve filters is samengebracht in hoofdstuk 7.

Paragraaf 5.3 gaat dieper in op de niet–lineaire vervorming die geïntroduceerd wordt tijdens het decimeren van de subbandsignalen. Zo werd al aangegeven dat

deze *vouwvervorming* een nadelig effect heeft op de convergentie van de subbandadaptieve filters. Hoewel ze aanleiding geven tot de grootste kostenreductie worden kritischgedecimeerde subbandadaptieve filterschema's best vermeden omdat de hoeveelheid toegevoegde vouwvervorming hier het grootst is en dus een slecht convergentiegedrag te verwachten is.

Een van de neveneffecten van subbandadaptief filteren is het verschijnen van een *residuele fout*. Dit wordt besproken in **paragraaf 5.4**. Stelling 5.2 toont namelijk aan dat de subbandadaptieve filters, zoals aangegeven op figuur 5.1, oneindig lang moeten zijn om een ongekend systeem van eindige orde perfect te kunnen modelleren. De subbandadaptieve filters strekken zich daarbij oneindig ver uit zowel in causale als in anti–causale richting, zoals aangetoond in paragraaf 5.4.1 op basis van enkele experimenten. Dit impliceert in de praktijk, wanneer we ons moeten beperken tot filters van eindige lengte, dat een residuele ondermodelleringsfout verschijnt. Om die residuele fout voldoende klein te houden, moeten anti–causale filtercoëfficiënten toegevoegd worden. De benodigde filterlengte is dan groter dan men initieel begroot had, wanneer men geen rekening houdt met dit neveneffect. Verder worden in paragraaf 5.4.2 twee ontwerpmethodes besproken die toelaten het aantal benodigde anti–causale filtercoëfficiënten te bepalen.

Tenslotte wordt in **paragraaf 5.5** een gedetailleerde *kostenanalyse* gemaakt van het subbandadaptieve filter. Zo blijkt dat de verwachte complexiteitswinst ten opzichte van het klassieke LMS–algoritme gemakkelijk overschat wordt. Ten eerste is het zo dat een aantal anti–causale filtercoëfficiënten moeten worden toegevoegd. Daardoor stijgt de kost en wordt extra vertraging geïntroduceerd. Ten tweede werd reeds aangegeven dat kritischgedecimeerde filterschema's niet in aanmerking komen voor subbandadaptief filteren en dat men beter overbemonsterde filterschema's gebruikt. Aangezien de decimatiefactor dan kleiner is dan het theoretische maximum, verlaagt ook hierdoor de complexiteitswinst.

Hoofdstuk 6 : Analyse van het frequentiedomeinadaptieve gepartitioneerde blokfilter als een subbandadaptief systeem

Het frequentiedomeinadaptieve filter (FDAF) is reeds vele jaren gekend als een goedkoop alternatief voor het LMS–algoritme. Het FDAF–adaptieve filter wordt kort besproken op bladzijde 40 en is een directe vertaling van het Blok–LMS–algoritme naar het frequentiedomein [142]. De lineaire convoluties en correlaties, die de kern vormen van het Blok–LMS–algoritme, worden hierbij efficiënt uitgerekend als componentsgewijze vermenigvuldigingen in het frequentiedomein, door gebruik te maken van "overlap–save"– of "overlap–add"–technieken en snelle signaaltransformaties zoals de FFT. De performantie en convergentie–eigenschappen van het FDAF–algoritme zijn vergelijkbaar met die van LMS. Verder blijkt dat het FDAF–algoritme enkel merkelijk goedkoper is dan LMS indien de zogenaamde bloklengte dezelfde grootte–orde heeft als de filterlengte. In de praktijk leidt dit vaak tot een

onaanvaardbare ingangs–uitgangsvertraging.

Door het adaptieve filter in gelijke delen te splitsen en deze delen afzonderlijk naar het frequentiedomein te transformeren, bekomt men een tijds/frequentiedomeingebaseerd adaptief filter, dat het frequentiedomeinadaptieve gepartitioneerde blokfilter (PBFDAF) wordt genoemd [147]. In dit hoofdstuk zullen we het PBFDAF–algoritme van naderbij bekijken en nagaan hoe het zich verhoudt tot de subbandadaptieve structuren die in hoofdstuk 5 behandeld worden.

In **paragraaf 6.1** wordt het *PBFDAF–algoritme* besproken. Vertrekkende van het Blok–LMS–algoritme wordt het PBFDAF–algoritme afgeleid in paragraaf 6.1.1 : de "overlap–save"–correctie wordt uitgelegd en we geven aan hoe het adaptieve filter gepartitioneerd wordt. In paragraaf 6.1.2 worden de algoritmische vergelijkingen samengevat en enkele eigenschappen toegelicht. Paragraaf 6.1.3 handelt vervolgens over *normalisatie*. Het niet–genormaliseerde en globaalgenormaliseerde PBFDAF–adaptieve filter zijn een exacte vertaling van het Blok–LMS–algoritme naar het frequentiedomein. Subbandnormalisatie daarentegen laat toe frequentie–afhankelijke stapgroottes in te stellen, wat een aanzienlijke performantieverbetering met zich meebrengt. Paragraaf 6.1.4 geeft aan dat net zoals bij het FDAF–adaptieve filter een onderscheid kan gemaakt worden tussen twee varianten, afhankelijk van de wijze waarop de filtergewichten worden geüpdatet. We bespreken het "constrained" en het "unconstrained" PBFDAF–algoritme. Tenslotte geeft paragraaf 6.1.5 aan dat een ambiguïteit kan optreden bij het "unconstrained" PBFDAF–algoritme. Hieraan kan worden verholpen door de algoritmische vergelijkingen lichtjes aan te passen.

Paragraaf 6.2 heeft als doel het *PBFDAF–algoritme* te beschrijven *als een subbandadaptief systeem*. Hiervoor vertrekken we van een grafische voorstelling van het PBFDAF–algoritme. Vooreerst wordt figuur 6.1, die de kern van het PBFDAF–algoritme weergeeft, in opeenvolgende stappen hertekend, wat resulteert in figuur 6.3. Men stelt vast dat deze figuur veel gelijkenissen vertoont met het schema van een DFT–gemoduleerd subbandadaptief filter (figuur 5.3). Merk op dat een extra foutencorrigerende module toegevoegd is, die de "overlap–save"–correctie op de foutuitgang van het PBFDAF–filter voorstelt. Bijgevolg kan het PBFDAF–algoritme aanzien worden als een soort DFT–gemoduleerd subbandadaptief filter. Door de gestructureerde prototypematrices $\mathbf{B}(z)$ en $\mathbf{C}(z)$ te bepalen, die het prototypefilter van respectievelijk de analyse- en de synthesefilterbank definiëren, kunnen de karakteristieken van de filterbanken achterhaald worden. Men stelt vast dat het PBFDAF–adaptieve filter gebruik maakt van filterbanken met een sinc–achtige frequentierespons, zoals blijkt uit figuren 6.4 en 6.5. Bijgevolg hebben de filterbanken een lage frequentieselectiviteit. Het is merkwaardig dat het PBFDAF–filter ondanks de slechte frequentieselectiviteit, toch een goed convergentiegedrag vertoont.

In paragraaf 5.2 worden drie ontwerpcriteria voor het subbandadaptieve filter gespecificeerd. Deze voorwaarden van frequentieselectiviteit, perfecte reconstructie en exact modelleren garanderen dat het subbandadaptieve filter naar behoren functioneert. Aangezien het PBFDAF–algoritme kan aanzien worden als een subbandadap-

tief systeem, gaan we na of aan de drie hierboven gespecificeerde *ontwerpcriteria* voldaan is. In **paragraaf 6.3** wordt aangetoond dat $\mathbf{C}(z)\mathbf{B}(z) = \mathbf{I}$, waaruit volgt dat de voorwaarde van perfecte reconstructie geldig is. Het derde ontwerpcriterium, dat in paragraaf 5.2 wordt gespecificeerd, vereist dat $\mathbf{C}(z)\mathbf{F}^{-1}\text{diag}\{F_i(z)\}\mathbf{FB}(z)$ pseudo–circulant is (zie vergelijking 5.7 en figuur 6.3). Het "constrained" PBFDAF–adaptieve filter blijkt aan deze voorwaarde te voldoen en dit met filters $F_i(z)$ van eindige lengte. Ook in het geval van het "unconstrained" PBFDAF–algoritme is hieraan voldaan, maar slechts na convergentie. Merk op dat het derde ontwerpcriterium in het geval van het standaard subbandadaptieve filter slechts geldig is indien de subbandfilters oneindig lang zijn. Aan het eerste ontwerpcriterium tenslotte, dat betrekking heeft op de frequentieselectiviteit van de filterbanken, voldoet de PBFDAF slechts in beperkte mate : de filterbanken hebben een sinc–achtige frequentierespons en bijgevolg een lage frequentieselectiviteit. Desalniettemin heeft het PBFDAF–algoritme goede convergentie–eigenschappen.

In **paragraaf 6.4** wordt een *kostenschatting* gemaakt van het PBFDAF–algoritme. De globale kost wordt bepaald, rekening houdend met de mogelijke instellingen van de vele algoritmische parameters. We onderzoeken de invloed van de parameters op de totale kost.

Hoofdstuk 7 : Een adaptatieschema gebaseerd op de globale fout

Experiment 5.5 en figuur 5.10 tonen aan dat het convergentiegedrag en de modelleringscapaciteiten van frequentiedomeinadaptieve filters zoals het PBFDAF–algoritme die van standaard subbandadaptieve systemen gemakkelijk overtroeven. We mogen daarom veronderstellen dat een klasse van subbandadaptieve filters kan gedefinieerd worden die het mechanisme en de eigenschappen van de frequentiedomeinaanpak overnemen en op deze wijze de performantie van het PBFDAF–algoritme kunnen benaderen.

In paragraaf 6.3 wordt aangetoond dat het PBFDAF–algoritme voldoet aan twee van de drie ontwerpcriteria die voorgesteld worden in hoofdstuk 5. Deze ontwerpcriteria zijn noodzakelijke voorwaarden opdat het subbandadaptieve filter naar behoren zou functioneren. Verder wordt in paragraaf 6.2 aangetoond dat het PBFDAF–algoritme kan aanzien worden als een subbandadaptief filter waaraan een foutencorrigerende module is toegevoegd. Deze module staat in voor de "overlap–save"–compensatie. Dankzij de foutencorrectie kunnen de subbandfilters geadapteerd worden op basis van een foutsignaal dat vrij is van vouwvervorming, wat leidt tot een verbeterd convergentiegedrag.

In dit hoofdstuk bespreken we een *adaptatieschema dat gebaseerd is op de globale fout*, in een poging om de foutencorrectie die aan de basis ligt van frequentiedomeingebaseerde algoritmen, uit te breiden naar meer algemene subbandschema's.

Dit alternatieve adaptatieschema wordt voorgesteld in **paragraaf 7.1**. In figuur 7.1 is aangegeven dat de subbandfilters F_m geadapteerd worden op basis van de globale fout e, en niet met behulp van de subbandfouten $\epsilon_m = d_m - y_m$, zoals typisch gebeurt in een standaard subbandadaptief schema als dat van figuur 5.2. In paragraaf 7.1 wordt het nieuwe adaptatieschema afgeleid. Zo blijkt dat de subbandfouten doorheen de synthesebank worden geleid. Op deze manier wordt de globale fout berekend, die vrij is van vouwvervorming. Verder worden de verschillen aangegeven met een adaptatieschema dat gebaseerd is op de subbandfouten en met het standaard subbandadaptieve filter.

In **paragraaf 7.2** wordt de *rekencomplexiteit* van het nieuwe adaptatieschema onderzocht. We geven aan hoe de rekenkost kan gereduceerd worden indien DFT–gemoduleerde filterbanken worden gebruikt. We vergelijken met het standaard subbandadaptieve filter en met het adaptatieschema dat gebaseerd is op de subbandfouten. Hoewel het nieuwe adaptatieschema een betere performantie vertoont dan het standaard subbandadaptieve filter, is de rekencomplexiteit hoger.

In paragraaf 6.2 wordt aangetoond dat het PBFDAF–algoritme kan aanzien worden als een speciaal subbandadaptief schema dat gebruik maakt van filterbanken met een slechte frequentieselectiviteit. Dankzij de "overlap–save"–correctie is de performantie van het PBFDAF–algoritme echter vrij goed. Zo wordt in **paragraaf 7.3** onderzocht wat gebeurt indien het alternatieve adaptatieschema wordt toegepast op een subbandsysteem dat gebruik maakt van de filterbanken van het PBFDAF–adaptieve filter. Stelling 7.1 toont aan dat de *gewichtupdatevergelijking van het "unconstrained" PBFDAF–algoritme* overeenkomt met het alternatieve adaptatieschema dat gebaseerd is op de globale fout, op voorwaarde dat de filterpartitielengte van het PBFDAF–algoritme een veelvoud is van de bloklengte. Dit geeft aan dat het alternatieve adaptatieschema kan aanzien worden als een uitbreiding van de "overlap–save"–correctie van het PBFDAF–algoritme. Men kan nu subbandadaptieve schema's ontwerpen, waarvoor twee van de drie ontwerpcriteria, namelijk die van frequentieselectiviteit en perfecte reconstructie, voldaan zijn en die gebaseerd zijn op het adaptatieschema dat in dit hoofdstuk wordt voorgesteld. Op deze manier kan men de performantie van frequentiedomeingebaseerde adaptieve filters beter benaderen.

Deel III : Geïtereerd Frequentiedomeinadaptief Gepartitioneerd Blokfilter

Deel III handelt over het geïtereerde frequentiedomeinadaptieve gepartitioneerde blokfilter (PBFDRAP). Dit algoritme combineert frequentiedomeinadaptief filteren met de zogenaamde "row action projection"–techniek [69]. Op deze manier bekomt men een gereduceerde foutuitgang en een betere schatting van de gewichtvectoren. In hoofdstuk 8 wordt het PBFDRAP–algoritme gedefinieerd en worden enkele ei-

genschappen besproken. Daar het PBFDRAP–algoritme neerkomt op het itereren van het PBFDAF–algoritme (zie hoofdstuk 6) gaan we na hoe het PBFDRAP–algoritme zich gedraagt indien het aantal iteraties wordt opgevoerd. In hoofdstuk 9 worden dan enkele snelle varianten voor het PBFDRAP–algoritme afgeleid en wordt aangetoond dat het PBFDRAP–adaptieve filter een goedkoper alternatief kan zijn voor het PRA–algoritme (zie paragraaf 2.3.2) indien men grote bloklengtes verkiest.

Hoofdstuk 8 : Gepartitioneerd–blokgebaseerd frequentiedomein–RAP–algoritme

Hoogkwalitatieve adaptieve akoestische–echo–onderdrukking vereist het modelleren van lange echopaden. Klassieke LMS–gebaseerde adaptieve filters worden hiervoor in de praktijk niet gebruikt omdat het LMS–algoritme suboptimaal is in termen van rekencomplexiteit (zie paragraaf 2.3.1). "Multirate"–schema's zoals het frequentiedomeinadaptieve gepartitioneerde blokfilter (PBFDAF) zijn een interessant alternatief en vindt men dan ook terug in commerciële echo–onderdrukkingssystemen die vandaag op de markt beschikbaar zijn. Het PBFDAF–algoritme wordt uitvoerig besproken in hoofdstuk 6. In dit hoofdstuk analyseren we het gepartitioneerd–blokgebaseerde frequentiedomein–RAP–algoritme (PBFDRAP), dat frequentiedomeinadaptief filteren met de zogenaamde "row action projection"–techniek (RAP) combineert. Het RAP–algoritme staat in de literatuur bekend als een uitbreiding en verbetering van het LMS–adaptieve filter [69].

In **paragraaf 8.1** wordt het *PBFDRAP–algoritme* gedefinieerd, vertrekkend van de updatevergelijkingen van het PBFDAF–adaptieve filter. Door meerdere malen doorheen de filter- en de gewichtupdatevergelijkingen van het PBFDAF–algoritme te stappen en daarbij de inkomende databuffers constant te houden, bekomt men een gereduceerde foutuitgang en een betere schatting van de filtergewichten. Dit geïtereerde algoritme kent net zoals het PBFDAF–adaptieve filter twee varianten, afhankelijk van het feit of gekozen wordt voor een "constrained", dan wel voor een "unconstrained" updaten van de filtergewichten. Het PBFDAF–algoritme is een speciaal geval van het PBFDRAP–algoritme waarvoor het aantal iteraties gelijk is aan 1. De vergelijkingen die het PBFDRAP–algoritme definiëren en een kostenschatting voor elk van de algoritmische stappen, zijn samengebracht in tabel 8.1. Doordat het PBFDRAP–algoritme meermaals itereert op de inkomende databuffers $(\underline{\mathbf{X}}_p^{(n)}, \mathbf{d}_n)$ (zie tabel 8.1) worden de filtergewichten beter geschat en verkleint het foutsignaal. Wanneer het aantal iteratiestappen verhoogt, wordt de zogenaamde a–posteriorifout verder gereduceerd. Itereren lijkt op het eerste zicht een vrij rekenintensieve operatie, omdat het grootste deel van de algoritmische bewerkingen meermaals moeten worden uitgevoerd. In hoofdstuk 9 worden echter een aantal snelle varianten voor het PBFDRAP–algoritme voorgesteld. Verder is echo–onderdrukking vaak maar een van de vele signaalverwerkingsblokken die samengebracht worden in eenzelfde commercieel product. Naast echo–onderdrukking vindt men modules

terug voor ruisonderdrukking, dereverberatie e.d. Deze staan in voor de voorverwerking en signaalconditionering van de signaalstromen die aangelegd worden aan meer complexe bouwblokken zoals een spraakherkenner bijvoorbeeld. Afhankelijk van de mode waarin het systeem zich bevindt, varieert de rekencomplexiteit en is op sommige tijdstippen meer rekenkracht beschikbaar voor de modules die instaan voor de signaalconditionering. Indien hiervoor PBFDRAP–technieken aangewend worden, kan men het aantal iteraties laten toenemen en de performantie opdrijven wanneer meer rekenkracht beschikbaar komt.

In **paragraaf 8.2** wordt het *asymptotisch gedrag* van het PBFDRAP–algoritme onderzocht door te berekenen hoe het algoritme zich gedraagt indien het aantal iteraties toeneemt. Hierbij worden de invloed van een aantal parameters in rekening gebracht. We maken hierbij een onderscheid tussen "constrained" en "unconstrained" updaten enerzijds en niet–genormaliseerd updaten versus subbandnormalisatie anderzijds. Zo wordt aangetoond dat het PBFDRAP–algoritme convergeert naar gekende adaptieve filterstructuren indien het aantal iteraties wordt opgevoerd :

- het niet–genormaliseerde "unconstrained" PBFDRAP–algoritme benadert een genormaliseerde variant van het "unconstrained" PBFDRAP–algoritme, dat gebruik maakt van geprojecteerde subbandenergieën en dat wordt geadapteerd met stapgrootte 1.
- voor het subbandgenormaliseerde "unconstrained" PBFDRAP–algoritme komt het verhogen van het aantal iteraties overeen met het aanleggen van een grotere stapgrootte.
- het niet–genormaliseerde "constrained" PBFDRAP–algoritme benadert het PRA–algoritme (zie paragraaf 2.3.2) met stapgrootte 1. De benadering houdt een reeksontwikkeling in van de matrixinverse in de gewichtupdatevergelijking van het PRA–algoritme .
- bij het itereren van het subbandgenormaliseerde "constrained" PBFDRAP–algoritme duiken stabiliteitsproblemen op indien het aantal iteraties te groot wordt.

Deze resultaten lijken de conclusies omtrent het geïtereerde LMS– en BLMS–algoritme [40] [116] te bevestigen, wat doet vermoeden dat geïtereerde, niet–genormaliseerde algoritmen convergeren naar hun genormaliseerde equivalenten met stapgrootte 1, indien het aantal iteraties opgevoerd wordt.

In **paragraaf 8.3** worden een aantal *experimenten* beschreven waarin het PBFDRAP–algoritme gevalideerd wordt in een akoestische–echo–onderdrukkingssetup. Zo blijkt inderdaad dat de performantie van het PBFDRAP–algoritme toeneemt bij verhogen van het aantal iteraties. Doordat de ingangssignalen typisch gekleurd zijn, convergeert het subbandgenormaliseerde algoritme het snelst. Hoewel de stabiliteit niet gegarandeerd is voor de subbandgenormaliseerde "constrained" variant,

bekomen we hiermee wel de beste performantie indien het aantal iteraties niet al te groot wordt. Indien men tenslotte de a–posteriorifouten beschouwt en niet de a–priorifouten zoals gebruikelijk is, bekomen we extra echo–onderdrukking. Dit is nochtans niet toegelaten tijdens dubbelspraak omdat zo het signaal van de lokale spreker mee onderdrukt wordt.

Hoofdstuk 9 : Snelle gepartitioneerd–blokgebaseerde frequentiedomein–RAP–algoritmen

In hoofdstuk 8 wordt het frequentiedomeinadaptieve filter (PBFDAF) met de "row action projection"–techniek (RAP) gecombineerd, wat leidt tot het gepartitioneerd–blokgebaseerde frequentiedomein–RAP–algoritme (PBFDRAP). Het PBFDRAP–algoritme kan worden aanzien als een geïtereerde versie van het PBFDAF–algoritme, waarmee bij een toenemend aantal iteraties een beter convergentiegedrag kan worden bekomen. De extra rekenkost per bijkomende iteratie is nochtans aanzienlijk indien het algoritme wordt geïmplementeerd zoals weergegeven in tabel 8.1 : zo verhoogt de implementatiekost bij R keer itereren ongeveer met een factor R.

In **paragraaf 9.1** worden een aantal *snelle varianten* voor het PBFDRAP–algoritme afgeleid. Dit leidt tot een aanzienlijke kostenreductie zonder enig verlies van performantie. Sommige van de voorgestelde varianten leggen beperkingen op aan bepaalde parameters of zijn enkel geldig voor een welbepaalde wijze van updaten (bvb. "unconstrained" of "constrained"). Andere varianten zijn toepasbaar ongeacht de instelling of de keuze van de parameters. Zo worden vier snelle varianten van het PBFDRAP–adaptieve filter voorgesteld in paragraaf 9.1. De algoritmische vergelijkingen en een kostenschatting voor elk van de algoritmische stappen zijn samengebracht in tabellen 9.1, 9.2, 9.3 en 9.4. Welk van de voorgestelde schema's, zoals voorgesteld in tabel 8.1, 9.1, 9.2, 9.3 of 9.4, uiteindelijk leidt tot de goedkoopste implementatie, hangt sterk af van de waarde van de algoritmische parameters en van de wijze van updaten ("(un)constrained", (niet–)genormaliseerd). Voor een typische toepassing waarvoor het PBFDRAP–algoritme wordt gebruikt, namelijk voor het identificeren van FIR–systemen van hoge orde, is het schema voorgesteld in tabel 9.3 wellicht het meest geschikt als men "unconstrained" updaten verkiest. In het geval van "constrained" updaten lijken het eerste (niet–snelle) en het laatste schema (tabellen 8.1 en 9.4) het meest aangewezen.

In **paragraaf 9.2** worden de verschillende PBFDRAP–varianten met elkaar vergeleken in termen van rekencomplexiteit. Zowel voor het geval van "unconstrained" als van "constrained" updaten wordt de standaard (niet–snelle) implementatie van tabel 8.1 vergeleken met snelle varianten van het algoritme. Figuur 9.1 en tabel 9.5 geven aan dat snelle varianten van het "unconstrained" geüpdate algoritme aanleiding kunnen geven tot een aanzienlijke kostenverlaging. Zo blijkt tweemaal itereren met het standaard schema even duur als viermaal itereren met het snelle algoritme van tabel 9.3. De *snelheidswinst* die kan bekomen worden met snelle varianten van

het "constrained" algoritme, wordt geëvalueerd in tabel 9.6 en figuur 9.2.

Stelling 8.6 toont aan dat het geïtereerde, niet–genormaliseerde en het geïtereerde, globaalgenormaliseerde "constrained" PBFDRAP–algoritme het PRA–adaptieve filter benaderen. In paragraaf 9.2.3 worden het geïtereerde, niet–genormaliseerde en het geïtereerde, globaalgenormaliseerde "constrained" PBFDRAP–algoritme daarom vergeleken met het PRA–adaptieve filter in termen van rekencomplexiteit. Het blijkt dat het geïtereerde PBFDRAP–algoritme een goedkoper alternatief is voor het PRA–algoritme indien men grote bloklengtes verkiest.

Deel IV : Akoestische–echo–onderdrukking, Implementatie en Experimenten

In het laatste deel van dit proefschrift tonen we aan dat de algoritmen die in hoofdstukken 2–9 worden besproken, succesvol kunnen toegepast worden in een reële akoestische–echo–onderdrukkingssetup. Een rechttoe–rechtaanimplementatie waarbij het adaptieve filter zonder meer wordt ingebracht in een reële setup, zal qua performantie veel te wensen over laten. In een praktische implementatie voorziet men daarom naast het adaptieve filter ook een zorgvuldig afgeregeld "controle"–algoritme. In hoofdstuk 10 wordt hier dieper op ingegaan en worden enkele adaptieve filteralgoritmen in realistische omstandigheden vergeleken. Tenslotte bespreken we een DSP–implementatie van een akoestische–echo–onderdrukkingssysteem in reële tijd.

Hoofdstuk 10 : Akoestische–echo–onderdrukking, implementatie & experimenten

De eerste drie delen van dit proefschrift handelen over filterbanken en adaptieve–filterschema's, waarbij de nadruk voornamelijk ligt op het algoritmische ontwerp. In de inleidende hoofdstukken wordt aangegeven dat deze technieken toepasbaar zijn in verschillende domeinen. In hoofdstuk 10 wordt een welbepaalde toepassing, namelijk akoestische–echo–onderdrukking, van naderbij bekeken. In hoofdstuk 2 wordt namelijk aangehaald dat het akoestische–echo–onderdrukkingsprobleem een typische voorbeeld is van adaptieve identificatie. De adaptieve filters die in dit werk besproken worden, zijn daarom zonder meer bruikbaar en inpasbaar in deze toepassing.

Een typisch reëel echo–onderdrukkingssysteem heeft nochtans te kampen met een aantal praktische problemen die de performantie nadelig beïnvloeden, zoals tijdsvariërende transmissiepaden, niet–lineariteiten in de signalenpaden en dubbelspraak. Uit experimenten blijkt dat een rechttoe–rechtaanimplementatie, waarbij men enkel gebruik maakt van een adaptief filter om de echo te verwijderen, geen voldoende

onderdrukking kan realiseren. Zo moet naast het adaptieve filter ook een "controle"–blok toegevoegd worden. Dit bouwblok blijkt een onmisbare schakel te zijn in elk reëel adaptief echo–onderdrukkingssysteem. Een schematische voorstelling van een typisch akoestische–echo–onderdrukkingssysteem wordt getoond in figuur 10.1. De belangrijkste functie van het "controle"–blok is het instellen van de stapgrootte van het adaptieve filteralgoritme. In een akoestische–echo–onderdrukkingssysteem is het te bewerken signaal meestal spraak. Spraaksignalen worden gekenmerkt door hun groot dynamisch bereik. De stapgrootte van het adaptieve filter moet daarom de schommelingen van de ogenblikkelijke signaalenergie volgen. Het normalisatiemechanisme dat hiervoor instaat, wordt typisch in het adaptieve filteralgoritme ingebed. Verder moet het adaptatieproces bevrozen worden zodra *dubbelspraak* optreedt. Tijdens dubbelspraak zijn beide correspondenten actief (zie ook figuur 1.3). Indien de filtercoëfficiënten verder aangepast worden tijdens dubbelspraak, treedt een duidelijk hoorbare distortie op en wordt de echo–onderdrukking in belangrijke mate teniet gedaan. Om hieraan te verhelpen worden allerhande controlemechanismen toegevoegd aan het adaptieve filteralgoritme waarmee dubbelspraak kan gedetecteerd worden. Dit "controle"–algoritme wordt typisch gestuurd door een veelheid aan parameters die met omzichtigheid moeten worden ingesteld.

In **paragraaf 10.1** wordt het *"controle"–algoritme* meer in detail bekeken en worden een paar bouwblokken besproken. Zo is het nauwkeurig bepalen van de *ogenblikkelijke signaalenergie* van wezenlijk belang zowel voor de dubbelspraakdetectie als voor de normalisatie van de stapgrootte van het adaptieve filter. We behandelen dit kort in paragraaf 10.1.1. *Spraak–ruisdetectie* wordt aangehaald in paragraaf 10.1.2. Verder worden in paragraaf 10.1.3 enkele *dubbelspraakdetectie*–algoritmen bestudeerd die men in de literatuur kan terugvinden. Dubbelspraakdetectie is een moeilijk probleem en zelfs de meest geavanceerde algoritmen falen met regelmaat. Om dit op te vangen wordt typisch een *niet–lineaire module* aan de echo–onderdrukker toegevoegd. Hiermee kunnen de residuele echo's verwijderd worden. Een eenvoudige niet–lineaire module wordt besproken in paragraaf 10.1.4.

In **paragraaf 10.2** worden een aantal *testresultaten* toegelicht. Zo werden verschillende realistische experimenten uitgevoerd met een aantal van de in de voorgaande hoofdstukken behandelde adaptieve algoritmen. De algoritmen worden vergeleken op basis van hun prestaties in een akoestische–echo–onderdrukkingsomgeving. De in deze paragraaf besproken experimenten maken gebruik van een gesimuleerde testomgeving. Het blijkt dat het NLMS–algoritme minder geschikt is dan subband- en frequentiedomeingebaseerde adaptieve filters indien akoestische signalen aangeboden worden. Het PBFDAF–algoritme levert het beste compromis tussen performantie en kost.

In het kader van het onderzoekswerk dat aan de basis ligt van dit proefschrift, werd een *DSP–implementatie* van een akoestische–echo–onderdrukkingssysteem in reële tijd gerealiseerd. Dit systeem is momenteel beschikbaar als een demo–opstelling in het ESAT–spraaklaboratorium van de KULeuven. Hiermee kunnen het belang van akoestische–echo–onderdrukking en de bruikbaarheid van enkele van de in dit werk

behandelde algoritmen aangetoond worden. In **paragraaf 10.3** wordt de demo–opstelling besproken en lichten we tenslotte een aantal experimenten toe, waarin verschillende adaptieve algoritmen op basis van reële signalen vergeleken worden.

Hoofdstuk 11 : Besluit en suggesties voor verder onderzoek

Besluit
In **deel I** van dit proefschrift worden ontwerptechnieken voor overbemonsterde DFT–gemoduleerde filterbanken besproken die voldoen aan een voorwaarde van perfecte of quasi–perfecte reconstructie.

Subband- en frequentiedomeingebaseerde adaptieve filters vormen het onderwerp van **deel II**. Deze "multirate"–systemen zijn een goed alternatief voor het LMS–algoritme indien lange FIR–filters geadapteerd worden. Door gebruik te maken van subband- of frequentie–afhankelijke stapgroottes en "multirate"–technieken kunnen een verhoogde performantie en een lagere rekenkost bekomen worden.

Deel III handelt over het geïtereerde frequentiedomeinadaptieve gepartitioneerde blokfilter (PBFDRAP), dat frequentiedomeinadaptief filteren combineert met "row action projection". Op deze manier bekomt men een gereduceerde foutuitgang en een betere schatting van de gewichtvectoren.

In **deel IV** tonen we aan dat de algoritmen die in hoofdstukken 2–9 worden besproken, succesvol kunnen toegepast worden in een reële akoestische–echo–onderdrukkingssetup.

Suggesties voor verder onderzoek
In hoofdstuk 3 worden enkele ontwerpmethodes voorgesteld waarmee DFT–gemoduleerde filterbanken kunnen ontworpen worden die voldoen aan een voorwaarde van perfecte reconstructie. We bespreken daarbij een methode die gebaseerd is op para–unitaire parametrisatie. De orde van de filterbanken kan hierbij ingesteld worden naar gelang de voorkeur en de eisen van de ontwerper. Het blijkt nochtans dat de procedure enkel convergeert naar een voldoende frequentieselectieve oplossing indien het aantal filtercoëfficiënten die gefixeerd worden op 0 of 1, relatief klein is. Het is niet duidelijk of meer geavanceerde ontwerptechnieken kunnen gevonden worden waarmee men frequentieselectieve DFT–gemoduleerde filterbanken van willekeurige orde kan ontwerpen die voldoen aan een voorwaarde van perfecte reconstructie.

In het proefschrift bespreken we hoofdzakelijk DFT–gemoduleerde FIR–filterbanken. Een belangrijk nadeel van deze structuren is de inherente tijdsvertraging die geïntroduceerd wordt. Anderzijds is algemeen geweten dat met IIR–filters een gelijke frequentieselectiviteit kan bekomen worden als met FIR–filters, maar dit bij veel lagere systeemordes. FIR–filters hebben dan weer als voordeel dat ze goedkoop kunnen worden geïmplementeerd door gebruik te maken van polyfasetechnieken.

Het zou interessant zijn IIR–gebaseerde filterbanken nader te bekijken en te onderzoeken of ontwerpprocedures voor IIR–filterbanken kunnen gevonden worden die voldoen aan een voorwaarde van perfecte of quasi–perfecte reconstructie.

In deel II van het proefschrift worden subband- en frequentiedomeingebaseerde adaptieve filtertechnieken besproken. Zo blijkt dat het frequentiedomeinadaptieve gepartitioneerde blokfilter (PBFDAF) kan aanzien worden als een subbandadaptief systeem. Hoewel de filterbanken die aan de basis liggen van het PBFDAF–algoritme, slechts een beperkte frequentieselectiviteit vertonen, ligt de performantie van dit algoritme beduidend hoger dan dat van het standaard adaptieve filter. Vooreerst zoeken we uit welke eigenschappen het PBFDAF–algoritme zo aantrekkelijk maken. Vervolgens trachten we deze eigenschappen uit te breiden naar een meer algemene klasse van subbandadaptieve filters. Op deze manier kunnen drie ontwerpcriteria afgeleid worden en stellen we een nieuw adaptatie–algoritme voor dat gebaseerd is op de globale fout. We tonen aan hoe een klasse van subbandsystemen kan ontworpen worden die voldoen aan het eerste en het tweede ontwerpcriterium en die gebruik maken van dit nieuwe adaptatie–algoritme. Nochtans zal blijken dat deze systemen minder performant zijn dan het PBFDAF–algoritme. Het is onze overtuiging dat dit performantieverschil te wijten is aan het feit dat aan het derde ontwerpcriterium, dat betrekking heeft op het perfect, tijdsinvariant modelleren van een systeem van eindige orde, niet voldaan is, tenzij men gebruik maakt van adaptieve filters van oneindige lengte. Men zou daarom kunnen nagaan of er subbandsystemen en -structuren bestaan waarvoor aan het derde criterium kan voldaan worden en dit met filters van eindige lengte. Voorts kan men trachten te achterhalen hoe deze systemen moeten ontworpen worden.

Het adaptatie–algoritme dat wordt voorgesteld in hoofdstuk 7, kan aanzien worden als een uitbreiding van de "overlap–save"–correctie op de foutuitgang van het PBFDAF–algoritme naar een meer algemene klasse van subbandadaptieve filters. Naast de correctie op de foutuitgang wordt normaal gesproken ook een correctie op de gewichtvectoren doorgevoerd, zoals bijvoorbeeld het geval is bij het "constrained" PBFDAF–algoritme. Het zou interessant zijn na te gaan of deze gewichtcorrectie ook kan uitgebreid worden naar een meer algemene klasse van subbandadaptieve filters en wat het effect hiervan is op de performantie.

In deel IV van het proefschrift wordt de toepasbaarheid van verschillende subband- en frequentiedomeingebaseerde adaptieve filters geïllustreerd in een akoestische–echo–onderdrukkingssetup. "Multirate"–systemen, waarvan subband- en frequentiedomeingebaseerde adaptieve filters typische voorbeelden zijn, laten toe een lagere rekencomplexiteit en een hogere systeemperformantie te bekomen dan standaard adaptieve filtertechnieken, indien tijdsvariërende breedbandsignalen zoals spraak worden aangeboden. Het lijkt de moeite waard na te gaan of en hoe subband- en frequentiedomeintechnieken kunnen aangewend worden in andere toepassingen waar de signaalkwaliteit ontoereikend is, zoals ruisonderdrukking en dereverberatie.