

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik



**Optimierung und Analyse überabtastender
komplex-modulierter Filterbänke mit individuell verstärkten
Teilbandsignalen**

DISSERTATION

zur
Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs

vorgelegt von
Thomas Kurbiel
Bochum

Bochum, 14. April 2010

Dissertation eingereicht:

Referent:

Korreferent:

Tag der mündlichen Prüfung:

14. April 2010

Prof. Dr.-Ing. H. G. Göckler

Prof. Dr.-Ing. R. Martin

29. Juni 2010

Schriftenreihe Digitale Signalverarbeitung

Band 5

Thomas Kurbiel

**Optimierung und Analyse überabtastender
komplex-modulierter Filterbänke mit
individuell verstärkten Teilbandsignalen**

Shaker Verlag
Aachen 2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9476-2

ISSN 1617-2221

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand in der Zeit von 2007 bis 2010 während meiner Tätigkeit als Promotionsstipendiat der Studienstiftung des deutschen Volkes in der Arbeitsgruppe Digitale Signalverarbeitung an der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik der Ruhr-Universität Bochum.

Zum Gelingen dieser Arbeit haben eine Vielzahl von Personen beigetragen, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Heinz G. Göckler für die interessante und praxisorientierte Aufgabenstellung, die Unterstützung und Betreuung meiner Arbeit, sowie für wertvolle Hinweise bei der Abfassung dieser Niederschrift. Vor allem danke ich ihm jedoch für die offene und außergewöhnlich freundschaftliche Atmosphäre sowie die ständige Diskussionsbereitschaft bzgl. fachlicher als auch außerfachlicher Themen.

Für die Übernahme des Korreferats, der damit verbundenen Mühen und dem meiner Arbeit entgegengebrachtem großen Interesse danke ich Herrn Professor Rainer Martin.

Weiterhin bedanke ich mich bei meinem Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Daniel Alfsmann für die zahlreichen Diskussionen, sowie bei allen ehemaligen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Digitale Signalverarbeitung für das angenehme Arbeitsklima.

Bei der Studienstiftung des deutschen Volkes bedanke ich mich für die Förderung meiner Promotion durch ein Stipendium und die finanzielle und ideelle Unterstützung während der gesamten Zeit.

Zu guter Letzt möchte ich mich herzlichst bei meiner Familie für die private Unterstützung und den entgegengebrachten Rückhalt bedanken.

Bochum, 14. April 2010

THOMAS KURBIEL

Inhaltsverzeichnis

Notation	v
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung und Stand der Technik	1
1.2 Ziele der Arbeit	2
1.3 Übersicht	3
2 Eigenschaften von SBC-Filterbänken	5
2.1 Übertragungseigenschaften	7
2.2 Verzerrungsfunktion	10
2.2.1 Vektordarstellung der Verzerrungsfunktion	11
2.2.2 Impulsantwort der Verzerrungsfunktion	11
2.2.3 Reellwertigkeit der Verzerrungsfunktion	12
2.2.4 Periodizität der Verzerrungsfunktion	13
2.2.5 Symmetrie der Verzerrungsfunktion	13
2.3 Störsignal am Ausgang der SBC-FB	14
2.3.1 Vektordarstellung der Aliasingfunktionen	14
2.3.2 Zeitbereichsdarstellung	15
2.3.3 Reellwertigkeit	16
2.3.4 Periodizität der Aliasingfunktionen	17
2.4 Realisierbare Verzögerungen	17
3 Gütemaße zur Beurteilung von Signalqualitäten	21
3.1 Kanalabhängiger Signal-Stör-Abstand am Ausgang der SBC-FB	21
3.1.1 Nutzsignal am Ausgang der SBC-FB	22
3.1.2 Störsignal am Ausgang der SBC-FB	23
3.1.2.1 Mittlere AKF $\overline{\varphi}_{yy}(\kappa)$	24
3.1.2.2 Mittlere KKF $\overline{\varphi}_{ys}(\kappa)$	29
3.1.2.3 Mittlere KKF $\overline{\varphi}_{sy}(\kappa)$	31
3.1.2.4 AKF des Störsignals am Ausgang der SBC-FB	32
3.1.2.5 LDS des Störsignals am Ausgang der SBC-FB	32
3.1.3 Eingangssignal	33
3.1.4 Weißer Eingangsprozess	35
3.2 SNR der Teilbandsignale	37

4	Entwurfsverfahren mit Spezifikationen (AKV)	39
4.1	Zielfunktionen	39
4.1.1	AFB-Prototypfilter	39
4.1.2	SFB-Prototypfilter	41
4.2	Nebenbedingungen	43
4.2.1	Durchlassbereich	43
4.2.2	Sperrbereich	43
4.3	Entwurfsalgorithmus	45
4.4	Diskussion	46
5	Entwurfsverfahren mit iterativer Gewichtung (IRV)	49
5.1	Ansatz	49
5.2	Zielfunktionen	51
5.2.1	AFB-Prototypfilter	51
5.2.2	SFB-Prototypfilter	53
5.3	Nebenbedingungen	54
5.4	Entwurfsalgorithmus	56
5.5	Diskussion	59
6	Übertragungseigenschaften	63
6.1	Einfluss der Verstärkungsfaktoren	63
6.1.1	Betragsfrequenzgang der Verzerrungsfunktion	66
6.1.2	Gruppenlaufzeit der Verzerrungsfunktion	68
6.2	Linearphasige Filtermodelle	69
6.3	Hinreichende Bedingung	71
6.4	Kompensationsmethode	73
6.4.1	Kompensierter Betragsfrequenzgang der Verzerrungsfunktion	74
6.4.2	Kompensierte Gruppenlaufzeit der Verzerrungsfunktion	76
6.5	Kanalabhängiger SNR am Ausgang der SBC-FB	78
7	Modifikationen der recheffizienten SBC-FB-Struktur	81
7.1	Analysefilterbank	81
7.2	Synthesefilterbank	83
7.3	Anwendung	85

8	Untersuchung bekannter Entwurfsverfahren	89
8.1	Entwurfsverfahren nach de Haan (HV)	89
8.1.1	AFB-Prototypfilter	89
8.1.2	SFB-Prototypfilter	92
8.1.3	Diskussion	93
8.2	Entwurfsverfahren nach Dam (DV)	94
8.2.1	AFB-Prototypfilter	95
8.2.2	SFB-Prototypfilter	96
8.2.3	Algorithmus	97
8.2.4	Diskussion	97
8.3	Entwurfsverfahren nach Stöcker (SV)	101
8.3.1	AFB-Prototypfilter	101
8.3.2	SFB-Prototypfilter	103
8.3.3	Algorithmus	104
8.3.4	Diskussion	104
8.4	Zusammenfassung	105
9	Numerische Beispiele	107
9.1	Vorgaben und Entwurfsparameter	107
9.2	Betragsfrequenzgänge	111
9.3	Gruppenlaufzeit	112
9.4	Kompensationsmethode	114
9.5	Qualität des Ausgangssignals	114
9.5.1	“ski-slope“-Verstärkungsprofil	115
9.5.2	Einheitliche Verstärkung	118
9.5.3	Unterschiedliche Verstärkungsprofile	119
9.6	Qualität der Teilbandsignale	120
9.7	Rechenleistung	121
9.8	Fazit	122
10	Zusammenfassung und Ausblick	125
A	Implementierung der Gütemaße	129
A.1	Kanalabhängiger SNR am Ausgang der SBC-FB	129
A.2	SNR der Teilbandsignale	134
B	Konvexe Programmierung	137
B.1	Optimierungsproblem mit Nebenbedingungen	137
B.2	Konvexe Mengen	138

C	Rotationstheorem	143
C.1	Grundlagen	143
C.2	Maximaler Fehler	144
D	Matrizen des IR-Verfahrens und deren effiziente Berechnung	145
D.1	Herleitung	145
D.1.1	Zeitbereichsdarstellung	145
D.1.2	Partielle Ableitung	148
D.1.3	Matrix-Elemente	150
D.2	Effiziente Berechnung	150
E	Recheneffiziente SBC-FB-Struktur	155
E.1	Analysefilterbank	155
E.2	Verstärkung der Teilbandsignale	159
E.3	Synthesefilterbank	159
	Literaturverzeichnis	163

Notation

Abkürzungen

AFB	Analysefilterbank
AKF	Autokorrelationsfolge
AU	Abtastratenumsetzung
BP	Bandpass
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
DSV	Digitale Signalverarbeitung
DTFT	Zeitdiskrete (<u>D</u> iscrete <u>T</u> ime) Fourier-Transformation
FB	Filterbank
FFT	Fast Fourier-Transformation
FIR	endliche Impulsantwort (<u>F</u> inite <u>I</u> mpuls <u>R</u> esponse)
HP	Hochpass
IA	Impulsantwort
KKF	Kreuzkorrelationsfolge
LDS	Leistungsdichtespektrum
LP	lineare Phase (<u>l</u> inear <u>P</u> hase)
LTI (LSI)	Linear Time (Shift) Invariant
PR	Perfekt rekonstruierend (<u>P</u> erfect <u>R</u> econstruction)
SBC	Subband Coder
SFG	Signalflussgraph
SFB	Synthesefilterbank
SNR	Signal-Stör-Abstand (<u>S</u> ignal-to- <u>N</u> oise-Ratio)
TB	Teilband
TBV	Teilbandverarbeitung
TP	Tiefpass

TMUX	Transmultiplexer
ÜF	Übertragungsfunktion (Systemfunktion)
VF	Verzerrungsfunktion
zT	z -Transformation bzw. z -Transformierte

Konventionen und Operatoren

$\arg \{ \cdot \}$	Argument
$\{ \cdot \}^*$	Komplexe Konjugation
$x * y$	Faltung von x und y
$E \{ \cdot \}$	Erwartungswert
$\operatorname{Re} \{ \cdot \}$	Realteil
$\operatorname{Im} \{ \cdot \}$	Imaginärteil
$\{ \cdot \}^T$	transponiert
$\{ \cdot \}^H = \{ [\cdot]^* \}^T$	transjugiert
$\lfloor x \rfloor$	Der Wert x wird Richtung $-\infty$ gerundet
$\lceil x \rceil$	Der Wert x wird Richtung ∞ gerundet
\bar{x}	Mittelwert von x
$ x $	Betrag von x

Funktionen

$\delta(n)$	Einheitsimpuls
$\operatorname{si}(x) = \sin(x)/x$	si-Funktion

Symbole

$f_i = 1/T_i$	Eingangsabtastrate (input) = $1/\text{Abtastperiode}$
$f_n = 1/T_n$	Nyquistabtastrate
$f_o = 1/T_o$	Ausgangsabtastrate (output)
$z_\bullet = e^{sT_\bullet}$	Variable der zT bezogen auf Abtastrate $f_\bullet = 1/T_\bullet$
$\Omega^{(\bullet)} = 2\pi f/f_\bullet$	Normierte Frequenzvariable diskreter Systeme; Abtastrate f_\bullet
$\Omega_d^{(\bullet)}$	normierte Durchlassgrenzfrequenz
$\Omega_s^{(\bullet)}$	normierte Sperrgrenzfrequenz
I	Kanalanzahl (Filterbank), Laufindex $l = 0, \dots, I - 1$ und $s = 0, \dots, I - 1$
M	Dezimations bzw. Interpolationsfaktor
\mathcal{O}	Überabtastfaktor
$n, m \in \mathbb{Z}$	diskrete Zeitparameter (bezogen auf T_i bzw. T_n)
$\kappa, \lambda \in \mathbb{Z}$	diskrete Zeitversätze, (bezogen auf T_i bzw. T_n)
$w_M(n)$	diskrete Abtastfunktion
$\mathbf{A}, [\mathbf{A}]_{\nu,\mu}$	Matrix, Element der Matrix \mathbf{A} in Zeile ν und Spalte μ
\mathbf{b}	Vektor
$\mathbf{1}$	Vektor, dessen sämtliche Elemente 1 sind
$x(n), x(m)$	reellwertige, zeitdiskrete Signale
$\underline{x}(n), \underline{x}(m)$	komplexwertige, zeitdiskrete Signale
$\varphi_{\underline{x}\underline{x}}(\kappa), \varphi_{\underline{x}\underline{x}}(\lambda)$	Autokorrelationsfolge stationärer Signale $\underline{x}(n)$ bzw. $\underline{x}(m)$
$\overline{\varphi}_{\underline{x}\underline{x}}(\kappa), \overline{\varphi}_{\underline{x}\underline{x}}(\lambda)$	mittlere AKF zyklstationärer Signale $\underline{x}(n)$ bzw. $\underline{x}(m)$
$\varphi_{\underline{x}\underline{y}}(\kappa)$	KKF gemeinsam stationärer Signale $\underline{x}(n)$ und $\underline{y}(n)$
$\Phi_{\underline{x}\underline{x}}\left(e^{j\Omega^{(\bullet)}}\right)$	Leistungsdichtespektrum stationärer Signale $\underline{x}(n)$ bzw. $\underline{x}(m)$
$\overline{\Phi}_{\underline{x}\underline{x}}\left(e^{j\Omega^{(\bullet)}}\right)$	mittleres LDS zyklstationärer Signale $\underline{x}(n)$ bzw. $\underline{x}(m)$
$\underline{X}(z_\bullet)$	zT von $\underline{x}(n)$ bzw. $\underline{x}(m)$

$\underline{X} \left(e^{j\Omega(\bullet)} \right)$	DTFT von $\underline{x}(n)$ bzw. $\underline{x}(m)$
$F_{\text{dist}} \left(e^{j\Omega(\bullet)} \right)$	Verzerrungsfunktion (distortion function)
$\underline{F}_{\text{alias},k} \left(e^{j\Omega(\bullet)} \right)$	Aliasingfunktionen, $k = 0, \dots, M - 1$
N_h, N_g	Länge der Impulsantwort des AFB- bzw. SFB-Prototypfilters
$\forall \dots$	für alle ...
\mathbb{N}	Menge der natürlichen Zahlen
\mathbb{N}_0	Menge der natürlichen Zahlen einschließlich Null
\mathbb{Z}	Menge der ganzen Zahlen
\mathbb{Q}	Menge der rationalen Zahlen
\mathbb{C}	Menge der komplexen Zahlen
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen

Anmerkungen zur Notation

- Komplexe Größen werden durch einen Unterstrich gekennzeichnet.