

Kompensation akustischer Echos unter Einfluß von nichtlinearen Audiokomponenten

Der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

vorgelegt von

Alexander K. E. Stenger

Erlangen, 2000

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 10. Juli 2000

Tag der Promotion: 6. November 2000

Dekan: Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. W. Kellermann

Prof. Dr.-Ing. E. Hänsler, Technische Universität Darmstadt

Berichte aus der Kommunikations- und Informationstechnik

Band 23

Alexander Stenger

**Kompensation akustischer Echos unter Einfluß
von nichtlinearen Audiokomponenten**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Stenger, Alexander:

Kompensation akustischer Echos unter Einfluss von
nichtlinearen Audiokomponenten/Alexander Stenger.

Aachen: Shaker, 2001

(Berichte aus der Kommunikations- und Informationstechnik; Bd. 23)

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-8675-1

Copyright Shaker Verlag 2001

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8675-1

ISSN 1432-489X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Kellermann für die intensive Betreuung der Arbeit, verbunden mit spannenden und lehrreichen Diskussionen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Hänsler möchte ich für sein Interesse an meiner Arbeit und die freundliche Übernahme des Korreferats danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Girod danke ich für die Gelegenheit, in einer hervorragenden Arbeitsgruppe die für mich weitgehend neuen Gebiete Nachrichtentechnik und digitale Signalverarbeitung kennenzulernen und für den Anstoß zu dieser Arbeit.

Weiterhin bedanke ich mich bei meinen Kollegen Dr. Frank Heinle, Dr. Rudolf Rabenstein, Wolfgang Sörgel, Dr. Eckehard Steinbach und Peter Eisert für viele interessante Diskussionen und bei Klaus Stuhlmüller und Dr. Frank Heinle für das kritische Korrekturlesen der Arbeit. Allen Mitarbeitern des Laboratoriums für Nachrichtentechnik möchte ich für das freundschaftliche und spaßige Arbeitsklima danken.

Ebenfalls danken möchte ich Dr. Stephan Weiß und Dr. Robert W. Stewart für die unvergeßliche Zeit an der Strathclyde University, während der ein nicht unwesentlicher Teil der Arbeit entstand.

Nicht zuletzt danke ich Anja für ihr Verständnis und ihre Ermutigungen während des Verfassens der Arbeit.

Kurzfassung

Heutige Freisprecheinrichtungen besitzen zur Reduktion akustischer Echos meist einen digitalen Kompensator mit linearem Echopfadmodell. Bei ausreichend linearen Audiokomponenten erreichen solche Kompensatoren unter realen Bedingungen eine Echoreduktion von etwa 20...30 dB. Durch den Einsatz kostengünstiger Audiokomponenten oder durch Übersteuerung des Wiedergabeverstärkers, z.B. aufgrund niedriger Batteriespannung in Mobilgeräten, entstehen nichtlineare Verzerrungen. Anhand eines Hörtests wird gezeigt, daß der Benutzer des Freisprechgeräts erhebliche derartige Verzerrungen bei Sprache toleriert bzw. nicht hört. Zum fernen Teilnehmer wird dadurch jedoch bei lauten Äußerungen ein störendes, verzerrtes Echo zurückgesendet, das oft nicht durch herkömmliche lineare Kompensation entfernt werden kann. Deshalb werden in dieser Arbeit neue Echokompensatoren mit nichtlinearem Echopfadmodell vorgeschlagen.

Es wird zwischen gedächtnislosen und gedächtnisbehafteten Nichtlinearitäten unterschieden und jeweils ein spezielles Modell eingesetzt. Erstere entstehen durch Übersteuern des Wiedergabeverstärkers. Für diesen Fall wird ein kaskadierter Kompensator mit gedächtnisloser Polynomial- oder Begrenzerkennlinie als Vorstufe für ein lineares FIR-Filter eingesetzt. Ein spezielles Adaptionungsverfahren erlaubt die gleichzeitige NLMS- bzw. RLS-Adaption der Vorstufe und NLMS-Adaption des FIR-Filters mit einem gemeinsamen Fehlerkriterium. Mit einem übersteuerten Ein-Chip-Verstärker und einem ausreichend dimensionierten Kleinlautsprecher wird bei 1.5...7-fachem Rechenaufwand die Echoreduktion gegenüber einem linearen Kompensator um bis zu 10 dB verbessert. Die Möglichkeit von recheneffizienten Frequenzbereichsrealisierungen ähnlich denen von linearen adaptiven Filtern wird aufgezeigt. Dominieren vom Lautsprecher verursachte gedächtnisbehaftete Nichtlinearitäten, so eignet sich zur Echokompensation ein Volterra-Filter zweiter Ordnung mit NLMS-Adaption. Durch Beschränkung auf relevante Koeffizienten kann mit etwa dreifachem Rechenaufwand im Vergleich zum linearen Kompensator die Echoreduktion um 5...8 dB verbessert werden, wie Experimente mit verschiedenen Kleinlautsprechern belegen.

Ein zentrales Problem bei Echokompensatoren ist die Steuerung der Adaptionsschrittweite in Abhängigkeit von Sprecheraktivität und Adaptionzustand. Basierend auf einer Steuerung für lineare Kompensatoren werden für die neuen Kompensatoren geeignete Erweiterungen entwickelt. Dadurch können obige Ergebnisse mit realistischen Gesprächsszenarien erreicht werden.

Für beide Modelle wird auf Ansätze zur Steigerung der Recheneffizienz verwiesen, die in Nachfolgearbeiten untersucht werden könnten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Linearer Echokompensator	5
2.1	Bewertungsmaße	6
2.2	Adaptionsverfahren	8
2.3	Steuerung der Adaption	10
3	Nichtlinearitäten im akustischen Echopfad	12
3.1	Modell des Echopfads	12
3.2	Maße für nichtlineare Verzerrung	13
3.2.1	Klirrfaktor	14
3.2.2	Verzerrungsmaß auf Basis eines parametrischen Modells	15
3.2.3	Restverzerrungsleistung	15
3.2.4	Praktische Messung von Verzerrungen im Zusammenhang mit adaptiven Echokompensatoren	17
3.3	Hörbarkeit von nichtlinearen Verzerrungen	18
3.3.1	Bekannte Ergebnisse	19
3.3.2	Hörtests mit Sprachsignalen	20
3.4	Linearer Kompensator und nichtlinearer Echopfad	22
3.4.1	Stationäre Erregung	23
3.4.2	Instationäre Erregung	25
3.4.3	Konsequenzen für die Schrittweitensteuerung	26
3.5	Ansätze zur Berücksichtigung der Nichtlinearitäten	26
3.5.1	Inverse nichtlineare Vorverzerrung	27
3.5.2	Dynamik-Kompression	28
3.5.3	Nichtlinearer Echokompensator	29
3.5.3.1	Benötigte Abtastrate	29
3.5.3.2	Nichtlinearität mit Gedächtnis	36
3.5.3.3	Gedächtnislose Nichtlinearität	37
3.6	Zusammenfassung	38
4	Gedächtnislose nichtlineare Vorstufe	40
4.1	Adaption	41
4.1.1	Allgemeine parametrische nichtlineare Funktion	41

4.1.2	Polynom-Kennlinie	43
4.1.2.1	Normierung der Adaptionsschrittweite der Vorstufe	44
4.1.2.2	Initialisierung	45
4.1.2.3	Schnellere Adaption durch Orthogonalisierung	45
4.1.2.4	Schnellere Adaption durch RLS-Algorithmus	47
4.1.3	Begrenzer-Kennlinie	48
4.1.3.1	Normierung der Adaptionsschrittweite der Vorstufe	50
4.1.3.2	Initialisierung	52
4.2	Maße für den Adaptionszustand	52
4.2.1	Systemabstand für die Polynom-Kennlinie	53
4.2.2	Systemabstand für die Begrenzer-Kennlinie	54
4.3	Steuerung der Adaption	54
4.3.1	FIR-Filter	54
4.3.2	Polynom-Kennlinie	55
4.3.3	Begrenzer-Kennlinie	57
4.4	Simulationen	57
4.4.1	Realisierung der optimalen Schrittweiten	58
4.4.1.1	Idealisierter Versuchsaufbau	58
4.4.1.2	Steuerung des FIR-Filters	59
4.4.1.3	Steuerung der Vorstufe	61
4.4.1.4	Steuerung des RLS-Algorithmus	63
4.4.2	Adaptionsgeschwindigkeit des Polynoms	63
4.4.3	Eignung des nichtlinearen Modells	64
4.4.4	Verhalten bei lokaler Störung	66
4.5	Rechen- und Speicheraufwand	69
4.6	Ausblick: Realisierung im Frequenzbereich	71
4.6.1	Linearer AEC im Frequenzbereich	71
4.6.2	Kombination von Frequenzbereichsverfahren und nichtlinearem Kompensator	73
5	Volterra-Filter	77
5.1	Volterra-Filter als Echopfadmodell	78
5.1.1	Modell des Lautsprechers	78
5.1.2	Volterra-Kerne von Audio-Systemen	78
5.1.3	Auswirkung der Kaskadenstruktur des Echopfads	80
5.1.4	Messung realer Echopfade	81
5.2	Adaption	85
5.2.1	NLMS Algorithmus	86
5.2.2	Systemabstand	87
5.2.3	Konvergenzgeschwindigkeit	88
5.2.4	Schrittweitensteuerung	89
5.3	Ergebnisse	91
5.3.1	Erforderliche Gedächtnislänge	91
5.3.2	Adaption bei lokaler Störung	92

5.3.3	Rechen- und Speicheraufwand	95
6	Zusammenfassung	96
A	Aspekte des LMS- und des NLMS-Algorithmus	99
B	Zusammenhang zwischen ERLE und Systemabstand	102
B.1	Linearer AEC	102
B.2	Kompensator mit Polynom-Kennlinie	103
B.3	Kompensator mit Volterra-Filter	105
C	Symbolverzeichnis	107
C.1	Abkürzungen	107
C.2	Formelzeichen für den linearen Echokompensator	108
C.3	Formelzeichen im Zusammenhang mit Nichtlinearitäten	109
C.4	Formelzeichen für den Echokompensator in Kaskadenstruktur	110
C.5	Formelzeichen für den Echokompensator mit Volterra-Filter	112
C.6	Operatoren	113
	Literaturverzeichnis	114