

K. Steffen Bittner

Iterative Korrektur von nichtlinearen
Verzerrungen und Phasenstörungen in
Mehrträgersystemen

Beiträge aus der Informationstechnik

Mobile Nachrichtenübertragung

Nr. 47

K. Steffen Bittner

**Iterative Korrektur von nichtlinearen
Verzerrungen und Phasenstörungen in
Mehrträgersystemen**

 VOGT

Dresden 2009

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by Die Deutsche Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie;
detailed bibliographic data is available in the internet at <http://dnb.ddb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2009

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Iterative Korrektur von nichtlinearen Verzerrungen und Phasenstörungen in
Mehrträgersystemen“ von K. Steffen Bittner überein.

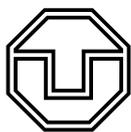
© Jörg Vogt Verlag 2009
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-938860-30-4

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de



Iterative Korrektur von nichtlinearen Verzerrungen und Phasenstörungen in Mehrträgersystemen

K. Steffen Bittner

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Eduard Jorswieck

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fettweis

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Berthold Lankl

Tag der Einreichung: 07. September 2009

Tag der Verteidigung: 04. November 2009

Kurzfassung

Angetrieben von der ständig steigenden Nachfrage an immer höheren Datenraten in drahtlosen Funkanwendungen gilt es Methoden zu entwickeln, welche die damit verbundenen Anforderungen erfüllen und letztendlich die spektrale Effizienz der Übertragung steigen lassen. Ein besonders vielversprechender Ansatz sind dabei die so genannten Mehrantennen- Mehrträgersysteme, weil sie die Vorteile beider Verfahren vereinigen. So führen Mehrantennensysteme zu einer erhöhten Kanalkapazität, während Mehrträgersysteme eine sehr breitbandige Übertragung bei handhabbarer rechentechnischer Komplexität erlauben. Jedoch besitzen Mehrträgersysteme einen hohen Dynamikumfang, was sie anfällig für nichtlineare Verzerrungen macht und besonders den Wirkungsgrad des Verstärkers beeinflusst. Außerdem sind sie sensibel gegenüber Synchronisationsfehlern.

Zur Kompensation der genannten Nachteile werden im Zuge dieser Arbeit iterative Empfängerstrategien entwickelt, welche den Fehlerbeitrag von nichtlinearen Störungen und Synchronisationsfehlern in Form von Phasenfluktuationen signifikant reduzieren. Die Gemeinsamkeit der präsentierten Algorithmen besteht darin, dass anhand von bekannten statistischen Eigenschaften des jeweiligen Störprozesses Realisierungen geschätzt und aus dem Empfangssignal entfernt werden.

Für eine einführende Motivation und Einordnung der Kompensationsalgorithmen erfolgt eine Abschätzung der erreichbaren Raten des Übertragungssystems, welche Aussagen über die Wirksamkeit und Grenzen der präsentierten Algorithmen zulassen. Die sich daran anschließenden numerischen Auswertungen anhand von Fehlerraten zeigen die volle Leistungsfähigkeit der Algorithmen in einem codierten System. So erreicht das Konzept der Entscheidungsrückkopplung zur Kompensation von nichtlinearen Verzerrungen annähernd die Leistungsfähigkeit einer linearen Übertragung. Für die Kompensation von Phasenfluktuationen wird gezeigt, dass schon das Schätzen und Entfernen von wenigen, ausgewählten Harmonischen die Fehlerraten und den Leistungsverlust signifikant reduziert. Weiterhin wird die Stabilität der entwickelten Algorithmen bei nicht perfekter Akquise und Kanalkenntnis am Empfänger betrachtet. Auch hier konnten beeindruckende Ergebnisse festgestellt werden.

Eine abschließende Auswertung der rechentechnischen Komplexität der Empfängerstruktur führt zu der Schlussfolgerung, dass der zusätzliche Mehraufwand durch den Gewinn an Leistungsfähigkeit gerechtfertigt ist.

Somit ist das Ergebnis dieser Arbeit, dass nichtlineare Verzerrungen sowie Phasenfluktuationen unter praktisch realistischen Gesichtspunkten mit Hilfe von geeigneten Empfängerstrategien geschätzt und kompensiert werden können.

Abstract

In order for modern wireless technologies to satisfy the demand for ever higher data rates, the radio frequency channel bandwidth has to be used as efficiently as possible. Multiple transmit and receive antennas allow high spectral efficiency by spatially multiplexing several data streams into the same time frequency bin. A very promising development is the combination of this concept with multicarrier techniques, which enables wideband communication in combination with low computational complexity. Multicarrier signals, however, suffer from a high dynamic range which makes them susceptible to nonlinear distortion. Furthermore they are sensitive to synchronisation errors such as phase noise.

The aim of this work is to develop and evaluate iterative receiver strategies which reduce the error due to nonlinear distortion and phase noise. The common base of the presented algorithms is the use of the known statistics of the underlying random process in order to estimate reliable, instantaneous realisations of the distortion noise. This distortion noise can then be removed from the received signal.

An appraisal of the achievable rates shows the potential and limits of the presented algorithms and their classification. This potential provided the motivation for the work.

The numerical evaluations of the algorithms in terms of error rates demonstrate the impressive performance in a coded environment. It is shown that the decision feedback algorithm used for the compensation of nonlinear distortion achieves almost the same performance as linear transmission. For the phase noise mitigation it is shown that, the estimation and compensation of a few numbers of reliable phase noise harmonics results in a substantial saving of transmit power and significantly lowers the remaining error floor. Furthermore the stability of the developed algorithm is tested under non perfect acquisition and channel state information at the receiver side. Also in these cases impressive performance results are obtained.

Finally, an evaluation of the receiver computational complexity is given, which leads to the conclusion that the additional overhead is more than justified by the given performance gain.

In conclusion, the main result of this thesis is that even in practical realistic scenarios, nonlinear distortion and phase noise can be estimated and compensated for with the use of adequate receiver techniques.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei all denjenigen bedanken, die mich während meines Studiums auf verschiedenste Art und Weise unterstützt haben.

Ganz besonderer Dank gilt dabei meinem Mentor Prof. Gerhard Fettweis. Er hat einen Lehrstuhl geschaffen, welcher einem Wissenschaftler die Möglichkeit gibt, sich frei zu entfalten. Für mich war es die Mitarbeit in vielen (inter-)nationalen Projekten, was nicht nur eine fachliche Herausforderung war, sondern auch meine Persönlichkeit prägte. Außerdem möchte ich mich bei Prof. Berthold Lankl für das Interesse an meiner Arbeit und der Übernahme des Zweitgutachtens ganz herzlich bedanken. Viele wertevolle Kommentare und Hinweise kamen von seiner Seite.

Die vorliegende Arbeit wäre in ihrer jetzigen Fassung nicht ohne die Hilfe von Kollegen und Freunden möglich. In vielen Gesprächen mit Ernesto, Wolfgang und Marco sind Ideen entstanden, welche sich in dieser Arbeit wiederfinden. Mit Thomas stand ich im direkten Dialog und zusammen haben wir Lösungen von einigen mathematischen Problemen entwickelt. Auch bei Andreas möchte ich mich bedanken, einem Freund, welcher mich nun schon seit 10 Jahren begleitet hat. Mit ihm habe ich nicht nur „spannende“ Schaltungstechnikpraktika gemeistert, sondern auch geniale Urlaube verbracht. Auch meinen ehemaligen Zimmerkollegen Peter, André und Ting-Jung möchte ich meinen Dank aussprechen. Es war eine fantastische Atmosphäre und für mich eine Freude, in diesem Büro zu arbeiten. Weiterhin möchte ich mich bei Susanne und Frau Jutta Hoffmann für das Korrekturlesen bedanken.

Ganz herzlichen Dank gilt meiner Familie für die Förderung und Unterstützung meiner Ausbildung. Meine Eltern und mein Bruder waren immer da, wenn ich sie brauchte. Meine Großväter Achim und Karl zeigten mir schon in früher Kindheit die Faszination der Mathematik und der Technik. Diese Faszination ist bis jetzt ungebrochen.

Zuletzt, aber in meinem Herzen an erster Stelle, möchte ich mich bei meiner Aleksandra bedanken. Ihre Liebe und Geduld in den letzten Monaten vermag ich nicht in Worte zu fassen. Mana mīlotā. Esmu tev ļoti pateicīgs. Es tevi mīlu.

Altenberg, im November 2009

Steffen Bittner

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Danksagung	v
1 Einleitung	1
1.1 Drahtlose Kommunikation	1
1.2 Gliederung und Beitrag dieser Arbeit	2
2 Mehrantennen-Mehrträgerverfahren	3
2.1 Systemüberblick	3
2.2 Kanalcodierung und Modulation	4
2.3 Übertragungskanal	4
2.3.1 Mehrwegeausbreitung	4
2.3.2 Statistische Kanalmodellierung	7
2.4 Grundlagen von Mehrträgerverfahren (OFDM)	8
2.4.1 Basisbandbetrachtung	8
2.4.2 Ratenbetrachtung	11
2.5 Mehrantennensysteme/MIMO	13
2.5.1 Systemmodell	14
2.5.2 Detektionsaufgabe	15
2.5.3 Detektionsstrategien	17
2.6 Mehrträger-Mehrantennenverfahren/MIMO-OFDM	20
3 Nichtlineare Signalverzerrung	23
3.1 Vorbetrachtung	23
3.2 Charakteristik von Mehrträgersignalen	25
3.2.1 Zusammenhang: Wirkungsgrad, IBO, PAPR	29
3.2.2 Digitale Signalvorverzerrung	30
3.2.3 Statistische Beschreibung	32
3.2.4 Ratenbetrachtung	35
3.3 Detektion begrenzter und gefilterter OFDM-Signale	37
3.3.1 Existierende Verfahren	37
3.3.2 Kompensationsalgorithmus	37
3.3.3 Numerische Ergebnisse	39

3.4	Zusammenfassung	42
4	Oszillatorphasenrauschen	45
4.1	Oszillatorphasenrauschen	45
4.1.1	Rauschmodelle	46
4.1.2	Systemmodell	55
4.1.3	Ratenbetrachtung	61
4.2	Kompensation des Gleichphasenfehlers	63
4.2.1	Kompensationsalgorithmen	64
4.2.2	Numerische Ergebnisse	66
4.3	Phasenrauschschätzung im Frequenzbereich	69
4.3.1	Literaturüberblick	70
4.3.2	Einantennensysteme	71
4.3.3	Mehrantennensysteme	79
4.4	Phasenrauschschätzung im Zeitbereich	82
4.4.1	Literaturüberblick	82
4.4.2	Kalmantracking	83
4.5	Zusammenfassung	88
5	Nichtlineare Verzerrungen und Oszillatorphasenrauschen	91
5.1	Problemanalyse	91
5.2	Systembeschreibung	92
5.2.1	Systemmodell	92
5.2.2	Ratenbetrachtung	93
5.3	Kompensation von digitaler Signalvorverzerrung und Phasenrauschen	96
5.3.1	Kompensationstrategie	96
5.3.2	Numerische Auswertung	98
5.4	Zusammenfassung	101
6	Praktische Gesichtspunkte	103
6.1	Fehlangepasste Phasenrauschkorrelationsmatrix	103
6.2	Signalakquise und Kanalschätzung	104
6.2.1	Synchronisation	105
6.2.2	Kanalschätzung	106
6.2.3	Ergebnisse	112
6.3	Komplexitätsanalyse	115
6.4	Zusammenfassung	116
7	Zusammenfassung und Ausblick	119
A	Zuverlässigkeitswerte/L-Werte	123
A.1	Vorbetrachtung	123
A.2	MAP Detektion, L-Wertberechnung	124

A.2.1	MAP Detektion, Harte Entscheidung	124
A.2.2	L-Wertberechnung, Weiche Entscheidung	125
B	Zirkulante Matrizen	127
B.1	Vorbetrachtung	127
B.2	Anwendungsbeispiele	129
B.2.1	OFDM-Kanal	129
B.2.2	Oszillatorphasenrauschen	129
C	Mehrantennendetektion	133
C.1	Lineare Detektion	133
C.1.1	MMSE Filter	133
C.1.2	SINR Berechnung	134
C.2	Parallele Interferenzauslöschung	134
C.2.1	Filterberechnung	135
C.2.2	SINR Berechnung	137
D	Übersicht bekannter digitaler Verfahren zur Reduktion der Signaldynamik	139
E	Oszillatoreigenschaften	143
E.1	Freilaufender Oszillator	143
E.2	Phasenregelkreis	145
F	Unscented Kalmanfilterung	151
G	Komplexitätsanalyse	153
	Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen	157
	Abbildungsverzeichnis	165
	Tabellenverzeichnis	169
	Literaturverzeichnis	171

1

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Drahtlose Kommunikation

Längst beschränkt sich die drahtlose Kommunikation nicht mehr auf den reinen Austausch von Sprache zwischen den Teilnehmern eines Drahtlosnetzwerkes, sondern immer mehr rückt der Fokus zukünftiger Mobilfunkstandards auf die Übertragung von großen Datenpaketen sowie hochdatenratigen Multimediaanwendungen. Im Zuge dieser rasanten Entwicklung steigen auch die Anforderungen an die durch das System zu unterstützenden Datenraten. Um diesen Tatsachen gerecht zu werden, müssen im Entwurfsprozess zukünftiger Systeme bekannte Techniken zur Datenübertragung berücksichtigt und weiterentwickelt werden.

Ein besonders vielversprechender Ansatz ist die Kombination von Mehrantennen- und Mehrträgerverfahren, weil er die Vorteile einer erhöhten Kanalkapazität (Mehrantennensystem) und einfache Signalverzerrung selbst bei frequenzselektiven Funkkanälen und Systembandbreiten von mehreren Megahertz (Mehrträgerverfahren) verbindet [IEEE11n 2008]. Mehrträgersysteme stellen jedoch hohe Anforderungen an die Signalverarbeitungskette und vor allem an das analoge Frontend eines Transceivers. Diese Anforderungen werden mit der Anzahl an Antennen und der verwendeter Trägerfrequenz noch zusätzlich verschärft.

Physikalische Störmechanismen in den analogen Komponenten führen dazu, dass das Sende- bzw. Empfangssignal eine Vielzahl an verschiedenartigen Signalverzerrungen erfährt, hervorgerufen zum Beispiel durch: Phasenrauschen, Gleichanteil, Frequenzversatz, Nichtlinearitäten, Jitter und I/Q Asymmetrie. Diese Störgrößen gilt es durch einen angepassten Systementwurf und/oder entsprechend gute Analogkomponenten zu vermeiden bzw. zu unterdrücken. Jedoch ist diese Vorgehensweise mit einem eventuellen Verlust an spektraler Effizienz und höheren Kosten verbunden. Ein alternativer Ansatz ist, die analogen Störgrößen bis zu einem gewissen Grad zuzulassen und die dadurch auftretenden Signalverzerrungen mit Hilfe von geeigneten Algorithmen digital zu kompensieren. Dieses Konzept ist in der Literatur auch als *Dirty RF* Paradigma bekannt und bildet die Motivation der vorliegenden Arbeit [Fettweis u. a. 2007].

1.2 Gliederung und Beitrag dieser Arbeit

Aufbauend auf bekannten, praxisrelevanten Modellen analoger Störgrößen entwickelt und bewertet diese Arbeit geeignete empfängerseitige Kompensationsalgorithmen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der iterativen Korrektur von Phasenrauschen und nichtlinearen Verzerrungen, da diese besonders bei hochvalenten Mehrträgerverfahren, welche zusätzlich noch bei hohen Trägerfrequenzen operieren, einen signifikanten Störbeitrag liefern.

Kapitel 2 stellt die systemtheoretischen Grundlagen eines Mehrantennen-Mehrträgerverfahrens vor. Ausgehend von der Signalverarbeitung am Sender und Empfänger werden die relevanten Signalparameter eingeführt und miteinander in Beziehung gesetzt.

Daran anschließend widmet sich Kapitel 3 der Problematik von nichtlinearen Signalverzerrungen und deren Auswirkungen auf das System, wobei ein bekannter Kompensationsalgorithmus untersucht und weiterentwickelt wird.

Ein größerer Teil dieser Arbeit beschäftigt sich in Kapitel 4 mit dem Phasenrauschen als multiplikative Störgröße. Anhand der statistischen Eigenschaften der Phasenfluktuationen werden zwei Kompensationsalgorithmen vorgestellt und miteinander verglichen. Besonders wird dabei auf die Anwendung in Mehrantennensystemen sowie auf die Quelle des Phasenrauschens eingegangen.

In Kapitel 5 erfolgt eine gemeinsame Betrachtung von Phasenrauschen und Nichtlinearitäten, indem beide Störgrößen in das Übertragungsmodell integriert und deren Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Systems charakterisiert werden. Weiterhin werden erste Ansätze einer möglichen Kompensation vorgeschlagen.

Abschließend diskutiert Kapitel 6 die präsentierten Kompensationsalgorithmen im Zusammenhang mit einer praktisch realisierbaren Empfängerstruktur und es erfolgt eine Bewertung sowie Gegenüberstellung der Komplexität.

Kapitel 7 fasst die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick über weiterführende Problemstellungen.