

# **Verbundoptimierung und Realisierung echtzeitfähiger blinder Kanalverzerrungs- und Synchronisationsmodule**

**Der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der**

**Universität Siegen**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften**

**(Dr.-Ing.)**

zur Genehmigung vorgelegte Dissertation

von

**Dipl.-Ing. Stephan Meyer**

- 1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Bessai
- 2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hubert Roth
- Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Roman Obermaisser

Tag der mündlichen Prüfung: 21.08.2014



Berichte aus der Kommunikationstechnik

**Stephan Meyer**

**Verbundoptimierung und Realisierung  
echtzeitfähiger blinder Kanalverzerrungs-  
und Synchronisationsmodule**

Shaker Verlag  
Aachen 2014

**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.: Siegen, Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3244-4

ISSN 0945-0823

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit ist am Lehrstuhl für Signal- und Systemtheorie an der Universität Siegen im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter entstanden.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Bessai für die Möglichkeit der Durchführung dieser Arbeit. Bereits während meines Studiums an der Universität Siegen und der Fertigstellung meiner Diplomarbeit am Fraunhofer IMS führte Prof. Bessai mich an die benötigte selbstständige und eigenverantwortliche Arbeitsweise heran. Sowohl seine hervorragende Unterstützung als auch die guten Arbeitsbedingungen ermöglichten einen erfolgreichen Abschluss dieser Dissertation.

Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hubert Roth für die Übernahme des Koreferats. Seine konstruktiven Anregungen und Hinweise lieferten einen wertvollen Beitrag zur Fertigstellung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Roman Obermaisser danke ich für das entgegengebrachte Interesse zur Begutachtung meiner Arbeit und der Bereitschaft, der Promotionskommission vorzusitzen.

Für die Tätigkeit als Mitglied der Promotionskommission bin ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Marcin Grzegorzek mit Dank verbunden.

Ferner gilt mein Dank allen ehemaligen Kollegen am Lehrstuhl für Digitale Kommunikationssysteme. Insbesondere meinen Kollegen Donatus Weber, Andreas Schantin, Jan Holle, Markus Dunte, André Groll, Jinsuh Shin, Rainer Schick, Matthias Schneider und Christian Bodenstedt bin ich zu besonderem Dank verpflichtet.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Studenten, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben. Hervorzuheben sind hier Simon Meckel, Michael Büdenbender, Achim Alexander Heinz, Daniel Stock, Philip Schmidt, Veit Wiese, Heiko Bub und Jonas Reitz.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern Christine und Dieter Meyer und meinen Geschwistern Frederic und Thomas für die jahrelange und fortwährende Unterstützung zeit meines Lebens.

November 2014

Stephan Meyer

## **Kurzfassung**

Moderne Kommunikationssysteme erfordern den Einsatz leistungsfähiger Funktionsblöcke zur Beseitigung kanalbedingter Signalverzerrungen. Im Gegensatz zu konventionellen Entzerrern, welche die Entfernung der auftretenden Störungen durch den Einsatz von Trainingssequenzen vollziehen, kommen "blinde" Entzerrer ohne diese Zusatzsymbole aus. Der Verzicht auf diese vordefinierten Trainingssequenzen ermöglicht eine deutliche Steigerung der Nettodatenrate des Kommunikationssystems.

Aktuelle Forschungsarbeiten im Themengebiet "Blinde Kanalverzerrung" konzentrieren sich neben der Optimierung des Adaptierungsprozesses auf die systembedingten Anpassungen beim Einsatz mehrstufiger digitaler Modulationsverfahren. Bei nahezu allen seither publizierten Arbeiten innerhalb des Forschungsgebiets wird perfekte Taktsynchronisation vorausgesetzt. Häufiger findet in diesem Zusammenhang die Trägersynchronisation Beachtung, allerdings unter der Verwendung unrealistischer Störgrößen. Aufgrund der getroffenen Annahmen (perfekter Takt, geringe Störgrößen) vereinfachen sich zwar die theoretische Analyse und die simulationsgestützte Untersuchung, diese idealisierten Voraussetzungen sind jedoch im praktischen Betrieb weder erfüllt noch umzusetzen. Bereits in den 90er Jahren wird von Jablon auf signifikante Probleme durch fehlerbehaftete Taktinformationen hingewiesen und von Nasir in 2010 als weiterhin ungelöste Problemstellung beschrieben. Praktische Lösungen – insbesondere für den Echtzeitbetrieb von Modems – gab es bisher leider nicht. Auch wurde das Problem der Positionierung des Entzerrers innerhalb der Signalverarbeitungskette relativ zu den beiden Synchronisationseinheiten bis heute nicht endgültig geklärt.

Die vorliegende Arbeit soll auf die genannten Fragen qualifizierte und durch Experimente bestätigte Antworten geben. Zur praktischen Untermauerung der Simulationsergebnisse aus umfassenden und breit angelegten eigenen Studien dient ein in mehrjähriger Entwicklungsarbeit entstandenes Labor-Funkmodem. Der prototypisch realisierte Hardware-Aufbau ermöglicht eine objektive Leistungsbewertung unterschiedlicher blinder

Entzerrverfahren bei Voranschaltung beliebiger international üblicher Referenz-Störkanäle. So lassen sich erstmalig sämtliche Simulationsergebnisse für die Basisbandsignalübertragung ebenso wie für gängige digitale Modulationsverfahren im Echtzeitbetrieb praktisch nachprüfen. Neben der Einhaltung der Echtzeitfähigkeit wurde besonderer Wert auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gelegt. Der modulare Software-Aufbau ermöglicht den einfachen Wechsel einzelner Verarbeitungsböcke innerhalb der Signalübertragungskette zur schnellen Anpassung an das zu untersuchende Experiment.

Besonders betont wird der Aspekt einer gemeinsamen "Verbundoptimierung" der Kanalverzerrungs- und der beiden beteiligten Synchronisationsmodule. Es konnte gezeigt werden, dass aufgrund der Vielzahl nichtlinearer Effekte hybride Algorithmen im direkten Vergleich mit kaskadierten Einzelalgorithmen nicht zwingend zu vorteilhafterem Gesamtverhalten führen. Unter Bewertung der erzielbaren Bitfehlerrate als Funktion des Störabstandes liefert der modifizierte "Decision Directed Modulus"-Algorithmus (MDDM) unabhängig vom Modulationsverfahren und vom Referenz-Störkanaltyp die besten Ergebnisse. Der Einsatz hybrider Algorithmen oder von Algorithmen mit modifizierten Nichtlinearitäten ermöglicht die Optimierung des Schrittweiteparameters bei gleichzeitiger Reduzierung der Entzerrerordnung. Dadurch sollen minimale Verarbeitungszeiten und rasche Konvergenz des Fehlerenergieverlaufs erreicht werden. Ein neu vorgeschlagenes Verfahren kombiniert den "Stop-and-Go"-Algorithmus und den "Joint"-Algorithmus. Hierdurch lässt sich typischerweise eine 22-prozentige Reduktion der Sendeleistung bei gleicher Bitfehlerrate sowie eine 6-prozentige Verkürzung der Verarbeitungszeit gegenüber dem MDDM-Algorithmus erzielen. Darüber hinaus führt der Einsatz einer Software-AGC (Automatic Gain Control) erstmalig zur vollständigen Entzerrung leichter Störkanäle innerhalb des Labor-Funkmodems.

## **Abstract**

Modern communication systems require efficient signal processing blocks for removal of various channel distortions. In contrast to conventional equalizers which remove these distortions by using known training symbols, blind equalizers carry out the adaptation process without these symbols. By avoiding predefined training sequences the communication system's allowable data throughput (bit rate) can be increased.

Recent research in the field of blind channel equalization focuses on the optimization of the adaptation process and on applications with multilevel digital modulation schemes. Almost all publications in this field assume perfect clock synchronization. In some papers additional carrier synchronization is being considered, however, always with unrealistic assumptions on critical system parameters. Consequently, assuming perfect clock signals and small disturbances, theoretical analyses and simulations become much simpler. These idealized requirements are not applicable to real world systems. This was already described in the early 90s by Jablon who pointed out significant equalization problems when only incorrect clock signals are available. Nasir's 2010 paper still indicates this as a further unresolved problem in the domain of communication systems. Practical solutions, in particular for real-time operation of modems, have not been presented yet. Additionally, the equalizer's optimal position relative to the synchronization units is not finally determined.

This thesis provides adequate solutions to the above mentioned problems. Theoretical results are validated in practice by implementation of the relevant algorithms on an evaluation board under real-time conditions. Using this test-bed allows the objective performance evaluation of different blind equalization algorithms for arbitrary reference channels. For the first time all simulation results can be practically verified under real-time conditions for baseband transmission on the one hand and using typical digital modulation schemes on the other hand. Particular attention is being paid to real-time capability as well as to reproducibility of results. The modular structure of the software implementation yields the possibility to interchange

various signal processing blocks inside the transmission path for matching them to the hardware experiments.

A main aspect of this thesis is the joint optimization of the channel equalizer combined with the synchronization units. It was shown that hybrid algorithms do not necessarily lead to performance improvements compared to single algorithms due to the multitude of nonlinear effects. Validation of bit error rates as a function of the signal-to-noise ratios showed that the Modified Decision Directed Modulus Algorithm (MDDMA) achieves best overall results whatever modulation scheme or distortion channel was chosen. Using hybrid algorithms or algorithms with modified nonlinearities allows for the optimization of, both, step size parameter and equalizer length. This aspect results in minimal processing time and fast convergence behavior of the error signal. The proposed new procedure combines the Stop-and-Go Algorithm with the Joint Algorithm. This results in a decrease of the required transmit power by about 22 percent while achieving the same bit error rate. Moreover a 6 percent reduction of processing time is possible relative to MDDMA. Furthermore, use of an Automatic Gain Control (AGC) leads to perfect equalization of an "easy" distortion channel within the modem.



# Inhalt

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Problemstellung</b> .....	<b>11</b>
<b>3. Adaptive Entzerrer</b> .....	<b>15</b>
3.1 Geschlossene Lösung .....	16
3.2 LMS-Algorithmus .....	21
3.3 Blinde Verfahren .....	25
3.3.1 Einleitung.....	25
3.3.2 Einzel-Algorithmen .....	30
3.3.3 Modifizierter Decision-Directed-Algorithmus .....	32
3.3.4 Modifizierter Godard-Algorithmus .....	33
3.3.5 Modifizierter Sato-Algorithmus .....	35
3.3.6 Modifizierter Constant-Modulus-Algorithmus.....	36
3.3.7 Multi-Modulus-Algorithmus .....	39
3.3.8 Modifizierter Decision-Directed-Modulus-Algorithmus.....	41
3.3.9 Auswertung und Zusammenfassung Einzel-Algorithmen.....	42
3.4 Hybride Algorithmen.....	56
3.4.1 Joint-Algorithmus .....	57
3.4.2 Dual-Mode-Algorithmus (Switch).....	61
3.4.3 Stop-and-Go-Algorithmus .....	64
3.4.4 Dual-Mode-Algorithmus .....	68
<b>4. Basisbandmodell</b> .....	<b>75</b>
4.1 Impulsform- und Matched-Filter-Entwurf .....	77
4.2 Überabtastung und Interpolation .....	83
4.3 Phasenregelkreis .....	85
4.3.1 Taktsynchronisation.....	91
4.3.2 Trägersynchronisation .....	94
4.4 Kanalmodelle.....	101
<b>5. Implementierung und Auswertung</b> .....	<b>109</b>
5.1 Aufbau und Zeitmessung.....	109
5.2 Auswertung der BER-Messungen im Basisband .....	116
5.3 Auswertung der BER-Messungen für eine Funkübertragung .....	121
<b>6. Optimierung</b> .....	<b>127</b>
6.1 Optimierung über Kombinationen mit dem Joint-Algorithmus .....	127
6.1.1 Modifizierter Stop-and-Go-Algorithmus.....	127
6.1.2 Modifizierter Dual-Mode-Algorithmus .....	128

6.2 Optimierung über Sigmoid-Funktion .....	132
6.3 Optimierung über AGC-gestützte Amplitudenregelung .....	137
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>141</b>
<b>Abkürzungs- und Formelverzeichnis .....</b>	<b>147</b>
Abkürzungen .....	147
Funktionen und Operatoren .....	151
Formelzeichen .....	153
Griechische .....	153
Römische .....	155
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>163</b>
<b>Literaturverzeichnis der Abschlussarbeiten .....</b>	<b>173</b>