

**Entwurf und Realisierung von
multistandardfähigen
Nulldurchgangsempfängerstrukturen
für die drahtlose Kommunikationstechnik**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Tobias Scholand

aus Duisburg

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Jung

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel

Tag der mündlichen Prüfung: 8.12.2006

Selected Topics in Communications Technologies

Tobias Scholand

**Entwurf und Realisierung von multistandardfähigen
Nulldurchgangsempfängerstrukturen für die
drahtlose Kommunikationstechnik**

Shaker Verlag
Aachen 2007

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.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-5815-3

ISSN 1860-2800

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

Danksagung

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Kommunikationstechnik der Fakultät für Ingenieurwissenschaften an der Universität Duisburg-Essen.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Fachgebiets Kommunikationstechnik Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Jung, der meine Arbeit als Referent dieser Dissertation immerzu engagiert gefördert und betreut hat. Seine Denkanstöße, Ratschläge und Beharrlichkeit haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Die umgängliche Zusammenarbeit hat mir dabei viel Freude bereitet.

Für die Übernahme des Koreferats dieser Dissertation möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel meinen Dank aussprechen. Als Leiter des Lehrstuhls für Technische Elektronik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg stand er meiner Arbeit offen und hilfreich zur Seite.

Für die angenehme Atmosphäre und die vielen fachlichen wie privaten Diskussionen gebührt mein herzlichster Dank allen augenblicklichen wie ehemaligen Mitarbeitern des Fachgebiets Kommunikationstechnik: Heribert Annen, Guido Bruck, Admir Burnic, Barbara Clausen, Prof. em. Dr. Gerhard Dickopp, Amr Eltaher, Friedhelm Fehr, Arjang Hessamian-Alinejad, Sabine Jankowski, Erika Pauli, Achim Seebens, Dietrich Schwarz, Christoph Spiegel, Andreas Waadt und Alexander Viessmann. Mein besonderer Dank gilt meinem langjährigen Bürogegnossen Thomas Faber.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Studierenden, deren Studien- wie Diplomarbeiten oder Hilfstätigkeiten zur Entstehung dieser Arbeit beitrugen. Insbesondere sind das Christoph Spiegel und Andreas Waadt, die mittlerweile selbst am Fachgebiet Kommunikationstechnik eine Dissertation anstreben.

Für die fortdauernde Unterstützung mochte ich dem Leiter der Elektronik-Werkstatt Bernd Klucken und seinen Mitarbeitern Bernhard Mucha und Manfred Slomke für ihre Hilfe bei der Fertigung und Bestückung im Rahmen dieser Dissertation entwickelter Leiterplatten danken.

Allen Industriepartnern des Fachgebiets Kommunikationstechnik und ihren Mitarbeitern möchte ich für zahlreiche Anregungen meinen Dank aussprechen. Insbesondere sind das die Teammitgliedern des 3G Standards R&D Lab der Firma Samsung Electronics in Suwon/ Korea und die der Firma Infineon Technologies.

Ich bedanke mich bei allen meinen Freunden, meiner Lebensgefährtin und meiner Schwester, die mich durch ihr Verständnis unterstützt haben. Schließlich gilt mein besonderer Dank meine Eltern Robert und Ursula, die mir das Studium der Elektrotechnik und somit diese Dissertation ermöglicht haben.

für meinen Vater

Übersicht

Der Wunsch nach mobiler Kommunikation hat im letzten Jahrhundert zur Entwicklung der drahtlosen Kommunikationstechnik geführt, die in zunehmendem Maße die drahtgebundene Kommunikationstechnik ersetzt. Durch die technologische Weiterentwicklung der Mikroelektronik sowie durch die Einführung der digitalen Signalverarbeitung kann seit Ende des letzten Jahrhunderts auch privaten Kommunikationsteilnehmern die kostengünstige Nutzung von Endgeräten mit robuster drahtloser Kommunikationstechnik ermöglicht werden. Durch die Forderungen der Kommunikationsteilnehmer nach vielfältigen drahtlosen Diensten sind aus der Evolution der drahtlosen Kommunikationstechnik multiple maßgeschneiderte Funkssysteme wie z. B. Bluetooth hervorgegangen. Es konnte sich ein Markt mit enormer Kundenzahl speziell für Endgeräte im niedrigen Preissegment entwickeln, deren Kosten durch eine ständige Weiterentwicklung gesenkt werden.

Als Beitrag zur oben genannten Kostensenkung ist der Entwurf von Empfängerstrukturen mit einer robusten Übertragungsqualität für kostengünstige Bluetooth-Endgeräte die wesentliche Motivation der vorliegenden Arbeit. Es wird eine Empfängerstruktur vorgeschlagen, deren digitale Signalverarbeitung auf der irregulären Abtastung beruht. Im Gegensatz zur konventionellen regulären Abtastung, die zeitlich äquidistante Abtastwerte generiert, erzeugt die irreguläre Abtastung zeitlich nicht äquidistante Abtastwerte. Speziell die Form der irregulären Nulldurchgangsabtastung, bei der die Nulldurchgangszeitpunkte des Empfangssignals bei einer niedrigen Zwischenfrequenz erfasst werden, erlaubt im Gegensatz zur konventionellen regulären Abtastung den Einsatz eines kostengünstigen Analog-Digital (A/D)-Umsetzers, der mit einem einzigen Bit quantisiert. Zu den wichtigsten Neuigkeitsaspekten dieser Arbeit gehören der Entwurf und die Analyse eines neuartigen Systemmodells als Grundlage für die in dieser Arbeit entwickelte digitale Signalverarbeitung. Die Flexibilität der entworfenen Nulldurchgangsempfängerstrukturen erleichtert durch ihre weitgehend digitale, programmgestützte Implementierung die Anpassung an zahlreiche Mobilfunksysteme.

Die Erfassung aufeinanderfolgender Nulldurchgangszeitpunkte kann mit einem digitalen Zähler als Hauptteil des A/D-Umsetzer realisiert werden. Die Kombination aus Zwischen- und Zählerfrequenz bestimmt die Genauigkeit der A/D-Umsetzung. Die entstehende Phasenquantisierung ist das Pendant zur Amplitudenquantisierung bei konventionellen Empfängerstrukturen mit regulärer Abtastung. Die Übertragungsqualität von Nulldurchgangsempfängerstrukturen wird anhand von Simulationen analysiert und mit derer konventioneller Empfängerstrukturen verglichen. Es wird gezeigt, dass eine identische Übertragungsqualität verglichen mit konventionellen Empfängerstrukturen ermöglicht wird. Der Aufbau eines echtzeitfähigen Demonstrators stützt die Simulationsergebnisse und weist die Machbarkeit von Nulldurchgangsempfängerstrukturen anhand von multimedialen Diensten nach.

Abstract

During the last century, the demand for mobile communication led to the development of the wireless communication technology which has gradually replaced wired communications. Owing to the continuing enhancements of microelectronics and semiconductor technology and by the rapid introduction of digital signal processing methods, mobile terminals deploying robust and low cost transceiver solutions can now also be provided to private communication subscribers since the 1990s. Driven by the demands of the communication subscribers for various wireless services, multiple tailor-made nomadic and mobile radio systems like Bluetooth have originated by the evolution of the wireless communication technology. A market with a huge number of customers has been established, especially for mobile terminals in the low cost segment. The costs of such mobile terminals have been decreasing by their continuous evolution.

The design of receiver structures with a robust transmission quality for low cost Bluetooth terminals is the essential motivation of this dissertation. In contrast to the conventional regular sampling with equidistant samples in time, a receiver structure with a digital signal processing based on irregular sampling, generating temporally non-equidistant samples, is suggested by the author. In comparison to the regular sampling approach, especially the so-called zero-crossing sampling which is a variant of irregular sampling facilitates the use of a low cost analog-to-digital converter (ADC) having only a single bit resolution. When the suggested zero-crossing sampling is used, those time instants at which the received signal prevailing at a low intermediate frequency changes its sign are measured as the basis for the succeeding digital signal processing. The design and the analysis of a novel mathematical system model which serves as the basis for the development of the required new digital signal processing algorithms represent a most important novelty of this dissertation. The flexibility of the newly developed zero-crossing receiver structures is obtained by their software centric and software defined concept and allows their easy adaptation to a multitude of radio systems.

The measurement of successive zero-crossing time instants can be realized with a digital counter that serves as the main part of the aforementioned ADC. The choice of the intermediate frequency in combination with the counter frequency determines the accuracy of the analog-to-digital conversion. The originated phase-quantization represents the counterpart to the amplitude quantization in conventional receiver structures with regular sampling. The author evaluates the transmission quality of the new zero-crossing receivers by simulations and compares it to the transmission quality of conventional receiver structures. It is found that the same transmission quality is achieved as for conventional receiver structures. The development of a real-time operating demonstrator justifies the theoretical and numerical results. The demonstrator provides proof of the feasibility of the suggested zero-crossing receiver structures by demonstrating multimedia services.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Drahtlose Kommunikationstechnik.....	1
1.2	Marktpotenzial	10
1.3	Anforderungen an Empfängerstrukturen.....	14
1.4	Motivation und Ziele.....	19
1.4.1	Stand der Technik heutiger Empfängerstrukturen.....	19
1.4.2	Nachteile heutiger Empfängerstrukturen.....	22
1.4.3	Ziele und Aktivitäten	23
1.4.4	Gliederung der Arbeit.....	25
2	Übertragungstechnik von digitalen Mobilfunksystemen	27
2.1	Übersicht	27
2.2	Struktureller Aufbau.....	28
2.2.1	OSI Referenz-Modell.....	28
2.2.2	Funktion der physikalischen Schicht	30
2.3	Modulationsverfahren	35
2.3.1	Einführung	35
2.3.2	Digitale Modulation.....	37
2.3.3	Analoge Frequenzmodulation.....	41

2.3.4	Analoge lineare Modulation	48
2.3.5	Modulationsverfahren wichtiger Mobilfunkstandards.....	54
2.4	Mobilfunkkanal	56
2.4.1	Einführung	56
2.4.2	Langsamer Schwund.....	57
2.4.3	Schneller Schwund	59
2.5	Übertragungsqualität klassischer Empfängerstrukturen.....	64
2.5.1	Einführung	64
2.5.2	Übertragungsqualität bei analoger linearer Modulation	67
2.5.3	Übertragungsqualität bei analoger Frequenzmodulation	73
3	Nulldurchgangsempfängerstrukturen für den Mobilfunk	81
3.1	Übersicht	81
3.2	Einführung.....	82
3.2.1	Prinzip der Nulldurchgangsabtastung.....	82
3.2.2	Historie der Nulldurchgangsabtastung.....	86
3.2.3	Nulldurchgangsabtastung für heutige Mobilfunksysteme	91
3.3	Systemmodell für die analoge Frequenzmodulation	97
3.3.1	Augenblicksfrequenz	97
3.3.2	Systemmodell mit Nulldurchgangsabtastung	102
3.3.3	Entwurf von Detektoren für die Nulldurchgangsabtastung	105
3.4	Systemmodell für die lineare analoge Modulation	114
3.4.1	Augenblicksphase	114
3.4.2	Systemmodell mit Nulldurchgangsabtastung	116
3.4.3	Entwurf von Detektoren für die Nulldurchgangsabtastung	117
3.4.4	Entscheidungsrückkopplung	120
3.5	Synchronisation – Kanalschätzung	124
3.5.1	Einführung	124

3.5.2	Grobsynchronisation.....	127
3.5.3	Feinsynchronisation.....	130
3.6	Übertragungsqualität.....	132
3.6.1	Analoge Frequenzmodulation.....	132
3.6.2	Analoge lineare Modulation.....	139
4	Implementierungsaspekte	147
4.1	Übersicht.....	147
4.2	Signalverarbeitung.....	148
4.2.1	Klassische Empfängerstrukturen.....	148
4.2.2	ZF-Nulldurchgangsempfängerstrukturen.....	155
4.3	Übertragungsqualität.....	160
4.3.1	Einführung.....	160
4.3.2	Analoge Frequenzmodulation.....	160
4.3.3	Analoge lineare Modulation.....	165
4.4	Funkreichweite.....	175
4.4.1	Einführung.....	175
4.4.2	Analoge Frequenzmodulation.....	179
4.4.3	Analoge lineare Modulation.....	183
5	Realisierung eines Demonstrators	191
5.1	Übersicht.....	191
5.2	Konzept.....	192
5.3	Realisierung.....	200
5.4	Rechenleistung.....	209
5.5	Übertragungsqualität.....	210
6	Zusammenfassung und Ausblick	213
6.1	Zusammenfassung.....	213
6.2	Ausblick.....	214

A	Ergänzende Bemerkungen und Tabellen	217
A.1	Tapped-Delay-Line Parameter des schnellen Schwundes	217
A.2	Nulldurchgangsempfängerstrukturen – Übertragungsqualität	219
Schrifttum		225
Bildverzeichnis		245
Tabellenverzeichnis		251
Häufig verwendete Größen und Symbole		253
Häufig verwendete Abkürzungen		267