

Beiträge aus der Informationstechnik

Marcus Windisch

**Estimation and Compensation of I/Q Imbalance
in Broadband Communications Receivers**

 VOGT

Dresden 2007

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.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2007

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Estimation and Compensation of I/Q Imbalance
in Broadband Communications Receivers“
von Marcus Windisch überein.

Besuchen Sie uns im Internet:
www.vogtverlag.de

© Jörg Vogt Verlag 2007
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor
Printed in Germany

ISBN 978-3-938860-13-7

Jörg Vogt Verlag
Voglerstr. 20 · 01277 Dresden
Telefon: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
Email: info@vogtverlag.de

Technische Universität Dresden

Estimation and Compensation of I/Q Imbalance in Broadband Communications Receivers

Marcus Windisch

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. habil. René Schüffny
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fettweis
Prof. Dr.-Ing. habil. MBA Frank Ellinger
Prof. Dr. Markku Renfors

Tag der Einreichung: 20.12.2006
Tag der Verteidigung: 27.03.2007

Abstract

Broadband wireless communications systems have seen tremendous developments throughout the past decade. Pushed by advanced applications, such as video streaming or download of large amounts of data, an ever increasing demand for higher data rates over the wireless link is created. Next generation short-range communications systems are currently designed with a target data rate of 1 Gigabit per second.

Reaching such ambitious data rates imposes serious challenges on the underlying hardware of the transceiver, in particular to the radio frequency (RF) components. The challenge is further aggravated since various other, partly contradicting, design goals need to be considered in RF transceiver design. Low power consumption, small size, and low cost are highly desirable features of the RF hardware. Furthermore, with the increasing number of wireless communications standards, multi-standard or multi-mode capabilities of the transceiver are becoming increasingly important.

Facing the ever increasing demands on the underlying hardware, unavoidable impairments in the RF circuits have been identified as one of the most limiting factors to further improve the system performance. Therefore, conventional RF transceiver design aims at avoiding these RF impairments, thus imposing an increased power consumption, size and/or cost. An alternative solution is offered by the *Dirty RF* paradigm. The key idea is to *accept* the RF impairments up to a certain degree and to *compensate* them digitally, thus keeping power consumption, size and cost of the transceiver at a desirable low level.

The practical implementation of the *Dirty RF* paradigm requires the proper understanding, modeling, and compensation of the various RF impairments. One of these impairments, namely receiver I/Q imbalance, is studied in full detail within this thesis. I/Q imbalance is an inherent issue in advanced receiver architectures based on analog I/Q signal processing, such as the direct conversion receiver and the low-IF receiver. While offering numerous advantages over the conventional heterodyne approach with respect to flexibility, integrability, size, and cost, I/Q architectures suffer from random deviations of the transfer characteristics in the I- and Q-branch.

Following the *Dirty RF* approach, various aspects of the I/Q imbalance are addressed throughout the course of this thesis. The concept of I/Q signal processing, together with its application in various receiver architectures is presented initially. An analysis of the circuit elements in I/Q receiver architectures and their specific contribution to the I/Q imbalance builds the basis for a stochastic I/Q imbalance model. Using this model, the impact of I/Q imbalance on the received signal is studied for different receiver architectures. A classifica-

tion of different approaches for a digital compensation of the I/Q imbalance, complemented by an extensive review of previous work in the field, concludes the introductory part of the thesis.

A novel framework for the *theoretical analysis* of system performance degradations due to I/Q imbalance constitutes the first major contribution of this thesis. Considering impairments due to both a noisy channel (AWGN or Rayleigh fading) and receiver I/Q imbalance, symbol and bit error probabilities in M -QAM modulated multi-carrier systems (such as OFDM) are derived. It has been found that the impact of I/Q imbalance is of secondary importance in the presence of an AWGN channel. In contrast, significant performance degradations have been observed for fading channels, in particular in the case of uncorrelated channel coefficients. The uncorrelated fading channel, representing the worst case scenario from the I/Q imbalance point of view, is covered by a closed-form solution. In this respect, a novel system design tool is provided, which is valuable for the dimensioning of the image rejection capabilities of the receiver front end, both with or without subsequent digital I/Q imbalance compensation.

A novel approach for the *digital estimation and compensation* of the I/Q imbalance constitutes the second major contribution of this thesis. In our view, the blind, i.e. non-reference-based, character is one of the key benefits of the novel algorithm. By solely observing the statistics of the received, corrupted symbols, the algorithm is able to estimate the unknown parameters of the I/Q imbalance. Thus, the algorithm is independent of any specialized training or calibration signals, such as standard-specific pilots or receiver-generated test signals. Implied by the deliberate abdication on any reference symbols, an inherent robustness to additional impairments, such as noise, fading or carrier frequency offset, is further observed. Various enhancements of the algorithm can be achieved through the application of Kalman filtering, including (i) incorporation of a priori knowledge about the front-end statistics, (ii) estimation and interpolation of frequency-selective I/Q imbalance, and (iii) tracking of time-variant I/Q imbalance.

Zusammenfassung

Breitbandige drahtlose Kommunikationssysteme haben in den letzten Jahren weitreichende Weiterentwicklungen erfahren. Angetrieben durch anspruchsvolle Applikationen, wie das Streamen von Videoinhalten oder die Übertragung großer Datenmengen, ist ein ständig wachsender Bedarf nach höheren Datenraten zu beobachten. So streben gegenwärtige Bemühungen für das Design drahtloser Kommunikationssysteme der nächsten Generation eine Zieldatenrate von 1 Gigabit pro Sekunde an.

Derart ambitionierte Datenraten sind nur mit stark gesteigerten Anforderungen an die zugrundeliegende Hardware realisierbar. Insbesondere die analogen Hochfrequenz(HF)-Baugruppen stellen eine enorme Herausforderung dar. Verschärft wird die Situation durch eine Reihe weiterer, teilweise schwer vereinbarer Randbedingungen. Beispielsweise sind ein geringer Stromverbrauch, kleine geometrische Abmessungen, sowie geringe Herstellungskosten wichtige Ziele für das Systemdesign. Auch die Fähigkeit, verschiedene Mobilfunkstandards mit unterschiedlichen Betriebsparametern hinsichtlich Trägerfrequenz und Bandbreite zu unterstützen, gewinnt zunehmend an Bedeutung.

Angesichts der ständig wachsenden Anforderungen wurde deutlich, dass praktisch unvermeidbare Nichtidealitäten in der HF-Hardware einen der limitierenden Faktoren zum Erreichen noch höherer Datenraten darstellen. Konventionelle HF-Designprinzipien haben daher zum Ziel, Nichtidealitäten streng zu vermeiden und erkaufen dies durch Nachteile hinsichtlich Leistungsaufnahme, Abmessungen oder Herstellungskosten. Das *Dirty RF* Paradigma schlägt eine grundsätzlich andere Herangehensweise vor. Nichtidealitäten werden bis zu einem bestimmten Grade *akzeptiert* und digital *kompensiert*. Leistungsaufnahme, Abmessungen und Herstellungskosten können daher innerhalb akzeptabler Grenzen gehalten werden.

Die praktische Umsetzung des *Dirty RF* Paradigmas erfordert ein entsprechendes Verstehen, Modellieren und Korrigieren der verschiedenen Nichtidealitäten. Eine dieser Nichtidealitäten, die so genannte I/Q Imbalance, wird in dieser Dissertation empfängerseitig ausführlich untersucht. I/Q Imbalance tritt in allen Empfängerarchitekturen auf, die mit komplexwertiger (I/Q) Signalverarbeitung im Analogteil arbeiten. Der Direktmischempfänger und der Low-IF Empfänger sind wichtige Vertreter dieser Gattung, die aufgrund ihrer zahlreichen Vorteile gegenüber konventionellen Empfängerarchitekturen zunehmend eingesetzt werden.

Beispielhaft für die generelle Anwendbarkeit des *Dirty RF* Paradigmas wird im Verlauf dieser Dissertation das Phänomen der I/Q Imbalance aus unterschiedlichen Blickwinkeln

beleuchtet. Das Prinzip der I/Q-Signalverarbeitung und seine Anwendung in verschiedenen Empfängerarchitekturen wird eingangs vorgestellt. Eine genaue Analyse der elektronischen Bauelemente in I/Q-Empfängerarchitekturen und ihr jeweiliger Beitrag zur Entstehung von I/Q Imbalance bildet die Grundlage für ein stochastisches Modell der I/Q Imbalance. Mit Hilfe dieses Modells wird der Einfluss der I/Q Imbalance auf das Empfangssignal für unterschiedliche Empfängerarchitekturen näher untersucht. Eine Klassifizierung möglicher Ansätze zur digitalen Korrektur der I/Q Imbalance, begleitet von Verweisen auf vorangegangenen Arbeiten zum Thema, schließt den einleitenden Teil der Arbeit ab.

Ein neuartiger Ansatz zur *theoretischen Untersuchung* der Systemleistungsfähigkeit unter dem Einfluss von I/Q Imbalance bildet den ersten von zwei größeren Beiträgen dieser Dissertation. Unter Berücksichtigung der Einflüsse des Mobilfunkkanals (AWGN oder Rayleigh-Schwundkanal) und der I/Q Imbalance im Empfänger werden Bit- und Symbolfehlerwahrscheinlichkeiten in M-QAM Mehrträgersignalen (wie z.B. OFDM) analytisch hergeleitet. Dabei wurde festgestellt, dass der Einfluss von I/Q Imbalance bei AWGN Kanälen nur von untergeordneter Bedeutung ist. Im Falle von Schwundkanälen sind hingegen signifikante Erhöhungen der Fehlerraten durch I/Q Imbalance zu verzeichnen, insbesondere bei unkorrelierten Kanalkoeffizienten. Der unkorrelierte Schwundkanal stellt unter dem Einfluss von I/Q Imbalance den ungünstigsten Fall dar. Da die Fehlerrate für dieses Szenario durch eine geschlossene Lösung bestimmbar ist, steht nun ein wertvolles Werkzeug zur Dimensionierung der HF-Hardware zur Verfügung. Gleichzeitig kann dieses Werkzeug auch für die Bestimmung der Anforderungen an das digitale Korrekturnetzwerk eingesetzt werden.

Ein neuartiger Ansatz zur *digitalen Schätzung und Korrektur* der I/Q Imbalance bildet den zweiten größeren Beitrag dieser Dissertation. Der blinde, d.h. nicht referenz-basierte Charakter des neuartigen Algorithmus stellt dabei einen der wesentlichen Vorteile gegenüber bisherigen Ansätzen dar. Durch eine einfache Beobachtung und Auswertung der Statistiken der empfangenen, gestörten Symbole ist eine Schätzung der unbekannten Parameter der I/Q Imbalance möglich. Diese herausragende Eigenschaft macht den Algorithmus unabhängig von speziellen Trainings- oder Kalibrierungssignalen, wie z.B. standard-spezifische Piloten oder empfängerseitig generierte Testsignale. Eine hohe Robustheit der Schätzung gegen zusätzliche Störungen, wie z.B. Rauschen, Schwund, oder Synchronisationsfehler, wurde als weitere wichtige Eigenschaft festgestellt. Durch Anwendung der Theorie der Kalman-Filter sind vielfältige Erweiterungen und Verbesserungen der Schätzung möglich. Dazu gehören insbesondere (i) die Einbeziehung von a priori Wissen über die Statistiken der I/Q Imbalance, (ii) die Schätzung von frequenzselektiver I/Q Imbalance, und (iii) das Nachführen (Tracken) von zeitlichen Veränderungen der I/Q Imbalance Parameter.

Acknowledgments

This thesis summarizes the results of my research activities at the Vodafone Chair Mobile Communications Systems at Technische Universität Dresden.

I owe sincere gratitude to Professor Gerhard Fettweis for giving me the opportunity to work on my dissertation under his supervision. His guiding personality, together with his generous support and encouragement, allowed for a truly exciting and valuable stay at his chair. I am very grateful to Prof. Dr. Markku Renfors and Prof. Dr. Frank Ellinger for acting as referees for the thesis.

Moreover, I would like to express special thanks to Dr. Heinrich Nuskowski and Peter Zillmann for frequent exchange of ideas and numerous fruitful discussions. Beyond that, I am thankful to the whole team for making our chair to such an extraordinarily inspiring and fun place to work at.

The valuable hours outside office with great friends certainly contributed to this thesis as well. I am particularly thankful to all my friends from the rock climbing and bouldering community for sharing exciting adventures at gorgeous places worldwide. Those great days truly helped to recharge my batteries and to give new inspirations for my daily work.

Finally, I would like to express my deep gratitude to my family for their outstanding love and support over all the years. Special thanks go to my dear Tabea for her indefinite love and patience. I especially appreciate her understanding during the last few month, when yet another weekend was spent working on my thesis.

Contents

Abstract/Zusammenfassung	i
Acknowledgments	v
Contents	vii
List of Figures	xi
List of Tables	xiii
Abbreviations	xiv
Symbols	xvi
1 Introduction	1
1.1 Wireless Communications	1
1.2 The Dirty RF Paradigm	2
1.3 Objective and Outline of This Thesis	2
2 Fundamentals of Wireless Communications	3
2.1 Signals in Communications	3
2.1.1 Representation of Signals	3
2.1.2 I/Q Signals	4
2.1.3 Bandpass Transmission	5
2.2 Mixing Techniques	6
2.2.1 Real Mixing	6
2.2.2 Complex Mixing	8
2.3 Receiver Architectures	10
2.3.1 Heterodyne Receiver	10
2.3.2 Direct Conversion Receiver	11
2.3.3 Low-IF Receiver	12
2.3.4 Alternative Receiver Architectures	12

3	I/Q Imbalance in Wireless Communications Receivers	15
3.1	Implementation Issues	15
3.1.1	Quadrature LO Signal Generation	16
3.1.2	Mixers	16
3.1.3	Low-Pass Filters	17
3.1.4	Amplifiers and A/D Converters	20
3.2	I/Q Imbalance Model	20
3.2.1	I/Q Imbalance vs. Other RF Impairments	21
3.2.2	RF-to-Baseband Model	22
3.2.3	Equivalent Baseband Model	23
3.2.4	Discrete-Time I/Q Imbalance Model	26
3.3	Signal Degradation due to I/Q Imbalance	29
3.3.1	I/Q Imbalance in Direct Conversion Receivers	29
3.3.2	I/Q Imbalance in Low-IF Receivers	29
3.3.3	Direct Conversion of OFDM Signals	32
3.3.4	Summary	36
4	I/Q Imbalance Compensation - Principles and Related Work	39
4.1	Classification	39
4.2	Local Estimation and Compensation	41
4.2.1	Analog Signal Generators	41
4.2.2	Tx-Branch Utilization	42
4.2.3	Reference Symbols	43
4.2.4	Blind Adaptive Filtering	45
4.2.5	Blind Parameter Estimation	47
4.2.6	Transmitter Pre-Correction	48
4.3	Link-Level Estimation and Compensation	50
4.4	Summary and Motivation of This Work	51
5	Performance Degradation due to I/Q Imbalance	53
5.1	System Model	54
5.1.1	Deterministic Model	54
5.1.2	RV Model	55
5.2	Properties of the Error Vector	56
5.2.1	AWGN Channel	56
5.2.2	Rayleigh Fading Channel	58
5.3	Symbol Error Probabilities	64
5.3.1	Preliminary Considerations	64
5.3.2	AWGN Channel	69
5.3.3	Rayleigh Fading Channel	76
5.3.4	Summary	88
5.4	Bit Error Probabilities	90
5.4.1	Preliminary Considerations	90

5.4.2	AWGN Channel	94
5.4.3	Rayleigh Fading Channel	96
5.5	Conclusions and Future Work	100
6	Estimation and Compensation of Frequency-Flat I/Q Imbalance	103
6.1	Fundamentals of Blind I/Q Imbalance Estimation and Compensation . . .	103
6.1.1	I/Q Imbalance Compensation	104
6.1.2	Blind I/Q Imbalance Parameter Extraction	106
6.1.3	Summary	111
6.2	Block-Based Parameter Estimation	112
6.2.1	Estimation Scheme	112
6.2.2	Performance Evaluation	112
6.2.3	Theoretical Performance Analysis	117
6.3	Filtered Parameter Estimation	123
6.3.1	Kalman Filtering	123
6.3.2	Estimation and Compensation Network	126
6.3.3	Performance Evaluation	131
6.4	Time-Variant I/Q Imbalance	134
6.4.1	Rapid I/Q Imbalance Parameter Variations	134
6.4.2	Slow I/Q Imbalance Parameter Variations	134
6.5	Summary and Conclusions	137
7	Estimation and Compensation of Frequency-Selective I/Q Imbalance	139
7.1	Review of Blind Parameter Estimation	139
7.1.1	Blind I/Q Imbalance Parameter Extraction	140
7.1.2	Elementary Estimator Scheme	142
7.1.3	Theoretical Performance Analysis	142
7.1.4	Summary and Conclusion	144
7.2	Filtered Parameter Estimation	146
7.2.1	Frequency-Selective Kalman Filtering	146
7.2.2	Estimation and Compensation Network	148
7.2.3	Performance Evaluation	152
7.3	System-Level Considerations	158
7.3.1	CFO Correction in OFDM Systems	158
7.3.2	Estimator Complexity Reduction	160
7.3.3	Multi-Antenna (MIMO) Receivers	161
7.4	Conclusions and Future Work	163
8	Summary	165
A	Transformation of Random Variables	167
A.1	Multivariate Gaussian Distributions	167
A.1.1	Definition	167

A.1.2	Linear Transformations	167
A.2	General Joint Distributions	168
A.2.1	Bijjective Transformations	168
A.2.2	Non-Bijjective Transformations	168
B	On the Quotient of Correlated Complex-Valued Random Variables	170
B.1	Problem Definition	170
B.2	Approach and Outline	171
B.3	Derivation	171
B.3.1	The joint pdf $f_1(x_1, y_1, x_2, y_2)$	171
B.3.2	The joint pdf $f_2(r_1, \theta_1, r_2, \theta_2)$	172
B.3.3	The joint pdf $f_3(r_p, \theta_p, r_q, \theta_q)$	173
B.3.4	The joint pdf $f_{r\theta}(r_q, \theta_q)$	175
B.3.5	The joint pdf $f_{xy}(x_q, y_q)$	177
C	Kalman Filters	178
C.1	Statement of the Kalman Filtering Problem	178
C.2	Notations	179
C.3	Kalman Filter Equations	179
C.4	Single State Kalman Filter	181
C.4.1	Conditions	181
C.4.2	Derivation	181
	Bibliography	183