

Andreas Frotzscher

Schätzung und Kompensation des Senderübersprechens in
Frequenzduplex-Sendeempfängern

Beiträge aus der Informationstechnik

Mobile Nachrichtenübertragung

Nr. 52

Andreas Frotzscher

**Schätzung und Kompensation des
Senderübersprechens in
Frequenzduplex-Sendeempfängern**

 VOGT

Dresden 2010

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., 2010

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Schätzung und Kompensation des Senderübersprechens in
Frequenzduplex-Sendeempfängern“ von Andreas Frotzschler überein.

© Jörg Vogt Verlag 2010
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-938860-36-6

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

Technische Universität Dresden

Schätzung und Kompensation des Senderübersprechens in Frequenzduplex-Sendeempfängern

Andreas Frotzscher

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. Ralf Lehnert

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fettweis

Prof. Dr.-Ing. Robert Weigel

Tag der Einreichung: 07. Januar 2010

Tag der Verteidigung: 15. April 2010

Kurzfassung

In komplexen Funknetzwerken, wie z.B. zellularen Mobilfunknetzen, erfolgt die bidirektionale Funkanbindung der Endgeräte bevorzugt nach dem *Frequency Division Duplex* (FDD) Prinzip, d.h. die Aufwärtsstrecke (engl.: *Uplink*) und die Abwärtsstrecke (engl.: *Downlink*) nutzen unterschiedliche Trägerfrequenzen. Der kontinuierlich steigende Bedarf nach höheren Übertragungsraten erfordern von den FDD Funkgeräten einen simultanen Sende- und Empfangsbetrieb. In einem mobilen Endgerät bindet ein Duplexer den Sendezweig (engl.: *Transmitter*, Tx) und den Empfangszweig (engl.: *Receiver*, Rx) an eine gemeinsame Antenne an und muss gleichzeitig den Empfangszweig von dem leistungsstarken Sendesignal isolieren. Die voranschreitende Miniaturisierung der Hardware der mobilen Endgeräte erschwert jedoch die Bereitstellung einer ausreichenden Tx-Rx Isolation des Duplexers. Diese Problematik wird durch die Anforderung weiter verschärft, mit einem Endgerät mehrere Funkstandards mit unterschiedlichen Trägerfrequenzen und Bandbreiten zu unterstützen. Der Wunsch, die Komplexität der Hardware dennoch gering zu halten, motiviert die Entwicklung einer rekonfigurierbaren, frequenzagilen Hardware, die flexibel auf unterschiedliche Trägerfrequenzen und Bandbreiten abgestimmt werden kann. Die geforderten, hohen Datenraten setzen sehr hohe Anforderungen an die zugrunde liegende Hardware. Ihre Erfüllung wird jedoch durch die angestrebte Frequenzagilität der analogen Baugruppen erschwert. Deshalb kann eine ausreichende Tx-Rx Isolation nicht gewährleistet werden. Das Sendesignal spricht in den Empfangszweig über und kann in Direktmischempfängern und low-IF Empfängern die Demodulation des empfangenen Nutzsignals empfindlich stören. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf das Senderübersprechen (engl.: *Tx Leakage*, TxL) in Direktmischempfängern, da diese Empfängerarchitektur vielfältige Vorteile für frequenzagile Multiband-Sendeempfänger aufweist.

In Direktmischempfängern erzeugt die Nichtlinearität des Abwärtsmischers ein Intermodulationsprodukt zweiter Ordnung des übersprechenden Sendesignals. Dieses Intermodulationsprodukt überlagert das heruntergemischte, empfangene Nutzsinal und stellt die dominierende TxL Interferenz dar. Die vorliegende Arbeit untersucht Verfahren, welche auf die Kompensation der TxL Interferenz im digitalen Basisband abzielen. Sie ermöglichen eine Senkung der Anforderungen an die Tx-Rx Isolation des Duplexers und an die analogen Baugruppen des Empfängers, dem analogen Empfänger-Frontend. Somit kann der Entwurf eines frequenzagilen Multiband-Frontends erheblich erleichtert werden. Das übersprechende Sendesignal erfährt zwischen dem Digital-Analog-Wandler im Sendezweig und dem Abwärtsmischer im Empfangszweig verschiedene Verstärkungen und Filterungen, die sich zu einem *Tx Leakage* Kanal zusammenfassen lassen. Es wird gezeigt, dass der TxL Kanal infolge von veränderlichen Objekten im Antennennahfeld zeitvariant ist, sofern kein adaptives Antennen-Anpassnetzwerk eingesetzt wird. Unter dieser Annahme lässt sich die Kohärenzzeit des Tx Leakage Kanals in einer unteren Abschätzung mit

1.9 Millisekunden angeben. Zusätzlich zu der Störung des Demodulationsprozesses reduziert die TxL Interferenz die, dem Nutzsignal effektiv zur Verfügung stehende Quantisierungsauflösung des Analog-Digital-Wandlers. Somit verursacht die TxL Interferenz einen irreversiblen SNR Verlust bezüglich des Empfangssignals, der die Einsetzbarkeit einer digitalen TxL Kompensation beschränkt.

Die größte Herausforderung der digitalen Kompensation der TxL Interferenz stellt die Schätzung des TxL Kanals dar. Ein sehr einfaches Schätzverfahren basiert auf der frequenzflachen Approximation des TxL Kanals und nutzt den adaptiven *Least Mean Square* (LMS) Schätzalgorithmus. Während im Fall eines schwach frequenzselektiven TxL Kanals eine hohe Schätzgenauigkeit erzielt wird, degradieren die Approximationsfehler mit zunehmender Frequenzselektivität des Kanals deutlich die Leistungsfähigkeit des Algorithmus. Das zweite Schätzverfahren fügt dem Sendesignal spezielle Referenzsequenzen (sog. Präambeln) hinzu und schätzt den TxL Kanal basierend auf der beobachteten TxL Interferenz der Präambeln. Dieser Ansatz erzielt präzisere Schätzergebnisse als der LMS Schätzer, solange eine bestimmte Mindest-Schätzblockgröße genutzt werden kann. Jedoch enthält der Schätzalgorithmus eine Fehlerfortpflanzung, die mit zunehmender Frequenzselektivität des TxL Kanals die Leistungsfähigkeit des Algorithmus verschlechtert. Des Weiteren reduzieren die Präambeln die Übertragungsrate des Sendesignals und erfordern zudem ihre Spezifizierung in den, von dem mobilen Endgerät unterstützten Funkstandards. Durch eine geeignete Weiterentwicklung des Schätzverfahrens zur Vermeidung der Fehlerfortpflanzung lässt sich die Schätzgenauigkeit deutlich verbessert, wodurch die genannten Nachteile des Verfahrens aufgewogen werden könnten. Das dritte Schätzverfahren nutzt eine Faktorisierung der TxL Interferenz und setzt einen *Least Squares* Schätzalgorithmus ein. Es besitzt zwar die höchste, rechentechnische Komplexität der drei vorgestellten TxL Schätzverfahren, jedoch erzielt es eine sehr präzise Schätzung des TxL Kanals und wird nur marginal von der Frequenzselektivität des TxL Kanals beeinflusst.

Abstract

In complex wireless communication networks, e.g. cellular networks, the terminals are linked to the base stations preferentially using the frequency division duplex (FDD) scheme, i.e. the uplink and downlink use different carrier frequencies. The continuously growing demand for higher data rates requires that the FDD transceivers transmit and receive simultaneously. In a mobile terminal a duplexer is used to connect on the one hand side the transmitter (Tx) and receiver (Rx) chain with a common antenna and on the other hand side to isolate the Rx chain from the powerful Tx signal. The continuing miniaturization of the handset hardware complicates achieving a sufficient Tx-Rx isolation. This problem gets even worse by the demand, to support several wireless communication standards with different carrier frequencies and bandwidths with the same handset. Keeping the complexity of the hardware as low as possible motivates the development of a reconfigurable frontend, which is tunable to different carrier frequencies and bandwidths. The demanded high data rates set challenging requirements on the hardware. However, the design of a frequency agile analog frontend complicates the fulfillment of these requirements. As one of the consequences the Tx-Rx isolation is insufficient. Thus, a significant part of the transmit signal leaks into the Rx chain and can severely deteriorate the demodulation of the received signal in direct conversion receivers and low-IF receivers. This work focuses on the transmitter leakage (Tx Leakage, TxL) in direct conversion receivers, since this receiver architecture offers various advantages for the design of a frequency agile frontend.

In direct conversion receivers, the nonlinearity of the down converter generates a second order intermodulation product of the leaking transmit signal. This intermodulation product interferes the down converted received signal and represents the dominating TxL interference. This work investigates algorithms for the compensation of the TxL interference in the digital baseband. This allows to relax the requirements on the Tx-Rx isolation of the duplexer and on the analog receiver frontend and thus, facilitates the design of a frequency agile multi-band frontend. The leaking transmit signal undergoes several amplifications and filtering between the digital-to-analog converter in the Tx chain and the down converter in the Rx chain, which can jointly be considered as a *Tx Leakage* channel. This work demonstrates the time variance of the TxL channel due to objects in the antenna near field, if no adaptive antenna matching network is used. Under this assumption a worst case estimate of the Tx Leakage channel coherence time of 1.9 milliseconds is derived. Besides deteriorating the demodulation process, the TxL interference reduces the effective quantization resolution of the analog-to-digital converter, available for the received signal. This causes an additional and irreversible SNR loss, which limits the applicability of a digital TxL compensation.

The major challenge of the digital TxL compensation can be traced back to the estimation of the TxL channel. The first, very simple estimation approach is based on a frequency flat approxima-

tion of the TxL channel and uses an adaptive Least Mean Square (LMS) estimation algorithm. In case of weak frequency selective TxL channels this approach achieves precise estimation results. However, with increasing frequency selectivity of the channel the approximation errors degrade severely the estimation performance. The second estimation approach introduces specific preambles in the transmit signal and estimates the TxL channel by observing the TxL interference of these preambles. This algorithm outperforms the LMS based one, if a certain minimum observation length of the received signal can be used. However, its performance suffers from an error propagation in the estimation algorithm, especially in case of frequency selective TxL channels. Furthermore, introducing preambles reduces the data rate of the transmit signal and requires their specification in the supported communication standards. By avoiding the error propagation problem the performance of this algorithms can be improved significantly, balancing out the discussed disadvantages. The third estimation approach considers a factorization of the TxL interference and uses a Least Squares (LS) estimation algorithm. Although it shows the highest computational complexity of the three presented estimation approaches, it achieves a very precise estimation of the TxL interference and depends only negligibly on the frequency selectivity of the TxL channel.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an dem Vodafone Stiftungslehrstuhl Mobile Nachrichtensysteme der Technischen Universität Dresden.

An erster Stelle möchte ich meinen ganz herzlichen Dank dem Leiter des Lehrstuhls, Professor Gerhard P. Fettweis, aussprechen für die Möglichkeit in seinem Team mitzuarbeiten und für seine motivierenden Worte eine Dissertation anzufertigen. Zum einen förderte er mit vielen wertvollen Ratschlägen den Erfolg dieser Arbeit. Zum anderen ließ er dennoch viel Freiraum für die eigene wissenschaftliche Entfaltung.

Bei Professor Robert Weigel möchte ich mich für sein Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens, sowie für die vielen wertvollen Hinweise im Rahmen des MARIO-Projektes bedanken. Mein Dank gilt ebenso Jan van Sinderen und Dr. Dirk Plettmeier für die vielen fruchtbaren Fachgespräche und ihr Interesse an meinem Forschungsthema.

Dennoch wäre die vorliegende Arbeit in dieser Form nicht ohne die Unterstützung durch die Kollegen des Vodafone-Lehrstuhls entstanden. Sowohl die vielen wertvollen Fachdiskussionen, als auch die fantastische Teamatmosphäre trugen erheblich zum Erfolg dieser Arbeit bei. Ein ganz besonderer Dank gilt hierbei Dr. Heinrich Nuszkowski. Er hat maßgeblich mein Interesse für den analogen Transceiver-Entwurf geweckt und mir bei der Lösung verschiedener Problemstellungen der Hochfrequenztechnik und der analogen Schaltungstechnik geholfen. Zudem danke ich ihm für das schnelle und gründliche Korrekturlesen des Manuskripts. Seit Beginn des gemeinsamen Studiums verbindet mich mit Dr. Steffen Bittner eine langjährige Freundschaft, welche neben der gleichen akademischen Laufbahn auch viele geniale, private Erlebnisse umfasst. Ihm möchte ich für seine Interesse an dieser Arbeit und für das schnelle und gründliche Korrekturlesen des Manuskripts danken. Meinem Kollegen und Freund Dr. André Fonseca Dos Santos danke ich für seine verlässliche Sportbegeisterung.

Ich möchte auch meinen Freunden danken, die mich all die Jahre auf ganz unterschiedliche Weise unterstützt haben und mir immer neue Kraft gegeben haben. Insbesondere möchte ich mich bei Daniel Görth bedanken, der mir seit der Grundschule ein treuer und verlässlicher Freund ist.

Nicht zuletzt möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern, meiner Schwester und meinen Großeltern bedanken. Sie haben mich all die Jahre großartig unterstützt und waren immer da, wenn ich sie brauchte. Einen ganz besonderen Dank möchte ich meiner lieben Susanne aussprechen für ihre Zuneigung, ihre Unterstützung und ihr Verständnis während der Promotionsphase.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Entwicklung mobiler Funktechnologien	1
1.2	Ziele der Arbeit	2
1.3	Gliederung	3
2	Grundlagen drahtloser Sendeempfänger	5
2.1	Übertragungsverfahren	5
2.1.1	Einzelträgerverfahren	5
2.1.2	Mehrträgerverfahren	8
2.2	Duplexverfahren	9
2.3	Empfängerarchitekturen	12
2.3.1	Implementierungsaspekte	13
2.3.2	Heterodyne Empfänger	19
2.3.3	Direktmischempfänger	20
2.3.4	Low-IF Empfänger	21
2.4	Zusammenfassung	22
3	Tx Leakage in Direktmischempfängern	23
3.1	Vorbetrachtung	23
3.1.1	Bandpass-Modell des Direktmisch-Transceivers	24
3.1.2	Leistungsfähigkeit und Störfestigkeit des analogen Empfänger-Frontends	28
3.2	Tx Leakage Interferenzanalyse	29
3.2.1	Signalmodellierung	31
3.2.2	Rauschen des Transceivers	35
3.2.3	Intermodulation des übersprechenden Sendesignals (IM2)	36
3.2.4	Kreuzmodulation des überkoppelnden Oszillatorsignals (XM3)	38
3.2.5	Phasenrauschstörung des übersprechenden Sendesignals (PN)	39
3.2.6	Kreuzmodulation eines Nachbarkanalsignals (ACXM)	41
3.2.7	Intermodulation eines Störsignals im halben Duplexabstand (HDD)	43
3.2.8	Intermodulation eines Störsignals im doppelten Duplexabstand (DDD)	44
3.2.9	Evaluation der Tx Leakage Interferenzen	45
3.3	Überblick der Tx Leakage Kompensationsansätze	47
3.3.1	Bandpass-Filterung	47
3.3.2	Interferenzauslöschung durch zusätzlichen Sendezweig	47
3.3.3	Adaptive Filterung	48
3.3.4	Digitale Tx Leakage Kompensation	49

3.4	Zusammenfassung	49
4	Systemmodellierung und Systemanalyse	51
4.1	Tx Leakage Modell	51
4.1.1	Äquivalente Basisband-Modellierung	51
4.1.2	Diskretes Tx Leakage Basisband-Modell	53
4.2	Einfluss des Tx Leakage auf die Analog-Digital-Wandlung	56
4.2.1	Statistische Eigenschaften des abgetasteten Empfangssignals	58
4.2.2	Signal-Rauschabstand im digitalen Empfänger-Frontend	64
4.3	Leistungsfähigkeit von OFDM Systemen unter Tx Leakage Einfluss	70
4.3.1	Leistungsdichtespektrum der Tx Leakage Interferenz	71
4.3.2	Ratenbetrachtung	76
4.4	Zusammenfassung	80
5	Tx Leakage Kanal	83
5.1	Zeitvarianz des Tx Leakage Kanals	83
5.2	Frequenzselektivität und Modellierung des Tx Leakage Kanals	90
5.3	Zusammenfassung	93
6	Digitale Kompensation der Tx Leakage Interferenz	95
6.1	Vorbetrachtungen	95
6.1.1	Vorstellung des Tx Leakage Schätzproblems	96
6.1.2	Einfluss der Entzerrung der Kanalselektion auf die Tx Leakage Schätzung	99
6.1.3	Analyse des Schätzproblems	100
6.2	Schätzung eines schwach frequenzselektiven Tx Leakage Kanals	101
6.3	Schätzung eines frequenzselektiven Tx Leakage Kanals	107
6.3.1	Präambelbasierte Tx Leakage Schätzung	107
6.3.2	<i>Least Squares</i> Tx Leakage Schätzung	117
6.4	Praktische Anwendung	122
6.4.1	Fehlerhafte Kenntnis der Parameter des analogen Empfänger-Frontends	122
6.4.2	Komplexitätsanalyse	124
6.5	Zusammenfassung	126
7	Zusammenfassung und Ausblick	129
A	Herleitung der Intercept-Punkte	133
A.1	Intercept-Punkte eines Verstärkers	133
A.2	Intercept-Punkt eines I/Q Direktmischers	134
B	Statistische Eigenschaften eines QAM modulierten Einzelträgersignals	137
B.1	Leistungsdichtespektrum des Signals	138
B.2	Leistungsdichtespektrum des Betragsquadrats des Signals	139
B.3	Leistungsdichtespektrum des Quadrats des Signals	141
B.4	Leistungsdichtespektrum des Bandpass-Signals mit Phasenrauschstörung	143

C	Diskretes Leistungsdichtespektrum der Tx Leakage Interferenz	145
C.1	Tx Leakage Interferenz eines Einzelträgersignals	145
C.2	Tx Leakage Interferenz eines OFDM Signals	146
D	Digitale Entzerrung der Kanalselektionsfilterung	151
E	Leistungsfähigkeit der präambelbasierten Tx Leakage Schätzung	155
F	Komplexitätsanalyse	159
	Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen	161
	Abkürzungen	161
	Symbole	164
	Funktionen und Operatoren	167
	Abbildungsverzeichnis	169
	Tabellenverzeichnis	173
	Literaturverzeichnis	175
	Literaturverzeichnis des Autors	183
	Lebenslauf	185

1 Kapitel 1

1 Einleitung

1.1 Entwicklung mobiler Funktechnologien

Die mobile Funkübertragung digitaler Daten erlebte in den letzten zwei Jahrzehnten eine rasante Weiterentwicklung. Die schnelle Entwicklung leistungsfähigerer Massenspeicher und deren Einsatz in einer Vielzahl von Endgeräten (z.B. Mobiltelefone, *Smartphones* und tragbare Computer) beschleunigte die Entstehung und Verbreitung neuer Informationsdienste und -technologien (z.B. Internet, Email, *Streaming*) und generierte den Bedarf, stetig höhere Datenraten mit den Endgeräten übertragen zu können. Erzielten die zellularen Mobilfunknetze der zweiten Generation noch Datenraten von wenigen Kilobits pro Sekunde, so werden die Mobilfunknetze der vierten Generation den Nutzern Spitzendatenraten von mehreren Hundert Megabits pro Sekunde zur Verfügung stellen.

Derart ambitionierte Datenraten setzen sehr hohe Anforderungen an die zugrundeliegende Hardware. Insbesondere der Entwurf der analogen Baugruppen, dem analogen Frontend, steht vor den teilweise schwer vereinbaren Herausforderungen eines geringen Stromverbrauchs, kleiner geometrischer Abmessungen und geringer Herstellungskosten. Diese Problematik wird durch die Anforderung weiter verschärft, mit dem gleichen Endgerät mehrere Funkstandards mit unterschiedlichen Trägerfrequenzen und Bandbreiten zu unterstützen. Der letzten Herausforderung wurde bisher durch den Aufbau von parallelen, jeweils auf einen Funkstandard abgestimmten, analogen Sendebzw. Empfangszweigen begegnet. Die daraus resultierende hohe Komplexität und folglich auch hohen Herstellungskosten und geometrischen Abmessungen der analogen Hardware mündeten in den Bestrebungen, ein frequenzagiles, rekonfigurierbares, analoges Frontend zu entwickeln, das sich flexibel auf unterschiedliche Trägerfrequenzen und Bandbreiten abstimmen lässt. In der englischsprachigen Literatur werden solche Ansätze unter dem Begriff *Software defined Radio* (SDR) zusammengefasst. Die Frequenzagilität der analogen Baugruppen erschwert jedoch deutlich die Erfüllung der an die Baugruppen gestellten Anforderungen wie z.B. Linearität und Rauschverhalten.

Zum Aufbau einer bidirektionalen Verbindung wird in komplexeren Funknetzen, wie beispielsweise in zellularen Mobilfunknetzen, bevorzugt das *Frequency Division Duplex* (FDD) Prinzip eingesetzt, in dem die Abwärtsstrecke (engl.: *Uplink*) und die Aufwärtsstrecke (engl.: *Downlink*) unterschiedliche Trägerfrequenzen nutzen. Die geringe Datenrate der zweiten Mobilfunkgeneration ermöglichte in den mobilen Endgeräten, zusätzlich zu der Separierung in der Frequenz, eine

zeitliche Separierung des Sende- und Empfangsbetriebs, wodurch sich die Implementierung des analogen Frontends vereinfacht. Aufgrund der kontinuierlichen Nachfrage nach höheren Datenraten ist jedoch der simultane Sende- und Empfangsbetrieb in den FDD Funkgeräten unumgänglich geworden.

In den mobilen Endgeräten wird ein Duplexer eingesetzt, um den Sendezweig (engl.: *Transmitter*, Tx) und Empfangszweig (engl.: *Receiver*, Rx) an die gemeinsame Antenne anzubinden und gleichzeitig den Empfangszweig von dem leistungsstarken Sendesignal zu isolieren. Die zunehmende Miniaturisierung der Hardware erschwert jedoch die Bereitstellung einer ausreichenden Tx-Rx Isolation des Duplexers. Diese Problematik verschärft sich weiter in frequenzagilen, rekonfigurierbaren Multiband-Frontends. Die Frequenzagilität des analogen Frontends erschwert deutlich die Erfüllung der gestellten Anforderungen. Infolge der unzureichenden Tx-Rx Isolation spricht ein signifikanter Anteil des Sendesignals in den Empfangszweig über und kann die Demodulation des Empfangssignals empfindlich stören.

In der Vergangenheit wurde dem Problem des Senderübersprechens (engl.: *Tx Leakage*, TxL) durch ein zusätzliches Bandpass-Filter in der Hochfrequenz-Stufe des Empfangszweiges zur Unterdrückung des übersprechende Sendesignals begegnet [BRMS05, LKL⁺06, BGT⁺08]. Ein anderer Vorschlag sieht die Erzeugung einer gegenphasigen Kopie des übersprechenden Sendesignals mithilfe eines zusätzlichen, baugleichen Sendezweiges vor [SSO⁺01]. Verschiedene Autoren schlugen auch die Nutzung eines analogen, adaptiven Filters parallel zu dem Duplexer zwischen dem Sende- und Empfangszweig zur Unterdrückung des übersprechenden Sendesignals vor [WKF03, OYNA05, Kan06, ABPC06, KF07]. Diese Lösungsansätze zielen somit auf die *Interferenzvermeidung* ab. Sie arbeiten alle in dem Hochfrequenz-Teil des analogen Frontends, weshalb sie nur begrenzt rekonfigurierbar sind. Zudem erhöhen sie die Komplexität des analogen Frontends und eignen sich somit nur bedingt für frequenzagile Multiband-Frontends.

Die vorliegende Dissertation verfolgt einen anderen Lösungsansatz. Die TxL Interferenz in dem analogen Empfänger-Frontend wird bewusst zugelassen. Das digitale Frontend des Empfangszweiges kennt das eigene, diskrete Sendesignal und kann deshalb die resultierende TxL Interferenz im digitalen Basisband mithilfe von Signalverarbeitungsalgorithmen schätzen und kompensieren. Dies bietet die Vorteile, flexibel für unterschiedliche Funkstandards einsetzbar zu sein und die Anforderungen an die Tx-Rx Isolation des Duplexers, als auch an das analoge Empfänger-Frontend senken und somit die Komplexität des analogen Frontends reduzieren zu können.

1.2 Ziele der Arbeit

In dieser Arbeit sollen folgende Fragestellungen untersucht werden:

1. Welche Interferenzen resultieren in Direktmischempfängern aus dem übersprechenden Sendesignal für das empfangene Nutzsignal und wie ist ihr jeweiliger Störeinfluss zu bewerten?
2. Wie kann die TxL Interferenz im diskreten Basisband modelliert werden?
3. Welche Schranken lassen sich für die Leistungsfähigkeit eines Übertragungssystems unter dem Einfluss der TxL Interferenz angeben? Wie stark reduziert sich die übertragbare Datenrate?

4. Welche Schranken lassen sich für die digitale Kompensation der Tx Leakage Interferenz angeben? Ab welcher Interferenzstärke ist eine digitale Kompensation nötig und ab welcher Interferenzstärke ist sie nicht mehr ausreichend und erfordert zusätzliche Kompensationsmaßnahmen in dem analogen Frontend?
5. Es sollen Verfahren für eine digitale Tx Leakage Kompensation entwickelt werden. Welche Rahmenfehleraten sind durch den Einsatz dieser Verfahren erreichbar? Die Rahmenfehleraten sind ein wichtiges Maß für die Leistungsfähigkeit, da heutige Datenübertragungssysteme fast ausschließlich paketorientiert arbeiten.

1.3 Gliederung

Die Arbeit ist in folgende Abschnitte untergliedert:

Das **Kapitel 2** stellt die Grundlagen drahtloser Übertragungssysteme vor und erläutert die Prinzipien einer bidirektionalen Funkverbindung. Zusätzlich werden die Herausforderungen in dem Entwurf der analogen Hardware der mobilen Endgeräte diskutiert und die prominentesten Sende- und Empfängerarchitekturen vorgestellt. Es wird gezeigt, dass Direktmischempfänger besonders störanfällig gegenüber Tx Leakage sind. Aufgrund ihrer besonderen Eignung zur Realisierung eines frequenzagilen Multiband-Frontends konzentriert sich die Arbeit im Weiteren Verlauf auf diese Empfängerarchitektur.

In dem **Kapitel 3** werden die verschiedenen Tx Leakage Interferenzen in Direktmischempfängern analysiert und die dominierende TxL Interferenz identifiziert. Zusätzlich wird ein Überblick über bisherige Lösungsansätze der Tx Leakage Problematik gegeben.

Das **Kapitel 4** leitet das äquivalente Basisband-Modell der TxL Interferenz her. Es wird der Einfluss des Tx Leakage auf die Analog-Digital Wandlung im Empfangszweig untersucht und insbesondere die Auswirkungen bei einer begrenzten Quantisierungsauflösung des Analog-Digital-Wandlers betrachtet. Des Weiteren wird die Leistungsfähigkeit von Mehrträgersystemen unter dem Einfluss von Tx Leakage mit bzw. ohne einer digitalen TxL Kompensation analysiert.

Das **Kapitel 5** untersucht die Eigenschaften der Übersprechcharakteristik, des TxL Kanals, hinsichtlich der Zeit- und Frequenzselektivität und stellt ein einfaches, skalierbares TxL Kanalmodell vor.

In dem **Kapitel 6** wird das, der digitalen Tx Leakage Kompensation zugrunde liegende Schätzproblem analysiert und drei Schätzverfahren vorgestellt sowie ihre Leistungsfähigkeit und rechen-technische Komplexität miteinander verglichen und bewertet.

Das **Kapitel 7** fasst die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und stellt weitere, mögliche Aufgabengebiete der digitalen Tx Leakage Kompensation vor.

