

Diss. ETH No. 18512

Iterative MIMO Decoding: Algorithms and VLSI Implementation Aspects

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

CHRISTOPH STUDER

Dipl.-Ing. ETH

born December 25, 1979

citizen of Solothurn, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. W. Fichtner, examiner

Prof. Dr. H. Bölskei, co-examiner

Prof. Dr. E. Viterbo, co-examiner

2009

Abstract

The use of multiple antennas at both ends of the wireless link is known as multiple-input multiple-output (MIMO) wireless technology and enables to transmit multiple data streams concurrently and within the same frequency band. This method is known as spatial multiplexing (SM) and improves the spectral efficiency and link reliability of wireless communication systems without requiring additional transmit power. Channel coding can be deployed to further improve the reliability of SM, which is one of the most promising technologies to meet the demands of future wireless communication systems for higher data-rates and improved quality of service.

Joint MIMO detection and channel decoding (JDD) is the optimum method for data detection (in terms of error-rate performance) in systems employing channel coding and SM. The (often) prohibitive computational complexity associated with JDD inhibits practical implementation. Iterative MIMO decoding requires significantly less computational complexity (compared to that of JDD) and was shown by Hochwald and ten Brink, *IEEE Trans. Comm.*, 2003, to enable near-optimum detection performance. The main idea underlying this approach is to separate MIMO detection from channel decoding and to iteratively exchange reliability information (i.e., soft-information) between a soft-input soft-output (SISO) detector for MIMO systems and a SISO channel decoder. So far, not much is known about the very-large-scale integration (VLSI) implementation complexity associated with iterative MIMO decoding.

In this thesis, we design and optimize algorithms for iterative MIMO decoding and investigate the associated performance and VLSI implementation aspects.

First, we optimize the detection algorithm developed by Wang and Poor, *IEEE Trans. Comm.*, 1999, for low-complexity soft-input soft-output MIMO detection. To this end, we propose a novel method that substantially reduces the computational complexity, without sacrificing performance. We design a corresponding high-throughput VLSI architecture and provide application-specific integrated circuit (ASIC) implementation results. This reference design demonstrates that SISO detection for iterative MIMO decoding is feasible in practice.

Secondly, we present a low-complexity SISO detection algorithm based on the principles of sphere decoding (SD), initially developed by Pohst, *ACM SIGSAM*, 1981. Our algorithm resorts to the single tree-search (STS) paradigm and incorporates clipping of soft-information into the tree-search, which results in significant complexity savings and allows to cover a large performance/complexity tradeoff region. In order to further reduce the complexity and to improve the performance of SISO STS-SD, we deploy a variety of techniques. The resulting algorithm clearly outperforms state-of-the-art SISO detection schemes for iterative MIMO decoding. Moreover, reference VLSI implementation results of soft-output STS-SD show that the proposed algorithm is well-suited for high-performance MIMO detection in practical systems.

Finally, we study the performance and VLSI implementation complexity associated with SISO channel decoding. To this end, we develop high-performance VLSI architectures for SISO decoding of convolutional codes, quasi-cyclic low density parity-check codes, and turbo codes. Corresponding ASIC implementation results demonstrate that high-throughput SISO channel decoding is feasible in practical systems.

Based on the results obtained throughout this thesis, we show that iterative MIMO decoding is feasible in practical systems and provide estimates of the silicon-complexity required for iterative MIMO decoding. In particular, we demonstrate that the silicon area of iterative MIMO decoding grows approximately linear in the number of iterations, while even a very small number of iterations is sufficient to approach the fundamental performance limits of MIMO wireless communication systems.

Zusammenfassung

Die MIMO (multiple-input multiple-output)-Technologie verwendet mehrere Antennen an beiden Seiten einer drahtlosen Verbindung und ermöglicht es, mehrere Datenströme gleichzeitig und im selben Frequenzband zu übertragen. Diese Technik —bekannt als räumliches Multiplexen— verbessert die spektrale Effizienz sowie die Zuverlässigkeit der Übertragung ohne die Sendeleistung zu erhöhen. Zusätzlich kann Kanalcodierung verwendet werden, um die Zuverlässigkeit der Übertragung weiter zu steigern. Räumliches Multiplexen im Verbund mit Kanalcodierung ist eine der wichtigsten Technologien, um den Ansprüchen von zukünftigen drahtlosen Kommunikationssystemen auf höheren Durchsatz und bessere Übertragungsqualität gerecht zu werden.

MIMO-Detektion mit gleichzeitiger Kanaldecodierung ist die optimale Methode um die Fehlerrate in solchen Systemen zu minimieren. Die benötigte Rechenleistung erlaubt es jedoch nicht, diese Methode in praktischen Systemen zu verwenden. Methoden, welche auf iterativer MIMO-Decodierung basieren, benötigen signifikant weniger Rechenleistung und erreichen dabei, wie Hochwald und ten Brink, *IEEE Trans. Comm.*, 2003, gezeigt haben, fast gleichwertige Fehlerraten. Die Kernidee dieser Verfahren besteht darin, MIMO-Detektion und Kanaldecodierung zu trennen und Zuverlässigkeitsinformation (soft-information) zwischen den beiden Komponenten auf iterative Weise auszutauschen; dies benötigt einen sogenannten SISO (soft-input soft-output)-MIMO-Detektor sowie einen SISO-Kanaldecoder. Bis Heute ist jedoch nicht viel über die Komplexität von VLSI (very-large scale integration)-Schaltungen für iterative MIMO-Decodierung bekannt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Algorithmen für iterative MIMO-Decodierung entwickelt und optimiert, sowie deren Leistungsfähigkeit und VLSI-Implementationskomplexität analysiert.

Zuerst wird der Detektionsalgorithmus von Wang und Poor, *IEEE Trans. Comm.*, 1999 untersucht und für bessere Effizienz optimiert. Dabei wird eine neue Methode angewendet, welche es ermöglicht die Komplexität des Algorithmus signifikant zu reduzieren ohne die Leistungsfähigkeit zu verringern. Basierend auf den in dieser Arbeit optimierten Algorithmus wurde eine VLSI-Schaltung implementiert, welche sehr hohe Effizienz erreicht und damit beweist, dass SISO-Detektion für iterative MIMO-Decodierung tatsächlich in die Praxis umgesetzt werden kann.

Als zweiten Beitrag dieser Arbeit präsentieren wir einen neuen SISO-Detektionsalgorithmus für MIMO-Systeme, welcher auf dem Prinzip von Sphere-Decoding (SD)—entwickelt von Pohst, *ACS SIGSAM*, 1981—aufbaut. Dieser Algorithmus benutzt das STS (single tree-search) Verfahren und bezieht das Limitieren von Zuverlässigkeitsinformation in die Baumsuche mit ein. Diese Technik führt zu einer massiven Komplexitätsreduktion und ermöglicht einen umfassenden Abtausch zwischen Leistungsfähigkeit und Komplexität. Ausserdem zeigt der resultierende Algorithmus bessere Leistungsfähigkeit und geringere Komplexität als bestehende SISO-Detektionsalgorithmen für iterative MIMO-Decodierung. Weiterhin zeigen wir VLSI-Implementationsresultate einer soft-output-Variante vom STS-SD Algorithmus und demonstrieren damit, dass diese Methode optimale Leistungsfähigkeit in praktischen Systemen erreichen kann.

Zuletzt wird der VLSI-Schaltungsaufwand und die Leistungsfähigkeit von verschiedenen (state-of-the-art) SISO-Kanaldecodern analysiert. Zu diesem Zweck wurden dedizierte VLSI-Implementationen für die SISO-Decodierung von Faltungscodes, LDPC (low-density parity check)-Codes, sowie Turbocodes entwickelt, welche einen hohen Durchsatz erreichen. Die daraus resultierenden Implementationsresultate zeigen, dass effiziente SISO-Decodierung für alle drei Codierungsverfahren in der Praxis möglich ist.

Basierend auf den Resultaten, die in dieser Arbeit erhalten wurden, zeigen wir, dass iterative MIMO-Decodierung in praktische Systeme umgesetzt werden kann. Zudem schätzen wir den entsprechenden

Flächenverbrauch ab und zeigen, dass die benötigte Schaltungsfläche ungefähr linear mit der Anzahl Iterationen ansteigt, wobei jedoch nur eine sehr geringe Zahl von Iterationen benötigt wird, um die optimale Leistungsfähigkeit von drahtlosen MIMO-Kommunikationssystemen näherungsweise zu erreichen.