

DISS. ETH NO. 17395

INFORMATION-THEORETIC ANALYSIS  
OF A CLASS OF MIMO CHANNEL  
MEASUREMENT DEVICES

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Technical Sciences

presented by

DANIEL S. BAUM

Dipl.-Ing., Universität Karlsruhe (TH)

born Dec. 22nd, 1973

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Helmut Bölcskei, examiner

Prof. Dr. J. Bach Andersen, coexaminer

2007

# Abstract

The field of information and communication theory experienced the start of a revolution in the 1990s when it became clear that using multiple antennas at transmitter and receiver could significantly increase the data rate achievable over a wireless link. Achievable data rates had approached well-known fundamental channel capacity limits for traditional single-antenna systems and this new technology promised to raise capacity well beyond those bounds by increasing the spectral efficiency of the communication link. This is possible because such multiple-input multiple-output (MIMO) systems, through a technique called Spatial Multiplexing, allow the simultaneous transmission of multiple data streams at no additional use of frequency bandwidth or power, only requiring that the environment provides sufficiently “rich” multi-path propagation (through scattering and other wave propagation effects).

Today, MIMO is widely recognized as the enabling technology for essentially all future wireless communication systems. But only around the turn of the century was this technology slowly being introduced into commercially used communication systems. One of the reasons is the significantly increased transmitter/receiver complexity and the little preexisting knowledge and experience in all aspects of the development of a MIMO modem, including the underlying MIMO wireless channel. Because the performance of systems employing MIMO depends on an extended range of properties of the channel compared

## ABSTRACT

to single-antenna systems, the characterization and modeling of the MIMO channel was and remains of fundamental importance.

The measurement of wireless MIMO channels is performed using MIMO radio channel sounders. Typically, the number of antennas used in the measurements is higher than in a corresponding communication device in order to increase the spatial measurement resolution. To increase the temporal resolution and because MIMO is often used in combination with wideband communication systems, channel sounders also typically measure over a large bandwidth. The sounder needs to be very carefully engineered to be able to actually deliver measurement results with the high precision corresponding to the fundamental resolution of the system. At the same time the amount of real-time data that needs to be processed and stored results in additional engineering challenges in the design of such a system. In the end, achieving the high accuracy requirements on the final measurement data, under the constraint of robustness to in-the-field operation, makes such devices complex to design, build, and characterize.

The large majority of commercially available MIMO radio channel measurement devices is based on time-division multiplexed switching (TDMS) of a single transmit/receive radio frequency chain into the elements of a transmit/receive antenna array. While being cost-effective, such a solution can cause significant measurement errors due to phase noise and frequency offset in the local oscillators. In this work, we systematically analyze the resulting errors and show that, in practice, *overestimation of channel capacity by several hundred percent* can occur. We demonstrate that underestimation is possible as well, albeit typically resulting in significantly smaller errors. Overestimation is caused by phase noise (and to a lesser extent frequency offset) leading to an increase of the MIMO channel rank.

Our analysis furthermore reveals that the impact of phase errors is, in general, most pronounced if the physical channel has low rank (typical for line-of-sight or poor scattering scenarios). The extreme case of a rank-1 physical channel is analyzed in detail. To empirically support

our analysis, we present measurement results obtained from a commercially employed TDMS-based MIMO channel sounder. In the light of the finding of this work, the results obtained through MIMO channel measurement campaigns using TDMS-based channel sounders should be interpreted with great care.

Finally, we discuss important aspects in the design and setup of a MIMO channel sounder as well as in the processing of the measurement data. We also propose methods to mitigate the impact of phase errors without significant changes in the sounder hardware.

# Kurzfassung

Das Gebiet der Nachrichtentechnik und Kommunikationstheorie erlebte in den 90er Jahren den Beginn einer Revolution als klar wurde, dass die Verwendung mehrerer Antennen am Sender und Empfänger eines drahtlosen Kommunikationssystems die erreichbare Datenrate signifikant erhöhen kann. Die realisierten Datenraten hatten die bekannten theoretischen Grenzen der Kanalkapazität von klassischen Ein-Antennen-Systemen erreicht, und diese neue Technologie versprach, durch Erhöhung der spektralen Effizienz auf dem Übertragungsweg, die Kapazität weit über diese Grenzen zu heben. Das ist möglich, weil solche Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Systeme, durch eine Technik namens Raummultiplex (Spatial Multiplexing) die gleichzeitige Übertragung mehrerer Datenströme ohne Verwendung zusätzlicher Frequenzbandbreite oder Senderleistung ermöglichen. Die einzige Voraussetzung ist, daß die in Abhängigkeit der Umgebung entstehende Mehrwegausbreitung (durch Reflexion und anderen Effekten der Funkwellen-Ausbreitung) "reichhaltig" genug ist.

Heute wird MIMO weithin als die entscheidende Technologie für praktisch alle zukünftigen drahtlosen Kommunikationssysteme angesehen. Aber erst zur Wende des letzten Jahrhunderts wurde diese Technologie langsam in kommerziell genutzten Kommunikationssystemen eingesetzt. Einer der Gründe hierfür ist die deutlich gesteigerte Sender-/Empfänger-Komplexität und das wenige vorhandene Wissen und Erfahrung in allen Aspekten der Entwicklung eines MIMO-Modems, ein-

## KURZFASSUNG

schliesslich des zugrundeliegenden drahtlosen MIMO-Kanals. Weil die Übertragungsleistung eines MIMO-Systems im Vergleich zu Ein-Antennen-Systemen von einer deutlich umfangreicheren Anzahl von Eigenschaften des Kanals abhängt, ist und bleibt die Charakterisierung und Modellierung dieser Art von Kanälen von fundamentaler Wichtigkeit.

Die Messung von drahtlosen MIMO-Kanälen wird mit Hilfe von MIMO-Funkkanal-Messgeräten, sogenannten Soundern, durchgeführt. Um die räumliche Auflösung der Messung zu erhöhen ist die Anzahl der verwendeten Antennen in Messungen üblicherweise grösser als die in vergleichbaren Kommunikationssystemen. Um die zeitliche Auflösung zu erhöhen und da MIMO oft in Kombination mit breitbandigen Kommunikationssystemen verwendet wird, messen Funkkanal-Sounder ebenfalls üblicherweise über eine relativ grosse Bandbreite. Das Messgerät muss sehr sorgfältig entwickelt werden um eine Genauigkeit der Messergebnisse zu erreichen welche dann auch der fundamentalen Auflösung des Systems entspricht. Gleichzeitig stellt die Menge an Echtzeit-Daten die verarbeitet und gespeichert werden müssen zusätzliche hohe technische Herausforderungen an die Geräteentwicklung. Letztlich gestaltet sich der Entwurf, Bau und Charakterisierung, auf Grund der hohen Anforderungen an die Genauigkeit der finalen Messdaten unter der Forderung von Robustheit gegenüber dem Einsatz unter Feldbedingungen, äusserst komplex.

Die Mehrzahl kommerziell erhältlicher MIMO-Funkkanal-Sounder basiert auf zeitmultiplexer Umschaltung (Time-Division Multiplexed Switching (TDMS)) einer einzigen Hochfrequenzeinheit (jeweils für Sender und Empfänger) in die Elemente einer Sender-/Empfänger-Mehrantennenstruktur. Während dies relativ kosteneffizient ist, kann eine solche Lösung signifikante Messfehler auf Grund von Phasenrauschen und Frequenzversatz in den Mischoszillatoren (Local Oscillators (LOs)) hervorrufen. In dieser Arbeit analysieren wir systematisch die entstehenden Fehler und zeigen, dass in der Praxis eine *Überschätzung der Kanalkapazität um mehrere hundert Prozent* auftreten kann.

Wir demonstrieren, dass eine Unterschätzung ebenfalls möglich ist, welche allerdings typischerweise zu deutlich kleineren Fehlern führt. Überschätzung tritt dadurch auf, dass Phasenrauschen (und zu einem geringeren Anteil Frequenzversatz) zu einer Erhöhung des Ranges des MIMO-Kanals führt.

Unsere Analyse macht weiterhin deutlich, dass der Einfluss von Phasenrauschen im Allgemeinen dann am stärksten ist wenn der physikalische Kanal niedrigen Rang hat (was typisch für Szenarien mit Sichtverbindung (line-of-sight (LOS)) oder wenig streuende Szenarien ist). Der Extremfall eines physikalischen Kanals mit einem Rang von 1 wird im Detail analysiert. Um unsere Analyse empirisch zu unterstützen, präsentieren wir Messergebnisse, die wir mit einem kommerziell eingesetzten TDMS-basierten MIMO-Funkkanal-Sounder erhalten haben. Im Angesicht der Ergebnisse dieser Arbeit sollten Ergebnisse, die auf MIMO-Kanal-Messkampagnen mit Hilfe TDMS-basierter Funkkanal-Sounder beruhen, mit grosser Vorsicht interpretiert werden.

Schliesslich behandeln wir wichtige Aspekte, sowohl in der Entwicklungsphase und Einrichtung eines Sounders, als auch in der Verarbeitung der Messdaten. Weiterhin präsentieren wir Methoden die entwickelt wurden um die Auswirkungen von Phasenfehlern abzuschwächen ohne grössere Änderungen am Aufbau des Sounders vornehmen zu müssen.