

DISS. ETH NO. 17352

NONCOHERENT MIMO WIDEBAND COMMUNICATIONS

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Technical Sciences

presented by

MORITZ BORGMANN

M.S. Stanford University

born 4.2.1977

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. techn. Helmut Bölcskei, examiner

Prof. Ezio Biglieri, coexaminer

2007

Abstract

In the late twentieth century, it increasingly seemed that only marginal improvements in the data rate of wireless communications systems would still be achievable, as practical system implementations came close to the well-known fundamental capacity limits. However, it was shown in the 1990s that if multiple antennas at the transmitter and the receiver are used, the attainable spectral efficiency can be increased significantly beyond the spectral-efficiency limits of traditional single-antenna systems. This principle is termed multiple-input multiple-output (MIMO) communication. Provided that the propagation environment exhibits rich scattering, MIMO systems allow the transmission of multiple independent data streams within the same frequency band at no additional power expenditure. In practice, MIMO systems will predominantly be employed in wideband channels, which exhibit frequency-selective fading. The use of MIMO wideband technology in combination with orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) modulation leads to drastically simplified receiver architectures. MIMO-OFDM is, in fact, the modulation scheme of choice for many recent and upcoming wireless communication standards such as the wireless LAN standard IEEE 802.11n and fourth-generation cellular standards.

Acquiring knowledge of the fading coefficients in a MIMO channel is already challenging in the frequency-flat (fast) fading case. In the frequency-selective case, this task becomes significantly more difficult because of the presence of multiple propagation paths, which results in an increased number of parameters to be estimated. In this thesis, we

address *noncoherent* frequency-selective MIMO-OFDM fading links, where neither the transmitter nor the receiver knows the channel, as opposed to *coherent* links, where the receiver has perfect channel-state information. We derive the code design criteria for noncoherent space-frequency coded MIMO-OFDM systems, show that the same maximum diversity gain as in the coherent case can be achieved, and provide explicit constructions of full-diversity (space and frequency) codes along with an analytical and numerical performance assessment.

We further study the capacity behavior of noncoherent full-band MIMO-OFDM systems under block fading. On the basis of capacity lower and upper bounds, we quantify the transmission rate penalty due to channel uncertainty as a function of the number of transmit antennas, the number of resolvable taps in the channel, the power delay profile, and the bandwidth. Our analysis reveals that for a given bandwidth and transmit power there is an optimum, capacity-maximizing, number of transmit antennas. Numerical results show that using a large number of transmit antennas in systems employing bandwidths of several gigahertz (such as in ultrawideband systems) is detrimental from a capacity point of view.

Finally, we address receiver design issues for coherent MIMO-OFDM systems. A drawback of such systems is that the necessary channel preprocessing can be computationally very demanding, since processing is performed on a tone-by-tone basis, with tens to possibly thousands of data-carrying tones. We present a new class of algorithms for computationally efficient matrix arithmetics in MIMO-OFDM receivers, focusing on the highly relevant example of channel matrix inversion for linear receivers. The proposed approach decomposes the problem such that intermediate results are polynomial, which allows an efficient computation by interpolation. We propose practical implementation approaches and perform an in-depth complexity analysis of the new class of interpolation-based inversion algorithms. For the system parameters employed in the IEEE 802.16a standard, we demonstrate computational cost savings of up to 80% over brute-force per-tone matrix inversion.

Kurzfassung

Im späten 20. Jahrhundert erschien es zunehmend, als ob drahtlose Kommunikationssysteme nur noch marginale Verbesserungen der Datenrate ermöglichen würden, weil praktische Implementierungen die bekannten theoretischen Grenzen der Systemkapazität erreichten. Einen Durchbruch stellte jedoch in den späten 1990er Jahren die sogenannte multiple-input multiple-output (MIMO)-Übertragung dar, bei der sowohl am Sender wie auch am Empfänger mehrere Antennen eingesetzt werden. MIMO-Systeme erreichen eine signifikant höhere spektrale Effizienz als traditionelle Systeme mit nur einer Antenne. MIMO-Systeme ermöglichen es, mehrere unabhängige Datenströme im selben Frequenzband zu übertragen, ohne dass es einer Erhöhung der Sendeleistung bedarf. In der Praxis wird MIMO-Technologie vorwiegend in breitbandigen Systemen eingesetzt, die frequenzselektivem Fading ausgesetzt sind. Empfänger für breitbandige MIMO-Systeme können mit Hilfe von orthogonaler Frequenzmultiplexmodulation (OFDM) besonders effizient implementiert werden. MIMO-OFDM stellt daher das Modulationsschema der Wahl für viele aktuelle und zukünftige Standards für Drahtloskommunikation dar, so zum Beispiel für den IEEE 802.11n-Standard für drahtlose lokale Netze (WLANs) und für in Entwicklung befindliche Mobilfunkstandards der vierten Generation.

Bereits in nicht frequenzselektiven (schnell veränderlichen) MIMO-Kanälen ist es sehr herausfordernd, Kenntnis der Kanalkoeffizienten zu erlangen. Im frequenzselektiven Fall wird diese Aufgabe noch einmal

deutlich schwieriger aufgrund der zeitlich auflösbaren Mehrwegeausbreitung, die zu einer erhöhten Zahl von zu schätzenden Kanalparametern führt. In dieser Arbeit befassen wir uns mit *nichtkohärenten* frequenzselektiven MIMO-OFDM-Übertragungskanälen, in denen weder der Sender noch der Empfänger die Kanalkoeffizienten kennen, im Gegensatz zu *kohärenten* Übertragungskanälen, in denen der Empfänger perfekte Kanalkennntnis hat. Wir leiten die Entwurfskriterien für nichtkohärente Raum-Frequenz-kodierte MIMO-OFDM-Systeme her, zeigen, dass der gleiche maximale Diversitätsgewinn wie im kohärenten Fall erreicht werden kann, und schlagen explizite Code-Konstruktionen vor, die volle Diversitätsordnung (in Raum und Frequenz) erreichen, sowie analysieren die Leistung dieser Codes analytisch und numerisch.

Darüber hinaus untersuchen wir das Kapazitätsverhalten von Voll-Band MIMO-OFDM-Systemen in Kanälen mit blockweisem Fading. Anhand von unteren und oberen Schranken quantifizieren wir den Verlust in Datenrate, der durch die fehlende Kanalkennntnis bewirkt wird, als Funktion der Zahl der Sendeantennen, der Zahl der zeitlich auflösbaren Kanalkoeffizienten, des Leistungsverzögerungsprofils, und der Bandbreite. Unsere Analyse zeigt, dass es für eine gegebene Bandbreite und Sendeleiste eine optimale (kapazitätsmaximierende) Zahl an Sendeantennen gibt. Numerische Ergebnisse zeigen, dass es vom Gesichtspunkt der Kapazität her schädlich sein kann, in Systemen mit mehreren Gigahertz Bandbreite, wie zum Beispiel sogenannte Ultra-Breitband-Systemen, eine Vielzahl von Antennen einzusetzen.

Abschliessend behandeln wir Aspekte des Empfängerentwurfs für kohärente MIMO-OFDM-Systeme. Ein Nachteil solcher Systeme ist, dass die nötige Vorverarbeitung der Kanalmatrizen sehr aufwendig sein kann, weil die Ergebnisse der Vorverarbeitung für jeden Ton separat benötigt werden, wobei praktische Systeme einige zehn bis möglicherweise tausende Töne einsetzen. Wir schlagen eine neuartige Klasse von Algorithmen für die effiziente Berechnung von matrixarithmetischen Funktionen in MIMO-OFDM-Empfängern vor, wobei wir uns auf den praktisch hochrelevanten Fall der Kanalinvertierung für lineare Empfänger konzentrieren. Der Ansatz besteht darin, die Vorverarbeitung so

zu zerlegen, dass Zwischenergebnisse polynomial sind und so mit Hilfe von Interpolation sehr effizient berechnet werden können. Wir schlagen praktische Implementationsverfahren vor und führen eine ausführliche Komplexitätsanalyse der interpolationsbasierten Algorithmen durch. Für die Systemparameter des IEEE 802.16a-Standards zeigen wir, dass unsere Algorithmen Komplexitätsreduktionen bis zu 80% gegenüber klassischer Ton-per-Ton-Inversion ermöglichen.