

Diss. ETH No. 18920

Design and Optimization of Distributed Multiuser Cooperative Wireless Networks

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY (ETH)
ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
CELAL EŞLİ
MSc. Boğaziçi University
born April 21, 1981
citizen of Turkey

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Armin Wittneben, examiner
Prof. Dr. Hakan Deliç, co-examiner
Assoc. Prof. Dr. Elza Erkip, co-examiner

2010

Abstract

Employing multiple antennas at the transmitter and receiver sides has been identified as the key enabler for high spectral efficiency in point-to-point communication, since it facilitates multiplexing of several data streams in space rather than in time/frequency. In this work, we are interested in achieving spatial multiplexing (SM) through efficient cooperative relaying schemes, even if both the transmit and receive antennas are distributed. To this end, we focus on wireless multiuser networks and aim at designing novel cooperative communication protocols, developing corresponding transmission and signal processing techniques, and optimizing the network performance.

This thesis is presented in two main parts. In the first part, we consider coherent multiuser *amplify-and-forward* (AF) relaying, where a set of source-destination (S-D) terminal pairs communicate concurrently over the same physical channel and a set of AF relay nodes assist the communication in a half-duplex scheme. It is known that multiuser interference can be cancelled with sufficient spatial degrees of freedom, i.e. relays. When additional relays are introduced to the network, we show that further multiple-input multiple-output (MIMO) gains can be achieved in a distributed manner through efficient (complex) relay gain optimizations. We choose two objective functions to maximize: sum rate and minimum link rate (max-min fairness). Moreover, it is shown that distributed diversity can be attained at the destinations through either relay selection or max-min type relay gain optimizations. Such gain allocation schemes require global knowledge of the channel coefficients between all participating nodes, which in practice may well diminish the spatial multiplexing gain. Addressing this issue, we introduce a new *distributed* gradient based gain allocation scheme, which substantially reduces this overhead. Key to this is the proof, that the gradient of the destination signal-to-interference-plus-noise ratio can be calculated in a distributed manner based on local channel state information (CSI) at the relays and limited feedback from the destinations.

The two *sine qua non* assumptions for the efficiency of coherent multiuser relaying are perfect CSI knowledge per relay and globally phase-synchronous relays. We take a

practical look on these two assumptions and assume that there are imperfections with both. After modeling the corresponding data mismatches within given uncertainty sets, we follow a worst-case framework and design semidefinite programming (SDP) based robust counterparts for max-min beamforming.

Lastly in order to have a bounded CSI dissemination overhead independent from the number of relays, we propose to partition the relays into multiple independent clusters. We consider either homogeneous relay clusters where each cluster independently manages the multiuser interference, or heterogeneous clusters where we establish a hierarchy in between different clusters each with a specific gain (array or spatial multiplexing) to achieve. We obtain effective diversity gain through cluster and time specific phase rotations in the former case, and through relay selection for clusters in the latter.

We shift our focus to *decode-and-forward* (DF) relaying in the second part of the thesis, and address both multiuser one- and two-way MIMO relaying. First we consider two MIMO terminals exchanging information via a single MIMO relay node. We extend the two-way protocol to multiple antenna equipped nodes with a primary focus on network coding based signal combination at the relay. In order to support unbalanced relay-to-terminal rates, we propose a *modified* network coding based approach, where we apply *zero padding per symbol* on the information sequence to be transmitted to the weak terminal, prior to XOR addition, and further we provide *a priori* decoding information to the corresponding terminal. Afterwards, we assume transmit CSI at the terminals/relay and design the transmit covariances that characterize the capacity boundaries of two-way relaying. We design SDP based covariance optimization schemes, each of which maximizes sum or minimum of the two terminal-to-terminal information rates. Moreover, we consider *imperfect* transmit CSI for the special case of single antenna terminals. Therein, we derive the worst-case broadcast capacity region, and further propose robust counterparts for the two optimization problems designed for perfect transmit CSI.

Finally, we extend one- and two-way DF relaying to the case of simultaneous MIMO communication of multiple S-D pairs. The relay is equipped with sufficient multiple antennas to resolve the MIMO multiple access channel spatially in the uplink and also to manage the interference through the downlink. Through the broadcast phase of multiuser one-way relaying, we apply conventional zero-forcing beamforming based MIMO broadcasting techniques. However, for the two-way case, we propose a novel two-level terminal separation for broadcasting: *bit-level* and *spatial-level*. Consequently, we design a modular relay transmit covariance optimization scheme that aims at maximizing the sum rate of all terminal-to-terminal rates optimally over the two relaying phases.

Kurzfassung

Die Verwendung von mehreren Sende- und Empfangsantennen wurde in den letzten Jahren als wichtigster Ansatz zur Verbesserung der spektralen Effizienz ausgemacht, da sie ermöglicht mehrere Datenströme gleichzeitig und im gleichen Frequenzband mittels räumlicher Multiplexverfahren (Spatial Multiplex) zu übertragen. In dieser Arbeit wird untersucht, wie eine räumliche Mehrfachübertragung mit verteilten Sende- und Empfangsantennen durch die Anwendung von effizienten und kooperativen Relaying-Protokollen erreicht werden kann. Der Fokus wird dabei auf drahtlose Netzwerke mit mehreren Benutzern gelegt, und es wird das Ziel verfolgt, neuartige kooperative Übertragungsprotokolle zu entwerfen, die dafür notwendigen Übertragungs- und Signalverarbeitungsalgorithmen zu entwickeln und die Netzwerkperformance zu optimieren.

Diese Dissertation ist in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil wird kohärentes Amplify-and-Forward (AF) Relaying für mehrere Benutzer betrachtet: Die gleichzeitige Kommunikation über den gleichen physikalischen Kanal einer Menge von Quell- und Zielknoten wird mit einer Menge von AF Relays im Halbduplex-Betrieb unterstützt. Es ist bekannt, dass die Interferenzen durch die Mehrfachbenutzung vollständig beseitigt werden können, falls eine gewisse mindest Anzahl von Relays zur Verfügung steht. In dieser Dissertation wird gezeigt, dass die Optimierung der Verstärkungsfaktoren zusätzlicher Relays weitere Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Gewinne bringt. Zur Optimierung werden zwei Kostenfunktionen betrachtet: entweder die summierte Datenübertragungsrate aller Verbindungen oder die kleinste Datenübertragungsrate aller einzelnen Verbindungen (Max-Min Fairness). Darüber hinaus wird gezeigt, dass verteilte Diversität durch die Auswahl von Relays oder die Max-Min Optimierung der Verstärkungsfaktoren erzielt werden kann. Solche Berechnungsmethoden der Relay-Verstärkungsfaktoren benötigen die allgemeine Kenntnis aller Kanalkoeffizienten zwis-

chen allen Knoten im Netzwerk. Diese Voraussetzung reduziert die erreichbaren Spatial Multiplex Gewinne in der Praxis erheblich. Um dieses Problem zu lösen, stellen wir ein neuartiges, verteiltes, gradientenbasiertes Optimierungsverfahren vor. Der Schlüssel zu dieser Methode ist der Beweis, dass der Gradient des Signal-zu-Interferenz-und-Rausch-Verhältnisses eines Zielknotens mit Hilfe von ausschliesslich lokalem Kanalwissen sowie eingeschränktem Feedback der Zielknoten am Relay berechnet werden kann.

Die zwei notwendigen Annahmen, welche die Effizienz von kohärentem AF Relaying für mehrere Benutzer gewährleisten sind perfekte Kanalkennntis und phasensynchrone Relays. In der Praxis können beide Annahmen nicht erfüllt werden. In dieser Dissertation werden diese Imperfektionen zuerst mittels eines Unsicherheitsbereiches modelliert und danach wird eine robuste Variante des auf der Semidefiniten Programmierung (SDP) basierenden Max-Min Beamformings entwickelt.

Schliesslich schlagen wir vor, die Relays in mehrere unabhängige Gruppen aufzuteilen, um die erforderliche Verteilung von Kanalkoeffizienten im Netzwerk zu begrenzen und von der gesamten Anzahl von Relays unabhängig zu machen. Einerseits werden homogene Relay-Gruppen betrachtet, wobei jede Gruppe unabhängig von den anderen die Mehrbenutzerinterferenzen eliminiert. Andererseits werden auch heterogene Relay-Gruppen betrachtet, wobei jede Gruppe einen speziellen MIMO Gewinn (Array oder Spatial Multiplexing) erzielen soll. Darüber hinaus wird die Diversität, im ersten Fall durch gruppen- und zeitabhängige Phasenrotationen und im zweiten Fall durch die Auswahl von Relays, erhöht.

Im zweiten Teil dieser Dissertation wird Decode-and-Forward (DF) MIMO Relaying für mehrere Benutzer im One-Way und Two-Way Betrieb untersucht. Zunächst betrachten wir zwei MIMO Endknoten, die ihre Daten über ein einzelnes MIMO Relay austauschen. Es wird das Two-Way Protokoll auf Knoten mit mehreren Antennen erweitert, wobei das Hauptaugenmerk auf die auf Network Coding basierende Signalverknüpfung am Relay gelegt wird. Um ungleiche Datenraten vom Relay zu den Zielknoten zu unterstützen, wird eine modifizierte auf Network Coding basierende Methode vorgeschlagen, bei der vor der XOR Addition ein Zero-Padding pro Symbol auf die Informationssequenz angewendet wird, die zum schwachen Zielknoten übertragen wird. Dies wird zusätzlich als a priori Information am entsprechenden Zielknoten zur Decodierung genutzt. Anschliessend wird betrachtet, dass Sender und Relays über die Kenntnis der Kanalkoeffizienten verfügen und es werden die Sendekovarianzen entworfen, welche die Kapazitätsgrenzen des Two-Way Relayings kennzeichnen. Es werden auf SDP basierende Optimierungsschemata entworfen, die jeweils die Summenrate oder das

Minimum der zwei Punkt-zu-Punkt Übertragungsraten maximieren. Ausserdem wird für ein Netzwerk mit Knoten mit nur einer Antenne der Fall betrachtet, dass die Kenntnis der Kanalkoeffizienten am Sender nicht perfekt ist. Hierzu wird die Worst-case Broadcast Capacity Region hergeleitet und weiter werden die robusten Gegenstücke zu den zwei Optimierungsproblemen für perfekte Kanalkennntnis entworfen.

Zum Abschluss wird One-Way und Two-Way DF Relaying erweitert für den Fall der simultanen MIMO Kommunikation von mehreren Quell- und Zielknoten. Dazu ist das Relay mit ausreichend Mehrfachantennen ausgestattet um den MIMO Multiple Access Kanal im Uplink räumlich aufzulösen und die Interferenz durch den Downlink zu handhaben. In dem Broadcast Zeitabschnitt des Mehrbenutzer-One-Way Relayings wenden wir herkömmliche Zero-Forcing Beamforming basierte MIMO Broadcasting Techniken an. Für den Two-Way Fall hingegen wird eine neue Knotentrennung auf zwei Ebenen vorgeschlagen: Auf Bit- und auf Raumbene. Infolgedessen wird ein modulares Relay Optimierungsschema der Sendekovarianz entworfen, das darauf ausgerichtet ist die Summenrate von allen Punkt-zu-Punkt Raten optimalerweise über die beiden Relaying Phasen zu maximieren.