

Diss. ETH No. 16775

Cooperative Relaying and Adaptive Scheduling for Low Mobility Wireless Access Networks

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
INGMAR HAMMERSTRÖM
Dipl.-Ing., RTWH Aachen
born May 14, 1975
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. A. Wittneben, examiner
Prof. Dr. H. Yanikomeroglu, co-examiner

2006

Abstract

In this thesis signal transmission schemes, in particular cooperative relaying schemes, for low mobility wireless networks are developed and analyzed. Low mobility limits the amount of the variation of the physical radio channel over the time. Thus, receiving nodes move only slowly out of an area associated to bad channel conditions, where signal fading is very strong. The use of diversity in the spatial and temporal dimensions mitigates the effects of fading and therefore increases the reliability of radio links in wireless networks. Diversity gains can also be realized in a distributed fashion (cooperative diversity). The main idea of these cooperative diversity schemes is to use relay nodes as virtual antennas to facilitate the communication of one source-destination pair. Relays can be classified as either *decode-and-forward* (DF) or *amplify-and-forward* (AF) relays. AF relays, which are considered mainly in this thesis, only retransmit an amplified version of their received signals. This leads to low-complexity relay transceivers and lower power consumption since there is no need of signal processing for decoding. One further advantage of AF relays is that they are transparent to adaptive modulation techniques which may be employed by the source.

First we analyze signaling schemes for one source-destination pair. Several AF relays, which operate within the same frequency band, facilitate the communication of this pair. The signaling schemes depend on the amount of channel state information (CSI) which is available at the relays. If, e.g., the relays know their corresponding first and second hop channel coefficient perfectly, the optimal signaling scheme results in coherent combining of all signal contributions at the destination. An additional requirement for coherent combining of distributed transmitters is a global phase reference, i.e., all local oscillators have to be phase synchronous. If there is no second hop CSI available at the relays one way to increase the reliability of the link is to use transmit diversity techniques. We present a new scheme which is able to achieve full diversity gain at the destination. This scheme essentially translates the block fading time-invariant channel into a time-variant channel by introducing, e.g., time-variant and relay-dependent phase offsets at the relays. This artificial time-variant channel can be exploited by an outer code introduced at the source.

Afterwards, we extend our results to the network-level perspective where multiple source-destination pairs share the same physical resources. A new concept to achieve multiuser diversity gains by opportunistic scheduling in a low mobility cooperative wireless network is presented and analyzed. We refer to this scheme as joint cooperative diversity and scheduling (JCDS). The key idea is to further exploit the artificially introduced time-variance by joint consideration of several source-destination pairs and to schedule, e.g., the link which supports the highest data rate among all links compared to its average supported rate. Note that although fairness of JCDS explicitly benefits from the artificial introduced time-variance it does not assure that each source-destination link is scheduled within specified time frame (short-term temporal fairness). Therefore two further scheduling schemes which are able to guarantee short-temporal fairness while achieving considerable multiuser diversity gains are presented.

Frequency selective broadband channels are addressed, too. We consider a two-hop MIMO-OFDM communication scheme with one source-destination pair and one relay. AF and DF relaying is considered. We examine the possibilities of power allocation (PA) over the subchannels in frequency and space domain to maximize the instantaneous rate of this link if channel state information at the transmitter (CSIT) is available. We consider two approaches: (i) separate optimization of source or relay PA with individual per node transmit power constraints and (ii) joint optimization of source and relay PA with joint transmit power constraint. We show that DF relaying with and without CSIT achieves much higher average rates than AF relaying with CSIT in most of the cases. Moreover, we show that the performance gain due to CSIT compared to no CSIT is much higher in the case of AF relaying than for DF relaying.

In the last part of the thesis we verify the obtained theoretical performance results by means of distributed measurements with the RACoon Laboratory which is available at the Communication Technology Laboratory. We demonstrate in a real-time experiment the proposed cooperative relaying scheme which translates the block-fading environment into a time-variant channel by introducing phase-offsets at the relays. Further, we analyze the performance of the JCDS scheme based on channel measurements which are conducted in two different indoor office environments.

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden Übertragungsverfahren für kooperative drahtlose Netze untersucht, in denen die Knoten nur eine geringe Mobilität aufweisen. Der Fokus der Arbeit ist dabei auf kooperative Relais-Verfahren gerichtet. Aufgrund der geringen Mobilität der Knoten ändert sich der physikalische Übertragungskanal (Funkkanal) nur im begrenzten Maße über der Zeit. Beispielsweise bewegen sich Knoten nur sehr langsam aus einem Bereich heraus, in dem der Signalschwund (Fading) sehr hoch ist.

Das Nutzen von räumlicher und zeitlicher Diversität verringert den Einfluß von Fading und verbessert daher die Zuverlässigkeit der Übertragung in drahtlosen Netzwerken. Diversität kann auch in einer verteilten Art und Weise realisiert werden (kooperative Diversität). Der Grundgedanke der kooperativen Diversitätsverfahren ist es, Relais als verteilte Antennen zu verwenden. In dieser Arbeit werden hauptsächlich Relais untersucht, die das empfangene Signal linear verstärken und dann weiterleiten, sogenannte Amplify-and-Forward (AF) Relais. Sie zeichnen sich zum einen durch eine geringe Komplexität und zum anderen durch eine geringe Leistungsaufnahme aus, da die empfangenen Signale nicht decodiert werden müssen. Ein weiterer Vorteil der AF Relais ist ihre Transparenz bezüglich adaptiver Modulationsverfahren, die von der Nachrichtenquelle eingesetzt werden können.

Im ersten Teil der Arbeit werden kooperative Relais-Verfahren zur Nachrichtenübertragung von einer Quelle zu einer Senke untersucht. Diese Verbindung wird durch mehrere AF Relais unterstützt. Die Wahl eines geeigneten Übertragungsverfahrens hängt davon ab, welche Kenntnis die Relais über den Funkkanal haben. Haben die Relais zum Beispiel perfekte Kenntnis über den Kanalzustand des ersten und zweiten Hops erzielt das optimale Übertragungsverfahren eine kohärente Überlagerung aller Signale der Relais am Empfänger. Eine notwendige Bedingung für eine kohärente Überlagerung aller Signale ist die Existenz einer globalen Phasenreferenz. Das heißt, daß die lokalen Oszillatoren aller Relais phasensynchron sein müssen. Wenn die Relais keine Information über den Funkkanal des zweiten Hops haben, besteht die Möglichkeit die Zuverlässigkeit der Verbindung durch Sendediversitätsverfahren zu erhöhen. Wir stellen ein neues Verfahren vor, welches volle Diversität

am Empfänger erzielen kann. Das Verfahren wandelt den quasi-statischen Funkkanal in einen zeitvarianten Funkkanal. Räumliche Diversität wird daher in zeitliche Diversität verwandelt. Dies geschieht zum Beispiel durch das multiplizieren des Empfangssignals der Relais mit einer zeitvarianten Phasensequenz. Die Phasensequenz ist für jedes Relais unterschiedlich. Diese künstlich eingefügte Zeitvarianz kann dann durch einen äusseren Code an der Nachrichtenquelle ausgenutzt werden.

Im zweiten Teil der Arbeit erweitern wir das Verfahren der künstlich eingefügten Zeitvarianz des Funkkanals auf Verbindungen zwischen mehreren Nachrichtenquellen und Nachrichtensenken. Wir stellen ein neues Konzept vor, welches Mehrbenutzerdiversität in drahtlosen Netzen erzielt. Diese Mehrbenutzerdiversität wird durch die opportunistische Kanalzuteilung erzielt, d.h., Benutzer werden dann für den Kanalzugriff eingeteilt, wenn sie eine hohe Datenrate unterstützen. Wir bezeichnen dieses Verfahren als "Joint Cooperative Diversity and Scheduling" (JCDS). Obwohl die Fairneß zwischen den einzelnen Verbindungen von der eingefügten Zeitvarianz profitiert, kann das Verfahren nicht garantieren, daß eine Verbindung zwischen einer Quelle und einer Senke in einem bestimmten Intervall für den Kanalzugriff eingeplant wird. Für die Verbesserung dieses Verhaltens stellen wir zwei weitere Verfahren vor. Diese garantieren, daß eine Verbindung zwischen einer Quelle und einer Senke in einem bestimmten Intervall für den Kanalzugriff eingeplant wird, während sie gleichzeitig Gewinne in Bezug auf Mehrbenutzerdiversität erzielen können.

Im dritten Teil der Arbeit werden Übertragungsverfahren für frequenzselektive Breitband Funkkanäle untersucht. Es wird ein MIMO-OFDM Szenario mit einer Quelle, einem Relais und einer Senke angenommen. Wir untersuchen die Möglichkeiten der effizienten Sendeleistungsverteilung (engl. Power Allocation (PA)) über die Dimensionen Raum und Frequenz an Quelle und Relais. Es werden zwei Ansätze vorgestellt: (i) die separate Optimierung der PA an Quelle oder Relais mit getrennten Sendeleistungsbeschränkungen an den Knoten, und (ii) die gemeinsame Optimierung der PA an Quelle und Relais mit einer gemeinsamen Sendeleistungsbeschränkungen für beide Knoten.

Im letzten Teil werden die theoretischen Ergebnisse der vorherigen Kapitel durch experimentelle Messungen verifiziert. Für die Messungen wird hierzu das RACooN Labor benutzt, das sich am Institut für Kommunikationstechnik der ETH Zürich befindet. Wir untersuchen experimentell sowohl das zuvor vorgestellte kooperative Diversitätsverfahren, welches anhand der Phasensequenzen an den Relais Zeitvarianz in den Funkkanal einfügt, als auch das JCDS-Verfahren.