



Doctoral Thesis

Coherent cooperative relaying in low mobility wireless multiuser networks

Author(s):

Berger, Stefan

Publication Date:

2010

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006198419> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 18912

Coherent Cooperative Relaying in Low Mobility Wireless Multiuser Networks

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences (Dr. sc. ETH Zürich)

presented by
STEFAN BERGER
Dipl.-Ing., Technische Universität München
born June 22, 1978
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr.-Ing. A. Wittneben, examiner
Prof. Dr.-Ing. A. Klein, co-examiner

2010

Abstract

In this thesis, several important aspects of cooperative wireless multiuser networks are investigated. These include *hardware imperfections*, *channel estimation*, *distributed phase synchronization*, *gain allocation*, and *practical demonstration*. The focus lies on coherent two-hop relaying networks where several amplify-and-forward (AF) relays assist the communication between multiple source-destination pairs. In these type of networks the signals from all relays are to add up coherently at the destination antennas. By choosing the gain factors in a smart way, a *spatial multiplexing gain*, *distributed diversity gain* and an *antenna gain* can thus be achieved. This allows multiple source-destination pairs to efficiently communicate concurrently on the same physical channel.

Hardware imperfections obviously degrade the overall system performance. In this work, impairments of the radio frequency (RF) hardware that are have a special impact on AF relaying networks are identified and investigated. Specifically, *local oscillator (LO) frequency offsets*, *LO phase noise*, and *I/Q imbalance* at the relays are discussed. A special focus lies on the comparison between frequency division duplexing (FDD) and time division duplexing (TDD) relays because it turns out that they are affected differently by the LO imperfections. Important design guidelines for the implementation of a practical cooperative network employing either type of relays are derived.

For coherent relaying schemes the gain factors have to be computed from instantaneous channel state information (CSI) that takes the current phases of the channel coefficients into account. If this type of information is not available or outdated, the unknown phase shifts due to the propagation delays prevent the signals from the relays to add up coherently at the destination antennas. Another important mechanism that may destroy coherency is that the LO phases of the nodes introduce phase shifts to the channel estimates. This leads to the key observation that the direction in which a channel between two wireless nodes is measured has an impact on the estimate if the nodes are not phase synchronous. Based on this insight, phase synchronization requirements for coherent relaying networks are found. Several channel estimation protocols are then identified that differ in the direction in which the individual point-to-point channels in a wireless two-hop network are measured. They are

investigated regarding the effort required to measure all channel coefficients and the quality of the estimates in the presence of additive noise and phase noise.

The analysis of the phase synchronization requirements reveals that in some cases a global phase reference is required for a certain set of nodes in order to allow for coherent forwarding. A very simple phase synchronization scheme is presented that provides a set of relays with a common LO phase. It is compared in detail to a similar scheme found in literature. Furthermore, the phase error resulting from imperfect synchronization due to additive noise and phase noise is characterized.

Two coherent beamforming schemes, namely multiuser zero-forcing (MUZF) and multiuser minimum mean squared error (MMSE) relaying, are then presented. The gain factors are derived in the presence of unknown and random LO phase offsets at all nodes. While inter-user interference is completely suppressed for MUZF, the multiuser MMSE relaying scheme minimizes the MMSE of the received symbols at all destinations. Both schemes exhibit a distributed spatial multiplexing gain by allowing multiple source-destination pairs to communicate concurrently on the same physical channel. The impact of *noisy CSI*, *phase noise*, and *phase synchronization errors* at the relays on the performance of both relaying schemes is also discussed.

Finally, a real-world demonstrator for distributed wireless communication networks, that is called RACoon Lab and is available at the Wireless Communications Group at ETH Zurich, is introduced. It was used to implement MUZF relaying on a practical two-hop relaying network with two source-destination pairs and three relays. The performance results show that even in the presence of hardware imperfections encountered in any practical system (e.g. additive noise, phase noise, interference, frequency offsets, etc.), a promising inter-user interference rejection capability can be observed.

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden verschiedene wichtige Aspekte von kooperativen, drahtlosen Mehrnutzer-Netzwerken untersucht. Betrachtet werden *Hardware-Imperfektionen*, die *Kanalmessung*, *Phasensynchronisierung* von verteilten Knoten, die *Berechnung von komplexwertigen Verstärkungsfaktoren der Relays* sowie ein praktischer *Demonstrator*. Der Fokus liegt bei kohärenten zwei-Hop Netzwerken bei denen so genannte „amplify-and-forward (AF)“ Relays die Kommunikation zwischen mehreren Sendern und Empfängern unterstützen. Bei dieser Art von Relays werden die Empfangssignale linear gefiltert aber nicht dekodiert bevor sie weitergesendet werden. Charakteristisch für die untersuchten Netzwerke ist, dass sich die Signale der Relays kohärent an den Antennen der Empfänger überlagern. Indem die komplexwertigen Verstärkungsfaktoren geschickt gewählt werden, können eine *räumliche Mehrfachnutzung des Kanals*, sowie ein *verteilter Diversitäts- und Antennengewinn* erzielt werden. Das erlaubt mehreren Nutzern effektiv auf demselben physikalischen Kanal zu kommunizieren.

Hardware-Imperfektionen vermindern die Leistungsfähigkeit des gesamten Netzwerkes. In dieser Arbeit werden Imperfektionen in der Hochfrequenz (HF)-Hardware betrachtet, die einen speziellen Einfluss auf Netzwerke mit AF-Relays besitzen. Im Speziellen werden *Frequenzabweichungen der Lokaloszillatoren*, *Phasenrauschen* und *I/Q Ungleichgewicht* diskutiert. Besonderes Gewicht erhält dabei der Vergleich zwischen Frequenzduplex und Zeitduplex Relays, weil beide Arten unterschiedlich unter den betrachteten Imperfektionen der Lokaloszillatoren leiden. Es werden daraus wichtige Richtlinien für die Implementierung praktischer Systeme abgeleitet.

Die Verstärkungsfaktoren in verteilten Systemen, bei denen die Signale sich kohärent an den Empfängern überlagern sollen, müssen aus aktueller Kanalinformation berechnet werden. Das ist unerlässlich, damit die derzeitigen Phasen der Kanalkoeffizienten berücksichtigt werden. Sollte diese Art von Kanalschätzung nicht zur Verfügung stehen oder veraltet sein, werden die Phasendrehungen, die durch die unbekanntenen Ausbreitungswege der unterschiedlichen Signale entstehen, eine kohärente Überlagerung verhindern. Der Einfluss der Lokaloszillatorphasen auf die Kanalschätzungen ist ein weiterer, wichtiger Mechanismus,

der dies unmöglich machen kann. Das führt zu der Schlüsselbeobachtung, dass die Richtung der Kanalmessung zwischen zwei Knoten, die nicht phasensynchron sind, einen Einfluss auf die Schätzung besitzt. Basierend auf dieser Erkenntnis werden Anforderungen an die Phasensynchronisierung in verteilten Netzwerken erarbeitet. Des Weiteren werden mehrere Kanalschätzprotokolle untersucht, die sich durch die Richtung, in der die einzelnen Punkt-zu-Punkt Kanäle gemessen werden, unterscheiden. Sie werden bezüglich des benötigten Aufwandes und der Qualität ihrer Kanalschätzungen in Gegenwart von additivem Rauschen und Phasenrauschen verglichen.

Die Analyse der Anforderungen an die Phasensynchronisierung enthüllt, dass bestimmte Gruppen von Knoten in manchen Fällen eine gemeinsame Phasenreferenz benötigen, damit eine kohärente Überlagerung der Signale an den Empfängern möglich ist. Es wird ein sehr einfaches Verfahren vorgestellt, mit dem sich eine solche gemeinsame Phasenreferenz bei verteilten Relay-Knoten erreichen lässt. Ein Vergleich mit einem ähnlichen Verfahren aus der Literatur beleuchtet die jeweiligen Vor- und Nachteile. Des Weiteren wird der Phasenfehler durch fehlerbehaftete Phasensynchronisierung aufgrund von additivem Rauschen und Phasenrauschen charakterisiert.

Danach werden zwei Methoden zur Berechnung der Verstärkungsfaktoren an den Relays präsentiert. Diese heissen „multiuser zero-forcing (MUZF) relaying“ und „multiuser minimum mean squared error (MMSE) relaying“. Die Verstärkungsfaktoren werden unter Berücksichtigung unbekannter und zufälliger Lokalszillatorphasen hergeleitet. Während „MUZF relaying“ jegliche Interferenz zwischen den Nutzern unterdrückt, wird der minimale mittlere quadratische Fehler (MMSE) aller Empfangssignale bei „MMSE relaying“ minimiert. Beide Verfahren erlauben eine effektive räumliche Mehrfachnutzung des Kanals für alle Nutzer. Des Weiteren wird der Einfluss von *verrauschter Kanalinformation*, *Phasenrauschen* und *Phasensynchronisierungsfehler* auf die Leistungsfähigkeit beider Methoden untersucht.

Schliesslich wird noch eine praktische Messeinrichtung, das so gennante „RACooN Lab“, vorgestellt. Es befindet sich am Institut für Kommunikationstechnik an der ETH Zürich und eignet sich als Demonstrator für verteilte, drahtlose Kommunikationsnetze. Das RACooN Lab wurde verwendet, um „MUZF relaying“ in einem realen zwei-Hop Netzwerk mit zwei Sender-Empfänger-Pärchen und drei Relays zu implementieren. Die Messergebnisse zeigen, dass bei realen Ausbreitungskanälen und selbst in Gegenwart von praktischen Hardware-Imperfektionen, wie z.B. additivem Rauschen, Phasenrauschen, Interferenz und Frequenzfehlern, eine vielversprechende Unterdrückung der Mehrnutzerinterferenz beobachtet werden kann.