

# Cooperative WLAN protocols for multimedia communication

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Ettefagh, Azadeh

**Publication date:**

2011

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006363155>

**Rights / license:**

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

**Originally published in:**

Series in Wireless Communications 13

Diss. ETH No. 18928

# **Cooperative WLAN Protocols for Multimedia Communication**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
AZADEH ETTEFAGH  
M.Sc., University of Ulm  
born July 20, 1975  
citizen of Iran

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

2010

# Abstract

In the recent years, wireless communications and the WLAN technology, as one of the most prevalent wireless indoor technologies, have received a lot of attention. However, while the demand for multimedia traffic over WLANs increases rapidly, the existing WLANs approach their limits. It is known that multiuser cooperative communication can enhance performance of wireless networks. It can substantially increase the spectral efficiency of wireless networks by utilising interference rather than avoiding it. This paradigm shift has a great impact on the medium access control (MAC) protocol. Most of the existing MAC protocols are designed to reduce the interference. In this work, the focus is on the WLAN and its limitations on utilising cooperative communication. WLANs were originally designed for point-to-point links with data traffic. However, in order to be able to support different applications, each with its own special requirements, further enhancements are needed.

This thesis is divided into two main parts. In the first part, the fundamental bounds of the existing WLANs with respect to physical (PHY) and MAC layers are studied. Outage probability, throughput and delay have been chosen as the main performance criteria. The results in this part present some of the existing problems in WLANs including relatively small coverage range, low efficiency, and some fairness issues. Possible relaying methods as a way to improve the coverage range or the data rate of a WLAN are also discussed. In the second part of the thesis, the focus is on the possible enhancements to improve the WLAN performance. We start this part by looking into a multiuser single-hop scenario and then study three advanced PHY relaying methods namely: multiuser decode-and-forward, two-way, and multiuser zero-forcing relaying scenarios. It has been shown that these methods can improve the spectral efficiency. However, these methods as well as many other cooperative techniques require simultaneous multiuser transmissions and hence cannot be supported by the current IEEE 802.11 systems using carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA/CA). In this part, a novel cluster-based MAC as extension of CSMA/CA is proposed to facilitate these cooperative techniques by utilising the multiuser interference mitigation capability of PHY layer.

According to the proposed cluster-based CSMA/CA (CB-CSMA/CA) scheme, nodes in a

network, including stations and relays, are allocated to different clusters. The nodes, which belong to the same cluster, are allowed to transmit concurrently, provided that there are enough degrees of freedom available to efficiently decode the desired stream at destinations. We study the impact of signal processing on the MAC protocol design, and explain the basics of CB-CSMA/CA as well as the required modifications of the existing IEEE 802.11 MAC.

We have applied the proposed CB-CSMA/CA to the above-mentioned relaying scenarios. The typical uplink/downlink transmissions in a WLAN with a multiple-antenna access point can also be considered as a subset of the first scenario, i.e. multiuser decode-and-forward relaying scenario. The analysis of the network performance with respect to both MAC and PHY layer parameters leads to more comprehensive results compared to the cases where only PHY or MAC layer parameters are studied. The results show that the CB-CSMA/CA improves throughput and reduces delay significantly as compared to the current WLAN systems.

After studying the performance of CB-CSMA/CA with some ideal assumptions, we extend our study to more realistic scenarios and take into account some cross-layer enhancements of the CB-CSMA/CA. In this study we consider three possible backoff procedure models and compare their performances in the presence of PHY channel errors. We have also considered different clustering methods, where stations are grouped into different clusters based on their channel conditions or higher layer requirements. Up to this point, we have only considered scenarios where all cluster members set their contention window to the same value, i.e. they are all perfectly event-synchronised, and therefore transmit simultaneously whenever they access the channel. We have extended then our study by looking into scenarios where stations in a cluster are not anymore perfectly event-synchronised and hence they may transmit in different time slots. We have shown analytically that in the worst case scenario, i.e., when all stations in all clusters are asynchronous, then the CB-CSMA/CA throughput approaches that of the IEEE 802.11 system. In fact, with the same data rate, header durations and backoff model, throughput of the CB-CSMA/CA is always better than that of the IEEE 802.11.

So far, only one- or two-hop communication links have been taken into consideration. In the last chapter, an outlook for multihop communications and possible extensions of the CB-CSMA/CA for the multihop links are presented.

In this thesis we show that the proposed CB-CSMA/CA is a promising approach for a variety of network configurations including typical infrastructure WLANs as well as ad hoc networks with or without relays. The proposed scheme is simple but powerful and flexible. The performance results in Chapter 6 show that throughput and delay of an IEEE 802.11

---

system can be significantly improved when the CB-CSMA/CA is applied. The analysis and discussion in Chapter 7 confirm that the performance can be further improved if we can take some cross-layer parameters into account while choosing the backoff model and forming the clusters.

# Kurzfassung

Drahtlose Kommunikation und insbesondere die WLAN Technologie, als vorherrschende drahtlose Kommunikationsform in Gebäuden, sind in den letzten Jahren viel beachtet worden. Obwohl der Bedarf an Multimedia-Übertragungen über WLAN ständig steigt, erreichen existierende WLANs ihre Durchsatzgrenzen. Es ist bekannt, dass kooperative Kommunikation von mehreren Benutzern die Effizienz von drahtlosen Netzwerken steigern kann. Durch dementsprechende Ausnutzung anstatt Vermeidung von Interferenz kann die spektrale Effizienz von drahtlosen Netzwerken enorm erhöht werden. Dieser Paradigmenwechsel hat einen grossen Einfluss auf Medium Access Control (MAC) Protokolle. Die meisten existierenden MAC Protokolle zielen darauf ab, Interferenz zu reduzieren. Diese Arbeit beschäftigt sich mit WLAN und den Einschränkungen, die kooperative Kommunikation verhindern. WLANs wurden ursprünglich zur Punkt-zu-Punkt Datenübertragung entworfen. Verbesserungen dieser ursprünglichen WLANs sind notwendig, um verschiedenste Applikationen mit unterschiedlichen Anforderungen zu unterstützen.

Diese Dissertation ist in zwei Hauptteile gegliedert. Im ersten Teil werden die fundamentalen Grenzen existierender WLANs sowohl in der PHY als auch in der MAC Schicht untersucht. Ausfallwahrscheinlichkeit, Durchsatz und Verzögerung dienen als Leistungskriterien. Die Resultate in diesem Teil zeigen einige Probleme existierender WLANs auf: kleine Abdeckung, geringe Effizienz, und Fairness-Probleme. Mögliche Relaying-Methoden zur Vergrösserung der Abdeckung oder Erhöhung der Datenrate werden ebenfalls diskutiert. Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit möglichen Verbesserungen der Leistungsfähigkeit von WLANs. Dieser Teil beginnt mit der Untersuchung eines Mehrbenutzer single-hop Szenarios und drei fortgeschrittene PHY Relaying-Methoden: Mehrbenutzer decode-and-forward, two-way und Mehrbenutzer zero-forcing Relaying. Es ist gezeigt worden, dass diese Methoden die spektrale Effizienz verbessern können. Diese Methoden erfordern jedoch, wie viele andere kooperative Techniken, eine gleichzeitige Übertragung mehrerer Benutzer und können daher mit dem derzeitigen IEEE 802.11 Standard, der Carrier Sense Multiple Access mit Collision Avoidance (CSMA/CA) benutzt, nicht verwendet werden. Um diese kooperativen Techniken zu ermöglichen und die PHY Fähigkeiten zur Verringerung

von Mehrbenutzer-Interferenzen auszunutzen, wird ein neuartiges, gruppierendes (cluster-based) MAC Protokoll als Erweiterung von CSMA/CA vorgeschlagen.

Knoten in einem drahtlosen Netzwerk, sowohl Endknoten als auch Relays, werden entsprechend dieser cluster-based CSMA/CA (CB-CSMA/CA) Methode verschiedenen Gruppen (Cluster) zugeordnet. Knoten in der gleichen Gruppe dürfen gleichzeitig übertragen, falls genügend Freiheitsgrade zur Verfügung stehen, um die gewünschten Daten am Zielknoten effizient zu decodieren. Der Einfluss der Signalverarbeitung auf das Design des MAC Protokolls wird untersucht, und sowohl die Grundlagen von CB-CSMA/CA als auch die notwendigen Modifikationen des existierenden IEEE 802.11 MAC werden besprochen.

Das vorgeschlagene CB-CSMA/CA Protokoll wird auf die oben erwähnten Relaying Methoden angewendet. Die typische uplink/downlink Übertragung in WLANs mit einem Access Point mit mehreren Antennen kann als Untermenge des ersten Szenarios, Mehrbenutzer decode-and-forward, aufgefasst werden. Die Analyse der Leistungsfähigkeit des Netzwerks bezüglich PHY und MAC Parametern führt zu umfangreicheren Resultaten im Vergleich zu einer Analyse, die entweder PHY oder MAC Parameter untersucht. Die Resultate zeigen, dass CB-CSMA/CA im Vergleich zu existierenden WLAN Systemen den Durchsatz enorm verbessert und die Verzögerung signifikant reduziert.

Nachdem die Leistungsfähigkeit von CB-CSMA/CA unter idealisierenden Annahmen untersucht worden ist, werden realistischere Szenarien analysiert, wobei einige Cross-Layer Verbesserungen von CB-CSMA/CA berücksichtigt werden. Es werden drei mögliche Backoff-Modelle in Betracht gezogen und deren Leistungsfähigkeit wird in Abhängigkeit von PHY Kanalfehlern verglichen. Des weiteren werden verschiedene Gruppierungsmethoden berücksichtigt, welche die Knoten aufgrund von Kanaleigenschaften oder Anforderungen von höheren Schichten aufteilen. Bis jetzt wurden nur Szenarien betrachtet, in denen alle Knoten einer Gruppe den gleichen Wert für das Contention Window haben. Das heisst, dass alle perfekt Ereignis-synchronisiert sind und daher immer gleichzeitig übertragen, wenn sie auf den Kanal zugreifen. Als Erweiterung werden nun Szenarien betrachtet, in denen Knoten in einer Gruppe nicht mehr synchronisiert sind und daher zu unterschiedlichen Zeitpunkten übertragen können. Es wird analytisch gezeigt, dass im schlechtesten Fall, falls alle Knoten in allen Gruppen nicht Ereignis-synchronisiert sind, der CB-CSMA/CA Durchsatz sich dem Durchsatz von IEEE 802.11 Systemen annähert. Tatsächlich ist der Durchsatz von CB-CSMA/CA immer besser als der von IEEE 802.11 Systemen, wenn die gleiche Datenrate, Header-Dauer und das gleiche Backoff-Modell verwendet wird.

Bis jetzt wurde einzig one- oder two-hop Kommunikation untersucht. Im letzten Kapitel wird ein Ausblick auf multihop Kommunikation gegeben und mögliche Erweiterungen von

---

CB-CSMA/CA vorgeschlagen.

In dieser Dissertation wird gezeigt, dass das vorgeschlagene CB-CSMA/CA Protokoll ein vielversprechender Ansatz für eine Vielzahl von Netzwerkkonfigurationen, wie zum Beispiel typische WLANs oder ad hoc Netzwerke mit und ohne Relays, ist. Die vorgeschlagene Methode ist einfach, mächtig und flexibel. Die Resultate in Kapitel 6 zeigen, dass mit Hilfe von CB-CSMA/CA der Durchsatz und die Verzögerung eines IEEE 802.11 Systems signifikant verbessert werden können. Die Analyse und Diskussion in Kapitel 7 bestätigt darüberhinaus, dass die Leistungsfähigkeit weiter verbessert werden kann, wenn einige Cross-Layer Parameter zur Gruppierung und zur Wahl des Backoff-Modells berücksichtigt werden.