BUFFER-AIDED RELAYING IN DF COOPERATIVE NETWORKS

MANOJ B. R.

BHARTI SCHOOL OF TELECOMMUNICATION
TECHNOLOGY AND MANAGEMENT
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
MAY 2019

BUFFER-AIDED RELAYING IN DF COOPERATIVE NETWORKS

by

MANOJ B. R.

BHARTI SCHOOL OF TELECOMMUNICATION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

Submitted

in fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

MAY 2019

Dedicated to

My parents & wife

Certificate

This is to certify that the thesis entitled **"Buffer-Aided Relaying in DF Cooperative Networks"** being submitted by **Manoj B. R.** to the Bharti School of Telecommunication Technology and Management, Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is the record of the bona-fide research work carried out by him under our supervision. In our opinion, the thesis has reached the standards fulfilling the requirements of the regulations relating to the degree. The results contained in this thesis have not been submitted either in part or in full to any other university or institute for the award of any degree or diploma.

(Prof. Manav Bhatnagar)
Department of Electrical Engineering
Bharti School of Telecommunication
Technology and Management
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi 110016
India

(Prof. Ranjan K. Mallik)
Department of Electrical Engineering
Bharti School of Telecommunication
Technology and Management
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi 110016
India

Acknowledgements

I was able to complete this doctoral thesis with the support of many people. I would like to express my deep sense of gratitude and tribute to all of them. First and foremost, I would like to express my sincere thanks and deepest gratitude to my thesis advisors **Prof. Manav Bhatnagar** and **Prof. Ranjan K. Mallik** for their valuable guidance, support and consistent encouragement throughout my doctoral studies. It was their encouragement that enabled me to come up with my own original ideas leading to the formulation of meaningful research problems. Their profound technical knowledge, passion towards research, attention to detail and diligence helped me in shaping up my vision for future research. I am deeply indebted for their inspiration, motivation and guidance.

I would also like to thank my research committee members Prof. Shankar Prakriya, Prof. Saif K. Mohammed, Prof. Mahesh P. Abegaonkar and Prof. Monika Aggarwal for their useful interactions, invaluable comments and suggestions. I am also thankful to all the professors at IIT Delhi from whom I had the opportunity in understanding the fundamentals during the courses.

I take this opportunity to thank the Ministry of Electronics & Information Technology (MeitY), government of India for supporting my fellowship towards research under Visvesvaraya PhD Scheme for Electronics & Information Technology. The financial support for attending the international conferences provided by the Bharti School of Telecommunication Technology and Management (BSTTM) is gratefully acknowledged. I would also like to thank the staff members of BSTTM office and Industrial R&D office for taking care of all the paperwork and other logistics. The help and

support provided by the hostel staff, housekeeping and maintenance staff, and security staff at IIT Delhi is also gratefully acknowledged.

My stay at IIT Delhi would not have been so memorable without the friends that I have made along the journey making my life joyful and I am thankful to them for being a constant source of encouragement. I would like to extend my special thanks to Ankit Garg, Dushyant Sharma, Hari Krishna Boddapati, Nilay Pandey, Sandeep Joshi, Shubhankar Gautam, Soumya Prakash Dash and Sunil Kumar for carrying out many technical discussions and making the journey an enjoyable one. Thanks go out to all my friends who have always been around to provide useful suggestions, companionship and created a peaceful research environment.

Most importantly, I would like to acknowledge my father Dr. Rajashekara and my mother Smt. Lalitha for their unconditional love, continuous support and blessings. Their high moral values, principles and emphasis on quality education made a pivot role in shaping me up the person I am today. Although, they were physically far away from me, their immense faith and wish made me work hard and diligently. It would not have been possible to complete this thesis without the blessings and the wishes of my grandparents. I thank my parents-in-law Shri. Shivaprakash and Smt. Gayatri for their support and encouragement. I would also like to thank Dinesh and Pragathi for their company and understanding nature. My deepest sense of gratitude to all my teachers in my academic career for their teachings and blessings throughout my life. Sincere thanks go to my wife Spoorthy, for her constant encouragement, support and understanding nature. She has always been there for me through thick and thin times of my journey.

I also place on record, my sense of gratitude to one and all who, directly or indirectly, have bestowed their wishes and blessings on me.

Manoj B. R.

Abstract

Cooperative communication has drawn a lot of attention due to its ability to extend network coverage and increase the reliability and effective transmission rates of wireless communication. Data transmission from a source to a destination can be achieved through cooperative diversity or multi-hop relaying using various relay selection techniques which are shown to be efficient in using system resources. In a conventional relaying network, the relay, without employing a data buffer, typically assumes a prefixed schedule for reception and transmission. However, the prefixed scheduling of the data reception and the transmission at the relay does not guarantee that the best of the source-to-relay and the relay-to-destination links is utilized when a fading environment is present. In recent years, for cooperative networks, equipping data buffers at relay nodes has been proven to offer flexible scheduling of data reception and transmission, and higher gain in terms of system throughput and diversity. Therefore, in this thesis, we present a detailed performance analysis of various buffer-aided relay selection techniques which are proposed for cooperative networks with decode-and-forward (DF) relays. We have adopted a Markov chain approach to analyze the state transition matrix that models the evolution of the relay buffer status.

To begin with, we propose, for a dual-hop link with buffer-aided DF cooperative networks, a relaying scheme which is based on giving a priority to the status of buffers along with the highest channel gain of wireless links. We derive analytical expressions for the outage probability and the average bit error rate. Expressions for the steady-state distribution are also obtained, and through these expressions, it is shown that states with the same probabilities can be clustered, thus reducing the size of the state transition matrix. We propose a state-clustering-based method to obtain the reduced

state transition matrix, which in turn reduces the computational complexity in obtaining the steady-state distribution. Numerical results demonstrate that the proposed scheme has better performance gain over the existing max-link scheme.

Multi-hop relaying is an important strategy for improved link performance and increasing the range of communication, while the data buffers at the relays improve the diversity advantage of the system. Thus, we analyze the performance of a buffer-aided multi-hop relaying system using the max-link relay selection scheme for DF cooperative networks. A generalized Markov chain approach is proposed to model the evolution of buffer status for more than one cluster of relays. Closed-form expressions for the outage probability and the average packet delay are derived. We also obtain analytical expressions for the steady-state probability vector for a three-hop buffer-aided system. Through these expressions, we observe that states with the same probabilities can be clustered, thus reducing the size of the state transition matrix. Furthermore, we propose a state-clustering-based method to obtain the reduced state transition matrix, which is further used to derive an analytical expression for the outage probability with reduced computational complexity. Numerical results are provided to investigate the performance of buffer-aided multi-hop relaying networks.

The drawback with the existing max-link scheme in buffer-aided multi-hop relaying networks is that the end-to-end average packet delay increases with increase in the buffer size and the number of relays. To overcome this limitation, we propose, for multi-hop DF cooperative networks, a novel virtual full-duplex relaying scheme, referred to as center-partition max-link relaying, by using buffer-aided half-duplex relays. In this scheme, we aim to select two independent available links for data transmission in the same time slot, which, in turn, improves the overall performance of the system. The performance of the system is analyzed in terms of outage probability and average packet delay. The state transition matrix of the Markov chain is constructed and its steady-state distribution is obtained to derive the outage probability. Numerical results demonstrate that the proposed scheme provides significant outage performance with reduced average packet delay as compared to that of buffer-aided multi-hop DF relaying networks using the conventional max-link scheme.

सार

सहकारी संचार ने नेटवर्क कवरेज का विस्तार करने और वायरलेस संचार की विश्वसनीयता और प्रभावी ट्रांसमिशन दरों को बढ़ाने की अपनी क्षमता के कारण बहुत ध्यान आकर्षित किया है। एक स्रोत से गंतव्य तक डेटा ट्रांसमिशन सहकारी विविधता या मल्टी-हॉप रिलेइंग के माध्यम से विभिन्न रिले चयन तकनीकों का उपयोग करके हासिल किया जा सकता है, जो सिस्टम संसाधनों का उपयोग करने में कुशल दिखाया गया है। एक पारंपरिक रिलेइंग नेटवर्क में, रिले, डेटा बफर का इस्तेमाल किए बिना, आमतौर पर रिसेप्शन और ट्रांसमिशन के लिए एक पूर्व-निर्धारित शेड्यूल होता है। हालाँकि, डेटा रिसेप्शन के पूर्वनिर्धारित शेड्यूलिंग और रिले में ट्रांसमिशन की गारंटी नहीं है कि सबसे अच्छा स्रोत-से-रिले और रिले- से-डेस्टिनेशन लिंक का उपयोग हो जब फेडिंग वातावरण मौजूद है। हाल के वर्षों में, सहकारी नेटवर्क के लिए, डेटा बफ़र को रिले नोड्स से लैस करने को डेटा रिसेप्शन और ट्रांसमिशन के लचीले शेड्यूलिंग और सिस्टम थ्रूपुट और विविधता के संदर्भ में उच्च लाभ प्रदान करने के लिए सिद्ध किया गया है। इसलिए, इस थीसिस में, हम विभिन्न बफर-एडेड रिले चयन तकनीकों का एक विस्तृत प्रदर्शन विश्लेषण प्रस्तुत करते हैं जो कि डिकोड-एंड-फॉरवर्ड (डीएफ) रिले के साथ सहकारी नेटवर्क के लिए प्रस्तावित हैं। हमने स्टेट ट्रांजीशन मैट्रिक्स का विश्लेषण करने के लिए एक मार्कोव श्रृंखला दृष्टिकोण अपनाया है जो रिले बफर स्थिति के क्रम-विकास को मॉडल करता है।

शुरुआत करने के लिए, हम बफर-एडेड डीएफ सहकारी नेटवर्क के साथ दोहरे-हॉप लिंक के लिए प्रस्ताव करते हैं, एक रिलेइंग योजना जो वायरलेस लिंक के उच्चतम चैनल लाभ के साथ बफ़र्स की स्थिति को प्राथमिकता देने पर आधारित है। हम आउटेज प्रायिकता और औसत बिट त्रुटि दर के लिए विश्लेषणात्मक अभिव्यक्तियाँ प्राप्त करते हैं। स्थिर-स्टेट वितरण के लिए अभिव्यक्तियाँ भी प्राप्त की गयी हैं, और इन अभिव्यक्तियों के माध्यम से यह दिखाया गया है कि समान संभावनाओं वाले स्टेट्स को क्लस्टर किया जा सकता है, इस प्रकार स्टेट ट्रांजीशन मैट्रिक्स का आकार कम हो जाता है। हम संक्षिप्त स्टेट ट्रांजीशन मैट्रिक्स प्राप्त करने के लिए एक स्टेट-क्लस्टरिंग-आधारित विधि का प्रस्ताव करते हैं, जो बदले में स्थिर-स्टेट वितरण प्राप्त करने में कम्प्यूटेशनल जटिलता को कम करता है। संख्यात्मक परिणाम प्रदर्शित करता है कि प्रस्तावित स्कीम का प्रदर्शन मौजूदा अधिकतम-लिंक योजना से बेहतर है।

मल्टी-हॉप रिलेइंग बेहतर लिंक प्रदर्शन और संचार की सीमा को बढ़ाने के लिए एक महत्वपूर्ण रणनीति है, जबकि रिले में डेटा बफ़र्स सिस्टम के विविधता लाभ में सुधार करते हैं। इस प्रकार हम डीएफ सहकारी नेटवर्क के लिए अधिकतम-लिंक रिले चयन योजना का उपयोग करके बफर-एडेड मल्टी-हॉप रिलेइंग सिस्टम के प्रदर्शन का विश्लेषण करते हैं। एक सामान्यीकृत मार्कोव श्रृंखला दृष्टिकोण रिले के एक से अधिक क्लस्टर के लिए बफर स्थिति के क्रम-विकास को मॉडल करने का प्रस्ताव है। आउटेज प्रायिकता और औसत पैकेट देरी के लिए क्लोज्ड-फॉर्म अभिव्यक्तियाँ निकाली गई हैं। हम तीन-हॉप बफर-एडेड सिस्टम के लिए स्थिर-स्टेट संभाव्यता वेक्टर के लिए विश्लेषणात्मक अभिव्यक्ति भी प्राप्त करते हैं। इन अभिव्यक्तियों के माध्यम से, हम देखते हैं कि समान संभावनाओं वाले स्टेट्स को क्लस्टर किया जा सकता है, इस प्रकार स्टेट ट्रांजीशन मैट्रिक्स के आकार को कम किया जा सकता है। इसके अलावा, हम एक स्टेट - क्लस्टरिंग-आधारित विधि का प्रस्ताव करते हैं ताकि संक्षिप्त स्टेट ट्रांजीशन मैट्रिक्स प्राप्त किया जा सके, जिसका उपयोग कम कम्प्यूटेशनल जटिलता के साथ आउटेज संभावना के लिए एक विश्लेषणात्मक अभिव्यक्ति प्राप्त करने के लिए किया जाता है। बफर-एडेड मल्टी-हॉप रिलेइंग नेटवर्क के प्रदर्शन की जांच करने के लिए संख्यात्मक परिणाम प्रदान किए गए हैं।

बफर-एडेड मल्टी-हॉप रिलेइंग नेटवर्क में मौजूदा अधिकतम-लिंक योजना के साथ दोष यह है कि बफर आकार में वृद्धि और रिले की संख्या के साथ एंड-टू-एंड औसत पैकेट देरी बढ़ जाती है। इस दोष को पार करने के लिए, हम प्रस्तावित करते हैं, मल्टी-हॉप डीएफ सहकारी नेटवर्क के लिए, एक नयी आभासी पूर्ण-द्वैध रिलेयिंग योजना, जिसे केंद्र-विभाजन अधिकतम-लिंक रिलेइंग के रूप में संदर्भित किया जाता है, बफर-एडेड आधा-द्वैध रिले का उपयोग करके। इस योजना में, हम एक ही स्लॉट में डेटा ट्रांसमिशन के लिए दो स्वतंत्र उपलब्ध लिंक का चयन करना चाहते हैं, जो बदले में, सिस्टम के समग्र प्रदर्शन में सुधार करता है। आउटेज प्रायिकता और औसत पैकेट देरी के संदर्भ में प्रणाली के प्रदर्शन का विश्लेषण किया गया है। मार्कोव श्रृंखला के स्टेट ट्रांजीशन मैट्रिक्स का निर्माण किया गया है और इसकी स्थिर-स्टेट वितरण की मदद से आउटेज संभावना को प्राप्त किया गया है । संख्यात्मक परिणाम प्रदर्शित करते हैं कि प्रस्तावित योजना पारंपरिक अधिकतम-लिंक योजना की तुलना में बफर-एडेड मल्टी-हॉप डीएफ रिलेइंग नेटवर्क में कम औसत पैकेट देरी के साथ महत्वपूर्ण आउटेज प्रदर्शन प्रदान करती है।

Table of Contents

List of Figures

List of Tables

Abbreviations

ABER	Average bit error rate
AF	Amplify-and-forward
BER	Bit error rate
BPSK	Binary phase-shift keying
bpcu	Bits per channel use
CCU	Central control unit
CDF	Cumulative distribution function
CPML	Center-partition max-link
CSI	Channel state information
DF	Decode-and-forward
FD	Full-duplex
FSO	Free space optical
HD	Half-duplex
i.i.d.	Independent and identically distributed
i.n.i.d.	Independent and non-identically distributed
IRI	Inter-relay interference
MC	Markov chain
NOMA	Non-orthogonal multiple access
PDF	Probability density function
RF	Radio frequency
SIR	Signal-to-interference ratio
SNR	Signal-to-noise ratio
SSK	Space-shift keying