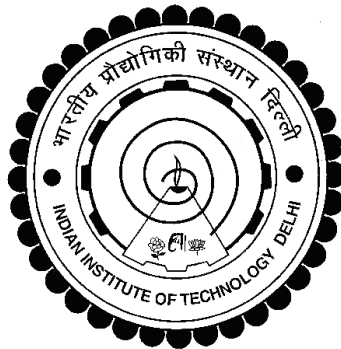


**PERFORMANCE ANALYSIS OF WIRELESS
NETWORKS WITH SPECTRALLY-EFFICIENT
UPLINK NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS
SIGNALLING**

MAYANK GUPTA



**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
SEPTEMBER 2024**

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2024

**PERFORMANCE ANALYSIS OF WIRELESS
NETWORKS WITH SPECTRALLY-EFFICIENT
UPLINK NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS
SIGNALLING**

by

MAYANK GUPTA

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

submitted

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

to the



INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

SEPTEMBER 2024

I dedicate this thesis to my beloved parents.

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis titled **Performance Analysis of Wireless Networks with Spectrally-Efficient Uplink Non-Orthogonal Multiple Access Signalling**, submitted by **Mr. Mayank Gupta**, to the Indian Institute of Technology, Delhi, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy**, is a bonafide record of the research work done by him under my supervision. In my opinion, the thesis has reached the standards fulfilling the requirements of the regulations relating to the degree.

The contents of this thesis, in full or in parts, have not been submitted to any other Institute or University for the award of any degree or diploma.

Dr. Shankar Prakriya
Thesis Supervisor
Professor
Department of Electrical Engineering
Indian Institute of Technology, Delhi
Hauz Khas New Delhi 110016

Date:
Place: New Delhi

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to extend my sincere gratitude to **Prof. Shankar Prakriya**, my Ph.D. supervisor, for his consistent encouragement and support during the course of my doctoral academic pursuits. The outcome and satisfaction of my research endeavors were substantially influenced by his insightful counsel and thought-provoking dialogues. I will always be indelibly grateful for his belief in me and insightful feedback throughout my Ph.D. tenure.

Prof. Shiv Dutt Joshi, Prof. Saif Khan Mohammed, and Prof. Monika Aggarwal, members of my student research committee (SRC), were also kind enough to provide me with insightful comments. Their insightful suggestions have made a substantial contribution to my advancement.

Being able to participate in courses at IIT Delhi has been an extraordinary privilege for me to gain knowledge, and I am thankful for the exceptional guidance provided by Prof. Shankar Prakriya, Prof. Shiv Dutt Joshi, Prof. Ranjan Kumar Mallik, Prof. Manav Bhatnagar, and Prof. Gourab Ghatak, who have instructed me in various courses.

I express my heartfelt gratitude to Prof. Sudhan Majhi (my M.Tech supervisor), Prof. Preetam Kumar, Prof. Sumanta Gupta, Prof. Yatendra Kumar Singh, Prof. Saurabh Kumar Pandey, Prof. Aneek Adhya, Prof. Rajib Kumar Jha, Prof. Sudhir Kumar, and Prof. Maheshkumar H. Kolekar from the Electrical Engineering Department of the Indian Institute of Technology, Patna. They have not only imparted knowledge in various subjects but also introduced me to the realm of research.

I express my sincere appreciation to my colleagues, Dr. Pratik Chakraborty, Dr. Bhupendra Kumar, Dr. Dileep Bapatla, Dr. Kamal Agrawal, Dr. Anand Jee, Amit Patel, Debakshi Dey, Amar Mishra, Sneha Singhal, Krishnami Bortamuly, and Faraz Nassar. Throughout my research, they have fostered a welcoming and encouraging

environment.

In addition to them, I would like to extend my regards to my hostelmates and friends: Harsh Vaid, Nandan M., Rahul Jaiswal, Songita, Manas Sahoo, Rajrishi, Gyandeep, Vishnu, Adnan, Soham Das, Bilal, Parvez, Dushyant, Satish, Sushil, Manish, Afzal, Amrish, Anurag, Mukesh, Kalyan, Laxman, Reza, Supriyo, Suraj, Venkatesh, Ayan, and Nikhil Ghodichore. They have been present for both my moments of happiness and sadness, offering unwavering assistance during difficult periods. I extend my affection to my juniors in the hostel: Gyanendra, Sarthak, Himanshu, Siddhant, Aditya, Abhishek, Anirudh, Krutik, Ishaan, Abhinna, Niranjana, Charan, Rachit, Dhruv, and Prabhjit, who have worked with me in various committees of the Udaigiri House.

I am thankful to IIT Delhi for providing me with the **Research Excellence Travel Award (RETA)**, **Research Scholar Travel Award (RSTA)**, and **Cumulative Outstanding Contribution Award in Hostel Life**.

Following that, I would like to express my profound gratitude to my family members, who have provided unwavering support throughout my journey. I deeply appreciate my mother's limitless love, my father's unwavering nurture, my brother's support, my sister's care, my brothers-in-law's concerns, and my sister-in-law's kindness. Their unwavering support and resolute actions have greatly influenced the person I have become today.

Date:

Mayank Gupta

ABSTRACT

In the swiftly maturing world of wireless communications, meeting the ever-increasing demand for higher data rates, enhanced spectral efficiency (SE), and improved connectivity is of major concern. The number of machine-type devices (MTDs), which are already an integral part of our daily lives, is projected to increase exponentially over the next few years. The current orthogonal multiple access (OMA) methods, which are extensively implemented in previous generations of wireless networks, are inadequate to handle the stringent future demands of user density and network traffic. Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) is emerging as a game-changing technology that promises to revolutionize the way it utilizes the radio spectrum and enable more efficient communication in future wireless networks. NOMA, unlike conventional OMA systems such as Frequency Division Multiple Access (FDMA), Time Division Multiple Access (TDMA), and Code Division Multiple Access (CDMA), allows multiple users to simultaneously share the same time and frequency resource. The fundamental basis of NOMA technology is rooted in the use of superposition coding (SC) and successive interference cancellation (SIC) methods. The rise in the number of devices in next-generation networks has prompted researchers to employ NOMA.

Cognitive Radio (CR) is another revolutionary technology that has emerged as a result of the scarcity of available radio frequency spectrum, and the inefficiency of the traditional fixed frequency allocation method. Implementing CR requires intelligent spectrum monitoring, effective spectrum management, and dynamic spectrum sharing. Three fundamental types of CR networks are underlay, overlay, and interweave. In underlay networks, secondary users (SUs) are allowed to share the spectrum of primary users (PUs) by transmitting at low power levels to control the interference caused to the primary receiver (PR). Strict interference constraints are enforced to prevent undue degradation of PU communications. In overlay networks, SUs enhance the primary

transmission in some manner, and then exploit the enhanced SNR to facilitate primary transmission. In interweave networks, SUs actively sense and detect unused spectrum (spectrum holes) within the PU's frequency bands and opportunistically transmit within these spectral holes without causing interference. Underlay CR enables continuous spectrum utilization and offers lower latency, as it does not have idle periods in which the spectrum is not utilized. This is in contrast to interweave CR, which may experience delays due to the time required for spectrum sensing and waiting for unused spectrum holes. Overlay CR might also introduce latency due to complex signal processing, and the coordination required with primary users. This is the motivation to study the performance of underlay CR NOMA networks in this thesis.

To facilitate uplink transmissions by a large number of users, semi-grant-free (SGF) communication schemes were evolved. SGF communication is a creative strategy that combines the advantages of both grant-based (GB) and grant-free (GF) communication approaches. This hybrid approach aims to address the shortcomings of conventional communication systems, especially in situations where traffic patterns are erratic or unpredictable. Devices using GB communication need to request access to a channel resource, and wait for permission before transmitting data. Although this approach guarantees efficient communication, it can cause enormous delays and increase overhead, particularly in networks with a large number of nodes. On the other hand, GF communication reduces overhead and latency by allowing devices to send data without being granted access to the channel resource. This can also result in interference and collisions, especially if multiple devices try to transmit simultaneously using the same channel resource. SGF communication reconciles these two points of view. In the SGF scheme, the number of nodes that are allowed to transmit is restricted in some manner to decrease chance of collisions and packet loss.

Most of the works in literature deal with downlink and cooperative underlay NOMA networks. This thesis considers multiuser uplink underlay NOMA wireless networks, and develops novel power control techniques. The first work develops an intelligent SU pair selection mechanism, and exploits NOMA signalling to maximize the throughput. Fixed power control is considered based on the statistical properties of the channels.

It is ensured that the interference to the primary network (PN) does not exceed the interference temperature limit (ITL). It is shown how primary channel knowledge can be intelligently exploited in a channel state information (CSI) dependent ITL scheme for even more significant throughput gains, which has not been explored in literature. In underlay networks, the signal-to-noise ratios (SNRs) of each link show large variations since the transmit powers are random, and determined by the random fading channels to the PR. This inspired our second work, which focuses on CSI based power control when two selected SUs transmit. The study utilizes NOMA/OMA mode switching, and develops lower and upper bounds on performance for both static and CSI dependent ITL. These bounds are important and useful to system designers. In both of the above works, only a pair of SUs is selected. The third work considers selecting multiple SUs instead of a single pair, and proposes channel-aware ITL apportioning among selected SUs. The throughput improves significantly when using the proposed power apportioning techniques. Upper bounds on throughput are derived for both static and CSI dependent ITL. Imperfect SIC occurs due to channel estimation errors and hardware impairments. For this reason, in this thesis, closed-form analytical expressions are derived for performance taking imperfect SIC into account.

The fourth work in this thesis examines multiuser SGF-NOMA networks using underlay CR principles and carefully apportioning the ITL among SGF users. It is shown that switching from 3-user NOMA to 2-user NOMA, and to OMA if both fail, avoids signalling outage and improves the overall throughput. For the first time, SIC errors are taken into account in analysis of SGF-NOMA networks. The fifth work proposes a novel instantaneous power apportioning scheme for multiple SGF users along with the GB user when all transmit concurrently using the same channel resource. Closed-form analytical expressions for the SGF user transmit powers and the overall throughput are derived.

The analysis of wireless NOMA and SGF networks is substantially advanced by this thesis. As the demand for improved SE increases in tandem with the density of users, the acquired insights become extremely valuable to system designers.

सार

वायरलेस संचार की तेजी से परिपक्व होती दुनिया में, उच्च डेटा दरों, बढ़ी हुई स्पेक्ट्रल दक्षता (एसई) और बेहतर कनेक्टिविटी की लगातार बढ़ती मांग को पूरा करना प्रमुख चिंता का विषय है। मशीन-प्रकार के उपकरणों (एमटीडी) की संख्या, जो पहले से ही हमारे दैनिक जीवन का एक अभिन्न अंग हैं, अगले कुछ वर्षों में तेजी से बढ़ने का अनुमान है। वर्तमान ऑर्थोगोनल मल्टीपल एक्सेस (ओएमए) विधियाँ, जो वायरलेस नेटवर्क की पिछली पीढ़ियों में बड़े पैमाने पर लागू की गई हैं, उपयोगकर्ता घनत्व और नेटवर्क ट्रैफ़िक की कठोर भविष्य की माँगों को संभालने के लिए अपर्याप्त हैं। नॉन-ऑर्थोगोनल मल्टीपल एक्सेस (एनओएमए) एक गेम-चेंजिंग तकनीक के रूप में उभर रही है जो रेडियो स्पेक्ट्रम का उपयोग करने के तरीके में क्रांतिकारी बदलाव लाने और भविष्य के वायरलेस नेटवर्क में अधिक कुशल संचार सक्षम करने का वादा करती है। नोमा, पारंपरिक ओमा सिस्टम जैसे कि फ्रीक्वेंसी डिवीज़न मल्टीपल एक्सेस (एफडीएमए), टाइम डिवीज़न मल्टीपल एक्सेस (टीडीएमए), और कोड डिवीज़न मल्टीपल एक्सेस (सीडीएमए) के विपरीत, कई उपयोगकर्ताओं को एक ही समय और आवृत्ति संसाधन को एक साथ साझा करने की अनुमति देता है। नोमा तकनीक का मूल आधार सुपरपोज़िशन कोडिंग (एससी) और क्रमिक हस्तक्षेप रद्दीकरण (एसआईसी) विधियों के उपयोग में निहित है। अगली पीढ़ी के नेटवर्क में उपकरणों की संख्या में वृद्धि ने शोधकर्ताओं को नोमा का उपयोग करने के लिए प्रेरित किया है।

कॉग्निटिव रेडियो (सीआर) एक और क्रांतिकारी तकनीक है जो उपलब्ध रेडियो आवृत्ति स्पेक्ट्रम की कमी और पारंपरिक निश्चित आवृत्ति आवंटन विधि की अक्षमता के परिणामस्वरूप उभरी है। कॉग्निटिव रेडियो को लागू करने के लिए बुद्धिमान स्पेक्ट्रम निगरानी, प्रभावी स्पेक्ट्रम प्रबंधन और गतिशील स्पेक्ट्रम साझाकरण की आवश्यकता होती है। कॉग्निटिव रेडियो नेटवर्क के तीन मूलभूत प्रकार अंडरले, ओवरले और इंटरवेव हैं। अंडरले नेटवर्क में, द्वितीयक उपयोगकर्ताओं (एसयू) को प्राथमिक रिसीवर (पीआर) के कारण होने वाले हस्तक्षेप को नियंत्रित करने के लिए कम शक्ति स्तरों पर संचरण करके प्राथमिक उपयोगकर्ताओं (पीयू) के स्पेक्ट्रम को साझा करने की अनुमति दी जाती है। प्राथमिक उपयोगकर्ताओं संचार के अनुचित क्षरण को रोकने के लिए सख्त हस्तक्षेप प्रतिबंध लागू किए जाते हैं। ओवरले नेटवर्क में, द्वितीयक उपयोगकर्ताओं किसी तरह से प्राथमिक संचरण को बढ़ाते हैं, और फिर प्राथमिक संचरण को सुविधाजनक बनाने के लिए बढ़े हुए एसएनआर का फायदा उठाते हैं। इंटरवेव नेटवर्क में, द्वितीयक उपयोगकर्ताओं सक्रिय रूप से प्राथमिक उपयोगकर्ताओं के आवृत्ति बैंड के भीतर अप्रयुक्त स्पेक्ट्रम (स्पेक्ट्रम छिद्रों) को पहचानते हैं और बिना किसी हस्तक्षेप के इन स्पेक्ट्रल छिद्रों के भीतर अवसरवादी रूप से संचारित करते हैं। अंडरले कॉग्निटिव रेडियो निरंतर स्पेक्ट्रम उपयोग को सक्षम बनाता है और कम विलंबता प्रदान करता है, क्योंकि इसमें निष्क्रिय अवधि नहीं होती है जिसमें स्पेक्ट्रम का उपयोग नहीं किया जाता है। यह इंटरवेव कॉग्निटिव रेडियो के विपरीत है, जिसमें स्पेक्ट्रम सेंसिंग के लिए आवश्यक समय और अप्रयुक्त

स्पेक्ट्रम छिद्रों की प्रतीक्षा के कारण देरी का अनुभव हो सकता है। ओवरले कॉग्निटिव रेडियो जटिल सिग्नल प्रोसेसिंग और प्राथमिक उपयोगकर्ताओं के साथ आवश्यक समन्वय के कारण विलंबता भी पेश कर सकता है। इस थीसिस में अंडरले कॉग्निटिव रेडियो नोमा नेटवर्क के प्रदर्शन का अध्ययन करने की यही प्रेरणा है।

बड़ी संख्या में उपयोगकर्ताओं द्वारा अपलिंक प्रसारण की सुविधा के लिए, सेमी-ग्रांट-फ्री (एसजीएफ) संचार योजनाएँ विकसित की गईं। सेमी-ग्रांट-फ्री संचार एक रचनात्मक रणनीति है जो ग्रांट-बेस्ड (जीबी) और ग्रांट-फ्री (जीएफ) संचार दृष्टिकोण दोनों के लाभों को जोड़ती है। इस हाइब्रिड दृष्टिकोण का उद्देश्य पारंपरिक संचार प्रणालियों की कमियों को दूर करना है, खासकर उन स्थितियों में जहाँ ट्रैफिक पैटर्न अनिश्चित या अप्रत्याशित हैं। ग्रांट-बेस्ड संचार का उपयोग करने वाले उपकरणों को चैनल संसाधन तक पहुँच का अनुरोध करने और डेटा संचारित करने से पहले अनुमति की प्रतीक्षा करने की आवश्यकता होती है। हालाँकि यह दृष्टिकोण कुशल संचार की गारंटी देता है, लेकिन यह बहुत अधिक देरी का कारण बन सकता है और ओवरहेड बढ़ा सकता है, खासकर बड़ी संख्या में नोड्स वाले नेटवर्क में। दूसरी ओर, ग्रांट-फ्री संचार डिवाइस को चैनल संसाधन तक पहुँचा दिए बिना डेटा भेजने की अनुमति देकर ओवरहेड और विलंबता को कम करता है। इससे हस्तक्षेप और टकराव भी हो सकता है, खासकर अगर कई डिवाइस एक ही चैनल संसाधन का उपयोग करके एक साथ संचारित करने का प्रयास करते हैं। सेमी-ग्रांट-फ्री संचार इन दो दृष्टिकोणों को समेटता है। सेमी-ग्रांट-फ्री योजना में, टकराव और पैकेट हानि की संभावना को कम करने के लिए संचारित करने की अनुमति देने वाले नोड्स की संख्या को किसी तरह से प्रतिबंधित किया जाता है।

साहित्य में अधिकांश कार्य डाउनलिंक और सहकारी अंडरले नोमा नेटवर्क से संबंधित हैं। यह थीसिस मल्टीयूजर अपलिंक अंडरले नोमा वायरलेस नेटवर्क पर विचार करती है, और नई पावर कंट्रोल तकनीक विकसित करती है। पहला कार्य एक बुद्धिमान द्वितीयक उपयोगकर्ताओं जोड़ी चयन तंत्र विकसित करता है, और थ्रूपुट को अधिकतम करने के लिए नोमा सिग्नलिंग का उपयोग करता है। चैनलों के सांख्यिकीय गुणों के आधार पर निश्चित पावर नियंत्रण पर विचार किया जाता है। यह सुनिश्चित किया जाता है कि प्राथमिक नेटवर्क (पीएन) में हस्तक्षेप इंटरफेरेंस टेम्परेचर लिमिट (आईटीएल) से अधिक न हो। यह दिखाया गया है कि कैसे प्राथमिक चैनल ज्ञान को चैनल स्टेट इनफार्मेशन (सीएसआई) पर निर्भर आईटीएल योजना में और भी अधिक महत्वपूर्ण थ्रूपुट लाभ के लिए बुद्धिमानी से उपयोग किया जा सकता है, जिसे साहित्य में नहीं खोजा गया है। अंडरले नेटवर्क में, प्रत्येक लिंक के सिग्नल-टू-नॉइज़ रेश्यो (एसएनआर) में बड़े बदलाव दिखाई देते हैं क्योंकि संचारित शक्तियाँ यादृच्छिक होती हैं, और प्राथमिक रिसीवर के लिए यादृच्छिक फ़ेडिंग चैनलों द्वारा निर्धारित होती हैं। इसने हमारे दूसरे कार्य को प्रेरित किया, जो दो चयनित द्वितीयक उपयोगकर्ताओं संचारित होने पर चैनल स्टेट इनफार्मेशन आधारित पावर नियंत्रण पर केंद्रित है। अध्ययन नोमा/ओमा मोड स्विचिंग का उपयोग करता है, तथा स्थिर और सीएसआई पर निर्भर आईटीएल दोनों के लिए प्रदर्शन पर निचली और ऊपरी सीमाएँ विकसित करता है। ये सीमाएँ सिस्टम डिज़ाइनरों के लिए महत्वपूर्ण और उपयोगी हैं। उपरोक्त दोनों कार्यों में, केवल द्वितीयक उपयोगकर्ताओं की एक जोड़ी का चयन किया गया है। तीसरा कार्य एकल जोड़ी के बजाय कई द्वितीयक उपयोगकर्ताओं का चयन करने पर विचार

करता है, तथा चयनित द्वितीयक उपयोगकर्ताओं के बीच चैनल-जागरूक आईटीएल विभाजन का प्रस्ताव करता है। प्रस्तावित पावर विभाजन तकनीकों का उपयोग करने पर थ्रूपुट में उल्लेखनीय सुधार होता है। थ्रूपुट पर ऊपरी सीमाएँ स्थिर और सीएसआई पर निर्भर आईटीएल दोनों के लिए निकाली गई हैं। चैनल अनुमान त्रुटियों और हार्डवेयर दुर्बलताओं के कारण अपूर्ण एसआईसी होता है। इस कारण से, इस थीसिस में, अपूर्ण एसआईसी को ध्यान में रखते हुए प्रदर्शन के लिए बंद-फ़ॉर्म विश्लेषणात्मक अभिव्यक्तियाँ निकाली गई हैं।

इस थीसिस में चौथा काम अंडरले सीआर सिद्धांतों का उपयोग करके और सेमी-ग्रांट-फ्री उपयोगकर्ताओं के बीच आईटीएल को सावधानीपूर्वक विभाजित करके बहुउपयोगकर्ता सेमी-ग्रांट-फ्री नोमा नेटवर्क की जांच करता है। यह दिखाया गया है कि ३-उपयोगकर्ता नोमा से २-उपयोगकर्ता नोमा पर स्विच करना, और यदि दोनों विफल हो जाते हैं तो ओमा पर स्विच करना, सिग्नलिंग आउटेज से बचाता है और समग्र थ्रूपुट में सुधार करता है। पहली बार, सेमी-ग्रांट-फ्री नोमा नेटवर्क के विश्लेषण में एसआईसी त्रुटियों को ध्यान में रखा गया है। पांचवां काम ग्रांट-बेस्ड उपयोगकर्ता के साथ-साथ कई सेमी-ग्रांट-फ्री उपयोगकर्ताओं के लिए एक नई तात्कालिक शक्ति विभाजन योजना का प्रस्ताव करता है जब सभी एक ही चैनल संसाधन का उपयोग करके समवर्ती रूप से संचार करते हैं। सेमी-ग्रांट-फ्री उपयोगकर्ता संचार शक्तियों और समग्र थ्रूपुट के लिए बंद-रूप विश्लेषणात्मक अभिव्यक्तियाँ प्राप्त की जाती हैं।

इस थीसिस द्वारा वायरलेस नोमा और सेमी-ग्रांट-फ्री नेटवर्क का विश्लेषण काफी हद तक उन्नत किया गया है। जैसे-जैसे उपयोगकर्ताओं की संख्या के साथ-साथ बेहतर स्पेक्ट्रल एफिशिएंसी की मांग बढ़ती है, सिस्टम डिज़ाइनरों के लिए प्राप्त अंतर्दृष्टि अत्यंत मूल्यवान हो जाती है।

Contents

CERTIFICATE i

ACKNOWLEDGEMENTS ii

ABSTRACT iv

LIST OF FIGURES xvi

ABBREVIATIONS xvii

NOTATION xx

1 INTRODUCTION 1

1.1 Background 1

1.1.1 Advancements in Wireless Communication Technologies . . 1

1.2 Wireless Channel Models 5

1.2.1 Types of Fading 6

1.2.2 Types of Wireless Channel Models 8

1.3 Performance Metrics 11

1.3.1 Outage Probability 11

1.3.2 Throughput 11

1.3.3 Diversity Order 12

1.3.4 Capacity 12

1.3.5 Ergodic Capacity 13

1.4 Primer on Multiple Access Technologies 13

1.4.1 OMA 14

1.4.2 NOMA 16

1.5 Order Statistics 23

1.6 Importance of Network Adaptation 23

1.7 Primer on CR 24

1.7.1	Overlay	25
1.7.2	Interweave	26
1.7.3	Underlay	27
1.8	Primer on SGF Communications	28
1.8.1	GB Communications	29
1.8.2	GF Communications	29
1.8.3	SGF Communications	29
1.9	Context and Literature Review	30
1.9.1	State of the art	31
1.10	Motivation	34
1.11	Contributions and Thesis Organization	37
2	PERFORMANCE ANALYSIS OF NOMA-BASED UPLINK UNDERLAY MULTIUSER NETWORKS	40
2.1	Introduction	40
2.2	System Model and NOMA Signalling	42
2.3	Performance with Static ITL	45
2.4	Performance with CSI dependent ITL	50
2.4.1	Performance of the Primary Network	51
2.4.2	Performance of Secondary Network when $I_p \geq 0$	52
2.4.3	Performance of Secondary Network when $I_p < 0$	53
2.5	Simulations and Numerical Results	58
2.6	Chapter Summary	62
3	PERFORMANCE ANALYSIS OF CHANNEL AWARE POWER CONTROL AND NOMA/OMA SWITCHING FOR UPLINK UNDERLAY NETWORKS	76
3.1	Introduction	76
3.2	System Model and Problem Formulation	78
3.3	Performance with CSI based Power Apportioning Parameter and Static ITL	81
3.4	Performance with CSI based Power Apportioning Parameter and CSI dependent ITL	90
3.4.1	Performance of Primary Network	91
3.4.2	Performance of Secondary Network when $I_p \geq 0$	91

3.4.3	Performance of Secondary Network, when $I_p < 0$	93
3.5	Simulations and Numerical Results	95
3.6	Chapter Summary	102
4	PERFORMANCE ANALYSIS OF MULTIUSER UPLINK UNDERLAY NOMA NETWORKS EXPLOITING CHANNEL KNOWLEDGE	120
4.1	Introduction	120
4.2	System Model and Problem Formulation	122
4.3	Performance Analysis	123
4.3.1	Performance of CA-ITLA - Static I_p	125
4.3.2	Performance of CA-ITLA - CSI dependent I_p	126
4.4	Simulations and Numerical Results	130
4.5	Chapter Summary	135
5	PERFORMANCE OF A NOMA-ENABLED UPLINK WITH MULTIPLE SEMI-GRANT FREE TRANSMISSIONS	139
5.1	Introduction	139
5.2	System Model and Problem Formulation	140
5.3	Outage Probability Analysis	145
5.3.1	Performance of GB user	145
5.3.2	Performance of SGF users when $I_p \geq 0$	146
5.3.3	Performance of SGF users when $I_p < 0$	147
5.4	Extension to K SGF users	148
5.5	Simulations and Numerical Results	153
5.6	Chapter Summary	157
6	CONCLUSION AND FUTURE WORKS	165
6.1	Conclusion	165
6.2	Future Work	168
6.2.1	Multiple Antenna at Each Node	168
6.2.2	NOMA with Movable Antennas	168
6.2.3	RIS-NOMA	169
6.2.4	ISAC-NOMA	169
6.2.5	OTFS-NOMA	170

Bibliography	171
LIST OF PUBLICATIONS BASED ON THIS THESIS	188
AUTHOR BIOGRAPHY	189

List of Figures

1.1	Reflection, Diffraction, and Scattering.	5
1.2	Wireless Transmission and Reception.	6
1.3	Types of Fading.	7
1.4	Types of Wireless Channel Models.	9
1.5	Types of Multiple Access Technologies.	14
1.6	Flowchart of NOMA.	16
1.7	Power apportioning in OMA and NOMA.	17
1.8	Downlink PD-NOMA.	18
1.9	Uplink PD-NOMA.	20
1.10	Overlay CR.	25
1.11	Interweave CR.	26
1.12	Underlay CR.	28
2.1	The underlay multiuser network.	42
2.2	Region to evaluate I_1	47
2.3	Region to evaluate I_2	48
2.4	Region to evaluate I_3	49
2.5	Region to evaluate I_4	55
2.6	Region to evaluate I_5	56
2.7	Region to evaluate I_6	57
2.8	p_o vs α for different combination of NOMA signalling.	59
2.9	τ vs ITL (dB) (includes comparison with OMA, used as benchmark).	59
2.10	p_o^{po} vs β	60
2.11	τ vs R_1 or R_2 for $R_1 = R_2$	61
2.12	τ vs R_1 for $R_2 = 0.5$ bpcu (Fixed).	62
2.13	τ vs N.	63
3.1	Underlay Multiuser System Model.	79
3.2	The non-outage region with the dynamic power apportioning parameter.	86

3.3	The non-outage region to evaluate the lower bound for $\tilde{\Upsilon}_4 \geq \tilde{\Upsilon}_3$. . .	88
3.4	The non-outage region to evaluate the upper bound for $\tilde{\Upsilon}_4 \geq \tilde{\Upsilon}_3$. . .	88
3.5	The non-outage region to evaluate the lower bound for $\tilde{\Upsilon}_4 < \tilde{\Upsilon}_3$. . .	88
3.6	The non-outage region to evaluate the upper bound for $\tilde{\Upsilon}_4 < \tilde{\Upsilon}_3$. . .	89
3.7	The non-outage region when the primary network is in outage (Section 3.4).	89
3.8	τ vs R_1 or R_2 for $R_1 = R_2$ with $\epsilon = 0, 0.01$ (includes comparison with OMA, used as benchmark).	97
3.9	τ_1 vs R_1 or R_2 for $R_1 = R_2$ with $\epsilon = 0, 0.01, 0.1$	97
3.10	τ vs R_1 for $R_2 = 2$ bpcu with $\epsilon = 0, 0.01$	99
3.11	τ vs ITL for $\epsilon = 0, 0.01, 0.1$	99
3.12	τ vs N for different R_1 and R_2	100
3.13	p_o^{NOMA} vs ITL (dB).	101
3.14	τ vs R_1 or R_2 for $R_1 = R_2$ including actual, upper and lower bounds (dynamic α and static I_p).	101
3.15	τ vs R_1 for $R_2 = 1$ bpcu including actual, upper and lower bounds (dynamic α and static I_p).	102
3.16	τ vs R_1 or R_2 for $R_1 = R_2$ including actual, upper and lower bounds (dynamic α and CSI dependent I_p).	103
3.17	τ vs R_1 for $R_2 = 1$ bpcu including actual, upper and lower bounds (dynamic α and CSI dependent I_p).	103
4.1	τ vs R , compared with benchmarks random selection scheme (RSS) with CA-ITLA, S-ITLA, RSS with S-ITLA, and OMA for perfect and imperfect SICs.	131
4.2	τ vs R with upper bounds for perfect and imperfect SICs.	132
4.3	τ vs R for different N	133
5.1	Illustration of SGF Uplink System Model.	141
5.2	Region to evaluate $p_{no,A}^{I_p < 0, V_a, V_b}$	148
5.3	Region to evaluate $p_{no,B}^{I_p < 0, V_a, V_b}$	148
5.4	Region to evaluate $p_{no,C}^{I_p < 0, V_a, V_b}$	149
5.5	$\tau_{gb}^{U_i^*}$ vs R_{gb} , compared with benchmark schemes.	154
5.6	τ^{DPAS} vs R_{gf} for $P_t = 10$ and 20 dB.	154
5.7	τ^{DPAS} vs R_{gf} with perfect and imperfect SICs.	155
5.8	τ^{IPAS} vs R_{gf} for $M = 3, 5, 7, 10$	156

5.9	τ^{IPAS} vs P_t (dB) for $R_{gb} = 1, 2, 3, 4, 5$ bpcu.	157
5.10	τ^{IPAS} vs P_t (dB) for $R_{gf} = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1$ bpcu.	158

ABBREVIATIONS

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
6G	Sixth Generation
AF	Amplify-and-Forward
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AR	Augmented Reality
AWGN	Additive White Gaussian Noise
B5G	Beyond Fifth Generation
bpcu	Bits Per Channel Use
BS	Base Station
BS-SGF	Best User Scheduling
CA-ITLA	Channel Aware Interference Temperature Limit Apportioning
CDF	Cumulative Distribution Function
CD-NOMA	Code Domain Non-orthogonal Multiple Access
CDMA	Code Division Multiple Access
CDRT	Coordinated Direct and Relay Transmission
CR	Cognitive Radio
CSI	Channel State Information
CS-SGF	Cumulative Distribution Function Based Scheduling
DC	Difference of Convex Functions
DCC	Distributed Contention Control
DF	Decode and Forward

DPC	Dynamic Power Control
EDGE	Enhanced Data Rates for Global System for Mobile Communications Evolution
EM	Electromagnetic
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FPA	Fixed Power Apportioning
GB	Grant-Based
GF	Grant-Free
GSM	Global System for Mobile Communications
HD	High Definition
H-NOMA	Hybrid Non-orthogonal Multiple Access
HSPA	High Speed Packet Access
iid	Independent and Identically Distributed
IoT	Internet of Things
ITL	Interference Temperature Limit
LOS	Line-of-Sight
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMS	Multimedia Messaging Service
mMTC	Massive Machine Type Communication
MTD	Machine-type Device
NMT	Nordic Mobile Telephone
NOMA	Non-orthogonal Multiple Access
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OLCC	Open Loop Contention Control
OMA	Orthogonal Multiple Access
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PDF	Probability Density Function
PD-NOMA	Power Domain Non-orthogonal Multiple Access
PN	Primary Network

PR	Primary Receiver
PT	Primary Transmitter
PU	Primary User
QoS	Quality of Service
SC	Superposition Coding
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SDMA	Spatial Division Multiple Access
SE	Spectral Efficiency
SGF	Semi-Grant-Free
SIC	Successive Interference Cancellation
SINR	Signal-to-Interference-Plus-Noise-Ratio
SMS	Short Message Service
SN	Secondary Network
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SR	Secondary Receiver
ST	Secondary Transmitter
SU	Secondary User
TDMA	Time Division Multiple Access
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communication
VoIP	Voice over Internet Protocol
VR	Virtual Reality
WAP	Wireless Application Protocol
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access

NOTATION

$ \cdot $	Absolute value
σ^2	Mean power of received signal before envelope detection
$\Gamma(\cdot)$	Gamma function, where $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt$
$\Gamma(\cdot, \cdot)$	Upper incomplete Gamma function, where $\Gamma(a, x) = \int_x^{\infty} e^{-t} t^{a-1} dt$
Γ	Received SNR
Γ_n^f	Received SINR at near user in downlink NOMA
Γ_n^n	Received SNR at near user in downlink NOMA
Γ_f	Received SINR at far user in downlink NOMA
Γ_n	Received SINR to decode the near user symbols in uplink NOMA
Γ_f'	Received SNR to decode the far user symbols in uplink NOMA
Γ_i	Received SNR at i^{th} user
Γ_i'	Received SNR at i^{th} user when $I_p < 0$
γ_{th}	Threshold SNR
$\gamma_{th,p}$	Threshold SNR of primary user
$\gamma_{th,i}$	Threshold SNR of i^{th} secondary user
γ_{gb}	Threshold SNR of GB user
γ_{gf}	Threshold SNR of SGF user
α	Power apportioning parameter
α_{min}	Minimum value of power apportioning parameter
α_{max}	Maximum value of power apportioning parameter
β	Power backoff parameter
β_{min}	Minimum value of power backoff parameter
β_{max}	Maximum value of power backoff parameter
Ω	Mean of random variable h_i
λ	Mean of random variable g_i
λ_p	Mean of random variable h_p
λ_{gb}	Reciprocal of mean of random variable $\tilde{g}_i$
λ_{gf}	Reciprocal of mean of random variable $\tilde{h}_j$
ϵ	Residual interference parameter
τ	Throughput
τ_1	Throughput of NOMA signalling alone
τ_L	Lower bound of throughput
τ_U	Upper bound of throughput
$\tau_{gb}^{U_i^*}$	Throughput of GB user
τ_{gf}	Sum throughput of SGF user with the proposed DPAS scheme
$\tau_{gf}^{I_p < 0}$	Sum throughput of SGF user with the proposed DPAS scheme when $I_p < 0$

τ^{DPAS}	Overall sum throughput of network for the proposed DPAS scheme
$\tau_{gf}^{\gamma_p > 0}$	Throughput of K SGF users with the proposed IPAS scheme when $I_p > 0$, where $\gamma_p = I_p/N_o$
$\tau_{gf}^{\gamma_p \leq 0}$	Throughput of selected K_o SGF users with the proposed IPAS scheme when $I_p \leq 0$, where $\gamma_p = I_p/N_o$
τ^{IPAS}	Overall throughput of SGF users with the IPAS scheme
A	Amplitude of the direct path signal
B	Channel bandwidth
B_i	Available bandwidth for the i^{th} user
B_p	Available bandwidth for PU
B_s	Available bandwidth for SU
C	Capacity of wireless channel
C_E	Ergodic capacity of the channel
$\mathcal{CN}(0, a)$	Zero mean complex Gaussian distribution with variance a
d	Diversity order
$\exp(\cdot)$	Exponential function
$\mathbb{E}$	Expectation operator
$Ei(\cdot)$	Exponential integral function, where $Ei(x) = - \int_{-x}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt$
$f(\cdot, \cdot)$	Function considers the signal of PU and the intended message of SU
$f_X(x)$	Probability density function of random variable X
$F_X(x)$	Cumulative distribution function of random variable X
g_i	Channel between i^{th} user and the PR
$\tilde{g}_i$	Channel between i^{th} GB user and the BS
h_n	Channel between near user and the BS
h_f	Channel between far user and the BS
h_i	Channel between i^{th} user and the BS
$\tilde{h}_j$	Channel between j^{th} SGF user and the BS
h_p	Channel between primary transmitter and primary receiver
$I_0(\cdot)$	Modified Bessel function of the first kind and order zero
I_p	Interference temperature limit
$\log(\cdot)$	Logarithmic function, where $\log(z) = \int_1^z \frac{dt}{t}$
m	Nakagami-m fading shape parameter
N_o	Noise variance
P	Total transmit power
P_i	Transmit power of i^{th} user
P_t	Transmit power of GB user
P_d	Spectrum hole detection probability
P_{fa}	False alarm probability
P_{pu}	Probability that the PU is active
P_{hole}	Probability that the spectrum hole is present
p_{no}	Non-outage probability
p_o	Outage probability/Outage probability of secondary network when $I_p \geq 0$
p_o^p	Outage probability of primary network
p_o^{po}	Outage probability of secondary network when $I_p < 0$
p_o^{NOMA}	Outage probability of NOMA signalling
p_o^{OMA}	Outage probability of OMA signalling

$p_o^{NOMA,L}$	Lower bound of outage probability of NOMA signalling
$p_o^{NOMA,U}$	Upper bound of outage probability of NOMA signalling
$P_o^{U_{i^*}}$	Outage probability of the GB user
$p_o^{V_a}$	Outage probability of V_a SGF user in the DPAS scheme
$p_o^{V_a,V_b}$	Outage probability with both V_a and V_b SGF user transmitting in the DPAS scheme
$p_o^{I_p < 0, V_a}$	Outage probability of V_a SGF user when $I_p < 0$ in the DPAS scheme
$p_o^{I_p < 0, V_a, V_b}$	Outage probability with both V_a and V_b SGF user transmitting when $I_p < 0$ in the DPAS scheme
$p_{no}^{\gamma_p \leq 0}$	Non-outage probability of K_o SGF user when $I_p < 0$ in IPAS scheme, where $\gamma_p = I_p/N_o$
$Q_1(.)$	Marcum Q-function
r_{pr}	Received signal at PR
R	Fixed target rate
R_{gb}	Fixed target rate of GB user
R_{gf}	Fixed target rate of SGF user
R_i	Fixed target rate of i^{th} user
R_p	Fixed target rate of primary user
s	GB user symbol
s_a	User symbol of best uplink channel gain among SGF users
s_b	User symbol of second best uplink channel gain among SGF users
s_f	Far user symbol
s_i	i^{th} user symbol
s_p	Primary user symbol
s_s	Secondary user symbol
s_n	Near user symbol
S	Nakagami-m fading spread parameter
$U(., ., .)$	Confluent hypergeometric function
U_f	Far user
U_i	i^{th} user
U_{i^*}	User U_{i^*} with best uplink channel gain among GB users
U_n	Near user
v_a	Zero-mean additive white Gaussian noise
v_s	Intended message for the SU
X_i	Unordered i^{th} iid random variable
$X_{(i)}$	Ordered i^{th} iid random variable
y_a	Received superimposed signal at BS/SR
y_{ai}	Remaining signal after SIC
y_e	Received signal at PU with dirty paper coding