

STOCHASTIC MODELLING OF ENERGY ASPECTS IN 5G WIRELESS NETWORKS: ANALYTICAL APPROACH

ANISHA



**DEPARTMENT OF MATHEMATICS
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
JANUARY 2024**

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

STOCHASTIC MODELLING OF ENERGY ASPECTS IN 5G WIRELESS NETWORKS: ANALYTICAL APPROACH

by

ANISHA

Department of Mathematics

Submitted

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

to the



**Indian Institute of Technology Delhi
January 2024**

Dedicated to
My Family

Certificate

This is to certify that the thesis entitled “**Stochastic Modelling of Energy Aspects in 5G Wireless Networks: Analytical Approach**” submitted by “**Ms. Anisha**” to the **Indian Institute of Technology Delhi**, for the award of the Degree of **Doctor of Philosophy**, is a record of the original bonafide research work carried out by her under my supervision and guidance. 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 in part or full to any other university or institute for the award of any degree or diploma.

New Delhi
January 2024

Prof. S. Dharmaraja
Professor
Department of Mathematics
IIT Delhi

Acknowledgements

First and foremost, I would like to express my deepest gratitude to God for his boundless grace, blessings, and guidance throughout my thesis writing. With his divine presence and guidance, I have had the strength and perseverance to overcome challenges and reach this milestone.

I would like to express my sincere gratitude and appreciation to the following individuals who have provided invaluable support and guidance throughout the process of thesis writing.

I would like to express my sincere gratitude to my thesis advisor, Prof. S. Dharmaraja, for their exceptional mentorship, wisdom, and expertise. Their dedication to my academic growth, insightful feedback, and constant encouragement have been invaluable in shaping the outcome of this research. I am truly grateful for their guidance and belief in my capabilities.

I would also like to thank my SRC (Student Research Committee) members: Prof. Aparna Mehra (Mathematics Department), Prof. Swades De (Electrical Engineering Department), and Dr. Anant K. Majee (Mathematics Department) for their useful suggestions and for sharing their time and knowledge during my Ph.D.. I am grateful to the Department of Mathematics and IIT Delhi authorities for the financial support during my research period and for providing me with all the other facilities needed to complete my Ph.D..

I would also like to acknowledge Dr. Sudhesh, Prof. Poala Tardelli, and Dr. Vidyotamma for their valuable contributions to my thesis. Their expertise and their willingness to share their knowledge have enriched my understanding of the subject matter. I am grateful for their thought-provoking discussions, which have sparked new ideas and perspectives, and their invaluable guidance in refining my research methodology.

To my beloved parents, Birbal Dass and Aarti Jindal, thank you for your unconditional love, unwavering support, and endless sacrifices. Your belief in me and your constant encouragement has been a source of strength throughout this journey. I am profoundly grateful for the values you have instilled

in me, and for always being there to provide guidance and a nurturing environment in which I could thrive. To my brother Manoj and sister-in-law, Saloni, thank you for always being there for me and providing me with a strong support system.

Furthermore, I would like to acknowledge and express my gratitude to my fiancé, Nikhil. Your love, support, and understanding have made a significant impact on my life. I would also like to acknowledge my father-in-law Rajeev Singhal and sister-in-law Sneha and brother-in-law Shubham for their unwavering support. Thank you for embracing me as a part of your family and for providing me with the encouragement and space needed to focus on my academic pursuits.

To my dear friends Tanvi, Sakshi, Priya, Anuradha, Kapil, and Pooja thank you for being pillars of support and a source of motivation. I want to thank all my batchmates Tanvi, Jyotsna, Manisha, Himanshu, Aakash, Santosh, Manuj, and Divay. I am grateful for the cherished memories we have shared and for the unwavering bond of friendship, we have formed. I would like to extend my gratitude to my friends Shakti, Sarfraz, Priya, Samiksha, and my senior colleagues Dr. Nitin, Dr. Nitu, and Dr. Raina, Dr. Priyanka for the countless hours spent discussing ideas and providing valuable insights.

To everyone mentioned above, I offer my deepest gratitude for your invaluable contributions to this thesis. Your unwavering support, encouragement, and belief in my abilities have made this achievement possible. I am truly blessed to have each and every one of you in my life. Thank you for being a part of my academic and personal journey.

New Delhi
January 2024

Anisha

Abstract

5G, the fifth-generation mobile network, represents a groundbreaking global wireless standard succeeding 1G, 2G, 3G, and 4G networks. This innovative network paradigm aims to connect not only people but also machines, objects, and devices, transcending conventional boundaries. The advanced features of 5G are truly remarkable, offering higher multi-Gbps peak data speeds, ultra-low latency, improved reliability, massive network capacity, increased availability, and a more consistent user experience. By delivering superior performance and efficiency, 5G opens doors to novel user experiences and facilitates seamless connectivity across diverse industries. The extensive implementation and utilization of 5G networks bring forth several challenges related to energy consumption that affect both User Equipment (UE) and Base Stations (BSs). While 5G offers the promise of faster data speeds, reduced latency, and improved connectivity, it also presents significant hurdles in terms of energy efficiency.

One primary challenge stems from the design of 5G devices, which are engineered to maintain a continuous connection with the network, even when not actively transmitting data. This “always-on” nature results in increased energy consumption compared to earlier network generations like 4G, where devices could frequently enter sleep mode. Consequently, the higher speeds and reduced latency of 5G tend to encourage users to consume more data, leading to greater energy requirements for data transmission and reception. Moreover, many 5G devices are equipped with multiple antennas and employ MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output) technology to enable faster data rates. These advanced antenna systems consume more power, especially when operating at high frequencies.

The denser network of base stations required by 5G, due to its shorter coverage range at

higher frequencies, contributes to elevated energy consumption through their construction and operation. 5G base stations often utilize beamforming technology to direct signals toward specific users, improving spectral efficiency. However, this technology demands more power for steering and maintaining these focused signal beams. Furthermore, the deployment of small cells in urban areas, vital for achieving 5G's promised capacity and coverage, exacerbates the energy consumption challenge as they require a constant power supply for operation and backhaul connectivity.

Addressing these energy-related issues is critical for the sustainable deployment of 5G networks. Ongoing research and development efforts aim to enhance the energy efficiency of both devices and network infrastructure. These initiatives encompass the development of low-power modes for UE devices, the creation of more efficient base station hardware, and the exploration of renewable energy sources to power network infrastructure. All of these endeavors are geared toward mitigating the drawbacks associated with the high energy consumption of 5G networks.

To achieve energy efficiency in UE and BSs, several strategies can be employed. One effective approach to reduce energy consumption in the UE is the implementation of the Discontinuous Reception (DRX) mechanism. This technology enables UEs to periodically enter a sleep mode, reducing power consumption by minimizing network communication when there is no data to transmit or receive. Similarly, for energy-saving in BS few techniques can be employed. BSs can adopt energy-saving strategies by intelligently powering down or reducing their operations during periods of low network traffic. This optimization ensures energy efficiency while maintaining coverage when necessary. Additionally, optimizing cell placement and load balancing helps ensure fewer base stations are active during periods of low demand, thereby reducing overall energy consumption. Dynamically adjusting the power output of base station components, such as amplifiers and radios, in response to traffic load requirements further enhances efficiency. To reduce dependence on conventional energy grids, incorporating renewable energy sources like solar panels and wind turbines into base station power sources is a sustainable approach. When these strategies are effectively implemented, they collectively lead to substantial reductions in energy consumption for both UE and BSs.

As energy saving in UE is one of the important issues for limited sources of power in the device. Initially, two stochastic models, namely the Markov model and semi-Markov

model, for the UE based on the states of DRX mechanism, i.e., a power-saving method in mobile communication networks are created. Explicit expressions are derived for transient and steady-state system size probabilities for the Markov model. For the semi-Markov model, steady-state probabilities are computed. Further, the performance measures such as mean and variance are computed for both models. Using these models, based on the states of DRX mechanism, energy saving in the UE is calculated. Finally, sensitivity analysis is performed in which the results obtained are compared for both models.

With the increasing prevalence of wireless sensor networks, the uninterrupted operation of these networks becomes essential. To ensure continuous functionality, wireless networks rely on available BSs. However, the persistent operation of base stations comes at the cost of substantial energy consumption. Consequently, given the surge in wireless network traffic and the necessity for uninterrupted base station availability, energy efficiency within the base station becomes a concerning issue. To address this, a semi-Markov model to depict the availability of the base station, with states corresponding to the failures of its components (baseband unit, remote unit, and software module) is modelled. The analysis yields a steady-state solution, with reward rates assigned to each state based on the energy consumption of individual base station components. This approach enables the determination of the expected energy consumption within this model. Additionally, the base station's throughput is assessed using an M/G/1 queueing model with server breakdown.

Further, various models for energy analysis in the base station are developed using sleep strategy of the base station. A sleep strategy with several sleep mode (SM) levels for energy-efficient 5G BS is proposed to reduce energy consumption in the base station. Energy consumption and Quality of Service (QoS) management are paired as a result of awakening sleeping BSs. Advanced Sleep Modes (ASMs) are one of the efficient techniques for energy saving in the base station. They gradually deactivate BS components to save energy. Based on component transition times (deactivation and activation), different SM levels could be considered. Then, a Q-learning based approach for ASMs is proposed to present an optimal tradeoff between energy consumption and QoS.

Further, based on the arrival and user requests (URs) to the system, three stochastic models for ASM are presented, namely the Markov model, the semi-Markov model, and the

Markov regenerative process model. Closed-form solutions are obtained for steady-state system size probabilities for all the models. Further, the performance measures such as power consumption, power saving factor, and throughput are computed for all the models. Finally, sensitivity analysis is presented in which the results obtained are compared for models.

BSs utilize diverse frequency bands to furnish coverage, capacity and adapt to varying communication demands. The selection of a specific frequency band can influence network performance, data rates, coverage scope, and signal propagation attributes. By opting for this particular frequency band, there is an associated energy consumption by the base station. Analysing this, the stochastic models for the base station, namely Markov model and semi-Markov model which involves the selection of the frequency bands according to the system's traffic are introduced. The closed-form solutions for the steady-state system size probabilities for these models are derived. Then, a sensitivity analysis to evaluate power consumption across various scenarios is conducted. Moreover, a comparison between the analytical findings and the simulation outcomes pertaining to the power consumption within the system is provided. This comparison illustrates that the methodologies yield convergent results, underscoring a substantial level of agreement.

सारांश

5जी, पांचवीं जनरेशन का मोबाइल नेटवर्क, 1जी, 2जी, 3जी और 4जी नेटवर्क के बाद एक अग्रणी वैश्विक वायरलेस मानक का प्रतिनिधित्व करता है। इस नवोन्मेषी नेटवर्क प्रतिमान का लक्ष्य पारंपरिक सीमाओं को पार करते हुए न केवल लोगों को बल्कि मशीनों, वस्तुओं और उपकरणों को भी जोड़ना है। 5जी की उन्नत सुविधाएँ वास्तव में उल्लेखनीय हैं, जो उच्च मल्टी-जीबीपीएस पीक डेटा स्पीड, अल्ट्रा-लो विलंबता, बेहतर विश्वसनीयता, विशाल नेटवर्क क्षमता, बढ़ी हुई उपलब्धता और अधिक सुसंगत उपयोगकर्ता अनुभव प्रदान करती हैं। बेहतर प्रदर्शन और दक्षता प्रदान करके, 5जी नए उपयोगकर्ता अनुभवों के द्वार खोलता है और विभिन्न उद्योगों में निर्बाध कनेक्टिविटी की सुविधा प्रदान करता है।

5जी नेटवर्क का व्यापक कार्यान्वयन और उपयोग ऊर्जा खपत से संबंधित कई चुनौतियां सामने लाता है जो उपयोगकर्ता उपकरण (यूई) और बेस स्टेशन (बीएस) दोनों को प्रभावित करते हैं। जबकि 5जी तेज़ डेटा गति, कम विलंबता और बेहतर कनेक्टिविटी का वादा करता है, यह ऊर्जा दक्षता के मामले में महत्वपूर्ण बाधाएँ भी प्रस्तुत करता है।

एक प्राथमिक चुनौती 5जी उपकरणों के डिज़ाइन से उत्पन्न होती है, जिन्हें सक्रिय रूप से डेटा संचारित न करने पर भी नेटवर्क के साथ निरंतर कनेक्शन बनाए रखने के लिए इंजीनियर किया जाता है। इस “हमेशा चालू” प्रकृति के परिणामस्वरूप 4जी जैसी पिछली नेटवर्क पीढ़ियों की तुलना में ऊर्जा की खपत बढ़ जाती है, जहां डिवाइस अक्सर स्लीप मोड में प्रवेश कर सकते थे। नतीजतन, 5जी की उच्च गति और कम विलंबता उपयोगकर्ताओं को अधिक डेटा उपभोग करने के लिए प्रोत्साहित करती है, जिसके परिणामस्वरूप डेटा ट्रांसमिशन और रिसोप्शन के लिए अधिक ऊर्जा की आवश्यकता है।

इसके अलावा, कई 5जी डिवाइस कई एंटेना से लैस हैं और तेज़ डेटा दरों को सक्षम करने के लिए मीमो (मल्टीपल-इनपुट, मल्टीपल-आउटपुट) तकनीक का उपयोग करते हैं। ये उन्नत एंटीना सिस्टम अधिक बिजली की खपत करते हैं, खासकर जब उच्च आवृत्तियों पर काम करते हैं।

5जी के लिए आवश्यक बेस स्टेशनों का सघन नेटवर्क, उच्च आवृत्तियों पर इसकी छोटी कवरेज रेंज के कारण, उनके निर्माण और संचालन के माध्यम से बढ़ी हुई ऊर्जा खपत में योगदान देता है। 5जी बेस स्टेशन अक्सर विशिष्ट उपयोगकर्ताओं की ओर सिग्नल निर्देशित करने के लिए बीमफॉर्मिंग तकनीक का उपयोग करते हैं, जिससे वर्णक्रमीय दक्षता में सुधार होता है। हालाँकि, यह तकनीक इन केंद्रित सिग्नल बीमों को चलाने और बनाए रखने के लिए अधिक शक्ति की मांग करती है। इसके अलावा, शहरी क्षेत्रों में छोटी सेल्स की तैनाती, जो 5जी की वादा की गई क्षमता और

कवरेज को प्राप्त करने के लिए महत्वपूर्ण है, ऊर्जा खपत की चुनौती को बढ़ा देती है क्योंकि उन्हें संचालन और बैकहॉल कनेक्टिविटी के लिए निरंतर बिजली आपूर्ति की आवश्यकता होती है।

5जी नेटवर्क की स्थायी तैनाती के लिए ऊर्जा से संबंधित इन मुद्दों को संबोधित करना महत्वपूर्ण है। चल रहे अनुसंधान और विकास प्रयासों का उद्देश्य उपकरणों और नेटवर्क बुनियादी ढांचे दोनों की ऊर्जा दक्षता को बढ़ाना है। इन पहलों में यूई उपकरणों के लिए कम-पावर मोड का विकास, अधिक कुशल बेस स्टेशन हार्डवेयर का निर्माण और बिजली नेटवर्क बुनियादी ढांचे के लिए नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों की खोज शामिल है। ये सभी प्रयास 5जी नेटवर्क की उच्च ऊर्जा खपत से जुड़ी कमियों को कम करने की दिशा में कार्यरत हैं।

यूई और बीएस में ऊर्जा दक्षता हासिल करने के लिए, कई रणनीतियों को नियोजित किया जा सकता है।

यूई में ऊर्जा खपत को कम करने के लिए एक प्रभावी तरीका डिसकंटिन्यूअस रिसेप्शन (डीआरएक्स) तंत्र का कार्यान्वयन है। यह तकनीक यूई को समय-समय पर स्लीप मोड में प्रवेश करने में सक्षम बनाती है, जब संचारित करने या प्राप्त करने के लिए कोई डेटा नहीं होता है, तो नेटवर्क संचार को कम करके बिजली की खपत को कम करती है। इसी प्रकार, बीएस में ऊर्जा-बचत के लिए कुछ तकनीकों को नियोजित किया जा सकता है। बेस स्टेशन, कम नेटवर्क ट्रैफ़िक की अवधि के दौरान बुद्धिमानी से अपने संचालन को कम या कम करके ऊर्जा-बचत रणनीतियों को अपना सकते हैं। यह अनुकूलन आवश्यक होने पर कवरेज बनाए रखते हुए ऊर्जा दक्षता सुनिश्चित करता है। इसके अतिरिक्त, सेल प्लेसमेंट और लोड संतुलन को अनुकूलित करने से यह सुनिश्चित करने में मदद मिलती है कि कम मांग की अवधि के दौरान कम बेस स्टेशन सक्रिय हैं, जिससे समग्र ऊर्जा खपत कम हो जाती है। ट्रैफ़िक लोड आवश्यकताओं के जवाब में बेस स्टेशन घटकों, जैसे एम्पलीफायरों और रेडियो, के पावर आउटपुट को गतिशील रूप से समायोजित करने से दक्षता में और वृद्धि होती है।

पारंपरिक ऊर्जा ग्रीडों पर निर्भरता कम करने के लिए, सौर पैनलों और पवन टर्बाइनों जैसे नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों को बेस स्टेशन बिजली स्रोतों में शामिल करना एक स्थायी दृष्टिकोण है।

जब इन रणनीतियों को प्रभावी ढंग से लागू किया जाता है, तो वे सामूहिक रूप से यूई और बीएस दोनों के लिए ऊर्जा खपत में पर्याप्त कमी लाते हैं।

चूंकि डिवाइस में बिजली के सीमित स्रोतों के लिए यूई में ऊर्जा की बचत महत्वपूर्ण मुद्दों में से एक है। प्रारंभ में, डीआरएक्स तंत्र, यानी, मोबाइल संचार नेटवर्क में एक बिजली-बचत विधि, की स्थिति के आधार पर यूई के लिए दो स्टोकेस्टिक मॉडल, अर्थात् मार्कोव मॉडल और सेमी-मार्कोव मॉडल, बनाए गए हैं। मार्कोव मॉडल के लिए क्षणिक और स्थिर-अवस्था प्रणाली आकार संभावनाओं के लिए स्पष्ट अभिव्यक्तियाँ प्राप्त की जाती हैं। सेमी-मार्कोव मॉडल

के लिए, स्थिर-अवस्था संभावनाओं की गणना की जाती है। इसके अलावा, माध्य और विचरण जैसे प्रदर्शन उपायों की गणना दोनों मॉडलों के लिए की जाती है। इन मॉडलों का उपयोग करके, डीआरएक्स तंत्र की स्थितियों के आधार पर, यूई में ऊर्जा बचत की गणना की जाती है। अंत में, संवेदनशीलता विश्लेषण किया जाता है जिसमें प्राप्त परिणामों की तुलना दोनों मॉडलों के लिए की जाती है।

वायरलेस सेंसर नेटवर्क के बढ़ते प्रचलन के साथ, इन नेटवर्क का निर्बाध संचालन आवश्यक हो जाता है। निरंतर कार्यक्षमता सुनिश्चित करने के लिए, वायरलेस नेटवर्क उपलब्ध बीएस पर भरोसा करते हैं। हालाँकि, बेस स्टेशनों के लगातार संचालन में पर्याप्त ऊर्जा खपत की कीमत चुकानी पड़ती है। नतीजतन, वायरलेस नेटवर्क ट्रैफ़िक में वृद्धि और निर्बाध बेस स्टेशन उपलब्धता की आवश्यकता को देखते हुए, बेस स्टेशन के भीतर ऊर्जा दक्षता एक चिंताजनक मुद्दा बन गया है।

इसे संबोधित करने के लिए, बेस स्टेशन की उपलब्धता को दर्शाने के लिए एक सेमि-मार्कोव मॉडल तैयार किया गया है, जिसमें इसके घटकों (बेसबैंड यूनिट, रिमोट यूनिट और सॉफ्टवेयर मॉड्यूल) की विफलताओं के अनुरूप स्थिति बताई गई है। विश्लेषण से एक स्थिर-स्थिति समाधान प्राप्त होता है, जिसमें व्यक्तिगत बेस स्टेशन घटकों की ऊर्जा खपत के आधार पर प्रत्येक स्टेट को रिवॉर्ड रेट्स प्रदान किए जाते हैं। यह दृष्टिकोण इस मॉडल के भीतर अपेक्षित ऊर्जा खपत का निर्धारण करने में सक्षम बनाता है। इसके अतिरिक्त, बेस स्टेशन के थ्रूपुट का मूल्यांकन सर्वर ब्रेकडाउन के साथ एम/जी/1 कतार मॉडल का उपयोग करके किया जाता है।

इसके अलावा, बेस स्टेशन की स्लीप रणनीति का उपयोग करके बेस स्टेशन में ऊर्जा विश्लेषण के लिए विभिन्न मॉडल विकसित किए गए हैं। बेस स्टेशन में ऊर्जा की खपत को कम करने के लिए ऊर्जा-कुशल 5जी बीएस के लिए कई स्लीप मोड (एसएम) स्तरों के साथ एक स्लीप की रणनीति प्रस्तावित है। ऊर्जा की खपत और सेवा की गुणवत्ता (क्यूओएस) प्रबंधन को सोते हुए बीएस को जागृत करने के परिणामस्वरूप जोड़ा जाता है। एडवांस्ड स्लीप मोड (एएसएम) बेस स्टेशन में ऊर्जा बचत के लिए कुशल तकनीकों में से एक है। वे ऊर्जा बचाने के लिए धीरे-धीरे बीएस घटकों को निष्क्रिय कर देते हैं। घटक संक्रमण समय (निष्क्रियता और सक्रियण) के आधार पर, विभिन्न एसएम स्तरों पर विचार किया जा सकता है। फिर, ऊर्जा खपत और क्यूओएस के बीच एक इष्टतम समझौता प्रस्तुत करने के लिए एसएम के लिए क्यू-लर्निंग आधारित दृष्टिकोण प्रस्तावित है।

इसके अलावा, सिस्टम में आगमन और उपयोगकर्ता अनुरोधों (यूआर) के आधार पर, एसएम के लिए तीन स्टोकेस्टिक मॉडल प्रस्तुत किए जाते हैं, अर्थात् मार्कोव मॉडल, सेमि-मार्कोव मॉडल और मार्कोव रीजनरेटिव प्रोसेस मॉडल। सभी मॉडलों के लिए स्थिर-अवस्था प्रणाली आकार संभावनाओं के लिए बंद-फ़ॉर्म समाधान प्राप्त किए जाते

हैं। इसके अलावा, सभी मॉडलों के लिए बिजली की खपत, बिजली बचत कारक और थ्रूपुट जैसे प्रदर्शन उपायों की गणना की जाती है। अंत में, संवेदनशीलता विश्लेषण प्रस्तुत किया जाता है जिसमें प्राप्त परिणामों की तुलना मॉडलों से की जाती है।

बीएस कवरेज, क्षमता प्रदान करने और विभिन्न संचार मांगों के अनुकूल होने के लिए विविध आवृत्ति बैंड का उपयोग करते हैं। एक विशिष्ट आवृत्ति बैंड का चयन नेटवर्क प्रदर्शन, डेटा दरों, कवरेज दायरे और सिग्नल प्रसार विशेषताओं को प्रभावित कर सकता है। इस विशेष आवृत्ति बैंड को चुनने से, बेस स्टेशन द्वारा संबंधित ऊर्जा खपत होती है। इसका विश्लेषण करते हुए, बेस स्टेशन के लिए स्टोकेस्टिक मॉडल, अर्थात् मार्कोव मॉडल और सेमी-मार्कोव मॉडल पेश किए गए हैं, जिसमें सिस्टम के ट्रैफ़िक के अनुसार आवृत्ति बैंड का चयन शामिल है। इन मॉडलों के लिए स्थिर-अवस्था प्रणाली आकार संभावनाओं के लिए क्लोज्ड -फॉर्म समाधान प्राप्त किए जाते हैं। फिर, विभिन्न परिदृश्यों में बिजली की खपत का मूल्यांकन करने के लिए एक संवेदनशीलता विश्लेषण आयोजित किया जाता है। इसके अलावा, सिस्टम के भीतर बिजली की खपत से संबंधित विश्लेषणात्मक निष्कर्षों और सिमुलेशन परिणामों के बीच तुलना प्रदान की गई है। यह तुलना दर्शाती है कि पद्धतियाँ अभिसरण परिणाम देती हैं, जो पर्याप्त स्तर की सहमति को रेखांकित करती हैं।

Contents

Certificate	i
Acknowledgements	iii
Abstract	v
List of Figures	xiii
List of Tables	xvii
List of Abbreviations	xix
1 Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Motivation and Declaration of Challenges in 5G Networks	3
1.3 Discontinuous Reception Mechanism	4
1.4 Base Station	5
1.5 Stochastic Modelling	8
1.6 Literature Review	14
1.7 Thesis Outline	17
2 Energy Saving for the User Equipment in LTE-A Networks	21
2.1 Introduction	21
2.2 State of Art	23
2.3 Proposed Continuous Time Markov Chain Model	24
2.3.1 Description	26
2.3.2 Transient Analysis	28
2.3.3 Steady-State Analysis	35

2.4	Proposed Semi-Markov Process Model	40
2.4.1	Description	40
2.4.2	Steady-State Analysis	41
2.5	Performance Analysis	47
2.5.1	Markov Model	47
2.5.2	Semi-Markov Model	50
2.6	Numerical Illustration	51
2.7	Conclusion and Future Work	55
3	Energy Analysis considering Availability of the Base Station in 5G Networks	57
3.1	Introduction	57
3.2	State of Art	59
3.3	Proposed Semi-Markov Process Model	62
3.4	Steady-State Analysis	66
3.5	Performance Analysis	67
3.5.1	Throughput	67
3.5.2	Energy Consumption	77
3.6	Numerical Illustration	78
3.7	Conclusion and Future Work	84
4	Energy Optimization for the Base Station in 5G Networks	87
4.1	Introduction	87
4.2	Advanced Sleep Mechanism	90
4.3	Model Description	91
4.4	Q-Learning Approach	94
4.5	Simulation Results	96
4.6	Conclusion and Future Work	98
5	Energy Analysis for the Base Station in 5G Networks	101
5.1	Introduction	101
5.2	State of Art	104
5.3	Description of Advanced Sleep Mechanism	106
5.4	Proposed Continuous Time Markov Chain Model	107
5.5	Proposed Semi-Markov Process Model	112

5.6	Proposed Markov Regenerative Process Model	119
5.7	Performance Measures	131
5.7.1	Power Saving Factor	133
5.7.2	Average Power Consumption	133
5.7.3	Throughput	133
5.8	Numerical Illustration	134
5.9	Conclusion and Future Work	137
6	Energy Efficiency for the Base Station in 5G Networks	139
6.1	Introduction	139
6.2	Description of the Remote Unit Architecture	143
6.3	Proposed Semi-Markov Process Model	147
6.4	Proposed Continuous time Markov Chain Model	156
6.5	Numerical Illustration	157
6.6	Conclusion and Future Work	165
7	Contributions, Limitations and Future Work	167
7.1	Contribution	167
7.1.1	Energy Saving in UE	167
7.1.2	Energy Analysis in the BS	168
7.2	Limitations	168
7.3	Future Work	168
	Bibliography	173
	Curriculum Vitae	187

List of Figures

1.1	Structure of DRX Mechanism	5
1.2	State transition in DRX Mechanism	6
1.3	Components of a Base Station	7
2.1	State transition diagram for the proposed Markov model	27
2.2	State transition diagram for the proposed semi-Markov model	41
2.3	Steady-state probability of working states varying number of packets and short cycles	52
2.4	Steady-state probability of long sleep varying number of packets	52
2.5	Steady-state probability of being in active state varying number of short cycles and packet service rate	53
2.6	Steady-state probability of being in short sleep varying the number of short cycles and the value of α	54
2.7	Steady-state probability of being in long sleep varying the number of short cycles and the value of ν	55
2.8	Energy saving factor varying number of short cycles	55
3.1	State transition diagram for the availability model	65
3.2	Server breakdown model with repair	70
3.3	State transition diagram of the performance model	70
3.4	Upstate probability of system by varying the parameter λ_B	79
3.5	Downstate probability of system by varying the parameter λ_B	80
3.6	Upstate probability of system by varying the parameter λ_R	80
3.7	Downstate probability of system by varying the parameter λ_R	81
3.8	Upstate probability of system by varying the parameter λ_S	82

3.9	Expected power consumption of system by varying the parameters λ_B and μ_B	82
3.10	Expected power consumption of system by varying the parameters λ_R and μ_R	83
3.11	Expected power consumption of system by varying the parameters λ_S and μ_S	83
3.12	Throughput of system by varying the parameters λ_B and μ_B	84
3.13	Throughput of system by varying the parameters λ_R and μ_R	85
4.1	State transition diagram for the proposed model	93
4.2	Tradeoff between average added delay and power consumption varying values of β	98
4.3	Tradeoff between rate and power consumption varying values of α	99
5.1	An overview of ASM in 5G networks	103
5.2	ASM-based proposed model for the BS in 5G system	108
5.3	State transition diagram for the proposed CTMC Model	109
5.4	State transition diagram for the proposed SMP Model	113
5.5	State transition diagram for the proposed MRGP Model	123
5.6	Tradeoff between power consumption and throughput varying values of λ	135
5.7	Tradeoff between power saving factor and throughput varying values of λ	135
5.8	Tradeoff between power consumption and throughput varying values of μ	136
5.9	Tradeoff between power saving factor and throughput varying values of μ	137
5.10	Tradeoff between power saving factor and power consumption varying values of λ	137
5.11	Tradeoff between power saving factor and power consumption varying values of μ	138
6.1	An overview of the architecture of Remote Unit	144
6.2	Flow chart for the proposed model	146
6.3	State transition diagram of the Proposed Model	148
6.4	Comparison of analytical and simulated results with varying parameters values v_4 for sojourn times deterministic distributed	159

6.5	Comparison of analytical and simulated results with varying parameters values v_3 for sojourn times deterministic distributed	160
6.6	Comparison of analytical and simulated results with varying parameters values v_2 for sojourn times deterministic distributed	160
6.7	Comparison of analytical and simulated results with varying parameters values v_1 for sojourn times deterministic distributed	161
6.8	Comparison of analytical and simulated results with varying parameters values v_1 for sojourn times hypo-exponential distributed	161
6.9	Comparison of analytical and simulated results with varying parameters values α_4 for sojourn times hypo-exponential distributed	162
6.10	Comparison of analytical and simulated results with varying parameters values v_2 for CTMC model	162
6.11	Comparison of analytical and simulated results with varying parameters values α_3 for CTMC model	163
6.12	Comparison of analytical and simulated results with varying parameters values v_1 for all the models	164
6.13	Comparison of analytical and simulated results with varying parameters values α_4 for all the models	164

List of Tables

1.1	UE energy consumption values in different periods of the DRX mechanism	4
2.1	Comparison of related publications with proposed work	25
2.2	Distributions of sojourn times in semi-Markov model	40
2.3	Values for energy saving factor by varying number of short cycles	56
3.1	Comparison of related publications with proposed work	62
3.2	Kernel matrix non-zero elements at any time $t > 0$	69
3.3	Expected sojourn times in different states of the proposed model	69
3.4	Reward rate attached with each state	78
3.5	Values of the different parameters	78
4.1	Comparison of related publications with proposed work	90
4.2	Power Consumption in different states	97
4.3	Base station Sleep mode characteristics	97
4.4	Simulation parameter values	97
5.1	Comparison of related publications with proposed work	106
5.2	Cumulative distribution functions for the proposed SMP model	114
5.3	Cumulative distribution functions for the proposed MRGP model	121
5.4	The one-step transition probabilities for the proposed MRGP model . . .	125
5.5	Power consumption values in different modes of the ASM	133
5.6	Expected sojourn times in different states of the proposed model	134
6.1	Comparison of related publications with proposed work	141
6.2	Distributions of sojourn times for different states of the proposed SMP model	148

6.3	Possible distributions taken as general distribution	148
6.4	Power Consumption in different states of the proposed model	158

List of Abbreviations

Symbol	Meaning
<i>ASM</i>	Advanced Sleep Mechanism
<i>AC</i>	Alternating Current
<i>BBU</i>	Base band Unit
<i>BS</i>	Base Station
<i>CTMC</i>	Continuous time Markov Chain
<i>CDF</i>	Cumulative Distribution Function
<i>DC</i>	Direct Current
<i>DCDU</i>	Direct Current Distribution Unit
<i>DRX</i>	Discontinuous Reception
<i>DTX</i>	Discontinuous Transmission
<i>EC</i>	Energy Consumption
<i>EE</i>	Energy Efficiency
<i>EMUA</i>	Environmental Monitoring Unit Type- A
<i>5G</i>	Fifth Generation
<i>4G</i>	Fourth Generation
<i>ICT</i>	Information and communication technology
<i>LTE – A</i>	Long Term Evolution Advanced
<i>MDP</i>	Markov Decision Process
<i>MRGP</i>	Markov Regenerative Process
<i>MTTF</i>	Mean Time to Failure

<i>MNO</i>	Mobile Network Operators
<i>MIMO</i>	Multiple-Input, Multiple-Output
<i>PDF</i>	Probability Density Function
<i>QoS</i>	Quality of Service
<i>RU</i>	Remote Unit
<i>RAN</i>	Radio Access Network
<i>2G</i>	Second Generation
<i>SMP</i>	Semi-Markov Process
<i>SM</i>	Sleep Mode
<i>3G</i>	Third Generation
<i>3GPP</i>	Third Generation Partnership Project
<i>UE</i>	User Equipment
<i>UR</i>	User Request