UPLINK TIMING SYNCHRONIZATION FOR FIFTH GENERATION COMMUNICATION SYSTEMS

ALOK KUMAR SINHA

BHARTI SCHOOL OF TELECOMMUNICATION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
APRIL 2021

©Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2021

UPLINK TIMING SYNCHRONIZATION FOR FIFTH GENERATION COMMUNICATION SYSTEMS

by

ALOK KUMAR SINHA

BHARTI SCHOOL OF TELECOMMUNICATION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

Submitted

in fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

APRIL 2021

Dedicated to

My Parents

Certificate

This is to certify that the thesis entitled **"Uplink Timing Synchronization for Fifth Generation Communication Systems"** being submitted by **Mr. Alok Kumar Sinha** 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 bonafide research work carried out 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 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.

Dr. Saif Khan Mohammed
Associate Professor
Department of Electrical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi, 110016, India

Date:
Place: New Delhi

Acknowledgements

First and foremost, I want to thank my PhD supervisor, Dr. Saif Khan Mohammed, for introducing and guiding me to the world of research. His teaching not only helped me in my research work but also enhanced my insight in several fields. His approach to look at any complex problem from the first principle makes things very easy for someone who is new to research. His vast experience in both academia and industry is quite helpful in shaping a practical research. It was a privilege to do research under his supervision.

I would like to thank my student research committee members, Prof. Shankar Prakriya, Prof. Brejesh Lall, and Prof. Monika Aggarwal for their valuable feedback and suggestions during my end semester presentations. I am grateful to the "Visvesvaraya PhD Scheme for Electronics and IT" of the Ministry of Electronics and Information Technology, Government of India, for the financial support during my research period.

I would like to extend my sincere gratitude to my fellow researchers and friends for their constant support and patience. Their encouragement and care made the journey very pleasant.

I would like to thank the almighty God and my family for their unconditional love and blessings.

Alok Kumar Sinha

Abstract

Fifth generation (5G) wireless communication systems have envisioned a communication utopia where every device and application will be served according to their need. This Herculean dream cannot be realised based on a single technology approach. Therefore the next-generation 5G wireless systems are a collective effort of many technologies such as massive multiple-input multiple-output (MIMO), millimeter wave (mmWave) communication, small cell network (SCN), device-to-device (D2D) communication, machine-to-machine (M2M) communication, etc. Area traffic capacity, network energy efficiency, latency, connection density, etc., are some of the key performance indicators of 5G. On the basis of requirements, the use cases of 5G are broadly classified into massive machine-type communication (mMTC), ultra-reliable and low-latency communication (URLLC) and enhanced mobile broadband (eMBB).

Uplink timing synchronization is the initial step of establishing a communication link between a base station (BS) and a user terminal (UT). For uplink timing synchronization, UTs advance their uplink time by their respective round-trip propagation delays so that the uplink signals from all UTs reach the BS simultaneously. In uplink timing synchronization, the BS estimates the round-trip propagation delay of a UT based on the random access (RA) preambles received from that UT in the uplink. The BS conveys this information back to that UT through random access response (RAR), and subsequently, the UT advances its uplink timing and attains uplink timing synchronization.

The uplink timing synchronization method in fourth generation (4G) long term evolution (LTE) systems is not robust to channel induced Doppler spread and cannot support simultaneous random access requests from a large number of UTs. Hence, the performance of the uplink timing synchronization method in 4G LTE degrades severely in high user density

and high mobility scenarios. Since 5G systems are expected to operate in high user density and high mobility scenarios also, the 4G LTE uplink timing synchronization methods cannot be used in 5G systems. Therefore, in this thesis, we propose uplink timing synchronization methods for 5G systems, which are robust to mobility induced delay spread as well as high user density.

For high user density scenarios in 5G (e.g., mMTC, eMBB), we have proposed a novel uplink timing synchronization method based on massive multiple-input multiple-output (MIMO). In massive MIMO systems, the BS is equipped with a large antenna array and can support multiple UTs in the same time-frequency resource, thereby enhancing connection density and traffic capacity. The RA preamble received at all the BS antenna is averaged so as to reduce the effect of AWGN and fast fading. This spatial averaging enables the successful detection of RA preambles even in scenarios where the same RA preamble is transmitted by more than one UT. It is noted that such collision scenarios will be more probable in high user density scenarios and will result in significant degradation of performance of uplink timing synchronization in 4G LTE systems. Also, the reduction in the effective noise variance makes the proposed method energy efficient. Detecting multiple UT on the same RA preamble and decreasing the preamble transmit power is not possible in 4G LTE. In 4G LTE, the random access response of each detected RA preamble is broadcast on a different downlink resource. As there is limited downlink resource for RAR broadcast, this limitation results in another bottleneck for uplink timing synchronization in 4G LTE. Therefore, in the proposed method we estimate the channel impulse response for each UT from the received RA preamble at the BS. This channel estimate is then used to beamform the RAR for more than one UT on the same downlink resource thereby enabling successful uplink timing synchronization for a large number of UTs in high user density scenarios. Beamforming of the RAR (instead of broadcasting it) also enables significant reduction in the downlink RAR transmission power.

In high mobility scenarios, the channel induced Doppler spread results in performance degradation in 4G LTE due to loss of orthogonality between its subcarriers. In this thesis, for high mobility scenarios we have proposed a novel RA preamble transmission waveform which is based on orthogonal time frequency space (OTFS) modulation. The proposed waveform is designed in the delay Doppler (DD) domain, which makes the estimation of the round-trip propagation delay almost invariant of the channel induced Doppler shift. For a given bandwidth constraint for the RA preamble waveform, we choose the delay domain

width and the number of delay domain sub-divisions in such a manner so as to ensure accurate estimation of the round-trip propagation delay between a cell-edge UT and the BS and also a low peak-to-average power ratio (PAPR) of the RA preamble waveform. In OTFS modulation, the Doppler domain width is the inverse of the delay domain width and the number of Doppler domain sub-divisions is equal to the total time duration of the RA preamble waveform divided by the delay domain width. We study the probability of missed detection of this delay-Doppler domain RA preamble and also propose time-domain windowing of the received RA preambles so as to reduce interference between adjacent RA preambles along the Doppler domain. Our study reveals a trade-off between the number of allowed RA preambles and the Doppler domain width of each RA preamble. A large Doppler domain width of each RA preamble reduces the amount of interference between adjacent RA preambles, but then this also reduces the number of allowed RA preambles which increases the probability of two or more UTs transmitting the same RA preamble. Numerical simulations reveal that in high mobility scenarios, the probability of missed detection of the proposed DD domain RA preamble waveform is significantly smaller than that of the RA preamble waveform in 4G LTE systems.

In this dissertation, we have addressed two important challenges faced by current methods for uplink timing synchronization. We have proposed novel solution to these problems which will help in realizing the vision of 5G.

सार

पांचवीं पीढ़ी (5 जी) बेतार संचार प्रणालियों ने एक संचार आदर्शलोक की कल्पना की है जहां हर उपकरण और एप्लिकेशन को उनकी जरूरत के अनुसार सेवा प्रदान की जायेगी। इस अत्यंत कठिन सपने को एकल प्रौद्योगिकी दृष्टिकोण पर साकार नहीं किया जा सकता। इसलिए अगली पीढ़ी के 5 जी बेतार प्रणालियाँ बड़े पैमाने पर कई तकनीकों का सामूहिक प्रयास हैं जैसे कि मल्टीपल इनपुट मल्टीपल आउटपुट (एमआईएमओ), मिलीमीटर वेव (एमएम वेव) संचार, छोटे सेल नेटवर्क (एससीएन), यंत्र से यंत्र (डीटूडी) संचार, मशीन से मशीन (एमटूएम) संचार, आदि।

क्षेत्र यातायात क्षमता, नेटवर्क ऊर्जा दक्षता, विलंबता, कनेक्शन घनत्व, आदि, कुछ 5 जी के प्रमुख निष्पादन संकेतक हैं। आवश्यकताओं के आधार पर, 5 जी के उपयोग के मामलों को मोटे तौर पर तीन भागों में वर्गीकृत किया गया है जो इस प्रकार हैं - मैसिव मशीन टाइप कम्युनिकेशन (एमएमटीसी), अति-विश्वसनीय और कम विलंबता संचार (युआरएलएलसी) और एन्हांस मोबाइल ब्रॉडबैंड (इएमबीबी)।

अपलिंक टाइम सिंक्रोनाइज़ेशन, बेस स्टेशन (बीएस) और उपयोगकर्ता टर्मिनल (यूटी) के बीच संचार संपर्क स्थापित करने का प्रारंभिक चरण है। अपलिंक टाइम सिंक्रोनाइज़ेशन के लिए, यूटी अपने अपलिंक समय को उनके राउंड-ट्रिप प्रसार में देरी जितना आगे बढ़ाते हैं ताकि सभी यूटी का अपलिंक संकेत एक साथ बीएस तक पहुँच सके। अपलिंक टाइम सिंक्रोनाइज़ेशन मे बीएस हर यूटी के लिये राउंड-ट्रिप प्रसार में देरी का अनुमान लगाता है, जिसकी गणना यूटी से अपलिंक में प्राप्त रैंडम एक्सेस (आरए) प्रियम्बल के आधार पर होती है। बीएस इस जानकारी को रैंडम एक्सेस रीस्पोंस (आरएआर) के माध्यम से वापस उस यूटी तक पहुंचाता है और तत्पश्चात्, यूटी अपनी अपलिंक टाइमिंग को आगे बढ़ाता है और अपलिंक टाइम सिंक्रोनाइज़ेशन प्राप्त करता है।

चौथी पीढ़ी (4 जी) दीर्घकालिक विकास (एलटीई) सिस्टम में अपलिंक टाइम सिंक्रोनाइज़ेशन का तरीका चैनल प्रेरित डॉपलर प्रसार के लिए मजबूत नहीं है और बड़ी संख्या में यूटी से एक साथ पहुँचे रैंडम एक्सेस (आरऐ) अनुरोधों का समर्थन नहीं कर सकता है। इसलिए, 4 जी एलटीई में अपलिंक टाइम सिंक्रोनाइजेशन विधि का प्रदर्शन उच्च उपयोगकर्ता घनत्व और उच्च गतिशीलता परिदृश्यों में गंभीर रूप से कम होता है। चूंकि 5 जी सिस्टम से उच्च उपयोगकर्ता घनत्व और उच्च गतिशीलता परिदृश्यों में भी काम करने की उम्मीद है, इसलिए 5 जी सिस्टम में 4 जी एलटीई अपलिंक टाइम सिंक्रोनाइज़ेशन विधियों का उपयोग नहीं किया जा सकता है। इसलिए, इस थीसिस में, हम 5 जी सिस्टम के लिए अपलिंक टाइम सिंक्रोनाइज़ेशन विधियों का प्रस्ताव करते हैं, जो गतिशीलता प्रेरित देरी के साथ-साथ उच्च उपयोगकर्ता घनत्व के लिए मजबूत हैं।

5 जी में उच्च उपयोगकर्ता घनत्व परिदृश्यों (जैसे, एमएमटीसी, इएमबीबी) के लिए, हमने बड़े पैमाने पर मल्टीपल-इनपुट मल्टीपल-आउटपुट (एमआईएमओ) पर आधारित एक नवीन अपलिंक टाइम सिंक्रोनाइज़ेशन विधि प्रस्तावित की है। मैसिव एमआईएमओ प्रणालियों में, बीएस एक बड़े एंटीना सरणी से लैस है और एक ही समय- फ्रिक्वेन्सी संसाधन में कई युटी का समर्थन कर सकता है, जिससे कनेक्शन घनत्व और यातायात क्षमता बढ़ जाती है। सभी बीएस एंटीना पर प्राप्त आरऐ प्रियम्बलों की औसत होती है ताकि एडब्लूजीएन और फ़ास्ट फेडिंग के प्रभाव को कम किया जा सके। यह स्थानिक औसत, आरऐ प्रियम्बल का सफल पता लगाने में सक्षम बनाता है यहां तक कि उन परिदृश्यों में भी जहां एक ही आरऐ प्रियम्बल एक से अधिक युटी द्वारा प्रसारित की जाती है। यह ध्यान दिया जाता है कि इस तरह के टकराव परिदृश्य उच्च उपयोगकर्ता घनत्व परिदृश्यों में अधिक संभावित होंगे और परिणामस्वरूप 4 जी एलटीई सिस्टम में अपलिंक टाइम सिंक्रोनाइज़ेशन के प्रदर्शन में महत्वपूर्ण गिरावट आएगी। इसके अलावा, प्रभावी नॉइज़ वैरिएन्स में कमी प्रस्तावित विधि को

ऊर्जा कुशल बनाती है। एक ही आरए प्रियम्बल पर कई यूटी का पता लगाना और प्रस्तावना संचारित शक्ति को कम करना 4 जी एलटीई में संभव नहीं है। 4 जी एलटीई में, प्रत्येक आरए प्रस्तावना का रैंडम एक्सेस प्रतिक्रिया(आरएआर) एक अलग डाउनलिंक संसाधन पर प्रसारित होती है। चूंकि आरएआर प्रसारण के लिए सीमित डाउनलिंक संसाधन है, इसलिए यह सीमा 4 जी एलटीई में अपलिंक टाइम सिंक्रोनाइज़ेशन के लिए एक और अड़चन है। इसलिए, प्रस्तावित विधि में, बीएस में प्राप्त आरए प्रियम्बल से प्रत्येक यूटी के लिए हम चैनल इम्पल्स रिस्पांस का अनुमान लगाते हैं । इस चैनल का अनुमान तब एक ही डाउनलिंक संसाधन पर एक से अधिक यूटी के लिए आरएआर को बीमफॉर्म करने के लिए उपयोग किया जाता है, जिससे उच्च उपयोगकर्ता घनत्व परिदृश्यों में बड़ी संख्या में यूटी के लिए सफल अपलिंक टाइम सिंक्रनाइज़ेशन सक्षम होता है। आरएआर की बीमफॉर्मिंग (इसे प्रसारित करने के बजाय) डाउनलिंक आरएआर ट्रांसमिशन पावर में महत्वपूर्ण कमी को भी सक्षम बनाता है ।

उच्च गतिशीलता परिदृश्यों में, चैनल द्वारा प्रेरित किया गया डॉपलर फैलाव के कारण सबकैरीएर के बीच ओर्थोगोनालिटी के नुकसान के कारण 4 जी एलटीई के प्रदर्शन में गिरावट आती है । इस थीसिस में, उच्च गतिशीलता परिदृश्यों के लिए हमने एक नवीन आरए प्रियम्बल संचारण तरंग का प्रस्ताव दिया है जो ऑर्थोगोनल टाइम फ्रिक्वेन्सी स्पेस (ओटीएफएस) मॉडुलेशन पर आधारित है। प्रस्तावित तरंग को डिले डॉपलर (डीडी) डोमेन में डिज़ाइन किया गया है, जहाँ राउंड-ट्रिप प्रसार देरी का अनुमान चैनल प्रेरित डॉपलर शिफ्ट के लगभग अपरिवर्तनीय होता है। आरए प्रियम्बल तरंग के लिए किसी दिए गए बैंडविड्थ अवरोध के लिए, हम डिले डोमेन की चौड़ाई और उप-विभाजन की संख्या को इस तरह से चुनते हैं ताकि सेल-एज पे स्थित यूटी के राउंड ट्रिप प्रसार देरी के सटीक अनुमान को सुनिश्चित किया जा सके, तथा आरए प्रियम्बल तरंग का शिखर-से-औसत शक्ति अनुपात (पिऐपिआर) कम हो । ओटीएफएस मॉड्यूलेशन में, डॉपलर डोमेन कि चौड़ाई डिले डोमेन कि चौड़ाई के उलटा होती है और डॉपलर डोमेन के उप- विभाजन की संख्या डिले डोमेन कि चौड़ाई द्वारा विभाजित आरए प्रस्तावनीय तरंग की कुल समय अवधि के बराबर है। हम इस डिले-डॉपलर डोमेन आरए प्रियम्बल के मिस्ड डिटेक्शन की संभावना का अध्ययन करते हैं और टाइम-डोमेन विंडोइंग का भी प्रस्ताव करते हैं ताकि डॉपलर डोमेन मे आस-पास के आरए पर्बल्स के बीच के हस्तक्षेप को कम किया जा सके । हमारे अध्ययन से आरए प्रियम्बल की संख्या और प्रत्येक आरए प्रियम्बल के डॉपलर डोमेन की चौड़ाई के बीच एक समझौताकारी समन्वय का पता चलता है। प्रत्येक आरए प्रियम्बल की एक बड़ी डॉपलर डोमेन चौड़ाई आरए प्रियम्बलो के बीच हस्तक्षेप की मात्रा को कम करती है, लेकिन फिर यह अनुमत आरए प्रियम्बलो की संख्या को भी कम कर देती है जिसके कारण एक ही आरए प्रियम्बल को प्रसारित करने वाले दो या अधिक यूटी की संभावना बढ़ती है । संख्यात्मक सिमुलेशन से पता चलता है कि उच्च गतिशीलता परिदृश्यों में, प्रस्तावित डीडी डोमेन आरए प्रियम्बल तरंग के मिस्ड डिटेक्शन की संभावना 4 जी एलटीई सिस्टम में आरए प्रियम्बल तरंग की तुलना में काफी कम है ।

इस शोध प्रबंध में, हमने अपलिंक टाइम सिंक्रोनाइज़ेशन के लिए वर्तमान विधियों द्वारा सामना की जाने वाली दो महत्वपूर्ण चुनौतियों का समाधान किया है। हमने इन समस्याओं के लिए नवीन समाधान का प्रस्ताव दिया है जो 5 जी की दृष्टि को साकार करने में मदद करेगा ।

Table of Contents

Certificate **i**

Acknowledgements **ii**

Abstract **iii**

List of Figures **ix**

List of Tables **xii**

List of Abbreviations **xiii**

1 Introduction **1**

1.1 5G: Aspirations and Goals 3

1.2 Uplink Timing Synchronization 4

1.3 Uplink Timing Synchronization for 5G 7

1.3.1 High User Density Scenario 7

1.3.2 High Mobility Scenario 8

1.4 Research Objectives and Scope of Work 9
1.5 Organization of the Thesis 11

2 Estimation of Timing Advance and Beamforming of Random Access Response in Crowded TDD Massive MIMO Systems 12

2.1 System Model 15
2.2 Proposed Uplink Timing Estimation 15
2.2.1 Random Access Preamble Transmission and Processing 16
2.2.2 Spatial Averaging at Base Station 19
2.2.3 Proposed Method for Timing Advance Estimation 23
2.3 Downlink Beamforming for RAR Transmission 29
2.3.1 Channel Estimation for the Detected UT Groups 30
2.3.2 Proposed Method for RAR Transmission 32
2.3.3 Automatic Contention Resolution 38
2.3.4 SINR Analysis 39
2.4 Numerical Analysis 45
2.4.1 Design & Transmission of RAR 46
2.4.2 Density and Distribution of UT 46
2.4.3 Results & Discussions 47
2.5 Conclusion 49

2.6 Future Work 51

3 Random Access Preamble Transmission for High Mobility Scenarios using OTFS 53

3.1 System Model & OTFS Modulation 56

3.2 Proposed OTFS Based RA Preamble Transmission and Timing Advance (TA) Estimation 63

3.2.1 Single UT Scenario 74

3.2.2 Multi-UT scenario 75

3.3 Selection of Design Parameters for the Proposed OTFS Based RA Waveform 80

3.4 Numerical Results 83

3.5 Conclusion 88

3.6 Future Work 90

Bibliography 90

Appendices 96

A Proofs for Chapter 2 97

A.1 Proof for Proposition 2.1 97

A.2 Proof for Proposition 2.2 98

A.3 Proof of Proposition 2.3 98

B Proofs for Chapter 3 **100**

B.1 Proof of Theorem 3.1 100

B.2 Proof of Theorem 3.2 101

B.3 Proof of Corollary 3.1 103

List of Publications **105**

Technical Biography of Author **107**

List of Figures

1.1 Evolution of cellular communication. 1

1.2 Requirements of 5G [7]. 2

1.3 Usage scenarios for 5G 3

1.4 Cell with one BS and two UTs 5

1.5 Uplink (UL) and downlink (DL) without uplink timing synchronization. . . . 6

1.6 Uplink (UL) and downlink (DL) with uplink timing synchronization. 6

1.7 RA preamble collision in high user density scenario. 8

1.8 Doppler induced ICI in OFDM system. 9

2.1 Massive MIMO system with M-antenna BS and K single-antenna UTs. . . . 16

2.2 Variation of P_F as a function of increasing number of BS antennas M, with $\frac{\mu}{\sigma^2} = \frac{\kappa}{\sqrt{M}}$ (fixed $\kappa = 5, 8$), $N_{\text{ZC}} = 864$, $G = 50$ and $\frac{p_{\text{u}}}{\sigma^2} = \frac{0.0632}{\sqrt{M}}$. 23

2.3 Variation of P_D as a function of increasing number of BS antennas M, with $\frac{\mu}{\sigma^2} = \frac{\kappa}{\sqrt{M}}$ (fixed $\kappa = 5, 8$), $N_{\text{ZC}} = 864$, $G = 50$ and $\frac{p_{\text{u}}}{\sigma^2} = \frac{0.0632}{\sqrt{M}}$. 24

2.4 Proposed UT grouping and timing advance estimation for the k-th RA preamble 25

2.5 Variation in the percentage of UTs with incorrect TA estimate as a function of average number of simultaneous RA requests. 28

2.6 Proposed UT group clustering for RAR beamforming. 33

2.7 Average Rx. SINR at different UTs in the first UT group of Fig. 2.4. 37

2.8 Variation of $\text{SINR}_{g1}[1]$ as a function of increasing M, with $P_T \propto \frac{1}{\sqrt{M}}$, $p_{\text{u}} \propto \frac{1}{\sqrt{M}}$. 44

2.9 The Empirical pdf of the instantaneous received SINR for both low ($K_g = 2$) and high ($K_g = 10$) UT density scenarios ($L = 5$, $N_{\text{ZC}} = 864$, $N_{\text{RS}} = 72$ and $N_{\text{SC}} = 39$). 45

2.10 The average number of repeat RA attempts as a function of increasing number of simultaneous RA requests, for $M = 20$, 80 and 160. 48

2.11 The Prob. of RA failure (number of repeat RA attempts > 5) versus the number of BS antennas, M, for a fixed average number of simultaneous RA requests = 25 in a 10 ms frame. 49

3.1 Illustration of the proposed RA preambles in the DD domain. $T = 16.66\mu s$, $\Delta f = 1/T = 60$ kHz, $M = 18$, $N = 96, N_1 = 5$. $\mathcal{R}_q, q = 0, 1, \cdots, 18$ are the DDRE groups corresponding to the 19 RA preambles. $\mathcal{R}_q$ and $\mathcal{R}_{q-1}$ are adjacent DDRE groups. 55

3.2 Information Tx. by two UTs in the DD domain in the absence of uplink timing synchronization. 60

3.3 Information Rx. at the BS in the DD domain in the absence of uplink timing synchronization. 61

3.4 Information Tx. by two UTs in the DD domain with uplink timing synchronization. 62

3.5 Information Rx. at the BS in the DD domain with uplink timing synchronization. 63

3.6 Proposed Random Access Channel (RACH) subframe based on OTFS modulation. 64

3.7 Normalized $|\widehat{x}[k, l = 8]|^2$ versus k. 79

3.8 Lower bound to the timing error probability (TEP) (R.H.S. of (3.38)) versus cell radius. 82

3.9 Timing Error Probability (TEP) of the proposed OTFS based RA and that of 4G LTE RA vs. SNR ρ for $\lambda = 0.25, 0.5, 1.0, 2.0$ calls/sec/sq. Km. $B_c = 1.08$ MHz, $T_c = 1.6$ ms, $P_{FA} = 1 \times 10^{-2}$, $\nu_{max} = 300$ Hz. 84

3.10 Timing Error Probability (TEP) of the proposed OTFS based RA and that of 4G LTE RA vs. SNR ρ for RA call rate spatial density $\lambda = 1.0$ call/sec/sq. km. $B_c = 1.08$ MHz, $T_c = 1.6$ ms, $P_{FA} = 1 \times 10^{-2}$, $\nu_{max} = 0, 300, 600, 1200$ Hz. 85

List of Tables

2.1 Minimum required $\frac{p_u}{\sigma^2}$ to achieve a required probability of TA estimation error $P_e = 10^{-2}$ and probability of false alarm $P_F = 10^{-3}$, with increasing base station antenna M. 22

3.1 Timing Error Probability (TEP) vs. (N_1, ν_{max}), $\lambda = 1$ call/sec/sq. Km, $\rho = -5$ dB. 86

3.2 Timing Error Probability (TEP) of the proposed OTFS based RA vs. (P_{FA}, ν_{max}), $\lambda = 1$ call/sec/sq. Km, $\rho = -5$ dB. 86

Glossary

3GPP	Third Generation Partnership Project
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BS	Base Station
CIR	Channel Impulse Response
CP	Cyclic Prefix
CRC	Cyclic Redundancy Check
D2D	Device-to-Device
DD	Delay-Doppler
DDRE	Delay-Doppler Resource Element
DL	Downlink
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
ESPRIT	Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariant Techniques
ETU	Extended Typical Urban
FSTD	Frequency Switched Transmit Diversity
GB	Guard Band
GSM	Groupe Spécial Mobile
i.i.d.	Independent and Identically Distributed
ICI	Inter-Carrier Interference
IMT	International Mobile Telecommunications
IoT	Internet of Things
LS	Least Squares
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine-to-Machine

MAI	Multiple Access Interference
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
mMTC	Massive Machine Type Communications
mmWave	Millimeter Wave
MUI	Multi-User Interference
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OTFS	Orthogonal Time Frequency Space
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PDC	Personal Digital Cellular
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDP	Power Delay Profile
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
R.H.S.	Right-Hand Side
RA	Random Access
RAR	Random Access Response
SCN	Small Cell Networks
SUCR	Strongest User Collision Resolution
SFBC	Space Frequency Block Coding
SINR	Signal-to-Interference plus Noise Ratio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TACS	Total Access Communication System
TDD	Time-Division Duplex
TEP	Timing Error Probability
TF	Time-Frequency
TFRE	Time-Frequency Resource Element
UL	Uplink
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications
UT	User Terminal
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access
ZC	Zadoff-Chu