

# DESIGN AND PERFORMANCE EVALUATION OF SPACE MODULATION TECHNIQUES

UGRASEN SINGH



BHARTI SCHOOL OF TELECOMMUNICATION  
TECHNOLOGY AND MANAGEMENT  
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI  
AUGUST 2022



© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2022



# DESIGN AND PERFORMANCE EVALUATION OF SPACE MODULATION TECHNIQUES

by

UGRASEN SINGH

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  
AUGUST 2022



# Certificate

This is to certify that the thesis entitled "**Design and Performance Evaluation of Space Modulation Techniques**" being submitted by **Mr. Ugrasen Singh** 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 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.

Date:  
New Delhi

(Prof. Manav Bhatnagar)

Professor

Bharti School of Telecom. Tech. & Mgmt.

Indian Institute of Technology Delhi



# Acknowledgements

I would first like to thank my supervisor **Prof. Manav Bhatnagar** for his expert guidance, constant support, and immense encouragement throughout my Ph.D. program. His invaluable suggestions and insightful discussions made me enjoy my research. Also, his enormous enthusiasm, honest dedication, and the quest for knowledge are truly inspirational. He stood there for me in my most difficult times and was always there to help whenever I needed it. My sincere appreciation also extends to Prof. Brejesh Lall, Prof. Seshan Srirangarajan, and Prof. Monika Aggarwal for their beneficial feedback and suggestions during my work.

I acknowledge my colleagues for helping me in various phases of my research work through numerous discussions and valuable inputs. I also thank my friends for sharing my joys and sorrows, and the amazing time I spent with them. Without their help, I would have faced many difficulties in continuing my Ph.D. program.

Most importantly, I am indebted to my parents for supporting me to do Ph.D., consistently being there with me at every phase, and understanding me in every situation. Whatever I have achieved so far, I owe it to their sacrifices. I am grateful to have a supportive supervisor and considerate parents. I feel blessed for their unconditional care and concern.

Ugrasen Singh



# Abstract

The demands for high data rate services and applications in wireless communication have been growing exponentially for decades. To meet these demands of users, multi-input multiple-output (MIMO) wireless systems have been introduced. Space modulation technique (SMT) is a lately developed transmission scheme for the MIMO systems. All transmission schemes introduced in this thesis are based on the SMT principle. Further, the main idea of SMT is to exploit the space as an additional modulation dimension to convey the data. The principle state-of-the-arts of SMT are space shift keying (SSK) and spatial modulation (SM). Furthermore, since SMT requires a single radio frequency (RF) chain to transmit information, it thus reduces the system design complexity and improve the energy efficiency (EE).

The study begins with the spatial constellation design and performance analysis of the SSK modulation with limited-feedback. In SSK, antenna index (AI) is denoted by the spatial constellation symbol. The bit-to-spatial mapping of spatial constellation symbols is adapted according to the partial channel state information (CSI) of the fading channels. More specifically, transmitter (Tx) does not receive perfect information of channel gain, but it is aware about the channel gain ordering. Based on the received partial CSI, Tx adapts the spatial constellation mapping and allocates transmit power weights to each transmit antenna (TA). Furthermore, the power adapted spatial constellation symbols are encoded by using gray coding scheme, which results in unit Hamming distance between adjacent spatial constellation symbols. In addition, maximum-likelihood (ML)-detector exploits to detect an active TA index of the multiple-input single-output (MISO) system. Accurate expressions for the average bit error rate (ABER) for  $2 \times 1$  and  $4 \times 1$  MISO systems over Rayleigh fading channel are

derived. Further, an approximate expression for the ABER of a generalized MISO system is also obtained. It is shown analytically that the ABER performance of the proposed SSK scheme can be improved by applying a non-uniform power allocation (PA) to make transmit links more distinguishable at the receiver (Rx). Moreover, we demonstrate analytically that the proposed scheme attains a diversity order which is twice of the conventional SSK scheme.

We then venture into the area of physical layer security (PLS) analysis for SSK-MISO system. The bit-to-spatial mapping of the spatial constellation symbols is adapted according to the partial CSI of the legitimate channel at Tx. Further, Tx also adapts transmit PA weights to each TA according to the partial CSI. Since an eavesdropper (Eve) is not (usually) aware of the legitimate CSI, it cannot successfully decode the AI; thus, transmission over the legitimate channel is secured from the wiretapping of Eve. An important virtue of the proposed scheme is that the Tx does not require full CSI of the legitimate and eavesdropper channels to secure the confidential information. The proposed work focuses on the secrecy rate (SR), secrecy outage probability (SOP), and ABER of the considered MISO system over Rayleigh fading channels. Approximate expressions of Bob's data rate for 2-ary and 4-ary SSK modulations are derived in the closed-form. Furthermore, an upper-bound of Bob's data rate for  $N_a$ -ary SSK modulation is also derived. In order to obtain the SR of the proposed scheme, we also evaluate Eve's data rate. Analytical results of SR, SOP, and ABER demonstrate the robustness of the proposed scheme.

Further, we extend our work on PLS to SM-MIMO system, where mapping of the spatial constellation and signal constellation are adapted. In SM-MIMO system, partial CSI of the legitimate channel is exploited by Tx to dynamically adapt the spatial and signal constellations mapping patterns. Thus, Eve cannot successfully decode the confidential information over the wiretap channel, since it does not aware of the spatial and signal constellation mapping rules. Further, an important virtue of the proposed transmission scheme that the Tx does not need to know the full CSI of Eve and legitimate channels. To demonstrate the security guaranteed by the proposed scheme, ABER, SR, and SOP are evaluated.

Apart from this, we present a spectral efficiency (SE) enhancing scheme for a single RF chain MIMO system. We present a quadrature spatial modulation-assisted full-duplex (QSM-FD) communication scheme for the MIMO systems, where transmit and receive antennas are co-located at each node. These antennas can be utilized as either transmit or receive antennas for a symbol duration, which implies that the proposed QSM-FD scheme is implemented with half-duplex (HD) antennas. An adaptive analog self-interference (SI) cancellation model is presented to reduce the SI to a desirable level. An ML-detector is employed that is subject to the residual SI. An upper bound of the ABER for the proposed scheme is also derived. Furthermore, we provide the analytical framework of the ergodic capacity (EC), system throughput, and ergodic spectral efficiency for the proposed QSM-FD scheme.

Finally, the idea of smart propagation environment is introduced, where modulated information carrying signal intentionally modified on the propagation medium to improve the system performance. We present a reconfigurable intelligent surface (RIS)-assisted SSK modulation and reflection phase modulation (RPM) scheme, where RIS embeds its own information in the reflection phase shift of the reflected RF signal. More specifically, the RIS simultaneously performs two tasks: i) reflecting the impinging RF signal with a discrete phase shift and ii) embedding the information bits in the phase shift. We perform joint detection for the RPM and SSK symbols using an ML-detector, and a unified analytical framework is presented for theoretical analysis of the ABER and EC of the proposed scheme. All numerical results are thoroughly verified through the Monte Carlo simulation. Numerical results reveal that the proposed scheme outperforms the conventional SSK scheme.



## सारांश

वायरलेस संचार में उच्च डेटा दर सेवाओं और अनुप्रयोगों की मांग दशकों से तेजी से बढ़ रही है। उपयोगकर्ताओं की इन मांगों को पूरा करने के लिए, बहु-इनपुट बहु-आउटपुट (MIMO) वायरलेस सिस्टम पेश किए गए हैं। स्पेस मॉड्यूलेशन तकनीक (एसएमटी) एमआईएमओ सिस्टम के लिए हाल ही में विकसित ट्रांसमिशन स्कीम है। इस थीसिस में प्रस्तुत सभी ट्रांसमिशन योजनाएं एसएमटी सिद्धांत पर आधारित हैं। इसके अलावा, एसएमटी का मुख्य विचार डेटा को संप्रेषित करने के लिए एक अतिरिक्त मॉड्यूलेशन आयाम के रूप में अंतरिक्ष का दोहन करना है। एसएमटी की प्रमुख तकनीकें स्पेस शिफ्ट कीडिंग (एसएसके) और स्थानिक मॉड्यूलन (एसएम) हैं। इसके अलावा, चूंकि एसएमटी को सूचना प्रसारित करने के लिए एकल रेडियो फ्रीक्वेंसी (आरएफ) श्रृंखला की आवश्यकता होती है, इसलिए यह सिस्टम डिजाइन जटिलता को कम करता है और ऊर्जा दक्षता (ईई) में सुधार करता है।

अध्ययन सीमित फीडबैक के साथ एसएसके मॉड्यूलेशन के स्थानिक नक्षत्र डिजाइन और प्रदर्शन विश्लेषण के साथ शुरू होता है। एसएसके में, एंटीना इंडेक्स (एआई) को स्थानिक नक्षत्र प्रतीक द्वारा दर्शाया जाता है। स्थानिक नक्षत्र प्रतीकों का बिट-टू-स्थानिक मानचित्रण लुप्त होती चैनलों की आंशिक चैनल स्थिति सूचना (सीएसआई) के अनुसार अनुकूलित किया जाता है। अधिक विशेष रूप से, ट्रांसमीटर (टीएक्स) को चैनल लाभ की सही जानकारी नहीं मिलती है, लेकिन यह चैनल लाभ आदेश के बारे में जानता है। प्राप्त आंशिक सीएसआई के आधार पर, टीएक्स स्थानिक नक्षत्र मानचित्रण को अनुकूलित करता है और प्रत्येक ट्रांसमिट एंटेना (टीए) को ट्रांसमिट पावर वेट आवंटित करता है। इसके अलावा, शक्ति-अनुकूलित स्थानिक नक्षत्र प्रतीकों को एक ग्रे कोडिंग योजना का उपयोग करके एन्कोड किया जाता है, जिसके परिणामस्वरूप आसन्न स्थानिक नक्षत्र प्रतीकों के बीच इकाई हैमिंग दूरी होती है। इसके अलावा, मल्टीपल-इनपुट सिंगल-आउटपुट (MISO) सिस्टम के एक सक्रिय TA इंडेक्स का पता लगाने के लिए अधिकतम-संभावना (ML) -डिटेक्टर शोषण करता है। रेले फेडिंग चैनल पर 2X1 और 4X1 MISO सिस्टम के लिए औसत बिट त्रुटि दर (ABER) के लिए सटीक अभिव्यक्तियाँ प्राप्त की जाती हैं। इसके अलावा, सामान्यीकृत MISO प्रणाली के ABER के लिए एक अनुमानित व्यंजक भी प्राप्त किया जाता है। यह विश्लेषणात्मक रूप से दिखाया गया है कि प्रस्तावित एसएसके योजना के एबीईआर प्रदर्शन को गैर-समान बिजली आवंटन (पीए) लागू करके रिसीवर (आरएक्स)

पर ट्रांसमिट लिंक को और अधिक विशिष्ट बनाने के लिए सुधार किया जा सकता है। इसके अलावा, हम विश्लेषणात्मक रूप से प्रदर्शित करते हैं कि प्रस्तावित योजना एक विविधता क्रम प्राप्त करती है जो पारंपरिक एसएसके योजना से दोगुना है।

फिर हम SSK-MISO प्रणाली के लिए भौतिक परत सुरक्षा (PLS) विश्लेषण के क्षेत्र में उद्यम करते हैं। स्थानिक तारामंडल प्रतीकों का बिट-टू-स्थानिक मानचित्रण Tx पर वैध चैनल के आंशिक CSI के अनुसार अनुकूलित किया गया है। इसके अलावा, Tx भी आंशिक CSI के अनुसार प्रत्येक TA को PA भार संचारित करता है। चूंकि एक छिपकर बात करने वाला (ईव) वैध सीएसआई के बारे में (आमतौर पर) अवगत नहीं है, यह एआई को सफलतापूर्वक डिकोड नहीं कर सकता है; इस प्रकार, वैध चैनल पर प्रसारण ईव के वायरटैपिंग से सुरक्षित है। प्रस्तावित योजना का एक महत्वपूर्ण गुण यह है कि गोपनीय जानकारी को सुरक्षित करने के लिए Tx को वैध और छिपकर बात कहने वाले चैनलों के पूर्ण CSI की आवश्यकता नहीं है। प्रस्तावित कार्य गोपनीयता दर (एसआर), गोपनीयता आउटटेज संभाव्यता (एसओपी), और रेले फिंडिंग चैनलों पर माना एमआईएसओ प्रणाली के एबीईआर पर केंद्रित है। 2X1 और 4X1 SSK के लिए Bob की डेटा दर का अनुमानित व्यंजक मॉड्यूलन बंद रूप में व्युत्पन्न होते हैं। इसके अलावा, NaX1 SSK मॉड्यूलन के लिए बॉब की डेटा दर की ऊपरी सीमा भी निकाली गई है। प्रस्तावित योजना का एसआर प्राप्त करने के लिए, हम ईव की डेटा दर का भी मूल्यांकन करते हैं। एसआर, एसओपी और एबीईआर के विश्लेषणात्मक परिणाम प्रस्तावित योजना की मजबूती को प्रदर्शित करते हैं।

इसके अलावा, हम पीएलएस पर अपने काम को एसएम-एमआईएमओ सिस्टम तक बढ़ाते हैं, जहां स्थानिक नक्षत्र और सिग्नल नक्षत्र के मानचित्रण को अनुकूलित किया जाता है। SM-MIMO प्रणाली में, वैध चैनल के आंशिक CSI का उपयोग Tx द्वारा स्थानिक और सिग्नल तारामंडल मानचित्रण पैटर्न को गतिशील रूप से अनुकूलित करने के लिए किया जाता है। इस प्रकार, ईव वायरटैप चैनल पर गोपनीय जानकारी को सफलतापूर्वक डिकोड नहीं कर सकता, क्योंकि उसे स्थानिक और सिग्नल नक्षत्र मानचित्रण नियमों की जानकारी नहीं है। इसके अलावा, प्रस्तावित ट्रांसमिशन योजना का एक महत्वपूर्ण गुण यह है कि टीएक्स को ईव और वैध चैनलों के पूर्ण सीएसआई को जानने की आवश्यकता नहीं है। प्रस्तावित योजना द्वारा गारंटीकृत सुरक्षा को प्रदर्शित करने के लिए, ABER, SR और SOP का मूल्यांकन किया जाता है।

इसके अलावा, हम एकल आरएफ श्रृंखला एमआईएमओ प्रणाली के लिए एक वर्णक्रमीय दक्षता (एसई) बढ़ाने वाली योजना प्रस्तुत करते हैं। हम एमआईएमओ सिस्टम के लिए एक चतुर्भुज स्थानिक मॉडलन-सहायता पूर्ण-द्वैध (क्यूएसएम-एफडी) संचार योजना प्रस्तुत करते हैं, जहां संचारण और प्राप्त एंटेना प्रत्येक नोड पर सह-स्थित होते हैं। इन एंटेना का उपयोग या तो एक प्रतीक अवधि के लिए एंटेना संचारित या प्राप्त करने के रूप में किया जा सकता है, जिसका अर्थ है कि प्रस्तावित क्यूएसएम-एफडी योजना आधे-द्वैध (एचडी) एंटेना के साथ लागू की गई है। एसआई को वांछनीय स्तर तक कम करने के लिए एक अनुकूली एनालॉग स्व-हस्तक्षेप (एसआई) रद्दीकरण मॉडल प्रस्तुत किया गया है। एक एमएल-डिटेक्टर कार्यरत है जो अवशिष्ट एसआई के अधीन है। प्रस्तावित योजना के लिए ABER की ऊपरी सीमा भी निकाली गई है। इसके अलावा, हम प्रस्तावित क्यूएसएम-एफडी योजना के लिए एर्गोडिक क्षमता (ईसी), सिस्टम थ्रूपुट, और एर्गोडिक स्पेक्ट्रल दक्षता का विश्लेषणात्मक ढांचा प्रदान करते हैं।

अंत में, एक स्मार्ट प्रचार वातावरण का विचार पेश किया गया है, जहां सिस्टम के प्रदर्शन को बेहतर बनाने के लिए प्रचार माध्यम पर जानबूझकर संशोधित सूचना-वाहक संकेत को संशोधित किया गया है। हम एक पुनः कॉन्फ़िगर करने योग्य बुद्धिमान सतह (आरआईएस)-सहायक एसएसके मॉड्यूलेशन और प्रतिबिंब चरण मॉड्यूलेशन (आरपीएम) योजना प्रस्तुत करते हैं, जहां आरआईएस प्रतिबिंबित आरएफ सिग्नल के प्रतिबिंब चरण बदलाव में अपनी जानकारी एम्बेड करता है। अधिक विशेष रूप से, आरआईएस एक साथ दो कार्य करता है: i) असतत चरण बदलाव के साथ आरएफ सिग्नल को प्रतिबिंबित करना और ii) चरण बदलाव में सूचना बिट्स को एम्बेड करना। हम एमएल डिटेक्टर का उपयोग करके आरपीएम और एसएसके प्रतीकों के लिए संयुक्त पहचान करते हैं, और प्रस्तावित योजना के एबीईआर और ईसी के सैद्धांतिक विश्लेषण के लिए एक एकीकृत विश्लेषणात्मक ढांचा प्रस्तुत किया जाता है। मॉंटे कार्लो सिमुलेशन के माध्यम से सभी संख्यात्मक परिणामों को अच्छी तरह से सत्यापित किया जाता है। संख्यात्मक परिणामों से पता चलता है कि प्रस्तावित योजना पारंपरिक एसएसके योजना से बेहतर प्रदर्शन करती है।



# Table of Contents

<b>Certificate</b>	<b>i</b>
<b>Acknowledgements</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>List of Figures</b>	<b>xii</b>
<b>List of Tables</b>	<b>xiii</b>
<b>Abbreviations</b>	<b>xiv</b>
<b>Notation</b>	<b>xvi</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Single Antenna Communication System . . . . .	2
1.2 Multiple Antenna Communication System . . . . .	3
1.2.1 Beamforming . . . . .	6
1.2.2 Space-Time Coding . . . . .	6
1.2.3 Spatial Multiplexing . . . . .	7
1.2.4 Disadvantages of MIMO System . . . . .	8
1.3 Space Modulation Technique . . . . .	9
1.3.1 Spatial Modulation . . . . .	9
1.3.2 Space Shift Keying . . . . .	11
1.4 Literature Review . . . . .	12
1.4.1 Spatial Modulation . . . . .	12

1.4.2	Space Shift Keying . . . . .	16
1.5	Motivation . . . . .	17
1.6	Thesis Contribution . . . . .	19
1.7	Outline of Thesis . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Limited Feedback-Based SSK Modulation</b>	<b>24</b>
2.1	Introduction . . . . .	24
2.2	Preliminaries . . . . .	27
2.2.1	System Model . . . . .	27
2.2.2	Bit Error Probability . . . . .	29
2.3	Proposed Limited Feedback-Based SSK Scheme . . . . .	30
2.3.1	Problems with the Conventional SSK Scheme . . . . .	30
2.3.2	Proposed SSK Scheme . . . . .	32
2.4	Performance Analysis . . . . .	37
2.4.1	Error Rate Analysis of $N_t \times 1$ MISO System . . . . .	44
2.4.2	Diversity Order Analysis . . . . .	45
2.4.3	Design Criteria for $\alpha$ . . . . .	46
2.5	Numerical Results and Discussion . . . . .	47
2.6	Summary . . . . .	56
<b>3</b>	<b>Secrecy Analysis for Adaptive SSK Modulation</b>	<b>57</b>
3.1	Introduction . . . . .	57
3.2	System Model . . . . .	60
3.3	Partial CSI-Based Adaptive Antenna Mapping . . . . .	61
3.4	Secrecy Rate Analysis . . . . .	65
3.4.1	Mutual Information Analysis . . . . .	65
3.4.2	Secrecy Rate Analysis . . . . .	67
3.4.3	Bit Error Rate . . . . .	80
3.4.4	Asymptotic Secrecy Rate Analysis . . . . .	81
3.4.5	Secrecy Outage Probability . . . . .	81
3.5	Numerical Results and Discussion . . . . .	82

3.6	Summary . . . . .	90
<b>4</b>	<b>Secrecy Enhancing Scheme for Spatial Modulation</b>	<b>91</b>
4.1	Introduction . . . . .	91
4.2	System Model . . . . .	93
4.3	Proposed Transmission Scheme . . . . .	94
4.4	Performance Analysis . . . . .	99
4.4.1	Secrecy Rate Analysis . . . . .	99
4.4.2	Bit Error Rate Analysis . . . . .	102
4.4.3	Secrecy Outage Probability . . . . .	103
4.5	Numerical Results and Discussion . . . . .	103
4.6	Summary . . . . .	106
<b>5</b>	<b>QSM-assisted Full-Duplex Communication</b>	<b>107</b>
5.1	Introduction . . . . .	107
5.2	System Model . . . . .	109
5.3	Performance Analysis . . . . .	111
5.3.1	Average Bit Error Rate . . . . .	111
5.3.2	Ergodic Capacity . . . . .	113
5.3.3	System Throughput . . . . .	115
5.4	Numerical Results and Discussion . . . . .	115
5.5	Summary . . . . .	120
<b>6</b>	<b>RIS-Aided SSK Modulation</b>	<b>121</b>
6.1	Introduction . . . . .	121
6.2	System Model . . . . .	124
6.3	Principle of the Proposed Scheme . . . . .	126
6.4	Performance Analysis . . . . .	127
6.4.1	Error Rate Analysis . . . . .	127
6.4.2	Diversity Order Analysis . . . . .	130
6.4.3	Ergodic Capacity Analysis . . . . .	131

6.5	Numerical Results and Discussion . . . . .	134
6.6	Summary . . . . .	137
<b>7</b>	<b>Conclusions and Future Works</b>	<b>138</b>
7.1	Conclusions . . . . .	138
7.2	Future Works . . . . .	141
	<b>Bibliography</b>	<b>143</b>
	<b>Publications based on this Thesis</b>	<b>158</b>
	<b>Technical Biography of Author</b>	<b>160</b>

# List of Figures

1.1	SISO wireless communication system . . . . .	2
1.2	MIMO wireless communication system . . . . .	5
1.3	General block diagram of the SM . . . . .	10
2.1	SSK system model with feedback. . . . .	27
2.2	Illustration of source mapping, spatial, and real-line constellation of the 4×1 MISO system for conventional SSK scheme. . . . .	31
2.3	Illustration of constellation design for the proposed SSK scheme for four TAs. . . . .	33
2.4	ABER versus SNR curves for the existing closed-loop SSK and proposed SSK schemes for SE of 1 bpcu. . . . .	48
2.5	ABER versus SNR curves for the conventional SSK/SM and proposed SSK schemes for SE of 2 bpcu. . . . .	49
2.6	PEP and ABER performance of the proposed scheme for $N_t = 4$ . . . . .	50
2.7	Comparison of PEP( $x_3 \rightarrow x_4$ ) and ABER curves for the proposed scheme with $N_t = 4$ , for different values of $\alpha$ . . . . .	51
2.8	Comparison of PEP( $X_{N_{t-1}} \rightarrow X_{N_t}$ ) and ABER Vs. SNR curves for the proposed scheme for different values of $N_t$ . . . . .	52
2.9	ABER versus $\alpha$ curves for proposed SSK scheme. . . . .	53
2.10	Performance comparison among the conventional, existing closed-loop, and proposed SSK schemes for spatially correlated channel for SE of 3 bpcu. . . . .	54
2.11	Plot of the probability of occurrence of adverse cases versus SE. . . . .	55

3.1	Illustration of the proposed secure transmission model. . . . .	61
3.2	Comparison of $\mathcal{R}_b$ and $\mathcal{R}_b(\tilde{\Psi}_{i,i}(s))$ versus SNR curves of Bob's data rate for $N_t = 4$ . . . . .	78
3.3	Comparison of $\mathcal{R}_b$ and $\mathcal{R}_b(\tilde{\Psi}_{N_t, N_t-1}(s))$ versus SNR curves of Bob's data rate for various number of $N_t$ . . . . .	79
3.4	BER versus SNR curves of Bob and Eve for SE of 1 bpcu. . . . .	83
3.5	BER versus SNR curves of Bob and Eve for SE of 2 bpcu. . . . .	84
3.6	Secrecy rate versus SNR curves for the proposed scheme with $N_t = 2$ . . . . .	85
3.7	Secrecy rate versus SNR curves for the proposed scheme with $N_t = 4$ . . . . .	86
3.8	Comparison between the analytical upper bound and exact SR values for the proposed scheme for $N_t = 4, 8, 16$ . . . . .	87
3.9	Analytical SR versus $\alpha$ plots for the proposed scheme for various number of TAs. . . . .	88
3.10	BER versus SNR curves of Bob and Eve for $N_t = 4$ . . . . .	88
3.11	SOP versus SNR curves for different values of $N_t$ . . . . .	90
4.1	System model. . . . .	94
4.2	BER vs SNR plots for Bob and Eve. . . . .	104
4.3	SR vs SNR plots of the proposed scheme. . . . .	104
4.4	SOP vs SNR plots of the proposed scheme. . . . .	105
5.1	System model of the QSM-FD wireless communication. . . . .	109
5.2	ABER-SNR plots of QSM-FD, FD, and SM-FD schemes for SE of 12 bpcu and $N = 4$ . . . . .	116
5.3	ABER-SNR plots of the QSM-FD scheme for $d = a = 1$ . . . . .	117
5.4	EC of the QSM-FD, SM-FD, and SM-HD schemes for $M = N = 4$ . . . . .	118
5.5	System throughput for various values of $M$ and $N$ . . . . .	119
5.6	Ergodic spectral efficiency vs. $N$ plots for different values of $M$ . . . . .	119
6.1	RIS-aided wireless communication system. . . . .	125
6.2	ABER versus SNR plots of the proposed scheme for various value of $N$ and $N_r = 1$ . . . . .	135

6.3	ABER versus SNR plots of the proposed scheme for different values of $N_t, M, N_r$ .	136
6.4	EC versus SNR plots of the proposed scheme for various values of $N_t, M, N$ , and $N_r$ .	136



# List of Tables

1.1	Alamouti code design . . . . .	7
1.2	SM mapping rule for $N_t = 4$ and $M = 2$ . . . . .	11
1.3	SSK mapping rule for $N_t = 4$ . . . . .	12
2.1	Spatial constellation design for the proposed SSK scheme . . . . .	33
3.1	Illustration of correspondence between channel gain order and AI mapping patterns for the proposed scheme with $N_t=2$ . . . . .	63
4.1	Illustration of spatial/signal constellation mapping pattern for the proposed scheme with $N_t = M = 2$ . . . . .	95
4.2	Illustration of spatial/signal constellation mapping pattern for the proposed scheme with $N_t = 4, M = 2$ . . . . .	96
4.3	Illustration of spatial/signal constellation mapping pattern for the proposed scheme with $N_t = 2, M = 4$ . . . . .	97
6.1	Illustration of bit-to-symbol mapping at AP and RIS for $M = 2$ and $N_t = 4$ . . . . .	126



# Abbreviations

ABER	Average Bit Error Rate
AI	Antenna Index
APM	Amplitude and Phase Modulation
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
Bob	Legitimate Receiver
bpcu	bits per channel use
CSI	Channel State Information
DCMC	Discrete-Input Continuous-Output Memoryless Channel
EC	Ergodic Capacity
EE	Energy Efficiency
Eve	Passive Eavesdropper
FD	Full Duplex
FDD	Frequency Division Duplex
MED	Minimum Euclidean Distance
MGF	Moment Generating Function
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MISO	Multiple-Input Single-Output
ML	Maximum Likelihood
MRC	Maximum Ratio Combining
HD	Half Duplex
IAS	Inter Antenna Synchronization
ICI	Inter Channel Interference

i.i.d.	independent and identically distributed
PA	Power Allocation
PDF	Probability Distribution Function
PLS	Physical Layer Security
QSM	Quadrature Spatial Modulation
RA	Receive Antenna
RF	Radio Frequency
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface
RPM	Reflection Phase Modulation
RV	Random Variable
Rx	Receiver
SC	Selection Combining
SE	Spectral Efficiency
SI	Self Interference
SIMO	Single-Input Multiple-Output
SISO	Single-Input Single-Output
SMTs	Space Modulation Techniques
SM	Spatial Modulation
SMUX	Spatial Multiplexing
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SOP	Secrecy Outage Probability
SR	Secrecy Rate
SSK	Space Shift Keying
STC	Space-Time Coding
STBC	Space-Time Block Coding
TA	Transmit Antenna
TS	Time Slot
Tx	Transmitter
V-BLAST	Vertical Bell Labs Layered Space-Time

# Notation

$\approx$	Approximately equal to
$\geq$	Greater than equal
$\leq$	Less than equal
$\sqrt{\cdot}$	Square root
$(\cdot)!$	Factorial
$\otimes$	Kronecker product operator
$(\cdot)^H$	Hermitian transform
$\arg \max[\cdot]$	Maximization operator
$\arg \min[\cdot]$	Minimization operator
$\Pi$	Permutation operator
$\exp(\cdot)$	Exponential function (i.e., $e^{(\cdot)}$ )
$\mathbf{e}_i$	$i^{\text{th}}$ column of the identity matrix
$\mathbf{w}$	Vector
$\mathbf{W}$	Matrix
$[\cdot]_{M \times N}$	A matrix with $M$ rows and $N$ columns
$t_r(\cdot)$	Trace of matrix
$\mathbb{E}[\cdot]$	Expectation operator
$[\cdot]^T$	Transpose operator
$ \cdot $	Absolute value
$\ \cdot\ ^2$	Frobenius norm
$f(\cdot)$	PDF
$f(\cdot, \cdot)$	Joint PDF
$f(\cdot   \cdot)$	Conditional PDF

$Pr(\cdot)$	Probability of event
$Q(\cdot)$	Gaussian q-function
$\Re\{\cdot\}$	Real component of complex quantity
$\Im\{\cdot\}$	Imaginary component of complex quantity
$\Psi(\cdot)$	Moment generating function
$I_0(\cdot)$	Modified Bessel of the first kind and zero order
$Q(\cdot, \cdot)$	First order Marcum q-function
$\Gamma(\cdot, \cdot)$	Upper incomplete gamma function
$\Gamma(\cdot)$	Complete gamma function
${}_2F_1(\cdot, \cdot; \cdot; \cdot)$	Gaussian hypergeometric function
$B(\cdot, \cdot)$	Beta function
$P_t$	Total power
$\log_x(y)$	The log, base x, of y
$\mathcal{I}(\cdot; \cdot)$	Mutual information
$diag([\cdot])$	Diagonal matrix
$\mathbf{I}_{N_t}$	Identity matrix of order $N_t \times N_t$
$\mathcal{H}(\cdot)$	Entropy
$\mathcal{H}(\cdot   \cdot)$	Conditional entropy
$\mathcal{D}_H(\cdot, \cdot)$	Hamming distance between different symbols
$G_{p,q}^{m,n} \left( \cdot \middle  \cdot \right)$	Meijer-G function