การวิเคราะห์ความจุของช่องสัญญาณเรย์ลีแบบหลายทางเข้าหลายทางออกที่มีสหสัมพันธ์เฟดดิงเชิงพื้นที่และความผิดพลาดในการประมาณค่า

นาย ฮา เหงียน ตรุง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CAPACITY ANALYSIS OF MIMO RAYLEIGH CHANNEL WITH SPATIAL FADING CORRELATIONS AND ESTIMATION ERRORS

Mr. Ha Duyen Trung

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2008
Copyright of Chulalongkorn University

511357

Thesis title:	CAPACITY ANALYSIS OF MIMO RAYLEIGH CHANNEL WITH SPATIAL FADING CORRELATIONS AND ESTIMATION ERRORS
By:	Mr. Ha Duyen Trung
Field of study:	Electrical Engineering
Thesis Advisor:	Associate Professor Watit Benjapolakul, PhD

Accepted by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of the Requirement for the Ph.D's Degree

..... Dean of the Faculty of Engineering

(Associate Professor Boonsom Lerdhirunwong, Dr.Ing.)

THESIS COMMITTEE

..... Chairman

(Associate Professor Somchai Jitapunkul, Dr.Ing.)

..... Advisor

(Associate Professor Dr. Watit Benjapolakul, D.Eng.)

..... Examiner

(Assistant Professor Dr. Tuptim Angkaew, Ph.D.)

..... Examiner

(Associate Professor Dr. Lunchakorn Wuttisittikulkij, Ph.D.)

..... External Examiner

(Chaiyaporn Khemapatapan, Ph.D.)

ฮา เหงียน ตรุง : การวิเคราะห์ความจุของช่องสัญญาณเรย์ลีแบบหลายทางเข้าหลายทางออกที่มีสหสัมพันธ์เฟดดิงเชิงพื้นที่และความผิดพลาดในการประมาณค่า (CAPACITY ANALYSIS OF MIMO RAYLEIGH CHANNEL WITH SPATIAL FADING CORRELATIONS AND ESTIMATION ERRORS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.วาทิต เบญจพลกุล, 111 หน้า.

ระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออกที่มีการติดตั้งแถวของสายอากาศทั้งที่ด้านเครื่องส่งและที่ด้านเครื่องรับเป็นแบบแผนที่ดีแบบแผนหนึ่งที่ทำให้การส่งข้อมูลด้วยอัตราข้อมูลที่สูงขึ้นและหรือเชื่อถือได้มากขึ้นเป็นจริงได้ วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์ความจุของช่องสัญญาณเรย์ลีแบบหลายทางเข้าหลายทางออกที่มีสหสัมพันธ์เฟดดิงเชิงอวกาศที่เครื่องรับโดยนำเอาประเด็นเรื่องพหุวิถีมาพิจารณาด้วย โดยทั่วไป รูปลักษณ์แบบจำลองของการกระจัดกระจายท้องถิ่นโดยรอบสถานีเคลื่อนที่ในสิ่งแวดล้อมแบบหลายทางเข้าหลายทางออกถูกดำเนินการโดยการจำลองแบบเพื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงอวกาศ อย่างไรก็ตาม ในวิทยานิพนธ์นี้ นิพจน์รูปแบบปิดที่แน่นอนของการแจกแจงค่าเจาะจงได้รับการพิจารณาบนพื้นฐานของคุณสมบัติทางสถิติของค่าเจาะจงของเมตริกซ์วิสฮาร์ทแบบสุ่มเชิงซ้อนที่มีสหสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์นี้ยังได้เสนอการประมาณค่ารูปแบบปิดทั่วไปของรูปแบบอินทริกรัลบนพื้นฐานของฟังก์ชัน-จีของเมอิเจอร์ ผลที่ได้แสดงว่าความจุเออร์กอดิกได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มจำนวนของสายอากาศและค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน เมื่อเปรียบเทียบกับช่องสัญญาณเรย์ลีที่มีการแจกแจงแบบไอไอดี (Independent Identically Distributed) การปรับปรุงส่วนที่เปลี่ยนของช่องสัญญาณเรย์ลีที่มีสหสัมพันธ์มีค่าน้อยลงเนื่องจากผลของสหสัมพันธ์เฟดดิงเชิงอวกาศ ผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองแบบมอนติคาร์โลแสดงให้เห็นความสอดคล้องที่ดีกับผลการวิเคราะห์ข้างต้น

นอกเหนือจากการวิเคราะห์ความจุแล้ว วิทยานิพนธ์นี้ยังได้มีการอภิปรายในแง่ทฤษฎีข่าวสารของแบบแผนการส่งแบบหลายทางเข้าหลายทางออกในทางปฏิบัติ ได้แก่ ระบบหลายทางเข้าหลายทางออกแบบมัลติเพลกซ์เชิงพื้นที่ซึ่งมีเครื่องรับแบบบังคับให้เป็นศูนย์ (zero-forcing) ที่ทำงานภายใต้สภาพที่เป็นจริง เช่น มีสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ มีความผิดพลาดในการประมาณค่าช่องสัญญาณ และมีการประวิงเวลาของการป้อนกลับจากเครื่องรับไปยังเครื่องส่ง วิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของช่องสัญญาณเฟดดิงที่มีสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่และความผิดพลาดในการประมาณค่า วิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงให้เห็นว่าความจุของระบบลดน้อยลงเมื่อข่าวสารสถานะช่องสัญญาณไม่สมบูรณ์และสัญญาณต่างๆ มีสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ นอกจากนี้ ยังได้มีการอนุพัทธ์ (derive) ขอบเขตล่างของข่าวสารร่วมสำหรับช่องสัญญาณเฟดดิงแบบราบที่มีเมตริกซ์กำลังสัญญาณรบกวนประสิทธิผล ซึ่งเป็นการศึกษาที่ง่ายในการทำให้เข้าใจอย่างลึกซึ้ง

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2551

497 18622 21 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ERGODIC CAPACITY / MULTIPLE-INPUT MULTIPLE-OUTPUT (MIMO) SYSTEMS / SMART ANTENNAS / FADING CHANNELS / SPATIAL CORRELATIONS / ESTIMATION ERRORS

HA DUYEN TRUNG : CAPACITY ANALYSIS OF MIMO RAYLEIGH CHANNEL WITH SPATIAL FADING CORRELATIONS AND ESTIMATION ERRORS, ADVISOR : ASSOC. PROF. WATIT BENJAPOLAKUL, Ph.D., 111 pp.

Multiple Input Multiple Output (MIMO) communications systems equipped with antennas array at both the transmitter and receiver ends are promising schemes to realize higher rate and/or reliable data transmission. In this thesis, capacity analysis of MIMO Rayleigh channel with spatial correlation at the receiver of multipath is studied. In general, a model configuration of local scattering around a mobile station in MIMO environment is carried out by simulation to examine spatial correlation coefficients. Based on statistical properties of the eigenvalues of correlated complex random Wishart matrices, the exact closed-form expressions of distribution of the eigenvalues are investigated. Then, the general closed-form evaluation of integral form is proposed based on Meijer's *G*-function. The analytical results demonstrate that the ergodic capacities are improved by increasing the number of the antennas and signal-to-noise ratio (SNR's). Compared with independent identically distributed (iid) Rayleigh channel, the incremental improvement of correlated Rayleigh channel is reduced by spatial fading correlation. The analytical results validated by Monte-Carlo simulations that show a good agreement.

In addition to the capacity analysis, the aspect of information theory of a practical MIMO transmission scheme is discussed, namely, spatial multiplexing MIMO system with zero forcing receiver which operating under realistic conditions such as spatially correlation, channel estimation errors, and delay feedback from the receiver to the transmitter. Results are presented for spatially correlated Rayleigh fading channels and estimation errors. It is demonstrated that the capacity of the system suffers degradation when the channel state information (CSI) is not perfect and in spatially correlated signals. A lower bound on mutual information is also derived for flat fading channel with the effective noise power matrix, which lead to simple study of insights.

Department Electrical Engineering Student's Signature .....

Field of Study Electrical Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year 2008

ACKNOWLEDGEMENTS

Looking back to the three years when I left my home country with full of hope and fear, came to further my study and research on wireless communications in Chulalongkorn University and Tokyo Institute of Technology. I really came a long way with lots of difficulties that I had never imagined. I would never forget all wonderful people who I ever met along the way and treated me so warmly.

Firstly, I would specially like to thank my supervisor, Prof. Watit Benjapolakul for his guidance, support, and establishment of the research environment for any student who finds an interest in mobile and wireless communications.

Secondly, I would like to express my deepest gratitude and appreciation to Prof. Kiyomichi Araki not only for teaching me the basic of knowledge but also the newest research ideas. I was really moved by his generous. Special thanks to Assoc. Prof. Kei Sakaguchi for his kind assistances and ideas for this study.

I also would like to express my gratitude to my thesis committee members, Prof. Somchai Jitapunkul, Prof. Tuptim Angkaew, Prof. Lunchakorn Wuttisittikulkij, and Dr. Chaiyaporn Khemapatapan for their guidance.

My stay and study in Thailand and Japan would not have been possible without the funding support of the Japan International Cooperation Agency (JICA) project for the ASEAN University Network / Southeast Asia Engineering Education Development Network (AUN/SEED-Net).

I would like to thank Dr. Lau Tze Liang for his understanding and thoughtfulness. I would also like to acknowledge all my Vietnamese friends in Thailand and Japan for their supports. Back home in Vietnam, I would like to thank all Lab members in the Center of Excellence in Telecommunications Systems Technology and Araki-Sakaguchi Lab, who have been always willing to help me, and hope that we will always find opportunities to get together independent of where in the world we will end up.

Finally, I would like to thank my parents who have always stood behind me and given me the patience, endlessness love, and resources I need to succeed in life.

Contents

Page

Abstract in Thai ..... **iv**

Abstract in English ..... **v**

Acknowledgments ..... **vi**

Contents ..... **vii**

List of Tables ..... **x**

List of Figure ..... **xi**

Chapter

1 Introduction **1**

1.1 Background and Motivation 1

1.2 Smart Antennas and MIMO Concept 4

1.3 Fundamental Limits of Channel Capacity 6

1.4 Rayleigh Fading Channel 8

1.5 Research Interests of MIMO Technologies 13

1.6 Scopes and Goals 16

1.7 Contributions of Dissertation 16

1.8 Literature Review 17

1.9 Outline of Dissertation 19

2 Theory of Complex Random Matrix **20**

2.1 Quadratic Forms on Complex Random Matrices 20

2.2 The Complex Central Wishart Matrix 24

3 MIMO Capacity Analysis with Spatial Fading Correlation **27**

3.1 Model Configuration of Spatial Correlations 27

3.1.1 Radio Wave Propagation of Mobile Wireless Communications 27

3.1.2 Spatial Correlation Characteristics 30

Chapter page

3.2 System Model 35
3.2.1 Spatial Correlation at the Receiver Side 37
3.2.2 Spatial Uncorrelated Channel 39
3.3 The Proposed Closed-Form Evaluation of Integral Form 40
3.4 Monte Carlo Method 42
3.5 Simulation Condition 43
3.6 Simulation Results and Discussion 45

4 MIMO Channel under Practical Conditions 61
4.1 System Definition and Channel Modeling 61
4.1.1 Channel Model with Estimation Error 64
4.1.2 Spatial Correlation Coefficient 65
4.1.3 Quality of Channel Estimation 68
4.1.4 Delayed Feedback Transmission..... 68
4.2 Proposal Procedure of the System 70
4.3 Bounds on Mutual Information in Practical Conditions 71
4.3.1 Imperfect CSI at the Receiver for IID Channel 71
4.3.2 Imperfect CSI at the Receiver and Delayed Feedbacks to the Transmitter for Spatially Correlation Channel 72
4.4 Analysis of Discussion on MIMO Performance in Ergodic Channel Capacity with Spatial Correlation and Estimation Errors 75
4.5 Approximation of BER on the Modulation Schemes: M-PSK and M-QAM 85
4.5.1 Case of M-PSK Scheme 88
4.5.2 Case of M-QSK Scheme 88

5 Conclusion and Recommendation 91

page

References **92**

Appendices **101**

Appendix A 102

Appendix B 103

Appendix C 104

Appendix D 110

VITAE **111**

List of Tables

Table		Page
1.1	Expectation for 4th generation systems (proposed by NTT DoCoMo).....	3
3.1	The simulation condition	44
3.2	MIMO Rayleigh uncorrelated (iid) channel: comparison numerical / simulated results	59
3.3	MIMO Rayleigh semi-correlated (at the receiver) channel: comparison of numerical / simulated results	60
4.1	The multiplying factor as a function of the Doppler spread and feedback delay.....	77

List of Figures

Figure		Page
1.1	Evolution of the mobile and communication systems	3
1.2	MIMO channel respond matrix and the real MIMO channel measurement system at Araki-Sakaguchi Laboratory	5
1.3	Rayleigh distribution	11
1.4	BER performance & SNR (of BPSK modulation) for with Rayleigh fading and without fading (AWGN)	12
1.5	Block diagram of principal research topics in MIMO technologies	15
3.1a	A typically macrocellular ratio-wave propagation environment: directed signal, single-bounce (dashed line), and multiple-bound (dotted line)	29
3.1b	Local scatterer	29
3.1c	"Single-ring" propagation model	29
3.2	The multiple Von Misses distribution of scatterer components at the MS ($\theta_p = 0$). When k=0, the distribution is uniform and is the isotropic scattering model	32
3.3	Spatial correlation characteristic at the BS antennas: magnitude of correlation coefficient versus antenna spacing for different angle Ω with the angle of incoming $\Delta \approx r/d = 0.006°$	33
3.4	Spatial correlation characteristic at the MS antennas: magnitude of correlation coefficient versus antenna spacing	34
3.5	Distribution of the eigenvalues $P^{semi}(\lambda_1, \lambda_2)$ of correlated Wishart matrix $\mathbf{S} = \mathbf{H}\mathbf{H}^{\dagger}$ for a 2x2 MIMO Rayleigh channel with $\rho_{MS(1,2)} = 0.3$	49
3.6	Distribution of the eigenvalues $P^{semi}(\lambda_1, \lambda_2)$ of correlated Wishart matrix $\mathbf{S} = \mathbf{H}\mathbf{H}^{\dagger}$ for a 2x2 MIMO Rayleigh channel with $\rho_{MS(1,2)} = 0.5$	50
3.7	Distribution of the eigenvalues $P^{semi}(\lambda_1, \lambda_2)$ of correlated Wishart matrix $\mathbf{S} = \mathbf{H}\mathbf{H}^{\dagger}$ for a 2x2 MIMO Rayleigh channel with $\rho_{MS(1,2)} = 0.9$	51
3.8	Distribution of the eigenvalues $P^{semi}(\lambda_1, \lambda_2)$ of correlated Wishart matrix $\mathbf{S} = \mathbf{H}\mathbf{H}^{\dagger}$ for a 4x2 MIMO Rayleigh channel with $\rho_{MS(1,2)} = 0.3$	52
3.9	Distribution of the eigenvalues $P^{semi}(\lambda_1, \lambda_2)$ of correlated Wishart matrix $\mathbf{S} = \mathbf{H}\mathbf{H}^{\dagger}$ for a 4x2 MIMO Rayleigh channel with $\rho_{MS(1,2)} = 0.5$	53

Figure

Page

3.10 Distribution of the eigenvalues $P(\lambda_1, \lambda_2)$ of correlated Wishart matrix $\mathbf{S} = \mathbf{H}\mathbf{H}^{\dagger}$ for a 4x2 MIMO Rayleigh channel with $\rho_{MS(1,2)} = 0.9$ 54

3.11 Capacity of semi-correlated MIMO Rayleigh channel at the MS under comparison of theoretical and simulated results with $\rho_{MS(1,2)} = 0.9$ 55

3.12 Capacity of uncorrelated MIMO Rayleigh channel under the comparison of theoretical and simulated results 56

3.13 Comparison of the numerical results in capacity of semi-correlated and uncorrelated MIMO Rayleigh channels with $\rho_{MS(1,2)} = 0.9$ 57

3.14 Capacity as a function of correlation coefficient for SNR=20dB and different MIMO channels with Nt = 2, 4, 6, 8, 10, and fixed Nr = 2 58

4.1 Block diagram of the proposed SM-MIMO-ZF system 63

4.2 Power correlation coefficiency as functions of Doppler and time lag..... 67

4.3 Block diagram of procedure of the proposed SM-MIMO-ZF system..... 70

4.4 Performance on mutual information (in bits per second per Hertz) versus SNR (in decibels) for (2x2) MIMO channels with uncorrelated, correlated receive antennas and estimation errors 79

4.5 Performance on mutual information (in bits per second per Hertz) versus SNR (in decibels) for (4x2) MIMO channels with uncorrelated, correlated receive antennas and estimation errors 80

4.6 Performance on mutual information (in bits per second per Hertz) versus SNR (in decibels) for (6x2) MIMO channels with uncorrelated, correlated receive antennas and estimation errors 81

4.7 Performance on mutual information (in bits per second per Hertz) versus SNR (in decibels) for (8x2) MIMO channels with uncorrelated, correlated receive antennas and estimation errors 82

4.8 Performance on mutual information (in bits per second per Hertz) versus SNR (in decibels) for (10x2) MIMO channels with uncorrelated, correlated receive antennas and estimation errors 83

4.9 Performance comparison on mutual information (in bits per second per Hertz) versus SNR (in decibels) for (2x2) and (4x2) MIMO channels with uncorrelated, correlated receive antennas and estimation errors 84

4.10 Performances of different modulation schemes 85

ACKNOWLEDGEMENTS

Looking back to the three years when I left my home country with full of hope and fear, came to further my study and research on wireless communications in Chulalongkorn University and Tokyo Institute of Technology. I really came a long way with lots of difficulties that I had never imagined. I would never forget all wonderful people who I ever met along the way and treated me so warmly.

Firstly, I would specially like to thank my supervisor, Prof. Watit Benjapolakul for his guidance, support, and establishment of the research environment for any student who finds an interest in mobile and wireless communications.

Secondly, I would like to express my deepest gratitude and appreciation to Prof. Kiyomichi Araki not only for teaching me the basic of knowledge but also the newest research ideas. I was really moved by his generous. Special thanks to Assoc. Prof. Kei Sakaguchi for his kind assistances and ideas for this study.

I also would like to express my gratitude to my thesis committee members, Prof. Somchai Jitapunkul, Prof. Tuptim Angkaew, Prof. Lunchakorn Wuttisittikulkij, and Dr. Chaiyaporn Khemapatapan for their guidance.

My stay and study in Thailand and Japan would not have been possible without the funding support of the Japan International Cooperation Agency (JICA) project for the ASEAN University Network / Southeast Asia Engineering Education Development Network (AUN/SEED-Net).

I would like to thank Dr. Lau Tze Liang for his understanding and thoughtfulness. I would also like to acknowledge all my Vietnamese friends in Thailand and Japan for their supports. Back home in Vietnam, I would like to thank all Lab members in the Center of Excellence in Telecommunications Systems Technology and Araki-Sakaguchi Lab, who have been always willing to help me, and hope that we will always find opportunities to get together independent of where in the world we will end up.

Finally, I would like to thank my parents who have always stood behind me and given me the patience, endlessness love, and resources I need to succeed in life.