

Thesis Title	Analysis of MIMO Wireless Channel Using Minimum Mean Square Error
Thesis Credits	36
Candidate	Mr. Narongrit Mekloi
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Kamon Jirasereeamornkul
Program	Doctor of Philosophy
Field of Study	Electrical and Computer Engineering
Department	Computer Engineering
Faculty	Engineering
Academic Year	2014

### Abstract

Multiple-input multiple-output (MIMO) systems architecture has recently as one of the most promising research areas of wireless communications, which has spectral efficiencies far beyond those offered by conventional techniques. This thesis is concerned with the use of MIMO in wireless communication over non-Gaussian fading channel. In a MIMO system employing the Minimum mean square error (MMSE) scheme with and without interference, perfect channel state information is assumed. The Nakagami-m fading MIMO channels are studied and closed-form outage probability is found. We also propose interference mitigation for MIMO systems. Based on statistical theory, we give a unified approach to outage performance and channel capacity for MIMO systems. We discuss the basic elements of wireless systems that utilize radio spectrum space in our analysis. We present a multiple antenna processing power based sensor. In this method, two antenna processing and analyze their sensing performance are considered. Closed form expression for the detection probability is derived. Finally, some numerical results the potential improvement in secondary users feasibility in smart radio based energy detection is shown.

Keywords : Channel Capacity/ Co-Channel Interference / MIMO Systems / Minimum Mean Square Error / Outage Probability/

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ช่องสัญญาณไร้สายมัลติเฟลอินพุตมัลติเฟลเอาต์พุตด้วยการใช้ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด
หน่วยกิต	36
ผู้เขียน	นายณรงค์ฤทธิ์ เมฆลอย
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร.กมล จิรเสรีอมรกุล
หลักสูตร	ปรัชญาคุษุบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ภาควิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2557

### บทคัดย่อ

สถาปัตยกรรมระบบสื่อสารแบบมัลติเฟลอินพุต มัลติเฟลเอาต์พุต เป็นหนึ่งในงานวิจัยทางด้านระบบสื่อสารไร้สายที่ได้รับความนิยมเพื่อที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานแถบความถี่ได้มาก วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอระบบสื่อสารแบบมัลติเฟลอินพุตมัลติเฟลเอาต์พุตสำหรับช่องสัญญาณที่ไม่ใช่การลดทอนแบบเกาส์เซียน โดยใช้วิธีการหาค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดในสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณแทรกสอด รวมถึงการสร้างแบบจำลองในช่องสัญญาณที่มีการลดทอนแบบนาคากามิ แสดงค่าความน่าจะเป็นที่สัญญาณขาดหายเพื่อวัดประสิทธิภาพของระบบ แสดงผลการแก้ปัญหาสัญญาณแทรกสอดในระบบสื่อสารแบบมัลติเฟลอินพุต มัลติเฟลเอาต์พุต โดยใช้หลักทางสถิติในการนำไปสู่การประเมินค่าความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหาย และค่าความจุของช่องสัญญาณ และยังได้กล่าวถึงพื้นฐานการใช้ประโยชน์จากแถบความถี่ที่ไม่มีผู้ใช้งานในระบบสื่อสารไร้สาย วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการค้นหาแถบความถี่ที่ว่าง ด้วยค่าความน่าจะเป็นของการตรวจพบ ในตอนท้ายได้แสดงถึงประสิทธิภาพของการค้นหาแถบความถี่ที่ว่างเพื่อให้ผู้ใช้งานรอง ได้มีโอกาสเข้าไปใช้ทรัพยากรได้อย่างถูกต้องด้วยวิธีการตรวจวัดพลังงาน

คำสำคัญ : ความจุช่องสัญญาณ / สัญญาณแทรกสอดร่วม / ระบบสื่อสารแบบมัลติเฟลอินพุต  
มัลติเฟลเอาต์พุต / ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด / ความน่าจะเป็นที่สัญญาณขาดหาย

## ACKNOWLEDGEMENTS

It is my pleasure to express my sincere appreciation and gratitude to my advisor, Asst. Dr. Prof. Kamon Jirasereeamornkul, for his support, advice and understanding. Without his kindness, this dissertation would not be possible. I would also like to thank Prof. Thomas Hunziker, Ph.D. from Lucerne University of Applied Sciences and Arts for encouragement and guidance, which have been extremely valuable throughout my work.

I consider a great honor to have Assoc. Prof. Dr. Athikom Roeksabutr from Mahanakorn University of Technology for his time, support, valuable suggestion. Most of all, I have learned a lot more than research work through his loyalty to integrity as an academic professional.

I would like to express my appreciation to Asst. Prof. Dr. Pinit Kumhom and Asst. Prof. Dr. Werapon Chiracharit for their vast experience and nice nature has given me a very great learning experience during course at King Mongkut's University of Technology Thonburi.

I am highly grateful to my dissertation committee, Asst. Prof. Dr. Surin Ngeamngam from Rajamangala University of Technology Thanyaburi for having dedicated his valuable time to participate my dissertation.

I would also like to thank my brother Mr. Yingyong for love and support. I wish to specially thank Parichard Saksopin, who gives me true love, encouragement and understanding.

Finally, to my parents, who although far away, were all ways closed to me in their thoughts and hearts, for their everlasting encouragement, faith, support and love.

## CONTENTS

	<b>PAGE</b>
ABSTRACT	i
THAI ABSTRACT	ii
ACKNOWLEDGEMENTS	iii
CONTENTS	iv
LIST OF FIGURES	v
LIST OF SYMBOLS	vi
<b>CHAPTER</b>	
<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
1.1 Overview Problem	1
1.2 Literature Review	3
1.3 Purpose and Contribution	3
1.4 Research Method	3
1.5 Outage Probability	4
1.6 Channel Capacity	4
<b>2. ANTENNA ARRAYS FUNDAMENTAL</b>	<b>6</b>
2.1 Linear Diversity Combining Methods	6
2.1.1 Practical Antenna Diversity	7
2.2 Previous Work	10
2.3 Central Limit Theorem	12
2.4 Analytical Framework	14
2.5 System Model	16
<b>3. MIMO STRATEGIES</b>	<b>21</b>
3.1 Nakagami- $m$ Fading	21
3.2 Non-Gaussian Fading	27
<b>4. SPECTRUM SENSING</b>	<b>32</b>
4.1 Power Based Sensing	33
4.2 Waveform Based Sensing	34
4.3 Detection Performance	36
4.4 Numerical Examples	39
<b>5. CONCLUSION</b>	<b>42</b>
<b>REFERENCES</b>	<b>44</b>
<b>CURRICULAM VITAE</b>	<b>50</b>

## LIST OF FIGURES

FIGURE	PAGE
1.1 Features of Wireless Systems	1
1.2 Difference between SISO, SIMO, MISO and MIMO systems	2
1.3 Schematic description of the process spectrum holes concept with respect to the 3 dimensions of time, frequency and power.	3
2.1 Relationships among wireless network design, antenna array performance, and propagation environment.	4
2.2 Generalized block diagram for space diversity	8
2.3 Basic form of scanning diversity	8
2.4 Comparison of diversity receivers MRC and SC.	9
2.5 Maximal ratio combiner	10
2.6 Schematic illustration of a MIMO system with multiple transmit and receives antennas.	11
2.7 Complex-baseband communication systems	15
2.8 An example of problems that detection delays	19
3.1 The probability density function of Nakagami- $m$ distribution	21
3.2 Outage probability versus SNR for MRC branches $L = 1, 2, 3$ , and value of $m = 0.5$ and SNR = 10 dB.	22
3.3 Outage probability versus SNR for dual MRC, and several values of $m$ and SNR = 10 dB.	22
3.4 Outage probability versus SNR for dual MRC in finescale, and several values of $m$ and SNR = 10 dB.	23
3.5 Outage probability versus average SINR with $L$ equal mean power faded interferers as a parameter, in the presence of 2 antenna elements and DOF $\alpha = 3$ .	25
3.6 Outage probability versus average SINR with antenna arrays as a parameter, in the presence of 8 equal mean powers faded interferers and DOF $\alpha = 3$ .	26
3.7 Probability of error versus average SINR in presence of four unequal powerinterferers with DOF as a parameter (DOF = 1, 2, 3, 15) without diversity order.	26
3.8 Probability of error versus average SINR in presence of two antenna elements with equal power interferers as a parameter.	27
4.1 Characteristics of detection	30
4.2 Detection performances with multiple antenna processing	35
4.3 Detection performances with multiple antenna processing	36

## LIST OF SYMBOLS

### SYMBOL

$\mathbf{A}$	Direction of arrival signal vector
$A$	Elementary envelope random variable
$\alpha, \nu$	Degree of freedom (DOF)
$B(a, b)$	Beta function
$\beta$	Specific function of interference-to-signal ratio (ISR)
$\delta_{a,b}$	Specific recursive coefficient
$\delta(\cdot)$	Delta function
$E[\cdot]$	Expected value
${}_2F_1(a, b; c; x)$	Gauss hypergeometric function
$g_n(\cdot)$	SIRP Generation function
$\gamma$	Instantaneous SIR or SINR threshold
$\Gamma$	Average interference-to-signal ratio (ISR)
$\Gamma(\cdot)$	Gamma function
$H$	Hermitian transpose of the complex vector
$\mathbf{I}$	Identity matrix
$J_n(x)$	n-th order Bessel function of the first kind
$K$	Number of multipath fading channels
$\mathbf{M}$	Gaussian distributed covariance matrix
$M$	Diversity orders (Number of antenna element)
$\mathbf{m}$	Complex Gaussian mean vector
$\mu_c, \mu_s$	Expected value of quadrature components
$\mu_1, \mu_2$	Expected value of uncorrelated quadrature components
$N$	Number of cochannel interferers
$\mathbf{n}$	Gaussian noise vector
$\Omega$	Average signal-to-interference ratio (SIR)
$P_\gamma(\gamma)$	Cumulative density function (cdf)
$p_\gamma(\gamma)$	Probability density function (pdf)
$P$	Signal power
$\phi(a, b)$	Specific coefficient under commutation law
$\varphi$	Elementary phase random variable
$q, r$	Non-negative random variable
$\mathbf{R}$	Received interferer-plus-noise covariance matrix
$R$	Resultant envelope random variable
$\mathbf{r}(\mathbf{t})$	Received signal vector at the output
$\rho$	Correlation coefficient
$s(t)$	Transmitted signal
$\sigma^2$	Common variance
$\sigma_n^2$	Gaussian noise power
$\theta$	Resultant phase random variable
$u$	Non-negative random variable

$\mathbf{w}$	Weight vector
$X_c$	In-phase components
$X_s$	Quadrature-phase components
$\mathbf{Z}$	Zero-mean complex Gaussian random vector