Dissertation Title	Performance Analysis of Optimum Combining and Multi-hop Relay Systems in Wireless Fading Channels with Co-channel Interference
Dissertation Credits	36
Candidate	Lt. Termpong Soithong
Dissertation Advisor	Asst. Prof. Dr. Chirasil Chayawan
Program	Doctor of Philosophy
Field of Study	Electrical and Computer Engineering
Department	Computer Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2554

Abstract

With the rapid growth of the wireless communication systems, wireless networks and devices are expected to support high-speed and high-quality multimedia services. Accomphishing this demand is challenging since wireless systems are subjected to many major constraints such as a complex and harsh fading channel, a scarce useable radio spectrum, and limitations on the power and size of hand-held terminals. Therefore, the effective spectral and power efficient fading mitigation techniques are required. In this work, the study of the performance of optimum combining (OC) operating in the Generalized Gamma (GG) fading channels with CCI has been investigated. The closed-form expressions of the outage probability, the moment generating function (MGF), and the average symbol error rate (ASER) for various digital modulation schemes have been derived. These analytical results are shown in terms of the Meijer-G function which can be easily and accurately computed by some software programs such as Maple or Mathematica. Consequently, the performance of multi-hop AF and DF relay systems in Rayleigh fading channels with CCI and additive white Gaussian noise (AWGN) are also been studied. The analytical expressions for useful performance measures for multi-hop relay systems such as the outage probability, the average symbol error rate, and the average channel capacity are derived. Moreover, the outage performance for both AF and DF relay systems in the interference-limited Nakagami fading channels are also obtained in this work. Finally, the accuracy of analytical results is then verified and depicted by computer simulation.

Keywords : Co-channel Interference/ Additive white Gaussian Noise/ Optimum Combining Technique/ Multi-hop Relaying Systems/ Outage Probability/ Average Symbol Error Rate/ Channel Capacity.

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์คุณภาพของระบบการรวมสัญญาณแบบดีที่สุดและระบบมัลติฮอปรีเลย์ในช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สายแบบเฟดดิงที่มีสัญญาณแทรกสอด
หน่วยกิตวิทยานิพนธ์	36
ผู้เขียน	ร.อ.เติมพงษ์ สร้อยทอง (ร.น.)
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.จิรศิลป์ จยาวรรณ
หลักสูตร	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ภาควิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2554

บทคัดย่อ

จากความเจริญก้าวหน้าและเติบโตอย่างรวดเร็วของระบบการสื่อสารไร้สาย ทำให้โครงข่ายและอุปกรณ์ไร้สายได้รับการคาดหวังว่าจะต้องสามารถรับ-ส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูง รวมทั้งสามารถรองรับและให้บริการการส่งข้อมูลแบบมัลติมีเดียได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการตอบสนองความต้องการดังกล่าวถือยังเป็นเรื่องที่ค่อนข้างท้าทายสำหรับระบบสื่อสารไร้สาย เนื่องจากมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ยกตัวอย่างเช่น ช่องสัญญาณเฟดดิงที่มีความซับซ้อน การขาดแคลนของย่านความถี่คลื่นวิทยุที่สามารถนำมาใช้งานได้ และข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาดและกำลังส่งของอุปกรณ์ไร้สาย ดังนั้นระบบที่สามารถใช้กำลังส่งและสเปกตรัมคลื่นความถี่ ตลอดจนสามารถบรรเทาผลกระทบจากสัญญาณเฟดดิงได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้ประสิทธิภาพของระบบการรวมสัญญาณแบบดีที่สุด (Optimum combining) ในช่องสัญญาณเฟดดิงที่มีการกระจายแบบแกมมาทั่วไป (Generalized Gamma) ที่มีสัญญาณแทรกสอดได้รับการศึกษา โดยได้นำเสนอค่าความน่าจะเป็นของการมีระดับหรือคุณภาพสัญญาณต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ (Outage probability), ฟังก์ชั่นก่อกำเนิดโมเมนต์ (Moment generating function) และอัตราเฉลี่ยความผิดพลาดเชิงสัญลักษณ์ (Average symbol error rate) ของระบบดิจิตอลมอดูเลชันแบบต่างๆ โดยแสดงผลดังกล่าวในรูปของฟังก์ชั่นไมเจอร์จี (Meijer-G) ซึ่งสามารถคำนวณค่าได้ง่ายและถูกต้องจากโปรแกรมซอฟแวร์ต่างๆ เช่น เมเปิล (Maple) หรือ แมททิเมติก้า (Mathematica) นอกจากนั้นประสิทธิภาพของระบบมัลติฮอปที่เป็นแบบการขยายสัญญาณแล้วส่งต่อ (Amplify-and-forward) และ การเข้ารหัสสัญญาณแล้วส่งต่อ (Decode-and-forward) ในช่องสัญญาณเฟดดิงแบบเรย์ลี (Rayleigh) ที่มีทั้งสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนได้ถูกนำมาทำการวิเคราะห์ โดยได้นำเสนอค่าความน่าจะเป็นของการมีระดับหรือคุณภาพ

สัญญาณต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้, อัตราเฉลี่ยความผิดพลาดเชิงสัญลักษณ์ และค่าเฉลี่ยความจุของช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นเป็นประโยชน์อย่างมากในการพิจารณาและชี้วัดคุณภาพของระบบ นอกจากนี้ประสิทธิภาพของระบบมัลติฮอปที่เป็นแบบ การขยายสัญญาณแล้วส่งต่อ (Amplify-and-forward) และ การเข้ารหัสสัญญาณแล้วส่งต่อ (Decode-and-forward) ในช่องสัญญาณเฟดดิงแบบนาคากามิ (Nakagami) ที่มีเฉพาะสัญญาณแทรกสอดได้ถูกศึกษาและวิเคราะห์ไว้เช่นกัน โดยความถูกต้องของผลการวิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณทั้งหมดถูกตรวจสอบและแสดงผลโดยการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

คำสำคัญ : สัญญาณแทรกสอด/ สัญญาณรบกวน/ ระบบการรวมสัญญาณแบบดีที่สุด/ ระบบการสื่อสารมัลติฮอปแบบส่งต่อ/ ความน่าจะเป็นของการมีระดับหรือคุณภาพสัญญาณต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้/ อัตราเฉลี่ยความผิดพลาดเชิงสัญลักษณ์/ ค่าเฉลี่ยความจุของช่องสัญญาณ

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to acknowledge many people around me who helped, supported and encouraged me during the course of this Ph.D. program. Without these kind people, my accomplishments would never have been possible.

Beyond anything, I would like to express my deep and sincere gratitude to my supervisor, Asst.Prof. Chirasil Chayawan, Ph.D., Electronics and Communication Engineering Department, King Mongkut's University of Technology Thonburi, who was abundantly helpful and offered invaluable assistance, support and guidance. His wide knowledge and his logical way of thinking have been of great value for me. His understanding, encouraging and personal guidance have provided a good basis for the present dissertation.

My sincere thanks are due to a dissertation chairman, Col. Assoc.Prof. Settapong Malisuwan, Ph.D., and all committees for their detailed review, constructive criticism and excellent advice during the preparation of this dissertation.

In addition, I wish to express my warm and sincere thanks to Prof. Valentine A. Aalo, Ph.D., who gave me the excellent opportunity to work with him in the Department of Computer&Electrical Engineering and Computer Science at the Florida Atlantic University in the USA. This interaction has tremendously broadened my world view and strengthen my understanding of wireless communications.

I owe my most sincere gratitude to Dr. Sangtien Cherdchid and his sister, P'Chompu, who gave me a very warm welcome to their family and untiringly helped me during my brief visit to the USA.

The financial support of the National Broadcasting and Telecommunications Commission (NBTC) is gratefully acknowledged.

Lastly, and most importantly, I want to dedicate this dissertation to my parents, Sirisak and Mali Soithong, my brothers, Sarun and Apinan Soithong, and my wife, Varunee Soithong, for their love, support and motivation throughout my life.

CONTENTS

PAGE

ENGLISH ABSTRACT ii

THAI ABSTRACT iv

ACKNOWLEDGEMENTS vi

CONTENTS vii

LIST OF TABLES x

LIST OF FIGURES xi

LIST OF ABBREVIATION xiii

LIST OF NOTATIONS xiv

CHAPTER

1. INTRODUCTION 1

1.1 Motivation and Background 1

1.2 Diversity Combining Techniques 1

1.3 Cooperative Communications 2

1.4 Objective 5

1.5 Outline 5

2. MODELING OF WIRELESS FADING CHANNELS 7

2.1 Multipath Fading 7

2.2 Shadowing 10

2.3 Composite Multipath/Shadowing 10

3. SYSTEM PERFORMANCE MEASURES 14

3.1 Moment Generating Function 14

3.2 Outage Probability 14

3.3 Average Symbol Error Rate 15

3.4 Amount of Fading 16

3.5 Channel Capacity 17

4. OPTIMUM COMBINING IN GENERALIZED GAMMA FADING CHANNELS 18

4.1 Introduction 18

4.2 System Model 20

4.3 Performance Analysis 24

4.4 Numerical Results 26

5. DUAL-HOP RELAY SYSTEMS IN RAYLEIGH FADING CHANNELS 32

5.1 Introduction 32

5.2 The Presence of CCI and Noise 34

5.3 Interference-limited (CCI only) 44

5.4 Performance Analysis 45

5.5 Numerical Results 48

6. MULTI-HOP RELAY SYSTEMS IN RAYLEIGH FADING CHANNELS 56

6.1 Introduction 56

6.2 System Model 57

6.3 Statistics of End-to-End SINR 60

6.4 Performance Analysis 68

6.5 Numerical Results 72

7. MULTI-HOP RELAY SYSTEMS IN INTERFERCE-LIMITED NAKAGAMI FADING CHANNELS **77**

7.1 Introduction 77

7.2 System Model 77

7.3 Outage Performance 81

7.4 Numerical Results 84

8. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK **89**

8.1 Conclusions 89

8.2 Future Research Directions 90

REFERENCES **91**

APPENDIX

A. Derivation of Equation (5.22) 103

B. Special Cases of Incomplete Webber Integral 105

C. Derivation of Equation (5.43) 107

D. Derivation of Equation (6.43) 109

E. Derivation of Equation (6.46) 112

CURRICULUM VITAE **115**

LIST OF TABLES

TABLE		PAGE
2.1	The envelope distributions derived by GG distribution	13
3.1	The parameters for a generic form for several modulation schemes	16

LIST OF FIGURES

FIGURE **PAGE**

1.1 Multi-hop AF relay systems 3
4.1 Optimum combining receivers with *N* interferers 20
4.2 Outage probability of OC receivers with 8 equal-mean power interferers in Generalized Gamma fading channels 28
4.3 Outage probability of an OC receiver (no diversity) with 8 equal-mean power interferers in Generalized Gamma fading channels 29
4.4 The ASER of 8-PSK for OC receivers with 8 equal-mean power interferers in Generalized Gamma fading channels 30
4.5 The ABER of BPSK of an OC receiver (no diversity) with 8 equal-mean power interferers in Generalized Gamma fading channels 31
5.1 Dual-hop relay systems with the presence of interference and noise 34
5.2 Outage probability of dual-hop relay system in the presence of equal-power interferers at the relay and destination nodes 51
5.3 Outage probability of dual-hop relay system with high SIR at the relay and destination nodes 52
5.4 ABER of dual-hop relay system in the presence of equal-power interferers at the relay and destination nodes 53
5.5 ABER of dual-hop relay system with high SIR at the relay and destination nodes 54
5.6 Outage probability of interference-limited dual-hop relay system 55
6.1 Multi-hop relay systems with the presence of interference and noise 58
6.2 Outage probability versus average SNR per hop for AF and DF relay systems with N=2, 3 hops and two equal-power interferers per hop with average INR equal to 5 dB 74
6.3 Average BER versus average SNR per hop for AF and DF relay systems with N=2, 3 hops and two equal-power interferers per hop with average INR equal to 5 dB 75
6.4 Average capacity versus average SNR per hop for AF and DF relay systems with N=2, 3 hops and two equal-power interferers per hop with average 76

INR equal to 5 dB.

7.1 Outage probability of 3-hop DF and AF relay systems in Nakagami-*m* fading channels 86

7.2 Outage probability of DF and AF relay systems with N=2 and 3 hops in Rayleigh fading channels with distinct powers 87

7.3 Outage probability of DF and AF for 2-hop relay systems with $\{m_{s,n}\}_{n=1}^{2} = 2$ and Λ =20, 25, 30 dB per interferer in Rayleigh fading channels 88

LIST OF ABBREVIATION

3G/4 G	=	The third/forth Generation
ABER	=	Average Bit Error Rate
AF	=	Amplify-and-Forward
AoF	=	Amount of Fading
ASER	=	Average Smbol Error Rate
AWGN	=	Additive White Gaussian Noise
CBFSK	=	Coherent Binary Frequency Shift Keying
CBPSK	=	Coherent Binary Phase Shift Keying
CCI	=	Cochannel Interference
CDF	=	Cumulative Density Function
CLT	=	Central Limit Theorem
Cpdf	=	Characteristic Probability Density Function
CSI	=	Channel-State Information
DAF	=	Decode-Amplify-and-forward
DCT	=	Discrete Cosine Transform
DF	=	Decode-and-Forward
DOF	=	Degree of Freedom
EF	=	Estimate-and-forward
EGC	=	Equal Gain Combining
GG	=	Generalize Gamma
MGF	=	Moment Generating Function
MRC	=	Maximum Ratio Combining
OC	=	Optimum Combining
PDF	=	Probability Density Function
PF	=	Piecewise-and-forward
SC	=	Selection Combining
SINR	=	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
SIR	=	Signal-to-Interference Ratio
SIRP	=	Spherically Invariant Random Process
SIRV	=	Spherically Invariant Random Vector
SNR	=	Signal-to-Noise Ratio

LIST OF NOTATIONS

α_n	=	Amplitude of desire signal
$\tilde{\mathbf{R}}$	=	Interference covariance matrix
W_n	=	Diversity gain
$\boldsymbol{Z}$	=	Zero-mean Gaussian vector
$\boldsymbol{X}$	=	SIRV
$\bar{P}_s$	=	ASER
G_n^2	=	AF relay gain
$\bar{C}$	=	Average Channel Capacity
$\Gamma(.)$	=	Gamma function
σ_n^2	=	Noise power
$s_0(t)$	=	Desired signal
$s_j(t)$	=	The jth interference signal
$F_u(u)$	=	Cumulative density function
${}_pF_q(.)$	=	Generalized hypergeometric function
$f_u(u)$	=	Probability density function
Ξ_{ik}	=	Partial-fraction coefficient
$I_n(-)$	=	Bessel function of the first kind
$\bar{F}_u(u)$	=	Complementary cumulative density function
$Q(.)$	=	Q function
$K_n(-)$	=	Bessel function of the second kind
$\binom{a}{b}$	=	Binomial coefficient
$\mathcal{L}^{-1}(.)$	=	Inverse Laplace transform
$G_{p,q}^{m,n}(.)$	=	Meijer-G function

$\psi(.)$	=	Confluent hypergeometric function of the second kind
$K_{e_{u,v}^2}(.)$	=	Incomplete Weber integral
$F_B^{(N)}(.)$	=	Lauricella multivariate hypergeometric function of the second kind
$E[-]$	=	Expected value
u	=	Non-negative random variable
W	=	Channel bandwidth