SUT7-709-50-12-87

รายงานการวิจัย

การพัฒนาเทคนิคการส่งข้อมูลของระบบ MIMO ในสภาวะที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ โดยใช้การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์

Developing transmission techniques of MIMO systems in an imperfect CSI condition via computer simulation

ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

SUT7-709-50-12-87

รายงานการวิจัย

การพัฒนาเทคนิคการส่งข้อมูลของระบบ MIMO ในสภาวะที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ โดยใช้การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์

Developing transmission techniques of MIMO systems in an imperfect CSI condition via computer simulation

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2550

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

เมษายน 2551

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณ Professor Marek E. Bialkowski สำหรับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัยของโครงการนี้ และขอขอบคุณ นายณัทพัชร์ พรหมสุวรรณา สำหรับการเก็บผลการวัดช่องสัญญาณ

ผู้วิจัย

พฤษภาคม 2551

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจมากที่สุดในขณะนี้คือ ระบบการส่งและรับแบบหลายช่องทาง (Multiple Input Multiple Output, MIMO) เพราะว่าระบบนี้สามารถให้อัตราการส่งข้อมูลในปริมาณที่มาก เมื่อเทียบกับการรับส่งแบบช่องทางเดียว (Single Input Single Output, SISO) จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ตั้งสมมุติฐานที่สำคัญประการหนึ่งคือสมมุติให้เครื่องส่งข้อมูลสามารถรู้ข้อมูลข่าวสารของช่องสัญญาณ (Channel State Information, CSI) ได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งภายใต้เงื่อนไขนี้ สมรรถนะของระบบ MIMO สามารถให้อัตราการส่งข้อมูลได้สูงถึง N เท่าของระบบ SISO เมื่อ N คือจำนวนที่น้อยที่สุดระหว่างจำนวนสายอากาศที่ภาคส่งและรับ ข้อสมมุตินี้สามารถถูกยอมรับได้ในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัตินั้นแทบที่จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลย เพราะเครื่องส่งไม่สามารถรับรู้ข้อมูลของช่องสัญญาณได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เพราะเกิดปัญหาที่สำคัญสองประการ กล่าวคือการเหลื่อมกันทางเวลา (Delay) ระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ และเกิดสัญญาณรบกวนที่เครื่องส่ง (Noise) ดังนั้นการศึกษาสมรรถนะที่แท้จริงของระบบ MIMO ในสภาวะที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องศึกษา สำหรับงานวิจัยในโครงการนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ในหลายลักษณะ และได้พัฒนาเทคนิคการส่งข้อมูลที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสำหรับสภาวะช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ดังกล่าว

Abstract

Nowadays Multiple Input Multiple Output (MIMO) system is the most attractive technology because of its ability to transmit a higher data rate in comparing with Single Input Single Output (SISO) system. From literatures, most researches in this area are based on the significant assumption that transmitter perfectly known a Channel State Information (CSI). Under this assumption, the capacity of MIMO system can provide upto N times over SISO capacity, where N is a minimum number between antenna elements of transmitter and receiver. This assumption is acceptable in theoritical work but it is impossible to be occurred in practice. This is because transmitter cannot perfectly know CSI information due to time delays and noises in transmission. Therefore, the study of real performance under imperfect CSI condition is necessary. In this research project, the investigation into MIMO system under imperfect CSI has been examined in many aspects. Then the development of transmission technique has been appropiately proposed in order to fit such an imperfect CSI condition.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญรูปภาพ ..... ฉ
บทที่ 1 1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย 2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
บทที่ 2 3
2.1 กล่าวนำ 3
2.2 ความเป็นมาของระบบ MIMO ที่เกี่ยวกับโครงการวิจัย 3
2.3 ความจุของช่องสัญญาณในระบบ MIMO 5
2.4 กล่าวท้ายบท 12
บทที่ 3 13
3.1 กล่าวนำ 13
3.2 เทคนิคการส่งข้อมูลเมื่อภาคส่งรู้ข้อมูลของช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์ 14
3.3 เทคนิคการส่งข้อมูลเมื่อภาคส่งรู้ข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ 16
3.4 ผลของเทคนิคการส่งข้อมูลจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ 21
3.4.1 ผลกระทบต่อ Rice factor 21
3.4.2 ผลกระทบต่อจำนวนของสายอากาศภาคส่งและรับ 24
3.5 กล่าวท้ายบท 26
บทที่ 4 28

4.1 กล่าวนำ 28
4.2 การพัฒนาเทคนิคการส่งข้อมูลให้เหมาะสมต่อสภาวะการทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ 29
4.2.1 หลักการของเทคนิคการเข้ารหัสล่วงหน้า 29
4.2.2 ผลจากการจำลองแบบ 31
4.3 การพัฒนาเทคนิคการส่งข้อมูลให้เหมาะสมต่อสภาวะการทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ สำหรับผู้ใช้งานหลายคน 34
4.3.1 หลักการเทคนิคการเข้ารหัสล่วงหน้า สำหรับผู้ใช้งานหลายคน 35
4.3.2 ผลจากการจำลองแบบ 40
4.4 กล่าวท้ายบท 41
บทที่ 5 44
5.1 สรุป 44
5.2 ข้อแสนอแนะ 45
บรรณานุกรม 46
ภาคผนวก ก การวัดช่องสัญญาณในทางปฏิบัติ 50
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ 52
ประวัติผู้วิจัย 53

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2- 1 โครงสร้างของระบบ MIMO 5
รูปที่ 2- 2 การกระจายคลื่นในสิ่งแวดล้อมแบบภายในอาคาร 8
รูปที่ 2- 3 ความจุของช่องสัญญาณระบบMIMO ในช่องสัญญาณแบบ Rician เมื่อ SNR = 10dB, $N_R = N_T = 4$ 10
รูปที่ 2- 1 ความจุของช่องสัญญาณแบบ Outage capacity (bps/Hz) ในช่องสัญญาณแบบ Rayleigh เมื่อ $N_R = N_T = 4$ 11
รูปที่ 3- 1 ความจุของช่องสัญญาณระบบ MIMO ในกรณีที่ภาคส่งทราบและไม่ทราบข้อมูล CSI แบบสมบูรณ์ เมื่อ $N_R = N_T = 4$ 14
รูปที่ 3- 3 ขีดจำกัดบนของความจุของช่องสัญญาณด้วยการใช้เทคนิคการส่งข้อมูลทั้งสี่ตามสมการที่ (2-26) ถึง (2-29) สำหรับระบบ 2x2 และ 5x5 MIMO 15
รูปที่ 3- 2 การทำงานของระบบ MIMO แบบปรับตัวได้ (ภาคส่งทราบข้อมูลของช่องสัญญาณ CSI) 21
รูปที่ 3- 4 ค่าเฉลี่ยความจุของช่องสัญญาณด้วยการใช้เทคนิคการส่งข้อมูลทั้งสี่สำหรับระบบ 2x2 และ 5x5 MIMO 22
รูปที่ 3- 5 ขีดจำกัดบนของความจุของช่องสัญญาณจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ด้วยการใช้เทคนิคการส่งข้อมูลทั้งสี่สำหรับระบบ 2x2 และ 5x5 MIMO 23
รูปที่ 3- 7 ค่าเฉลี่ยความจุของช่องสัญญาณด้วยการใช้เทคนิคการส่งข้อมูลทั้งสี่เทคนิคจากการจำลองแบบ 24
รูปที่ 3- 6 ขีดจำกัดบนของความจุของช่องสัญญาณด้วยการใช้เทคนิคการส่งข้อมูลทั้งสี่ตามสมการที่ (2-26) ถึง (2-29) 25
รูปที่ 4- 1 เทคนิคการเข้ารหัสล่วงหน้าสำหรับระบบ MIMO แบบที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ 28
รูปที่ 4- 2 ความจุของช่องสัญญาณเฉลี่ย เมื่อ $N_R = N_T = 4$ และ $K = 0, 10$ 30
รูปที่ 4- 3 สมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาด เมื่อ $N_R = N_T = 2, 4$ และ $K = 0, 10$ 31
รูปที่ 4- 4 สมรรถนะของปริมาณบิตที่ส่งได้ เมื่อ $N_R = N_T = 2, 4$ และ $K = 0, 10$ 32

รูปที่ 4- 5 ระบบ MIMO ที่มีหนึ่งภาคส่งและ K ภาครับ 35
รูปที่ 4- 6 ผลกระทบของความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ เมื่อ $N_t = 7$, $K = 3$, $N_r = 3$, $\sigma_e^2 = 0$ (สภาวะสมบูณ์) และ 0.5 (ไม่สมบูรณ์) 36
รูปที่ 4- 7 สมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาดจากเทคนิคต่างๆ เมื่อ $N_t = 5, K = 3, N_r = 2$, $\sigma_e^2 = 0.1$ 38
รูปที่ 4- 8 สมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาดจากเทคนิคต่างๆ เมื่อ $N_t = 7, K = 3, N_r = 3$, $\sigma_e^2 = 0.1$ 39
รูปที่ 4- 9 สมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาดจากเทคนิคต่างๆ เมื่อ $N_t = 7, K = 3, N_r = 3$, $\sigma_e^2 = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5$ 40
รูปที่ ก- 1 วิธีการเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อใช้วัดช่องสัญญาณของระบบ MIMO 47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication) ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก อาทิเช่น การสื่อสารผ่านเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ (Mobile Communication Network) หรือเครือข่ายไร้สายท้องถิ่น (WLAN) ซึ่งทิศทางการวิจัยและพัฒนาของเทคโนโลยีในกลุ่มนี้เป็นไปในทิศทางเดียว คือต้องการพัฒนาการส่งและรับข้อมูลให้มีสมรรถนะที่สูงมากขึ้น ตัวอย่างเช่น การพัฒนาส่งการข้อมูลแบบไร้สายเพื่อรองรับข้อมูลจำนวนมากจากบริการอินเตอร์เน็ตไร้สาย (Wireless Internet) และการส่งข้อมูลด้วยอัตราการส่งข้อมูลความเร็วสูงสำหรับสื่อสั่งได้ (Multimedia on Demand) เพื่อเป็นการตอบสนองความต้องการเหล่านี้ การวิจัยและพัฒนาเพื่อหาเทคโนโลยีใหม่ที่สอดคล้องกับความต้องการทั้งหมดจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างมาก [1]

เทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจมากที่สุดในขณะนี้คือ ระบบการส่งและรับแบบหลายช่องทาง (Multiple Input Multiple Output, MIMO) เพราะว่าระบบนี้สามารถให้อัตราการส่งข้อมูลในปริมาณที่มากเมื่อเทียบกับการรับส่งแบบช่องทางเดียว (Single Input Single Output, SISO) อีกทั้งยังมีงานวิจัยในเชิงทฤษฎีอีกมากมายที่พิสูจน์ศักยภาพของระบบนี้ [2-3] อย่างไรก็ตามงานวิจัยเหล่านี้ได้ตั้งสมมุติฐานไว้หลายประการ ประการที่สำคัญประการหนึ่งคือสมมุติให้เครื่องส่งข้อมูลสามารถรู้ข้อมูลข่าวสารของช่องสัญญาณ (Channel State Information, CSI) ได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งภายใต้เงื่อนไขนี้สมรรถนะของระบบ MIMO สามารถให้อัตราการส่งข้อมูลได้สูงถึง N เท่าของระบบ SISO เมื่อ N คือจำนวนสายอากาศส่งและรับ ข้อสมมุตินี้สามารถถูกยอมรับได้ในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัตินั้นแทบที่จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลย เพราะเครื่องส่งไม่สามารถรับรู้ข้อมูลของช่องสัญญาณได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เพราะเกิดปัญหาที่สำคัญสองประการกล่าวคือการเหลื่อมกันทางเวลา (Delay) ระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ และเกิดสัญญาณรบกวนที่เครื่องส่ง (Noise) ดังนั้นการศึกษาสมรรถนะที่แท้จริงของระบบ MIMO ในสภาวะที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องศึกษา และนอกจากนี้การพัฒนาวิธีการส่งข้อมูลเพื่อให้เหมาะสำหรับสภาวะดังกล่าวก็เป็นที่น่าสนใจเป็นอย่างมากเช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อพัฒนาเทคนิคการส่งของระบบ MIMO ให้สามารถใช้งานในสิ่งแวดล้อมไร้สาย ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะต้องมีอัตราความผิดพลาดในการส่งข้อมูล (Bit Error Rate, BER) ที่ต่ำกว่าวิธีอื่นๆ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ศึกษาและพัฒนาเทคนิคการส่งของระบบ MIMO ภายใต้สภาวะต่างๆ โดยใช้การจำลองแบบ (Simulation Model) ของการสื่อสารไร้สาย ทั้งที่ทราบช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ ซึ่งแบบจำลองนี้จะถูกออกแบบและประมวลผลภายในคอมพิวเตอร์

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาและออกแบบจำลองระบบ MIMO
2. สร้างโปรแกรมจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม Matlab
3. ศึกษาผลกระทบของเทคนิคต่างๆ ในระบบ MIMO
4. พัฒนาเทคนิคของระบบ MIMO เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการ
5. ทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างเทคนิคที่พัฒนาขึ้น กับเทคนิคต่างๆ ในงานวรรณกรรมต่างๆ โดยใช้ผลจากการจำลองของโปรแกรม Matlab- ศึกษา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลสำเร็จของงานวิจัยในโครงการนี้ คือการได้มาซึ่งเทคนิคการส่งข้อมูลของระบบ MIMO แบบใหม่ที่เหมาะสมต่อทุกสภาวะของการทราบช่องสัญญาณทั้งแบบสมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ โดยที่ผลสำเร็จนี้จะนำประโยชน์มาสู่กลุ่มของนักวิจัยทั้งภาครัฐและเอกชนในกิจการโทรคมนาคม เพราะองค์ความรู้ของเทคนิคนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารไร้สายอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงการออกแบบสถาปัตยกรรมของอุปกรณ์ภายในเครื่องส่งและรับ ซึ่งนอกจากจะเป็นองค์ความรู้ใหม่ในการวิจัยแล้ว จะยังนำไปสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ได้อีกด้วย

บทที่ 2

หลักการพื้นฐานของระบบ MIMO

2.1 กล่าวนำ

เทคโนโลยีระบบการส่งและรับแบบหลายช่องทาง (Multiple Input Multiple Output ; MIMO) หรือที่เรียกว่าระบบ MIMO นั้นเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วทุกมุมโลก เนื่องจากความสามารถในการเพิ่มความจุของช่องสัญญาณและสามารถลดอัตราความผิดพลาดในการส่งข้อมูลได้พร้อมๆ กัน การอธิบายถึงหลักการทำงานทั้งหมดของระบบ MIMO นั้นจึงมีรายละเอียดมากมายหลายส่วน อาทิเช่น ส่วนของการเข้าและถอดรหัสเชิงตำแหน่งและเวลา (Space Time Coding) ส่วนของการประมาณช่องสัญญาณ (Channel Estimation) ส่วนของการออกแบบเพื่อเลือกใช้สายอากาศ (Antenna Section) ส่วนของการสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณ (Channel Modelling) และส่วนการออกแบบวิธีการส่งข้อมูล (Transmission Technique) เป็นต้น โดยที่แต่ละส่วนก็จะมีรายละเอียดเชิงลึกที่แตกต่างกัน ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงอธิบายเพียงแค่หลักการทำงานพื้นฐานของระบบ MIMO ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในโครงการนี้เท่านั้น อันได้แก่ การทำงานเบื้องต้นของเทคนิคการส่งข้อมูลระบบ MIMO ทั้งในสภาวะที่ทราบช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์และไม่สมบูรณ์

2.2 ความเป็นมาของระบบ MIMO ที่เกี่ยวกับโครงการวิจัย

ระบบ MIMO เป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบันนี้เนื่องจากความสามารถในการเพิ่มความจุของช่องสัญญาณและความน่าเชื่อถือในการสื่อสารไร้สายได้โดยปราศจากการใช้ทรัพยากรความถี่เพิ่มเติม [1]-[3] โดยระบบ MIMO ใช้สายอากาศหลายต้นทั้งสองด้านที่ภาคส่งและภาครับ ซึ่งต่างจากเทคโนโลยีเดิมที่ใช้ในระบบสื่อสารไร้สายประเภทระบบสายอากาศฉลาด (Smart Antenna System) ที่จะใช้สายอากาศหลายต้นแค่เพียงด้านเดียว ไม่ว่าจะเป็นที่ภาคส่งอย่างเดียวหรือภาครับอย่างเดียวก็ตาม โดยที่ระบบ MIMO นี้จะสามารถดึงความสามารถทั้งการมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing) และไดเวอร์ซิตี้ (Diversity) ได้นั้นจะต้องขึ้นอยู่กับสองปัจจัยที่สำคัญคือ คุณสมบัติของช่องสัญญาณ และเทคนิคการส่งรับข้อมูล

สำหรับสภาวะช่องสัญญาณที่มีได้รับผลกระทบอย่างมากจากการเฟดจากสัญญาณหลายวิถี (Multipath Fading) หรือเรียกสภาวะช่องสัญญาณแบบนี้ว่าเป็นช่องสัญญาณแบบ Rayleigh Fading Channel

ในช่องสัญญาณแบบนี้ระบบ MIMO สามารถเพิ่มความจุของช่องสัญญาณได้ด้วยการส่งข้อมูลที่แตกต่างกันและไม่สัมพันธ์กัน ออกไปที่สายอากาศภาคส่งหลายๆ ต้นพร้อมๆกัน เรียกเทคนิคการส่งข้อมูลแบบนี้ว่าการส่งข้อมูลแบบอิสระ (Independent Transmission) ข้อดีของการส่งข้อมูลแบบนี้คือภาคส่งไม่มีความจำเป็นที่ต้องทราบข้อมูลของช่องสัญญาณก่อนส่งออกไป เทคนิคการส่งข้อมูลแบบอิสระนี้ได้รับการพิสูจน์ยืนยันความสำเร็จทางทฤษฎีจากงานวิจัยมากมาย [4]-[7]

อย่างไรก็ตามสภาวะของช่องสัญญาณไม่เป็นแบบ Rayleigh เสมอไป เพราะว่าช่องสัญญาณในการใช้งานจริงนั้นมักจะประกอบขึ้นด้วยสัญญาณจากแนวสายตา (Line of Sight; LOS) และสัญญาณนอกแนวสายตา (Non line of Sight; NLOS) ส่วนผสมของสององค์ประกอบนี้มักจะทำให้ช่องสัญญาณไม่เป็นแบบ Rayleigh ดังนั้นเทคนิคการส่งข้อมูลแบบอิสระนั้นไม่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว เพราะไม่สามารถให้ความจุของช่องสัญญาณได้มากที่สุดเหมือนของช่องสัญญาณ Rayleigh จึงมีงานวิจัยมากมายพยายามพัฒนาเทคนิคการส่งรับข้อมูลแบบต่างๆ เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพให้เหมาะสมกับช่องสัญญาณในสถานการณ์จริง

เทคนิคการส่งข้อมูลที่เหมือนกันหรือมีความสัมพันธ์กันออกไปในสายอากาศหลายๆ ต้นที่ภาคส่งนั้นก็เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่นิยมมาก เรียกเทคนิคนี้ว่าการส่งข้อมูลแบบไม่อิสระ (Dependent Transmission) เทคนิคนี้จะทำให้ผลรวมของอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio; SNR) สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ความจุช่องสัญญาณสูงขึ้นตามไปด้วย แต่เทคนิคนี้เหมาะกับช่องสัญญาณแบบ LOS เท่านั้น ไม่เหมาะกับช่องสัญญาณที่มีส่วนผสมของ LOS และ NLOS

โดยทั่วไปช่องสัญญาณที่ประกอบด้วย LOS และ NLOS เรียกว่าช่องสัญญาณแบบ Rician Fading Channel ดังนั้นเทคนิคที่พัฒนาขึ้นจะต้องสามารถรองรับช่องสัญญาณแบบ Rician และยังต้องสามารถปรับตัวได้สำหรับสภาวะที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ด้วย [8]-[9] เพราะว่าในสถานการณ์จริงการรับรู้ข้อมูลของช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์แทบจะเป็นไปไม่ได้เลย ด้วยเหตุผลที่กล่าวไปแล้วในตอนต้น สำหรับระบบที่สามารถปรับตัวได้ตามสภาวะการรับรู้ช่องสัญญาณนั้นได้ถูกพิจารณาว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีในการเพิ่มคุณภาพของการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารไร้สายอื่นๆ [9]-[11] ในทางปฏิบัติแล้วมาตรฐานต่างๆ ก็นิยมใช้หลักการปรับตัวนี้เช่นกัน อาทิเช่น Enhanced Data GSM Evolution (EDGE) [12] Code Division Multiplexing Access 2000 (CDMA2000) [13] General Packet Radio System 136 (GPRS-136) [14] High Performance Radio Local Area Network type II (HIPEERLAN II) [15] Universal Mobile Telecommunication System with High Speed Downlink Packet Access (UMTS-HSDPA) [16]

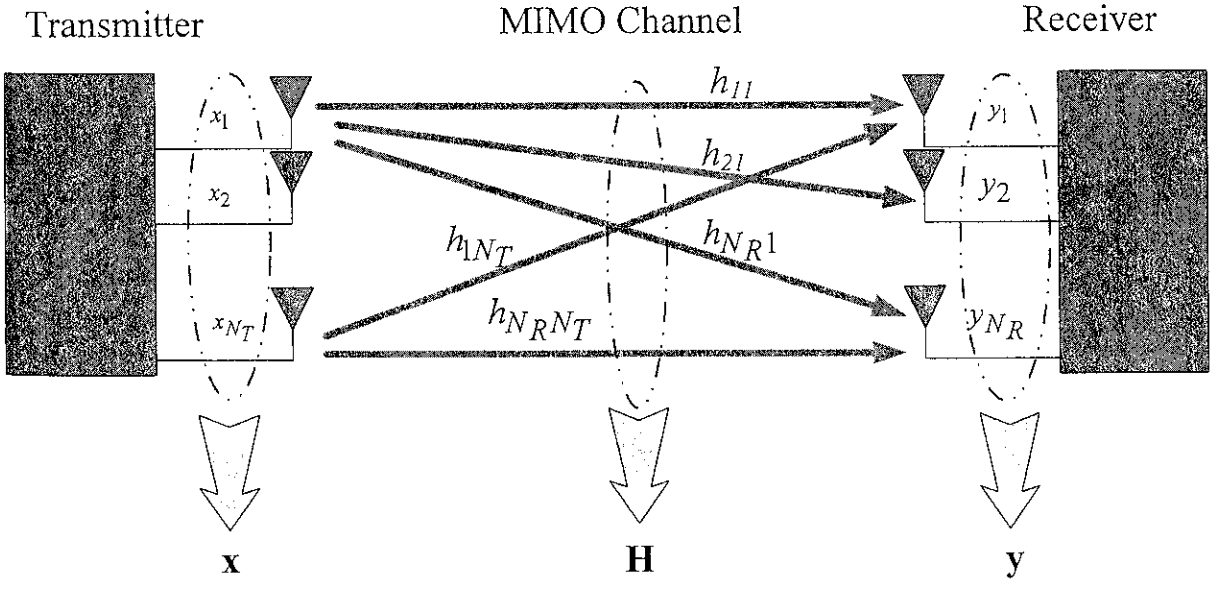
สำหรับในระบบ MIMO เทคนิคการส่งข้อมูลที่สามารถปรับตัวได้เมื่อทราบสภาวะของช่องสัญญาณนั้นนิยมใช้หลักการ Water Filling (WF) [2],[8] โดยที่เทคนิคนี้ภาคส่งจะต้องรู้ข้อมูลของช่องสัญญาณแบบ

สมบูรณ์เท่านั้น ผลของการใช้เทคนิคนี้จะทำให้ความจุของช่องสัญญาณสูงขึ้นอย่างมาก แต่ปัญหาคือในทางปฏิบัตินั้นภาคส่งจะรู้ช่องสัญญาณได้จากการส่งข้อมูลนี้กลับมาจากภาครับ ทำให้เกิดความผิดพลาดในการทราบข้อมูลของช่องสัญญาณในหลายๆ ขั้นตอน เช่น ความผิดพลาดของการประมาณช่องสัญญาณ ความผิดพลาดจากการหน่วงเวลาในการส่งข้อมูลกลับมา และความผิดพลาดในการอ่านข้อมูลที่ภาครับ ดังนั้นเทคนิคการส่งข้อมูลด้วยวิธี WF นั้นจึงไม่สามารถใช้งานจริงได้ จำเป็นที่ต้องพัฒนาเทคนิคอื่นๆ ที่สามารถรองรับการรับรู้ช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ได้

2.3 ความจุของช่องสัญญาณในระบบ MIMO

โครงสร้างของระบบ MIMO ที่พิจารณาเฉพาะแถบความถี่แคบ (Narrowband) ถูกแสดงในรูปที่ 2- 1 จากรูประบบ MIMO ประกอบด้วยจำนวนของสายอากาศที่ภาคส่ง N_T ต้น และสายอากาศที่ภาครับ N_R ต้น โดยที่ช่องสัญญาณสามารถจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ **H**

ข้อดีของระบบ MIMO ที่เหนือกว่าระบบ SISO ได้ถูกพิสูจน์ทางทฤษฎีแล้วในงานวิจัยของ Teletar [2] โดยในงานวิจัยนั้นมีการสมมุติให้ช่องสัญญาณ **H** มีการกระจายตัวแบบอิสระที่เหมือนกัน (identically independent distributed; i.i.d.) ด้วยกระบวนการแบบ Complex Gaussian ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และค่าความแปรปรวนของส่วนจริงเท่ากับส่วนจินตภาพที่ 0.5



รูปที่ 2- 2 โครงสร้างของระบบ MIMO

ดังนั้นเท่ากับว่าช่องสัญญาณนี้มีขนาดของแอมปิจูดเป็นแบบ Rayleigh และมุมเฟสเป็นแบบ Uniform ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวนี้ค่าความจุของช่องสัญญาณสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-1)

$$C = \max_{tr\{\mathbf{Q}\} \le P_T ; q_{nn} \ge 0} E_{\mathbf{H}} \left\{ \log_2 \det(\mathbf{I}_{N_R} + \frac{1}{P_N} \mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{H}^{\dagger}) \right\} \qquad (2\text{-}1)$$

โดยที่ $\mathbf{Q}$ คือเมตริกซ์ Covariance ของข้อมูลที่ส่งจากภาคส่งดังแสดงด้วยความสัมพันธ์ $\mathbf{Q} = E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^{\dagger}\}$, $E\{\cdot\}$ คือการดำเนินการของ Expectation ตามเวลาและ $E_{\mathbf{H}}\{\cdot\}$ คือการดำเนินการทาง Expectation ตามช่องสัญญาณ $\mathbf{H}$ และ q_{nn} คือสมาชิกในเมตริกซ์ $\mathbf{Q}$ ที่แถว nth และหลัก nth

เพราะว่าคุณลักษณะของเมตริกซ์ $\mathbf{H}$ เป็นกระบวนการแบบสุ่ม การประเมินสมรรถนะของระบบ MIMO จึงใช้ค่าของความจุช่องสัญญาณทางสถิติ ที่นิยมใช้เรียกว่าความจุของช่องสัญญาณนอกพิสัย (Outage Capacity) โดยที่ความจุของช่องสัญญาณนอกพิสัย C_{out} มีความสัมพันธ์กับความน่าจะเป็นนอกพิสัย P_{out} ซึ่งเป็นความน่าจะเป็นที่ความจุของช่องสัญญาณ C มีค่าต่ำกว่าค่าของ C_{out} ดังแสดงเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$P_{out} = P(C < C_{out}) = 1 - P(C > C_{out}) \qquad (2\text{-}2)$$

จากสมการที่ (2-1) ค่าความจุของช่องสัญญาณจะขึ้นกับคุณสมบัติของเมตริกซ์ $\mathbf{Q}$ ที่กำหนดถึงวิธีการส่งข้อมูลของสัญญาณ สำหรับกรณีที่แต่ละก้านของสายอากาศที่มีข้อมูล $x_1, x_2, ..., x_{N_T}$ เป็นอิสระต่อกันด้วยกำลังส่งเท่าๆ กัน ค่าเมตริกซ์ Covariance $\mathbf{Q}$ จะมีค่าเท่ากับเมตริกซ์เอกลักษณ์ที่มีขนาด $N_T \times N_T$ แต่ถูกกำหนดกำลังส่งด้วยขนาด P_T / N_T ในกรณีนี้สัญญาณที่ส่งข้อมูลออกไปในแต่ละก้านของสายอากาศจะเป็นอิสระต่อกันดังนั้นความจุของช่องสัญญาณในสมการที่ (2-1) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2-3).

$$C = E_{\mathbf{H}} \left\{ \log_2 \det(\mathbf{I}_{N_R} + \frac{\rho}{N_T} \mathbf{H}\mathbf{H}^{\dagger}) \right\} \qquad (2\text{-}3)$$

สมการด้านบนนี้สามารถทำให้ง่ายขึ้นได้ด้วยการพิจารณาพจน์ของ $\mathbf{HH}^{\dagger}$ ให้เป็นเมตริกซ์แบบ Wishart matrix ด้วยค่า eigenvalues $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_N$ และประกอบกับการใช้คุณสมบัติของการทำดีเทอร์มิเน็นที่ det(**I** +**AB**) = det(**I**+**BA**) จะได้ว่าสมการที่ (2-3) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2-4)

$$C = E_{\lambda}\left\{\sum_{n=1}^{N}\log_2(1+\frac{\rho}{N_T}\lambda_n)\right\} \tag{2-4}$$

เมื่อ N คือค่าที่น้อยที่สุดระหว่างจำนวนของสายอากาศภาคส่ง N_T และจำนวนของสายอากาศภาครับ N_R λ_n แสดงถึงอัตราขยายกำลังของช่องสัญญาณในลำดับที่ nth ของสมาชิกในแนวแทยงมุมของเมตริกซ์ $\mathbf{HH}^{\dagger}$ สำหรับกรณีที่ $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_N$ มีการกระจายตัวทางสถิติเท่ากัน สมการที่ (2-4) สามารถลดรูปเหลือเพียงแค่

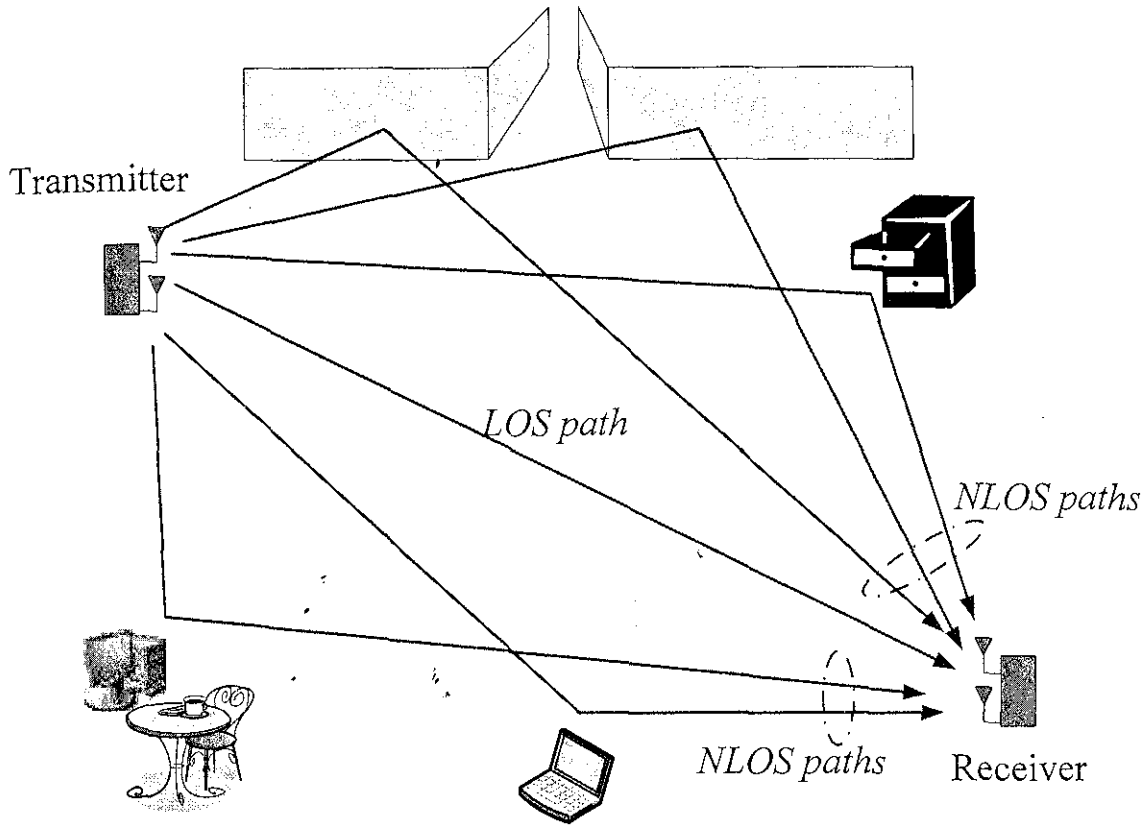
$$C = N \cdot E_{\lambda}\left\{\log_2(1+\frac{\rho}{N_T}\lambda_1)\right\} \tag{2-5}$$

ผลจากสมการที่ (2-5) แสดงให้เห็นว่า เมื่อ $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_N$ เท่ากันความจุของช่องสัญญาณในระบบ MIMO จะมีค่าเป็นจำนวน N เท่าของความจุของช่องสัญญาณในระบบ SISO ข้อสรุปนี้ตรงกับงานวิจัยหลายๆ ชิ้นจากทุกมุมโลก และเป็นสิ่งที่ทำให้ระบบ MIMO ได้รับความสนใจมากว่าระบบ SISO แต่ทว่าข้อสรุปนี้อยู่บนพื้นฐานของสมมุติฐานที่สำคัญ สองประการคือ

1. เมตริกซ์ช่องสัญญาณ **H** ต้องเป็นช่องสัญญาณแบบ i.i.d. Rayleigh channel
2. เมตริกซ์ **Q** จะต้องเป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์

จากข้อสมมุติฐานสองประการนี้ทำให้มีสิ่งน่าสงสัยว่าในสถานการณ์จริงนั้นสมมุติฐานเหล่านี้ยังคงเป็นจริงได้หรือไม่ สำหรับสมมุติฐานที่ว่าช่องสัญญาณเป็น Rayleigh channel นั้นมีความเป็นไปได้มาก สำหรับสถานการณ์ที่ใช้ระบบ MIMO ภายในตัวอาคารเพราะบางตำแหน่งสัญญาณ LOS สามารถละเลยได้ อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีทั่วไปนั้นสัญญาณที่ได้รับจากการกระจายคลื่นในสิ่งแวดล้อมนั้นย่อมไม่เป็นกรณีของ Rayleigh เสมอไป

รูปที่ 2- 2 แสดงถึงกรณีทั่วๆไปที่สัญญาณที่รับได้จะเป็นผลของการรวมกันของสัญญาณจากเส้นทางของ LOS และ NLOS สำหรับสัญญาณที่มาจาก NLOS นั้นเกิดจากลักษณะทางกายภาพที่สัญญาณที่ส่งออกมาไปกระทำกับวัตถุต่างๆ อาทิเช่น กำแพง โต๊ะ ชั้นวางหนังสือ หรือมนุษย์ที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ การกระทำที่



รูปที่ 2- 3 การกระจายคลื่นในสิ่งแวดล้อมแบบภายในอาคาร

เกิดขึ้นกับวัตถุนี้มีปรากฏการณ์ทั้งหมด 3 อย่างคือ การสะท้อน (Reflection) การเลี้ยวเบน(Diffraction) และการกระเจิง (Scattering)

การสะท้อนเกิดขึ้นเมื่อมีสัญญาณจากภาคส่งไปตกกระทบกับวัตถุทางกายภาพซึ่งมีลักษณะพื้นผิวที่ใหญ่เทียบกับความยาวคลื่นพาห์ ส่วนการเลี้ยวเบนนั้นเป็นผลเนื่องมาจากคลื่นเดินทางโค้งอ้อมวัตถุที่กีดขวางอยู่ โดยมากแล้วพื้นผิวที่เกิดการเลี้ยวเบนจะมีลักษณะเป็นปลายแหลม ขอบ หรือมุม สำหรับการกระเจิงนั้นเกิดขึ้นจากขนาดทางกายภาพของวัตถุมีขนาดเล็กว่าความยาวคลื่นพาห์ เมื่อกล่าวโดยรวมแล้วผลจากปรากฏการณ์ทั้งสามอย่างนี้จะมีส่วนร่วมกันทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณรับได้ที่ภาครับ และเป็นปัจจัยโดยตรงที่มีผลต่อคุณสมบัติของช่องสัญญาณในระบบ MIMO สำหรับสัญญาณที่เดินทางในเส้นทางของ NLOS นั้นมักจะเกิดขึ้นภาคในตัวอาคารเสมอเนื่องจากมีวัตถุต่างๆ มากมาย ดังนั้นช่องสัญญาณของระบบ MIMO จึงเป็นภาพรวมของสัญญาณจากทั้ง LOS และ NLOS และทำให้ช่องสัญญาณเปลี่ยนคุณลักษณะจาก Rayleigh ไปเป็น Rician

มีงานวิจัยหลายแห่ง [6],[7],[17],[18] ได้พิจารณาความจุของช่องสัญญาณในระบบ MIMO ภายใต้เงื่อนไขของ Rician แทนที่จะใช้ Rayleigh โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Kang [6] ได้พิสูจน์และสร้าง Moment Generating Function (MGF) ที่แม่นยำขึ้นสำหรับ Mutual Information ของช่องสัญญาณแบบ Rician ทำให้สามารถใช้ MGF เพื่อหาความจุของช่องสัญญาณเฉลี่ยได้ ส่วนงานวิจัยของ Smith [17] ได้แสดงให้เห็นว่าการประมาณ Gaussian นั้นสามารถใช้งานได้ดีในระบบ MIMO แบบช่องสัญญาณ Rician และการประมาณ Gaussian สำหรับ mutual information ของ Rician MIMO channel ด้วย rank-one mean matrix ได้ถูกศึกษาและอธิบายในงานวิจัยของ Hansen [18] เพื่อหาความจุของช่องสัญญาณออกมา แต่งานวิจัยที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคืองานของ Jayaweera [7] ที่ได้สร้างสมการความจุของช่องสัญญาณในระบบ MIMO ด้วยการใช้ probability density function ของ non central Wishart matrix โดยสรุปนั้นงานวิจัยที่กล่าวแล้วทั้งหมดนี้จะสามารถหาค่าของความจุของช่องสัญญาณในสภาวะของ Rician แทนที่การใช้ Rayleigh distribution ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน แต่ก็ยังคงต้องใช้คุณสมบัติที่เหมือนกับของช่องสัญญาณ $\mathbf{H}$ ซึ่งสมาชิกในเมตริกซ์มีผลตอบของช่องสัญญาณ h_{rt} (entry of $\mathbf{H}$) ที่ถูกกำหนดด้วยสมการ (2-6)

$$h_{rt} = \mathrm{Re}\{h_{rt}\} + j\,\mathrm{Im}\{h_{rt}\} \tag{2-6}$$

เมื่อ $\mathrm{Re}\{h_{rt}\}$ และ $\mathrm{Im}\{h_{rt}\}$ คือส่วนจริงและส่วนจินตภาพของ h_{rt} ทั้งสองส่วนนี้เป็นอิสระต่อกัน และมีฟังชันก์การจะกายตัวของความน่าจะเป็น (probability density function (*pdf*)) ดังแสดงในสมการ (2-7) และ (2-8)

$$pdf(\mathrm{Re}\{h_{rt}\}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{(\mathrm{Re}\{h_{rt}\}-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{2-7}$$

$$pdf(\mathrm{Im}\{h_{rt}\}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{(\mathrm{Im}\{h_{rt}\}-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{2-8}$$

เมื่อ μ คือค่าเฉลี่ย และ σ^2 คือความแปรปรวน

อีกนัยหนึ่ง ค่าขนาดของ h_{rt} สามารถกำหนดได้ด้วยการกระจายแบบ Rician *pdf* ดังแสดงใน (2-9)

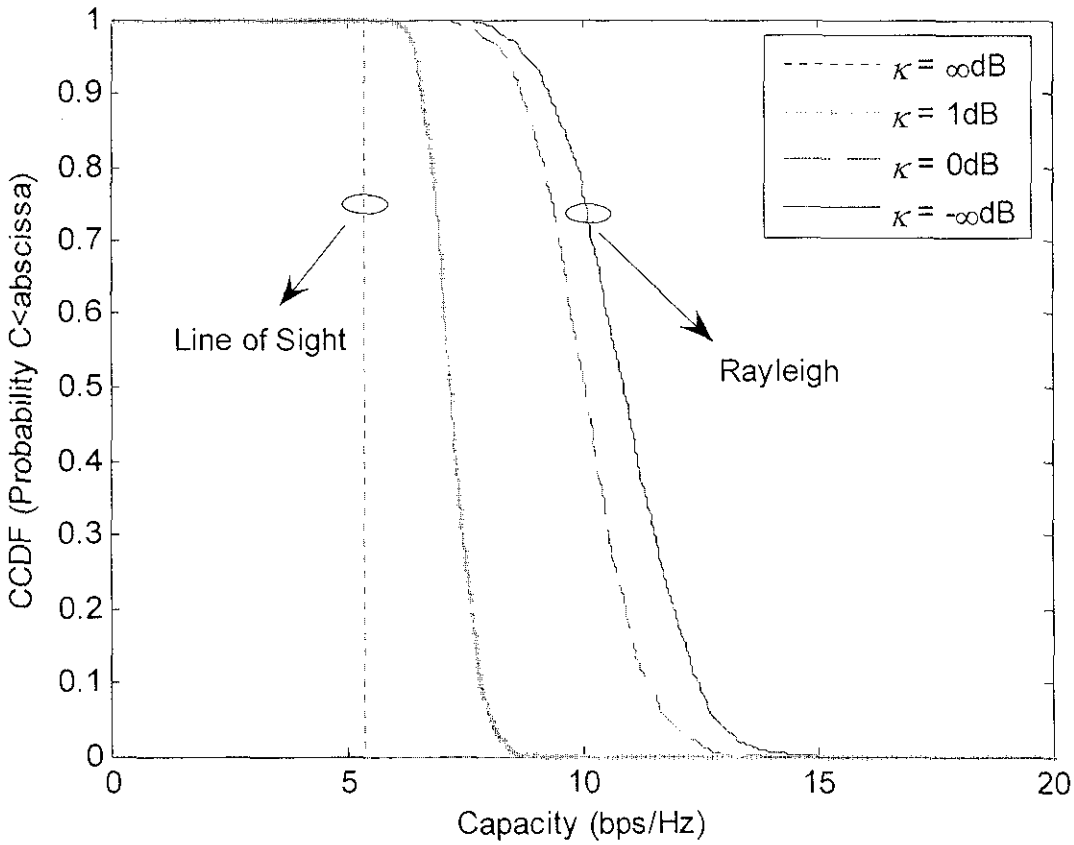
$$pdf(\|h_{rt}\|) = 2\|h_{rt}\|(1+\kappa)\exp\left(-(1+\kappa)\|h_{rt}\|^2 - \kappa\right)I_0\left(2\sqrt{\kappa(1+\kappa)}\|h_{rt}\|\right) \tag{2-9}$$

เมื่อ I_0 คือ zeroth order modified Bessel function ของ first kind [19] และRician K factor ถูกกำหนดด้วยสมการที่ (2-10)

$$\kappa = \frac{\mu^2}{2\sigma^2} \tag{2-10}$$

สมมุติฐานของ Rice สำหรับช่องสัญญาณแทนที่จะใช้ Rayleigh channel conditions นั้นถูกพิจารณาว่ามีผลกระทบต่อความจุของช่องสัญญาณในระบบ MIMO โดยตรง ผลกระทบนี้แสดงในรูปที่ 2- 3 ซึ่งแสดงถึง Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF) ของความจุของช่องสัญญาณในระบบ MIMO แปรผันกับตัวแปร Rice factor ผลที่แสดงนี้นำมาจากสมการ (2-2)

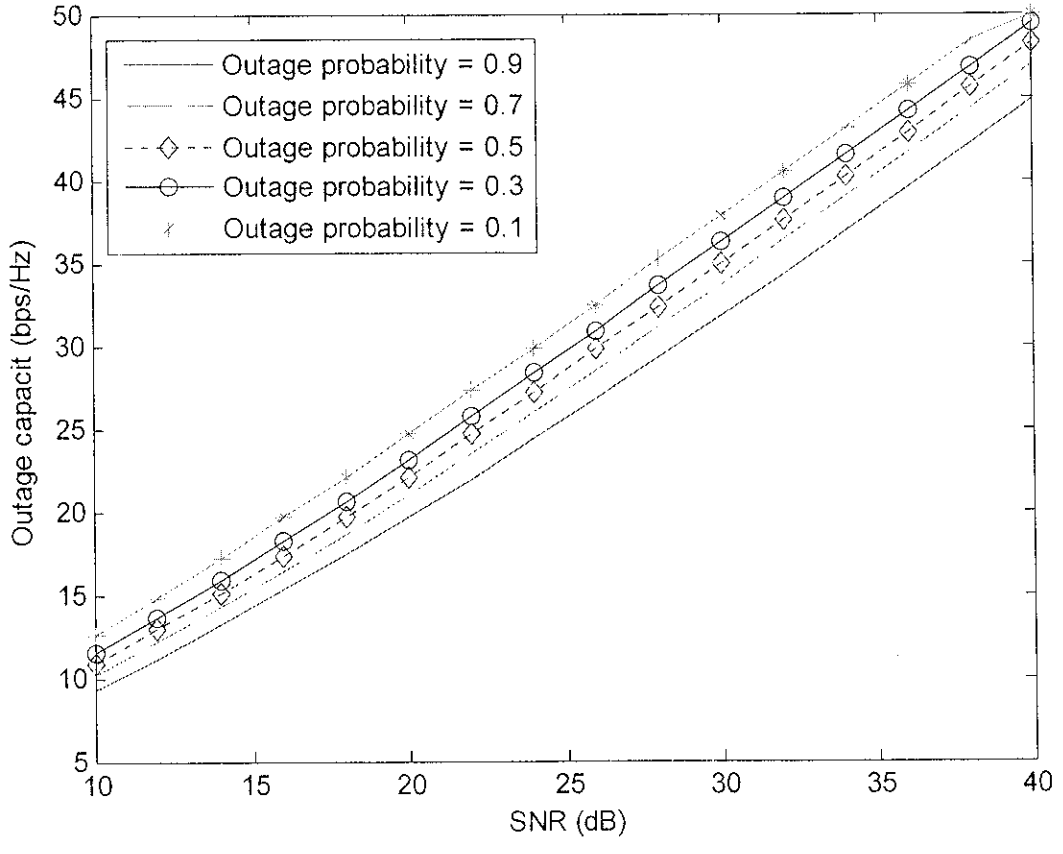
จากรูปที่ 2- 3 ค่าความจุของช่องสัญญาณต่ำกว่าเมื่อ Rice factor เพิ่มขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายด้วยความ



รูปที่ 2- 4 ความจุของช่องสัญญาณระบบMIMO ในช่องสัญญาณแบบ Rician เมื่อ SNR = 10dB, $N_R = N_T = 4$

จริงที่ว่าองค์ประกอบในเส้นทาง LOS มีอิทธิพลมากกว่า ทำให้ความเป็นอิสระต่อกันและกันในสมาชิกของเมตริกซ์ **H** ลดลง ผลก็คือค่า eigenvalues ของ $\mathbf{HH}^{\dagger}$ ในสมการที่ (2-4) มีค่าไม่เท่ากัน และนี้ก็คือสาเหตุที่ทำให้ความจุลดลงนั้นเอง

เพื่อความสมบูรณ์ของงานวิจัยรูปที่ 2.4 แสดงถึง Outage capacity ของ Outage Probability ที่ค่าต่างๆ กัน จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่า เมื่อ Outage probability มีค่า สูงขึ้นค่าความจุของช่องสัญญาณเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะจะมีโอกาสที่จะส่งข้อมูลด้วยปริมาณผิดพลาดได้เพิ่มขึ้น ถ้าช่องความจุของสัญญาณเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าค่าความจุนี้เป็นความสัมพันธ์ที่ขึ้นกับความน่าจะเป็นดังนั้นการใช้เพียงค่าเฉลี่ยที่เป็นค่ากลางของความจุ ถือว่าเป็นตัวแทนที่เพียงพอสำหรับการพิจารณาสมรรถนะในระบบ MIMO ดังนั้นผลการจำลองแบบต่อไปนี้จะใช้ค่าเฉลี่ยเพียงค่าเดียวเพื่อเปรียบเทียบปริมาณความจุของช่องสัญญาณ



รูปที่ 2- 5 ความจุของช่องสัญญาณแบบ Outage capacity (bps/Hz) ในช่องสัญญาณแบบ Rayleigh เมื่อ $N_R = N_T = 4$

2.4 กล่าวท้ายบท

จากการพิสูจน์ทางทฤษฎีพบว่าค่าความจุของช่องสัญญาณในระบบ MIMO มีค่าเป็นจำนวน N เท่าของระบบปกติ ซึ่งค่า N นั้นขึ้นกับจำนวนของสายอากาศภาคส่งและภาครับ ทำให้ระบบ MIMO นั้นเป็นที่น่าสนใจสำหรับอนาคต แต่ความจุของช่องสัญญาณนั้นขึ้นกับปัจจัยหลักสองประการคือ คุณลักษณะของช่องสัญญาณในรูปของเมตริกซ์ **H** และเทคนิคการส่งข้อมูลในรูปของค่าเมตริกซ์ Covariance **Q** สำหรับช่องสัญญาณ **H** นั้นมีคุณลักษณะที่เปลี่ยนไปตามลักษณะสิ่งแวดล้อมในการสื่อสารไร้สายนั้น โดยมีผลกระทบหลักๆ จากการสะท้อน เลี้ยวเบนและกระเจิง จึงทำให้รูปแบบการกระจายตัวทางคณิตศาสตร์สามารถใช้แบบจำลอง Rician fading channel แทนได้ ผลจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของความจุของช่องสัญญาณนั้นอ่อนไหวต่อลักษณะของช่องสัญญาณมาก ดังนั้นจึงจำเป็นที่ต้องมีการปรับเปลี่ยนเทศนิคการส่งข้อมูลที่ภาคส่งเพื่อให้สอดคล้องต่อช่องสัญญาณนั้นๆ อันจะทำให้เกิดความจุของช่องสัญญาณที่มากที่สุดได้ รายละเอียดของเทคนิคเหล่านี้จะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 3

เทคนิคการส่งข้อมูลเมื่อภาคส่งทราบข้อมูลของช่องสัญญาณ

3.1 กล่าวนำ

จากผลในบทที่แล้วสามารถสรุปได้ว่า สำหรับการกำหนดค่าคงที่ให้ **Q** (กำหนดไว้ให้สัญญาณที่ภาคส่งในแต่ละก้านของสายอากาศเป็นอิสระซึ่งกันและกัน) ความจุของช่องสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ **H** ตัวอย่างจากรูปที่ 2- 3 เมื่อพิจารณาที่ SNR ใดๆ จะพบว่าความจุของช่องสัญญาณจะลดลงเมื่อมีสัญญาณ LOS เพิ่มมากขึ้น แต่จากที่กล่าวไว้ในบทที่แล้ว ความจุของช่องสัญญาณนั้นไม่ได้ขึ้นกับ **H** เพียงอย่างเดียวแต่ขึ้นกับเทคนิคการส่งข้อมูล หรือ **Q** ด้วย

ในบทนี้จะอธิบายถึงผลกระทบของความจุของช่องสัญญาณที่มีจากการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของ **Q** (มีความหมายเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงเทคนิคการส่งข้อมูล) กล่าวคือเมตริกซ์ **Q** สามารถถูกปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมตามการเปลี่ยนแปลงของ **H** เพื่อให้ได้ค่าความจุของช่องสัญญาณในระบบ MIMO ดีขึ้น แต่การที่จะปรับเปลี่ยนค่า **Q** นั้นจะต้องอาศัยการรู้ค่าข้อมูลของช่องสัญญาณที่ภาคส่ง สำหรับวิธีที่เป็นที่รู้จักดีในการปรับ **Q** ของระบบ MIMO ตามข้อมูลช่องสัญญาณนั้นคือ Water Filling (WF) algorithm [2], [8] อัลกอริทึมนี้อยู่บนสมมุติฐานที่ทั้งภาครับและภาคส่งรู้ข้อมูลของช่องสัญญาณที่สมบูรณ์และครบถ้วน แต่ในความเป็นจริงแล้วแทบที่จะเป็นไปไม่ได้เลยสำหรับภาคส่งที่จะรู้ข้อมูลได้อย่างสมบูรณ์ ทางเลือกอื่นที่เป็นไปได้คือหาเทคนิคการส่งข้อมูลใหม่ที่ไม่ต้องการรู้ข้อมูลอย่างสมบูรณ์ที่ภาคส่ง Jayaweera [7], [20] ได้เสนอเทคนิคในการส่งข้อมูลแบบปรับตัวโดยขึ้นอยู่กับข้อมูลแค่ Rice factor เท่านั้นที่ภาคส่ง แต่เทคนิคนี้ไม่สามารถให้ค่าความจุของช่องสัญญาณที่ดีที่สุดได้ ต่อมางานวิจัยของ Uthansakul [21] ได้เสนอว่าภาคส่งควรต้องรู้ค่าทั้ง Rice factor และ SNR ถึงจะทำให้ได้เทคนิคการส่งข้อมูลที่สามารถรองรับความจุของช่องสัญญาณที่ดีที่สุดได้ ผลในการจำลองแบบพบว่าเทคนิคของ Uthanskul นี้สามารถให้ความจุของช่องสัญญาณสูงที่สุดและสูงกว่าของ Jayaweera [7], [20] ซึ่งจะลงในรายละเอียดของเทคนิคในหัวข้อถัดไป

3.2 เทคนิคการส่งข้อมูลเมื่อภาคส่งรู้ข้อมูลของช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์

ก่อนที่จะอธิบายถึงเทคนิคนั้นขั้นแรกจะขออธิบายถึงการทำงานของระบบ MIMO แบบปรับตัวได้ที่สมมุติให้ภาคส่งสามารถรับรู้ข้อมูลของช่องสัญญาณได้อย่างสมบูรณ์และครบถ้วน กรณีเช่นนี้ช่องสัญญาณจะถือว่าเป็นช่องสัญญาณที่ถูกรับรู้ได้ หรือกำหนดแน่นอนได้สำหรับทั้งภาคส่งและรับ ด้วยการใช้ทฤษฎี Singular Value Decomposition (SVD) theorem ช่องสัญญาณ $\mathbf{H}$ สามารถถูกพิจารณาได้เป็น

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^{\dagger} \tag{3-1}$$

เมื่อ $\mathbf{U}$ และ $\mathbf{V}$ คือ unitary matrices และ $\mathbf{D}$ คือ non-negative diagonal matrix ที่มีสมาชิกในแนวทแยงเป็นรากที่สองของค่า eigenvalues ($\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \ldots, \sqrt{\lambda_N}$) ของ $\mathbf{H}^{\dagger}\mathbf{H}$

ดังนั้นเมื่อนำ (3-1) ไปพิจารณาใหม่ในสมการตั้งต้นของระบบ MIMO จะทำให้เขียนสมการของสัญญาณภาครับใหม่ได้ดังนี้

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{D} \cdot \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{n}} \tag{3-2}$$

เมื่อ $\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{U}^{\dagger}\mathbf{y}$, $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{U}^{\dagger}\mathbf{x}$ และ $\tilde{\mathbf{n}} = \mathbf{U}^{\dagger}\mathbf{n}$ โดยที่ $\mathbf{Q} = E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^{\dagger}\} = E\{\tilde{\mathbf{x}}\tilde{\mathbf{x}}^{\dagger}\}$.

จากสมการที่ (3-2) ความจุของช่องสัญญาณสามารถหาได้ด้วยสมการใหม่ดังแสดงใน (3-3)

$$C = \sum_{n=1}^{N} \log_2 (1 + \frac{q_{nn}}{P_N} \lambda_n) \tag{3-3}$$

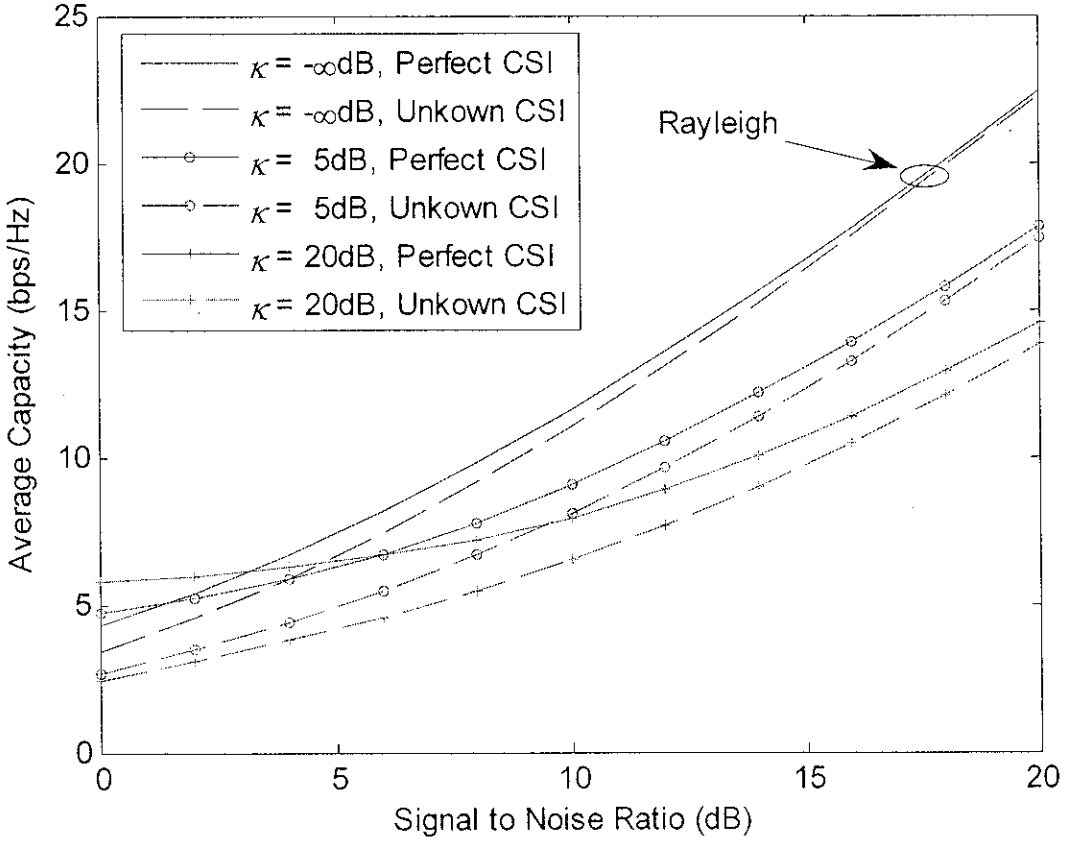
จากนั้นประยุกต์เทคนิคแบบ Lagrange multiplier method [22] เข้าไปใน (3-3) ค่า covariance ของข้อมูลที่ถูกส่งออกไป q_{nn} สามารถกำหนดได้ด้วยสมการ (3-4)

$$q_{nn} = \mu_c - \frac{P_N}{\lambda_n} \tag{3-4}$$

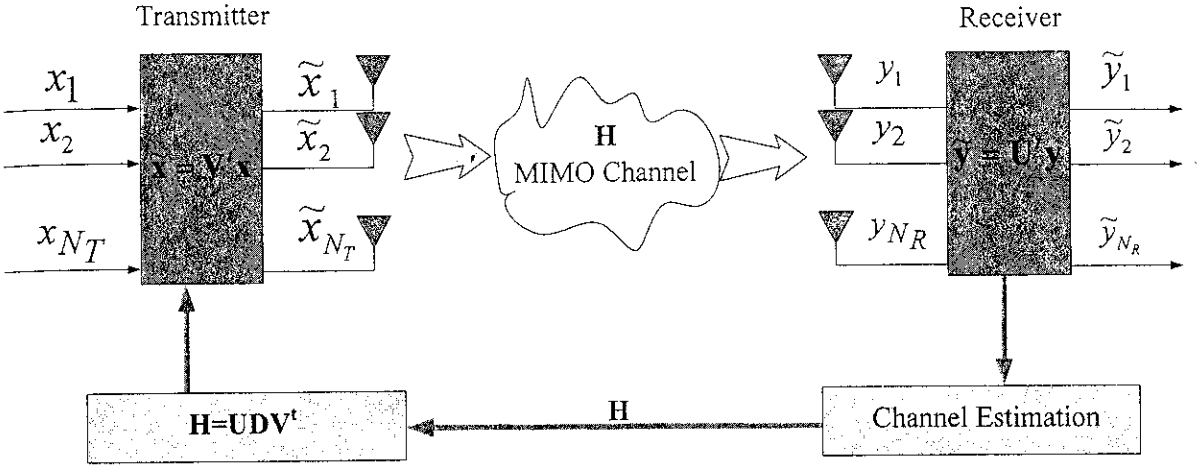
เมื่อ μ_c ถูกเลือกเพื่อให้เงื่อนไข $\sum_{n=1}^{N} q_{nn} = P_T$ เป็นจริง

รูปที่ 3- 1 แสดงถึงความจุของช่องสัญญาณในระบบ MIMO ทั้งกรณีที่ภาคส่งรู้และไม่รู้ข้อมูลของช่องสัญญาณ (CSI) แบบสมบูรณ์

สมรรถนะของระบบ MIMO ในกรณีที่ภาคส่งรู้ข้อมูล CSI นั้นดีกว่ากรณีที่ไม่รู้ข้อมูล หรืออาจกล่าวได้ว่าระบบ MIMO แบบปรับตัวได้ (Adaptive MIMO system) นั้นให้ความจุของช่องสัญญาณที่ดีกว่า โดยที่ความแตกต่างระหว่างระบบแบบปรับตัวและไม่ปรับตัวนั้นน้อยลงเมื่อช่องสัญญาณเข้าใกล้ Rayleigh fading channel ($K = 0$ or $-\infty$ dB) ในกรณีเช่นนี้ระบบแบบไม่รู้ข้อมูล CSI ที่ภาคส่งจะทำงานได้ดีบนเทคนิคการส่งข้อมูลแบบอิสระต่อกัน (Independent transmission scheme) แต่ระบบที่ภาคส่งรู้ข้อมูล CSI นั้นจะดีกว่าเมื่อช่องสัญญาณเป็น Rician fading channel รูปที่ 3- 2 แสดงแผนภาพแสดงการทำงานของระบบ MIMO แบบปรับตัวได้ หรือแบบที่ภาคส่งสามารถรู้ข้อมูล CSI



รูปที่ 3- 1 ความจุของช่องสัญญาณระบบ MIMO ในกรณีที่ภาคส่งทราบและไม่ทราบข้อมูล CSI แบบสมบูรณ์ เมื่อ $N_R = N_T = 4$



รูปที่ 3- 2 การทำงานของระบบ MIMO แบบปรับตัวได้ (ภาคส่งทราบข้อมูลของช่องสัญญาณ CSI)

3.3 เทคนิคการส่งข้อมูลเมื่อภาคส่งรู้ข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์

ในทางทฤษฎีเทคนิคการส่งข้อมูลเมื่อภาคส่งทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์นั้นสามารถกำหนดได้โดยง่ายด้วยสมการทางคณิตศาตร์ (3-4) ซึ่งเป็นการกำหนดวิธีการปรับขนาดของกำลังส่งในแต่ละก้านของสายอากาศเพียงเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงการที่จะทราบข้อมูล CSI นั้นทำได้ไม่ง่ายนัก เพราะจะต้องมีการส่งข้อมูล CSI ย้อนกลับมาอยู่ตลอดเวลา ที่สำคัญข้อมูลนี้จะต้องครบถ้วนทุกองค์ประกอบของสมาชิกในช่องสัญญาณเมตริกซ์ **H** การส่งข้อมูลโดยไม่มีข้อผิดพลาดนั้นย่อมเป็นไปไม่ได้ ทำให้เกิดปัญหาเพิ่มเติมขึ้นในเรื่องการกำหนดค่าการส่งข้อมูลที่ต้องเพิ่มปริมาณข้อมูลเพื่อรับรู้ช่องสัญญาณ ทำให้การสื่อสารไม่มีประสิทธิภาพเต็มที่ นอกจากนี้การรู้ข้อมูลแบบสมบูรณ์นั้นยังคงมีปัญหาที่สำคัญในทางปฏิบัติ คือ ไม่สามารถใช้งานกับสิ่งแวดล้อมแบบ Fast fading channel ได้เพราะเมื่อช่องสัญญาณเปลี่ยนแปลงเร็ว ข้อมูลที่ส่งย้อนกลับมาให้ภาคส่งก็จะไม่ใช่ข้อมูลของช่องสัญญาณ ณ เวลานั้นแล้วทำให้การปรับตัวไม่ได้ผลสำเร็จอย่างที่ต้องการ ด้วยเหตุผลหลักทั้งสองประการ จึงได้มีการเสนอเทคนิคอื่นๆ ที่อาศัยการส่งข้อมูลแบบไม่สมบูรณ์

จากที่กล่าวมาในหัวข้อที่แล้วนั้น ช่องสัญญาณจะถูกพิจารณาเป็นแบบ Rician โดยมี Rician factor (K) เป็นตัวแปรกำหนดคุณสมบัติของช่องสัญญาณ ดังนั้นการทราบเพียงแค่ Rician factor นั้นจึงเป็นวิธีที่นิยมสำหรับการทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ สำหรับกรณีพิเศษบางอย่างเช่น Rayleigh ($K = 0$) และ pure Rician ($K = \infty$) นั้น optimal covariance matrices **Q** สามารถกำหนดได้ด้วยหลักการทางทฤษฎีดังนี้

สำหรับ Rayleigh fading channel ค่าของ covariance matrix $\mathbf{Q}$ สามารถหาได้จาก (3-5) และเรียกเทคนิคนี้ว่า Independent transmission scheme

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^0 = \frac{P}{N_T}\mathbf{I}_{N_T} \tag{3-5}$$

ค่าที่แสดงในสมการ (3-5) นั้นชัดเจนว่าแต่ละก้านของสายอากาศที่ภาคส่งจะต้องส่งออกด้วยกำลังของสัญญาณที่เท่าๆ กัน และข้อมูลของแต่ละก้านนั้นเป็นอิสระต่อกันและกัน แต่สำหรับกรณีของ Rician fading channel ที่ $K = \infty$ ผลเฉลยของ $\mathbf{Q}$ สามารถหาได้ด้วยการใช้ WF algorithm ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3-6)

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^\infty = \frac{P}{N_T}\mathbf{\Psi}_{N_T} \tag{3-6}$$

เมื่อ $\mathbf{\Psi}_{N_T}$ คือเมตริกซ์ขนาด $N_T \times N_T$ ที่มีสมาชิกทุกตัวเท่ากับ 1

ในกรณีนี้ แต่ละก้านของสายอากาศภาคส่งจะมีค่ากำลังส่งของสัญญาณเท่ากันเหมือนกับแบบ Rayleigh แต่ว่าข้อมูลที่ส่งในแต่ละก้านนั้นต้องมีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ (3-6) และเรียกเทคนิคนี้ว่า Dependent transmission scheme

ขั้นต่อไปคือการหาเทคนิคที่สามารถปรับตัวได้ต่อทุกสภาวะของ Rice factor K งานวิจัยของ Jayaweera [7], [20] ได้เสนอให้ใช้วิธีเฉลี่ยค่าระหว่าง independent และ dependent schemes ดังแสดงในสมการที่ (3-7)

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^{\mathbf{AV}} = \frac{P}{N_T(1+\kappa)}\left(\mathbf{I}_{N_T} + \kappa\mathbf{\Psi}_{N_T}\right) \tag{3-7}$$

เรียกเทคนิคการส่งข้อมูลแบบนี้ว่า Average transmission scheme จากที่เห็นในสมการที่ (3-7) เทคนิคนี้ต้องการทราบข้อมูลของ Rice K factor เพื่อนำกลับไปให้ที่ภาคส่ง ซึ่งวิธีการทราบข้อมูลนี้ได้ถูกเสนอไว้ในงานวิจัย [23],[24]

ต่อมา Uthansakul [21] ได้พัฒนางานวิจัยต่อจาก Jayaweera [7], [20] โดยเสนอว่าภาคส่งควรต้องทราบข้อมูลสองอย่างคือ K และ SNR ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาเทคนิคการส่งข้อมูลให้มีประสิทธิภาพ

สูงขึ้น ด้วยการพิจารณาของฟังชันก์ logarithm ว่าเป็น concave function บน positive definite matrices และการประยุกต์ Jensen's inequality ทำให้ได้ว่าสมการที่ (2-1) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ (3-8)

$$\begin{aligned} C &\le \max_{tr\{\mathbf{Q}\]\le P_T;q_{nn}\ge 0} \log_2 \det\left(\mathbf{I}_{N_T}+\frac{1}{P_N}\mathbf{U}^T\mathbf{QUD}\right) \\ &= \max_{tr\{\tilde{\mathbf{Q}}\]\le P_T;\tilde{q}_{nn}\ge 0} \log_2 \det\left(\mathbf{I}_{N_T}+\frac{1}{P_N}\tilde{\mathbf{Q}}\mathbf{D}\right) \end{aligned} \tag{3-8}$$

เมื่อ $\mathbf{U}$ คือ unitary matrix

จากนั้นประยุกต์ SVD technique ดังนี้

$$E_{\mathbf{H}}\{\mathbf{H}^{\dagger}\mathbf{H}\} = \mathbf{UDU}^T \tag{3-9}$$

$$E_{\mathbf{H}}\{\mathbf{H}^{\dagger}\mathbf{H}\} = \left(\frac{N_R}{1+\kappa}\right)\begin{bmatrix} 1+\kappa & \kappa & \cdots & \kappa \\ \kappa & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & 1+\kappa & \kappa \\ \kappa & \cdots & \kappa & 1+\kappa \end{bmatrix} \tag{3-10}$$

$$\mathbf{UDU}^T = \left(\frac{N_R}{1+\kappa}\right)\mathbf{U}\begin{bmatrix} 1+N_T\kappa & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & \cdots & & 1 \end{bmatrix}\mathbf{U}^T \tag{3-11}$$

จากสมการที่ (3-8) พบว่าที่ด้านขวามือของสมการสามารถทำให้มีค่ามากที่สุดได้เมื่อเมตริกซ์ $\tilde{\mathbf{Q}}$ เป็นเมตริกซ์แทยงมุม (สมาชิกตามแนวทแยงมุมได้มาจากการใช้ WF algorithm) ดังนั้นเมตริกซ์ $\tilde{\mathbf{Q}}$ เขียนใหม่ได้ในสมการที่ (3-12)

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \left(\frac{P(1-\varepsilon)}{N_T}\right)\begin{bmatrix} 1+N_T\dfrac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & \cdots & & 1 \end{bmatrix} \tag{3-12}$$

เมื่อ $\varepsilon = \min\left\{\frac{\kappa(1+\kappa)N_T}{\rho(1+N_T\kappa)N_R}, 1\right\}$

เพื่ออธิบายถึงลักษณะทางกายภาพของผลเฉลยที่ได้ ε ต้องมีค่าอยู่ในพิสัย $0 \le \varepsilon \le 1$ ทั้งนี้มาจากเงื่อนไขของสมาชิกตามแนวแทยงมุม ($\tilde{q}_{nn}$) ของเมตริกซ์ $\tilde{\mathbf{Q}}$ ว่าต้องไม่มีค่าน้อยกว่าศูนย์ เงื่อนไขนี้กำหนดค่าที่เป็นไปได้ให้กับ K ในกรณีที่รู้ค่า SNR=ρ ขีดจำกัดที่สามารถอธิบายได้ง่ายๆ คือเมื่อ N_R=N_T=1 นั้น ε= 1 ตามค่าของ K=ρ ในขณะที่ K=P_{LOS}/P_{NLOS} และ $\rho \approx P_{LOS}/P_N$ (สำหรับค่า K มากๆ) K=ρ กลายเป็นค่าที่มากที่สุดซึ่งถูกวัดได้ที่ภาคส่ง ค่า K นี้ไม่สามารถวัดได้เมื่อ P_{NLOS} มีค่าต่ำกว่าระดับของสัญญาณรบกวน

ดังนั้นผลเฉลยสำหรับเทคนิคที่ดีที่สุดเป็นดังต่อไปนี้

$$\mathbf{Q}^{\mathbf{OPT}} = \mathbf{U}\tilde{\mathbf{Q}}\mathbf{U}^T \tag{3-13}$$

$$\mathbf{Q}^{\mathbf{OPT}} = \left(\frac{P(1-\varepsilon)}{N_T}\right)\begin{bmatrix} 1+\frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} & \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} & \cdots & \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \\ \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & 1+\frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} & \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \\ \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} & \cdots & \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} & 1+\frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \end{bmatrix} \tag{3-14}$$

จากสมการที่ (3-14) ค่า covariance matrix Q^{OPT} สำหรับเทคนิคใหม่ของการส่งข้อมูลจะถูกเรียกว่า Optimal transmission scheme และสามารถเขียนเป็นสมการที่ (3-15).

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^{\mathbf{OPT}} = \frac{P}{N_T}\left((1-\varepsilon)\mathbf{I}_{N_T} + \varepsilon\boldsymbol{\Psi}_{N_T}\right) \tag{3-15}$$

เพื่อที่จะแสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคการส่งข้อมูลทั้งสี่แบบที่กล่าวไปแล้วนั้น การอ้างถึงเทคนิคทั้งสี่จะทำให้สะดวกขึ้นด้วยการอ้างถึงเทคนิค A B C และ D โดยที่ Independent transmission scheme ที่สัมพันธ์กับ pure NLOS (K = 0) จะถูกเรียกว่า scheme A ตามสมการที่ (3-5) Dependent transmission scheme ที่สัมพันธ์กับ pure LOS (K = ∞) จะถูกเรียกว่า scheme B ตามสมการที่ (3-6) เทคนิคการส่งข้อมูลตามสมการที่ (3-7) ถูกเรียกว่า scheme C และเทคนิคใหม่ตามสมการที่ (3-15) ถูก

เรียกว่า scheme D ซึ่ง scheme D นี้ภาคส่งต้องการทราบค่าของทั้ง K และ ρ ในรูปของ ε ในขณะที่ scheme C ต้องการเพียงแค่ค่า K เท่านั้น

จากการแทนที่สมการ (3-5) (3-6) (3-7) และ (3-15) เข้าไปใน (3-8) จะทำให้ได้ค่าขีดจำกัดบนของความจุของช่องสัญญาณ (upper bound capacity) สำหรับ schemes A B C และ D ดังแสดงด้วยสมการที่ (3-16) ถึง (3-19)

$$C_{UB}^{0} = \log_2\left(1+\frac{\rho(1+N_T\kappa)N_R}{(1+\kappa)N_T}\right)+(N_T-1)\log_2\left(1+\frac{\rho N_R}{(1+\kappa)N_T}\right) \tag{3-16}$$

$$C_{UB}^{\infty} = \log_2\left(1+\frac{\rho(1+N_T\kappa)N_R}{(1+\kappa)}\right) \tag{3-17}$$

$$\begin{aligned} C_{UB}^{\mathrm{AV}} &= \log_2\left(1+\kappa(N_T-1)+\frac{\rho(1+N_T\kappa)^2N_R}{(1+\kappa)^2N_T}\right) \\ &\quad +(N_T-1)\log_2\left(1+\frac{\rho N_R}{(1+\kappa)^2N_T}\right) \end{aligned} \tag{3-18}$$

$$C_{UB}^{\mathrm{OPT}} = \begin{cases} \log_2\left(1+\kappa(N_T-1)+\dfrac{\kappa}{\varepsilon}\right)+ \\ \quad (N_T-1)\log_2\left(1+\dfrac{(1-\varepsilon)\rho N_R}{(1+k)N_T}\right) & 0\le\varepsilon<1 \\ \log_2\left(1+0.5\left(\begin{matrix}\rho N_T N_R-N_T \\ +\sqrt{(\rho N_T N_R-N_T)^2+4\rho N_T N_R}\end{matrix}\right)\right) & \varepsilon=1 \end{cases} \tag{3-19}$$

เพื่อที่จะประเมินสมรรถนะของทั้งสี่เทคนิคการส่งข้อมูล (A B C และ D) ในขั้นแรกสมการขีดจำกัดบนของค่าความจุของช่องสัญญาณ (3-16) ถึง (3-19) ถูกสร้างขึ้นด้วยการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ตามโปรแกรม Matlab โดยมีค่า K และตัวแปรหลัก ในขั้นถัดมานั้นเงื่อนไขอื่นๆของ Rician fading channel ได้ถูกจำลองขึ้นด้วยการใช้แบบจำลอง Single Bounce Scattering (SBS) [25] เมื่อใช้แบบจำลองนี้ ช่องสัญญาณ **H** สามารถถูกจำลองด้วยการสมการทางคณิตศาสตร์ และค่าความจุของช่องสัญญาณก็สามารถคำนวณได้ด้วยการเฉลี่ยจากค่าที่สุ่มมา 1,000 ค่าของช่องสัญญาณ **H** ผลที่ได้จะนำกลับไปเปรียบเทียบกับผลในขั้นแรกเพื่อยืนยันความถูกต้อง ในการจำลองแบบนี้ใช้ระยะ inter-element spacing ที่ 0.5 λ ที่ทั้งภาคส่งและรับ

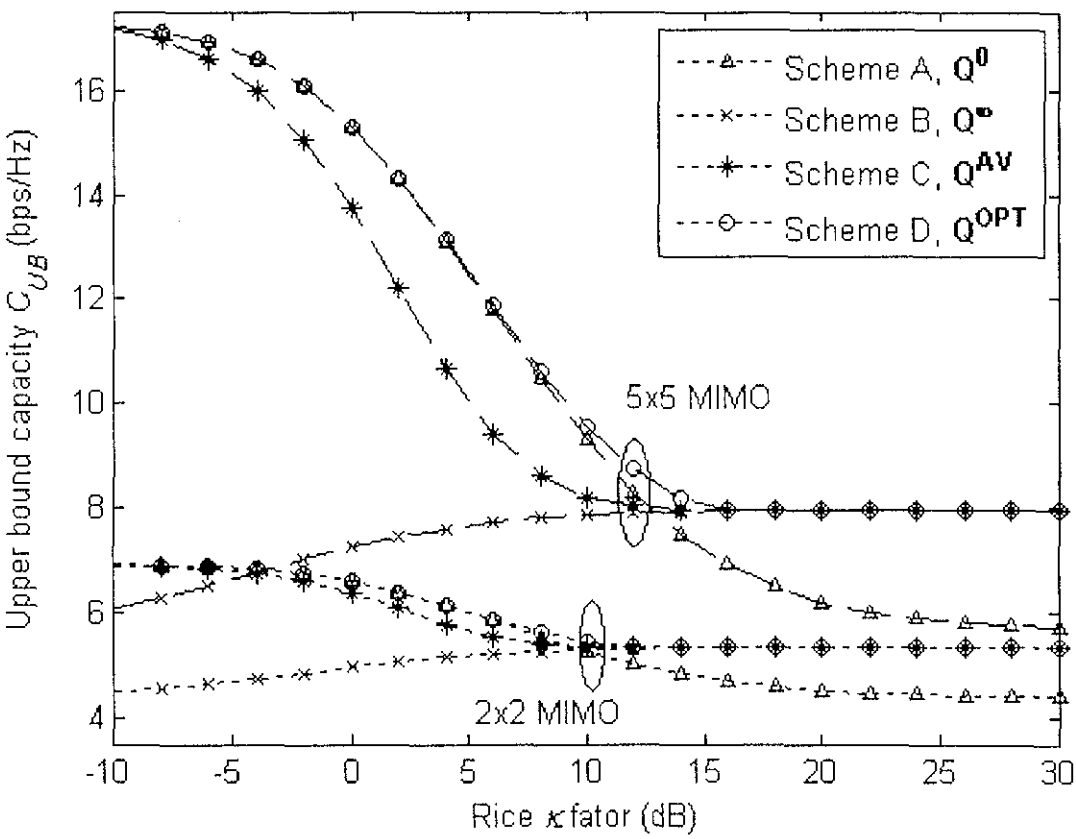
3.4 ผลของเทคนิคการส่งข้อมูลจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์

3.4.1 ผลกระทบต่อ Rice factor

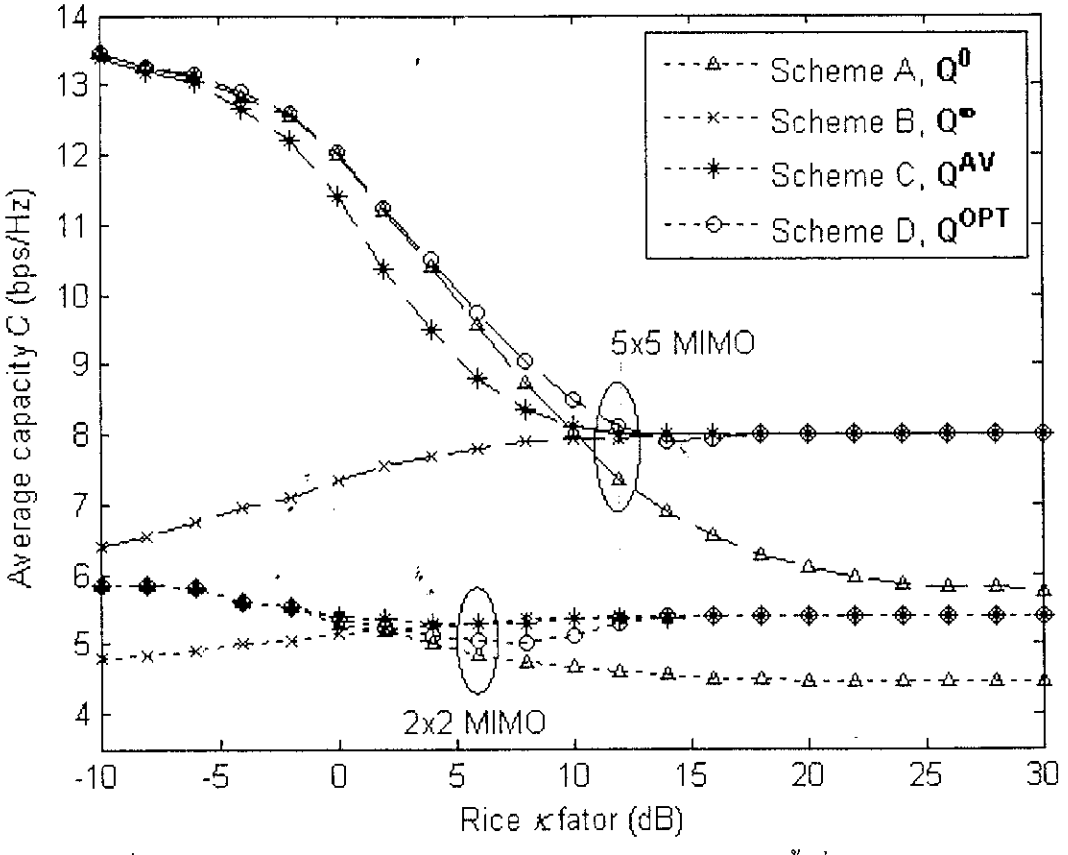
รูปที่ 3- 3 แสดงถึงขีดจำกัดบนของค่าความจุของช่องสัญญาณจากการใช้เทคนิคการส่งข้อมูลทั้งสี่เทคนิคสำหรับระบบ 2x2 และ 5x5 MIMO เมื่อ SNR= ρ = 10 dB สำหรับจุดประสงค์ที่เลือกระบบ 2x2 และ 5x5 MIMO เพื่อต้องการแสดงให้เห็นว่าสมการที่ (3-15) ใช้งานได้จริงสำหรับค่าใดๆ ของ N_T นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าเมื่อ K มีค่าน้อยมากๆ ($K \approx -\infty$dB) ค่าความจุของช่องสัญญาณของเทคนิค scheme C และ D เข้าใกล้สู่ค่าความจุของช่องสัญญาณของเทคนิค scheme A โดยมีค่า 6.9bps/Hz และ 17.3bps/Hz สำหรับระบบ 2x2 และ 5x5 MIMO ตามลำดับ ค่าความจุของช่องสัญญาณ 5.5bps/Hz และ 8.0bps/Hz สำหรับระบบ 2x2 และ5x5 MIMO มาสามารถคำนวณได้เมื่อใช้เทคนิค scheme C และ D แล้วยังลู่เข้าใกล้ scheme B ด้วย เมื่อ K มีค่ามากๆ ($K \approx \infty$dB) สำหรับตัวเลือกของ covariance matrix ตามสมการที่ (3-15) แสดงให้เห็นว่า Independent transmission scheme A ล้มเหลวเมื่อ K มีค่ามากๆ เพราะว่าสัญญาณมีความสัมพันธ์กันที่ภาครับเนื่องจาก LOS เด่นมาก และทำนองเดียวกันกับ Dependent transmission scheme ที่แสดงให้เห็นว่ามีสมรรถนะที่แย่เมื่อ K มีค่าน้อยๆ เหตุผลก็เพราะว่าสัญญาณที่สัมพันธ์กันไม่สามารถใช้ประโยชน์ของการแยกช่องสัญญาณแบบไม่สัมพันธ์กันได้นั้นเอง

รูปที่ 3- 4 แสดงความจุของช่องสัญญาณที่ได้จากการคำนวณของการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ตามหลัก Monte Carlo สำหรับ 2x2 และ 5x5 MIMO เมื่อ ρ = 10 dB โดยที่ covariance matrices ของสัญญาณที่ภาคส่งเป็นไปตามเงื่อนไขในสมการที่ (3-5) ถึง (3-7) และ (3-15) ความจุของช่องสัญญาณถูกคำนวณด้วยการเฉลี่ยค่าของความจุช่องสัญญาณจำนวน 1,000 ค่าที่ได้จากการสุ่มช่องสัญญาณจำนวน 1,000 channel matrices โดยทั่วไปแล้วค่าความจุของช่องสัญญาณสำหรับทั้งสี่เทคนิคการส่งข้อมูลจะให้ผลและแนวโน้มที่เหมือนกับค่าขีดจำกัดบนของความจุของช่องสัญญาณที่แสดงในรูปที่ 3- 3 สิ่งที่ต่างกันมีเพียงแค่ระดับของความจุของช่องสัญญาณเท่านั้น ทั้งนี้ค่าความจุของช่องสัญญาณในรูปที่ 3- 4 ย่อมมีค่าน้อยกว่าขีดจำกัดบนของมันที่อยู่ในรูปที่ 3- 3

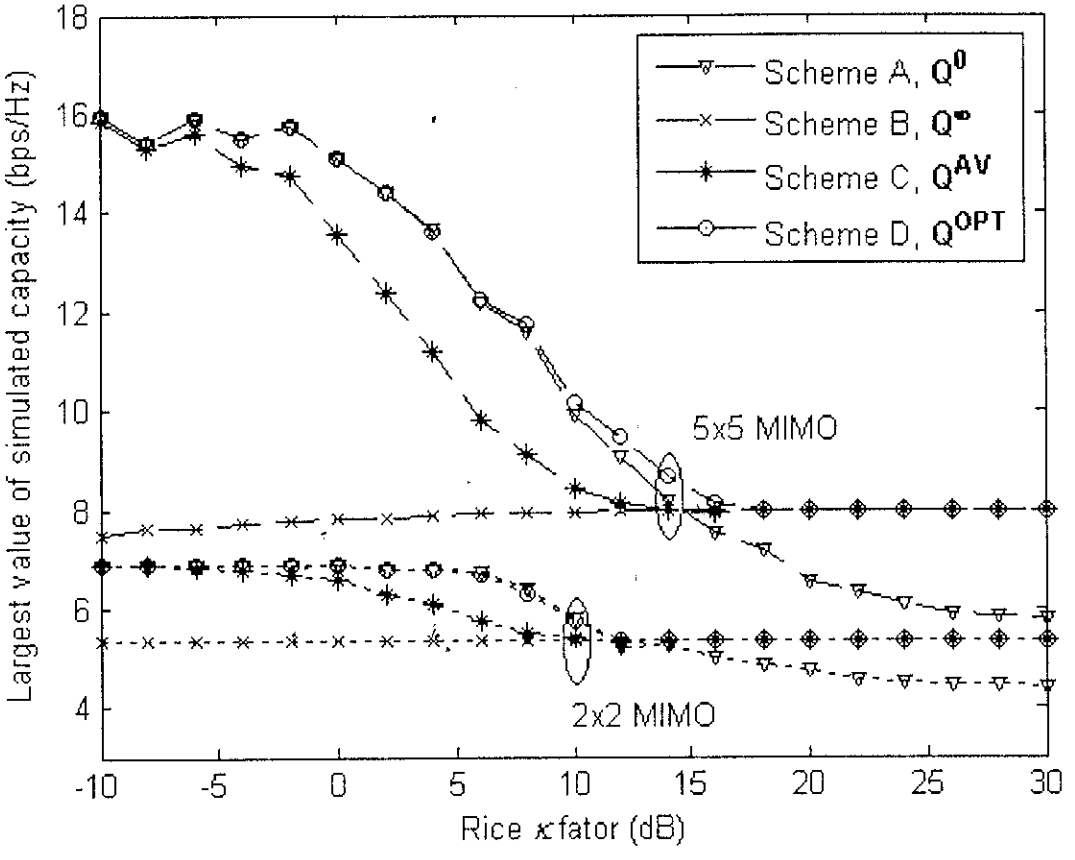
รูปที่ 3- 5 แสดงถึงขีดจำกัดบนความจุของช่องสัญญาณที่ได้จากการจำลองแบบ ซึ่งหาได้จากการใช้ค่าความจุของช่องสัญญาณที่มากที่สุดจากจำนวน 1,000 ค่าที่ได้จากการสุ่มช่องสัญญาณ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการประมาณด้วยสมการที่ (3-16) ถึง (3-19) กับค่าจากการจำลองแบบให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ยืนยันการใช้ผลจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ว่าตรงกับหลักการทางทฤษฎี



รูปที่ 3- 3 ขีดจำกัดบนของความจุของช่องสัญญาณด้วยการใช้เทคนิคการส่งข้อมูลทั้งสี่ตามสมการที่ (2-26) ถึง (2-29) สำหรับระบบ 2x2 และ 5x5 MIMO



รูปที่ 3- 4 ค่าเฉลี่ยความจุของช่องสัญญาณด้วยการใช้เทคนิคการส่งข้อมูลทั้งสี่สำหรับระบบ 2x2 และ 5x5 MIMO



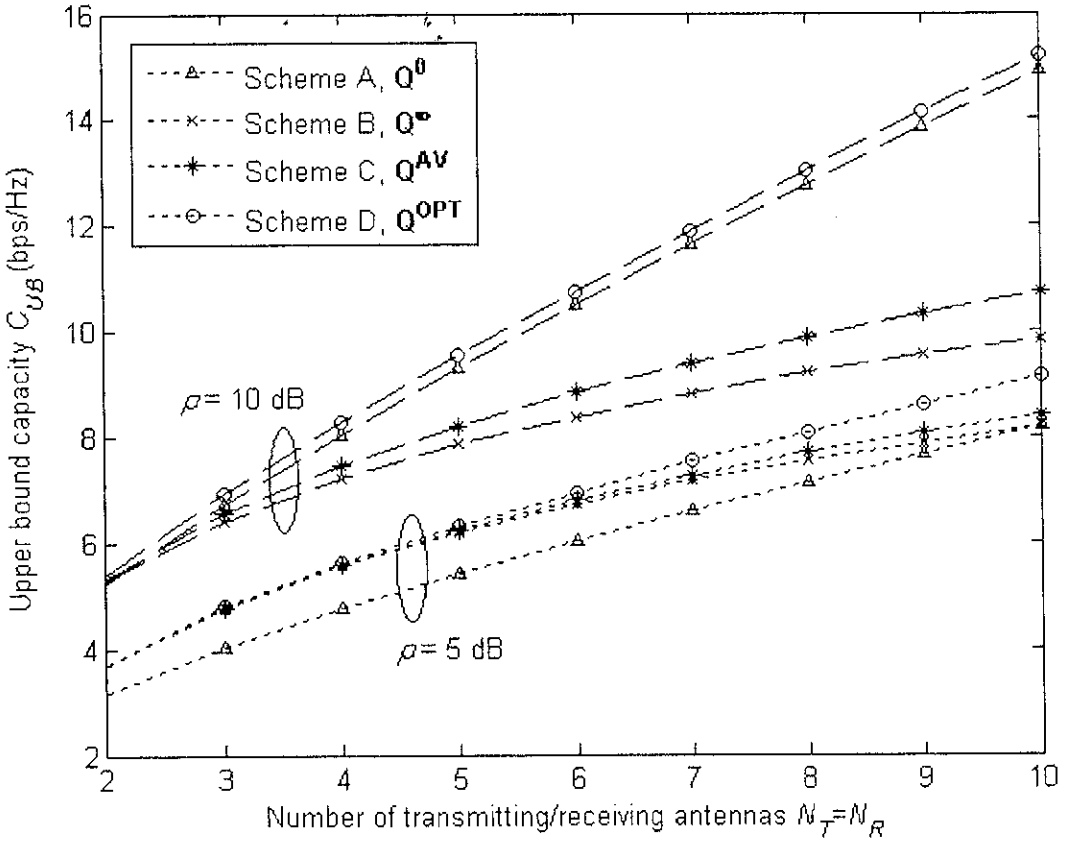
รูปที่ 3- 5 ขีดจำกัดบนของความจุของช่องสัญญาณจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ด้วยการใช้เทคนิคการส่งข้อมูลทั้งสี่สำหรับระบบ 2x2 และ 5x5 MIMO

3.4.2 ผลกระทบต่อจำนวนของสายอากาศภาคส่งและรับ

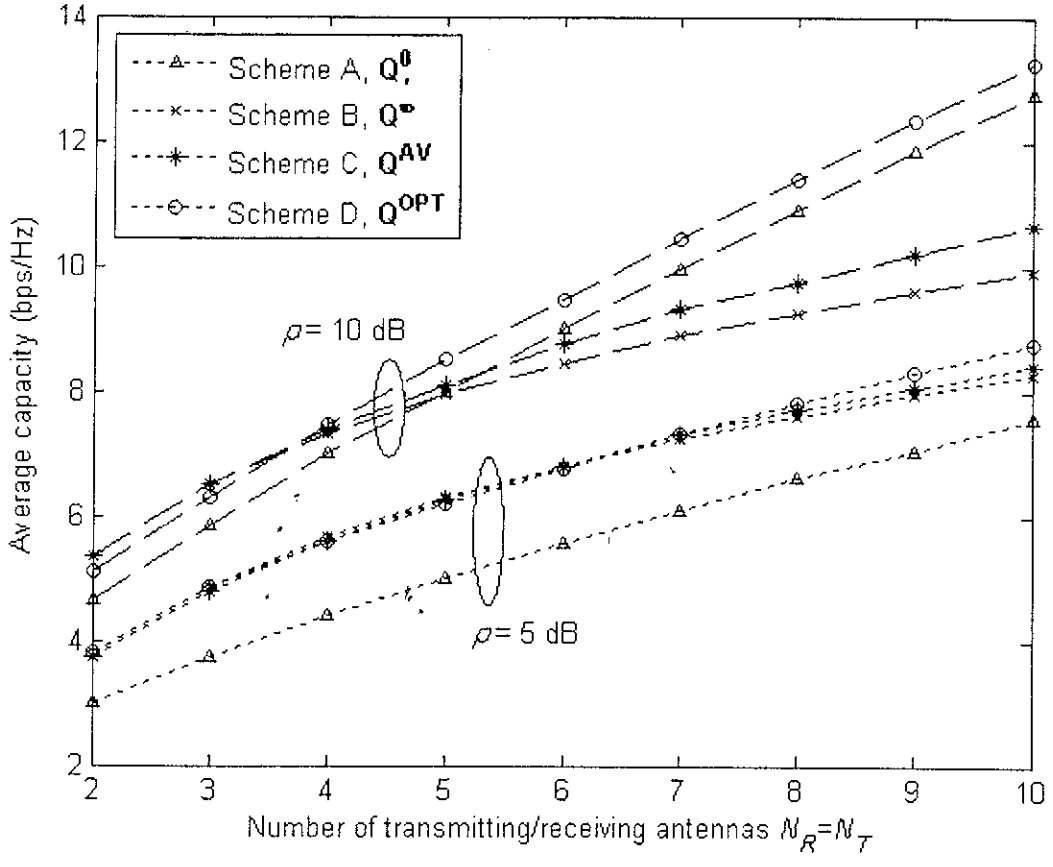
รูปที่ 3- 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขีดจำกัดบนของความจุของช่องสัญญาณ C_{UB} (bps/Hz) และจำนวนของสายอากาศภาคส่งและรับ โดยที่ NT = NR K =10 dB และρ = 5, 10 dB โดยทั่วไปแล้วความจุของช่องสัญญาณจะเพิ่มขึ้นเมื่อ SNR เพิ่มขึ้นสำหรับทั้งสี่เทคนิคเพียงแต่ว่าจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ไม่เท่ากันในแต่ละเทคนิค เมื่อกำหนดให้ ρ = 10 dB ความแตกต่างระหว่างความจุของช่องสัญญาณมีค่าเห็นเด่นชัดขึ้นเมื่อจำนวนสายอากาศเพิ่มขึ้น

รูปที่ 3- 7 แสดงถึงค่าเฉลี่ยของความจุของช่องสัญญาณที่ได้จากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ตามหลักการของ Monte Carlo ค่าความจุของช่องสัญญาณที่ได้นี้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่เหมือนกันกับค่าขีดจำกัดบนในรูปที่ 3- 6 เพียงแต่ค่าจากการจำลองแบบนี้มีค่าน้อยกว่าค่าของขีดจำกัดบน

จากผลทั้งหมดที่ได้แสดงไปไม่ว่าจะเป็นขีดจำกัดบน หรือค่าเฉลี่ยของความจุของช่องสัญญาณ ก็เป็นการพิสูจน์ให้เห็นว่าระบบแบบปรับตัวได้ หรือระบบที่ภาคส่งทราบเพียงแค่ข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์นั้นสามารถมีความจุของช่องสัญญาณสูงที่สุด



รูปที่ 3- 6 ขีดจำกัดบนของความจุของช่องสัญญาณด้วยการใช้เทคนิคการส่งข้อมูลทั้งสี่ตามสมการที่ (2-26) ถึง (2-29)



รูปที่ 3- 7 ค่าเฉลี่ยความจุของช่องสัญญาณด้วยการใช้เทคนิคการส่งข้อมูลทั้งสี่เทคนิคจากการจำลองแบบ

3.5 กล่าวท้ายบท

เทคนิคการส่งข้อมูลที่เหมาะสมในระบบ MIMO ซึ่งอยู่ในรูปของค่าเมตริกซ์ Covariance Q สามารถทำให้ระบบได้ค่าความจุของช่องสัญญาณที่สูงที่สุดไม่ว่าจะเป็นสถานการณ์ใดก็ตาม แต่การที่จะปรับเปลี่ยนค่า Q ได้นั้นจำเป็นที่ภาคส่งจะต้องทราบข้อมูลของช่องสัญญาณเสียก่อน การทราบข้อมูลนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือในสภาวะที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์ และในสภาวะที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ ผลจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์สามารถสรุปได้ว่าค่าขีดจำกัดบน และค่าเฉลี่ยของความจุของช่องสัญญาณมีค่าตรงกับค่าที่ได้ตามทฤษฎี ดังนั้นการใช้การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ก็สามารถให้ค่าที่น่าเชื่อถือได้ ทำให้สามารถวิเคราะห์สถานการณ์อื่นๆ ได้เพิ่มขึ้นอีก

มาก อย่างไรก็ตามเทคนิคการส่งข้อมูลเหล่านี้เป็นเพียงแค่ค่าตามทฤษฎี หรือเป็นแค่ค่าเมตริกซ์ Covariance **Q** เท่านั้นไม่สามารถนำไปออกแบบในการใช้งานจริงได้ ดังนั้นเนื้อหาในบทถัดไปจะกล่าวถึงการเปลี่ยนเมตริกซ์ Covariance **Q** ให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้งานได้จริง

บทที่ 4

เทคนิคการส่งข้อมูลที่พัฒนาขึ้นให้เหมาะสมต่อสภาวะการทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์

4.1 กล่าวนำ

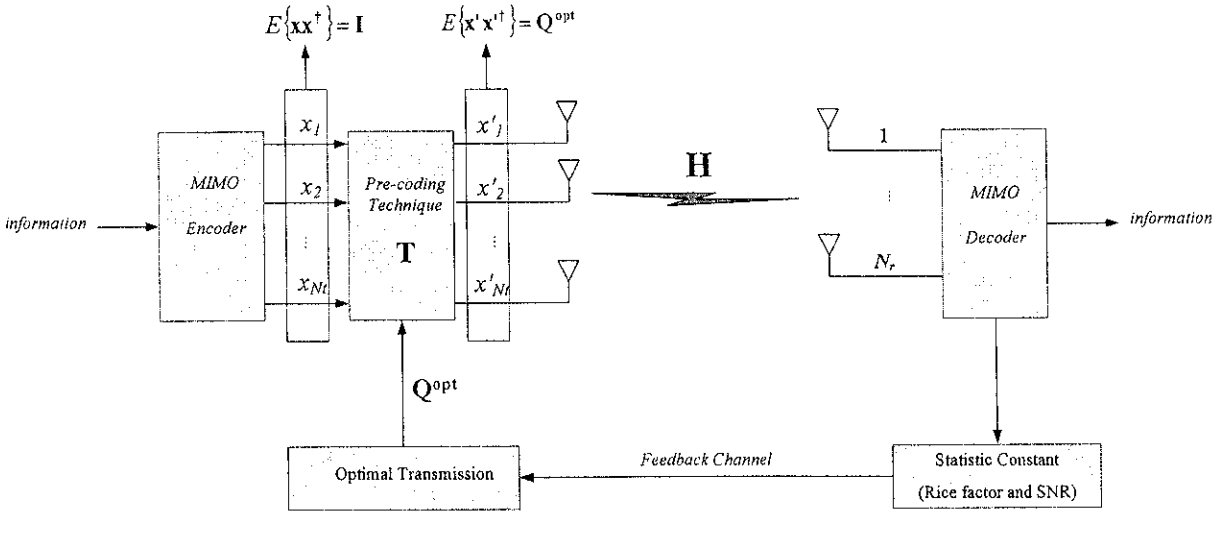
ในบทที่แล้วได้แสดงให้เห็นว่าระบบ MIMO ที่ภาคส่งทราบข้อมูลของช่องสัญญาณนั้นสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการส่งข้อมูลในรูปของเมตริกซ์ Q ทำให้สมรรถนะของระบบสูงขึ้นได้ เทคนิคการส่งข้อมูลนี้สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ คือ เทคนิคที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์ และเทคนิคที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามเทคนิคที่อยู่ในสภาวะทราบข้อมูลแบบสมบูรณ์นั้นจะสามาถทำงานได้ดีเมื่อช่องสัญญาณแทบที่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย และต้องการการป้อนข้อมูลจากภาครับย้อนกลับไปให้ภาคส่งด้วยความถี่ที่สูงมาก และปริมาณข้อมูลที่ป้อนกลับก็เป็นข้อมูลที่ครบถ้วนทุกองค์ประกอบของช่องสัญญาณ ดังนั้นแนวทางในการใช้การทราบข้อมูลแบบสมบูรณ์จึงไม่นิยมนำมาใช้งาน ทำให้แนวทางการใช้เทคนิคการส่งข้อมูลในสภาวะแบบไม่สมบูรณ์กลายเป็นที่น่าสนใจมากกว่า เพราะเพียงแค่ภาครับส่งข้อมูลบางส่วนของช่องสัญญาณกลับมาให้ภาคส่งก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ MIMO ได้แล้ว ดังที่แสดงในบทที่แล้วพบว่าเทคนิคการส่งข้อมูลแบบไม่สมบูรณ์นั้นจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงค่าเมตริกซ์ Covariance Q ที่ภาคส่ง แต่ค่าเมตริกซ์ Q นี้เป็นค่าทางสถิติซึ่งปกติแล้วข้อมูลที่ภาคส่งไม่สามารถกำหนดได้ ดังนั้นตามธรรมชาติแล้ว Q ไม่สามารถกำหนดได้แน่นอน และที่สำคัญไม่มีทางตรงกับผลเฉลยที่กำหนดไว้ในบทที่แล้วอย่างแน่นอน การพัฒนาเทคนิคการส่งข้อมูลนี้จึงยังคงจำเป็นที่ต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไปเพื่อให้สามารถสร้างเทคนิคที่ใช้งานได้จริง สำหรับบทนี้เป็นงานวิจัยที่ผู้เขียนพัฒนาขึ้นเองในโครงการวิจัยนี้ซึ่งยังไม่มีใครเคยทำวิจัยนี้มาก่อน โดยที่จะแบ่งเทคนิคที่พัฒนาขึ้นเป็นสองส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกจะอธิบายถึงแนวทางในการเปลี่ยนข้อมูลที่ภาคส่งให้กลายเป็น Q ที่เหมาะสมกับสภาวะของช่องสัญญาณ เพราะว่าเทคนิคที่กล่าวในบทที่แล้วใช้ได้เพียงแค่ผู้ใช้งานคนเดียวเท่านั้นสำหรับส่วนที่สองจึงเป็นการนำแนวคิดในการพัฒนาแบบส่วนแรกมาประยุกต์เพื่อให้สามารถใช้งานได้กับผู้ใช้งานหลายๆ คนพร้อมๆ กัน

4.2 การพัฒนาเทคนิคการส่งข้อมูลให้เหมาะสมต่อสภาวะการทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์

สำหรับงานวิจัยในโครงการนี้เลือกใช้เทคนิคแบบการเข้ารหัสล่วงหน้า (Pre-coding Technique) เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติของข้อมูลที่ต้องการส่งที่ภาคส่งให้มีค่าเมตริกซ์ Covariance **Q** ตามการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ **H** เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมากเพราะสามารถใช้งานได้จริงและสะดวกสำหรับการพัฒนาบนฮาร์ดแวร์จริง

4.2.1 หลักการของเทคนิคการเข้ารหัสล่วงหน้า

รูปที่ 4- 1 แสดงภาพเทคนิคการเข้ารหัสล่วงหน้าสำหรับการส่งข้อมูลระบบ MIMO ในสภาวะที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ จากรูปจะเห็นได้ว่าการเข้ารหัสล่วงหน้านี้จะทำให้คุณลักษณะของข้อมูลที่ภาคส่งให้เป็นข้อมูลที่มีคุณลักษณะตามเมตริกซ์ Covariance **Q** ที่เหมาะสมได้ รหัสล่วงหน้าในรูปแบบของเมตริกซ์ **T** นี้จะต้องถูกออกแบบให้เหมาะสมตามการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ สำหรับระบบที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์รหัสล่วงหน้านั้นสามารถออกแบบได้โดยง่ายด้วยการรวมทั้งเมตริกซ์ **V** และการจัดสรรกำลังส่ง q_{nn} ตามสมการที่ (3-1) และ (3-4) ดังนั้นรหัสล่วงหน้านั้นสามารถกำหนดตามเทคนิคการส่งข้อมูลที่ให้ค่าความจุของช่องสัญญาณสูงที่สุดในกรณีที่ทราบข้อมูลแบบสมบูรณ์ได้ตามสมการที่ (4-1)



รูปที่ 4- 1 เทคนิคการเข้ารหัสล่วงหน้าสำหรับระบบ MIMO แบบที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์

$$\mathbf{T} = \mathbf{q}\mathbf{V}^{\dagger}. \tag{4-1}$$

เมื่อ $\mathbf{q}$ กำหนดด้วย $\mathbf{q} = [\sqrt{q_{11}} \quad \sqrt{q_{22}} \quad \cdots \quad \sqrt{q_{N_T N_T}}]$.

สำหรับกรณีที่เทคนิคไม่ทราบข้อมูลแบบสมบูรณ์ การหาเมตริกซ์เข้ารหัสล่วงหน้านั้นยากกว่ามาก เพราะว่าสัญญาณภาคส่งเป็นแบบที่คาดคะเนไม่ได้ดังนั้นเกือบเป็นไปไม่ได้เลยที่เมตริกซ์ Covariance นั้นจะมีธรรมชาติเท่ากับผลเฉลยที่ต้องการสำหรับการปรับให้เหมาะสมกับช่องสัญญาณตามสมการที่ (3-15) ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหานี้ข้อมูลที่ภาคส่ง $\mathbf{x}$ ต้องผ่านการเข้ารหัสล่วงหน้า $\mathbf{T}$ จึงจะทำให้ได้ข้อมูลที่มีคุณลักษณะเป็นไปตามที่ต้องการสำหรับเมตริกซ์ Covariance $\mathbf{Q}$ ซึ่งผลเฉลยของเมตริกซ์นี้แสดงในสมการที่ (4-2).

$$\mathbf{Q} = E\left\{\mathbf{T}\mathbf{x}\mathbf{x}^{\dagger}\mathbf{T}^{\dagger}\right\}. \tag{4-2}$$

เมื่อประยุกต์เทคนิค SVD และพิจารณาข้อมูลที่ภาคส่ง $\mathbf{x}$ เป็นกระบวนการแบบ ergodic ทำให้ได้เมตริกซ์เข้ารหัสล่วงหน้า $\mathbf{T}$ ในสมการที่ (4-3)

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} a & c & \cdots & c \\ b & d & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ b & 0 & 0 & d \end{bmatrix}. \tag{4-3}$$

เมื่อ

$$a = \sqrt{\varepsilon} - \frac{(1-\varepsilon)\left(1+\sqrt{N_T\varepsilon - 2\varepsilon + 2}\right)}{N_T\varepsilon - 2\varepsilon + 1}. \qquad b = \sqrt{\varepsilon}.$$

$$c = \frac{\sqrt{1-\varepsilon}\left(\sqrt{\varepsilon} + \sqrt{N_T\varepsilon^2 - 2\varepsilon^2 + 2\varepsilon}\right)}{N_T\varepsilon - 2\varepsilon + 1}. \qquad d = \sqrt{1-\varepsilon}.$$

จากการใช้เทคนิค Zero Forcing (ZF) สัญญาณที่ใช้สำหรับการตัดสินใจที่ภาครับสามารถเขียนได้ในสมการที่ (4-4)

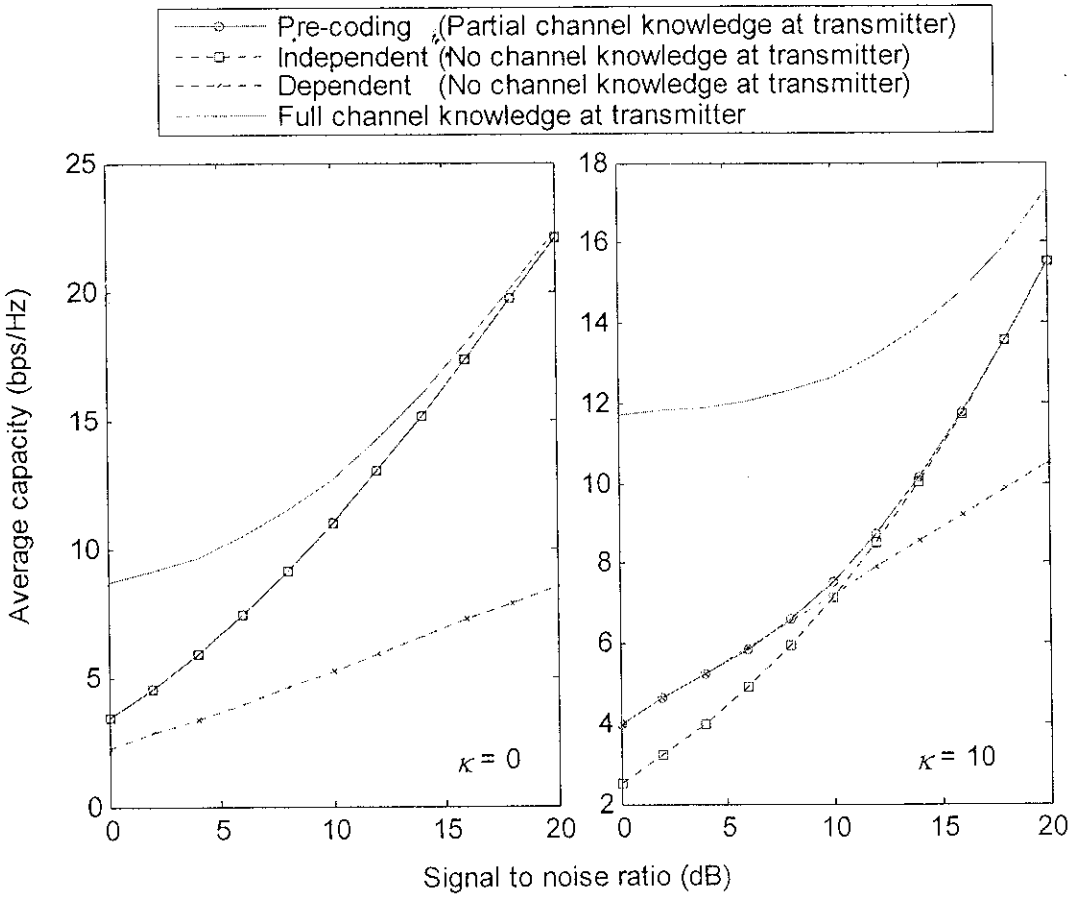
$$\tilde{\mathbf{y}} = \left(\mathbf{T}\mathbf{H}\mathbf{H}^{\dagger}\mathbf{T}^{\dagger}\right)^{-1}\mathbf{T}^{\dagger}\mathbf{H}^{\dagger}\left(\mathbf{H}\mathbf{T}\mathbf{x} + \mathbf{n}\right). \tag{4-4}$$

เมื่อ **n** คือ $N_R \times N_T$ noise vector ที่ภาครับ

ผลเฉลยตามสมการที่ (4-3) เปลี่ยนข้อมูลของสัญญาณภาคส่ง **x** ให้มีค่าเมตริกซ์ Covariance **Q** เป็นไปตามฟังชันก์ของ $\mathcal{E}$ สำหรับกรณีปกติ $\mathcal{E} = 0$ และ 1 ค่าเมตริกซ์ **T** มีค่าเท่ากับ identity matrix และเมตริกซ์ที่สมาชิกมีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมดยกเว้นสมาชิกที่อยู่ในคอลัมม์แรกจะมีค่าเป็นหนึ่งตามลำดับ สิ่งนี้ตรงกับคุณสมบัติของเทคนิคการส่งข้อมูลแบบ independent และ dependent ซึ่งเป็นกรณีเฉพาะของ Rayleigh ($K = 0$) และ Rician ($K = \infty$)

4.2.2 ผลจากการจำลองแบบ

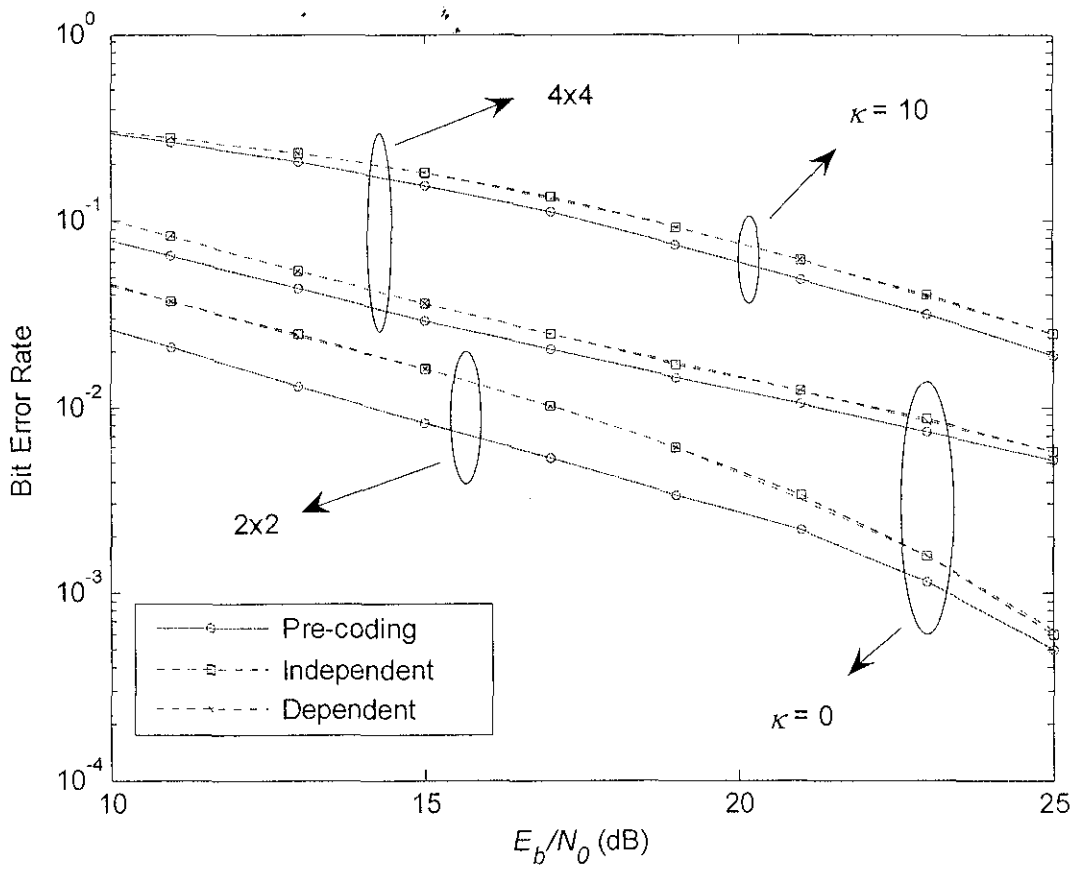
เพื่อดูผลที่ได้จากทางทฤษฎีความจุของช่องสัญญาณจะถูกคำนวณจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ในรูปของ bit per second per Hz ด้วยโปรแกรม MATLAB ค่าเฉลี่ยของความจุของช่องสัญญาณหาได้จาก



รูปที่ 4- 2 ความจุของช่องสัญญาณเฉลี่ย เมื่อ $N_R = N_T = 4$ และ $K = 0, 10$

การเฉลี่ยความจุของช่องสัญญาณจากจำนวนทั้งหมด 10,000 ค่าที่ได้จากการสุ่มช่องสัญญาณ 10,000 ค่า จากที่เห็นในรูปที่ 4- 2 เทคนิคที่พัฒนาขึ้นบนสภาวะที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณบางส่วน (Partial channel knowledge) สามารถให้ความจุของช่อสัญญาณได้เทียบเท่ากับเทคนิคแบบ Independent scheme ภายใต้เงื่อนไข Rayleigh ($K = 0$) fading channel และก็เห็นได้ชัดว่าเทคนิคแบบ Dependent scheme ไม่สามารถให้ความจุของช่องสัญญาณได้ดีภายใต้เงื่อนไขนี้ ในทางตรงกันข้ามเทคนิค Dependent scheme จะให้ความจุของช่องสัญญาณได้ดีมากเมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขแบบ Rician ($K = 10$) fading channel สิ่งนี้น่าสนใจที่จะสังเกตว่าเทคนิคแบบทราบช่องสัญญาณเพียงบางส่วน หรือแบบไม่สมบูรณ์นั้นสามารถให้ค่าความจุของช่องสัญญาณได้ดีที่สุดภายใต้ทุกๆ สภาวะของช่องสัญญาณและเทียบเท่ากับเทคนิคอื่นๆ ที่สูงที่สุด

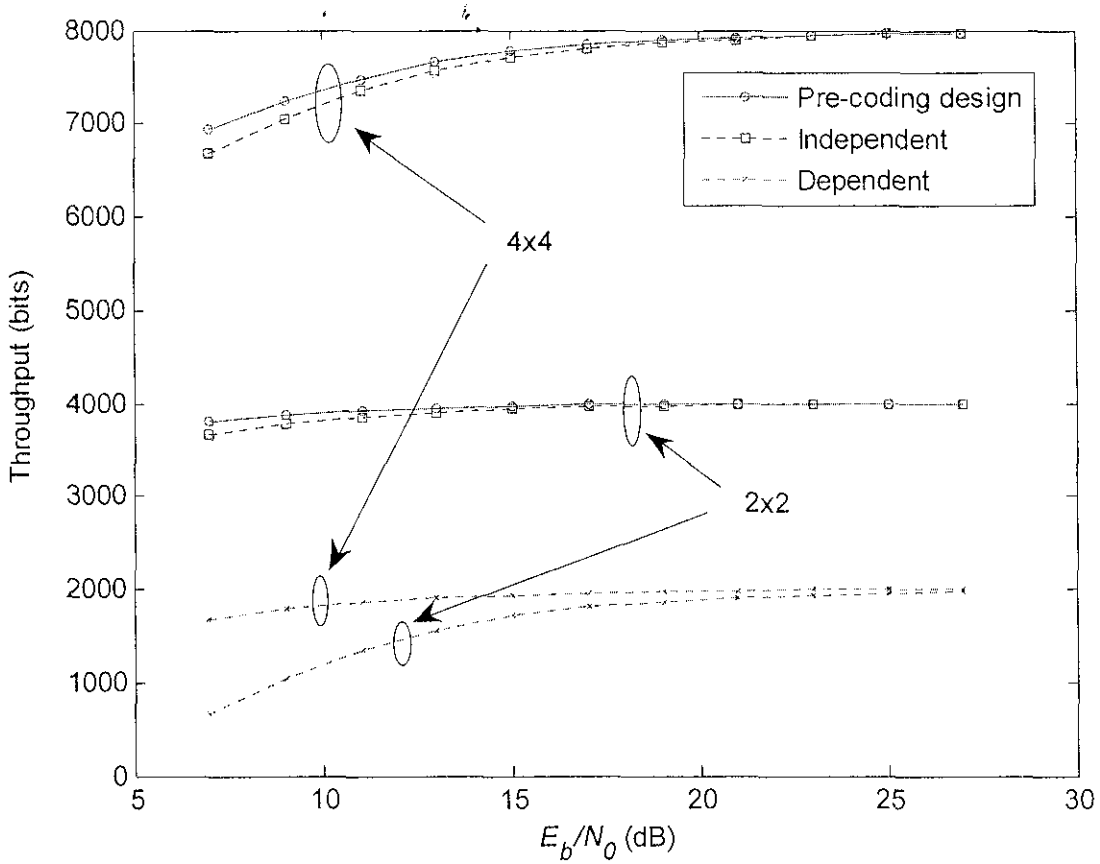
นอกจากนี้การจำลองแบบยังคงทำในเงื่อนไขอื่นๆ ของ Rice K factor และเปลี่ยนจำนวนของสายอากาศ แต่ผลที่ได้นั้นยังคงยืนยันข้อสรุปเดิมที่ได้ว่าความจุของช่องสัญญาณนั้นจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ



รูปที่ 4- 3 สมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาด เมื่อ $N_R = N_T = 2, 4$ และ $K = 0, 10$

ภาคส่งทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์ ดังที่เห็นในรูปที่ 4- 2 ความจุของช่องสัญญาณแบบที่ภาคส่งทราบค่าความจุของช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์นั้นให้ค่าความจุที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้นเป็นการยากมากที่จะทำให้ภาคส่งทราบข้อมูลแบบสมบูรณ์นั้นเป็นไปไม่ได้เลยในทางปฏิบัติ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งไปที่การทราบข้อมูลแบบไม่สมบูรณ์

ความจุของช่องสัญญาณเป็นเพียงแค่ค่าที่บ่งบอกถึงสมรรถนะทางทฤษฎีเท่านั้นดังนั้นเพื่อจะทำให้ทราบถึงข้อดีของเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในทุกแง่มุม การหาสมรรถนะบนตัวแปรที่ใช้งานทางปฏิบัติจึงจำเป็นมาก ในงานวิจัยนี้จึงใช้ค่าอัตราการส่งข้อมูลผิดพลาดในรูปของอัตราบิตผิดพลาด (Bit Error Rate : BER) และปริมาณบิตที่ส่งได้ (Throughput) โดยที่จะสุ่ม 8,000 บิตที่ผสมสัญญาณแบบ QPSK และหาค่าเฉลี่ยจากการสุ่ม 10,000 ช่องสัญญาณ ในรูปที่ 4-3 แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาดเทียบกับอัตราส่วนของพลังงานบิตต่อสัญญาณรบกวน (E_b/N_0) สำหรับค่า $K = 0$ และ 10, $N_T = N_R = 2$ และ 4 จากรูป



รูปที่ 4- 4 สมรรถนะของปริมาณบิตที่ส่งได้ เมื่อ $N_R = N_T = 2, 4$ และ $K = 0, 10$

ที่ 4- 3 จะเห็นได้ว่าค่าสมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาดนั้นจะแย่ลงและแปรผันตาม Rice K factor และจำนวนของสายอากาศ นอกจากนี้ค่าสมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาดที่ดีที่สุดสามารถได้รับจากเทคนิคที่พัฒนาขึ้นเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ

จากรูปสามารถสังเกตได้ว่าสมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาดของทั้งกรณี Independent และ Dependent นั้นจะให้ผลที่คล้ายๆ กัน แต่ค่าอัตราบิตผิดพลาดนี้เป็นเพียงตัวบ่งบอกคุณภาพของระบบเท่านั้นซึ่งยังไม่ใช่ปริมาณการส่งข้อมูลจริง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงดูต่อไปถึงค่าปริมาณบิตที่ส่งได้เพื่อประกอบการพิจารณาคู่กับอัตราบิตผิดพลาด รูปที่ 4- 4 แสดงถึงปริมาณบิตที่ส่งได้ของระบบ สำหรับ $K = 0, N_T = N_R = 2$ และ 4 ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าปริมาณบิตที่แตกต่างกันนั้นเกิดขึ้นจากกรณีที่เป็น Independent และ Dependent ซึ่งไม่เหมือนบทสรุปจากอัตราบิตผิดพลาดในรูปที่ 4- 3 ทั้งนี้เกิดขึ้นเพราะว่าสัญญาณที่ส่งออกไปของเทคนิคแบบ Dependent นั้นเป็นข้อมูลที่สัมพันธ์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเหมือนกันหมดทุกเส้นทางของสายอากาศภาคส่งนั้นเอง ดังนั้นปริมาณบิตที่ส่งออกไปได้นั้นจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ $1/N_T$ เท่าของเทคนิคแบบ Independent และเมื่อสรุปจากรูปที่ 4- 2 ถึงรูปที่ 4- 4 สามารถกล่าวได้ว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นนั้นเหนือกว่าเทคนิคอื่นๆ แต่จำเป็นที่ภาคส่งต้องรู้ค่าของ Rice K factor และ SNR เท่านั้น

4.3 การพัฒนาเทคนิคการส่งข้อมูลให้เหมาะสมต่อสภาวะการทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ สำหรับผู้ใช้งานหลายคน

จากหัวข้อที่แล้วพบว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นนั้นประสบความสำเร็จมากเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ แต่สำหรับการใช้งานจริงในทางปฏิบัตินั้น ระบบจะต้องสามารถรองรับการใช้งานจากผู้ใช้งานหลายๆ คนได้พร้อมๆ กัน ซึ่งงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาต่อยอดมาให้สามารถนำเทคนิคในหัวข้อที่แล้วมาใช้กับผู้ใช้งานหลายๆ คนได้ โดยการพัฒนาเมตริกซ์เข้ารหัสล่วงหน้ามาใช้กับปัญหาที่มีผู้ใช้งานหลายคน สำหรับปัญหานี้ได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลกเพราะว่าเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติและสามารถนำไปสู่การพัฒนาต้นแบบเพื่อใช้งานในทางการค้าได้อีกด้วย

จุดประสงค์หลักของการแก้ปัญหานี้อยู่ที่การกำจัดสัญญาณแทรกแซงร่วมช่องสัญญาณ (Co-channel interference; CCI) ซึ่งเกิดเนื่องจากผู้ใช้งานหลายๆ คนที่ส่งสัญญาณในความถี่เดียวกัน ณ เวลาเดียวกันด้วย จากการสำรวจวรรณกรรมเกี่ยวกับปัญหาที่มีผู้ใช้งานหลายคนนี้พบว่ามีงานวิจัยส่วนใหญ่ที่พัฒนาด้วยเทคนิคแบบเข้ารหัสล่วงหน้า ซึ่งบางงานวิจัยเรียกว่า linear transmit pre-processing techniques [26-29] สาเหตุที่เทคนิคแบบเข้ารหัสล่วงหน้าได้รับความสนใจมากนั้นก็เพราะว่าเทคนิคนี้มีความซับซ้อนที่ต่ำมาก

และต้องการส่วนต่างๆที่เพิ่มขึ้นในระบบน้อยที่สุด จุดประสงค์ของเทคนิคเหล่านี้ก็เพื่อต้องการปรับสัญญาณที่ภาคส่งตามข้อมูลของช่องสัญญาณดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ในบางงานวิจัย [26] เทคนิคการเข้ารหัสล่วงหน้าสำหรับผู้ใช้งานหลายคนนั้นได้ถูกกำหนดด้วยวิธีการใช้ค่า Eigenvector Beam Forming (EBF) เพื่อหาค่าที่มากที่สุดของ SNR ซึ่งเทคนิคนี้ได้ถูกพัฒนาต่อเพื่อหาค่าที่มากที่สุดของ Signal to Jamming and Noise Ratio (SJNR) [27] นอกจากนี้ยังมีอีกหลายงานวิจัย [28-29] ที่ใช้ค่าของ Singular Value Decomposition (SVD) เพื่อกำหนดเมตริกซ์เข้ารหัสล่วงหน้า

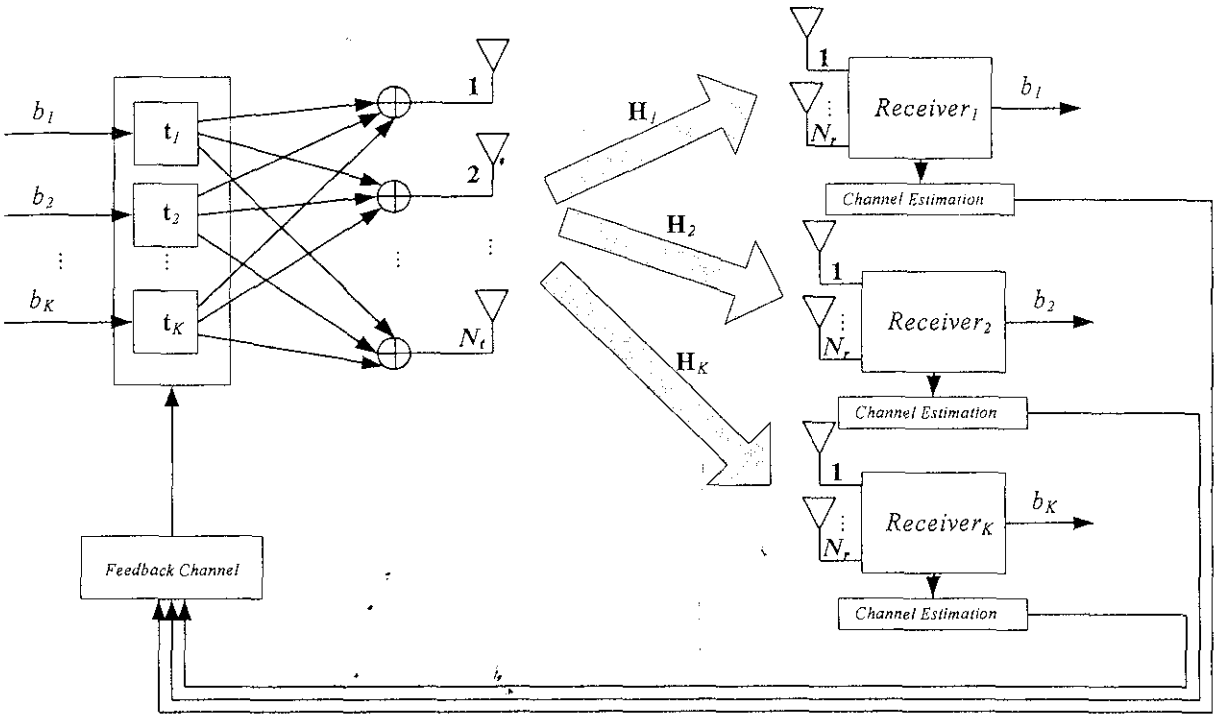
เทคนิคที่กล่าวไปแล้วนั้นอยู่บนสมมุติฐานที่ภาคส่งจะต้องทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติด้วยเหตุผลที่เคยกล่าวไปในหัวข้อที่แล้ว ดังนั้นเทคนิคที่สามารถใช้งานเมื่อภาคส่งทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์จึงน่าสนใจกว่ามาก ในหัวข้อนี้จะนำวิธีการเข้ารหัสแบบล่วงหน้าเหมือนที่นำเสนอในหัวข้อที่แล้วมาประยุกต์ใช้ภายใต้การใช้งานของผู้ใช้หลายๆคนพร้อมๆ กัน เทคนิคใหม่ที่พัฒนาขึ้นนี้ก็จะอยู่บนพื้นฐานของการหาค่าที่มากที่สุดของ SJNR ด้วยเทคนิคใหม่นี้ก็จะสามารถคิดถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในสภาวะการทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์

4.3.1 หลักการเทคนิคการเข้ารหัสล่วงหน้า สำหรับผู้ใช้งานหลายคน

รูปแสดงโครงสร้างของระบบ MIMO ที่ใช้งานกับผู้ใช้หลายคนแสดงในรูปที่ 4- 5 ในระบบนี้ประกอบด้วยสายอากาศที่ภาคส่งจำนวน N_t และสายอากาศที่ภาครับของผู้ใช้งานคนที่ kth มีจำนวน N_r ซึ่งในระบบมีจำนวนผู้ใช้งานทั้งหมดจำนวน K ที่ผู้ใช้งานทั้งหมดส่งสัญญาณในเวลาเดียวกันบนความถี่เดียวกัน ในงานวิจัยนี้สมมุติว่าช่องสัญญาณเป็นแบบ flat fading ซึ่งอธิบายด้วย $N_r \times N_t$ matrix $\mathbf{H}_k$ สมาชิกในเมตริกซ์นี้เป็นแบบ independently identically distributed (i.i.d.) ที่มีการกระจายตัวแบบ zero mean complex Gaussian random variables ด้วยค่า variance เท่ากับหนึ่ง

สมมุติให้ b_k เป็นตัวแทนของสัญลักษณ์ของข้อมูลที่ส่งออกของผู้ใช้งานที่ kth โดยจะส่งผ่านไปยังเวกเตอร์การเข้ารหัสล่วงหน้า $N_t \times 1$ vectors $\mathbf{t}_k$ (ในปัญหาแบบผู้ใช้งานหลายคนจะไม่เหมือนกับแบบผู้ใช้งานคนเดียวเพราะเลือกใช้เวกเตอร์แทนเมตริกซ์) ดังนั้นสัญญาณเบสแบนด์ที่ภาครับของผู้ใช้งานคนที่ kth สามารถอธิบายด้วยสมการที่ (4-5)

$$\mathbf{r}_k = \sum_{i=1}^{K} \mathbf{H}_k \mathbf{t}_i b_i + \mathbf{n}_k \tag{4-5}$$



รูปที่ 4- 5 ระบบ MIMO ที่มีหนึ่งภาคส่งและ K ภาครับ

เมื่อสัญญาณรบกวน $\mathbf{n}_k$ คือเวกเตอร์ $N_r \times 1$ ที่เป็น i.i.d. zero mean complex Gaussian random variables ด้วยค่า variance N_0

สำหรับสภาวะที่ภาคส่งไม่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ ช่องสัญญาณของระบบ MIMO สามารถจำลองได้ด้วยเมตริกซ์เชิงซ้อน $\mathbf{H}_k^e = \mathbf{H}_k + \mathbf{\Sigma}_k$ [7] โดยที่ $\mathbf{\Sigma}_k$ แสดงถึงเมตริกซ์ที่ไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณซึ่งมีสมาชิกเป็น zero mean complex Gaussian random variables ด้วยค่า variance σ_e^2 ดังนั้นภายใต้เงื่อนไขของช่องสัญญาณนี้ สัญญาณที่ภาครับของผู้ใช้งานคนที่ kth สามารถแสดงด้วยสมการที่(4-6)

$$\mathbf{r}_k = \sum_{i=1}^{K} (\mathbf{H}_k + \mathbf{\Sigma}_k)\mathbf{t}_i b_i + \mathbf{n}_k \tag{4-6}$$

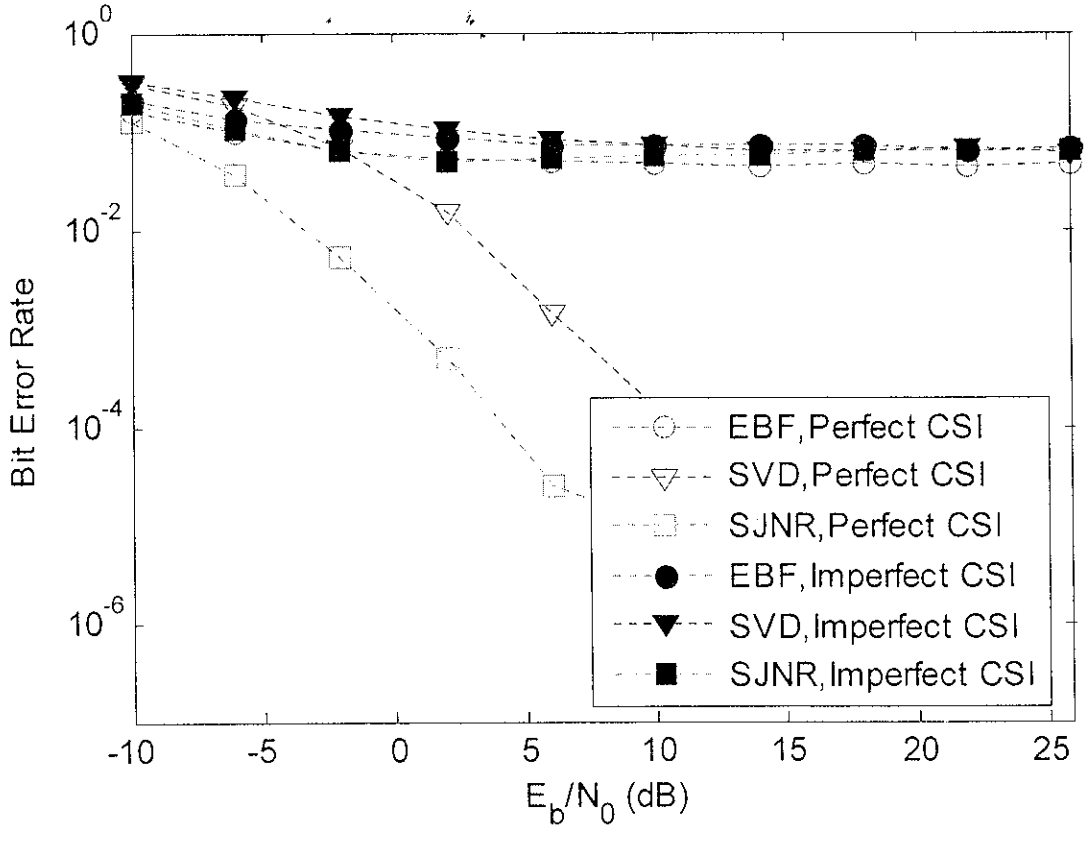
ด้วยหลักการของการเข้ารหัสล่วงหน้า เวกเตอร์ $\mathbf{t}_i$ ในสมการที่ (4-6) เป็นตัวแปรที่ต้องการหาซึ่งจะขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณโดยพิจารณาจากค่าความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณที่ได้รับแบบ

ไม่สมบูรณ์ ในงานวิจัยนี้เลือกพัฒนาบนเทคนิค SJNR เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ให้สมรรถนะของระบบดีที่สุด โดยที่มีสมการตั้งต้นของปัญหาแสดงในสมการที่ (4-7)

$$SJNR_k = \frac{E\left\{\mathbf{t}_k^{\dagger}(\mathbf{H}_k+\boldsymbol{\Sigma}_k)^{\dagger}(\mathbf{H}_k+\boldsymbol{\Sigma}_k)\mathbf{t}_k\right\}}{E\left\{\mathbf{t}_k^{\dagger}\left(\sum_{i=1,\neq k}^{K}(\mathbf{H}_i+\boldsymbol{\Sigma}_i)^{\dagger}(\mathbf{H}_i+\boldsymbol{\Sigma}_i)\right)\mathbf{t}_k+N_0\right\}} \tag{4-7}$$

โดยที่ † แสดงถึงการดำเนินการของ conjugate และ transpose

ผลเฉลยของการหาค่าที่มากที่สุดของ SJNR ในสมการที่ (4-7) นั้นสามารถหาได้จากการใช้ผลเฉลยเฉพาะของปัญหาแบบ generalised Rayleigh quotient problem [8] เนื่องจากค่า expectation ของเมตริกซ์ไม่



รูปที่ 4- 6 ผลกระทบของความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ เมื่อ N_t = 7, K = 3, N_r = 3, σ_e^2 = 0 (สภาวะสมบูณ์) และ 0.5 (ไม่สมบูรณ์)

สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ Σ_k เป็นแบบที่ทราบค่าดังนั้นเวกเตอร์เข้ารหัสล่วงหน้า ซึ่งจะเรียกเทคนิคนี้ว่า modified SJNR สามารถคำนวณได้จากค่า eigenvalue ที่มากที่สุดของเมตริกซ์ต่อไปนี้

$$\left(\left(\sum_{i=1,\neq k}^{K}\mathbf{H}_i^{\dagger}\mathbf{H}_i\right)+(N_0+N_r(K-1)\sigma_e^2)\mathbf{I}\right)^{-1}\left(\mathbf{H}_k^{\dagger}\mathbf{H}_k+N_r\sigma_e^2\mathbf{I}\right)$$

สำหรับเทคนิคอื่นๆ ที่ทำมาเปรียบเทียบในรายงานวิจัยฉบับนี้มีรายละเอียดของเทคนิคโดยคร่าวดังต่อไปนี้

1. เทคนิค EBF

เทคนิคนี้พิจารณาการกำจัดสัญญาณแทรกแซงช่องสัญญาณร่วม (Co-Channel Interference: CCI) โดยไม่สนใจว่าสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณจะสูงเท่าใด ทำให้ภาพรวมของเทคนิคนี้คล้ายกับวิธีการของ Zero Forcing (ZF) แต่ผลกระทบที่สำคัญของการใช้ ZF คือขีดจำกัดที่คงที่ของโครงสร้างในระบบ MIMO ในรูปแบบจำนวนสายอากาศที่ภาคส่งและรับ เวกเตอร์เข้ารหัสล่วงหน้าของเทคนิค EBF หาได้จากสมการที่ (4-8)

$$\mathbf{t}_k = \arg\limits_{\mathbf{v}_i\in\mathbf{V}_k}\left\{\lambda_k^{\max}=\mathbf{u}_i^{\dagger}\mathbf{H}_k\mathbf{v}_i\right\} \tag{4-8}$$

โดยที่ $\lambda_k^{\max}$ คือค่า eigenvalue ที่มากที่สุดของเมตริกซ์ $\mathbf{H}_k$ และ $\mathbf{H}_k=\mathbf{U}_k\mathbf{\Lambda}_k\mathbf{V}_k^{\dagger}$

สังเกตได้ว่าผลเฉลยในสมการที่ (4-8) เป็นผลเฉลยที่ตรงกับปัญหาการหาค่าที่มากที่สุดของ SNR ในสถานะการณ์ที่มีผู้ใช้หลายคนในระบบ MIMO

2. เทคนิค SVD

เทคนิคนี้เป็นการหาเวกเตอร์เข้ารหัสล่วงหน้าที่ใช้การแยกลักษณะของสัญญาณในระบบ MIMO ที่มีผู้ใช้งานพร้อมๆ กัน โดยแยกเป็นผู้ใช้งานแต่ละคนที่ช่องสัญญาณเสมือนแบบขนาน ดังนั้นเทคนิคอะไรก็ตามที่ใช้งานได้กับผู้ใช้งานเพียงคนเดียวก็สามารถนำมาประยุกต์เข้ากับเทคนิคนี้ได้ ตัวอย่างอาทิเช่น ระบบ V-BLAST หรือระบบที่ร่วมการประมวลผลที่ภาคส่งและรับซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เทคนิคที่เรียกว่า SVD (Singular Value Decomposition) กุญแจสำคัญของการแยกลักษณะสัญญาณออกมานั้นจึนอยู่กับกาสัญญาณของผู้ใช้งานแต่ละคน ถ้าแต่ละคนมีสัญญาณที่เป็นอิสระต่อกันมาก การแยกสัญญาณก็จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย ผลที่ตามมาคือประสิทธิภาพของระบบโดยรวมก็จะสูงตามไปด้วย สำหรับเวกเตอร์เข้ารหัสล่วงหน้าสามารถหาได้จากสมการที่ (4-9)

$$\mathbf{t}_k \in \bigcap_{i=1, i\neq k}^{K} \ker(\mathbf{H}_i). \tag{4-9}$$

โดยที่ ker(·) หมายถึง null space หรือ kernel ของเมตริกซ์ (·)

เทคนิคนี้สามารถทำงานได้ดีภายใต้เงื่อนไขของจำนวนสายอากาศส่งและรับ ถ้าจำนวนผู้ส่งและรับมากกว่าจำนวนสายอากาศที่กำหนดไว้ ระบบก็จะไม่สามารถทำงานได้เลยเพราะสัญญาณจะกวนกันโดยไม่สามารถแยกออกมาได้ สำหรับเงื่อนไขที่กำหนดไว้เป็นไปตามสมการที่ (4-10)

$$N_t > (K-1)N_r. \tag{4-10}$$

3. เทคนิค SJNR

เป็นเทคนิคที่ต้องการหาค่าที่มากที่สุดของอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนและสัญญาณแจม (Signal to Jamming and Noise Ratio) ดังนั้นมันเป็นไปได้มากที่จะกำจัด CCI และสัญญาณรบกวนที่เวลาเดียวกัน สำหรับเวกเตอร์เข้ารหัสล่วงหน้าของวิธี SJNR นั้นสามารถหาได้จากค่า eigenvalue ที่มากที่สุดของเมตริกซ์ต่อไปนี้

$$\left(\left(\sum_{i=1, i\neq k}^{K} \mathbf{H}_i^{\dagger}\mathbf{H}_i\right) + N_0\mathbf{I}\right)^{-1}\left(\mathbf{H}_k^{\dagger}\mathbf{H}_k\right)$$

สำหรับสมการวิเคราะห์ BER Throughput ที่ได้จากเทคนิคต่างๆ นั้น สามารถใช้หลักการวิเคราะห์ของทฤษฎีพื้นฐานในระบบการสื่อสารไร้สายทั่วไปได้ ทั้งนี้เพราะเมื่อแทนค่าเวกเตอร์เข้ารหัสล่วงหน้าที่หาได้จากเทคนิค modified SJNR EBF SVD และ SJNR ลงในสมการที่ (4-7) จะทำให้ได้ค่า SJNR ของผู้ใช้งานแต่ละคน จากนั้นก็นำ SJNR นี้ไปวิเคราะห์หา BER ตามประเภทของการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ ดังตัวอย่างในสมการต่อไปนี้

FSK modulation $$BER_{FSK} = Q\left(\sqrt{SJNR}\right) \tag{4-11}$$

BPSK modulattoo $$BER_{BPSK} = Q\left(\sqrt{SJNR}\right) \tag{4-12}$$

QPSK modulattoo $$BER_{QPSK} = Q\left(\sqrt{SJNR}\right) \tag{4-12}$$

M-QAM modulation $$\mathrm{BER}_{M-QAM} \approx 0.2\exp\left(-g\ (b)SJNR\right) \tag{4-13}$$

$$g(b) = \begin{cases} \dfrac{6}{5\cdot 2\ -4} & b = 1,3,5,... \\ \dfrac{6}{4\cdot 2\ -4} & b = 2,4,6,... \end{cases}$$

4.3.2 ผลจากการจำลองแบบ

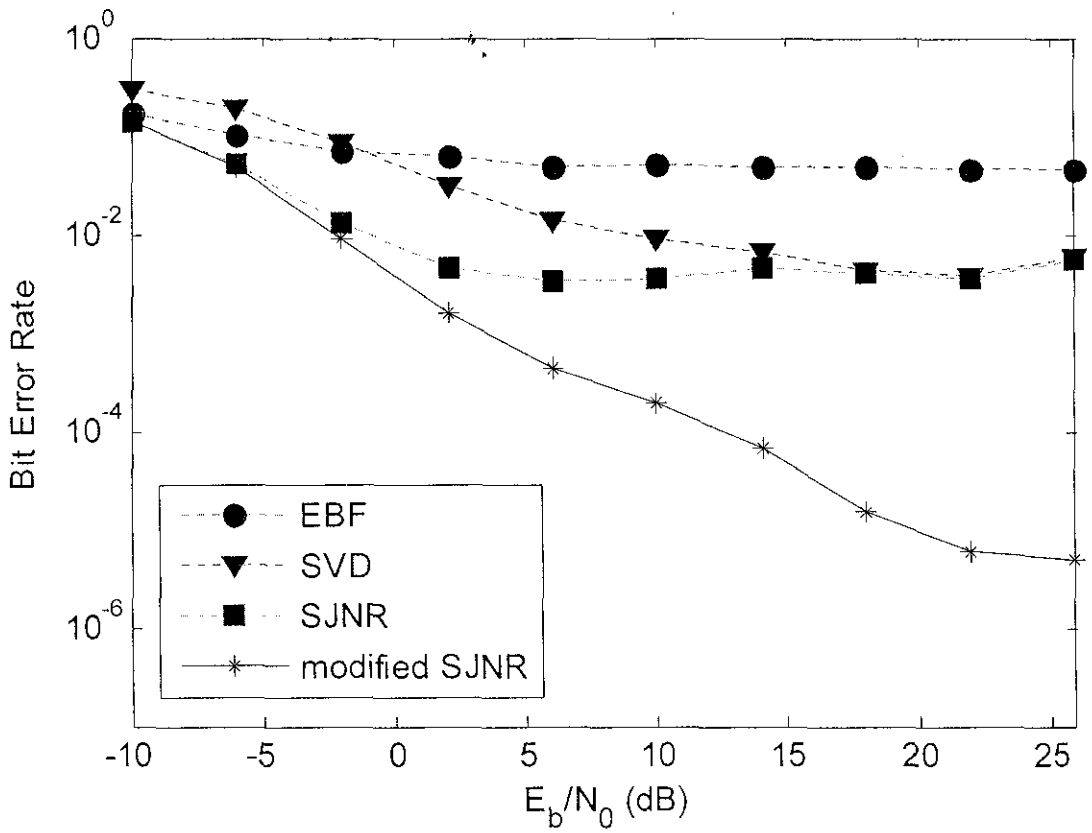
รูปที่ 4- 6 แสดงผลกระทบของความไม่สมบูรณ์ในการทราบค่าข้อมูลของช่องสัญญาณบนสมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาดจากเทคนิคต่างๆ ดังนี้ EBF, SVD และ SJNR สำหรับการผสมสัญญาณแบบ QPSK เมื่อ $Nt = 7$, $Nr = 3$, $K = 3$ และ $\sigma_e^2 = 0$, 0.5 เวกเตอร์เข้ารหัสล่วงหน้า $\mathbf{t}_k$ ของเทคนิคแบบ EBF, SVD และ SJNR นั้นสามารถหาได้ตามงานวิจัยที่อ้างถึงใน [26], [28-29] และ [27] ตามลำดับ ผลที่แสดงในรูปชี้ให้เห็นว่าเทคนิคทั้งหมดนี้ล้มเหลวเมื่ออยู่ในสภาวะที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ ทั้งนี้เป็นเพราะภาคส่งใช้ค่าเวกเตอร์เข้ารหัสล่วงหน้าที่คำนวณมาจากช่องสัญญาณที่สมบูรณ์นั้นเอง

ผลในการจำลองแบบถัดไปนั้นแสดงถึงสมรรถนะของเทคนิค modified SJNR ที่เสนอในงานวิจัยนี้ โดยนำไปเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ อันได้แก่เทคนิค EBF, SVD และ SJNR ผลที่ได้เกิดจากการสุ่มข้อมูลบิตที่มีการผสมสัญญาณแบบ QPSK และช่องสัญญาณของระบบ MIMO เป็นแบบสุ่ม รูปที่ 4- 7 แสดงถึงสมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาดของเทคนิคแบบ EBF, SVD, SJNR และ modified SJNR สำหรับ $Nt = 7$, $Nr = 3$, $K = 3$, $\sigma_e^2 = 0.1$ จากผลในรูปที่ 4- 6 พบว่าเทคนิคแบบ SJNR ให้อัตราบิตผิดพลาดที่น้อยที่สุดเมื่อภายใต้สภาวะของการทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์ แต่สำหรับรูปที่ 4- 7 นั้นอัตราบิตผิดพลาดของเทคนิค SJNR เข้าใกล้เทคนิคแบบ SVD เมื่อค่า Eb/N0 สูงๆ ด้วยเหตุผลที่ความไม่สมบูรณ์ของการทราบข้อมูลของช่องสัญญาณนั้นในกรณีที่ Eb/N0 มีค่าต่ำๆ นั้นถูกพิจารณาเสมือนเป็นสัญญาณรบกวนธรรมดาในระบบเท่านั้นเอง ทำให้เทคนิคแบบ SJNR มีสมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาดที่ดีกว่าเทคนิคแบบ EBF และSVD แต่สำหรับกรณีที่ Eb/N0 มีค่าสูงๆ นั้น ค่าความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณนั้นจะเป็นเหตุให้กำลังของสัญญาณแทรกแซงร่วมช่องสัญญาณมีค่าสูงมากกว่าสัญญาณรบกวน ในกรณีนี้ทั้งเทคนิคแบบ SVD และ SJNR ไม่สามารถกำจัดข้อผิดพลาดเหล่านี้ออกไปได้หมดสิ้น ถึงอย่างไรก็ตามเทคนิคแบบ modified SJNR สามารถให้สมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาดดีที่สุดเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ซึ่งผลนี้เป็นจริงสำหรับในทุกกรณีของ Eb/N0 ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเทคนิคนี้ได้นับความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณเข้าไปในการคำนวณหาเวกเตอร์เข้ารหัสล่วงหน้า

รูปที่ 4- 8 ได้แสดงยืนยันถึงข้อดีของการใช้เทคนิคแบบ modified SJNR ว่าเหนือว่าเทคนิคอื่นๆ ด้วยการเปลี่ยนค่าตัวแปรของ N_t และ N_r ในรูปที่ 4- 9 ค่าสมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาดของเทคนิค modified SJNR เทียบกับ σ_e^2 ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 ได้ถูกคำนวณด้วยการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการหาความไวต่อสภาวะของความไม่สมบูรณ์ในช่องสัญญาณ

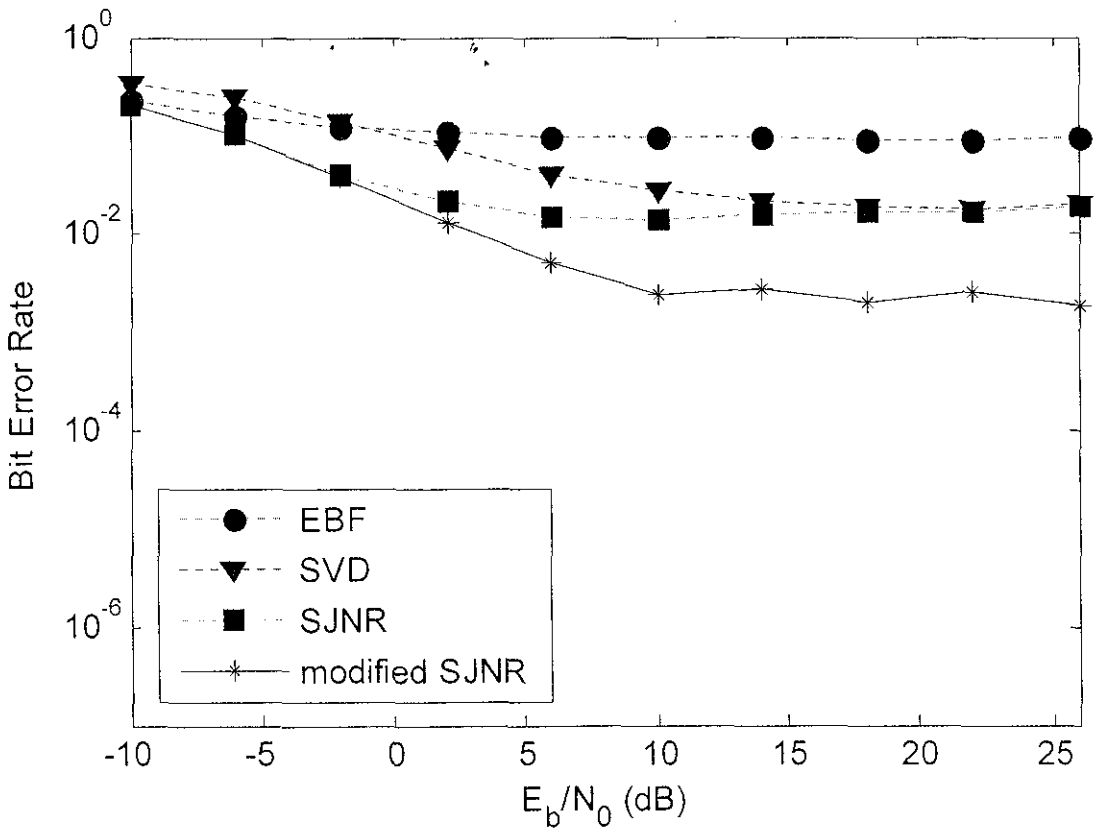
4.4 กล่าวท้ายบท

จากเนื้อหาบทนี้พบว่าการเข้ารหัสล่วงหน้าที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการส่งข้อมูลของระบบ MIMO ในสภาวะที่ภาคส่งทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์

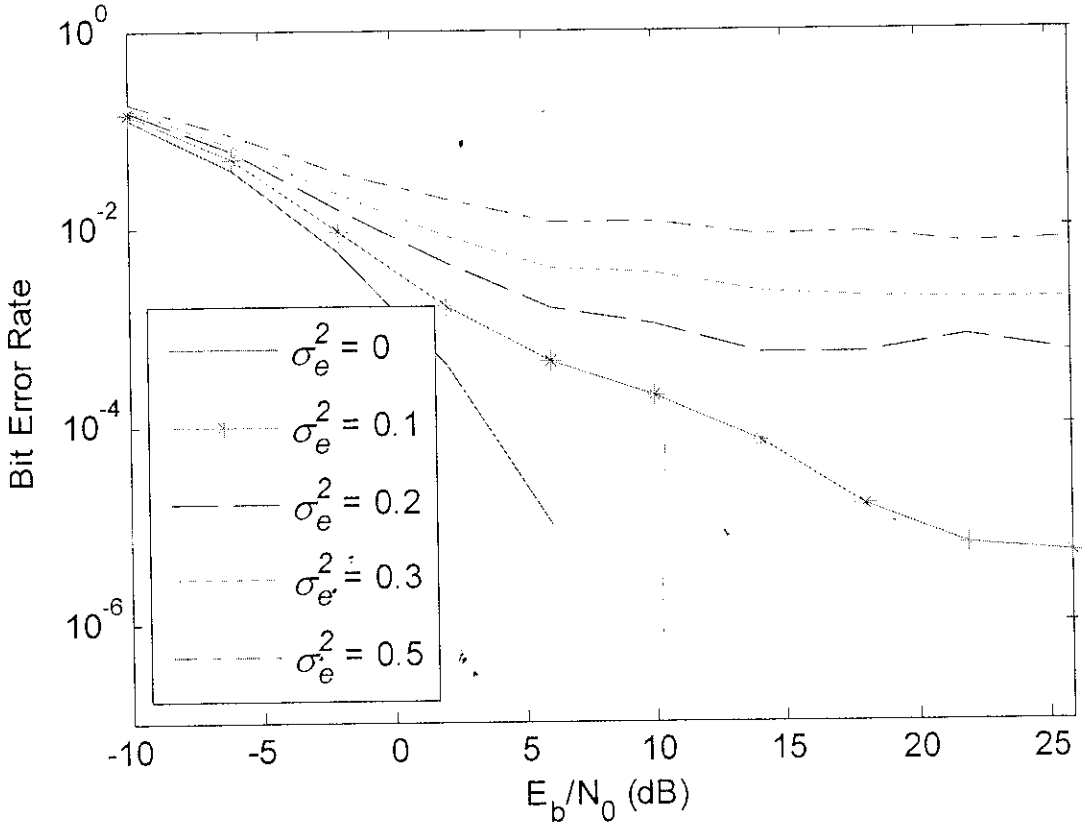


รูปที่ 4- 7 สมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาดจากเทคนิคต่างๆ เมื่อ $N_t = 5, K = 3, N_r = 2, \sigma_e^2 = 0.1$

โดยได้มีการเปรียบเทียบสมรรถนะกับเทคนิคอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นค่าความจุของช่องสัญญาณซึ่งเป็นดรรชนีชี้วัดความสำเร็จทางทฤษฎี และค่าอัตราบิตผิดพลาดที่แสดงคุณภาพของระบบในทางปฏิบัติ ความสำเร็จอีกอย่างหนึ่งของงานเทคนิคที่พัฒนาขึ้นนี้ก็คือแนวทางที่สามารถนำเทคนิคนี้ไปดำเนินการใช้งานจริงได้ทันที เพราะเทคนิคนี้ได้ออกแบบบนพื้นฐานของสัญญาณที่อยู่ในระดับกายภาพ โดยที่ไม่ต้องมีความซับซ้อนใดๆ เพิ่มเติมอีกเลย นอกจากนี้งานวิจัยยังได้ขยายผลต่อไปยังระบบที่พิจารณาผู้ใช้งานหลายๆ คนพร้อมๆ กันโดยมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาเทคนิคด้วยการเข้ารหัสล่วงหน้า ผลจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์พบว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นสามารถให้สมรรถนะของระบบ MIMO ได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ



รูปที่ 4- 8 สมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาดจากเทคนิคต่างๆ เมื่อ $N_t = 7, K = 3, N_r = 3, \sigma_e^2 = 0.1$



รูปที่ 4- 9 สมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาดจากเทคนิคต่างๆ เมื่อ $N_t = 7, K = 3, N_r = 3, \sigma_e^2 = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5$

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเรื่องระบบ MIMO ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่สำคัญสำหรับการสื่อสารไร้สายในอนาคต โดยมุ่งเน้นพัฒนาไปที่แทคนิคการส่งข้อมูลของระบบ MIMO เพื่อให้สามารถได้เทคนิคที่มีประสิทธิภาพและสามารถนำไปดำเนินการปฏิบัติได้จริง จากการพิสูจน์ทางทฤษฎีพบว่าค่าความจุของช่องสัญญาณในระบบ MIMO มีค่าเป็นจำนวน N เท่าของระบบปกติ ซึ่งค่า N นั้นขึ้นกับจำนวนของสายอากาศภาคส่งและภาครับ ทำให้ระบบ MIMO นั้นเป็นที่น่าสนใจสำหรับอนาคต แต่ความจุของช่องสัญญาณนั้นขึ้นกับปัจจัยหลักสองประการคือ คุณลักษณะของช่องสัญญาณในรูปของเมตริกซ์ **H** และเทคนิคการส่งข้อมูลในรูปของค่าเมตริกซ์ Covariance **Q** สำหรับช่องสัญญาณ **H** นั้นมีคุณลักษณะที่เปลี่ยนไปตามลักษณะสิ่งแวดล้อมในการสื่อสารไร้สายนั้น โดยมีผลกระทบหลักๆ จากการสะท้อน เลี้ยวเบนและกระเจิง จึงทำให้รูปแบบการกระจายตัวทางคณิตศาสตร์สามารถใช้แบบจำลอง Rician fading channel แทนได้ ผลจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของความจุของช่องสัญญาณนั้นอ่อนไหวต่อลักษณะของช่องสัญญาณมาก ดังนั้นจึงจำเป็นที่ต้องมีการปรับเปลี่ยนเทคนิคการส่งข้อมูลที่ภาคส่งเพื่อให้สอดคล้องต่อช่องสัญญาณนั้นๆ อันจะทำให้เกิดความจุของช่องสัญญาณที่มากที่สุดได้ เทคนิคการส่งข้อมูลที่เหมาะสมในระบบ MIMO ซึ่งอยู่ในรูปของค่าเมตริกซ์ Covariance Q สามารถทำให้ระบบได้ค่าความจุของช่องสัญญาณที่สูงที่สุดไม่ว่าจะเป็นสถานการณ์ใดก็ตาม แต่การที่จะปรับเปลี่ยนค่า Q ได้นั้นจำเป็นที่ภาคส่งจะต้องทราบข้อมูลของช่องสัญญาณเสียก่อน การทราบข้อมูลนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือในสภาวะที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์ และในสภาวะที่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ ผลจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์สามารถสรุปได้ว่าค่าขีดจำกัดบน และค่าเฉลี่ยของความจุของช่องสัญญาณมีค่าตรงกับค่าที่ได้ตามทฤษฎี ดังนั้นการใช้การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ก็สามารถให้ค่าที่น่าเชื่อถือได้ ทำให้สามารถวิเคราะห์สถานการณ์อื่นๆ ได้เพิ่มขึ้นอีกมาก อย่างไรก็ตามเทคนิคการส่งข้อมูลเหล่านี้เป็นเพียงแค่ค่าตามทฤษฎี หรือเป็นแค่ค่าเมตริกซ์ Covariance **Q** เท่านั้นไม่สามารถนำไปออกแบบในการใช้งานจริงได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องมีการพัฒนาเทคนิคเพื่อเปลี่ยนเมตริกซ์ Covariance **Q** ให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้งานได้จริง

จากการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่าการเข้ารหัสล่วงหน้าที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้เป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการส่งข้อมูลของระบบ MIMO ในสภาวะที่ภาคส่งทราบข้อมูลของช่องสัญญาณแบบไม่สมบูรณ์ โดยได้มีการเปรียบเทียบสมรรถนะกับเทคนิคอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นค่าความจุของช่องสัญญาณซึ่งเป็นดรรชนีชี้วัดความสำเร็จทางทฤษฎี และค่าอัตราบิตผิดพลาดที่แสดงคุณภาพของระบบในทางปฏิบัติ ความสำเร็จอีกอย่างหนึ่งของงานเทคนิคที่พัฒนาขึ้นนี้ก็คือแนวทางที่สามารถนำเทคนิคนี้ไปดำเนินการใช้งานจริงได้ทันที เพราะเทคนิคนี้ได้ออกแบบบนพื้นฐานของสัญญาณที่อยู่ในระดับกายภาพ โดยที่ไม่ต้องมีความซับซ้อนใดๆ เพิ่มเติมอีกเลย นอกจากนี้งานวิจัยยังได้ขยายผลต่อไปยังระบบที่พิจารณาผู้ใช้งานหลายๆ คนพร้อมๆ กัน โดยมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาเทคนิคด้วยการเข้ารหัสล่วงหน้า ผลจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์พบว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นสามารถให้สมรรถนะของระบบ MIMO ได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ

5.2 ข้อแสนอแนะ

1. การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์นี้เป็นเพียงผลงานเบื้องต้นที่ระบุถึงความสำเร็จของการใช้เทคนิคการส่งข้อมูลในสภาวะแบบไม่สมบูรณ์ แต่ก็ยังเป็นที่น่าสนใจว่าสมรรถนะของเทคนิคนี้ในทางปฏิบัติแล้วจะให้ผลเป็นอย่างไร ซึ่งหากต้องการยืนยันข้อสรุปของความสำเร็จจากเทคนิคที่พัฒนาขึ้นนั้นจำเป็นที่จะต้องดำเนินการสร้างชุดระบบทดสอบ MIMO การสร้างชุดทดสอบนี้อาศัยทั้งเวลาในการวิจัยและทุนทรัพย์
2. การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์นั้น ผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานว่าไม่มีผลกระทบเนื่องจาก Mutual Coupling ระหว่างสายอากาศที่ภาคส่งและรับ ซึ่งในทางปฏิบัติผลกระทบนี้แม้ว่าจะมีน้อยมากก็ตาม แต่ก็อาจจะส่งผลต่อสมรรถนะในระบบได้เช่นกัน ดังนั้นจึงเป็นหัวข้อที่สำคัญอีกเรื่องหนึ่งที่ควรจะต้องนำ Mutual Coupling นี้มาพิจารณาร่วมด้วยในการออกแบบเทคนิคการส่งข้อมูล

บรรณานุกรม

[1] Gesbert, D., Shafi, M., Shiu, D., Smith, P.J., & Naguib, A. (2003). From Theory to Practice: An Overview of MIMO. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, 21(3), 281-302.

[2] Telatar, E. (1999). Capacity of multiantenna Gaussian channels. **European Transactions on Telecommunication ETT**, 10(6), 585–596.

[3] Paulraj, A.J., Gore, D.A., Nabar, R.U. & Bolcskei, H. (2004). An overview of MIMO communications—a key to gigabit wireless. **Proceedings of the IEEE**, 92(2), 198-218.

[4] Lebrun, G., Faulkner, M., Shafi, M., & Smith, P.J. (2004). MIMO Ricean channel capacity, 2004 **IEEE International Conference on Communications** (pp. 2939 – 2943). IEEE press.

[5] Tang, Z. & Mohan, A.S. (2005). Experimental investigation of indoor MIMO Ricean channel capacity. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, 4, 55-58.

[6] Kang, M. & Alouini, M.-S. (2006). Capacity of MIMO Rician channels. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, 5(1), 112-122.

[7] Jayaweera, S.K. & Poor, H.V. (2002). On the capacity of multi-antenna systems in the presence of Rician fading. **Proceeding of IEEE Vehicular Technology Conference 2002-Fall** (pp. 1963-1967). IEEE press.

[8] Goldsmith, A., Jafar, S.A., Jindal, N & Vishwanath, S. (2003). Capacity limits of MIMO channels. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, 21(5), 684-702.

[9] Skoglund, M. & Jongren, G. (2003). On the capacity of a multiple-antenna communication link with channel side information. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, 21(3), 295-405.

[10] Catreux, S., Erceg, V., Gesbert, D., & Heath, Jr., R.W. (2002). Adaptive modulation and MIMO coding for broadband wireless data networks. **IEEE Communications Magazine**, 40(6), 108-115.

[11] Jöngren, G., Skoglund, M. & Ottersten, B. (2002). Combining beamforming with orthogonal space–time block coding. **IEEE Transactions on Information Theory**, 48, 611–627.

[12] Halonen, T., Romero, J. & Melero, J. (2003). **GSM, GPRS and EDGE Performance**. New York: John Wiley and Sons.

[13] Sarkar, S. & Yu-Cheun Jou. (2001). cdma2000: adaptive reverse link operation using Doppler estimation. **12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications** (pp. F-25-F-29). IEEE press.

[14] Balachandran, K., Ejzak, R., Nanda, S., Vitebskiy, S. & Seth, S. (1999). GPRS-136: high-rate packet data service for North American TDMA digital cellular systems. **IEEE Personal Communications**, 6(3), 34-37.

[15] ETSI (2001). **Broadband radio access networks (BRAN)**; HIPERLAN type2; physical layer (Technical Specification, ETSI 101 475 v1.3.1).

[16] Fukui, N. (2003). Study of channel quality feedback in UMTS HSDPA. **14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications** (pp. 336-340). IEEE press.

[17] Hansen, J. & Bolcskei, H. (2004). A geometrical investigation of the rank-1 Ricean MIMO channel at high SNR. **IEEE International Symposium on Information Theory** (p. 64). IEEE press.

[18] Smith, P. J. & Shafi, M. (2002). On a Gaussian approximation to the capacity of wireless MIMO systems. **International Conference on Communications** (pp. 406–410). IEEE press.

[19] McLachlan, N.W. (1955). **Bessel Functions for Engineers.** Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press.

[20] Jayaweera, S.K. & Poor, H.V. (2005). On the capacity of multiple-antenna systems in Rician fading. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, 4(3), 1102-1111.

[21] Uthansakul, P., Bialkowski, M.E., Durrani, S. & Bialkowski, K. (2005). Effect of Line of Sight Propagation on Capacity of an Indoor MIMO System. **Proceeding of IEEE Antennas and Propagation Society Symposium** (pp. 707 – 710). IEEE press.

[22] Hugh Everett III (1963). Generalized Lagrange Multiplier Method for Solving Problems of Optimum Allocation of Resources. **Operations Research**, 11(3), 399-417.

[23] Patzold, M., Szczepanski, A. & Youssef, N. (2002). Methods for modeling of specified and measured multipath power-delay profiles. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 51(5), 978-988.

[24] Tepedelenlioglu, C., Abdi, A., & Giannakis, G. B. (2003). The Rician k factor: estimation and performance analysis. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, 2(4), 799-810.

[25] Bialkowski, M.E., Uthansakul, P., & Bialkowski, K. (2006). Investigations into the effect of LOS signal blocking on capacity of an indoor MIMO system. **Proceeding of 16th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications** (pp. 1-4). IEEE press.

[26] Chung, J., Hwang, C.-S., Kim, K. and Kim, Y.K. (2003). A random beamforming technique in MIMO systems exploiting multiuser diversity. **IEEE Journal on Selected Areas in Communication**, 21(5), 848-855.

[27] Zhang, J., Wu, Y., Xu, M. and Wang, J. (2005) Linear transmitter precoding design for downlink of multiuser MIMO systems. **Electronics Letters** 41(14), 811-813.

[28] Choi, R.L.U. and Murch, R.D. (2004) A transmit pre-processing technique for multiuser MIMO systems: a decomposition approach. **IEEE Transaction on Wireless Communication** 3(1), 20-24.

[29] Spencer, Q.H., Swindlehurst, A.L. and Haardt, M. (2004) Zero forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels. **IEEE Transaction on Signal Processing** 52(2), 461-471.

ภาคผนวก

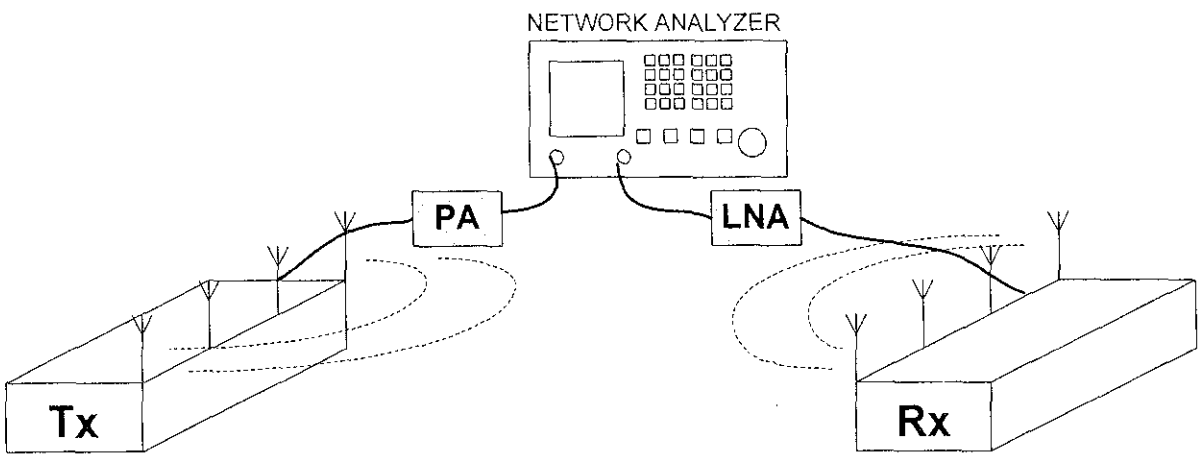
ภาคผนวก ก

การวัดช่องสัญญาณในทางปฏิบัติ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการใช้ข้อมูลของช่องสัญญาณที่ได้จากการวัดจริงบางส่วนเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ของระบบ MIMO โดยการวัดช่องสัญญาณนี้ทำด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1. เครื่องมือวัด Network Analyzer
2. อุปกรณ์ขยายสัญญาณที่ภาคส่ง (Power Amplifier)
3. อุปกรณ์ขยายสัญญาณที่ภาครับ (Low Noise Amplifier)
4. สายอากาศแถวลำดับที่ภาคส่งและภาครับ
5. สายส่งสัญญาณ
6. ฐานรองสายอากาศแถวลำดับที่ภาคส่งและภาครับ

รูปที่ ก- 1 แสดงวิธีการเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อใช้ในการวัดช่องสัญญาณของระบบ MIMO โดยที่เครื่องมือวัด Network Analyzer สามารถวัดได้ทั้งขนาดและมุมเฟสของสัญญาณทำให้สามารถวัดค่าช่องสัญญาณได้โดยตรง แต่ระบบ MIMO เป็นระบบที่มีช่องสัญญาณเป็นชุดเมตริกซ์ ดังนั้นในการวัดค่าแต่



รูปที่ ก- 1 วิธีการเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อใช้วัดช่องสัญญาณของระบบ MIMO

ละครั้งจึงเป็นเพียงแค่สมาชิกหนึ่งในเมตริกซ์ของช่องสัญญาณเท่านั้น เพื่อให้ได้ข้อมูลของช่องสัญญาณที่ครบสมบูรณ์จำเป็นที่จะต้องมีการสลับสายส่งสัญญาณในการวัดที่ภาครับและภาคส่งให้ได้จำนวนช่องสัญญาณเท่ากับสมาชิกทั้งหมดของเมตริกซ์ **H** จึงจะสมบูรณ์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการบันทึกช่องสัญญาณและทำการคำนวณค่าความจุของช่องสัญญาณจากค่าที่วัดได้นี้ ผลปรากฏว่าค่าที่ได้ตรงกับค่าที่เกิดจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ จึงสรุปได้ว่าการใช้ผลคำนวณจากคอมพิวเตอร์มีความน่าเชื่อถือมาก

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ

1. P. Uthansakul and M. E. Bialkowski. (2007). Transmission Technique for Downlink Multiuser MIMO System Operating Under Imperfect CSI at Transmitter. IEEE International Symposium on Antenna and Propagations, Honolulu, Hawaii, pp. 317-320.
2. P. Uthansakul and M. Uthansakul. (2007). Design of Pre-coding Technique for Optimal MIMO Transmission under Rician Fading Channel. 2007 Asia-Pacific Microwave Conference, Bangkok, pp. 1029-1032.

ประวัติผู้วิจัย

ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2539 และ 2541 จากนั้นเข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรระบบโทรคมนาคมที่องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย จนกระทั้ง พ.ศ. 2543 จึงได้ย้ายมาเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้ลาศึกษาต่อระดับปริญญาเอกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ณ University of Queensland, Australia เมื่อ พ.ศ. 2549 จึงได้กลับเข้ามาปฏิบัติหน้าที่อาจารย์ตามเดิม ผู้วิจัยมีเชี่ยวชาญในด้านระบบ MIMO, Information Theory, Radio Wave Modelling, Mobile Communication, Advance Wireless Communication ปัจจุบันมีบทความวิจัยมากกว่า 40 รายการ และมีลิขสิทธิ์ 1 รายการ

ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล ได้รับรางวัล Young Scientist Travel Grant Award จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ International Symposium on Antenna Propagation ปี พ.ศ. 2547 ณ ประเทศญี่ปุ่น และได้รับรางวัล Best Student Presentation Award จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ Australian Symposium on Antanna ปี พ.ศ. 2548 ณ ประเทศออสเตรเลีย