

การปรับกำลังในทางปริภูมิและเวลาสำหรับการมอดูเลตแบบ BPSK และรหัสทางปริภูมิ-เวลา
แบบอะลามูติบนช่องสัญญาณแบบเรย์ลีเฟดดิ้ง



นายเชมธนะ สุวพิชญ์ภูมิ

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

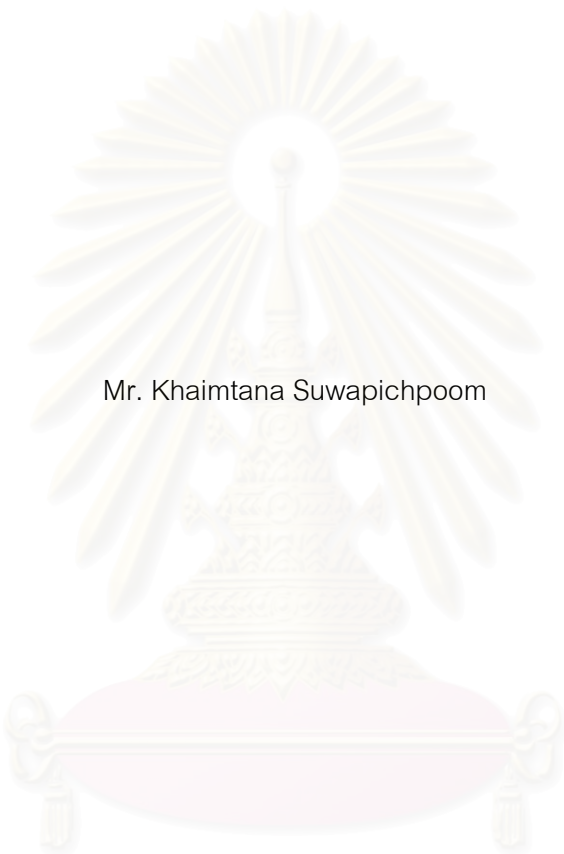
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-1788-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADAPTIVE POWER IN SPACE AND TIME FOR BPSK MODULATION AND SPACE-TIME
ALAMOUTI CODE OVER RAYLEIGH FADING CHANNEL



Mr. Khaimtana Suwapichpoom

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-14-1788-8

เชมธนะ สุวพิชญ์ภูมิ : การปรับกำลังในทางปริภูมิและเวลาสำหรับการมอดูเลตแบบ BPSK และรหัสทางปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติบนช่องสัญญาณแบบเรย์ลีเฟดดิ้ง (ADAPTIVE POWER IN SPACE AND TIME FOR BPSK MODULATION AND SPACE-TIME ALAMOUTI CODE OVER RAYLEIGH FADING CHANNEL) อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร.ลัญจกร วุฒิสถิติกุลกิจ, 78 หน้า. ISBN 974-14-1788-8.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการพัฒนาเทคนิคการปรับกำลังส่งเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของการส่งสัญญาณดิจิทัลผ่านช่องสัญญาณสื่อสารไร้สายที่มีปัญหาเฟดดิ้งแบบเรย์ลี โดยใช้การมอดูเลตแบบ BPSK และรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti เทคนิคที่เสนอนี้อาศัยเครื่องรับปลายทางทำหน้าที่คำนวณค่าระดับกำลังส่งที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณและทำการป้อนกลับค่าดังกล่าวให้กับภาคส่ง ในกรณีการมอดูเลตแบบ BPSK สามารถหาผลเฉลี่ยของค่าการปรับกำลังส่งที่เหมาะสมที่สุดได้โดยอาศัยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ แต่สำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti มีความซับซ้อนกว่ามาก ยังไม่สามารถหาผลเฉลี่ยที่เหมาะสมในรูปแบบปิดได้ จึงได้อาศัยการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นหลัก เทคนิคการปรับกำลังส่งสามารถทำได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับจำนวนของระดับกำลังส่งที่ใช้กับวิธีการกำหนดค่ากำลังส่งของแต่ละระดับให้สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอวิธีการปรับกำลังส่งสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ไว้ 3 แบบ คือ เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลา เทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง และเทคนิคการปรับกำลังส่งทั้งทางเวลาและระหว่างเสาส่งพร้อมกัน จากผลการทดสอบด้วยโปรแกรมการจำลองระบบพบว่าเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาให้ผลที่ดี อัตราความผิดพลาดบิตมีค่าลดต่ำกว่าระบบดั้งเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการเพิ่มค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ที่อัตราบิตผิดพลาดเท่ากับ 10^{-4} การปรับกำลังส่งด้วยวิธีนี้สามารถให้สมรรถนะที่ดีขึ้นถึง 2.5 dB และ 1 dB สำหรับการปรับกำลังส่งทางเวลาแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ตามลำดับ ในส่วนของเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง นั้นปรากฏว่าไม่ได้ช่วยเพิ่มสมรรถนะของระบบแต่อย่างใดในทุกช่วงของค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน แต่หากนำการควบคุมแบบพีซีมาช่วยในการปรับค่ากำลังส่งจะทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้น และสุดท้ายสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทั้งทางเวลาและระหว่างเสาส่งพร้อมกันพบว่าให้ค่าสมรรถนะแยกว่าเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาเพียงอย่างเดียว ไม่คุ้มกับจำนวนบิตที่ต้องเสียไปในการป้อนกลับ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการปรับกำลังส่งทางเวลาเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถปรับปรุงสมรรถนะของการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องอาศัยการเพิ่มขนาดแบนด์วิดท์หรือจำนวนเสาอากาศแต่อย่างใด หากแต่ต้องมีการป้อนกลับข้อมูลช่องสัญญาณโดยใช้ไม่เกิน 1-2 บิตต่อการส่งข้อมูลหนึ่งสัญลักษณ์

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....เชมธนะ สุวพิชญ์ภูมิ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา...2548...

4570233021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: Adaptive Power / Space-time Alamouti / Rayleigh fading

KHAIMTANA SUWAPICHPOOM : ADAPTIVE POWER IN SPACE AND TIME FOR BPSK MODULATION AND SPACE-TIME ALAMOUTI CODE OVER RAYLEIGH FADING CHANNEL: ASSOC. PROF. LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ. Ph.D., 78 pp. ISBN 974-14-1788-8.

This thesis proposes power management technique to improve performance of digital signaling through wireless channel with rayleigh fading for BPSK modulation and space-time Alamouti code. This proposed technique requires the receiver to calculate appropriate transmission power based on channel coefficient and feedback this value to the transmitter. In case of BPSK modulation, optimal power level can be obtained through mathematical analysis allowing maximum transmission performance. However, for space-time Alamouti code, mathematical formulation is more complicated, and to our knowledge no closed form analysis is feasible. Therefore, computer simulation will be used extensively instead. Power management technique can vary considerably depending on the number of transmit power levels being used, which must be appropriately adjusted to suit the channel conditions. In this thesis we propose threes methods for power management: power management in time domain, power management between antennas and power management both in time domain and between antennas at the same time. According to the simulation results, the first method offers good performance: BER is decreased when comparing to the conventional counterpart, particularly when SNR is increased. For example, at BER of 10^{-4} such technique provides 2.5 dB and 1 dB for gain over the conventional scheme for the first and second sub techniques of power management in time domain respectively. Power management between antennas offers no advantage at all for any SNR but, using Fuzzy Logic to adaptive power can improve performance of system. Finally, performance of power management both in time domain and between antennas at the same time provides very bad performance over the power management in time domain, hence additional feedback bits are not justified. In conclusion power management in time domain is an efficient technique to improve the performance of signal transmission over wireless channel without demanding an increase of bandwidth or an increase the number of transmit antennas. However, this approach requires no more than 1-2 bits for each symbol transmission.

Department.....Electrical Engineering..... Student's signature..... *Khaimtana Suwapichpoom*

Field of study.....Electrical Engineering..... Advisor's signature..... *Lunchakorn Wuttisittikulki*

Academic year ..2005..

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดี
ยิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ฉวีฉกร วุฒิสัทธาภิณฑกิจ ที่กรุณาให้คำแนะนำ
แนวทาง รวมทั้งข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในการวิจัยอย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด ข้าพเจ้าจึง
ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ นายกำพล วรดิษฐ์ สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านสำหรับ
การทำวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทั้งในและนอกห้องปฏิบัติการวิจัยระบบโทรคมนาคมทุก
ท่าน ที่ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ทั้งในงานวิจัยและนอกงานวิจัย รวมทั้งความ
ช่วยเหลือและแรงศรัทธาที่ดีตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าต้องขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและทุก ๆ คนในครอบครัวของ
ข้าพเจ้า ซึ่งคอยให้การสนับสนุน เป็นกำลังใจ และเข้าใจในตัวข้าพเจ้าเสมอมา ตั้งแต่เริ่มต้นจน
จนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
1.6 คำโครงวิทยานิพนธ์.....	4
2 ความรู้พื้นฐาน.....	6
2.1 รหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti.....	7
2.1.1 การเข้ารหัสสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti.....	7
2.1.2 การถอดรหัสสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti.....	8
2.1.3 การถอดรหัสสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ในกรณีที่ใช้สายอากาศรับหลายต้น.....	14
2.1.3.1 ตัวอย่างการถอดรหัสสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ในกรณีที่ใช้สายอากาศรับ 2 ต้น.....	15
2.2 หลักการพื้นฐานของ Fuzzy Logic.....	17
2.2.1 องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องในการทำงานของ Fuzzy Logic.....	17
2.2.2 โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซี.....	18
2.2.3 หลักการพิจารณาในการเลือกองค์ประกอบของตัวควบคุมฟัซซี.....	20
2.2.3.1 การเลือกฟังก์ชันการเป็นสมาชิก.....	20

บทที่	หน้า
2.2.3.2	การเลือกค่า Linguistic Variable และ Linguistic Value..... 21
2.2.3.3	วิธีการ Fuzzy Inference..... 22
2.2.3.4	การกำหนดกฎในฐานกฎ..... 24
2.2.3.5	วิธีการ Defuzzification..... 25
3	การปรับกำลังส่งของสัญญาณสำหรับการมอดูเลตแบบ BPSK 26
3.1	หลักการทํางานของเทคนิคการปรับกำลังส่ง..... 26
3.2	การปรับกำลังส่งของสัญญาณสำหรับการมอดูเลตแบบ BPSK..... 27
3.3	การกำหนดสมมติฐาน..... 29
3.4	การจำลองโดยอาศัยสมมติฐานที่ตั้งไว้..... 31
3.5	สมรรถนะสูงสุดของการปรับกำลังส่งสำหรับการมอดูเลตแบบ BPSK..... 35
3.6	ผลการจำลองโดยอาศัยสมการค่าสมรรถนะสูงสุด..... 37
3.7	การประยุกต์ใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีทางปริภูมิร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่ง... 40
3.8	ผลการจำลองโดยใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่ง..... 44
4	เทคนิคการปรับกำลังส่งสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลาที่เสนอ..... 46
4.1	เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลา: วิธีที่ 1..... 46
4.1.1	เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกัน..... 47
4.1.2	การจำลองและวิเคราะห์ผลสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกัน..... 49
4.1.3	เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกัน..... 55
4.1.4	การจำลองและวิเคราะห์ผลสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกัน..... 57
4.2	เทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสา: วิธีที่ 2..... 61
4.2.1	หลักการและสมมติฐานของเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง 61
4.2.2	การจำลองและวิเคราะห์ผลสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง..... 62

บทที่	หน้า
4.2.3 การปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่งโดยอาศัย Fuzzy Logic และการ จำลอง.....	64
4.3 เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาและปรับระหว่เสาพร้อมกัน: วิธีที่ 3.....	68
4.3.1 หลักการและสมมติฐานของเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดย พิจารณาเสาส่งแยกออกจากกันและปรับระหว่เสาส่งพร้อมกัน..	68
4.3.2 การจำลองและวิเคราะห์ผลสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทาง เวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกันและปรับระหว่เสาส่ง พร้อมกัน.....	69
4.3.3 หลักการและสมมติฐานของเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดย พิจารณาเสาส่งร่วมกันและปรับระหว่เสาส่งพร้อมกัน.....	70
4.3.4 การจำลองและวิเคราะห์ผลสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทาง เวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันและปรับระหว่เสาส่งพร้อมกัน....	70
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 บทสรุป.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	74
รายการอ้างอิง.....	75
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	77

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 4.1	ค่าการปรับกำลังส่งที่ใช้แทนในแต่ละกรณีของความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่งแยกออกจากกัน.....	50
ตารางที่ 4.2	ค่าการปรับกำลังส่งที่ใช้แทนในแต่ละกรณีของความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณทั้งสองเสาส่งร่วมกัน.....	58
ตารางที่ 4.3	ค่าการปรับกำลังส่งที่ใช้แทนในแต่ละกรณีของความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง.....	63
ตารางที่ 4.4	ฐานกฎที่ใช้ในการจำลอง.....	67



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างการเข้ารหัสบล็อกปริภูมิ-เวลา Alamouti.....	8
รูปที่ 2.2 ภาพรวมของระบบรับส่งสัญญาณที่ใช้รหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti.....	10
รูปที่ 2.3 ภาพรวมระบบรับส่งสัญญาณที่ใช้รหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ที่ใช้สายอากาศรับ 2 ต้น.....	16
รูปที่ 2.4 โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมพีซี.....	18
รูปที่ 2.5 พารามิเตอร์ของ MF.....	21
รูปที่ 2.6 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ Term Set ค่าสูง ปานกลาง และต่ำ.....	22
รูปที่ 2.7 วิธีการ Max-Min Inference.....	24
รูปที่ 2.8 วิธีการ Defuzzification แบบต่างๆ.....	25
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเทคนิคการปรับกำลังส่ง.....	27
รูปที่ 3.2 เรย์ลีเฟดดิ้ง.....	27
รูปที่ 3.3 เรย์ลีเฟดดิ้งที่แบ่งออกเป็น 8 ระดับ.....	28
รูปที่ 3.4 ค่าที่ใช้แทนเฟดดิ้งที่ระดับต่าง ๆ สำหรับกรณีที่แบ่งเฟดดิ้งออกเป็น 8 ระดับ.....	30
รูปที่ 3.5 ผลการจำลองกรณีที่แบ่งเฟดดิ้งเป็น 2 ระดับ.....	32
รูปที่ 3.6 ผลการจำลองกรณีที่แบ่งเฟดดิ้งเป็น 4 ระดับ.....	32
รูปที่ 3.7 ผลการจำลองกรณีที่แบ่งเฟดดิ้งเป็น 8 ระดับ.....	33
รูปที่ 3.8 สมรรถนะของระบบกรณีที่แทน x_i ด้วยการลดลงแบบเชิงเส้นในแต่ละค่าของการแบ่งระดับของเฟดดิ้ง.....	35
รูปที่ 3.9 อัตราผิดพลาดบิตระหว่างการแทนด้วยสมการลดลงแบบเชิงเส้นกับค่าเหมาะที่สุดกรณีแบ่งระดับเฟดดิ้งออกเป็น 2 ระดับ.....	38
รูปที่ 3.10 อัตราผิดพลาดบิตระหว่างการแทนด้วยสมการลดลงแบบเชิงเส้นกับค่าเหมาะที่สุดกรณีแบ่งระดับเฟดดิ้งออกเป็น 4 ระดับ.....	38
รูปที่ 3.11 อัตราผิดพลาดบิตระหว่างการแทนด้วยสมการลดลงแบบเชิงเส้นกับค่าเหมาะที่สุดกรณีแบ่งระดับเฟดดิ้งออกเป็น 8 ระดับ.....	39
รูปที่ 3.12 อัตราผิดพลาดบิตเมื่อแทนด้วยค่าเหมาะที่สุดในแต่ละค่าของการแบ่งระดับของเฟดดิ้ง.....	40
รูปที่ 3.13 ผลการจำลองของระบบที่ประยุกต์ใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่ง.....	45

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.1 การแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่ง.....	48
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองโดยกำหนดค่า $B = 0.4$ และเปลี่ยนแปลงค่า A และ C	50
รูปที่ 4.3 ผลการจำลองโดยกำหนดค่า $B = 0.6$ และเปลี่ยนแปลงค่า A และ C	51
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองโดยกำหนดค่า $B = 0.8$ และเปลี่ยนแปลงค่า A และ C	51
รูปที่ 4.5 ผลการจำลองโดยกำหนดค่า $B = 1.2$ และเปลี่ยนแปลงค่า A และ C	52
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองโดยกำหนดค่า $B = 1.4$ และเปลี่ยนแปลงค่า A และ C	52
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองโดยกำหนดค่า $B = 1.0$ และเปลี่ยนแปลงค่า A และ C	53
รูปที่ 4.8 ค่า A , B และ C ที่ทำให้ค่าสมรรถนะที่ได้มีค่าสูงสุดในกรณีที่พิจารณาค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่งแยกออกจากกัน.....	54
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างกรณีที่มีการปรับกำลังส่งกับไม่มีการปรับกำลังส่ง.....	54
รูปที่ 4.10 เฟดดิ้งที่มีการกระจายแบบโคสแควร์.....	56
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองโดยเปลี่ยนแปลงค่า A และ B	57
รูปที่ 4.12 ค่า A และ B ที่ทำให้ค่าสมรรถนะที่ได้มีค่าสูงสุดในกรณีที่พิจารณาค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่งร่วมกัน.....	58
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างกรณีที่มีการปรับกำลังส่งกับไม่มีการปรับกำลังส่ง.....	59
รูปที่ 4.14 สมรรถนะระหว่างวิธีพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่งแบบแยกจากกันและวิธีพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่งแบบร่วมกัน.....	60
รูปที่ 4.15 สมรรถนะของระบบเมื่อใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง.....	63
รูปที่ 4.16 Input Membership Function ของสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณที่เกิดจากเสาส่งต้นที่ 1	65
รูปที่ 4.17 Input Membership Function ของสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณที่เกิดจากเสาส่งต้นที่ 2	65
รูปที่ 4.18 Output Membership Function.....	66
รูปที่ 4.19 สมรรถนะของระบบจากการจำลองระบบโดยอาศัย Fuzzy Logic	67

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.20 สมรรถนะของระบบเมื่อใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสา ส่งแยกออกจากกัน และปรับระหว่างเสาส่งพร้อมกัน.....	69
รูปที่ 4.21 สมรรถนะของระบบเมื่อใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสา ส่งร่วมกัน และปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่งพร้อมกัน.....	71



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

บทนำนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่ได้รับ และเค้าโครงวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทุกวันนี้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก ระบบการสื่อสารข้อมูลทางดิจิทัล ไม่ว่าจะเป็นการส่งข้อมูล ภาพ เสียง และมัลติมีเดียต่างๆ เหล่านี้ ต่างก็มีแนวโน้มที่จะกระทำผ่านช่องสัญญาณไร้สายมากขึ้น ในการออกแบบระบบสื่อสารไร้สายนั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง ได้แก่ สิ่งแวดล้อมมีปรากฏการณ์คลื่นหลายวิถี (Multipath) และมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ส่งผลให้การแพร่กระจายคลื่นวิทยุเป็นแบบแปรตามเวลา สเปกตรัมคลื่นวิทยุ (Radio Spectrum) ที่มีอยู่อย่างจำกัด ความพึงพอใจของผู้ใช้รวมทั้งความต้องการของผู้ให้บริการที่ต้องการให้สถานีฐานมีพื้นที่ครอบคลุมมากขึ้น และมีความจุของผู้เช่า (Subscriber Capacity) เพิ่มมากขึ้นโดยที่มีค่าใช้จ่ายของโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่ลดลง จึงมีการนำเทคโนโลยีต่างๆ มาใช้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามความต้องการเหล่านี้ซึ่ง ได้แก่ วิธีการเข้าถึงหลายทางขั้นสูง (Advanced Multiple Access Schemes) การเข้ารหัสแหล่งกำเนิดเพื่อให้ใช้แบนด์วิดท์อย่างมีประสิทธิภาพ (Bandwidth – Efficient Source Coding) เป็นต้น

ช่องสัญญาณไร้สายนั้นมีปรากฏการณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ สัญญาณที่ส่งผ่านช่องสัญญาณไร้สายจะถูกลดทอนขนาดและหน่วงเวลาถึงปลายทางอย่างสุ่มซึ่งเรียกว่า เฟดดิ้ง (Fading) อันเป็นปรากฏการณ์ที่ขึ้นอยู่กับทั้งเวลา และวิธีการแพร่ของคลื่น (ในการจำลองช่องสัญญาณที่มีผลของเฟดดิ้งมักจะนิยมใช้แบบจำลองช่องสัญญาณที่มีการกระจายแบบเรย์ลี (Rayleigh distribution) เนื่องจากลักษณะการแจกแจงของสัญญาณในตัวอาคารและในตัวเมืองส่วนใหญ่จะมีรูปแบบดังกล่าว) ขณะที่การมอดูเลตในระบบเซลลูลาร์เดิมใช้กรรมวิธีสัญญาณเชิงเวลา (Temporal Signal Processing) แต่เพียงอย่างเดียว จึงเกิดแนวคิดใหม่ในการนำเอาไดเวอร์ซิตีทางปริภูมิ (Space or Spatial Diversity) คือ ใช้สายอากาศส่ง และรับหลาย ๆ อัน มาใช้ร่วมกับการใช้ไดเวอร์ซิตีทางเวลา (Time or Temporal Diversity) แต่เดิมซึ่งหากตั้งสายอากาศส่งและรับในปริภูมิให้มีความอิสระเชิงปริภูมิ กล่าวคือสัญญาณจากสายอากาศส่งแต่ละต้นส่งไปยังสายอากาศรับแต่ละต้น จะต้องได้รับผลกระทบจากเฟดดิ้งแตกต่างกันเพื่อข่าวสาร (Information)

ที่ถูกส่งไป ณ เวลาหนึ่ง ๆ ในทุก ๆ วิธีจะไม่ถูกรบกวนจนทำให้สูญเสียพร้อมกันในทุก ๆ วิธี ระบบใหม่นี้สามารถใช้ประโยชน์ของไดเวอร์ซิตีทางปริภูมิเข้ามาช่วยปรับปรุงสมรรถนะของระบบการสื่อสารไร้สายในด้านการทนต่อผลกระทบของเฟดดิ้งได้ แต่ก็ทำให้เพิ่มความซับซ้อนให้แก่ระบบด้วย

ในระบบการสื่อสารไร้สายจะต้องมีการประมาณช่องสัญญาณ คือ ประมาณค่าของผลกระทบจากเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในขณะนั้น เช่น โดยการส่งลำดับการฝึกฝน (Training Sequence) ซึ่งก็คือบิตที่ใช้ทดสอบสถานะของช่องสัญญาณนั้นไปยังภาครับก่อนการส่งข่าวสาร เพื่อให้ภาครับสามารถประมาณช่องสัญญาณได้อย่างถูกต้อง จะเห็นว่าลำดับการฝึกฝนนี้ถือว่าเป็นส่วนที่ทำให้ประสิทธิภาพของการใช้แบนด์วิดท์ลดลง หรือหากไม่ใช้ลำดับการฝึกฝนที่ภาครับก็ต้องมีเทคนิคกรรมวิธีสัญญาณที่ซับซ้อนเพื่อสามารถประมาณช่องสัญญาณได้อย่างแม่นยำ เป็นสาเหตุให้อุปกรณ์ในระบบมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น ในการออกแบบที่ดีนั้นควรที่จะทำให้การสร้างระบบมีค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก และอุปกรณ์มีความซับซ้อนน้อย แต่ยังคงให้ผลที่สามารถยอมรับได้

ปัญหาจากเฟดดิ้งของช่องสัญญาณ ยังคงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในระบบสื่อสารไร้สาย จึงเกิดแนวความคิดให้มีการนำเทคนิคการปรับกำลังของสัญญาณที่ภาคส่งโดยอาศัยการปรับตัวของช่องสัญญาณมาใช้งาน เพื่อลดผลกระทบจากเฟดดิ้งที่เกิดขึ้น และเพิ่มสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้น

เทคนิคการปรับตัวสำหรับภาคส่งถูกเสนอขึ้นครั้งแรกประมาณช่วงเวลากลางยุค 60 ถึงต้นยุค 70 [1] ในขณะนั้นการให้ความสนใจในเรื่องเทคนิคการปรับตัวยังคงมีไม่มากนัก อาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านฮาร์ดแวร์ เพราะเทคโนโลยีต่างๆ ในช่วงเวลาดังกล่าวนั้นยังพัฒนาได้ไม่ดีเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันนี้ เช่น ขาดเทคนิคประมาณค่าช่องสัญญาณที่ดีพอ และในขณะนั้นระบบสื่อสารส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่การเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด (point-to-point) ซึ่งไม่มีการป้อนกลับไปยังเครื่องรับ แต่ในยุคปัจจุบันนี้ที่เทคโนโลยีต่างๆ ถูกพัฒนาและวิวัฒนาการเรื่อยมาจนทำให้ข้อจำกัดต่างๆ สำหรับเทคนิคการปรับตัวลดน้อยลงมาก ผลคือทำให้แนวความคิดสำหรับเทคนิคการปรับตัวได้ถูกฟื้นฟูขึ้นมาใหม่อีกครั้งเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบสื่อสารไร้สายในยุคที่ 3 [2, 3] โดยมีวัตถุประสงค์คือปรับปรุงสมรรถนะของการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นไปเพื่อให้ข้อมูลที่รับได้ที่เครื่องรับมีคุณภาพดียิ่งขึ้น ทั้งขนาดและเฟสของสัญญาณที่รับได้ผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณที่ส่งมาจริงน้อยลงให้มากที่สุด หรืออีกแง่มุมหนึ่งก็คือเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่มีอยู่อย่างไม่จำกัดให้ได้มากที่สุดนั่นเอง

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอการพัฒนาเทคนิคการปรับกำลังส่งเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของการส่งสัญญาณดิจิทัลผ่านช่องสัญญาณสื่อสารไร้สายที่มีปัญหาเฟดดิ้งแบบเรย์ลี

โดยจะพิจารณาในกรณีที่ภาคส่งรู้เฟดดิ้งของช่องสัญญาณ ซึ่งในระบบสื่อสารตามปกติแล้วการส่งสัญญาณแต่ละครั้งเราจะกำหนดให้ค่ากำลังที่ใช้ในการส่งสัญญาณนั้นมีค่าเท่ากัน หากเราสามารถจัดสรรกำลังที่ใช้ในการส่งแต่ละครั้งไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มกำลังส่งให้มากขึ้นหรือลดกำลังส่งลงให้เหมาะสมกับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในขณะนั้น น่าจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ และสมรรถนะของระบบให้ดียิ่งขึ้น โดยเทคนิคที่เสนอนี้อาศัยเครื่องรับปลายทางทำหน้าที่คำนวณค่าระดับกำลังส่งที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณและทำการป้อนกลับค่าดังกล่าวให้กับภาคส่ง เมื่อภาคส่งได้รับข้อมูลจากการป้อนกลับแล้วจึงทำการปรับค่ากำลังส่งให้แก่สัญญาณที่จะส่งออกไป แล้วทำการส่งสัญญาณนั้นออกไปยังเครื่องรับปลายทาง และนอกจากนี้จะมีการนำ Fuzzy Logic [15] มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่งที่เสนอในบางเทคนิคเพื่อให้ได้สมรรถนะของระบบที่ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

พัฒนาสมรรถนะของระบบการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณสื่อสารไร้สายที่มีปัญหาของเฟดดิ้งแบบเรย์ลี โดยใช้เทคนิคการจัดสรรกำลังในการส่งของสัญญาณให้เหมาะสมกับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณ ภายใต้เงื่อนไขที่ภาครับทราบค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ และมีการป้อนกลับขนาดกำลังส่งที่เหมาะสมให้กับภาคส่งโดยกำหนดให้ใช้จำนวนบิตที่จำกัด

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. พัฒนาเทคนิคการจัดสรรกำลังส่งอย่างพลวัตสำหรับสำหรับระบบสื่อสารไร้สายที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK ทั้งระบบที่ใช้เสาส่งเพียงต้นเดียวและระบบที่มีการใช้เสาส่งหลายต้น ภายใต้เงื่อนไขที่ภาครับทราบค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ และมีการป้อนกลับขนาดกำลังส่งที่เหมาะสมให้กับภาคส่งโดยกำหนดให้ใช้จำนวนบิตที่จำกัด
2. พัฒนาเทคนิคการจัดสรรกำลังส่งอย่างพลวัตสำหรับสำหรับระบบสื่อสารไร้สายที่ใช้รหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ที่มีการใช้เสาส่งสองต้นภายใต้เงื่อนไขที่ภาครับทราบค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ และมีการป้อนกลับขนาดกำลังส่งที่เหมาะสมให้กับภาคส่งโดยกำหนดให้ใช้จำนวนบิตที่จำกัด
3. ทดสอบสมรรถนะของระบบที่พัฒนาขึ้นโดยเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการปรับกำลังส่งอย่างพลวัต

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
 - 1.1 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคไดเวอร์ซิตี
 - 1.2 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับการเข้ารหัสปริภูมิ-เวลา และรหัสปริภูมิ-เวลา
2. ออกแบบระบบที่จะจำลอง เขียนโปรแกรมการจำลอง และทดสอบโปรแกรมที่เขียนโดยเทียบกับข้อมูลที่มีอยู่ในบทความต่าง ๆ ในด้านนี้
3. ทดลอง เก็บข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่มีอยู่ก่อน และวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบรวบรวมและสรุปผลการวิจัยทั้งหมด เพื่อเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจแนวความคิดและหลักการพื้นฐานของไดเวอร์ซิตีทางปริภูมิ-เวลา
2. เข้าใจแนวความคิดและหลักการพื้นฐานของการเข้ารหัสบล็อกปริภูมิ-เวลา
3. สามารถพัฒนาสมรรถนะของระบบ และทราบผลกระทบจากการนำเทคนิคการจัดสรรกำลังที่ภาคส่งเมื่อภาคส่งรู้เฟดดิ้งของช่องสัญญาณมาใช้งาน

1.6 เค้าโครงวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งรายละเอียดออกเป็น 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ตลอดจนประโยชน์ที่ได้รับ และเค้าโครงของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน กล่าวถึงรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti โดยประกอบไปด้วยการเข้ารหัสสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti การถอดรหัสสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti และการถอดรหัสสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ในกรณีที่ใช้เสารับหลายต้น และยังคงกล่าวถึงโครงสร้างองค์ประกอบ และการทำงานของ Fuzzy Logic โดยสังเขปอีกด้วย

บทที่ 3 เทคนิคการปรับกำลังส่งสำหรับการมอดูเลตแบบ BPSK เนื้อหาในบทนี้เป็นการเสนอการพัฒนาเทคนิคการปรับกำลังส่งเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของการส่งสัญญาณดิจิทัลผ่านช่องสัญญาณสื่อสารไร้สายที่มีปัญหาเฟดดิ้งแบบเรย์ลี โดยใช้การมอดูเลตแบบ BPSK ซึ่งอาศัย

เครื่องรับปลายทางทำหน้าที่คำนวณค่าระดับกำลังส่งที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณและทำการป้อนกลับค่าดังกล่าวให้กับภาคส่ง และสามารถหาผลเฉลยของค่าการปรับกำลังส่งที่เหมาะสมที่สุดได้โดยอาศัยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ จากนั้นได้ทำเทคนิคไดเวอร์ซิตีมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่ง และหาผลเฉลยทางคณิตศาสตร์สำหรับการปรับค่ากำลังส่งที่เหมาะสมที่สุดของการประยุกต์ใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่ง

บทที่ 4 เทคนิคการปรับกำลังส่งสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งร่วมกับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti เทคนิคการปรับกำลังส่งสามารถทำได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับจำนวนของระดับกำลังส่งที่ใช้กับวิธีการกำหนดค่ากำลังส่งของแต่ละระดับให้สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ ในบทนี้ได้เสนอวิธีการปรับกำลังส่งสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ไว้ 3 แบบ คือ เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลา สำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลานี้จะมีวิธีพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณ 2 วิธีด้วยกัน คือพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณแต่ละเสาส่งแยกออกจากกัน และพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณแต่ละเสาส่งร่วมกัน และเทคนิคที่เสนอแบบที่ 2 คือเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง สำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งแบบที่ 2 นี้ยังให้ค่าสมรรถนะของระบบที่ไม่ดีเท่าไรนักจึงนำ Fuzzy Logic มาประยุกต์ใช้งานร่วมกันเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้ดียิ่งขึ้น และเทคนิคสุดท้ายที่เสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือเทคนิคการปรับกำลังส่งทั้งทางเวลาและระหว่างเสาส่งพร้อมกันจากนั้นทำการจำลองโดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และวิเคราะห์ผลการจำลองระหว่างกรณีที่มีการนำเทคนิคการปรับกำลังส่งมาใช้ร่วมกับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการใช้เทคนิคการปรับกำลังส่ง

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงบทสรุปจากเทคนิคการปรับกำลังส่งที่ทั้งเทคนิคการปรับกำลังส่งสำหรับการมอดูเลตแบบ BPSK และเทคนิคการปรับกำลังส่งสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ที่เสนอทั้ง 3 แบบ จากนั้นจะเป็นข้อเสนอแนะต่างๆ ที่มีต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐาน

การส่งผ่านสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายนอกจากจะได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (Additive White Gaussian Noise) แล้วยังต้องเผชิญกับปัญหาเฟดดิ้ง (fading) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์มัลติพาท (multipath) ภายในช่องสัญญาณอีกด้วย ปัญหาดังกล่าวนี้ส่งผลให้เกิดการลดทอนของสัญญาณอย่างรุนแรงจนทำให้การตัดสินใจที่ภาครับมีความผิดพลาดได้อย่างมาก ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีความพยายามในการพัฒนากรรมวิธีประมวลสัญญาณที่สามารถจัดการกับปัญหาเฟดดิ้ง ในปัจจุบันเทคนิคไดเวอร์ซิตี (diversity) จัดว่าเป็นหนึ่งในกรรมวิธีที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีศักยภาพในการแก้ปัญหาเฟดดิ้งได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องเพิ่มขนาดแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณขึ้นแต่อย่างใด หลักการพื้นฐานของไดเวอร์ซิตี คือ การให้ระบบส่งสัญญาณในลักษณะที่ทำให้ภาครับได้สัญญาณซ้ำเติมหลายชุด โดยที่สัญญาณแต่ละชุดมีเส้นทางการส่งผ่านที่แตกต่างกัน และคาดหวังว่าจะมีคลื่นสัญญาณอย่างน้อยหนึ่งเส้นทางที่สามารถเดินทางถึงภาครับโดยไม่ได้รับผลกระทบจากเฟดดิ้งอย่างรุนแรง

การทำไดเวอร์ซิตีสามารถทำได้หลายลักษณะ ยกตัวอย่าง เช่น

- ไดเวอร์ซิตีเชิงเวลา (time diversity)
- ไดเวอร์ซิตีเชิงความถี่ (frequency diversity)
- ไดเวอร์ซิตีเชิงปริภูมิ (space diversity) หรือไดเวอร์ซิตีเชิงสายอากาศ (antenna diversity)

ในทางปฏิบัติอุปกรณ์รับสัญญาณในสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ เช่น ระบบ GSM มักจะมีการประยุกต์ใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีเชิงปริภูมิ กล่าวคือ มีการติดตั้งสายอากาศสำหรับรับสัญญาณมากกว่าหนึ่งต้น การที่ระบบมีสายอากาศรับสัญญาณหลายต้นช่วยให้ภาครับสามารถรับสัญญาณข้อมูลเดียวกันจากหลายเส้นทาง และยังหากการส่งผ่านสัญญาณของแต่ละเส้นทางมีความเป็นอิสระจากกันแล้ว โอกาสที่ภาครับจะได้สัญญาณที่มีคุณภาพดีพออย่างน้อยหนึ่งเส้นทางก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย

อย่างไรก็ดี ในหลายปีที่ผ่านมางานวิจัยจำนวนมากได้ให้ความสนใจกับการพัฒนาเทคนิคไดเวอร์ซิตีให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยนอกจากจะใช้สายอากาศรับหลายต้นแล้ว ยังมีการเสนอ

ให้ใช้สายอากาศส่งหลายต้นควบคู่กันไปด้วย ระบบดังกล่าวนี้ให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นได้โดยอาศัย การผสมผสานเทคนิคไดเวอร์ซิตีเชิงเวลาเข้ากับเทคนิคไดเวอร์ซิตีเชิงปริภูมิ การคิดค้นและพัฒนา เทคนิคไดเวอร์ซิตีเชิงปริภูมิ-เวลา (space time diversity) จึงมีขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายปีที่ ผ่านมา และมีรูปแบบที่หลากหลายแตกต่างกัน

ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคนิคไดเวอร์ซิตีเชิงปริภูมิ-เวลาในระดับพื้นฐานเพื่อให้เกิดความ เข้าใจในขั้นเบื้องต้นเท่านั้น โดยในการอธิบายจะขอยกตัวอย่างการทำงานของรหัสที่มีชื่อเรียกว่า รหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ซึ่งเป็นรหัสที่ได้รับการออกแบบโดยใช้หลักการของไดเวอร์ซิตีเชิง ปริภูมิ-เวลา มีรูปแบบเรียบง่าย และให้สมรรถนะที่ดีขึ้นกว่าระบบที่ใช้สายอากาศส่งเพียงต้นเดียว ภายใต้อุปกรณ์ที่มีปัญหาเฟดดิ้ง รหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti นี้ถูกคิดค้นขึ้นโดย S. M. Alamouti ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้กับระบบสื่อสารที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้นตายตัว ในขณะที่ ทางภาครับสามารถจะติดตั้งสายอากาศรับจำนวนเท่าใดก็ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งยังมีสายอากาศรับ มากขึ้นจะทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น รหัสดังกล่าวนี้มีคุณลักษณะเฉพาะตัวที่น่าสนใจคือ การ ถอดรหัสเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (optimal decoding) สามารถกระทำได้โดยอาศัยกระบวนการ ที่ไม่ซับซ้อน

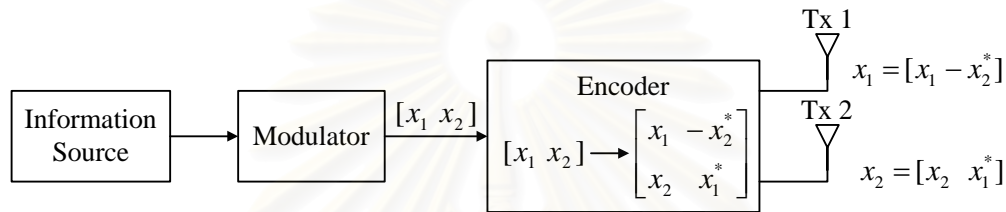
2.1 รหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti

2.1.1 การเข้ารหัสสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti

กรรมวิธีการเข้ารหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1 แหล่งกำเนิด ข่าวสาร (information source) ให้กำเนิดสัญลักษณ์ข้อมูลเพื่อป้อนเข้าสู่วงจรมอดูเลเตอร์ (modulator) ครึ่งละจำนวน 2 สัญลักษณ์ สัญลักษณ์ที่ผ่านการมอดูเลตแล้ว ได้แก่ x_1 และ x_2 จะ ได้รับการแปลงด้วยวงจรรหัส (encoder) ให้ได้เป็นสัญญาณที่ใช้ส่งจริงในสายอากาศแต่ละต้น โดยรูปแบบการส่งสัญญาณสามารถเขียนแสดงในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

การส่งสัญญาณแต่ละครั้งหรือการส่งสัญญาณหนึ่งบล็อกจะใช้เวลาส่ง 2 คาบเวลาต่อเนื่องกัน ในการส่งของคาบเวลาแรกหรือที่เวลา t สัญญาณที่ส่งออกจากสายอากาศต้นที่ 1 และต้นที่ 2 ได้แก่ x_1 และ x_2 ตามลำดับ ส่วนในคาบเวลาที่ 2 หรือที่เวลา $t+T$ สัญญาณที่ส่งออกจากสายอากาศที่ 1 และ 2 ได้แก่ $-x_2^*$ และ x_1^* ตามลำดับ ทั้งนี้ x_i^* คือค่าสังยุคเชิงซ้อนของ x_i จะเห็นว่ารูปแบบการเขียนเมทริกซ์ X นั้นกำหนดให้หมายเลขแถวหมายถึงสายอากาศที่จะส่งและหมายเลขคอลัมน์หมายถึงเวลา



รูปที่ 2.1 โครงสร้างการเข้ารหัสบล็อกปริภูมิ-เวลา Alamouti

คุณสมบัติที่น่าสนใจประการหนึ่งของรหัส Alamouti คือ การที่เราสามารถกำหนดหรือเลือกชนิดของการมอดูเลตแบบใดก็ได้ เช่น M-PSK M-QAM หรือ M-ASK เป็นต้น ดังนั้น เราจึงสามารถกำหนดจำนวนบิตข้อมูลที่จะส่งในแต่ละครั้งได้ตามปรารถนา ยกตัวอย่าง เช่น หากต้องการส่งข้อมูลให้ได้ 1 บิตต่อหนึ่งคาบเวลา ให้ใช้การมอดูเลตแบบ Binary-PSK หรือหากต้องการส่งให้ได้ความเร็วเพิ่มขึ้นเท่าตัวคือ 2 บิตต่อหนึ่งคาบเวลา ให้ใช้การมอดูเลต Quadrature-PSK สำหรับกรณีทั่วไปที่ใช้ M -ary PSK จำนวนบิตที่ระบบสามารถส่งได้ต่อหนึ่งคาบเวลามีค่าเท่ากับ $m = \log_2 M$ การที่เราสามารถกำหนดอัตราบิตในการส่งข้อมูลได้ตามต้องการจัดว่าเป็นคุณลักษณะเฉพาะตัวที่เป็นประโยชน์ประการหนึ่งของรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti

2.1.2 การถอดรหัสสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti

ในหัวข้อนี้จะพิจารณากรรมวิธีการถอดรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti สำหรับระบบที่ใช้สายอากาศรับเพียงต้นเดียว ซึ่งมีโครงสร้างการทำงานตามที่แสดงในรูปที่ 2.2 จากรูปสัญญาณที่ส่งออกจากเสาส่งแต่ละต้นมีเส้นทางการเดินทางที่ต่างกัน โดยสมมติให้สัญญาณทั้งสองได้รับผลกระทบจากเฟดดิ้งในลักษณะที่เป็นอิสระจากกัน และสามารถจำลองได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของ

ช่องสัญญาณ $h_1(t)$ และ $h_2(t)$ ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณจะแปรเปลี่ยนตามเวลา t แต่โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณของช่วงเวลา 2 คาบที่ต่อเนื่องกันมักจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ฉะนั้นเราจึงสามารถสมมติว่าในการส่งรหัสปริภูมิ-เวลาแต่ละครั้งที่มีความยาวเท่ากับ 2 คาบเวลา สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณมีค่าคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ

$$h_1(t) = h_1(t + T) = h_1 \quad (2.2)$$

$$h_2(t) = h_2(t + T) = h_2 \quad (2.3)$$

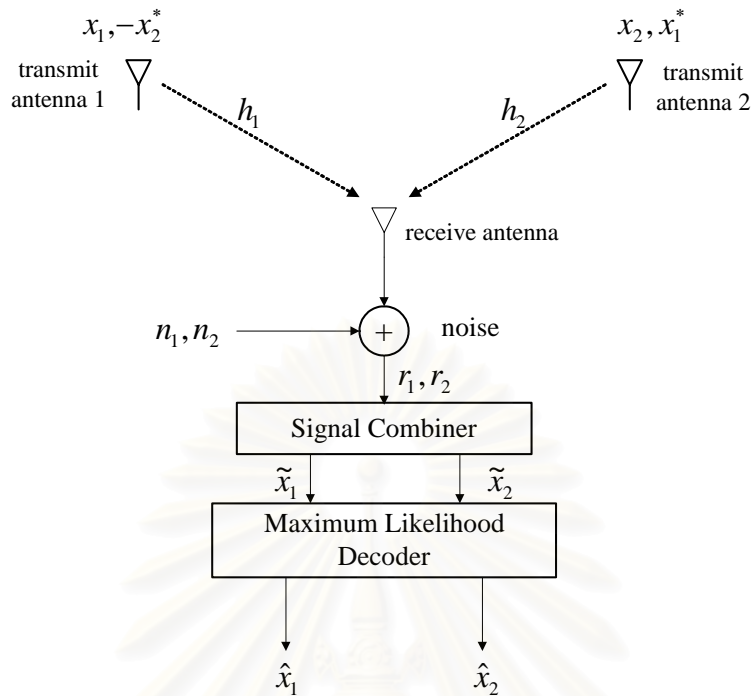
สังเกตว่าความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.2) และ (2.3) ได้มีการละตัวแปรทางเวลาออก เพื่อให้การแสดงความสัมพันธ์มีความกระชับมากขึ้น ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแอมพลิจูดและเฟสได้ดังนี้

$$h_1 = |h_1|e^{j\theta_1} \quad (2.4)$$

$$h_2 = |h_2|e^{j\theta_2} \quad (2.5)$$

โดยที่ $|h_1|$ และ $|h_2|$ แทนอัตราขยายเชิงแอมพลิจูด และ θ_1 และ θ_2 แทนการเลื่อนเชิงเฟส ของวิถีจากสายอากาศส่งเสาที่ 1 และ 2 ไปยังสายอากาศรับ และ T แทนคาบของสัญลักษณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 ภาพรวมของระบบรับส่งสัญญาณที่ใช้รหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti

เมื่อพิจารณาสัญญาณที่สายอากาศรับในรูปที่ 2.2 จะได้ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่รับได้ r_1 และ r_2 ณ เวลา t และ $t + T$ ตามลำดับดังนี้

$$r_1 = h_1 x_1 + h_2 x_2 + n_1 \quad (2.6)$$

$$r_2 = -h_1 x_2^* + h_2 x_1^* + n_2 \quad (2.7)$$

โดยที่ n_1 และ n_2 คือ สัญญาณรบกวน AWGN ซึ่งเป็นตัวแปรแรนดอมเกาส์เชิงซ้อนที่เป็นอิสระต่อกัน มีค่าเฉลี่ย (mean) เท่ากับศูนย์ และค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (power spectral density) เท่ากับ $N_0/2$

ในขั้นตอนการถอดรหัสปริภูมิ-เวลาให้นำสัญญาณ r_1 และ r_2 ที่รับได้ไปใช้ในการถอดรหัสเพื่อตัดสินใจสัญลักษณ์ x_1 และ x_2 โดยใช้วิธีการพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นจริงสูงสุด (Maximum likelihood decoder) ซึ่งทำได้โดยการกำหนดฟังก์ชันต้นทุนในรูปของระยะยูคลิเดียน (Euclidean distance) ระหว่างคู่สัญญาณที่รับได้ (r_1, r_2) กับคู่สัญลักษณ์ (x_1, x_2) ทำการคำนวณหาค่าฟังก์ชันต้นทุนของคู่สัญลักษณ์ (x_1, x_2) ที่เป็นไปได้ทั้งหมดให้ครบทุกรูปแบบ

จากนั้นให้ตัดสินใจสัญลักษณ์โดยเลือกคู่สัญลักษณ์ที่มีค่าฟังก์ชันต้นทุนต่ำสุด หรือเทียบเท่ากับการมีระยะยูคลิเดียนต่ำสุด (minimize Euclidean distance) กระบวนการตัดสินใจสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$(\hat{x}_1, \hat{x}_2) = \arg \min_{(x_1, x_2) \in C} |r_1 - h_1 x_1 - h_2 x_2|^2 + |r_2 + h_1 x_2^* - h_2 x_1^*|^2 \quad (2.8)$$

สังเกตว่าในขั้นตอนการคำนวณนี้จะทำได้ก็ต่อเมื่อภาครีบทรอบค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ h_1 และ h_2 ที่ถูกต้องสมบูรณ์ ในทางปฏิบัติค่าดังกล่าวนี้จะได้จากการประมาณด้วยวงจรมแยกต่างหาก

เราสามารถจัดรูปฟังก์ชันต้นทุน $C(x_1, x_2) = |r_1 - h_1 x_1 - h_2 x_2|^2 + |r_2 + h_1 x_2^* - h_2 x_1^*|^2$ ให้เรียบง่ายและเป็นระบบมากขึ้นได้ดังนี้ ขั้นแรกให้กระจายพจน์ยกกำลังสองออกเป็น

$$\begin{aligned} C(x_1, x_2) &= (r_1 - h_1 x_1 - h_2 x_2)(r_1 - h_1 x_1 - h_2 x_2)^* \\ &\quad + (r_2 + h_1 x_2^* - h_2 x_1^*)(r_2 + h_1 x_2^* - h_2 x_1^*)^* \\ &= |r_1|^2 - h_1 x_1 r_1^* - h_2 x_2 r_1^* - r_1 h_1^* x_1^* + |h_1|^2 |x_1|^2 \\ &\quad + h_1^* h_2 x_1^* x_2 - r_1 h_2^* x_2^* + h_1 h_2^* x_1 x_2^* + |h_2|^2 |x_2|^2 \\ &\quad + |r_2|^2 + h_1 x_2 r_2^* - h_2 x_1 r_2^* + h_1^* x_2 r_2 + |h_1|^2 |x_2|^2 \\ &\quad - h_1^* h_2 x_1^* x_2 - h_2^* x_1 r_2 - h_1 h_2^* x_1 x_2^* + |h_2|^2 |x_1|^2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

สังเกตว่าพจน์ $|r_1|^2$ และ $|r_2|^2$ ไม่มีผลต่อการตัดสินใจความน่าจะเป็นจริงสูงสุดของสัญลักษณ์ (\hat{x}_1, \hat{x}_2) เพราะเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับ (x_1, x_2) จึงสามารถละออกจากฟังก์ชันต้นทุนได้ นอกจากนี้พบว่าพจน์ $h_1 h_2^* x_1 x_2^*$ และ $h_1^* h_2 x_1^* x_2$ หักล้างกับพจน์ $-h_1 h_2^* x_1 x_2^*$ และ $-h_1^* h_2 x_1^* x_2$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนฟังก์ชันต้นทุนใหม่ได้ตามสมการ (2.10) ดังนี้

$$\begin{aligned} C'(x_1, x_2) &= -h_1 x_1 r_1^* - h_2 x_2 r_1^* - r_1 h_1^* x_1^* + |h_1|^2 |x_1|^2 - r_1 h_2^* x_2^* + |h_2|^2 |x_2|^2 \\ &\quad + h_1 x_2 r_2^* - h_2 x_1 r_2^* + h_1^* x_2 r_2 + |h_1|^2 |x_2|^2 - h_2^* x_1 r_2 + |h_2|^2 |x_1|^2 \end{aligned} \quad (2.10)$$

ทำการจัดรูปสมการ (2.10) ใหม่โดยการดึงตัวร่วมได้เป็น

$$\begin{aligned}
C'(x_1, x_2) &= |x_1|^2(|h_1|^2 + |h_2|^2) + |x_2|^2(|h_1|^2 + |h_2|^2) \\
&+ (-h_1 x_1 r_1^* - h_2^* x_1 r_2 - r_1 h_1^* x_1^* - h_2 x_1^* r_2^*) \\
&+ (-h_2 x_2 r_1^* + h_1^* x_2 r + h_1 x_2^* r_2^* - r_1 h_2^* x_2^*)
\end{aligned} \tag{2.11}$$

กำหนดให้

$$\tilde{x}_1 = h_1^* r_1 + h_2 r_2^* \tag{2.12}$$

$$\tilde{x}_2 = h_2^* r_1 - h_1 r_2^* \tag{2.13}$$

จะทำให้จัดรูปต่อไปได้เป็น

$$C'(x_1, x_2) = |x_1|^2(|h_1|^2 + |h_2|^2) + |x_2|^2(|h_1|^2 + |h_2|^2) - \tilde{x}_1^* x_1 - \tilde{x}_1 x_1^* - \tilde{x}_2^* x_2 - \tilde{x}_2 x_2^* \tag{2.14}$$

จากนิยามของระยะยูคลิดเดียว

$$d^2(A, B) = (A - B)(A^* - B^*) = |A|^2 + |B|^2 - AB^* - A^* B \tag{2.15}$$

สมการที่ (2.14) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned}
C'(x_1, x_2) &= |x_1|^2(|h_1|^2 + |h_2|^2) + |x_2|^2(|h_1|^2 + |h_2|^2) \\
&+ |\tilde{x}_1 - x_1|^2 - |x_1|^2 - |\tilde{x}_1|^2 + |\tilde{x}_2 - x_2|^2 - |x_2|^2 - |\tilde{x}_2|^2
\end{aligned} \tag{2.16}$$

เนื่องจากพจน์ $-|\tilde{x}_1|^2 - |\tilde{x}_2|^2$ ไม่มีผลต่อการตัดสินใจสัญลักษณ์ เพราะเป็นค่าที่ขึ้นกับ $|r_1|^2, |r_2|^2$ เท่านั้น จึงสามารถละออกได้ ฟังก์ชันต้นทุนที่ใช้ในการตัดสินใจสัญลักษณ์จึงเขียนให้กระชับขึ้นได้เป็น

$$C''(x_1, x_2) = |x_1|^2(|h_1|^2 + |h_2|^2 - 1) + |x_2|^2(|h_1|^2 + |h_2|^2 - 1) + |\tilde{x}_1 - x_1|^2 + |\tilde{x}_2 - x_2|^2 \tag{2.17}$$

กระบวนการตัดสินใจสัญลักษณ์ x_1 และ x_2 ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.8) จึงสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$(\hat{x}_1, \hat{x}_2) = \arg \min_{(x_1, x_2) \in \mathcal{C}} (|h_1|^2 + |h_2|^2 - 1)(|x_1|^2 + |x_2|^2) + d^2(\tilde{x}_1, x_1) + d^2(\tilde{x}_2, x_2) \quad (2.18)$$

สังเกตว่าฝั่งทางขวามือของสมการความสัมพันธ์สามารถแบ่งแยกพจน์ออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกมีเฉพาะ x_1 เป็นตัวประกอบในขณะที่กลุ่มที่สองมีแต่ x_2 เป็นตัวประกอบ ดังนั้น การหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันต้นทุนจึงสามารถแยกพิจารณาเป็นสองส่วนได้ คือหาค่าต่ำสุดของพจน์ที่มีเฉพาะ x_1 และหาค่าต่ำสุดของพจน์ที่มีแต่ x_2 ได้ การที่เราสามารถพิจารณา x_1 แยกจาก x_2 ได้ มีความหมายว่าการตัดสินใจคู่สัญลักษณ์ (x_1, x_2) สามารถทำแยกอิสระจากกันได้ คุณสมบัติดังกล่าวนี้ช่วยให้กระบวนการตัดสินใจสัญลักษณ์มีความซับซ้อนน้อยลง โดยเกณฑ์การตัดสินใจสัญลักษณ์มีรายละเอียดดังนี้

$$\hat{x}_1 = \arg \min_{x_1 \in \mathcal{C}} |x_1|^2 (|h_1|^2 + |h_2|^2 - 1) + d^2(\tilde{x}_1, x_1) \quad (2.19)$$

และ

$$\hat{x}_2 = \arg \min_{x_2 \in \mathcal{C}} |x_2|^2 (|h_1|^2 + |h_2|^2 - 1) + d^2(\tilde{x}_2, x_2) \quad (2.20)$$

ที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นการแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขการตัดสินใจสัญลักษณ์ตามสมการที่ (2.8) ซึ่งพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นจริงสูงสุด ที่จัดว่าเป็นกรรมวิธีที่ซับซ้อนมาก สามารถลดรูปลงเหลือเป็นเงื่อนไขการตัดสินใจที่มีความซับซ้อนน้อยลง ดังสมการที่ (2.19) และ (2.20) กล่าวคือ จากที่ต้องตัดสินใจสัญลักษณ์ของทั้ง 2 เวลาพร้อมกัน มาเป็นการตัดสินใจสัญลักษณ์ของแต่ละเวลาแยกจากกัน ซึ่งหมายความว่าจากเดิมที่ต้องมีการทดสอบค่าฟังก์ชันต้นทุนที่คำนวณจากระยะยูคลิเดียนจำนวนมากถึง M^2 ครั้ง ลดเหลือเพียง $2M$ เมื่อ M แทนรูปแบบที่เป็นไปได้ของสัญลักษณ์ การที่กระบวนการถอดรหัสมีความซับซ้อนน้อยลงได้นี้เป็นผลมาจากการที่รหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ได้รับการออกแบบมาให้มีคุณสมบัติความตั้งฉากกันของรหัสที่ส่งในแต่ละเสา

พิจารณารูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงขั้นตอนของระบบการรับส่งสัญญาณดิจิทัลที่ใช้รหัสปริภูมิ-เวลาผ่านช่องสัญญาณที่มีปัญหาของเฟดดิ้ง การทำงานของภาครับตามในรูปจะเห็นว่ามีการนำสัญญาณ (r_1, r_2) ไปผ่านวงจรผสมรวมสัญญาณ (signal combiner) ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.12) และ (2.13) ได้เป็นคู่สัญญาณ $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2)$ หากแทนค่า r_1 และ r_2 ลงในทั้งสองสมการแล้ว จะได้ผลลัพธ์เป็น

$$\tilde{x}_1 = (|h_1|^2 + |h_2|^2)x_1 + h_1^*n_1 + h_2n_2^* \quad (2.21)$$

$$\tilde{x}_2 = (|h_1|^2 + |h_2|^2)x_2 - h_1n_2^* + h_2^*n_1 \quad (2.22)$$

จากนั้นนำค่าทั้งสองนี้มาใช้ในการตัดสินใจสัญลักษณ์โดยวิธีความน่าจะเป็นจริงสูงสุดตามที่ระบุในสมการที่ (2.19) และ (2.20)

2.1.3 การถอดรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ในกรณีที่ใช้สายอากาศรับหลายต้น

ในหัวข้อนี้จะขยายการพิจารณากระบวนการถอดรหัส Alamouti ให้ครอบคลุมถึงกรณีที่ระบบมีการติดตั้งสายอากาศรับหลายเสา สมมติให้ระบบมีสายอากาศรับจำนวน n_R ต้น และให้ r_1^j และ r_2^j แทนสัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศรับเสาที่ j ที่เวลา t และ $t+T$ ตามลำดับ

$$r_1^j = h_{j,1}x_1 + h_{j,2}x_2 + n_{j,1} \quad (2.23)$$

$$r_2^j = -h_{j,1}x_2^* + h_{j,2}x_1^* + n_{j,2} \quad (2.24)$$

โดยที่ $h_{j,i}$ สำหรับ $i = 1, 2$ และ $j = 1, 2, \dots, n_R$ แทนสัมประสิทธิ์การเฟดของวิถีจากสายอากาศส่งที่ i ไปยังสายอากาศรับที่ j และ $n_{j,1}$ และ $n_{j,2}$ แทนสัญญาณรบกวนที่สายอากาศรับเสาที่ j ที่เวลา t และ $t+T$ ตามลำดับ ในขั้นตอนการตัดสินใจสัญลักษณ์ \hat{x}_1 และ \hat{x}_2 อาศัยหลักการคำนวณค่าความน่าจะเป็นจริงสูงสุดเหมือนกับในกรณีที่ มีสายอากาศรับเพียงต้นเดียว โดยในกรณีของระบบที่มีสายอากาศรับหลายต้นสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$(\hat{x}_1, \hat{x}_2) = \arg \min_{(x_1, x_2) \in C} \sum_{j=1}^{n_R} |r_1^j - h_{j,1}x_1 - h_{j,2}x_2|^2 + |r_2^j + h_{j,1}x_2^* - h_{j,2}x_1^*|^2 \quad (2.25)$$

การคำนวณตามสมการที่ (2.25) จัดว่ามีความซับซ้อนมาก อย่างไรก็ตาม เราสามารถประยุกต์แนววิธีการลดรูปสมการให้มีความกระชับขึ้นได้ดังเช่นในกรณีของระบบที่มีสายอากาศรับเพียงต้นเดียว และผลที่ได้คือกระบวนการตัดสินใจสัญลักษณ์ที่เรียบง่าย กล่าวคือ กลายเป็นกระบวนการผสมรวมสัญญาณแบบเส้น (linear combination) ของสัญญาณที่รับได้ดังนี้

$$\tilde{x}_1 = \sum_{j=1}^{n_R} h_{j,1}^* r_1^j + h_{j,2} (r_2^j)^* \quad (2.26)$$

$$= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_R} |h_{j,i}|^2 x_1 + \sum_{j=1}^{n_R} h_{j,1}^* n_{j,1} + h_{j,2} n_{j,2}^*$$

$$\begin{aligned} \tilde{x}_2 &= \sum_{j=1}^{n_R} h_{j,2}^* r_1^j + h_{j,1} (r_2^j)^* \\ &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_R} |h_{j,i}|^2 x_2 + \sum_{j=1}^{n_R} h_{j,2}^* n_{j,1} - h_{j,1} n_{j,2}^* \end{aligned} \quad (2.27)$$

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปทำการถอดรหัสแบบความน่าจะเป็นจริงสูงสุดตามสมการที่ (2.28) และ (2.29) เพื่อตัดสินใจสัญลักษณ์ \hat{x}_1 และ \hat{x}_2 ที่เป็นอิสระแยกจากกัน

$$\hat{x}_1 = \arg \min_{x_1 \in C} \left[\left(\sum_{j=1}^{n_R} (|h_{j,1}|^2 + |h_{j,2}|^2) - 1 \right) |x_1|^2 + d^2(\tilde{x}_1, x_1) \right] \quad (2.28)$$

$$\hat{x}_2 = \arg \min_{x_2 \in C} \left[\left(\sum_{j=1}^{n_R} (|h_{j,1}|^2 + |h_{j,2}|^2) - 1 \right) |x_2|^2 + d^2(\tilde{x}_2, x_2) \right] \quad (2.29)$$

2.1.3.1 ตัวอย่างการถอดรหัสสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ในกรณีที่ใช้สายอากาศรับ 2 ต้น

ในที่นี้ได้แสดงตัวอย่างรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ที่ใช้สายอากาศรับ และสายอากาศส่ง 2 ต้น ซึ่งมีโครงสร้างโดยรวมดังรูปที่ 2.3 สัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศรับเสาที่ 1 ที่เวลา t และ $t+T$ แทนด้วย r_1^1 และ r_2^1 ตามลำดับ โดยสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$r_1^1 = h_{1,1}x_1 + h_{1,2}x_2 + n_{1,1} \quad (2.30)$$

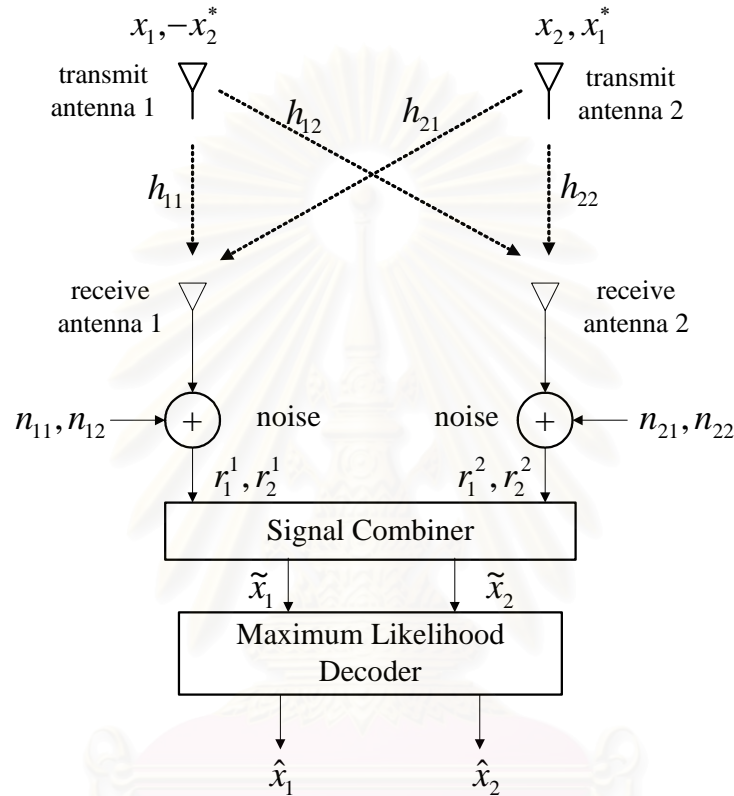
$$r_2^1 = -h_{1,1}x_2^* + h_{1,2}x_1^* + n_{1,2} \quad (2.31)$$

และสัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศรับเสาที่ 2 ที่เวลา t และ $t+T$ แทนด้วย r_1^2 และ r_2^2 ตามลำดับ โดยสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$r_1^2 = h_{2,1}x_1 + h_{2,2}x_2 + n_{2,1} \quad (2.32)$$

$$r_2^2 = -h_{2,1}x_2^* + h_{2,2}x_1^* + n_{2,2} \quad (2.33)$$

โดย $n_{1,1}$, $n_{1,2}$, $n_{2,1}$ และ $n_{2,2}$ แทน สัญญาณรบกวนวงจรงเชิงซ้อนที่มีการกระจายเกาส์สีขาวแบบวงกที่
รับได้ที่สายอากาศรับต้นที่ 1 ที่เวลา t และ $t+T$ และที่รับได้ที่สายอากาศรับต้นที่ 2 ที่เวลา t
และ $t+T$ ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 ภาพรวมระบบรับส่งสัญญาณที่ใช้รหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ที่ใช้สายอากาศรับ 2 ต้น

นำสัญญาณที่รับได้ทั้งหมดไปผ่านกระบวนการผสมเพื่อทำการแยกสัญญาณ x_1 และ x_2
ออกจากสัญญาณที่รับได้ สัญญาณที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการผสมแล้วแทนด้วย \tilde{x}_1 และ \tilde{x}_2
ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\tilde{x}_1 = h_{1,1}^* r_1^1 + h_{1,2} (r_2^1)^* + h_{2,1}^* r_1^2 + h_{2,2} (r_2^2)^* \quad (2.34)$$

$$\tilde{x}_2 = h_{1,2}^* r_1^1 - h_{1,1} (r_2^1)^* + h_{2,2}^* r_1^2 - h_{2,1} (r_2^2)^* \quad (2.35)$$

ซึ่งเราสามารถแทนค่า r_1^1 r_1^2 r_2^1 และ r_2^2 ลงในสมการข้างต้นทั้งสองสมการเพื่อทำการจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\tilde{x}_1 = (|h_{1,1}|^2 + |h_{1,2}|^2 + |h_{2,1}|^2 + |h_{2,2}|^2)x_1 + h_{1,1}^*n_{1,1} + h_{1,2}^*n_{1,2} + h_{2,1}^*n_{2,1} + h_{2,2}^*n_{2,2} \quad (2.36)$$

$$\tilde{x}_2 = (|h_{1,1}|^2 + |h_{1,2}|^2 + |h_{2,1}|^2 + |h_{2,2}|^2)x_2 + h_{1,2}^*n_{1,1} - h_{1,1}^*n_{1,2} + h_{2,2}^*n_{2,1} - h_{2,1}^*n_{2,2} \quad (2.37)$$

จากนั้นจึงส่งสัญญาณ \tilde{x}_1 และ \tilde{x}_2 ที่ได้ไปผ่านระเบียบวิธีการถอดรหัสแบบความน่าจะเป็นจริงสูงสุด เพื่อให้ได้ค่าที่ใช้ในการตัดสินใจออกมาได้ดังสมการ (2.28) และ (2.29) ข้างต้น

2.2 หลักการพื้นฐานของ Fuzzy Logic

2.2.1 องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องในการทำงานของ Fuzzy Logic มีดังนี้ [15]

Linguistic Variable เรียกว่า Fuzzy Set หรือ ตัวแปรเชิงภาษา เป็นตัวแปรที่จะนำมาพิจารณาในทางฟัซซี มีทั้งในส่วนของอินพุตและเอาต์พุตของฟัซซี มักจะใช้ตัวแปรขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบฟัซซี เขียนในรูปของ $T(X)$ เมื่อ X เป็นตัวแปรตัวหนึ่ง เช่น แทนตัวแปรของค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ

Linguistic Value เรียกว่า Term Set โดยมีลักษณะเป็นค่าที่มีการบรรยายในเชิงภาษาเป็นตัวอักษรซึ่งตัวแปรทางฟัซซีเป็นไปได้ จำนวนของค่านี้อาจจะถูกเลือกโดยพิจารณาถึงความยุ่งยากในการทำงานและประสิทธิภาพที่ได้ในการควบคุม เช่น ค่า Linguistic Value ของตัวแปรที่แทนสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณที่มี 3 ค่าคือ สูง ปานกลาง และต่ำ เขียนได้ดังนี้

$$T(X) = \{High(H), Medium(H), Low(H)\}$$

Membership Function (MF) เรียกว่า ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก เป็นรูปแบบของค่า Term Set แต่ละตัวตลอดช่วงของตัวแปรเชิงภาษา ซึ่งก็คือ แต่ละ Term Set ของตัวแปรเชิงภาษาจะถูกกำหนดโดย Membership Function มีได้ทั้งที่เป็นค่า discrete และค่าที่ต่อเนื่อง ขึ้นกับชนิดของตัวแปร โดยที่ความสูงของฟังก์ชันสมาชิกจะมีค่าสูงสุดเป็นหนึ่งเสมอ มักจะเขียนอยู่ในรูปของสมการต่างๆ เช่น รูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมู และรูปประฆังคว่ำ เป็นต้น เช่นค่า Membership

Function ของตัวแปรที่เป็นค่าการปรับกำลังส่งที่จะป้อนกลับไปยังภาคส่งที่มีค่า 3 ค่า สามารถเขียนได้ในรูป

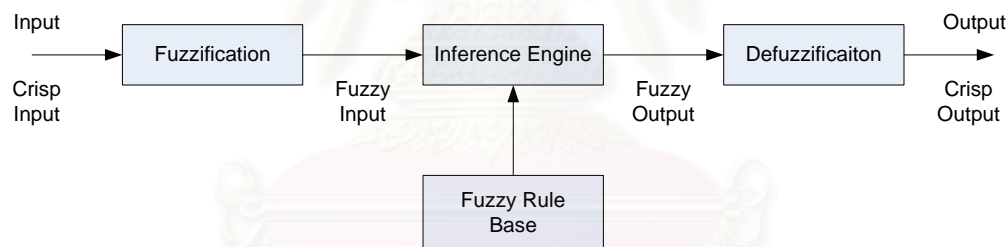
$$M(X) = \{\mu_{high}, \mu_{medium}, \mu_{low}\}$$

Degree of Membership เป็นค่าที่ได้โดยนำค่าอินพุตที่เป็นจุดมาเทียบกับ Membership Function ของ Fuzzy Set แล้วอ่านค่าที่ได้เป็นระดับของการเป็นสมาชิกนั้นๆ จะได้ค่าออกมาอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ซึ่งเป็นค่าทางฟัซซี

โดยที่ $\mu_{high}(X)$ แทน ระดับการเป็นสมาชิกใน Term Set ของค่า High ที่ค่าอินพุต X

2.2.2 โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมแบบฟัซซี

โครงสร้างโดยทั่วไปของการควบคุมแบบฟัซซีประกอบด้วย 4 ส่วน คือ Fuzzification Fuzzy Rule Base (ฐานกฎ) Inference Engine และ Defuzzification ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมแบบฟัซซี

Fuzzification

กระบวนการ Fuzzication ทำหน้าที่จัดค่าของตัวแปรอินพุตที่เข้ามาให้เหมาะสมกับที่จะนำไปใช้งาน และทำการเปลี่ยนค่าอินพุตของระบบที่มีลักษณะเป็นค่าจุด (Crisp Value) ให้เป็นค่าอินพุตทางฟัซซี ทำให้ได้ค่าสถานะของระบบในรูปของฟัซซีเซต แล้วจึงส่งค่าที่ได้ไปยังส่วน Inference Engine เพื่อเปรียบเทียบสถานะของระบบกับเงื่อนไขในกฎที่กำหนดไว้ และทำการหาการควบคุมที่เหมาะสมต่อไป

Fuzzy Rule Base (ฐานกฎ)

ฐานกฎ มีหน้าที่แสดงข้อมูลของสถานะของระบบเข้ากับการควบคุมที่เหมาะสมในรูปแบบของ Fuzzy If-Then Rule (Fuzzy Implication หรือ Fuzzy Condition Statement) โดยทั่วไปจะเขียนอยู่ในรูปของ

If x is A Then y is B

โดยที่ **A** และ **B** เป็นค่า Linguistic Value ของค่าอินพุตและเอาต์พุตตามลำดับ

x และ **y** เป็นค่า Linguistic Variable ของค่าอินพุตและเอาต์พุตตามลำดับ

หรืออาจเขียนได้ว่า

If (สถานะของระบบ) Then (กริยาควบคุม)

ตัวอย่างเช่น กฎจากการควบคุมการทำงานของคอนยักของ

If (Distance = Far AND Angle = Zero) Then (Power = Medium)

กฎดังกล่าวข้างต้นทั้งหมดจะถูกนำไปใช้ในการทำงานของ Inference Engine ซึ่งได้มีการศึกษา มาอย่างกว้างขวางและมีการเสนอวิธีการต่างๆ หลายวิธีซึ่งมีความเหมาะสมแตกต่างกันตาม ลักษณะการใช้งาน

Inference Engine

กระบวนการ Inference Engine เป็นกลไกสำคัญที่จะนำสถานะของระบบที่ตรวจวัดได้ใน รูปของค่าทางฟัซซี มาเปรียบเทียบกับกฎการควบคุมในส่วนของ Fuzzy Rule Base ซึ่งอยู่ในรูป Fuzzy If-Then Rule โดยมีวิธีการจัดการได้หลายรูปแบบ เช่นวิธีของ Mamdani, Sugeno และ Tsukamoto เป็นต้น ผลที่ได้จำใช้เป็นตัวควบคุมเพื่อให้กระบวนการดำเนินไปในลักษณะที่ต้องการ โดยอยู่ในรูปของค่าเอาต์พุตทางฟัซซี และส่งต่อไปยังส่วนของ Defuzzification

Defuzzification

กระบวนการ Defuzzification ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนค่าเอาต์พุตของระบบที่มีลักษณะเป็นค่าทางฟัซซี ให้เป็นค่าเอาต์พุตของระบบที่มีลักษณะเป็นค่าจุด (Crisp Value) และทำการแปลงค่าจุดของตัวแปรควบคุมเป็นค่ากายภาพ ทำให้ได้ค่าที่ใช้เป็นตัวควบคุมเพื่อให้กระบวนการดำเนินไปในลักษณะที่ต้องการ

2.2.3 หลักพิจารณาในการเลือกองค์ประกอบของตัวควบคุมแบบฟัซซี

เนื่องจากการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซีประกอบด้วยการทำงานหลายส่วนและในแต่ละส่วนได้มีการศึกษาวิธีการทำงานมาอย่างกว้างขวางโดยนักวิจัยหลายคน มีการเสนอวิธีการต่างๆ มาหลากหลายวิธี ซึ่งมีความเหมาะสมแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน ในส่วนของหัวข้อนี้จะกล่าวถึงองค์ประกอบต่างๆ ในการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซีและวิธีการที่เลือกใช้ในแบบจำลองการทำงานที่จะนำเสนอต่อไป

2.2.3.1 การเลือกฟังก์ชันการเป็นสมาชิก

รูปร่างของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกที่เป็นที่นิยมมาก ได้แก่ รูปสามเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยมคางหมู และรูปประฆัง เนื่องจากสามารถอธิบายได้ในรูปของฟังก์ชันและพารามิเตอร์ได้ง่ายไม่ซับซ้อน ใช้หน่วยความจำในการเก็บข้อมูลของรูปร่างน้อยและจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพในเทอมของเงื่อนไขเวลาจริง

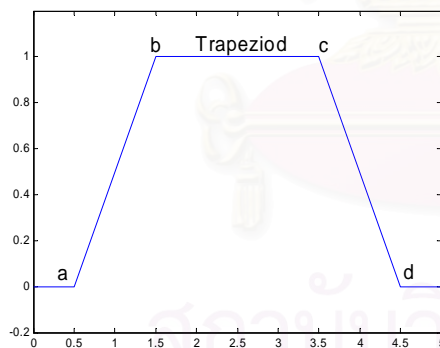
การทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซีที่จะใช้ในแบบจำลองที่จะนำเสนอต่อไป ได้เลือกใช้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของทั้งตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู และรูปสามเหลี่ยม เนื่องจากให้ผลตอบสนองในการทำงานเร็ว เหมาะสมกับการทำงานในแบบเป็นเวลาจริง โดยมีพารามิเตอร์ในการกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันอยู่ 4 ตัว คือ a b c และ d ดังแสดงในสมการที่ (2.38)

$$\text{Trapezoid}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (2.38)$$

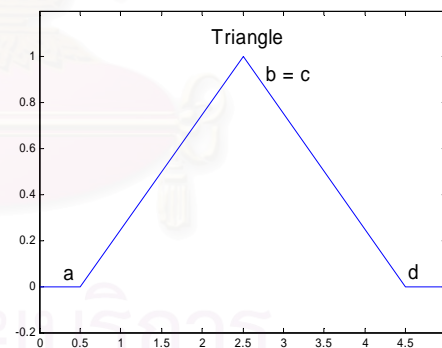
สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าต่ำที่สุด "min" และค่าสูงที่สุด "max" ได้ดังสมการที่ (2.39)

$$\text{Trapezoid}(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (2.39)$$

นอกจากนี้ยังเป็นการง่ายในการที่จะใช้งานร่วมกันกับฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของรูปทรงสามเหลี่ยมเนื่องจากสามารถใช้สมการเดียวกันในการทำงานได้ โดยใช้พารามิเตอร์ b และ c ในรูปสี่เหลี่ยมคางหมูเป็นตัวเดียวกันสำหรับแทนจุดยอดของรูปสามเหลี่ยม ยกตัวอย่างพารามิเตอร์ในการออกแบบฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของรูปสี่เหลี่ยมคางหมู $\{x; 0.5, 1.5, 3.5, 4.5\}$ แสดงในรูปที่ 2.5 (ก) และฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของรูปสามเหลี่ยม $\{s; 0.5, 2.5, 4.5\}$ แสดงในรูปที่ 2.5 (ข)



(ก)



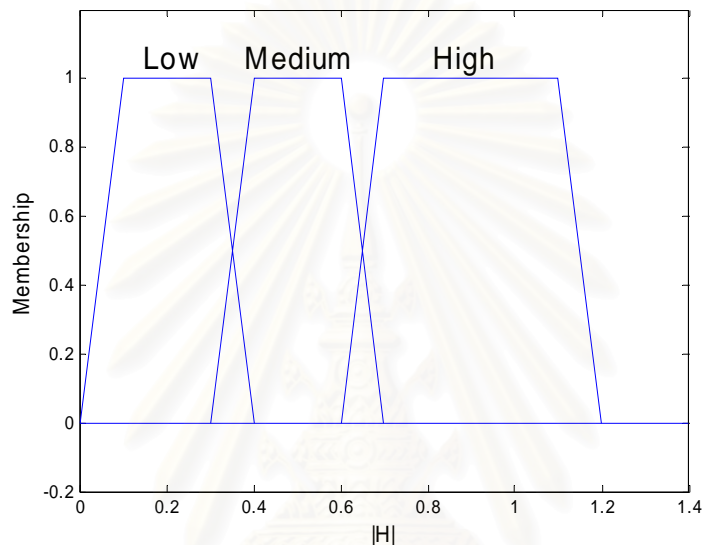
(ข)

รูปที่ 2.5 พารามิเตอร์ของ MF (ก) Trapezoid $\{x; 0.5, 1.5, 3.5, 4.5\}$ (ข) Triangle $\{s; 0.5, 2.5, 4.5\}$

2.2.3.2 การเลือกค่า Linguistic Variable และ Linguistic Value

ตัวแปรเชิงภาษาที่เลือกมาพิจารณาในการตัดสินใจควบคุมระบบนั้นโดยมากจะเลือกพิจารณาจากตัวแปรที่มีผลกระทบต่อระบบและเกี่ยวข้องกับการดำเนินงานของตัวควบคุมเพื่อให้

กระบวนการดำเนินไปในลักษณะที่ต้องการ ส่วนการเลือกค่า Term Set ของตัวแปรเชิงภาษาหนึ่งๆ จะประกอบด้วยจำนวนจำกัดของค่าที่แสดงได้ด้วยอักษรซึ่งตัวแปรภาษานั้นๆ เป็นไปได้ เช่น ถ้าเลือกตัวแปรภาษาเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณแล้ว Term Set ที่เลือกใช้จะกำหนดให้เป็นเทอมของปริมาณที่ต่างกัน เช่น Term Set ที่มี 3 ค่าคือ สูง ปานกลาง และต่ำ ที่มีฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ Term Set ค่าสูง ปานกลาง และต่ำ

ถ้าต้องการรายละเอียดที่มากขึ้น สามารถทำได้โดยเพิ่มจำนวน Term Set ให้มากขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนของ Term Set หรือตัวแปรเชิงภาษาจะมีผลทำให้ต้องเพิ่มจำนวนกฎในส่วนของฐานกฎที่ต้องใช้มากขึ้นตามไปด้วย เช่น Term Set ของตัวแปรเชิงภาษา 2 ตัวที่มีจำนวนสมาชิกตัวละ 10 สมาชิกจะมีจำนวนกฎสูงสุดในฐานกฎเป็น 100 ข้อ เป็นต้น

2.2.3.3 วิธีการ Fuzzy Inference

ในกระบวนการ Fuzzy Inference นั้นได้มีการวิจัยและสรุปออกมาเป็นวิธีการทำงานหลากหลายรูปแบบยกตัวอย่างเช่น วิธีของ Mamdani Sugeno และ Tsukamoto โดยทั้งสามวิธีนี้เป็นที่นิยมนำมาใช้ในการทำงานอย่างแพร่หลาย ในแต่ละวิธีก็จะมีการทำงานที่แตกต่างกัน ในที่นี้จะกล่าวถึงการทำงานของ Mamdani Inference System หรืออาจเรียกว่าวิธี Max-Min Inference

ที่เลือกใช้ในรูปแบบจำลองที่จะนำเสนอต่อไป การทำงานของวิธี Max-Min Inference จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

- Aggregation

ทำหน้าที่ประมวลผลในส่วนของ “If” ในฐานกฎที่อยู่ในรูป If-Then Rule ซึ่งก็คือการหาค่าผลลัพธ์ในส่วนของเงื่อนไข If ที่แทนสถานะของระบบ ที่อยู่ในฐานกฎข้อเดียวกัน มีวิธีการกระทำโดยใช้ตัวดำเนินการ $\min(\text{Intersection, AND})$ เขียนได้ในรูปของสมการที่ (2.40)

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (2.40)$$

โดยที่ A และ B เป็นฟัซซีเซตใน U และ $u \in U$ (Universe of Discourse)

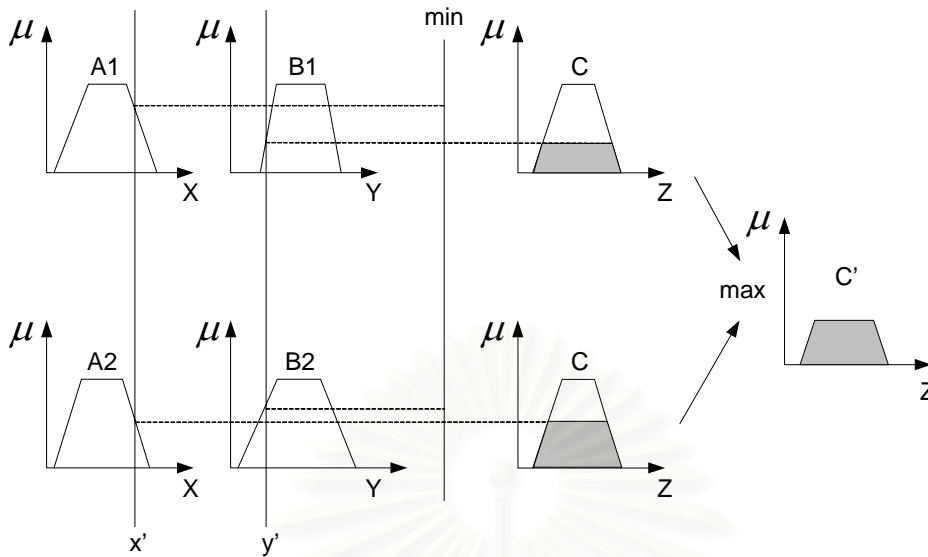
- Composition

ทำหน้าที่ประมวลผลในส่วนของ “Then” ในฐานกฎที่อยู่ในรูป If-Then Rule ซึ่งก็คือการหาค่าผลลัพธ์ในส่วนของเงื่อนไข Then ที่แทนกริยาควบคุม ที่อยู่ใน Term Set เดียวกันของตัวแปรภาษาทางด้านเอาต์พุต มีวิธีการกระทำโดยใช้ตัวดำเนินการ $\max(\text{Union, OR})$ เขียนได้ในรูปของสมการที่ (2.41)

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (2.41)$$

โดยที่ A และ B เป็นฟัซซีเซตใน U และ $u \in U$ (Universe of Discourse)

จากการทำงานของทั้งสองส่วนจะได้ค่าของเอาต์พุตที่เป็นค่าทางฟัซซี อยู่ในรูปที่เป็นค่าของ Term Set ต่างๆ ของตัวแปรภาษาทางด้านเอาต์พุต ซึ่งจะส่งค่าเหล่านี้ไปยังกระบวนการ Defuzzification เพื่อแปลงค่าทางฟัซซีให้เป็นค่าจริงที่สามารถนำไปใช้ในการควบคุมระบบได้ รูปที่ 5.4 แสดงตัวอย่างการทำงานของ Max-Min Inference System เทียบกับฐานกฎสองข้อ โดยมีอินพุตค่าจุดเป็นค่า x และ y ได้เอาต์พุตเป็นค่า C ที่เป็นค่าทางฟัซซี เมื่อกำหนดให้ A_1, A_2 และ B_1, B_2 เป็น Term Set ของตัวแปรเชิงภาษาทางด้านอินพุต A และ B ตามลำดับ และ C เป็น Term Set ของตัวแปรเชิงภาษาทางด้านเอาต์พุต



รูปที่ 2.7 วิธีการ Max-Min Inference

2.2.3.4 การกำหนดกฎในฐานกฎ

การกำหนดกฎในฐานกฎสามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับงานที่จะนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งกฎเหล่านี้สามารถนำมาใช้ร่วมกันเพื่อให้ได้การกำหนดกฎที่มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

1. กำหนดกฎบนพื้นฐานความรู้และประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติการ ผู้เชี่ยวชาญ หรือวิศวกรควบคุม ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย
2. หาแบบจำลองพีชคณิตของกระบวนการภายใต้การควบคุมก่อน แล้วจึงทำการสร้างกฎการควบคุมพีชคณิตจากการวิเคราะห์แบบจำลองขึ้น
3. ใช้แนวคิดของระบบพีชคณิตเข้ามาประกอบ โดยลักษณะการควบคุมหลักยังเป็นการควบคุมแบบดั้งเดิม ทำให้ได้การควบคุมที่ให้สมรรถนะคล้ายกับวิธีดั้งเดิมแต่อยู่ในรูปแบบของกฎการควบคุมพีชคณิต
4. วิธีการเรียนรู้ เป็นการกำหนดให้ตัวควบคุมสามารถเรียนรู้เองว่ากฎหรือพารามิเตอร์ที่สำคัญเช่นฟังก์ชันการเป็นสมาชิกที่เหมาะสมควรเป็นอย่างไร โดยการปรับตัวให้เหมาะสมขึ้นโดยดูจากสมรรถนะการทำงานในปัจจุบัน ซึ่งวิธีนี้กำลังเป็นที่สนใจศึกษากันอยู่ในปัจจุบัน

2.2.3.5 วิธีการ Defuzzification

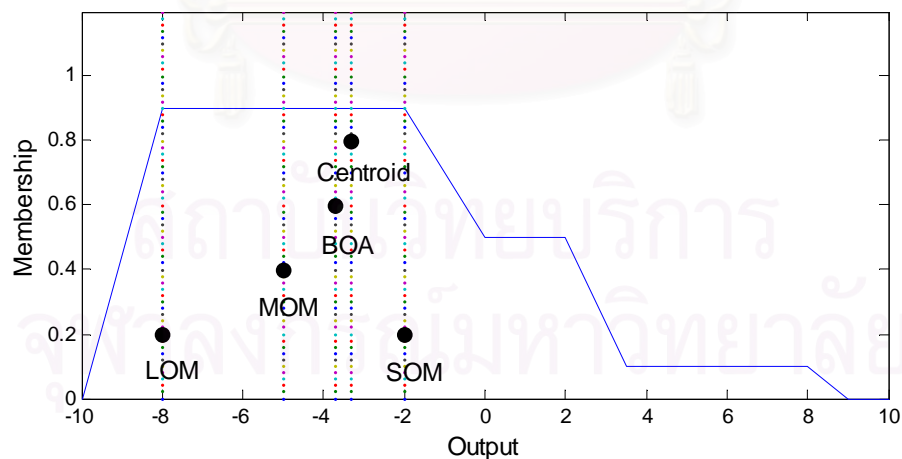
การ Defuzzification มี 5 วิธี ผลของการทำงานในแต่ละวิธีแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 2.8

1. วิธีจุดศูนย์กลางถ่วง (Centroid) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด ค่าที่ได้หาได้จากสมการที่ (2.42)

$$u^* = \frac{\int_U \mu_u(u)udu}{\int_U \mu_u(u)du} \quad (2.42)$$

โดยที่ $\mu_u(u)$ เป็นผลรวมของค่าเอาต์พุตทางฟัซซี

2. วิธี Bisector of Area (BOA) เป็นค่าที่ได้จากการแบ่งพื้นที่ออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน
3. วิธี Mean of Maximum (MOM) เป็นค่าเฉลี่ยของค่าที่มีระดับการเป็นสมาชิกสูงสุด
4. วิธี Smallest of Maximum (SOM) เป็นค่าน้อยที่สุดของค่าที่มีระดับการเป็นสมาชิกสูงสุด
5. วิธี Largest of Maximum (LOM) เป็นค่ามากที่สุดของค่าที่มีระดับการเป็นสมาชิกสูงสุด



รูปที่ 2.8 วิธีการ Defuzzification แบบต่างๆ

บทที่ 3

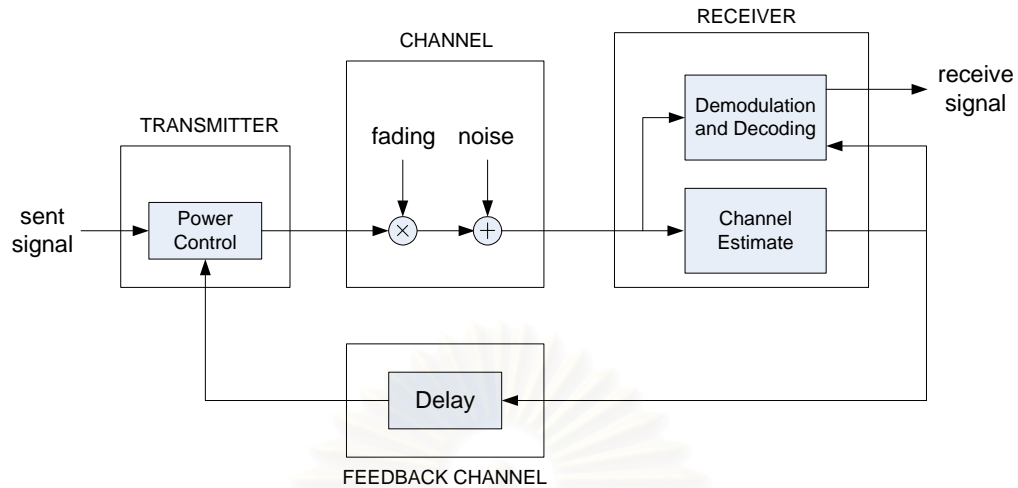
การปรับกำลังส่งของสัญญาณสำหรับการมอดูเลตแบบ BPSK

บทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับเทคนิคการปรับกำลังส่งของสัญญาณที่เสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พร้อมทั้งทำการจำลองระบบเพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มสมรรถนะของระบบเมื่อนำเทคนิคการปรับกำลังส่งที่เสนอมาใช้งานจริง โดยในการจำลองได้นำเทคนิคการปรับกำลังส่งไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับการมอดูเลตแบบ BPSK ภายใต้สภาพช่องสัญญาณไร้สายแบบเรย์ลี และจากแนวโน้มสมรรถนะของระบบที่ได้นำไปสู่การหาผลเฉลยสำหรับค่าการปรับกำลังส่งที่เหมาะสมที่สุดของการมอดูเลตแบบ BPSK เพื่อให้ได้ค่าสมรรถนะของระบบที่สูงที่สุด ด้วยการใช้การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

วัตถุประสงค์หลักของเทคนิคการปรับกำลังส่งของสัญญาณที่นำเสนอเป็นการจัดสรรกำลังส่งที่เหมาะสมให้แก่ระบบสื่อสารไร้สาย เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องอาศัยการเพิ่มแบนด์วิดท์หรือจำนวนเสาอากาศแต่อย่างใด หากแต่ต้องมีการป้อนกลับข้อมูลของสัญญาณโดยใช้จำนวนบิตในการป้อนกลับไม่เกิน 1 – 2 บิตต่อการส่งข้อมูลหนึ่งสัญลักษณ์

3.1 หลักการทำงานของเทคนิคการปรับกำลังส่ง

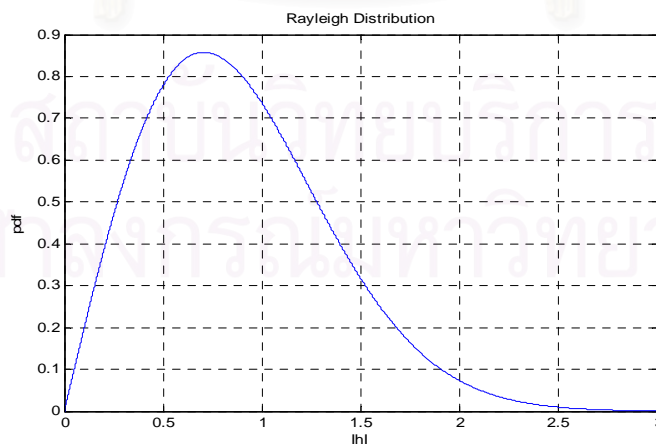
โครงสร้างการทำงานของเทคนิคการปรับกำลังส่งแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยเริ่มจากสัญญาณถูกส่งออกไปจากเครื่องส่งต้นทาง (Transmitter) และเดินทางผ่านช่องสัญญาณไร้สายไปยังเครื่องรับที่อยู่ปลายทาง (Receiver) ในระหว่างที่เดินทางไปยังเครื่องรับ สัญญาณที่ถูกส่งออกมาจะได้รับผลกระทบจากเฟดดิ้งของช่องสัญญาณและสัญญาณรบกวน ทำให้สัญญาณที่ถูกส่งออกมานั้นเกิดการลดทอนขึ้น และเมื่อเครื่องรับที่ปลายทาง รับสัญญาณที่ถูกส่งออกมาได้แล้ว จะทำการประมาณค่าของสัญญาณ จากนั้นนำข่าวสารของช่องสัญญาณไปประมวลเพื่อกำหนดค่ากำลังส่งที่เหมาะสมและจึงป้อนกลับค่าที่คำนวณได้กลับไปยังเครื่องส่งที่ต้นทางเพื่อทำการปรับค่ากำลังส่งให้เหมาะสมกับช่องสัญญาณในขณะนั้น



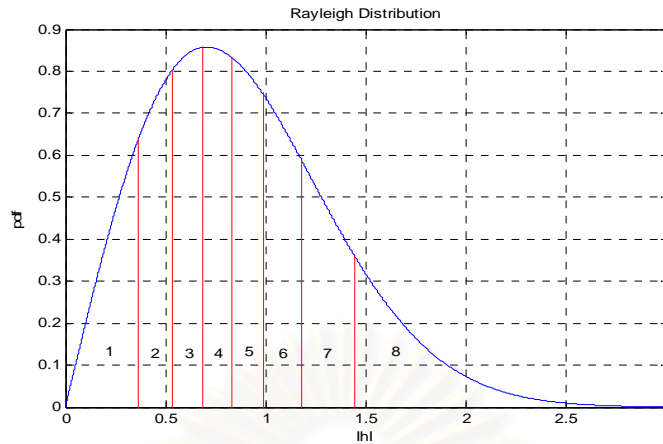
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเทคนิคการปรับกำลังส่ง

3.2 การปรับกำลังส่งของสัญญาณสำหรับการมอดูเลตแบบ BPSK

การปรับกำลังส่งเริ่มจากการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณ ออกเป็น N ระดับ โดยที่ $N = 1, 2, 3, \dots$ แต่ระดับของเฟดดิ้งนั้นมีความน่าจะเป็นในการเกิดเท่าๆ กัน และกำหนดให้เฟดดิ้งของช่องสัญญาณเป็นเฟดดิ้งที่มีการกระจายแบบเรย์ลี (Rayleigh distribution) เนื่องจากลักษณะการแจกแจงของสัญญาณในตัวอาคารและในตัวเมืองส่วนใหญ่จะมีรูปแบบดังกล่าว ดังรูปที่ 3.2 และเพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตและทำความเข้าใจ จะยกตัวอย่างการแบ่งระดับของเฟดดิ้งออกเป็น 8 ระดับ หรือ 8 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 เรย์ลีเฟดดิ้ง



รูปที่ 3.3 เรย์ลีเฟดติงที่แบ่งออกเป็น 8 ระดับ

หลังจากที่แบ่งเฟดติงออกเป็น N ระดับแล้ว จึงทำการกำหนดค่าที่ใช้แทนเฟดติงในแต่ละระดับ เหล่านั้นด้วยค่าที่แตกต่างกันออกไป ในที่นี้แทนด้วย w_i โดยที่ $i = 1, 2, \dots, N$ หากค่าเฟดติงของ ช่องสัญญาณมีค่าอยู่ในระดับใด หรือช่วงใด ให้หาค่าที่กำหนดให้กับช่วงนั้นๆ (w_i) เข้าไปคูณกับ ค่าของข้อมูลที่จะทำการส่งออกไป s เสมือนเป็นการถ่วงน้ำหนักให้กับข้อมูลที่จะถูกส่งออกไป นั้นเอง ซึ่งทำให้ได้ค่าสัญญาณที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักแล้ว \hat{s} ดังนี้

$$\hat{s} = \sqrt{w_i} * s$$

- เมื่อ s แทน สัญญาณที่จะถูกส่งออกไปยังภาครับ
 w_i แทน ค่าที่ใช้ถ่วงน้ำหนักให้แก่สัญญาณที่จะถูกส่งออกไปเมื่อเทียบกับเฟดติง
 ของช่องสัญญาณ หรือค่าที่ใช้ปรับกำลังส่งให้แก่สัญญาณที่จะถูก
 ส่งออกไปยังภาครับ
 \hat{s} แทน สัญญาณที่ส่งออกไปซึ่งผ่านการปรับกำลังส่งของสัญญาณแล้ว

การทำงานของระบบหลังจากที่ทำการแปลงค่าของข้อมูลที่จะถูกส่งออกไปเสร็จเรียบร้อยแล้ว แล้วนั้นจะยังคงเป็นเหมือนระบบการสื่อสารไร้สายทุกๆ ไป นั่นคือ ที่ภาคส่งเริ่มต้นส่งข้อมูลออกไปยังภาครับ ข้อมูลที่ถูกส่งออกไปเดินทางผ่านช่องสัญญาณไร้สายไปสู่ภาครับ และในระหว่างนี้เองที่สัญญาณที่ถูกส่งออกมา นั้นถูกทำให้เกิดการลดทอน อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากเฟดติงของช่องสัญญาณ จนเมื่อข้อมูลที่ถูกส่งเดินทางมาถึงภาครับและทำการรับข้อมูล ในขณะที่ทำการรับข้อมูลนี้เองก็จะเกิดการลดทอนขึ้นอีกครั้งแต่เป็นการลดทอนเนื่องจากมีสัญญาณรบกวนแทรกเข้ามาที่เครื่องรับ จากที่กล่าวมา สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$r = h * \hat{s} + n$$

- โดยที่ r แทน สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ
 h แทน เฟดดิ้งของช่องสัญญาณ
 n แทน สัญญาณรบกวน
 \hat{s} แทน สัญญาณที่ส่งออกไปซึ่งผ่านการปรับกำลังส่งของสัญญาณแล้ว

3.3 การกำหนดสมมติฐาน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดลองกำหนดค่า w_i โดยเลือกสมการที่มีค่าคุณลักษณะแตกต่างกันออกไปทั้งหมด 6 สมการ ที่คาดว่าจะครอบคลุมความเป็นไปได้ทั้งหมดมาทำการทดลอง เพื่อให้เห็นถึงแนวโน้มของสมรรถนะของระบบที่จะเกิดขึ้นสำหรับการกำหนดค่า w_i ในกรณีต่างๆ โดยแทนค่า w_i ของเฟดดิ้งในระดับต่างๆ ด้วยค่าสมการคุณลักษณะที่แตกต่างกันดังนี้ คือ การเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น (Linearly Increase : \mathbf{Y}_1) การลดลงแบบเชิงเส้น (Linearly Decrease : \mathbf{Y}_2) การเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลแบบที่ 1 (Exponentially Increase 1 : \mathbf{Y}_3) การลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแบบที่ 1 (Exponentially Decrease 1 : \mathbf{Y}_4) การเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลแบบที่ 2 (Exponentially Increase 2 : \mathbf{Y}_5) การลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแบบที่ 2 (Exponentially Decrease 2 : \mathbf{Y}_6) และแทนค่าด้วย 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.3 สำหรับกรณีที่แทนค่าด้วย 1 มีความหมายว่า ระบบไม่มีการถ่วงน้ำหนักของข้อมูลที่จะส่งออกไป นั่นก็คือระบบการสื่อสารไร้สายตามปกติที่ไม่ได้ทำการปรับกำลังส่งนั่นเอง ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างของสมรรถนะของระบบในการปรับกำลังส่งเมื่อแทนค่า w_i ด้วยสมการคุณลักษณะแต่ละรูปแบบเปรียบเทียบกับระบบทั่วไปที่ไม่ได้ทำการปรับกำลังส่ง

- การเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นกำหนดจากค่าที่เริ่มต้นจาก 1 เพิ่มขึ้นไปจนถึงจำนวนระดับที่ทำการแบ่ง

$\mathbf{y}_1 = [1 \quad 2 \quad \dots \quad M]$ โดยที่ M เป็นจำนวนระดับที่ทำการแบ่ง

$$\mathbf{Y}_1 = \frac{\mathbf{y}_1}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (y_i^2)}{M}}}$$

- การลดลงแบบเชิงเส้นกำหนดจากค่าที่เริ่มต้นจากจำนวนระดับที่แบ่งลดลงจนถึง 1

$\mathbf{y}_2 = [M \quad M-1 \quad \dots \quad 1]$ โดยที่ M เป็นจำนวนระดับที่ทำการแบ่ง

$$\mathbf{Y}_2 = \frac{\mathbf{y}_2}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (y_i^2)}{M}}}$$

- การเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลแบบที่ 1 กำหนดจากการเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลค่าที่เริ่มต้นจาก 1 เพิ่มขึ้นไปจนถึงจำนวนระดับที่ทำการแบ่ง เช่น $\exp(1)$, $\exp(2)$, $\exp(3)$ และ $\exp(4)$ เป็นต้น สำหรับการแบ่งระดับออกเป็น 4 ระดับ

$\mathbf{y}_3 = [e^1 \quad e^2 \quad \dots \quad e^M]$ โดยที่ M เป็นจำนวนระดับที่ทำการแบ่ง

$$\mathbf{Y}_3 = \frac{\mathbf{y}_3}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (y_i^2)}{M}}}$$

- การลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแบบที่ 1 กำหนดจากค่าที่เริ่มต้นจากเอกซ์โพเนนเชียลแบบของระดับที่แบ่งลดลงจนถึงเอกซ์โพเนนเชียล 1 เช่น $\exp(4)$, $\exp(3)$, $\exp(2)$ และ $\exp(1)$ เป็นต้น สำหรับการแบ่งระดับออกเป็น 4 ระดับ

$\mathbf{y}_4 = [e^M \quad e^{M-1} \quad \dots \quad e^1]$ โดยที่ M เป็นจำนวนระดับที่ทำการแบ่ง

$$\mathbf{Y}_4 = \frac{\mathbf{y}_4}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (y_i^2)}{M}}}$$

- การเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลแบบที่ 2 เป็นส่วนกลับของการเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลแบบที่ 1

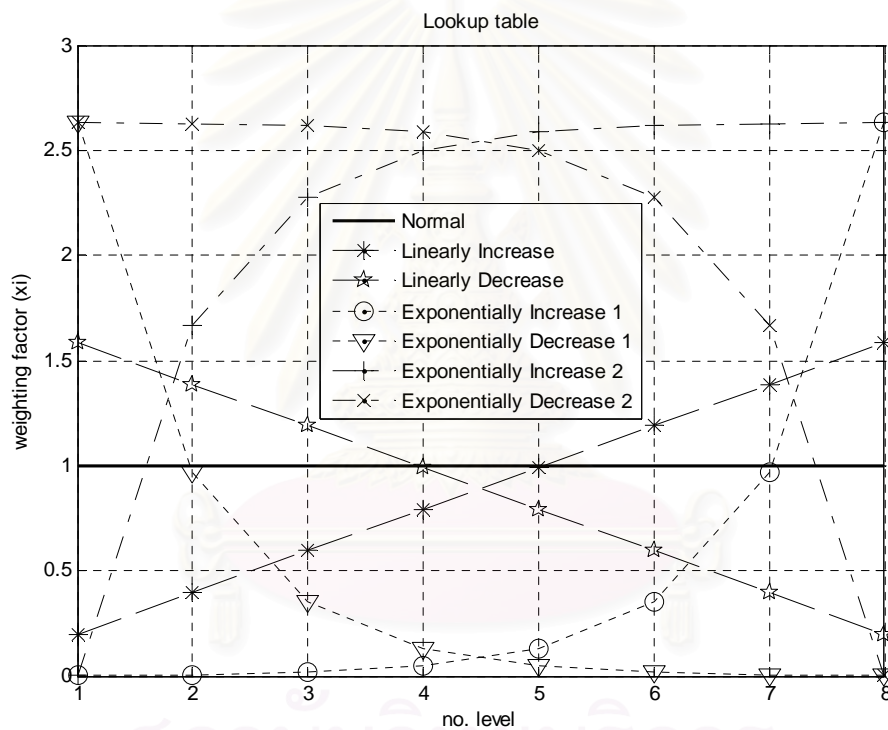
$\mathbf{y}_5 = [-e^M \quad -e^{M-1} \quad \dots \quad -e^1]$ โดยที่ M เป็นจำนวนระดับที่ทำการแบ่ง

$$\mathbf{Y}_5 = \left(\frac{\mathbf{y}_5}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (y_i^2)}{M}}} \right) - (-e^M - e^1)$$

- การลดทอนแบบเอกซ์โพเนนเชียลแบบที่ 2 เป็นส่วนกลับของการลดทอนแบบเอกซ์โพเนนเชียลแบบที่ 1

$y_6 = [-e^1 \quad -e^2 \quad \dots \quad -e^M]$ โดยที่ M เป็นจำนวนระดับที่ทำการแบ่ง

$$Y_6 = \left(\frac{y_6}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (y_i^2)}{M}}} \right) - (-e^1 - e^M)$$



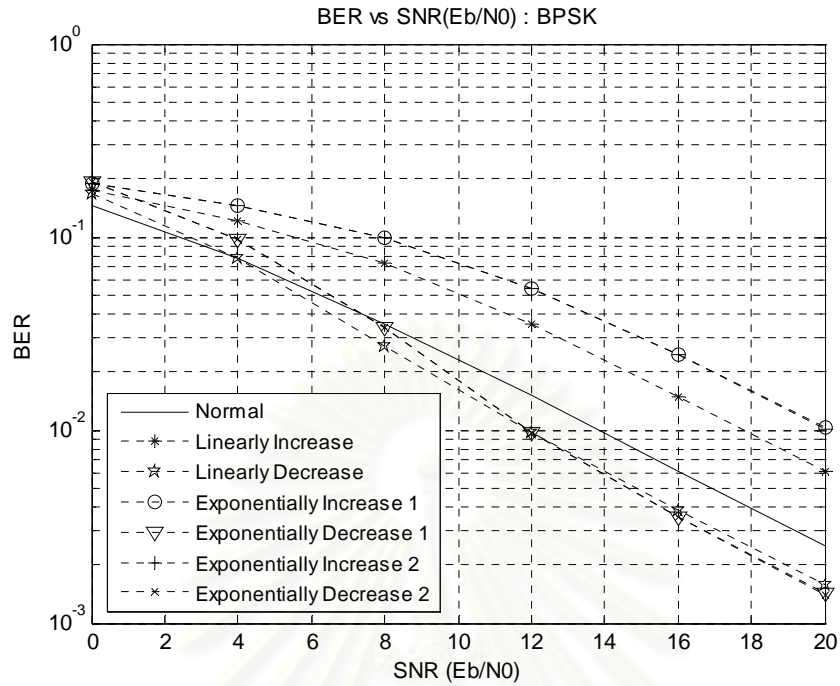
รูปที่ 3.4 ค่าที่ใช้แทนเฟดดิ้งที่ระดับต่าง ๆ สำหรับกรณีทีแบ่งเฟดดิ้งออกเป็น 8 ระดับ

จากการวิเคราะห์รูปที่ 3.3 พบว่ากรณีทีแทนค่า w_i ด้วยความสัมพันธ์ของสมการคุณลักษณะที่เป็นแบบการลดทอนแบบเชิงเส้น และการลดทอนแบบเอกซ์โพเนนเชียลแบบที่ 2 นำจะให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate : BER เป็นค่าที่แสดงถึงสมรรถนะของระบบที่สนใจในสภาวะต่างๆ เช่น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน) ที่น้อยกว่ากรณีทีแทนค่า w_i ด้วยสมการคุณลักษณะแบบอื่นๆ เนื่องจากในช่วงที่ค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณมีค่าน้อย จะส่งผลให้เกิดการลดทอนของสัญญาณมากตามไปด้วย หากค่าของ w_i ที่ใช้แทนในช่วงนี้มี

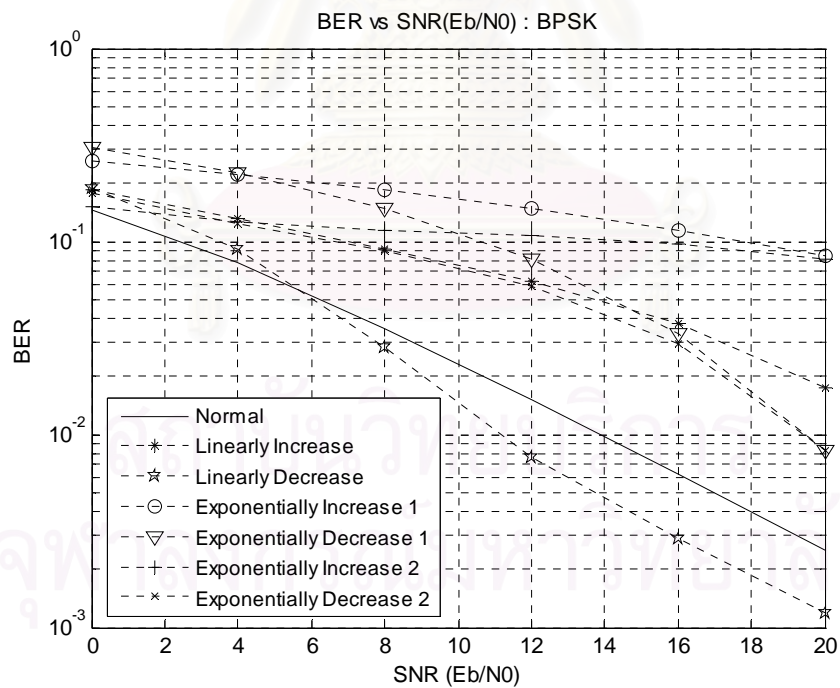
ค่ามากก็จะเป็นดี เพราะนั่นหมายถึงการปรับค่ากำลังที่ใช้ในการส่งให้เพิ่มมากยิ่งขึ้น เพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดจากการลดทอนของสัญญาณอันเนื่องมาจากเฟดดิ้งของช่องสัญญาณ ดังนั้น การที่เราแทนค่า w_i ให้มีค่ามากในช่วงที่เฟดดิ้งของช่องสัญญาณมีค่าน้อย จึงส่งผลให้ค่า BER ของระบบที่ได้มีค่าน้อยลงหรือมีสมรรถนะดียิ่งขึ้นนั่นเอง และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.3 พบว่าค่า w_i ที่ได้จากการสมการคุณลักษณะทั้งสองสมการนี้ไม่ว่าจะเป็นการลดลงแบบเชิงเส้นหรือว่าการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแบบที่ 2 นั้น มีค่าสูงกว่ากรณีที่แทนค่า w_i ด้วยสมการคุณลักษณะอื่นๆ และในทางกลับกันสำหรับในกรณีที่ค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณมีค่ามาก นั่นหมายถึงการลดทอนของสัญญาณอันเนื่องมาจากเฟดดิ้งของช่องสัญญาณมีค่าน้อย ดังนั้นไม่จำเป็นต้องเพิ่มกำลังในการส่งให้มากเกินไปจนความจะเป็น ค่า w_i ที่ใช้แทนในกรณีที่ค่าเฟดดิ้งมีค่าอยู่ในช่วงนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีค่ามาก

3.4 การจำลองโดยอาศัยสมมติฐานที่ตั้งไว้

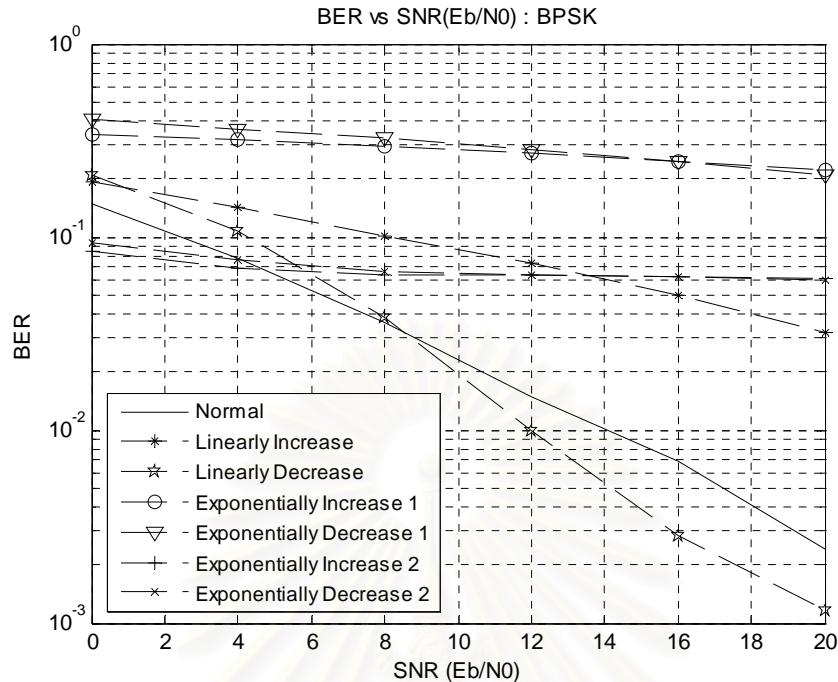
เมื่อนำค่าความสัมพันธ์ต่างๆ ไปจำลองระบบ โดยพิจารณาค่าอัตราผิดพลาดบิตเทียบกับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio หรือ SNR) ในกรณีที่แทนค่า w_i ที่ใช้ในการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณด้วยค่าต่างๆ ดังสมการที่กล่าวไว้ข้างต้น ผลลัพธ์ที่ออกมาจะมีค่าใกล้เคียงกับที่วิเคราะห์ไว้ ซึ่งได้แสดงผลการจำลองไว้ในรูปที่ 3.4 รูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 สำหรับการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณออกเป็น 2 ระดับ 4 ระดับ และ 8 ระดับ ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 ผลการจำลองกรณีที่แบ่งเฟดดิ้งเป็น 2 ระดับ



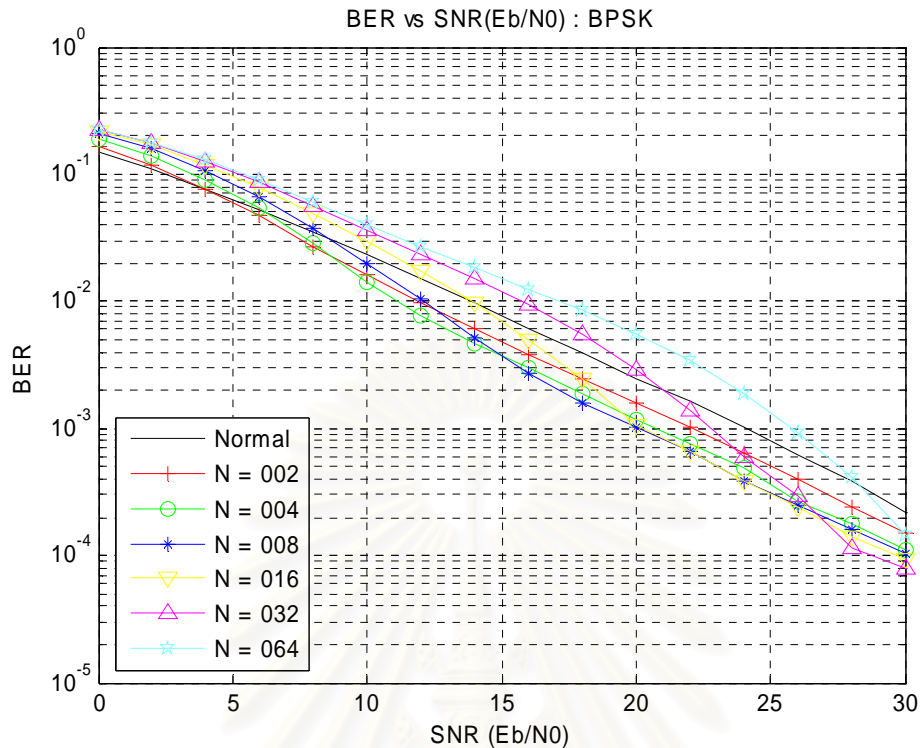
รูปที่ 3.6 ผลการจำลองกรณีที่แบ่งเฟดดิ้งเป็น 4 ระดับ



รูปที่ 3.7 ผลการจำลองกรณีนี้แบ่งเฟดดิ้งเป็น 8 ระดับ

เมื่อพิจารณาสมรรถนะของระบบจากรูปแสดงผลที่ได้จากการจำลองทั้งสามรูปเมื่อกำหนดค่า w_i ตามสมมติฐานที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น พบว่ากรณีที่แทนค่า w_i ด้วยสมการที่มีค่าคุณลักษณะของการลดลงแบบเชิงเส้น และการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแบบที่ 2 นั้นให้ค่าสมรรถนะของระบบที่ดีกว่ากรณีที่แทนค่า w_i ด้วยสมการที่มีค่าคุณลักษณะแบบอื่นๆ ซึ่งเป็นไปตามที่วิเคราะห์ไว้ข้างต้น แต่หากเพิ่มจำนวนระดับของการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณให้มากขึ้นนั้น กรณีที่แทนค่า w_i ด้วยสมการของการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแบบที่ 2 กลับให้ค่าอัตราผิดพลาดบิตที่มากขึ้นกว่ากรณีที่จำนวนระดับของการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณมีค่าน้อยๆ นั่นคือสมรรถนะของระบบที่ได้สำหรับกรณีที่แทนค่า w_i ด้วยสมการที่มีค่าคุณลักษณะเป็นแบบการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแบบที่ 2 มีค่าแย่ลงเมื่อมีการเพิ่มระดับของการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณให้มากขึ้น แต่สำหรับในกรณีที่แทนค่า w_i ด้วยสมการของการลดลงแบบเชิงเส้นนั้น ไม่ว่าจำนวนระดับของการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณมีค่าเป็นเท่าไรค่าสมรรถนะของระบบที่ได้ก็ยังคงมีค่าดีกว่ากรณีที่ไม่ได้ทำการปรับค่ากำลังส่งเลย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากรณีที่แทนค่า w_i ด้วยสมการคุณลักษณะที่เป็นแบบการลดลงแบบเชิงเส้นเป็นกรณีที่ทำให้ระบบมีค่าสมรรถนะสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีที่แทนค่า w_i ด้วยสมการที่มีค่าคุณลักษณะอื่นๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว

เมื่อแยกพิจารณาเฉพาะกรณีที่แทนค่า w_i ด้วยสมการที่มีค่าคุณลักษณะของการลดลงแบบเชิงเส้นอย่างละเอียด โดยทำการจำลองเฉพาะกรณีที่แทนค่า w_i ด้วยสมการที่มีค่าคุณลักษณะแบบการลดลงแบบเชิงเส้น ที่จำนวนระดับของการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน คือ 2 ระดับ 4 ระดับ 8 ระดับ 16 ระดับ 32 ระดับ และ 64 ระดับ สมรรถนะของระบบที่ได้สำหรับการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณที่ระดับต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.7 และจากผลการจำลองนี้จะเห็นว่าค่าสมรรถนะของระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนระดับที่ใช้ในการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณมากพอสมควร ในช่วงต้นของกราฟที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำ ค่าอัตราผิดพลาดบิตของระบบที่มีการนำวิธีรับกำลังส่งมาใช้งานมีค่าสูงกว่าระบบดั้งเดิมหรือมีสมรรถนะแยกว่าระบบดั้งเดิม แต่เมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูงขึ้นค่าอัตราผิดพลาดบิตจะยิ่งต่ำลงจนมีค่าน้อยกว่าค่าอัตราผิดพลาดบิตของระบบดั้งเดิม และจุดตัดระหว่างเส้นกราฟแสดงค่าอัตราผิดพลาดบิตของระบบที่นำวิธีการรับกำลังส่งมาใช้งานกับระบบดั้งเดิมนี้อาจมีค่าเลื่อนไปทางขวาของกราฟตามค่าจำนวนระดับที่ใช้สำหรับการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ยิ่งจำนวนระดับที่ใช้ยิ่งมากช่วงที่ค่าอัตราผิดพลาดบิตของระบบที่นำการรับกำลังส่งมาใช้งานสำหรับกรณีที่แทนค่า w_i ด้วยสมการที่มีค่าคุณลักษณะของการลดลงแบบเชิงเส้นมีค่าสูงกว่าระบบดั้งเดิมจะยิ่งมีค่ากว้างขึ้น แต่อย่างไรก็ตามที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูง ระบบที่นำวิธีรับกำลังส่งมาใช้งานก็ยังคงให้สมรรถนะที่ดีกว่ากรณีที่ไม่มีวิธีการรับกำลังส่งมาใช้งาน



รูปที่ 3.8 สมรรถนะของระบบกรณีแทน w_i ด้วยการลดลงแบบเชิงเส้น
ในแต่ค่าของการแบ่งระดับของเฟดดิ้ง

พิจารณาจากกราฟแสดงผลการจำลองทั้งหมด จะเห็นว่าเส้นกราฟของการจำลองแต่ละเส้นมีค่าแตกต่างกันออกไปตามค่า w_i ที่ใช้ ดังนั้นหากเราแทนค่า w_i ด้วยค่าคุณลักษณะอื่นๆ ที่เหมาะสม น่าจะทำให้ได้ผลการจำลองที่ดีขึ้นกว่าที่ได้จากสมการคุณลักษณะทั้ง 6 สมการที่ใช้

3.5 สมรรถนะสูงสุดของเทคนิคการปรับกำลังส่งสำหรับการมอดูเลตแบบ BPSK

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจึงได้เกิดแนวความคิดที่จะหาค่าสมรรถนะสูงสุดโดยอาศัยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด โดยจะพิจารณาเฉพาะกรณีการมอดูเลต BPSK เท่านั้น เนื่องจากเป็นวิธีเดียวที่สามารถหาผลเฉลยได้อย่างสมบูรณ์ กรณีอื่น ๆ ยังไม่สามารถหาผลเฉลยในรูปความสัมพันธ์ที่กระชับได้ การวิเคราะห์เริ่มต้นจากความสัมพันธ์ในรูปของสมการความน่าจะเป็นดังสมการที่ (3.1)

$$\bar{P}_e = \int_0^{\infty} P_e(h) p_h(h) dh \quad (3.1)$$

ในวิทยานิพนธ์นี้จะขอพิจารณาข้อมูลที่เป็นการมอดูเลตแบบ BPSK ซึ่งมีค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตดังนี้

$$P_e(SNR) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\rho)$$

ดังนั้นสำหรับวิธีที่เสนอ เราจะได้ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตแบบ BPSK ที่มีความสัมพันธ์กับค่าของ w_i และ h ดังนี้

$$P_e(SNR) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h)$$

และฟังก์ชันความน่าจะเป็นของเรย์ลีเฟดดิ้งมีค่า

$$p_h(h) = 2he^{-h^2}$$

นำค่าทั้งสองแทนลงในสมการที่ (3.1) จะได้

$$\hat{P}_e = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) 2he^{-h^2} dh \quad (3.2)$$

เนื่องจากเราทำการแบ่งช่วงของเฟดดิ้งออกเป็นระดับต่างๆ ดังนั้นการขอบเขตของการอินทิเกรตจาก 0 ถึง ∞ จึงต้องเปลี่ยนค่าเป็นขอบเขตของช่วงที่เราทำการแบ่งในแต่ละระดับ ในที่นี้ขอแทนค่าด้วย h_i ถึง h_{i+1} และทำการรวมค่าที่อินทิเกรตแล้วในแต่ละช่วงเข้าด้วยกัน ดังนั้นสมการที่ (3.2) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\bar{P}_e = \sum_{i=1}^N \int_{h_i}^{h_{i+1}} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) he^{-h^2} dh \quad (3.3)$$

ทำการอินทิเกรตด้วยวิธีการอินทิเกรตแบบบายพาด โดยเลือกใช้ค่า u และ dv ดังนี้

$$u = \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h)$$

จะได้
$$du = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-(\rho\sqrt{w_i}h)^2} \rho\sqrt{w_i} dh$$

และ
$$dv = he^{-h^2} dh$$

ดังนั้น
$$v = -\frac{1}{2} e^{-h^2}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.3) จึงได้ว่า

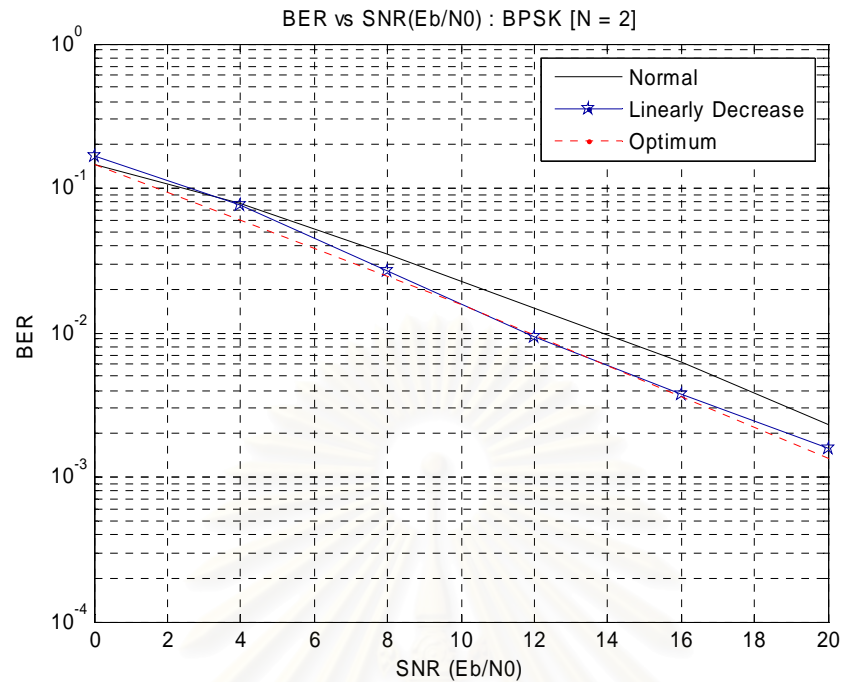
$$\bar{P}_e = \sum_{i=1}^N \left[-\frac{1}{2} e^{-h^2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) \Big|_{h_i}^{h_{i+1}} - \int_{h_i}^{h_{i+1}} \frac{\rho\sqrt{w_i}}{\sqrt{\pi}} e^{-((1+\rho\sqrt{w_i})^2)h^2} dh \right]$$

ทำการอินทิเกรตแล้วแทนค่าขอบเขตจะได้สมการที่แสดงค่าสมรรถนะสูงสุดของการปรับกำลังส่งออกมาดังสมการ

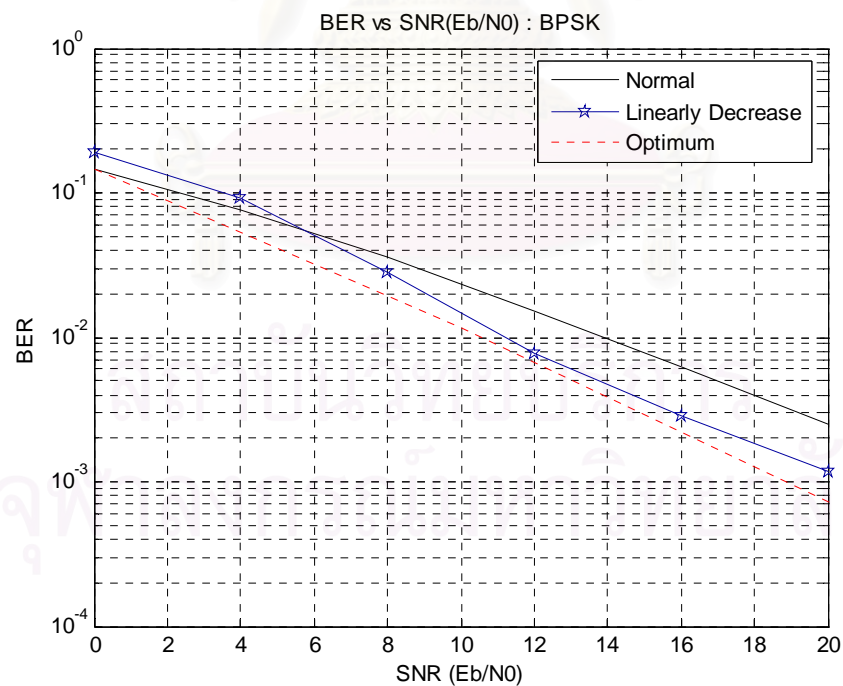
$$\bar{P}_e = \sum_{i=1}^N \left[-\frac{e^{-h^2}}{2} + \frac{e^{-h^2}}{2} \operatorname{erf}(\rho\sqrt{w_i}h) - \frac{\rho\sqrt{w_i}}{2\sqrt{1+(\rho\sqrt{w_i})^2}} \operatorname{erf}(\sqrt{1+(\rho\sqrt{w_i})^2}h) \right]_{h_i}^{h_{i+1}} \quad (3.4)$$

3.6 ผลการจำลองโดยอาศัยสมการค่าสมรรถนะสูงสุด

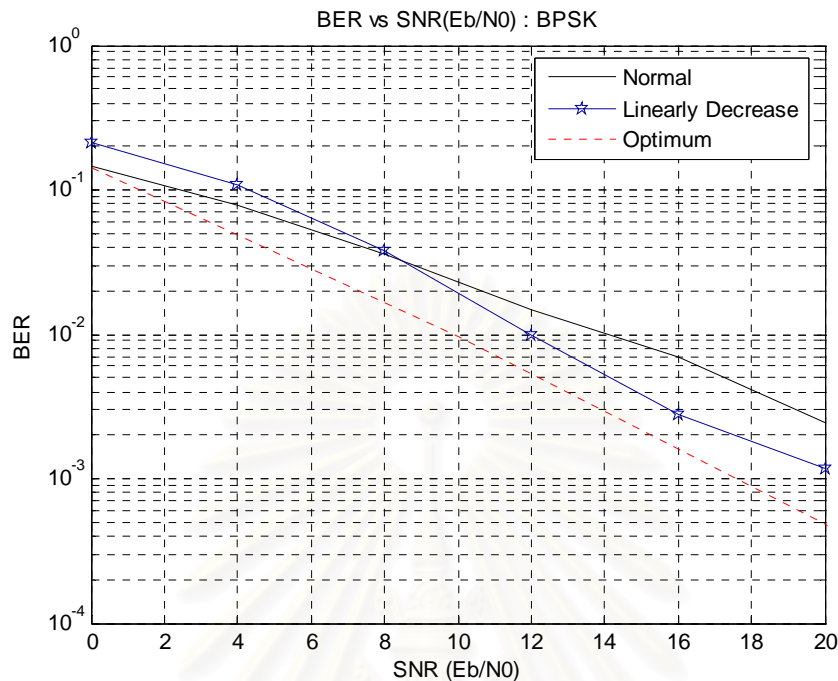
นำค่าสมรรถนะสูงสุดที่ได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.4) ไปทำการจำลองเปรียบเทียบกับอีก 2 กรณี โดยที่กรณีแรกคือกรณีที่แทนค่า w_i โดยใช้สมการคุณลักษณะของการลดลงแบบเชิงเส้น เนื่องจากการจำลองที่ผ่านมาพบว่าการแทนค่า w_i โดยใช้สมการคุณลักษณะการลดลงแบบเชิงเส้นนี้เป็นกรณีที่ให้ค่าสมรรถนะของระบบสูงกว่ากรณีที่แทนค่า w_i ด้วยค่าสมการคุณลักษณะอื่น ๆ ดังที่ได้ทำการจำลองและแสดงผลการจำลองไว้ในหัวข้อที่ 3.3 และอีกกรณีหนึ่งที่ต้องการเปรียบเทียบให้เห็นคือกรณีที่เป็นระบบดั้งเดิมนั้นคือไม่มีการนำเทคนิคการปรับกำลังส่งมาใช้แต่อย่างใด ทั้งนี้เพื่อแสดงเปรียบเทียบค่าสมรรถนะที่แตกต่างกันระหว่างระบบที่ไม่มีการปรับค่ากำลังส่ง และระบบที่นำเทคนิคการปรับกำลังส่งมาใช้งาน ซึ่งได้จำลองระบบในกรณีที่ทำการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณออกเป็น 2 ระดับ 4 ระดับ และ 8 ระดับ โดยผลการจำลองได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.8 รูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 อัตราผิดพลาดบิตระหว่างการแทนด้วยสมการลดลงแบบเชิงเส้นกับค่าที่เหมาะสมที่สุด
กรณีแบ่งระดับเฟดดิ้งออกเป็น 2 ระดับ



รูปที่ 3.10 อัตราผิดพลาดบิตระหว่างการแทนด้วยสมการลดลงแบบเชิงเส้นกับค่าที่เหมาะสมที่สุด
กรณีแบ่งระดับเฟดดิ้งออกเป็น 4 ระดับ

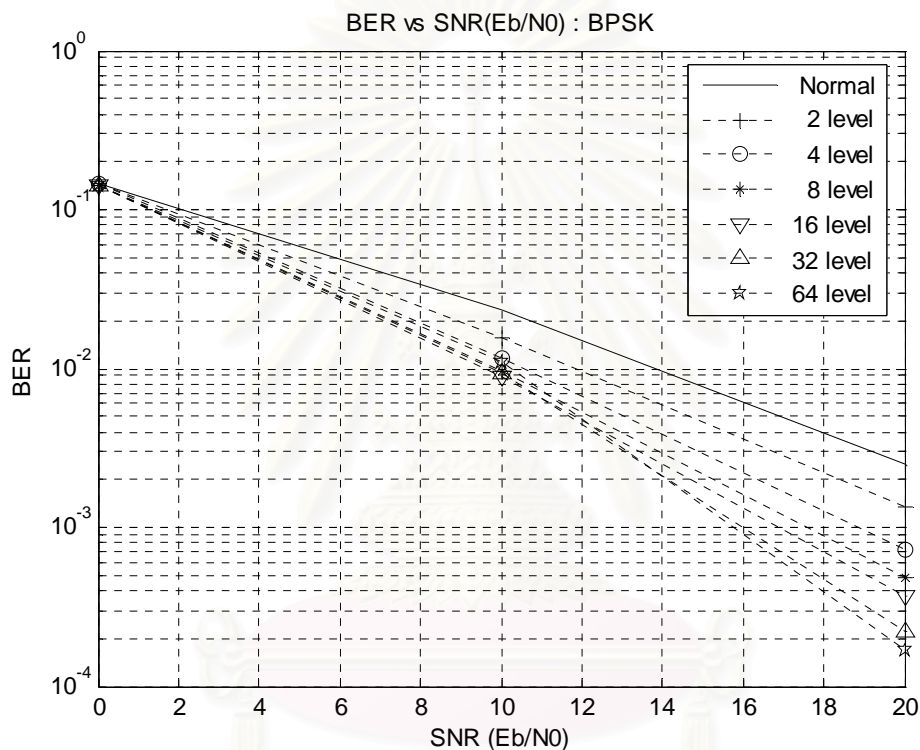


รูปที่ 3.11 อัตราผิดพลาดบิตระหว่างการแทนด้วยสมการลดแบบเชิงเส้นกับค่าที่เหมาะสมที่สุดกรณีแบ่งระดับเฟดดิ้งออกเป็น 8 ระดับ

จากผลการจำลองที่แสดงในรูปที่ 3.8 รูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 พบว่าการจำลองโดยใช้ค่าความสัมพันธ์จากสมการที่ (3.4) ให้ค่าอัตราผิดพลาดบิตน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้งกรณีที่ใช้วิธีปรับกำลังส่งโดยการแทนค่า w_i ด้วยสมการที่มีค่าคุณลักษณะของการลดแบบเชิงเส้น และกรณีที่ไม่มีการปรับกำลังส่ง สำหรับทุกค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนและทุกค่าของจำนวนระดับที่ใช้สำหรับการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณ นอกจากนี้ยังพบว่ายิ่งเพิ่มจำนวนระดับที่ใช้สำหรับการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณให้มากขึ้น ความแตกต่างของเทคนิคการปรับกำลังส่งทั้งสองเทคนิคที่ใช้ในการจำลองนี้ นั่นคือ ระหว่างการแทนค่า w_i ด้วยความสัมพันธ์ของสมการการลดแบบเชิงเส้น และการแทนค่า w_i ด้วยสมการที่ให้ค่าสมรรถนะสูงสุด ก็จะมีมากขึ้นเรื่อยๆ ตามค่าจำนวนระดับที่เพิ่มขึ้น และสมรรถนะสูงสุดของระบบที่ได้ก็จะเป็นสมรรถนะที่ได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.4

ทำการจำลองอย่างละเอียดเฉพาะกรณีที่ใช้ค่าการปรับกำลังส่งที่เหมาะสมที่สุดจากสมการที่ 3.4 สำหรับจำนวนระดับที่ใช้ในการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณตั้งแต่ 2 ระดับ 4 ระดับ 8 ระดับ 16 ระดับ 32 ระดับ และ 64 ระดับ เพื่อแสดงให้เห็นแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าจำนวนระดับที่ใช้แบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณให้เพิ่มมากขึ้น ได้ผลการ

จำลองดังแสดงในรูปที่ 3.11 พิจารณาจากผลการจำลองที่ได้ พบว่าจำนวนระดับที่ใช้ในการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณแปรผกผันกับค่าอัตราผิดพลาดบิต นั่นคือเมื่อเพิ่มจำนวนระดับที่ใช้ในการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณให้มากขึ้น ค่าอัตราผิดพลาดบิตก็จะมีค่าต่ำลง นั่นคือสมรรถนะของระบบที่ได้จะดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการลดต่ำลงของค่าอัตราผิดพลาดบิตนั้นจะมีค่าลู่อู่เข้าสู่อ่างหนึ่ง สังเกตได้จากสมรรถนะของระบบสำหรับผลการจำลองกรณีที่ใช้จำนวนระดับตั้งแต่ 32 ระดับขึ้นไป จะเริ่มมีค่าใกล้เคียงกันแม้ว่าจะเพิ่มจำนวนระดับให้มากขึ้นอีกก็ตาม



รูปที่ 3.12 อัตราผิดพลาดบิตเมื่อแทนด้วยค่าที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละค่าของการแบ่งระดับของเฟดดิ้ง

3.7 การประยุกต์ใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีทางปริภูมิร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่ง

ไดเวอร์ซิตีทางปริภูมิ เป็นเทคนิคที่อาศัยคุณสมบัติพื้นฐานการแพร่กระจายของคลื่นสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งมักจะมีเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณแบบหลายวิถี และโดยทั่วไปแล้วหากการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นทางหนึ่งถูกรบกวนอย่างมากจากเฟดดิ้งทำให้สัญญาณที่ได้รับมีกำลังอ่อนมาก ก็อาจจะมีการเคลื่อนสัญญาณจากเส้นทางอื่นที่ให้สัญญาณกำลังสูง ดังนั้นหากเราติดตั้งสายอากาศหรือเสาส่งที่คนละตำแหน่งกันมากกว่าหนึ่งแห่ง

ก็จะสามารถรับสัญญาณได้จากหลายเส้นทาง จากนั้นระบบก็สามารถที่จะเลือกเฉพาะสัญญาณที่มีกำลังสูงมาใช้ได้ [14]

ในหัวข้อนี้จะเสนอการนำเทคนิคไดเวอร์ซิตีมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่ง นั่นคือเพิ่มจำนวนเสาส่งให้มากขึ้น และภาครับจะทำการเลือกรับสัญญาณที่มาจากเสาส่งที่มีกำลังสูงที่สุดมาใช้งาน ในขณะที่การปรับกำลังส่งโดยพิจารณาสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณนั้น ยังคงกระทำอยู่ วิธีที่เสนอนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้ดียิ่งขึ้น โดยเริ่มต้นพิจารณาจากค่า PDF ของเฟดดิ้งที่มีการกระจายแบบเรย์ลีดังสมการที่ (3.5)

$$p_h(h) = 2he^{-h^2} \quad (3.5)$$

จากค่า PDF สามารถหาค่า CDF ของเฟดดิ้งที่มีการกระจายแบบเรย์ลีได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_h(h) &= \int_0^h 2xe^{-x^2} dx \\ &= \int_0^h 2xe^{-x^2} \frac{1}{-2x} d(-x^2) \\ &= -e^{-x^2} \Big|_0^h \\ &= 1 - e^{-h^2}; \quad h \geq 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

สำหรับภาครับ ทำการเลือกสัญญาณที่มาจากเสาส่งต้นที่มีกำลังแรงที่สุดมาใช้งาน

$$h_m = \max(h_1, h_2, h_3, \dots, h_m)$$

ซึ่งค่า CDF ของ h_m สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_{h_m}(h_m) &= P(\max(h_1, h_2, h_3, \dots, h_n) \leq h_m) \\ &= P(h_i \leq h_m, \forall i) \end{aligned} \quad (3.7)$$

เนื่องจากค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณจากเสาส่งแต่ละต้นมีค่าอิสระจากกัน ดังนั้นในกรณีที่เสาส่งมีจำนวน n ต้น จึงสามารถเขียนสมการที่ (3.7) ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_{h_m} &= [P_{h_i}(h_i)]^n \\
 &= [1 - e^{-h_m^2}]^n
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

นำค่าที่ได้จากสมการที่ (3.8) ไปหาค่า PDF โดยสามารถหาได้จากการหาค่าอนุพันธ์ ซึ่งจะค่าดังนี้

$$p_{h_m}(h_m) = n[1 - e^{-h_m^2}]^{n-1} 2h_m e^{-h_m^2}, \quad h_m \geq 0 \tag{3.9}$$

นำค่าที่ได้ไปแทนในสมการที่ (3.1) เพื่อหาค่าที่ทำให้ได้สมรรถนะสูงสุด โดยพิจารณาสำหรับกรณีที่ใช้เสาสูง 2 ต้น และแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณออกเป็น 8 ระดับ

$$\begin{aligned}
 \bar{P}_e &= \sum_{i=0}^7 \int_{h_i}^{h_{i+1}} P_e(\rho\sqrt{w_i}h) p_{h_i}(h) dh \\
 &= \sum_{i=0}^7 \int_{h_i}^{h_{i+1}} \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) 2[1 - e^{-h^2}] 2he^{-h^2} dh \\
 &= \sum_{i=0}^7 \int_{h_i}^{h_{i+1}} (2he^{-h^2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) - 2he^{-h^2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h)e^{-h^2}) dh \\
 &= \sum_{i=0}^7 \int_{h_i}^{h_{i+1}} (2he^{-h^2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) - 2he^{-2h^2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h)) dh
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

พิจารณาที่ละเทอม ทำการอินทิเกรตโดยใช้เทคนิคการอินทิเกรตแบบบายพาสส์ โดยสำหรับเทอม

แรก $\int_{h_i}^{h_{i+1}} 2he^{-h^2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) dh$ กำหนดค่า u และ dv ดังนี้

$$\begin{aligned}
 u &= \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) \quad \rightarrow \quad du = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \rho\sqrt{w_i} e^{-(\rho\sqrt{w_i}h)^2} dh \\
 dv &= 2he^{-h^2} dh \quad \rightarrow \quad v = -e^{-h^2}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 \int_{h_i}^{h_{i+1}} 2he^{-h^2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) dh &= \left[-e^{-h^2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) \right]_{h_i}^{h_{i+1}} - \int_{h_i}^{h_{i+1}} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \rho\sqrt{w_i} e^{-h^2} e^{-(\rho\sqrt{w_i}h)^2} dh \\
 &= \left[-e^{-h^2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) \right]_{h_i}^{h_{i+1}} - \left[\frac{\rho\sqrt{w_i}}{\sqrt{1 + (\rho\sqrt{w_i})^2}} \operatorname{erf}\left(h\sqrt{1 + (\rho\sqrt{w_i})^2} \right) \right]_{h_i}^{h_{i+1}}
 \end{aligned}$$

และสำหรับเทอมของ $\int_{h_i}^{h_{i+1}} 2he^{-2h^2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h)dh$ กำหนดค่า u และ dv ดังนี้

$$u = \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) \rightarrow du = -\frac{2}{\sqrt{\pi}}\rho\sqrt{w_i}e^{-(\rho\sqrt{w_i}h)^2} dh$$

$$dv = 2he^{-2h^2} dh \rightarrow v = -\frac{1}{2}e^{-2h^2}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \int_{h_i}^{h_{i+1}} 2he^{-2h^2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h)dh &= \left[-\frac{1}{2}e^{-2h^2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) \right]_{h_i}^{h_{i+1}} - \int_{h_i}^{h_{i+1}} \frac{1}{\sqrt{\pi}}\rho\sqrt{w_i}e^{-2h^2} e^{-(\rho\sqrt{w_i}h)^2} dh \\ &= \left[-\frac{1}{2}e^{-2h^2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) \right]_{h_i}^{h_{i+1}} - \left[\frac{\rho\sqrt{w_i}}{2\sqrt{2+(\rho\sqrt{w_i})^2}} \operatorname{erf}\left(h\sqrt{1+(\rho\sqrt{w_i})^2} \right) \right]_{h_i}^{h_{i+1}} \end{aligned}$$

นำค่าที่ได้ไปแทนกลับลงในสมการที่ (3.10) จะได้

$$\begin{aligned} \bar{P}_e &= \sum_{i=0}^7 \left[-e^{-h^2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) \left(1 + \frac{e^{-h^2}}{2} \right) - \frac{\rho\sqrt{w_i}}{\sqrt{1+(\rho\sqrt{w_i})^2}} \operatorname{erf}\left(h\sqrt{1+(\rho\sqrt{w_i})^2} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\rho\sqrt{w_i}}{2\sqrt{2+(\rho\sqrt{w_i})^2}} \operatorname{erf}\left(h\sqrt{2+(\rho\sqrt{w_i})^2} \right) \right]_{h_i}^{h_{i+1}} \quad (3.11) \end{aligned}$$

สมการที่ (3.10) เป็นสมการของความสัมพันธ์ที่ทำให้ระบบได้ค่าสมรรถนะสูงสุดจากการใช้เสาส่งจำนวน 2 ต้น และแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณออกเป็น 8 ระดับ สำหรับกรณีของระบบที่ใช้เสาส่งจำนวน M ต้น และทำการแบ่งระดับเฟดดิ้งออกเป็น N ระดับ เราสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{P}_e &= \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=1}^M \int_{h_i}^{h_{i+1}} (-1)^{(k-1)} M \binom{M-1}{k-1} h e^{-kh^2} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) dh \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=1}^M \int_{h_i}^{h_{i+1}} (-1)^k M \binom{M-1}{k-1} \left[\frac{e^{-kh^2}}{2k} \operatorname{erfc}(\rho\sqrt{w_i}h) + \frac{\rho\sqrt{w_i}}{2k\sqrt{k + (\rho\sqrt{w_i})^2}} \operatorname{erf}\left(h\sqrt{k + (\rho\sqrt{w_i})^2}\right) \right] \Bigg|_{h_i}^{h_{i+1}} \end{aligned} \quad (3.12)$$

โดยที่ M แทน จำนวนเสาส่ง

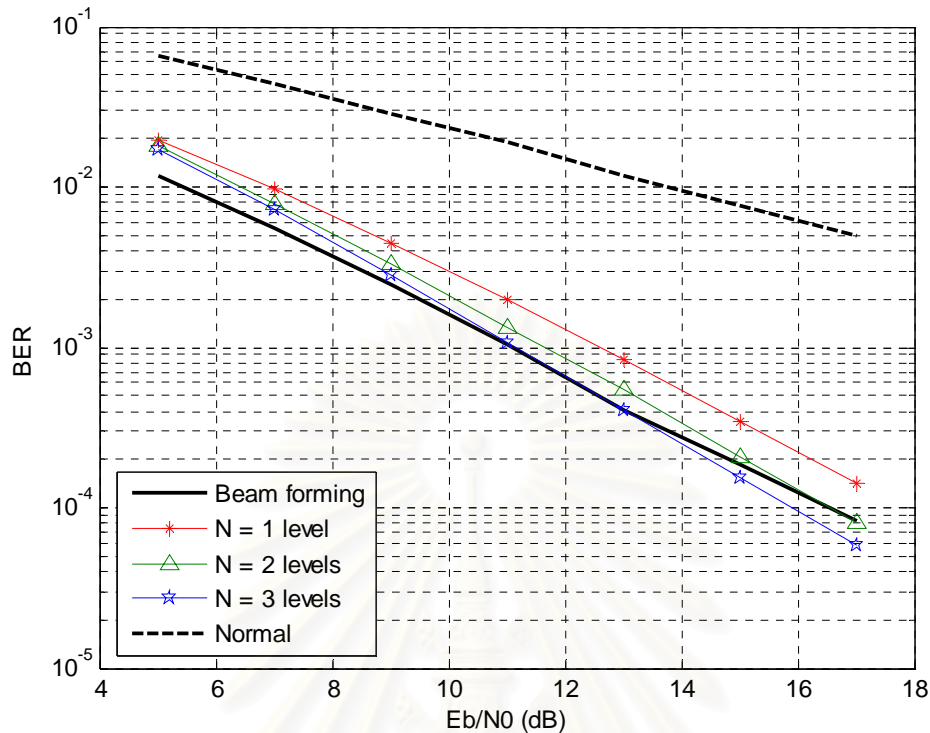
N แทน จำนวนระดับที่แบ่งจากการพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณ

w_i แทน ค่าที่ใช้ปรับกำลังส่งให้แก่สัญญาณที่จะส่งออกไปที่ระดับ i สำหรับการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณ

3.8 ผลลัพท์โดยใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่ง

จากความสัมพันธ์ที่ได้ในสมการที่ (3.12) นำไปทำการจำลองระบบ และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองทั้ง 4 กรณี ดังนี้ กรณีแรกคือระบบที่อาศัยเทคนิค Beam forming กรณีที่สองคือระบบที่ใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการปรับกำลังส่งแต่อย่างใด กรณีที่สามคือระบบที่อาศัยเทคนิคไดเวอร์ซิตีและเทคนิคการปรับกำลังส่งโดยใช้การแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณออกเป็น 2 ระดับ และกรณีสุดท้ายคือกรณีที่ระบบอาศัยเทคนิคไดเวอร์ซิตีและเทคนิคการปรับกำลังส่งโดยใช้การแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณออกเป็น 3 ระดับ ซึ่งผลการจำลองนำมาแสดงไว้ในรูปที่ 3.13

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.13 ผลการจำลองของระบบที่ประยุกต์ใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่ง

พิจารณาจากผลการจำลองที่แสดงไว้ พบว่า การใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีเพียงอย่างเดียวไม่ช่วยให้สมรรถนะของระบบมีค่าดีกว่ากรณีของระบบที่ใช้ Beam forming เลยในทุกช่วงของค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน แต่เมื่อมีการนำเทคนิคการปรับกำลังส่งมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคนิคไดเวอร์ซิตีจะเห็นว่าสมรรถนะของระบบมีค่าดียิ่งขึ้น ถึงแม้ว่าในช่วงที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำค่าสมรรถนะของระบบที่อาศัยเทคนิคไดเวอร์ซิตีร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่งจะมีสมรรถนะที่ต่ำกว่าระบบที่ใช้เทคนิค Beam forming แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้มากขึ้น ค่าสมรรถนะของระบบที่ใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่งจะมีค่าดีขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสมรรถนะของระบบมีค่าดีกว่าระบบที่ใช้เทคนิค Beam forming โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากเพิ่มระดับที่ใช้สำหรับการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณให้มากขึ้น สมรรถนะของระบบจะมีค่าดียิ่งขึ้นตามไปด้วย

บทที่ 4

เทคนิคการปรับกำลังส่งสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลาที่เสนอ

จากผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลของการประยุกต์ใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งกับระบบสื่อสารไร้สายที่ใช้วิธีมอดูเลต BPSK พื้นฐานที่บรรยายไว้ในบทที่ 3 พบว่าเทคนิคดังกล่าวนี้สามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะของระบบขึ้นได้โดยไม่ต้องใช้รหัสช่องสัญญาณที่ซับซ้อน ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งเข้ากับระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น กล่าวคือ เป็นระบบที่มีการใช้เสาส่งมากกว่า 1 ต้นควบคู่กับรหัสปริภูมิ-เวลา โดยในวิทยานิพนธ์นี้ เราได้เลือกใช้รหัสปริภูมิ-เวลาชนิดหนึ่งที่มีชื่อเรียกว่า รหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti สำหรับรายละเอียดของรหัส Alamouti ได้บรรยายไว้ในบทที่ 2

รหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti แบบพื้นฐานมีการใช้เสาส่งจำนวน 2 ต้น เสารับ 1 ต้น อย่างไรก็ตามก็คิดว่าเราสามารถขยายให้เข้ากับระบบที่มีเสารับหลายต้นได้เช่นกัน โดยอาศัยเทคนิคการรวมสัญญาณแบบ MRC การที่ระบบมีเสาส่งจำนวน 2 ต้น ทำให้เกิดไดเวอร์ซิตีทางปริภูมิ และไดเวอร์ซิตีทางเวลาขึ้น นอกจากนี้ในการพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณสำหรับการแบ่งระดับเฟดดิ้งตามวิธีการปรับกำลังส่งที่เสนอไว้ในบทที่ 3 จะมีความซับซ้อนมากขึ้น โดยทั่วไปแล้วเทคนิคการปรับกำลังส่งสามารถทำได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับจำนวนของระดับกำลังส่งที่ใช้กับวิธีการกำหนดค่ากำลังส่งของแต่ละระดับให้สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ ในบทนี้ได้เสนอวิธีการประยุกต์ใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ไว้ 3 แบบ คือ เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลา เทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง และเทคนิคการปรับกำลังส่งทั้งทางเวลาและระหว่างเสาส่งพร้อมกัน จากนั้นทำการจำลองระบบโดยใช้เทคนิคที่เสนอไว้ทั้ง 3 แบบ พร้อมทั้งแสดงผลการจำลอง วิเคราะห์สมรรถนะของระบบที่ได้จากการจำลอง และเปรียบเทียบระหว่างผลการนำเทคนิคการปรับกำลังส่งมาใช้งานทั้ง 3 แบบ กับระบบที่ไม่มี การนำเทคนิคการปรับกำลังส่งมาใช้งาน

4.1 เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลา: วิธีที่ 1

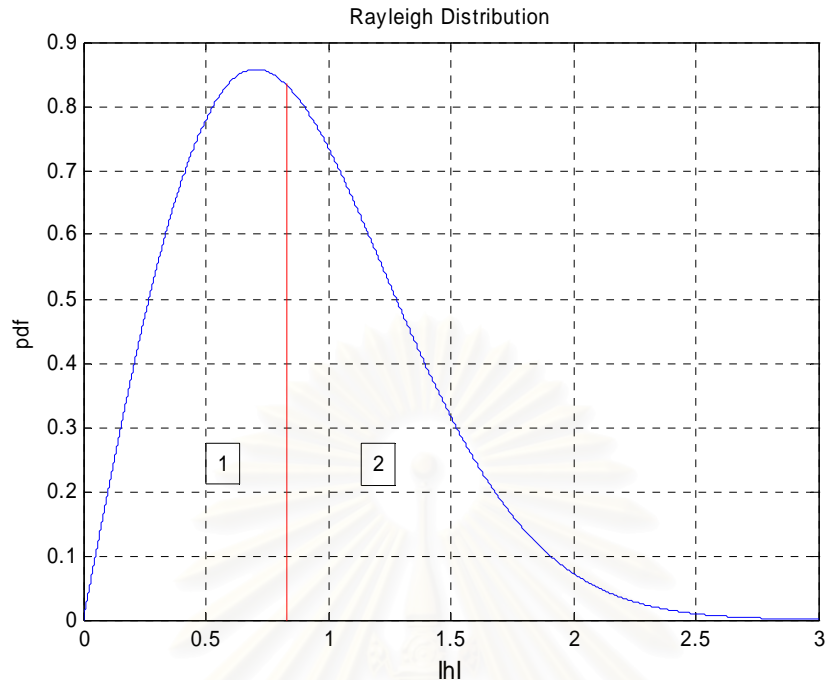
วิธีแรกที่เสนอในบทนี้คือเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลา ซึ่งหลักการส่วนใหญ่ที่ใช้ในการปรับกำลังส่งยังคงเป็นเหมือนที่ได้บรรยายไว้ในบทที่ 3 แต่จะมีพารามิเตอร์ที่ต้องทำการพิจารณาเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti มีความซับซ้อนมากกว่าการมอดูเลตแบบ

BPSK ที่ได้บรรยายไว้ในบทที่ 3 จากที่เคยกล่าวไว้ข้างต้นว่า รหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti เป็นรหัสที่ใช้เสาส่ง 2 ต้น ช่องสัญญาณที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณไปยังภาครับก็จะมี 2 ช่องสัญญาณ ดังนั้น การพิจารณาระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งจึงต้องพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณทั้งสองช่องสัญญาณนั้น ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอแนวความคิดสำหรับการพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาไว้ 2 วิธี วิธีแรกคือพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่งแยกออกจากกัน และวิธีที่สองคือพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่งแบบร่วมกัน

4.1.1 เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกัน

การส่งสัญญาณด้วยรหัส Alamouti นั้น มีการใช้เสาส่งจำนวน 2 ต้น สัญญาณที่ส่งออกจากเสาส่งแต่ละต้นสมมติให้มีเส้นทางการแพร่กระจายที่แตกต่างกันและเป็นอิสระจากกัน เมื่อสัญญาณเดินทางถึงเสารับที่ปลายทางย่อมได้รับผลกระทบจากปัญหาเฟดดิ้งที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม เฟดดิ้งที่เกิดขึ้นกับทั้งสองเส้นทางนั้นต่างก็มีลักษณะการกระจายแบบเรย์ลีเหมือนกัน กำหนดให้ h_1 แทนสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณที่พิจารณาจากเสาส่งต้นที่ 1 ไปยังภาครับ และ h_2 แทนสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณที่พิจารณาจากเสาส่งต้นที่ 2 ไปยังภาครับ เนื่องจากในระบบนี้มีเสาส่ง 2 ต้น ในการปรับกำลังส่งทางเวลาจึงมีความซับซ้อนขึ้นเพราะต้องนำค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณทั้งสองค่ามาพิจารณาประกอบกันเพื่อให้การปรับเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ในที่นี้เนื่องจากเราต้องการลดความซับซ้อนของการป้อนกลับข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณให้น้อยที่สุด จึงได้แบ่งแยกสถานะของช่องสัญญาณออกเป็น 2 สถานะที่แตกต่างกัน ได้แก่ สถานะดี (good state) และสถานะเลว (bad state) โดยพิจารณาจากค่าแอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 การแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่ง

ทำการพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณจากเสาส่งแต่ละต้นแยกออกจากกัน กำหนดให้ความน่าจะเป็นในการเกิดของทั้งสถานะดี และสถานะเลวมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจะพบว่ามีกรณีทั้งหมดอยู่ 4 กรณีที่จะสามารถเกิดขึ้นได้ นั่นคือ

- เฟดดิ้งของช่องสัญญาณของเสาส่งที่ 1 มีค่าน้อย หรือสถานะเลว ในขณะที่เฟดดิ้งของช่องสัญญาณของเสาส่งที่ 2 มีค่าน้อย หรือสถานะเลวเช่นเดียวกัน
- เฟดดิ้งของช่องสัญญาณของเสาส่งที่ 1 มีค่าน้อย หรือสถานะเลวในขณะที่เฟดดิ้งของช่องสัญญาณของเสาส่งที่ 2 มีค่ามาก หรือสถานะดี
- เฟดดิ้งของช่องสัญญาณของเสาส่งที่ 1 มีค่ามาก หรือสถานะดีในขณะที่เฟดดิ้งของช่องสัญญาณของเสาส่งที่ 2 มีค่าน้อย หรือสถานะเลว
- เฟดดิ้งของช่องสัญญาณของเสาส่งที่ 1 มีค่ามาก หรือสถานะดีในขณะที่เฟดดิ้งของช่องสัญญาณของเสาส่งที่ 2 มีค่ามาก หรือสถานะดีเช่นเดียวกัน

จากเหตุการณ์ความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นทั้ง 4 กรณีนี้ เราสามารถแทนค่าที่จะนำมาใช้ในการปรับกำลังของสัญญาณที่จะส่งออกไปได้สามค่าด้วยกัน คือ หากเกิดกรณีที่ 1 ให้แทนค่าด้วย A และหากเกิดกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 ให้แทนค่าด้วย B และสุดท้ายหากเกิดกรณีที่ 4 ให้แทนค่าด้วย C ดังแสดงในตารางที่ 4.1

จำนวนบิตที่ใช้ในการป้อนกลับสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสา
ส่งแยกออกจากกันเท่ากับ 1.5 บิต

ตารางที่ 4.1 ค่าการปรับกำลังส่งที่ใช้แทนในแต่ละกรณีของความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้น
เมื่อพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่งแยกออกจากกัน

สถานะของ $ h_1 $	สถานะของ $ h_2 $	ค่าปรับกำลังส่งของสัญญาณส่ง
1 (เลว)	1 (เลว)	A
1 (เลว)	2 (ดี)	B
2 (ดี)	1 (เลว)	B
2 (ดี)	2 (ดี)	C

4.1.2 การจำลองระบบและวิเคราะห์ผลสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลา โดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกัน

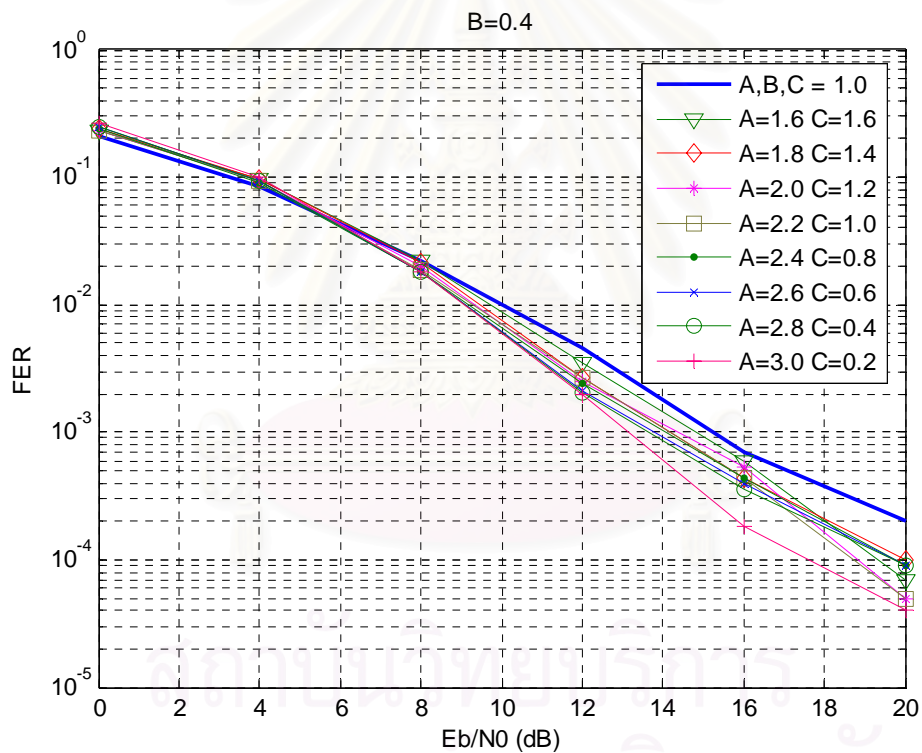
ทำการจำลองโดยเปลี่ยนแปลงค่า A B และ C ไปเรื่อยๆ เพื่อหาค่าที่ทำให้ค่าสมรรถนะที่
ได้มีค่าสูงที่สุด โดยอาศัยสมมติฐานดังนี้

1. หากค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณมีค่าน้อย ให้เพิ่มกำลังส่งให้มีค่ามากขึ้นเพื่อลดผลกระทบ
จากการลดทอนของสัญญาณอื่นเนื่องมาจากเฟดดิ้งของช่องสัญญาณ
2. หากค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณมีค่ามาก ให้ลดกำลังส่งลง เนื่องจากเมื่อค่าเฟดดิ้งของ
ช่องสัญญาณมีค่ามาก นั่นคือการลดทอนของสัญญาณอื่นเนื่องมาจากเฟดดิ้งก็มีค่า
น้อยลงไปด้วยเช่นกัน ดังนั้นไม่จำเป็นต้องอาศัยกำลังส่งที่สูงมากก็เพียงพอที่จะทำให้
ภาครับสามารถรับสัญญาณได้อย่างถูกต้องไม่ผิดเพี้ยน
3. ไม่ว่าจะปรับกำลังส่งด้วยค่า A B และ C เป็นเท่าไรก็ตาม ค่ากำลังส่งเฉลี่ยของระบบมีค่า
เท่าเดิมเสมอ

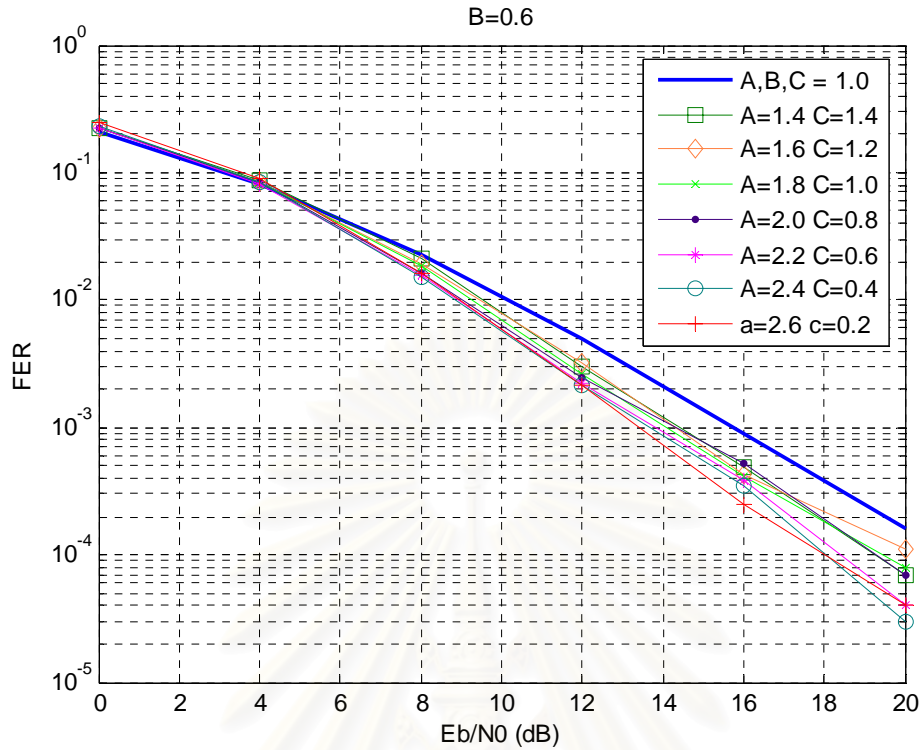
เพื่อตัดปัญหาความซับซ้อนที่จะเกิดขึ้นในการจำลองระบบ จึงได้ทำการจำลองโดย
กำหนดค่า B คงที่ที่ค่าต่างๆ โดยเริ่มจาก 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 และ 1.4 แล้วทำการปรับเปลี่ยนค่า
A และ C ที่เหลือแทน เนื่องจากค่า B มีความน่าจะเป็นหรือโอกาสที่จะเกิดเท่ากับ 1 ใน 2 ซึ่งมี

มากกว่าค่า A และ C ที่ต่างก็มีความน่าจะเป็นหรือโอกาสที่จะเกิดเท่ากับ 1 ใน 4 ดังนั้นจึงเลือกที่จะให้ค่าความสำคัญแก่ค่า B มากกว่าค่า A และค่า C

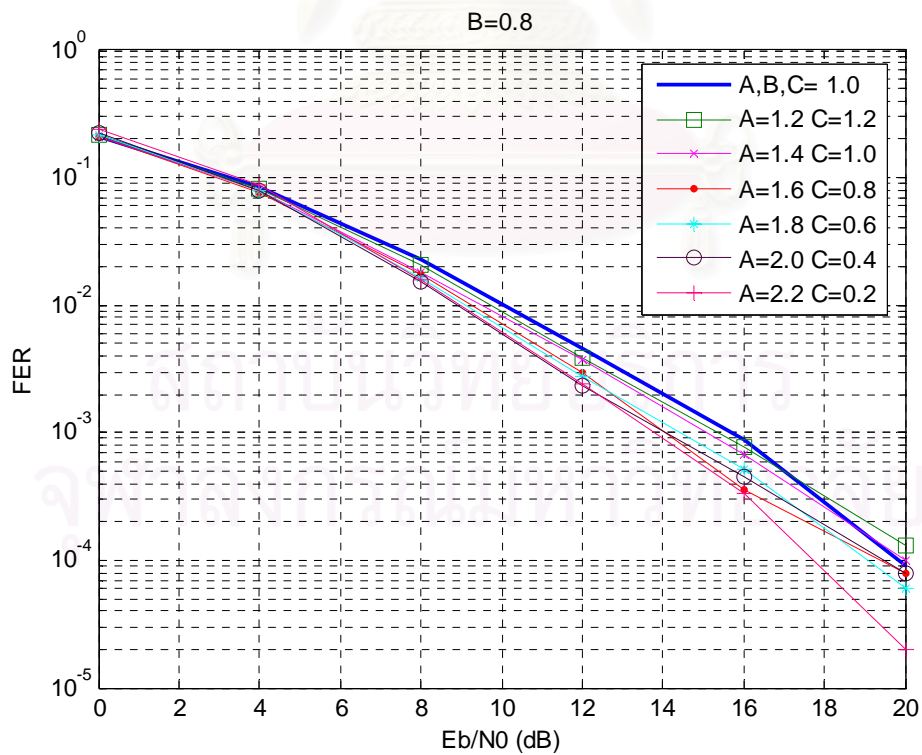
ผลการจำลองที่ได้จากการทดลองปรับเปลี่ยนค่า A B และ C ในกรณีต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 รูปที่ 4.3 รูปที่ 4.4 รูปที่ 4.5 รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ซึ่งในผลการจำลองในบทที่ 4 นี้เราจะเปลี่ยนมาพิจารณาค่าอัตราผิดพลาดเฟรม (Frame Error Rate : FER) เปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน แทนค่าอัตราผิดพลาดบิต เพราะรหัสสปีร์ภูมิ-เวลา Alamouti เป็นรหัสสปีร์ออกชนิดหนึ่ง ในการส่งสัญญาณแต่ละครั้งจะส่งทีละบิต ไม่เหมือนกับการมอดูเลตแบบ BPSK ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 เพราะการมอดูเลตแบบ BPSK จะส่งสัญญาณทีละบิต ดังนั้นในการพิจารณาจึงต้องพิจารณาค่าอัตราผิดพลาดบิต



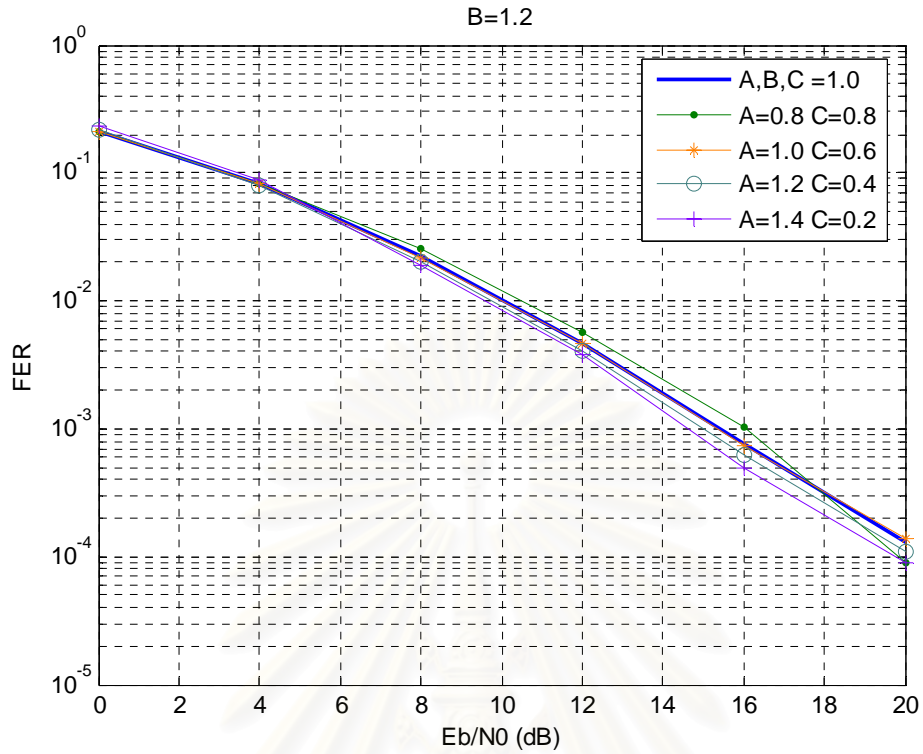
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองโดยกำหนดค่า B = 0.4 และเปลี่ยนแปลงค่า A และ C



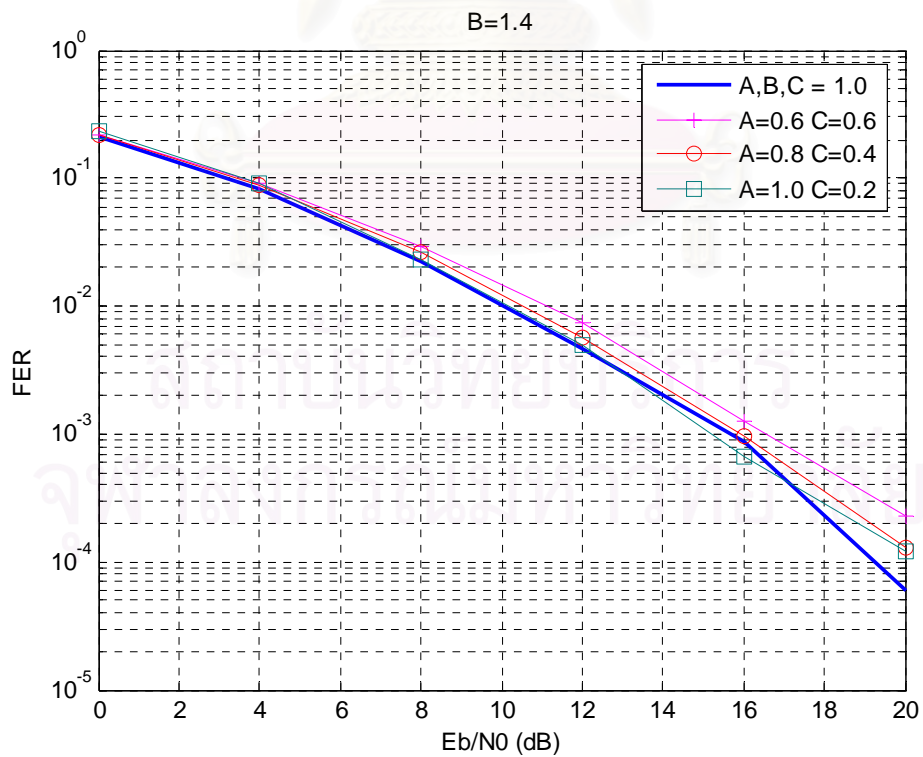
รูปที่ 4.3 ผลการจำลองโดยกำหนดค่า $B = 0.6$ และเปลี่ยนแปลงค่า A และ C



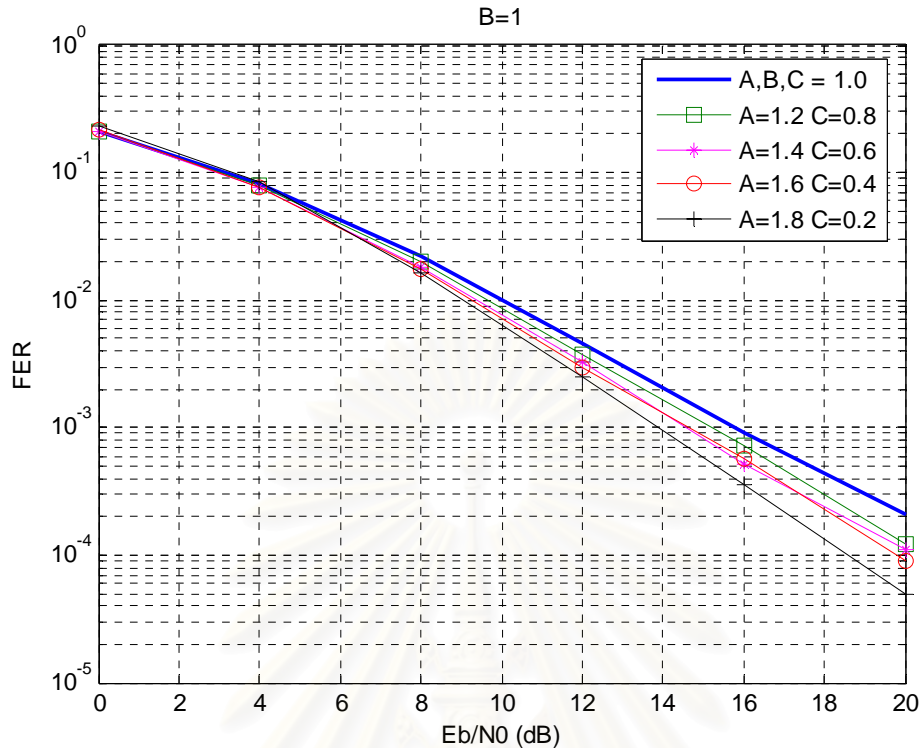
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองโดยกำหนดค่า $B = 0.8$ และเปลี่ยนแปลงค่า A และ C



รูปที่ 4.5 ผลการจำลองโดยกำหนดค่า $B = 1.2$ และเปลี่ยนแปลงค่า A และ C



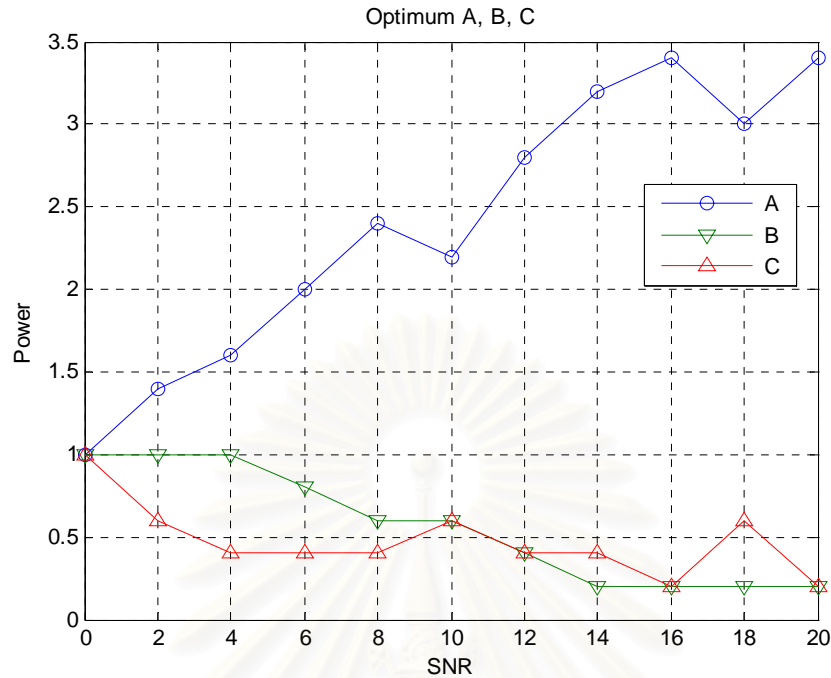
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองโดยกำหนดค่า $B = 1.4$ และเปลี่ยนแปลงค่า A และ C



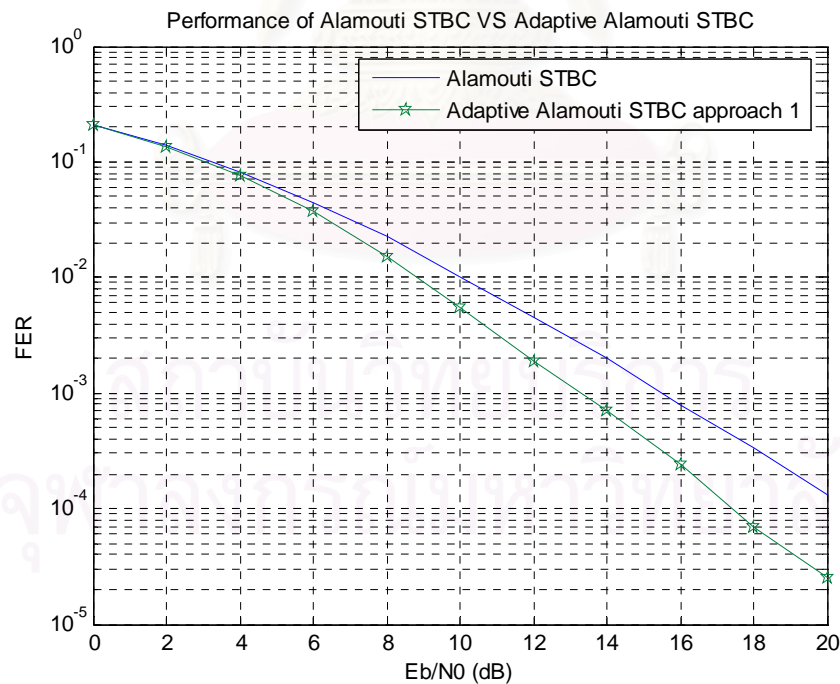
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองโดยกำหนดค่า $B = 1.0$ และเปลี่ยนแปลงค่า A และ C

จากผลการจำลองที่ได้ สามารถหาค่า A B และ C ที่ทำให้การปรับกำลังส่งที่ใช้ ได้ค่าสมรรถนะสูงสุดออกมา โดยพิจารณาจากค่า A B และ C ที่ทำให้ได้ค่าอัตราผิดพลาดเฟรมต่ำที่สุดในแต่ละค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ซึ่งค่า A B และ C ที่ได้นั้นนำมาเขียนกราฟแสดงได้ดังรูปที่ 4.8

รูปที่ 4.9 เป็นการนำค่าสมรรถนะสูงสุดของรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ที่อาศัยเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยใช้วิธีพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่งแยกออกจากกัน โดยอาศัยค่า A B และ C ตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 มาแสดงเปรียบเทียบกับสมรรถนะของรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti กรณีที่ไม่ได้ทำการปรับกำลังส่ง



รูปที่ 4.8 ค่า A, B และ C ที่ทำให้ค่าสมรรถนะที่ได้มีค่าสูงสุด
ในกรณีที่พิจารณาค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่งแยกออกจากกัน



รูปที่ 4.9 สมรรถนะของรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti เมื่ออาศัยเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดย
พิจารณาส่งแยกออกจากกัน และสมรรถนะของรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti แบบดั้งเดิม

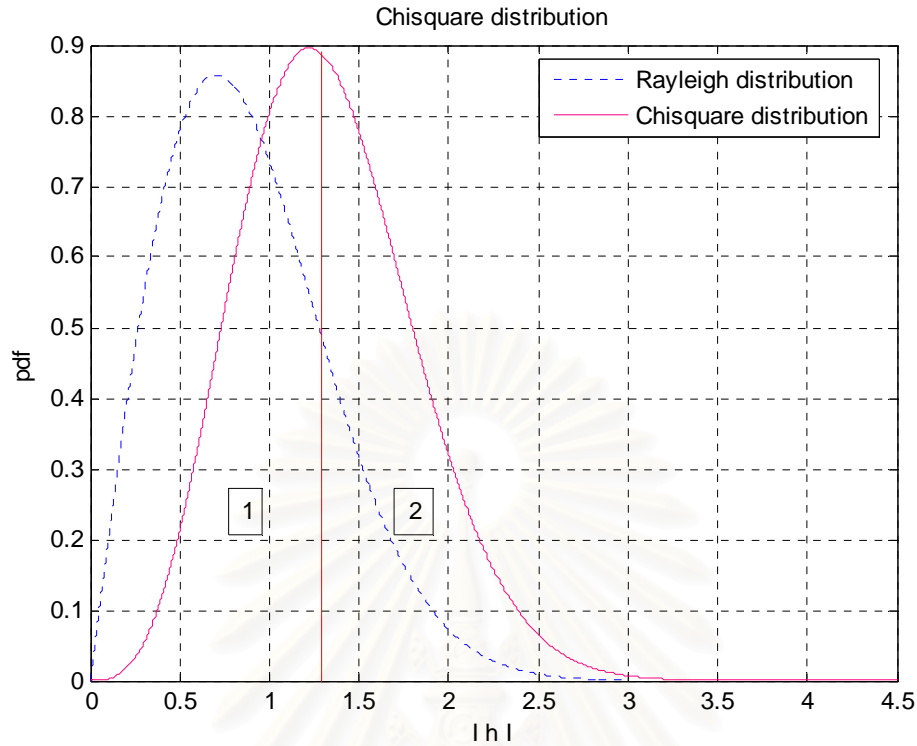
จากผลการจำลองพบว่ารหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ที่อาศัยเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกันจะให้สมรรถนะของระบบที่ดีกว่ารหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ที่ไม่ได้ใช้เทคนิคการปรับกำลังส่ง ถึงแม้ว่าในช่วงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนน้อย (0 - 4 dB) ค่าสมรรถนะของรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ทั้งสองระบบ นั้นคือระหว่างกรณีที่อาศัยเทคนิคการปรับกำลังส่งมาประยุกต์ใช้งานร่วมกัน และกรณีที่เป็นระบบดั้งเดิม กล่าวคือไม่มีการปรับกำลังส่งเลย จะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้น (มากกว่า 4 dB) ค่าสมรรถนะของระบบในกรณีที่มีการปรับกำลังส่ง จะเริ่มมีค่าดีกว่าระบบดั้งเดิม และยิ่งค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากขึ้นความแตกต่างของสมรรถนะระหว่างสองระบบจะยิ่งชัดเจนมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ที่อัตราผิดพลาดเฟรมที่ 10^{-2} สมรรถนะของระบบที่อาศัยเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกันดีกว่าสมรรถนะของระบบดั้งเดิมอยู่ประมาณ 1 dB และที่อัตราผิดพลาดเฟรมที่ 10^{-4} สมรรถนะของระบบที่อาศัยเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกันดีกว่าสมรรถนะของระบบดั้งเดิมอยู่ประมาณ 2.5 dB

4.1.3 เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกัน

สำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันนี้ ในการพิจารณาแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณนั้น เริ่มจากให้นำเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่งมารวมกัน แล้วจึงนำเฟดดิ้งของช่องสัญญาณที่รวมกันแล้ว ไปทำการแบ่งระดับเพื่อนำมาใช้พิจารณาการปรับค่ากำลังส่งของสัญญาณต่อไป

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เน้นพิจารณากับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti แบบพื้นฐานที่มีการใช้เสาส่งจำนวน 2 ต้น เสารับ 1 ต้น ดังนั้นเฟดดิ้งของช่องสัญญาณที่ต้องพิจารณาสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันจึงมีสองค่า คือ h_1 และ h_2 การรวมกันของเฟดดิ้งที่มีการกระจายแบบเรย์ลีสองตัวนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธียกกำลังสองมาใช้รวมค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณทั้งสองค่าเข้าด้วยกัน ผลลัพธ์ที่ออกมาจะมีค่าเป็นเฟดดิ้งที่มีการกระจายแบบไคสแควร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.10

$$h_{\text{rayleigh}} + h_{\text{rayleigh}} \Rightarrow h_{\text{chisquare}}$$



รูปที่ 4.10 เฟดดิ้งที่มีการกระจายแบบไคสแควร์

ระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณที่ทำการแบ่งมีทั้งหมดสองระดับ ดังนั้นความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ต่างๆ มีดังนี้

- ผลรวมของเฟดดิ้งทั้งสองเสาส่งมีค่ามาก หรือสถานะเลว ให้ปรับค่ากำลังส่งของสัญญาณด้วยค่า A
- ผลรวมของเฟดดิ้งทั้งสองเสาส่งมีค่าน้อย หรือสถานะดี ให้ปรับค่ากำลังส่งของสัญญาณด้วยค่า B

ดังแสดงในตารางที่ 4.2

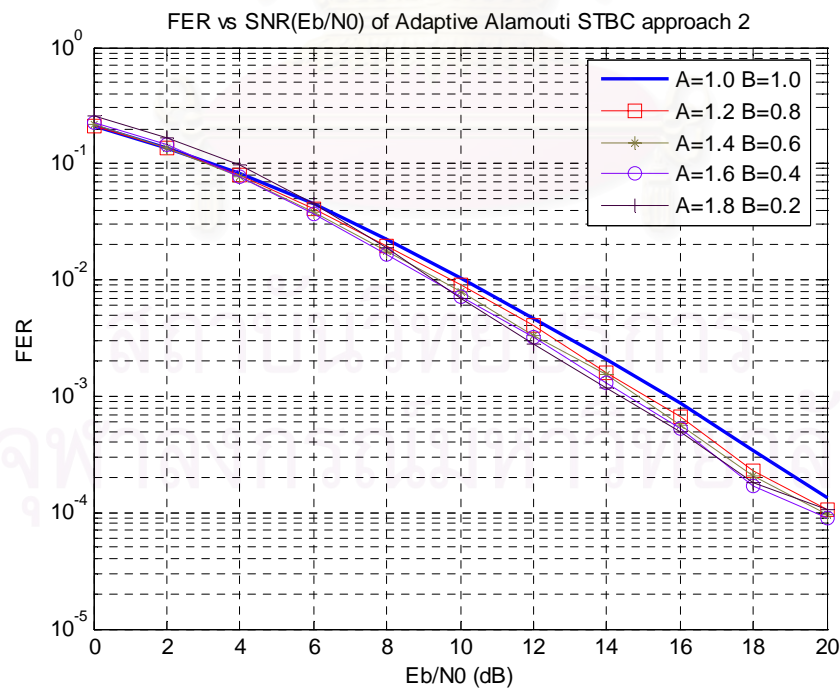
จำนวนบิตป้อนกลับที่ใช้สำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันเท่ากับ 1 บิต

ตารางที่ 4.2 ค่าการปรับกำลังส่งที่ใช้แทนในแต่ละกรณีของความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้น
เมื่อพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณทั้งสองเสาส่งร่วมกัน

สถานะของโคสแควร์ ($ h_{chi} $)	ค่าปรับกำลังส่งของสัญญาณส่ง
1 (เลว)	A
2 (ดี)	B

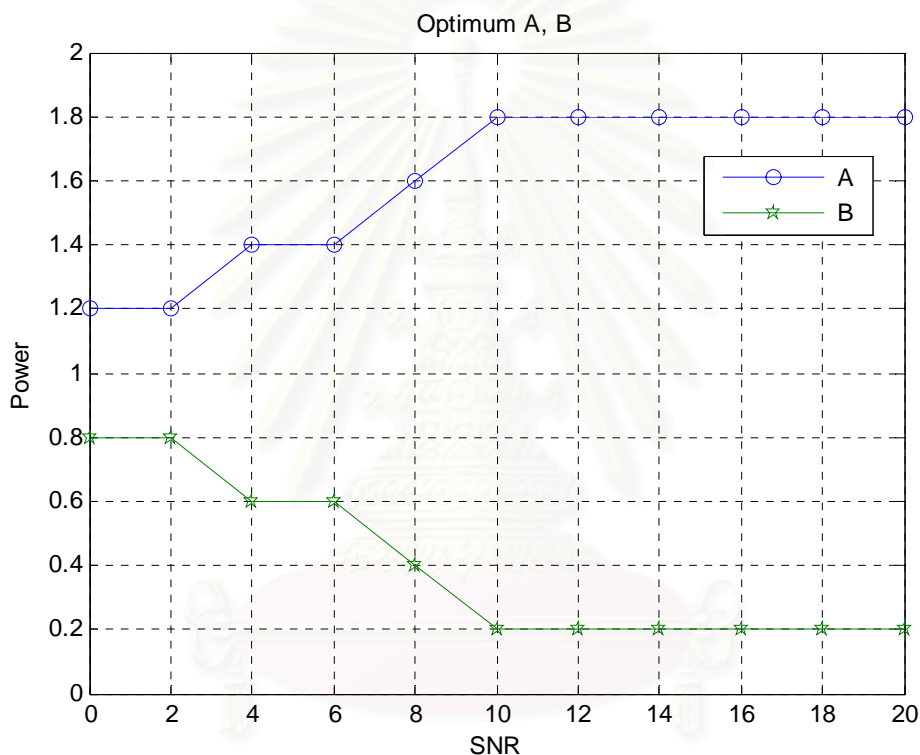
4.1.4 การจำลองระบบและวิเคราะห์ผลสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลา โดยพิจารณาเสาส่งร่วมกัน

ทำการจำลองโดยทดลองปรับค่า A และ B และเปลี่ยนแปลงค่าไปเรื่อยๆ เพื่อหาค่าที่ทำให้ค่าสมรรถนะที่ได้มีค่าสูงที่สุด โดยอาศัยสมมุติฐานที่กล่าวไว้ข้างต้น คือ หากค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณมีค่ามาก ให้เพิ่มกำลังส่งให้มีความมากขึ้นเพื่อลดผลกระทบจากการลดทอนของสัญญาณอันเนื่องมาจากเฟดดิ้งของช่องสัญญาณ และในทางกลับกันหากค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณมีค่าน้อย ให้ลดกำลังส่งลง ผลการจำลองของรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ที่ใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 สมรรถนะของรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti เมื่ออาศัยเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลา
โดยพิจารณาเสาส่งร่วมกัน เมื่อปรับค่า A และ B ต่างๆ กัน

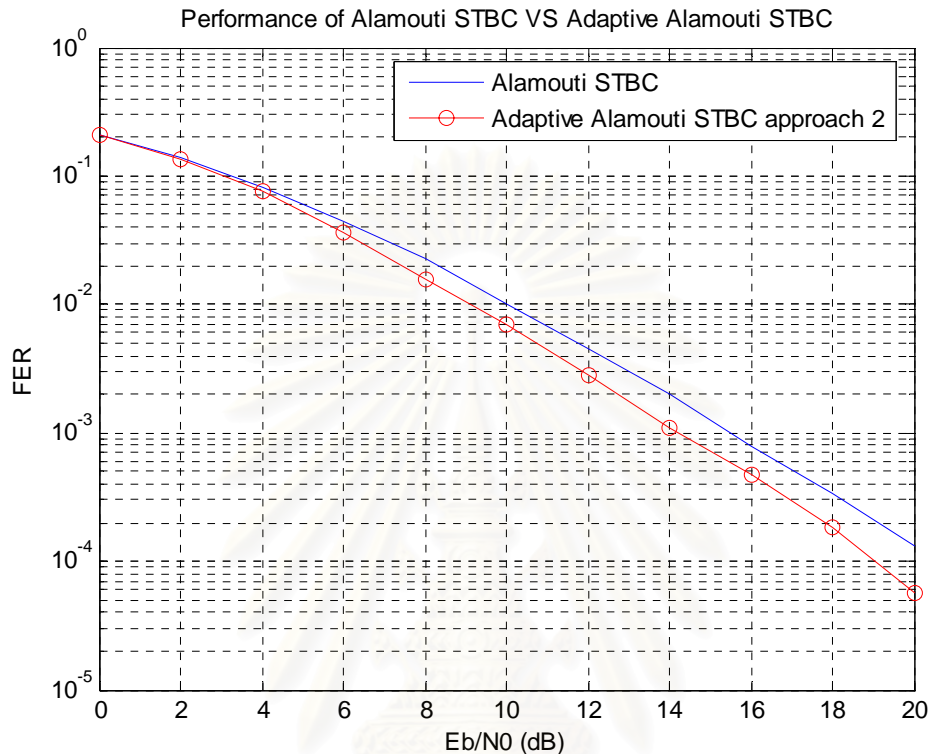
จากผลการจำลองที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.11 สามารถนำมาพิจารณาหาค่า A และ B ที่ส่งผลให้ได้ค่าอัตราผิดพลาดเฟรมต่ำสุดที่แต่ละค่าของค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เพื่อให้ได้ค่า A และ B ที่ทำให้เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันมีค่าสมรรถนะสูงสุด และค่า A และ B ที่หาได้ในแต่ละค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนนั้นสามารถนำมาแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ค่า A และ B ที่ทำให้ค่าสมรรถนะที่ได้มีค่าสูงสุด
ในกรณีที่พิจารณาค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่งร่วมกัน

ค่าสมรรถนะสูงสุดของรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ที่ได้จากเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกัน สามารถหาได้โดยอาศัยค่า A และ B ที่ได้จากรูปที่ 4.12 ไปทำการจำลองอีกครั้งโดยแทนค่า A และ B ตามค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในแต่ละจุด ซึ่งผลที่ได้จะเป็นกราฟที่แสดงสมรรถนะสูงสุดของเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันมาประยุกต์ใช้ร่วมกับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti นำกราฟสมรรถนะสูงสุดที่ได้ไป

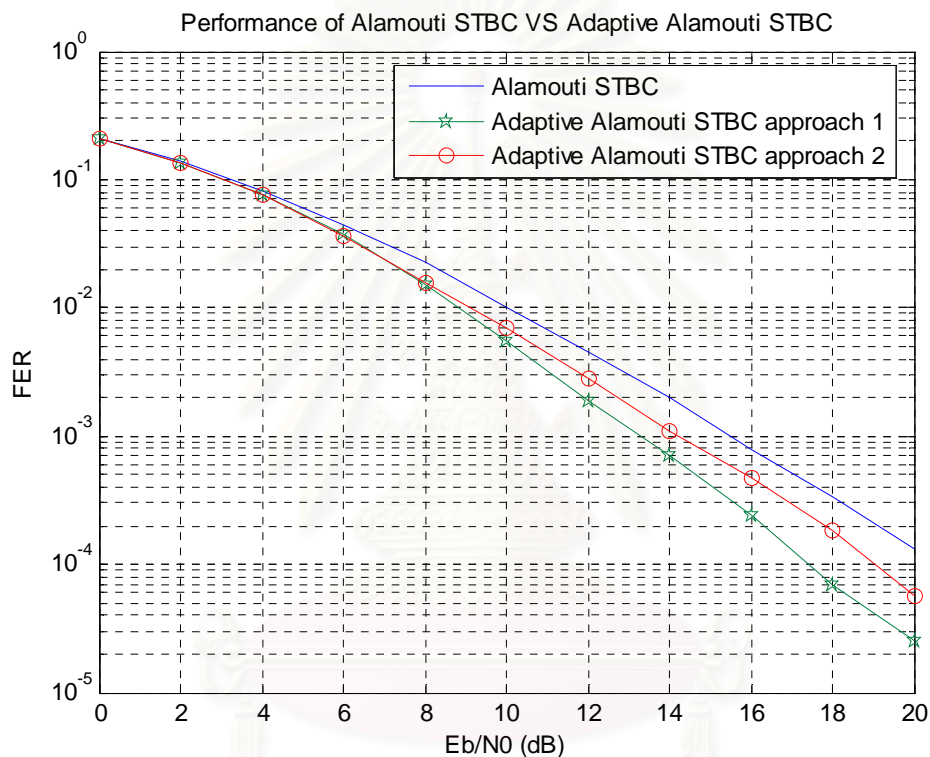
เขียนเปรียบเทียบกับสมรรถนะของรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti แบบดั้งเดิมนั้นคือกรณีที่ไม่มี การปรับกำลังส่งของสัญญาณได้ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 สมรรถนะของรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti เมื่ออาศัยเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลา โดยพิจารณาเสาส่งร่วมกัน และสมรรถนะของรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti แบบดั้งเดิม

จากผลการจำลองพบว่ารหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ที่อาศัยเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันก็ยังคงให้สมรรถนะของระบบที่ดีกว่ารหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti แบบดั้งเดิม เช่นเดียวกับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกัน และในช่วงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนน้อย (0 - 4 dB) ค่าสมรรถนะของรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ทั้งสองระบบนั้นคือระหว่างกรณีที่อาศัยเทคนิคการปรับกำลังส่งมาประยุกต์ใช้งานร่วมกัน และกรณีที่เป็นระบบดั้งเดิมมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้น (มากกว่า 4 dB) ระบบที่นำเทคนิคการปรับกำลังส่งมาใช้งานจะค่อยๆ มีสมรรถนะที่ดีกว่าระบบดั้งเดิมมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ที่อัตราผิดพลาดเฟรมที่ 10^{-2} สมรรถนะของระบบที่อาศัยเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกันดีกว่าสมรรถนะของระบบดั้งเดิมอยู่ประมาณ 1 dB

จากค่าสมรรถนะสูงสุดของรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ที่อาศัยเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลามาประยุกต์ใช้งานร่วมกันของทั้งสองวิธี คือ เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกัน และเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกัน นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของทั้งสองวิธีกับสมรรถนะของรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti แบบดั้งเดิม โดยพิจารณาจากค่าอัตราผิดพลาดเฟรมต่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 สมรรถนะระหว่างวิธีพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่งแบบแยกจากกัน และวิธีพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่งแบบร่วมกัน

จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการปรับกำลังส่งโดยพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่งแบบแยกออกจากกันนั้นให้ค่าสมรรถนะที่ดีกว่ากรณีที่ใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งโดยพิจารณาเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในแต่ละเสาส่งแบบร่วมกัน ถึงแม้ว่าในช่วงที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าตั้งแต่ 0 – 8 dB ค่าสมรรถนะของเทคนิคการปรับกำลังส่งทั้งสองจะวิธีมีสมรรถนะไม่แตกต่างกันมากนัก (แต่อย่างไรก็ดีที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนตั้งแต่ 4 dB ขึ้นไป สมรรถนะของเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาทั้งสองวิธีนี้ก็เริ่มมีสมรรถนะที่ดีกว่ารหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti แบบดั้งเดิมแล้ว) แต่หากยิ่งเพิ่มค่า

อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้มากขึ้นกว่า 8 dB ความแตกต่างระหว่างสมรรถนะของเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาทั้งสองวิธีนี้ก็จะมีความแตกต่างกันมากขึ้นตามไปด้วย ถึงแม้ว่าเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันจะให้ค่าสมรรถนะของระบบที่ดีกว่าระบบดั้งเดิมก็ตาม แต่ก็ยังไม่ดีเท่ากับกรณีที่ใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกัน

เมื่อพิจารณาภาพรวมจะเห็นว่าเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกันจะให้สมรรถนะของระบบที่ดีกว่าเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกัน แต่อย่างไรก็ตามต้องไม่ลืมว่าในการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกันจะมีความซับซ้อนมากกว่าเทคนิคการปรับกำลังส่งโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกัน และจำนวนบิตที่ต้องใช้ในการบอกลับก็มีจำนวนมากกว่า ดังนั้นในการจะเลือกใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาวิธีใดวิธีหนึ่งมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบของตนเอง ควรจะพิจารณาข้อจำกัดต่างๆ ให้เหมาะสมกับระบบที่มีอยู่

4.2 เทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง: วิธีที่ 2

4.2.1 หลักการและสมมติฐานของเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง

เนื่องจากรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti เป็นรหัสที่อาศัยเสาส่งมากกว่าหนึ่งต้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะทำการปรับกำลังส่งระหว่างเสา โดยวิธีการปรับกำลังส่งระหว่างเสาจะพิจารณาจากค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณของแต่ละเสาส่งที่ค่าไทม์สล็อต (time-slot) เดียวกัน นั่นคือ ทำการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณซึ่งพิจารณาโดยนำค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณของแต่ละเสาส่งที่แต่ละไทม์สล็อตมาเปรียบเทียบกัน หากค่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณของเสาส่งใดมีค่ามากกว่า ให้ทำการเพิ่มกำลังส่งให้แก่เสาส่งนั้น และลดกำลังส่งที่อีกเสาส่งหนึ่งลง

พิจารณากรณีที่ใช้เสาส่งสองต้น สำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti พื้นฐาน ดังนั้นในการแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาสามารถทำได้โดยการ เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณของทั้งสองเสาส่งซึ่งก็คือ h_1 และ h_2 และจากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณนั้น ทำให้การแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณสามารถแบ่งได้เป็นสองระดับ ดังนั้นความน่าจะเป็นในการที่จะเกิดเหตุการณ์ต่างๆ และการตั้งสมมติฐานสำหรับการปรับกำลังส่งของสัญญาณ เป็นไปดังนี้

- สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณของเสาส่งต้นที่ 1 มีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณของเสาส่งต้นที่ 2 ให้ปรับเพิ่มกำลังส่งของเสาส่งต้นที่ 1 ให้มากขึ้น และขณะเดียวกันก็ลดค่ากำลังส่งที่เสาส่งต้นที่ 2 ให้น้อยลง
- สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณของเสาส่งต้นที่ 1 มีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณของเสาส่งต้นที่ 2 ให้ปรับลดกำลังส่งของเสาส่งต้นที่ 1 ให้น้อยลง และขณะเดียวกันก็เพิ่มค่ากำลังส่งที่เสาส่งต้นที่ 2 ให้มากขึ้น

ดังแสดงในตารางที่ 4.3

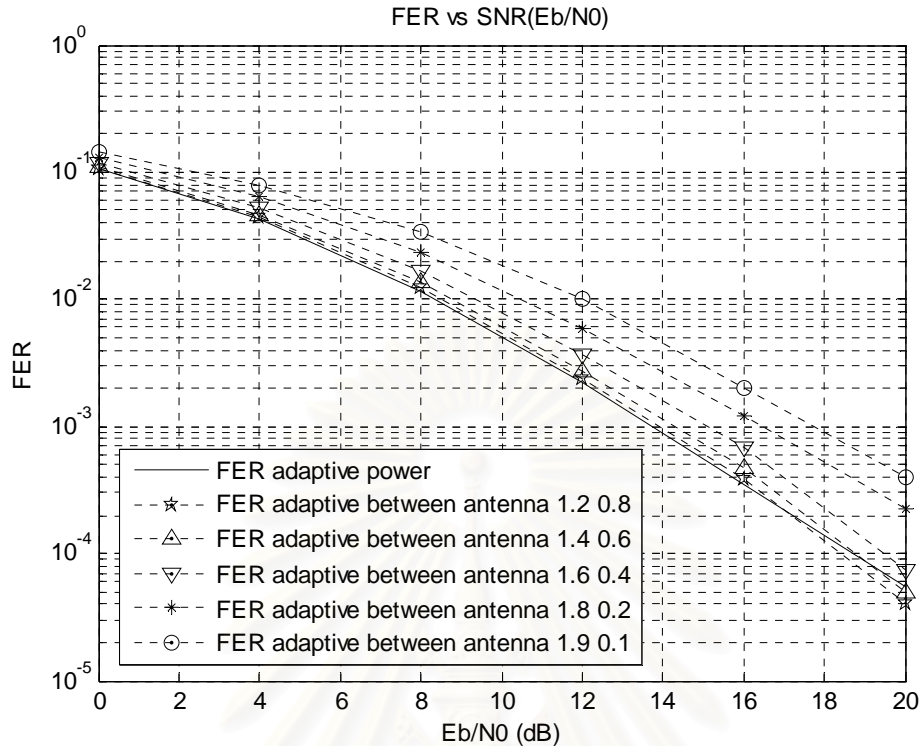
จำนวนบิตย้อนกลับที่ใช้สำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง เท่ากับ 1 บิต

ตารางที่ 4.3 ค่าการปรับกำลังส่งที่ใช้แทนในแต่ละกรณีของความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง

การเปรียบเทียบระหว่าง $ h_1 $ และ $ h_2 $	ค่าปรับกำลังส่งของสัญญาณส่งที่เสาส่งต้นที่ 1	ค่าปรับกำลังส่งของสัญญาณส่งที่เสาส่งต้นที่ 2
$ h_1 > h_2 $	A	B
$ h_1 < h_2 $	B	A

4.2.2 การจำลองระบบและวิเคราะห์ผลสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง

ทำการจำลองโดยทดลองปรับค่า A และ B และเปลี่ยนแปลงค่าไปเรื่อยๆ เพื่อหาค่าที่ทำให้ค่าสมรรถนะที่ได้มีค่าสูงที่สุด โดยอาศัยสมมุติฐานที่กล่าวไว้ข้างต้น คือ ปรับเพิ่มกำลังส่งของเสาส่งต้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณมากกว่าและลดกำลังส่งของเสาส่งต้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณน้อยกว่าไปพร้อมกัน ผลการจำลองของรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ที่ใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 สมรรถนะของระบบเมื่อใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง

พิจารณาสมรรถนะของเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่งสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti จากรูปที่ 4.15 ปรากฏว่าเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่งไม่ได้ช่วยเพิ่มสมรรถนะของระบบแต่อย่างใดในทุกช่วงของค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ไม่ว่าจะปรับเปลี่ยนค่า A และ B เป็นเท่าไรก็ตาม และนอกจากนี้ยังพบว่าหากปรับค่า A และ B ให้สูงขึ้น สมรรถนะของระบบที่ได้กลับมีค่าลู่ออก ทั้งที่ในกรณีของเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลานั้น หากปรับค่า A และ B ให้สูงขึ้น สมรรถนะของระบบจะมีค่าลู่เข้า ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากในการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ ทำการพิจารณาแค่ค่าสัมประสิทธิ์ของเสาส่งต้นใดมีค่ามากกว่ากัน จึงทำการปรับเพิ่มกำลังส่งของเสาส่งต้นนั้น โดยที่ไม่ทราบว่าคุณสมบัติของเสาส่งนั้นดีหรือสถานะเลวแต่อย่างใด ดังนั้นจึงมีการเสนอให้อาศัย Fuzzy Logic มาประยุกต์ใช้งาน โดยที่ยังคงให้ค่าบิตป้อนกลับที่ใช้เพียงแค่บิตเดียว

4.2.3 การปรับกำลังส่งระหว่างเสาโดยอาศัย Fuzzy Logic และการจำลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอให้มีการนำ Fuzzy Logic มาประยุกต์ใช้งานสำหรับการตัดสินใจค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ เพื่อแก้ปัญหาการไม่รู้ค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ สำหรับกรณีที่ใช้เทคนิคการปรับกำลังส่ง โดยที่บิตป้อนกลับที่ใช้ยังคงมีค่าเท่ากับ 1 บิตเท่านั้น ในการจำลองระบบโดยอาศัย Fuzzy Logic สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก

ใช้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

Linguistic Variable และ Linguistic Value

Term Set ที่เลือกใช้ในการจำลองระบบกำหนดให้มีค่าดังนี้คือ สูง ปานกลาง และต่ำ สำหรับการกำหนดค่า Term Set ขึ้นอยู่กับว่าต้องการรายละเอียดมากเพียงใด หากต้องการรายละเอียดมากขึ้นก็สามารถกำหนดค่า Term Set ให้มากกว่านี้ได้

Fuzzy Inference Engine

ใช้วิธีการของ Mamdani Inference System หรืออาจเรียกว่าวิธี Max-Min Inference System

การกำหนดกฎในฐานกฎ

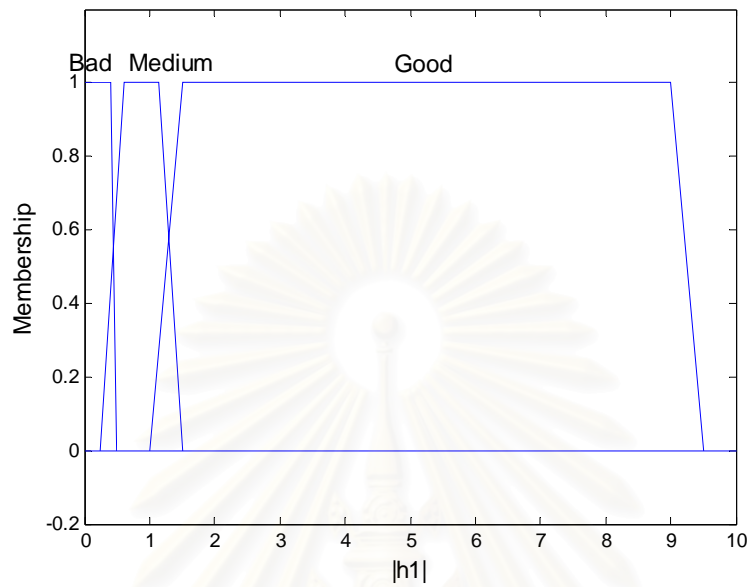
การกำหนดกฎอยู่บนพื้นฐานความรู้ประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติการ

Defuzzification

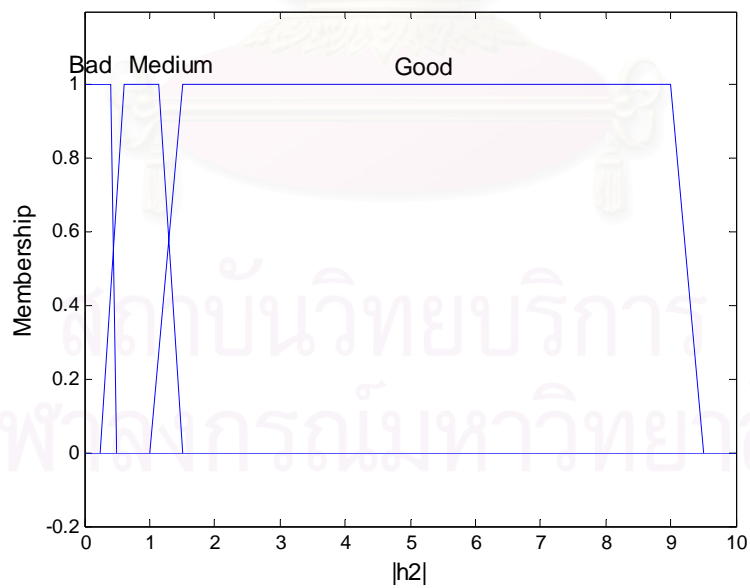
สำหรับการ Defuzzification เลือกใช้วิธีจุดศูนย์กลางของพื้นที่ (Centroid Area)

ในการจำลองทำการปรับเปลี่ยนค่าที่ใช้สำหรับปรับกำลังส่งของสัญญาณโดยอาศัยตัวควบคุมแบบฟัซซี ซึ่งค่าอินพุตที่ป้อนให้แก่ตัวควบคุมฟัซซีมี 2 ค่า คือค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณที่เกิดจากเสาส่งต้นที่ 1 และค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณที่เกิดจากเสาส่งต้นที่ 2 ซึ่งแต่ละค่าถูกแยกพิจารณาออกเป็น 3 กรณีคือค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณมีค่าเลข ค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณมีค่าปานกลาง และค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณมีค่าดี โดยใช้

ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 สำหรับอินพุตค่าที่ 1 และอินพุตค่าที่ 2 ตามลำดับ

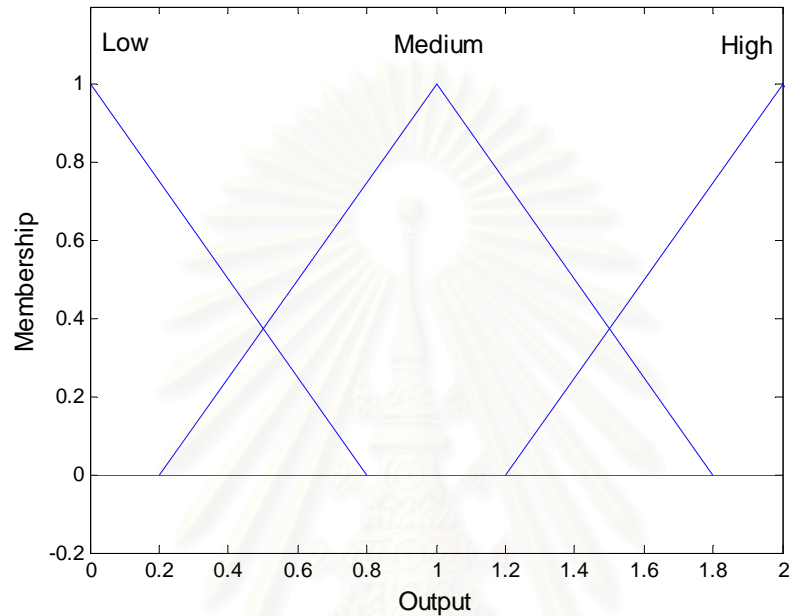


รูปที่ 4.16 Input Membership Function ของสัมประสิทธิ์ของสัญญาณที่เกิดจากเสาส่งต้นที่ 1



รูปที่ 4.17 Input Membership Function ของสัมประสิทธิ์ของสัญญาณที่เกิดจากเสาส่งต้นที่ 2

ในการจำลองนี้ค่าเอาต์พุตที่ได้คือค่าที่ใช้สำหรับปรับกำลังส่งของสัญญาณที่จะถูกส่งออกไป ใช้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยมและแบ่งออกเป็น 3 กรณีเช่นกัน คือปรับกำลังส่งด้วยค่าต่ำ ปรับกำลังส่งด้วยค่าปานกลาง และสุดท้ายปรับกำลังส่งด้วยค่าสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.18



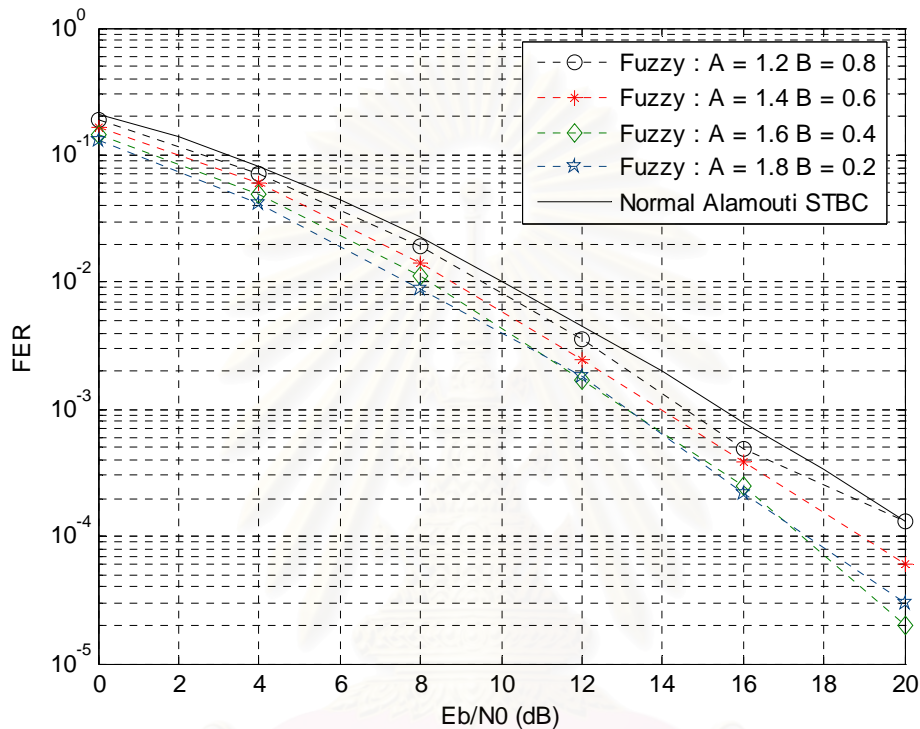
รูปที่ 4.18 Output Membership Function

กฎที่กำหนดในฐานกฎสำหรับการจำลองระบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีค่าเป็นไปตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ฐานกฎที่ใช้ในการจำลอง

สถานะของ $ h_1 $	สถานะของ $ h_2 $	ค่าปรับกำลังส่งของสัญญาณส่ง (A)
เลว	เลว	ปานกลาง
ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
ดี	ดี	ปานกลาง
เลว	ดี	สูง
ดี	เลว	ต่ำ

เอาต์พุตที่ได้จากการใช้ Fuzzy Logic เป็นตัวตัดสินใจคือค่าที่ใช้ปรับกำลังส่งของสัญญาณที่เสาส่งต้นที่ 1 หรือค่า A และสำหรับค่าที่ใช้ปรับกำลังส่งที่เสาส่งต้นที่ 2 สามารถหาได้จากการนำค่าที่ใช้ปรับกำลังส่งที่เสาส่งต้นที่ 1 ไปหักลบออกจากค่าที่ใช้ปรับกำลังส่งทั้งหมด ซึ่งผลการจำลองระบบโดยใช้ Fuzzy Logic ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 สมรรถนะของระบบจาก

การจำลองระบบโดยอาศัย Fuzzy Logic เป็นตัวตัดสินใจกำหนดค่าที่ใช้สำหรับปรับกำลังส่งของสัญญาณที่เสาส่งต้นที่ 1 และ 2 เปรียบได้กับเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่งที่เสนอไว้ในบทที่ 4 แต่สมรรถนะที่ได้จากการจำลองระบบโดยใช้ Fuzzy Logic กลับมีค่าดีกว่าสมรรถนะที่ได้จากเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่งนั้นเราไม่ทราบค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณอย่างละเอียดเหมือนกับการใช้ Fuzzy Logic ทราบแต่เพียงว่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณจากเสาส่งต้นใดมากกว่าหรือน้อยกว่ากัน ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณจากเสาส่งต้นที่ 1 มากกว่านั้น ไม่ได้บอกค่าสัมประสิทธิ์ที่มากกว่านั้นมีสถานะเลวหรือสถานะดี และในทำนองเดียวกันหากค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณจากเสาส่งต้นที่ 1 มีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ

จากเสาส่งต้นที่ 2 ก็ไม่ได้บ่งบอกว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่น้อยกว่านั้นมีสถานะเลวหรือสถานะดีแต่อย่างไร แต่สำหรับการตัดสินใจโดยใช้ Fuzzy Logic นี้สามารถบอกได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่มากกว่าหรือน้อยกว่านั้นมีสถานะดี หรือเลว และนอกจากนี้ในการจำลองโดยใช้ Fuzzy Logic นี้เรายังแบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณออกเป็น 3 ระดับ ซึ่งมากกว่าจำนวนระดับที่ใช้ในเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง อย่างที่กล่าวไว้แล้วว่าหากจำนวนระดับที่ใช้แบ่งระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณมีค่ามากขึ้นสมรรถนะของระบบที่ได้ก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

4.3 เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลา และปรับระหว่างเสาส่งพร้อมกัน: วิธีที่ 3

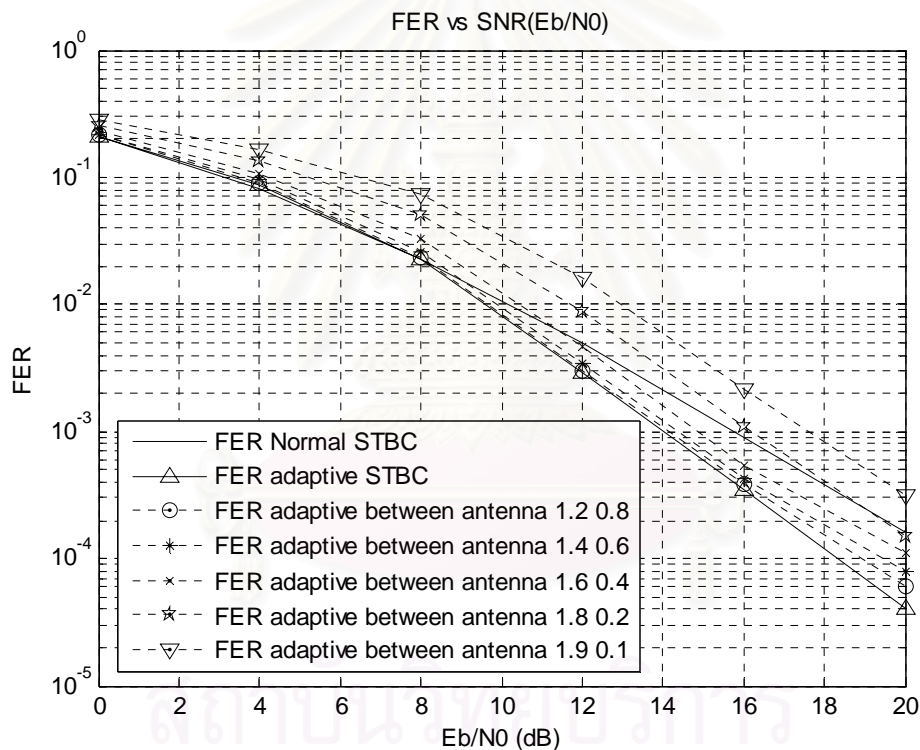
จากเทคนิคการปรับกำลังส่งทั้งสองวิธีที่ได้เสนอ เราพบว่า การปรับกำลังส่งทั้งสองวิธีที่ได้เสนอไปต่างก็ให้สมรรถนะของระบบที่แตกต่างกัน จึงเกิดแนวความคิดที่จะนำเทคนิคการปรับกำลังส่งทั้งสองวิธีมาใช้ร่วมกัน กล่าวคือปรับกำลังส่งทั้งทางเวลา และปรับกำลังส่งระหว่างเสาไปพร้อมๆ กัน ซึ่งจากหัวข้อที่ 4.1 เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลา เราได้เสนอเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาออกเป็นสองแบบด้วยกัน คือเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกัน และเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกัน ดังนั้นในเทคนิคการปรับกำลังส่งวิธีที่ 3 ที่เสนอนี้จึงมีสองหัวข้อย่อยๆ นั่นคือ เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกันและปรับระหว่างเสาส่งพร้อมกัน กับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันและปรับระหว่างเสาส่งพร้อมกัน

4.3.1 หลักการและสมมติฐานของเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกันและปรับระหว่างเสาส่งพร้อมกัน

เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกันและปรับระหว่างเสาส่งพร้อมกัน หลักการทำงานก็จะเหมือนกับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกัน และเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสา โดยจะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณทั้งทางเวลาและระหว่างเสาไปพร้อมกัน จากเดิมเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกจากกันใช้จำนวนบิตป้อนกลับ 1.5 บิต และส่วนของเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่งใช้จำนวนบิตป้อนกลับ 1 บิต ดังนั้นเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกจากกันและปรับระหว่างเสาส่งพร้อมกันนั้นจะใช้บิตป้อนกลับทั้งหมด 2.5 บิต

4.3.2 การจำลองระบบและวิเคราะห์ผลสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลา โดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกันและปรับระหว่างเสาส่งพร้อมกัน

ทำการจำลองระบบโดยปรับเปลี่ยนค่ากำลังส่งเพื่อให้ได้ค่าที่ทำให้ได้สมรรถนะของระบบออกมาดีที่สุด ได้ผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบทั้งหมด 3 ระบบด้วยกันคือ ระบบที่ใช้รหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti แบบดั้งเดิมที่ไม่มีการปรับกำลังส่ง ระบบนำเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกจากกันมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti และระบบสุดท้ายคือระบบที่นำเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกจากกันและปรับระหว่างเสาส่งพร้อมกันมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti



รูปที่ 4.20 สมรรถนะของระบบเมื่อใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกัน และปรับระหว่างเสาส่งพร้อมกัน

จากรูปที่ 4.20 ถึงแม้ว่าเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกจากกันและปรับระหว่างเสาส่งพร้อมกัน ในกรณีที่ทำการปรับค่ากำลังส่งบางค่าอาจจะทำให้สมรรถนะของระบบดีกว่าระบบดั้งเดิมอยู่บ้าง แต่โดยรวมแล้วกลับกล่าวได้ว่าการนำเทคนิคการปรับกำลังส่ง

ระหว่างเสาส่งเข้ามาใช้งานร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลา กลับส่งผลให้สมรรถนะของระบบแย่งกว่าการที่เลือกใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกจากกันเพียงเทคนิคเดียว

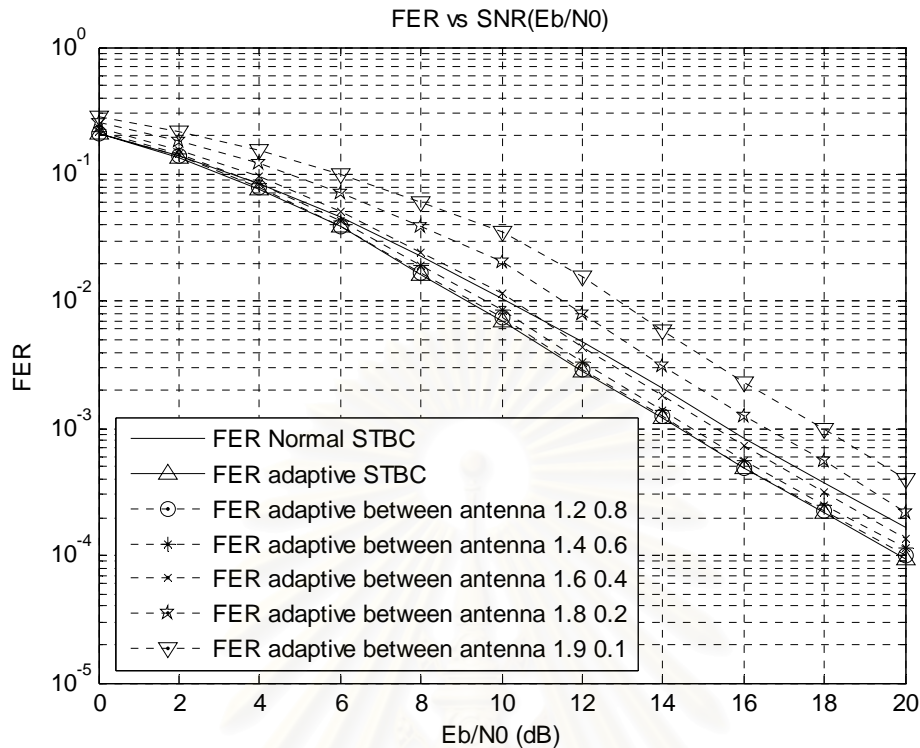
4.3.3 หลักการและสมมติฐานของเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันและปรับระหว่างเสาส่งพร้อมกัน

หลักการทำงานของเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันและปรับระหว่างเสาส่งพร้อมกันก็จะคล้ายกับวิธีก่อนหน้านี้ หากแต่เปลี่ยนไปพิจารณาเสาส่งร่วมกันแทนการพิจารณาเสาส่งแบบแยกออกจากกัน และยังคงพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณทั้งทางเวลาและระหว่างเสาไปพร้อมๆ กัน และจำนวนบิตป้อนกลับที่ต้องใช้สำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันและปรับระหว่างเสาส่งพร้อมกันนั้นเท่ากับ 2 บิต เนื่องจากเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกัน และเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่งต่างก็ใช้จำนวนบิตป้อนกลับ 1 บิต

4.3.4 การจำลองระบบและวิเคราะห์ผลสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันและปรับระหว่างเสาส่งพร้อมกัน

ทำการจำลองระบบโดยปรับเปลี่ยนค่ากำลังส่งเพื่อให้ได้ค่าที่ทำให้ได้สมรรถนะของระบบออกมาดีที่สุด ได้ผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบทั้งหมด 3 ระบบด้วยกันคือ ระบบที่ใช้รหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti แบบดั้งเดิมที่ไม่มีการปรับกำลังส่ง ระบบนำเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti และระบบสุดท้ายคือระบบที่นำเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันและปรับระหว่างเสาส่งพร้อมกันมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.21 สมรรถนะของระบบเมื่อใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกัน และปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่งพร้อมกัน

ซึ่งจากผลการทดลองในรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าการนำเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่งมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกัน สำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti นั้นไม่ได้ช่วยให้สมรรถนะของระบบดีขึ้นแม้แต่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้เฉพาะเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันเพียงอย่างเดียว ไม่ว่าจะค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจะมีค่าเป็นเท่าไรก็ตาม

จากผลการจำลองทั้งหมดที่ได้อธิบายไว้จึงสามารถสรุปได้ว่าการเทคนิคปรับกำลังส่งทางเวลาเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องอาศัยการเพิ่มขนาดแบนด์วิดท์หรือจำนวนเสาอากาศแต่อย่างใด หากแต่ต้องมีการป้อนกลับข้อมูลของสัญญาณโดยใช้ไม่เกิน 1-2 บิตต่อการส่งข้อมูลหนึ่งสัญลักษณ์

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ ได้ศึกษาเทคนิคโคเวอริจิตีเชิงปริภูมิ-เวลาในระดับพื้นฐาน โดยในการอธิบายจะยกตัวอย่างการทำงานของรหัสที่มีชื่อเรียกว่า รหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ซึ่งเป็นรหัสที่ได้รับการออกแบบโดยใช้หลักการของโคเวอริจิตีเชิงปริภูมิ-เวลา มีรูปแบบเรียบง่าย ให้สมรรถนะที่ดีขึ้นกว่าระบบที่ใช้สายอากาศส่งเพียงต้นเดียวภายใต้ช่องสัญญาณที่มีปัญหาเฟดดิ้ง ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้กับระบบสื่อสารที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้นตายตัว ในขณะที่ทางภาครับสามารถจะติดตั้งสายอากาศรับจำนวนเท่าใดก็ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งยังมีสายอากาศรับมากขึ้นจะทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น รหัสดังกล่าวนี้มีคุณลักษณะเฉพาะตัวที่น่าสนใจคือ การถอดรหัสเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด สามารถกระทำได้โดยอาศัยกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน จากนั้นได้เสนอเทคนิคการปรับกำลังส่งเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของการส่งสัญญาณดิจิทัลผ่านช่องสัญญาณสื่อสารไร้สายที่มีปัญหาเฟดดิ้งแบบเรย์ลี โดยใช้การมอดูเลตแบบ BPSK และรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti โดยเทคนิคที่เสนอนี้อาศัยเครื่องรับปลายทางทำหน้าที่คำนวณค่าระดับกำลังส่งที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณและทำการป้อนกลับค่าดังกล่าวให้กับภาคส่ง ในกรณีการมอดูเลตแบบ BPSK สามารถหาผลเฉลยของค่าการปรับกำลังส่งที่เหมาะสมที่สุดได้โดยอาศัยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ แต่สำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti มีความซับซ้อนกว่ามาก ยังไม่สามารถหาผลเฉลยที่เหมาะสมในรูปแบบปิดได้ จึงได้อาศัยการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นหลัก เทคนิคการปรับกำลังส่งสามารถทำได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับจำนวนของระดับกำลังส่งที่ใช้กับวิธีการกำหนดค่ากำลังส่งของแต่ละระดับให้สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอวิธีการปรับกำลังส่งสำหรับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ไว้ 3 แบบ คือ เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลา เทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง และเทคนิคการปรับกำลังส่งทั้งทางเวลาและระหว่างเสาส่งพร้อมกัน

สำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลา ได้เสนอเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาไว้สองแบบ คือเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกัน และเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกัน ซึ่งข้อแตกต่างระหว่างสองวิธีนี้คือการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ เนื่องจากรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti เป็นรหัสที่มีเสาส่ง 2 ต้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณที่ต้องพิจารณาจึงมีสองค่าด้วยกัน คือสัมประสิทธิ์ของ

ช่องสัญญาณจากเสาส่งต้นที่ 1 และสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณจากเสาส่งต้นที่ 2 เทคนิคการปรับกำลังส่งโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกันจำเป็นต้องอาศัยบิตป้อนกลับจำนวน 1.5 บิต จากการจำลองพบว่า การนำเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกัน มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับรหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti ให้สมรรถนะของระบบที่ดีกว่ารหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti แบบดั้งเดิมที่ไม่มีการปรับกำลังส่งเลย ถึงแม้ว่าในช่วงที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำ (0 dB - 4 dB) สมรรถนะของทั้งสองระบบจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ยิ่งค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้นสมรรถนะของเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกันจะดีขึ้นเรื่อยๆ ยกตัวอย่างเช่น ที่ค่าอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-2} ระบบที่ใช้เทคนิคการปรับกำลังส่งจะมีสมรรถนะที่ดีกว่าระบบดั้งเดิมอยู่ 1 dB และที่ค่าอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-4} สมรรถนะของระบบที่นำเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกันจะมีค่าที่ดีกว่าระบบดั้งเดิมอยู่ถึง 2.5 dB ส่วนเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันเสนอโดยมีความคิดที่จะลดจำนวนของบิตป้อนกลับให้ลดลง โดยทำการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณร่วมกัน กล่าวคือ นำค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณที่เกิดจากเสาส่งต้นที่ 1 และเสาส่งต้นที่ 2 มารวมกันก่อนแล้วจึงค่อยพิจารณาปรับระดับเฟดดิ้งของช่องสัญญาณ ซึ่งวิธีรวมกันของค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณนั้นสามารถทำได้หลายรูปแบบ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกวิธีรวมกันของค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณโดยใช้วิธียกกำลังสอง ซึ่งทำให้จำนวนบิตที่ต้องป้อนกลับลดลงเหลือเพียงแค่ 1 บิต ผลจากการจำลองพบว่าถึงแม้เราจะลดจำนวนบิตป้อนกลับลง สมรรถนะของระบบที่ได้จากการนำเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันก็ยังคงมีสมรรถนะที่ดีกว่าระบบดั้งเดิม เพียงแต่สมรรถนะของระบบที่ได้ไม่ดีเท่าสมรรถนะของระบบที่ได้จากเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะจำนวนบิตป้อนกลับที่ลดลง เพราะเมื่อป้อนกลับด้วยจำนวนบิตที่มากขึ้นนั้นหมายถึงเรารู้ค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณที่ละเอียดมากขึ้นตามไปด้วย ในการปรับค่ากำลังส่งจึงสามารถปรับค่าให้เหมาะสมได้ดีกว่ากรณีที่เราไม่รู้ค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณอย่างไม่ละเอียด สรุปสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาที่เสนอ พบว่าเทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาให้ผลที่ดี อัตราความผิดพลาดบิตมีค่าลดต่ำกว่าระบบดั้งเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการเพิ่มค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ที่อัตราบิตผิดพลาดเท่ากับ 10^{-4} การปรับกำลังส่งด้วยวิธีนี้สามารถให้สมรรถนะที่ดีขึ้นถึง 2.5 dB และ 1 dB สำหรับการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งแยกออกจากกัน และการปรับกำลังส่งทางเวลาโดยพิจารณาเสาส่งร่วมกันตามลำดับ

อย่างที่กล่าวไว้แล้วว่ารหัสปริภูมิ-เวลา Alamouti เป็นรหัสที่ใช้เสาส่ง 2 ต้น จึงเกิดความคิดที่จะทำการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่งขึ้น ซึ่งได้เสนอเป็นเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่าง

เสาส่ง โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณระหว่างเสาส่งทั้ง 2 ต้น และใช้บิตป้อนกลับจำนวน 1 บิต ซึ่งผลการจำลองที่ได้ ปรากฏว่าเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่งกลับไม่ได้ช่วยเพิ่มสมรรถนะของระบบแต่อย่างใดในทุกช่วงของค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ไม่ว่าจะปรับค่ากำลังส่งเป็นเท่าไรก็ตาม ซึ่งเป็นผลมาจากการตัดสินใจค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณที่ไม่ชัดเจน นั่นคือ ตัดสินค่าสัมประสิทธิ์โดยดูแค่ค่าสัมประสิทธิ์จากเสาส่งต้นใดมีค่ามากกว่า จึงทำการปรับกำลังส่ง โดยไม่ทราบเลยว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่มากกว่านั้นมีสถานะดีหรือสถานะเลว ดังนั้นจึงได้นำ Fuzzy Logic มาประยุกต์ใช้งาน โดยที่จำนวนบิตป้อนกลับที่ใช้ยังคงมีค่าเท่ากับ 1 บิต ผลที่ได้จากการนำ Fuzzy Logic มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่ง คือ ระบบมีค่าสมรรถนะที่ดีขึ้นตามที่คาดหวังไว้

และสุดท้ายสำหรับเทคนิคการปรับกำลังส่งทั้งทางเวลาและระหว่างเสาส่งพร้อมกันพบว่าให้ค่าสมรรถนะที่แยกว่าการใช้เพียงแค่เทคนิคการปรับกำลังส่งทางเวลาเพียงอย่างเดียว เพราะเมื่อมีการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่งร่วมด้วย สมรรถนะของระบบที่ได้จะมีแค่แยกลงอย่างมาก และไม่คุ้มกับจำนวนบิตที่ต้องเสียไปในการป้อนกลับ

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการปรับกำลังส่งทางเวลาเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถปรับปรุงสมรรถนะของการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องอาศัยการเพิ่มขนาดแบนด์วิดท์หรือจำนวนเสาอากาศแต่อย่างใด หากแต่ต้องมีการป้อนกลับข้อมูลช่องสัญญาณโดยใช้ไม่เกิน 1-2 บิตต่อการส่งข้อมูลหนึ่งสัญลักษณ์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. รหัสปรับภูมิ-เวลา Alamouti นั้นยังสามารถประยุกต์ใช้ได้กับหลายเสารับ ซึ่งนับเป็นประเด็นที่น่าสนใจอีกประเด็นหนึ่งที่น่าจะนำมาพิจารณาใช้กับเทคนิคการปรับกำลังส่ง

2. น่าจะมีการนำ Fuzzy Logic มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่งทั้งหมดที่ได้เสนอไว้ เพราะจากเป้าหมายแรกที่คาดหวังคือการนำ Fuzzy Logic มาช่วยปรับปรุงสมรรถนะของระบบที่อาศัยเทคนิคการปรับกำลังส่งระหว่างเสาส่ง โดยใช้จำนวนบิตป้อนกลับเท่ากับ 1. บิตเท่าเดิม ซึ่งให้ผลที่ดีตามที่คาดหวังไว้ ดังนั้นจึงน่าจะนำ Fuzzy Logic มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคนิคการปรับกำลังส่งที่เสนอทั้งหมด

รายการอ้างอิง

1. J., K., Cavers. Variable-rate transmission for rayleigh fading channels. IEEE Transaction. (Feb. 1972): 15-22.
2. B., Vucetic. An adaptive coding scheme for time-varying channels. IEEE Transaction. (May 1991): 653-663.
3. M., Rice, and S., B., Wicker. Adaptive error control for slowly varying channels. IEEE Transaction. (Feb. 1994): 917-926.
4. Z., Liu, G., B., Giannakis, S., Zhou, and B., Muquet. Space-time coding for broadband wireless communications. Wireless Communications and Mobile Computing (Jan. 2001): 35- 53.
5. B. Vucetic, and J., Yuan. Space-time coding. England: Wiley, 2003.
6. S. M., Alamouti. A simple transmit diversity technique for wireless communications. IEEE J. Select. Areas Communication. (Oct. 1998): 1451-1458.
7. T., H., Liew, and L., Hanzo. Space-time codes and concatenated channel codes for wireless communications. Proc. IEEE. (Feb. 2002): 187-219.
8. J., Cheng, H., Wang, and S., Cheng. Space-time block coded transmit diversity for OFDM system in mobile channels. in proc. PIMRC 2002. Nanjing, China: 208-211.
9. A., Narula, M., Lopez, M., Trott, and G., Wornell. Efficient use of side information in multiple-antenna data transmission over fading channels IEEE J. Select. Areas Commun. (October 1998): 1423-1436.
10. N., Wang, and S., Blostein. Minimum BER power allocation for MIMO spatial multiplexing systems. IEEE. (2005): 2282-2286.
11. L., Xian, and H., Lui. An adaptive power allocation scheme for space-time block coded MIMO systems. WCNC. (2005): 504-508.
12. P., Xia, S., Zhou, and G., Giannakis. Multiantenna adaptive modulation with beamforming based on bandwidth-constrained feedback. IEEE Transaction. (Mar. 2005): 526-536.

13. J., Zhang, A., Sayeed, and B., Van, Veen. Optimal space-time transceiver design for selective wireless broadcast with channel state information, IEEE Transaction. (Nov. 2004): 2040-2050.
14. Z., Liu, G., B., Giannakis, S., Zhou, and B., Muquet. Space-time coding for broadband wireless communications. Wireless Communications and Mobile Computing. (Jan. 2001): 35-53.
15. J., S., R., Jang, C., T., Sun, and E., Mizutani. Neuro-Fuzzy and Soft Computing, Prentice Hall, 1997.
16. อภิศักดิ์ สัตถนะ. การปรับจุดเริ่มเปลี่ยนตามความยาวคิวแบบพลวัตสำหรับถังรั้วที่มีความสำคัญในโครงข่ายเอทีเอ็มโดยใช้พีซีออกจิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเชมธนะ สุวพิชญ์ภูมิ เกิดเมื่อวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ.2522 ที่จังหวัดยะลา เข้ารับการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2541 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย