

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ
ด้วยวงจรกรองปรับตัวได้ LMS

PERFORMANCE ENHANCEMENT IN COOPERATIVE WIRELESS
COMMUNICATION WITH ADAPTIVE LMS FILTER



จिरพันธุ์ พิมพ์

JIRAPUN PIMPOL

เลขหมู่.....110351
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....- 1 พ.ย. 2553

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2553

KMITL-2010-EN-M-0110-028

**PERFORMANCE ENHANCEMENT IN COOPERATIVE WIRELESS
COMMUNICATION WITH ADAPTIVE LMS FILTER**

JIRAPUN PIMPOL

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2010

KMITL-2010-EN-M-010-028

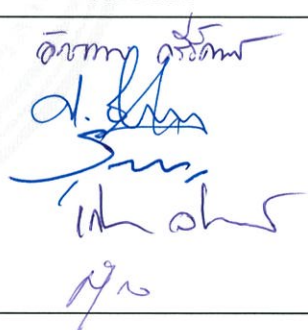
COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือด้วยวงจรกรองปรับตัวได้ LMS
Thesis Title Performance Enhancement in Cooperative Wireless Communication with LMS Adaptive Filter
นักศึกษา นายจิรพันธ์ พิมพล
รหัสประจำตัว 48060919
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุวิพล สิทธีชีวะภาค
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-M-010-028

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.อัศวพล	ตรีรัตน์	
ดร.ศรวัฒน์	ชีวิปริษา	
รศ.ดร.สุรพันธ์	อัมม่น	
รศ.เกรียงไกร	วงศ์โรจนภรณ์	
รศ.ดร.สุวิพล	สิทธชีวะภาค	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 17 มีนาคม พ.ศ. 2553 เวลา 09.30-11.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 17 มีนาคม พ.ศ. 2553

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
วันที่ ๒ เดือน พฤษภาคม พ.ศ. ๒๕๕๓
ลงชื่อ..... ศิวพร

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือด้วยวงจรกรองปรับตัวได้ LMS
นักศึกษา	นายจิรพันธ์ พิมพล
รหัสประจำตัว	48060919
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวิพล สิทธีชีวกภาค

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ โดยใช้วิธีอัลกอริทึมแบบค่าเฉลี่ยกลางกำลังสองค่าน้อยที่สุด (LMS) ในการประมาณค่าช่องสัญญาณแบบปรับตัวได้ ในระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ โดยมีโปรโตคอลการมอดูเลตแบบเลื่อนเฟส BPSK และ QPSK บนพื้นฐานการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบหลายทางโดยการแบ่งเวลา (TDMA) และใช้การส่งผ่านข้อมูลแบบขยายและส่งต่อ (Amplify and Forward) ซึ่งจะพิจารณาเลือกเงื่อนไขการปรับตัวจากอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน (SNR) ในการส่งสัญญาณโดยตรงที่ไม่มีผู้ช่วยส่ง (Non cooperative) และการส่งสัญญาณโดยมีผู้ช่วยส่ง (User cooperative) ที่ใช้เทคนิคการรวมสัญญาณ Enhanced Signal to Noise Ratio combining (ESNRC) และแบบรวมด้วยอัตราส่วนเท่ากัน (Equal Ratio Combining : ERC) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพจะเปรียบเทียบระหว่างการส่งสัญญาณจากผู้ส่งไปยังผู้รับปลายทางโดยตรงที่ไม่มีผู้ช่วยส่ง การส่งสัญญาณจากผู้ส่งไปยังปลายทางโดยมีผู้ช่วยส่ง และการส่งสัญญาณโดยใช้วิธีอัลกอริทึมแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองค่าน้อยที่สุด และเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางด้านเครื่องรับเมื่อผู้ช่วยส่ง (Relay) อยู่ที่ระยะต่างๆ ในการประมาณค่าช่องสัญญาณแบบปรับตัวได้ การแสดงผลเป็นการเปรียบเทียบค่าอัตราความผิดพลาดในการตัดสินใจสัญลักษณ์ (Symbol error rates : SER)

Thesis	Performance enhancement in Cooperative wireless communications with LMS adaptive filter
Student	Mr.Jirapun Pimpol
Student ID.	48060919
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Suvepon Sittichivapak

Abstract

This research proposes a performance enhancement of cooperative communications by using least mean square algorithm (LMS) adaptive channel estimation with an amplify and forward for Binary phase shift keying modulation and Quadrature phase shift keying modulation. Time division multiple access (TDMA) for signal transmission is used. The adaptive protocol is based on the maximum signal to noise ratio (SNR), which a non-cooperative and one relay cooperative are considered. At the receiver, the Enhanced Signal to Noise combining (ESNRC) and Equal Ratio Combining (ERC), Symbol error rate (SER) are considered in order to performance measured. We compare the signal transmission by using a non-cooperative signal transmission, a one relay cooperative signal transmission and a signal transmission using adaptive channel estimation and also, the signal transmission by using distance of relay.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รศ.ดร.สุวิพล สิริทิวภาค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาตรวจสอบความถูกต้องของเนื้อหา รวมถึงให้คำแนะนำในแนวทางการวิจัย ตลอดจนแนวคิด การแก้ปัญหาต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและระลึกถึงในความกรุณา จึงขอขอบคุณ ท่านไว้ ณ โอกาสนี้ และขอขอบพระคุณท่าน คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาสละเวลามาเป็นคณะกรรมการในการสอบไว้ ณ โอกาสนี้

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุน ส่งเสริม ตลอดจนมา ขอบคุณพี่ชาย พี่สาว ที่ให้ความช่วยเหลือเสมอ รวมถึงเพื่อนๆทุกท่าน ที่คอยสนับสนุน และร่วมแก้ปัญหาคด้วยเสมอมา ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

จิรพันธ์ พิมพล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.5 เครื่องมือที่ใช้	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับช่องสัญญาณ	6
2.2 หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย	8
2.3 คิจิตตมอดูเลชัน	9
2.4 ความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity)	15
2.5 ความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ	17
2.6 การปรับแต่งช่องสัญญาณ	23
2.7 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรปรับแต่งช่องสัญญาณ	23
2.8 อัลกอริทึม Least Mean Square (LMS)	27
2.6 วิธีการรวมสัญญาณในช่องสัญญาณที่มีความหลากหลาย	29
2.7 พารามิเตอร์ที่ใช้วัดสมรรถนะของระบบและความหมายของค่าต่าง ๆ	33
บทที่ 3 งานวิจัยที่นำเสนอ	33
3.1 โครงสร้างของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ	33
3.2 ค่าอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR)	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การพิจารณาสัญญาณที่ปลายทาง และการเลือกเส้นทางของสัญญาณที่ปลายทาง	39
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	42
4.1 การจำลองระบบการทำงานของอัลกอริทึม LMS	42
4.2 การจำลองผลของระบบที่นำเสนอในสถานการณ์ต่างๆ	46
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	61
5.1 สรุปผลการวิจัย	61
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	62
เอกสารอ้างอิง	63
ประวัติผู้วิจัย	54

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 มุม α_n ของคลื่นสัญญาณที่มาถึงของปรากฏการณ์คอปเพลอร์	8
2.2 การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณ ไร้สาย	9
2.3 ซิกแนลสเปซของระบบ BPSK	11
2.4 ซิกแนลสเปซของระบบ QPSK	13
2.5 ซิกแนลสเปซของระบบ 8-PSK (M=8)	15
2.6 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ	18
2.7 การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ	19
2.8 การส่งต่อสัญญาณแบบ AF ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ	21
2.9 การส่งต่อสัญญาณแบบ DF ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ	22
2.10 การปรับแต่งช่องสัญญาณ	23
2.11 โครงสร้างพื้นฐานของตัวกรองวีเนอร์	24
2.12 ตัวกรองวีเนอร์ที่อาศัยกระบวนการวนวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดในการปรับตัว	27
2.13 บล็อกไดอะแกรมวิธีการรวมสัญญาณแบบเลือก	30
2.14 บล็อกไดอะแกรมวิธีการรวมสัญญาณแบบ ESNRC	30
2.15 บล็อกไดอะแกรมวิธีการรวมสัญญาณแบบ ERC	31
3.1 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ	32
3.2 การส่งสัญญาณ โดยไม่มีผู้ช่วย	33
3.3 การส่งสัญญาณ โดยมีผู้ช่วย 1 คน	33
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตัว เมื่อ $\mu = 0.01$	42
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตัว เมื่อ $\mu = 0.02$	43
4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตัว เมื่อ $\mu = 0.03$	43
4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตัว เมื่อ $\mu = 0.05$	44
4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตัว เมื่อ $\mu = 0.009$	44
4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตัว เมื่อ $\mu = 0.005$	45
4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตัว เมื่อ $\mu = 0.001$	45
4.8 เปรียบเทียบระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณีมอดูเลตแบบ BPSK	46
4.9 เปรียบเทียบระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณีมอดูเลตแบบ QPSK	47
4.10 เปรียบเทียบระบบกรณีมอดูเลตแบบ BPSK และ QPSK	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณีของระบบที่นำเสนอ	49
4.12 เปรียบเทียบระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณีของระบบที่นำเสนอ	50
4.13 เปรียบเทียบการรวมสัญญาณปลายทางของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ	51
4.14 ช่องสัญญาณจากผู้ส่งไปยังผู้ช่วยส่งเปลี่ยน $\sigma^2 = 10$	52
4.15 เปรียบเทียบ SER ช่องสัญญาณจากผู้ส่งไปยังผู้ช่วยส่งเปลี่ยน $\sigma^2 = 10$	53
4.16 ช่องสัญญาณจากผู้ช่วยส่งไปยังปลายทางเปลี่ยน $\sigma^2 = 10$	54
4.17 เปรียบเทียบ SER ช่องสัญญาณจากผู้ช่วยส่งไปยังปลายทางเปลี่ยน $\sigma^2 = 10$	54
4.18 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณี Relay อยู่ระหว่างผู้ส่งกับปลายทาง	55
4.19 เปรียบเทียบค่า SER ที่เกิดกรณี Relay อยู่ระหว่างผู้ส่งกับปลายทาง	56
4.20 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณี Relay อยู่ใกล้กับผู้ส่ง	57
4.21 เปรียบเทียบค่า SER ที่เกิดกรณี Relay อยู่ใกล้ผู้ส่ง	57
4.22 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณี Relay อยู่ใกล้กับปลายทาง	58
4.23 เปรียบเทียบค่า SER ที่เกิดกรณี Relay อยู่ใกล้ปลายทาง	59
4.24 เปรียบเทียบค่า SER ที่เกิดกรณี Relay เข้าใกล้กับผู้ส่ง(Sender) และเข้าใกล้ปลายทาง (Destination) เป็นระยะทางที่เท่ากัน	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีของระบบสื่อสารไร้สายได้มีการพัฒนาออกมาหลากหลายรูปแบบเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นเรื่องความเร็วในการรับ/ส่งข้อมูลที่สูงขึ้น เรื่องของความเป็นอิสระในการเคลื่อนที่ได้ หรือจะเป็นเรื่องของคุณภาพ ความน่าเชื่อถือในการให้บริการที่ดีในระบบ ทั้งนี้ก็เพื่อรองรับกับความต้องการในการสื่อสารข้อมูลมัลติมีเดีย ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลภาพ ข้อมูลเสียงและข้อมูลสื่อสารอื่นๆ ในอนาคต

เป็นที่รู้กันว่าระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก (Multiple Input Multiple Output : MIMO)[1][2] สามารถรองรับความต้องการดังกล่าวในอนาคตได้ หลักการเบื้องต้นที่ทำให้ระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออกมีคุณสมบัติดังที่กล่าวมา คือ การใช้งานชุดสายอากาศที่มีมากกว่าหนึ่งตัวติดตั้งทั้งที่เครื่องส่งและเครื่องรับ ซึ่งการเพิ่มจำนวนของสายอากาศนี้จะส่งผลให้ระบบสามารถเพิ่มช่องทางการสื่อสารข้อมูลและเพิ่มทางเลือกในการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ซึ่งอย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีระบบสื่อสารไร้สายชนิดหนึ่งที่สามารถรองรับการส่งข้อมูลในอนาคตและเพิ่มทางเลือกในการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ดีที่สุดได้ เช่นเดียวกับระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก และไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนของสายอากาศที่เครื่องส่งและเครื่องรับ การสื่อสารดังกล่าวนี้เรียกว่า การสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ (Wireless cooperative communications)[3][4]

การสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ เป็นเทคนิคการส่งต่อข้อมูล (Relaying) โดยให้ผู้ใช้งานคนอื่นๆในระบบทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยส่งต่อข้อมูลไปยังเครื่องรับปลายทาง ซึ่งจะทำให้เกิดระบบการสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออกเสมือน (Virtual MIMO systems) ขึ้นมา เทคนิคนี้ช่วยเพิ่มความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity)[5] ให้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้อัตราความผิดพลาดของการตัดสินใจผิดพลาด (Bit error rate : BER) ของระบบโดยรวมลดลง แต่ปัญหาที่เกิดจากการจางหายหรือเฟดดิ้ง (Fading) ที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ จากสัญญาณรบกวน (Noise) ความล่าช้าของสัญญาณที่ส่งมา (Delays) และจากการสะท้อนในหลายทิศทาง (Multi path) ของช่องสัญญาณ มีผลให้เกิดการลดทอนของสัญญาณ (Attenuations) เช่นกัน และทำให้อัตราความผิดพลาดของการตัดสินใจผิดพลาด (Bit error rate : BER) ที่ภาครับมีค่าสูงขึ้น จนเกิดความผิดพลาดในการรับ/ส่งสัญญาณ

ระบบสื่อสารไร้สายนั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ระบบสื่อสารแบบไม่ร่วมนัย (Noncoherent) และแบบร่วมนัย (Coherent) ซึ่งทั้งสองแบบมีข้อแตกต่างกันที่สรุปได้ดังนี้ ระบบ

การสื่อสารแบบไม่ร่วมนัย จะไม่มีการกู้สัญญาณพาห้ที่ใช้ในการส่งข้อมูลทางด้านเครื่องรับ เนื่องจากการส่งข้อมูลจะใช้ข้อมูลก่อนหน้านั้นเป็นข้อมูลอ้างอิง จึงทำให้การถอดรหัสทางด้านเครื่องรับมีความซับซ้อนน้อย และมีต้นทุนในการสร้างเครื่องรับของระบบต่ำ ส่วนการสื่อสารแบบร่วมนัย จะมีความยุ่งยากและซับซ้อนสำหรับการถอดรหัสข้อมูลทางด้านเครื่องรับมากกว่า แต่เนื่องจากทางด้านของเครื่องรับนั้น มีกระบวนการกู้สัญญาณพาห้ที่ใช้ในการส่งข้อมูลได้ใกล้เคียงกับทางด้านเครื่องส่งมากที่สุด จึงทำให้การรับ/ส่งข้อมูลมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบไม่ร่วมนัย 2 เท่า หรือประมาณ 3 dB ณ ค่าอัตราการตัดสินใจผิดพลาดเดียวกัน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มุ่งทำการศึกษา การรับ/ส่งข้อมูลในระบบสื่อสารไร้สายแบบ Coherent เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษา และวิเคราะห์วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูล แบบขยายและส่งต่อ โดยใช้การประมาณค่าช่องสัญญาณด้วยตัวกรองแบบปรับตัวได้ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด ให้มีอัตราความผิดพลาดในการตัดสินใจสัญลักษณ์ (Symbol error rate : SER) ต่ำลง ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาและวิเคราะห์วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพ วิธีการส่งข้อมูลของระบบสื่อสารแบบร่วมมือ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วิธีการรับ/ส่งข้อมูลของระบบสื่อสารแบบร่วมมือ
2. วิธีการของการประมาณค่าช่องสัญญาณด้วยตัวกรองแบบปรับตัวได้ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด
3. วิธีการรวมสัญญาณในช่องสัญญาณที่มีความหลากหลาย
4. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูลของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมนัย (Coherent)

1.3.2 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูลของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ ที่มีผู้ใช้งานทั้งหมดในระบบ 2 คน และมีเครื่องรับ (Receiver) 1 เครื่อง ภายใต้สภาพภูมิศาสตร์ของช่องสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาวิธีการรับ/ส่งข้อมูลของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

2. ศึกษาความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการมอดูเลชันแบบต่างๆ รวมถึงการประมาณค่าช่องสัญญาณด้วยตัวกรองแบบปรับตัวได้ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด
3. ศึกษาวิธีการรวมสัญญาณในช่องสัญญาณที่มีความหลากหลาย
4. ศึกษาการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูลของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมนัย (Coherent)
5. วิเคราะห์ประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูลของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ
6. ทดสอบและวัดประสิทธิภาพ ผลของวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูล ด้วยการประมาณค่าช่องสัญญาณด้วยตัวกรองแบบปรับตัวได้ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด สำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ
7. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลจากการทดลอง
8. สรุปผล

1.5 เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ใช้ในการคำนวณและเขียน โปรแกรม
2. ซอฟต์แวร์โปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ และวิธีการประมาณค่าช่องสัญญาณด้วยตัวกรองแบบปรับตัวได้ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด
2. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูล ของการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ
3. ได้วิธีการในการเพิ่มประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูล ด้วยการประมาณค่าช่องสัญญาณด้วยตัวกรองแบบปรับตัวได้ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด สำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือแบบร่วมนัย
4. เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยและประยุกต์ใช้ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กับจำนวนผู้ใช้งานในระบบ โดยมีผู้ส่ง 1 คน ผู้ช่วยส่ง 1 คน และเครื่องรับ 1 เครื่อง
5. เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ ในการส่งสัญญาณแบบต่างๆ เช่น สัญญาณภาพ และสัญญาณเสียง เป็นต้น

1.7 ภาพรวมของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะแบ่งออกเป็น 5 บท โดยมีรายละเอียด ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ วิธีดำเนินการวิจัย รวมถึงเครื่องมือที่ใช้ ตลอดจนประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และภาพรวมของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย ความหลากหลายของช่องสัญญาณ ความรู้เบื้องต้นกับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ การประมาณค่าช่องสัญญาณด้วยตัวกรองแบบปรับตัวได้ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด ช่องสัญญาณและการจางหาย เทคนิคการรวมสัญญาณแบบต่างๆ และสุดท้ายจะอธิบายถึงพารามิเตอร์ที่ใช้วัดสมรรถนะของระบบและความหมายของค่าต่าง ๆ

บทที่ 3 งานวิจัยที่นำเสนอ โดยจะนำเสนอการประมาณค่าช่องสัญญาณด้วยตัวกรองแบบปรับตัวได้ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ โดยใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบเลื่อนเฟสในการรับ/ส่งสัญญาณ และใช้โปรโตคอลการส่งผ่านสัญญาณแบบ Amplify and Forward (AF) ซึ่งจะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบที่นำเสนอ หลักในการพิจารณาเลือกเส้นทางด้วยค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) และการทำงานของระบบที่นำเสนอ

บทที่ 4 ผลการวิจัย ในบทนี้จะเป็นการจำลองผล (Simulation) จากระบบที่นำเสนอ ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่นำเสนอ ในแง่ของอัตราความผิดพลาดในการตัดสินใจสัญลักษณ์ (SER) เปรียบเทียบกับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่มีการส่งสัญญาณแบบไม่มีการประมาณค่าช่องสัญญาณ กับการรวมสัญญาณจากหลายทิศทางแบบ ERC และการรวมสัญญาณจากหลายทิศทางแบบ ESNRC ในสถานการณ์แต่ละแบบ

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ จะเป็นการสรุปผลที่เกิดขึ้นในงานวิจัยที่ได้ศึกษาี้ รวมถึงการอภิปรายผลการวิจัย สุดท้ายจะเป็นข้อเสนอแนะ และแนวทางการทำวิจัยในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับในบทนี้ จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องโดยจะแบ่งเนื้อหาหลักๆ ดังนี้คือ ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับช่องสัญญาณ หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย ความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity) ความรู้เบื้องต้นกับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบต่างๆ การปรับเปลี่ยนการมอดูเลต สุดท้ายจะอธิบายถึงพารามิเตอร์ที่ใช้วัดสมรรถนะของระบบและความหมายของค่าต่างๆ เพื่อเข้าใจถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในการรับ/ส่งข้อมูลข่าวสารผ่านช่องสัญญาณไร้สายและวิธีการตามทฤษฎีต่างๆ นี้มาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับช่องสัญญาณ

2.1.1 ช่องสัญญาณ (Channel)

ช่องสัญญาณ หมายถึง ตัวกลางเพื่อให้สัญญาณผ่านไปจากสายอากาศเครื่องส่งไปยังสายอากาศเครื่องรับ ซึ่งมีความเป็นไปได้หลายรูปแบบทั้งที่เป็นอากาศปกติ เป็นสายทองแดง เป็นใยแก้วนำแสง โดยที่ช่องสัญญาณนั้นจะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณอินพุตชุดหนึ่งให้เป็นสัญญาณเอาต์พุตชุดหนึ่งและในระบบการสื่อสารไร้สายคลื่นสัญญาณที่ถูกส่งออกมาทางเครื่องส่งจะไม่ได้เดินทางมายังทางเครื่องรับปลายทางเป็นแนวเส้นตรง เพราะจะต้องพบกับสิ่งกีดขวางในสภาพแวดล้อมที่สัญญาณจะต้องเคลื่อนที่ผ่าน โดยที่คลื่นสัญญาณที่มาถึงทางเครื่องรับจะเกิดขึ้นจากการรวมกันของคลื่นหลายวิถีที่มาจากหลายทิศทางซึ่งเกิดจากการสะท้อน (Reflection) การเลี้ยวเบน (Diffraction) และการกระเจิง (Scattering) ผ่านสิ่งกีดขวางต่าง ๆ เช่น สิ่งก่อสร้าง ต้นไม้ ยานพาหนะ โดยจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดหลายวิถี (Multi path) และผลจากการเกิดหลายวิถีนี้เองทำให้สัญญาณที่มาถึงทางเครื่องรับนั้นมีผลมาจากสัญญาณมากกว่าหนึ่งวิถี ซึ่งแต่ละวิถีนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่แตกต่างกันออกไป ทั้งในเชิงแอมพลิจูดและเฟส สัญญาณที่ได้รับจะประกอบไปด้วยผลจากวิถีต่าง ๆ สัญญาณในแต่ละวิถีอาจเขียนให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ของแอมพลิจูดและเฟสได้ ถ้าอุปกรณ์ปลายทางกำลังเคลื่อนที่ หรือสภาพแวดล้อมโดยรอบมีการเปลี่ยนแปลง ผลกระทบจากช่องสัญญาณอาจเปลี่ยนแปลงอย่างสุ่มไปตามเวลาดังนั้น ณ ขณะหนึ่งสัญญาณในวิถีอาจรวมกันแบบหักล้าง และในอีกขณะหนึ่ง อาจรวมกันแบบเสริม รูปแบบของการกระจายตัวที่ใช้กันทั่วไปในการบอกลักษณะของแอมพลิจูดสุ่มที่เป็นผลมาจากช่องสัญญาณหลายวิถี มีอยู่ 2 แบบ ได้แก่ การกระจายตัวแบบเรย์ลี (Rayleigh) และการกระจายตัวแบบไรเซียน (Rician)

ถ้าในสัญญาณที่ได้รับไม่มีองค์ประกอบตามเส้นแนวสายตา (Line of Sight : LOS)[2] ซึ่งก็คือเมื่อวิถีตรงถูกบดบัง ดังเช่น การแพร่กระจายสัญญาณระยะไกลในสภาพแวดล้อมกลางแจ้ง (Outdoor) สัญญาณที่ได้รับจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบกระเจิง (Scattered) อันเนื่องมาจากการสะท้อนที่ไม่มีวิถีหลัก ซึ่งจะสามารถแยกออกเป็นองค์ประกอบร่วมเฟส (In-phase) และองค์ประกอบตั้งฉาก (Quadrature) ซึ่งวิถีของสัญญาณแต่ละวิถีมีผลต่อทั้งสองส่วนนี้ด้วย จากทฤษฎีขีดจำกัดกลาง (Central Limit Theorem) เมื่อมีวิถีจำนวนมาก จะทำให้สามารถอนุมานได้ว่า องค์ประกอบร่วมเฟสและองค์ประกอบตั้งฉากเป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ดังนั้นแอมพลิจูดทั้งหมดของสัญญาณที่ได้มาจากการบวกเวกเตอร์องค์ประกอบทั้งหมดจึงเป็นไปตามนิยามของการกระจายตัวแบบเรย์ลีนอกจากนี้เฟสก็มีการกระจายตัวแบบเอกรูปในช่วง $[0, 2\pi]$ การกระจายตัวแบบเรย์ลีของแอมพลิจูดของสัญญาณ ρ มีนิยามดังนี้

$$f_\rho(\rho) = \frac{\rho}{\sigma^2} e^{-\left(\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (2.1)$$

โดยที่ ρ^2 คือ แวเรียนซ์ขององค์ประกอบร่วมเฟส และองค์ประกอบตั้งฉาก ซึ่งปริมาณทางสถิติสองค่าที่เกี่ยวข้องในที่นี้คือ ค่าเฉลี่ยและ โมเมนต์ที่สองของตัวแปรสุ่มแบบเรย์ลี ซึ่งมีค่าเป็น

$$E\{\rho\} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma \quad (2.2)$$

$$E\{\rho^2\} = 2\sigma^2 \quad (2.3)$$

ถ้ามีองค์ประกอบ LOS แนวตรงดังในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร (Indoor) สัญญาณที่ได้รับจะมีองค์ประกอบตาม LOS หลัก และองค์ประกอบกระเจิงอันเนื่องมาจากการสะท้อน เมื่อกำหนดให้องค์ประกอบ LOS อยู่ในแนวร่วมเฟส โดยแอมพลิจูดของสัญญาณที่ได้รับ ρ จะมีการกระจายตัวแบบไรเชียนดังนี้

$$f_\rho(\rho) = \frac{\rho}{\sigma^2} e^{-\left(\frac{\rho^2+a_0^2}{2\rho^2}\right)} I_0\left(\frac{a_0\rho}{\sigma^2}\right) \quad (2.4)$$

โดยที่ ρ^2 แทนกำลังขององค์ประกอบร่วมเฟส และองค์ประกอบตั้งฉากกระเจิง α_0 คือแอมพลิจูดขององค์ประกอบ LOS และ $I_0(\rho)$ เป็นฟังก์ชันเบสเซลดัดแปลงอันดับศูนย์ การกระจายตัวแบบไรเซียนนี้มักจะใช้ตัวประกอบ K ของไรเซียนเป็นตัวกำหนดลักษณะดังนี้

$$K = \frac{\alpha_0^2}{2\sigma^2} \quad (2.5)$$

จากการวัดในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารต่าง ๆ พบว่าโดยทั่วไปค่าของ K จะมีค่าเป็น 10 ปริมาณทางสถิติที่เกี่ยวข้องในที่นี้คือ ค่าเฉลี่ยของการกระจายตัวแบบไรเซียนซึ่งมีค่าเป็น

$$E\{\rho\} = e^{-k/2} \sqrt{\frac{\pi}{2(K+1)}} \rho \left[(1+K)I_0\left(\frac{K}{2}\right) + KI_1\left(\frac{K}{2}\right) \right] \quad (2.6)$$

โดยที่ $I_1(K)$ แทนฟังก์ชันเบสเซลดัดแปลงอันดับหนึ่ง (First Order Modified Bessel Function)

2.1.2 ดอปเพลอร์ (Doppler)

นอกจากการเกิดพหุวิถีแล้ว การเกิดปรากฏการณ์ดอปเพลอร์นั้นก็จะส่งผลกระทบต่อการสื่อสารของระบบสื่อสารไร้สายด้วย เนื่องจากผลที่ผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่จึงทำให้คลื่นสัญญาณที่มาถึงนั้นมีความถี่ที่เปลี่ยนไป โดยมุมของสัญญาณที่มาถึง (Angle of arrival, α_n) ที่ถูกนิยามให้เป็นมุมระหว่างคลื่นสัญญาณที่มาถึงวิถีที่ n และทิศทางเคลื่อนที่ของผู้ใช้งาน ดังแสดงในภาพที่ 2.1 และค่าความถี่ดอปเพลอร์ของคลื่นสัญญาณวิถีที่ n จะมีค่าดังนี้

$$f_n = f_{\max} \cos \alpha_n \quad (2.7)$$

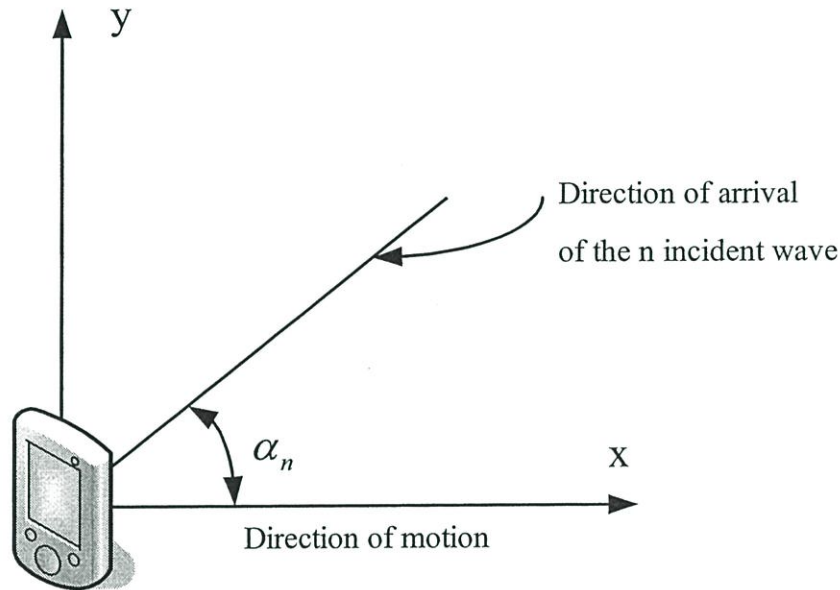
โดยที่ f_{\max} คือค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุดนั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วของผู้ใช้งาน (v) และค่าความถี่กลางที่ใช้ในการส่งข้อมูลดังสมการที่ (2.8)

$$f_{\max} = \frac{v}{c_0} f_0 \quad (2.8)$$

เมื่อ f_0 คือ ความถี่คลื่นสัญญาณพาห้

c_0 คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที

เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์นี้เอง จะทำให้สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณที่ถูกส่งนั้นกระจายออกกระหว่างการส่งข้อมูล เมื่อพิจารณาเชิงเวลาผลของปรากฏการณ์ ดอปเพลอร์นี้จะทำให้ผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse response) ของช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงทางเวลา

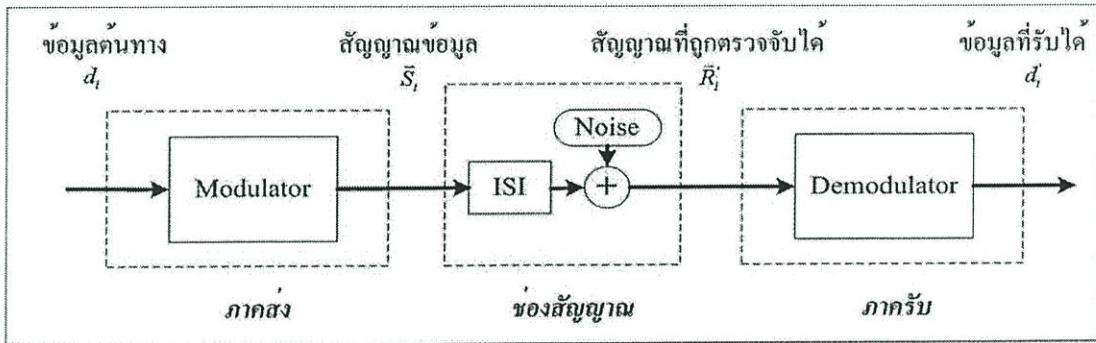


รูปที่ 2.1 มุม α_n ของคลื่นสัญญาณที่มาถึงของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์

2.2 หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย

ในการออกแบบและใช้งานระบบสื่อสารไร้สายเพื่อรับ/ส่งข้อมูลดิจิทัลนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบสื่อสาร เช่น ขนาดแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของช่องสัญญาณที่ใช้ งาน อัตราเร็วในการส่งข้อมูล และกำลังส่ง เป็นต้น โดยจะต้องมีการออกแบบให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้งานระบบสื่อสารนั้นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เป็นการรบกวนช่องสัญญาณอื่นๆ ดังนั้นข้อมูลดิจิทัล d_i ต้องผ่านกระบวนการมอดูเลต (Modulate) ก่อนถูกส่งผ่านระบบสื่อสาร เพื่อแปลงข้อมูลให้กลายเป็นสัญญาณข้อมูล \bar{S}_i ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการส่งผ่านช่องสัญญาณ และเมื่อสัญญาณข้อมูล \bar{R}_i ถูกตรวจจับได้ที่ภาครับ ก็จะถูกนำมาผ่านกระบวนการ ดีมอดูเลต (Demodulate) เพื่อแปลงสัญญาณข้อมูลให้กลายเป็นข้อมูลดิจิทัล \bar{d}_i เพื่อนำไปใช้งานต่อไป โดยจะพบว่าข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากทำงานของภาครับนั้นอาจมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไป เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ถูส่งออกไปจากภาคส่ง ซึ่งเกิดมาจากผลขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบสื่อสาร สำหรับองค์ประกอบหลักที่ส่งผลให้ข้อมูลที่ถูส่งผ่านมาเกิดความผิดพลาดขึ้นนั้น เกิดมาจากการถูรบกวนจากสัญญาณรบกวน (Noise) และเกิดจากลักษณะในการส่งข้อมูล

ที่สัญญาณข้อมูล \bar{S}_i สามารถเดินทางไปถึงภาครับได้จากหลายทิศทางด้วยกัน (Multi path) โดยที่ในแต่ละเส้นทางนั้นอาจจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณในลักษณะของการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์ขึ้น



รูปที่ 2.2 การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย

2.3 ดิจิตอลมอดูเลชัน (Digital Modulation)

2.3.1 การมอดูเลตแบบ BPSK (Binary Phase Shift Keying)

ในระบบสื่อสารดิจิตอลแบบ BPSK อาศัยสัญญาณสองรูปแบบ ได้แก่ $S_1(t)$ และ $S_2(t)$ ในการแทนข้อมูลไบนารี 1 และ 0 ตามลำดับดังนี้

$$S_1(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad (2.9)$$

$$S_2(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \pi) \quad (2.10)$$

$$S_2(t) = -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad (2.11)$$

โดยที่ E_b เป็นพลังงานของสัญญาณใน 1 บิต (Signal energy per bit) และ $0 \leq t \leq T_b$ เมื่อ T_b คือคาบเวลาของการส่ง 1 บิต ซึ่งมักกำหนดให้มีค่าเป็นจำนวนเท่าที่ลงตัวของคาบของสัญญาณคลื่นพาห์ ($T_c = 1/f_c$) นั่นคือ $T_b = mT_c$ โดยที่ m เป็นค่าคงที่จำนวนเต็มบวก สังเกตว่าการแสดงสัญญาณ $S(t)$ ได้มีการนำค่า E_b มาเกี่ยวพันเป็นส่วนหนึ่งของแอมพลิจูดของสัญญาณ $S(t)$

ฉะนั้นหากคำนวณพลังงานของสัญญาณในหนึ่งบิตจากนิยามพลังงานของสัญญาณก็จะได้ค่าเท่ากับ E_b ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{พลังงานของสัญญาณต่อหนึ่งบิต} &= \int_0^{T_b} s^2(t) dt \\ &= \int_0^{T_b} \frac{2E_b}{T_b} \cos^2(2\pi f_c t) dt \\ &= E_b \end{aligned} \quad (2.12)$$

เมื่อนำสัญญาณ $S_1(t)$ และ $S_2(t)$ ตามสมการ (2.9) และ (2.10) มาหาฟังก์ชันเบซิสตามกรรมวิธีของ Gram-Schmidt จะพบว่ามิฟังก์ชันเบซิสเพียงตัวเดียวคือ

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T_b \quad (2.13)$$

และสัญญาณทั้งสองตัวสามารถเขียนในรูปของฟังก์ชันเบซิสได้เป็น

$$s_1(t) = \sqrt{E_b} \phi_1(t) \quad 0 \leq t \leq T_b \quad (2.14)$$

และ

$$s_2(t) = -\sqrt{E_b} \phi_1(t) \quad 0 \leq t \leq T_b \quad (2.15)$$

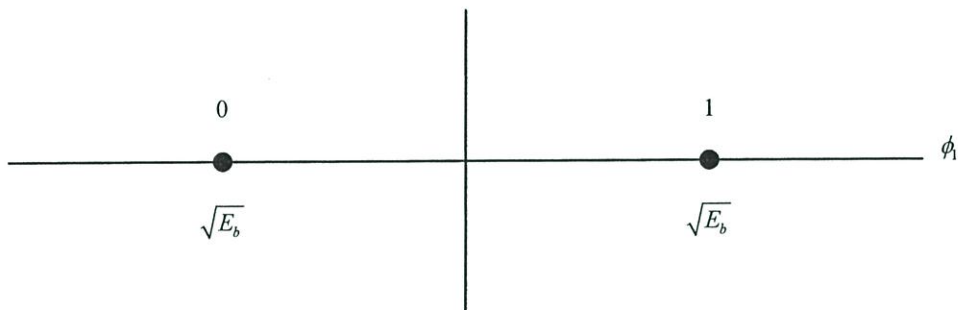
โดยที่สัมประสิทธิ์การคูณ S_{11} และ S_{21} หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} s_{11} &= \int_0^{T_b} s_1(t) \phi_1(t) dt \\ &= \sqrt{E_b} \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$s_{21} = \int_0^{T_b} s_2(t)\phi_1(t)dt \quad (2.17)$$

$$= \sqrt{E_b}$$

เมื่อนำมาวาดบนระบบแกน จะมีลักษณะเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าซิกแนลสเปซที่มีเพียงแกนเดียว



รูปที่ 2.3 ซิกแนลสเปซของระบบ BPSK

2.3.2 การมอดูเลตแบบ QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)

การมอดูเลตสัญญาณแบบ QPSK จะเป็นการพิจารณาข้อมูลดิจิทัลที่เข้ามาครั้งละ 2 บิต และจะมีสัญญาณเพื่อแทนข้อมูลที่ต่างกันถึงสี่รูปแบบ เพื่อแทนข้อมูลดิจิทัลที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ ได้แก่ 00 10 10 และ 11 รูปสัญญาณที่ใช้ในการแทนข้อมูลดิจิทัลจะมีแอมพลิจูดและความถี่เท่ากัน แต่จะมีเฟสต่างกันไปที่ละ $\pi/2$ องศา ดังนี้

$$S_1(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t) \quad (2.18)$$

$$S_2(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + \pi/2) \quad (2.19)$$

$$= \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \sin(2\pi f_c t)$$

$$S_3(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + \pi) \quad (2.20)$$

$$= -\sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t)$$

$$S_4(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + 3\pi/2) \quad (2.21)$$

$$= -\sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \sin(2\pi f_c t)$$

โดย E_s คือ พลังงานของสัญญาณต่อหนึ่งสัญลักษณ์ที่ส่งออกมาในช่วงเวลา T_s วินาที เมื่อพิจารณาสัญญาณทั้ง 4 ตัว เราสามารถเลือกฟังก์ชันเบซิส 2 ตัวที่เหมาะสมได้โดยกำหนดให้มีค่าดังนี้

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (2.22)$$

และ

$$\phi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (2.23)$$

สัญญาณทั้ง 4 รูปแบบสามารถเขียนในรูปของฟังก์ชันเบซิสได้เป็น

$$s_1(t) = \sqrt{E_s} \phi_1(t) \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (2.24)$$

$$s_2(t) = \sqrt{E_s} \phi_2(t) \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (2.25)$$

$$s_3(t) = -\sqrt{E_s} \phi_1(t) \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (2.26)$$

$$s_4(t) = -\sqrt{E_s} \phi_2(t) \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (2.27)$$

โดยสัมประสิทธิ์การคูณ s_{11} , s_{12} , s_{21} , s_{22} , s_{31} , s_{32} , s_{41} และ s_{42} หาได้จากความสัมพันธ์ดัง
ดังนี้

$$s_{11} = \sqrt{E_s} \qquad s_{12} = 0$$

$$s_{21} = 0 \qquad s_{22} = \sqrt{E_s}$$

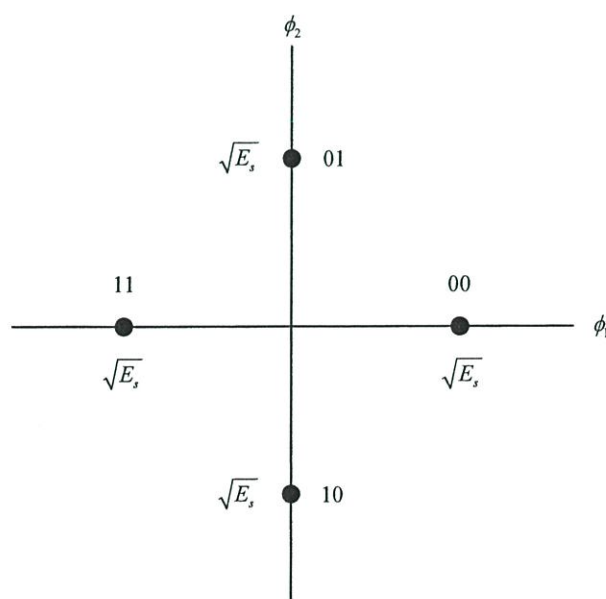
$$s_{31} = -\sqrt{E_s} \qquad s_{32} = 0$$

$$s_{41} = 0 \qquad s_{42} = -\sqrt{E_s}$$

และนำสัญญาณ $s_1(t)$, $s_2(t)$, $s_3(t)$ และ $s_4(t)$ มาเขียนในรูปของเวกเตอร์จะได้ผลดังนี้

$$s_1 = \begin{bmatrix} \sqrt{E_s} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad s_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{E_s} \end{bmatrix}, \quad s_3 = \begin{bmatrix} -\sqrt{E_s} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad s_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sqrt{E_s} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

นำเวกเตอร์เหล่านี้ไปเขียนในระบบแกน ϕ_1 และ ϕ_2 จะได้จุดสัญญาณ 4 จุดบนซิกแนลสเปซดังรูป
ที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ซิกแนลสเปซของระบบ QPSK

2.3.3 การมอดูเลตแบบ M-ary PSK (M-ary Phase Shift Keying)

การส่งสัญญาณของแต่ละช่วงเวลา T จะใช้สัญญาณได้มากถึง M รูปแบบ คือ สัญญาณ $s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)$ ในการแทนข้อมูลดิจิทัล สัญญาณแต่ละสัญญาณจะมีแอมพลิจูดและความถี่เท่ากันหมด แต่จะมีเฟสที่แตกต่างกัน โดยสัญญาณที่ใช้จะมีเฟสต่างกันว่า $2\pi/M$ องศา ดังนี้

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi(i-1)}{M}\right) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2.29)$$

โดย E_s คือ พลังงานของสัญญาณต่อหนึ่งสัญลักษณ์ที่ส่งออกในช่วงเวลา T_s วินาที เมื่อพิจารณาสัญญาณทั้ง M ตัว เราสามารถเลือกฟังก์ชันเบซิสเพียง 2 ตัวที่เหมาะสมได้โดยกำหนดให้มีค่าดังนี้

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (2.30)$$

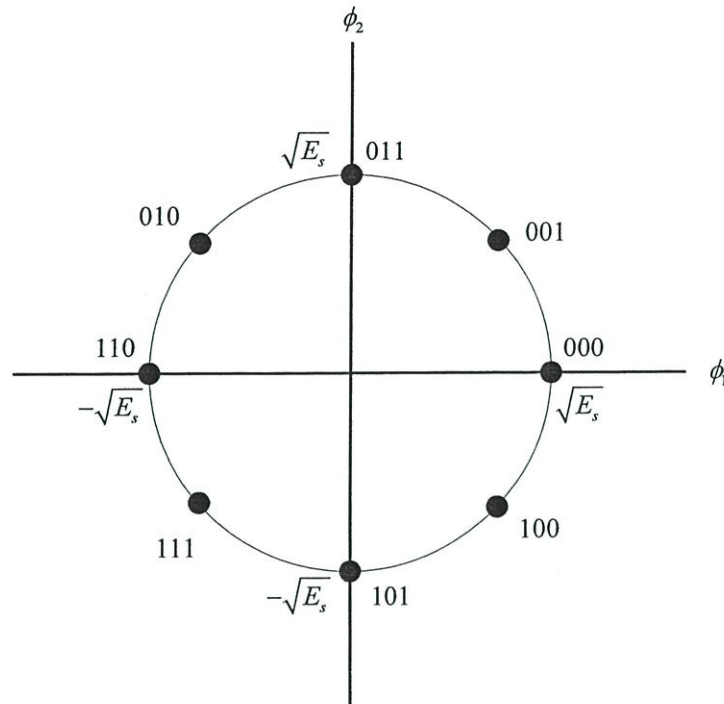
และ

$$\phi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (2.31)$$

เมื่อกำหนดสัมประสิทธิ์การคูณของฟังก์ชันเบซิสของสัญญาณ $s_i(t)$ แต่ละตัวจากความสัมพันธ์และนำสัญญาณแต่ละตัวมาเขียนในรูปของเวกเตอร์จะได้ผลดังนี้

$$s_i = \begin{bmatrix} \sqrt{E_s} \cos \frac{2\pi(i-1)}{M} \\ \sqrt{E_s} \sin \frac{2\pi(i-1)}{M} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

เราสามารถนำเวกเตอร์เหล่านี้ไปเขียนในระบบแกน ϕ_1 และ ϕ_2 ได้ ยกตัวอย่างเช่นกรณี $M = 8$ จะได้จุดสัญญาณจำนวน 8 จุดบนซิกแนลสเปซดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ซิกแนลสเตปของระบบ 8-PSK (M=8)

2.3 ความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity)

ความหลากหลายของช่องสัญญาณ[13] หรือไดเวอร์ซิตี (Diversity) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถช่วยให้การรับส่งสัญญาณมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องมีการเพิ่มบิตพิเศษ (Codebits) รวมเข้ากับบิตข้อมูล (Data bits) อย่างที่ต้องใช้ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel Codes) และยังไม่ต้องการส่งสัญญาณ ที่เรียกว่า Training sequence สำหรับการปรับค่าสัมประสิทธิ์การคูณของวงจรรีควอไลเซอร์ ซึ่งหมายถึงว่า ไม่มีการแบ่งเอาแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณ ไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของการรับ/ส่งสัญญาณเลย นอกจากนี้ ส่วนของอุปกรณ์ที่ต้องเพิ่มเข้ามาสำหรับการทำไดเวอร์ซิตี ก็มีราคาที่ไม่แพงจนเกินไป ดังนั้นเทคนิคไดเวอร์ซิตีจึงมีประโยชน์อย่างมากในทางปฏิบัติ

หลักการขอไดเวอร์ซิตี คือ การอาศัยคุณสมบัติพื้นฐาน ของการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณ ในระบบสื่อสารไร้สายซึ่งมักจะมีเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณหลายเส้นทางและโดยทั่วไปแล้ว ถ้าหากการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นทางหนึ่งถูกรบกวนอย่างมากจากการจางหาย ทำให้ สัญญาณที่รับมามีกำลังที่อ่อนมาก ก็อาจจะมีการรับสัญญาณจากเส้นทางอื่น ที่ให้สัญญาณที่รับมามีกำลังสูง ดังนั้นถ้าหากเราทำการติดตั้งจุดรับสัญญาณ มากกว่าหนึ่งแห่งก็จะสามารถรับสัญญาณได้จากหลายเส้นทาง จากนั้นระบบก็จะสามารถที่จะทำการเลือกเฉพาะสัญญาณที่มีกำลังสูง

มาใช้ได้ ซึ่งวิธีการนี้สามารถช่วยทำให้ค่า SNR ของสัญญาณที่ภาครับมีคุณภาพที่ดีขึ้นได้ สังเกตว่าคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ดีขึ้น โดยที่ทางภาครับสัญญาณมิได้มีส่วนเกี่ยวข้องด้วยเลย ซึ่งวิธีการไคเวอร์ซิตีชนิดที่นิยมใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้ คือ

2.3.1 ไคเวอร์ซิตีทางเวลา (Time Diversity)

ไคเวอร์ซิตีทางเวลา (Time Diversity) คือ การส่งสัญญาณข้อมูลเดิมซ้ำ มากกว่าหนึ่งครั้ง ที่เวลาแตกต่างกัน โดยการส่งแต่ละครั้งจะต้องเว้นช่วงเวลาให้ห่างกันมากพอ คือ ต้องมากกว่าช่วง Coherence time ของช่องสัญญาณ ผลที่ได้คือ ภาครับจะได้รับสัญญาณข้อมูลซ้ำหลายครั้ง โดยสัญญาณข้อมูลที่รับได้ในแต่ละครั้งนี้ จะได้รับผลกระทบจากเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในลักษณะที่แตกต่างกัน ค่าของ coherence time ขึ้นอยู่กับค่า Doppler spread ของคลื่นสัญญาณ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ และความถี่ของคลื่นพาห้ ตัวอย่างของการใช้งานเทคนิคไคเวอร์ซิตีทางเวลา คือ วงจร RAKE receiver ในระบบ CDMA

2.3.2 ไคเวอร์ซิตีทางความถี่ (Frequency Diversity)

ไคเวอร์ซิตีชนิดนี้ จะใช้ความถี่สองช่องสัญญาณ ระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับ ข้อมูลจะถูกส่งโดยเครื่องส่งสองตัว ที่ทำงานที่ความถี่แตกต่างกัน ซึ่งสัญญาณทั้งสองจะถูกรวมกันไปสู่ท่อนำคลื่นและสายอากาศตามลำดับ โดยสัญญาณจะถูกส่งออกไปในสายอากาศเดียวกัน (แต่อาจมีโพลาริเซชันต่างกัน) ที่ด้านรับสายอากาศจะรับสัญญาณและผ่านท่อนำคลื่นไปยังตัวกรองความถี่แยกความถี่ทั้งสองออกมา เครื่องรับแต่ละตัวก็จะแยกสัญญาณข้อมูลออกมา ด้วยวิธีการดังกล่าวก็จะทำให้สามารถลดผลกระทบจากการจางหายได้ ถ้าหากการแยกกันของความถี่ของเครื่องส่งสัญญาณมีมาก การจางหายซึ่งเกิดเฉพาะที่ความถี่หนึ่งๆ จะมีโอกาสน้อยมากที่จะเกิดกับสัญญาณทั้งสองความถี่พร้อมๆกัน จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบ สำหรับความถี่ที่ห่างกันประมาณ 2 เฮอร์เซ็นต์ ถือว่าเพียงพอ และถ้ายิ่งห่างกัน 5 เฮอร์เซ็นต์ ก็จะดีมากที่สุด ข้อเสียของไคเวอร์ซิตีทางความถี่คือ จะต้องใช้แถบความถี่มากกว่าปกติ จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับพื้นที่ในเมืองใหญ่ จำนวนช่องสัญญาณก็มีจำกัด การเพิ่มประสิทธิภาพของไคเวอร์ซิตีทางความถี่ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับไคเวอร์ซิตีแบบสเปซ จากการคำนวณพบว่าเพิ่มขึ้นเพียง 10 เท่า เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีไคเวอร์ซิตี

2.3.3 ไคเวอร์ซิตีทางสเปซ (Space Diversity) หรือ ไคเวอร์ซิตีทางสายอากาศ (Antenna Diversity)

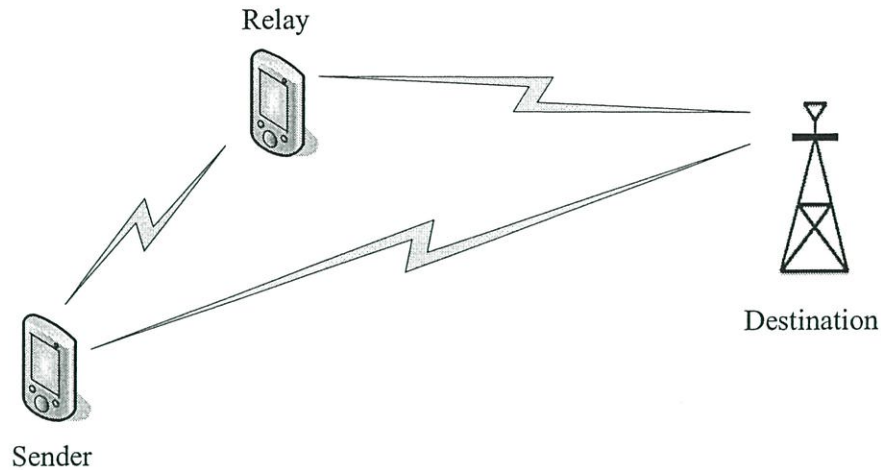
ไคเวอร์ซิตีชนิดนี้ เครื่องรับจะรับสัญญาณจากสายอากาศ ตั้งแต่สองคันขึ้นไป ซึ่งติดตั้งอยู่ห่างกัน เป็นระยะหลายเท่าของความยาวคลื่น โดยสัญญาณที่ได้รับจากแต่ละสายอากาศจะถูกต่อเข้ากับตัวไคเวอร์ซิตีคอมไบเนอร์ (Diversity Combiner) ซึ่งหน้าที่ของตัวคอมไบเนอร์ก็คือ จะทำการเลือกสัญญาณที่ดีที่สุดหรือทำการรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน ซึ่งก็แล้วแต่การออกแบบ สัญญาณ

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

จากด้านส่งจะเดินทางเป็นเส้นตรงสองเส้นทาง ไปยังสายอากาศทางด้านรับทั้งสองต้น และสัญญาณจากเครื่องส่งอาจจะเดินทางไปในอีกหลายเส้นทางที่แตกต่างกัน และเส้นทางที่สัญญาณเกิดมีความต่างเฟสกับสัญญาณทางตรง ก็จะทำให้เกิดการจางหายหลายวิธีขึ้นที่สายอากาศด้านรับ แต่สายอากาศทั้งสองต้นนั้น จะไม่เกิดการจางหายหลายวิธี ที่เหมือนกัน เพราะระยะทางของสายอากาศทั้งสองต้นแตกต่างกัน นั่นคือ แม้ว่าสัญญาณที่เดินทางในระยะทางจากสายอากาศด้านส่งไปยังสายอากาศด้านรับ ข้างใดข้างหนึ่งอาจเกิดการหักล้างทางเฟสกัน แต่ในสายอากาศด้านรับอีกข้างหนึ่งก็จะไม่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าว จากสถิติพบว่า การใช้ไดเวอร์ซิตีแบบสเปซทำให้คุณภาพของสัญญาณดีขึ้นหลายร้อยเท่า ซึ่งเป็นที่น่าพอใจมาก และสายอากาศมักติดตั้งห่างกันเป็นระยะทาง 200 เท่า ของความยาวคลื่นที่ใช้ จากการค้นพบว่า การจัดสายอากาศไดเวอร์ซิตีที่ดีที่สุดจะอยู่ในแนวอนให้สายอากาศอยู่ห่าง ๆ กัน นอกจากนี้ การใช้ไดเวอร์ซิตีแบบสเปซยังมีประสิทธิภาพดีกว่าฟรีควอนซีไดเวอร์ซิตี เพราะว่า ไดเวอร์ซิตีแบบสเปซ ใช้ความถี่น้อยกว่า และใช้สำหรับช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวก็จะประหยัดกว่าด้วย ไดเวอร์ซิตีแบบนี้มีประโยชน์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาผลกระทบจากการจางหาย เราจะใช้เทคนิคการรวมความหลากหลายของสัญญาณจากไดเวอร์ซิตีคอมไบเนอร์ สำหรับช่องสัญญาณ ซึ่งจะมีอยู่ 3 วิธีการหลักๆ คือ 1. วิธีการรวมสัญญาณแบบเลือก (Selection Combining) 2. วิธีการรวมสัญญาณแบบปรับปรุงอัตราส่วน SNR (Enhanced Signal to Noise Ratio combining : ESNRC) และ 3. วิธีการรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากัน (Equal Gain Combining) โดยทั้งหมดนี้จะอธิบายอย่างละเอียด ในหัวข้อต่อไป

2.4 ความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

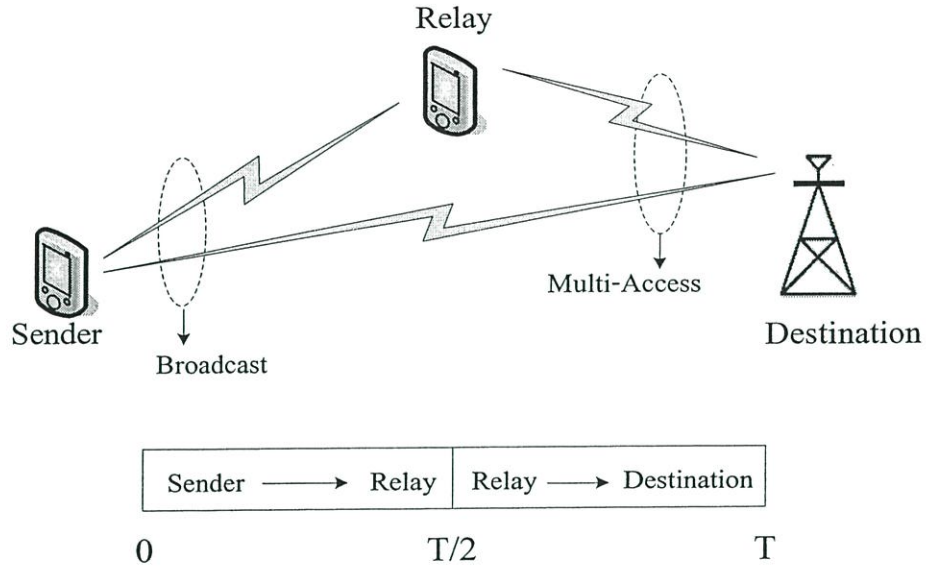
ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือคือ ระบบสื่อสารที่อาศัยผู้ใช้งานในโครงข่ายระบบสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication Network) ทำหน้าที่รับสัญญาณและช่วยส่งต่อสัญญาณที่รับได้ไปยังเครื่องรับปลายทางร่วมกัน โดยผู้ใช้ที่ส่งสัญญาณเป็นคนแรก เรียกว่า “เครื่องส่ง (Sender)” และผู้ใช้ที่ทำหน้าที่ช่วยส่งต่อสัญญาณ เรียกว่า “Relay” ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ซึ่งการช่วยส่งต่อสัญญาณจะทำให้เกิดการเพิ่มความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity gain) ขึ้นเหมือนในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก และส่งผลทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลลดลง ข้อดีของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมืออีกประการหนึ่งคือ การช่วยเพิ่มพิสัย (Range) ในการสื่อสารของผู้ใช้งานในโครงข่ายสื่อสารไร้สาย เนื่องจากผู้ใช้งานที่อยู่ใกล้เครื่องรับปลายทางสามารถช่วยส่งต่อข้อมูลของผู้ส่งซึ่งอยู่ห่างไกลออกไปมาก ๆ ได้ ซึ่งทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าอันจำกัด จากแบตเตอรี่ของผู้ส่งข้อมูลในระบบ ลดลงได้ ทำให้สามารถสื่อสารได้นานขึ้น



รูปที่ 2.6 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

2.4.1 แบบจำลองระบบและการเข้าถึงช่องสัญญาณ

การส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ จะพิจารณาการส่งสัญญาณในแบบทิศทางเดียว คือ การสื่อสารในทิศทางจากผู้ใช้งานไปยังเครื่องรับปลายทาง โดยมีการแบ่งช่องสัญญาณออกเป็นหลายๆ ช่องสัญญาณที่ตั้งฉากกัน และมีการเข้าถึงช่องสัญญาณจากผู้ใช้งานคนได้ 3 แบบคือ การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access : FDMA) การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access: TDMA) และการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access: CDMA) เพื่อความสะดวกในการอธิบาย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะพิจารณาการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA และให้เวลาสำหรับการส่งสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานทั้งหมดไปยังเครื่องรับมีกระบวนการซิงโครไนซ์ (Synchronization) อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.7 การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

การส่งสัญญาณแบบร่วมมือสำหรับระบบสื่อสารไร้สายในภาพที่ 2.7 ซึ่งกำหนด ให้ผู้ใช้คนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง และผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Relay ดังนั้นจึงสามารถแบ่ง การส่งสัญญาณออกเป็น 2 เฟสดังนี้

ช่วงที่ 1 $\left(0 - \frac{T}{2}\right)$ เป็นช่วงเวลาที่ผู้ใช้คนที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งกระจายสัญญาณ ไปยังเครื่องรับปลายทางและผู้ใช้งานที่ 2 พร้อม ๆ กัน โดยอาศัยคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าออกไปรอบทิศทางของช่องสัญญาณไร้สาย ดังสมการที่ (2.33) และ (2.34)

$$y_{sd}(n) = \sqrt{P_s} h_{sd} x_s(n) + n_{sd}(n) \quad (2.33)$$

$$y_{sr}(n) = \sqrt{P_s} h_{sr} x_s(n) + n_{sr}(n) \quad (2.34)$$

- เมื่อ
- $x_s(n)$ คือ ข้อมูลที่ส่งออกจากเครื่องส่ง
 - h_{sd} คือ ช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ
 - h_{sr} คือ ช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและ Relay
 - $n_{sd}(n)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ
 - $n_{sr}(n)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องส่งและ Relay
 - P_s คือ กำลังส่งสัญญาณจากเครื่องส่ง

ช่วงที่ 2 $\left(\frac{T}{2} - T\right)$ เป็นช่วงเวลาที่ใช้คนที่ 2 ซึ่งทำหน้าที่เป็น Relay ช่วยส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับปลายทาง ดังสมการที่ (2.35)

$$y_{rd}(n) = \sqrt{P_{rd}} h_{rd} \hat{x}_s(n) + n_{rd}(n) \quad (2.35)$$

สัญญาณที่ปลายทาง (Destination)

$$y_{srd}(n) = y_{sd}(n) + y_{rd}(n) \quad (2.36)$$

- เมื่อ $y_{srd}(n)$ คือ สัญญาณที่ปลายทาง
 h_{rd} คือ ช่องสัญญาณระหว่าง Relay กับปลายทาง
 $n_{rd}(n)$ คือ สัญญาณรบกวน Relay กับปลายทาง
 P_{rd} คือ กำลังที่ใช้ส่งสัญญาณ เท่ากับ 1

2.4.2 โพรโทคอลสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

ในปัจจุบันได้มีการนำเสนอโพรโทคอลสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือไว้ 3 รูปแบบดังต่อไปนี้

2.4.2.1. โพรโทคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง (Fixed Relaying Protocol)

โพรโทคอลแบบนี้มีหลักการคือ มีการกำหนดจำนวนและระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็น Relay คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการสื่อสาร โพรโทคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนน้อยที่สุด

2.4.2.2. โพรโทคอลแบบเลือก (Selecting Relaying Protocol) โพรโทคอล

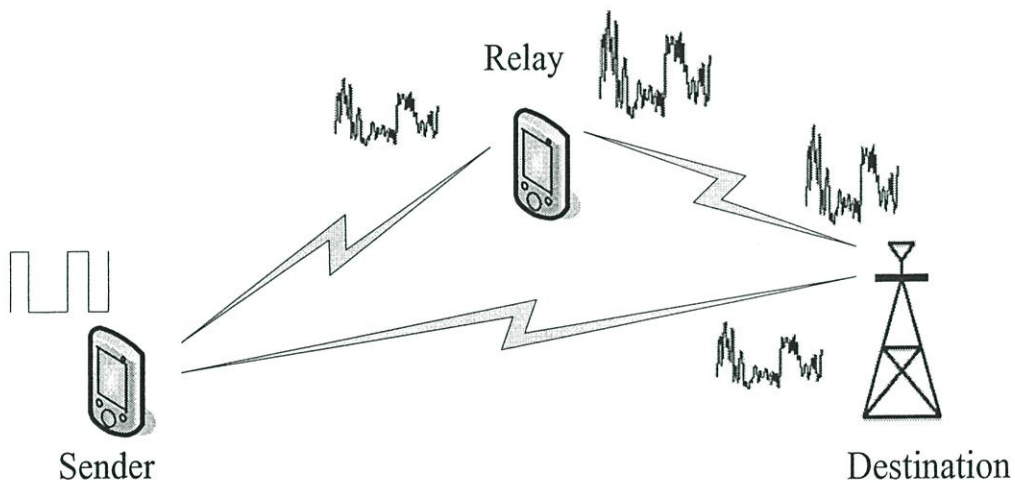
แบบนี้จะมีหลักการ คือ ไม่มีการกำหนดจำนวนและระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็น Relay ที่คงที่ โดยมีวิธีการเลือกผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็น Relay จากค่าขนาดของสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและผู้ใช้ที่จะถูกเลือกเป็น Relay ที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งโพรโทคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนมากกว่าโพรโทคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง

2.4.2.3. โพรโทคอลแบบมีการป้อนกลับ (Incremental Relaying Protocol)

โพรโทคอลแบบนี้จะมีลักษณะคล้ายๆกับโพรโทคอลแบบเลือก Relay เพียงแต่มีการเพิ่มเงื่อนไขการเลือกผู้ทำหน้าที่เป็น Relay มากขึ้น และจุดเด่นของโพรโทคอลนี้ก็คือ เครื่องรับจะทำการส่งข้อความตอบกลับไปยังผู้ใช้ทุกคน เพื่อให้ทราบสถานะของการส่งสัญญาณในแต่ละครั้ง หากการส่งข้อมูลนั้นไม่มีความผิดพลาด เครื่องรับจะส่งข้อความกลับมายังผู้ใช้ทุกคน เพื่อให้รับทราบ

สถานะของการส่งที่สมบูรณ์จึงทำให้ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay ไม่ต้องส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ แต่ถ้าหากการส่งข้อมูลเกิดความผิดพลาดเครื่องรับจะส่งข้อความกลับมายังผู้ใช้ทุกคนเพื่อรับทราบสถานะของการส่งที่ไม่สมบูรณ์และมีการร้องขอให้มีการส่งข้อมูลใหม่จากผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay โพรโตคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนสูงที่สุดการหาประสิทธิภาพของโพรโตคอลทั้งหมดนี้สามารถทำได้โดย การหาความน่าจะเป็นของสัญญาณที่ขาดหาย (Outage probability) และจะเห็นได้ว่าโพรโตคอลในแต่ละแบบจะมีความซับซ้อนแตกต่างกัน และมีประสิทธิภาพที่ต่างกันด้วย โดยโพรโตคอลแบบมีการป้อนกลับจะมีประสิทธิภาพสูงสุด และโพรโตคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง จะมีประสิทธิภาพต่ำสุดการส่งต่อสัญญาณจาก Relay ไปยังเครื่องรับ สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบด้วยกัน คือ Amplify and Forward (AF) และ Decode and Forward (DF)

1. Amplify and Forward คือผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay จะทำการขยายสัญญาณที่รับได้ให้มีขนาดแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนด แล้วส่งต่อไปยังเครื่องรับปลายทาง ดังแสดงในภาพที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การส่งต่อสัญญาณแบบ AF ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

จากการจำลองและการเข้าถึงช่องสัญญาณในภาพที่ 2.5 Relay จะทำการขยายสัญญาณที่รับได้ให้มีแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนด และส่งต่อสัญญาณที่ได้รับไปยังเครื่องรับปลายทาง ซึ่งผลของข้อมูลที่ได้ จะเป็นดังสมการที่ (2.37)

$$y_{rd}(n) = \beta y_{sr}(n) \quad ; \quad n = \frac{T}{2} + 1 \dots T \quad (2.37)$$

เมื่อ y_{sr} คือ สัญญาณที่ Relay รับได้จากเครื่องส่ง

β คือ อัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณ $\beta \leq \sqrt{\frac{P_s}{|h_{sr}|^2 P_s + N_0}}$

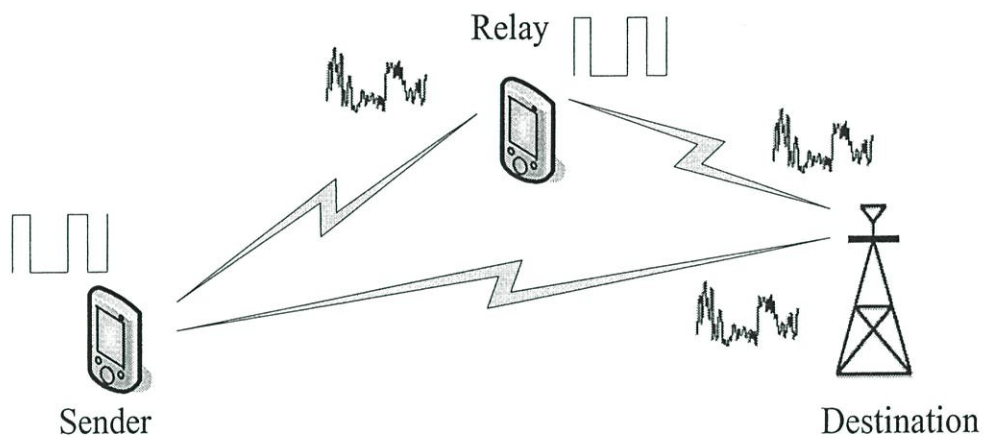
T คือ ช่วงเวลาใดๆ ที่ใช้ในการรับ-ส่งสัญญาณ

และ

h_{sr} คือ ช่องสัญญาณสำหรับการส่งข้อมูลระหว่างเครื่องส่งและ Relay

N_0 คือ แวเรียนซ์ของสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN)

2. Decode and Forward ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay จะถอดรหัสสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณเดิมที่ส่งมาจากเครื่องส่ง แล้วส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ ดังแสดงในภาพที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การส่งต่อสัญญาณแบบ DF ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

จากการจำลองและการเข้าถึงช่องสัญญาณในภาพที่ 2.9 Relay จะทำการถอดรหัสสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณเดิมที่ส่งมาจากเครื่องส่ง แล้วส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ ซึ่งข้อมูลที่ได้ เป็นดังสมการที่ (2.38)

$$x_r(n) = \hat{x}_s(n) \quad ; n = \frac{T}{2} + 1 \dots T \quad (2.38)$$

เมื่อ $\hat{x}_s(n)$ คือ ข้อมูลจากเครื่องส่ง ซึ่งถูกถอดรหัสจาก Relay

2.5 การปรับแต่งช่องสัญญาณ

การส่งผ่านสัญญาณในระบบสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบดิจิทัล มีปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งที่เรียกว่า Intersymbol Interference (ISI) ซึ่งเกิดจากผลกระทบของมัลติพาทที่เกิดขึ้นภายในช่องสัญญาณที่สัญญาณส่งผ่าน ผลกระทบของ ISI ทำให้สัญญาณที่ส่งผ่านมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไป และส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่รับได้ที่ภาครับ วิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการจัดการกับปัญหา ISI นี้ก็คือการใช้วงจรที่เรียกว่า อีควอลไลเซอร์ (Equalizer) ไปติดตั้งที่ภาครับสัญญาณ วงจรอีควอลไลเซอร์มีหน้าที่ในการปรับแก้รูปสัญญาณให้มีคุณลักษณะที่ดีขึ้นเพื่อให้การดึงสัญญาณเดิมกลับคืนมา มีความถูกต้องมากขึ้น เนื่องจากคุณลักษณะของช่องสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการแปรเปลี่ยนไปตามเวลา ดังนั้น โดยปกติแล้ววงจรอีควอลไลเซอร์ที่ใช้ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ จะต้องสามารถปรับตัวได้ (Adaptive) นั่นคือคุณสมบัติหรือพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรจะต้องสามารถเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพของช่องสัญญาณที่มักจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ดังนั้นจึงเรียกวงจรดังกล่าวว่า วงจรอีควอลไลเซอร์แบบปรับตัวได้ (Adaptive Equalizer)

หลักการทำงานของวงจรอีควอลไลเซอร์แบบปรับตัวได้ จะแบ่งการส่งสัญญาณออกเป็น 2 ช่วงสลับกันไปตลอด ในช่วงแรกภาคส่งจะส่งชุดบิตที่เรียกว่า ชุดลำดับการฝึก (Training sequence) ไปให้ภาครับ ซึ่งรูปแบบของชุดบิตที่ว่านี้ ภาครับจะทราบค่าอยู่ล่วงหน้าแล้ว ชุดบิตเหล่านี้อาจจะมีรูปแบบตายตัวหรืออาจจะเป็น Pseudorandom binary ก็ได้ ในช่วงที่ภาครับได้รับชุดบิตดังกล่าว ภาครับก็จะทำการคำนวณและปรับค่าสัมประสิทธิ์ของฟิลเตอร์ในวงจรอีควอลไลเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพของช่องสัญญาณในขณะนั้น เมื่อภาคส่งสิ้นสุดการส่งชุดลำดับการฝึกก็จะเข้าสู่ช่วงที่สอง ซึ่งเป็นช่วงที่ภาคส่งจะทำการส่งบิตข้อมูลของผู้ใช้ตามไป ในช่วงนี้ที่ภาครับจะใช้วงจรอีควอลไลเซอร์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณไว้มาใช้ในการดึงสัญญาณข้อมูลกลับมาเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องที่สุด จะเห็นว่าคุณลักษณะของวงจรอีควอลไลเซอร์จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพของช่องสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งมักจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและสามารถจัดการกับปัญหาของ ISI ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากกลไกการทำงานของอีควอลไลเซอร์ในลักษณะนี้ จึงเป็นวิธีที่มีประโยชน์อย่างมากในระบบ TDM ซึ่งมีการจัดแบ่งเวลาการส่งสัญญาณออกเป็นบล็อกที่ชัดเจน โดยระบบจะส่งชุดลำดับการฝึกสลับการส่งบิตข้อมูลของผู้ใช้

2.5.1 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรปรับแต่งช่องสัญญาณ

วงจรอีควอลไลเซอร์ประกอบด้วยอุปกรณ์หนึ่งช่วงเวลาจำนวน N ชุด วงจรคูณสัญญาณจำนวน $N+1$ ชุด และวงจรวกสัญญาณ รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของวงจรอีควอลไลเซอร์ใน

ช่วงเวลาที่อยู่ระหว่างการปรับค่าสัมประสิทธิ์การคูณ (Weights) ที่ขาเข้าของวงจรจะมีสัญญาณ y_k ค่าใหม่เข้าทุกๆ ช่วงเวลา ค่าของ y_k นี้มีขนาดไม่แน่นอน เพราะแปรเปลี่ยนไปตามสภาพของช่องสัญญาณและปริมาณของสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณในขณะนั้นๆ ดังนั้นจึงกล่าวว่า y_k เป็นกระบวนการเรณดอม (Random process) โครงสร้างของวงจรที่ต่อเชื่อมในลักษณะนี้มีชื่อเรียกว่า Transversal filter ค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้แปรเปลี่ยนตามเวลาในช่วงที่ระบบกำลังหาค่าที่เหมาะสม ค่า w เหล่านี้อาจจะมีการปรับเปลี่ยนในทุกๆ ครั้งที่มีการเพิ่มขึ้นของค่า k หรืออาจจะเปลี่ยนหลังจากที่มีข้อมูลขาเข้าจำนวนหนึ่งบล็อก

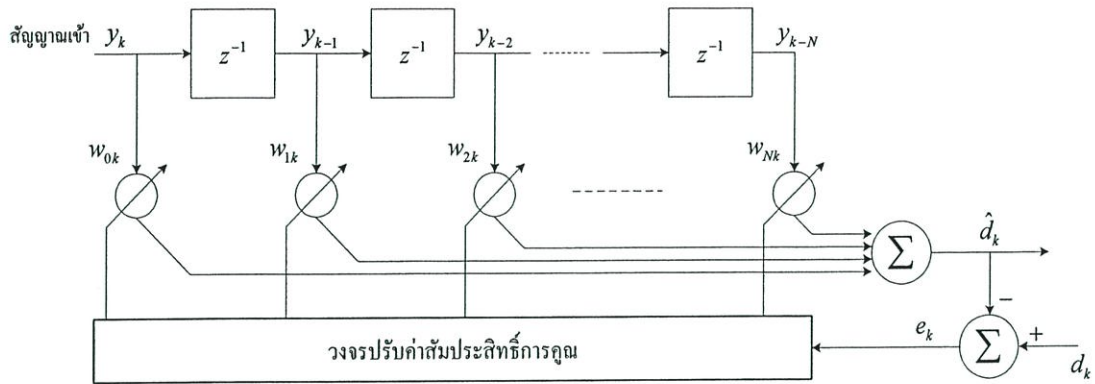
กรรมวิธีหรืออัลกอริทึมในการปรับค่าสัมประสิทธิ์จะขึ้นอยู่กับค่า e_k เป็นสำคัญ โดย e_k คือผลต่างที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่า d_k กับค่า \hat{d}_k ซึ่งโดยทั่วไปอัลกอริทึมที่ใช้ก็จะพยายามปรับสัมประสิทธิ์การคูณในทิศทางที่ทำให้ค่าฟังก์ชันต้นทุน (Cost function) ที่สนใจมีขนาดลดต่ำลงเรื่อยๆ ค่าฟังก์ชันต้นทุนที่นิยมใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์แบบหนึ่งคือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาด (Mean Square Error : MSE) ระหว่างค่าของสัญญาณที่ต้องการกับค่าของสัญญาณที่ได้จากวงจรอีควอไลเซอร์ สำหรับตัวอย่างอัลกอริทึมชนิดหนึ่งที่ใช้งานทั่วไปในการคำนวณและปรับค่าสัมประสิทธิ์คือ กรรมวิธี Least Mean Squares (LMS) โดยในการคำนวณและปรับค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสม

$$\text{New weights} = \text{Previous} + (\text{Constant} \times \text{Previous error} \times \text{Current input}) \quad (2.29)$$

โดยที่

$$\text{Previous error} = \text{Previous desired output} - \text{Previous actual output} \quad (2.30)$$

สำหรับค่าคงที่ (Constant) ที่ใช้นั้นสามารถที่จะปรับเปลี่ยนไปได้ในการคำนวณแต่ละรอบเพื่อควบคุมอัตราการเปลี่ยนของค่าสัมประสิทธิ์ให้เหมาะสม การคำนวณปรับค่าสัมประสิทธิ์ของการคูณจะกระทำซ้ำไปเรื่อยๆ หลายรอบจนกระทั่งค่าสัมประสิทธิ์เริ่มจะอยู่ตัวและเข้าใกล้ค่าที่ดีที่สุด เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมแล้วกระบวนการปรับค่าสัมประสิทธิ์ก็จะหยุดลง ช่วงเวลาถัดมาก็จะใช้ในการรับส่งบิตข้อมูลของผู้ใช้ ในช่วงเวลานี้จะใช้ชุดสัมประสิทธิ์ที่หาได้ไปจนกระทั่งมีความจำเป็นที่จะต้องปรับค่าสัมประสิทธิ์ใหม่อีกครั้ง



รูปที่ 2.10 โครงสร้างวงจรอีควอไลเซอร์ที่มีการปรับสัมประสิทธิ์การคูณ

จากโครงสร้างของวงจรอีควอไลเซอร์ในรูปที่ 2.10 เราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมได้โดยวิธีการต่อไปนี้
กำหนดให้เวกเตอร์ \mathbf{y}_k แทนสัญญาณขาเข้าของวงจรอีควอไลเซอร์

$$\mathbf{y}_k = [y_k \quad y_{k-1} \quad y_{k-2} \quad \cdots \quad y_{k-N}]^T \quad (2.31)$$

และให้เวกเตอร์ \mathbf{w}_k แทนค่าสัมประสิทธิ์การคูณของวงจรอีควอไลเซอร์

$$\mathbf{w}_k = [w_{0k} \quad w_{1k} \quad w_{2k} \quad \cdots \quad w_{Nk}]^T \quad (2.32)$$

เราสามารถแสดงสัญญาณที่ขาออกซึ่งมีค่าเท่ากับ $\hat{d}_k = \sum_{n=0}^N w_{nk} y_{k-n}$ ในรูปของเวกเตอร์ได้เป็น

$$\hat{d}_k = \mathbf{y}_k^T \mathbf{w}_k = \mathbf{w}_k^T \mathbf{y}_k \quad (2.33)$$

ในช่วงที่วงจรทราบค่าของชุดข้อมูล d_k (Desired response) ค่าความแตกต่างหรือความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ

$$e_k = d_k - \hat{d}_k \quad (2.34)$$

จากสมการ (2.33) จะได้

$$e_k = d_k - \mathbf{y}_k^T \mathbf{w}_k = d_k - \mathbf{w}_k^T \mathbf{y}_k \quad (2.35)$$

$$|e_k|^2 = d_k^2 - \mathbf{w}_k^T \mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^T \mathbf{w}_k - 2d_k \mathbf{y}_k^T \mathbf{w}_k \quad (2.36)$$

กำหนดให้เวกเตอร์ \mathbf{p} แทนสหสัมพันธ์ไขว้ (Cross correlation) ระหว่างสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่ขาเข้า

$$\mathbf{p} = E[d_k \mathbf{y}_k] = E[d_k y_k \quad d_k y_{k-1} \quad d_k y_{k-2} \quad \cdots \quad d_k y_{k-N}]^T \quad (2.37)$$

และกำหนดให้เมทริกซ์ \mathbf{R} แทนเมทริกซ์สหสัมพันธ์ของขาเข้า (Input correlation matrix) ที่มีขนาดเท่ากับ $(N+1) \times (N+1)$ หรือบางทีเรียกว่า โคแวลเรียนซ์เมทริกซ์ของขาเข้า

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^T] = E \begin{bmatrix} y_k^2 & y_k y_{k-1} & y_k y_{k-2} & \cdots & y_k y_{k-N} \\ y_{k-1} y_k & y_{k-1}^2 & y_{k-1} y_{k-2} & \cdots & y_{k-1} y_{k-N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{k-N} y_k & y_{k-N} y_{k-1} & y_{k-N} y_{k-2} & \cdots & y_{k-N}^2 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

ถ้าหาก x_k และ y_k มีคุณลักษณะที่เป็นสแตชันนารี (Stationary) จะได้ว่าเทอมต่างๆ ใน \mathbf{p} และ \mathbf{R} ก็จะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จากสมการข้างต้นจะได้ Mean Square Error (MSE)

$$MSE = \xi = E[d_k^2] + \mathbf{w}^T \mathbf{R} \mathbf{w} - 2\mathbf{p}^T \mathbf{w} \quad (2.39)$$

จากสมการนี้เราสามารถหาค่าเวกเตอร์ \mathbf{w} ที่ทำให้ค่า MSE มีขนาดต่ำที่สุด (Minimum MSE หรือ MMSE) ได้โดยการหาค่าเกรเดียนต์ของ ξ

$$\nabla = \frac{\partial \xi}{\partial \mathbf{w}} = \left[\frac{\partial \xi}{\partial w_0} \quad \frac{\partial \xi}{\partial w_1} \quad \cdots \quad \frac{\partial \xi}{\partial w_N} \right]^T \quad (2.40)$$

เมื่อหาอนุพันธ์ของ ξ โดยเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การคูณแต่ละค่าจนครบก็จะได้

$$\nabla = 2\mathbf{R}\mathbf{w} - 2\mathbf{p} \quad (2.41)$$

กำหนดให้ $\nabla = 0$ เพื่อหาค่าที่ต่ำที่สุดของ MSE ผลลัพธ์ที่ได้คือชุดสัมประสิทธิ์ $\hat{\mathbf{w}}$ ที่เหมาะสม

$$\hat{\mathbf{w}} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{p} \quad (2.42)$$

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้ไปแทนในสมการ (2.39) จะได้

$$MMSE = \xi_{\min} = E[d_k^2] + \mathbf{p}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p} = E[d_k^2] - \mathbf{p}^T \hat{\mathbf{w}} \quad (2.43)$$

2.5.1 อัลกอริทึม Least Mean Square (LMS)

สำหรับวงจรอีควอไลเซอร์แบบเชิงเส้นที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 นั้น เราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ในสมการ (2.42) หากแต่เนื่องจากการหาค่าเมทริกซ์ผกผันของ \mathbf{R} ในสมการ (2.42) โดยตรงนั้นค่อนข้างมีความซับซ้อนมาก โดยเฉพาะในกรณีที่วงจรอีควอไลเซอร์ประกอบด้วยอุปกรณ์หน่วยเวลาจำนวนมากและมีการป้อนข้อมูลสุ่มด้วยอัตราที่เร็วมาก ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำเทคนิคที่เรียกว่า Steepest descent มาใช้ในการหาชุดสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมแทน สำหรับขั้นตอนการทำงานของเทคนิคดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

1. กำหนดค่าตั้งต้นให้กับเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ $\mathbf{w}(0)$ ซึ่งเราสามารถกำหนดให้มีค่าได้อย่างอิสระ ค่านี้จึงเหมือนเป็นจุดเริ่มแรกในการค้นหาจุดต่ำสุดของระบบในลำดับต่อไป สำหรับค่าที่ใช้กันทั่วไปคือตั้งให้มีค่าเป็น 0 ทั้งหมด
2. จากจุดเริ่มต้นดังกล่าวให้คำนวณหาเวกเตอร์เกรเดียนต์ (Gradient vector) ของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดยกกำลังสอง $J(n)$ เทียบกับเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ $\mathbf{w}(n)$ สังเกตว่าเราได้ใช้ตัวแปร $J(n)$ แทนที่ ξ ซึ่งมีดัชนี n เพิ่มเข้ามาเพื่อใช้บ่งบอกถึงรอบหรือครั้งของการปรับตัว
3. ปรับค่าเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ใหม่โดยอาศัยเวกเตอร์เกรเดียนต์ในการบอกทิศทางของการปรับตัว กล่าวคือ จะปรับในทิศทางที่ตรงข้ามกับค่าของเวกเตอร์เกรเดียนต์คำนวณค่าเฉลี่ยความผิดพลาดยกกำลังสอง (MSE) ใหม่โดยใช้เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ชุดใหม่
4. กลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 ใหม่

จากคำอธิบายถึงขั้นตอนการทำงาน หากนำมาพิจารณาในเชิงสมการทางคณิตศาสตร์จะได้ผลดังนี้ กำหนดให้ $\mathbf{w}(n)$ แทนเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ที่เวลา n และกำหนดให้ $\nabla(n)$ แทนเวกเตอร์เกรเดียนต์คำนวณ ณ เวลา n การปรับค่าสัมประสิทธิ์จะมีความสัมพันธ์คือ

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \frac{1}{2} \mu [-\nabla(n)] \quad (2.44)$$

โดยที่ μ เป็นตัวเลขคงที่ค่าบวก
และจากสมการที่ (2.42) เวกเตอร์เกรเดียนต์มีค่าดังนี้คือ

$$\nabla(n) = \frac{\partial J(n)}{\partial \mathbf{w}(n)} = -2\mathbf{p} + 2\mathbf{R}\mathbf{w}(n) \quad (2.45)$$

ในการคำนวณตรงนี้จำเป็นที่เราจะต้องทราบค่าของเมทริกซ์สหสัมพันธ์ของขาเข้า \mathbf{R} และเวกเตอร์สหสัมพันธ์ไขว้ \mathbf{p} จากระบบที่พิจารณา จากนั้นแทนค่า $\nabla(n)$ ตามสมการ (2.45) ลงในสมการ (2.44) ผลที่ได้คือ

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu[\mathbf{p} - \mathbf{R}\mathbf{w}(n)] \quad (2.46)$$

กระบวนการของเทคนิค Steepest descent จะกระทำแบบวนซ้ำจนกระทั่งเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ที่ได้ลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสม สังเกตว่า μ คือ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดช่วงเวลาการปรับแต่ละครั้ง หากตั้งให้มีค่าที่ใหญ่กระบวนการปรับสัมประสิทธิ์จะลู่เข้าสู่จุดอยู่ตัวของระบบได้อย่างรวดเร็ว แต่ถ้าใหญ่มากเกินไป ผลที่ได้จากการปรับจะไม่ดี เพราะระบบอาจจะแกว่งไปมาไม่ลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสม

จากที่กล่าวมาทั้งหมด จะเห็นได้ว่าการปรับค่าสัมประสิทธิ์จำเป็นที่จะต้องทราบค่าเวกเตอร์เกรเดียนต์ในการปรับแต่ละรอบ และจะต้องเลือกค่าคงที่ μ ให้เหมาะสมกับระบบ ระบบจึงจะให้ผลที่ถูกต้องและลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสม ในทางปฏิบัติเป็นเรื่องยากที่จะสามารถวัดค่าเวกเตอร์เกรเดียนต์ให้ถูกต้อง ดังนั้นการใช้งานจริงจึงมักจะต้องอาศัยการประมาณค่าแทน โดยจะประมาณจากข้อมูลที่รับได้ กรรมวิธีการประมาณวิธีหนึ่งมีชื่อเรียกว่าอัลกอริทึม Least Mean Square (LMS) การประมาณของอัลกอริทึม LMS จะใช้ข้อมูลที่ได้รับ ณ ขณะนั้นๆ มาใช้แทนในเมทริกซ์ \mathbf{R} และเวกเตอร์ \mathbf{p} เพื่อใช้ในการประมาณเวกเตอร์เกรเดียนต์ นั่นคือ

$$\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{y}(n)\mathbf{y}^T(n) \quad (2.46)$$

$$\hat{\mathbf{p}} = \mathbf{y}(n)d(n) \quad (2.47)$$

โดยเวกเตอร์ $\mathbf{y}(n)$ ก็คือ เวกเตอร์ \mathbf{y}_k ที่กำหนดในสมการ (2.31) และ $d(n)$ ก็คือ d_k ด้วยเช่นกัน

สำหรับค่าประมาณของเวกเตอร์เกรเดียนต์สามารถคำนวณได้เป็น

$$\hat{\nabla} = -2\mathbf{y}(n)d(n) + 2\mathbf{y}(n)\mathbf{y}^T(n)\hat{\mathbf{w}}(n) \quad (2.48)$$

นำเวกเตอร์เกรเดียนต์ที่คำนวณได้ไปแทนลงในสมการ (2.44)

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{w}}(n+1) &= \hat{\mathbf{w}}(n) + \mu\mathbf{y}(n)[d(n) - \mathbf{y}^T(n)\hat{\mathbf{w}}(n)] \\ &= \hat{\mathbf{w}}(n) + \mu\mathbf{y}(n)e(n) \end{aligned} \quad (2.49)$$

จากที่ได้อธิบายมาทั้งหมด เราสามารถสรุปการทำงานของอัลกอริทึม LMS ได้ดังนี้ ขั้นแรกจะทำการเลือกค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์ชุดหนึ่ง โดยเรนคอมหรือโดยกำหนดให้เป็นศูนย์ทั้งหมด จากนั้นทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์แต่ละค่าเหล่านั้นทีละนิดเพื่อให้ได้ค่า MSE ที่มีขนาดต่ำลงเรื่อยๆ โดยการปรับในแต่ละรอบนั้นจะอาศัยสมการต่อไปนี้

$$d(n) = \mathbf{w}^T(n)\mathbf{y}(n) \quad (2.50)$$

$$e(n) = x(n) - d(n) \quad (2.51)$$

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu\mathbf{y}(n)e(n) \quad (2.52)$$

โดย n เป็นค่าที่บ่งถึงรอบของการปรับค่าสัมประสิทธิ์ μ คือ ค่าคงที่เล็กๆ ค่าหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมอัตราการลู่เข้าของค่าสัมประสิทธิ์แต่ละรอบ โดยค่านี้ควรจะเล็กพอที่จะทำให้การปรับค่าสัมประสิทธิ์มีเสถียรภาพ สามารถลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมได้โดยไม่มีปัญหาการแกว่ง

2.6 วิธีการรวมสัญญาณในช่องสัญญาณที่มีความหลากหลาย

เนื่องจากระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ มีการรับสัญญาณชุดเดียวกันจากเครื่องส่งและ Relay ในแต่ละช่องสัญญาณที่แตกต่างกันจึงต้องมีการรวมสัญญาณ เพื่อให้ได้สัญญาณที่ดีที่สุดไปใช้งานยกตัวอย่าง เช่น ระบบสื่อสารไร้สายมีความหลากหลายของช่องสัญญาณมีเท่ากับ 2 ดังนั้น จึงทำให้สามารถรวมสัญญาณ ได้ดังนี้

เมื่อกำหนดให้ $f_1(t)$ เป็นสัญญาณที่รับมาจากช่องสัญญาณ h_1 และ $f_2(t)$ เป็นข้อมูลที่ได้รับมาจากช่องสัญญาณ h_2 ดังนั้นผลรวมของสัญญาณของแต่ละช่องสัญญาณเท่ากับ

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) \quad (2.53)$$

ถ้าพิจารณาระบบสื่อสารที่มีความหลากหลายทางด้านรับมีจำนวนเท่ากัน N สามารถรวมสัญญาณได้ดังสมการ (2.54)

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) + \dots + f_n(t) = \sum_{j=1}^N f_j(t) \quad (2.54)$$

เนื่องจากระบบที่ทำการศึกษาคือระบบมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น จึงทำให้ระบบมีอัตราการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณ a_j แสดงได้ดังสมการ (2.55)

$$f(t) = a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) + \dots + a_n f_n(t) = \sum_{j=1}^N a_j f_j(t) \quad (2.55)$$

โดยกำหนดให้

$$f_j(t) = x_j(t) \cdot m(t) + n_j(t)$$

$x_j(t)$ คือ กำลังที่ใช้สำหรับการข้อมูลจากเครื่องส่ง

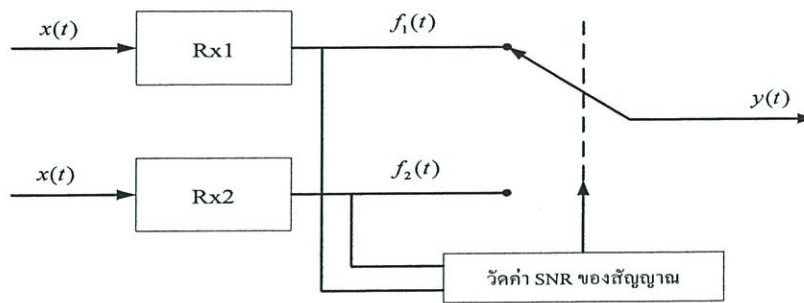
$m(t)$ คือ ข้อมูลที่ต้องการส่ง

a_j คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณ

$n_j(t)$ คือ สัญญาณรบกวนของแต่ละช่องสัญญาณทางด้านเครื่องรับ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการรวมสัญญาณไว้ทั้งหมด 3 วิธี ดังนี้

2.6.1 วิธีการรวมสัญญาณแบบเลือก (Selection Diversity)



รูปที่ 2.13 บล็อกไดอะแกรมวิธีการรวมสัญญาณแบบเลือก

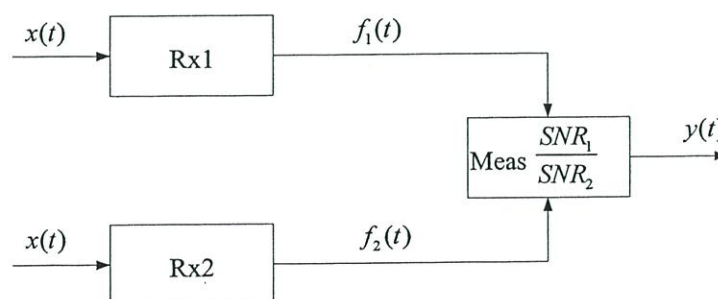
วิธีการนี้จะทำการรวมสัญญาณโดยเลือกสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณที่ดีที่สุดเพียง 1 สัญญาณเท่านั้น ซึ่งจะทำให้การพิจารณาเลือกสัญญาณที่มีค่า SNR มากที่สุด ของสัญญาณที่รับมาทั้งหมด จากสมการที่ (2.56) กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณได้ดังนี้

$$a_j(t) = \begin{cases} 1, & \text{for } j = k \\ 0, & \text{for } j \neq k \end{cases} \quad (2.56)$$

เมื่อกำหนดให้ k คือ ช่องสัญญาณที่ถูกเลือก

2.6.2 วิธีการรวมสัญญาณแบบปรับปรุงอัตราส่วน SNR (Enhanced Signal to Noise

Ratio combining : ESNRC)



รูปที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมวิธีการรวมสัญญาณแบบ ESNRC

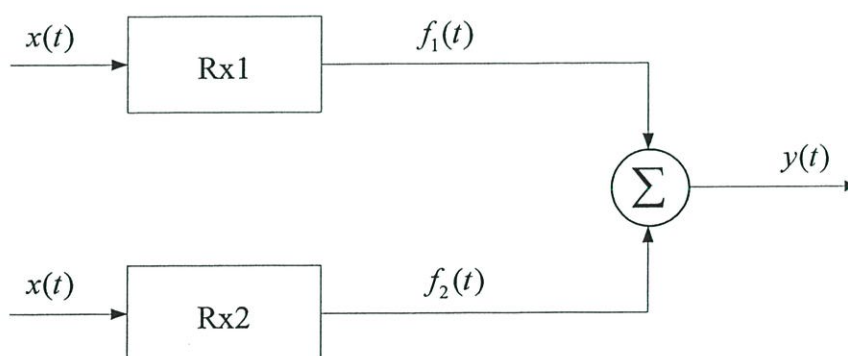
หลักการรวมสัญญาณที่ปลายทางด้วยวิธี ESNRC เป็นการกำหนดเงื่อนไขของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Enhanced Signal to Noise Ratio : ESNRC) สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$y_d = \frac{SNR_{sd}}{SNR_{rd}} \quad (2.57)$$

ดังนั้นเงื่อนไขการรวมสัญญาณแบบ ESNRC เป็นดังนี้

$$y_d(n) = \begin{cases} y_{sd}(n) & \left(\frac{SNR_{sd}}{SNR_{srd}} > 10\right) \\ y_{sd}(n) + y_{srd} & \left(0.1 \leq \frac{SNR_{sd}}{SNR_{srd}} \leq 10\right) \\ y_{srd}(n) & \left(\frac{SNR_{sd}}{SNR_{srd}} < 0.1\right) \end{cases} \quad (2.58)$$

2.6.3 วิธีการรวมสัญญาณแบบรวมด้วยอัตราส่วนเท่ากัน (Equal Ratio Combining : ERC)



รูปที่ 2.15 บล็อกไดอะแกรมวิธีการรวมสัญญาณแบบ ERC

หลักการรวมสัญญาณแบบหลายทิศทางที่ปลายทางด้วยวิธี ERC คือการรวมสัญญาณที่ได้มาจากช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณ มารวมกัน โดยที่ไม่ได้มีการปรับแต่งค่าอื่นใด ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) \quad (2.59)$$

2.8 พารามิเตอร์ที่ใช้วัดสมรรถนะของระบบ และความหมายของค่าต่าง ๆ

2.8.1 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (Bit Error Probability : BEP)

อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล หรืออัตราความน่าจะเป็นของบิตที่ผิดพลาด (Bit Error Probability: BEP) คือ อัตราส่วนของจำนวนบิตข้อมูล ที่ทางภาครับตัดสินผิดพลาดเมื่อเทียบกับจำนวนบิตข้อมูลทั้งหมดที่ถูกส่งมาจากภาคส่ง เป็นค่าพารามิเตอร์สำคัญในการวัดสมรรถนะของระบบ เป็นค่าที่แสดงถึงความถูกต้องของการรับ/ส่งข้อมูลโดยตรง อัตราความผิดพลาดบิตเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่สนใจในสภาวะต่าง ๆ เช่น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน หรือเมื่อจำนวนผู้ใช้เปลี่ยนไป เป็นต้น

2.8.2 อัตราความผิดพลาดในการตัดสินสัญลักษณ์ (Symbol Error Rates : SER)

อัตราความผิดพลาดในการตัดสินสัญลักษณ์ คือ อัตราส่วนของจำนวนสัญลักษณ์ที่ทางด้านภาครับตัดสินผิดพลาด เมื่อเทียบกับจำนวนของสัญลักษณ์ทั้งหมดที่ถูกส่งมาจากภาคส่ง เป็นค่าพารามิเตอร์สำคัญในการวัดสมรรถนะของระบบ เป็นค่าที่แสดงถึงความถูกต้องของการรับ/ส่งข้อมูลโดยตรง เป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่สนใจในสภาวะต่าง ๆ เช่น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน หรือเมื่อจำนวนผู้ใช้เปลี่ยนไป เช่นกัน

2.8.3 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio : SNR)

ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) คือ อัตราส่วนกำลังของสัญญาณเมื่อเทียบกับกำลังของสัญญาณรบกวน ส่วนใหญ่ค่ากำลังของสัญญาณจะมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่ากำลังของสัญญาณรบกวน ดังนั้นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน จึงนิยามวัดกันในหน่วย เดซิเบล (dB) โดยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสำหรับผู้ใช้นั้น ในค่าหน่วยของ เดซิเบล สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$SNR_k = 10 \log \left(\frac{A_k^2}{\sigma^2} \right) \quad (2.60)$$

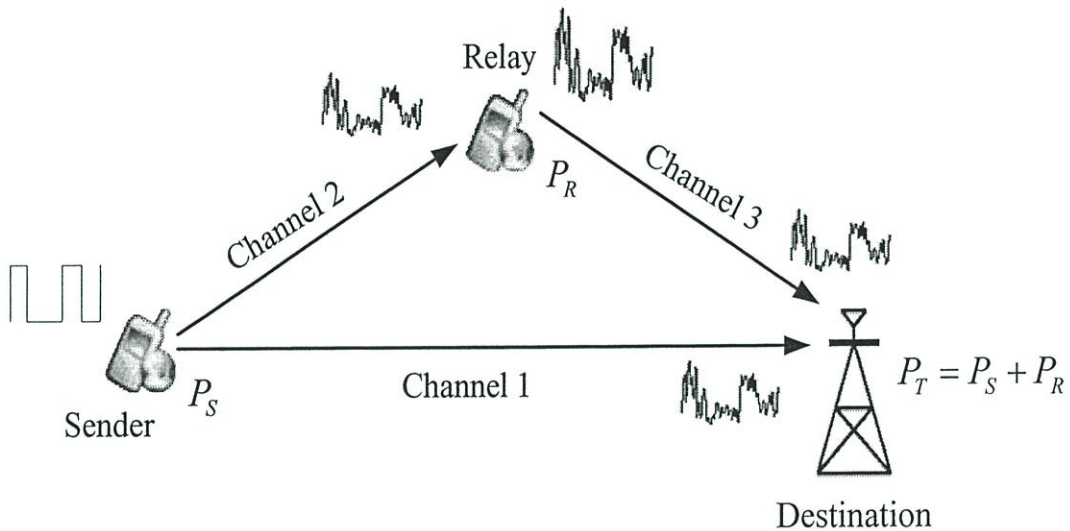
เมื่อ A_k คือขนาดของสัญญาณของผู้ใช้คนที่ k และ σ^2 ค่าแวกเรียนซ์ของสัญญาณรบกวน ซึ่งก็คือ กำลังงานของสัญญาณรบกวนนั่นเอง

บทที่ 3

การวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ

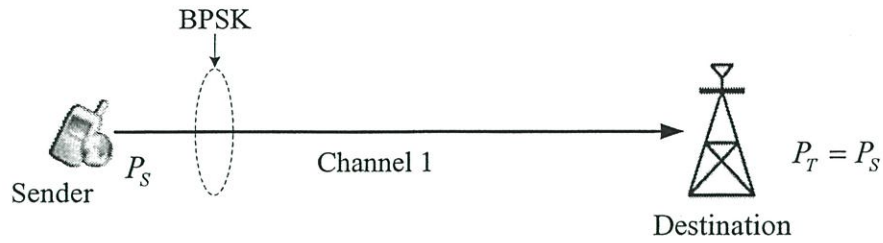
ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย จำนวนผู้ใช้งานในโครงข่าย ทั้งหมด 2 คน และมีเครื่องรับปลายทาง 1 เครื่อง โดยกำหนดให้ ผู้ใช้งานคนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง ผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็นรีเลย์ ซึ่งในการส่งต่อสัญญาณจากรีเลย์ไปยังเครื่องรับ จะพิจารณาการส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify and Forward ผ่านช่องสัญญาณที่มีการจางหายแนวราบแบบเรย์ลี ในการสื่อสารแบบร่วมมัย ซึ่งมีการมอดูเลตแบบเล็อนเฟส ดังที่แสดงในภาพที่ 3.1 และ โครงสร้างการส่งสัญญาณของระบบ แสดงในภาพที่



รูปที่ 3.1 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ

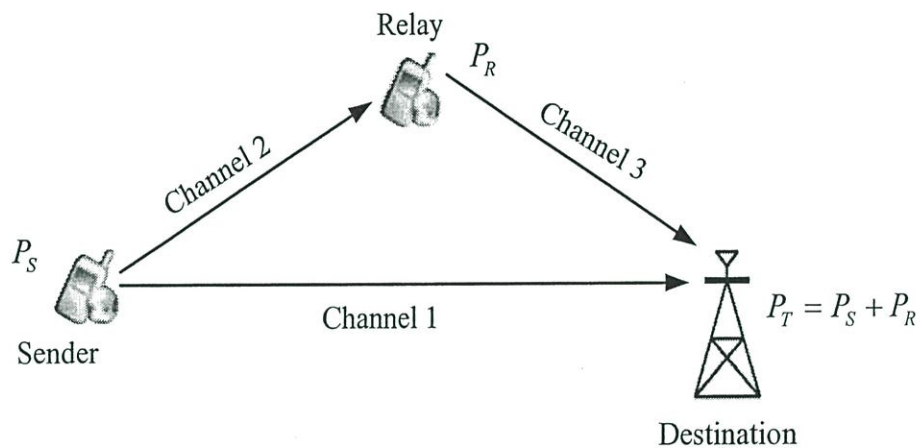
จากภาพที่ 3.1 การส่งสัญญาณจากผู้ใช้งานคนที่ 1 จะทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง เพื่อส่งสัญญาณไปยังเครื่องรับปลายทาง โดยกำหนดให้มีอัตราการมอดูเลตแบบเต็มอัตรา และผลรวมของกำลังส่งสัญญาณเท่ากับผลรวมของกำลังส่งจากผู้ใช้งานคนที่ 1 กับคนที่ 2 ($P_T = P_S + P_R$) ซึ่งสามารถแบ่งการส่งสัญญาณและการมอดูเลตออกได้ 2 แบบ ดังนี้คือ

1. การส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ (Non cooperation strategy) ซึ่งจะใช้การมอดูเลตแบบ BPSK สำหรับการส่งสัญญาณ และผลรวมของกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ $P_T = P_S$ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การส่งสัญญาณโดยไม่มีผู้ช่วย

2. การส่งสัญญาณโดยมีผู้ใช้งานอื่นช่วยเหลือ 1 คน (1 user cooperation) ซึ่งสามารถให้ผู้ใช้งานคนที่ 2 ช่วยส่งต่อสัญญาณได้ โดยรูปแบบนี้จะใช้การมอดูเลตแบบ QPSK และผลรวมของกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ $P_T = P_S + P_R$ ดังแสดงในภาพที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การส่งสัญญาณโดยมีผู้ช่วย 1 คน

ดังที่กล่าวไว้ว่า ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอที่นี่ จะใช้วิธีการมอดูเลตแบบเลื่อนเฟส สำหรับการส่งสัญญาณ โดยผ่านช่องสัญญาณที่มีการเกิดการจางหายแนวราบแบบเรย์ลี สามารถแบ่งการส่งสัญญาณออกเป็น 2 เฟส ดังนี้

เฟสที่ 1 $\left(0 - \frac{T}{2}\right)$ เป็นช่วงเวลาที่ผู้ใช้คนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งกระจายสัญญาณ

ไปยังเครื่องรับปลายทางและผู้ใช้งานคนที่ 2 พร้อม ๆ กัน โดยอาศัยคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปรอบทิศทางของช่องสัญญาณไร้สายที่มีการเกิดเฟดดิ้งแนวราบแบบเรย์ลี ซึ่งสามารถแทนสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับปลายทางและรีเลย์ 1 ด้วย สมการที่ (3.1) และ (3.2)

สมการที่ปลายทาง (Destination)

$$\mathbf{y}_{sd} = \sqrt{P_s} h_{sd} \mathbf{u}_s x_s + \mathbf{n}_s \quad (3.1)$$

สมการที่รีเลย์ (Relay)

$$y_{sr} = \sqrt{P_s} h_{sr} x_s + n_r \quad (3.2)$$

เมื่อสัญญาณที่รับได้มารวมกับ อัลกอริทึม LMS ของระบบสายอากาศ จากสมการที่ (3.1) ที่ output จะเป็นดังนี้

$$y_{d1} = \mathbf{w}_s^H \mathbf{y}_{sd} \quad (3.3)$$

$$y_{d1} = \mathbf{w}_s^H \left(\sqrt{P_s} h_{sr} x_s \right) + \mathbf{w}_s^H \mathbf{n}_r \quad (3.4)$$

- เมื่อ
- x_s คือ ข้อมูลที่ส่งออกไป
 - \mathbf{u}_s คือ array vector ที่มาจากเครื่องส่ง
 - h_{sd} คือ ช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งกับปลายทาง
 - h_{sr} คือ ช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งกับ Relay
 - n_s คือ สัญญาณรบกวนที่เครื่องส่ง
 - n_r คือ สัญญาณรบกวนที่ Relay
 - P_s คือ กำลังที่ใช้ส่งสัญญาณ เท่ากับ 1
 - \mathbf{w}_s^H คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของระบบจากเครื่องส่ง

เฟสที่ 2 $\left(\frac{T}{2} - T \right)$ เป็นช่วงเวลาที่ ผู้ใช้คนที่ 2 (relay) ทำหน้าที่เป็นรีเลย์ ขยายส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับปลายทาง ผ่านช่องสัญญาณไร้สายที่มีการเกิดการจางหายแนวราบแบบเรย์ลี ซึ่งก็สามารถแทนสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับปลายทาง ด้วยสมการที่ (3.4) เช่นเดียวกับเฟสที่ 1

สมการที่ปลายทาง (Destination)

$$\mathbf{y}_{rd} = \frac{\sqrt{P_s P_r} h_{sr} h_{rd} \mathbf{u}_r x_s}{\sqrt{P_s |h_r|^2 + N_0}} + \frac{\sqrt{P_r} h_{rd} \mathbf{u}_r n_r}{\sqrt{P_s |h_r|^2 + N_0}} + \mathbf{n}_d \quad (3.5)$$

เมื่อสัญญาณที่รับได้มารวมกับ อัลกอริทึม LMS ของระบบสายอากาศ จากสมการที่ (3.4) ที่ output จะเป็นดังนี้

$$y_{d2} = \mathbf{w}_r^H \mathbf{y}_{rd} \quad (3.6)$$

$$y_{d2} = \mathbf{w}_r^H \left(\frac{\sqrt{P_s P_r} h_{sr} h_{rd} \mathbf{u}_r x_s}{\sqrt{P_s |h_r|^2 + N_0}} \right) + \mathbf{w}_r^H \left(\frac{\sqrt{P_r} h_{rd} \mathbf{u}_r n_r}{\sqrt{P_s |h_r|^2 + N_0}} \right) + \mathbf{w}_r^H \mathbf{n}_d \quad (3.7)$$

- เมื่อ x_s คือ ข้อมูลที่ส่งออกไป
 \mathbf{u}_r คือ array vector ที่มาจาก Relay
 h_{rd} คือ ช่องสัญญาณระหว่าง Relay กับปลายทาง
 n_d คือ สัญญาณรบกวนที่ปลายทาง
 n_r คือ สัญญาณรบกวนที่ Relay
 P_s คือ กำลังที่ใส่ส่งสัญญาณ เท่ากับ 1
 \mathbf{w}_r^H คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของระบบจาก Relay
 N_0 คือ ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน

เนื่องจากระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่เสนอ มีการส่งข้อมูลชุดเดียวกัน มากกว่า 1 ชุดสัญญาณไปยังเครื่องรับปลายทางเดียวกัน เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีคุณภาพดีที่สุด ในการนำไปใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการรวมสัญญาณทางด้านเครื่องรับ ซึ่งในระบบได้ที่นำเสนอนี้ ก็จะใช้เทคนิคการรวมสัญญาณจากหลายทิศทาง ESNRC เพื่อรวมสัญญาณทางด้านเครื่องรับ

3.2 ค่าอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR)

การพิจารณาค่า SNR ในระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือของทั้งสองเส้นทาง คือ เส้นทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับโดยตรง ไม่มีผู้ช่วยส่งสัญญาณ และจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ โดยมีผู้ช่วยส่ง 1 คน สัญญาณในแต่ละเส้นทางได้ผ่านตัวกรองปรับตัวได้ LMS ดังนั้นจึงสามารถหาค่าได้ดังต่อไปนี้

จากสมการปลายทางที่เครื่องรับ โดยสัญญาณเดินทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับโดยตรง ไม่มีผู้ช่วยส่งสัญญาณ (สมการที่ 3.4)

$$y_{d1} = \mathbf{w}_s^H \left(\sqrt{P_s} h_{sr} x_s \right) + \mathbf{w}_s^H \mathbf{n}_r$$

กำหนดให้ค่า SNR ของสัญญาณที่ส่งด้านนี้เป็น SNR_{direct} จะได้ว่า

$$SNR_{direct} = \frac{\text{Power of Signal}}{\text{Power of Noise}} \quad (3.8)$$

$$\text{จะพบว่า Power of Signal component} = E \left[\left\| \mathbf{w}_s^H \sqrt{P_s} h_{sd} \mathbf{u}_s x_s \right\|^2 \right] \quad (3.9)$$

$$\text{และพบว่า Power of Noise component} = E \left[\left\| \mathbf{w}_s^H \mathbf{n}_s \right\|^2 \right] \quad (3.10)$$

$$\text{พิจารณา Power of Signal} = E \left[\left(x_s \sqrt{P_s} h_{sd} \mathbf{w}_s^H \mathbf{u}_s \right) \left(x_s^* \sqrt{P_s} h_{sd}^* \mathbf{u}_s^H \mathbf{w}_s \right) \right]$$

$$\text{Power of Noise} = |x_s|^2 P_s |h_{sd}|^2 \mathbf{w}_s^H \mathbf{u}_s \mathbf{u}_s^H \mathbf{w}_s$$

เมื่อ $|x_s|^2 = E_{\hat{x}_s}$ คือ ค่าพลังงานใน 1 สัญลักษณ์ ที่มีค่าเท่ากับ 1 = $P_s |h_{sd}|^2 \mathbf{w}_s^H \mathbf{u}_s \mathbf{u}_s^H \mathbf{w}_s$

$$\text{เพราะฉะนั้น จะได้ Power of Signal} = P_s |h_{sd}|^2 \left\| \mathbf{u}_s^H \mathbf{w}_s \right\|^2 \quad (3.11)$$

$$\text{Power of Noise} = E \left[\left\| \mathbf{w}_s^H \mathbf{n}_s \right\|^2 \right] \quad (3.12)$$

$$= E \left[\left(\mathbf{w}_s^H \mathbf{n}_s \right) \left(\mathbf{w}_s^H \mathbf{n}_s \right)^H \right]$$

$$= E \left[\mathbf{w}_s^H \mathbf{n}_s \mathbf{n}_s^H \mathbf{w}_s \right]$$

$$= \mathbf{w}_s^H E \left[\mathbf{n}_s \mathbf{n}_s^H \right] \mathbf{w}_s$$

$$= N_0 \mathbf{w}_s^H \mathbf{w}_s$$

เพราะฉะนั้น จะได้ Power of Noise = $N_0 \|\mathbf{w}_s\|^2$ (3.13)
 ดังนั้นจากสมการที่ 3.11 และ 3.13

$$SNR_{direct} = \frac{P_s |h_{sd}|^2 \|\mathbf{u}_s^H \mathbf{w}_s\|^2}{N_0 \|\mathbf{w}_s\|^2} \quad (3.14)$$

และสมการปลายทางที่เครื่องรับ โดยสัญญาณเดินทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ โดยมีผู้ช่วยส่ง

$$\text{สัญญาณ(สมการที่ 3.7)} \quad y_{d2} = \mathbf{w}_r^H \left(\frac{\sqrt{P_s P_r} h_{sr} h_{rd} \mathbf{u}_r x_s}{\sqrt{P_s |h_r|^2 + N_0}} \right) + \mathbf{w}_r^H \left(\frac{\sqrt{P_r} h_{rd} \mathbf{u}_r n_r}{\sqrt{P_s |h_r|^2 + N_0}} \right) + \mathbf{w}_r^H \mathbf{n}_d$$

กำหนดให้ค่า SNR ของสัญญาณที่ส่งด้านนี้เป็น SNR_{coop} จะได้ว่า

$$SNR_{coop} = \frac{\text{Power of Signal}}{\text{Power of Noise}} \quad (3.15)$$

$$\text{จะพบว่า Power of Signal component} = E \left[\left\| \mathbf{w}_r^H \left(\frac{\sqrt{P_s P_r} h_{sr} h_{rd} \mathbf{u}_r x_s}{\sqrt{P_s |h_{sr}|^2 + N_0}} \right) \right\|^2 \right] \quad (3.16)$$

$$\text{และพบว่า Power of Noise component} = E \left[\|\mathbf{w}_r^H \mathbf{n}_d\|^2 \right] + E \left[\left\| \frac{\mathbf{w}_r^H \sqrt{P_r} h_{rd} \mathbf{u}_r n_r}{\sqrt{P_s |h_{sr}|^2 + N_0}} \right\|^2 \right] \quad (3.17)$$

$$\text{พิจารณา Power of Signal component} = E \left[\left\| \mathbf{w}_r^H \left(\frac{\sqrt{P_s P_r} h_{sr} h_{rd} \mathbf{u}_r x_s}{\sqrt{P_s |h_{sr}|^2 + N_0}} \right) \right\|^2 \right]$$

$$\text{เพราะฉะนั้น จะได้ Power of Signal} = \frac{P_s P_r |h_{sd}|^2 |h_{rd}|^2 \|\mathbf{u}_r^H \mathbf{w}_2\|^2}{P_s |h_{sr}|^2 + N_0} \quad (3.18)$$

$$\text{Power of Noise} = E \left[\|\mathbf{w}_r^H \mathbf{n}_d\|^2 \right] + E \left[\left\| \frac{\mathbf{w}_r^H \sqrt{P_r} h_{rd} \mathbf{u}_r n_r}{\sqrt{P_s |h_{sr}|^2 + N_0}} \right\|^2 \right]$$

$$E \left[\left\| \mathbf{w}_r^H \mathbf{n}_d \right\|^2 \right] = \left\| \mathbf{w}_r \right\|^2 N_0$$

$$E \left[\left\| \frac{\mathbf{w}_r^H \sqrt{P_r} h_{rd} \mathbf{u}_r n_r}{\sqrt{P_s |h_2|^2 + N_0}} \right\|^2 \right] = \frac{P_r |h_{rd}|^2 \left\| \mathbf{u}_r^H \mathbf{w}_r \right\|^2 N_0}{P_s |h_2|^2 + N_0}$$

เพราะฉะนั้น จะได้ Power of Noise = $\left\| \mathbf{w}_r \right\|^2 N_0 + \frac{P_r |h_{rd}|^2 \left\| \mathbf{u}_r^H \mathbf{w}_r \right\|^2 N_0}{P_s |h_{sr}|^2 + N_0}$

หรือ
$$= \left(\left\| \mathbf{w}_r \right\|^2 + \frac{P_r |h_{rd}|^2 \left\| \mathbf{u}_r^H \mathbf{w}_r \right\|^2}{P_s |h_{sr}|^2 + N_0} \right) N_0 \quad (3.19)$$

ดังนั้น
$$SNR_{coop} = \frac{\frac{P_r |h_{rd}|^2 \left\| \mathbf{u}_r^H \mathbf{w}_r \right\|^2 N_0}{P_s |h_2|^2 + N_0}}{\left(\left\| \mathbf{w}_r \right\|^2 + \frac{P_r |h_{rd}|^2 \left\| \mathbf{u}_r^H \mathbf{w}_r \right\|^2}{P_s |h_{sr}|^2 + N_0} \right) N_0} \quad (3.20)$$

3.3 การพิจารณาสัญญาณที่ปลายทาง และการเลือกเส้นทางของสัญญาณที่ปลายทาง

การพิจารณาเลือกสัญญาณที่ปลายทางที่มีสัญญาณที่เข้ามาหลายเส้นทาง (เส้นทางที่มาจากเครื่องส่งมายังเครื่องรับโดยตรง และเส้นทางที่มาจากเครื่องรับโดยมีผู้ช่วย 1 คน) จะพิจารณาจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของเส้นทางที่ส่งจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับปลายทางโดยตรงที่ไม่มีผู้ช่วย (Signal to Noise Ratio of non cooperative : SNR_{direct}) ต่อกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของเส้นทางที่ส่งจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับปลายทางโดยตรงมีผู้ช่วย 1 คน (Signal to Noise Ratio of cooperative : SNR_{coop}) การพิจารณาเส้นทางในลักษณะนี้เรียกว่า Enhanced Signal to Noise Ratio combining (ESNRC) โดยแทนด้วย y_d

$$y_d = \frac{SNR_{direct}}{SNR_{coop}} \quad (3.21)$$

และมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

ถ้าค่า $y_d = \frac{SNR_{direct}}{SNR_{coop}} > 10$

เลือกสัญญาณที่เดินทางมาจากเครื่องส่ง โดยตรงที่ไม่มีผู้ช่วย ($y_d = y_{sd}$)

ถ้าค่า $y_d = 0.1 \leq \frac{SNR_{direct}}{SNR_{coop}} \leq 10$

เลือกเส้นทางโดยนำสัญญาณทั้งสองเส้นทางมารวมกัน ($y_d = y_{sd} + y_{rd}$)

ถ้าค่า $y_d = \frac{SNR_{direct}}{SNR_{coop}} < 0.1$

เลือกเส้นทางสัญญาณที่เดินทางจากเครื่องส่ง โดยมีผู้ช่วยส่ง ($y_d = y_{rd}$)

บทที่ 4

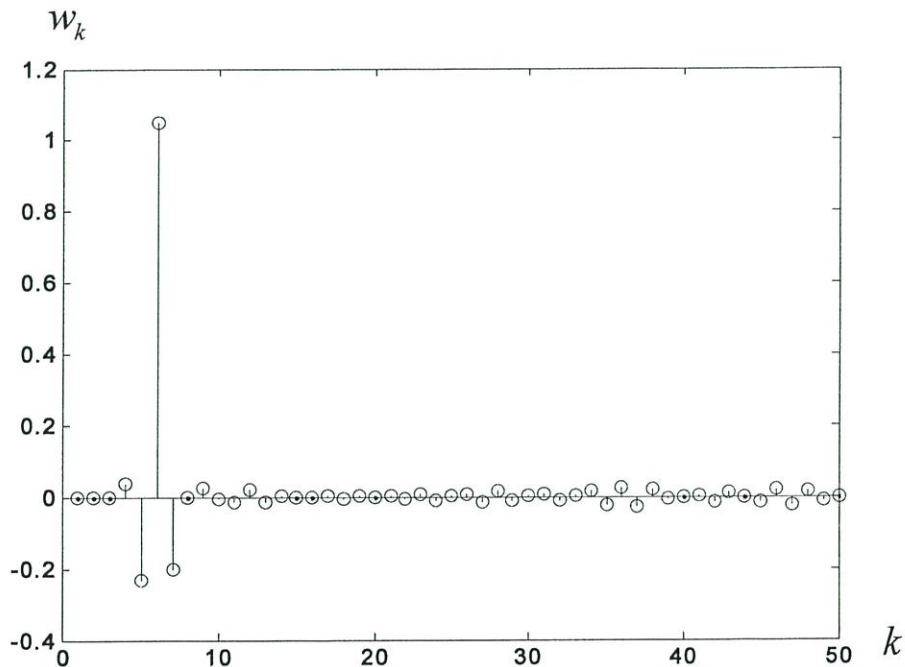
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทนี้จะเป็นการจำลองผล (Simulation) ของระบบที่นำเสนอ ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่นำเสนอ กับระบบสื่อสารแบบร่วมมือ ที่มีการส่งสัญญาณแบบปกติที่ไม่มีการใช้ตัวกรองแบบปรับตัวได้ โดยมีการรวมสัญญาณจากหลายทิศทาง เพื่อเลือกเส้นทางของสัญญาณที่ดีที่สุด และระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือนี้ ได้กำหนดให้มีผู้ใช้งานในระบบ 2 คน โดยมีผู้ส่ง 1 คน ผู้ช่วยส่ง 1 คน และมีเครื่องรับ 1 เครื่อง

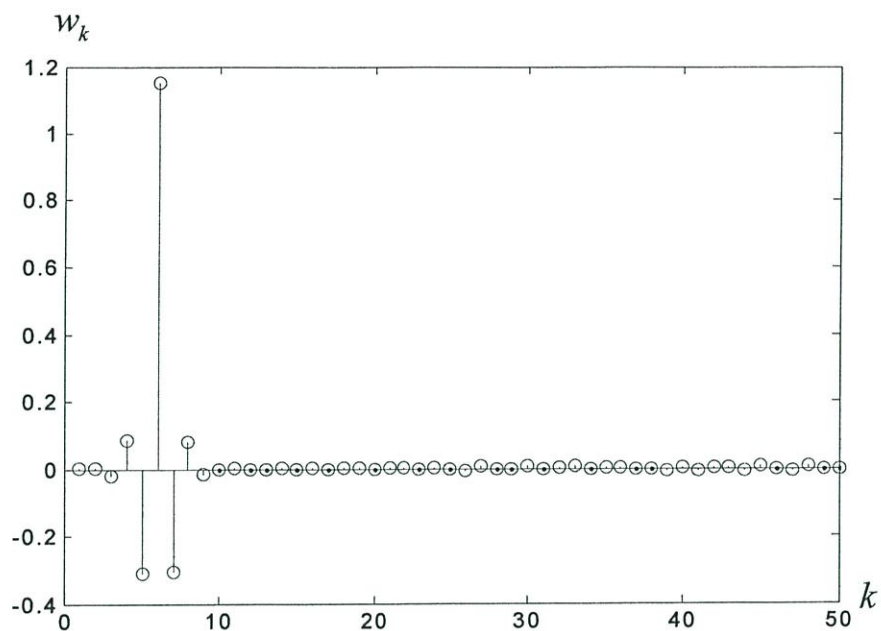
4.1 การจำลองระบบการทำงานของอัลกอริทึม LMS

ในส่วนนี้จะเป็นการจำลองผล (Simulation) โดยเครื่องคอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะสามารถทำการจำลองระบบการทำงานของอัลกอริทึม LMS เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสม โดยการเปลี่ยนค่า μ

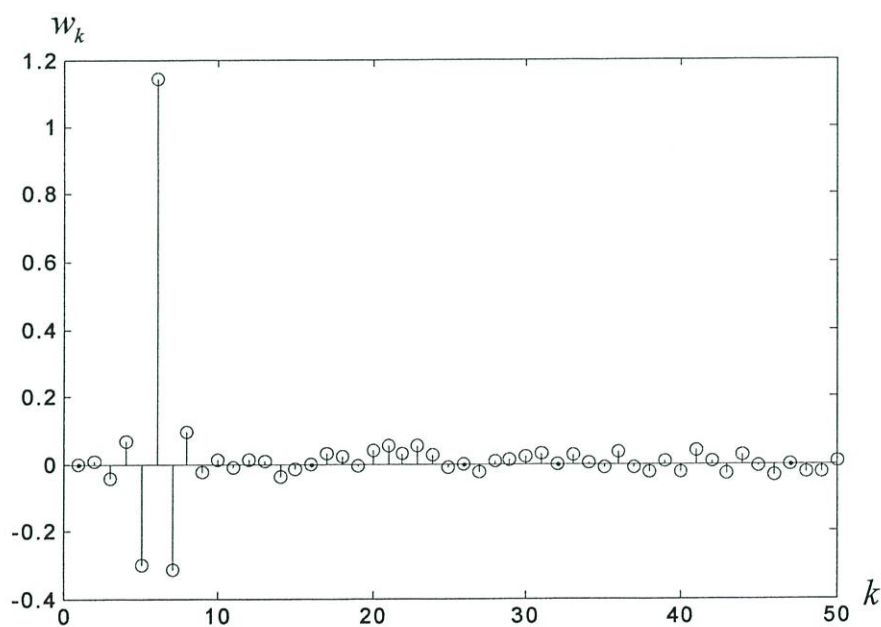
μ คือ ค่าคงที่เล็กๆ ค่าหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมอัตราการลู่เข้าของค่าสัมประสิทธิ์แต่ละรอบ โดยค่านี้นี้ควรจะเล็กพอที่จะทำให้การปรับค่าสัมประสิทธิ์มีเสถียรภาพ



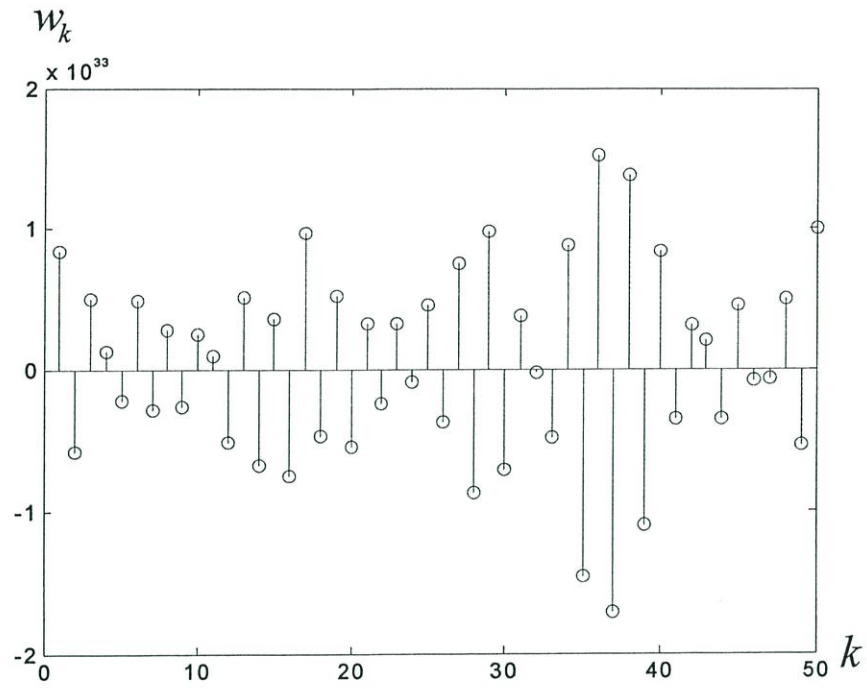
รูปที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตัว เมื่อ $\mu = 0.01$



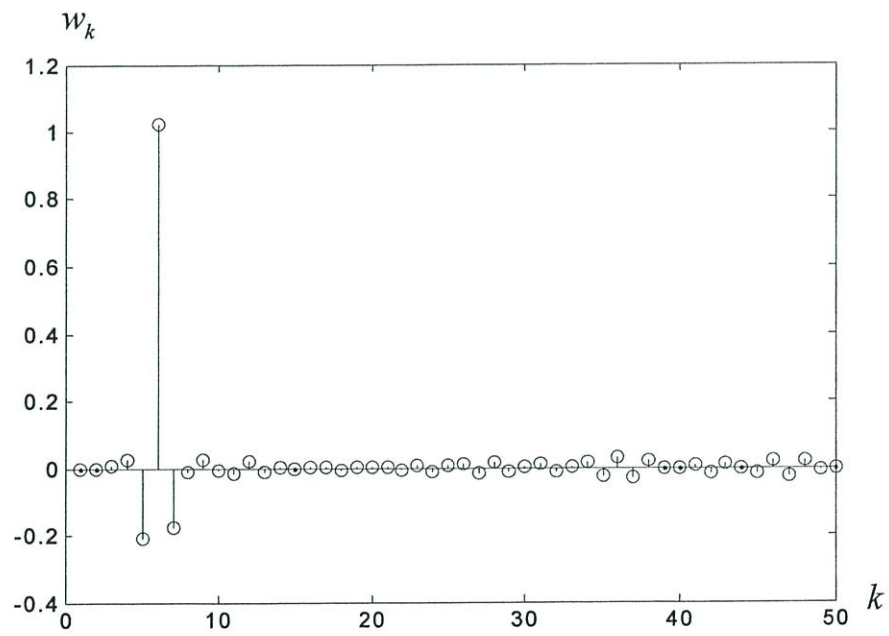
รูปที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตัว เมื่อ $\mu = 0.02$



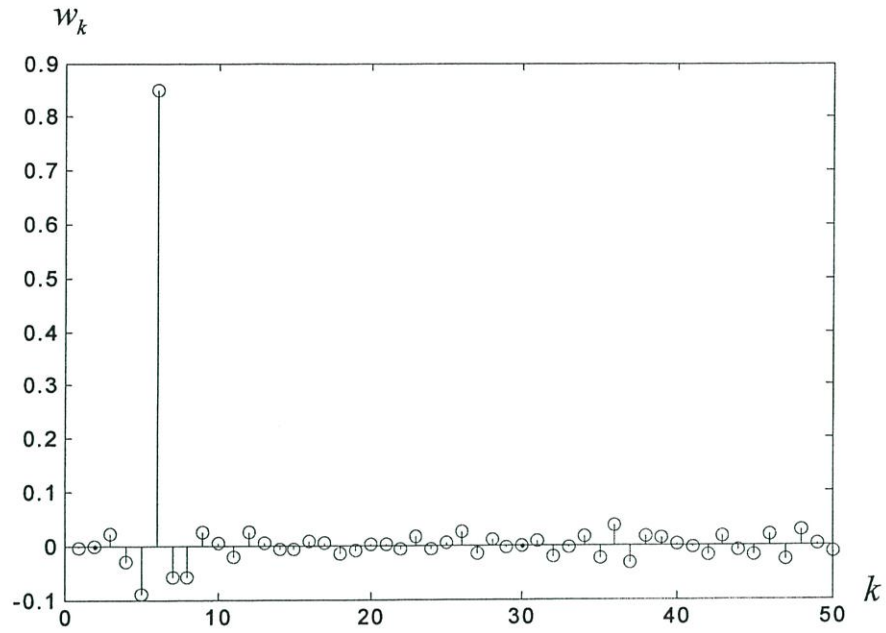
รูปที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตัว เมื่อ $\mu = 0.03$



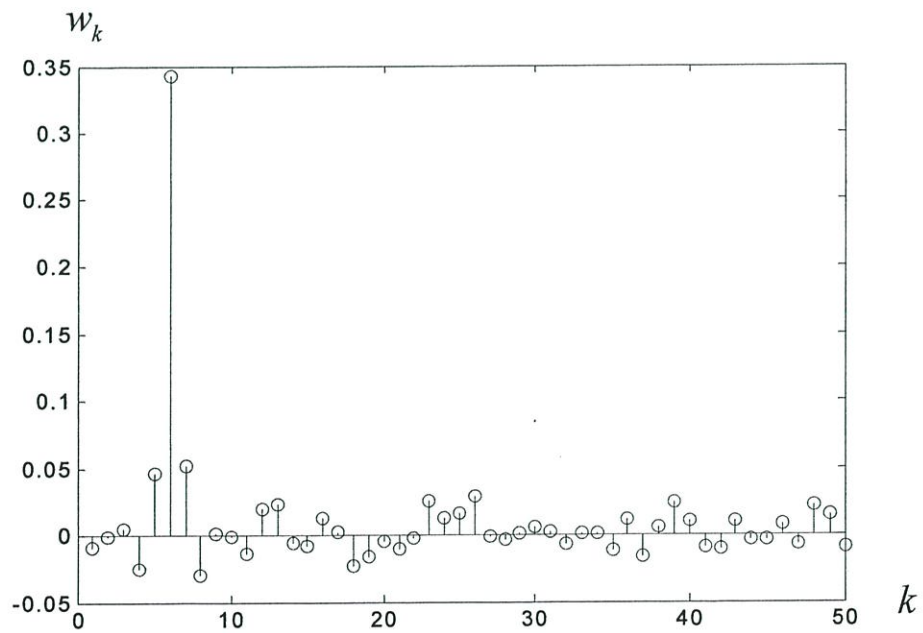
รูปที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตัว เมื่อ $\mu = 0.05$



รูปที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตัว เมื่อ $\mu = 0.009$



รูปที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตัว เมื่อ $\mu = 0.005$



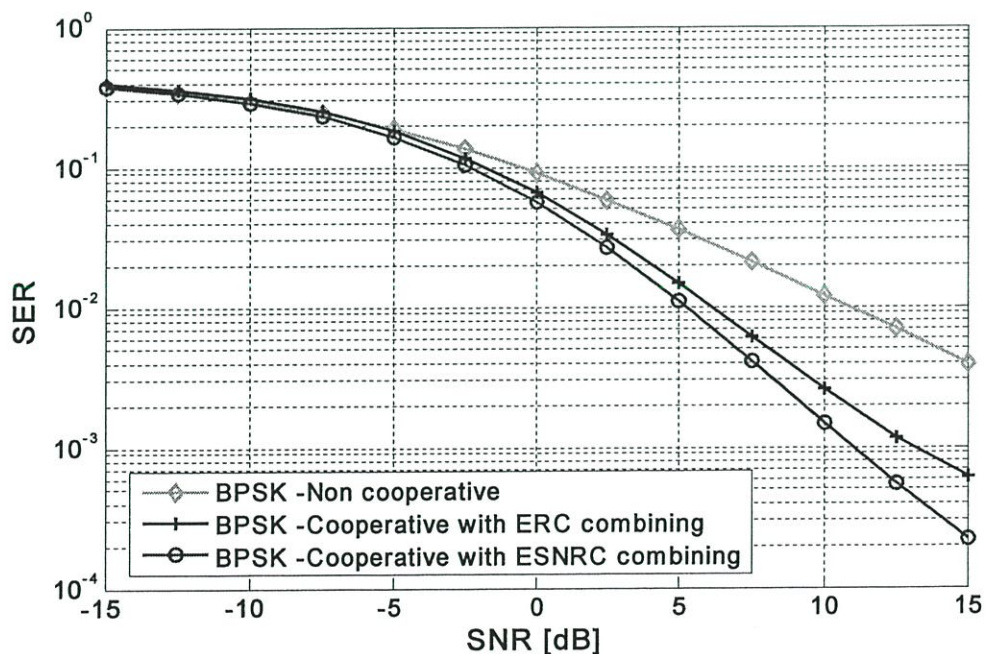
รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตัว เมื่อ $\mu = 0.001$

μ คือ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดช่วงเวลาการปรับแต่ละครั้ง หากตั้งให้มีค่าที่ใหญ่ กระบวนการปรับสัมประสิทธิ์จะเข้าสู่จุดอยู่ตัวของระบบได้อย่างรวดเร็ว แต่ถ้าใหญ่มากเกินไป ผลที่ได้จากการปรับจะไม่ดี เพราะระบบอาจจะแกว่งไปมาไม่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสม

4.2 การจำลองผลของระบบที่นำเสนอในสถานการณ์ต่างๆ

1. กำลังงานไฟฟ้ารวมของผู้ใช้งานแต่ละคนเท่ากับ 1 วัตต์ ($P_T = 1$) โดย $P_T = P_s + P_r$
2. ช่องสัญญาณและในระบบ จะมีค่าความแปรปรวน $\sigma^2 = 1$
3. ผู้ใช้งานในระบบทั้งหมด ใช้โปรโตคอลการส่งผ่านสัญญาณแบบ Amplifier and Forward (AF) ด้วยการมอดูเลตแบบเลื่อนเฟส
4. จำนวนบิตข้อมูลเท่ากับ 200,000 บิต
5. สัญญาณอ้างอิง (Reference signal) เท่ากับ 500 บิต
6. การแสดงผลสมรรถนะของระบบที่นำเสนอ โดยเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดในการตัดสินใจสัญลักษณ์ (SER) กับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR)

4.2.1 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบโดยใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK

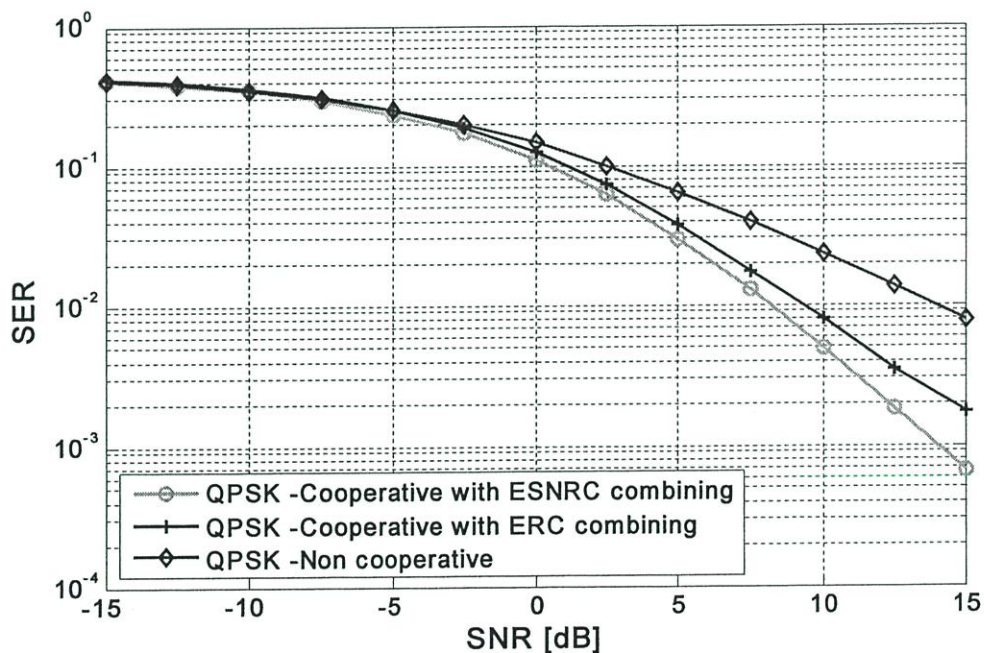


รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณีมอดูเลตแบบ BPSK

จากรูปที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ โดยกำหนดให้ระบบมีผู้ใช้งาน 2 คน คนที่หนึ่งเป็นผู้ส่ง และคนที่สองเป็นผู้ช่วยส่ง การเดินทางของของสัญญาณไปยังปลายทางแบ่งออกเป็นสองเส้นทาง คือ เส้นทางที่เดินทางจากผู้ส่งโดยตรงไปยังปลายทาง และเส้นทางที่มีผู้ช่วยส่งหนึ่งคน ผู้ช่วยส่งมีการส่งผ่านข้อมูลแบบ AF และทั้งสองเส้นทางใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK การรวมสัญญาณแบบหลายเส้นทางที่ปลายทางใช้แบบ ESNRC และ ERC เพื่อเปรียบเทียบค่า SER ของทั้งสองเส้นทาง เมื่อค่า SNR เปลี่ยนแปลง

จากการจำลองระบบพบว่าระบบที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK ทั้งสองเส้นทาง ในเส้นทางที่มีผู้ช่วยส่งหนึ่งคนจะได้ค่า SER ที่ดีกว่าเส้นทางที่ไม่มีผู้ช่วยส่งตลอดช่วง SNR และเมื่อเปรียบเทียบการรวมสัญญาณที่ปลายทางระหว่างแบบ ESNRC และ ERC พบว่าการรวมสัญญาณที่ปลายทางที่ใช้วิธี ESNRC จะได้ค่า SER ที่ดีกว่า

4.2.2 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบโดยใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ QPSK



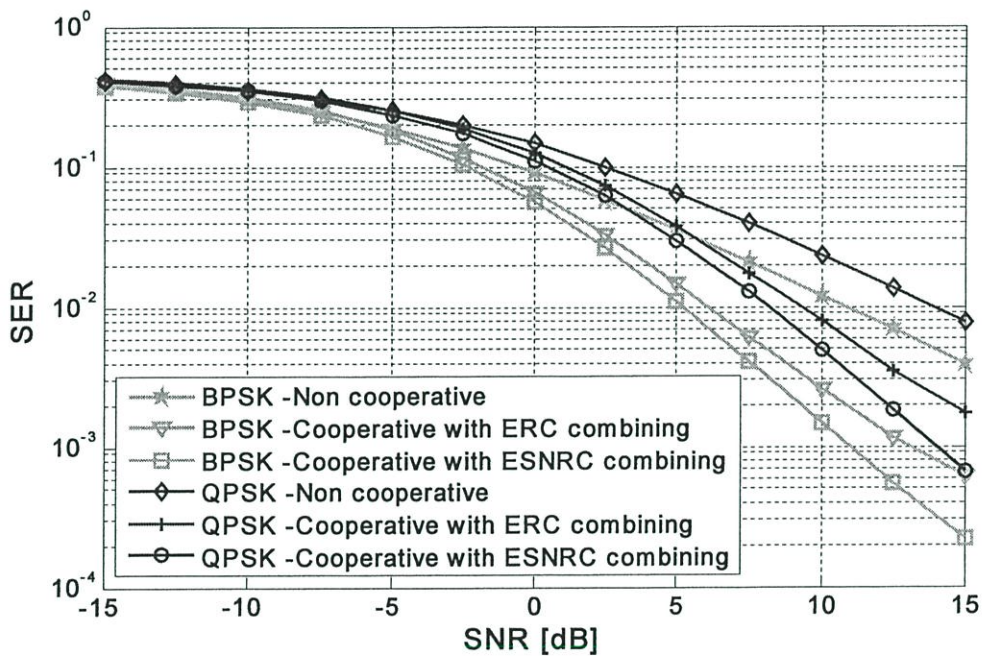
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณีมอดูเลตแบบ QPSK

จากรูปที่ 4.9 เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ โดยกำหนดให้ระบบมีผู้ใช้งาน 2 คน คนที่หนึ่งเป็นผู้ส่ง และคนที่สองเป็นผู้ช่วยส่ง การเดินทางของของสัญญาณไปยังปลายทางแบ่งออกเป็นสองเส้นทาง คือ เส้นทางที่เดินทางจากผู้ส่งโดยตรงไปยังปลายทาง และเส้นทางที่มีผู้ช่วยส่งหนึ่งคน ผู้ช่วยส่งมีการส่งผ่านข้อมูลแบบ AF และทั้งสอง

เส้นทางใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ QPSK การรวมสัญญาณแบบหลายเส้นทางที่ปลายทางใช้แบบ ESNRC และ ERC เพื่อเปรียบเทียบค่า SER ของทั้งสองเส้นทาง เมื่อค่า SNR เปลี่ยนแปลง

จากการจำลองระบบพบว่าระบบที่ใช้การมอดูเลตแบบ QPSK ทั้งสองเส้นทาง ในเส้นทางที่มีผู้ช่วยส่งหนึ่งคนจะได้ค่า SER ที่ดีกว่าเส้นทางที่ไม่มีผู้ช่วยส่งตลอดช่วง SNR และเมื่อเปรียบเทียบการรวมสัญญาณที่ปลายระหว่างแบบ ESNRC และ ERC พบว่าการรวมสัญญาณที่ปลายทางที่ใช้วิธี ESNRC จะได้ค่า SER ที่ดีกว่า

4.2.3 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบโดยใช้การระหว่างมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK และ QPSK



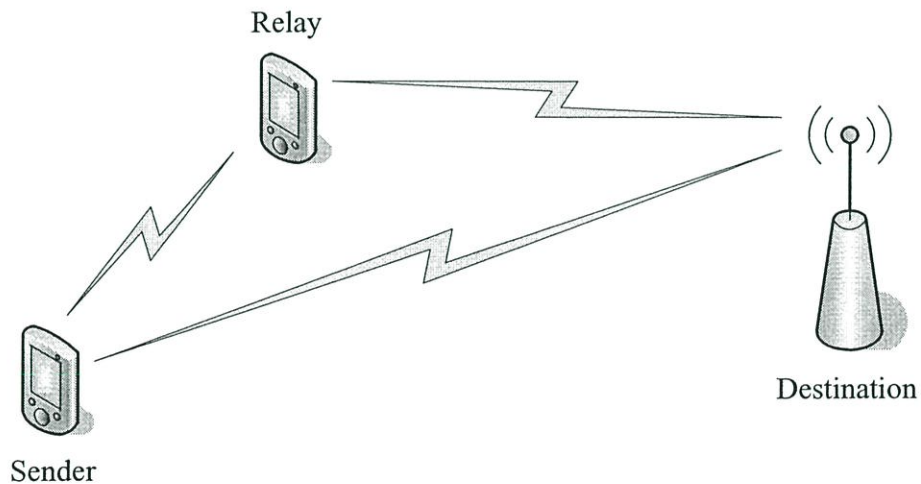
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบระบบการมอดูเลตแบบ BPSK และ QPSK

จากรูปที่ 4.10 เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ โดยกำหนดให้ระบบมีผู้ใช้งาน 2 คน คนที่หนึ่งเป็นผู้ส่ง และคนที่สองเป็นผู้ช่วยส่ง การเดินทางของสัญญาณไปยังปลายทางแบ่งออกเป็นสองเส้นทาง คือ เส้นทางที่เดินทางจากผู้ส่งโดยตรงไปยังปลายทาง และเส้นทางที่มีผู้ช่วยส่งหนึ่งคน ผู้ช่วยส่งมีการส่งผ่านข้อมูลแบบ AF และทำการเปรียบเทียบทั้งสองเส้นทางใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK และ QPSK การรวมสัญญาณแบบหลายเส้นทางที่ปลายทางใช้แบบ ESNRC และ ERC เพื่อเปรียบเทียบค่า SER ของทั้งสองเส้นทาง เมื่อค่า SNR เปลี่ยนแปลง

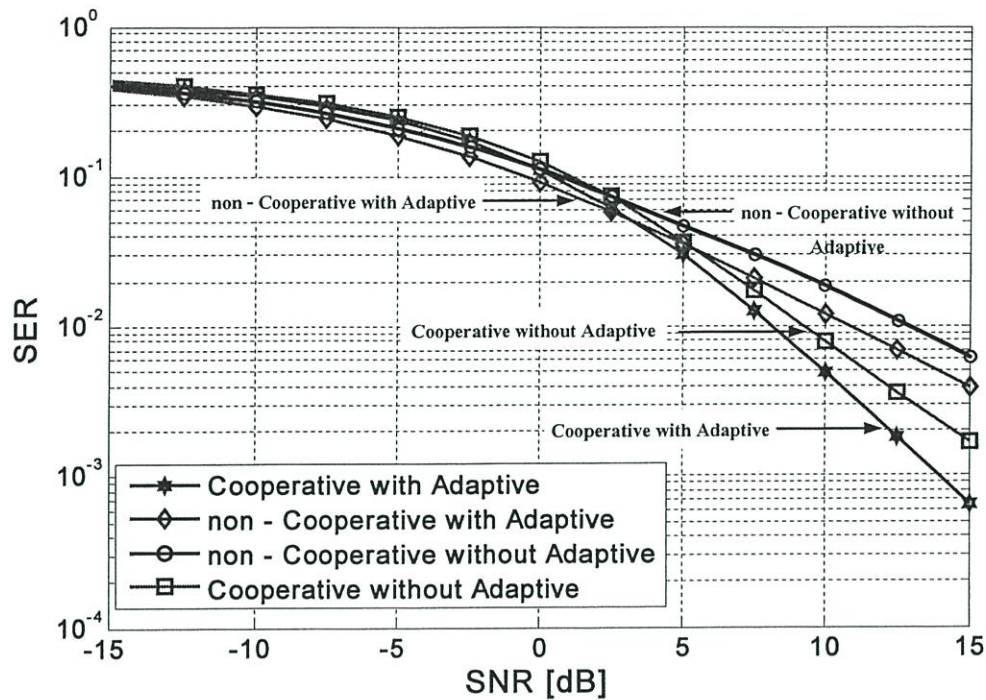
จากการจำลองระบบพบว่าระบบที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK โดยเส้นทางที่มีผู้ช่วยส่งหนึ่งคนจะได้ค่า SER ที่ดีกว่าเส้นทางที่มีผู้ช่วยส่งหนึ่งคน โดยใช้การมอดูเลตแบบ QPSK และในช่วงที่ค่า SNR ของระบบมีค่าต่ำกว่า 5 dB ในเส้นทางที่สัญญาณเดินทางจากผู้ส่งไปยังปลายทางที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK ยังให้ค่า SER ที่ดีกว่าช่องสัญญาณที่มีผู้ช่วยส่งหนึ่งคนที่ใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ QPSK และเมื่อเปรียบเทียบการการรวมสัญญาณที่ปลายทางระหว่างแบบ ESNRC และ ERC พบว่าการรวมสัญญาณที่ปลายทางที่ใช้วิธี ESNRC จะได้ค่า SER ที่ดีกว่าทั้งแบบที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK และแบบ QPSK

4.2.4 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่นำเสนอ กับสมรรถนะของระบบที่ไม่ใช้ตัวกรองแบบปรับตัวได้

ในส่วนนี้จะเป็นการแสดง การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่นำเสนอ ในสถานการณ์ปกติ คือ ทุกช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบจะมีค่าความแปรปรวน $\sigma^2 = 1$ และความยาวของช่องสัญญาณแต่ละช่องมีระยะทางเท่ากับ 1 หน่วย โดยทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่นำเสนอ



รูปที่ 4.11 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณีของระบบที่นำเสนอ



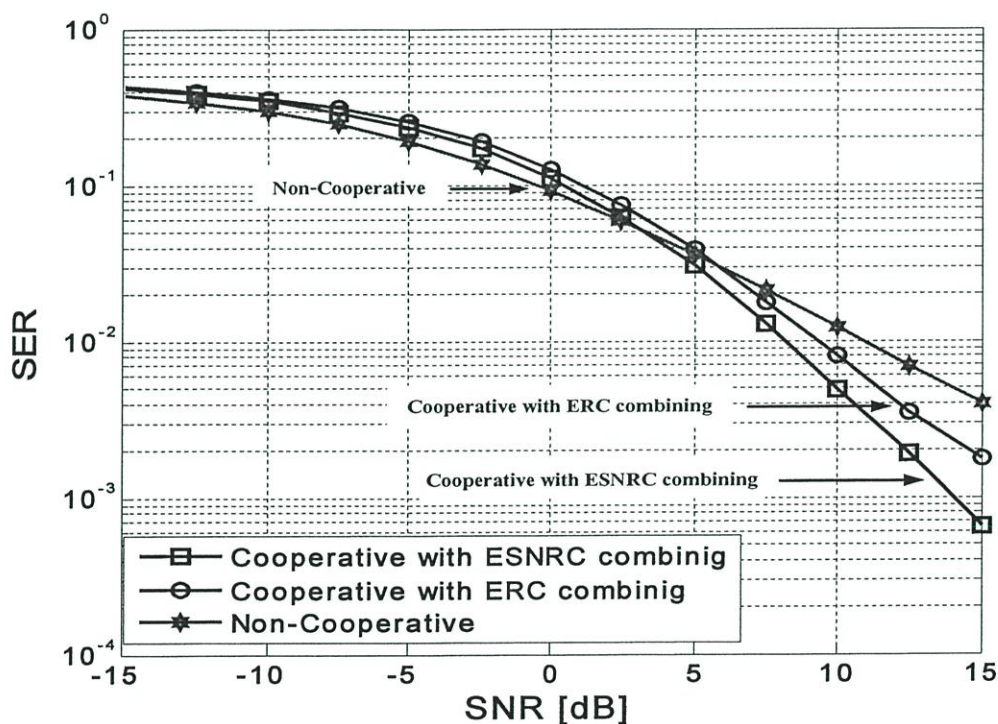
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณีของระบบที่นำเสนอ

จากรูปที่ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบที่แสดงให้เห็นถึงผลที่เกิดจากการนำระบบการประมาณค่าช่องสัญญาณด้วยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (least-mean-square : LMS) มาใช้ในระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ โดยจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างสองเส้นทาง คือ เส้นทางที่หนึ่ง เส้นทางที่สัญญาณเดินทางผ่านช่องจากผู้ส่ง (Sender,S) ไปยังปลายทาง (Destination,D) โดยตรง ที่ไม่มีผู้ช่วยส่ง หรือที่เรียกว่า Non Cooperative communications และการส่งสัญญาณจากผู้ส่งไปยังปลายทางโดยมีผู้ช่วยส่ง (Relay,R) จำนวน 1 คน หรือที่เรียกว่า Cooperative communications ผลที่ได้จากกราฟแสดงให้เห็นว่าในช่วงที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ไม่สูง ค่าอัตราความผิดพลาดในการตัดสินใจสัญลักษณ์ (Symbol error rate : SER) ของระบบที่ส่งโดยตรงไม่มีผู้ช่วยส่ง (Non – Cooperative communications) จะมีค่าความผิดพลาดต่ำกว่าระบบที่ส่งแบบอาศัยผู้ช่วยส่ง 1 คน (Cooperative communications) แต่เมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) สูงขึ้น ค่าอัตราความผิดพลาดในการตัดสินใจสัญลักษณ์ (SER) ของระบบที่ส่งแบบอาศัยผู้ช่วยส่ง 1 คน จะมีค่าความผิดพลาดต่ำกว่าระบบที่ส่งโดยตรงไม่มีผู้ช่วยส่ง และเมื่อนำระบบการประมาณค่าช่องสัญญาณด้วยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด(least-mean-square:LMS) มาใช้กับทั้งสองเส้นทาง ผลที่ได้เมื่อวัดค่า SER จะแสดงผลออกมาในทางเดียวกับกับกรณีที่ไม่ได้ใช้ระบบการประมาณค่า LMS และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้

จากการนำระบบการประมาณค่า LMS กับระบบที่ไม่ได้ใช้การประมาณค่า LMS ผลที่แสดงออกมา ระบบที่มีการใช้การประมาณค่า LMS จะให้ค่าอัตราความผิดพลาดในการตัดสินใจสัญลักษณ์ (Symbol error rate : SER) ที่ต่ำกว่าระบบที่ไม่มีการใช้การประมาณค่า LMS ทั้งสองเส้นทาง

4.2.5 เปรียบเทียบระบบที่ใช้การประมาณค่า LMS เมื่อมีการรวมสัญญาณปลายทางที่แตกต่างกัน

การเปรียบเทียบในส่วนนี้จะเป็นการแสดงสมรรถนะของระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ โดยจะเป็นการเปรียบเทียบการรวมสัญญาณที่ปลายทางระหว่างการรวมสัญญาณปลายทางแบบรวมด้วยอัตราส่วนเท่ากัน (Equal Ratio Combining : ERC) และการรวมสัญญาณปลายทางแบบปรับปรุงอัตราส่วน SNR (Enhanced Signal to Noise Ratio combining : ESNRC) รวมถึงการเปรียบเทียบกับระบบการส่งสัญญาณโดยตรงที่ไม่มีผู้ช่วยส่ง



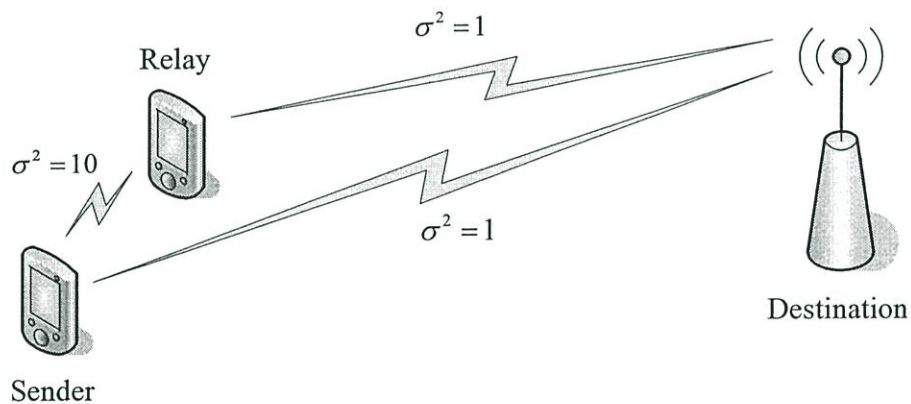
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบการรวมสัญญาณปลายทางของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

กราฟที่ได้ในรูปที่ 4.13 แสดงถึงผลการเปรียบเทียบค่า SER ของระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ เปรียบเทียบผลระหว่างการรวมสัญญาณที่ปลายแบบ ESNRC กับแบบ ERC จะได้ว่าผลการรวมสัญญาณที่ปลายทางโดยวิธี ESNRC จะทำให้ได้ค่า SER ของระบบต่ำกว่าการรวมสัญญาณปลายทางโดยวิธี ERC ตลอดทั้งค่า SNR [dB] ซึ่งยิ่งค่า SNR [dB] มีค่าสูงจะให้เห็น

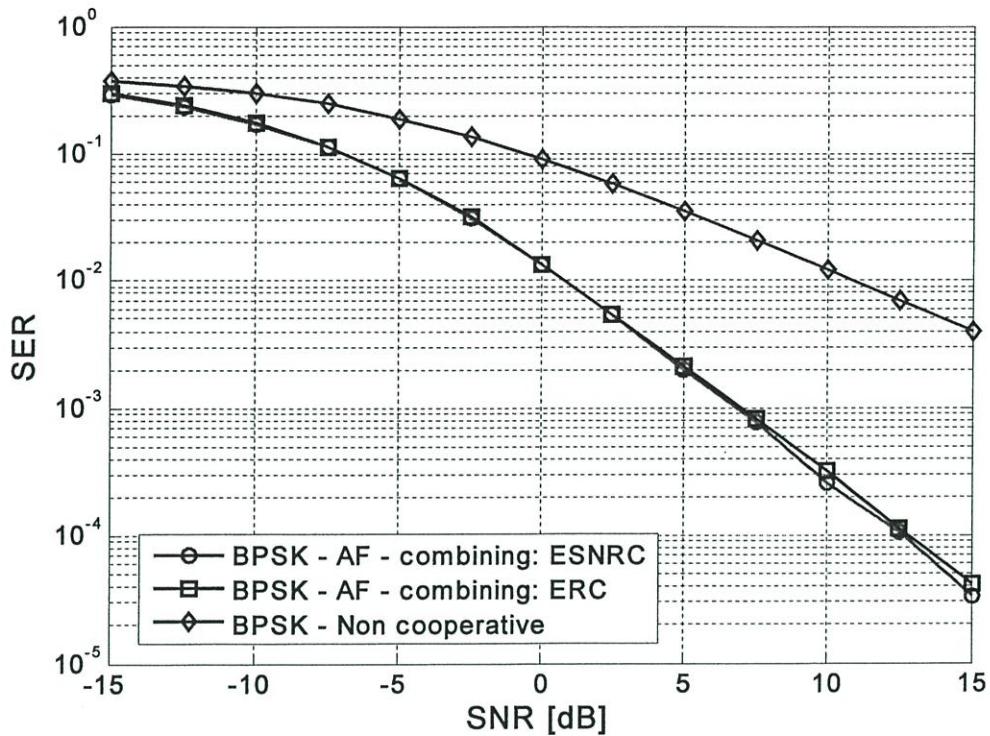
ความแตกต่างของทั้ง 2 วิธีมากขึ้น และเมื่อเทียบทั้ง 2 วิธี กับการส่งโดยตรงไม่มีผู้ช่วยส่งจะเห็นได้ว่าในช่วง SNR[dB]ต่ำ การส่งแบบไม่มีผู้ช่วยส่งจะได้ค่า SER ที่ต่ำกว่าทั้ง 2 วิธี แต่เมื่อ SNR[dB] สูงขึ้น การส่งสัญญาณในระบบที่มีผู้ส่ง 1 คน จะได้ค่า SER ที่ต่ำกว่าแบบไม่มีผู้ช่วยส่ง

4.2.6 เปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนค่า σ^2 ของช่องสัญญาณในระบบจากผู้ส่งไปยังผู้ช่วยส่งสัญญาณ

ในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า σ^2 ภายในช่องสัญญาณ โดยกำหนดให้ในแต่ละช่องสัญญาณมีการมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK และผู้ช่วยส่งใช้การส่งผ่านข้อมูลแบบ AF และการรวมสัญญาณที่ปลายทางใช้แบบ ESNRC และ ERC การเปรียบเทียบระบบโดยแสดงค่า SER ต่อ SNR



รูปที่ 4.14 ช่องสัญญาณจากผู้ส่งไปยังผู้ช่วยส่งเปลี่ยน $\sigma^2 = 10$

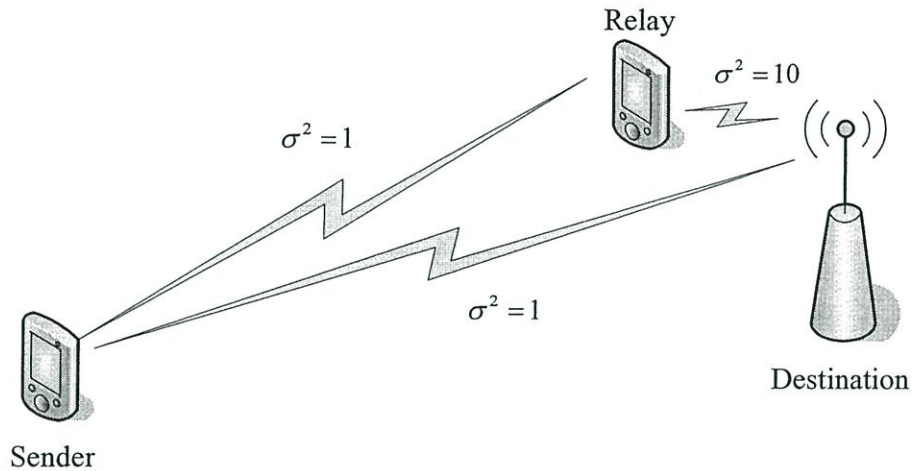


รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบ SER ของสัญญาณจากผู้ส่งไปยังผู้ช่วยส่งเปลี่ยน $\sigma^2 = 10$

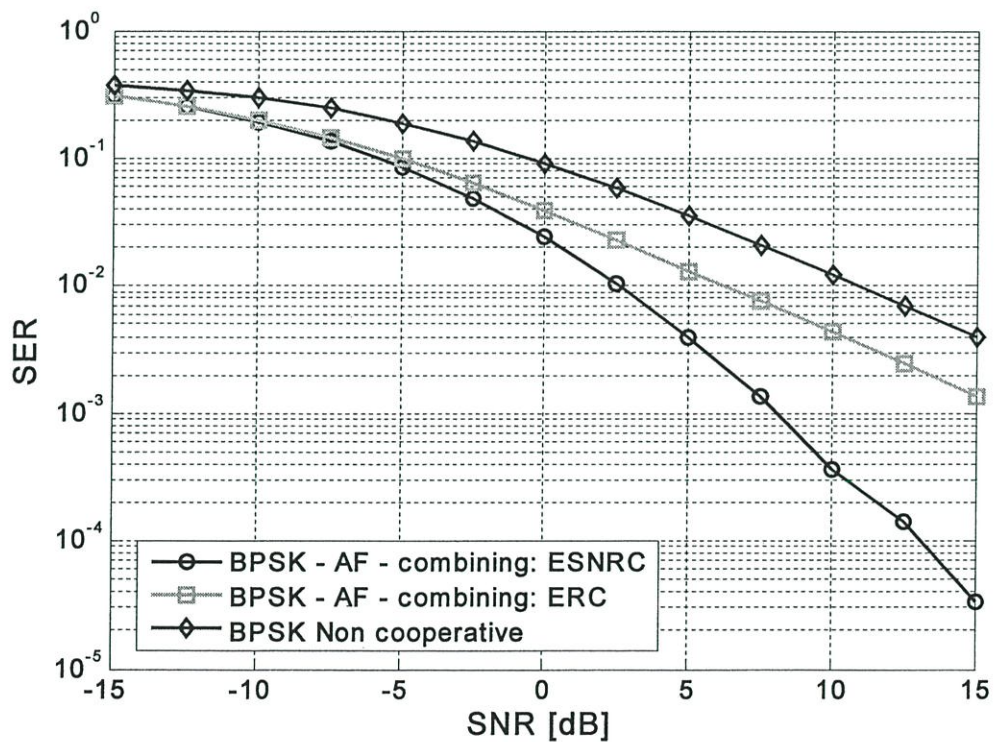
จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่า SER ที่ได้จากการจำลองระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือกรณีที่มีระบบมีผู้ใช้ 2 คน และเครื่องรับ 1 เครื่อง โดยผู้ใช้งานในระบบแต่ละคน ใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK ในสถานการณ์ที่รีเลย์อยู่ใกล้สถานีส่ง โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความแปรปรวนให้กับช่องสัญญาณที่ใช้ จาก 1 เป็น 10 ในเส้นทางระหว่างต้นทางไปยังรีเลย์ พบว่าการส่งสัญญาณที่มีผู้ช่วยส่งจะให้ค่า SER ที่ดีกว่าระบบที่ไม่มีผู้ช่วยส่ง และการเลือกใช้การรวมสัญญาณที่ปลายทางแบบ ESNRC จะให้ค่า SER ที่ดีกว่าแบบ ERC ในช่วงที่ค่า SNR สูง อยู่เพียงเล็กน้อย

4.2.6 เปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนค่า σ^2 ของช่องสัญญาณในระบบจากผู้ช่วยส่งไปยังปลายทาง

ในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า σ^2 ภายในช่องสัญญาณจากผู้ช่วยส่งไปยังปลายทาง โดยกำหนดให้ในแต่ละช่องสัญญาณมีการมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK และผู้ช่วยส่งใช้การส่งผ่านข้อมูลแบบ AF และการรวมสัญญาณที่ปลายทางใช้แบบ ESNRC และ ERC การเปรียบเทียบระบบโดยแสดงค่า SER ต่อ SNR



รูปที่ 4.16 ช่องสัญญาณจากผู้ช่วยส่งไปยังปลายทางเปลี่ยน $\sigma^2 = 10$



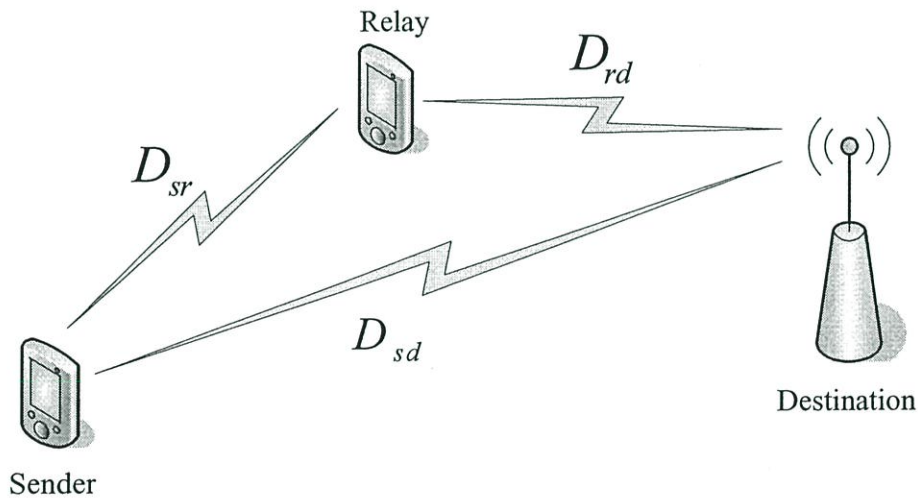
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบ SER ช่องสัญญาณจากผู้ช่วยส่งไปยังปลายทางเปลี่ยน $\sigma^2 = 10$

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่า SER ที่ได้จากการจำลองระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือกรณีที่มีระบบมีผู้ใช้ 2 คน และเครื่องรับ 1 เครื่อง โดยผู้ใช้งานในระบบแต่ละคน ใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK ในสถานการณ์ที่รีเลย์อยู่ใกล้สถานีส่ง โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความ

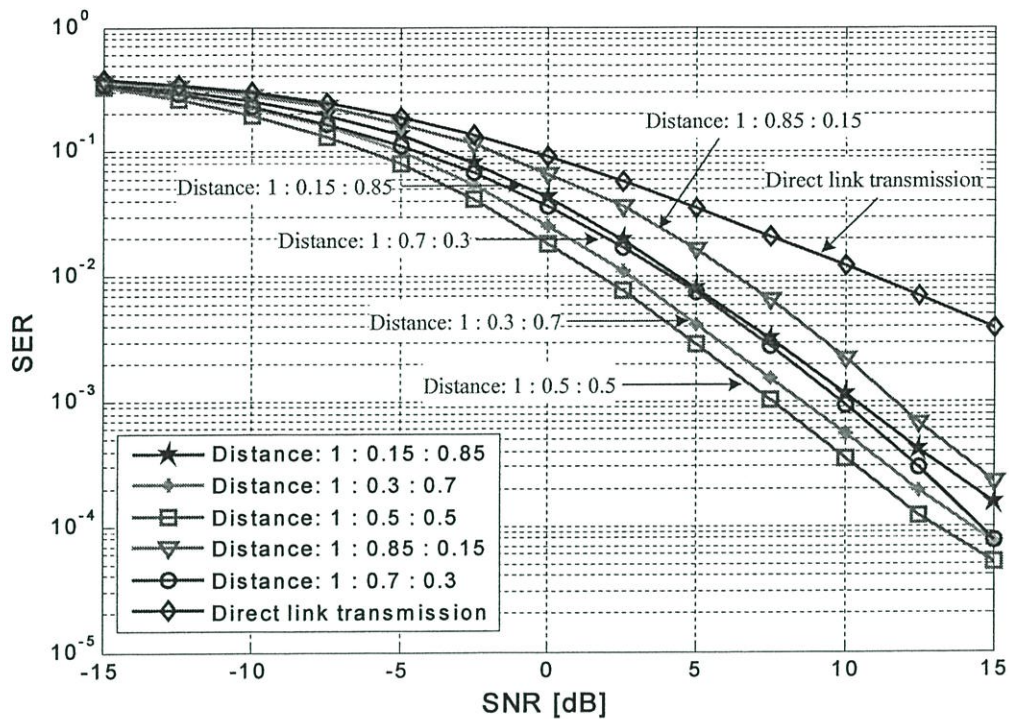
แปรปรวนให้กับช่องสัญญาณที่ใช้ จาก 1 เป็น 10 ในเส้นทางระหว่างรีเลย์ไปยังปลายทาง พบว่าการส่งสัญญาณที่มีผู้ช่วยส่งจะให้ค่า SER ที่ดีกว่าระบบที่ไม่มีผู้ช่วยส่ง และการเลือกใช้การรวมสัญญาณที่ปลายทางแบบ ESNRC จะให้ค่า SER ที่ดีกว่าแบบ ERC

4.2.7 เปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นจากการเลื่อนตำแหน่งของ Relay ให้อยู่ระหว่างผู้ส่ง (Sender) กับปลายทาง (Destination)

ในส่วนนี้จะเป็นการแสดง การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่นำเสนอ ในสถานการณ์ที่รีเลย์อยู่ระหว่างผู้ส่งกับปลายทาง คือ กำหนดให้ช่องสัญญาณระหว่างผู้ส่งกับปลายทาง มีระยะทาง 1 หน่วย โดยระยะทางระหว่างผู้ส่งกับรีเลย์ และระยะทางจากรีเลย์ไปยังปลายทาง จะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งการเคลื่อนของรีเลย์ โดยเปรียบเทียบกับระยะทางของผู้ส่งไปยังปลายทางโดยตรง ($D_{sd} = D_{sr} + D_{rd} = 1$) การรวมสัญญาณหลายทิศทางที่ปลายทางใช้ ESNRC เนื่องจากจากการรวมสัญญาณปลายทางหลายทิศทางแบบ ESNRC ให้อัตราความผิดพลาดในการตัดสินใจสัญญาณ (SER) ต่ำที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.18 โดยทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่นำเสนอขณะที่รีเลย์อยู่ที่ระยะทางต่างๆ



รูปที่ 4.18 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณี Relay อยู่ระหว่างผู้ส่งกับปลายทาง

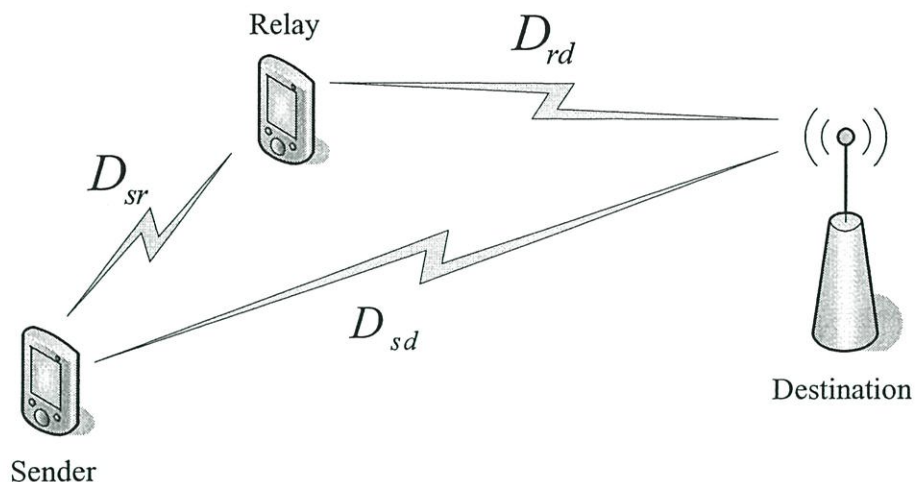


รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบค่า SER ที่เกิดกรณี Relay อยู่ระหว่างผู้ส่งกับปลายทาง

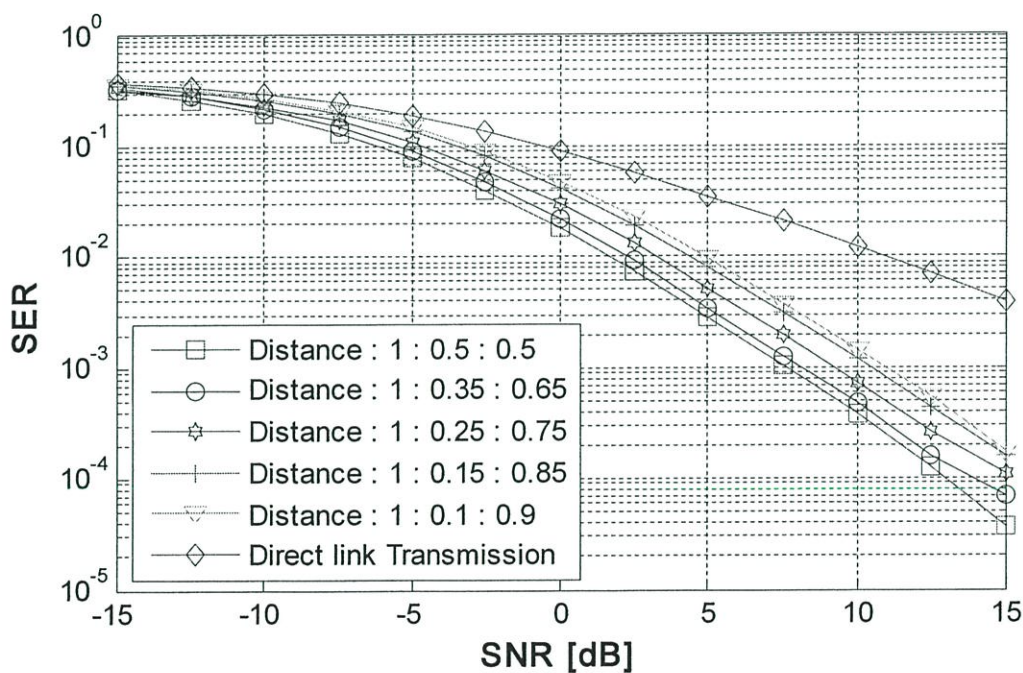
จากการเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนตำแหน่งของผู้ช่วยส่ง (Relay) ดังแสดงในรูปที่ 4.19 โดยการกำหนดให้ระยะทางของช่องสัญญาณระหว่างผู้ส่งไปยังเครื่องรับ โดยตรงที่ไม่มีผู้ช่วยส่ง (D_{sd}) มีระยะทางเท่ากับ 1 และระยะทางระหว่างผู้ส่งไปยังผู้ช่วยส่ง (D_{sr}) เมื่อรวมกับระยะทางของช่องสัญญาณสัญญาณระหว่างผู้ช่วยส่งไปยังปลายทาง (D_{rd}) มีค่าเท่ากับระยะทางของผู้ส่งไปยังปลายทางโดยตรงเท่ากับ 1 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ตำแหน่งที่ให้ค่า SER ต่ำที่สุด คือ ตำแหน่งของรีเลย์อยู่กึ่งกลาง ของระยะทางทั้งหมด) ของระยะทางช่องสัญญาณระหว่างผู้ส่งไปยังปลายทาง โดยตรง ซึ่งจะให้ค่า SER ต่ำกว่าตลอดช่วง SER

4.2.8 เปรียบเทียบการเลื่อนตำแหน่งของ Relay ให้เข้าใกล้กับผู้ส่ง (Sender)

ในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบโดยวัดค่า SER โดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของรีเลย์ จากตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทางของช่องสัญญาณจากผู้ส่งไปยังปลายทาง โดยจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะการเลื่อนรีเลย์เข้าหาผู้ส่ง และทำการเปรียบเทียบค่า SER ในแต่ละตำแหน่งเทียบกับตำแหน่งของรีเลย์ที่จุดกึ่งกลาง การรวมสัญญาณที่ปลายทางแบบหลายเส้นทางเลือกใช้แบบ ESNRC



รูปที่ 4.20 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณี Relay อยู่ใกล้กับผู้ส่ง



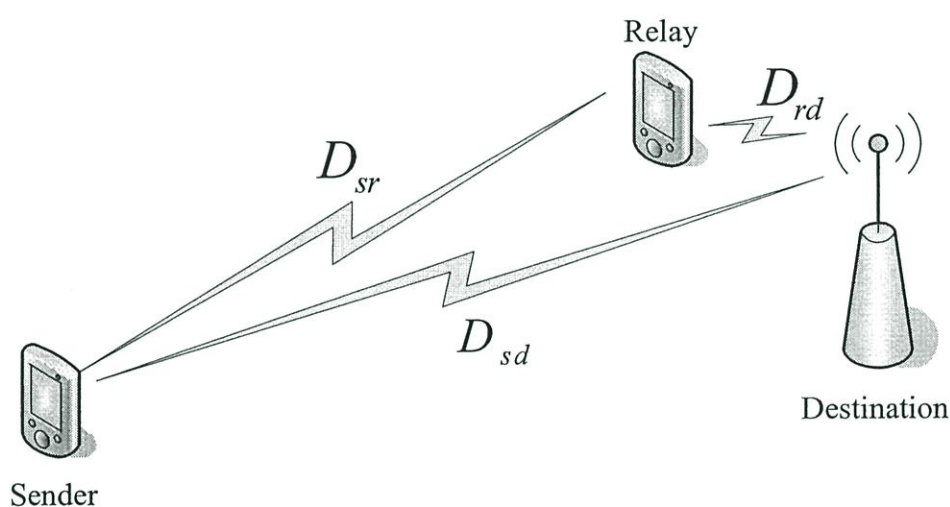
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่า SER ที่เกิดกรณี Relay อยู่ใกล้ผู้ส่ง

จากการเปรียบเทียบค่า SER ที่เกิดขึ้นจากกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของรีเลย์ โดยการเลื่อนตำแหน่งของรีเลย์ให้เข้าใกล้กับตำแหน่งของผู้ส่ง ดังแสดงการเลื่อนตำแหน่งในรูปที่ 4.20 พบว่าผลที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.21 เมื่อเราเลื่อนตำแหน่งของรีเลย์ให้เข้าใกล้ผู้ส่งมากเท่าไร ก็เปรียบเสมือนผู้ช่วยส่งมีระยะทางอยู่ไกลจากปลายทางตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลให้มีอัตรา

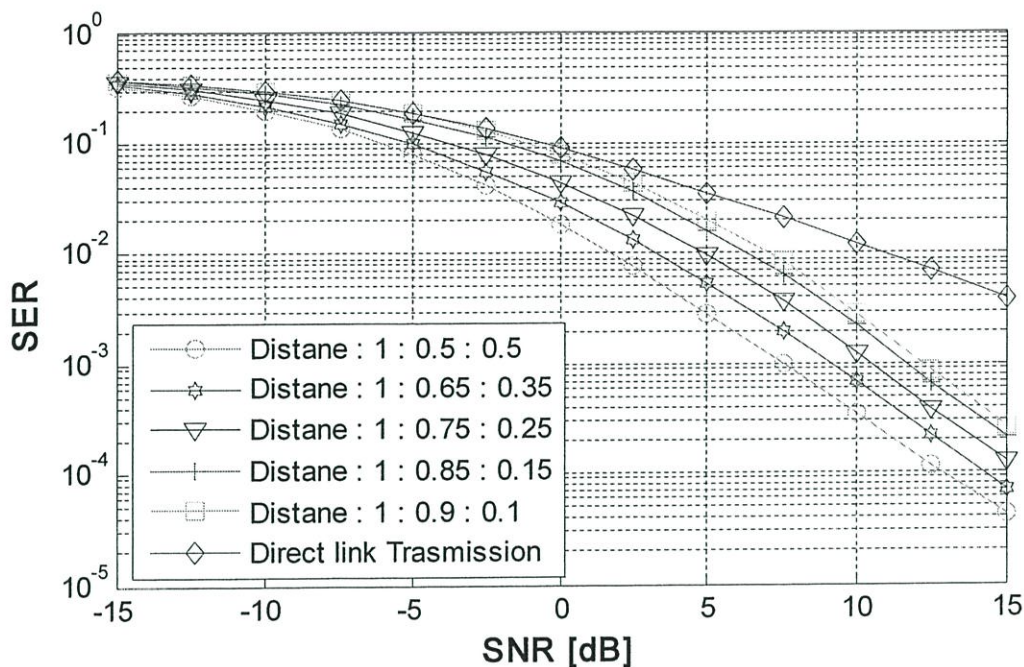
ความผิดพลาด SER เพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งของรีเลย์ที่อยู่กึ่งกลางระหว่างผู้ส่งกับปลายทาง

4.2.9 เปรียบเทียบการเลื่อนตำแหน่งของ Relay ให้เข้าใกล้กับปลายทาง (Destination)

ในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบโดยวัดค่า SER โดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของรีเลย์ จากตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทางของช่องสัญญาณจากผู้ส่งไปยังปลายทาง โดยจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะการเลื่อนรีเลย์เข้าหาปลายทาง และทำการเปรียบเทียบค่า SER ในแต่ละตำแหน่งเทียบกับตำแหน่งของรีเลย์ที่จุดกึ่งกลาง การรวมสัญญาณที่ปลายทางแบบหลายเส้นทางเลือกใช้แบบ ESNRC



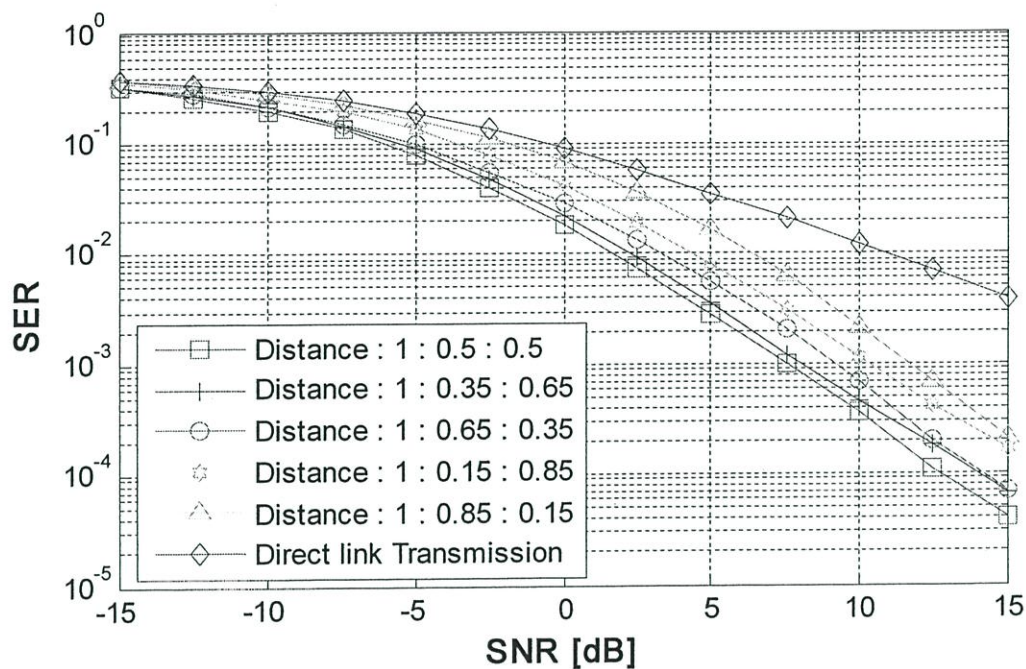
รูปที่ 4.22 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณี Relay อยู่ใกล้กับปลายทาง



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบค่า SER ที่เกิดกรณี Relay อยู่ใกล้ปลายทาง

จากการเปรียบเทียบค่า SER ที่เกิดขึ้นจากกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของรีเลย์ โดยการเลื่อนตำแหน่งของรีเลย์ให้เข้าใกล้กับตำแหน่งของปลายทาง ดังแสดงการเลื่อนตำแหน่งในรูปที่ 4.22 พบว่าผลที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.23 เมื่อเราเลื่อนตำแหน่งของรีเลย์ให้เข้าใกล้ปลายทางมากเท่าไร ก็เปรียบเสมือนผู้ช่วยส่งมีระยะทางอยู่ไกลจากผู้ส่งตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลให้มีอัตราความผิดพลาด SER เพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งของรีเลย์ที่อยู่กึ่งกลางระหว่างผู้ส่งกับปลายทาง

4.2.10 เปรียบเทียบการเลื่อนตำแหน่งของ Relay เข้าใกล้กับผู้ส่ง (Sender) และเข้าใกล้ปลายทาง (Destination) เป็นระยะทางที่เท่ากัน



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบค่า SER ที่เกิดขึ้นกรณี Relay เข้าใกล้กับผู้ส่ง (Sender) และเข้าใกล้ปลายทาง (Destination) เป็นระยะทางที่เท่ากัน

จากรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นถึงผลการเปรียบเทียบค่า SER ที่เกิดขึ้นกรณี Relay เข้าใกล้กับผู้ส่ง (Sender) และเข้าใกล้ปลายทาง (Destination) เป็นระยะทางที่เท่ากันจากกราฟที่แสดงนี้จะเป็นการอ้างผลของค่า SER กับผู้ช่วยส่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทาง เนื่องจากผู้ช่วยส่งจะให้ค่า SER คีที่่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.16 และในกราฟนี้แสดงให้เห็นว่า การเลื่อนตำแหน่งของผู้ช่วยส่งเข้าหาผู้ส่งจะให้ค่าความผิดพลาด (SER) ต่ำกว่า การเลื่อนตำแหน่งของผู้ช่วยส่งเข้าใกล้ปลายทาง แต่ตำแหน่งที่ให้ค่า SER คีที่่สุด คือ อยู่ใกล้จุดกึ่งกลางของระยะทาง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ (Cooperative communications) ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นด้วยวิธีปรับแต่งช่องสัญญาณด้วยตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (Least mean square: LMS algorithm) มาใช้ในการประมาณค่าของช่องสัญญาณแต่ละช่อง คือ ช่องสัญญาณที่มีการส่งสัญญาณจากผู้ส่งไปยังปลายทางโดยตรงที่ไม่มีผู้ช่วยส่ง และช่องสัญญาณที่ส่งสัญญาณจากผู้ส่งไปยังปลายทางโดยมีผู้ช่วยส่ง โดยกำหนดให้ระบบผู้ส่งข้อมูล (Sender) จำนวน 1 คน และมีผู้ช่วยในการส่งข้อมูล (Relay) จำนวน 1 คน โดยมีโปรโตคอลการมอดูเลตแบบเลื่อนเฟส บนพื้นฐานการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบหลายทางโดยการแบ่งเวลา (TDMA) และใช้การส่งผ่านข้อมูลจากผู้ช่วยส่งแบบขยายและส่งต่อ (Amplify and Forward) ไปยังสถานีฐาน ที่ปลายทางมีการรวมสัญญาณแบบหลายทิศทางด้วยวิธีแบบรวมด้วยอัตราส่วนเท่ากัน (Equal Ratio Combining : ERC) และการรวมสัญญาณปลายทางแบบปรับปรุงอัตราส่วน SNR (Enhanced Signal to Noise Ratio combining : ESNRC) การวัดประสิทธิภาพของสัญญาณสามารถวัดด้วยค่าอัตราความผิดพลาดในการตัดสินใจสัญลักษณ์ (Symbol error rate : SER) ซึ่งได้พบว่าระบบการสื่อสารแบบร่วมมือที่มีการประมาณค่าช่องสัญญาณด้วยระบบที่นำเสนอสามารถลดค่า SER ให้ต่ำลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารแบบร่วมมือที่ไม่มีการประมาณค่าของช่องสัญญาณ การเลือกวิธีการมอดูเลตสัญญาณด้วยวิธี BPSK จะให้ค่า SER ที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วิธีมอดูเลตแบบ QPSK ในการเลือกใช้วิธีการรวมสัญญาณที่ปลายทางก็มีผลต่อประสิทธิภาพของสัญญาณด้วยเช่นกัน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงวิธีรวมสัญญาณที่ปลายทาง 2 วิธี การรวมสัญญาณที่ปลายทางแบบ ESNRC จะให้ประสิทธิภาพของระบบที่ดีกว่าการรวมสัญญาณแบบ ERC ในการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือจะเห็นได้ว่าสิ่งที่สำคัญก็คือผู้ช่วยส่ง ถ้าในระบบมีผู้ช่วยส่งที่ดีก็จะสามารถลดค่า SER ให้ลดต่ำลงได้ และถ้ามีจำนวนผู้ช่วยส่งที่ดีมีจำนวนมากขึ้นในระบบก็จะช่วยลดค่า SER ให้ต่ำลงได้อีก และตำแหน่งของ Relay ก็มีผลต่อประสิทธิภาพของสัญญาณด้วย จากงานวิจัยฉบับนี้พบว่า ผู้ช่วยส่งที่ใช้การส่งผ่านข้อมูลจากผู้ช่วยส่งแบบขยายและส่งต่อ (Amplify and Forward) ก็เปรียบเสมือนเป็นเครื่องทวนสัญญาณ (Repeater) ดังนั้นถ้าผู้ช่วยส่งอยู่ใกล้ผู้ส่งจะทำให้ค่า SER ต่ำลงมากกว่าที่ผู้ส่งอยู่ไกลปลายทาง แต่ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของ Relay ก็คือ Relay ควรจะอยู่กึ่งกลางของระยะทางระหว่างผู้ส่งกับปลายทาง

ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงสามารถสรุปผลการวิจัยได้ว่า ในระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่ใช้การส่งผ่านข้อมูลแบบขยายและส่งต่อ (Amplify and Forward) มีการประมาณช่องสัญญาณด้วยตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (least mean square (LMS) สามารถลดค่าอัตราความผิดพลาดในการตัดสินใจสัญลักษณ์ (Symbol error rate : SER) ให้ลดต่ำลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการประมาณค่าช่องสัญญาณ การรวมสัญญาณที่ปลายทางแบบหลายทิศทางควรใช้วิธี ESNRC การเลือกใช้โปรโตคอลในการมอดูเลต กรณีที่ค่า SNR ต่ำ ควรใช้การมอดูเลตแบบ BPSK ถ้ากรณีที่ SNR สูง ควรเลือกการมอดูเลตแบบ QPSK และตำแหน่งที่เหมาะสมของ Relay ที่ให้ค่า SER ต่ำสุดควรอยู่กึ่งกลางระหว่างผู้ส่งกับปลายทาง และถ้ามีจำนวนของ Relay จำนวนมากขึ้นก็จะสามารถลดค่า SER ให้ลดต่ำลงได้

การปรับค่าสัมประสิทธิ์ μ คือ ค่าคงที่เล็กๆ ค่าหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมอัตราการลู่เข้าของค่าสัมประสิทธิ์แต่ละรอบ โดยค่านี้ควรจะมีค่าที่เล็กพอที่จะทำให้การปรับค่าสัมประสิทธิ์มีเสถียรภาพ สามารถลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมได้โดยไม่มีปัญหาการแกว่ง

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยที่ควรพัฒนาหรือศึกษาต่อไปในอนาคต

- 1 นำระบบการปรับตัวได้ของโปรโตคอลในการมอดูเลตมาใช้ในระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ ซึ่งจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้ดีขึ้น
- 2 นำระบบ OFDM มาใช้กับระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ
- 3 นำวิธีการส่งผ่านข้อมูลแบบ Decode and Forward และ Amplify and Forward มาใช้ร่วมกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.J.Paulraj, D.A.Gore, R.U. Nabar, H.Bölcskei. “An Overview of MIMO communications-A Key to Gigabit Wireless.” *Proceedings of the IEEE*. 92 (February 2004) : 198-218.
- [2] Al-Dhahir, N, “FIR channel-shortening equalizers for MIMO ISI channels”, *IEEE Communications Magazine*, 213 - 218, Feb 2001
- [3] A. Nosratinia, Todd E.Hunter, “Cooperative Communication in Wireless Networks”, *IEEE Communications Magazine*, October 74-80, 2004.
- [4]. J.N. Laneman, D.C Tse, G.W. Wornell, “Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior”, *IEEE Signal Processing Letters*, September 597-600, 2005.
- [5] Chaiyod Pirak, Z.Jane Wang and K.J. Ray Liu. “An Adaptive protocol for cooperative communications achieving asymptotic minimum symbol-error-rate.” *IEEE ICASSP06*. May 2006
- [6] Jae Ha Yoo; Dong Yon Kim, “Network echo canceller based on the practical adaptive filter”, *Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, 693 - 696, Dec. 2005
- [7] D. G. Brennan. “Linear diversity combining techniques.” *Proceedings of the IEEE*. 91 (Feb. 2003) :331-356.
- [8] Rugini, L.; Leus, G, “Basis Expansion Adaptive Filters for Time-Varying System Identification”, *IEEE International Workshop*, 153 - 156, Dec. 2007
- [9] Tarokh, V., et al., “Space-Time Codes for High Data Rate Wireless Communication: Performance Criteria in Presence of Channel Estimation Errors, Mobility, and Multiple Paths.” *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 47, No.2, (February 1999) : 199-207.
- [10] Haykin, S. (2002). *Adaptive Filter Theory*. (4th Edition). Prentice-Hall.
- [11] Feuer, A., and Weinstein, E. (1985). Convergence Analysis of LMS Filters with Uncorrelated Gaussian Data. *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 31(1): 222- 230.
- [12] Nachaiyaphum, K., Sujitjorn, S., and Rugmai, S. (2008). Adaptive Wiener Filter Based Numerical Filter with an Application to Beam Position Monitoring. *WSEAS Trans. Electronics*. 2(5): 40-52.

- [13] Troparevsky, M. I., and D'Attellis, C.E. (2004). On the convergence of the LMS algorithm in adaptive filtering. *Signal Processing*. 84(2004): 1985-1988.
- [14] Wang, J., and Milstien, L. B. (1996). Adaptive LMS filters for cellular CDMA overlay situations. *IEEE Jour. Communications*. 14(9): 1548-1559.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายจิรพันธ์ พิมพล

วัน เดือน ปีเกิด 8 พฤษภาคม 2522 ที่ขอนแก่น

ที่อยู่ 124 หมู่ 6 ต.กุดขอนแก่น อ.ภูเวียง จ.ขอนแก่น 40150 โทร.086-982-3319

ประวัติการศึกษา 2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า-โทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) ระบบโทรคมนาคม

2.) ระบบสายอากาศ

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

ปัจจุบัน อาจารย์พิเศษมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น