

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องรับปรับตัวได้แบบปริภูมิเวลาสำหรับเครือข่ายรีเลย์แบบร่วมมือ

ADAPTIVE SPACE-TIME RECEIVER FOR COOPERATIVE
RELAY NETWORKS



T123049

นางสาวรชนีกร ชัยสงค์
RACHANEEKORN CHAISONG

จพ.
ร 122ค
2005

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 123049
วัน,เดือน,ปี..... 1.8.ค.ค. 2555

b. 122ค 9/23
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2555
KMITL-2012-EN-M-230-056

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADAPTIVE SPACE-TIME RECEIVER FOR COOPERATIVE
RELAY NETWORKS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASSTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012
KMITL-2012-EN-M-230-056

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

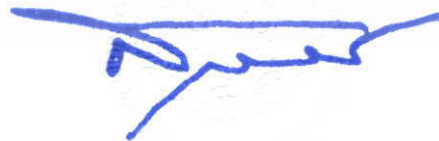
หัวข้อวิทยานิพนธ์ เครื่องรับปรับตัวได้แบบปริภูมิเวลาสำหรับเครือข่ายรีเลย์แบบร่วมมือ
Thesis Title Adaptive Space-Time Receiver for Cooperative Relay Networks
นักศึกษา นางสาวรชนีกร ชัยสงค์
รหัสประจำตัว 51061002
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชวลิต เบญจางคประเสริฐ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2012-EN-M-230-060

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.อรลาภ	แสงอรุณ	
รศ.ดร.อรรถสิทธิ์	เหล่าสกุล	
รศ.นภพินท์	อนันตศิริชัย	
ดร.พนารัตน์	เชิญถนอมวงศ์	
รศ.ดร.ชวลิต	เบญจางคประเสริฐ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องรับปรับตัวได้แบบปริภูมิเวลาสำหรับเครือข่ายรีเลย์แบบร่วมมือ
ชื่อนักศึกษา	นางสาวรชนีกร ชัยสงค์
รหัสประจำตัว	51061002
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ชาลิต เบญจางคประเสริฐ

บทคัดย่อ

ในอนาคตรบบการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายจะมีการสนับสนุนอัตราการส่งข้อมูลที่สูงยิ่งขึ้น ซึ่งความจุของระบบสามารถเพิ่มได้ด้วยการใช้เสาอากาศส่งหลายต้นรับหลายต้น (Multiple Input Multiple Output : MIMO) โดยรับสัญญาณที่กระจาย และสะท้อนอยู่ในสภาพแวดล้อม และเมื่อสัญญาณโดยตรง (Line-of-Sight) ของช่องสัญญาณขาดหายไป ทำให้ความจุของช่องสัญญาณลดลงเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้จึงได้ใช้ประโยชน์จากการทำงานร่วมกันโดยใช้รีเลย์โหนดขยายและส่งต่อ (Amplify & Forward relay node) ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่สามารถจะนำมาแก้ไขปัญหานี้ได้ และสามารถที่จะเพิ่มระยะของช่องสัญญาณ MIMO ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากเครื่องรับปรับตัวได้ โดยการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา (Layered Space-Time Coded : LSTC) ซึ่งมีความซับซ้อนต่ำ ทำให้สามารถทำงานได้เร็ว และใช้เพื่อลดสัญญาณรบกวน และขจัดสัญญาณแทรกสอดในช่องสัญญาณร่วม (Co - Channel Interference : CCI) และการจางหายเนื่องจากหลายเส้นทาง (Multi-Path Fading) ของระบบให้ดีขึ้น โดยเทคนิคการปรับค่าแบบ LMS (Least Mean Square Algorithm) และ แบบ SR (The Signed - Regressor Algorithm) ได้ถูกนำมาปรับใช้ในกระบวนการปรับค่าน้ำของเครื่องรับ ผลการจำลองการทำงาน แสดงให้เห็นว่า เครื่องรับที่นำเสนอสามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบให้สูงขึ้นได้

Thesis Title	ADAPTIVE SPACE-TIME RECEIVER FOR COOPERATIVE RELAY NETWORKS
Student	Miss Rachaneekorn Chaisong
Student ID	51061002
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2012
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chawalit Benjangkprasert

ABSTRACT

In future wireless communication systems have to support high data rates. The capacity of these systems can be increased dramatically by using multiple antennas at the transmitter and the receiver working in a rich scattering and reflecting environment, but in a line-of-sight environment the MIMO channel matrix is rank deficient, therefore the capacity increase diminishes. An adaptive space-time receiver for cooperative relay networks is proposed. Using cooperative amplify-and-forward relay nodes, the proposed receiver is based on a joint adaptive iterative detection and decoding algorithm, adaptively cancels co-channel interference and eliminates the multiple access interference. The least mean square (LMS) algorithm and the signed-regressor (SR) algorithm are used for the adaptive receiver. Simulation results show that the proposed scheme achieves better bit error rate (BER) performance.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ชวลิต เบญจางคประเสริฐ และ ดร.จักรี ทีฆภาคย์วิศิษฐ์ เป็นอย่างสูงที่ให้ข้อมูลที่สำคัญมาก ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนช่วยชี้แนะแนวทางในการทำวิจัย เป็นที่ปรึกษาและคอยกระตุ้นเตือนอยู่เสมอ ทำให้มีกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณโย พี่โรจน์ บีม แม็ก พี่ศักดิ์ และพี่ต้อม ที่ให้คำแนะนำและข้อมูลต่าง ๆ และเป็นกำลังใจที่ทำให้ประสบผลสำเร็จ

ขอขอบคุณ อ.สมยศ คุณอมร คุณสมบูรณ์ และคุณบรรลือชัย ที่ให้การสนับสนุนเรื่องทุนในการศึกษา รวมทั้งเพื่อน ๆ พี่ ๆ ที่บริษัท โนว์ฮาวทรานสเฟอร์ จำกัด ที่เป็นกำลังใจให้จนประสบผลสำเร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้คำสั่งสอน และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด ตั้งแต่เริ่มเข้าศึกษาจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ

คุณค่าและประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบแด่บุคคลที่กล่าวถึงข้างต้น และทุก ๆ คนที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ด้วย

รชนีกร ชัยสงค์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย.....	5
2.1 หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย.....	5
2.2 ความหลากหลายของช่องสัญญาณและการจางหาย.....	6
2.2.1 ไตเวอร์ซิตีทางเวลา.....	6
2.2.2 ไตเวอร์ซิตีทางความถี่.....	7
2.2.3 ไตเวอร์ซิตีทางสเปซ หรือไตเวอร์ซิตีทางสายอากาศ.....	7
2.2.3.1 ไตเวอร์ซิตีการรวมสัญญาณโดยใช้อัตราส่วนสูงที่สุด.....	8
2.2.4 การจางหายหรือเฟดดิ้ง (Fading).....	8
2.2.5 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดการจางหาย.....	9
2.2.5.1 การแผ่แบบประวิงเวลา (Delay spread).....	9
2.2.5.2 การแผ่แบบดอปเพลอร์ (Doppler spread).....	9
2.2.6 รูปแบบการจางหาย.....	9
2.2.6.1 รูปแบบของการจางหายเมื่อพิจารณาจากการแผ่แบบประวิงเวลา.....	11
2.2.6.2 รูปแบบของการจางหายเมื่อพิจารณาจากการแผ่แบบดอปเพลอร์.....	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก	13
2.3.1 ระบบหนึ่งทางเข้าหลายทางออก.....	13
2.3.2 ระบบหลายทางเข้าหนึ่งทางออก.....	13
2.3.3 ระบบหลายทางเข้าหลายทางออก.....	13
2.3.4 เทคนิคการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก	14
2.3.4.1 การเข้ารหัสเชิงปริภูมิเวลา.....	14
2.3.4.2 การมัลติเพล็กซ์ทางปริภูมิ.....	14
2.4 ความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ	15
2.4.1 แบบจำลองระบบและการเข้าถึงช่องสัญญาณ.....	16
2.4.2 โพรโทคอลสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ.....	18
2.4.2.1 โพรโทคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง.....	18
2.4.2.2 โพรโทคอลแบบเลือก.....	18
2.4.2.3 โพรโทคอลแบบมีการป้อนกลับ.....	18
2.5 รหัสประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา.....	20
2.5.1 เครื่องส่งแบบปริภูมิเวลา.....	21
2.5.2 เครื่องรับแบบปริภูมิเวลา.....	25
2.6 วงจรกรองปรับตัวได้.....	26
2.6.1 วงจรกรองปรับตัวได้แบบ LMS.....	26
2.6.1.1 สมรรถนะของวงจรกรองปรับตัวได้ที่อาศัยอัลกอริทึมแบบค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด.....	33
2.6.2 อัลกอริทึมดัดแปลงจากอัลกอริทึมแบบ LMS.....	43
2.6.2.1 อัลกอริทึมแบบไซน์.....	43
2.6.2.2 อัลกอริทึมแบบไซน์รีเกรสเซอร์.....	43
2.6.2.3 อัลกอริทึมแบบไซน์-ไซน์.....	44
2.6.3 การวัดประสิทธิภาพของระบบปรับตัว.....	44
2.6.3.1 ความเร็วในการลู่เข้า.....	45
2.6.3.2 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง.....	45
2.6.3.3 ความถูกต้องในการประมวลค่าตัวแปร.....	45
2.6.3.4 ความซับซ้อนในการประมวลผล.....	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 รหัสคอนโวลูชัน	45
2.7.1 ตัวอย่างการเข้ารหัสคอนโวลูชัน	46
2.7.2 แผนภาพการเปลี่ยนสถานะ	48
2.8 การถอดรหัสแบบแมป	50
2.8.1 อัลกอริทึมการถอดรหัสแบบแมป	52
2.9 ปัญหาของการจางหายเนื่องจากหลายเส้นทาง	56
บทที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูล	57
3.1 โครงสร้างเครื่องรับแบบร่วมมือ	57
3.2 โครงสร้างเครื่องส่งแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา	59
3.3 โครงสร้างเครื่องรับ	60
3.4 การทำงานของระบบที่นำเสนอ	64
บทที่ 4 ผลการวิจัย	65
4.1 ข้อกำหนดในการจำลองผล	65
4.1.1 การตั้งค่าเริ่มต้นคงที่ของภาคส่งและภาครับ และจำนวนรีเลย์	65
4.1.2 ค่าที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ สำหรับการทำงานร่วมกันของรีเลย์	65
4.1.3 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ซึ่งพิจารณาจากจำนวนของบิตที่ผิดพลาด จากบิตข้อมูลที่ส่งออกไปทั้งหมด	66
4.2 เปรียบเทียบความเร็วในการลู่เข้า (Convergence speed) ของอัลกอริทึมแบบ LMS และ SR	66
4.3 แบบจำลองการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงขาดหาย	67
4.3.1 การเปรียบเทียบระหว่างเครื่องรับแบบปรับตัวได้โดยใช้เครือข่ายรีเลย์แบบร่วมมือ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS	67
4.3.1.1 การเปรียบเทียบระหว่างการใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ตัว ตามลำดับ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS	67
4.3.1.2 การเปรียบเทียบระหว่างใช้รีเลย์จำนวน 1 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS	68
4.3.1.3 การเปรียบเทียบระหว่างใช้รีเลย์จำนวน 2 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS	69

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1.4 การเปรียบเทียบระหว่างใช้รีเลย์จำนวน 3 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS	70
4.3.2 การเปรียบเทียบระหว่างเครื่องรับแบบปรับตัวได้โดยใช้เครือข่ายรีเลย์แบบร่วมมือ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR	71
4.3.2.1 การเปรียบเทียบระหว่างการใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ตัวตามลำดับ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR.....	71
4.3.2.2 การเปรียบเทียบระหว่างใช้รีเลย์จำนวน 1 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR	72
4.3.2.3 การเปรียบเทียบระหว่างใช้รีเลย์จำนวน 2 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR.....	73
4.3.2.4 การเปรียบเทียบระหว่างใช้รีเลย์จำนวน 3 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR.....	74
4.4 แบบจำลองแบบการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง	75
4.4.1 การเปรียบเทียบระหว่างเครื่องรับแบบปรับตัวได้โดยใช้เครือข่ายรีเลย์แบบร่วมมือ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS	75
4.4.1.1 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงที่ไม่ใช้รีเลย์ และใช้รีเลย์ 1 ตัว โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS	75
4.4.1.2 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ซึ่งใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ตัว ตามลำดับ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS.....	76
4.4.1.3 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ซึ่งใช้รีเลย์จำนวน 1 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS.....	77
4.4.1.4 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ซึ่งใช้รีเลย์จำนวน 2 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS.....	78
4.4.1.5 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ซึ่งใช้รีเลย์จำนวน 3 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS.....	79
4.4.2 การเปรียบเทียบระหว่างเครื่องรับแบบปรับตัวได้โดยใช้เครือข่ายรีเลย์แบบร่วมมือ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR	80
4.4.2.1 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงที่ไม่ใช้รีเลย์ และใช้รีเลย์ 1 ตัว โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR.....	80

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.2.2 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ซึ่งใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ตัว ตามลำดับ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR.....	81
4.4.2.3 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ซึ่งใช้รีเลย์จำนวน 1 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้ อัลกอริทึมแบบ SR.....	82
4.4.2.4 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ซึ่งใช้รีเลย์จำนวน 2 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้ อัลกอริทึมแบบ SR.....	83
4.4.2.5 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ซึ่งใช้รีเลย์จำนวน 3 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้ อัลกอริทึมแบบ SR.....	84
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	85
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	85
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
บรรณานุกรม.....	87
ภาคผนวก.....	89
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	91

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การกำหนดค่าสำหรับค่าแต่ละสถานะ	49
2.2 รายละเอียดการเปลี่ยนสถานะ	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย..... 6
2.2	แสดงรูปแบบของการจางหาย 11
2.3	การรับส่งข้อมูลแบบสายอากาศเดี่ยวและหลายสายอากาศ 13
2.4	แบบจำลองการมัลติเพิล็กซ์เชิงปริภูมิ 15
2.5	ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ..... 16
2.6	การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ..... 16
2.7	การส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify and Forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ..... 19
2.8	การส่งต่อสัญญาณแบบ Decode and Forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ..... 20
2.9	สถาปัตยกรรม VLST..... 21
2.10	สถาปัตยกรรม HLST ที่มีวงจรถ่ายรหัสหนึ่งตัว..... 22
2.11	สถาปัตยกรรม HLST ที่มีวงจรถ่ายรหัสในแต่ละชั้น..... 22
2.12	สถาปัตยกรรม DLST หรือ TLST 23
2.13	บล็อกไดอะแกรมวงจรกรองแบบปรับตัวได้ที่อาศัยอัลกอริทึมแบบ LMS 27
2.14	ให้ค่าผิดพลาดเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณ 41
2.15	อัตราการลู่เข้าของอัลกอริทึมแบบ LMS, Singed, Signed Regressor, Sign-Sign..... 44
2.16	โครงสร้างวงจรถ่ายรหัสคอนโวลูชัน..... 46
2.17	ตัวอย่างวงจรถ่ายรหัสคอนโวลูชัน..... 46
2.18	ตัวอย่างขั้นตอนการเข้ารหัสของข้อมูล 110101 โดยใช้วงจรถ่ายรหัสในรูปที่ 2.17 48
2.19	แผนภาพการเปลี่ยนสถานะของวงจรถ่ายรหัสคอนโวลูชันตามโครงสร้างในรูปที่ 2.20 48
2.20	ตัวอย่างการเปลี่ยนสถานะของวงจรถ่ายรหัสคอนโวลูชันตามตัวอย่าง 49
2.21	ตัวเข้ารหัสสำหรับรหัสไบนารี (2, 1, 2)..... 50
2.22	สถานะในเทรลลิสไดอะแกรมสำหรับรหัสคอนโวลูชันไบนารี (2, 1, 2)..... 51
2.23	ภาพแสดงรีเคอร์ชันทั้งแบบไปทางด้านหน้าและด้านหลัง 55
3.1	ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่น่าเสนอ 57
3.2	โครงสร้างเครือข่ายรีเลย์ 2-hop สำหรับลำดับการส่งของเสาอากาศเครื่องส่งและเครื่องรับ 58
3.3	โครงสร้างเครื่องส่งเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา..... 60
3.4	โครงสร้างเครื่องรับแบบปรับตัวได้แบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา (LST) 60
4.1	การเปรียบเทียบความเร็วในการลู่เข้า (Convergence speed) ของอัลกอริทึมแบบ LMS และ SR โดยใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากัน คือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX}=2$) ต้น และ รีเลย์ 1 ตัว ($N_R = 1$) กับค่า MSE ใช้จำนวนวนซ้ำ (iteration) 50 รอบ 66
4.2	ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณีการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงขาดหาย โดยใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากัน คือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX}=2$) ต้น และ รีเลย์ 1 2 และ 3 ตัว ($N_R = 1, 2, 3$) ตามลำดับ..... 67

สารบัญรูป (ต่อ)

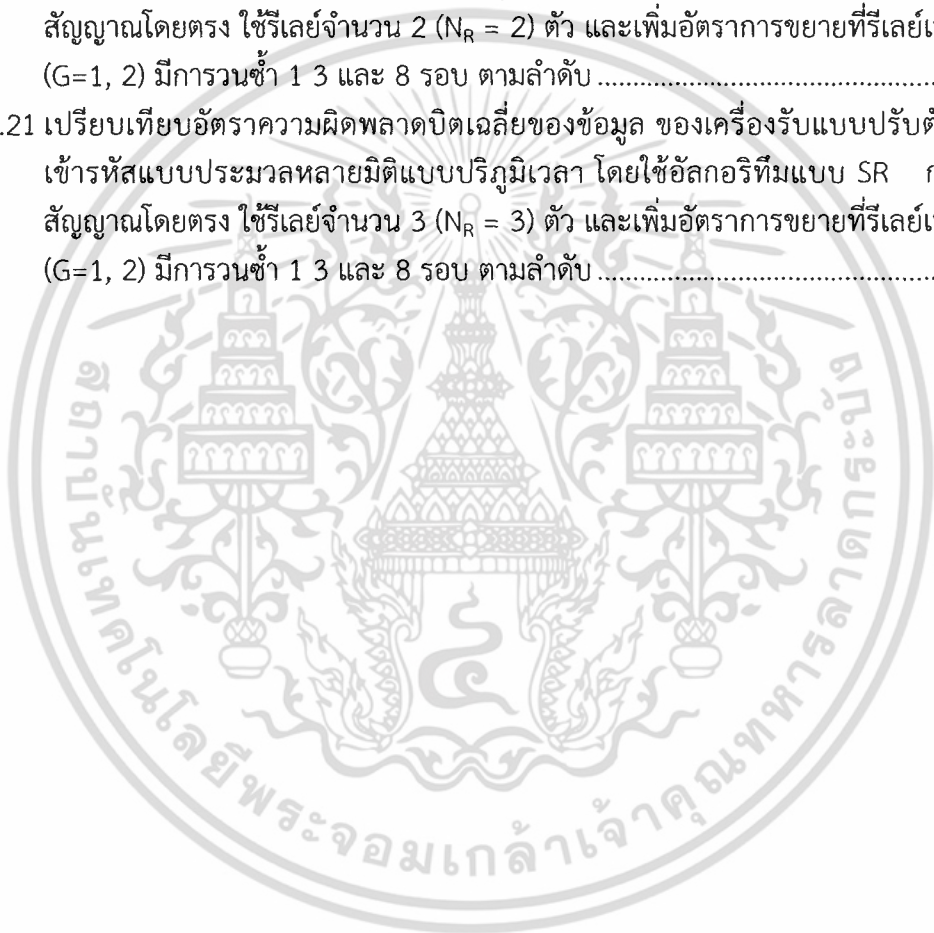
รูปที่	หน้า
4.3 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีสัญญาณโดยตรงขาดหาย และใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ($N_R = 1, 2$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบตามลำดับ.....	67
4.4 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีโดยตรงขาดหายไป และใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ.....	68
4.5 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีสัญญาณโดยตรงขาดหายไป และใช้รีเลย์จำนวน 2 ($N_R = 2$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ.....	69
4.6 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีสัญญาณโดยตรงขาดหายไป และใช้รีเลย์จำนวน 3 ($N_R = 3$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ.....	70
4.7 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR กรณีสัญญาณโดยตรงขาดหายไป และใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ($N_R = 1, 2$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ.....	71
4.8 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR กรณีสัญญาณโดยตรงขาดหายไป และใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบตามลำดับ.....	72
4.9 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SA กรณีสัญญาณโดยตรงขาดหายไป และใช้รีเลย์จำนวน 2 ($N_R = 2$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ.....	73
4.10 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SA กรณีสัญญาณโดยตรงขาดหายไป และใช้รีเลย์จำนวน 3 ($N_R = 3$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ.....	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณีของระบบที่นำเสนอมีการเชื่อมต่อกับสัญญาณโดยตรง ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากัน คือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX}=2$) ต้น และ รีเลย์ 1 2 และ 3 ตัว ($N_R = 1, 2, 3$) ตามลำดับ.....	75
4.12 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงโดยไม่ใช้รีเลย์ (LoS) และเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง โดยใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ.....	75
4.13 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ($N_R = 1, 2$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ.....	76
4.14 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา ใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง โดยใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ.....	77
4.15 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ใช้รีเลย์จำนวน 2 ($N_R = 2$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ.....	78
4.16 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ใช้รีเลย์จำนวน 3 ($N_R = 3$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ.....	79
4.17 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงโดยไม่ใช้รีเลย์ (LoS) และเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ.....	80
4.18 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ($N_R = 1, 2$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ.....	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ	82
4.20 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ใช้รีเลย์จำนวน 2 ($N_R = 2$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ	83
4.21 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ใช้รีเลย์จำนวน 3 ($N_R = 3$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ	84



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการสื่อสารไร้สายได้มีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวัน เนื่องจากความต้องการสื่อสารได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และหลากหลายในการรับส่งข้อมูล การรับส่งข้อมูลจะใช้ความถี่วิทยุในย่านความถี่มากกว่า 5 GHz เช่น Wireless Local Area Network (WLAN) ในย่าน Industrial Scientific and Medical (ISM) หรือการใช้โทรศัพท์มือถือที่นับวันจะต้องการส่งข้อมูลในรูปแบบที่เป็น Multimedia เช่น ไฟล์วิดีโอ รูปภาพ เพลง ที่ต้องการอัตราการส่งข้อมูล และความถูกต้องในการรับส่งข้อมูลที่สูง โดยที่มีข้อจำกัดในเรื่องแบนด์วิดท์ที่มีอย่างจำกัด แต่ต้องการใช้ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นเทคโนโลยีทางการสื่อสารใหม่ ๆ เพื่อสนองความต้องการดังกล่าว ซึ่งการรับส่งข้อมูลแบบไร้สายแบบส่งหลายเสารับหลายเสา (Multiple Input Multiple Output: MIMO) สามารถสนองความต้องการดังกล่าวได้

เทคนิคการส่งแบบ MIMO หรือ การสื่อสารแบบส่งหลายเสารับหลายเสานั้น สามารถเพิ่มความเร็วในการส่งข้อมูล และความจุของระบบสื่อสารได้ โดยการใช้จำนวนของเสาอากาศส่ง และรับมากกว่าหนึ่งเสา เป็นผลทำให้สามารถเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลได้รวดเร็วมากขึ้น [1] เนื่องจากการใช้เสาอากาศส่งหลายเสาจะเป็นการแบ่งข้อมูลในการส่งออกไปในแต่ละเสา ส่วนในทางภาครับก็จะใช้เสาอากาศรับหลายเสาเป็นการเพิ่มกำลังในการรับสัญญาณที่หลายเส้นทาง เมื่อมาถึงภาครับจะทำให้เป็นการเพิ่มอัตราการไต่เวอร์ซิติ [2]

โครงสร้างรหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา (Layered space-time coded : LSTC)[3][4] เป็นระบบที่ปรับปรุงประสิทธิภาพของช่องสัญญาณที่เกิดปัญหาบรบกวนของช่องสัญญาณร่วม (Co-Channel Interference : CCI) ที่เกิดขึ้นจากการที่ผู้ใช้ มีการใช้งานของเสาอากาศมากกว่าหนึ่งเสาต่อหนึ่งคน ซึ่งก็คือเสาอากาศแบบ MIMO เสาอากาศของผู้ใช้งานรายหนึ่ง ๆ จะใช้รหัสชุดเดียวกันในทุกเสาทำให้เมื่อสัญญาณมาถึงภาครับ และถูกถอดออก จะเกิดข้อมูลที่ไม่ใช่ของเสาอากาศที่พิจารณาบรบกวนเสาอากาศที่กำลังพิจารณาอยู่ เนื่องจากเกิดอัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation) ระหว่างข้อมูลที่ส่งออกมาจากแต่ละเสาอากาศส่ง นอกจากนี้ยังเกิดการจางหายเนื่องจากหลายเส้นทาง (Multipath fading) สภาพการใช้งานจริงสัญญาณจะมีการสะท้อนกับสิ่งต่าง ๆ รอบข้างได้มากมาย ไม่จำกัดอยู่เฉพาะในบางรูปแบบ ซึ่งการสะท้อนของคลื่นเหล่านี้ส่งผลให้สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ ประกอบด้วยสัญญาณที่แพร่มาจากมากกว่าหนึ่งทิศทาง และโดยทั่วไปแล้วสัญญาณเหล่านี้มักจะเดินทางมาถึงภาครับด้วยเวลาที่แตกต่างกัน และมีขนาดที่แตกต่างกันด้วย เมื่อสัญญาณเหล่านี้มารวมเข้าด้วยกัน จะได้สัญญาณที่มีแอมพลิจูดแปรเปลี่ยนได้อย่างมาก

สำหรับการเพิ่มความถี่นั้น มีความเป็นไปได้ที่จะปรับเพิ่มจำนวนเสาอากาศหลายเสามากมาย เพื่อเพิ่มค่าการกระจายสัญญาณ (Rich array) เพราะเมื่อสัญญาณมีขนาดของการกระจายลดลง และไม่สัมพันธ์กับระยะทาง อัตราการเพิ่มของสัญญาณเมื่อเพิ่มจำนวนของเสาอากาศ สามารถชดเชยในส่วนนี้ได้ เสาอากาศหลายเสานี้ยังใช้เทคนิค MIMO ซึ่งนำไปสู่ประสิทธิภาพในการรับสัญญาณที่สะท้อนกับวัตถุต่าง ๆ ในสภาพแวดล้อม อย่างไรก็ตาม สำหรับที่ความถี่ที่มากกว่า 5 GHz นี้ยังเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการใช้เทคโนโลยี MIMO ซึ่งต้องอาศัยการสะท้อนสัญญาณจากวัตถุต่าง ๆ ใน

สภาพแวดล้อม การเพิ่มรัศมีในการรับสัญญาณโดยอิสระนี้ จะต้องพึ่งสัญญาณจากหลายเส้นทาง ในสภาพแวดล้อม และประสิทธิภาพของกระบวนการเข้ารหัส และปริภูมิเวลาลดลง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสหสัมพันธ์ (Correlation) ของสัญญาณในระบบที่มีความถี่สูง ๆ จะมีการเพิ่มในส่วนของการรวมสัญญาณ เพราะว่าการแพร่ของสัญญาณมาจากสัญญาณที่มาจากทางอื่น มากกว่าสัญญาณที่มาจากสัญญาณโดยตรง (Line-of-Sight: LoS)

ใน [5] แสดงการทำงานร่วมกันที่ชั้นฟิสิกัล (Physical Layer: PHY) เช่น การทำงานร่วมกันของรีเลย์ ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มระยะของช่องสัญญาณของ MIMO ประเด็นสำคัญการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ เป็นเทคนิคการส่งต่อข้อมูล (Relaying) นั่นคือ การทำงานด้วยกันหลาย ๆ โหนด หรือเฉพาะรีเลย์ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยส่งต่อข้อมูลไปยังเครื่องรับปลายทาง ซึ่งจะทำให้เกิดระบบการสื่อสารแบบหลายทางเข้า/ออกเสมือน (Virtual MIMO systems) ขึ้นมา ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาการทำงานแบบเครือข่ายรีเลย์ 2-hop (2-hop relay network) โดยการใช้กระบวนการขยายและส่งต่อ (Amplify and Forward: AF) ใช้เป็นเส้นทางในการส่งสัญญาณในรีเลย์ ซึ่งมีการส่งกำลังงานในระดับต่ำ เพราะรีเลย์โหนดไม่จำเป็นต้องใช้กำลังในการถอดรหัสการปรับระยะของตัวนำของช่องสัญญาณเมทริกซ์ (Channel matrix leads) ให้ดีขึ้น ทำให้เพิ่มอัตราการส่งข้อมูลของการสื่อสารของช่องสัญญาณเพิ่มขึ้น ซึ่งนอกเหนือจากการทำงานร่วมกันของรีเลย์ แล้วยังเป็นกรเพิ่มระยะให้ดีขึ้น และยังทำให้ทราบว่าการสื่อสารแบบหลายช่วง (Multihop) เป็นการเพิ่มระยะของสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ยิ่งขึ้น และเป็นการลดพลังงานรวมของเครือข่ายอีกด้วย

ในส่วนของวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ การทำงานร่วมกันของสัญญาณ โดยใช้รีเลย์เป็นตัวขยายสัญญาณและส่งต่อ และใช้เทคนิค MIMO และอัตราการส่งสูง โดยการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา LSTC ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ลักษณะการส่งสัญญาณด้วยวิธีเหล่านี้ได้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาและวิเคราะห์วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูลแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา ให้มีอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate : BER) ต่ำลงในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เนื่องจากความต้องการสื่อสารได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และความหลากหลายในการรับส่งข้อมูลที่นับวันจะต้องการส่งข้อมูลในรูปแบบที่ต้องการ การส่งข้อมูลที่สูง โดยที่มีข้อจำกัดในเรื่องแบนด์วิดท์ที่มีอยู่อย่างจำกัด แต่ต้องการใช้ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจากสภาพแวดล้อมสัญญาณที่ได้รับส่วนใหญ่ จะได้รับจากสัญญาณที่กระจายและสะท้อนอยู่ในสภาพแวดล้อม แต่เมื่อสัญญาณโดยตรงที่ได้เกิดขาดหายไปทำให้ความจุของช่องสัญญาณลดลงตามไปด้วย ดังนั้นการนำการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ ซึ่งเป็นเทคนิคการส่งต่อข้อมูล โดยใช้รีเลย์เป็นตัวช่วยในระบบ จะทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยในการส่งต่อข้อมูลไปยังเครื่องรับปลายทาง เทคนิคนี้จะช่วยเพิ่มความหลากหลายของช่องสัญญาณและการใช้ประโยชน์จากเครื่องรับปรับตัวได้ โดยการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลาเพื่อลดสัญญาณรบกวนและขจัดสัญญาณแทรกสอดในช่องสัญญาณร่วม และสัญญาณจากการจางหายเนื่องจากหลายเส้นทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

การสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ เป็นเทคนิคการส่งต่อข้อมูล โดยใช้รีเลย์ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ช่วยส่งต่อข้อมูลไปยังเครื่องรับปลายทาง ซึ่งจะทำให้เกิดระบบการสื่อสารแบบหลายทางเข้า/ออก เสมือนขึ้นมา เทคนิคนี้ช่วยเพิ่มความหลากหลายของช่องสัญญาณให้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้อัตราความผิดพลาดของการตัดสินใจของระบบโดยรวมลดลง และทำให้เพิ่มระยะของการรับ/ส่งสัญญาณ

การใช้เครื่องรับปรับตัวได้ในการกำจัดสัญญาณรบกวนจะทำได้โดยให้สัญญาณ ที่ส่งจากเครื่องส่งสัญญาณ และรีเลย์ ส่งไปที่เครื่องรับปรับตัวได้แบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา แล้ววงจรทำการประมาณค่าสัญญาณรบกวนนั้น ซึ่งก็คือสัญญาณอ้างอิงของระบบ เพื่อนำไปลบออกจากสัญญาณที่มีการรบกวน ดังนั้นถ้าวงจรกรองสัญญาณสามารถปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองจนสามารถทำการประมาณค่าสัญญาณรบกวน ได้เท่ากับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจริง ก็จะทำให้ได้สัญญาณที่ปราศจากสัญญาณรบกวน

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการศึกษาเกี่ยวกับหลักการของระบบสื่อสารแบบร่วมมือ
2. ศึกษาหลักการทํางาน การวิเคราะห์ และการออกแบบเครื่องส่งและรับปรับตัวได้แบบปริภูมิเวลาเพื่อใช้สำหรับเครือข่ายแบบร่วมมือ โดยใช้เทคนิคการปรับค่าแบบ LMS (Least Mean Square Algorithm)
3. ศึกษาหลักการและออกแบบเครื่องรับปรับตัวได้แบบปริภูมิเวลา เพื่อใช้สำหรับเครือข่ายแบบร่วมมือ โดยใช้เทคนิคการปรับค่าแบบ SR (The Signed – Regressor Algorithm)

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาความเป็นมาของงานวิจัย
2. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย
 - หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย
 - ระบบไร้สายแบบร่วมมือ
 - การประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา
 - หลักการทํางาน การวิเคราะห์ และออกแบบเครื่องรับปรับตัวได้แบบปริภูมิเวลา เพื่อใช้สำหรับเครือข่ายแบบร่วมมือ
3. งานวิจัยที่นำเสนอ โดยจะนำเสนอการพัฒนาเทคนิคการปรับตัวของการส่งสัญญาณด้วยเครื่องรับปรับตัวได้ ในระบบสื่อสารแบบร่วมมือ โดยใช้เทคนิคการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา ในการรับ/ส่งสัญญาณ และใช้การส่งผ่านสัญญาณแบบ Amplify – and – Forward (AF) ซึ่งจะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบที่นำเสนอ หลักการ และการทำงานของระบบที่นำเสนอ

4. ผลการวิจัยในบทนี้จะเป็นการจำลองผล จากระบบที่นำเสนอด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่นำเสนอ ในแง่ของอัตราความผิดพลาดบิต (BER) ของข้อมูลของเครื่องรับปรับค่าวนรอบที่มีการประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา
5. สรุปผลการวิจัยข้อเสนอแนะ จะเป็นการสรุปผลที่เกิดขึ้นในงานวิจัยที่ได้ศึกษานี้ รวมถึงการอภิปรายผลการวิจัยสุดท้ายจะเป็นข้อเสนอแนะ และแนวทางในการทำวิจัยในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

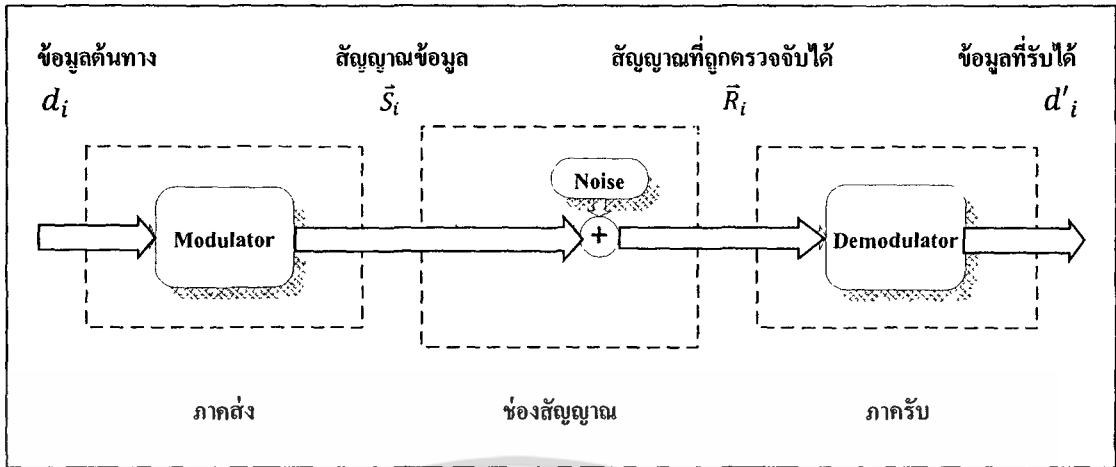
บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย

สำหรับในบทนี้ จะกล่าวถึง ความรู้พื้นฐาน และทฤษฎีที่จำเป็นสำหรับทำวิทยานิพนธ์ โดยเนื้อหาหลัก ๆ ประกอบด้วย หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย ความหลากหลายของช่องสัญญาณและการจางหาย ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ ความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ รหัสประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา วงจรกรองปรับตัว รหัสคอนโวลูชัน การถอดรหัสแบบแมป ปัญหาของการจางหายเนื่องจากหลายเส้นทาง

2.1 หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย

ในการออกแบบและประยุกต์ใช้งานระบบสื่อสารไร้สายนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบสื่อสาร เช่น ขนาดแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของช่องสัญญาณที่ใช้ งาน อัตราในการส่งข้อมูล และกำลังส่ง เป็นต้น โดยจะต้องมีการออกแบบให้เหมาะสม เพื่อให้สามารถใช้งานระบบสื่อสารนั้น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่เป็นการรบกวนช่องสัญญาณอื่น ดังนั้นข้อมูลดิจิทัล d_i ต้องผ่านการมอดูเลต (Modulate) ก่อนถูกส่งผ่านระบบสื่อสาร เพื่อแปลงข้อมูลให้กลายเป็นสัญญาณข้อมูล s_i ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการส่งผ่านช่องสัญญาณ และเมื่อสัญญาณข้อมูล R_i ถูกตรวจจับได้ที่ภาครับ ก็จะถูกนำมาผ่านกระบวนการดีมอดูเลต (Demodulate) เพื่อแปลงสัญญาณข้อมูลให้กลายเป็นข้อมูลดิจิทัล d'_i เพื่อนำไปใช้งานต่อไป โดยจะพบว่า ข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากการทำงานของภาครับนั้น อาจมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไป เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ถูกส่งออกไปจากภาคส่ง ซึ่งเกิดมาจากผลขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบสื่อสาร สำหรับองค์ประกอบหลักที่ส่งผลให้ข้อมูลที่ถูกส่งผ่านทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นนั้น เกิดมาจากการถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวน (Noise) และเกิดจากลักษณะในการส่งข้อมูลที่สัญญาณข้อมูล s_i สามารถเดินทางไปถึงภาครับได้จากหลายเส้นทางด้วยกัน (Multi-path) โดยที่ในแต่ละเส้นทางนั้น อาจจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณในลักษณะของการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์ขึ้น



รูปที่ 2.1 การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย

2.2 ความหลากหลายของช่องสัญญาณ และการจางหาย (Diversity and Fading)

ความหลากหลายของช่องสัญญาณ หรือไดเวอร์ซิตี (Diversity) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถช่วยให้การรับส่งสัญญาณมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องมีการเพิ่มบิตรหัส (Code bits) รวมเข้ากับบิตข้อมูล (Data bits) อย่างที่ต้องใช้ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel coding) และยังไม่ต้องมีการส่งสัญญาณ ที่เรียกว่าเทรนนิ่งซีควเอนซ์ (Training sequence) สำหรับใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์การคูณของวงจรรีซีฟเออร์ ซึ่งหมายถึงว่า ไม่มีการแบ่งเอาแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณ ไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของการรับ/ส่งสัญญาณเลย นอกจากนี้ ส่วนของอุปกรณ์ที่ต้องเพิ่มเข้ามา สำหรับการทำไดเวอร์ซิตี ก็มีราคาที่ไม่แพงจนเกินไป ดังนั้นเทคนิคไดเวอร์ซิตี จึงมีประโยชน์อย่างมากในทางปฏิบัติ

หลักการของไดเวอร์ซิตี คือ การอาศัยคุณสมบัติพื้นฐาน ของการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณ ในระบบสื่อสารไร้สาย ซึ่งมักจะมีเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณหลายเส้นทาง และโดยทั่วไปแล้ว ถ้าหากการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นทางหนึ่ง ถูกรบกวนอย่างมากจากการจางหายทำให้สัญญาณที่รับมามีกำลังอ่อนมาก ก็อาจจะมีการรับสัญญาณจากเส้นทางอื่น ที่ทำให้สัญญาณที่รับมามีกำลังสูง ดังนั้นถ้าหากทำการติดตั้งจุดรับสัญญาณมากกว่าหนึ่งแห่ง ก็จะสามารถรับสัญญาณได้จากหลายเส้นทาง จากนั้นระบบสามารถที่จะทำการเลือกเฉพาะสัญญาณที่มีกำลังสูงมาใช้ได้ ซึ่งวิธีการนี้สามารถช่วยทำให้ค่า SNR ของสัญญาณที่ภาครับมีคุณภาพที่ดีขึ้นได้ถึง 20-30 dB ไดเวอร์ซิตีชนิดที่นิยมใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้ คือ

2.2.1 ไดเวอร์ซิตีทางเวลา (Time Diversity)

ไดเวอร์ซิตีทางเวลา (Time Diversity) คือ การส่งสัญญาณข้อมูลเดิมซ้ำมากกว่าหนึ่งครั้งทีละเวลาแตกต่างกัน โดยการส่งแต่ละครั้ง จะต้องเว้นช่วงเวลาให้ห่างกันมากพอ คือ ต้องมากกว่าช่วงโคฮีเรียนซ์ไทม์ (Coherence time) ของช่องสัญญาณ ผลที่ได้คือ ภาครับจะได้รับสัญญาณข้อมูลซ้ำหลายครั้ง โดยสัญญาณข้อมูลที่ได้รับในแต่ละครั้ง จะได้รับผลกระทบจากการจางหายในช่องสัญญาณแตกต่างกันไป เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยลักษณะที่แตกต่างกัน ค่าของโคฮีเรียนท์ขึ้นอยู่กับค่าดอปเปอร์สเปรด (Doppler spread) ของคลื่นสัญญาณ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่และความถี่ของคลื่นพาห้

2.2.2 ไตเวอร์ซิตีทางความถี่ (Frequency Diversity)

ไตเวอร์ซิตีชนิดนี้ จะใช้ความถี่ถึงสองช่องสัญญาณ ระหว่างเสาอากาศด้านส่งและด้านรับ ข้อมูลจะถูกส่งโดยเครื่องส่งสองตัว ที่ทำงานที่ความถี่แตกต่างกัน ซึ่งสัญญาณทั้งสองจะถูกรวมกันไปสู่ ท่อนำคลื่นและสายอากาศตามลำดับ โดยสัญญาณจะถูกส่งออกไปในอากาศเดียวกัน (แต่อาจมี โพลาริเซชันต่างกัน) ที่ด้านรับสายอากาศจะรับสัญญาณและผ่านท่อนำคลื่นไปยังตัวกรองความถี่แยก ความถี่ทั้งสองออกมา เครื่องรับแต่ละตัวก็จะแยกสัญญาณข้อมูลออกมา ด้วยวิธีการดังกล่าวก็จะทำให้ สามารถลดผลกระทบจากการจางหายได้ ถ้าหากการแยกกันของความถี่ของเครื่องส่งสัญญาณมีมาก การจางหายซึ่งเกิดเฉพาะที่ความถี่หนึ่ง ๆ จะมีโอกาสน้อยมาก ๆ ที่จะเกิดกับสัญญาณทั้งสองความถี่ พร้อม ๆ กัน จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบ สำหรับความถี่ที่ห่างกันประมาณ 2 เปอร์เซนต์ ถือว่าเพียงพอ และถ้ายิ่งห่างกัน 5 เปอร์เซนต์ ก็จะดีมากที่สุด ข้อเสียของไตเวอร์ซิตีทางความถี่คือ จะต้องใช้แถบความถี่มากกว่าปกติ จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับพื้นที่ในเมืองใหญ่ จำนวนช่องสัญญาณมี จำกัด การเพิ่มประสิทธิภาพของไตเวอร์ซิตีทางความถี่ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ ไตเวอร์ซิตี ทางสเปซ จากการคำนวณพบว่าเพิ่มขึ้นเพียง 10 เท่า เท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มี ไตเวอร์ซิตี

2.2.3 ไตเวอร์ซิตีทางสเปซ (Space - Diversity) หรือไตเวอร์ซิตีทางสายอากาศ (Antenna Diversity)

ไตเวอร์ซิตีชนิดนี้ เครื่องรับจะรับสัญญาณจากสายอากาศ ตั้งแต่สองต้นขึ้นไป ซึ่งติดตั้งอยู่ ห่างกัน เป็นระยะหลายเท่าของความยาวคลื่น โดยสัญญาณที่ได้รับจากแต่ละสายอากาศจะถูกต่อเข้ากับตัวไตเวอร์ซิตีคอมไบเนอร์ (Diversity Combiner) ซึ่งหน้าที่ของตัวคอมไบเนอร์ก็คือ จะทำการ เลือกสัญญาณที่ดีที่สุด หรือทำการรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน ซึ่งก็แล้วแต่การออกแบบ สัญญาณจาก ด้านส่งจะเดินทางเป็นเส้นตรงสองเส้นทาง ไปยังสายอากาศทางด้านรับทั้งสองต้น และสัญญาณจาก เครื่องส่ง อาจจะเดินทางไปในอีกหลายเส้นทางที่แตกต่างกัน และเส้นทางที่สัญญาณเกิดความต่าง เฟสกับสัญญาณทางตรง ก็จะทำให้เกิดการจางหายเนื่องจากหลายเส้นทาง ขึ้นที่สายอากาศด้านรับ แต่สายอากาศทั้งสองต้นนั้น จะไม่เกิดการจางหายเนื่องจากหลายเส้นทางที่เหมือนกัน เพราะ ระยะทางของสายอากาศทั้งสองต้นแตกต่างกัน นั่นคือ แม้ว่าสัญญาณที่เดินทางในระยะทางจาก สายอากาศด้านส่งไปยังสายอากาศด้านรับ ช่างใดช่างหนึ่งอาจเกิดการหักล้างทางเฟสกัน แต่ใน สายอากาศด้านรับอีกช่างหนึ่งก็จะไม่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าว จากสถิติพบว่าการใช้ไตเวอร์ซิตีทางสเปซ ทำให้คุณภาพของสัญญาณดีขึ้นหลายร้อยเท่าซึ่งเป็นที่น่าพอใจมาก และสายอากาศมักติดตั้งห่างกัน เป็นระยะทาง 200 เท่า ของความยาวคลื่นที่ใช้ จากการค้นพบล่าสุด การจัดสายอากาศไตเวอร์ซิตีที่ดี ที่สุดจะอยู่ในแนวนอนให้สายอากาศอยู่ห่าง ๆ กัน นอกจากนี้ การใช้ไตเวอร์ซิตีทางสเปซยังมี

ประสิทธิภาพดีกว่าไดเวอร์ซิตีทางความถี่ เพราะว่าไดเวอร์ซิตีทางสเปซใช้ความถี่เดียว และใช้สำหรับช่องสัญญาณเพียงช่องเดียว จึงทำให้ใช้แบนด์วิดท์น้อยกว่า

ไดเวอร์ซิตีแบบนี้มีประโยชน์ ที่ใช้ในการแก้ปัญหาผลกระทบจากการจางหาย จะใช้เทคนิคการรวมความหลากหลายของสัญญาณจากไดเวอร์ซิตีคอมไบเนอร์ สามารถแบ่งเทคนิคการรับสัญญาณของวิธีการนี้ออกได้เป็น 4 รูปแบบ คือ

- Selection Diversity
- Feedback or Scanning Diversity
- Maximal Ratio Combining
- Equal Gain Combining

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไดเวอร์ซิตี การรวมสัญญาณโดยใช้อัตราส่วนสูงที่สุด (Maximal Ratio Combining) ซึ่งจะอธิบายในส่วนต่อไป

2.2.3.1 ไดเวอร์ซิตีแบบรวมสัญญาณโดยใช้อัตราส่วนสูงที่สุด

สำหรับไดเวอร์ซิตีแบบรวมสัญญาณโดยใช้อัตราส่วนสูงที่สุดสัญญาณที่ได้รับจากทุกจุดรับสัญญาณทั้ง M แห่งจะถูกนำมารวมกัน โดยให้น้ำหนักที่แตกต่างกันตามขนาดของสัญญาณที่ต้องการต่อกำลังของสัญญาณรบกวน ทั้งนี้ในกระบวนการรวมสัญญาณนั้นจะต้องแน่ใจว่าสัญญาณเหล่านี้มีเฟสที่ตรงกัน ข้อดีของวิธีการนี้คือช่วยให้ภาครับมีโอกาสที่จะสามารถได้รับสัญญาณที่มีค่า SNR ขนาดที่ใหญ่ขึ้นกว่าค่า SNR ที่ดีที่สุดของสัญญาณที่รับได้แต่ละแห่ง เทคนิคนี้ค่อนข้างจะมีความซับซ้อนยุ่งยากกว่าวิธีอื่น ๆ มาก เพราะต้องมีการคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม หากแต่ในปัจจุบันการพัฒนาและความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีกรรมวิธีประมวลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing) ก็ช่วยทำให้การสร้างวงจรเหล่านี้มีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

2.2.4 การจางหายหรือเฟดดิ้ง (Fading)

ในระบบสื่อสารไร้สาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ คุณสมบัติของช่องสัญญาณไม่ได้อยู่ในสภาพคงที่ (Stationary) และสามารถคาดเดาได้เหมือนช่องสัญญาณในระบบสื่อสารที่เชื่อมต่อด้วยสาย (Wired channel) แต่ช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเชิงสุ่ม (Random) และเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ทั้งนี้เนื่องจากการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไร้สายระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่กับสถานีฐาน เกิดขึ้นสูงจากพื้นดินไม่มากนัก ดังนั้นสัญญาณที่ส่งอาจเกิดการสะท้อนกับสิ่งกีดขวางที่อยู่ในบริเวณนั้น เช่น อาคาร ต้นไม้ หรือ พื้นดิน ส่งผลให้สัญญาณที่ได้รับปลายทาง ประกอบไปด้วยสัญญาณสะท้อนจากหลากหลายเส้นทาง ซึ่งมีขนาดและเฟสที่ต่างกันอย่างสิ้นเชิง นอกจากนี้ การเคลื่อนที่ของสถานีส่งขณะที่มีการส่งสัญญาณ หรือการที่สภาพแวดล้อมที่อยู่ระหว่างภาคส่ง และภาครับมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา อย่างเช่น การเคลื่อนที่ของรถยนต์ที่อยู่บริเวณรอบ ๆ เครื่องส่ง ก็มีผลต่อสัญญาณที่ได้รับที่ปลายทางด้วยเช่นกัน ปัจจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นส่งผลให้สัญญาณที่ปลายทางได้รับ มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างรวดเร็ว ทั้งในแง่ของขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การจางหายของสัญญาณ (Small scaled fading) หรือ เฟดดิ้ง (Fading) ทั้งนี้ในกรณีที่ช่องสัญญาณไร้สายมีสัญญาณสะท้อนจากทิศทางต่าง ๆ จำนวนมาก แต่ไม่มีสัญญาณที่มาจากเส้นทางการตรง (Line-of-Sight: LoS) ระหว่างภาคส่งกับภาครับ จะเรียกการจางหายที่เกิดขึ้นนี้ว่า เรย์ลีเฟดดิ้ง (Rayleigh fading) ทั้งนี้เนื่องจากสภาพของ เอนเวลโลป (Envelop) ของสัญญาณที่ได้รับมีการกระจายตัวทางสถิติเป็นแบบเรย์ลี ซึ่งในต่อไป จะกล่าวถึง ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดการจางหาย และรูปแบบของการจางหาย

2.2.5 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดการจางหาย

ปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดการจางหายมีอยู่ 2 ประการ คือ

2.2.5.1 การแผ่แบบประวิงเวลา (Delay spread)

เนื่องจากสัญญาณที่ถูส่งมาจากต้นทาง เมื่อไปกระทบกับสิ่งกีดขวางที่อยู่ระหว่าง ภาคส่งกับภาครับ ก็จะมีการสะท้อนและหักเห ซึ่งมาถึงยังปลายทางในเวลาที่แตกต่างกัน ดังนั้น สัญญาณรวมที่ปลายทาง จึงเป็นสัญญาณที่มีการประวิงเวลาไป หรืออาจเรียกว่า สัญญาณเกิดการแผ่ ทางเวลา (Time spread) ผลของการประวิงเวลานั้นทำให้การเดินทางไปยังปลายทางของสัญญาณ ใช้เวลานานกว่าปกติ ก่อให้เกิดการรบกวนกันของสัญญาณในแต่ละสัญลักษณ์ หรือการแทรกสอด ระหว่างสัญลักษณ์ ทั้งนี้การประวิงเวลาของสัญญาณจะเกิดขึ้นมากหรือน้อย ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของ ช่องสัญญาณ

2.2.5.2 การแผ่แบบดอปเพลอร์ (Doppler spread)

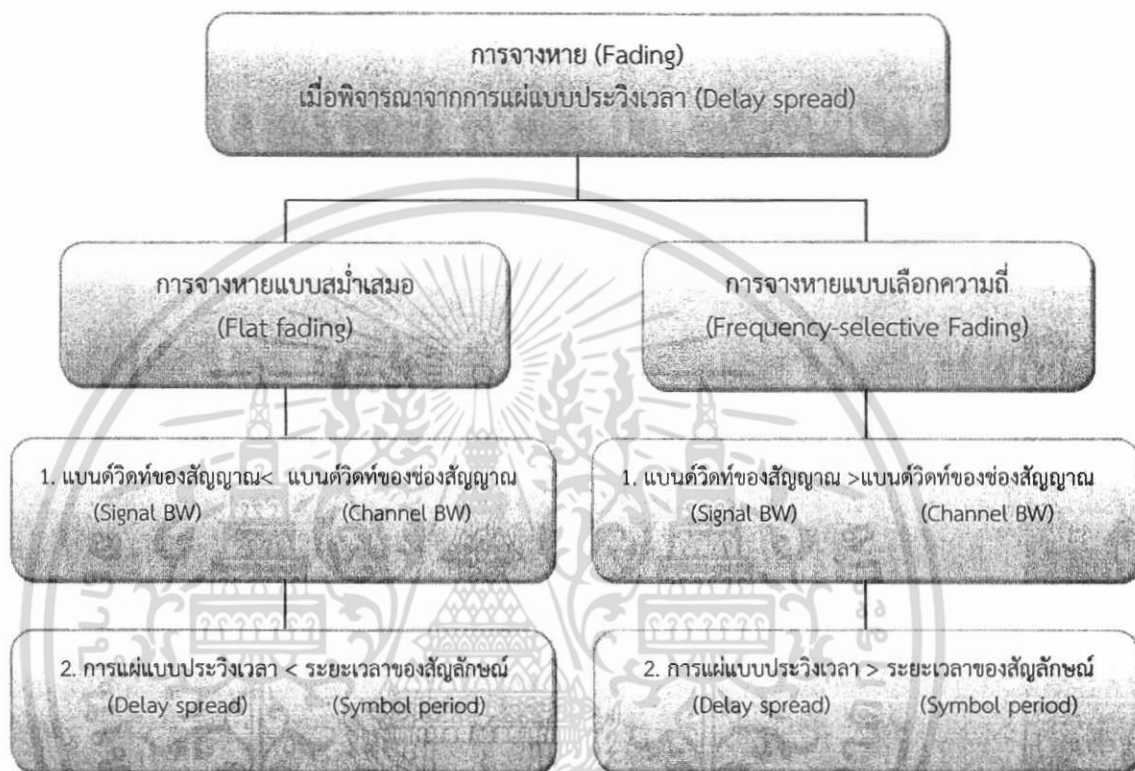
การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างสถานีเคลื่อนที่กับสถานีฐาน ส่งผลให้สัญญาณที่ เดินทางมาในแต่ละเส้นทางเกิดการเลื่อนทางความถี่ เรียกว่า การเลื่อนความถี่แบบดอปเพลอร์ (Doppler shift) ซึ่งความถี่ที่เลื่อนไปจะมีค่าเป็นบวกหรือลบเล็กน้อยเพียงใด ก็ขึ้นอยู่กับทิศทางและ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของสถานีโมบายล์ด้วย นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของวัตถุที่อยู่บริเวณรอบ ๆ สถานีโมบายล์ ก็ยังส่งผลให้เกิดการเลื่อนความถี่แบบดอปเพลอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เหมือนกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การแผ่แบบดอปเพลอร์นี้ ทำให้ช่องสัญญาณมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลง ไปตามเวลา (Time-varying channel) และอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นก็ส่งผลโดยตรงต่อ ความเร็วของการเกิดการจางหายด้วย

2.2.6 รูปแบบของการจางหาย

การจางหายที่เกิดขึ้นในการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไร้สายนั้น มีอยู่หลายประเภทการที่ จะพิจารณาว่าเป็นการจางหายแบบใด จะพิจารณาจากลักษณะของสัญญาณที่ส่งเปรียบเทียบกับ คุณลักษณะของช่องสัญญาณ (Channel characteristic) เป็นหลักพารามิเตอร์ของสัญญาณที่ใช้ พิจารณาได้แก่ แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ช่วงเวลาของสัญลักษณ์ (Symbol period) เมื่อทำการ พิจารณาลักษณะของการจางหายจากการแผ่แบบประวิงเวลา จะได้การจางหาย 2 รูปแบบ คือ การ จางหายแบบแนวราบ (Flat fading) และการจางหายแบบเลือกความถี่ (Frequency-selective

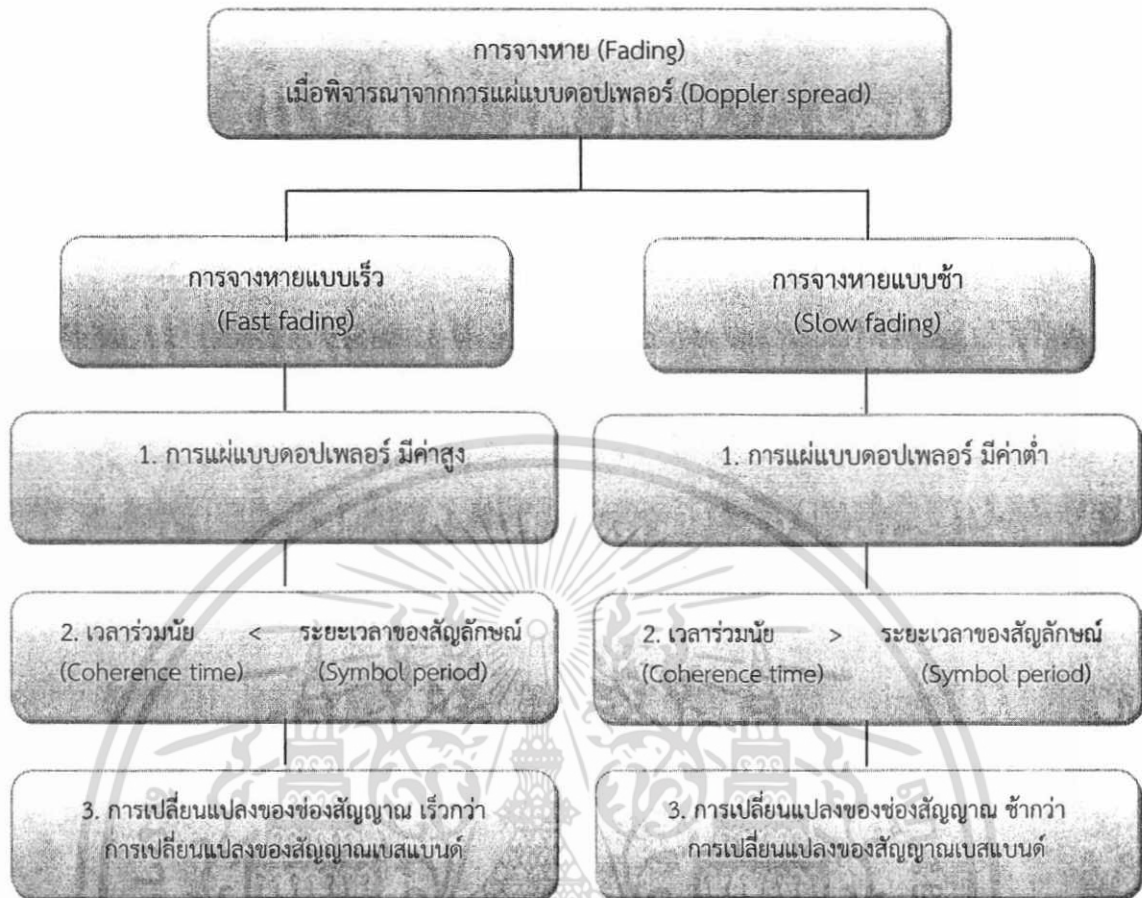
fading) ในขณะที่การแผ่แบบดอปเพลอร์ จะส่งผลกระทบต่อการใช้งานอีก 2 รูปแบบ คือ การจางหายแบบเร็ว (Fast fading) และการจางหายแบบช้า (Slow fading)

ซึ่งการพิจารณารูปแบบของการจางหายจากการแผ่แบบประวิงเวลา และการแผ่แบบดอปเพลอร์ดังกล่าว เกิดขึ้นอย่างเป็นอิสระต่อกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



(ก) เมื่อพิจารณาจากการแผ่แบบประวิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) เมื่อพิจารณาจากการแผ่แบบดอปเพลอร์

รูปที่ 2.2 รูปแบบของการจางหาย ก) เมื่อพิจารณาจากการแผ่แบบประวิงเวลา

ข) เมื่อพิจารณาจากการแผ่แบบดอปเพลอร์

2.2.6.1 รูปแบบของการจางหายเมื่อพิจารณาจากการแผ่แบบประวิงเวลา

การแผ่แบบประวิงเวลา อันเนื่องมาจากคลื่นหลายเส้นทาง(Multi - path) ทำให้เกิดการจางหาย อยู่ 2 รูปแบบ คือ การจางหายแบบสม่ำเสมอ และการจางหายแบบเลือกความถี่

ก) การจางหายแบบสม่ำเสมอ (Flat Fading)

ถ้าช่องสัญญาณมีผลตอบสนองอัตราขยายคงที่ และมีผลตอบสนองเฟสที่เป็นเชิงเส้น ในช่วงแบนด์วิดท์ที่กว้างกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณแล้ว จะทำให้การจางหายที่เกิดขึ้นเป็นแบบสม่ำเสมอ กล่าวคือ สัญญาณรับได้ที่ปลายทาง จะมีคุณลักษณะเชิงสเปกตรัม (Spectrum characteristic) เหมือนเดิม แต่ค่ากำลังของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เนื่องจากผลของคลื่นมัลติพาท ที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ ดังนั้นช่องสัญญาณที่เกิดการจางหายแบบสม่ำเสมอนี้ จึงสามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่า ช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูด (Amplitude

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

Varying Channel) การแจกแจงของแอมพลิจูดที่มักพบโดยทั่วไปจะเป็นการแจกแจงแบบเรย์ลีย์ (Rayleigh distribution)

ข) การจางหายแบบเลือกความถี่ (Frequency-Selective Fading)

ถ้าช่องสัญญาณมีผลตอบสนองอัตราขยายคงที่ และมีผลตอบสนองเฟสที่เป็นเชิงเส้น ในช่วงแบนด์วิดท์ที่แคบกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณแล้ว การจางหายที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบเลือกความถี่ กล่าวคือ สเปกตรัมของสัญญาณจะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณไม่เท่ากันทั้งหมดโดย ส่วนประกอบสเปกตรัมที่อยู่นอกช่วงแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณ จะได้รับผลกระทบที่แตกต่างออกไป ซึ่งช่วงพิสัยของความถี่ที่ช่องสัญญาณ ส่งผลกระทบต่อส่วนประกอบของสเปกตรัมโดยเท่าเทียมกัน เรียกว่า แบนด์วิดท์ร่วมนัย (Coherent bandwidth) เมื่อช่องสัญญาณเกิดการจางหายแบบเลือกความถี่ ผลตอบสนองช่องสัญญาณจะเกิดการแผ่ออกทางเวลา ซึ่งยาวกว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์ ทำให้สัญญาณที่ได้รับถูกลดทอนขนาด และมีการประวิงทางเวลา ส่งผลให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Intersymbol Interference) ขึ้น

2.2.6.2 รูปแบบของการจางหายเมื่อพิจารณาจากการแผ่แบบดอปเพลอร์

การเลื่อนความถี่แบบดอปเพลอร์ อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันระหว่าง โทรศัพท์เคลื่อนที่กับสถานีฐาน ส่งผลต่อความเร็วของการจางหาย ทำให้เกิดการจางหายขึ้นมา 2 รูปแบบ คือ การจางหายแบบเร็ว และการจางหายแบบช้า

ก) การจางหายแบบเร็ว (Fast fading)

การแผ่แบบดอปเพลอร์ และเวลาร่วมนัย (Coherence time) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกถึงคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของช่องสัญญาณ ซึ่งมีผลมาจากการเคลื่อนที่ของ โทรศัพท์เคลื่อนที่ เวลาร่วมนัยนั้นคือ ช่วงเวลาทางสถิติที่ผลตอบสนองต่อช่องสัญญาณมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ยังเป็นค่าที่บอกให้ทราบถึง ความคล้ายคลึงกันของผลตอบสนองช่องสัญญาณในช่วงเวลาหนึ่งอีกด้วย กล่าวคือ สัญญาณที่มีถึงภาครับที่เวลาต่างกันแต่ไม่เกินเวลาร่วมนัย จะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณใกล้เคียงกัน

ในกรณีของการจางหายแบบเร็ว ผลตอบสนองช่องสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วภายในช่วงเวลาที่ยังสัญญาณ ดังนั้นเวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณ จะมีค่าน้อยกว่าช่วงเวลาของสัญญาณ และคุณลักษณะของการจางหายจะเปลี่ยนแปลงไปมาหลายครั้งในขณะที่สัญลักษณ์หนึ่ง ๆ ถูกส่งไป ส่งผลให้รูปร่างของสัญญาณเบสแบนด์ผิดเพี้ยนไป

ข) การจางหายแบบช้า (Slow fading)

การจางหายแบบช้า เกิดขึ้นเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองช่องสัญญาณมีค่าน้อยกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ หรือเวลาร่วมนัยมีค่ามากกว่าเวลาของสัญลักษณ์ ในกรณีนี้ช่องสัญญาณจะมีผลตอบสนองคงที่ภายในช่วงเวลาหลายสัญลักษณ์ ทำให้ได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณติดกันเป็นช่วงยาว

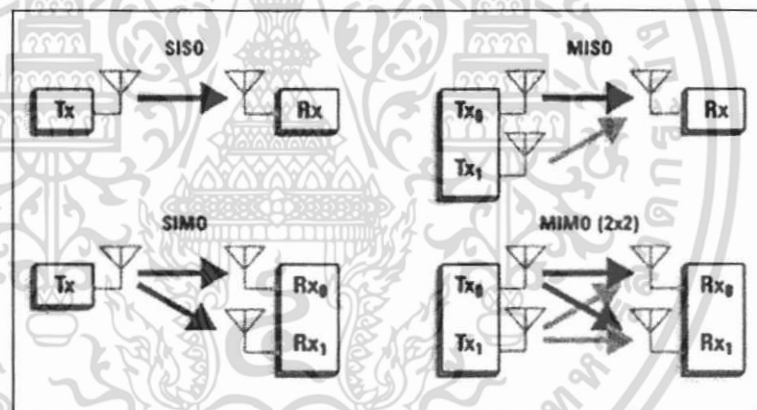
2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สาย แบบหลายทางเข้า หลายทางออก

ช่วงแรก ๆ ของงานวิจัยในระบบการสื่อสารไร้สาย จะเป็นการส่งผ่านข้อมูลในระบบโดยไร้สายอากาศที่ภาครับและภาคส่งเพียงด้านเดียว ที่เรียกว่า ระบบหนึ่งทางเข้าหนึ่งทางออก (Single - Input Single - output: SISO) ต่อมาได้มีการพัฒนางานวิจัยโดยได้ศึกษาระบบการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศ (Multiple Antennas) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีการส่งข้อมูลแบบหลายเสาอากาศนี้ ทำให้ความจุในระบบเพิ่มขึ้น สามารถรับ/ส่งข้อมูลได้มากขึ้น โดยในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบดังต่อไปนี้

2.3.1 ระบบหนึ่งทางเข้าหลายทางออก (Single - Input Multiple - Output System: SIMO) คือระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหนึ่งต้นทางภาครับหลายต้น

2.3.2 ระบบหลายทางเข้าหนึ่งทางออก (Multiple - Input Single - Output system: MISO) คือระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหลายต้น และสายอากาศทางภาครับหนึ่งต้น

2.3.3 ระบบหลายทางเข้าหลายทางออก (Multiple - Input Multiple - Output systems: MIMO) คือระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหลายต้น และสายอากาศทางภาครับหลายต้น เช่นกัน



รูปที่ 2.3 การรับส่งข้อมูลแบบสายอากาศเดี่ยว และหลายสายอากาศ

ในระบบทั้ง 3 รูปแบบนี้ ระบบหลายทางเข้าหลายทางออก (MIMO) จะให้สมรรถนะทางด้านความจุช่องสัญญาณสูงที่สุด จึงมีการวิจัยและพัฒนา รูปแบบ เพื่อนำมาใช้แทนระบบหนึ่งทางเข้าหนึ่งทางออก (SISO) ซึ่งทำให้เกิดการพัฒนาสมรรถนะของระบบดังนี้

1. อัตราการขยายแถวลำดับ (Array Gain) การใช้สายอากาศหลาย ๆ ต้น จะทำให้ อัตราการขยายของสัญญาณที่ออกมาจากสายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะทาง (Range) และพื้นที่ครอบคลุม (Coverage) ในการส่งสัญญาณเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในกรณีที่เพิ่มพื้นที่ ที่ต้องการส่งสัญญาณให้กว้างขึ้น หรือกรณีที่จำนวนของผู้ใช้งานในพื้นที่นั้นมีอยู่ไม่มาก จะทำให้จำนวนการติดตั้งสถานีฐานลดลง เพราะพื้นที่ที่ครอบคลุมมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อดีที่ทำให้

กำลังงานส่งจากตัวสถานีเคลื่อนที่ (โทรศัพท์มือถือ) มีค่าลดลง ตามอัตราการขยายของสายอากาศที่สถานีฐานนั้นมีมากขึ้น หรือค่าความไวที่สายอากาศแถวลำดับที่สถานีฐานรับได้มีมากขึ้นนั่นเอง

2. อัตราการขยายไดเวอร์ซิตี (Diversity Gain) ค่ากำลังของสัญญาณระบบสื่อสารไร้สายนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนตามการลดทอนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ เทคนิคไดเวอร์ซิตี จึงเป็นวิธีที่มีประโยชน์มากในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจางหายนั้น ดังนั้นระบบสื่อสารหลายทางเข้าหลายทางออก จึงมีการใช้สายอากาศภาคส่ง และสายอากาศภาครับ ต้นที่มีการจางหายหรือเฟดดิ้งเป็นอิสระต่อกัน เมื่อส่งสัญญาณออกไปจะทำให้ภาครับสามารถรวมสัญญาณที่เข้ามาได้ โดยลดปัญหาเรื่องของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของสัญญาณในระบบออกไปได้มาก เมื่อเทียบกับระบบสื่อสารหนึ่งทางเข้าหนึ่งทางออก (SISO)

3. กำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (Spatial Multiplexing Gain) ช่องสัญญาณในระบบสื่อสารหลายทางเข้าหลายทางออก จะมีการเพิ่มขึ้นของความจุช่องสัญญาณในระบบเป็นเส้นตรง และมีค่าเท่ากับค่าที่น้อยที่สุดระหว่างจำนวนสายอากาศที่ภาคส่งและภาครับ โดยไม่มีผลต่อค่ากำลังงานหรือการใช้แบนด์วิดท์ ค่ากำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (Spatial Multiplexing Gain) จะส่งผลให้ความจุของช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสายอากาศแต่ละเสาภายใต้เงื่อนไขของช่องสัญญาณที่มีการแพร่กระจายของสัญญาณมากพอ (Rich scattering) ทำให้ทางภาครับสามารถแยกสัญญาณต่าง ๆ ออกจากกันได้

4. การลดการแทรกสอด (Interference reduction) การแทรกสอดแบบร่วมภายในช่องสัญญาณ (Co-channel interference) เกิดจากการใช้ความถี่ซ้ำ (Frequency reuse) เมื่อมีการใช้สายอากาศหลาย ๆ ต้น จะเกิดความแตกต่างระหว่างระยะห่างของสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่อยู่ในช่องสัญญาณข้างเคียง จึงทำให้สามารถลดการแทรกสอดได้

2.3.4 เทคนิคการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก

ในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีช่องสัญญาณเป็นแบบหลายทางเข้าหลายทางออก จะมีเทคนิคการส่งข้อมูลอยู่หลายเทคนิค แต่ก็สามารถจัดกลุ่มรวมกันตามเทคนิคหลักได้ 2 กลุ่ม คือ

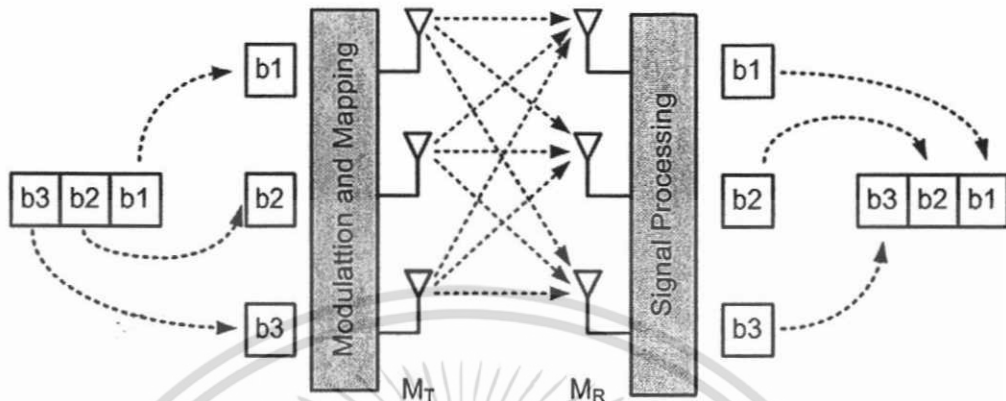
2.3.4.1 การเข้ารหัสเชิงปริภูมิเวลา (Space-time coding)

เทคนิคนี้ จะใช้สายอากาศที่เพิ่มเข้ามาในระบบ มาช่วยกันเข้ารหัส เพื่อให้ได้ไดเวอร์ซิตีทางปริภูมิเวลา ทำให้ข้อมูลที่ส่งมีความน่าเชื่อถือ และมีความทนทานต่อการผิดพลาดมากขึ้น เมื่อช่องสัญญาณที่ส่งผ่าน เป็นแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ซึ่งวิธีการส่งแบบนี้มีข้อดี คือ มีรูปแบบการส่งสัญญาณที่ง่ายและมีความซับซ้อนต่ำ

2.3.4.2 การมัลติเพล็กซ์ทางปริภูมิ (Spatial multiplexing)

เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก ซึ่งเทคนิคการส่งข้อมูลแบบนี้จะให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูง โดยขั้นตอนการส่ง จะมีการส่งข้อมูลที่เป็น

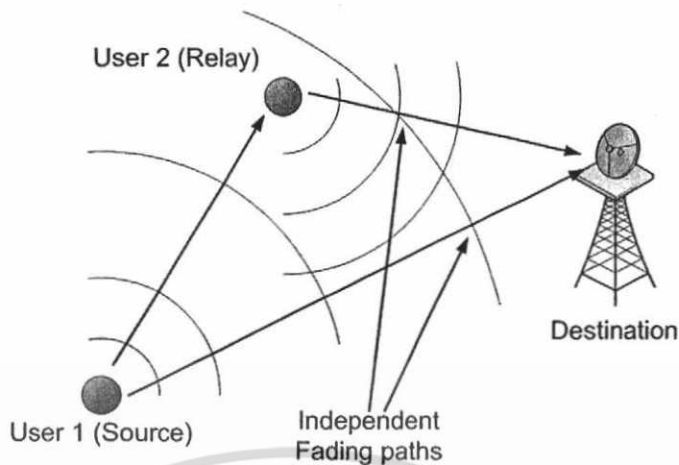
อิสระกันทั้งหมด M_T ค่า (เท่ากับจำนวนของสายอากาศที่ภาคส่ง) ต่อหนึ่งคาบสัญลักษณ์ คือ ข้อมูลที่ถูกส่งไปในแต่ละสายอากาศจะเป็นข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แบบจำลองการมัลติเพล็กซ์เชิงปริภูมิ

2.4 ความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

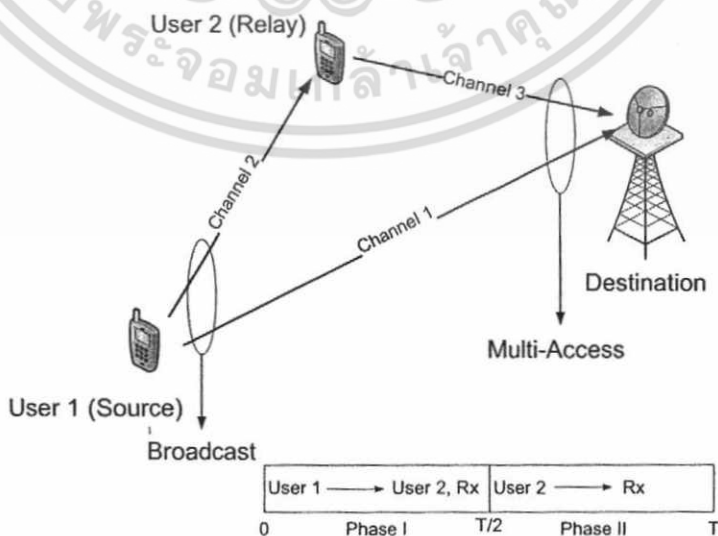
ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ คือ ระบบสื่อสารที่อาศัยผู้ใช้งานในโครงข่ายระบบสื่อสารไร้สาย (Wireless communication network) ทำหน้าที่รับสัญญาณที่รับได้ไปยังเครื่องรับปลายทางร่วมกัน โดยผู้ใช้ที่ส่งสัญญาณและช่วยส่งต่อสัญญาณที่รับได้ไปยังเครื่องรับปลายทางร่วมกัน โดยผู้ใช้ที่ส่งสัญญาณเป็นคนแรก เรียกว่า “เครื่องส่ง (Source)” และผู้ใช้ที่ทำหน้าที่ช่วยส่งต่อสัญญาณ เรียกว่า “รีเลย์ (Relay)” [8]-[9] ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ซึ่งการช่วยส่งต่อสัญญาณจะทำให้เกิดการเพิ่มความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity gain) ขึ้น เหมือนในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก และส่งผลทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลลดลง ข้อดีของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมืออีกประการหนึ่งคือ การช่วยเพิ่มพิสัย (Range) ในการสื่อสารของผู้ใช้งานในโครงข่ายสื่อสารไร้สาย เนื่องจากผู้ใช้งานที่อยู่ใกล้เครื่องรับปลายทาง สามารถช่วยส่งต่อข้อมูลของผู้ส่งซึ่งอยู่ห่างไกลออกไปมาก ๆ ได้ ซึ่งทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าอันจำกัด จากแบตเตอรี่ของผู้ส่งข้อมูลในระบบลดลงได้ ทำให้สามารถสื่อสารได้นานขึ้น



รูปที่ 2.5 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

2.4.1 แบบจำลองระบบและการเข้าถึงช่องสัญญาณ

การส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ จะพิจารณาการส่งสัญญาณในแบบทิศทางเดียว [6] คือ การสื่อสารในทิศทางจากผู้ใช้งานไปยังเครื่องรับปลายทาง โดยมีการแบ่งช่องสัญญาณออกเป็นหลาย ๆ ช่องสัญญาณที่ตั้งฉากกัน และมีการเข้าถึงช่องสัญญาณจากผู้ใช้งานหลายคนได้ 3 แบบ คือ การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access: FDMA) การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access: TDMA) และการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access: CDMA) เพื่อความสะดวกในการอธิบาย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะพิจารณาการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และให้เวลาสำหรับการส่งสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานทั้งหมดไปยังเครื่องรับมีกระบวนการซิงโครไนซ์ (Synchronization) อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.6 การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การส่งสัญญาณแบบร่วมมือสำหรับระบบสื่อสารไร้สายในรูปที่ 2.6 ซึ่งกำหนดให้ผู้ใช้งานคนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง และผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็นรีเลย์โดยมีช่วงเวลาของการเข้าถึงช่องสัญญาณที่ใช้ทั้งหมดคือ T สามารถแบ่งการส่งสัญญาณออกเป็น 2 เฟส ดังนี้

เฟสที่ 1 ($0 - \frac{T}{2}$) : เป็นช่วงเวลาที่ผู้ใช้คนที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งกระจายสัญญาณไปยังเครื่องรับปลายทางและผู้ใช้คนที่ 2 พร้อม ๆ กัน โดยอาศัยคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปรอบทิศทางของช่องสัญญาณไร้สาย ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)

$$Y_{SD}(n) = \sqrt{P_1}h_{SD}x_S(n) + n_{SD}(n) \quad (2.1)$$

$$Y_{SR}(n) = \sqrt{P_1}h_{SR}x_S(n) + n_{SR}(n) \quad (2.2)$$

เมื่อ	$x_S(n)$	คือ	ข้อมูลที่ส่งออกจากเครื่องส่ง
	h_{SD}	คือ	ช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ
	h_{SR}	คือ	ช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและรีเลย์
	$n_{SD}(n)$	คือ	สัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ
	$n_{SR}(n)$	คือ	สัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องส่งและรีเลย์
	P_1	คือ	กำลังส่งสัญญาณจากเครื่องส่ง

เฟสที่ 2 ($\frac{T}{2} - T$) : เป็นช่วงเวลาที่ผู้ใช้คนที่ 2 ซึ่งทำหน้าที่เป็นรีเลย์ ช่วยส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ ดังสมการที่ (2.3)

$$Y_{RD}(n) = \sqrt{P_2}h_{RD}\hat{x}_S(n) + n_{RD}(n) \quad (2.3)$$

และ

$$Y_{SRD}(n) = Y_{SD}(n) + Y_{RD}(n) \quad (2.4)$$

เมื่อ	\hat{x}_S	คือ	ข้อมูลที่ส่งออกจากเครื่องส่ง
	h_{RD}	คือ	ช่องสัญญาณระหว่างรีเลย์ และเครื่องรับ
	h_{SR}	คือ	ช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่ง และรีเลย์
	$n_{RD}(n)$	คือ	สัญญาณรบกวนระหว่างรีเลย์ และเครื่องรับ
	P_2	คือ	กำลังส่งสัญญาณจากรีเลย์

2.4.2 โพรโทคอลสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

ในปัจจุบันได้มีการนำเสนอโพรโทคอลสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือไว้ 3 รูปแบบดังต่อไปนี้

2.4.2.1 โพรโทคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง (Fixed Relaying Protocol) โพรโทคอลแบบนี้มีหลักการ คือ มีการกำหนดจำนวนและระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็นรีเลย์ คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการสื่อสาร โพรโทคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนน้อยที่สุด

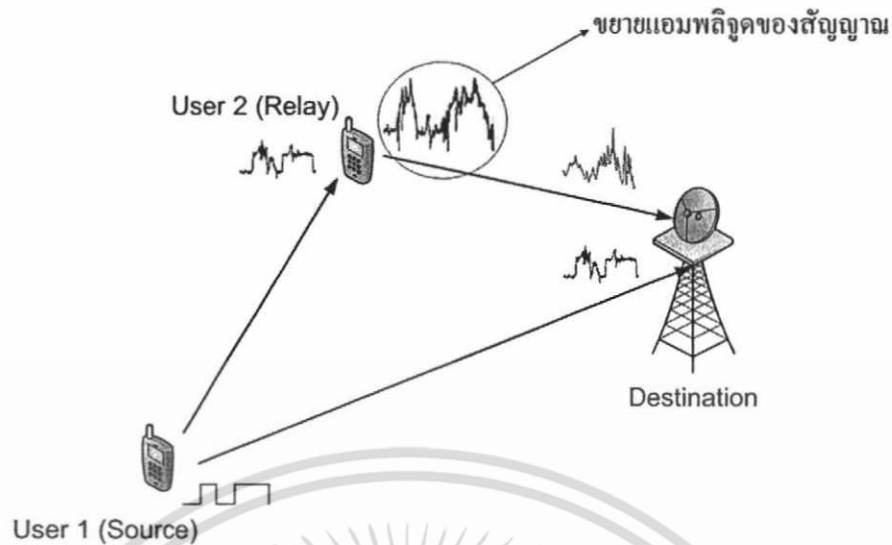
2.4.2.2 โพรโทคอลแบบเลือก (Selecting Relaying Protocol) โพรโทคอลแบบนี้มีหลักการ คือ ไม่มีการกำหนดจำนวนและระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็นรีเลย์ที่คงที่ โดยมีวิธีการเลือกผู้ใช้งาน เพื่อทำหน้าที่เป็นรีเลย์จากค่าขนาดของสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและผู้ใช้ที่จะถูกเลือกเป็นรีเลย์มีค่ามากที่สุด ซึ่งโพรโทคอลแบบนี้ จะมีความซับซ้อนมากกว่า โพรโทคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง

2.4.2.3 โพรโทคอลแบบมีการป้อนกลับ (Incremental Relaying Protocol) โพรโทคอลแบบนี้จะมีลักษณะคล้าย ๆ กับโพรโทคอลแบบเลือกกรีเลย์ เพียงแต่มีการเพิ่มเงื่อนไขการเลือกผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์มากขึ้น และจุดเด่นของโพรโทคอลนี้ก็คือ เครื่องรับจะทำการส่งข้อความตอบกลับไปยังผู้ใช้ทุกคน เพื่อให้ทราบสถานะของการส่งสัญญาณในแต่ละครั้ง หากการส่งข้อมูลนั้นไม่มีความผิดพลาด เครื่องรับจะส่งข้อความกลับมายังผู้ใช้ทุกคนเพื่อให้ทราบสถานะของการส่งที่สมบูรณ์ จึงทำให้ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์ ไม่ต้องส่งสัญญาณไปยังเครื่องรับ แต่ถ้าหากส่งข้อมูลเกิดความผิดพลาด เครื่องรับจะส่งข้อความกลับมายังผู้ใช้ทุกคน เพื่อรับทราบสถานะของการส่งที่ไม่สมบูรณ์ และมีการร้องขอให้มีการส่งข้อมูลใหม่จากผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์ โพรโทคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนสูงสุด

การหาประสิทธิภาพของโพรโทคอลทั้งหมดนี้สามารถทำได้โดยการหาความน่าจะเป็นของสัญญาณที่ขาดหาย (Outage probability) [6] และจะเห็นได้ว่าโพรโทคอลในแต่ละแบบจะมีความซับซ้อนที่แตกต่างกัน และมีประสิทธิภาพที่ต่างกันด้วย โดยโพรโทคอลแบบมีการป้อนกลับจะมีประสิทธิภาพสูงสุด และโพรโทคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง จะมีประสิทธิภาพต่ำสุด

การส่งต่อสัญญาณจากกรีเลย์ ไปยังเครื่องรับ สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ *Amplify - and - Forward (AF)* และ *Decode - and Forward (DF)*[6]

n) *Amplify - and - Forward* : ผู้ใช้ทำหน้าที่เป็นรีเลย์ ซึ่งจะทำการขยายสัญญาณที่ได้รับให้มีขนาดแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนด แล้วส่งต่อไปยังเครื่องรับปลายทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify and Forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

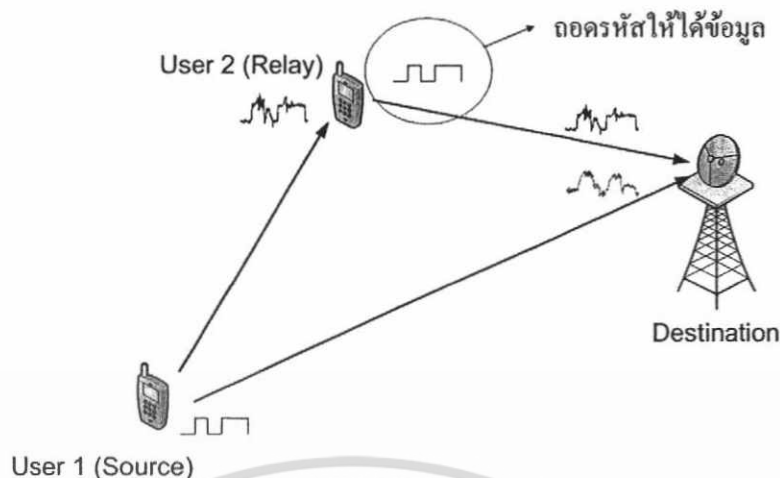
จากการจำลองและการเข้าถึงช่องสัญญาณในรูปที่ 2.7 รีเลย์จะทำการขยายสัญญาณที่ได้รับให้มีแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนด และส่งต่อสัญญาณที่ได้รับไปยังเครื่องรับ ซึ่งผลของข้อมูลที่ได้จะเป็นดังสมการที่ (2.5)

$$x_R(n) = \beta Y_{SR}(n) \quad ; n = T + 1 \dots T \quad (2.5)$$

เมื่อ	$Y_{SR}(n)$	คือ	สัญญาณที่รีเลย์รับได้จากเครื่องส่ง
	β	คือ	อัตราขยายแอมพลิจูดสัญญาณ $\beta \leq \sqrt{\frac{1}{ h_{SR} ^2 P_1 + N_0}}$
	h_{SR}	คือ	ช่องสัญญาณสำหรับการส่งข้อมูลระหว่างเครื่องส่งและรีเลย์
	N_0	คือ	แวนรียนซ์ของสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN)

ข) Decode and Forward : ผู้ใช้ทำหน้าที่เป็นรีเลย์จะถอดรหัสสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณเดิมที่ส่งมาจากเครื่องส่ง แล้วส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การส่งต่อสัญญาณแบบ Decode-and-forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

จากการจำลองและการเข้าถึงช่องสัญญาณในรูปที่ 2.8 รีเลย์ จะทำการถอดรหัสสัญญาณ เพื่อให้ได้สัญญาณเดิมที่ส่งมาจากเครื่องส่ง แล้วส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ ซึ่งข้อมูลที่ได้เป็นดังสมการที่ (2.6)

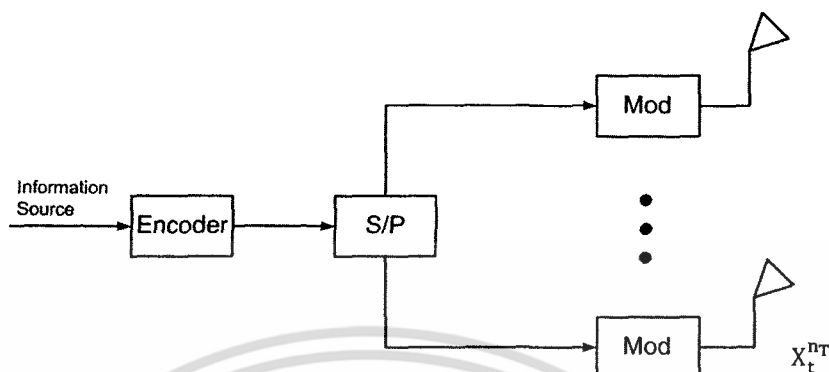
$$x_R[n] = x_S[n] \quad ; n = \frac{T}{2} + 1 \dots T \quad (2.6)$$

เมื่อ $x_S[n]$ คือ ข้อมูลจากเครื่องส่ง ซึ่งถูกถอดรหัสจากรีเลย์

2.5 รหัสประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา (Layered Space - Time Codes)

Foschini[2] ได้นำเสนอโครงสร้างสถาปัตยกรรมการประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้ในการประมวลผลแบบ 1 มิติ โดย 1 มิตินั้นหมายถึง 1 มิติในปริภูมิเวลา ซึ่งขั้นตอนวิธีการจะอาศัยเทคนิคการประมวลผลสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูงที่ภาครับและการเข้ารหัสข้อมูลแบบ 1 มิติที่เป็น การเข้ารหัสแบบดั้งเดิม โดยทั่วไปแล้วลักษณะสถาปัตยกรรมที่ได้นำเสนอ จำนวนของข้อมูลที่ได้ถูก แบ่งเป็นสายจำนวน n_T สาย โดยภาครับใช้จำนวนเสารับ $n_R = n_T$ เสาเพื่อที่จะแยกและตรวจจับ สัญญาณจำนวนเท่ากับ n_T ขั้นตอนการแยก จะทำได้โดยการผสมผสานกันระหว่างการลด (Suppression) และการหักล้าง (Cancellation) สัญญาณรบกวน สัญญาณที่ถูกแยกนั้นทำการ ถอดรหัสโดยการถอดรหัสคอนโวลูชันที่ใช้สำหรับการถอดรหัสแบบ 1 มิติ จึงเป็นผลทำให้มีความ ชับซ้อนในการทำงานน้อยกว่าการถอดรหัสแบบความน่าจะเป็นจริงสูงสุด (Maximum Likelihood) ความซับซ้อนของเครื่องรับแบบปริภูมิเวลา จะเพิ่มขึ้นในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นกับความเร็วของการส่ง

ข้อมูล ในระบบของปริภูมิเวลา จำนวนของเสาทางฝั่งรับจะต้องมีจำนวนเท่ากับหรือมากกว่าจำนวนเสาทางฝั่งภาคส่ง เพื่อให้เป็นผลดีกับการรับสัญญาณและการถอดรหัสข้อมูล



รูปที่ 2.9 สถาปัตยกรรม VLST

2.5.1 เครื่องส่งแบบปริภูมิเวลา (LST Transmitters)

ในระบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา มีสถาปัตยกรรมของเครื่องส่งอยู่มากมายหลายรูปแบบ ในแต่ละรูปแบบมีการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาดหรือไม่ และวิธีการในการมอดูเลตสัญลักษณ์ที่ใช้ในเสาอากาศทางฝั่งส่ง ระบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา ไม่มีการเข้ารหัสหรือที่เรียกว่า ระบบประมวลหลายมิติแนวตั้งแบบปริภูมิเวลา (Vertical Layered Space – Time: VLST) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ข้อมูลอินพุตเขียนแทนได้เป็น c จะถูกแบ่งจากข้อมูลอนุกรมให้เป็นข้อมูลขนานจำนวนเท่ากับ n_T สาย หลังจากนั้นข้อมูลในแต่ละสายจะถูกมอดูเลตโดยวิธีการมอดูเลชันแบบ M ระดับ และหลังจากนั้นข้อมูลในแต่ละสายจะถูกส่งออกไปในแต่ละสายอากาศ ซึ่งการประมวลผลสัญญาณ โดยแบ่งแยกตามสายข้อมูลแต่ละสายจะถูกเรียกว่าชั้นสัญญาณ (Layer) สัญลักษณ์ที่ถูกมอดูเลตจะถูกเรียงในเมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่ง (Transmittal Matrix) ซึ่งถูกแทนโดย X ซึ่งมีจำนวนแถวเท่ากับ n_T แถว และจำนวนคอลัมน์เท่ากับ L คอลัมน์โดยที่ L เป็นค่าความยาวของบล็อกข้อมูลที่ส่ง คอลัมน์ที่ t ของเมตริกซ์สัญญาณทางด้านภาคส่งซึ่งเขียนแทนด้วย x_t ซึ่งประกอบด้วยสัญลักษณ์ที่ถูกมอดูเลต $x_t^1, x_t^2, \dots, x_t^{n_T}$ โดยที่ $t = 1, 2, \dots, L$ ในเวลา t เครื่องส่งจะส่งข้อมูลของคอลัมน์ที่ t ของเมตริกซ์สัญญาณทางด้านภาคส่ง หนึ่งสัญลักษณ์ต่อหนึ่งเสาอากาศ เพราะฉะนั้น x_t^i จะถูกส่งจากเสาอากาศส่งที่ i ณ เวลา t โครงสร้างแบบแนวตั้งจะหมายถึง การส่งสัญญาณแบบเป็นลำดับตามคอลัมน์ของเมตริกซ์ในปริภูมิเวลา (Space–Time Domain) การส่งสัญญาณในรูปแบบดังกล่าว สามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการเข้ารหัสคอนโวลูชัน ซึ่งเป็นการเข้ารหัสแบบ 1 มิติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งคำว่า 1 มิติ หมายถึงปริภูมิเวลาในขณะที่รหัสสามารถเป็นหลายมิติได้ในโดเมนเวลา ซึ่งสถาปัตยกรรมแบบทริตต์ประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา (Threaded Layered Space-Time : TLST) ที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับสถาปัตยกรรมแบบประมวลหลายมิติแนวอนแบบปริภูมิเวลา (Horizontal Layer Space-Time : HLST)

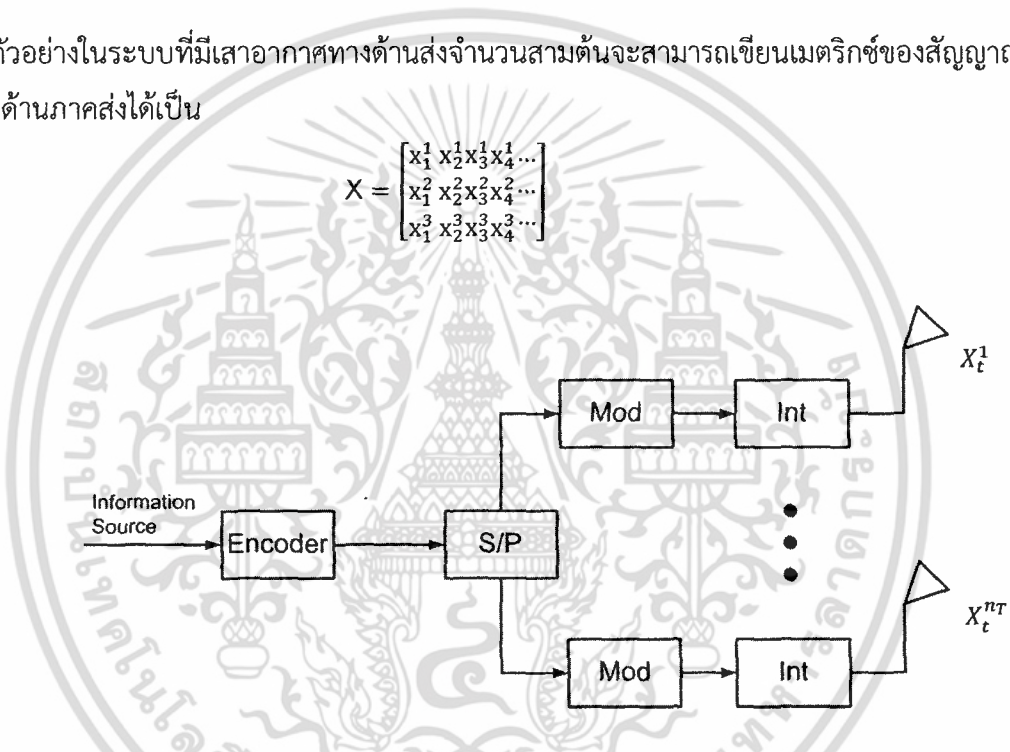
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสถาปัตยกรรมแบบประมวลผลหลายมิติแนวนอนแบบปริภูมิเวลา (HLST) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ในขั้นแรกข้อมูลจะถูกนำไปเข้ารหัสช่องสัญญาณ และจะถูกแบ่งข้อมูลเป็นจำนวน n_T สาย ซึ่งข้อมูลในแต่ละสายจะถูกมอดูเลต อินเทอร์ลีฟ และกำหนดเสาอากาศที่ใช้ในการส่ง ถ้าหากสัญลักษณ์ที่ออกมาจากมอดูเลเตอร์ ถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ x_i^t โดยที่ i แสดงถึงหมายเลขของชั้นสัญญาณและ t แสดงถึงหมายเลขของชั้นสัญญาณและ t หมายถึงช่วงเวลา เมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่งจะเขียนได้เป็น

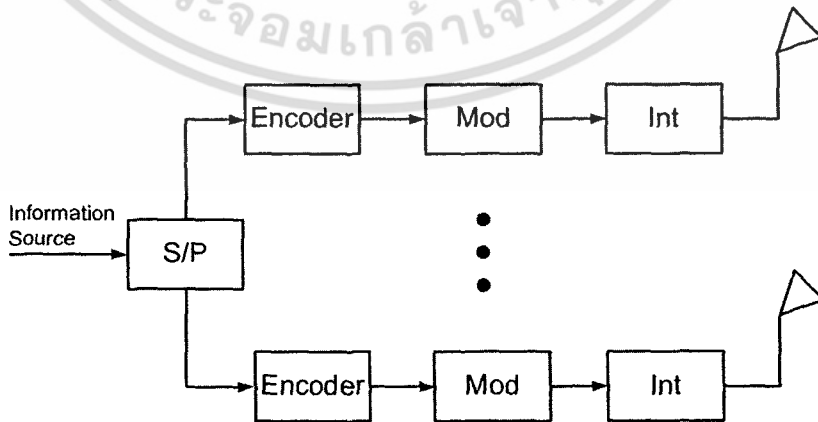
$$X = [x_i^t] \tag{2.7}$$

ยกตัวอย่างในระบบที่มีเสาอากาศทางด้านส่งจำนวนสามต้นจะสามารถเขียนเมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่งได้เป็น

$$X = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & x_3^1 & x_4^1 & \dots \\ x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & x_4^2 & \dots \\ x_1^3 & x_2^3 & x_3^3 & x_4^3 & \dots \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

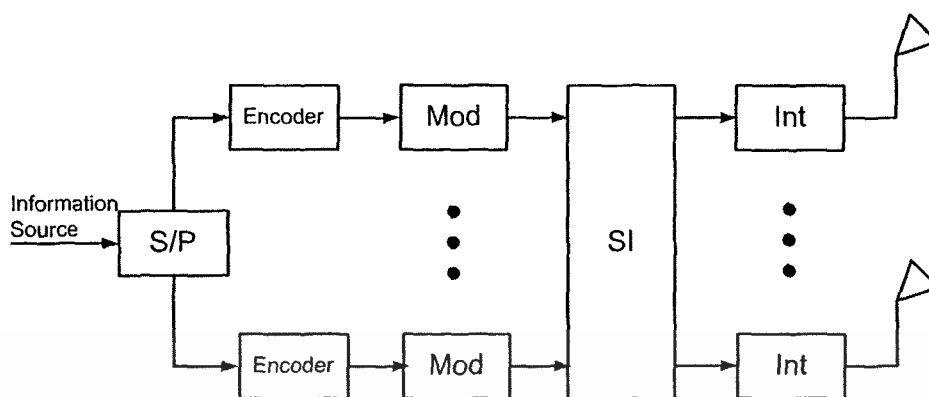


รูปที่ 2.10 สถาปัตยกรรม HLST ที่มีวงจรรหัสในชั้นหนึ่งตัว



รูปที่ 2.11 สถาปัตยกรรม HLST ที่มีวงจรรหัสในแต่ละชั้นสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 สถาปัตยกรรม DLST หรือ TLST

ชุดข้อมูล $x_1^1, x_2^1, x_3^1, x_4^1 \dots$ จะถูกส่งออกจากเสาส่งที่หนึ่ง ชุดข้อมูล $x_1^2, x_2^2, x_3^2, x_4^2 \dots$ จะถูกส่งออกจากเสาส่งที่สอง และชุดข้อมูล $x_1^3, x_2^3, x_3^3, x_4^3 \dots$ จะถูกส่งออกจากเสาส่งที่สามตามลำดับ

สถาปัตยกรรมแบบ HLST ยังสามารถที่จะนำมาดัดแปลง โดยทำการแยกข้อมูลแบบอนุกรมให้เป็นข้อมูลขนานก่อน ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.11 ซึ่งข้อมูลในแต่ละสายย่อยของข้อมูลขนานจะถูกเข้ารหัสอย่างเป็นอิสระต่อกัน โดยวงจรเข้ารหัสช่องสัญญาณ จากนั้นสัญญาณจะถูกทำการอินเตอร์ลีฟ มอดูเลต และหลังจากนั้นสัญญาณ จะถูกส่งด้วยเสาอากาศที่ได้ทำการกำหนดไว้ ซึ่งสามารถที่จะสมมุติได้ว่า วงจรเข้ารหัสช่องสัญญาณในแต่ละชั้นนั้น มีลักษณะที่จำเพาะเจาะจงอย่างไรก็ตามการเข้ารหัสที่แตกต่างกันในแต่ละชั้นสัญญาณ สามารถที่จะกระทำได้

ประสิทธิภาพที่มากกว่า สามารถทำได้โดยการใช้สถาปัตยกรรมแบบไดอากอนอลเสเยอร์สเปซไทม์ (Diagonal Layer Space-Time : DLST) ซึ่งข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสและมอดูเลตจะถูกกระจายไปในแต่ละเสาส่งตามแนวเส้นทแยงมุมของเมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่ง ยกตัวอย่าง เมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่งของสถาปัตยกรรมแบบ DLST จะถูกสร้างมาจากเมตริกซ์ X โดยการห้วงเวลาข้อมูลในแถวที่ i เป็นเวลาเท่ากับ $i - 1$ ซึ่งจะทำให้ค่าของสมาชิกที่ไม่เป็นศูนย์เรียงตัวในแนวเส้นทแยงมุม สมาชิกของตริกซ์ที่อยู่ใต้เส้นทแยงมุมจะมีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมแรกจะถูกส่งด้วยเสาอากาศเสาที่หนึ่ง สมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมที่สองจะถูกส่งด้วยเสาอากาศเสาที่สอง สมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมที่สามจะถูกส่งด้วยเสาอากาศเสาที่สาม สมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมที่สี่ จะถูกส่งด้วยเสาอากาศเสาที่สี่ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสในแต่ละชุดของวงจรเข้ารหัสช่องสัญญาณถูกกระจายส่งออกไปด้วยเสาอากาศหลายเสา ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งการทำสเปซอินเตอร์ลีฟ (Spatial Interleaving) ของสถาปัตยกรรมแบบ DLST สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & x_3^1 x_4^1 x_5^1 x_6^1 \dots \\ 0 & x_1^2 & x_2^2 x_3^2 x_4^2 x_5^2 \dots \\ 0 & 0 & x_1^3 x_2^3 x_3^3 x_4^3 \dots \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & x_3^1 x_4^1 x_5^1 x_6^1 \dots \\ 0 & x_2^2 & x_3^2 x_4^2 x_5^2 x_6^2 \dots \\ 0 & 0 & x_3^3 x_4^3 x_5^3 x_6^3 \dots \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

แถวของเมตริกซ์ที่อยู่ทางด้านของสมการที่ (2.9) มาจากการเรียงตัวในแนวเส้นทแยงมุมของเมตริกซ์ทางด้านซ้ายมือ ซึ่งแถวแรกของเมตริกซ์จะถูกส่งด้วยเสาอากาศต้นที่สาม

การจัดลำดับชั้นของสัญญาณตามแนวเส้นทแยงมุมทำให้ได้โคเวอริจันซ์แบบปริภูมิเวลา (Space Diversity) และจะทำให้ได้ประสิทธิภาพที่มากกว่าการจัดเรียงไปตามแนวนอน

อย่างไรก็ตามจะเกิดการสูญเสียประสิทธิภาพของการใช้สเปกตรัล (Spectral) ในสถาปัตยกรรมแบบ DLST ที่เกิดจากการที่มีสมาชิกภายในเมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่งที่มีค่าเป็น 0

ซึ่งสถาปัตยกรรมที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือสถาปัตยกรรมแบบ TLST ที่ได้ดัดแปลงมาจากสถาปัตยกรรมแบบ HLST โดยการเพิ่มส่วนของการทำสเปซอินเตอร์ลีฟ (Spatial Interleaver : SI) ก่อนที่ข้อมูลจะเข้าสู่การทำอินเตอร์ลีฟทางเวลา (Time Interleaver) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.12 โดยวงจรอินเตอร์ลีฟเชิงเวลาจะใช้การสลับลำดับแบบสุ่ม โดยจะมีการสร้างลำดับของการสลับลำดับบิต (Fixed Random Permutation) และจะสลับข้อมูลตามลำดับนี้ ยกตัวอย่างจากข้อมูลที่จะส่งออกจากเสาอากาศส่งที่หนึ่งมีลำดับการเรียงดังนี้ $x_1^1, x_2^1, x_3^1, x_4^1, x_5^1, x_6^1, x_7^1, x_8^1$ เมื่อผ่านวงจรการทำอินเตอร์ลีฟเชิงเวลาจะได้ข้อมูลที่เรียงใหม่ได้เป็น $x_1^1, x_3^1, x_6^1, x_8^1, x_2^1, x_7^1, x_4^1, x_5^1$

ในระบบที่มีจำนวนเสาอากาศทางด้านส่งเท่ากับ 3 ต้น ($n_T = 3$) การทำสเปซอินเตอร์ลีฟสามารถแสดงได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x_1^1 x_2^1 x_3^1 x_4^1 \dots \\ x_1^2 x_2^2 x_3^2 x_4^2 \dots \\ x_1^3 x_2^3 x_3^3 x_4^3 \dots \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} x_1^1 x_3^1 x_2^1 x_4^1 \dots \\ x_1^2 x_2^2 x_3^2 x_4^2 \dots \\ x_1^3 x_2^3 x_3^3 x_4^3 \dots \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

ซึ่งสมาชิกของเมตริกซ์มอดูเลชัน จะถูกแสดงทางด้านซ้ายของสมการที่ (2.10) ซึ่งสามารถเขียนเป็น x_t^i แสดงถึงสัญลักษณ์การมอดูเลชันของชั้นสัญญาณที่ i และ t เมตริกซ์ทางด้านซ้ายของสมการที่ (2.10) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น X' คือเมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่งของสถาปัตยกรรมแบบ TLST ซึ่งคือสัญลักษณ์ที่ได้จากการมอดูเลต $x_1^1, x_2^1, x_3^1, x_4^1 \dots$ จะถูกสร้างจากวงจรมอดูเลตในชั้นสัญญาณที่ 1, 3, 2 และ 1 ตามลำดับที่จะถูกส่งด้วยเสาอากาศส่งที่ 1

วงจรสเปซอินเตอร์ลีฟ ในสถาปัตยกรรมแบบ TLST สามารถถูกแสดงด้วยวงจรอินเตอร์ลีฟแบบไซคลิกชิฟต์ (Cyclic-Shift) ถ้าเมตริกซ์ทางด้านซ้ายของสมการ (2.7) คือ X ในคอลัมน์แรกของเมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่ง X' จะเหมือนกันกับคอลัมน์แรกของ X ในคอลัมน์ที่สองของเมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่ง X' จะเหมือนกันกับคอลัมน์ที่สองของ X ที่ถูกทำ cyclic-shift 1 ตำแหน่ง X ในคอลัมน์ที่สามของเมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่ง X' จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานหรือการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมือนกันกับคอลัมน์ที่สามของ X ที่ถูกทำไซคลิกชิฟต์ 2 ตำแหน่ง X ในคอลัมน์ที่สี่ของเมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่ง X' จะเหมือนกันกับคอลัมน์ที่สี่ของ X และเป็นไปตามหลักการของไซคลิกชิฟต์ สำหรับคอลัมน์ต่อไป ซึ่งสามารถแทนที่สมาชิก X' เป็น x'_t ซึ่งการเปลี่ยนค่า x'_t เป็นค่า x'_t' สามารถเขียนได้เป็น

$$x'_t' = x'_t, i' = [(i + t - 2) \bmod n_T] + 1 \quad (2.11)$$

ประสิทธิภาพของสเปกตรัล (Spectral) ของสถาปัตยกรรมแบบ HLST และ TLST คือ Rm_{n_T} โดยที่ Rm_{n_T} คือ ค่าโค้ดเรท (Code rate) และ m คือ จำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ ซึ่งประสิทธิภาพของสเปกตรัลของสถาปัตยกรรม DLST จะลดลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากค่าศูนย์ภายในเมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่ง

2.5.2 เครื่องรับแบบปริภูมิเวลา (LST Receivers)

เพื่อให้เป็นการง่ายต่อการวิเคราะห์โครงสร้างสถาปัตยกรรมแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา สมมติให้การจัดชั้นสัญญาณเป็นแบบการจัดสัญญาณตามแนวนอน (Horizontal Layering) ที่มีการเข้ารหัสแบบไบนารีและการมอดูเลชันแบบ BPSK

ไดเวอร์ซิตีทางด้านส่งทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแบบสเปเชียล สัญญาณได้ถูกส่งออกจากเสาอากาศหลายต้นแพร่กระจายไปตามเส้นทางที่เป็นอิสระต่อกัน และเกิดการรบกวนกันเองที่ภาครับ ซึ่งการรบกวนกันสามารถแสดงได้เป็นเมตริกซ์ดังนี้

$$r_t = Hx_t + n_t$$

โดยที่ r_t เป็นคอลัมน์เมตริกซ์ที่เป็นองค์ประกอบ n_r ของสัญญาณที่รับได้ของเสาอากาศรับจำนวน n_r ต้น x_t เป็นเมตริกซ์คอลัมน์ที่ t ของเมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่ง X และ n_t เป็นคอลัมน์เมตริกซ์ที่เป็นองค์ประกอบ n_r ของสัญญาณรบกวนประเภท AWGN ที่มาจากเสาอากาศทางด้านรับ โดยที่ค่าความแปรปรวนของแต่ละต้น อากาศมีค่าเท่ากับ σ^2 ถ้าหากโครงสร้างที่ใช้เป็นแบบที่มีการทำสเปเชียลอินเตอร์ลีฟ ซึ่งแทนได้ด้วย X' ซึ่งเพื่อความง่ายในการเขียนสามารถเขียนเมตริกซ์ r_t, x_t และ n_t เป็น r, x, n

โครงสร้างแบบปริภูมิเวลาสามารถมองเป็นระบบ CDMA ที่มีการซิงโครนัส (Synchronous Code Division Multiple Access: CDMA) ที่มีจำนวนของเสาอากาศส่งเท่ากับจำนวนของผู้ใช้งาน ซึ่งการรบกวนกันระหว่างเสาอากาศส่งจะมีค่าเท่ากับค่าสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อื่น (Multiple Access Interference: MAI) ในระบบ CDMA ในขณะที่สัมประสิทธิ์จากการจางหายเชิงซ้อนมีความสัมพันธ์กับรหัสแผ่ การวิเคราะห์นี้สามารถนำมาขยาย เพื่อใช้กับวิธีการทำงานของเครื่องรับได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

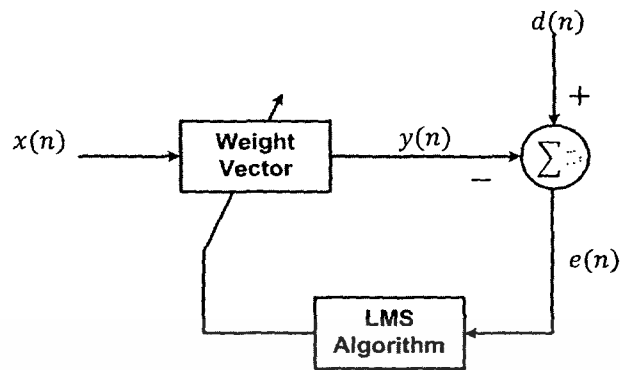
ดังนั้นเครื่องรับประเภทหลายผู้ใช้งานที่ออกแบบมาสำหรับ CDMA สามารถที่จะนำมาดัดแปลงเพื่อใช้งานกับระบบ LST ภายใต้หลักการเหล่านี้ เครื่องรับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบ LST ที่ไม่มีการเข้ารหัส คือเครื่องรับหลายผู้ใช้งานแบบความน่าจะเป็นจริงสูงสุดซึ่งทำงานอยู่บนหลักการของเทรลลิส (Trellis) โดยการคำนวณค่าสถิติความน่าจะเป็นจริงสูงสุดเหมือนกับในวิธีการแบบไวเทอร์บี ความซับซ้อนของวิธีการนี้เป็นอัตราเอ็กซ์โพเนนเชียลกับจำนวนของเสาอากาศทางภาคส่ง

สำหรับระบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลาที่มีการเข้ารหัส เครื่องรับที่เหมาะสมที่สุดจะต้องทำงานร่วมกันระหว่างการรับสัญญาณและถอดรหัสข้อมูล ซึ่งทำได้โดยการผสมกันระหว่างรหัสเทรลลิสของระบบประมวลผลแบบปริภูมิเวลา และการเข้ารหัสช่องสัญญาณ ความซับซ้อนของเครื่องรับจะเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลของผลคูณของจำนวนเสาอากาศส่ง และอันดับหน่วยความจำรหัส ซึ่งเป็นผลทำให้เครื่องรับแบบเหมาะสมที่สุด ไม่สามารถที่จะนำมาใช้งานในทางปฏิบัติได้ ยกเว้นสำหรับการใช้งานเสาอากาศส่งจำนวนน้อยเท่านั้น จึงเป็นสาเหตุที่มีการวิจัยเครื่องรับที่มีสมรรถนะรองลงมา ซึ่งเครื่องรับที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นหนึ่งในเครื่องรับที่มีสมรรถนะรองลงมา ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทที่ 3

2.6 วงจรกรองปรับตัวได้ (Adaptive Filter)

2.6.1 วงจรกรองปรับตัวได้ใช้อัลกอริทึมแบบ LMS (Least Mean Square Algorithm)

วงจรกรองปรับตัวได้ มักใช้อัลกอริทึมแบบ LMS จัดเป็นวิธีการแก้ปัญหาวงจรกรองเชิงเส้นชนิดหนึ่งที่มีการทำงานอยู่บนพื้นฐานของวงจรกรองที่มีอัลกอริทึมแบบค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด ข้อดีของวงจรกรองแบบปรับตัวได้ คือ มีสูตรการคำนวณที่ง่ายไม่ซับซ้อน และไม่จำเป็นต้องรู้พารามิเตอร์ทางสถิติของสัญญาณขาเข้า ที่สำคัญค่าสัมประสิทธิ์ ของวงจรกรองจะถูกปรับโดยอัตโนมัติให้เหมาะสมเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของสัญญาณขาเข้า กรรมวิธีการปรับตัวของ LMS จึงแตกต่างไปจากการแก้ปัญหาวงจรกรองเชิงเส้นด้วยทฤษฎีวงจกรองของวินเนอร์ (Wiener Filter Theory) ที่พิจารณาการคำนวณจากค่าเฉลี่ยทางสถิติ (Ensemble Average) เป็นพื้นฐานในการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสม ผลเฉลี่ยที่ได้วิธีของวินเนอร์จะมีเพียงค่าเดียว และค่าที่คำนวณได้นี้มีความเหมาะสมสำหรับเวกเตอร์สัญญาณขาเข้าตลอดทุกช่วงเวลาที่ยังพิจารณา ฉะนั้นกรรมวิธีของวินเนอร์ จึงใช้ได้เฉพาะกับสัญญาณที่มีคุณสมบัติของสเตชันนารี (Stationary) สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำวงจรกรองแบบปรับตัวได้ ที่ใช้อัลกอริทึมค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด (LMS Algorithm) มาประยุกต์ใช้



รูปที่ 2.13 บล็อกไดอะแกรมวงจรกรองแบบปรับตัวได้ที่อาศัยอัลกอริทึมแบบ LMS

วงจรกรองแบบปรับตัวได้ที่อาศัยอัลกอริทึมค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด เป็นวิธีการที่ง่าย การคำนวณไม่ซับซ้อน มีเวลาการลู่เข้า (Convergence Time) ที่เร็ว และอาศัยค่าสัญญาณผิดพลาด $e(n)$ มาคำนวณ เพื่อปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรสัญญาณ โดยใช้เงื่อนไขของการลดค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error: MSE) ให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้สัญญาณขาออกจากวงจรกรองสัญญาณนั้น มีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิงมากที่สุดด้วย เมื่อต้องการหาค่า ξ ที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการปรับ w ทำได้โดยหา $\frac{\partial \xi}{\partial w}$

$$g_w = \frac{\partial \xi}{\partial w} = \frac{\partial E[e^2(n)]}{\partial w} = -2E[e(n)x(n)] = -2p + 2Rw \quad (2.12)$$

การค้นหาแบบสเต็ปเพิลเดสเซนต (Steepest Descent Method) ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรตั้งสมการ

$$w(n+1) = w(n) - \mu g_w(n)$$

$$w(n+1) = w(n) - 2\mu R w(n) + 2\mu p \quad (2.13)$$

โดยที่ μ คือ ค่าเกณฑ์การปรับตัว (Adaption Gain) หรือค่าช่วงก้าว

จากสมการที่ (2.13) จะเห็นได้ว่าค่า $w(n+1)$ จะปรับค่าตามค่าลบของเกรเดียนท์ $\xi(g_w)$ และค่า μ มีผลต่ออัตราการลู่เข้าของอัลกอริทึม ในการกำหนดค่า μ ต้องกำหนดให้เหมาะสม เงื่อนไขในการกำหนดค่า μ นั้น จะเริ่มพิจารณาจากคุณสมบัติ ค่าคุณลักษณะหรือค่าไอเกน (Eigen values) และเมตริกซ์ของเวกเตอร์ไอเกน (Eigenvector) ของเมตริกซ์สหสัมพันธ์ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[R - \lambda I]Q_i = 0 \quad (2.14)$$

โดยที่ λ คือ ค่าไอเกน
 I คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์
 Q_i คือ เมตริกซ์ของเวกเตอร์ไอเกนที่สอดคล้องกับค่าไอเกน และ $Q_i^{-1} = Q_i^T$

จากสมการที่ (2.14) สามารถเขียนได้เป็น

$$RQ_i = \lambda Q_i \quad (2.15)$$

และสมการกระจายสมการที่ (2.15) ได้ดังนี้

$$R[Q_0 Q_1 \dots Q_{L-1}] = [Q_0 Q_1 \dots Q_{L-1}] \begin{bmatrix} \lambda_0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_{L-1} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.16) สามารถเขียนสมการที่ (2.15) ได้ใหม่ดังนี้

$$RQ = QA$$

$$A = Q^T R Q \text{ หรือ } R = QAQ^T \quad (2.17)$$

โดยที่ A คือ เมตริกซ์ของค่าไอเกนซึ่งเป็นเมตริกซ์แนวทแยง (Diagonal Matrix) กำหนดให้

$$v = w - w_0 \quad (2.18)$$

และ

$$v' = Q^T v = Q^{-1} v \quad (2.19)$$

โดยที่ v คือ ค่าที่เบี่ยงเบนไปของสัมประสิทธิ์ของวงจรรอง

สมการที่ (2.18) เป็นการแปลงพิกัดจากพิกัดของสัมประสิทธิ์วงจรรองให้เป็นพิกัดของค่าเบี่ยงเบนของวงจรรอง ส่วนสมการที่ (2.19) เป็นการหมุนแกน

สามารถเขียนสมการที่ (2.17) ให้อยู่ในรูปของค่าเบี่ยงเบนสัมประสิทธิ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนโวสสำหรับกรเซงนเพื่อกรศกษเทนน เมอนญตเหนงไปเซประเยชนदनกรค้
 น่วกรณเญ ทงส่น อกทงท้มนเให้ดดเปลงเนอห และดองอ้งองถงเจ้ของเอกสรทกคร้งที่ม่กรน้ไปใช้

$$\mathbf{v}(n+1) = [\mathbf{I} - 2\mu\mathbf{R}]\mathbf{v}(n) \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.19) สามารถเขียนสมการที่ (2.20) ได้ใหม่ดังนี้

$$\mathbf{Q}\mathbf{v}'(n+1) = [\mathbf{I} - 2\mu\mathbf{R}]\mathbf{Q}\mathbf{v}'(n) \quad (2.21)$$

นำ \mathbf{Q}^{-1} คูณทั้งสองข้างของสมการได้

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{v}'(n+1) &= \mathbf{Q}^{-1}[\mathbf{I} - 2\mu\mathbf{R}]\mathbf{Q}\mathbf{v}'(n) \\ \mathbf{v}'(n+1) &= [\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{I}\mathbf{Q} - 2\mu\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{R}\mathbf{Q}]\mathbf{v}'(n) \end{aligned} \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.17) จัดรูปสมการที่ (2.22) ได้ดังนี้

$$\mathbf{v}'(n+1) = [\mathbf{I} - 2\mu\mathbf{\Lambda}]\mathbf{v}'(n) \quad (2.23)$$

ให้ $n = n-1$ จะได้

$$\begin{aligned} \mathbf{v}'(n+1) &= [\mathbf{I} - 2\mu\mathbf{\Lambda}]\mathbf{v}'(n-1) \\ \mathbf{v}'(n+1)[\mathbf{I} - 2\mu\mathbf{\Lambda}]\mathbf{v}'(n-1) &= 0 \end{aligned} \quad (2.24)$$

สมการที่ (2.24) เป็นสมการผลต่าง (Difference Equation) ที่มีแต่ผลตอบสนองธรรมชาติ ($\mathbf{v}'_n(n)$) ซึ่งหาได้จาก

$$\mathbf{v}'_n(n) - [\mathbf{I} - 2\mu\mathbf{\Lambda}]\mathbf{v}'_n(n-1) = 0 \quad (2.25)$$

โดยกำหนดให้

$$\mathbf{v}'_n(n) = \mathbf{C}r^n \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ (2.26) ลงในสมการที่ (2.25) จะได้

$$Cr^n - [I - 2\mu\Lambda]Cr^{n-1} = 0 \quad (2.27)$$

ให้ $n = 0$ จะได้

$$C - [I - 2\mu\Lambda]Cr^{-1} = 0 \quad (2.28)$$

นำ r มาคูณทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$Cr - [I - 2\mu\Lambda]C = 0 \quad (2.29)$$

นำ C มาหารทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\begin{aligned} r - [I - 2\mu\Lambda] &= 0 \\ r &= [I - 2\mu\Lambda] \end{aligned} \quad (2.30)$$

สมการที่ (2.30) สามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$r = I - 2\mu\Lambda = \begin{bmatrix} 1 - 2\mu\lambda_0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 - 2\mu\lambda_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 - 2\mu\lambda_{L-1} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

ซึ่งสามารถลดรูปได้เป็น

$$r = 1 - 2\mu\lambda_i \quad ; i = 0, 1, \dots, L-1 \quad (2.32)$$

ดังนั้นค่าผลตอบสนองธรรมชาติ $v'_n(n)$ คือ

$$v'_n(n) = C[1 - 2\mu\lambda_i]^n \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.32) หาค่า c โดยให้ $n = 0$ จะได้

$$v'_n(0) = c$$

ดังนั้นค่าผลตอบสนองของธรรมชาติ คือ

$$v'_n(n) = [1 - 2\mu\lambda_i]^n v'_n(0) \quad (2.34)$$

จากเงื่อนไขของเสถียรภาพของระบบทำให้

$$|1 - 2\mu\lambda_i| < 1 \quad (2.35)$$

เอาค่าสัมบูรณ์ออกจะได้

$$-1 < 1 - 2\mu\lambda_i < 1 \quad (2.36)$$

แก้สมการได้ดังนี้

$$-2 < -2\mu\lambda_i < 0$$

$$0 < \mu\lambda_i < 1$$

$$0 < \mu < \frac{1}{\lambda_i} \quad (2.37)$$

เนื่องจากค่าไอเกนสูงสุดที่เป็นไป คือ λ_{\max} ดังนั้นสมการที่ (2.36) จะได้ขอบเขตใหม่ คือ

$$0 < \mu < \frac{1}{\lambda_{\max}} \quad (2.37)$$

และผลบวกของค่าไอเกนทั้งหมด หรือผลบวกในแนวทแยงของ Λ ($\text{tr}(\Lambda)$) มีค่ามากกว่า λ_{\max}

ดังนั้นสมการที่ (2.37) จะได้ขอบเขตใหม่ คือ

$$0 < \mu < \frac{1}{\text{tr}(\Lambda)} \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.17) หาค่าผลบวกในแนวทแยงจะได้

$$\text{tr}(\Lambda) = \text{tr}Q^{-1}RQ \quad (2.39)$$

จากคุณสมบัติของผลบวกในแนวทแยงของเมตริกซ์

$$\text{tr}(AB) = \text{tr}(BA) \quad (2.40)$$

ทำให้สมการที่ (2.39) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\text{tr}(\Lambda) = \text{tr}(RQQ^{-1}) = \text{tr}(R) \quad (2.41)$$

แทนสมการที่ (2.41) ลงในสมการที่ (2.38) จะได้

$$0 < \mu < \frac{1}{\text{tr}(R)} \quad (2.42)$$

โดยที่ $\text{tr}(R)$ คือ ผลบวกในแนวทแยงของเมตริกซ์สหสัมพันธ์

จากสมการ (2.42) สามารถหาเมตริกซ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณขาเข้าได้ สามารถรู้ขอบเขตค่าขนาดขั้นที่เหมาะสมได้เช่นเดียวกัน

สำหรับอัลกอริทึมแบบค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดนั้น ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองจะใช้การประมาณค่าเกรเดียนต์ของ $\xi(\hat{g}_w)$ จากสมการที่ (2.43) ของวิธีวีเนอร์-ฮอฟท์

$$w_0 = R^{-1}p \quad (2.43)$$

โดยจะประมาณให้

$$R \approx \hat{R}(n) = x(n)x^T(n) \quad (2.44)$$

$$p \approx \hat{p}(n) = d(n)x(n) \quad (2.45)$$

การประมาณค่าเกรเดียนต์ของ $\xi(\hat{g}_w)$ คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
\hat{g}_w(n) &= -2\hat{p}(n) + 2\hat{R}(n)w(n) \\
&= -2d(n)x(n) + 2x(n)x^T(n)w(n) \\
&= -2x(n)(d(n) - x^T(n)w(n)) \\
&= -2x(n)(d(n) - y(n)) \\
&= -2e(n)x(n)
\end{aligned} \tag{2.46}$$

ดังนั้น สมการการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรถือ

$$\begin{aligned}
w(n+1) &= w(n) - \mu \hat{g}_w(n) \\
&= w(n) + 2\mu e(n)x(n)
\end{aligned} \tag{2.47}$$

จากสมการที่ (2.44) และ (2.47) จะเห็นได้ว่า สมการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวิธีค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดนั้น ค่าคาดหวัง (Expectation Operation) ได้ถูกนำออกไปจากสมการการปรับค่าสัมประสิทธิ์ในวิธีสตีพเพสเซนส์ ซึ่งแทนด้วยการประมาณค่าเกรเดียนท์ การลดค่าคาดหวังนี้ ทำให้เกิดผลตามมาคือ ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรถองโดยวิธีค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด ค่าความผิดพลาดจะมีการเคลื่อนไหวอย่างสุ่มรอบ ๆ ค่าต่ำสุดของพื้นผิวความผิดพลาด (Error Surface) หรือลู่เข้าสู่ค่าเฉลี่ยแทนที่จะลู่เข้าจุดต่ำสุดอย่างแท้จริง

2.6.1.1 สมรรถนะของวงจรถองสัญญาณแบบปรับตัวที่ได้ที่อาศัยอัลกอริทึม แบบค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด

ในการวัดสมรรถนะการทำงานของวงจรถองสัญญาณแบบปรับตัวได้ จะใช้เกณฑ์ในการวัด 2 ค่า คือ

ก) ค่ามิสแอดจัสเมนต์ (Misadjustment)

ค่ามิสแอดจัสเมนต์สามารถหาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$M = \frac{E[\xi_{ex}]}{\xi_{min}} \tag{2.48}$$

โดยที่ ξ_{min} คือ ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่น้อยที่สุด ซึ่งหาได้จากวิธีของวินเนอร์-ฮอฟท์

ξ_{ex} คือ ผลต่างระหว่างค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของวงจรถองกับค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่น้อยที่สุด ซึ่งหาได้จากวิธีของวินเนอร์-ฮอฟท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ ξ_{ex} หาได้จาก

$$\xi_{ex} = \xi - \xi_{min} \quad (2.49)$$

โดยที่ ξ คือ ค่าผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยของวงจรรองสัญญาณ

จากสมการที่ (2.50)

$$\xi = E[d^2(n)] - 2\mathbf{w}^T \mathbf{p} + \mathbf{w}^T \mathbf{R} \mathbf{w} \quad (2.50)$$

จากสมการที่ (2.18) จัดรูปสมการที่ (2.50) ให้อยู่ในรูปของ v โดยบวกเทอม $[-\mathbf{w}_0^T \mathbf{p} + \mathbf{w}_0^T \mathbf{p}]$ ทางขวามือของสมการที่ (2.50) จะได้

$$\xi = E[d^2(n)] - \mathbf{w}_0^T \mathbf{p} + \mathbf{w}_0^T \mathbf{p} - 2\mathbf{w}^T \mathbf{p} + \mathbf{w}^T \mathbf{R} \mathbf{w} \quad (2.51)$$

สมการที่ (2.52)

$$\xi_{min} = E[d^2(n)] - \mathbf{w}_0^T \mathbf{p} \quad (2.52)$$

จากสมการที่ (2.52) และสมการที่ (2.51) สามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$\xi = \xi_{min} + \mathbf{w}_0^T \mathbf{p} - 2\mathbf{w}^T \mathbf{p} + \mathbf{w}^T \mathbf{R} \mathbf{w} \quad (2.53)$$

การกระจายเทอม $2\mathbf{w}^T \mathbf{p}$ จะได้

$$\xi = \xi_{min} + \mathbf{w}_0^T \mathbf{p} - \mathbf{w}^T \mathbf{p} - \mathbf{w}^T \mathbf{p} + \mathbf{w}^T \mathbf{R} \mathbf{w} \quad (2.54)$$

ดึงตัวร่วม \mathbf{p} ของเทอมที่ 2 กับ 3 ออกมาจะได้

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_{min} - (\mathbf{w}^T - \mathbf{w}_0^T) \mathbf{p} - \mathbf{w}^T \mathbf{p} + \mathbf{w}^T \mathbf{R} \mathbf{w} \\ &= \xi_{min} - \mathbf{v}^T \mathbf{p} - \mathbf{w}^T \mathbf{p} + \mathbf{w}^T \mathbf{R} \mathbf{w} \end{aligned} \quad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.43) หาค่า \mathbf{p} ได้

$$\mathbf{p} = \mathbf{R}\mathbf{w}_0 \quad (2.56)$$

แทนค่าสมการที่ (2.56) ลงในสมการที่ (2.57) จะได้

$$\xi = \xi_{\min} - \mathbf{v}^T \mathbf{R}\mathbf{w}_0 - \mathbf{w}^T \mathbf{R}\mathbf{w}_0 + \mathbf{w}^T \mathbf{R}\mathbf{w} \quad (2.57)$$

ดึงตัวร่วม $\mathbf{w}^T \mathbf{R}$ ของเทอมที่ 3 กับ 4 ในสมการที่ (2.57) ออกมาจะได้

$$\xi = \xi_{\min} - \mathbf{v}^T \mathbf{R}\mathbf{w}_0 - \mathbf{w}^T \mathbf{R}(\mathbf{w} - \mathbf{w}_0) \quad (2.58)$$

จากสมการที่ (2.18) สามารถเขียนสมการที่ (2.58) ได้ใหม่ดังนี้

$$\xi = \xi_{\min} - \mathbf{v}^T \mathbf{R}\mathbf{w}_0 + \mathbf{w}^T \mathbf{R}\mathbf{v} \quad (2.59)$$

จัดรูปสมการที่ (2.59) ได้ใหม่ดังนี้

$$\xi = \xi_{\min} - \mathbf{w}_0^T \mathbf{R}\mathbf{v} + \mathbf{w}^T \mathbf{R}\mathbf{v} \quad (2.60)$$

ดึงตัวร่วม $\mathbf{R}\mathbf{v}$ ในเทอมที่ 2 กับ 3 ของสมการที่ (2.60) ออกจะได้

$$\xi = \xi_{\min} + \mathbf{v}^T \mathbf{R}\mathbf{v} \quad (2.61)$$

เปรียบเทียบสมการที่ (2.61) กับ (2.60) จะได้

$$\xi_{\text{ex}} = \mathbf{v}^T \mathbf{R}\mathbf{v} \quad (2.62)$$

จากสมการที่ (2.19) จะได้

$$\begin{aligned} \xi_{\text{ex}} &= (\mathbf{Q}\mathbf{v}')^T \mathbf{R}\mathbf{Q}\mathbf{v}' \\ &= \mathbf{v}'^T \mathbf{Q}^T \mathbf{R}\mathbf{Q}\mathbf{v}' \end{aligned} \quad (2.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.17) สามารถเขียนสมการที่ (2.63) ได้ใหม่ดังนี้

$$\xi_{ex} = \mathbf{v}'^T \Lambda \mathbf{v}' \quad (2.64)$$

ดังนั้น

$$E[\xi_{ex}] = E[\mathbf{v}'^T \Lambda \mathbf{v}'] \quad (2.65)$$

จากสมการที่ (2.65) เมตริกซ์ค่าไอเกน Λ เป็นเทริกซ์แนวทแยง ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการที่ (2.65) ได้ใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} E[\xi_{ex}] &= \left(\sum_{n=0}^N \lambda_n \right) E[\mathbf{v}'^T \mathbf{v}'] \\ &= \text{tr}(\mathbf{R}) E[\mathbf{v}'^T \mathbf{v}'] \end{aligned} \quad (2.66)$$

การประมาณค่าเกรเดียนท์ของ $\xi(\hat{\mathbf{g}}_w)$ ในอัลกอริทึมแบบค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด จะทำให้เกิดการรบกวนแบบเกรเดียนท์ขึ้น ซึ่งการประมาณค่าเกรเดียนท์ของ $\xi(\hat{\mathbf{g}}_w)$ นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของการรบกวนแบบเกรเดียนท์ได้ดังนี้

$$\hat{\mathbf{g}}_w = \mathbf{g}_w + \mathbf{N} \quad (2.67)$$

โดยที่ \mathbf{N} คือ การรบกวนแบบเกรเดียนท์

จากสมการที่ (2.12) สมการที่ (2.67) สามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$\hat{\mathbf{g}}_w = 2\mathbf{R}\mathbf{w} - 2\mathbf{p} + \mathbf{N} \quad (2.68)$$

จากสมการการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของอัลกอริทึมแบบค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \mu \hat{\mathbf{g}}_w(n) \quad (2.69)$$

แทนค่าสมการที่ (2.56) และ (2.69) ลงในสมการที่ (2.69) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - 2\mu\mathbf{R}\mathbf{w}(n) - 2\mu\mathbf{R}^{-1}\mathbf{w}_0 + \mu\mathbf{N}(n) \quad (2.70)$$

เปลี่ยนพิกัดจาก \mathbf{w} ไปเป็น \mathbf{v} โดยให้สมการที่ (2.18) จะได้

$$\mathbf{v}(n+1) = \mathbf{v}(n) - 2\mu\mathbf{R}\mathbf{v}(n) + \mu\mathbf{N}(n) \quad (2.71)$$

จากสมการที่ (2.19) สามารถเขียนสมการที่ (2.71) ได้ดังนี้

$$\mathbf{Q}\mathbf{v}'(n+1) = \mathbf{Q}\mathbf{v}'(n) - 2\mu\mathbf{R}\mathbf{Q}\mathbf{v}(n) + \mu\mathbf{N}(n) \quad (2.72)$$

นำ \mathbf{Q}^{-1} คูณทั้งสองข้างของสมการที่ (2.72)

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{v}'(n+1) &= \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{v}'(n) - 2\mu\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{R}\mathbf{Q}\mathbf{v}(n) + \mu\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{N}(n) \\ \mathbf{v}'(n+1) &= \mathbf{v}'(n) - 2\mu\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{R}\mathbf{Q}\mathbf{v}(n) + \mu\mathbf{N}'(n) \end{aligned} \quad (2.73)$$

จากสมการที่ (2.17) สามารถเขียนสมการที่ (2.73)

$$\begin{aligned} \mathbf{v}'(n+1) &= \mathbf{v}'(n) - 2\mu\mathbf{\Lambda}\mathbf{v}'(n) + \mu\mathbf{N}'(n) \\ &= [\mathbf{I} - 2\mu\mathbf{\Lambda}]\mathbf{v}'(n) + \mu\mathbf{N}'(n) \end{aligned} \quad (2.74)$$

เมื่อเข้าสู่สภาวะลู่เข้า $\mathbf{v}'(n+1) = \mathbf{v}'(n)$ ดังนั้นจะได้

$$\mathbf{v}'(n) = [\mathbf{I} - 2\mu\mathbf{\Lambda}]\mathbf{v}'(n) + \mu\mathbf{N}'(n) \quad (2.75)$$

ทำการหาค่า $\mathbf{v}'(n)\mathbf{v}'^T(n)$ จะได้

$$\begin{aligned} \mathbf{v}'(n)\mathbf{v}'^T &= [\mathbf{I} - 2\mu\mathbf{\Lambda}]\mathbf{v}'(n)\mathbf{v}'^T(n)[\mathbf{I} - 2\mu\mathbf{\Lambda}]^T + \mu^2\mathbf{N}'\mathbf{N}'^T(n) \\ &\quad - \mu\{[\mathbf{I} - 2\mu\mathbf{\Lambda}]\mathbf{v}'(n)\mathbf{N}'^T(n) + \mathbf{N}'(n)\mathbf{v}'^T(n)[\mathbf{I} - 2\mu\mathbf{\Lambda}]^T\} \end{aligned} \quad (2.76)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นหาค่า $E[v'(n)v'^T(n)]$ ซึ่งก็คือค่า $\text{cov}[v'(n)]$ ได้ดังนี้

$$\text{cov}[v'(n)] = (1 - 2\mu\Lambda)^2 \text{cov}[v'(n)] + \mu^2 \text{cov}[N'(n)] \quad (2.77)$$

จากสมการที่ (2.77) สามารถกระจายเทอม $[1 - 2\mu\Lambda]^2$ ได้ดังนี้

$$\text{cov}[v'(n)] = (1 - 4\mu\Lambda + 4\mu^2\Lambda^2) \text{cov}[v'(n)] + \mu^2 \text{cov}[N'(n)] \quad (2.78)$$

ทำการย้ายข้างรวมเทอมของ $\text{cov}[v'(n)]$ จะได้

$$\begin{aligned} 4\lambda[\Lambda - \mu\Lambda^2] \text{cov}[v'(n)] &= \mu^2 \text{cov}[N'(n)] \\ \text{cov}[v'(n)] &= \frac{\mu}{4} [\Lambda - \mu\Lambda^2]^{-1} \text{cov}[N'(n)] \end{aligned} \quad (2.79)$$

พิกสมการที่ (2.79) ไว้ก่อน ทำการหาค่า $\text{cov}[N'(n)]$ จากสมการที่ (2.46) แทนค่าลงในสมการที่ (2.68) จะได้

$$-2e(n)x(n) = g_w + N(n) \quad (2.80)$$

จากวิธีของวินเนอร์-ฮอฟท์จะให้ $g_w = 0$ ดังนั้น

$$N(n) = -2e(n)x(n) \quad (2.81)$$

จากสมการที่ (2.80) สามารถหาค่า $\text{cov}[N(n)]$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{cov}[N(n)] &= E[N(n)N^T(n)] \\ &= 4E[e^2(n)x(n)x^T(n)] \\ &= 4E[e^2(n)E(x(n)x^T(n))] \\ &= 4\xi_{\min R} \end{aligned} \quad (2.82)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการหาค่า $\text{cov}[N'(n)]$ โดยอาศัยการหมุนแกนในสมการที่ (2.19) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{cov}[N'(n)] &= \text{cov}[Q^{-1}N(n)] \\
 &= E[Q^{-1}N(n)(Q^{-1}N(n))^T] \\
 &= E[Q^{-1}N(n)N^T(n)Q] \\
 &= Q^{-1}E[N(n)N^T(n)]Q \\
 &= Q^{-1}\text{cov}[N(n)]Q
 \end{aligned} \tag{2.83}$$

แทนสมการที่ (2.82) ลงในสมการที่ (2.83) จะได้

$$\begin{aligned}
 \text{cov}[N'(n)] &= Q^{-1}4\xi_{\min}RQ \\
 &= 4\xi_{\min}Q^{-1}RQ \\
 &= 4\xi_{\min}\Lambda
 \end{aligned} \tag{2.84}$$

แทนสมการที่ (2.84) ลงในสมการที่ (2.79) จะได้

$$\begin{aligned}
 \text{cov}[v'(n)] &= \frac{\mu}{4}[\Lambda - \mu\Lambda^2]^{-1}4\xi_{\min}\Lambda \\
 &= 4\xi_{\min}[\Lambda - \mu\Lambda^2]^{-1}\Lambda
 \end{aligned} \tag{2.85}$$

เมื่อให้ค่า $\mu\Lambda$ มีค่าน้อยกว่า 1 เนื่องจากการเลือกค่า μ น้อย ๆ จึงสามารถละเทอมของ $\mu\Lambda^2$ ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned}
 \text{cov}[v'(n)] &\approx \mu\xi_{\min}\Lambda^{-1}\Lambda \\
 &\approx \mu\xi_{\min}I
 \end{aligned} \tag{2.86}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ (2.86) ลงในสมการที่ (2.67) จะได้

$$E[\xi_{\min}] = \text{tr}(\mathbf{R})\mu\xi_{\min} \quad (2.87)$$

ดังนั้นค่ามิสแอดจัสเมนต์ในสมการที่ (2.48) จะสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} M &= \frac{\text{tr}(\mathbf{R})\mu\xi_{\min}}{\xi_{\min}} \\ &= \text{tr}(\mathbf{R})\mu \end{aligned} \quad (2.88)$$

สำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะโดยใช้ค่ามิสแอดจัสเมนต์นั้น หากวงจรรองสัญญาณแบบปรับตัวได้วงจรรุ่น มีค่ามิสแอดจัสเมนต์น้อยกว่า ก็จะถือว่าวงจรรุ่นนั้นมีสมรรถนะมากกว่า

ข) ความเร็วในการลู่เข้า

โดยปกติแล้วความเร็วในการลู่เข้าจะพิจารณาจากจำนวนค่าตัวอย่างในการปรับตัวที่ทำให้เกิดค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด ซึ่งจะหาได้เมื่อทราบค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยสุดของระบบก่อน แต่ในการออกแบบระบบการปรับตัวนั้น บางครั้งไม่สามารถทราบได้ว่าสัญญาณขาเข้าของระบบเป็นอย่างไร ทำให้ไม่สามารถทราบค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยสุดได้ ดังนั้นจึงต้องทำการพิจารณาจากค่าคงที่ทางเวลาในการลดลงของค่าผิดพลาดกำลังสอง โดยแต่ละทอมที่ขึ้นอยู่กับจำนวนค่าตัวอย่างในการปรับตัวออก เมื่อหาค่าคงที่ทางเวลาในการลดลงของค่าผิดพลาดกำลังสองได้แล้ว จะสามารถนำไปหาจำนวนค่าตัวอย่างที่ใช้ในการลู่เข้าของระบบได้ ภายใต้เงื่อนไขของสภาวะลู่เข้า ดังนั้นในการหาจำนวนค่าตัวอย่าง จะเริ่มจากการพิจารณาค่าคงที่ทางเวลา โดยหาได้จาก

- ค่าคงที่ทางเวลา (Time Constant)

การพิจารณาค่าผิดพลาดกำลังสองที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบของการปรับค่าสัมประสิทธิ์นั้น จากสมการที่ (2.49) และ (2.64) จะได้

$$\xi(\mathbf{n}) = \xi_{\min} + \mathbf{v}^T(\mathbf{n})\mathbf{A}\mathbf{v}'(\mathbf{n}) \quad (2.89)$$

จากผลตอบสนองธรรมชาติของสมการผลต่างที่แสดงในสมการที่ (2.34)

$$\mathbf{v}'(\mathbf{n}) = (1 - 2\mu\lambda)^n \mathbf{v}'(\mathbf{0}) \quad (2.90)$$

แทนค่าสมการที่ (2.19) ลงในสมการที่ (2.34) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Q^{-1}v(n) = (1 - 2\mu\lambda)^n Q^{-1}v(0) \quad (2.91)$$

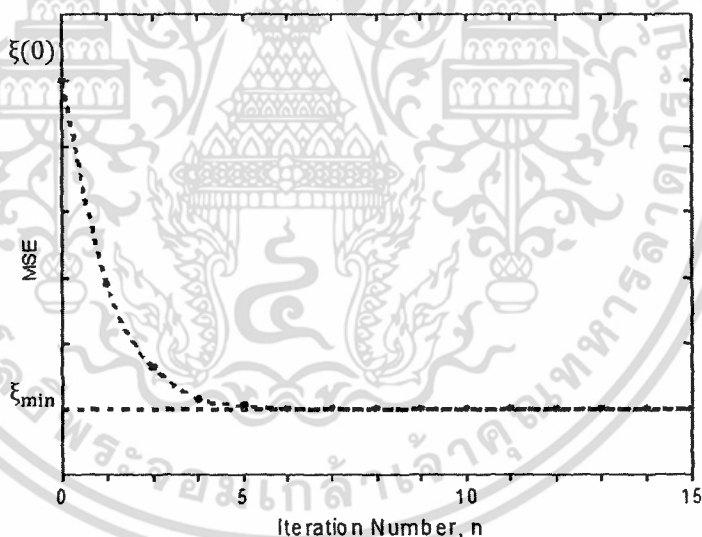
แทนสมการที่ (2.91) ลงในสมการที่ (2.89) จะได้

$$\begin{aligned} \xi(n) &= \xi_{\min} + (1 - 2\mu\lambda)^n v^T(0) [Q^T \Lambda Q] v(0) (1 - 2\mu\lambda)^n \\ &= \xi_{\min} + (1 - 2\mu\lambda)^{2n} v^T(0) R v(0) \end{aligned} \quad (2.92)$$

จากสมการที่ (2.62) สามารถเขียนสมการที่ (2.92) ได้ใหม่ดังนี้

$$\xi(n) = \xi_{\min} + (1 - 2\mu\lambda)^{2n} \xi_{\text{ex}}(0) \quad (2.93)$$

จากนั้นพิจารณาค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากการปรับค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละรอบ จะได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณ

จากรูปที่ 2.14 ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยมีการลดลงเป็นเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\xi(n) &= \xi_{\min} + [\xi(0) - \xi_{\min}] \exp\left(-\frac{n}{\tau}\right) \\ &= \xi_{\min} + \xi_{\text{ex}}(0) \exp\left(-\frac{n}{\tau}\right)\end{aligned}\quad (2.94)$$

โดยที่ τ คือ ค่าคงที่ทางเวลาของการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลในรูปที่ 2.14 เปรียบเทียบสมการที่ (2.93) กับ (2.94) จะได้

$$(1 - 2\mu\lambda)^{2n} = \left(\exp\left(-\frac{1}{\tau}\right)\right)^n \quad (2.95)$$

นำค่า $\frac{2}{2}$ คูณในเทอมของ τ แล้วทำการจัดให้อยู่ในรูปยกกำลัง $2n$ จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}(1 - 2\mu\lambda)^{2n} &= \left(\exp\left(-\frac{2}{2\tau}\right)\right)^n \\ (1 - 2\mu\lambda)^{2n} &= \left(\exp\left(-\frac{1}{2\tau}\right)\right)^{2n}\end{aligned}\quad (2.96)$$

จากสมการที่ (2.96) ทำให้ทราบว่า

$$\begin{aligned}(1 - 2\mu\lambda) &= \exp\left(-\frac{1}{2\tau}\right) \\ (1 - 2\mu\lambda) &\approx 1 - \frac{1}{2\tau}\end{aligned}\quad (2.97)$$

แก้สมการหาค่าคงที่ทางเวลาของการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล

$$2\tau \approx \frac{1}{2\mu\lambda}$$

$$\tau \approx \frac{1}{4\mu\lambda} \quad (2.98)$$

ค่าคงที่ทางเวลาในการลดลงของการปรับตัวจากการพิจารณาค่าผิดพลาดกำลังสองที่ได้จากสมการที่ (2.98) เมื่อทำการพิจารณาสมการที่ (2.94) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสู่เข้า $\xi(n) = \xi_{\min}$ จะได้

$$\xi_{\text{ex}}(0) \exp\left(-\frac{n}{\tau}\right) = 0 \quad (2.99)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเราทำการแทนค่า $n = 5\tau$ ลงในสมการที่ (2.99) แล้วจะได้

$$\xi_{\text{ex}}(0) \exp(-5) = 0.007\xi_{\text{ex}}(0) \approx 0 \quad (2.100)$$

จากสมการที่ (2.100) ในทางปฏิบัติถือว่าประมาณได้เท่ากับศูนย์ ดังนั้นสามารถหาจำนวนค่าตัวอย่างที่ใช้ในการลู่เข้าของระบบ เมื่อทราบค่าคงที่ทางเวลาในการลดลงของค่าผิดพลาดกำลังสองจากสมการที่ (2.98) ได้ดังนี้

$$n = 5\tau \approx \frac{5}{4\mu\lambda} \quad (2.101)$$

2.6.2 อัลกอริทึมดัดแปลงจากอัลกอริทึมแบบ LMS (Simplified LMS Algorithms)

อัลกอริทึมที่ดัดแปลงจากอัลกอริทึมแบบ LMS [10] มีดังต่อไปนี้

2.6.2.1 อัลกอริทึมแบบไซน์ (The Sign Algorithm)

วิธีการของไซน์อัลกอริทึมที่ใช้สำหรับปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองปรับตัวได้สามารถกำหนดได้ดังสมการ

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu \text{sign}(e(n))x(n) \quad (2.102)$$

เนื่องจากการแทนค่า $e(n)$ ด้วยค่าไซน์ของ $e(n)$ ทำให้ความซับซ้อนในการคำนวณของตัวกรองลดต่ำกว่าตัวกรองปรับตัวโดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานที่ความเร็วสูงการใช้ฮาร์ดแวร์ของการวนซ้ำของตัวกรองปรับตัวจะลดลง

2.6.2.2 อัลกอริทึมแบบไซน์รีเกรสเซอร์ (The Signed - Regressor (SR) Algorithm)

อัลกอริทึมแบบไซน์รีเกรสเซอร์ ได้จากการแทนที่ $x(n)$ คือค่าเวกเตอร์เทปอินพุต (Tap-input vector) ด้วยค่าเวกเตอร์ $\text{sign}(x(n))$ จะได้อัลกอริทึมแบบ SR ดังสมการ

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu e(n)\text{sign}(x(n)) \quad (2.103)$$

ถ้าหากเทียบสมการที่ (2.102) กับสมการที่ (2.103) ถึงแม้ว่าสมการที่ได้จะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่ตัวกรองด้วยการใช้อัลกอริทึมแบบไซน์รีเกรสเซอร์นี้ มีประสิทธิภาพในการปรับตัวดีกว่าตัวกรองที่ปรับตัวด้วยค่าอัลกอริทึมแบบไซน์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้อัลกอริทึมนี้

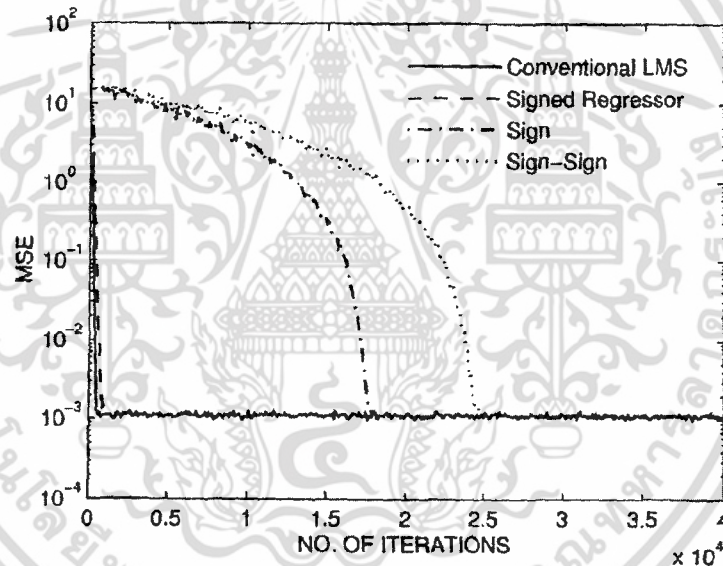
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2.3 อัลกอริทึมแบบไซน์ - ไซน์ (The Sign - Sign (SS) Algorithm)

อัลกอริทึมแบบไซน์ - ไซน์ คือการรวมอัลกอริทึมแบบไซน์ และอัลกอริทึมแบบไซน์ และอัลกอริทึมแบบไซน์รีเกรสเซอร์ จะได้สมการอัลกอริทึมใหม่ดังนี้

$$w(n + 1) = w(n) + 2\mu \text{sign}(e(n))\text{sign}(x(n)) \quad (2.104)$$

จากรูปที่ 2.15 แสดงอัตราการลู่เข้าของอัลกอริทึม เมื่อให้ตัวกรองมีค่าเท่ากับ $H(z) = H_1(z)$ และให้ค่าพารามิเตอร์สตีปไซด์แตกต่างกัน มีค่าลู่เข้าสู่ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (MSE) ผลที่ได้จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพของตัวกรองปรับตัวได้ที่ใช้อัลกอริทึมแบบ SR มีค่าการลู่เข้าแยกว่า ตัวกรองปรับตัวได้ที่ใช้อัลกอริทึมแบบ LMS เล็กน้อย และ ตัวกรองปรับตัวได้ที่ใช้อัลกอริทึมแบบไซน์ และแบบไซน์-ไซน์ จะมีค่าลู่เข้าช้ากว่าตัวกรองปรับตัวได้โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS



รูปที่ 2.15 อัตราการลู่เข้าของอัลกอริทึมแบบ LMS, Signed, Signed Regressor, Sign-Sign

2.6.3 การวัดประสิทธิภาพของระบบปรับตัว

ในระบบปรับตัวทุกระบบมีความจำเป็นที่จะต้องทำการวัดประสิทธิภาพ โดยการเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมต่าง ๆ ซึ่งนอกจากต้องทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของตัวกรองแล้วยังต้องทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม เพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้อัลกอริทึมที่ให้การตอบสนองที่ดี การวัดประสิทธิภาพของอัลกอริทึมมีหลายวิธีดังจะกล่าวต่อไปนี้

2.6.3.1 ความเร็วในการลู่เข้า (Convergence Rate)

อัตราในการลู่เข้าของระบบปรับตัวเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมาก ซึ่งจะต้องทำการวัดเพื่อให้ได้ตามความต้องการของงานที่จะนำไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความเร็วในการลู่เข้านั้นสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมได้ อย่างไรก็ตามการเลือกใช้อัลกอริทึมไม่จำเป็นต้องใช้อัลกอริทึมที่มีความเร็วสูงสุดเนื่องจากการเพิ่มความเร็ว ราคาในการสร้างและความซับซ้อนของวงจรก็จะสูงขึ้น

2.6.3.2 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square Error)

จะวัดในลักษณะของค่าความผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุด (Minimum Mean Square Error: MMSE) ซึ่งใช้ในการวัดความสามารถในการทำงานของระบบในการลดสัญญาณรบกวน (Elimination Noise) ทำนายสัญญาณ (Signal Prediction) หรือแยกแยะระบบ (System Identifying) แล้วแต่ว่าจะเป็นระบบอะไร โดยทั่วไปแล้วค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น โครงสร้างของตัวกรอง ความไวของสัมประสิทธิ์ ตลอดจนสัญญาณรบกวนทั่วไป

2.6.3.3 ความถูกต้องในการประมาณค่าตัวแปร (Parameter Estimation Accuracy)

ความถูกต้องในการประมาณค่าตัวแปรเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากเมื่อมีการนำระบบปรับตัวไปใช้ในการหาคุณลักษณะของระบบที่ไม่สามารถระบุค่าได้ (System Identifying) ซึ่งความถูกต้องในการประมาณค่าตัวแปรมีมาก จะทำให้ได้แบบจำลองของระบบต้องการใกล้เคียงความจริงมากขึ้น

2.6.3.4 ความซับซ้อนในการประมวลผล (Computation Complexity)

ความซับซ้อนในการประมวลผลมีความสำคัญมากในการนำระบบปรับตัวไปใช้งานจริงโดยทั่วไปต้องการความซับซ้อนในการประมวลผลที่ต่ำ ทำให้การสร้างมีราคาถูก

2.7 รหัสคอนโวลูชัน

การเข้ารหัสคอนโวลูชัน (Convolution Code) มีโครงสร้างทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.16 พารามิเตอร์ที่บ่งถึงคุณลักษณะของวงจรประกอบด้วย 3 ค่าได้แก่ n , k และ K โดย

K คือ จำนวนชุดของสัญลักษณ์ข้อมูลที่ใช้ในการเข้ารหัสแต่ละรอบ (Constraint Length)

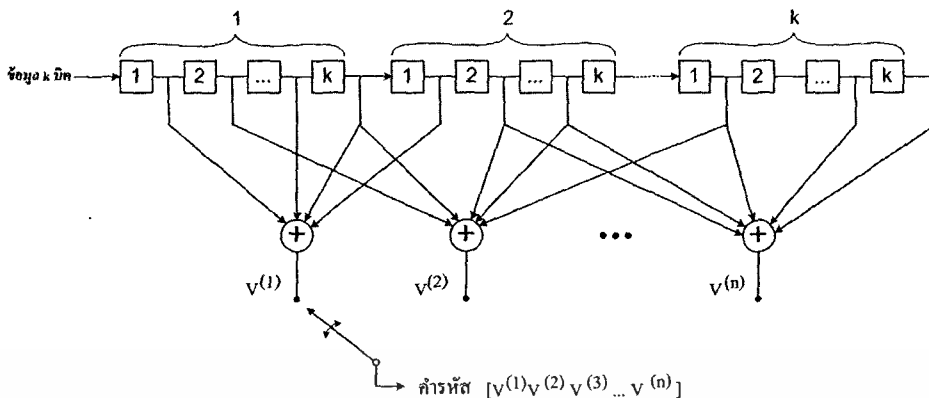
k คือ จำนวนของบิตต่อหนึ่งสัญลักษณ์ เช่น ถ้าข้อมูลเข้าเป็นไบนารี ค่า $k=1$ และถ้าหากข้อมูล เข้าเป็น 4-array ค่า $k=2$

Kk คือ จำนวนชิฟต์รีจิสเตอร์ที่ต้องใช้

n คือ จำนวนบิตที่ได้จากการเข้ารหัสและออกมาที่ขาออกของวงจรเข้ารหัส

k/n คือ อัตราการเข้ารหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



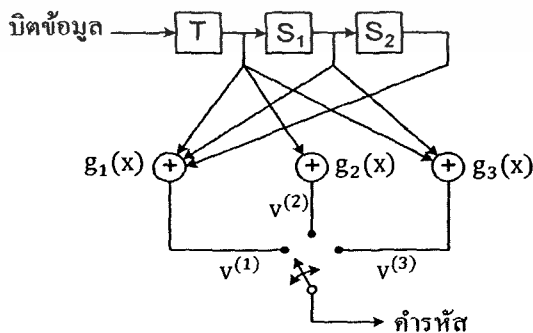
รูปที่ 2.16 โครงสร้างวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน

การทำงานของวงจรเข้ารหัสเป็นดังนี้คือ ในการเข้ารหัสแต่ละครั้งจะต้องป้อนข้อมูลเข้าสู่วงจรจำนวน k บิต โดยอาศัยการเลื่อนบิตข้อมูลเข้าสู่ชิพตรีจิสเตอร์ เป็นจำนวน k ครั้งนั่นเอง จากนั้นจึงอ่านค่าของคำรหัสที่ได้ทางด้านออกของวงจร โดยจะอ่านค่า $v^{(1)}, v^{(2)}, v^{(3)}, \dots, v^{(n)}$ ทีละบิตไปจนกระทั่งครบทั้ง n บิต ด้วยเหตุนี้ จึงได้ชุดรหัสที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ k/n สำหรับพารามิเตอร์ K คือ จำนวนสัญลักษณ์ที่ใช้ในการเข้ารหัสแต่ละครั้ง โดยค่านี้ต้องสร้างความสัมพันธ์ระหว่างบิตข้อมูลที่ต่อเนื่องกันด้วยช่วงกว้างมากน้อยเพียงใด ด้วยเหตุนี้จึงเรียกพารามิเตอร์ K ว่าเป็นค่าจำนวนชุดของสัญลักษณ์ข้อมูลที่ใช้ในการเข้ารหัสแต่ละรอบ ค่านี้อาจพิจารณาเป็นจำนวนบิตก็ได้ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ kK บิต ดังนั้นในกรณีเฉพาะที่ใช้ $k=1$ จำนวนชิพตรีจิสเตอร์ทั้งหมดที่ต้องใช้มีทั้งหมด K ตัว และอัตราการเข้ารหัสจะมีค่าเท่ากับ $1/n$

สำหรับค่าของคำรหัสที่ได้แต่ละบิตขึ้นอยู่กับว่า จะนำบิตใดบ้างในจำนวน kK บิต มาใช้ประกอบในการคำนวณผลบวกแบบมอดูโล 2 โดยทั่วไปเราจะแสดงโครงสร้างในส่วนนี้ในรูปของพหุนามตัวกำเนิด (Generator Polynomial)

2.7.1 ตัวอย่างการเข้ารหัสคอนโวลูชัน

ชิพตรีจิสเตอร์ 3 ชุด ($K=3, k=1$)



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับข้าราชการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยนาให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

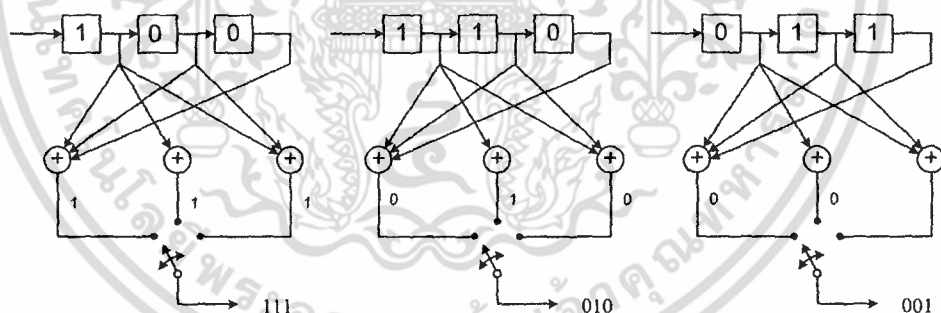
ในการทำความเข้าใจกับกลไกการทำงานของวิธีการเข้ารหัสคอนโวลูชัน จะอาศัยวงจรเข้ารหัสที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $1/3$, $K=3$ และ $k=1$ ในรูปที่ 2.17 เป็นตัวอย่างในการอธิบายจากวงจรในรูปจะเห็นว่า $k=1$ ดังนั้นจำนวนบิตที่จะเลื่อนเข้าสำหรับการเข้ารหัสแต่ละครั้งมีค่าเพียง 1 บิต ค่า $K=3$ และ $k=1$ หมายความว่าต้องใช้ชิพตรีจิสเตอร์จำนวน 3 ชุด และในรูปประกอบด้วยวงจรพหุนามตัวกำเนิด 3 ชุดคือ $g_1(x)$, $g_2(x)$ และ $g_3(x)$ โดยที่

$$g_1(x) = 1 + x + x^2$$

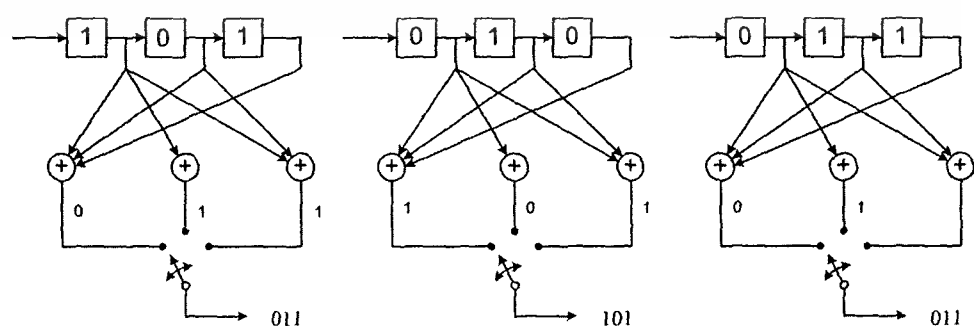
$$g_2(x) = 1$$

$$g_3(x) = 1 + x$$

การเข้ารหัสข้อมูลแต่ละบิตจะให้เป็นการรหัสที่มีจำนวนมากถึง 3 บิตได้แก่ $v^{(1)}, v^{(2)}, v^{(3)}$ ค่าเหล่านี้คือค่าที่ได้จากขาออกของวงจรพหุนามของ $g_1(x)$, $g_2(x)$ และ $g_3(x)$ นั่นเอง โดยกระบวนการอ่านค่าเหล่านี้จะวนสลับกันไป ยกตัวอย่างเช่น ถ้าข้อมูลหกบิตแรกที่ป้อนเข้าสู่วงจรเข้ารหัสมีค่าเป็น 110101 คำรหัสที่ได้จากวงจรเข้ารหัสจะมีค่าเท่ากับ 111 010 001 011 101 101 011 101 100 สำหรับรายละเอียดการเข้ารหัสอย่างเป็นขั้นตอนของทั้ง หกบิต สามารถดูได้จากรูปที่ 2.18 สังเกตได้ว่า ทุกครั้งที่ถึงสิ้นสุดการเข้ารหัสบิตข้อมูล ทั้งนี้ก็เพื่อปรับให้ชิพตรีจิสเตอร์กลับคืนสู่สถานะเดียวกับตอนเริ่มต้นซึ่งมีค่าเป็น 0 ทั้งหมด

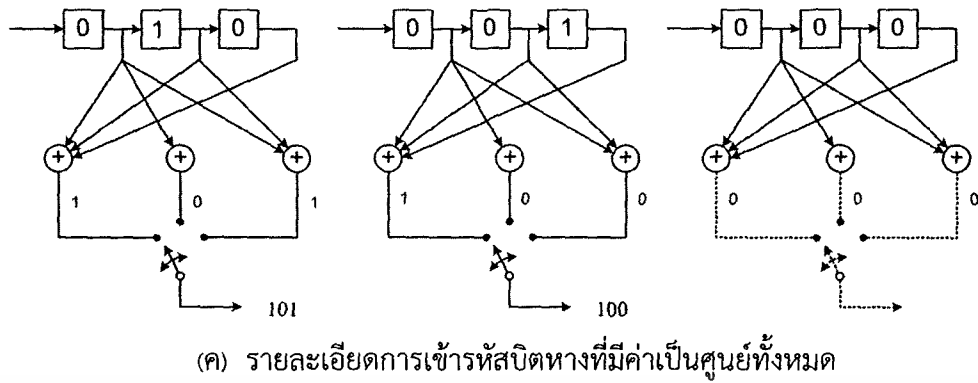


(ก) รายละเอียดการเข้ารหัสสามบิตแรก



(ข) รายละเอียดการเข้ารหัสสามบิตที่เหลือ

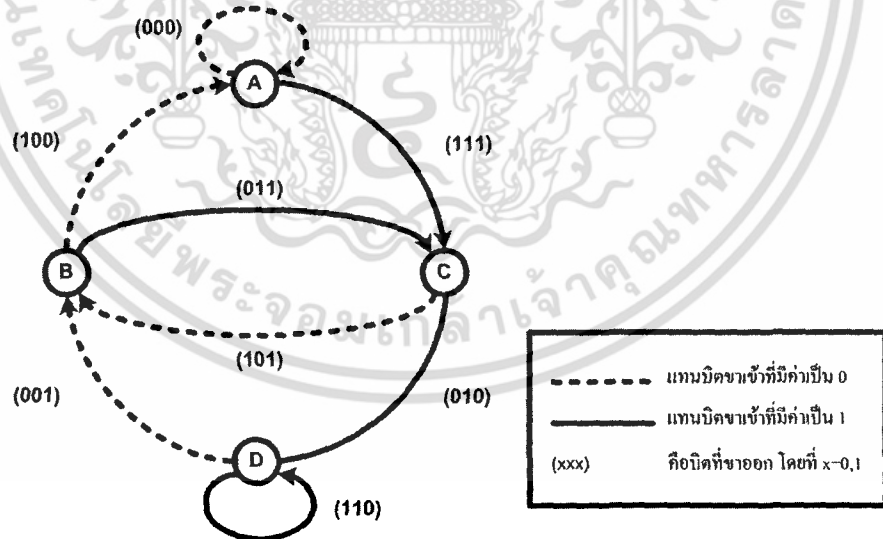
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างขั้นตอนการเข้ารหัสของข้อมูล 110101 โดยใช้วงจรเข้ารหัสในรูปที่ 2.17

2.7.2 แผนภาพการเปลี่ยนสถานะ

ในการพิจารณาและเข้าใจถึงคุณลักษณะของวงจรเข้ารหัส สามารถใช้แผนภาพแสดงการเปลี่ยนสถานะ (State Transition Diagram) ช่วยในการอธิบายได้ดังแสดงในรูปที่ 2.19 โดยกำหนดให้สถานะหมายถึงค่าของชิฟต์รีจิสเตอร์ s_1 และ s_2 นั้นเอง ดังนั้นจึงมีสถานะที่ได้ทั้งสิ้น 4 สถานะ ดูรายละเอียดการกำหนดสถานะได้ในตารางที่ 2.5 การเปลี่ยนสถานะของวงจรเข้ารหัสขึ้นอยู่กับบิตข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่วงจร เส้นประ หมายถึงว่า ข้อมูลบิตที่เข้ามามีค่าเป็น 0 และเส้นทึบหมายถึงว่าข้อมูลบิตที่เข้ามาเป็น 1 ส่วนค่าในวงเล็บคือค่ารหัสที่ได้จากการเข้ารหัส



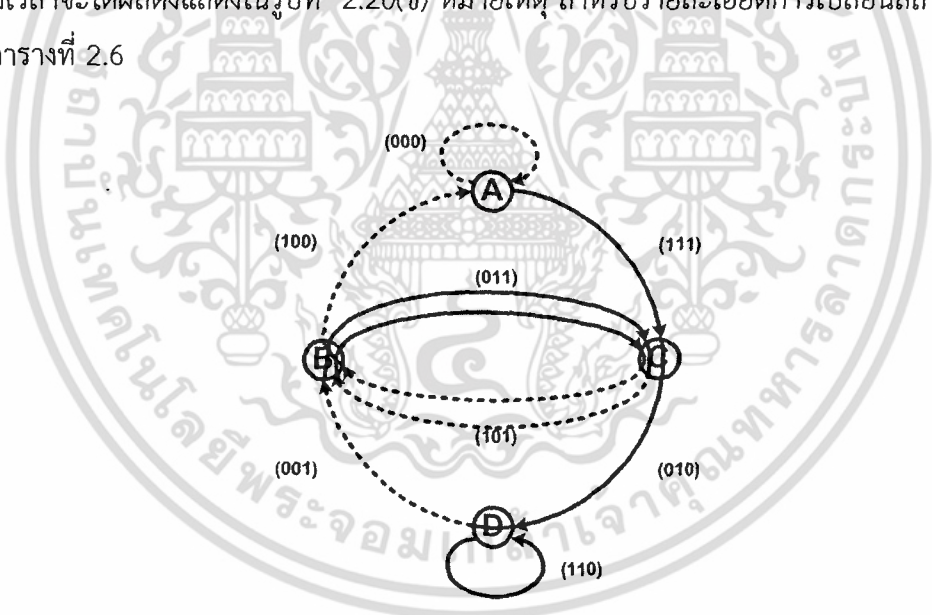
รูปที่ 2.19 แผนภาพการเปลี่ยนสถานะของวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชันตามโครงสร้างในรูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

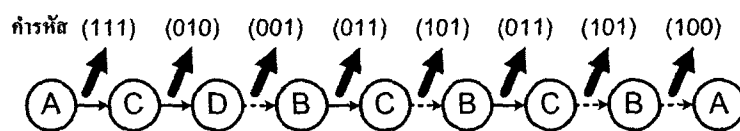
ตารางที่ 2.1 การกำหนดค่าสำหรับค่าสำหรับแต่ละสถานะ

สถานะ	S_1	S_2
A	0	0
B	0	1
C	1	0
D	1	1

ยกตัวอย่างเช่น ในช่วงเริ่มต้นของการเข้ารหัสตามตัวอย่างในรูปที่ 2.20(ก) วงจรเข้ารหัสอยู่ในสถานะ A ($S_1 = 0$ และ $S_2 = 0$) เมื่อได้รับการป้อนข้อมูลบิตแรกที่มีค่าเท่ากับ 1 เข้าสู่วงจร ส่งผลให้วงจรเปลี่ยนสถานะจาก A ไปเป็น C ($S_1 = 1$ และ $S_2 = 0$) ซึ่งทั้งรูปที่ 2.18(ก) และ 2.20(ก) ประกอบ เมื่อได้ป้อนข้อมูลบิตที่สองที่มีค่าเป็น 1 เข้าไปในวงจร ผลที่เกิดขึ้นคือวงจรเปลี่ยนจากสถานะ C ไปสู่สถานะ D ($S_1 = 1$ และ $S_2 = 1$) บิตที่สามที่ป้อนเข้าวงจรมีค่าเป็น 0 ระบบจึงเปลี่ยนจากสถานะ D เข้าไปสู่สถานะ B ($S_1 = 0$ และ $S_2 = 1$) หากนำลำดับการเปลี่ยนสถานะมาเรียงลำดับตามเวลาจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.20(ข) หมายเหตุ สำหรับรายละเอียดการเปลี่ยนสถานะได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.6



(ก) ตัวอย่างเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นแสดงในรูปของของแผนภาพการเปลี่ยนสถานะ



(ข) การเปลี่ยนสถานะที่เกิดขึ้นและค่ารหัสที่ได้

รูปที่ 2.20 ตัวอย่างการเปลี่ยนสถานะของวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชันตามตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดการเปลี่ยนสถานะ

เดิม			Input	ใหม่				Output
สถานะ	S ₁	S ₂		T	S ₁	S ₂	สถานะ	
A	0	0	0	0	0	0	A	000
	0	0	1	1	0	0	C	111
B	0	1	0	0	0	1	A	100
	0	1	1	1	0	1	C	011
C	1	0	0	0	1	0	B	101
	1	0	1	1	1	0	D	010
D	1	1	0	0	1	1	B	001
	1	1	1	1	1	1	D	110

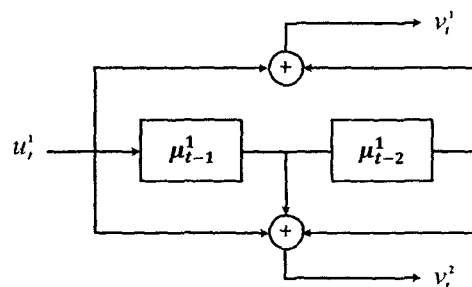
2.8 การถอดรหัสแบบแมป (MAP Decoding Principles)

ตัวแปร n , k , m ในรหัสคอนโวลูชัน สามารถทำได้โดยการป้อนอินพุต k เข้าไป แล้วได้ผลลัพธ์เอาต์พุต n ($n > k$) ซึ่งเป็นวงจรอนุกรมเชิงเส้นกับหน่วยความจำรหัสอินพุต m ในการสร้างสัญญาณ โดยรหัสคอนโวลูชัน สามารถอธิบายได้ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณโพลีโนเมียล ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเข้ารหัส (Code Rate) และหน่วยความจำรหัส m โดยที่อัตรารหัส $R = \frac{k}{n}$ รูปที่ 2.22 แสดงถึง ตัวอย่างของ รหัสโบนารี (2, 1, 2) กับเครื่องกำเนิดสัญญาณโพลีโนเมียล ($5_8, 7_8$) สมการของตัวเข้ารหัส สามารถเขียนได้เป็น

$$v^1 = u \cdot g^1 \quad (2.105)$$

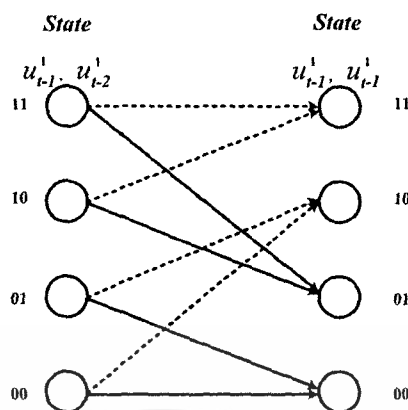
$$v^2 = u \cdot g^2 \quad (2.106)$$

ซึ่ง * แสดงถึงการ คอนโวลูชัน และการทำงานทั้งหมด คือมอดูโล 2



รูปที่ 2.21 ตัวเข้ารหัส สำหรับรหัสโบนารี (2, 1, 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 สถานะในเทรลลิสไดอะแกรมสำหรับรหัสคอนโวลูชันไบนารี (2, 1, 2)

วิธีที่สะดวกและง่ายสำหรับการอธิบาย ขั้นตอนการเข้ารหัส และถอดรหัส คือการใช้แผนภาพเทรลลิส สถานะของเทรลลิสสำหรับอินพุตที่เวลา t สำหรับรหัสไบนารี (2, 1, 2) แสดงในรูปที่ 2.22 แผนภาพเทรลลิสนี้ ประกอบด้วยสถานะ N สถานะซึ่ง N คือจำนวนของอินพุต N แต่ละตัวจะประกอบไปด้วยบิตข้อมูลอินพุต k สถานะของวงจรเข้ารหัสคือกลุ่มของชิพตรีจิสเตอร์ของตัวเอง วงจรเข้ารหัสที่มีหน่วยความจำทั้งหมด K จะมีจำนวนของสถานะเท่ากับ 2^k ในแต่ละบล็อกของอินพุต k จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปสู่สถานะใหม่ขึ้นทุก ๆ บล็อก ด้วยเหตุนี้ แต่ละสถานะจึงแยกออกมาได้ 2^k สถานะในแต่ละเส้น เส้นทางนั้นหมายถึงอินพุตที่ k ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะที่เวลา t ซึ่งแทนด้วย $\mathbf{u}_1 = [u_{t,1}, u_{t,2}, \dots, u_{t,k}]$ และ เอาต์พุต n แทนด้วย $\mathbf{v}_1 = [v_{t,0}, \dots, v_{t,n-1}]$

กำหนดให้ \mathbf{r} เป็นข้อมูลที่ได้รับ เงื่อนไขของความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดของวงจรถอดรหัสเขียนได้ว่า

$$P(E|\mathbf{r}) = P(\hat{\mathbf{u}} \neq \mathbf{u}) = P(\hat{\mathbf{v}} \neq \mathbf{v}) \quad (2.107)$$

ความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดของตัววงจรถอดรหัสคือ

$$P(E) = \sum_{\mathbf{r}} P(E|\mathbf{r})P(\mathbf{r}) \quad (2.108)$$

ในเทอร์มของ $P(\mathbf{r})$ จะเป็นตัวแปรอิสระจากอัลกอริทึมของการถอดรหัส ดังนั้น ค่าความน่าจะเป็นที่น้อยที่สุดในการเกิดความผิดพลาดในสมการที่ 2.108 สามารถทำได้โดยการลดค่าของ $P(E|\mathbf{r}) = P(\hat{\mathbf{v}} \neq \mathbf{v}|\mathbf{r})$ สำหรับทุก \mathbf{r} ซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่าที่สูงที่สุดของ $P(\hat{\mathbf{v}} \neq \mathbf{v}|\mathbf{r})$ ซึ่งค่าที่สูงที่สุดนี้หาได้จาก

$$P(\hat{\mathbf{v}} \neq \mathbf{v}|\mathbf{r}) = \frac{P(\mathbf{r}|\mathbf{v})P(\mathbf{v})}{P(\mathbf{r})} \quad (2.109)$$

ถ้าลำดับของการเข้ารหัสเท่ากันหมด จะได้รับการถอดรหัสที่มีค่าเหมาะสมที่สุด สำหรับช่องสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องสามารถหาได้จาก

$$P(\mathbf{r}|\mathbf{v}) = \prod_i P(r_i|v_i) \quad (2.110)$$

สามารถแก้ไขสมการที่ (2.110) ให้ซับซ้อนน้อยลง ด้วยการหาค่าที่มากที่สุดของสมการนี้ โดยการใช้ฟังก์ชัน $\log x$ โดยที่ $\log x$ เป็นฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยสมการ 2.110 สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\log P(\mathbf{r}|\mathbf{v}) = \sum_i \log P(r_i|v_i) \quad (2.111)$$

ฟังก์ชัน $\log P(\mathbf{r}|\mathbf{v})$ เป็นที่รู้จักในชื่อของฟังก์ชัน \log - likelihood

2.8.1 อัลกอริทึมการถอดรหัสแบบแมป (Maximum a Probability: MAP)

อัลกอริทึมของแมป ถูกใช้ในการถอดรหัส เพื่อให้ได้ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดที่น้อยที่สุด และยังสามารถนำไปใช้งานจริงโดยใช้อัลกอริทึมการรีเคอร์ชัน ทั้งแบบไปทางด้านหน้าและด้านหลัง (Forward and Backward Recursion) แมปทำงานบนพื้นฐานของการแสดงรหัสในรูปแบบเทรลลิส จากรูปที่ 2.22 อัลกอริทึมถอดรหัสนี้สำคัญมาก สำหรับอัลกอริทึมการถอดรหัสแบบวนซ้ำ

วงจรถอดรหัสซอฟต์แวร์เอาต์พุตแมป (Soft-Output MAP Decoder) คำนวณอัตราส่วนความน่าจะเป็นจริงเบื้องหลังแบบลอการิทึม (Posteriori log - likelihood) ของบิตข้อมูล u_i ดังนี้

$$\Lambda(u_i) = \log \frac{P(u_i=1|\mathbf{r})}{P(u_i=0|\mathbf{r})} \quad (2.112)$$

ซึ่ง $P\{u_i = i|\mathbf{r}\}$, $i = 0, 1$ คือความน่าจะเป็นเบื้องหลัง (A Posteriori Probability: APP) ของบิตข้อมูล u_i วงจรถอดรหัสทำการตัดสินใจแบบฮาร์ดโดยการเปรียบเทียบ $\Lambda(u_i)$ กับ 0

$$\Lambda(u_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } \Lambda(u_i) > 0 \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2.113)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APP ในสมการที่ 2.112 สามารถที่จะคำนวณได้จากแผนภาพทรานซิส

$$P\{u_t = 1|r\} = \sum_{m', m \in B_t^1} \{S_{t-1} = m', S_t = m|r\} \quad (2.114)$$

S_{t-1} กับ S_t เป็นสถานะของวงจรทรานซิสที่เวลา $t-1$ กับ t ตามลำดับ และ B_t^0 กับ B_t^1 เป็นชุดของการเปลี่ยนแปลงของสถานะจากสถานะ m' ถึง m ซึ่งเนื่องจาก $u_t = 0$ กับ $u_t = 1$ ตามลำดับ ซึ่งสมการที่ 2.113 และ 2.114 สามารถเขียนได้เป็น

$$P\{u_t = 0|r\} = \sum_{m', m \in B_t^0} \{S_{t-1} = m', S_t = m|r\} \quad (2.115)$$

$$P\{u_t = 1|r\} = \sum_{m', m \in B_t^1} \{S_{t-1} = m', S_t = m|r\} \quad (2.116)$$

$P(r)$ เป็นค่าคงที่ซึ่งไม่มีผลต่อการเกิดค่าสูงสุด เพราะมันจะถูกละทิ้งครั้งต่อไป ในการคำนวณค่า APP ของบิตข้อมูลให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ฟังก์ชันของความน่าจะเป็นต่อไปนี้จะถูกกำหนดขึ้น

$$\alpha_1(m) = P\{S_t = m, r_t\} \quad (2.117)$$

$$\beta_1(m) = P\{r_{t+1}^N | S_t = m\} \quad (2.118)$$

$$\gamma_i^1(m', m) = P\{u_t = i, S_t = m, r_t | S_{t-1} = m'\} \quad (2.119)$$

โดยที่

$$r_t = (r_{t,0}, \dots, r_{t,i}, \dots, r_{t,n-1}) \quad (2.120)$$

$$r_t^k = (r_{t,k}, r_{t+1,k}, \dots, r_{k,k}) \quad (2.121)$$

ความน่าจะเป็นร่วมของการเปลี่ยนแปลง (The Joint Transition Probability) $P\{S_{t-1} = m', S_t = m, r\}$ สามารถเขียนได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (2.122)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P\{S_{t-1} = m', S_1 = m, r\} = \alpha_{t-1}(m) \sum_{i \in 0,1} \gamma_t^i(m', m) \beta_t(m)$$

โดยที่ $\alpha_t(m)$ และ $\beta_t(m)$

$$\alpha_t(m) = \sum_{m'} \alpha_{t-1}(m') \sum_{i \in 0,1} \gamma_t^i(m', m) \quad (2.123)$$

$$\beta_t(m) = \sum_{m'} \beta_{t-1}(m') \sum_{i \in 0,1} \gamma_t^i(m', m) \quad (2.124)$$

และ $\gamma_t^i(m', m)$ คือความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณ (Channel Transition Probability) ให้ค่านำหน้าจากค่าความน่าจะเป็นของบิตข้อมูล ความน่าจะเป็นเบื้องหลัง $P(u_t = i)$, $i = 0, 1$ โดยที่ u_t คือ สัญลักษณ์ของข้อมูล ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลง $S_{t-1} = m' \rightarrow S_1 = m$ สัมประสิทธิ์ $\gamma_t^i(m', m)$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\gamma_t^i(m', m) = P(u_t = i) \prod_{j=0}^{j=n-1} P\{r_{t,j} | x_{t,j}\} \quad (2.125)$$

$$P\{r_{t,j} | x_{t,j}\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(r_{t,j} - x_{t,j})^2}{2\sigma^2}} \quad (2.126)$$

โดยที่ $x_{t,j} = 0, \dots, n-1$ คือ สัญลักษณ์ที่มอดูเลตแบบ BPSK ในคำรหัสสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลง $S_{t-1} = m' \rightarrow S_1 = m$

ถ้าสมมุติว่าวงจรถอดรหัสเริ่มต้นและจบการทำงานที่สถานะที่ 0 เงื่อนไขของขอบเขตจะเป็น

$$\alpha_0(0) = 1, \alpha_0(m) = 0, \text{ for } m \neq 0 \quad (2.127)$$

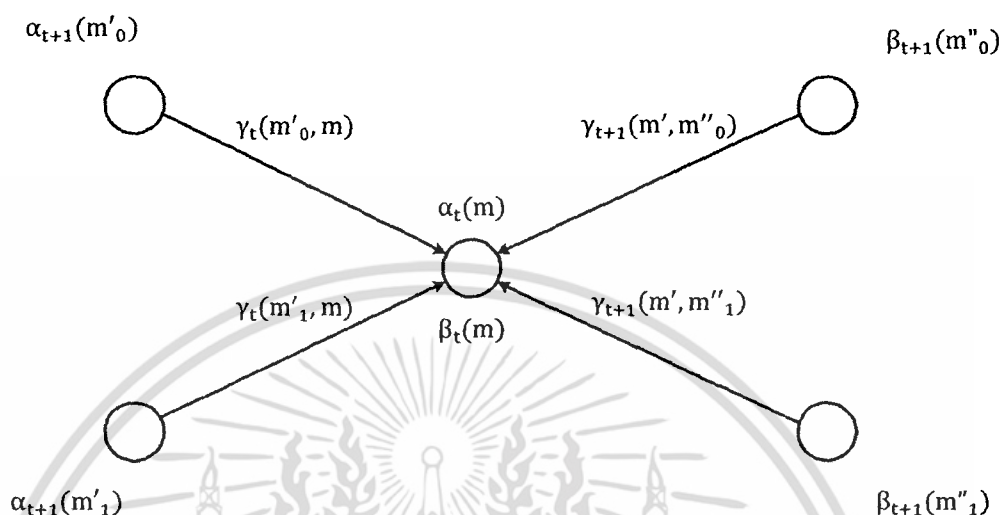
$$\beta_N(0) = 1, \beta_N(m) = 0, \text{ for } m \neq 0 \quad (2.128)$$

อัตราส่วนความน่าจะเป็นจริงแบบลอการิทึมสามารถเขียนได้เป็น

$$\Lambda(u_t) = \log \frac{\sum_{(m',m) \in \beta^1} \alpha_{t-1}(m') \gamma_t^1(m', m) \beta_t(m)}{\sum_{(m',m) \in \beta^0} \alpha_{t-1}(m') \gamma_t^0(m', m) \beta_t(m)} \quad (2.129)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติอัลกอริทึมที่ได้กล่าวถึงมานั้นจะหมายถึง อัลกอริทึมการเรียกตัวเองทั้งแบบไปทางด้านหน้าและด้านหลัง ถึงสัมประสิทธิ์ $\alpha_t(m)$ ถูกคำนวณอย่างวนซ้ำ ตั้งแต่จุดเริ่มต้นของเทรลลิสและสัมประสิทธิ์ $\beta_t(m)$ ถูกคำนวณอย่างวนซ้ำเริ่มที่ตอนท้ายของเทรลลิส



รูปที่ 2.23 ภาพแสดงรีเคอร์ชันทั้งแบบไปทางด้านหน้าและด้านหลัง

ในรูปที่ 2.23 แสดงการนำเสนอในรูปแบบของรูปภาพรีเคอร์ชันทั้งแบบไปทางด้านหน้าและด้านหลังจากภาพ $\alpha_{t-1}(m'_i)$ แสดงสัมประสิทธิ์ α สำหรับสถานะ (m'_i) ในสถานะที่ $(t-1)th$ ซึ่งเชื่อมต่อกับสถานะ m ในสถานะเทรลลิสที่ $t-th$ และมีการเปลี่ยนแปลงจาก $S_{t-1} = m' \rightarrow S_t = m$ โดยมีสาเหตุจากบิตข้อมูล $u_t = i, i = 0, 1$ ในทำนองเดียวกัน $\beta_{t+1}(m'')$ (β เป็นสัมประสิทธิ์สำหรับสถานะ m'') ในสถานะเทรลลิสที่ $(t-1)th$ จะเชื่อมต่อกับสถานะ m ในสถานะเทรลลิสที่ $t-th$ และมีการเปลี่ยนแปลง $S_{t-1} = m' \rightarrow S_t = m$ ซึ่งมีสาเหตุมาจาก บิตข้อมูล $u_t = i, i = 0, 1$

ค่าความน่าจะเป็นของ Posteriori สามารถที่จะคำนวณได้จาก

$$P\{u_t = 1 | \mathbf{r}\} = \frac{e^{\Lambda u_t}}{1 + e^{\Lambda u_t}} \quad (2.130)$$

$$P\{u_t = 0 | \mathbf{r}\} = \frac{1}{1 + e^{\Lambda u_t}} \quad (2.131)$$

ค่าความน่าจะเป็นเบื้องหลังของบิตข้อมูลที่ถูกส่งสามารถคำนวณโดยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นของคำรหัสซึ่งประกอบด้วยบิตที่ถูกส่งอย่างเฉพาะเจาะจงนั้นคือ

$$P\{x_{i,j} = 1 | \mathbf{r}\} = \sum_{u_t = i, x_{i,j} = 1} P\{u_t = i | \mathbf{r}\} \quad (2.132)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P\{x_{i,j} = -1|r\} = \sum_{u_t=i, x_{i,j}=1} P\{u_t = i|r\} \quad (2.133)$$

2.9 ปัญหาของการจางหายเนื่องจากหลายเส้นทาง

การใช้งานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้ใช้ มักจะอยู่สูงจากพื้นผิวประมาณไม่เกิน 3 เมตร ดังนั้นคลื่นสัญญาณที่ส่งผ่านจะเกิดการสะท้อนกับพื้นผิวหรือสิ่งต่าง ๆ รอบข้างอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งการสะท้อนของคลื่นเหล่านี้ส่งผลให้สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับประกอบด้วยสัญญาณที่แพร่มา มากกว่าหนึ่งทิศทาง และโดยทั่วไปแล้วสัญญาณเหล่านี้ มักเดินทางมาถึงภาครับด้วยเวลาที่แตกต่างกัน และมีขนาดที่แตกต่างกันด้วย เมื่อสัญญาณเหล่านี้มักจะเดินทางมาถึงภาครับด้วยเวลาที่แตกต่างกัน และมีขนาดที่แตกต่างกันด้วย เมื่อสัญญาณเหล่านี้มารวมเข้าด้วยกัน จะได้สัญญาณที่มีแอมพลิจูดแปรเปลี่ยนได้อย่างมาก ปัญหานี้มีชื่อเรียกว่า การจางหายเนื่องจากหลายเส้นทาง (Multipath Fading)

ในสภาพการใช้งานจริงสัญญาณจะมีการสะท้อนกับสิ่งต่าง ๆ รอบข้าง ๆ ได้มากมายหลาย ลักษณะไม่จำกัดอยู่เฉพาะในบางรูปแบบ อีกทั้งผู้ใช้อาจมีการเคลื่อนที่ในระหว่างการใช้งานประกอบกับสิ่งแวดล้อมรอบข้างอาจมีการเคลื่อนไหวเช่นกัน สิ่งเหล่านี้ทำให้สภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ฉะนั้นจึงเป็นเรื่องยากที่เราจะทราบถึงเส้นทางการส่งผ่านของคลื่นสัญญาณใด ๆ ได้อย่างชัดเจนแน่นอน

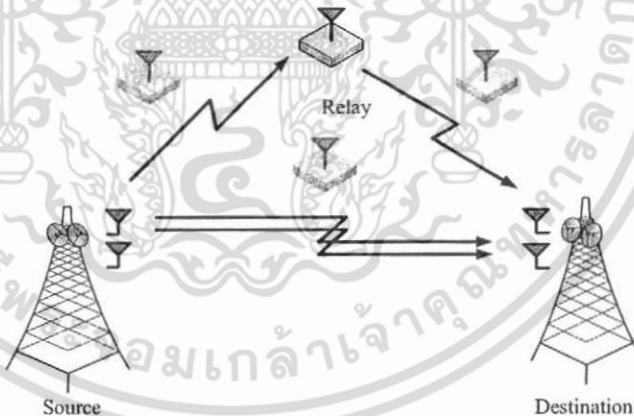
บทที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทนี้จะนำเสนองานวิจัย ซึ่งเป็นการนำเทคนิคเครื่องรับแบบปรับตัวได้แบบปริภูมิเวลา สำหรับเครือข่ายแบบร่วมมือ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา (Layered space - time coded) ซึ่งในการส่งต่อสัญญาณจากรีเลย์ไปยังเครื่องรับ จะใช้การส่งต่อสัญญาณแบบขยายและส่งต่อ (Amplify and Forward : AF)

โครงสร้างระบบเครื่องรับแบบปรับตัวได้แบบปริภูมิเวลาสำหรับเครือข่ายรีเลย์แบบร่วมมือ ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย โครงสร้างเครื่องรับแบบร่วมมือ โครงสร้างเครื่องส่งแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา เครื่องรับแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา

3.1 โครงสร้างเครื่องรับแบบร่วมมือ

ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือแบบเข้าหลายทางออกหลายทาง (MIMO) ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย จำนวนเครื่องส่ง 1 เครื่อง เครื่องรับ 1 เครื่อง มีรีเลย์ 1 และ 2 เครื่อง ตามลำดับ โดยกำหนดให้ผู้ใช้งานทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง และรีเลย์ มีหน้าที่ส่งต่อสัญญาณจากรีเลย์ไปยังเครื่องรับ จะพิจารณาการส่งต่อสัญญาณแบบขยายและส่งต่อ ในการสื่อสารแบบร่วมนี้ ซึ่งมีการมอดูเลตแบบ BPSK ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และโครงสร้างเครือข่ายรีเลย์ 2-hop สำหรับลำดับการส่งของเสาอากาศเครื่องส่ง และเครื่องรับแสดงดังรูปที่ 3.2

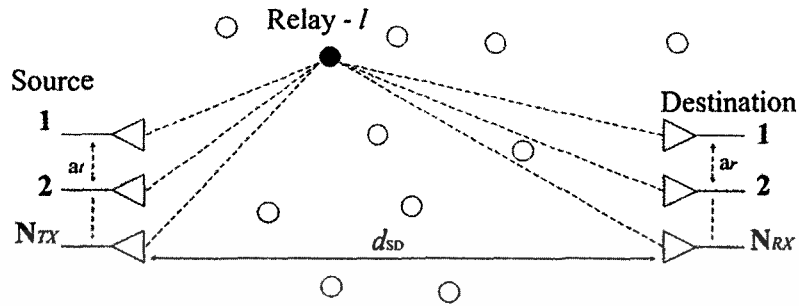


รูปที่ 3.1 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ

จากรูปที่ 3.2 ได้นำเสนอระบบการทำงานแบบร่วมมือแบบ MIMO โดยให้เครื่องส่งสัญญาณ (Source) คือ N_{TX} และเครื่องรับสัญญาณ (Destination) คือ N_{RX} ซึ่งในแบบจำลองนี้การส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากเครื่องส่งสัญญาณไปยังเครื่องรับสัญญาณนั้น เกิดขึ้นสองช่วงเวลา (Time slot) โดยช่วงเวลาแรก สัญญาณจะถูกส่งจากเครื่องส่งไปยังรีเลย์ และรีเลย์รับข้อมูล ช่วงเวลาที่สองสัญญาณจะถูกส่งจากรีเลย์ และผ่านกระบวนการขยายสัญญาณและถูกส่งไปยังเครื่องรับสัญญาณ ซึ่งวัตถุประสงค์สำคัญของเครือข่ายแบบร่วมมือนั้น เพื่อช่วยเพิ่มระยะของช่องสัญญาณ และเป็นการปรับปรุงการเชื่อมต่อสัญญาณของระบบ MIMO ให้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสังเกตได้ว่ารีเลย์ในรูปที่ 3.2 เป็นการส่งใช้เสาอากาศแบบรอบตัว (Omni-directional) คือ สายอากาศที่กระจายสัญญาณทั่วทุกทิศทางในอากาศ



รูปที่ 3.2 โครงสร้างเครือข่ายรีเลย์ 2-hop สำหรับลำดับการส่งของเสาอากาศเครื่องส่งและเครื่องรับ

จากรูปที่ 3.2 ให้ N_{TX} คือเสาส่งสัญญาณส่งข้อมูลถึง เสารับสัญญาณ คือ N_{RX} และให้ N_R เสาส่งสัญญาณที่รีเลย์เป็นตัวช่วยส่งสัญญาณ เพื่อเป็นการเพิ่มระยะของสัญญาณ และเป็นการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูล ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาเสาส่งสัญญาณที่มีรีเลย์เพียงเสา 1 ต้นเท่านั้น

ในช่วงเวลา k เครื่องส่งสัญญาณ ได้ส่งสัญญาณไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete-time) ($N_{TX} \times 1$) ให้เป็นเวกเตอร์ s_k รีเลย์ และเครื่องรับสัญญาณ จะรับสัญญาณสามารถกำหนดได้ดัง

$$y_k = H_1 s_k + w_{k,R} \tag{3.1}$$

$$r_k = H_0 s_k + w_k \tag{3.2}$$

- | | | |
|---|-----|--|
| เมื่อ y_k | คือ | เวกเตอร์ ($N_R \times 1$) สัญญาณที่ได้รับจากรีเลย์ |
| r_k | คือ | เวกเตอร์ ($N_{RX} \times 1$) สัญญาณที่เครื่องรับที่รับได้ |
| $w_{k,R}$ | คือ | สัญญาณรบกวน (AWGN) ที่รีเลย์ |
| w_k | คือ | สัญญาณรบกวน (AWGN) เครื่องรับสัญญาณ |
| $H_0 \in \mathbb{C}^{N_{RX} \times N_{TX}}$ | คือ | สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณของสัญญาณโดยตรงระหว่างเครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณ |
| $H_1 \in \mathbb{C}^{N_R \times N_{TX}}$ | คือ | สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งสัญญาณและรีเลย์ (hop-1) |

ในช่วงเวลาที่ $k + 1$ รีเลย์จะส่ง Gy_k ไปยังเครื่องรับสัญญาณ และเครื่องส่งสัญญาณจะหยุดส่งข้อมูล G เป็น เมตริกซ์เฉย ($N_R \times N_R$) คือ อัตราการส่งสัญญาณอนาล็อก (Analog) ของรีเลย์ ซึ่งสังเกตได้ว่า รีเลย์ไม่สามารถที่จะรับสัญญาณได้ในขณะที่ช่วงเวลาที่ $k + 1$ จนกว่ารีเลย์จะส่งสัญญาณที่รับมา จากช่วงเวลาก่อนหน้านั้นเสร็จ ดังนั้น ในช่วงเวลาที่ $k + 1$ สามารถเขียนดังสมการ (3.3)

$$\tilde{r}_{k+1} = H_2 G y_k + w_{k+1} \quad (3.3)$$

$H_2 \in \mathbb{C}^{N_{RX} \times N_{TX}}$ คือ สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณระหว่างรีเลย์และเครื่องรับสัญญาณ (hop-2)

โดยแทนค่าสมการ (3.1) ในสมการ (3.3) จะได้สมการ

$$\tilde{r}_{k+1} = H_2 G H_1 s_k + H_2 G w_{k,R} + w_{k+1} \quad (3.4)$$

เนื่องจาก G และ H_2 เป็นผลที่ได้จากสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับในช่วงเวลาที่ $k + 1$ ให้ $n_{k+1} = H_2 G w_{k,R} + w_{k+1}$ คือสัญญาณรบกวน เมื่อ hop-2 ของรีเลย์ดังสมการ

$$\tilde{H}_{12} = H_2 G H_1 \quad (3.5)$$

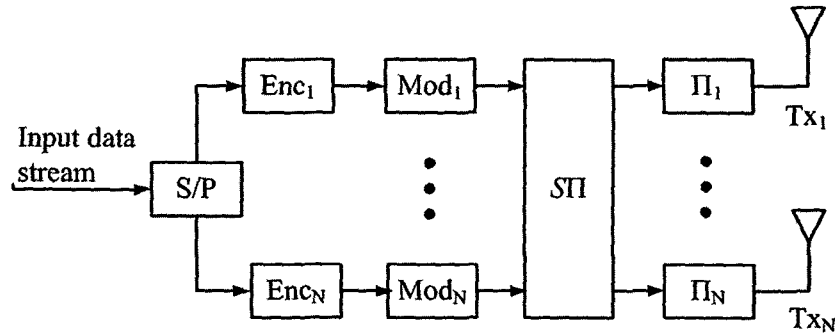
เมื่อนำช่วงเวลาที่ k และ ช่วงเวลาที่ $k + 1$ มารวมกันในรูปของเวกเตอร์จะได้

$$\tilde{r}_{k,k+1} = \begin{bmatrix} r_k \\ \tilde{r}_{k+1} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} H_0 \\ \tilde{H}_{12} \end{bmatrix}}_{\tilde{H}} s_k + \begin{bmatrix} w_k \\ n_{k+1} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

\tilde{H} คือ เมตริกซ์ของช่องสัญญาณ ($N_{TX} \times 2N_{RX}$) ของช่องสัญญาณ MIMO กับ AWGN (Additive White Gaussian Noise)

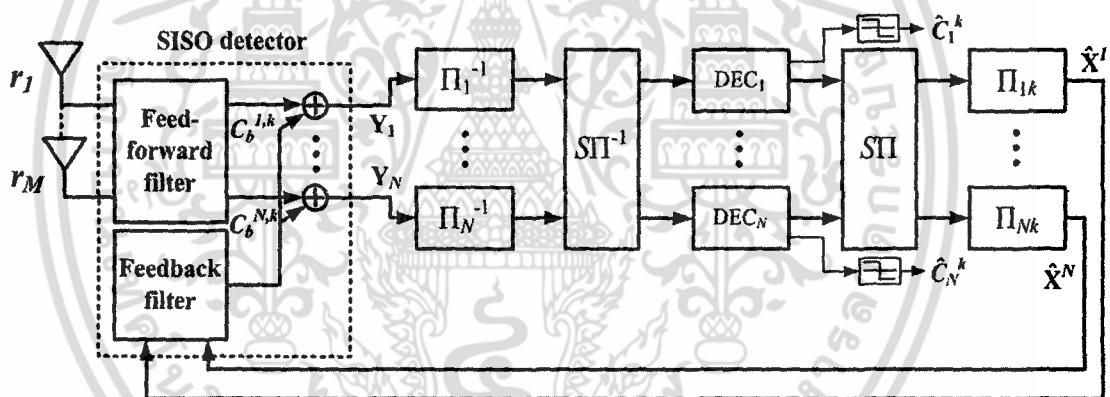
3.2 โครงสร้างเครื่องส่งแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา (Layered Space-Time)

โครงสร้างของเครื่องส่งที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา (Layered Space-Time) จากรูปที่ 3.3 เป็นเสาอากาศส่งจำนวน N ต้น โดยข้อมูลจะถูกแบ่ง จากแฟรมแบบแถวเดียวเป็นแบบขนานตามลำดับชั้นเท่าจำนวนเสาอากาศ เพื่อแบ่งข้อมูลในการส่งออกไปในแต่ละต้น จากนั้นข้อมูลแต่ละลำดับชั้นจะถูก เข้ารหัสโดยการใช้วงจรคอนโวลูชัน (Convolution Code) และเข้าสู่กระบวนการมอดูเลต แล้วเข้าสู่วงจรอินเตอร์ลีฟเชิงเวลา (Time Interleave) เพื่อทำการสลับข้อมูลในแนวชั้นเดียวกัน ที่ทำเช่นนี้เพื่อทำการลดความผิดพลาดในการส่งไปในช่องสัญญาณ เอกสารนี้ จากนั้นทำการส่งออกไปพร้อมกันจากเสาส่งทั้งหมด N ต้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 โครงสร้างเครื่องส่งเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา

3.3 โครงสร้างเครื่องรับ



รูปที่ 3.4 โครงสร้างเครื่องรับแบบปรับตัวได้แบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา (LST)

จากรูปที่ 3.4 เครื่องรับแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา สัญญาณข้อมูลที่รับได้จะถูกส่งผ่านไปที่ส่วนตรวจจับสัญญาณแบบปรับค่าได้ (Adaptive Detector) โดยส่วนตรวจจับจะแยกเป็นการตรวจจับของแต่ละผู้ใช้ และในแต่ละตัวตรวจจับแยกสัญญาณออกเป็นแต่ละสัญลักษณ์ 1 ถึง N ตามแต่ละลำดับชั้นที่เสาส่งทำการส่งสัญลักษณ์ ซึ่งเมื่อผ่านส่วนนี้จะเป็นส่วนของการถอดรหัสคำเดิม (SISO) แบบขนานจำนวน N ชุด จากนั้นจะผ่านวงจรถอดรหัสเชิงเวลา (Time Deinterleaver) กับวงจรถอดรหัสเชิงพื้นที่ (Spatial Deinterleave) แล้วทำการป้อนกลับเข้าไปในวงจรตรวจจับ โดยจะทำการป้อนกลับเพื่อหักล้างสัญญาณรบกวนระหว่างผู้ใช้ (MAI) และสัญญาณรบกวนระหว่างผู้ใช้เดียวกันแต่ละลำดับชั้น (CCI) วงจรถอดจับสัญญาณแบบปรับค่าได้จะทำหน้าที่ในการทำการหักล้างสัญญาณรบกวนด้วยกระบวนการแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด (MMSE) ซึ่งประกอบด้วยส่วนของวงจรกรองไปข้างหน้า (Feed-Forward Filter) และวงจรกรองป้อนกลับ (Feed-back Filter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวนซ้ำ (Iteration) รอบแรก วงจรกรองป้อนไปข้างหน้าจะทำหน้าที่ถอดค่าสัญลักษณ์ออกมาจากสัญญาณที่รับได้ในการลดสัญญาณรบกวน โดยที่ไม่มีการหักล้างสัญญาณรบกวน เพราะไม่มีสัญลักษณ์ที่ได้จากการประมาณ (Estimated Symbol) จากวงจรถอดรหัสแบบ MAP ในการวนซ้ำรอบที่สอง หลังจากการทำงานในรอบการวนซ้ำรอบแรกวงจรกรองป้อนกลับจะถูกใช้ในกระบวนการตรวจจับสัญญาณ โดยสัญลักษณ์ที่ได้จากการประมาณจากเอาต์พุตของวงจรถอดรหัส MAP จะถูกป้อนกลับมายังวงจรกรองป้อนกลับ เพื่อที่จะหักล้างสัญญาณรบกวนจากเสาสัญญาณอื่นในช่วงของการตรวจจับสัญญาณของ MMSE โดยสัญลักษณ์ที่ตรวจจับได้ของชั้นสัญญาณในรอบของการวนซ้ำที่ k th ที่เวลา t สำหรับลำดับชั้นที่ i คือค่า $y_t^{i,k}$ ซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$y_t^{i,k} = w_f^{i,kT} \mathbf{r} + w_b^{i,kT} \underline{x}^{i,k}, \quad (3.7)$$

$$\underline{x}^{i,k} = (x_t^{1,k}, x_t^{2,k}, \dots, x_t^{i-1,k}, x_t^{i+1,k}, x_t^{N,k}) \quad (3.8)$$

เมื่อ $w_f^{i,k}$ คือ ขนาดเวกเตอร์ $M \times 1$ แทนสัมประสิทธิ์วงจรกรองไปข้างหน้า โดย $w_f = [w_{f,0}, w_{f,1}, \dots, w_{f,M-1}]^T$
 $w_b^{i,k}$ คือ ขนาดเวกเตอร์ $(N-1) \times 1$ แทนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองป้อนกลับ ภายในตัวตรวจจับของสัญญาณที่ i ในรอบของการวนซ้ำที่ k th โดย $w_b = [w_{b,0}, w_{b,1}, w_{b,i-1}, w_{b,i+1}, \dots, w_{b,N-1}]^T$
 $\underline{x}^{i,k}$ คือ ขนาดของเวกเตอร์ $(N-1) \times 1$ แทนสัญลักษณ์จากการประมาณจากเอาต์พุตของวงจรถอดรหัสแบบภายในตัวตรวจจับของชั้นสัญญาณที่ i ในรอบของการวนซ้ำที่ k th
 M คือ จำนวนเสาอากาศรับของสถานีฐาน
 N คือ จำนวนเสาอากาศส่ง
 i คือ เสาอากาศที่พิจารณา หรือชั้นสัญญาณที่พิจารณา

ในเทอร์มที่สองในสมการที่ (3.7) แสดงค่าหักล้างสัญญาณแทรกสอด โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์วงจรกรองป้อนกลับ $c_b^{i,k}$ โดยให้

$$c_b^{i,k} = w_b^{i,kT} \underline{x}^{i,k} \quad (3.9)$$

โดยให้ $w_f^{i,k}$ และ $c_b^{i,k}$ เป็นค่าการคำนวณที่ทำให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองมีค่าเฉลี่ยน้อย ซึ่งค่าอัตราความผิดพลาดบิต ดังสมการ (3.10)

$$e = E [|y_t^{i,k} - x_t^{i,k}|^2] \quad (3.10)$$

ซึ่งเป็นที่ทราบว่าเป็นค่าการเรียนรู้ของสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ ของเมตริกซ์ \mathbf{H}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \mathbf{H}_i \mathbf{H}_i^H \quad (3.11)$$

$$\mathbf{B} = \underline{\mathbf{H}}^i [\mathbf{I}_{N-1} - \text{diag}(\underline{\mathbf{x}}^{i,k} \underline{\mathbf{x}}^{i,kT}) + \underline{\mathbf{x}}^{i,k} \underline{\mathbf{x}}^{i,kT}] \underline{\mathbf{H}}^{iH} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{D} = \underline{\mathbf{H}}^i \underline{\mathbf{x}}^{i,k} \quad (3.13)$$

$$\mathbf{R} = \sigma^2 \mathbf{I}_M \quad (3.14)$$

โดยให้

\mathbf{H}_i คือ เมตริกซ์ขนาดของสัญญาณ ในระดับชั้นที่ i th เมตริกซ์ \mathbf{H} เป็นสัญลักษณ์เวกเตอร์ $M \times 1$ ของอัตราความซับซ้อนของช่องสัญญาณสำหรับเสาอากาศที่ส่ง ที่ชั้นสัญญาณที่ i th

\mathbf{H}_i^H คือ ค่าคอนจูเกตทรานสโพส (Conjugate transpose) ของ \mathbf{H}_i

$\underline{\mathbf{H}}^i$ คือ เมตริกซ์ขนาด $M \times (N - 1)$ ของอัตราความซับซ้อนของช่องสัญญาณสำหรับเสาอากาศที่ส่งที่ $(N - 1)$

ซึ่งค่าที่เหมาะสมที่สุดของวงจกรองไปข้างหน้า และวงจกรองป้อนกลับ ได้สมการ

$$\mathbf{w}_j^{i,kT} = \mathbf{H}_i^H (\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{R} - \mathbf{D}\mathbf{D}^H)^{-1} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{c}_b^{i,kT} = -\mathbf{w}_j^{i,kT} \mathbf{D} \quad (3.16)$$

เมื่อ

\mathbf{I}_{N-1} คือ $(N-1) \times (N-1)$

\mathbf{I}_M คือ $M \times M$ เมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrices)

เนื่องจากไม่สามารถที่จะทราบค่าของมอดกกระทบของสัญญาณรบกวน และกำลังของสัญญาณได้ จึงทำให้มีการใช้อัลกอริทึมการปรับตัวมาใช้งานเพื่อทำการหาค่าของสัมประสิทธิ์ $\mathbf{w}_f^{i,k}$ และ $\mathbf{w}_b^{i,k}$ โดยอัลกอริทึมที่เลือกใช้นั้นคือ อัลกอริทึมการปรับตัวแบบ LMS (Least Mean Square Algorithm) และ SR (Sign Regressor Algorithm) โดยให้สมการที่ (3.7) ทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของ $\mathbf{w}_j^{i,k}(t)$ และ $\mathbf{w}_b^{i,k}(t)$ ในเวลา t แทนค่าในอัตราความผิดพลาดบิต ในสมการ (3.10) จะได้

$$e(t) = E \left[\left| \mathbf{w}_j^{i,kT}(t) r + \mathbf{w}_b^{i,kT} \underline{\mathbf{x}}^{i,k} - x_i^{i,k} \right|^2 \right] \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$\mathbf{w}_f^{i,k}(t+1) = \mathbf{w}_f^{i,k}(t) + \mu_f e(t) \mathbf{r}(t) \quad (3.18)$$

$$\mathbf{w}_b^{i,k}(t+1) = \mathbf{w}_b^{i,k}(t) + \mu_b e(t) \mathbf{x}(t) \quad (3.19)$$

การปรับปรุงประสิทธิภาพวงจรรองป้อนไปข้างหน้า และวงจรรองป้อนกลับ โดยใช้ อัลกอริทึมแบบไซน์รีเกรสเซอร์ (Sign Regressor Algorithm) โดยให้

$$\mathbf{w}_f^{i,k}(t+1) = \mathbf{w}_f^{i,k}(t) + \mu_f \text{sgn } e(t) \mathbf{r}(t) \quad (3.20)$$

$$\mathbf{w}_b^{i,k}(t+1) = \mathbf{w}_b^{i,k}(t) + \mu_b \text{sgn } e(t) \mathbf{x}(t) \quad (3.21)$$

μ_f คือ ค่าสแต็ปไซส์ (Step sizes) สำหรับวงจรรองป้อนไปข้างหน้า

μ_b คือ ค่าสแต็ปไซส์ (Step sizes) วงจรรองป้อนกลับ

ในช่วงตรวจจับสัญญาณเอาต์พุตที่ $y_t^{i,k}$ คือ ค่าที่ถูกถอดรหัสโดยใช้การถอดรหัสแบบแมป (Maximum A Posteriori : MAP) โดยมีจุดเลตได้สัญญาณ 1 และ -1 ดังสมการที่ (3.22)

$$P((y_t^{i,k}) | x_t^{i,k} = \pm 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \frac{-(y_t^{i,k} \mp 1)^2}{2\sigma^2} \quad (3.22)$$

โดยพิจารณาอัตราส่วนเป็นจริงเบื้องหลังแบบลอการิทึม (log-likelihood ratios : LLR) ในแต่ละชั้นของสัญญาณที่ i th ในรอบของการวนซ้ำที่ k th โดยให้ $y_t^{i,k}$ ดังแสดงในสมการ

$$\lambda_t^{i,k} = \log \left(\frac{P((x_t^{i,k} = 1) | y_t^{i,k})}{P((x_t^{i,k} = -1) | y_t^{i,k})} \right) \quad (3.23)$$

สัญลักษณ์ความน่าจะเป็นเบื้องหลัง (A posteriori probabilities : APP) คือ $P((x_t^{i,k} = q) | y_t^{i,k}, q = 1, -1)$ ซึ่งอยู่บนของเอาต์พุต กำหนดให้ $y_t^{i,k}$ สมการที่ได้

$$P((x_t^{i,k} = 1) | y_t^{i,k}) = \frac{e^{\lambda_t^{i,k}}}{e^{\lambda_t^{i,k}} + 1}, \quad (3.24)$$

$$P((x_t^{i,k} = -1) | y_t^{i,k}) = \frac{1}{e^{\lambda_t^{i,k}} + 1}, \quad (3.25)$$

ดังนั้นการประมาณค่าสัญลักษณ์ซอฟต์แวร์เอาต์พุต ในแต่ละลำดับขั้นที่ i th ในรอบของการวนซ้ำที่ k th ดังสมการ (3.26)

$$x_t^{i,k} = \frac{e^{\lambda_t^{i,k}} - 1}{e^{\lambda_t^{i,k}} + 1}, \quad (3.26)$$

3.4. การทำงานของระบบที่นำเสนอ

การทำงานแบบร่วมมือของรีเลย์โดยใช้เครื่องรับแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มระยะของช่องสัญญาณ และ ช่วยลดสัญญาณรบกวนและขจัดสัญญาณแทรกสอดในช่องสัญญาณร่วม และสัญญาณที่เกิดจากการจางหายเนื่องจากหลายเส้นทาง ซึ่งการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ เป็นเทคนิคการส่งต่อข้อมูล ที่ทำงานช่วยกันหลาย ๆ โหนด ซึ่งรีเลย์ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยส่งต่อข้อมูลไปยังเครื่องรับปลายทาง

ในบทต่อไปจะกล่าวถึงการเปรียบเทียบความเร็วในการลู่เข้า (Convergence speed) ของการส่งสัญญาณแบบร่วมมือ และได้แสดงแบบจำลองการส่งสัญญาณแบบร่วมมือไว้ 2 แบบ คือแบบจำลองที่ 1 การเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงขาดหาย ระหว่างภาครับและภาคส่ง ซึ่งกรณีนี้ ภาครับจะรับสัญญาณที่ถูกส่งมาจากรีเลย์เพียงทางเดียว (H_{12}) แบบจำลองที่ 2 การเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงระหว่างภาครับและภาคส่ง (H_{12} และ H_0) ได้ใช้เครื่องส่งและเครื่องรับแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลามาประยุกต์ใช้ และใช้เทคนิคการปรับวนซ้ำ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS และ SR

บทที่ 4

ผลการวิจัย

หลังจากที่ได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ตลอดจนระบบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ในบทนี้จะเป็นการจำลองผล (Simulation) ของระบบที่นำเสนอด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับความเร็วในการลู่เข้า (Convergence speed) ของ อัลกอริทึมแบบ LMS และ SR และเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล โดยแบ่งออกเป็น แบบจำลองแบบการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงขาดหาย (Direct link blocked) และแบบจำลองแบบการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง (direct link)

4.1 ข้อกำหนดในการจำลองผล

ในส่วนนี้จะเป็นการกำหนดเงื่อนไข ในรายละเอียด รวมถึงข้อตกลงต่าง ๆ ในการจำลองผล (Simulation) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะสามารถทำการจำลองแบบในแต่ละสถานการณ์ด้วยเงื่อนไขเดียวกัน คือ

4.1.1 การตั้งค่าเริ่มต้นคงที่ของภาคส่งและภาครับ และจำนวนรีเลย์

- จำนวนผู้ใช้งานจำนวน หนึ่งราย
- ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK
- ใช้การเข้ารหัสข้อมูลแบบ Convolution มีค่า $g = [1 \ 1 \ 0 \ 1; 1 \ 1 \ 1 \ 1]$
- จำนวนเสา 2×2 MIMO ข้อมูลในแต่ละเฟรม 260 บิต
- หลักการเปลี่ยนโดย serial to parallel ในแต่ละลำดับชั้นของการรหัส LSTC ประกอบด้วย ข้อมูล 130 บิต และมีการเข้ารหัส 266 สัญลักษณ์ ต่อลำดับชั้น
- ใช้วิธีการถอดรหัสแบบ MAP
- ใช้การทดลองเฉลี่ยของเฟรมที่ส่งมากกว่า 1,000 ครั้งสำหรับการเปรียบเทียบ BER
- ค่า E_b/N_0 กำหนดให้อยู่ในช่วง 2-10 dB
- ระยะห่างระหว่างแต่ละเสาอากาศมีความกว้างเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

4.1.2 ค่าที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ สำหรับการทำงานร่วมกันของรีเลย์

- เปรียบเทียบความเร็วในการลู่เข้า (Convergence speed) ของอัลกอริทึมแบบ LMS และ SR โดยปรับค่าการวนซ้ำจำนวน 50 รอบ

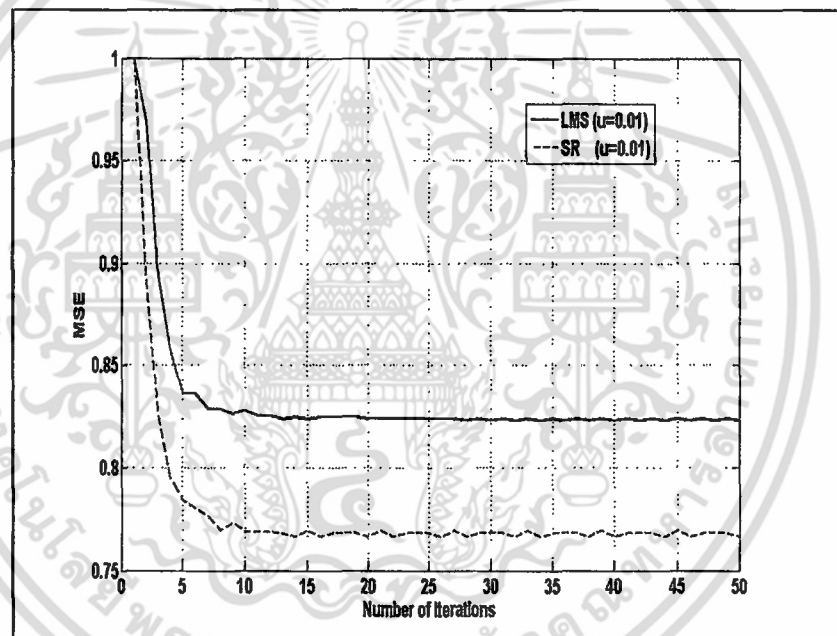
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การเปลี่ยนแปลงจำนวน 1 2 และ 3 ตัว ตามลำดับ ระเบียบด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเปลี่ยนค่าโดยไม่ใช่รีเลย์ โดยใช้เสาอากาศส่ง และรับ 2×2
- เพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณของรีเลย์ เป็น 1 และ 2 ($G = 1, 2$) ตามลำดับ

4.1.3 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ซึ่งพิจารณาจากจำนวนของบิตที่ผิดพลาด จากบิตข้อมูลที่ส่งออกไปทั้งหมด

- $BER = (\text{Number of Bit Error}) / (\text{Total Number of Transmission Bit})$

4.2 เปรียบเทียบความเร็วในการลู่เข้า (Convergence speed) ของอัลกอริทึมแบบ LMS และ SR

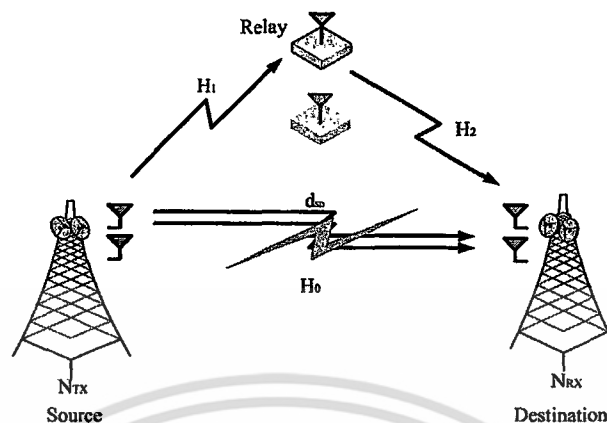


รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบความเร็วในการลู่เข้า (Convergence speed) ของอัลกอริทึมแบบ LMS และ SR โดยใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากัน คือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX} = 2$) ต้น และ รีเลย์ 1 ตัว ($N_R = 1$) กับค่า MSE ใช้จำนวนวนซ้ำ (Iteration) 50 รอบ

จากรูปที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบความเร็วในการลู่เข้า ของอัลกอริทึมแบบ LMS และ SR โดยใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากัน คือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX} = 2$) ต้น และ รีเลย์ 1 ตัว ($N_R = 1$) ซึ่งใช้เครื่องรับที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา ได้ทำการปรับค่าวนซ้ำจำนวน 50 รอบ จากรูปผลการทดลองเครื่องรับที่ใช้อัลกอริทึมแบบ SR มีประสิทธิภาพการลู่เข้าดีกว่า อัลกอริทึมแบบ LMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 แบบจำลองการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงขาดหาย

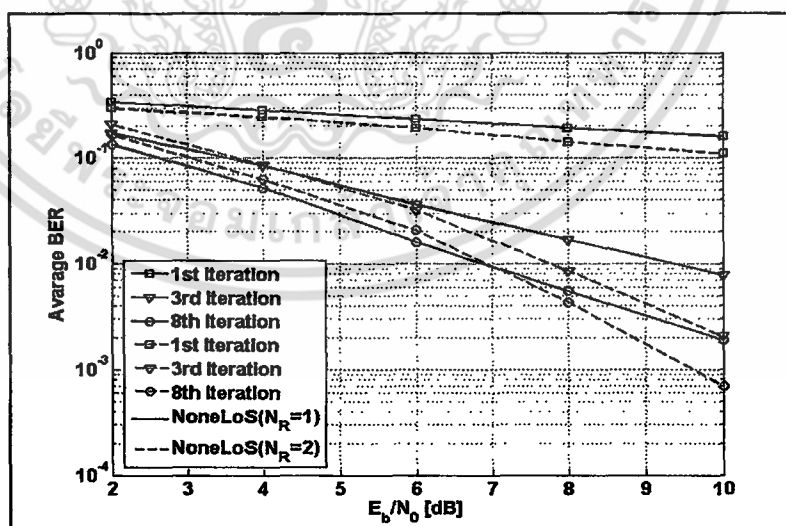


รูปที่ 4.2 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณีการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงขาดหาย โดยใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากัน คือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX} = 2$) ต้น และ รีเลย์ 1 2 และ 3 ตัว ($N_R = 1, 2, 3$) ตามลำดับ

4.3.1 การเปรียบเทียบระหว่างเครื่องรับแบบปรับตัวได้โดยใช้เครือข่ายรีเลย์แบบร่วมมือ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS

4.3.1.1 การเปรียบเทียบระหว่างการใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ตัว ตามลำดับ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS

2 x 2 MIMO, LMS Algorithm



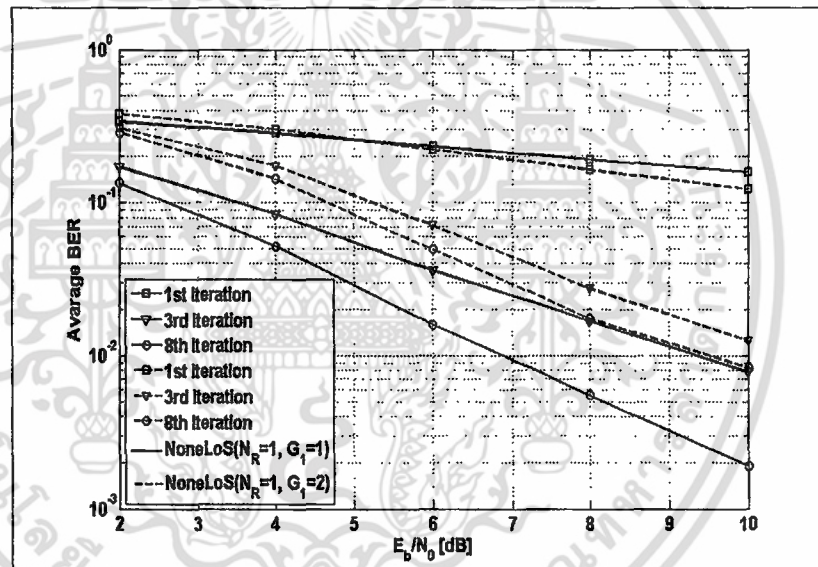
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีสัญญาณโดยตรงขาดหาย และใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ($N_R = 1, 2$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเรียงพิมพ์และการใช้ซ้ำโดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS และใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ($N_R = 1, 2$) ตัว ตามลำดับ มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากัน คือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX}=2$) โดยทำการปรับค่าสัญญาณ E_b/N_0 ระหว่าง 2 – 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลองเครื่องรับที่มี รีเลย์น้อยกว่าจะมีค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่สูงกว่าเครื่องรับที่มีรีเลย์มากกว่า แสดงว่าการเพิ่มจำนวนรีเลย์ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยการลดอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลได้

4.3.1.2 การเปรียบเทียบระหว่างใช้รีเลย์จำนวน 1 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS

2 x 2 MIMO, LMS Algorithm



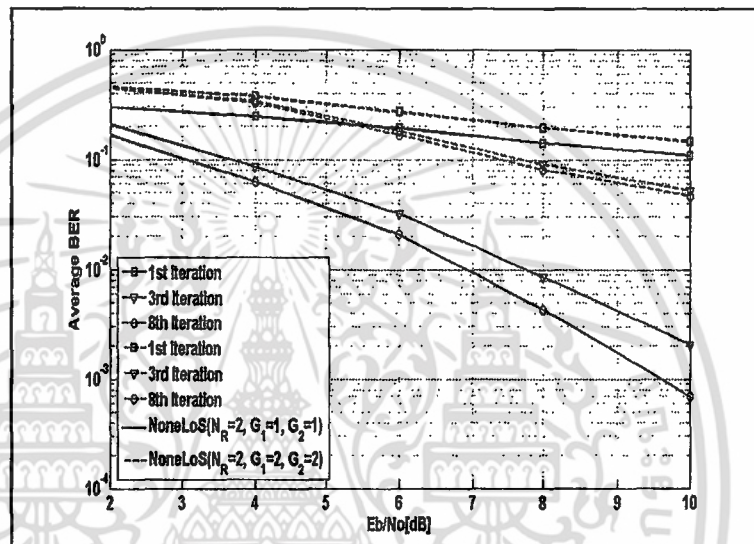
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีสัญญาณโดยตรงขาดหายไป และใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS และใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากันคือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX}=2$) และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

($G=1, 2$) ตามลำดับ โดยทำการปรับค่าสัญญาณ E_b/N_0 ระหว่าง 2 – 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลอง เครื่องรับที่มีการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์มากจะมีอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลมากกว่าเครื่องรับที่มีอัตราขยายน้อยกว่า แสดงว่าการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์จะเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนในระบบด้วย

4.3.1.3 การเปรียบเทียบระหว่างใช้รีเลย์จำนวน 2 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS

2 x 2 MIMO, LMS Algorithm

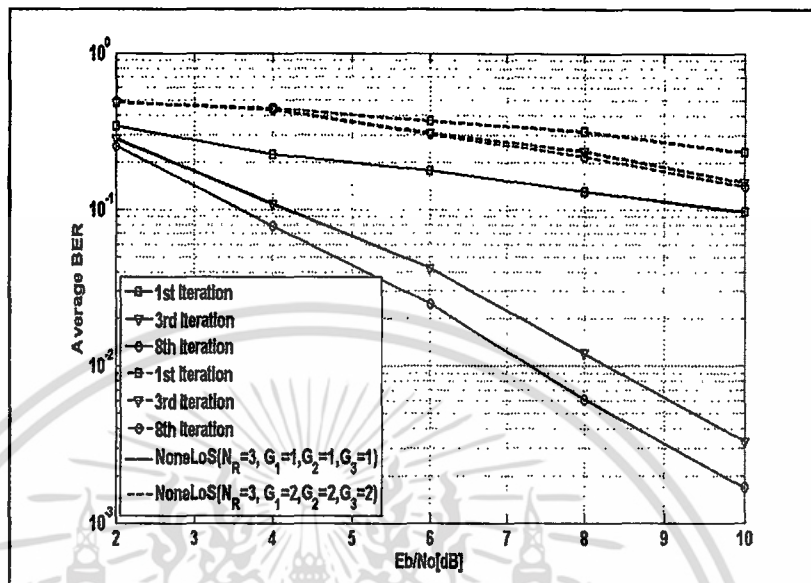


รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีสัญญาณโดยตรงขาดหายไป และใช้รีเลย์จำนวน 2 ($N_R = 2$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบตามลำดับ

จากรูปที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS และใช้รีเลย์จำนวน 2 ($N_R = 2$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากันคือ 2 x 2 ($N_{TX} = 2, N_{RX}=2$) และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) ตามลำดับ โดยทำการปรับค่าสัญญาณ E_b/N_0 ระหว่าง 2 – 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลอง เครื่องรับที่มีการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์มากจะมีอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลมากกว่าเครื่องรับที่มีอัตราขยายน้อยกว่า แสดงว่าการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์จะเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนในระบบด้วย

4.3.1.4 การเปรียบเทียบระหว่างใช้รีเลย์จำนวน 3 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS

2 x 2 MIMO, LMS Algorithm



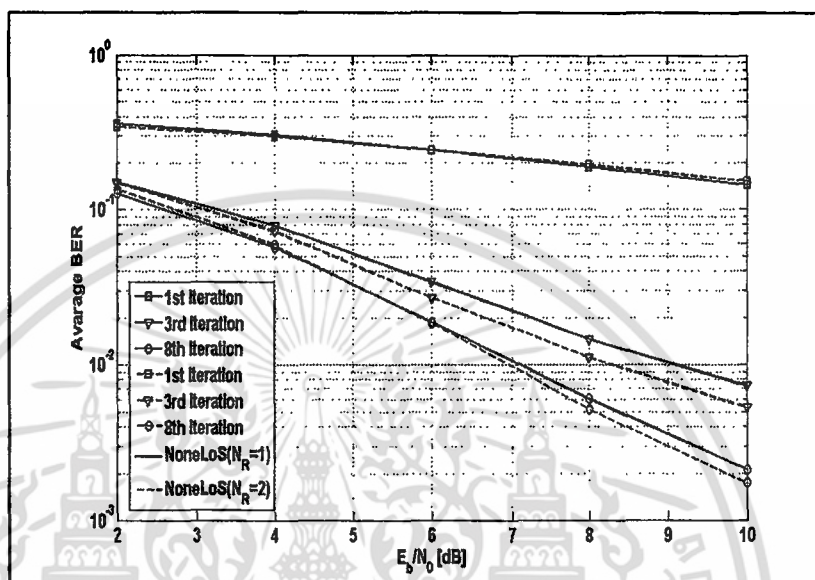
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีสัญญาณโดยตรงขาดหายไป และใช้รีเลย์จำนวน 3 ($N_R = 3$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS และใช้รีเลย์จำนวน 3 ($N_R = 3$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากันคือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX} = 2$) และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) ตามลำดับ โดยทำการปรับค่าสัญญาณ Eb/No ระหว่าง 2 - 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลอง เครื่องรับที่มีการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์มากจะมีอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่มากกว่าเครื่องรับที่มีอัตราขยายน้อยกว่า แสดงว่าการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์จะเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนในระบบด้วย

4.3.2 การเปรียบเทียบระหว่างเครื่องรับแบบปรับตัวได้โดยใช้เครือข่ายรีเลย์แบบร่วมมือ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR

4.3.2.1 การเปรียบเทียบระหว่างการใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ตัวตามลำดับ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR

2 x 2 MIMO, SR Algorithm

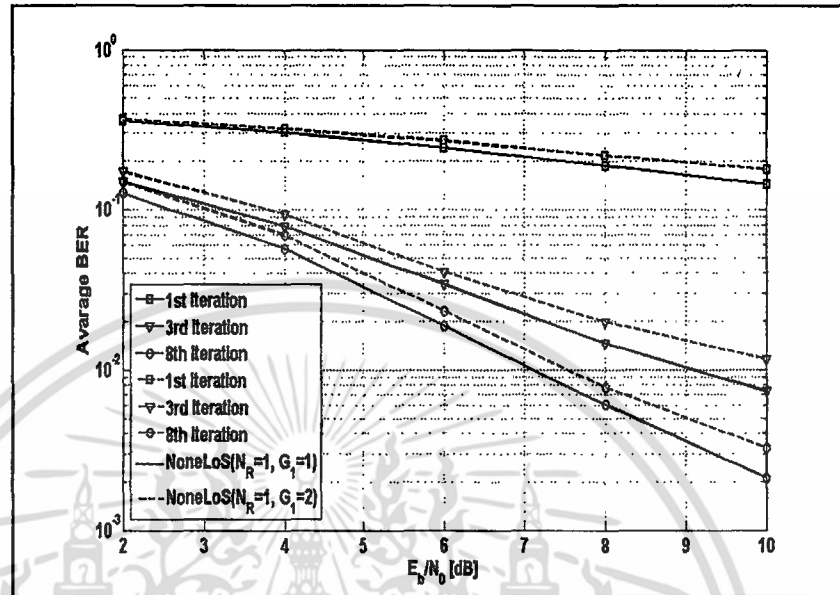


รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR กรณีสัญญาณโดยตรงขาดหายไป และใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ($N_R = 1, 2$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.7 จากรูปที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR และใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ($N_R = 1, 2$) ตัว ตามลำดับ มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากันคือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX} = 2$) โดยทำการปรับค่าสัญญาณ E_b/N_0 ระหว่าง 2 – 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลองเครื่องรับที่มี รีเลย์น้อยกว่าจะมีอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่มากกว่าเครื่องรับที่มีรีเลย์มากกว่า แสดงว่าการเพิ่มจำนวนรีเลย์สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยการลดค่าเฉลี่ยอัตราผิดพลาดของบิตข้อมูลได้

4.3.2.2 การเปรียบเทียบระหว่างใช้รีเลย์จำนวน 1 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR

2 x 2 MIMO, SR Algorithm

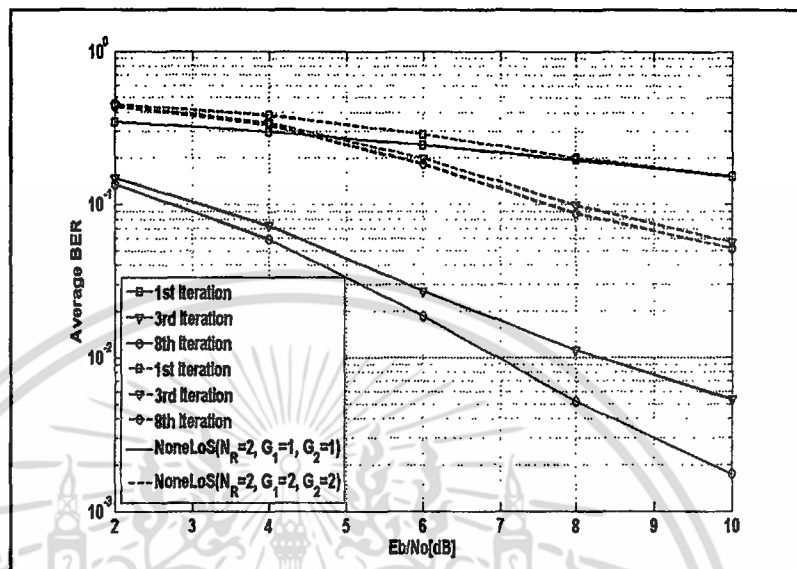


รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR กรณีสัญญาณโดยตรงขาดหายไป และใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SA และใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากันคือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX} = 2$) และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) ตามลำดับ โดยทำการปรับค่าสัญญาณ E_b/N_0 ระหว่าง 2 – 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลอง เครื่องรับที่มีการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์มากจะมีอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่มากกว่าเครื่องรับที่มีอัตราขยายน้อยกว่า แสดงว่าการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์จะเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนในระบบด้วย

4.3.2.3 การเปรียบเทียบระหว่างใช้รีเลย์จำนวน 2 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR

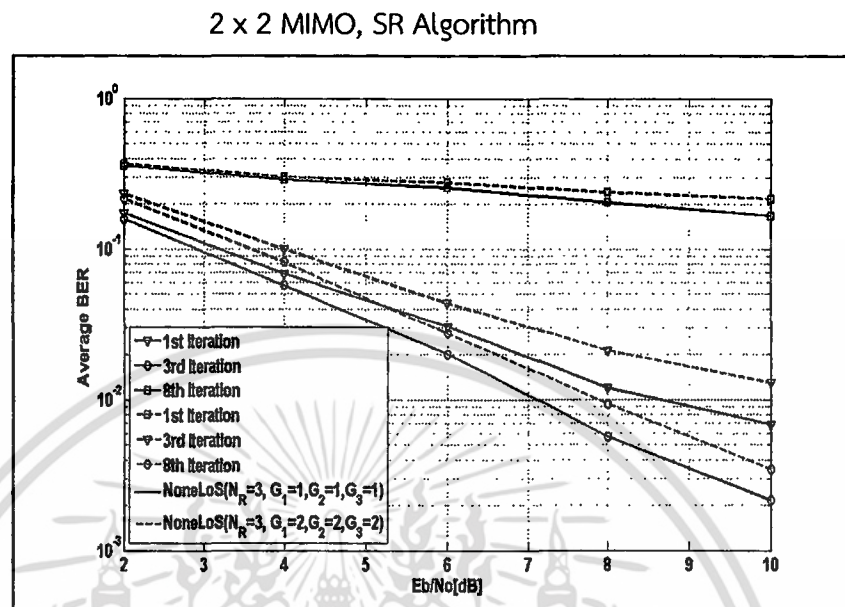
2 x 2 MIMO, SR Algorithm



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SA กรณีสัญญาณโดยตรงขาดหายไป และใช้รีเลย์จำนวน 2 ($N_R = 2$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.9 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SA และใช้รีเลย์จำนวน 2 ($N_R = 2$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากันคือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX} = 2$) และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) ตามลำดับ โดยทำการปรับค่าสัญญาณ E_b/N_0 ระหว่าง 2 - 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลอง เครื่องรับที่มีการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์มากจะมีอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่มากกว่าเครื่องรับที่มีอัตราขยายน้อยกว่า แสดงว่าการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์จะเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนในระบบด้วย

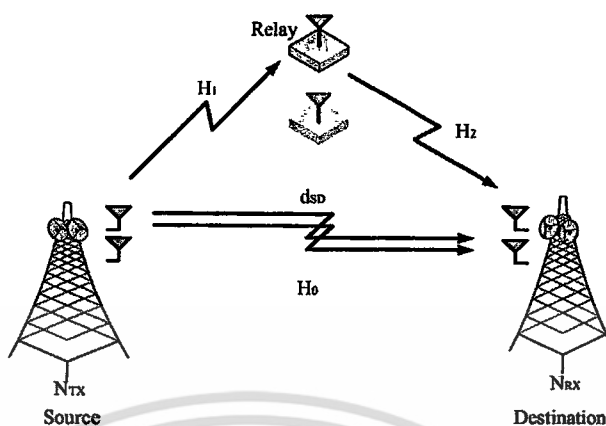
4.3.2.4 การเปรียบเทียบระหว่างใช้รีเลย์จำนวน 3 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SA กรณีสัญญาณโดยตรงขาดหายไป และใช้รีเลย์จำนวน 3 ($N_R = 3$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบตามลำดับ

จากรูปที่ 4.10 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SA และใช้รีเลย์จำนวน 3 ($N_R = 3$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากันคือ 2 x 2 ($N_{TX} = 2, N_{RX}=2$) และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) ตามลำดับ โดยทำการปรับค่าสัญญาณ Eb/No ระหว่าง 2 – 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลอง เครื่องรับที่มีการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์มากจะมีอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่มากกว่าเครื่องรับที่มีอัตราขยายน้อยกว่า แสดงว่าการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์จะเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนในระบบด้วย

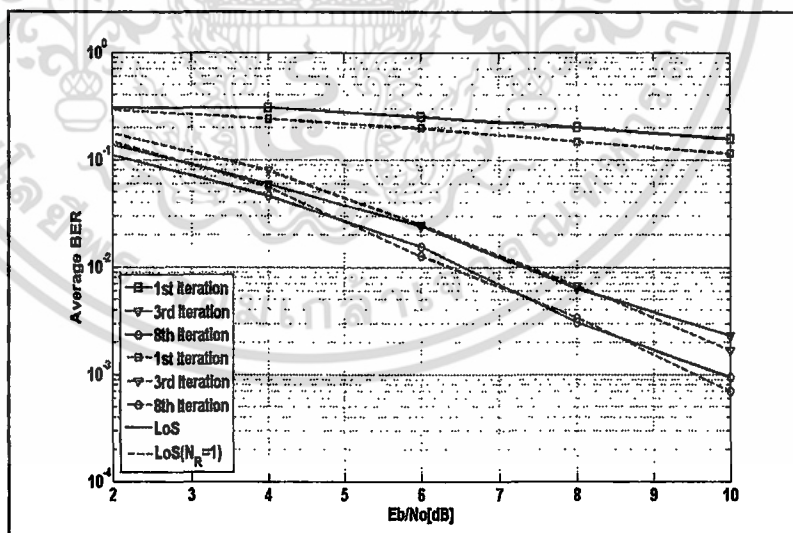
4.4 แบบจำลองแบบการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง



รูปที่ 4.11 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ กรณีของระบบที่นำเสนอมีการเชื่อมต่อกับสัญญาณโดยตรง ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากัน คือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX} = 2$) ต้น และ รีเลย์ 1 2 และ 3 ตัว ($N_R = 1, 2, 3$) ตามลำดับ

4.4.1 การเปรียบเทียบระหว่างเครื่องรับแบบปรับตัวได้โดยใช้เครือข่ายรีเลย์แบบร่วมมือ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS

4.4.1.1 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงที่ไม่ใช้รีเลย์ และ ใช้รีเลย์ 1 ตัว โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS 2 x 2 MIMO, LMS Algorithm

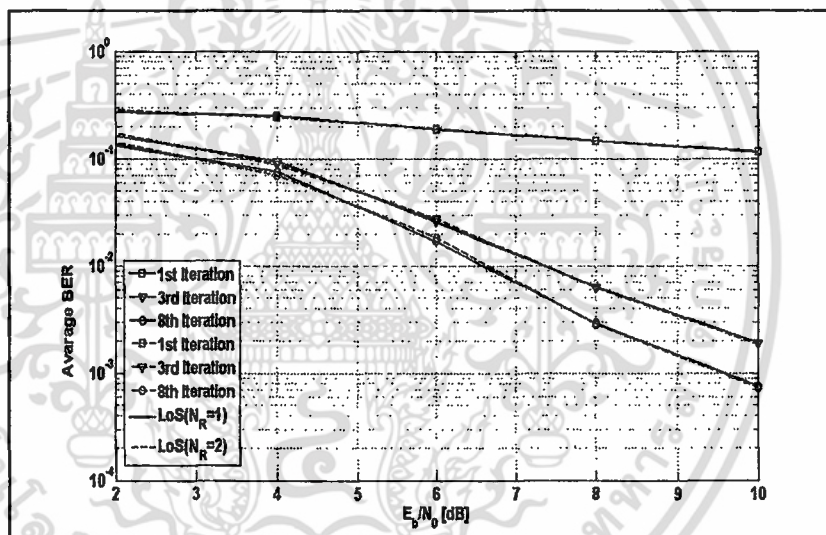


รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงโดยไม่ใช้รีเลย์ (LoS) และเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง โดยใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS โดยเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงโดยไม่ใช้รีเลย์ (LoS) และเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงโดยใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากันคือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX}=2$) โดยทำการปรับค่าสัญญาณ E_b/N_0 ระหว่าง 2 – 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลองเครื่องรับที่มีรีเลย์ 1 ตัว จะมีอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่น้อยกว่าเครื่องรับที่ไม่ใช้รีเลย์ (LoS) แสดงว่าการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงโดยใช้รีเลย์ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการลดค่าเฉลี่ยอัตราผิดพลาดของบิตข้อมูลได้

4.4.1.2 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ซึ่งใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ตัว ตามลำดับ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS 2 x 2 MIMO, LMS Algorithm



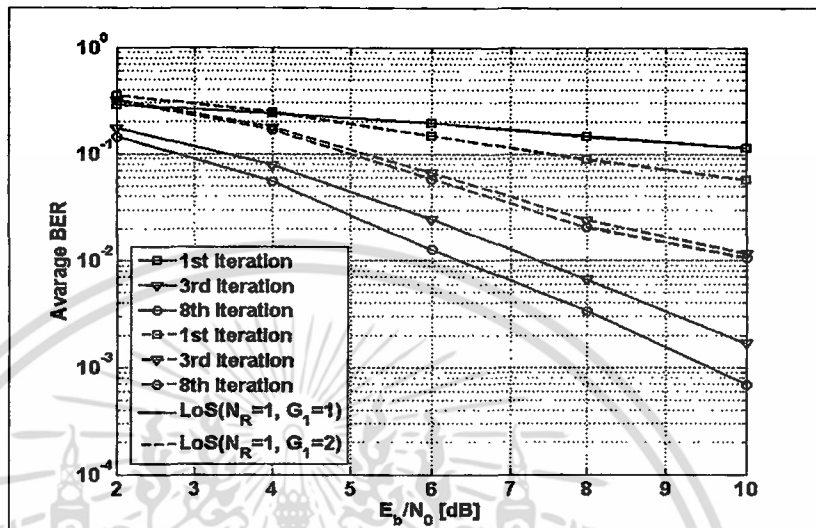
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ($N_R = 1, 2$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.13 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS โดยใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ($N_R = 1, 2$) ตัว ตามลำดับ มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากันคือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX}=2$) โดยทำการปรับค่าสัญญาณ E_b/N_0 ระหว่าง 2 – 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลองเครื่องรับที่ใช้รีเลย์ 1 และ 2 ตัว มีจะมีอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.3 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ซึ่งใช้รีเลย์จำนวน 1 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้ อัลกอริทึมแบบ LMS

2 x 2 MIMO, LMS Algorithm

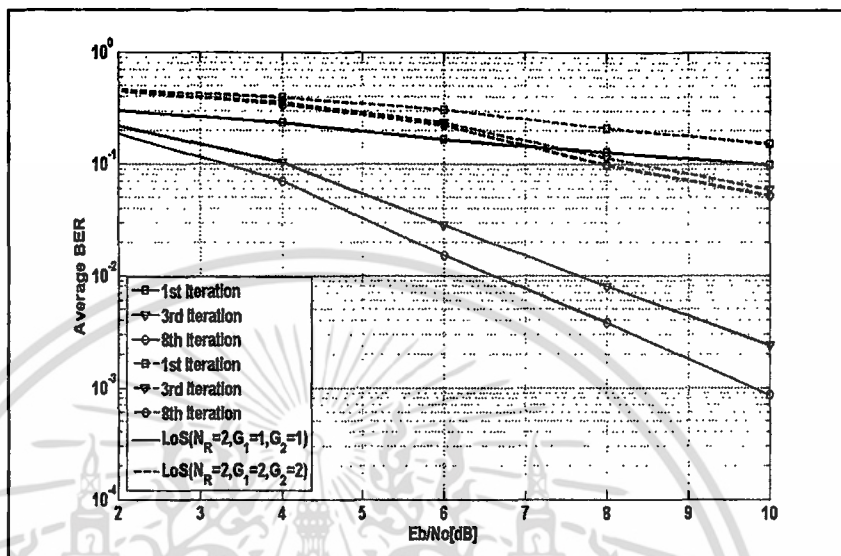


รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา ใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง โดยใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.14 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS และใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากันคือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX} = 2$) และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) ตามลำดับ โดยทำการปรับค่าสัญญาณ E_b/N_0 ระหว่าง 2 – 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลอง เครื่องรับที่มีการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์มากจะมีอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่มากกว่าเครื่องรับที่มีอัตราขยายน้อยกว่า แสดงว่าการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์จะเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนในระบบด้วย

4.4.1.4 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ซึ่งใช้รีเลย์จำนวน 2 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้ อัลกอริทึมแบบ LMS

2 x 2 MIMO, LMS Algorithm

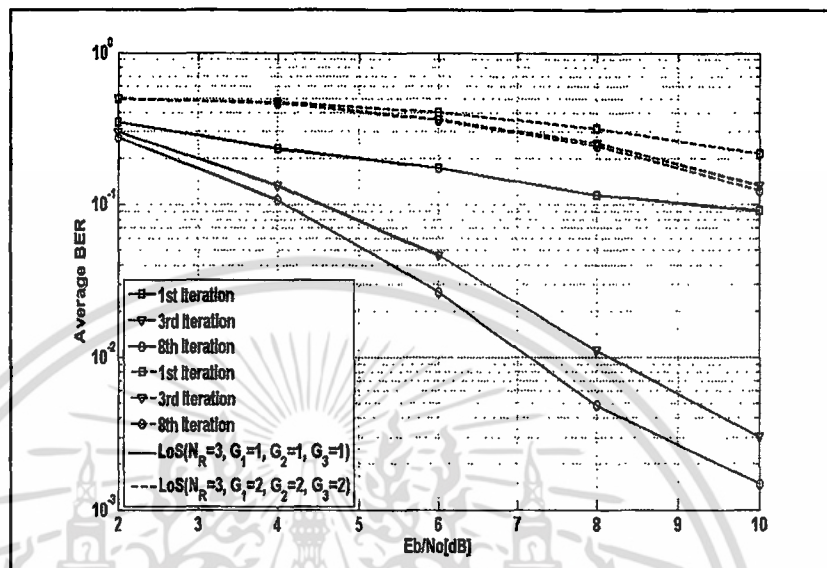


รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ใช้รีเลย์จำนวน 2 ($N_R = 2$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.15 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS และใช้รีเลย์จำนวน 2 ($N_R = 2$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากันคือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX} = 2$) และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) ตามลำดับ โดยทำการปรับค่าสัญญาณ E_b/N_0 ระหว่าง 2 – 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลอง เครื่องรับที่มีการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์มาก จะมีอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่มากกว่าเครื่องรับที่มีอัตราขยายน้อยกว่า แสดงว่าการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์จะเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนในระบบด้วย

4.4.1.5 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ซึ่งใช้รีเลย์จำนวน 3 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้ อัลกอริทึมแบบ LMS

2 x 2 MIMO, LMS Algorithm



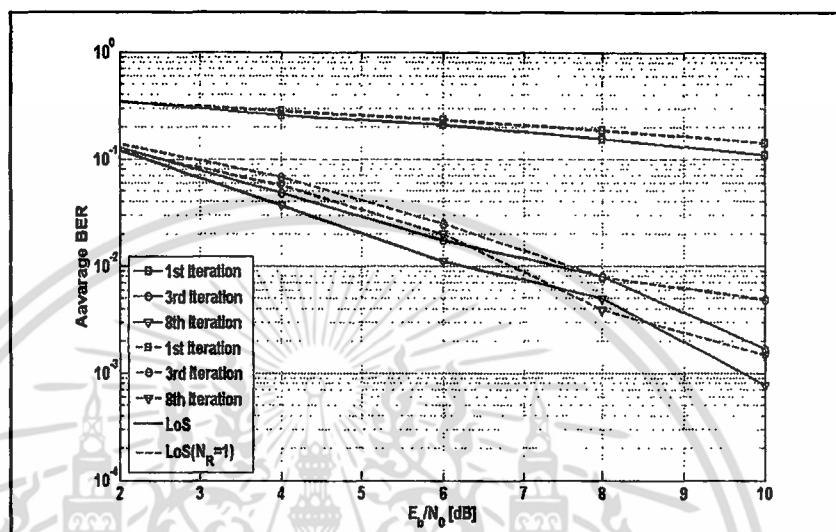
รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ใช้รีเลย์จำนวน 3 ($N_R = 3$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.16 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS และใช้รีเลย์จำนวน 3 ($N_R = 3$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากันคือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX} = 2$) และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) ตามลำดับ โดยทำการปรับค่าสัญญาณ E_b/N_0 ระหว่าง 2 – 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลอง เครื่องรับที่มีการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์มาก จะมีอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่มากกว่าเครื่องรับที่มีอัตราขยายน้อยกว่า แสดงว่าการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์จะเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนในระบบด้วย

4.4.2 การเปรียบเทียบระหว่างเครื่องรับแบบปรับตัวได้โดยใช้เครือข่ายรีเลย์แบบร่วมมื่อ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR

4.4.2.1 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงที่ไม่ใช้รีเลย์ และใช้ รีเลย์ 1 ตัว โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR

2 x 2 MIMO, SR Algorithm

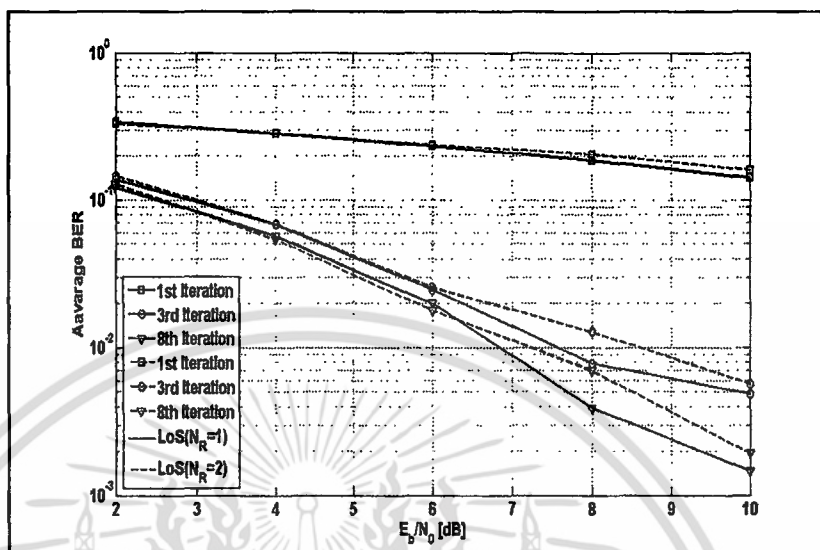


รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงโดยไม่ใช้รีเลย์ (LoS) และเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.17 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR โดยเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง โดยไม่ใช้รีเลย์ (LoS) และเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง โดยใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากันคือ 2 x 2 ($N_{TX} = 2, N_{RX}=2$) โดยทำการปรับค่าสัญญาณ E_b/N_0 ระหว่าง 2 - 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลองเครื่องรับที่มีรีเลย์ 1 ตัว จะมีอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่น้อยกว่าเครื่องรับที่ไม่ใช้รีเลย์ (LoS) แสดงว่าการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงโดยใช้รีเลย์ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการลดค่าเฉลี่ยอัตราผิดพลาดของบิตข้อมูลได้

4.4.2.2 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ซึ่งใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ตัว ตามลำดับ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR

2 x 2 MIMO, SR Algorithm

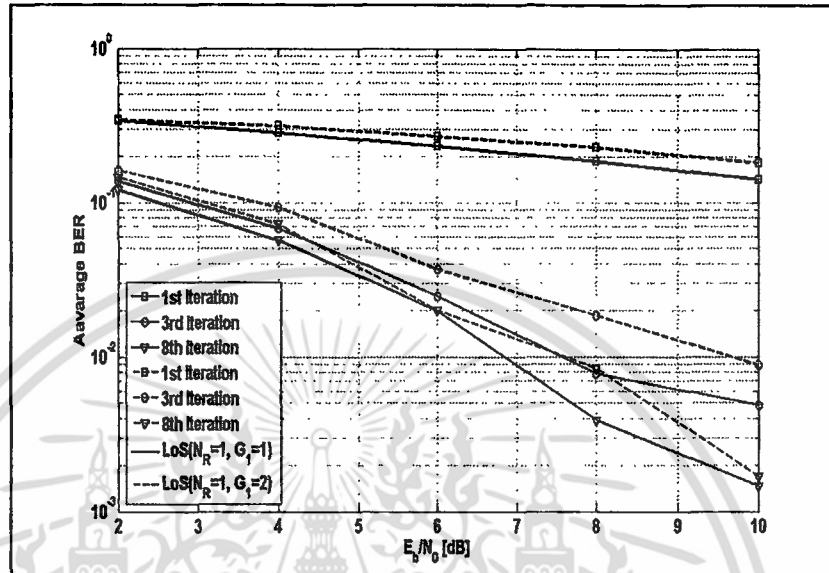


รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ($N_R = 1, 2$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.18 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR ใช้รีเลย์จำนวน 1 และ 2 ($N_R = 1, 2$) ตัว ตามลำดับ มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากันคือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX} = 2$) จากรูปผลการทดลองเครื่องรับที่มีรีเลย์น้อยกว่า จะมีอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่น้อยกว่า เครื่องรับที่มีรีเลย์มากกว่า แสดงว่าการเพิ่มจำนวนรีเลย์ ทำให้ประสิทธิภาพค่าเฉลี่ยอัตราผิดพลาดของบิตข้อมูลลดลง

4.4.2.3 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ซึ่งใช้รีเลย์จำนวน 1 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้ อัลกอริทึมแบบ SR

2 x 2 MIMO, SR Algorithm

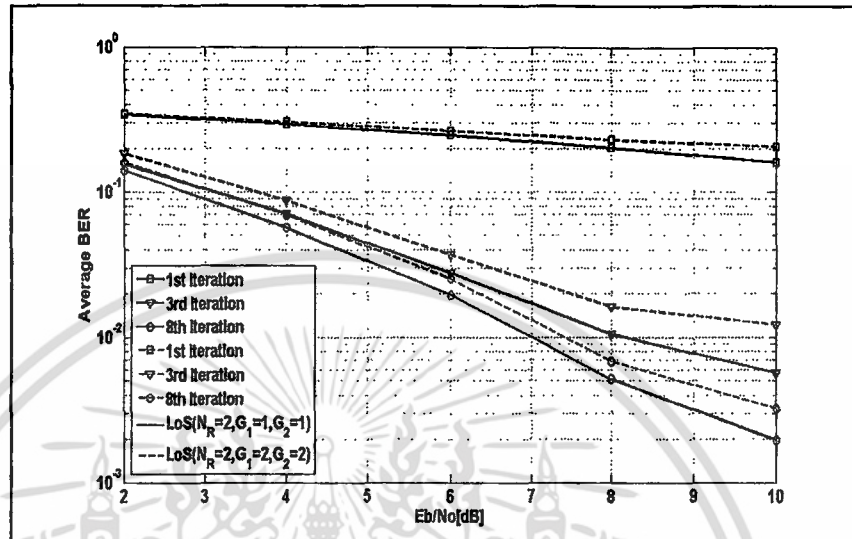


รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.19 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR และใช้รีเลย์จำนวน 1 ($N_R = 1$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากันคือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX} = 2$) และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) ตามลำดับ โดยทำการปรับค่าสัญญาณ E_b/N_0 ระหว่าง 2 - 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลอง เครื่องรับที่มีการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์มาก จะมีอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่สูงกว่าเครื่องรับที่มีอัตราขยายน้อยกว่า แสดงว่าการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์จะเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนในระบบด้วย

4.4.2.4 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ซึ่งใช้รีเลย์จำนวน 2 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้ อัลกอริทึมแบบ SR

2 x 2 MIMO, SR Algorithm

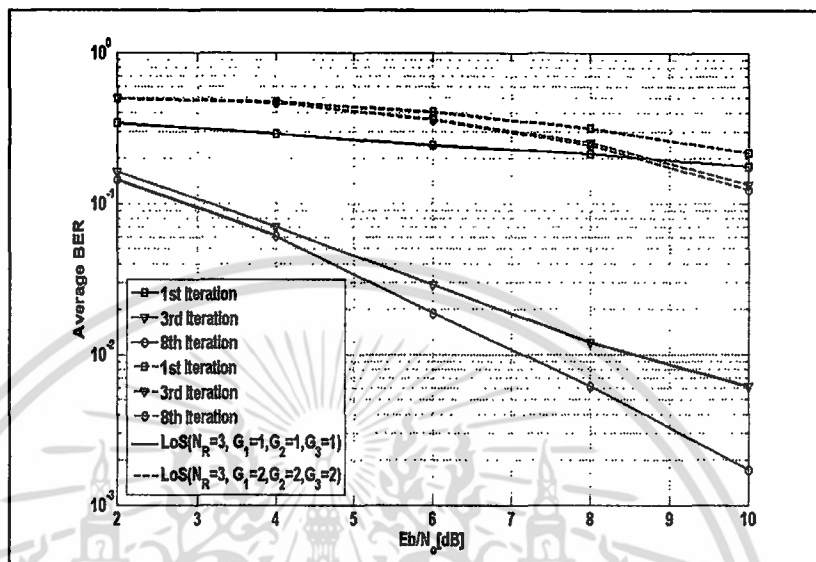


รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบอัตราการผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ใช้รีเลย์จำนวน 2 ($N_R = 2$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.20 เป็นการเปรียบเทียบอัตราการผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR และ ใช้รีเลย์จำนวน 2 ($N_R = 2$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวน เท่ากันคือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX} = 2$) และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) ตามลำดับ โดยทำการปรับค่าสัญญาณ E_b/N_0 ระหว่าง 2 - 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลอง เครื่องรับที่มีการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์มากจะมีอัตราการผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่มากกว่าเครื่องรับที่มีอัตราขยายน้อยกว่า แสดงว่าการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์จะเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนในระบบด้วย

4.4.2.5 การเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ซึ่งใช้รีเลย์จำนวน 3 ตัว และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์ต่างกัน โดยใช้ อัลกอริทึมแบบ SR

2 x 2 MIMO, SR Algorithm



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR กรณีเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง ใช้รีเลย์จำนวน 3 ($N_R = 3$) ตัว และเพิ่มอัตราการขยายที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.21 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ของเครื่องรับแบบปรับตัวได้ ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา โดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR และใช้รีเลย์จำนวน 3 ($N_R = 3$) ตัว มีการวนซ้ำ 1 3 และ 8 รอบ ใช้เสาอากาศในการส่งและรับจำนวนเท่ากันคือ 2×2 ($N_{TX} = 2, N_{RX} = 2$) และเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์เป็น 1 และ 2 ($G=1, 2$) ตามลำดับ โดยทำการปรับค่าสัญญาณ E_b/N_0 ระหว่าง 2 – 10 เดซิเบล จากรูปผลการทดลอง เครื่องรับที่มีการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์มากจะมีอัตราความผิดพลาดของบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่มากกว่าเครื่องรับที่มีอัตราขยายน้อยกว่า แสดงว่าการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณที่รีเลย์จะเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนในระบบด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอเครื่องรับแบบปรับตัวได้แบบปริภูมิเวลาสำหรับเครือข่ายแบบร่วมมือให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นด้วยวิธีปรับแต่งช่องสัญญาณด้วยตัวกรองที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (Least mean square (LMS) algorithm) และ อัลกอริทึมแบบไซน์รีเกรสเซอร์ (Sign Regressor (SR) Algorithm) มาใช้ในการประมาณค่าของช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณ โดยกำหนดให้ระบบเครื่องส่งข้อมูล จำนวน 1 เครื่อง และมี 1 2 และ 3 รีเลย์ (Relay) ตามลำดับ ซึ่งเป็นตัวช่วยในการส่งข้อมูล และมีเครื่องรับ 1 เครื่อง โดยใช้เสาอากาศระบบหลายทางเข้าหลายทางออก (Multiple Input Multiple Output : MIMO) เครื่องรับ 2 ต้น เครื่องส่ง 2 ต้น โดยมีโพรโทคอลการมอดูเลตแบบเลื่อนเฟส บนพื้นฐานการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบหลายทางโดยการแบ่งเวลา (TDMA) และใช้การส่งผ่านข้อมูลจากรีเลย์แบบขยายและส่งต่อ (Amplify and Forward) ไปยังเครื่องรับ มีการรวมสัญญาณแบบอัตราส่วนสูงสุด (Maximal Ratio Combining) การวัดประสิทธิภาพของสัญญาณสามารถวัดด้วยค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate : BER) โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบความเร็วในการลู่เข้า (Convergence speed) ของการส่งสัญญาณแบบร่วมมือ และได้แสดงแบบจำลองการส่งสัญญาณแบบร่วมมือไว้ 2 แบบ คือ แบบจำลองแบบสัญญาณโดยตรงขาดหาย (Direct link blocked) คือช่องสัญญาณที่มีการส่งสัญญาณ จากเครื่องส่งไปยังรีเลย์ และส่งต่อจากรีเลย์ไปยังเครื่องรับ โดยที่ช่องสัญญาณโดยตรงขาดหาย และแบบจำลองแบบการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง (Direct link) ช่องสัญญาณที่มีการส่งสัญญาณจากเครื่องส่งไปยังรีเลย์ ส่งต่อไปยังเครื่องรับ และจากช่องสัญญาณที่มีการส่งจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับโดยตรง

แบบจำลองแบบการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงขาดหาย โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS และ SR สามารถสรุปได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มจำนวนรีเลย์เพิ่มขึ้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการลดอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูลได้ และเมื่อการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณ จะทำให้ประสิทธิภาพการลดอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูลลดลงเนื่องจากการเพิ่มสัญญาณรบกวนไปด้วย

แบบจำลองแบบการเชื่อมต่อสัญญาณโดยตรง นั้นสรุปได้ว่า การใช้อัลกอริทึมแบบ LMS เมื่อเพิ่มจำนวนรีเลย์นั้นมีอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อใช้ลกอริทึมแบบ SR เมื่อเพิ่มจำนวนรีเลย์ทำให้อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูลลดลง และเมื่อการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณ จะทำให้ประสิทธิภาพการลดค่าเฉลี่ยบิตลดลงเนื่องจากการเพิ่ม

เอกสารนี้ สัญญาณรบกวนไปด้วย ทรัพยากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสรุปผลได้ว่า รูปแบบการทำงานร่วมกันของสัญญาณโดยใช้รีเลย์ในการขยายและส่งต่อ (Amplify and forward) โดยใช้เทคนิค MIMO และเครื่องรับแบบปรับตัวได้ที่มีการเข้ารหัสแบบประมวลผลหลายมิติแบบปริภูมิเวลา ซึ่งใช้วิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (Least mean square (LMS)) และ อัลกอริทึมแบบไซน์รีเกรสเซอร์ (Sign Regressor Algorithm (SR)) มีความเร็วในการลู่เข้าโดยใช้อัลกอริทึมแบบ SR มีประสิทธิภาพการลู่เข้าดีกว่าอัลกอริทึมแบบ LMS และ สามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูล ในการวนซ้ำในแต่ละรอบได้ เมื่อเมื่อมีการส่งสัญญาณโดยที่ไม่ใช้รีเลย์ และโดยการเพิ่มรีเลย์ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มรีเลย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้สูงขึ้นได้ และยังสามารถที่จะเพิ่มระยะการส่งของช่องสัญญาณได้ แต่เมื่อมีการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณ (Gain) ที่ตัวรีเลย์ทำให้อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูลมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการส่งสัญญาณที่ตัวรีเลย์เป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนทำให้อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูลมีมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูลที่เกิดขึ้นนี้มีแนวโน้มเป็นไปตามงานวิจัย[12]

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยที่ได้สรุปไปแล้วนั้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณ เพิ่มขึ้นทำให้เป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไปในระบบด้วย และทำให้อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้น ควรทำการศึกษาวิธีการลดสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายนั้นโดยวิธีการ เช่น

1. ควรใช้ค่าคำนวณและปรับปรุงการรันโปรแกรมด้วยการหาค่าการเพิ่มอัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณ (Gain)
2. ควรทดลองส่ง/รับ ข้อมูลด้วยการใช้โพรโทคอลการส่งผ่านข้อมูลแบบ Decode-and-Forward (DF) เพื่อช่วยลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ

บรรณานุกรม

- [1] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication :Performance criterion and code construction", *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 44, pp. 744-765, Mar. 1998.
- [2] G. J. Foschini and M. J. Gans, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi element antennas", *Bell Labs. Tech. J.*, vol. 1, pp. 41-59, Autumn 1996.
- [3] H. El Gamal and A. R. Hammons, Jr., "A new approach to Layered space-time coding and signal processing", *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 47, pp. 2321-2334, 2001.
- [4] S. Marinkovic, B. Vucetic, and A. Ushirokawa, "Space-time iterative and multistage receiver structures for CDMA mobile communication systems", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 19, pp. 1594-1604, 2001.
- [5] A. Wittneben and B. Rankov, "Impact of cooperative relays on the capacity of rank-deficient MIMO channels", in *Proc. 12th IST Summit on Mob. And Wirel. Comm.*, pp. 421-425, Jun. 15-18, 2003.
- [6] J. N. Laneman, D. N. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior", *IEEE Trans. Inform. Theory*, 2002.
- [7] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity-Part I & Part II", *IEEE Trans. Commun.*, 2003.
- [8] M. Jankiraman, *Space-time codes and MIMO systems*, 1st ed. London: Artech House, 2004.
- [9] A. Goldsmith, *Wireless Communications System*, 1st ed. Cambridge University Press, 2005.
- [10] B. Farhang-Boroujeny, "Adaptive Filters Theory and Applications", John Wiley & Sons, 1998.
- [11] S. Haykin, "Adaptive Filter Theory", 4th ed., Prentice-Hall, 2002.
- [12] I. Hammerstrom, M. K. B. Rankov and A. Wittneben, "Space-time processing for cooperative relay networks", *2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference, VTC 2003-Fall*, vol. 1, pp.404-408, Oct. 2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] T. Chakree, V. D. Pham and V. Branka, "An adaptive iterative receiver for space-time coding MIMO systems", *Journal of Telecom. and Inform. Tech*, vol.1, pp.54-59, 2006.
- [14] H. El. Gamal and E. Geraniotis, "Iterative multiuser detection for coded CDMA signals in AWGN and fading channels", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 18, pp. 30-41, 2000.
- [15] G. H. Golub and C. F. Van Loan, "Matrix Computations", 3rd ed. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1966.
- [16] S. Salivahanan, A. Vallavaraj, C. Gnanapriya, "Digital Signal Processing", McGraw-Hill International Edition, 2001.
- [17] ลัญฉกร วุฒิสหธิกุลกิจ "เทคโนโลยีโทรคมนาคม ทฤษฎีข่าวสารและการเข้ารหัส" สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2546.




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. R. Chaisong, C. Tekapakvisit and C. Benjangkprasert, "Adaptive Space-Time Receiver for Cooperative Relay Networks", ICCAS 2010, Korea, Oct. 27-30, 2010.
2. R. Chaisong, C. Tekapakvisit and C. Benjangkprasert, "Adaptive Space-Time Receiver for Cooperative Relay Networks Based on Signed Regressor Algorithm", ICIEE 2011, Thailand, May 28-29, 2011.

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ นางสาวชนิกร ชัยสงค์
- วัน เดือน ปีเกิด 30 กันยายน 2525 ที่จังหวัดกาฬสินธุ์
- ที่อยู่ 187 หมู่ 9 บ้านข้าวลื้อ ตำบลจำปาโมง อำเภอบ้านผือ จังหวัดอุดรธานี 41160
- ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2547 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
- พ.ศ. 2551 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขา วิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้