

การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์เคลื่อนที่
ที่ใช้การสลับโมโม่แบบปรับตัว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554

**COVERAGE PREDICTION OF ADAPTIVE MIMO
SWITCHING FOR MOBILE WIMAX SYSTEMS**



Pattaraporn Khakhai

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2011

ภัทรพร คำชาย : การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์เคลื่อนที่ที่ใช้การสลับ

โมโมแบบปรับตัว (COVERAGE PREDICTION OF ADAPTIVE MIMO SWITCHING FOR MOBILE WIMAX SYSTEMS)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิระพงษ์ อุฑารสกุล, 109 หน้า.

ปัจจุบันเทคโนโลยีการเข้าถึงสื่อสารไร้สายบรอดแบนด์ได้รับความนิยมในการใช้งาน และมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก การสื่อสารที่ให้ทั้งความสะดวก รวดเร็ว และมีความถูกต้องมากขึ้นเท่าไร ก็ยิ่งจะตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานมากขึ้นเท่านั้น รวมถึงการพัฒนาการให้บริการที่ดี ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของประสิทธิภาพในการรับ และส่งข้อมูลที่สูงขึ้น มีคุณภาพความน่าเชื่อถือในการให้บริการที่ดี อีกทั้งยังมีพื้นที่ในการให้บริการที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น ด้วยสมรรถนะของเทคโนโลยีไวแมกซ์ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจ และสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้บริการเหล่านี้ได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเทคโนโลยีนี้มาพัฒนาขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับ และส่งข้อมูลให้มีประสิทธิภาพตลอดการใช้งาน โดยจะนำเทคนิคโมโม (Multiple Input Multiple Output : MIMO) แบบวงเปิด (Open loop MIMO) เข้ามาใช้งานในระบบ ซึ่งเทคนิคโมโมแบบวงเปิดนี้ก็จะมียุสองประเภทหลักๆ ก็คือ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง (Spatial Multiplexing : SM) เป็นเทคนิคที่สามารถเพิ่มความเร็วในการรับ และส่งข้อมูลได้หลายเท่า และเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา (Space Time Coding : STC) เทคนิคนี้จะมีประสิทธิภาพในการช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการเฟด ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าทั้งสองเทคนิคนี้มีข้อดีข้อเสียที่ต่างกัน ทำให้เกิดเทคนิคใหม่ ซึ่งจะรวมเอาข้อดีของทั้งสองเทคนิคนี้ เข้ามาไว้ด้วยกัน ที่เรียกว่า การสลับโมโมแบบปรับตัว (Adaptive MIMO Switching : AMS) นอกจากนี้วิทยานิพนธ์นำเสนอถึงสมรรถนะของพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์เมื่อนำเทคนิคโมโมมาใช้งานด้วย รวมถึงการเสนอแนวคิดของการนำเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัวมาใช้ในการออกแบบระบบไวแมกซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับ และส่งข้อมูลที่ดีขึ้น

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

PATTARAPORN KHAKHAI : COVERAGE PREDICTION OF ADAPTIVE
MIMO SWITCHING FOR MOBILE WIMAX SYSTEMS. THESIS

ADVISOR : ASST. PROF. PEERAPONG UTHANSAKUL, Ph.D., 109 PP.

WIMAX/ADAPTIVE MIMO SWITCHING/COVERAGE AREA

Nowadays, the wireless broadband access technology becomes the most influence part of daily life. The user requirements on convenient, fast and precise system are the main drive of new coming technology. Also the system that can provide the more reliable coverage area gains more profits. Consequently, the WiMAX system is on focus due to its performance and supporting to all user requirements. Hence, this thesis aims to enhance the transmission efficiency of WiMAX by applying MIMO (Multiple Input Multiple Output) technique. In fact, the open loop MIMO system is categorized into 2 types including SM (Spatial Multiplexing) and STC (Space Time Coding). Both types have the different benefits which the adaptive MIMO switching can integrate both benefits into one system. In this thesis, the performance of WiMAX system when applying AMS technique is investigated. The simulation results indicate that better BER (Bit Error Rate) is achieved by using AMS. Furthermore, this thesis presents the coverage prediction of WiMAX system employing AMS technique which is useful for practical design.

School of Telecommunication Engineering Student's Signature _____

Academic Year 2011 Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ท่านได้ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษาในทุก ๆ เรื่อง ช่วยแนะแนวทางการแก้ปัญหา ให้ความรู้ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่มอบทุนสนับสนุนการศึกษาสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในระดับบัณฑิตศึกษาในครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีต และปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรม เลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษา โดยเป็นอย่างดีมาตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบผลสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา และขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีต และปัจจุบันที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักยิ่ง และเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ถ่ายทอด ประสพการณ์ และความรู้ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีต และปัจจุบัน รวมถึงมิตรสหายที่คอยให้กำลังใจ และเป็นเพื่อนที่ดีต่อผู้วิจัย จนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

ภัทรพร คำชาย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขีดตกลงเบื้องต้น.....	4
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 รายละเอียดวิทยานิพนธ์.....	4
2 เทคโนโลยีการสื่อสารระบบไวแมกซ์.....	6
2.1 หลักการพื้นฐานของระบบไวแมกซ์.....	6
2.2 มาตรฐานไวแมกซ์.....	7
2.2.1 แอร์อินเตอร์เฟซของมาตรฐานไวแมกซ์.....	8
2.2.2 โครงสร้างของระบบไวแมกซ์.....	11
2.3 เทคนิคโมโม.....	33
2.4 เทคนิคการส่งสัญญาณด้วยระบบโมโม.....	37
2.4.1 ระบบโมโมแบบวงเปิด.....	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 แบบจำลองช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบไวแมกซ์.....	41
2.5.1 แบบจำลอง Path loss Stanford University Interim (SUI).....	42
2.5.2 RMS delay spread.....	43
2.5.3 Fade distribution หรือ K-Factor.....	43
2.5.4 Antenna Gain Reduction Factor (GRF).....	44
2.5.5 แบบจำลองช่องสัญญาณ Modified Stanford University Interim (SUI)	44
2.6 สรุปเนื้อหาบทที่ 2.....	47
3 เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวในระบบไวแมกซ์.....	48
3.1 เทคนิคโมโม่ในระบบไวแมกซ์.....	48
3.2 โครงสร้างของระบบไวแมกซ์ที่เทคนิคโมโม่.....	50
3.2.1 เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา.....	51
3.2.2 เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง.....	56
3.3 เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัว.....	59
3.4 การทำนายพื้นที่ครอบคลุม.....	61
3.4.1 ขั้นตอนการทำนายพื้นที่ครอบคลุมเมื่อกำหนดระดับค่าอัตราความผิดพลาดบล็อก	63
3.4.2 ขั้นตอนการทำนายพื้นที่ครอบคลุมเมื่อกำหนดระยะทาง.....	63
3.5 สรุปเนื้อหาบทที่ 3.....	65
4 ผลการจำลองแบบ.....	66
4.1 การจำลองแบบระบบไวแมกซ์.....	66
4.2 การจำลองแบบระบบไวแมกซ์ที่ใช้เทคนิคโมโม่.....	67
4.3 การจำลองแบบโดยใช้ระบบโมโม่แบบวงเปิด.....	68
4.4 การจำลองแบบโดยใช้เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัว.....	74
4.5 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมเมื่อใช้เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัว	77

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 การจำลองแบบเพื่อทำนายพื้นที่ครอบคลุม.....	80
4.7 สรุปเนื้อหาบทที่ 4.....	86
5 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	88
5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	88
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	90
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	90
รายการอ้างอิง.....	91
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	93
ประวัติผู้เขียน.....	109

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงค่าของเวกเตอร์ฟังก์ชันสำหรับอัตราเร็วที่ต่างกันของการเข้ารหัสคอนโวลูชัน.....	21
2.2	ค่าพารามิเตอร์ a b และ c สำหรับช่องสัญญาณ SUI.....	43
2.3	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI.....	44
2.4	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI-3.....	46
3.1	การเปรียบเทียบจำนวนของสายอากาศส่ง และอัตราเร็วในการส่งข้อมูล.....	49
3.2	การเปรียบเทียบจำนวนของสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศภาครับ..... กับเทคนิคที่ใช้ในการส่งข้อมูล	49
3.3	แสดงรูปแบบเมตริกซ์ที่ใช้ในการเข้ารหัสของเทคนิคต่าง ๆ.....	50
4.1	แสดงจำนวนของบิตข้อมูลในแต่ละรูปแบบของการมอดูเลชัน.....	67
4.2	แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลองของระบบไวแมกซ์.....	67
4.3	แสดงรูปแบบของเทคนิคโมโม และรูปแบบของการมอดูเลชันที่..... สามารถสลับโหมดได้	73

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย.....	7
2.2	แสดงแผนภาพของภาคส่งระบบไวมัลท์.....	11
2.3	แผนภาพของการเข้ารหัส.....	12
2.4	แสดงการเข้ารหัสแบบ Convolution $K = 3$	15
2.5	ไคอะแกรมสถานะของการเข้ารหัส.....	18
2.6	ไคอะแกรมต้นไม้ของการเข้ารหัส.....	19
2.7	ไคอะแกรมทรลิสของการเข้ารหัส.....	20
2.8	การใช้งานไคอะแกรมทรลิส.....	20
2.9	Constellation Map ของ BPSK และ QPSK.....	22
2.10	Constellation Map ของ 16-QAM และ 64-QAM.....	23
2.11	การใส่ Cyclic prefix ในสัญลักษณ์ของ OFDM.....	25
2.12	แสดงแผนภาพของภาครับระบบไวมัลท์.....	26
2.13	การถอดรหัสแบบ Viterbi (1)	31
2.14	การถอดรหัสแบบ Viterbi (2)	31
2.15	การถอดรหัสแบบ Viterbi (3)	32
2.16	การถอดรหัสแบบ Viterbi (4)	32
2.17	การรับ และส่งข้อมูลแบบสายอากาศต้นเดียว และสายอากาศหลายต้น.....	33
2.18	ระบบโมโมที่ประกอบด้วยสายอากาศส่ง M ต้น และสายอากาศรับ N ต้น.....	35
2.19	การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา แบบ Alamouti.....	39
2.20	การทำงานของเข้ารหัสเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง.....	41
2.21	โครงสร้างของแบบจำลองช่องสัญญาณ SUI.....	45
3.1	โครงสร้างภาคส่งของระบบไวมัลท์ที่ใช้เทคนิคโมโม.....	51
3.2	โครงสร้างภาครับของระบบไวมัลท์ที่ใช้เทคนิคโมโม.....	51

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.3	ภาคส่ง และภาครับของเทคนิค STC..... ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 2 ต้น	52
3.4	ภาคส่ง และภาครับของเทคนิค STC..... ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น	54
3.5	ภาคส่ง และภาครับของเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 2 ต้น	57
3.6	ภาคส่ง และภาครับของเทคนิค SM..... ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น	58
3.7	โครงสร้างการทำงานของเทคนิค AMS.....	60
3.8	พื้นที่ครอบคลุมของเซลล์.....	62
3.9	ขั้นตอนการทำนายพื้นที่ครอบคลุมเมื่อกำหนดค่าระดับความผิดพลาดบล็อก.....	64
3.10	ขั้นตอนการทำนายพื้นที่ครอบคลุมเมื่อกำหนดค่าระยะทาง.....	65
4.1	BER VS Eb/No ของเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น..... และสายอากาศรับ 2 ต้น	69
4.2	BER VS Eb/No ของเทคนิค STC ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น..... และสายอากาศรับ 2 ต้น	70
4.3	BER VS Eb/No ของเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น..... และสายอากาศรับ 3 ต้น	70
4.4	BER VS Eb/No ของเทคนิค STC ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น..... และสายอากาศรับ 3 ต้น	71
4.5	BER VS Eb/No ของเทคนิค STC และ เทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น..... และสายอากาศรับ 2 ต้น	71
4.6	BER VS Eb/No ของเทคนิค STC และ เทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น..... และสายอากาศรับ 3 ต้น	72
4.7	รูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้ระหว่างเทคนิค STC และ เทคนิค SM..... ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศภาครับ 2 ต้น	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.8	รูปแบบที่สามารถสลัป โหมดกัน ได้ระหว่างเทคนิค STC และ เทคนิค SM..... ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศภากรับ 3 ต้น	73
4.9	รูปแบบ A ร่วมกับเทคนิค AMS.....	75
4.10	รูปแบบ B ร่วมกับเทคนิค AMS.....	76
4.11	รูปแบบ C ร่วมกับเทคนิค AMS.....	76
4.12	รูปแบบ D ร่วมกับเทคนิค AMS.....	77
4.13	การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค STC เทคนิค SM..... และเทคนิค AMS ของรูปแบบ A	78
4.14	การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค STC เทคนิค SM..... และเทคนิค AMS ของรูปแบบ B	79
4.15	การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค STC เทคนิค SM..... และเทคนิค AMS ของรูปแบบ C	79
4.16	การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค STC เทคนิค SM..... และเทคนิค AMS ของรูปแบบ D	80
4.17	พื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค AMS ที่ค่า SNR ต่างๆ กัน.....	86

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AMS	=	Adaptive MIMO Switching
ADSL	=	Asymmetric Digital Subscriber Line
BER	=	Bit Error Rate
BLER	=	Block Error Rate
BPSK	=	Binary Phase Shift Keying
CIR	=	Channel Impulse Response
DSL	=	Digital Subscriber Lines
FFT	=	Fast Fourier Transform
FDD	=	Frequency Division Duplex
IFFT	=	Inverse Fast Fourier Transform
K	=	Constraint Length
LOS	=	Line Of Sight
MAC	=	Medium Access Control
MISO	=	Multiple Input Single Output
MIMO	=	Multiple Input Multiple Output
NLOS	=	Non Line Of Sight
OFDM	=	Orthogonal Frequency Division Multiplex
PRBS	=	Pseudo-Random Binary Sequence
QPSK	=	Quadrature Phase Shift Keying
RS	=	Reed Solomon
SM	=	Spatial Multiplexing
STC	=	Space-Time Coding
SISO	=	Single Input Single Output
SIMO	=	Single Input Multiple Output
STTC	=	Space Time Trellis Code
STBC	=	Space Time Block Code

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

SUI	=	Stanford University Interim
SNR	=	Signal to Noise Ratio
TDD	=	Time Division Duplex
TDMA	=	Time Division Multiple Access
WMAN	=	Wireless Metropolitan Area Network
WLAN	=	Wireless Local Area Network
WiMAX	=	Worldwide interoperability for Microwave Access
16-QAM	=	16-Quadrature Amplitude Modulation
64-QAM	=	64-Quadrature Amplitude Modulation
τ_{rms}	=	rms delay spread
R	=	อัตราการเข้ารหัส
x	=	สัญญาณทางเวลา
X	=	สัญญาณทางความถี่
H	=	เมตริกซ์ช่องสัญญาณ

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงความเป็นมาและความสำคัญ เหตุจูงใจสำหรับการทำงานวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วย ความเป็นมาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการเข้าถึงสื่อสารไร้สายบรอดแบนด์ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลาย และมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก การสื่อสารที่ให้ทั้งความสะดวก รวดเร็ว และมีความถูกต้องมากขึ้นเท่าไร ก็ยิ่งจะตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานมากขึ้นเท่านั้น แต่การที่จะตอบสนองเพื่อให้เกิดประโยชน์กับผู้ใช้งานได้นั้น ยังต้องอาศัยการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของประสิทธิภาพในการรับ และส่งข้อมูลที่สูงขึ้น มีคุณภาพความน่าเชื่อถือในการให้บริการที่ดีในระบบ อีกทั้งยังมีพื้นที่ในการให้บริการที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น จากการศึกษาพบว่า เทคโนโลยีไวแมกซ์นั้น เป็นเทคโนโลยีบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงที่ถูกพัฒนาขึ้นตามมาตรฐาน IEEE 802.16 ที่สามารถรองรับการใช้งานขณะที่เคลื่อนที่ได้ และยังสามารถกระจายสัญญาณในลักษณะจากจุดเดียวไปยังหลายจุด (Point-to-Multipoint) ได้พร้อม ๆ กัน โดยมีความสามารถรองรับกับการทำงานแบบที่ไม่อยู่ในระดับสายตา (Non-Line-of-Sight) จะทำงานได้แม้กระทั่งมีสิ่งกีดขวาง (ต้นไม้ และ อาคาร) ได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังสามารถส่งข้อมูลได้ไกลถึง 50 กิโลเมตร โดยประมาณ ด้วยอัตราความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลถึง 75 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) โดยการรับ และส่งข้อมูลนั้นก็จำเป็นต้องผ่านช่องสัญญาณสื่อสารแบบไร้สาย แต่เนื่องจากคุณลักษณะของช่องสัญญาณไร้สายที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบต่างๆ อย่างเช่น สิ่งแวดล้อมทางกายภาพ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ภาครับหรือภาคส่งรวมถึงอุณหภูมิ เป็นต้น เป็นผลให้สัญญาณข้อมูลที่ถูกตรวจจับได้ ณ ภาครับมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิม ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยี และวิธีการต่างๆ ขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหานี้

เทคนิค OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) เป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจในการแก้ปัญหาดังกล่าว เทคนิค OFDM สำหรับระบบไวแมกซ์เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ประโยชน์จากความถี่เล็กๆ ซึ่งเรียกว่า คลื่นพาหะย่อย (Sub-carrier) เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์

สูงสุดจากการใช้งานช่องสัญญาณ โดยมีการแบ่งความถี่ออกเป็นแถบความถี่ย่อย ๆ แล้วแยกส่งข้อมูลออกหลาย ๆ ช่อง โดยภาคส่งนั้นมีการแปลงชุดข้อมูลแบบอนุกรมให้เป็นแบบขนาน และนำข้อมูลที่ได้ออกไปทำการมอดูเลต จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้ไปทำการแปลง IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) ซึ่งเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์จนกระทั่งได้แซมปลิงสัญญาณที่ความถี่ต่างๆที่ส่งจากกันออกมาเนื่องจากสภาพแวดล้อมรอบๆ ภาคส่ง และภาครับ เช่น สิ่งกีดขวาง, ผนัง, กำแพง หรือตึกรามบ้านช่อง สิ่งเหล่านี้ก่อให้เกิดการเฟดของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี (Multipath propagation) การแทรกสอดระหว่างสัญญาณเป็นอีกปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลกระทบดังกล่าว จึงมีการเสริมสร้างไซคลิกเข้าไปที่เฟรมข้อมูล และแปลงชุดข้อมูลจากแบบขนานไปเป็นแบบอนุกรมก่อนทำการส่งผ่านสายอากาศไปยังภาครับ เมื่อสัญญาณผ่านเข้ามาที่ภาครับแล้วจะมีการแปลงชุดข้อมูลจากแบบอนุกรมไปเป็นแบบขนาน และทำการถอดไซคลิกออกจากนั้นจึงนำข้อมูลไปทำการแปลง FFT (Fast Fourier Transform) และทำการดีมอดูเลตพร้อมทั้งแปลงจากชุดข้อมูลแบบขนานไปเป็นแบบอนุกรมจึงได้ข้อมูลเดิมกลับมา อย่างไรก็ตามการที่จะทำให้ระบบไวแมกซ์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ก็ยังต้องอาศัยเทคนิคอื่น ๆ เพิ่มเติม ซึ่งระบบไวแมกซ์นั้นได้นำเทคนิคไม โม (Multiple Input Multiple Output : MIMO) เข้ามาเป็นทางเลือกในการใช้งานจริง

เทคนิคไม โมแบบวงเปิด (Open loop MIMO) มีสองประเภทใหญ่ๆคือ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง (Spatial Multiplexing : SM) เป็นการส่งข้อมูลโดยการแยกสัญญาณที่จะส่งออกเป็นสองชุดแยกจากกันเพื่อส่งผ่านสายอากาศในแต่ละต้น ซึ่งจะสามารถเพิ่มความเร็วในการรับ และส่งข้อมูลได้หลายเท่า และอีกประเภทก็คือ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา (Space Time Coding : STC) เป็นเทคนิคที่อยู่บนพื้นฐานของวิธีการทำไคเวอร์ซิตีทางด้านส่ง ซึ่งเป็นการรวมเอาการออกแบบรหัสช่องสัญญาณ และการใช้สายอากาศหลายต้นเข้าด้วยกัน โดยจะใช้สายอากาศส่งหลายๆ ต้น และสายอากาศรับต้นเดียว หรือหลาย ๆ ต้น ร่วมกับการใช้ไคเวอร์ซิตีทางด้านเวลา โดยอาศัยหลักการที่ว่า ถ้าหากตั้งสายอากาศส่ง และรับให้มีความเป็นอิสระเชิงตำแหน่งแล้ว สัญญาณจากสายอากาศส่งแต่ละตัว ที่ส่งไปยังสายอากาศรับแต่ละตัว จะต้องได้รับผลกระทบจากการเฟดที่แตกต่างกัน เพื่อให้ข้อมูลที่ถูกลงไป ณ เวลาหนึ่งๆ ในแต่ละเส้นทาง ไม่ถูกรบกวนจนทำให้สูญเสียไปพร้อมกันหมดทุกเส้นทาง ดังนั้น การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา จึงมีประสิทธิภาพในการช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการเฟดของสัญญาณ การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา แบบ Alamouti เป็นรูปแบบหนึ่ง ในรูปแบบของการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ซึ่งเป็นรหัสที่ได้รับการออกแบบ โดยใช้หลักการของไคเวอร์ซิตีเชิงตำแหน่ง (space diversity) ที่มีรูปแบบเรียบง่าย และให้สมรรถนะที่ดีขึ้นกว่าระบบที่มีการใช้สายอากาศส่งเพียงต้นเดียว รหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบ Alamouti นี้ถูกคิดค้นขึ้นโดย (Siavash M, Alamouti., 1998; Vahid Tarokh, Hamid

Jafarkhani, and A.R. Calderbank., 1999) ที่ออกแบบมาเพื่อใช้กับระบบสื่อสารที่ใช้สายอากาศภาคส่ง 2 ต้น ในขณะที่ภาครับจะใช้สายอากาศจำนวนเท่าใดก็ได้ ตามต้องการ โดยรหัสดังกล่าวนี้มีคุณลักษณะเฉพาะตัวที่น่าสนใจคือ การถอดรหัสเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (optimal decoding) ซึ่งสามารถกระทำได้ โดยกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ด้วยเทคโนโลยีไวแมกซ์นี้สามารถรองรับจำนวนสายอากาศส่งได้สูงสุดถึง 4 ต้น จึงมีงานวิจัยนำเสนอถึงการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา โดยการใส่สายอากาศภาคส่งที่ 2, 3 และ 4 ต้น ผ่านช่องสัญญาณไร้สายไปยังสายอากาศรับจำนวน n ต้น (Vahid Tarokh, Hamid Jafarkhani, and A.R. Calderbank., 1999) ทั้งนี้แล้วเทคนิคโมโมแบบวงเปิดทั้งสองรูปแบบก็มีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันจึงได้มีเทคนิคใหม่ที่สามารถนำเอาข้อดีของทั้งสองเทคนิคนี้มารวมเข้าไว้ด้วยกัน เทคนิคนี้เรียกว่า การสลับโมโมแบบปรับตัว (Adaptive MIMO Switching : AMS) ได้นำเสนอหลักเกณฑ์สำหรับการเลือกระหว่างทั้ง 2 เทคนิคนี้เข้าไว้ด้วยกัน โดยใช้หลักการหาค่าระยะทางยูคลิดที่ต่ำที่สุดมาใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกรูปแบบเพื่อให้ได้ระบบที่ดีและเหมาะสมในการทำงานขณะนั้น (R.W. Heath Jr, and A.J. Paulraj., 2005) นอกจากนี้แล้วยังมีงานวิจัยอีกจำนวนหนึ่งที่น่าเอาเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัวเข้าไปใช้งาน และได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคดังกล่าวนี้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานได้ดีกว่าการเลือกใช้งานเทคนิคโมโมเพียงรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งเท่านั้น (Prabaagarane,N., Ramakrishnan,M., Karthika,S., Janani,U,G., Janaki,S., 2008) จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจที่จะนำเทคนิคดังกล่าวนี้มาใช้ในงานวิจัยโดยเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการรับ และส่งข้อมูลในระบบไวแมกซ์ให้ยังคงมีประสิทธิภาพดีในการใช้งาน และยังได้ศึกษาถึงพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ที่เกิดขึ้น เมื่อนำเทคนิคโมโมดังกล่าวเข้ามาใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงสมรรถนะของระบบไวแมกซ์ ที่มีการใช้เทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัว และการทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ โดยรายละเอียดสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาระบบไวแมกซ์ให้มีประสิทธิภาพในการรับ และส่งข้อมูลดีขึ้น โดยนำเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัวเข้ามาใช้งาน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาถึงพื้นที่ครอบคลุมที่เกิดขึ้นในระบบไวแมกซ์ เมื่อนำเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัวเข้ามาใช้งาน

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 เทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการรับ และส่งข้อมูล คือ เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัว เพราะมีข้อดีกว่าการเลือกใช้เทคนิค โมโม่เพียงรูปแบบเดียว
- 1.3.2 ศึกษาถึงพื้นที่ครอบคลุมของระบบ ไวมแมกซ์ เมื่อนำเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวเข้ามาใช้งาน
- 1.3.3 จำลองระบบ ไวมแมกซ์ด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองแบบ

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาหลักการนำเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวเข้ามาใช้งานในระบบ ไวมแมกซ์
- 1.4.2 วิเคราะห์การทำนายพื้นที่ครอบคลุมที่ได้จากการนำเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวเข้ามาใช้งานในระบบ ไวมแมกซ์
- 1.4.3 การจำลองแบบระบบ ไวมแมกซ์นั้นจะใช้สายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้น และจำนวนของสายอากาศภาครับที่ 2 ต้น และ 3 ต้น
- 1.4.4 ใช้โปรแกรมแมทแลป (MATLAB) ในการจำลองแบบระบบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับ และส่งข้อมูลในระบบ ไวมแมกซ์
- 1.5.2 ได้วิธีการวิเคราะห์การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบ ไวมแมกซ์ ที่นำเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวเข้ามาใช้งาน
- 1.5.3 เป็นแนวทางการวิจัย และประยุกต์ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการรับ และส่งข้อมูลในระบบ ไวมแมกซ์ รวมถึงการทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบ ไวมแมกซ์ต่อไป

1.6 รายละเอียดวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย 5 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย ซึ่งจะเน้นไปที่ระบบไวแมกซ์ โครงสร้างของระบบทั้งภาคส่ง และภาครับสัญญาณ ระบบการสื่อสารไร้สายแบบหลายสายอากาศ ส่ง และหลายสายอากาศรับที่เรียกว่า ระบบไมโม เทคนิคที่ใช้ในการส่งสัญญาณของระบบไมโม และช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบไวแมกซ์

บทที่ 3 กล่าวถึงระบบไมโมที่สามารถใช้งานร่วมกับระบบไวแมกซ์ แนวคิดในการนำเทคนิคไมโมมาใช้ในระบบไวแมกซ์ เทคนิคที่ใช้ส่งสัญญาณของระบบไมโมทั้งเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง รวมถึงการใช้เทคนิคการสลับไมโมแบบปรับตัว การวิเคราะห์เพื่อการทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ ที่เสนอในวิทยานิพนธ์

บทที่ 4 กล่าวถึงการจำลองระบบไวแมกซ์ที่นำเทคนิคไมโมแบบวงเปิดเข้ามาใช้งาน โดยจะทำการเปรียบเทียบรูปแบบทั้งหมด และทำการคัดเลือกรูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้เพื่อเลือกรูปแบบดังกล่าวไปใช้กับเทคนิคการสลับไมโมแบบปรับตัว รวมไปถึงการทำนายถึงพื้นที่ครอบคลุมที่เกิดขึ้นเมื่อนำเทคนิคการสลับไมโมแบบปรับตัวมาใช้งานในระบบไวแมกซ์ด้วย

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ยังรวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้น ข้อเสนอแนะแนวทางในการแก้ไข และแนวทางการพัฒนาในอนาคต



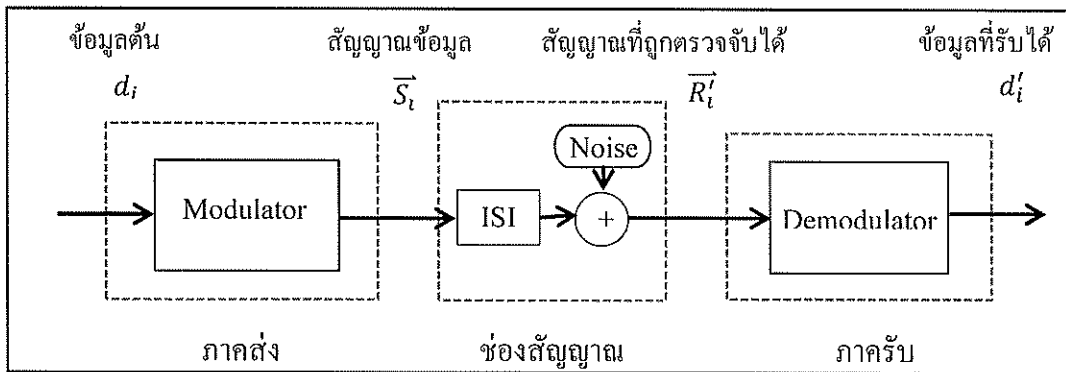
บทที่ 2

เทคโนโลยีการสื่อสารระบบไวแมกซ์

สำหรับในบทนี้ จะกล่าวถึง หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย ในวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นไปที่เทคโนโลยีไวแมกซ์ โดยจะกล่าวถึงการสื่อสารไร้สายระหว่างอุปกรณ์สื่อสารกับสถานีฐาน โครงสร้างเฟรม (Frame structure) และโครงสร้างของระบบไวแมกซ์ ซึ่งก็จะแบ่งออกเป็น โครงสร้างของภาคส่ง และ โครงสร้างของภาครับ พร้อมทั้งการนำเทคนิคโมโมเข้ามาใช้งานในระบบไวแมกซ์ และช่องสัญญาณที่ใช้ในการรับ และส่งข้อมูล

2.1 หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย

ในการออกแบบ และใช้งานระบบสื่อสารไร้สายเพื่อรับ และส่งข้อมูลดิจิทัลนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบสื่อสาร เช่น ขนาดแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของช่องสัญญาณที่ใช้งาน อัตราเร็วในการส่งข้อมูล และกำลังส่ง เป็นต้น โดยจะต้องมีการออกแบบให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้งานระบบสื่อสารนั้นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่เป็นการรบกวนช่องสัญญาณอื่นๆ ดังนั้นข้อมูลดิจิทัล d_i ต้องผ่านกระบวนการมอดูเลชัน (Modulation) ก่อนถูกส่งผ่านระบบสื่อสาร เพื่อแปลงข้อมูลให้กลายเป็นสัญญาณข้อมูล S_i ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการส่งผ่านช่องสัญญาณ และเมื่อสัญญาณข้อมูล R_i ถูกตรวจจับได้ที่ภาครับ ก็จะถูกนำมาผ่านกระบวนการ ดีมอดูเลชัน (Demodulation) เพื่อแปลงสัญญาณข้อมูลให้กลายเป็นข้อมูลดิจิทัล d'_i เพื่อนำไปใช้งานต่อไป โดยจะพบว่า ข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากทำงานของภาครับนั้น อาจมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไป เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ถูกส่งออกไปจากภาคส่ง ซึ่งเกิดมาจากผลขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบสื่อสาร สำหรับองค์ประกอบหลักที่ส่งผลให้ข้อมูลที่ถูกส่งผ่านมา เกิดความผิดพลาดขึ้นนั้น เกิดมาจากการถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวน (Noise) และเกิดจากลักษณะในการส่งข้อมูลที่สัญญาณข้อมูลสามารถเดินทางไปถึงภาครับได้จากหลายวิถีด้วยกัน (Multi-path) โดยที่ในแต่ละเส้นทางนั้น อาจจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณในลักษณะของการซ้อนทับระหว่างสัญญาณขึ้น



รูปที่ 2.1 การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย

2.2 มาตรฐานไวแมกซ์

แต่เดิมนั้นระบบไวแมกซ์นั้นจะมุ่งเน้นการใช้งานแบบประจำที่ ซึ่งอุปกรณ์ของผู้ใช้บริการจะติดตั้งอยู่กับที่ในลักษณะภายนอกอาคารเป็นหลัก ก่อนที่จะพัฒนาไปเป็นการใช้งานภายในอาคาร แล้วจึงพัฒนาออกแบบให้สามารถใช้งานแบบเคลื่อนที่ได้ มาตรฐาน IEEE 802.16 หรือ ไวแมกซ์ เป็นมาตรฐานเทคโนโลยีล่าสุดมาตรฐานหนึ่ง ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ของสหรัฐอเมริกาเริ่มเผยแพร่ในปี ค.ศ. 2001 โดยในขณะเดียวกัน European Telecommunications Standards Institute (ETSI) ก็ได้พัฒนามาตรฐานเทคโนโลยีการเข้าถึงข้อมูลความเร็วสูงที่เรียกว่า HiperMAN คู่ขนานกันไปด้วย แต่ได้มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกันกับ IEEE อยู่ตลอดในปี ค.ศ. 2001 ภาคอุตสาหกรรม ซึ่งประกอบไปด้วย ผู้ผลิตอุปกรณ์ ผู้พัฒนา chipset และผู้ประกอบการ ได้รวมตัวกันก่อตั้ง WiMAX Forum (Worldwide Interoperability for Microwave Access Forum) เป็นองค์กรที่ไม่แสวงหาผลกำไร มีเป้าหมายเพื่อสนับสนุน และพัฒนาอุปกรณ์เครือข่ายให้มาตรฐานในกลุ่ม IEEE 802.16 เป็นไปในแนวทางเดียวกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้อุปกรณ์จากผู้ผลิตต่าง ๆ สามารถใช้งานร่วมกันได้ เกิดความกลมกลืนของมาตรฐาน และมีราคาเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้น IEEE 802.16 จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ไวแมกซ์ แสดงได้ดังนี้

- **IEEE 802.16** เป็นมาตรฐานที่ให้ระยะทางการเชื่อมโยง 1.6 - 4.8 กิโลเมตร เป็นมาตรฐานเดียวที่สนับสนุน LOS (Line Of Sight) โดยมีการใช้งานในช่วงความถี่ที่สูงมากคือ 10 - 66 GHz

- **IEEE 802.16a** เป็นมาตรฐานที่แก้ไขปรับปรุงจาก IEEE 802.16 เดิม โดยใช้งานที่ความถี่ 2-11 GHz ซึ่งคุณสมบัติเด่นที่ได้รับการแก้ไขจากมาตรฐาน 802.16 เดิมคือคุณสมบัติการ

รองรับการทำงานแบบที่ไม่อยู่ในระดับสายตา NLOS (Non-Line-Of-Sight) ทั้งยังมีคุณสมบัติการทำงานเมื่อมีสิ่งกีดขวาง อาทิเช่น ต้นไม้, อาคาร ฯลฯ นอกจากนี้ก็ยังช่วยให้สามารถขยายระบบเครือข่ายเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตไร้สายความเร็วสูงได้อย่างกว้างขวางด้วยรัศมีทำการที่ไกลถึง 31 ไมล์ หรือประมาณ 48 กิโลเมตร และมีอัตราความเร็วในการรับ และส่งข้อมูลสูงสุดถึง 75 เมกะบิตต่อวินาที ทำให้สามารถรองรับการเชื่อมต่อการใช้งานระบบเครือข่ายของบริษัทที่ใช้สายประเภท T1 (T1-type) กว่า 60 ราย และการเชื่อมต่อแบบ DSL ตามบ้านเรือนที่พักอาศัยอีกหลายร้อยครัวเรือนได้พร้อมกันโดยไม่เกิดปัญหาในการใช้งาน

— **IEEE 802.16e** เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาให้สนับสนุนการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์พกพาประเภทต่างๆ เช่น อุปกรณ์พีดีเอ โน้ตบุ๊ก เป็นต้น โดยให้รัศมีทำงานที่ 1.6 – 4.8 กิโลเมตร มีระบบที่ช่วยให้ผู้ใช้งานนั้นสามารถสื่อสารได้โดยให้คุณภาพในการสื่อสารที่ดี และมีเสถียรภาพขณะใช้งาน แม้ว่าจะมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาก็ตาม มีการตั้งเสาสัญญาณไว้มากกระจายเป็นเครือข่ายครอบคลุมบริเวณที่ต้องการให้บริการ หรือนำเอามาใช้เพื่อเพิ่มระยะทางในการให้บริการให้ไกลขึ้นถึงชานเมือง หรือตั้งเสาไว้มากเพื่อรับส่งข้อมูล และกระจายต่อไปกับผู้ใช้งาน ADSL, DSL ในพื้นที่ที่ลากสายสัญญาณหลักเข้ามาลำบาก โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1) นำเอาระบบมาให้บริการอินเทอร์เน็ต โดยผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า Fix wireless access อุปกรณ์ตัวนี้จะเป็นตัวรับสัญญาณที่สามารถติดที่ไหนก็ได้ เช่น ข้างตัวบ้าน หรือตัวตึกแล้วรับสัญญาณไว้มาก นำไปกระจายต่อยังเครื่องคอมพิวเตอร์ต่าง ๆ ผ่านสวิทซ์ซึ่งตัวอุปกรณ์จะอยู่กับที่ไม่ได้ขยับไปไหน

2) จะมีการพัฒนาอุปกรณ์ลูกข่ายให้ใช้งานมาตรฐาน IEEE 802.16e เพื่อให้ใช้งานในขณะที่มีการเคลื่อนที่ และสามารถใช้งานข้ามเสาส่งสัญญาณได้ เช่น ขับรถไปรอบเมืองก็ยังใช้งานได้

2.2.1 แอร์อินเตอร์เฟสของมาตรฐานไว้มาก

แอร์อินเตอร์เฟสของมาตรฐานไว้มากได้ถูกกำหนดโดยมาตรฐาน IEEE 802.16e ซึ่งสามารถใช้งานในความถี่ 2 - 11 GHz ซึ่งในเรื่องนี้จะกล่าวถึงการทำงานในชั้น Medium Access Control (MAC) และชั้นกายภาพ (Physical)

ชั้น Medium Access Control

การส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานกับสถานีลูกข่าย มีสองทิศทางได้แก่ ขาขึ้น (uplink) คือ การส่งข้อมูลจากสถานีลูกข่ายไปสถานีฐาน และขาลง (downlink) คือ การส่งข้อมูลจากสถานีฐานไปสถานีลูกข่าย ดังนั้น Duplex scheme สำหรับการส่งสัญญาณขาขึ้น และขาลง มีได้สองรูปแบบหลัก ๆ คือ

1) **TDD (Time Division Duplex)** การส่งข้อมูลทางด้านขาขึ้นกับขาลงที่มีความถี่เดียวกัน แต่แบ่งกันส่งคนละช่วงเวลา การส่งนั้นจะถูกแบ่งช่วงเวลาออกเป็นเฟรม และในแต่ละเฟรมนั้นจะมีการแบ่งช่วงเวลาย่อยเป็นสองซับเฟรม การส่งข้อมูลในทิศทางขาขึ้นจะถูกส่งในช่วงเวลาซับเฟรมขาขึ้น (uplink subframe) ขณะที่การส่งข้อมูลทิศทางขาลง ส่งในช่วงเวลาซับเฟรมขาลง (downlink subframe) ดังนั้น TDD สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลาเฟรมได้ คือ สัดส่วนช่วงเวลาของซับเฟรมขาขึ้น กับ ซับเฟรมขาลง มีการเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นกับปริมาณทราฟฟิกของสัญญาณขาขึ้น และขาลง ดังนั้น TDD จึงมีความยืดหยุ่นในการจัดการแบนด์วิธ

2) **FDD (Frequency Division Duplex)** การส่งข้อมูลทางด้านขาขึ้นกับขาลงนั้นจะส่งในเวลาเดียวกัน แต่แบ่งกันส่งคนละความถี่ นอกจากนี้ FDD ยังรองรับอุปกรณ์ลูกข่ายที่เป็นแบบ Half-FDD คือ อุปกรณ์ลูกข่ายจะทำการส่งข้อมูล และรับข้อมูลคนละเวลากัน ขณะที่อุปกรณ์ลูกข่ายกำลังส่งข้อมูลจะไม่สามารถรับข้อมูลได้ แต่การส่ง และรับข้อมูลยังใช้คนละความถี่กัน การใช้รูปแบบ Half-FDD อุปกรณ์จะมีราคาถูกลงกว่า Full-FDD เพราะส่วนประกอบภาครับสัญญาณกับภาคส่งสัญญาณของอุปกรณ์สามารถใช้ชุดเดียวกันร่วมกันได้ ภายในเฟรมของทั้ง TDD และ FDD จะมีการแบ่งย่อยออกเป็น time slot ซึ่งการส่งข้อมูลของทั้งสถานีฐาน และสถานีลูกข่าย จะต้องส่งตรงตาม time slot ที่ว่านี้ ดังนั้นทั้งสถานีฐาน และสถานีลูกข่ายจะต้องมีการตั้งเวลาให้ตรงกัน เพื่อให้ส่งข้อมูลลงใน time slot ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

การเข้าถึงช่องสัญญาณสำหรับในทิศทางขาลงจะไม่ซับซ้อน เพราะทิศทางขาลงนั้นมีเพียงสถานีฐานผู้เดียวเท่านั้น ที่เป็นผู้ส่งข้อมูลในช่วงเวลาซับเฟรมขาลง และกระจายข้อมูลไปทุก ๆ สถานีลูกข่าย ส่วนการเข้าถึงช่องสัญญาณในทิศทางขาขึ้นนั้นมีหลาย ๆ สถานีลูกข่ายที่มีโอกาสที่จะส่งได้ในช่วงเวลาซับเฟรมขาขึ้นได้ ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการส่งข้อมูลจากหลายสถานีลูกข่ายในเวลาพร้อมกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลเกิดขึ้น ดังนั้นในการส่งข้อมูลในทิศทางขาขึ้นจึงจำเป็นต้องใช้ Time Division Multiple Access (TDMA) ช่วยจัดตารางเวลาของการส่งของสถานีลูกข่าย ตารางเวลาของการส่งนี้ถูกกำหนด และถูกควบคุมโดยสถานีฐาน ทุก ๆ ช่วงเวลา สถานีฐานจะส่งข้อความกระจายไปสถานีลูกข่าย ภายในข้อความจะประกอบไปด้วยตารางเวลาการส่งของสถานีลูกข่ายดังนั้นสถานีลูกข่ายจะทราบว่าควรส่งข้อมูลใน time slot ใด และจำนวน time slot เท่าไรซึ่งแสดงให้เห็นว่าสถานีฐานสามารถกำหนดช่วงเวลา และจำนวน time slot ให้แต่ละสถานีลูกข่ายให้เหมาะสมกับความต้องการแบนด์วิธของแต่ละสถานีลูกข่าย

นอกจากไวแมกซ์มีความยืดหยุ่นในการจัดการแบนด์วิธแล้ว ยังมีความยืดหยุ่นในการจัดการรูปแบบการรับส่งข้อมูล คือ ในทุก ๆ Time frame สถานีฐานจะทำการปรับเปลี่ยน

และกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของการรับส่งสำหรับแต่ละสถานีลูกข่าย เช่น ปรับเปลี่ยน Forward Error Correcting Code Rate ปรับเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลตให้เหมาะสมในแต่ละสภาพของช่องสัญญาณ ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลได้ดียิ่งขึ้น

ชั้นกายภาพ (Physical Layer : PHY)

มาตรฐาน IEEE 802.16 ได้กำหนด PHY เลขอร์ไว้ทั้งหมด 5 รูปแบบด้วยกัน คือ

1) **Wireless MAN SC** จะเป็นลักษณะของ Single Carrier ซึ่งเป็นรูปแบบของ 802.16 ตัวแรกสุดที่ได้กำหนดขึ้น โดยความถี่ที่ใช้งานจะอยู่ในย่านที่สูงกว่า 11 GHz สามารถที่จะทำงานได้ทั้งแบบ FDD หรือ TDD และไม่มีการใช้งาน OFDM

2) **Wireless MAN SCa** ได้ปรากฏอยู่ใน 802.16a เป็นการใช้งานแบบ Single Carrier เช่นกัน จึงไม่มีการใช้งาน OFDM โดยใช้งานกับความถี่ 2-11 GHz ที่ให้บริการแบบ Point to Multipoint และมีทั้งแบบ FDD และ TDD นับเป็นจุดเริ่มต้นของการใช้ไวแมกซ์แบบ Last Mile เป็นครั้งแรกเพื่อรองรับผู้ใช้งานทั่วไป

3) **Wireless MAN OFDM** เป็นการเพิ่มความสามารถของ OFDM เข้าไปใน 802.16a และใช้เป็นรากฐานจนถึงปัจจุบันที่เป็น 802.16e โดยการใช้งาน FFT ขนาด 256 เพื่อรองรับการใช้งานแบบ NLOS และแบบ Point to Multipoint ที่ความถี่ 2 - 11 GHz สามารถที่จะใช้ได้ทั้ง FDD หรือ TDD และออกมาใช้งานกันใน 802.16d เป็นครั้งแรก จึงอาจจะเป็นที่รู้จักกันในชื่อ Fixed WiMAX เพราะ 802.16d ยังให้บริการแบบไม่เคลื่อนที่อยู่นั่นเอง แต่จริง ๆ แล้วมันก็สามารถที่จะให้บริการแบบเคลื่อนที่ได้ ดังจะพบใน 802.16e และรองรับการเชื่อมต่อแบบ Mesh ได้ อีกด้วย

4) **Wireless MAN OFDMA** เป็นผลงานของ 802.16a อีกเช่นกัน โดยจะมีขนาด FFT เท่ากับ 2048 ใช้งานความถี่ 2 - 11 GHz รองรับได้ทั้ง FDD และ TDD และรองรับการใช้งานแบบเคลื่อนที่ได้ด้วย และในมาตรฐาน 802.16e ของปี ค.ศ. 2005 นั้นก็ได้มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบจาก OFDMA ปกติเป็น S-OFDMA นั่นคือ สามารถปรับเปลี่ยนขนาด FFT ได้ตั้งแต่ 256 512 1024 ไปจนถึง 2048 โดยการกำหนดช่วงห่างระหว่าง subcarrier ไว้ให้คงที่นั่นเอง ซึ่งจะทำให้มีความยืดหยุ่นไปตามสภาพของระบบแบนด์วิดท์ที่มีให้ และสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดีขึ้น เหมาะสมกับการใช้งานแบบเคลื่อนที่ได้ จึงทำให้ 802.16e ได้รับความสนใจเป็นอย่างสูง

5) **Wireless MAN Human** เป็นผลงานของ 802.16b ซึ่งไม่ได้มีการใช้งานในปัจจุบัน สามารถทำงานได้ในแบบ TDD เท่านั้น และใช้งาน OFDM หรือ OFDMA ได้ด้วย

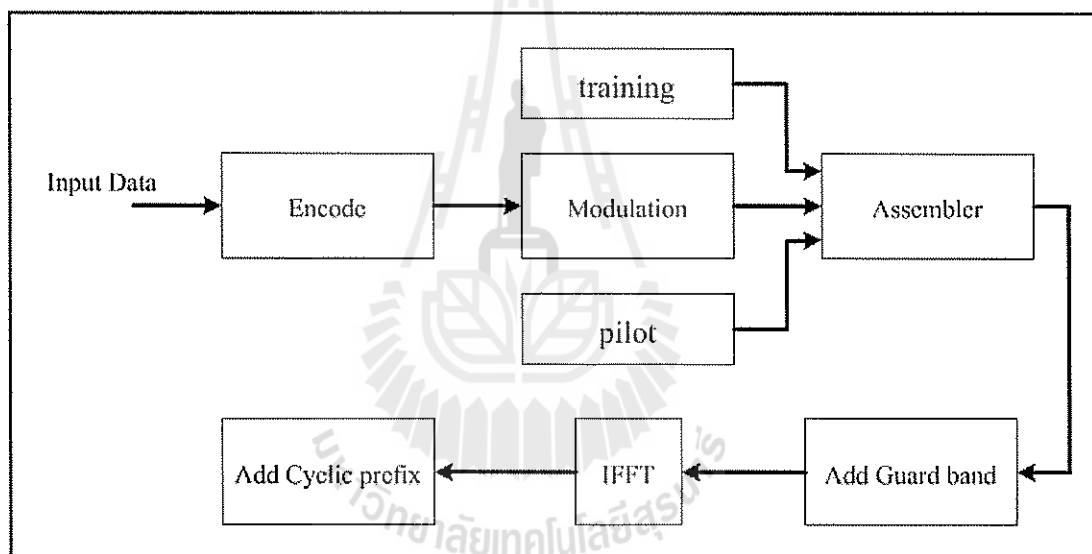
ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษา มาตรฐานไวแมกซ์ IEEE 802.16e โดยจำใช้ FFT ขนาด 256 และสามารถทำงานได้ที่ความถี่ที่ 2-11 GHz โดยให้รัศมีทางานที่ 1.6 - 4.8

กิโลเมตร ในมาตรฐานนี้สถานีลูกข่ายสามารถติดต่อสื่อสารกับสถานีฐานได้โดยไม่ต้องเป็นแบบ LOS

2.2.2 โครงสร้างของระบบไวแมกซ์

เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบไวแมกซ์ แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ภาคส่ง และภาครับ ซึ่งศึกษามาจากงานวิจัยของ Sakkarin Chaokuntod, (2009) **PAPR REDUCTION TECHNIQUE FOR ADAPTIVE MODULATION IN BROADBAND WIRELESS ACCESS**. Thesis for the Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering Suranaree University of Technology. p.4-41. โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

ภาคส่ง



รูปที่ 2.2 แผนภาพภาคส่งระบบไวแมกซ์

จากรูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพของภาคส่งของระบบไวแมกซ์ได้ดังนี้ คือ ขั้นตอนแรก จะทำการสุ่มข้อมูลขึ้นมา จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาเข้ารหัส (Encode) และก็นำข้อมูลไปมอดูเลตสัญญาณ (Modulation) โดยการมอดูเลตสัญญาณนี้มีทั้งหมด 4 รูปแบบที่ใช้คือ BPSK QPSK 16-QAM และ 64-QAM จากนั้นก็นำข้อมูลที่ได้มาทำการจัดเรียง (Assembling) ที่มีทั้งหมด 256 subcarriers จะประกอบไปด้วยข้อมูล 192 subcarrier 1 zero DC subcarrier 8 pilot subcarriers และ 55 guard carriers จากนั้นก็จะทำ การรวม subcarrier ทุก ๆ subcarrier เข้าด้วยกัน และนำไป

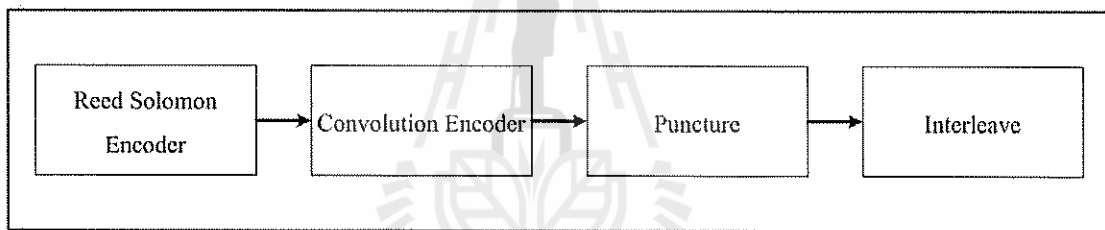
ผ่านการทำกระบวนการ IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) สุดท้ายก็จะทำการเพิ่ม cyclic prefix เข้าไปเพื่อช่วยลดผลกระทบจากการรบกวนกันระหว่างสัญญาณ

1) แหล่งกำเนิด (Source)

ข้อมูลจะถูกสร้างขึ้นเป็นบิต จากนั้นก็จะทำการสุ่มข้อมูลซึ่งเปรียบเสมือนเป็นการเข้ารหัส (Encryption) ในระดับเลเยอร์แรกของข้อมูล เพื่อสร้างความปลอดภัยจากการดักฟังข้อมูลต่าง ๆ หลังจากนั้นก็จะส่งต่อไปยังส่วนการเข้ารหัส

2) การเข้ารหัส (Encoding)

เพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือ และเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลจึงต้องมีการเพิ่มความสามารถที่จะตรวจจับ และแก้ไขข้อมูลที่ผิดพลาด ในส่วนการเข้ารหัสนี้จะประกอบไปด้วยการเข้ารหัสหลาย ๆ แบบ สามารถแสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งมีวัตถุประสงค์ และการใช้งานแตกต่างกัน ซึ่งมีการเข้ารหัสดังนี้



รูปที่ 2.3 แผนภาพของการเข้ารหัส

2.1) การเข้ารหัสแบบรีดโซโลมอน (Reed Solomon Encoder)

รหัสรีดโซโลมอนเป็นรหัสที่ไม่เป็นไบนารี (Nonbinary Cyclic Codes) แต่ละสัญลักษณ์จะมีจำนวน m บิต โดยที่ m เป็นจำนวนเต็มบวกมีค่ามากกว่า 2 ซึ่งรหัส RS (n, k) จะกระทำบนสัญลักษณ์ m บิต สำหรับทุก n และ k จะมีค่า $0 < k < n < 2^m + 2$ โดยที่ k คือ จำนวนสัญลักษณ์ของข้อมูลเริ่มต้นในการเข้ารหัส และ n คือ จำนวนรวมของสัญลักษณ์รหัสในบล็อกการเข้ารหัส สำหรับรูปแบบการเข้ารหัส RS (n, k) ที่ได้เป็น $(n, k) = (2^m - 1, 2^m - 1 - 2t)$ โดย t คือ สัญลักษณ์ความผิดพลาดที่สามารถแก้ไขได้ของรหัส $n - k = 2t$ เป็นจำนวนสัญลักษณ์ของรหัสแก้ไข (Parity) สำหรับรหัส RS นี้ มีระยะห่าง (Distance) ระหว่าง 2 Codeword จะกำหนดที่จำนวนสัญลักษณ์ที่แตกต่างในลำดับจะได้ระยะห่างต่ำสุด (Minimum distance) เป็น $d_{min} = n - k + 1$ เมื่อ t คือ จำนวนสูงสุดของสัญลักษณ์ที่สามารถเกิดการผิดพลาดได้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$t = \left\lceil \frac{d_{\min} - 1}{2} \right\rceil = \left\lceil \frac{n - k}{2} \right\rceil \quad (2.1)$$

ในการเข้ารหัสรีดโซโลมอนนั้นจะใช้พหุนามกำเนิด (Generator Polynomial) ของรหัสสามารถเขียนได้ดังนี้

$$g(x) = \sum_{i=0}^{2t} g_i x^i = g_0 + g_1 x + g_2 x^2 + \dots + g_{2t} x^{2t} \quad (2.2)$$

เมื่อ $g_i \in GF(2^m)$ คือรีของพหุนามจำนวนพหุนามกำเนิดคือ $2t$ ดังนั้นจึงสามารถที่จะกำหนดจากจำนวนรากที่ต่อเนื่องจำนวน $2t$ ราก หรือเมื่อเขียนเป็นรูปทั่วไปจะได้เป็น

$$g(x) = \prod_{i=j_0}^{j_0+2t-1} (x - \alpha^i) \quad (2.3)$$

ปกติแล้วจะให้ $j_0 = 1$ แต่บางกรณี $j_0 \neq 1$ ก็ได้ เช่น $2(j_0 + t) = 2^m$ กรณีต้องการสัมประสิทธิ์ $g(x)$ แบบสมมาตร สำหรับรูปแบบการเข้ารหัสรีดโซโลมอนนั้นจะมีรูปแบบการเข้ารหัส 2 รูปแบบคือ การเข้ารหัสเชิงระบบ และการเข้ารหัสโดยรีจิสเตอร์ โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดการทำงานแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. การเข้ารหัสเชิงระบบ

เนื่องจากว่ารหัสรีดโซโลมอนเป็นรหัสวนรอบ โดยจะเป็นการเลื่อนไปทางขวาของคำรหัส แต่คำรหัสก็ยังคงเป็นคำรหัสอยู่เช่นเดิม ถ้าเลื่อน k ข้อมูลไปจนขวาสุดแล้วเติมส่วน $2t$ ตำแหน่งทางด้านหน้า เราก็จะได้รหัสรีดโซโลมอนเชิงระบบ การกระทำดังกล่าวในทางคณิตศาสตร์คือการการทำ $X^{(n-k)}m(x)$ และถ้าหาร $X^{(n-k)}m(x)$ ด้วย $g(x)$ และมีเศษที่เหลือจากการหาร เราก็จะได้เศษจากการหารเป็น พาริตี (parity) ดังนี้

$$X^{(n-k)}m(x) = Q(x)g(x) + p(x) \quad (2.4)$$

เมื่อ $Q(x)$ คือ ผลที่ได้จากการหาร $g(x)$ คือ เศษที่เหลือจากการหาร ซึ่งจะสนใจเฉพาะเศษที่เหลือจึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$p(x) = X^{(n-k)}m(x) \bmod q(x) \text{ หรือ } p(x) = X^{2t}m(x) \bmod q(x) \quad (2.5)$$

ดังนั้นจะได้รหัสเชิงระบบแสดงได้เป็น

$$c(x) = p(x) + X^{2t}m(x) \quad (2.6)$$

2. การเข้ารหัสโดยรีจิสเตอร์

รีจิสเตอร์ป้อนกลับเลื่อนเชิงเส้น (Linear Feedback Shift Register: LFSR) ซึ่งใช้ในการคำนวณการหารเศษเหลือหรือมอดูโลสามารถนำมาใช้ในการเข้ารหัสได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะนำข้อมูลซึ่งมีดีกรีสูงเข้ามาก่อน และจะถูกส่งออกไปพร้อมๆกับการไหลตเข้าสู่วงจรหารเหลือเศษที่เป็นรีจิสเตอร์ป้อนกลับเลื่อนเชิงเส้น เมื่อครบจำนวน k ข้อมูล (หรือ k สัญญลักษณ์) แล้ว สวิตช์จะสลับไปทางตรงข้าม เพื่อให้ผลเศษหารเลื่อนออกไป จะสังเกตว่าเส้นทางข้อมูลทั้งหมด จะมีขนาดกว้างเท่ากับ m บิต และหากไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของพหุนามกำเนิดแล้ว วงจรคูณจะเป็นวงจรมูลค่าคงที่ (เพราะค่า g , คงที่) ซึ่งซับซ้อนน้อยกว่าวงจรมูลค่าสำหรับการคูณด้วยค่าทั่วไป ดังนั้นรหัสที่ถูกส่งออกไปจะเขียนเป็นพหุนามได้ดังนี้

$$c(x) = m_{2t+k-1}x^{2t+k-1} + m_{2t+k-2}x^{2t+k-2} + \dots + m_0x^{2t} + p_{2t-1}x^{2t-1} + p_2x^2 + p_1x + p_0 \quad (2.7)$$

$$= c_{n-1}x^{n-1} + c_{n-2}x^{n-2} + \dots + c_kx^k + c_{2t-1}x^{2t-1} + \dots + c_2x^2 + c_1x + c_0$$

2.2) การเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน (Convolution Encoder)

หลังจากที่เข้ารหัสแบบ RS แล้ว จากนั้นข้อมูลก็จะถูกเข้ารหัสคอนโวลูชันอีกครั้งหนึ่ง การเข้ารหัสคอนโวลูชันเป็นความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุตเรียงลำดับอย่างต่อเนื่อง โดยข้อมูลเข้ามาผ่านตัว shift register (Flip - Flop) และ Modulo-2 adder (Exclusive or) การหาเอาต์พุตของภาคเข้ารหัสจะทำโดยนำข้อมูลที่อยู่ใน shift register บวกแบบ Modulo-2 adder ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.4 จากวงจรเข้ารหัสจะมีอัตราการเข้ารหัส (Rate) เท่ากับ $1/2$ และค่า Constraint Length (K) เท่ากับ 3 โดยจะใช้ Generator Polynomial เพื่อแสดงตำแหน่งของข้อมูลใน

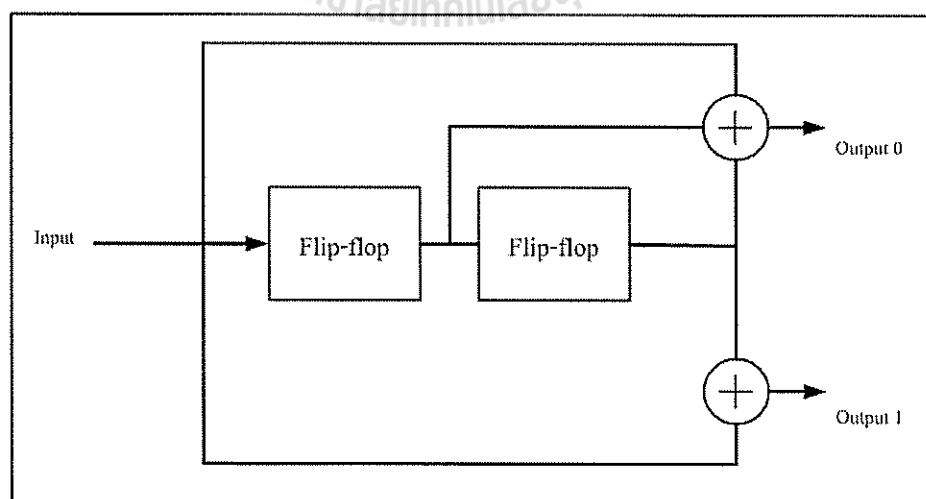
shift register ที่จะนำมาหาค่าเอาต์พุต โดยการบวกแบบ Modulo-2 คือ g_0 เท่ากับ 58 และ g_1 เท่ากับ 78 โดยในการทำงานนั้น จะดึงข้อมูลที่จะเข้ารหัสมาครั้งละ 1 บิต ($k = 1$) เข้ามาภายในวงจร ซึ่งจะ ทำให้ข้อมูลที่อยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ ใน shift register ถูกเลื่อนเข้ามาอยู่ในตำแหน่งถัดไป ต่อจากนั้น จะมีการนำข้อมูลทั้งหมดที่เก็บไว้ใน shift register มาทำการหาเอาต์พุตจำนวน 2 บิต ($n = 2$) ซึ่ง อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $1/2$ ($\text{Rate} = k/n = 1/2$) ที่เป็นผลลัพธ์ส่งออกไปจากภาคเข้ารหัส

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรการเข้ารหัสคอนโวลูชัน

จากวงจรการเข้ารหัสคอนโวลูชันที่มีการรับข้อมูลที่จะทำการเข้ารหัสเข้ามา ภายในวงจรครั้งละ 1 บิต จากนั้นจึงทำการคำนวณหาค่าของ Codeword ที่จะถูกส่งออกไปเป็น ผลลัพธ์ของภาคเข้ารหัสจำนวน 2 บิต โดยการคำนวณหาค่า Codeword ในแต่ละครั้งนั้น จะมีการนำ ข้อมูลที่อยู่ใน shift register จำนวน 3 บิต (K) มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งในการวิเคราะห์การทำงานของ วงจรเข้ารหัสนั้น จะมีการแทนการทำงานต่าง ๆ ของวงจรด้วยตัวแปรที่เรียกว่า Generator Polynomial ซึ่งจะเป็นตัวแปรที่ใช้แสดงถึงลักษณะของการคำนวณหาค่าผลลัพธ์ในการเข้ารหัสของ O/P แต่ละตัว โดยในกรณีของวงจรเข้ารหัสตัวอย่างในรูปที่ 2.4 นั้น จะสามารถแสดงการทำงานต่าง ๆ ของวงจรได้ด้วย Generator Polynomial ต่อไปนี้

$$g_1 = [1 \ 1 \ 1] \quad (2.8)$$

$$g_2 = [1 \ 0 \ 1] \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.4 การเข้ารหัส Convolution $K=3$

ซึ่งในการคำนวณหาค่าของข้อมูลที่ได้หลังจากการเข้ารหัสนั้นจะสามารถนำข้อมูลที่ได้จากค่าของ Generator Polynomial มาทำการคำนวณหาค่าของผลลัพธ์ที่ได้จากการเข้ารหัส โดยการนำข้อมูลที่จะทำการเข้ารหัสมาทำการคอนโวลูชันกับค่าของ Generator Polynomial ดังสมการ

$$O/P = [\text{input}] * g_i \quad (2.10)$$

$$O/P1 = [1 \ 0 \ 0 \ 1] * [1 \ 0 \ 1] = 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \quad (2.11)$$

$$O/P2 = [1 \ 0 \ 0 \ 1] * [1 \ 1 \ 1] = 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \quad (2.12)$$

ดังนั้นค่าของ Codeword ที่ได้จากการเข้ารหัสข้อมูลนั้น จะเกิดจากข้อมูลที่คำนวณได้จาก $O/P1$ และตามด้วย $O/P2$ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 11 01 01 11 01 01 ซึ่งจากการคำนวณต่างๆ ในการหาผลลัพธ์ของวงจรเข้ารหัสนั้น สามารถที่จะคำนวณได้จากการหาค่าการคอนโวลูชัน ดังนั้น จึงมีการเรียกรูปแบบในการเข้ารหัสข้อมูลในลักษณะนี้ว่าเป็นการเข้ารหัสคอนโวลูชัน และเมื่อนำมาเขียนรวมกันจะได้เป็น Generator Polynomial ของวงจรเข้ารหัสจะมีลักษณะดังนี้

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

โดยในบางกรณีนั้น จะมีการแทนค่าของ Generator Polynomial ด้วยเลขฐาน 8 เพื่อแสดงถึงข้อมูลที่อยู่ใน Generator Polynomial โดยในกรณีของวงจรตัวอย่างนั้นจะมีการแทนค่าของ Generator Polynomial ด้วยเลข 58 และ 78 และสำหรับข้อมูลในการเข้ารหัสนั้น จะมีการแบ่งข้อมูลที่จะทำการเข้ารหัสออกเป็น n ชุด โดยที่แต่ละชุดนั้นมีขนาดเท่ากับ k_0 บิต ซึ่งในการทำงานนั้นจะมีการดึงข้อมูลเข้ามาภายในวงจรในแต่ละครั้งนั้น จะมีการนำข้อมูลจำนวน k_0 บิต มาทำการประมวลผลเพื่อหาค่า codeword จำนวน n_0 บิตเพื่อส่งออกไปจากวงจร โดยที่จะมีการทำงานในลักษณะนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งข้อมูลทุกบิตถูกนำมาเข้ารหัสทั้งหมด และผลลัพธ์ที่ออกจากวงจรเข้ารหัสจะกลับเข้าสู่ภาวะข้อมูลทั้งหมดเป็น 0 ทั้งหมด จึงถือว่าเป็นการสิ้นสุดของการเข้ารหัสข้อมูล ดังนั้นสำหรับการเข้ารหัสคอนโวลูชันจะมีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ

$$R = \frac{nk_0}{(n+L-1)n_p} \quad (2.14)$$

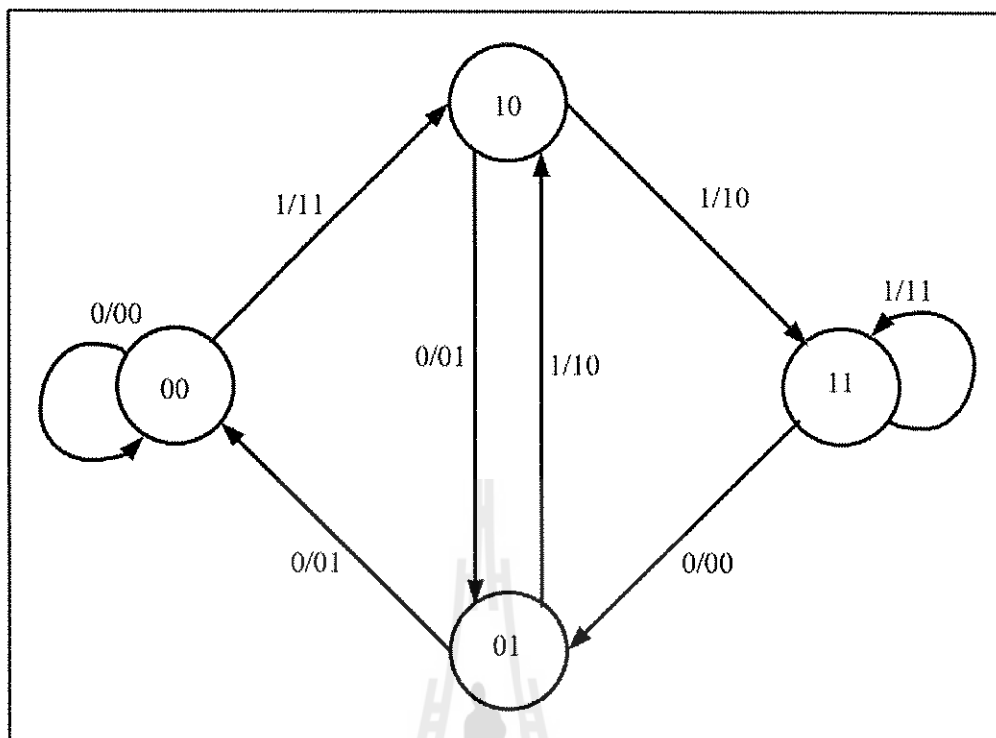
และในกรณีที่ค่า n มีค่ามากกว่าค่า L มาก ๆ จะได้ค่าอัตราเข้ารหัสมีค่าเท่ากับ

$$R = \frac{k_0}{n_0} \quad (2.15)$$

ในการวิเคราะห์การทำงานต่าง ๆ ของวงจรการเข้ารหัสคอนโวลูชันนั้น นอกจากจะมีการใช้สมการของ Generator Polynomial แล้ว จะมีการแสดงการทำงานต่าง ๆ ของวงจรเข้ารหัส โดยการใช้รูปภาพในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ในวงจรเข้ารหัสที่ถูกป้อนเข้ามา ณ เวลานั้น และค่าของ Codeword ที่เป็นเอาต์พุตจะถูกส่งออกจากวงจรเมื่อมีข้อมูลในกรณีต่าง ๆ ป้อนเข้ามา ซึ่งรูปแบบแผนภาพที่ใช้ในการแสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัสข้อมูลนั้น จะมีอยู่ 3 รูปแบบ คือ ไคอะแกรมสถานะ (State diagram), ไคอะแกรมต้นไม้ (Tree diagram) และไคอะแกรมเทรลลิส (Trellis diagram) ซึ่งมีรายละเอียดแสดงได้ดังต่อไปนี้

ก) ไคอะแกรมสถานะ (State diagram)

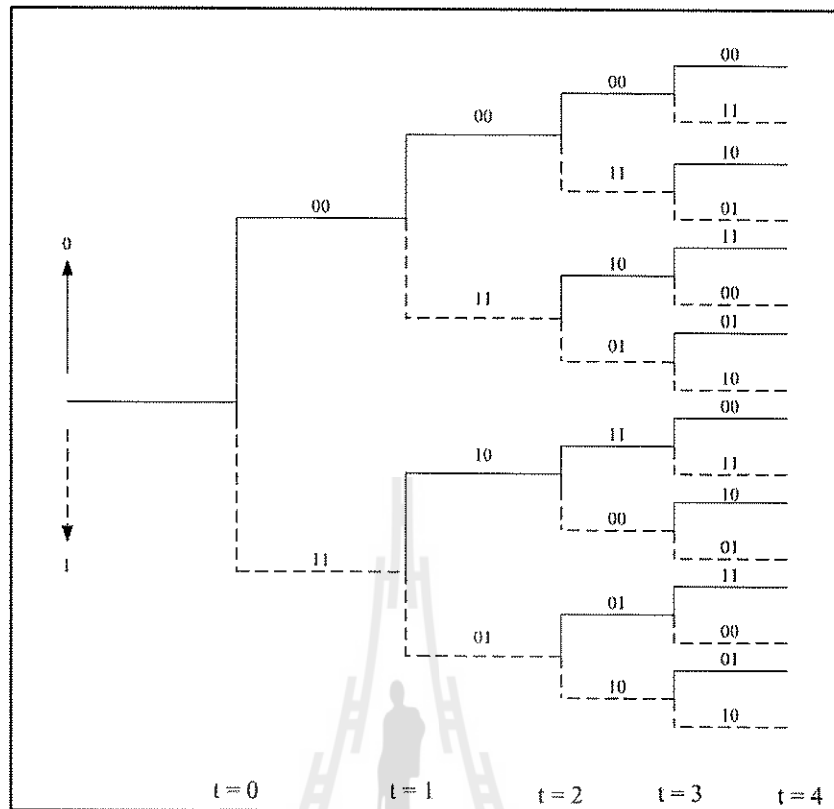
ไคอะแกรมสถานะจะแสดงค่าของข้อมูลใน shift register และเอาต์พุตของตัวเข้ารหัส ซึ่งแสดงในรูปแบบที่ 2.5 ตัวเลขที่อยู่ในวงกลมแต่ละวงนั้น จะหมายถึงสภาวะต่าง ๆ ของข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ใน shift register ซึ่งในกรณีของวงจรเข้ารหัสที่ใช้เป็นตัวอย่างนั้น จำนวนสถานะ (State) ทั้งหมดเท่ากับ 4 และสำหรับลูกศรที่แสดงไว้ในรูปนั้นจะแสดงถึงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงการทำงานจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ป้อนเข้ามา ณ เวลานั้น ๆ เช่น กรณีข้อมูลที่เก็บไว้มีค่าเป็น 00 เมื่อมีข้อมูล 1 เข้ามาจะมีผลทำให้ข้อมูลที่เก็บไว้ถูกเปลี่ยนเป็น 10 และจะมีการส่งค่า 11 ออกไปจากวงจร (แทนด้วยสัญลักษณ์ 1/11 ดังรูป) แต่ถ้าหากว่ามีการป้อนข้อมูล 0 เข้ามา วงจรก็จะมีสภาวะเป็น 00 เหมือนเดิม และจะมีการส่งค่า 00 ออกไปจากวงจร (แทนด้วยสัญลักษณ์ 0/00 ดังรูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 ไตอะแกรมแสดงสถานะของการเข้ารหัส

ข) ไตอะแกรมต้นไม้ (Tree diagram)

สำหรับไตอะแกรมต้นไม้ นั้น เป็นการพิจารณาถึงลักษณะของการทำงานของวงจรเข้ารหัสข้อมูล โดยที่จะมีการพิจารณาถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการป้อนข้อมูลต่าง ๆ เข้าไปในวงจรการเข้ารหัสเป็นหลัก ซึ่งลักษณะของไตอะแกรมต้นไม้ มีลักษณะดังรูปที่ 2.6 ในการแสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน โดยใช้ไตอะแกรมต้นไม้ นั้นจะเป็นการพิจารณาการทำงานโดยการคำนึงถึงข้อมูลที่ป้อนเข้ามา และถูกส่งออกไปจากภาคเข้ารหัสเป็นหลัก ซึ่งในการพิจารณานั้น จะเริ่มต้นจากตำแหน่งรากของไตอะแกรมต้นไม้ ในกรณีของรูปที่ 2.6 นั้นจะอยู่ในตำแหน่งซ้ายมือสุดของรูป ซึ่งจะมีการนำข้อมูลที่ถูกรับเข้ามาภายในวงจรเข้ารหัส เป็นตัวกำหนดทิศทางการเดินของข้อมูลในไตอะแกรมต้นไม้ โดยในกรณีของไตอะแกรมต้นไม้ ตัวอย่างนั้นจะกำหนดให้มีการเลื่อนตำแหน่งไปข้างบน เมื่อมีการรับข้อมูล 0 เข้ามา และจะเลื่อนตำแหน่งลงล่าง เมื่อมีการรับข้อมูล 1 เข้ามา ซึ่งหลังจากที่มีการเลื่อนตำแหน่งที่ใช้พิจารณาแล้ว จะมีการพิจารณาถึงข้อมูลที่ถูกรับออกไปจากทางภาคเข้ารหัส ณ เวลานั้น ๆ จากข้อมูลที่อยู่นอกระยะเส้นทางในตำแหน่งที่มีการพิจารณา

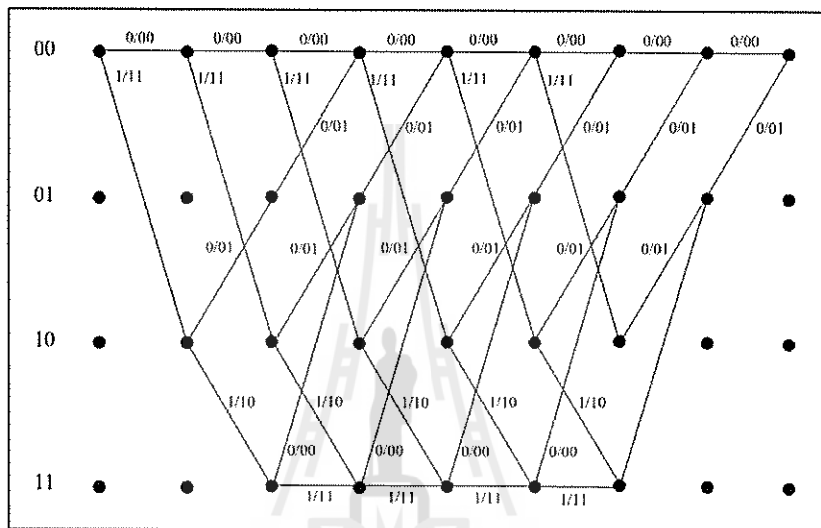


รูปที่ 2.6 ไคอะแกรมต้นไม้ของการเข้ารหัส

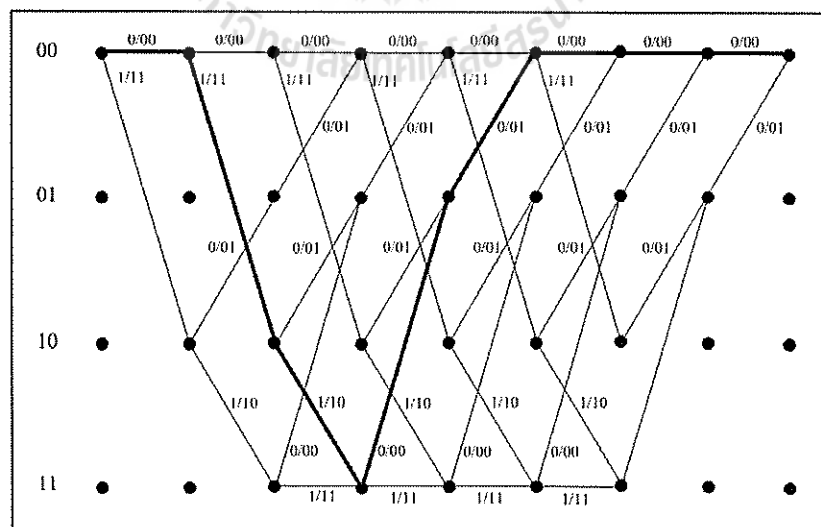
ค) ไคอะแกรมเทรลลิส (Trellis diagram)

การแสดงผลการทำงานของวงจรเข้ารหัสโดยใช้ไคอะแกรมเทรลลิสนั้นจะเป็นการแสดงผลการทำงานของวงจรเข้ารหัสโดยใช้ไคอะแกรมสถานะ มาเปลี่ยนแปลงลักษณะให้อยู่ในอีกลักษณะหนึ่งซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงข้อมูลต่าง ๆ ภายในวงจรเข้ารหัสข้อมูลที่ป้อนเข้ามา และ Codeword ที่จะถูกส่งออกไป ณ เวลาต่าง ๆ โดยลักษณะของไคอะแกรมเทรลลิสจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นการนำข้อมูลในอดีตมาทำการประมวลผลร่วมกับข้อมูลในเวลานั้น และจะมีการป้อนข้อมูลเข้ามาภายในวงจรครั้งละ 1 บิต ($k_0 = 1$) ซึ่งในกรณีนี้จะมีข้อมูลที่จะเข้ารหัสทั้งหมด 6 บิต ซึ่งเส้นทางต่าง ๆ ที่อยู่ในไคอะแกรมเทรลลิสนั้น จะแสดงถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงสถานะของวงจร และตัวเลข x/y ที่อยู่เหนือทางเดินในแต่ละเส้นทางนั้น จะแสดงถึงข้อมูลที่ป้อนเข้ามา และ Codeword ที่จะถูกส่งออกไปเมื่อมีการป้อนข้อมูลนั้นเข้ามา ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงลักษณะของไคอะแกรมเทรลลิสแล้ว จะพบว่ารูปแบบของไคอะแกรมเทรลลิส ในแต่ละสถานะการทำงานนั้น จะมีลักษณะที่คล้ายกัน แต่จะมีความแตกต่างกันเฉพาะส่วนหัว และส่วนท้าย ซึ่งเป็นผลมาจากข้อมูลที่เก็บอยู่ในวงจรนั้นจะมีค่าเริ่มต้นจากภาวะที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด และจะจบลงที่ภาวะ

ข้อมูลเป็น 0 เช่นกัน ดังนั้นเส้นทางอื่น ๆ ที่ไม่ผ่านจุดที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด ณ จุดเริ่มต้น และจุดสุดท้ายนั้นจะไม่ถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นขนาดของความยาวในโคอะแกรมเทอร์ลิส จึงขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ถูกนำมาเข้ารหัส ตัวอย่างในการใช้งานโคอะแกรมเทอร์ลิส เช่น กรณีที่มีการป้อนข้อมูล 0 1 1 0 0 0 0 เข้ามาภายในวงจรจะสามารถใช้โคอะแกรมเทอร์ลิสในการหาลักษณะของ Codeword ได้ดังรูปที่ 2.8 ดังนั้นข้อมูลที่ได้หลังจากการเข้ารหัสแล้วจะมีค่าเท่ากับ 00 11 10 00 01 00 00 00



รูปที่ 2.7 โคอะแกรมเทอร์ลิสของการเข้ารหัส



รูปที่ 2.8 การใช้งานโคอะแกรมเทอร์ลิส

2.3) การทำพังก์เจอร์ (Puncturing)

กระบวนการพังก์เจอร์จะใช้สำหรับสร้างอัตราเร็วสำหรับการเข้ารหัสที่หลากหลายตามต้องการ ด้วยการลบิตข้อมูลออกอย่างเป็นรูปแบบ เพื่อให้ระบบมีความหลากหลายในการแก้ไขความผิดพลาดได้หลายระดับ โดยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน และอัตราเร็วที่ใช้ก็คือ $1/2$, $2/3$, $3/4$, และ $5/6$ โดยเวกเตอร์พังก์เจอร์นั้นแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ซึ่งบิต “0” หมายถึง บิตที่ถูกตัดทิ้ง

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าของเวกเตอร์พังก์เจอร์สำหรับอัตราเร็วที่ต่างกันของการเข้ารหัสคอนโวลูชัน

Rate	Puncture Vector
1/2	[1]
2/3	[1 1 10]
3/4	[1 1 0 1 1 0]
5/6	[1 1 0 1 1 0 0 1 1 0]

2.4) การทำ Interleaving

เป็นกระบวนการในการสลับย้ายตำแหน่งของข้อมูล เพื่อลดโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูล โดยไม่ต้องสูญเสียแบนด์วิดท์หรือขีดความสามารถในการรับส่งข้อมูลแต่อย่างใด สำหรับมาตรฐานไวแมกซ์ นั้นก็ได้ใช้วิธีนี้หลังจากการเข้ารหัสข้อมูลด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลยิ่งขึ้น ซึ่งการทำ Interleaving ในมาตรฐานไวแมกซ์ จะทำ 2 ขั้นตอนคือ

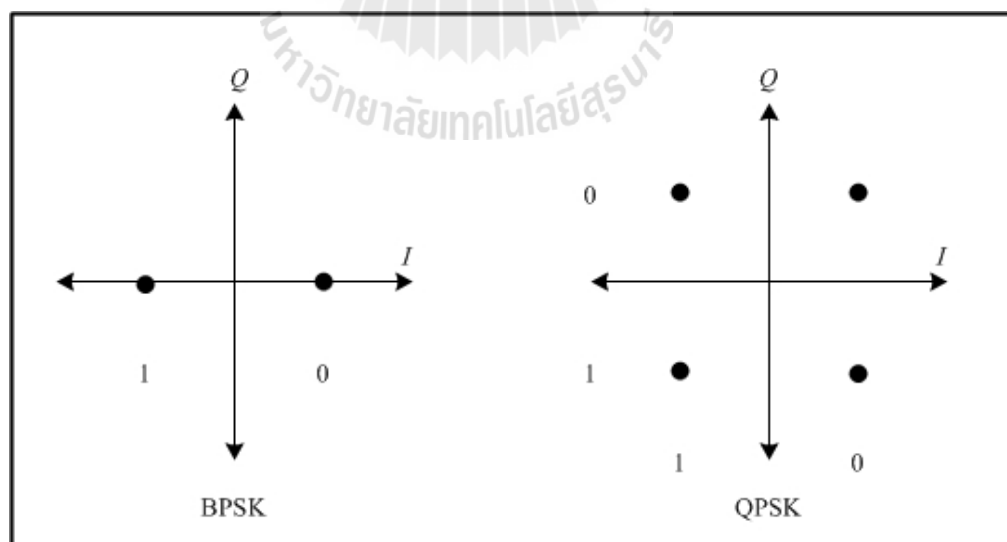
1) ทำการสลับหรือย้ายตำแหน่งบิตข้อมูลที่อยู่ติดกัน ไปไว้กับความถี่ subcarrier ที่ไม่ติดกันของ OFDM ที่ใช้งานอยู่ เพื่อให้โอกาสที่จะถูกรบกวนจากความถี่อื่น ๆ ลดลง เป็นการกระจายความถี่ที่ดี และเพิ่มประสิทธิภาพในการถอดรหัสมากขึ้น

2) จากนั้นจะทำการย้ายตำแหน่งบิตข้อมูลที่ติดกันให้ไปอยู่บนบิตที่ significant ต่างกันในการมอดูเลต เพื่อให้กระจายความเสี่ยงที่จะเกิดจากการรบกวนของสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลต เพราะโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดในแต่ละบิตของ 16-QAM และ 64-QAM จะ

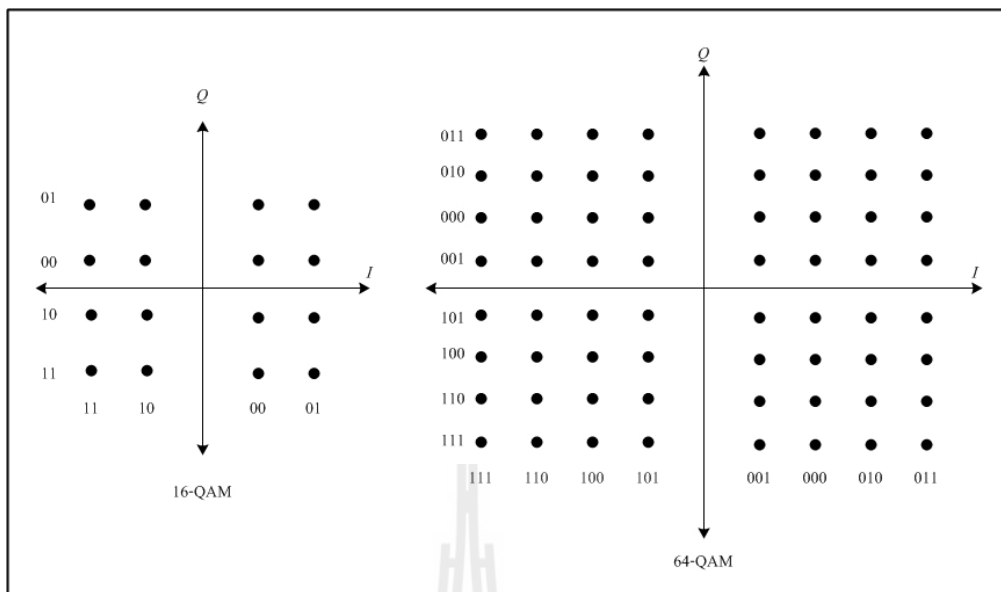
แตกต่างกันออกไป บิตที่เป็น most significant จะมีโอกาสเกิดความผิดพลาดได้น้อยกว่าบิตที่เป็น least significant นั้นเอง

3) การมอดูเลชัน

หลังจากที่ผ่านการทำ interleaving ขึ้นตอนต่อมาก็จะเป็นการมอดูเลตสัญญาณซึ่งในการสื่อสารแบบไร้สายนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการมอดูเลตสัญญาณ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณออกไปได้ การมอดูเลชันก็คือ การเปลี่ยนข้อมูลบิตให้มาอยู่ในรูปของแอมพลิจูด และเฟส ซึ่งถูกจัดอยู่ในรูปของเวกเตอร์เชิงซ้อน in-phase และ quadrature-phase (IQ) ซึ่งสามารถแสดงได้ในแผนภาพดวงดาว (Constellation diagram) โดยการวาด IQ สำหรับรูปแบบการมอดูเลชันนั้น แสดงให้เห็นถึงเวกเตอร์ที่ได้ทำการส่งออกไปสำหรับข้อมูลทั้งหมดที่รวมกัน ซึ่งวิธี Gray coding เป็นวิธีแบ่งแต่ละจุดของแผนภาพดวงดาวด้วยบิตที่แตกต่างกันเพียงบิตเดียวการเข้ารหัสนี้จะช่วยให้ BER ทั้งหมดลดน้อยลง โดยทำการลดความผิดพลาดบิตหลาย ๆ บิตที่เกิดจากความผิดพลาดของหนึ่งสัญลักษณ์ โดยมาตรฐานไอแมกซ์ใช้รูปแบบการมอดูเลชัน 4 รูปแบบ คือ BPSK (Binary Phase Shift Keying) QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 16-QAM (16-Quadrature Amplitude Modulation) และ 64-QAM (64-Quadrature Amplitude Modulation) ซึ่งรูปแบบการมอดูเลชันแบบต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 และ รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 Constellation Maps ของ BPSK และ QPSK



รูปที่ 2.10 Constellation Maps ของ 16-QAM และ 64-QAM

4) การทำสัญลักษณ์ Pilot

สัญลักษณ์ Pilot ทำหน้าที่ในการชดเชย frequency offset ที่ภาครับได้ และสามารถใช้ในการประมาณช่องสัญญาณ (Channel Estimation) ได้ สัญลักษณ์ Pilot นี้จะแทรกอยู่ในส่วนของข้อมูล OFDM subcarrier ซึ่ง Pilot นี้ได้มาจาก pseudo-random binary sequence (PRBS) generator ซึ่งอยู่ในรูป polynomial $x^{11} + x^9 + 1$ ที่เกิดจากการมอดูเลตแบบ BPSK ซึ่งการมอดูเลตแบบนี้ทำให้เกิด $k - 2w_k$ และ $1 - 2\bar{w}_k$ โดย w_k คือ ข้อมูลที่เกิดจาก PRBS และ \bar{w}_k คือการกลับบิตของ w_k ตำแหน่งที่ pilot แทรกอยู่นั้นคือ

$$p_{-88} = p_{-38} = p_{63} = p_{88} = 1 - 2w_k \tag{2.16}$$

$$p_{-63} = p_{-13} = p_{13} = p_{38} = 1 - 2\bar{w}_k \tag{2.17}$$

ข้อมูลที่เกิดจาก PRBS นั้นขึ้นอยู่กับทิศทางของการส่งคือ ทิศขาขึ้นหรือขาลง ซึ่งข้อมูลที่เป็น 1 ทั้งหมด จะใช้สำหรับทิศทางการส่งขาลง ส่วนข้อมูลที่สลับกันระหว่าง 1 และ 0 ซึ่งบิตแรกเป็น 1 จะใช้สำหรับทิศทางการส่งขาขึ้น

5) การใส่ Training Sequence

ในระบบไวแมกซ์นั้น ในส่วนที่เป็นพรีเอมเบิล (Preamble) ของข้อมูลขาขึ้น และขาลงจะประกอบด้วย Training Sequence ซึ่งสามารถแบ่ง Training Sequence ออกเป็น 3 ประเภท โดย Training Sequence นี้จะหาได้จากข้อมูลทางความถี่ ซึ่งข้อมูลนี้มีจำนวน 201 subcarrier (P_{ALL}) ในการส่งข้อมูลขาลง ใช้พรีเอมเบิลแบบสั้น ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลจากสัญลักษณ์ OFDM สั้น ๆ ออกไปก่อน เพื่อใช้สำหรับการซิงโครไนซ์ (Synchronize) ข้อมูลระหว่างภาคส่งและภาครับ ส่วน Training Sequence แบบที่ 2 จะเป็น Training Sequence แบบยาวซึ่งใช้สำหรับการประมาณช่องสัญญาณที่ภาครับ และ Training Sequence แบบสุดท้ายจะใช้สำหรับการส่งข้อมูลแบบ Space Time Coding (STC) ซึ่งการส่งข้อมูลแบบนี้ ต้องใช้สายอากาศหลายตัว ดังนั้น จึงต้องส่งพรีเอมเบิลไปทุก ๆ สายอากาศพร้อม ๆ กัน

6) การรวมข้อมูล (Assembler)

ในระบบไวแมกซ์มี 256-point FFT ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ ข้อมูล pilot และจุดศูนย์ (null) 200 subcarrier ใช้สำหรับข้อมูล และ pilot ใน 8 subcarrier เป็น pilot ส่วน 192 subcarrier เป็นข้อมูลส่วนที่เหลือเป็นจุดศูนย์ที่ใช้สำหรับ zero DC และ guard carrier ในการสร้างสัญลักษณ์ OFDM นั้น ขั้นตอนแรกจะเริ่มจาก ใส่ zero DC ตรงกลางแบ่งข้อมูลออกเป็นสองส่วนจากนั้นก็แทรก pilot เข้าไป ซึ่งแทรกเข้าไปที่ตำแหน่ง subcarrier ที่ 13 38 63 88 114 139 164 และ 189 จากนั้นก็จะแบ่ง guard carrier ใส่ไว้ข้างหน้า และข้างหลังของข้อมูล

7) การใส่ guard band

หลังจากที่ผ่านกระบวนการการรวมข้อมูล ซึ่งมีข้อมูล 201 subcarrier ส่วนอีก 55 subcarrier นั้น เป็นส่วนที่ไม่มีข้อมูล และเป็น 0 ทั้งหมด ซึ่งหน้าที่ของส่วนนี้ก็เพื่อช่วยลดการเกิดความถี่รบกวนให้แก่ช่องสัญญาณข้าง ๆ

8) การทำกระบวนการ IFFT

กระบวนการทำ IFFT นี้ถูกใช้เพื่อทำการสร้างสัญญาณไปอยู่ในโดเมนเวลา โดยสัญลักษณ์ที่ได้รับหลังจากการมอดูเลชันแล้วนั้นจะถูกมองอยู่ในรูปแอมพลิจูดของสัญญาณของจุดศูนย์กลางของไซน์ซอไซด์ หมายความว่าแต่ละตัวอย่างที่ไม่ต่อเนื่องก่อนการใช้อัลกอริทึม IFFT ที่สอดคล้องกับแต่ละพหุคูณ การทำ IFFT เป็นวิธีการที่รวดเร็วในการมอดูเลชันแต่ละพหุคูณแบบขนาน ซึ่งเหมือนกับการใช้ตัวมอดูเลต และตัวดีมอดูเลตหลายตัว ดังนั้น กระบวนการ IFFT จึงเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่าย และเวลาจำนวนมาก ซึ่งก่อนที่จะทำการจำลองแบบนี้จำเป็นต้องมีการจัดเรียงพหุคูณก่อน ซึ่งสมการในการทำ IFFT สามารถเขียนได้เป็น

$$x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j2\pi ki/N}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.18)$$

9) การเสริมสร้าง cyclic prefix

การจะทำให้สัญญาณ OFDM มีความทนทานต่อการประวิงเวลาของสัญญาณหลายวิธีนั้น จะต้องทำให้สัญญาณ OFDM มีความหน่วงเวลามากกว่าค่าหน่วงเวลาสูงสุดของสัญญาณที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ โดยการเพิ่มให้สัญลักษณ์ OFDM มีความหน่วงเวลามากขึ้น ด้วยการเพิ่ม guard interval เข้าไปในแต่ละสัญลักษณ์ OFDM ซึ่ง guard interval นี้เป็นการคัดลอกส่วนท้ายของสัญลักษณ์ OFDM มาวางไว้ที่ส่วนหน้าของสัญลักษณ์ หรือที่เรียกว่า การทำ cyclic prefix แสดงดังรูปที่ 2.11

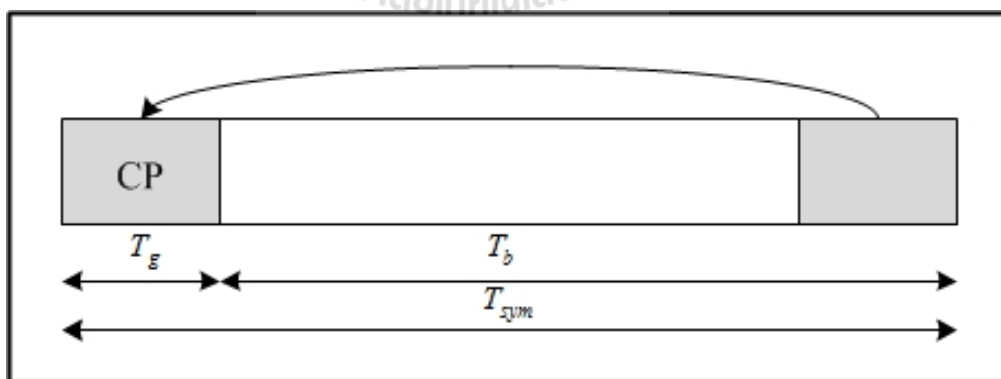
การใส่ cyclic prefix นั้นจะคัดลอกส่วนท้ายของสัญลักษณ์ OFDM มาวางไว้ที่ส่วนหน้าของสัญลักษณ์ ซึ่งผลรวมระยะเวลาทั้งหมดของสัญลักษณ์กำหนดได้เป็น

$$T_{sym} = T_b + T_g \quad (2.19)$$

โดย T_{sym} คือ คาบทั้งหมดของสัญลักษณ์ OFDM

T_b คือ คาบของสัญลักษณ์ข้อมูลที่ใช้

T_g คือ คาบของ cyclic prefix



รูปที่ 2.11 การใส่ cyclic prefix ในสัญลักษณ์ของ OFDM

เมื่อ G คือ ค่าที่กำหนดอัตราส่วนความยาวของ cyclic prefix เพื่อจัดการรบกวนระหว่างสัญลักษณ์ และต้องคำนึงถึงช่วงเวลาของ cyclic prefix ว่าจะต้องมีเวลายาวกว่าการกระจายตัวของช่องสัญญาณ นอกจากนี้แล้วก็ควรจะมียุทธศาสตร์ที่เล็กที่สุดเท่าที่เป็นได้ เพราะมันจะใช้ค่านี้ในการส่งสัญญาณ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว G จะมีค่าน้อยกว่า 1/4 สามารถแสดงได้เป็น

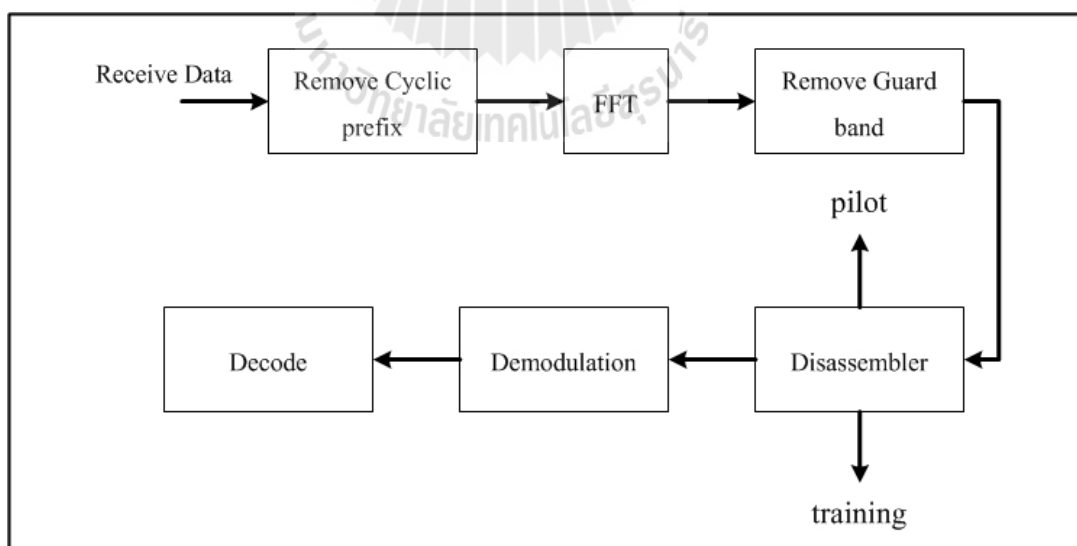
$$G = \frac{T_g}{T_b} \tag{2.20}$$

ภาครับ

ภาครับในระบบไวแมกซ์แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งขั้นตอนแรกจะเป็นการเอาส่วนที่เป็น cyclic prefix ออก จากนั้นก็ทำกระบวนการ FFT (Fast Fourier Transform) ต่อจากนั้นก็นำข้อมูลที่ได้ มาตัดส่วน guard carrier ออก แล้วก็แยกข้อมูลที่มี pilot ออกจากกัน ส่วนสุดท้ายก็จะเป็นการถอดรหัส (decoder)

1) การทำกระบวนการ FFT

หลังจากข้อมูลที่ถูกตัดส่วน cyclic prefix ออก จากนั้นก็ทำกระบวนการ FFT ซึ่งเป็นการทำกลับจากกระบวนการ IFFT



รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงภาครับของระบบไวแมกซ์

2) การตัดส่วน guard band ออก

หลังจากทำกระบวนการ FFT แล้ว จากนั้นจะตัดส่วนที่เป็น guard band ออก เพื่อจะได้ข้อมูลออกมา

3) การแยกข้อมูลออก (Disassembler)

หลังจากได้ข้อมูลออกมา จะต้องแยกข้อมูลนี้ออกอีก เนื่องจากข้อมูลส่วนนี้มีข้อมูล 3 ส่วนรวมกันอยู่ คือ ข้อมูล pilot และ training

4) การประมาณช่องสัญญาณ

ในการส่งข้อมูลแบบไร้สาย ข้อมูลที่ถูกส่งจากภาคส่งย่อมมีการเปลี่ยนแปลง หลังจากผ่านช่องสัญญาณ ซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวน ส่วนที่ภาครับยังได้รับผลกระทบจากสัญญาณหลายวิธี ซึ่งมีสัญญาณมาถึงที่ภาครับหลาย ๆ สัญญาณพร้อม ๆ กัน ดังนั้นที่ภาครับจึงต้องมีวิธีการในการหาสัญญาณที่ถูกต้อง ในการหาสัญญาณที่ถูกต้องนี้จำเป็นต้องรู้ Channel Impulse Response (CIR) ซึ่งใช้ในการประมาณช่องสัญญาณ โดยปกติการประมาณช่องสัญญาณจะสามารถรู้จากลำดับบิตที่ส่งมาจากภาคส่ง ซึ่งจะส่งมาเป็นระยะ ๆ โดยจะนำมาเปรียบเทียบกับ CIR

5) การตีמודูเลต

การตีמודูเลตเป็นการเปลี่ยนจากสัญญาณในลักษณะรูปคลื่น เป็นสัญญาณในลักษณะตัวเลขหรือชุดของตัวเลข ซึ่งจะนำมาประมาณเป็นข้อมูลไบนารีหรือสัญลักษณ์ M-ary ต่อไป

6) การถอดรหัส

ในส่วนนี้เป็นส่วนสุดท้ายในกระบวนการทางภาครับ เป็นการถอดรหัสเพื่อจะได้ข้อมูลที่ส่งมาจากภาคส่ง ซึ่งจะถอดรหัส 3 รูปแบบคือ

6.1) การ Deinterleaving

การ Deinterleaving เป็นการจัดเรียงบิตใหม่ให้ถูกต้องเหมือนเดิม ซึ่งทำกลับกันจากกระบวนการ Interleaving

6.2) การถอดรหัสแบบ Viterbi

การถอดรหัสแบบ Viterbi เป็นที่นิยมในการใช้งานมากที่สุด ในการถอดรหัสแบบ Convolution code ซึ่งการทำงานของ Viterbi จะเป็นแบบ Maximum Likelihood โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการถอดรหัสจะเป็นเส้นทางเพียงเส้นทางเดียวที่มีความน่าจะเป็นสูงสุดจากเส้นทางทั้งหมดใน Trellis diagram ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับข้อมูลที่ถูกลงมากที่สุด รูปแบบการถอดรหัสแบบ Viterbi จะมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน ได้แก่ Hard-decision และ Soft-decision

ก) **Hard decision** สำหรับการทำงานของวงจรถอดรหัสที่ใช้กระบวนการตัดสินใจแบบ Hard decision นั้น จะเป็นการพิจารณาข้อมูลที่ได้รับเข้ามาโดยการพิจารณาว่าข้อมูลที่รับเข้ามาในแต่ละบิตนั้น มีค่าของข้อมูลเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น

ข) **Soft decision** การถอดรหัสที่มีการใช้กระบวนการตัดสินใจแบบ Soft decision จะเป็นการพิจารณาถึงข้อมูลที่ได้รับเข้ามาได้โดยการทำการตัดสินใจระดับของข้อมูลที่รับเข้ามาได้โดยการแบ่งระดับของสัญญาณที่ใช้ในการคำนวณหาค่าเมตริกซ์ที่มากกว่า 2 ระดับ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นั้น จะได้ข้อมูล และรายละเอียดของข้อมูลที่ส่งมาที่มากกว่ากรณีของ Hard decision ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการตัดสินใจนั้น จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าเมตริกซ์ เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่รับเข้ามา ณ เวลานั้น ๆ กับข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางต่าง ๆ ณ เวลานั้น ซึ่งจะมีรูปแบบที่ใช้ในการคำนวณที่แตกต่างกันไป

ค) อัลกอริทึมแบบ Viterbi โดยในการทำงานต่าง ๆ นั้นจะต้องมีการคำนวณหาความแตกต่าง ระหว่างข้อมูลที่รับเข้ามา กับค่าที่อยู่ในเส้นทางต่าง ๆ เพื่อใช้ในการกระบวนการตัดสินใจ โดยกระบวนการที่ใช้ในการทำการค้นหาเส้นทางที่อยู่ในไดอะแกรมเทรลลิส ที่มีลักษณะคล้ายกับข้อมูลที่รับได้มากที่สุด เพื่อจะได้นำข้อมูลที่ได้จากเส้นทางนั้นมาคำนวณค่าของข้อมูลที่ถูส่งมา โดยในกระบวนการในการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ อัลกอริทึมแบบ Viterbi นั้น จะมีขั้นตอนดังนี้

1) พิจารณาแบ่งข้อมูลที่รับเข้ามาออกเป็นข้อมูลย่อย ๆ จำนวน m ช่วง ซึ่งแต่ละช่วงนั้นมีขนาดของข้อมูลเท่ากับ n_0 บิต

2) ทำการวาดไดอะแกรมเทรลลิสที่มีจำนวนสถานะในการทำงานเท่ากับ m สถานะ โดยจะมีการพิจารณาเฉพาะเส้นทางที่มีความเป็นไปได้ว่าจะถูกส่งมาเท่านั้น โดยสำหรับที่สถานะของไดอะแกรมเทรลลิสตั้งแต่ $L-1$ ขึ้นไปนั้น ให้วาดเส้นทางที่พุ่งเข้าหาสถานะของวงจรมีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด

3) กำหนดค่าตัวแปร $l = 1$ และ ทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรเมตริกซ์ ในสถานะเริ่มต้นที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด ให้มีค่าของเมตริกซ์เท่ากับ 0

4) ทำการคำนวณหาความแตกต่างของข้อมูล ระหว่างข้อมูลที่รับได้ชุดที่ l กับข้อมูลในเส้นทางในการเปลี่ยนแปลงสถานะในไดอะแกรมเทรลลิสจากสถานะที่ l ไปเป็น $l+1$

5) นำค่าที่คำนวณได้นั้น ไปบวกกับค่าเมตริกซ์สะสมของสถานะ l เพื่อหาค่าของเมตริกซ์สะสมในสถานะที่ $l+1$ เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่

เหมาะสมที่สุดในการเปลี่ยนแปลงข้อมูลไปยังสถานะนั้น ๆ โดยในแต่ละสถานะนั้น จะมีจำนวนเส้นทางทั้งหมด จำนวน $2k_0$ เส้นทางที่จะพุ่งเข้าสถานะเดียวกัน

6) พิจารณา ณ ตำแหน่งในสถานะที่ $l+1$ ในแต่ละสถานะนั้นทำการเลือกเส้นทางที่มีค่าเมตริกซ์สะสมที่มีค่าน้อยที่สุดที่จะพุ่งเข้าหาในแต่ละสถานะ โดยเส้นทางที่ถูกเลือกนั้นจะถูกเรียกว่า Survivor ซึ่งจะเป็เส้นทางที่ถูกเก็บไว้ทำการคำนวณในแต่ละสถานะต่อไป และสำหรับเส้นทางอื่น ๆ ที่ไม่ได้ถูกเลือกนั้น จะถูกเรียกว่า Forgetting โดยจะถูกลบทิ้งออกไปจากระบบการตัดสินใจ

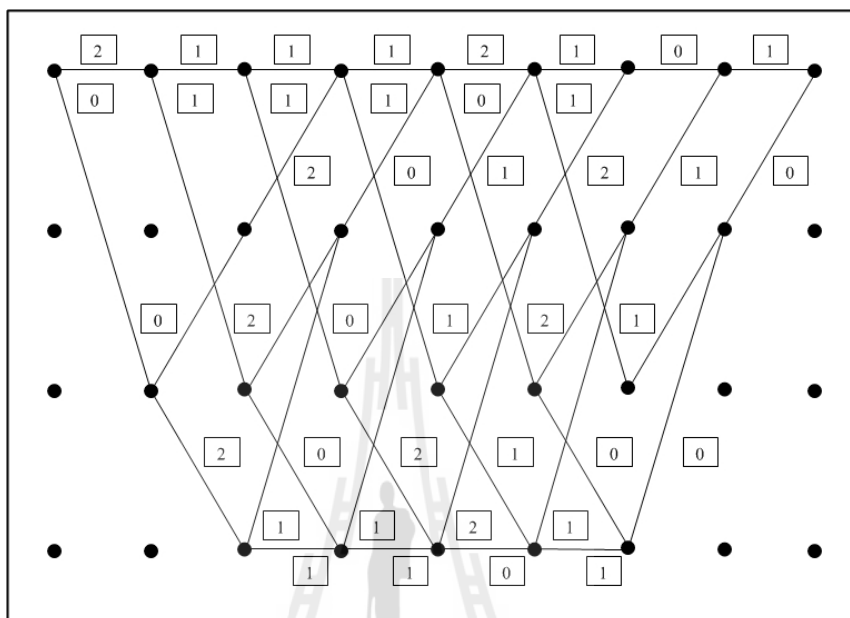
7) ถ้าหากว่า l นั้นมีค่าเท่ากับ m แล้วให้ทำงานในขั้นตอนต่อไปได้แต่ถ้ายังมีค่าน้อยกว่า จะต้องมีการเพิ่มค่า l ขึ้นไปอีก 1 จากนั้นจึงกลับไปทำงานในขั้นตอนที่ 4 ใหม่

8) แต่ถ้ยังมีค่าน้อยกว่า จะต้องมีการเพิ่มค่า l ขึ้นไปอีก 1 จากนั้นจึงกลับไปทำงานในขั้นตอนที่ 4 ใหม่ เริ่มต้นพิจารณา ณ สถานะที่ $m+1$ ที่มีสถานะของข้อมูลสถานะเป็น 0 ทั้งหมด ทำการเลือกเส้นทางที่เป็น Survivor ซึ่งเป็นเส้นทางที่ถูกเลือกที่เหลืออยู่ย้อนกลับไปจนกระทั่งถึงสถานะเริ่มต้น ของการทำงานที่มีสถานะในการทำงานเป็น 0 ทั้งหมด ซึ่งเส้นทางที่ได้นั้นจะเป็นเส้นทางที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้รับมามากที่สุด ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาข้อมูลข่าวสารที่ถูกส่งมา โดยข้อมูลข่าวสารที่จะถูกส่งออกไปจากภาคถอดรหัสนั้นจะเป็นการส่งข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในเส้นทางส่งออกไป ยกเว้นข้อมูล 0 จำนวน $k_0(L-1)$ บิต ที่อยู่ท้ายสุดนั้นจะถูกตัดทิ้งไป

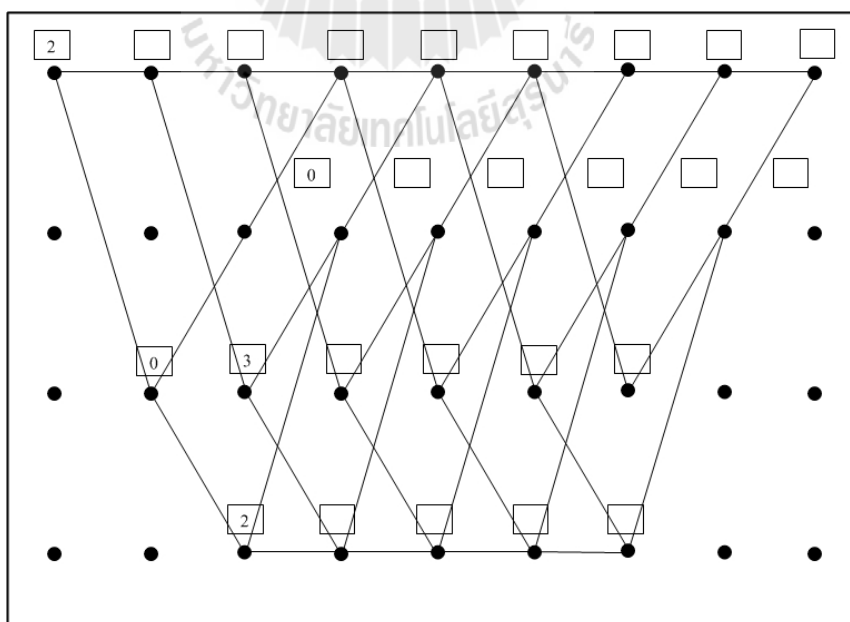
ตัวอย่างเช่น ในกรณีวงจรถอดรหัสสำหรับข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสด้วยวงจรในรูปที่ 2.4 ซึ่งมีการป้อนข้อมูลดิบจำนวน 6 บิต มีค่าเท่ากับ 1 0 1 0 1 1 ซึ่งเมื่อทำการเข้ารหัสแล้วจะได้ codeword ที่มีค่าเท่ากับ 1 1 0 1 1 0 0 1 1 0 1 0 0 0 1 จากนั้นพิจารณา ในกรณีที่มีข้อมูลของ codeword ที่รับได้ที่ปลายทางนั้นเกิดความผิดพลาดในการตีความขึ้นจำนวน 1 บิต จึงทำให้ข้อมูลที่ได้รับได้มีค่าเป็น 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 0 1 ดังนั้นในการถอดรหัสโดยใช้วิธีการ Viterbi นั้นจะทำงาน โดยเริ่มต้นจากการนำข้อมูลที่ได้มาทำการแบ่งข้อมูลออกชุด ๆ ซึ่งมีขนาดเท่ากับจำนวนของ codeword ที่วงจรเข้ารหัสส่งออกมาในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 2 ดังนั้นข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็นชุดได้ดังนี้ 11 01 10 01 11 10 00 01 ซึ่งในการทำงานนั้น จะมีการพิจารณาข้อมูลที่ละชุดเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางต่าง ๆ ในไดอะแกรมทรลิตส์ โดยการทำงานในช่วงแรกนั้นจะเป็นการหาความแตกต่างระหว่างข้อมูลที่ได้รับได้ และข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางต่าง ๆ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นการนำข้อมูลที่ได้รับได้ในแต่ละช่วงเวลามาทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางต่าง ๆ โดยในช่วงเวลาที่ 1 นั้นจะเป็นการนำข้อมูล 11 ที่รับ

ได้มาทำการเปรียบเทียบเพื่อหาจำนวนบิตของข้อมูลที่มีความแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นทางที่ลากจากโหนดเริ่มต้นที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด มายังโหนดที่มีข้อมูลเป็น 00 ในช่วงเวลาถัดไปซึ่งมีข้อมูลในเส้นทางเป็น 0/00 ซึ่งจะพบว่ามีความแตกต่างกันจำนวน 2 บิต และเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นทางที่ลากไปยังโหนดที่มีข้อมูลเป็น 10 จะพบว่ามีความแตกต่างเท่ากับ 0 บิต และในช่วงเวลาที่ 2 จะเป็นการนำข้อมูล 01 ที่รับได้ ณ เวลานั้นมาทำการเปรียบเทียบกับเส้นทางต่าง ๆ ทั้งหมด ณ เวลานั้น ๆ และจะมีการคำนวณเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบทุกเส้นทาง จากนั้นในการทำขั้นตอนต่อไปจะเป็นการคำนวณหาค่าเมตริกซ์สะสมของเส้นทาง โดยสำหรับ 2 ช่วงเวลาแรกนั้นจะมีการทำงานดังรูปที่ 2.14 ในการทำงานนั้นจะเริ่มต้นที่โหนด 00 ที่อยู่ซ้ายบนสุดของรูป ซึ่งกำหนดค่าเมตริกซ์ใหม่เป็น 0 จากนั้นจึงพิจารณาโหนดถัดไปที่เชื่อมต่อกับโหนด 00 ซึ่งมี 2 โหนดด้วยกัน โดยจะทำการนำเมตริกซ์ที่อยู่ในเส้นทางนั้นมาบวกกับเมตริกซ์สะสมที่ถูกเก็บไว้ยังโหนดที่พิจารณา ซึ่ง ณ เวลาคือ โหนด 00 ที่อยู่ซ้ายบนสุด และผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะถูกเก็บไว้ในโหนดที่อยู่ปลายทางของเส้นทางนั้น ๆ ซึ่งจะทำงานเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีการพบว่า มีเส้นทางมากกว่า 1 เส้นทาง ที่พุ่งเข้าหาโหนดเดียวกัน ดังเช่นในช่วงเวลาที่ 3 จนถึงช่วงเวลาที่ 8 ซึ่งเมื่อมีเหตุการณ์นี้เกิดขึ้น จะต้องมีการตัดสินใจเพื่อเลือกเส้นทางที่ใช้ในการคำนวณเฉพาะเส้นทางที่มีค่าเมตริกซ์สะสมน้อยที่สุดเท่านั้นมาพิจารณา โดยในช่วงเวลาที่ 3 นั้นจะมีการคำนวณดังรูปที่ 2.15 สำหรับการพิจารณาค่าเมตริกซ์สะสมที่โหนด 00 ในช่วงเวลาที่ 3 นั้น จะเป็นการตัดสินใจเลือกเส้นทางระหว่างเส้นทางที่มาจากโหนด 00 และโหนด 01 ของช่วงเวลาที่ 2 ซึ่งจะทำให้การเลือกเส้นทางที่มีค่าเมตริกซ์สะสมน้อยที่สุดเท่านั้น โดยสำหรับเส้นทางที่มาจากโหนด 00 จะมีค่าเมตริกซ์สะสมเท่ากับ $3+1$ เท่ากับ 4 และเส้นทางที่มาจากโหนด 01 มีค่าเท่ากับ $0+2$ เท่ากับ 2 ดังนั้นจึงเลือกเส้นทางที่มาจากโหนด 01 มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งจะมีการทำงานในลักษณะนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งคำนวณเมตริกซ์สะสมครบทุกช่วงเวลา จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการค้นหาเส้นทาง โดยเริ่มต้นที่โหนด 00 ที่อยู่ขวาสุดของรูป จากนั้นจึงทำการมองย้อนกลับในโหนดที่อยู่ซ้ายมือที่มีเส้นทางต่อกับโหนด 00 โดยจะทำการเลือกเส้นทางที่ต่อกับโหนดที่มีค่าเมตริกซ์สะสมที่มีค่าน้อยที่สุดเพื่อเลือกเป็นเส้นทางที่ใช้งาน หลังจากนั้นจึงย้ายจุดที่พิจารณาไปยังโหนดถัดไปทางซ้ายมือ ที่อยู่ปลายทางของเส้นทางที่เลือกไว้ ซึ่งจะมีกระบวนการตัดสินใจเช่นเดิมซ้ำอีกครั้งโดยจะมีการทำงานเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนมีการค้นหาเส้นทางครบทุกช่วงเวลา ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.16 หลังจากนั้น จะเป็นการนำข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางที่ถูกเลือกมาใช้ในการหาข้อมูลคิบที่ส่งมา โดยการพิจารณาถึงข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางส่วนต่าง ๆ ซึ่งจากรูปนั้นจะเห็นว่า ข้อมูลคิบที่ถอดรหัสได้จะมีค่าเท่ากับ 1 0 1 0 1 1 0 0 โดยใน 2 บิตสุดท้ายจะไม่ถูกนำมา

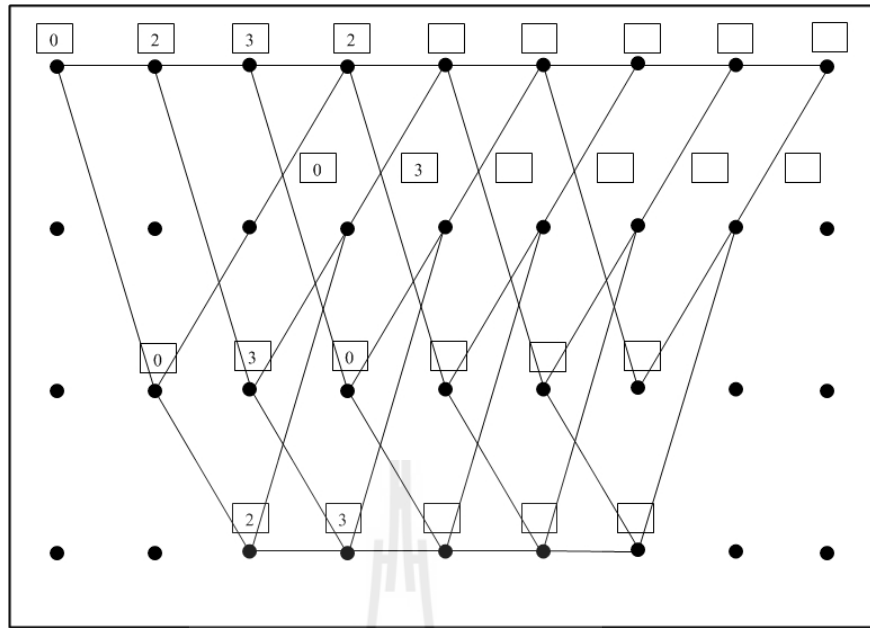
พิจารณาเนื่องจากเป็นข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามาเพื่อใช้ในการคำนวณ ดังนั้นข้อมูลดิบที่ได้จากการถอดรหัสจะมีค่าเท่ากับ 1 0 1 0 1 1



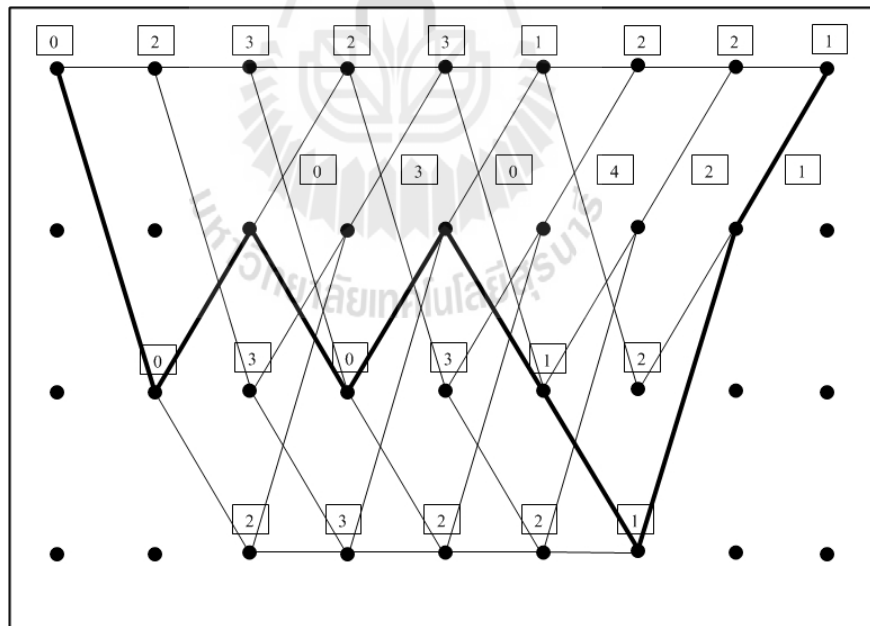
รูปที่ 2.13 การถอดรหัสแบบ Viterbi (1)



รูปที่ 2.14 การถอดรหัสแบบ Viterbi (2)



รูปที่ 2.15 การถอดรหัสแบบ Viterbi (3)



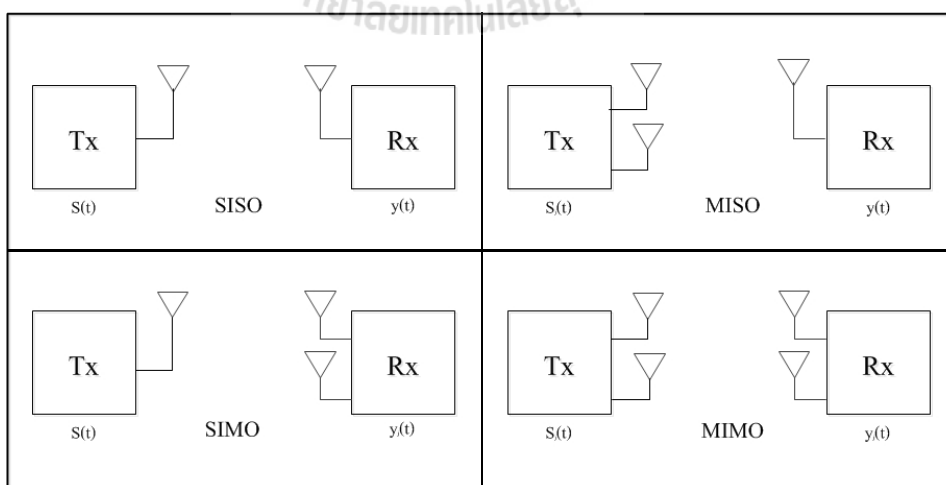
รูปที่ 2.16 การถอดรหัสแบบ Viterbi (4)

6.3) การถอดรหัสแบบรีดโซโลมอน

ในส่วนนี้เป็นการถอดรหัสส่วนสุดท้าย ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการถอดรหัสเพื่อจะได้ข้อมูลที่มาจากภาคส่ง การถอดรหัสแบบรีดโซโลมอนก็จะถอดรหัสกลับจากการเข้ารหัสแบบรีดโซโลมอน ดังนั้นหลังจากการถอดรหัสที่มี codeword เท่ากับ n เมื่อถอดรหัสแล้วข้อมูลจะมีขนาดเท่ากับ k เมื่อ $n = 255$ และ $k = 239$

2.3 เทคนิคไมโม

การวิจัยในระบบการสื่อสารไร้สายในช่วงแรกนั้น จะเป็นการส่งผ่านข้อมูลในระบบโดยใช้สายอากาศที่ภาครับ และภาคส่งเพียงแค่อันเดียว (Single -Input Single-Output system : SISO) ต่อมาได้มีการศึกษา และพัฒนางานวิจัย ระบบการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศ (Multiple Antennas) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งจะพบว่า เมื่อมีการส่งข้อมูลแบบสายอากาศหลายอันนี้ ทำให้ความจุในระบบเพิ่มขึ้น สามารถรับ และส่งข้อมูลได้มากขึ้น โดยในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ ระบบที่ใช้จำนวนสายอากาศภาคส่งหนึ่งอัน และ จำนวนสายอากาศภาครับหลายอัน (Single-Input Multiple-Output system : SIMO) ระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหลายอัน และสายอากาศภาครับหนึ่งอัน (Multiple-Input Single-Output system : MISO) สุดท้ายคือ ระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศภาคส่งหลายอัน และสายอากาศภาครับหลายอัน หรือที่เรียกว่า ไมโม (Multiple-Input Multiple-Output system : MIMO)



รูปที่ 2.17 การรับ และส่งข้อมูลแบบสายอากาศหนึ่งอัน และสายอากาศหลายอัน

ในระบบทั้ง 3 รูปแบบนี้ ระบบสายอากาศโมโม นี้จะให้สมรรถนะทางด้านความจุ ช่องสัญญาณสูงที่สุด จึงมีการวิจัย และพัฒนารูปแบบ เพื่อนำมาใช้แทนระบบที่ใช้สายอากาศ ภาคส่งต้นเดียว และสายอากาศภาครับต้นเดียว ซึ่งทำให้เกิดการพัฒนาสมรรถนะของระบบ ดังนี้

1) อัตราการขยายแถวลำดับ (Array Gain)

การใช้สายอากาศหลายต้น จะทำให้อัตราการขยายของสัญญาณที่ออกมาจากสายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะทาง (Range) และพื้นที่ครอบคลุม (Coverage) ในการส่งสัญญาณเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในกรณีที่เพิ่มพื้นที่ที่ต้องการส่งสัญญาณให้กว้างขึ้น หรือกรณีที่จำนวนของผู้ใช้งานในพื้นที่นั้นมีอยู่ไม่มาก จะทำให้จำนวนการติดตั้งสถานีฐานลดลง เพราะพื้นที่ที่ครอบคลุมมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อดีที่ทำให้กำลังงานส่งจากตัวสถานีเคลื่อนที่ (โทรศัพท์มือถือ) มีค่าลดลง ตามอัตราการขยายของสายอากาศที่สถานีฐานนั้นมีมากขึ้น หรือค่าความไวที่สายอากาศแถวลำดับที่สถานีฐานรับได้มีมากขึ้นนั่นเอง

2) อัตราการขยายไคเวอร์ซิตี (Diversity Gain)

ค่ากำลังของสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนตามการลดทอนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ เทคนิคไคเวอร์ซิตีจึงเป็นวิธีที่มีประโยชน์มากในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจางหายนั้น ๆ หรือที่เรียกว่า เฟดดิ้ง (fading) ดังนั้นระบบสื่อสารที่ใช้สายอากาศส่งหลายต้น และสายอากาศรับหลายต้น (MIMO System) ที่ใช้สายอากาศภาคส่ง M_T ต้น และสายอากาศภาครับ M_R ต้น ที่มีการจางหายหรือเฟดดิ้งเป็นอิสระต่อกัน เมื่อส่งสัญญาณออกไปจะทำให้ภาครับสามารถรวมสัญญาณที่เข้ามาได้ โดยลดปัญหาเรื่องของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของสัญญาณในระบบออกไปได้มาก เมื่อเทียบกับระบบสื่อสารที่ใช้สายอากาศที่ภาครับ และภาคส่งเพียงแค่ต้นเดียว (SISO System)

3) กำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (Spatial Multiplexing Gain)

ช่องสัญญาณในระบบสื่อสารที่ใช้สายอากาศส่งหลายต้น และสายอากาศรับหลายต้นนั้นจะมีการเพิ่มขึ้นของความจุช่องสัญญาณในระบบเป็นเส้นตรง และมีค่าเท่ากับค่าที่น้อยที่สุดระหว่างจำนวนสายอากาศที่ภาคส่ง และภาครับ โดยไม่มีผลต่อค่ากำลังงาน หรือการใช้แบนด์วิดท์ ค่ากำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (Spatial Multiplexing Gain) จะส่งผลให้ความจุของช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการส่งแบบหลายระยะทางนั้น ทางภาคส่งจะทำการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกันออกจากสายอากาศแต่ละต้น ภายใต้เงื่อนไขของช่องสัญญาณที่มีการแพร่กระจายของสัญญาณมากพอ (rich scattering) ทำให้ทางภาครับสามารถแยกสัญญาณต่าง ๆ ออกจากกันได้

4) การลดการแทรกสอด (interference reduction)

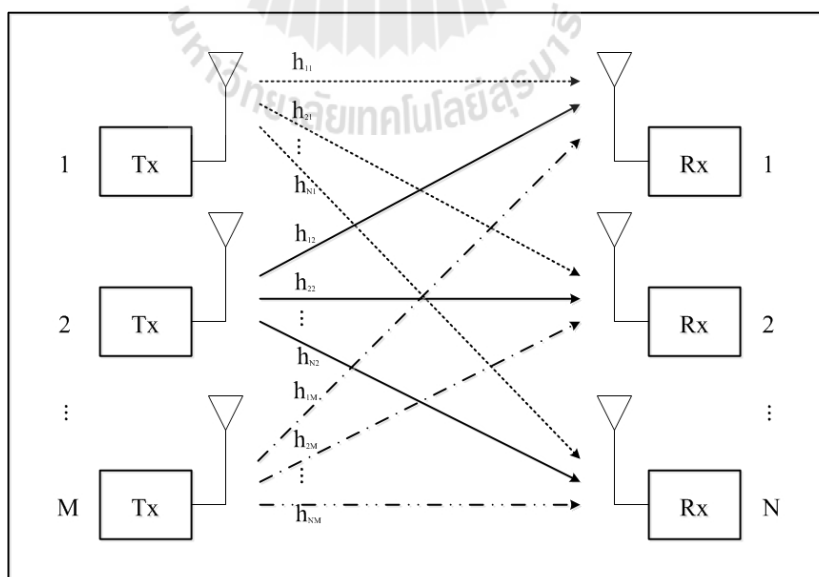
การแทรกสอดแบบร่วมภายในช่องสัญญาณ (co-channel interference) เกิดจากการใช้

ความถี่ซ้ำ (frequency reuse) เมื่อมีการใช้สายอากาศหลาย ๆ ต้นจะเกิดความแตกต่างระหว่างระยะห่างของสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่อยู่ในช่องสัญญาณข้างเคียง จึงทำให้สามารถลดการแทรกสอดได้

หลักการทํางานของระบบ MIMO

ในระบบรับส่งสัญญาณไร้สายทั่วไป การส่งสัญญาณไร้สายไปที่ความถี่เดียวกันจะทำให้เกิดการรบกวนกัน หากเป็นกรณีของสถานีวิทยุ FM นั้น อาจพบว่าบางช่วงก็รับฟังได้ บางช่วงก็รับฟังไม่ได้ นั่นเกิดจากการตอบสนองของคลื่นความถี่นั้นเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งระบบ MIMO (MIMO System) นั้นก็ใช้สายอากาศส่ง และสายอากาศรับหลายชุดด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 2.18 โดยจะประกอบไปด้วย จำนวนสายอากาศของภาคส่ง M ต้น และจำนวนของสายอากาศภาครับจำนวน N ต้น ซึ่งค่า h_{ij} คือค่าตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณหนึ่ง ๆ จากสายอากาศภาคส่ง j ไปยังสายอากาศภาครับ i และค่า n_i คือ ค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นระหว่างส่งสัญญาณไร้สาย เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, N$ และ $j = 1, 2, 3, \dots, M$ ดังนั้นสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศต้นที่ i ของภาครับคือ y_i สามารถแสดงได้ดังนี้

$$y_i = \sum_{j=1}^M h_{ij} x_j + n_i \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.18 ระบบ MIMO ที่ประกอบไปด้วยสายอากาศส่ง M ต้น และ สายอากาศรับ N ต้น

เพื่อความสะดวกในการพิจารณาเราสามารถเขียนสมการที่ 2.21 ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \cdots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \cdots & h_{2N} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & \cdots & h_{3N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ h_{N1} & h_{N2} & h_{N3} & \cdots & h_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_N \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

สามารถเขียนให้กระชับได้เป็น

$$y = Hx + n \quad (2.23)$$

การวัดค่าตอบสนองของช่องสัญญาณนั้น ทำได้โดยการวัดความแรงของสัญญาณที่ได้ในช่วงต้นของเฟรม คือ Preamble ซึ่งจะประกอบไปด้วย Training Sequence จำนวนหนึ่งซึ่งความแม่นยำของการวัดความแรงของสัญญาณนั้น ก็สามารถนำมาคำนวณกลับมาเป็นค่าการตอบสนองของช่องสัญญาณ ซึ่งจะนำมาใช้เพื่อแยกแยะสัญญาณที่ส่งออกมาจากสายอากาศหลาย ๆ ต้น

ในการทำงานของภาครับระบบโมโม่จะเริ่มจากการวัดค่า y_0, y_1, y_2 ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งครบ y_N ค่า นั่นก็คือ การวัดระดับสัญญาณของสายอากาศภาครับทั้งหมด N ต้น ที่มีในช่วงต้นของเฟรม คือ Preamble ที่มี Training Sequence จำนวนหนึ่ง หลังจากนั้นก็เริ่มแก้สมการเพื่อหาข้อมูลที่ถูกส่งออกมา ซึ่งเราจะได้เมตริกซ์ของช่องสัญญาณ H ขนาดเท่ากับ $M \times N$ ซึ่งจะนำมาใช้ในการแก้สมการเพื่อหาค่า x ที่ส่งมาจากภาคส่งสัญญาณจาก x_0, x_1, x_2 ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งครบ x_M ค่า จากนั้นนำข้อมูลที่ถอดรหัสแล้ว มาเรียงลำดับใหม่ก็จะได้ข้อมูลที่ต้นทางส่งมาทั้งหมด

ปัญหาของระบบโมโม่ที่จะทำให้การสื่อสารล้มเหลว เนื่องจากสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนสูง หรือบางช่วงที่มีสัญญาณสะท้อนมาจากวัตถุที่เป็นโลหะ เช่น หลังคาเหล็ก ม่าน หรือตู้เหล็กที่ใช้เก็บเอกสาร จะทำให้ค่า y_N ที่วัดได้ผิดเพี้ยนไป นั่นหมายถึงการถอดสมการเพื่อแยกแยะหาค่า H นั้นอาจจะทำไม่ได้ ซึ่งก็ยังมีวิธีแก้ไข คือ การใช้กระบวนการ CSI (Channel State Information) ซึ่งเป็นการแจ้งสภาพของช่องสัญญาณร่วมกันระหว่างภาครับ และภาคส่ง ซึ่งจะช่วยให้ระบบโมโม่กลับมาทำงานได้ หรือการปรับลดความเร็วในการส่งข้อมูลลงก็ทำให้ระบบโมโม่กลับมาทำงานได้เช่นกัน

2.4 เทคนิคการส่งสัญญาณด้วยระบบ MIMO

วิธีการเพิ่มคุณภาพ และระดับสัญญาณด้วยสายอากาศหลาย ๆ ต้นนั้นมียุทธวิธีด้วยกันหลายวิธี และให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจจะแบ่งเทคนิคการส่งสัญญาณด้วยระบบ MIMO ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ ระบบ MIMO แบบวงเปิด (Opened-loop MIMO System) และ ระบบ MIMO แบบวงปิด (Closed-loop MIMO System) ซึ่ง 2 วิธีนี้ต่างกันตรงที่มีการนำข้อมูลการรับสัญญาณของอีกด้านหนึ่งหรือยูสเซอร์ มาใช้ในการปรับแต่งกระบวนการปรับแต่งสัญญาณ และการแพร่กระจายสัญญาณเพื่อให้ได้ระดับสัญญาณ และคุณภาพที่มากขึ้น โดยระบบ MIMO แบบวงเปิดจะไม่มี การรับสัญญาณของยูสเซอร์มาใช้ปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณ แต่ระบบ MIMO แบบวงปิดจะมีการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณจากข้อมูลของผู้ใช้งาน ซึ่งทั้ง 2 เทคนิคนี้จะถูกนำไปใช้งานในมาตรฐาน IEEE 802.16 ด้วย โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาเทคนิคการส่งสัญญาณด้วยระบบ MIMO แบบวงเปิด

2.4.1 ระบบ MIMO แบบวงเปิด

สำหรับเทคนิคการส่งสัญญาณระบบ MIMO แบบวงเปิดนั้น ก็จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน ถ้าเรียกตามมาตรฐานไวเมกซ์ก็คือ รูปแบบ Matrix A หรือ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และรูปแบบ Matrix B หรือ เทคนิคการมอดูเลตเชิงตำแหน่ง

1) เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา

เทคโนโลยีที่ใช้การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา (Space Time Coding : STC) เป็นเทคโนโลยีแบบ Spatial diversity โดยอาศัยชุดของสายอากาศหลายต้นวางในระยะห่างที่เหมาะสม และส่งข้อมูลซ้ำ ๆ ออกไปยังปลายทางที่มีสายอากาศรับหลายต้นเช่นกัน ซึ่งเทคนิคนี้จะใช้ความถี่ได้เต็มประสิทธิภาพเนื่องจากใช้ความถี่เดียวกันในการส่งสัญญาณ ไร้สายออกไปจากสายอากาศหลายต้นพร้อม ๆ กันโดยไม่ทำให้เกิดการรบกวนกัน ซึ่งเทคนิคนี้จะทำการต่อสู้กับปัญหาที่เกิดขึ้นในการรับ และส่งสัญญาณไร้สายโดยเฉพาะ หรือปัญหาที่เรียกว่า Multipath fading ปัญหาในเรื่องของ Multipath fading เป็นปัญหาการสื่อสารไร้สายที่แพร่กระจายออกไปเมื่อส่งสัญญาณไปยังปลายทาง แต่ด้วยการแพร่กระจายออกไปนั้นสัญญาณก็จะออกไปในหลายทิศทาง สัญญาณที่ถูกส่งออกไปก็อาจจะไปกับกระทบกับสิ่งต่าง ๆ รอบตัว เช่น ตึกกรามบ้านช่อง ต้นไม้ เป็นต้น การสะท้อนของสัญญาณไปในทิศทางต่าง ๆ มีบางส่วนที่สะท้อนแล้วมารวมกับสัญญาณที่ไม่สะท้อน และพุ่งตรงไปยังยูสเซอร์ที่รับสัญญาณนั้น ซึ่งการรวมกันของสัญญาณก็อาจจะมีทั้งเข้ามา รวมกันเพื่อเสริมหรือหักล้างกัน ทำให้สัญญาณปลายทางที่รับได้ผิดเพี้ยนไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะทางที่สัญญาณนั้นเดินทาง และเฟสของสัญญาณที่เข้ามา ดังนั้นหากมีการวางสายอากาศต้นที่สองซึ่งอยู่ห่างออกไป จากที่เคยหักล้างกันก็อาจจะรวมกันในลักษณะแตกต่างกัน ทำให้สัญญาณที่

รับได้นั้นดีขึ้นจึงเกิดแนวคิดของ Receive diversity ที่มีสายอากาศต้นอื่นช่วยรับสัญญาณ แล้วนำสัญญาณมารวมกันเพื่อทำให้สัญญาณที่ดีขึ้น โดยการนำสัญญาณมารวมกันนั้นก็จะมี 2 ลักษณะ คือแบบ Selective combining ซึ่งจะเลือกรับสัญญาณแรงที่สุดดีที่สุดจากสายอากาศเส้นใดเส้นหนึ่งเข้ามา เพื่อประมวลสัญญาณต่อไป ซึ่งวิธีการนี้ง่ายต่อการประมวลสัญญาณเข้ามาด้วยการเลือกเพียงสัญญาณเดียวเท่านั้น ไม่ต้องทำอะไรเพิ่มเติม เหตุที่วิธีนี้น่าสนใจก็เพราะมีต้นทุนที่ถูก แต่วิธีนี้ยังไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุด จึงมีอีกวิธีคือ Maximal ratio combining จะเป็นการการนำสัญญาณทั้งสองมารวมกัน โดยให้น้ำหนักของสัญญาณที่เข้ามารวมกันนั้น แตกต่างกันตามสภาพของสัญญาณที่เข้ามา โดยจะให้น้ำหนักตามค่า SNR ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงคุณภาพของสัญญาณที่เข้ามา และนำมารวมเข้าด้วยกัน ช่วยให้สัญญาณที่เข้ามามีคุณภาพดี และไม่ต้องกังวลหากสัญญาณที่เข้ามาจะมีปัญหา เพราะมีอีกสัญญาณหนึ่งคอยช่วยเหลือ

เมื่อมีภาครับสัญญาณก็ต้องมีภาคส่งสัญญาณด้วยเช่นกัน ดังนั้นก็จะมีกรณีของ Transmit diversity มาทำงานร่วมด้วย โดยมีเทคนิคในการเข้ารหัสที่นิยมใช้ดังนี้

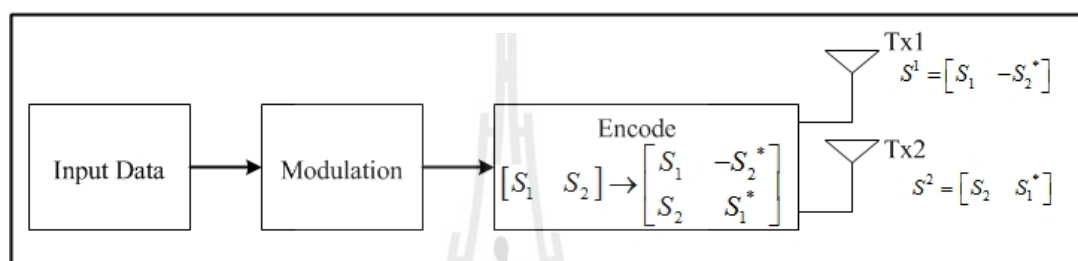
- การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา แบบเทรลลิส Space-Time Trellis Code (STTC)
- การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา แบบบล็อก Space-Time Block Code (STBC)
- การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา แบบ Alamouti

ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะขอกล่าวถึงการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา แบบ Alamouti เนื่องจากมีคุณลักษณะเฉพาะตัวที่น่าสนใจ คือ การถอดรหัสเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน มีรูปแบบที่เรียบง่าย และให้โคเวอริจี้ดีในระบบสูง

การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบ Alamouti นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.18 เมื่อข้อมูล (Input Data) สร้างสัญลักษณ์ข้อมูล และส่งเข้าสู่วงจรมอดูเลเตอร์ (Modulator) ครึ่งละจำนวน 2 สัญลักษณ์ สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแล้ว ได้แก่ S_1 และ S_2 จะได้รับการแปลงด้วยวงจรเข้ารหัส (Encoder) ให้ได้เป็นสัญญาณที่ใช้ส่งจริงในสายอากาศแต่ละต้น โดยรูปแบบการส่งสัญญาณสามารถเขียนแสดงในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} S_1 & -S_2^* \\ S_2 & S_1^* \end{bmatrix}$$

การส่งสัญญาณแต่ละครั้ง หรือการส่งสัญญาณหนึ่งบล็อกจะใช้เวลาในการส่ง 2 คาบเวลา ต่อเนื่องกัน ในการส่งของคาบเวลาแรกหรือที่เวลา t สัญญาณที่ส่งออกจากสายอากาศต้นที่ 1 และ ต้นที่ 2 ได้แก่ s_1 และ s_2 ตามลำดับ ส่วนในคาบเวลาที่ 2 หรือที่เวลา $t+T$ สัญญาณที่ส่งออกจาก สายอากาศที่ 1 และ 2 ได้แก่ $-s_2^*$ และ s_1^* ตามลำดับ โดยคุณสมบัติที่น่าสนใจประการหนึ่งของ รหัสแบบ Alamouti คือ การที่เราสามารถกำหนด หรือ เลือกชนิดของการมอดูเลตแบบใดก็ได้ ซึ่ง ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ใช้การมอดูเลตทั้งหมด 4 แบบคือ BPSK, QPSK, 16QAM และ 64QAM



รูปที่ 2.19 การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา แบบ Alamouti

การถอดรหัสข้อมูลสำหรับรหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบ Alamouti จะ กล่าวถึงการถอดรหัสสำหรับการใช้สายอากาศรับหลายต้น เนื่องจากในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบ Alamouti ที่มีจำนวนสายอากาศส่ง 2 ต้น และจำนวน สายอากาศรับ 2 และ 3 ต้น กระบวนการถอดรหัสสัญญาณนั้นอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าสัมประสิทธิ์ ของช่องสัญญาณในช่วงเวลา t_1 และ t_2 มีค่าคงที่ นั่นหมายความว่าสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณจาก สายอากาศส่งต้นแรกไปยังสายอากาศภาครับลำดับที่ j หรือ $h_{j,1}$ และรวมถึงสัมประสิทธิ์ ช่องสัญญาณจากสายอากาศส่งต้นที่สองไปยังสายอากาศภาครับลำดับที่ j หรือ $h_{j,2}$ จะต้องเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} h_{j,1} &= h_{j,1}(t) = h_{j,1}(t+T) = h_{j,1}(t_1) = h_{j,1}(t_2) \\ h_{j,2} &= h_{j,2}(t) = h_{j,2}(t+T) = h_{j,2}(t_1) = h_{j,2}(t_2) \end{aligned} \quad (2.24)$$

และให้ระบบมีจำนวนของสายอากาศภาครับจำนวน n_r ต้น สัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศภาครับ ลำดับที่ j ของสองช่วงเวลาคือ r_j^1 และ r_j^2 สัญญาณที่รับได้อยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$\begin{aligned} r_j^1 &= h_{j,1}S_1 + h_{j,2}S_2 + n_j^1 \\ r_j^2 &= h_{j,1}S_2^* + h_{j,2}S_1^* + n_j^2 \end{aligned} \quad (2.25)$$

จากสมการที่ (2.25) องค์ประกอบ Additive White Gaussian Noise (AWGN) ถูกเพิ่มลงไปทีละสายอากาศลำดับที่ j ในช่วงระยะเวลา t_1 และ t_2 แสดงโดย n_j^1 และ n_j^2 ตามลำดับ

กระบวนการถอดรหัสทำได้โดยอาศัยการรวมของสัญญาณ และการถอดรหัสแบบ Maximum likelihood อย่างไรก็ตามด้วยวิธีการนี้ สัมประสิทธิ์ของสัญญาณถูกพิจารณาว่าถูกรับรู้โดยถูกต้องสมบูรณ์ที่ภาครับ ในการรับรู้ข้อมูลสถานะช่องสัญญาณที่ภาครับสามารถทำได้โดยการใช้สัญญาณนำร่อง กระบวนการของการรวมสัญญาณแบบเชิงเส้น (Linear Combination) ของสัญญาณที่รับได้ สามารถแสดงได้เป็น

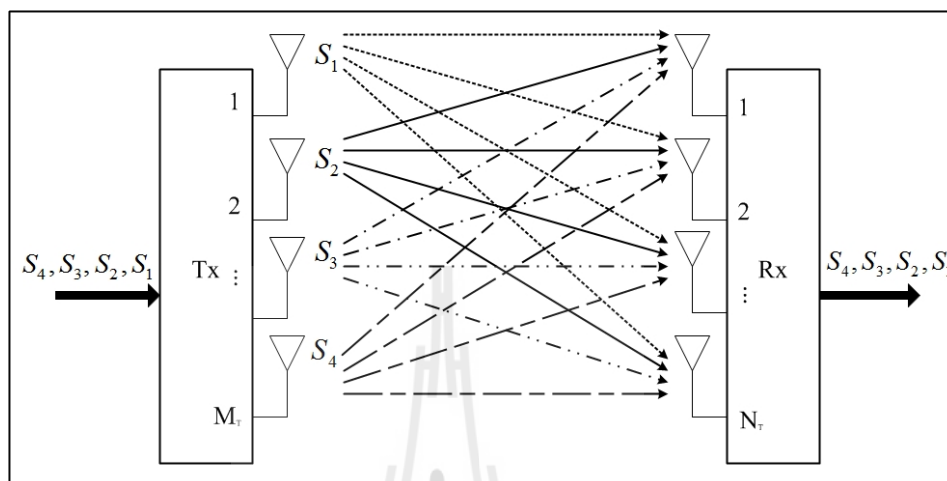
$$\begin{aligned} \tilde{S}_1 &= \sum_{j=1}^{n_R} \{h_{j,1}^* r_j^1 + h_{j,2} (r_j^2)^*\} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_R} |h_{j,i}|^2 S_1 + \sum_{j=1}^{n_R} \{h_{j,1}^* n_j^1 + h_{j,2} (n_j^2)^*\} \\ \tilde{S}_2 &= \sum_{j=1}^{n_R} \{h_{j,2}^* r_j^1 - h_{j,1} (r_j^2)^*\} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_R} |h_{j,i}|^2 S_2 + \sum_{j=1}^{n_R} \{h_{j,2}^* n_j^1 - h_{j,1} (n_j^2)^*\} \end{aligned} \quad (2.26)$$

เราจะเห็นว่าสิ่งที่ส่งผลกระทบต่อในการตัดสินใจจากการถอดรหัสประกอบด้วยขนาดของสัญญาณที่ถูกส่ง และสัญญาณรบกวน ขนาดของสัญญาณมีค่าเท่ากับผลรวมของขนาดสัญญาณที่ได้จากสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ และสัญญาณรบกวนคือ ผลรวมของสัญญาณรบกวนที่สายอากาศภาครับคูณกับสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ

2) เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง

เป็นเทคนิคในการส่งสัญญาณที่ให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูง เนื่องจากการส่งข้อมูลนั้นจะมีการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระกันทั้งหมด M_T ค่า เท่ากับจำนวนสายอากาศที่อยู่ในภาคส่งต่อหนึ่งคาบสัญญาณ คือ ข้อมูลที่ถูกส่งไปในแต่ละสายอากาศจะเป็นข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.20 เทคนิคการส่งสัญญาณแบบนี้จะอาจเรียกง่าย ๆ ว่าต่างคนต่างส่งข้อมูล โดยที่ส่งความถี่เดียวกัน และช่วงเวลาเดียวกัน ผลที่ได้คือช่วยให้อัตราการส่งข้อมูลสามารถส่งได้เร็วขึ้น แต่ก็ยังพบปัญหาในด้านการรบกวนกันของสัญญาณอยู่ ทำให้เทคนิคการส่งสัญญาณแบบนี้ไม่เหมาะสมกับสภาพการส่งสัญญาณแบบแนวตรง Line of Sight และไม่สามารถเพิ่มพื้นที่การสื่อสารออกไปได้ไกลมากนัก โดยเทคนิคนี้จะใช้ Multipath ในการแยกสัญญาณออกจากกัน ซึ่งพื้นที่ที่เหมาะสมใน

การใช้เทคนิคนี้ก็คือ บริเวณในเมืองที่มีตึก บ้าน หรือ สิ่งสะท้อนสัญญาณ ซึ่งจะสร้าง Multipath ได้มาก ทำให้การทำงานของเทคนิคนี้ดีขึ้น



รูปที่ 2.20 การทำงานของการเข้ารหัสเทคนิคการมัลติเพิล็กซ์เชิงตำแหน่ง

2.5 แบบจำลองช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบไวแมกซ์

ในการสื่อสารแบบไร้สายจำเป็นต้องมีความแม่นยำในการอธิบายช่องสัญญาณแบบไร้สาย ซึ่งในแบบจำลองช่องสัญญาณนั้นขึ้นอยู่กับแต่ละสิ่งแวดล้อม เช่นในการสื่อสารยุคแรกจะมีสถาปัตยกรรมที่มีสถานีฐาน และสถานีลูกข่ายสื่อสารกันแบบ LOS ซึ่งระบบมีเซลล์เดียว และไม่มีการคิด Co-channel interference ในการสื่อสารยุคที่สอง ระบบมีรูปแบบของสถาปัตยกรรมที่มีหลายเซลล์ ที่มีการติดต่อ สื่อสารแบบ NLOS ซึ่งในเนื้อหาส่วนนี้จะกำหนดแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่มีสถาปัตยกรรมแบบหลายเซลล์ ในแบบจำลองนี้จะกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

- แต่ละเซลล์มีรัศมีน้อยกว่า 10 กม.
- สายอากาศภาครับแบบชี้ทิศทางจะติดตั้งได้ชายคาบ้าน หน้าต่าง และบนหลังคา
- สายอากาศที่สถานีฐานมีความสูง 15 - 40 เมตร
- ความต้องการพื้นที่ครอบคลุมประมาณ 80 - 90 เปอร์เซ็นต์

ในช่องสัญญาณแบบไร้สายจะแสดงลักษณะดังนี้

- Path loss
- Delay spread Fading

- Doppler spread
- Co channel interference

2.5.1 แบบจำลอง Path Loss Modified Stanford University Interim (SUI)

ภูมิภาคที่มี Path loss มาก คือ บริเวณที่เต็มไปด้วยเนินเขา (ประเภท A) ส่วนภูมิภาคที่มี Path loss น้อย จะเป็นบริเวณที่ราบเรียบ และมีต้นไม้เบาบาง (ประเภท C) และที่ที่มี Path loss กลาง ๆ ถูกจัดให้อยู่ในประเภท B ข้อมูลจากการทดลองถูกเก็บรวบรวม โดย AT&T ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี 1995 ซึ่งสูตรในการหา Path loss หาได้จาก

$$PL = A + 10\gamma \log(d / d_0) + X_f + X_h + s \quad (2.27)$$

เมื่อ $A = 20 \log(4\pi d_0 / \lambda)$ โดย λ คือ ความยาวคลื่น $\gamma = (a - bh_b + c / h_b)$ โดย h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน มีค่า 10 - 80 เมตร $d_0 = 100$ เมตร a , b และ c คือ ค่าคงที่ในแต่ละภูมิภาค และผลกระทบจาก shadowing แสดงโดย s ซึ่งมีการแจกแจงแบบ lognormal โดย s มีค่าตั้งแต่ 8.2 - 10.6 dB ขึ้นอยู่กับแต่ละภูมิภาค และ X_f และ X_h แสดงได้เป็น

$$X_f = 6 \log\left(\frac{f}{2000}\right) \quad (2.28)$$

และ

$$X_h = -10.8 \log\left(\frac{h_r}{2.0}\right) \quad (2.29)$$

$$X_h = -20.0 \log\left(\frac{h_r}{2.0}\right) \quad (2.30)$$

จากสมการที่ (2.29) สำหรับ ประเภท A และ B สมการที่ (2.30) สำหรับประเภท C เมื่อ f คือ ความถี่ของสายอากาศภาครับ มีหน่วยเป็น MHz และ h_r คือ ความสูงของสายอากาศภาครับ อยู่ระหว่าง 2 - 10 เมตร

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ a , b และ c สำหรับช่องสัญญาณ SUI

ค่าพารามิเตอร์	ประเภทของภูมิประเทศ		
	A	B	C
a	4.6	4	3.6
b	0.0075	0.0065	0.005
c	12.6	17.1	20

2.5.2 RMS delay spread

ค่า rms delay spread เป็นไปตามการแจกแจงแบบ lognormal ซึ่งแบบจำลองนี้มีค่า rms delay spread ดังสมการ

$$\tau_{rms} = T_1 d^\epsilon y \quad (2.31)$$

เมื่อ d คือ ระยะทางในหน่วยกิโลเมตร T_1 คือ ค่าเฉลี่ยของ τ_{rms} ที่ระยะ $d = 1$ กิโลเมตร ϵ มีค่าระหว่าง 0.5 - 1.0 และ y คือ ความแปรปรวนของ lognormal

2.5.3 Fade distribution หรือ K-Factor

สัญญาณที่มีแบนแคบ จะมีลักษณะการแจกแจงแบบริเซียน (Rician distribution) ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญของการแจกแจงแบบนี้คือค่า K-Factor ซึ่งสามารถแสดงส่วนประกอบกำลังที่เป็นแบบอยู่กับที่ (fixed) หรือเป็นแบบกระเจิง (scatter) จากการผลการทดลองที่บริเวณอ่าวในรัฐซานฟรานซิสโก ที่ความถี่ 2.4 GHz ความสูงของสายอากาศภาคส่งประมาณ 20 เมตร ซึ่งการแจกแจงของ K-Factor นี้เป็นแบบ lognormal ซึ่งมีค่าเฉลี่ยขึ้นอยู่กับฤดู ความสูงของสายอากาศ ความกว้างของลำคลื่นของสายอากาศ และระยะทาง ในที่นี้มีความเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 8 dB จากผลการทดลองนี้สามารถหาค่า K-factor ได้ดังนี้

$$K = F_s F_h F_b K_0 d^\gamma u \quad (2.32)$$

ซึ่ง F_s คือ factor ที่ขึ้นอยู่กับฤดู โดย $F_s = 1$ ในฤดูร้อน $F_s = 2.5$ ในฤดูหนาว
 F_h คือ factor ที่ขึ้นอยู่กับความสูงของสายอากาศภาครับ โดย $F_h = (h/3)^{0.46}$
 F_b คือ factor ที่ขึ้นอยู่กับความกว้างของลำคลื่น ซึ่งมีค่า $F_b = (b/17)^{-0.62}$

- K_0 และ γ คือ regression coefficient ซึ่ง $K_0=10$, $\gamma=-0.5$
- u คือ ตัวแปร lognormal ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 dB และความเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 8 dB
- y คือ ความแปรปรวนของ lognormal

2.5.4 Antenna Gain Reduction Factor (GRF)

Factor นี้ใช้สำหรับพิจารณา link budget ของสายอากาศภาครับ จากผลการทดลองที่วัดในบริเวณชานเมือง โดยความสูงของสายอากาศที่สถานีฐานสูง 43 เมตร สายอากาศที่ภาครับสูง 5.2, 10.4 และ 16.5 เมตร และสายอากาศภาครับมีความกว้างของลำคลื่น 10° สำหรับค่า GRF ที่สายอากาศภาครับสูง 5.2 เมตร นั้นมีค่าเท่ากับ 10 dB ส่วนค่า GRF ที่สายอากาศภาครับสูง 10.4 และ 16.5 เมตร จะมีค่าประมาณ 7 dB

2.5.5 แบบจำลองช่องสัญญาณ Modified Stanford University Interim (SUI)

ในแบบจำลองนี้จะแบ่งรูปแบบของช่องสัญญาณออกเป็น 6 รูปแบบ ซึ่งถูกเลือกมาจากสามภูมิภาคในสหรัฐอเมริกา ซึ่งแบบจำลองนี้เหมาะสำหรับใช้ในการจำลองผลออกแบบพัฒนา และใช้ในการทดสอบเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับการสื่อสารแบนกว้างแบบไร้สายแบบนิ่ง

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ถูกเลือกมาจากแบบจำลองที่ได้กล่าวมาข้างต้นซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI (Erceg, Hari, Smith, Baum, Sheikh, Tappenden, Costa, Bushue, Sarajedini, Schwartz, Branlund, Kaitz, and Trinkwon, 2001) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI

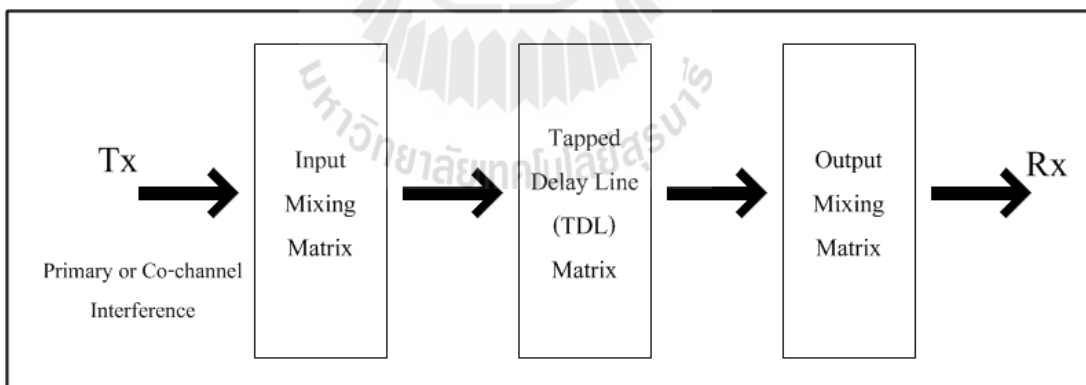
ประเภทของภูมิภาค		รูปแบบช่องสัญญาณ SUI	
C		SUI-1 SUI-2	
B		SUI-3 SUI-4	
A		SUI-5 SUI-6	
ค่า K -Factor ต่ำ			
Doppler	Low delay spread	Moderate delay spread	High delay spread
Low	SUI-3		SUI-5
High		SUI-4	SUI-6

ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI (ต่อ)

ค่า K -Factor สูง			
Doppler	Low delay spread	Moderate delay spread	High delay spread
Low	SUI-1 SUI-2		
High			

โครงสร้างของช่องสัญญาณ SUI ที่แสดงในรูปที่ 2.21 แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

- 1) Input Mixing Matrix ในส่วนนี้จะเป็นการสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตเมื่อใช้สายอากาศส่งหลายต้น
- 2) Tapped Delay Line Matrix ในส่วนนี้จะเป็นการ multipath fading ของช่องสัญญาณที่มี tapped delay line 3 tap ซึ่งในแต่ละ tap นั้นจะเป็นแบบ non uniform delay และอัตราขยายมีการแจกแจงแบบริเชียนที่มี K -Factor > 0 หรือเป็นแบบเรย์ลีที่มี K -Factor $= 0$
- 3) Output Mixing Matrix ในส่วนนี้จะเป็นการสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตที่มีการใช้สายอากาศรับหลายต้น



รูปที่ 2.21 โครงสร้างแบบจำลองของช่องสัญญาณ SUI

โครงสร้างของช่องสัญญาณ SUI

- แต่ละเซลล์มีรัศมี 7 กิโลเมตร
- สายอากาศภาคส่งสูง 30 เมตร

- สายอากาศภาครับสูง 6 เมตร
 - สายอากาศภาคส่งมีความกว้างลำคลื่น 120°
 - สายอากาศภาครับมีความกว้างลำคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง(360°) และ 30°
- สำหรับสายอากาศที่มีความกว้างลำคลื่น 30° ค่า RMS delay spread จะน้อยกว่า

2.3 เท่าของสายอากาศแบบรอบทิศทาง ซึ่งเป็นผลทำให้ tap ที่ 2 กำลังจะถูกลดทอนลง 6 dB และใน tap ที่ 3 กำลังจะถูกลดทอนลง 12 dB

- มีโพลาริเซชันในแนวตั้ง
- 90 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมเซลล์ มีความน่าเชื่อถือ 99.9 เปอร์เซ็นต์ ในแต่ละพื้นที่ครอบคลุม

ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ช่องสัญญาณ SUI-3 ในการจำลองแบบรายละเอียดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI-3 แสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของช่องสัญญาณ SUI-3

SUI-3 Channel				
	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Units
Delay	0	0.4	0.9	μs
Power (omni Ant.)	0	-5	-10	dB
90% K-Fact. (omni)	1	0	0	
75% K-Fact. (omni)	7	0	0	
Power (30° Ant.)	0	-11	-22	dB
90% K-Fact. (omni)	3	0	0	
75% K-Fact. (omni)	19	0	0	
Doppler	0.4	0.3	0.5	Hz
Ant. Corelation : $\rho_{ENV} = 0.4$		Terrain Type : B		
Gain Reduction Factor : $GRF = 3$ dB		Omni Antenna : $\tau_{RMS} = 0.264 \mu s$		
Normalization Factor : $F_{omni} = -1.5113$ dB		Overall K : K = 0.5 (90%); K = 1.6 (75%)		
$F_{30^\circ} = -0.3573$ dB		30° antenna : $\tau_{RMS} = 0.123 \mu s$		
		Overall K : K = 2.2 (90%); K = 7.0 (75%)		

2.6 สรุปเนื้อหาในบทที่ 2

เนื้อหาที่กล่าวถึงในบทนี้จะอธิบายการส่งสัญญาณแบบไร้สาย โดยจะเน้นไปที่ระบบไวแมกซ์ ซึ่งเป็นมาตรฐานที่มีอัตราในการรับ และส่งข้อมูลสูง โดยในระบบไวแมกซ์นี้จะกล่าวถึงแอร์อินเตอร์เฟซของระบบไวแมกซ์ การทำงานในชั้น Medium Access Control และการทำงานในชั้น PHY Layer รวมถึงการอธิบายโครงสร้างการทำงานของระบบไวแมกซ์ ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็นโครงสร้างของภาคส่งสัญญาณ และ โครงสร้างของภาครับสัญญาณ จากนั้นจะเป็นการอธิบายถึงการนำระบบโมโมเข้ามาใช้งาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับ และส่งข้อมูลให้แก่ระบบไวแมกซ์ รวมถึงเทคนิคของระบบโมโมแบบวงเปิด และเทคนิคการเข้ารหัสของข้อมูลที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ จากนั้นจะอธิบายถึงแบบจำลองช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบไวแมกซ์ ซึ่งก็คือช่องสัญญาณ SUI ในงานวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ช่องสัญญาณ SUI-3 ซึ่งอธิบายถึงรูปแบบ และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้งาน



บทที่ 3

เทคนิคการสลับไมโมแบบปรับตัวในระบบไวแมกซ์

สำหรับเทคนิคไมโมที่รองรับกับการทำงานตามมาตรฐานไวแมกซ์นั้นก็จะมียู่ 3 รูปแบบด้วยกันคือ รูปแบบ Matrix A รูปแบบ Matrix B และรูปแบบ Matrix C ซึ่งแต่ละรูปแบบนี้จะมีอัตราเร็วในการส่งข้อมูล และรองรับกับจำนวนของสายอากาศที่ใช้งานแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยวิทยานิพนธ์นี้ใช้จำนวนของสายอากาศส่งที่ 2 ต้น โดยการใช้งานสายอากาศส่งที่ 2 ต้นนี้ ก็จะรองรับกับการทำงานของระบบไมโมสองรูปแบบด้วยกันคือ รูปแบบ Matrix A และรูปแบบ Matrix B ซึ่งทั้งสองรูปแบบนี้ก็จะมีการทำงานที่มีข้อดีที่แตกต่างกันไป ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนอ เทคนิคการสลับไมโมแบบปรับตัว เพื่อนำข้อดีของทั้งสองรูปแบบมาใช้งาน ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.1 เทคนิคไมโมในระบบไวแมกซ์

ในมาตรฐานไวแมกซ์นั้นมีเทคนิคไมโมที่รองรับกับการทำงานของระบบอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน สำหรับระบบไมโมที่มีจำนวนของสายอากาศภาคส่ง 2 ต้นนั้น จะรองรับกับการทำงานของระบบไวแมกซ์สองรูปแบบ คือ รูปแบบ Matrix A ที่รองรับเทคนิคการส่งข้อมูลแบบการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา (Space-Time Coding : STC) และ รูปแบบ Matrix B คือ เทคนิคการส่งข้อมูลแบบการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง (Spatial Multiplexing : SM) และสำหรับระบบที่ใช้จำนวนของสายอากาศที่ภาคส่งจำนวน 4 ต้นนั้นจะรองรับกับการทำงานของระบบไวแมกซ์ 3 รูปแบบด้วยกัน คือ

- รูปแบบ Matrix A (rate 1) รองรับกับเทคนิคการส่งข้อมูลแบบการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา
- รูปแบบ Matrix B (rate 2) รองรับกับเทคนิคการส่งข้อมูลสองรูปแบบคือ การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และ การมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง
- รูปแบบ Matrix C (rate 4) จะรองรับกับเทคนิคการส่งข้อมูลแบบ การมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง เพียงรูปแบบเดียว

โดยทำการเปรียบเทียบรูปแบบของจำนวนสายอากาศภาคส่ง และจำนวนของสายอากาศภาครับด้วยอัตราเร็วในการส่งข้อมูลแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 และเปรียบเทียบกับเทคนิคที่ใช้ในการส่งข้อมูลของแต่ละรูปแบบแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบจำนวนของสายอากาศภาคส่ง และอัตราเร็วในการส่งข้อมูล

จำนวนสายอากาศภาคส่ง	อัตราเร็วในการส่งข้อมูล		
	1x	2x	4x
4	STC (Matrix A)	STC & SMX (Matrix B)	SMX (Matrix C)
2	STC (Matrix A)	SMX (Matrix B)	-
1	Baseline case	-	-

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบจำนวนของสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศภาครับกับเทคนิคที่ใช้ในการส่งข้อมูล

จำนวนสายอากาศส่ง	จำนวนสายอากาศรับ			
	1	2	3	4
1	STC (Matrix A)	2xSMX (Matrix B) STC + 2xMRC (Matrix A)	2xSMX (Matrix B) STC + 3xMRC (Matrix A)	4xSMX (Matrix C)
2	STC (Matrix A)	2xSMX (Matrix B) STC + 2xMRC (Matrix A)	2xSMX (Matrix B) STC + 3xMRC (Matrix A)	STC + 4xMRC (Matrix A)
1	Baseline Case	MRC	MRC	MRC

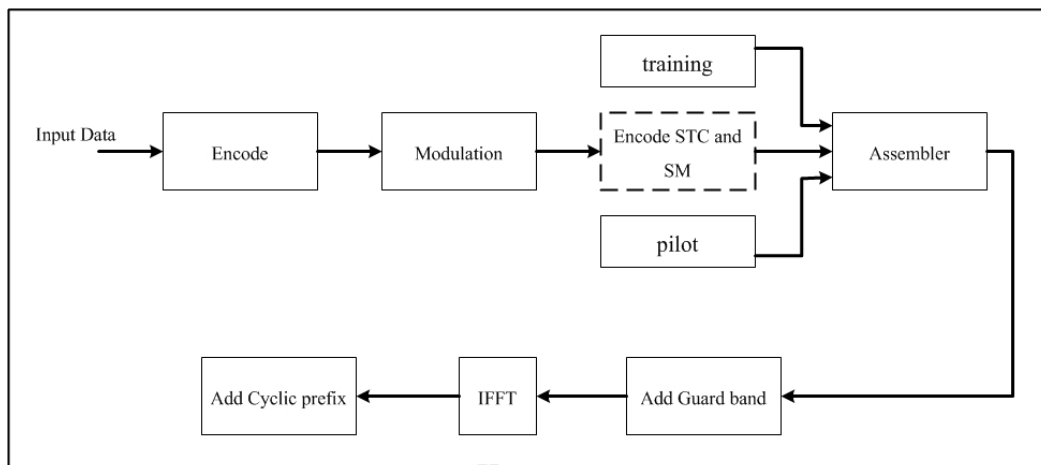
จากเทคนิคของระบบโมโม ในตารางที่ 3.2 นั้นจะมีรูปแบบของเมตริกซ์ในการเข้ารหัสที่แตกต่างกันตามจำนวนของสายอากาศภาคส่ง และจำนวนของสายอากาศภาครับ และอัตราเร็วในการส่งข้อมูลของแต่ละเทคนิคจึงสรุปใหม่ ได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงรูปแบบเมตริกซ์ที่ใช้ในการเข้ารหัสของเทคนิคต่าง ๆ

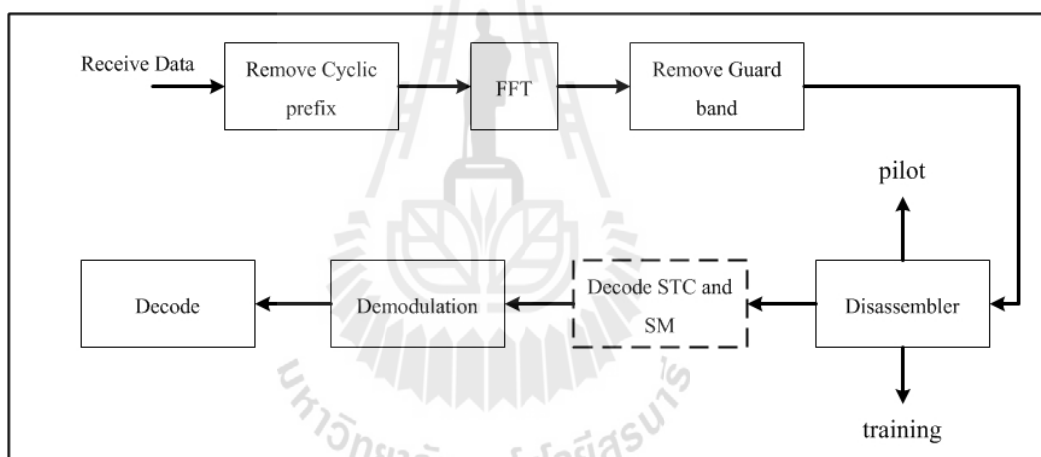
Data Rate		1x	2x	4x
สายอากาศ ภาคส่ง 2 ต้น	เทคนิค ที่ใช้	STC (Matrix A)	Spatial Multiplexing (Matrix B)	-
	รูปแบบ เมตริกซ์	$\begin{bmatrix} S_1 & -S_2^* \\ S_2 & S_1^* \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}$	-
สายอากาศ ภาคส่ง 4 ต้น	เทคนิค ที่ใช้	STC (Matrix A)	STC และ Spatial Multiplexing (Matrix B)	Spatial Multiplexing (Matrix C)
	รูปแบบ เมตริกซ์	$\begin{bmatrix} S_1 & -S_2^* & 0 & 0 \\ S_2 & S_1^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 & -S_4^* \\ 0 & 0 & S_4 & S_3^* \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} S_1 & -S_2^* & S_5 & -S_7^* \\ S_2 & S_1^* & S_6 & -S_8^* \\ S_3 & -S_4^* & S_7 & -S_5^* \\ S_3 & S_3^* & S_8 & S_6^* \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix}$

3.2 โครงสร้างของระบบไวแมกซ์ที่ใช้เทคนิคโมโม

ระบบการสื่อสารไร้สายไวแมกซ์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ จะนำเสนอโครงสร้างของระบบโดยการนำเทคนิคโมโมเข้ามาใช้งาน เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการรับ และส่งข้อมูลของระบบไวแมกซ์ ซึ่งจะแบ่งออกเป็นภาคส่งสัญญาณ และภาครับสัญญาณ ที่ภาคส่งสัญญาณนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ในส่วนการทำงานของเทคนิคโมโมที่นำเสนอนั้นจะเป็นการเข้ารหัสทั้งสองเทคนิค คือ การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา (Space-Time coding : STC) และการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง (Spatial Multiplexing : SM) เมื่อข้อมูลผ่านการมอดูเลตสัญญาณมาแล้ว จะนำข้อมูลนั้นมาเข้ารหัสสำหรับเทคนิคโมโม และทำการส่งข้อมูลออกไปตามลำดับ ในส่วนภาครับสัญญาณนั้นจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 เมื่อข้อมูลถูกรับได้ที่เครื่องรับ จะผ่านกระบวนการต่างๆ จากนั้นจะทำการแยก pilot และ training ออก เมื่อได้ข้อมูลออกมา ก็จะนำข้อมูลนั้นไปผ่านกระบวนการถอดรหัสเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูส่งมา ในส่วนของบล็อกโคเดแกรมต่าง ๆ นอกเหนือจากกระบวนการเข้ารหัสของเทคนิคโมโม และการถอดรหัสของเทคนิคโมโมนั้น เราได้อธิบายหลักการทำงานไว้แล้วในบทที่ 2



รูปที่ 3.1 โครงสร้างภาคส่งของระบบไวแมกซ์ที่ใช้เทคนิคโมโม



รูปที่ 3.2 โครงสร้างภาครับของระบบไวแมกซ์ที่ใช้เทคนิคโมโม

โดยในงานวิทยานิพนธ์นี้จะจำลองระบบโดยใช้จำนวนของสายอากาศที่ภาคส่งจำนวน 2 ต้น และสายอากาศที่ภาครับจำนวน 2 และ 3 ต้น ตามลำดับ ผ่านช่องสัญญาณที่ใช้คือ SUI-3 ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการส่งสัญญาณของระบบโมโมก็จะมี 2 เทคนิคดังนี้

3.2.1 เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา

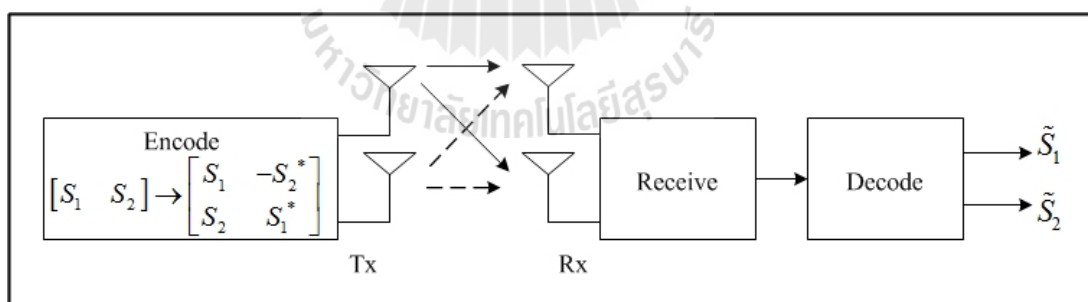
ในการจำลองแบบนั้นจะใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไวแมกซ์ ในการรับ และส่งข้อมูล โดยรูปแบบที่เป็นที่นิยมใช้งานกันได้แก่การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกในรูปแบบของ Alamouti เมื่อแหล่งกำเนิดข้อมูลสร้างสัญลักษณ์ข้อมูลส่งเข้าสู่ตัวจรมอคูเลเตอร์ ครั้งละ 2 สัญลักษณ์ จากนั้นสัญลักษณ์ทั้ง 2 จะถูกส่งเข้า

ไปสู่วงจรการเข้ารหัส และถูกส่งผ่านไปยังสายอากาศส่งเพื่อส่งผ่านช่องสัญญาณสื่อสารไร้สายไปยังภาครับ การส่งสัญญาณในแต่ละครั้ง หรือ สัญญาณหนึ่งบิตจะใช้เวลาในการส่ง 2 คาบเวลาที่มีความต่อเนื่องกัน โดยเมตริกซ์แถวจะแสดงตำแหน่งหรือสายอากาศที่จะส่ง ส่วนเมตริกซ์หลักจะแสดงเวลาในการส่ง ซึ่งช่วงเวลาที่ t สัญญาณที่ถูกส่งออกไปได้แก่ S_1 และ S_2 ตามลำดับ และที่เวลา $t+T$ สัญญาณที่ถูกส่งออกไปได้แก่ สัญญาณ $-S_2^*$ และ S_1^* โดยมีเมตริกซ์ในการเข้ารหัสสัญญาณดังนี้

$$\begin{bmatrix} S_1 & -S_2^* \\ S_2 & S_1^* \end{bmatrix}$$

1) เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาของสายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 2 ต้น

การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาสำหรับระบบที่ใช้สายอากาศภาคส่ง 2 ต้น และสายอากาศภาครับ 2 ต้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 โดยช่วงเวลาที่ t สัญญาณที่ถูกส่งออกไปได้แก่ S_1 และ S_2 ตามลำดับ และ ที่เวลา $t+T$ สัญญาณที่ถูกส่งออกไปได้แก่ สัญญาณ $-S_2^*$ และ S_1^* ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 ภาคส่ง และภาครับของเทคนิค STC ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 2 ต้น

สมการที่ภาครับสัญญาณที่ใช้สายอากาศ 2 ต้น

สัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศภาครับต้นที่ 1 ที่เวลา t_1 และ t_2 แทนด้วย r_{11} และ r_{12} ตามลำดับ โดยสามารถแสดงได้เป็น

$$r_{11} = h_{11}S_1 + h_{12}S_2 + n_{11} \quad (3.1)$$

$$r_{12} = -h_{11}S_2^* + h_{12}S_1^* + n_{12} \quad (3.2)$$

และสัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศภาครับต้นที่ 2 ที่เวลา t_1 และ t_2 แทนด้วย r_{21} และ r_{22} ตามลำดับ โดยสามารถแสดงได้เป็น

$$r_{21} = h_{21}S_1 + h_{22}S_2 + n_{21} \quad (3.3)$$

$$r_{22} = -h_{21}S_2^* + h_{22}S_1^* + n_{22} \quad (3.4)$$

นำสัญญาณที่รับได้ทั้งหมดผ่านกระบวนการรวมสัญญาณ และทำการแยกสัญญาณ S_1 และ S_2 ออกจากสัญญาณที่รับได้ สัญญาณที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการรวมสัญญาณแล้ว จะแทนด้วย \tilde{r}_1 และ \tilde{r}_2 ซึ่งมีค่าคือ

$$\tilde{r}_1 = h_{11}^*r_{11} + h_{12}^*r_{12} + h_{21}^*r_{21} + h_{22}^*r_{22} \quad (3.5)$$

$$\tilde{r}_2 = h_{12}^*r_{11} - h_{11}^*r_{12} + h_{22}^*r_{21} - h_{21}^*r_{22} \quad (3.6)$$

ซึ่งเราสามารถแทนค่า r_{11} , r_{12} , r_{21} และ r_{22} ลงในสมการที่ (3.5) และ (3.6) เพื่อทำการจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$Y_{\tilde{r}_1} = (|h_{11}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{21}|^2 + |h_{22}|^2)s_1 + h_{11}^*n_{11} + h_{12}^*n_{12} + h_{21}^*n_{21} + h_{22}^*n_{22} \quad (3.7)$$

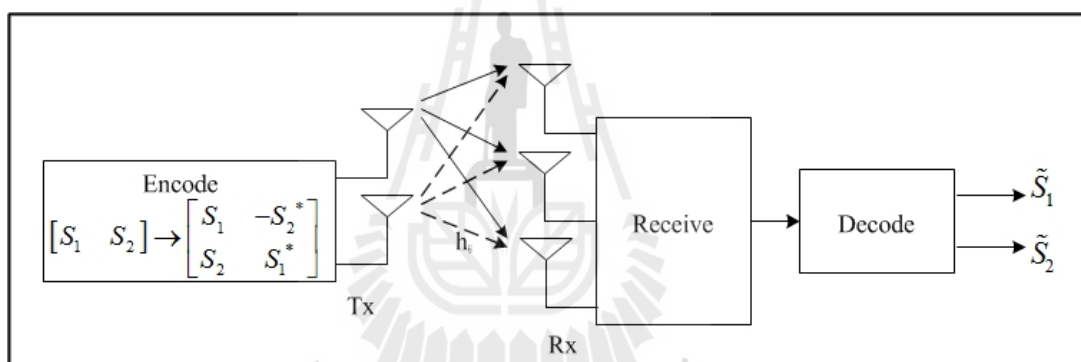
$$Y_{\tilde{r}_2} = (|h_{11}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{21}|^2 + |h_{22}|^2)s_2 + h_{12}^*n_{11} - h_{11}^*n_{12} + h_{22}^*n_{21} - h_{21}^*n_{22} \quad (3.8)$$

เมื่อ h_{11} และ h_{12} คือ ช่องสัญญาณสำหรับการส่งสัญญาณจากสายอากาศส่งต้นที่ 1 ไปยังสายอากาศภาครับต้นที่ 1 และสายอากาศรับต้นที่ 2 เมื่อเวลาที่ t_1 และ t_2

h_{21} และ h_{22} คือ ช่องสัญญาณสำหรับการส่งสัญญาณจากสายอากาศภาคส่งต้นที่ 2 ไปยังสายอากาศภาครับต้นที่ 1 และสายอากาศรับต้นที่ 2 เมื่อเวลาที่ t_1 และ t_2
 n_{11} , n_{12} , n_{21} , n_{22} คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ที่สายอากาศภาคส่งไปยังสายอากาศภาครับ

2) เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาของสายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น

การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาสำหรับระบบที่ใช้สายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้น และสายอากาศภาครับ 3 ต้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 โดยช่วงเวลาที่ t สัญญาณที่ถูกส่งออกไปได้แก่ S_1 และ S_2 ตามลำดับ และที่เวลา $t+T$ สัญญาณที่ถูกส่งออกไปได้แก่ สัญญาณ $-S_2^*$ และ S_1^* ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 ภาคส่งและภาครับของเทคนิค STC ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น

สมการที่ภาครับสัญญาณที่ใช้สายอากาศ 3 ต้น

สัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศภาครับต้นที่ 1 ที่เวลา t_1 และ t_2 แทนด้วย r_{11} และ r_{21} ตามลำดับ โดยสามารถแสดงได้เป็น

$$r_{11} = h_{11}S_1 + h_{21}S_2 + n_{11} \quad (3.9)$$

$$r_{21} = -h_{11}S_2^* + h_{21}S_1^* + n_{21} \quad (3.10)$$

สัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศภาครับต้นที่ 2 ที่เวลา t_1 และ t_2 แทนด้วย r_{12} และ r_{22} ตามลำดับ โดยสามารถแสดงได้เป็น

$$r_{12} = h_{12}S_1 + h_{22}S_2 + n_{12} \quad (3.11)$$

$$r_{22} = -h_{12}S_2^* + h_{22}S_1^* + n_{22} \quad (3.12)$$

สัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศภาครับต้นที่ 3 ที่เวลา t_1 และ t_2 แทนด้วย r_{13} และ r_{23} ตามลำดับ โดยสามารถแสดงได้เป็น

$$r_{13} = h_{13}S_1 + h_{23}S_2 + n_{13} \quad (3.13)$$

$$r_{23} = -h_{13}S_2^* + h_{23}S_1^* + n_{23} \quad (3.14)$$

นำสัญญาณที่รับได้ทั้งหมดผ่านกระบวนการรวมสัญญาณ และทำการแยกสัญญาณ S_1 และ S_2 ออกจากสัญญาณที่รับได้ สัญญาณที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการรวมสัญญาณแล้ว จะแทนด้วย \tilde{r}_1 และ \tilde{r}_2 ซึ่งมีค่าคือ

$$\tilde{S}_1 = h_{11}^*r_{11} + h_{21}r_{21}^* + h_{12}^*r_{12} + h_{22}r_{22}^* + h_{13}^*r_{13} + h_{23}r_{23}^* \quad (3.15)$$

$$\tilde{S}_2 = h_{21}^*r_{11} - h_{11}r_{21}^* + h_{22}^*r_{12} - h_{12}r_{22}^* + h_{23}^*r_{13} - h_{13}r_{23}^* \quad (3.16)$$

ซึ่งเราสามารถแทนค่า r_{11} , r_{12} , r_{13} , r_{21} , r_{22} และ r_{23} ลงในสมการที่ (3.15) และ (3.16) และทำการจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$Y_{\tilde{S}_1} = (|h_{11}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{13}|^2 + |h_{21}|^2 + |h_{22}|^2 + |h_{23}|^2)s_1 + h_{11}^*n_{11} + h_{21}n_{21}^* + h_{12}^*n_{12} + h_{22}n_{22}^* + h_{13}^*n_{13} + h_{23}n_{23}^* \quad (3.17)$$

$$Y_{s_2} = (|h_{11}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{13}|^2 + |h_{21}|^2 + |h_{22}|^2 + |h_{23}|^2)s_2 + h_{21}^*n_{11} - h_{11}n_{21}^* + h_{22}^*n_{12} - h_{21}n_{22}^* + h_{23}^*n_{13} - h_{13}n_{23}^* \quad (3.18)$$

- เมื่อ h_{11}, h_{12} และ h_{13} คือ ช่องสัญญาณสำหรับการส่งสัญญาณจากสายอากาศภาคส่งต้นที่ 1 ไปยังสายอากาศภาครับต้นที่ 1 สายอากาศภาครับต้นที่ 2 และสายอากาศภาครับต้นที่ 3 เมื่อเวลาที่ t_1 และ t_2
- h_{21}, h_{22} และ h_{23} คือ ช่องสัญญาณสำหรับการส่งสัญญาณจากสายอากาศภาคส่งต้นที่ 2 ไปยังสายอากาศภาครับต้นที่ 1 สายอากาศภาครับต้นที่ 2 และสายอากาศภาครับต้นที่ 3 เมื่อเวลาที่ t_1 และ t_2
- $n_{11}, n_{12}, n_{13}, n_{21}, n_{22}, n_{23}$ คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ที่สายอากาศภาคส่งไปยังสายอากาศภาครับ

3.2.2 เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง

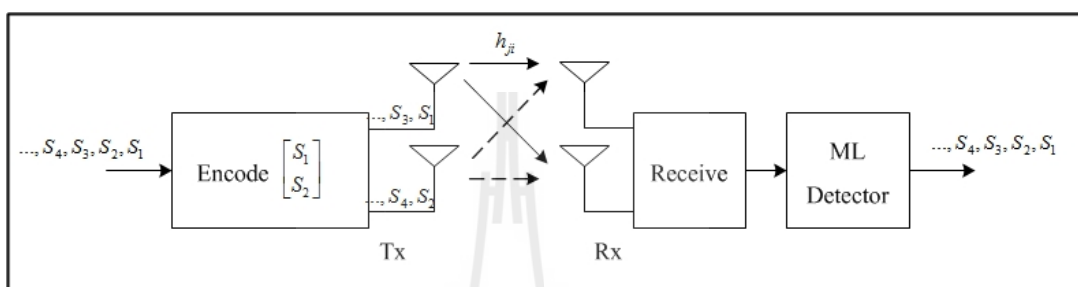
เป็นเทคนิคในการส่งสัญญาณที่ให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูง เนื่องจากการส่งข้อมูลนั้นจะมีการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระกันทั้งหมด M_T ค่า เท่ากับจำนวนสายอากาศที่อยู่ในภาคส่ง ต่อหนึ่งคาบสัญญาณ คือ ข้อมูลที่ถูกส่งไปในแต่ละสายอากาศจะเป็นข้อมูลที่แตกต่างกัน เทคนิคการส่งสัญญาณแบบนี้อาจจะเรียกง่าย ๆ ว่าต่างคนต่างส่งข้อมูล โดยที่ส่งความถี่เดียวกัน และช่วงเวลาเดียวกัน ผลที่ได้คือช่วยให้อัตราการส่งข้อมูลสามารถส่งได้เร็วขึ้น โดยรูปแบบของเมตริกซ์ที่ใช้ในการเข้ารหัสสำหรับเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง โดยใช้สายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้นนั้นแสดงเป็น

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}$$

ที่ภาครับสัญญาณนั้นจะแบ่งออกเป็น ระบบที่ใช้สายอากาศภาครับที่ 2 ต้น และระบบที่ใช้สายอากาศภาครับที่ 3 ต้น ซึ่งกระบวนการในการถอดรหัสนั้นจะใช้เทคนิคการถอดรหัสเพื่อตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ S_1 และ S_2 โดยใช้ วิธีการพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นจริงสูงสุด (Maximum likelihood decoder)

1) เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง สำหรับสายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 2 ต้น

เทคนิคนี้จะเป็นการแบ่งข้อมูลที่จะส่งไปในแต่ละสายอากาศแยกจากกัน โดยในหนึ่งชุดข้อมูลจะถูกแยกออกเป็น 2 ชุดข้อมูลเท่ากับจำนวนของสายอากาศที่ภาคส่ง โดยสายอากาศแต่ละต้นนั้นจะส่งข้อมูลที่แตกต่างกันออกไป แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ภาคส่ง และภาครับของเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 2 ต้น

สมการที่ภาครับสัญญาณ สำหรับสายอากาศรับ 2 ต้น

ที่ภาครับสัญญาณจะรับสัญญาณ S_1 และ S_2 ที่ถูกส่งผ่านช่องสัญญาณมายังภาครับ ซึ่งภาครับสัญญาณจะรับสัญญาณได้เป็น

$$r_1 = h_{11}S_1 + h_{12}S_2 + n_1 \quad (3.19)$$

$$r_2 = h_{21}S_1 + h_{22}S_2 + n_2 \quad (3.20)$$

สามารถจัดรูปสมการให้ง่ายขึ้นให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

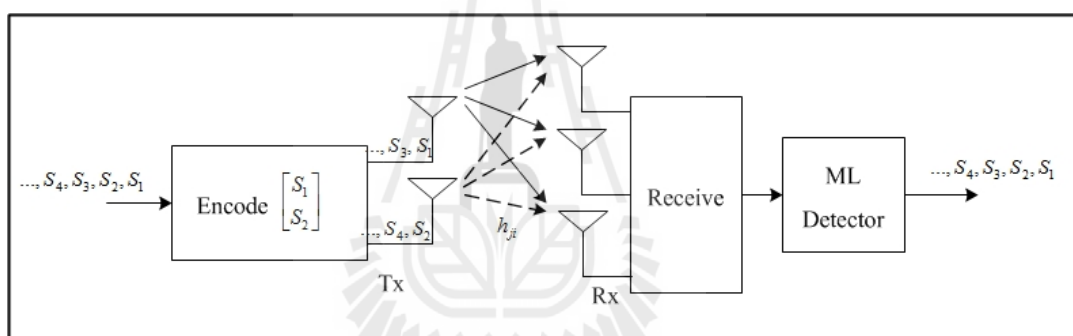
$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

เมื่อ r_i คือ สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับสัญญาณ

- h_{ji} คือ ช่องสัญญาณที่ใช้ส่งข้อมูลจากภาคส่งไปยังภาครับ
- n_i คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น
- $i = 1, 2$ คือ จำนวนของสายอากาศภาครับ
- $j = 1, 2$ คือ จำนวนของสายอากาศภาคส่ง

2) เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง สำหรับสายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น

สำหรับภาครับที่มีสายอากาศรับ 3 ต้นนั้น ที่ภาคส่งสัญญาณยังคงใช้สายอากาศส่งที่ 2 ต้นเหมือนเดิม โดยแบ่งข้อมูลที่จะส่งเป็น 2 ชุดข้อมูล เพื่อส่งไปในสายอากาศแต่ละต้นแยกจากกัน ไปยังสายอากาศภาครับทั้ง 3 ต้น แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ภาคส่ง และภาครับของเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น

สมการที่ภาครับสัญญาณ สำหรับสายอากาศรับ 3 ต้น

ที่ภาครับสัญญาณจะรับสัญญาณ S_1 และ S_2 ที่ถูกส่งผ่านช่องสัญญาณมายังภาครับ ซึ่งภาครับสัญญาณจะรับสัญญาณได้เป็น

$$r_1 = h_{11}S_1 + h_{12}S_2 + n_1 \quad (3.22)$$

$$r_2 = h_{21}S_1 + h_{22}S_2 + n_2 \quad (3.23)$$

$$r_3 = h_{31}S_1 + h_{32}S_2 + n_3 \quad (3.24)$$

สามารถจัดรูปสมการให้ง่ายขึ้นให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ h_{31} & h_{32} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

- เมื่อ r_i คือ สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับสัญญาณ
 h_{ji} คือ ช่องสัญญาณที่ใช้ส่งข้อมูลจากภาคส่งไปยังภาครับ
 n_i คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น
 $i = 1, 2, 3$ คือ จำนวนของสายอากาศภาครับ
 $j = 1, 2$ คือ จำนวนของสายอากาศภาคส่ง

ในการถอดรหัสนั้นจะขอกกล่าวถึงกระบวนการถอดรหัสสำหรับภาครับสัญญาณที่สายอากาศรับ 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น ไปพร้อมกัน เนื่องจากทั้งสองระบบนี้จะใช้กระบวนการถอดรหัสวิธีเดียวกัน คือ การนำสัญญาณที่รับได้คือ r_i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, N_r$ ไปใช้ในการถอดรหัสเพื่อตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ S_1 และ S_2 โดยใช้วิธีการพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นจริงสูงสุด (Maximum likelihood decoder) ดังแสดงได้เป็น

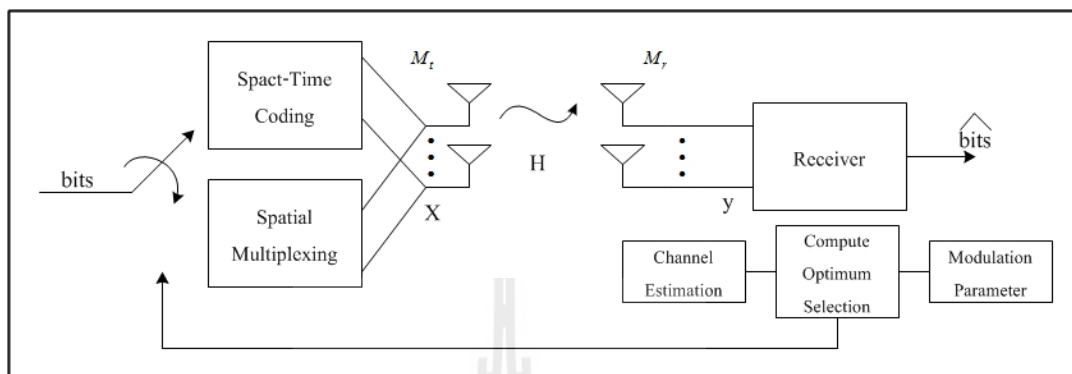
$$\hat{S} = \arg \min_{s \in C} \|r - Hs\|^2 \quad (3.26)$$

- เมื่อ s คือ จำนวนชุดของ constellation ทั้งหมดของแต่ละรูปแบบที่ใช้ในการมอดูเลชัน
 H คือ ช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งข้อมูล

3.3 เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัว (Adaptive MIMO Switching : AMS)

เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัว ศึกษาจากงานของ Robert W. Heath Jr. and Arogyaswami Paulraj (2005) เทคนิคนี้จะนำเทคนิคในการส่งสัญญาณของระบบโมโม่ทั้งสองรูปแบบเข้ามารวมไว้ด้วยกัน เพื่อเป็นวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพในการรับ และส่งข้อมูลของระบบให้ดีขึ้นกว่าการเลือกใช้เทคนิคในการส่งข้อมูลเพียงรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง โดยเทคนิคนี้จะใช้การคำนวณค่าระยะยูคลิเดียนต่ำสุด (Minimum Euclidean Distance) ของทั้งสองรูปแบบคือ ระยะยูคลิเดียนต่ำสุดของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และระยะยูคลิเดียนต่ำสุดของ

เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง เพื่อเป็นการเลือกรูปแบบที่จะใช้ในการส่งข้อมูลในแต่ละครั้ง ซึ่งโครงสร้างของเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โครงสร้างการทำงานของเทคนิค AMS

1) การคำนวณค่าระยะยูคลิดี้นต่ำสุด ของเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงปริภูมิ

ในการคำนวณค่าระยะยูคลิดี้นต่ำสุดจะคำนวณจากค่าพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณ ค่าสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับ และค่าของจุดคอนสเทลเลชันในแต่ละรูปแบบที่ใช้ในการมอดูเลตสัญญาณ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$d_{\min,SM}^2 = \min_{s_i, s_j \in S_{SM}, s_i \neq s_j} \frac{\|H(s_i - s_j)\|^2}{M_t} \quad (3.27)$$

โดยที่ $d_{\min,SM}^2$ คือ ค่าระยะยูคลิดี้นต่ำสุดของเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง

H คือ ช่องสัญญาณที่ใช้ในส่งข้อมูลจากภาคส่งไปยังภาครับ

s_i, s_j คือ ค่าของคอนสเทลเลชัน โดยที่ $s_i \neq s_j$

M_t คือ จำนวนของสายอากาศภาคส่ง

2) การคำนวณค่าระยะยูคลิดี้นต่ำสุด ของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา

การคำนวณค่าระยะยูคลิดี้นต่ำสุดของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลานั้น จะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมือนกับเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง แต่จะมีลักษณะของสมการที่ใช้ในการคำนวณแตกต่างกัน โดยสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$d_{\min,STC}^2 = \frac{\|H\|_F^2}{M_t} d_{\min,sc}^2 \quad (3.28)$$

โดย $d_{\min,sc}^2$ สามารถแสดงได้เป็น

$$d_{\min,sc}^2 = \min(s_i - s_j)^2 \quad (3.29)$$

- เมื่อ $d_{\min,STC}^2$ คือ ค่าระยะยูคลิดเลียนต่ำสุดของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา
- $d_{\min,sc}^2$ คือ ค่าระยะของความแตกต่างของคอนสแตนต์เลขชี้กำลัง ซึ่ง $d_{\min,sc}^2 \neq d_{\min,STC}^2$
- $\|\bullet\|_F$ คือ Frobenius norm
- s_i, s_j คือ ค่าของคอนสแตนต์เลขชี้กำลัง โดยที่ $s_i \neq s_j$
- H คือ ช่องสัญญาณที่ใช้ในส่งข้อมูลจากภาคส่งไปยังภาครับ
- M_t คือ จำนวนของสายอากาศภาคส่ง

หลักการเลือกโหนดสำหรับการส่งข้อมูล

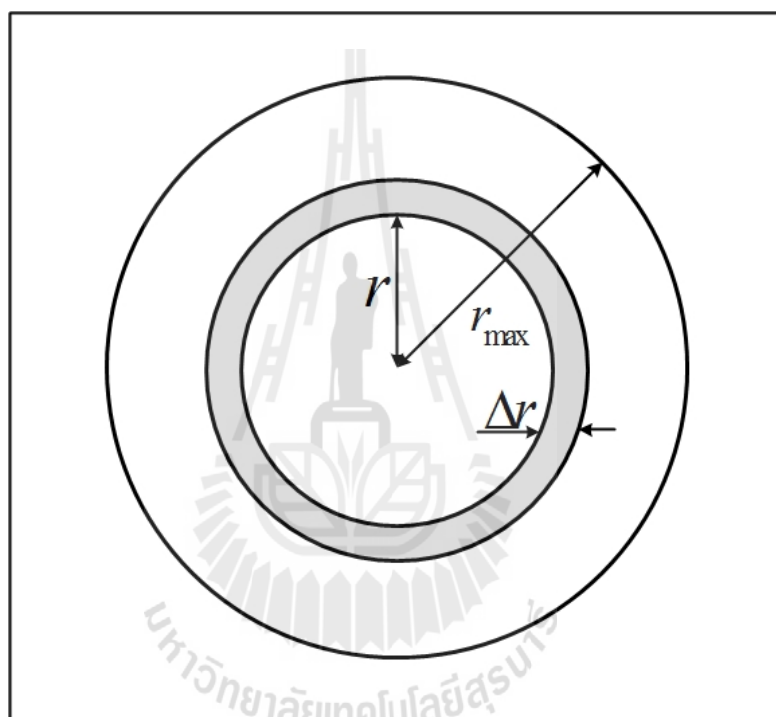
หลักการเลือกโหนดสำหรับการส่งข้อมูล จะคำนวณค่าระยะยูคลิดเลียนต่ำสุดของแต่ละรูปแบบ จากนั้นจะนำค่าระยะยูคลิดเลียนต่ำสุดของแต่ละรูปแบบมาเป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ เพื่อใช้เลือกรูปแบบที่จะใช้ในการส่งข้อมูลออกไป โดยมีหลักการเลือก คือ ถ้าค่า $d_{\min,STC}^2 \leq d_{\min,SM}^2$ ระบบจะทำการเลือกรูปแบบของเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่งในการส่งข้อมูลออกไป นอกเหนือจากนี้แล้ว ระบบจะเลือกรูปแบบของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาในการส่งข้อมูลออกไป

3.4 การทำนายพื้นที่ครอบคลุม

พื้นที่ครอบคลุมของระบบนั้นสามารถหาได้จากการคาดคะเนเป็นเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่เซลล์ โดยศึกษาจาก Saunders, S., (2007) Antennas and propagation for wireless communication systems พิจารณารูปที่ 3.8 นั้นแสดงถึงรัศมีทั้งหมดของเซลล์ คือ r_{\max} และรัศมีของเซลล์ขนาดเล็กคือ r ที่มีความกว้างเป็น Δr ซึ่ง $p_e(r)$ คือ ความน่าจะเป็นการสูญเสียของสัญญาณที่มีค่าต่ำกว่าค่าขีดเริ่มที่ระยะทาง r และพื้นที่ของการครอบคลุมเซลล์เป็น $(2\pi r)\Delta r$ จะได้ความน่าจะเป็นของการครอบคลุมทั้งหมดของเซลล์เป็น P_{cell} ซึ่งเกิดจากผลรวมของพื้นที่ทั้งหมดจากรัศมีเซลล์ที่ 0 ถึง

r_{\max} คูณด้วยอัตราร้อยละของพื้นที่ที่สอดคล้องกัน และหารด้วยพื้นที่ของเซลล์ทั้งหมด (πr_{\max}^2) ถ้ารัศมีของเซลล์มีขนาดลดลง จะได้ค่าของ $\Delta r \rightarrow 0$ ซึ่งจะได้ความน่าจะเป็นของการครอบคลุมทั้งหมดของเซลล์เป็น

$$P_{cell} = \frac{1}{\pi r_{\max}^2} \int_{r=0}^{r_{\max}} p_e(r) \times 2\pi r dr \quad (3.30)$$



รูปที่ 3.8 พื้นที่ครอบคลุมทั้งหมดของเซลล์

การทำนายพื้นที่ครอบคลุมที่แสดงในวิทยานิพนธ์นี้ จะเป็นการทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ที่ได้นำระบบโมโมแบบวงเปิดเข้ามาใช้งาน และยังรวมถึงเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัว ซึ่งการทำนายพื้นที่ครอบคลุมนั้น จะทำนายพื้นที่ครอบคลุมของแต่ละรูปแบบทั้งเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง จากนั้นก็ทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ที่นำเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัวมาใช้งาน และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับว่า การนำเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัวเข้ามาใช้งานในระบบนั้น ยังคงให้ประสิทธิภาพการทำงานดีกว่าการเลือกใช้งานเทคนิคโมโมเพียงรูปแบบเดียว การทำนายพื้นที่

ครอบคลุมนั้น ได้ศึกษาจากงานวิจัยของ Louay M. A. Jalloul, Senior Member, IEEE, and Sam P. Alex (2008) การทำนายพื้นที่ครอบคลุมนั้นจะแสดงได้เป็น

$$P_{\text{coverage}} = \Pr(BLER_i \leq BLER_{\text{target}}) \quad (3.31)$$

เมื่อ P_{coverage} คือ ความน่าจะเป็นของพื้นที่ครอบคลุมที่เกิดขึ้น โดย $BLER_i$ คือค่าอัตราความผิดพลาดบล็อกครั้งที่ i ของรูปแบบการมอดูเลชัน และการเข้ารหัส (Modulation and Coding Scheme) นั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าของ $BLER_{\text{target}}$ เมื่อ $BLER_{\text{target}}$ คือ ค่าคุณภาพที่จำเป็นในการให้บริการ ในการจำลองระบบนี้จะตั้ง $BLER_{\text{target}}$ ไว้ที่ 10^{-2}

3.4.1 ขั้นตอนการทำนายพื้นที่ครอบคลุมเมื่อกำหนดระดับค่าอัตราความผิดพลาดบล็อก

การทำนายพื้นที่ครอบคลุมในส่วนนี้จะกำหนดค่าของความผิดพลาดบล็อกที่เป็นเป้าหมายไว้ก่อน เพื่อเป็นเกณฑ์ในการทำนายพื้นที่ครอบคลุม โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) กำหนดระดับค่าเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุม และระดับค่าอัตราความผิดพลาดบล็อกที่ต้องการไว้

2) จากเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุม และระดับค่าของความผิดพลาดบล็อกที่กำหนดไว้ นั้น นำมาหาค่าของ SNR ที่สอดคล้องกับค่าที่กำหนดไว้

3) เมื่อได้ค่า SNR แล้ว นำค่า SNR ดังกล่าวมาหาค่า P_r

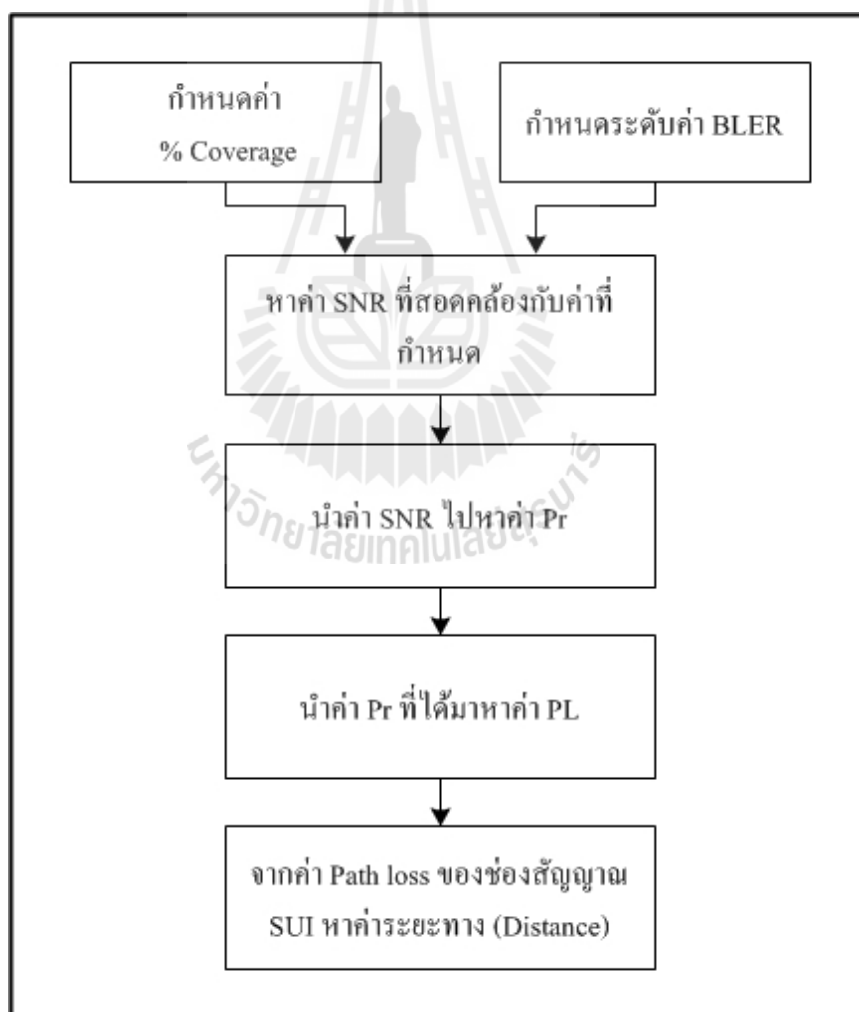
4) เมื่อทราบค่า P_r นำค่า P_r นี้ไปหาค่าของ Path Loss

5) นำค่า PL ที่ได้จากขั้นตอนที่ 4) ไปหาค่าของระยะทางที่สอดคล้องจากการกำหนดเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุม และค่าอัตราความผิดพลาดบล็อกไว้ ด้วยการ ใช้ Path loss ของช่องสัญญาณ SU1 ซึ่งผลที่ออกมา นั้นจะได้เป็นระยะทางที่ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุม และระดับค่าความผิดพลาดบล็อกที่กำหนดไว้ข้างต้น ซึ่งขั้นตอนที่กล่าวมานี้สามารถเขียนแสดงได้ดังแผนภาพรูปที่ 3.9

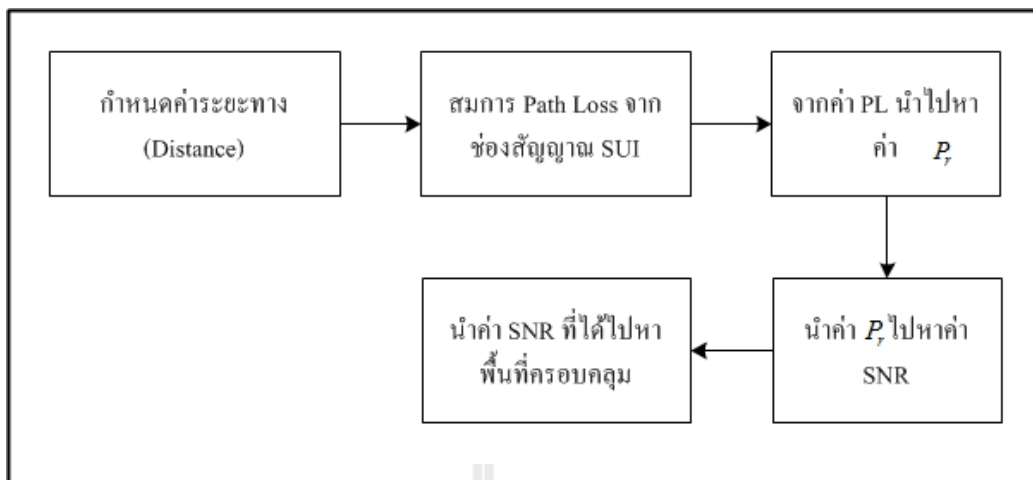
3.4.2 ขั้นตอนการทำนายพื้นที่ครอบคลุมเมื่อกำหนดระยะทาง

สำหรับการทำนายพื้นที่ครอบคลุมในหัวข้อนี้จะเป็นการทำนายพื้นที่ครอบคลุม โดยการกำหนดค่าของระยะทางระหว่างสถานีฐาน และสถานีรับสัญญาณ โดยเราจะกำหนดค่าของระยะทางที่ค่าต่างกันเพื่อดูถึงประสิทธิภาพของพื้นที่ครอบคลุมที่เกิดขึ้น โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) เลือกค่าระยะทางที่ต้องการทดสอบเพื่อการทำนายพื้นที่ครอบคลุม
- 2) จากระยะทางที่กำหนดนำมาหาค่า Path Loss จากช่องสัญญาณ SUI ที่ใช้ในการจำลองแบบ จะได้ค่า Path Loss
- 3) นำค่า Path Loss ที่ได้ในขั้นตอน 3) มาหาค่า P_r
- 4) นำค่า P_r ไปหาความความสัมพันธ์เพื่อให้ได้ค่า SNR ออกมา
- 5) เมื่อได้ค่า SNR ที่ระยะทางที่กำหนดแล้ว นำค่า SNR ที่ได้นี้ มาดูว่าค่านี้จะสามารถให้พื้นที่ครอบคลุมได้เป็นกี่เปอร์เซ็นต์ จากทั้ง 3 ขั้นตอนที่ได้กล่าวมานี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการทำนายพื้นที่ครอบคลุมเมื่อกำหนดค่าระดับความผิดพลาดบ้ล็ก



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการทำนายพื้นที่ครอบคลุมเมื่อกำหนดค่าระยะทาง

3.5 สรุปเนื้อหาบทที่ 3

เนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงระบบโมโมที่รองรับกับการทำงานของเทคโนโลยีไวแมกซ์ ทั้งด้านอัตราเร็วในการส่งข้อมูล เทคนิคที่ใช้ในการส่งข้อมูล จำนวนของสายอากาศภาคส่ง และจำนวนของสายอากาศภาครับที่สามารถใช้งานในระบบไวแมกซ์ได้ จากนั้นก็จะกล่าวถึงการจำลองระบบด้วยการนำระบบโมโมมาใช้งานในระบบไวแมกซ์ ซึ่งจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ภาครับสัญญาณ และภาคส่งสัญญาณ พร้อมทั้งเทคนิคการเข้ารหัสของระบบโมโมแต่ละรูปแบบ การวิเคราะห์การเข้ารหัส และการถอดรหัสของภาครับสัญญาณ ทั้งเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา กับเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง จากนั้นนำเสนอถึงการนำเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัว เพื่อนำมาใช้ในการจำลองระบบด้วย เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการทำงานที่ดีขึ้นในการนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้งาน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงพื้นที่ครอบคลุมที่เกิดขึ้นจากการนำเทคนิคดังกล่าวข้างต้นมาใช้งานกับระบบไวแมกซ์

บทที่ 4

ผลการจำลองแบบ

เนื้อหาในบทนี้จะแสดงผลการจำลองแบบของระบบไวแมกซ์ เมื่อใช้เทคนิคโมโม โดยจำลองระบบไวแมกซ์ ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งแบ่งการจำลองแบบออกเป็นดังนี้คือ ในส่วนแรกจะเป็นการจำลองแบบระบบโดยใช้เทคนิคโมโมสองเทคนิคคือ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา กับ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง และนำผลที่ได้จากการจำลองแบบของทั้งสองเทคนิคนี้มาเปรียบเทียบกัน เพื่อคัดเลือกรูปแบบที่สามารถเกิดการสลับโหมคกันได้เพื่อเก็บผลไปใช้ในการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป จากนั้นนำผลการจำลองแบบที่ทำการคัดเลือกไว้แล้วในส่วนแรก มาใช้กับเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัว โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบจากอัตราของความผิดพลาดบิต (Bit error rate : BER) และสุดท้ายนำเสนอการทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ เมื่อนำเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัวมาใช้กับระบบไวแมกซ์

4.1 การจำลองแบบระบบไวแมกซ์

เป็นการจำลองระบบไวแมกซ์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งจะทำการสุ่มข้อมูลบิตขึ้นมา และผ่านการเข้ารหัส ด้วย Reed-Solomon Encode, Convolutional Encode, Puncturing และ Interleaving โดยข้อมูลที่ผ่านการเข้ารหัสสมาก็จะถูกนำมามอดูเลชัน ในการจำลองแบบนี้จะใช้รูปแบบของการมอดูเลชัน 4 รูปแบบ คือ BPSK QPSK 16-QAM และ 64-QAM จากนั้นก็จะใส่ Zero Dc และ Guard Carrier แล้วนำไปผ่านกระบวนการ IFFT ซึ่งจำนวนบิตที่สร้างขึ้นมาี้ก็จะมีจำนวนไม่เท่ากัน เนื่องมาจากมาตรฐานไวแมกซ์นั้น ได้มีการกำหนดอัตราเร็วในการเข้ารหัสที่แตกต่างกัน ซึ่งก็จะได้จำนวนของบิตที่แตกต่างกันด้วย และแต่ละรูปแบบของการมอดูเลชันก็จะให้จำนวนของสัญลักษณ์ที่ไม่เท่ากัน และมีความสามารถในการป้องกันความผิดพลาดบิตไม่เท่ากัน จากนั้นก็จะนำข้อมูลที่ได้ไปผ่านกระบวนการ OFDM เพื่อปรับให้ขนาดของสัญลักษณ์มีจำนวนเท่ากัน ซึ่งตามมาตรฐานไวแมกซ์จะใช้จำนวนของสัญลักษณ์ คือ 256 ก่อนที่จะทำการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณออกไป ซึ่งจำนวนของบิตที่ได้ในแต่ละขั้นตอน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนของบิตข้อมูลในแต่ละรูปแบบของการมอดูเลชัน

	BPSK	QPSK		16-QAM		64-QAM	
	1/2	1/2	3/4	1/2	3/4	2/3	3/4
Data bits	88	184	280	376	376	760	856
Reed Solomon	96	256	320	512	512	864	960
Convolution	192	384	384	768	768	1152	1152
Interleaving	192	384	384	768	768	1152	1152
Mapping	192	192	192	192	192	192	192
OFDM Subcarrier	256	256	256	256	256	256	256

สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองแบบของระบบไวแมกซ์ สามารถแสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลองของระบบไวแมกซ์

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
ความถี่	2.5 GHz
ความสูงสถานีฐาน	80 เมตร
ความสูงภากรับ	10 เมตร
แบนด์วิดท์	5 MHz
ขนาด OFDM	256 OFDM
CP	1/4
กำลังส่งสถานีฐาน	40 W (46dBm)
ช่องสัญญาณ	Rayleigh Channel (SUI-3)

4.2 การจำลองแบบระบบไวแมกซ์ที่ใช้เทคนิคโมโม

การจำลองระบบไวแมกซ์ที่นำเทคนิคโมโมมาใช้งานนั้นจะเป็นการทำงานหลังจากที่ข้อมูลผ่านการมอดูเลชันมาแล้ว จะนำข้อมูลดังกล่าวนั้นมาเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา (Space-Time Coding : STC) และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง (Spatial Multiplexing : SM) จากนั้นจะทำการคัดเลือกรูปแบบที่สามารถสลับโหมคกันได้ โดยรูปแบบที่สามารถสลับโหมคกันได้นั้นต้องเกิดจากการตัดกันของระบบโมโมทั้งสองเทคนิค เมื่อได้รูปแบบที่สามารถสลับโหมคกันได้ ก็

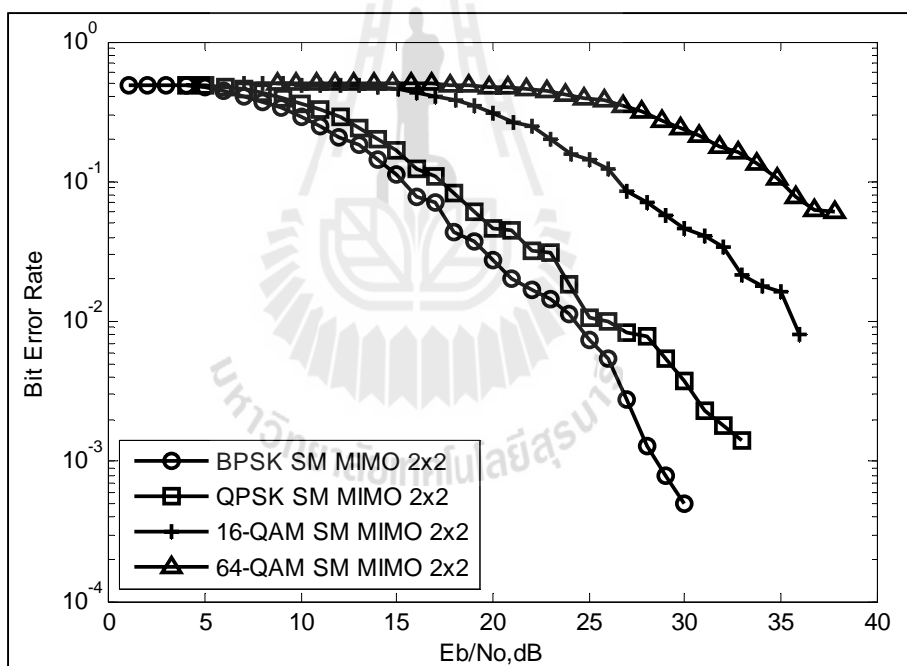
นำรูปแบบนั้นไปจำลองแบบกับเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัว ซึ่งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละรูปแบบนั้น จะดูจากค่าอัตราความผิดพลาดบิต ซึ่งจะแสดงผลการจำลองแบบในหัวข้อถัดไป

4.3 การจำลองแบบโดยใช้ระบบโมโม่แบบวงเปิด

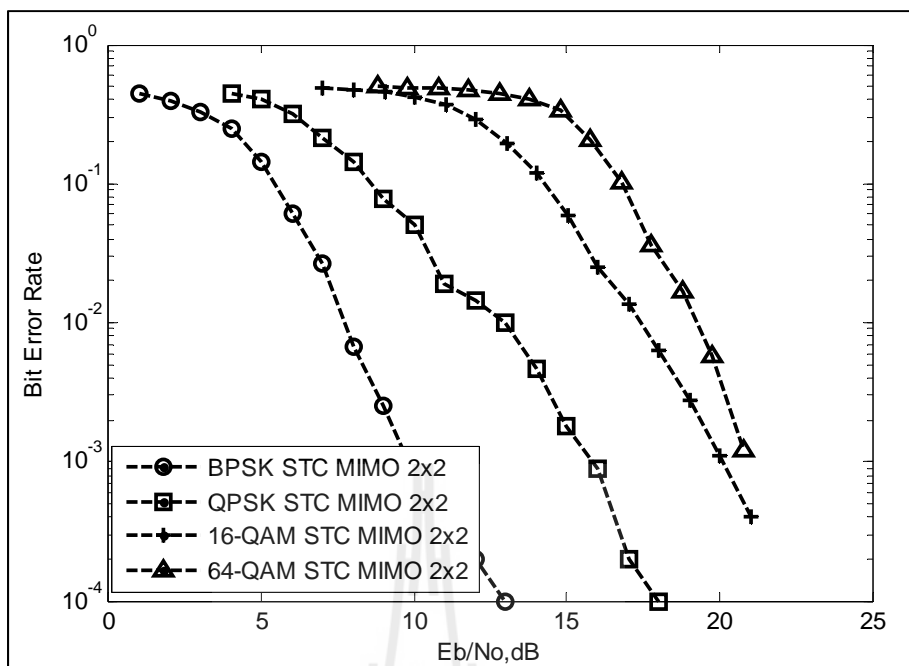
การจำลองแบบในส่วนนี้ จะนำระบบโมโม่แบบวงเปิดที่มีเทคนิคการส่งข้อมูลสองรูปแบบคือ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง โดยทำการจำลองแบบซึ่งวัดค่าประสิทธิภาพของแต่ละรูปแบบด้วยค่าอัตราความผิดพลาดบิต โดยใช้จำนวนของสายอากาศที่ภาคส่งจำนวน 2 ต้น และสายอากาศภาครับจำนวน 2 ต้น และ 3 ต้น ตามลำดับ ซึ่งมีรูปแบบการมอดูเลชันทั้งหมด 4 รูปแบบคือ BPSK QPSK 16-QAM และ 64-QAM ผลการจำลองแบบสามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 จากกราฟจะแสดงถึง BER ที่แปรผันตามค่า E_b/N_0 สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชัน ด้วยความสามารถในการทนต่อสัญญาณรบกวนที่แตกต่างกัน ซึ่งจากรูปกราฟจะเห็นได้ว่ารูปแบบของ BPSK จะสามารถทนต่อสัญญาณรบกวนได้ดีที่สุด รองลงมาคือ QPSK 16-QAM และ 64-QAM ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากรูปแบบของการมอดูเลชันแต่ละรูปแบบนั้นจะมีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ที่ต่างกัน โดย BPSK จะมีจำนวน 1 บิตต่อสัญลักษณ์ QPSK จะมีจำนวน 2 บิตต่อสัญลักษณ์ 16-QAM จะมีจำนวน 4 บิตต่อสัญลักษณ์ และ 64-QAM จะมีจำนวน 6 บิตต่อสัญลักษณ์ นั่นแสดงว่าการมอดูเลชันที่มีจำนวนของบิตต่อสัญลักษณ์น้อย จะสามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดีกว่า รูปแบบการมอดูเลชันที่มีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์มาก

จากนั้นนำกราฟที่ได้จากรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 มาพล็อตรวมเข้าด้วยกัน โดยจะแบ่งออกเป็นกราฟที่แสดงระบบที่ใช้สายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้น และสายอากาศภาครับที่ 2 ต้น และกราฟที่แสดงระบบที่ใช้สายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้น และสายอากาศภาครับที่ 3 ต้น โดยนำเทคนิคโมโม่ทั้งสองรูปแบบคือ การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่งมาพล็อตรวมกัน ซึ่งผลการจำลองแบบนั้นสามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.5 และ 4.6 การนำกราฟของทั้งสองเทคนิคของระบบโมโม่แบบวงเปิดมาพล็อตเข้าด้วยกันนั้น ก็เพื่อวัตถุประสงค์ในการคัดเลือกรูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้จริง โดยรูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้นั้นจะเป็นรูปแบบที่เส้นกราฟเกิดจากการตัดกันของทั้งสองเทคนิค ซึ่งถ้าเราไม่ทำการเลือกรูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้นั้น ระบบต้องใช้ระยะเวลาในการประมวลผลมากขึ้น เนื่องจากระบบไม่สามารถทราบได้ว่ารูปแบบไหนที่สามารถเกิดการสลับโหมดได้จริง ก็จำเป็นต้องทำการประมวลผลทุกๆ รูปแบบ แต่ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงให้เห็นถึงการเลือกรูปแบบของระบบโมโม่ที่สามารถสลับโหมดกัน

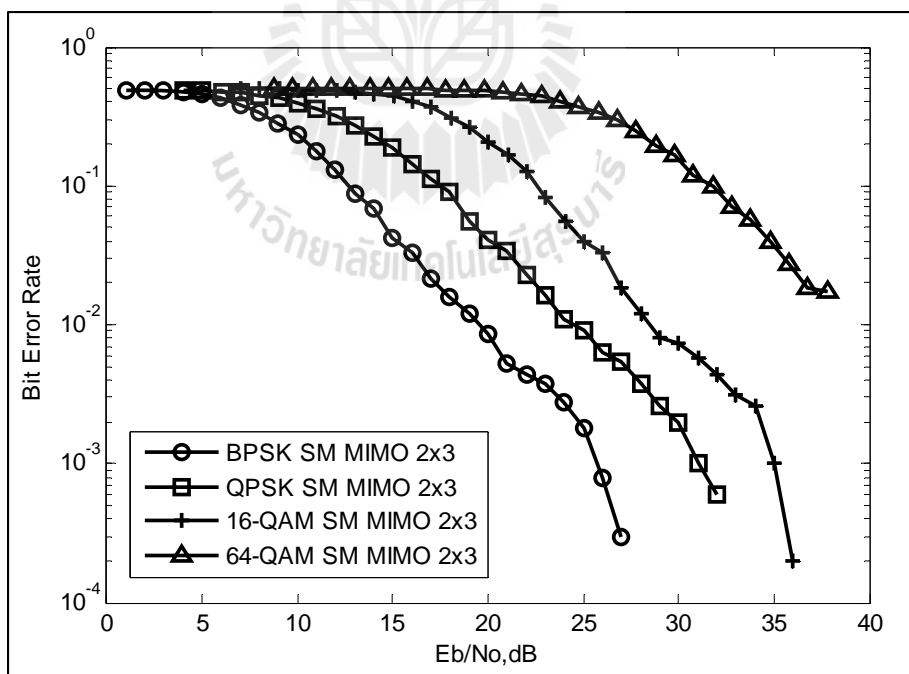
ได้เพื่อเก็บผลไว้ และตัดรูปแบบที่ไม่จำเป็นออก ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดกระบวนการในการทำงานของระบบให้มีระยะเวลาการทำงานที่รวดเร็วยิ่งขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องทำการประมวลผลในทุกรูปแบบ ผลการจำลองแบบที่ได้คัดเลือกรูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้นั้นสามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.7 และ 4.8 ส่วนรูปแบบที่ไม่สามารถสลับโหมดกันได้ก็ถูกตัดออกไป จากกราฟรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่ารูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้นั้นมีเพียง 3 รูปแบบ โดยเกิดการตัดกันของกราฟเพียง 4 รูปแบบ ซึ่งจากเดิมมีจำนวนรูปแบบทั้งหมดถึง 8 รูปแบบ จะเห็นได้ว่าผลจากการคัดเลือกรูปแบบนั้นสามารถลดรูปแบบที่ไม่จำเป็นออกได้ถึงครึ่งหนึ่งของรูปแบบทั้งหมด และกราฟรูปที่ 4.8 จะแสดงให้เห็นว่ามีเพียงรูปแบบเดียวเท่านั้นที่สามารถสลับโหมดกันได้ ซึ่งจะสามารถลดรูปแบบที่ไม่จำเป็นออกไปได้ถึง 6 รูปแบบ จึงสามารถช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้รวดเร็วยิ่งขึ้น เพราะไม่ต้องทำการประมวลผลทุก ๆ รูปแบบ



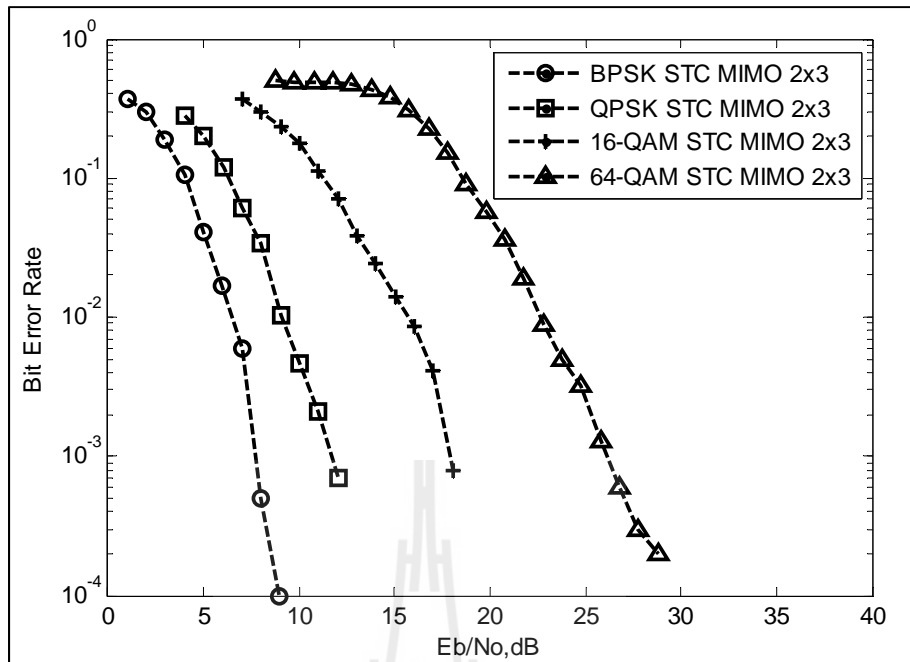
รูปที่ 4.1 BER VS E_b/N_0 ของเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับที่ 2 ต้น



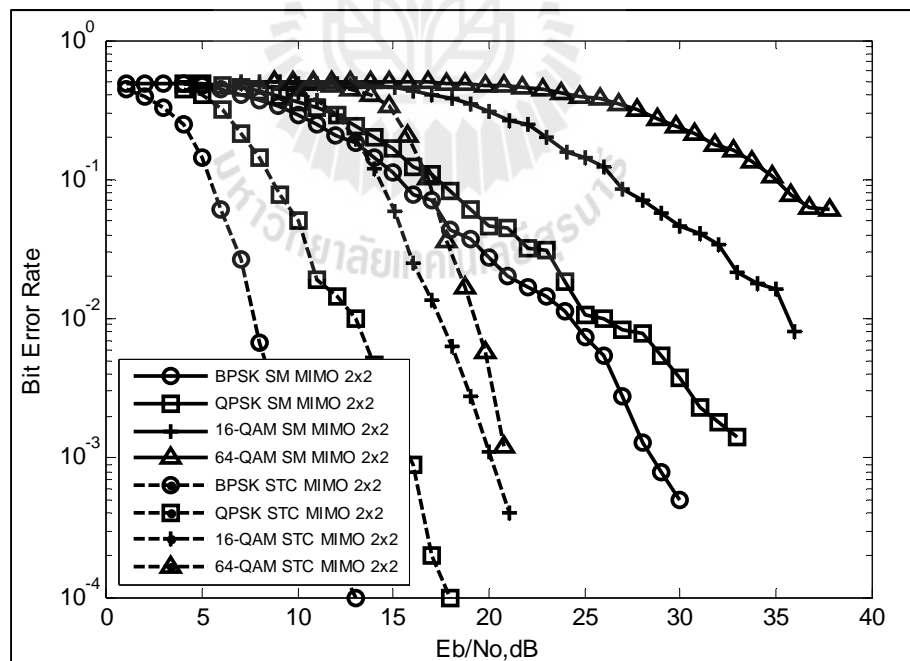
รูปที่ 4.2 BER VS E_b/N_0 ของเทคนิค STC ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 2 ต้น



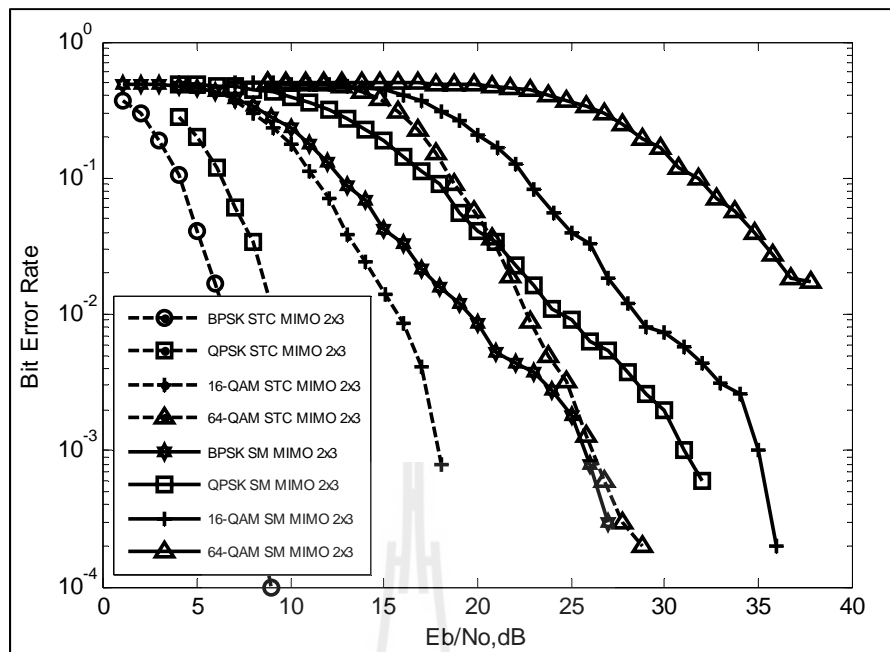
รูปที่ 4.3 BER VS E_b/N_0 ของเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น



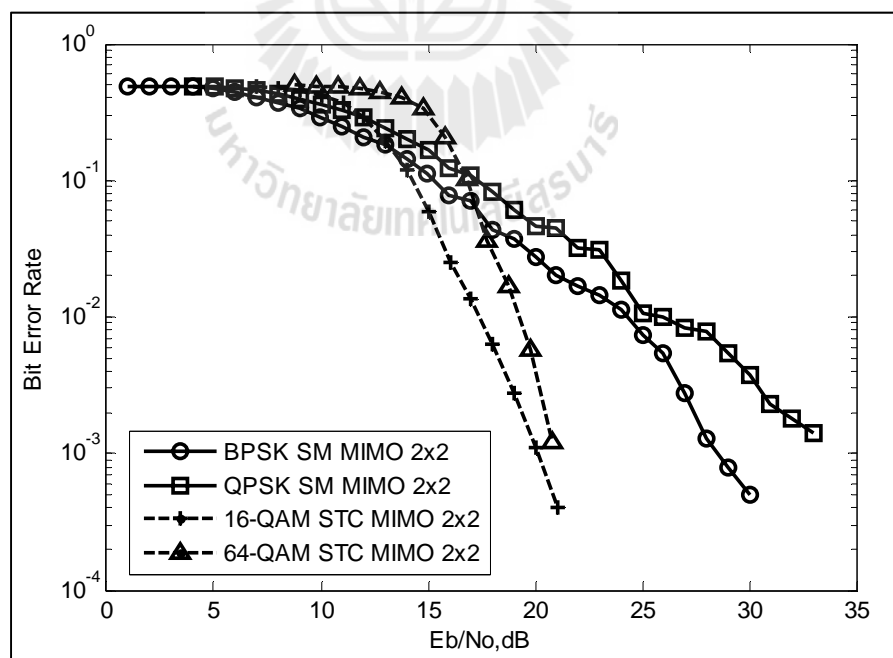
รูปที่ 4.4 BER VS E_b/N_0 ของเทคนิค STC ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น



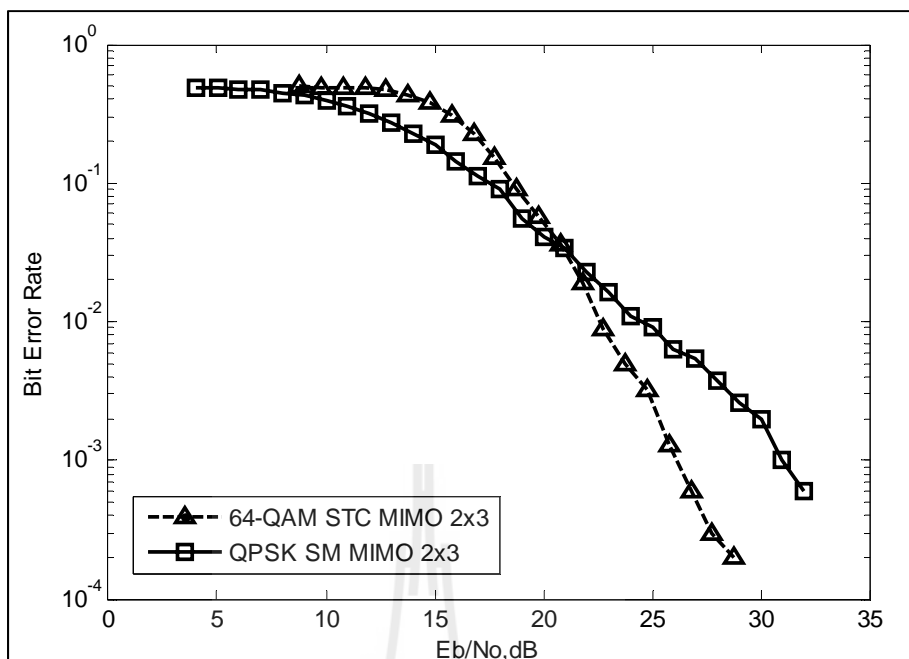
รูปที่ 4.5 BER VS E_b/N_0 ของเทคนิค STC และเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 2 ต้น



รูปที่ 4.6 BER VS E_b/N_0 ของเทคนิค STC และเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น



รูปที่ 4.7 รูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้ระหว่างเทคนิค STC และ เทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 2 ต้น



รูปที่ 4.8 รูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้ระหว่างเทคนิค STC และ เทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น

จากกราฟในรูปที่ 4.7 และ 4.8 นั้นเราสามารถนำมาจัดรูปแบบใหม่ให้อยู่ในรูปแบบของตาราง เพื่อที่จะสามารถเห็นรูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้ชัดเจนยิ่งขึ้น พร้อมทั้งรูปแบบของการมอดูเลชันที่สามารถสลับโหมดกันได้ โดยจะแบ่งเป็นรูปแบบ A B C และ D ทั้งนี้ระบบที่ใช้จำนวนของสายอากาศภาคส่ง 2 ต้น และสายอากาศภาครับ 2 ต้นนั้น จะถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบ A B และ C ส่วนระบบที่มีจำนวนสายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้น และสายอากาศภาครับที่ 3 ต้นนั้นมีเพียงรูปแบบเดียว ซึ่งจัดให้อยู่ในรูปแบบ D โดยทุกรูปแบบนี้แสดงข้อมูลได้ดังตารางที่ 4.3

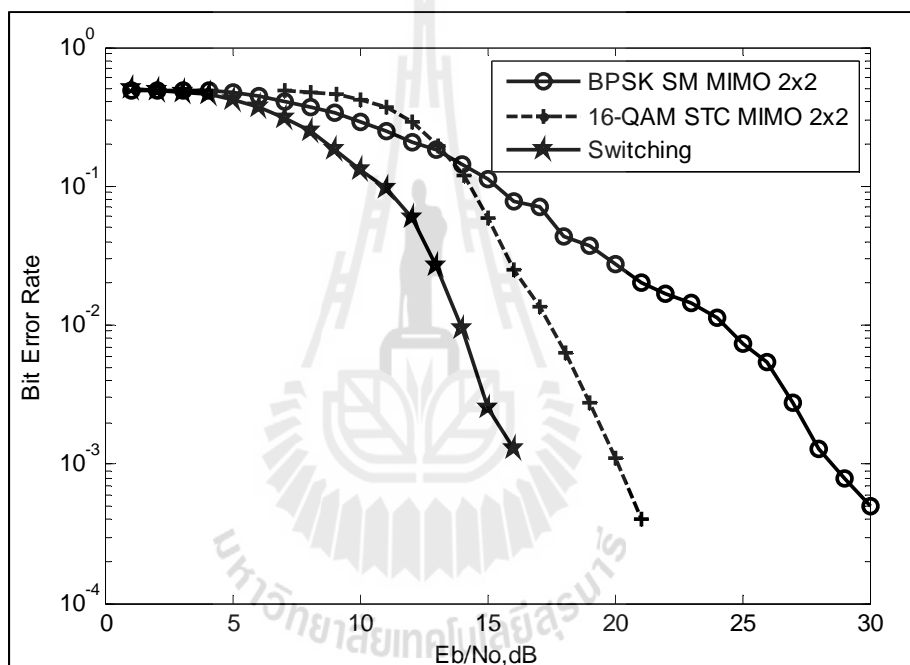
ตารางที่ 4.3 แสดงรูปแบบของเทคนิคโมโม และรูปแบบของการมอดูเลชันที่สามารถสลับโหมดได้

จำนวนของสายอากาศ		รูปแบบ	การมอดูเลชัน	
ภาคส่ง	ภาครับ		STC	SM
2	2	A	16-QAM	BPSK
2	2	B	64-QAM	BPSK
2	2	C	64-QAM	QPSK
2	3	D	64-QAM	QPSK

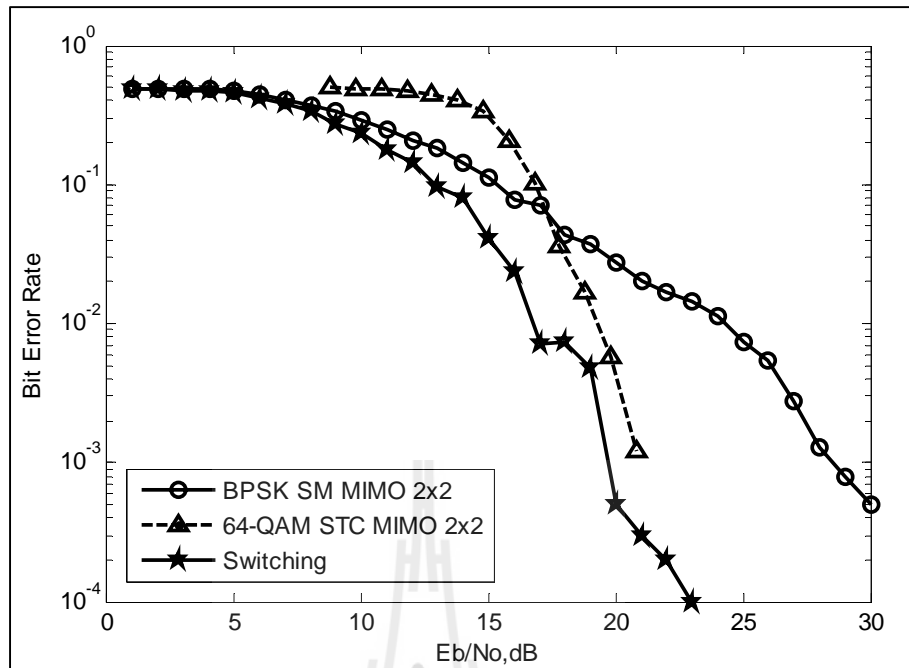
4.4 การจำลองแบบโดยใช้เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัว

การจำลองแบบในส่วนนี้จะนำเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวเข้ามาใช้งานกับระบบไวแวมซ์ ซึ่งหลักการทำงานของเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัว และหลักเกณฑ์ในการเลือกแต่ละรูปแบบนั้น จะใช้การพิจารณาค่าระยะยูลิเดียนต่ำสุดของแต่ละรูปแบบมาพิจารณา โดยค่าระยะยูลิเดียนต่ำสุดของรูปแบบใดมีค่ามากก็จะเลือกรูปแบบนั้นในการส่งข้อมูลออกไป และในหัวข้อที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นได้ทำการคัดเลือกรูปแบบที่สามารถสลับโมโม่ได้เรียบร้อยแล้ว ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 4.3 จากตารางที่ 4.3 นี้ จะนำรูปแบบดังกล่าวทั้ง 4 รูปแบบคือ A B C และ D มาทำการจำลองแบบโดยใช้เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัว ซึ่งผลจากการจำลองแบบนั้น แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.9 ถึง 4.12 จากกราฟรูปที่ 4.9 นั้นจะเป็นการจำลองแบบของรูปแบบ A โดยรูปแบบที่สามารถสลับโมโม่ได้นั้น คือ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ที่มีรูปแบบการมอดูเลชันคือ 16-QAM และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง ที่มีรูปแบบการมอดูเลชันคือ BPSK จากรูปกราฟจะเห็นได้ว่า รูปกราฟที่เกิดจากการนำเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวมาใช้งานนั้น จะให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ลดลงกว่าการใช้เพียงเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่งเพียงรูปแบบเดียว จากกราฟรูปที่ 4.10 นั้นจะเป็นการจำลองแบบของรูปแบบ B โดยรูปแบบที่สามารถสลับโมโม่ได้นั้น คือ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ที่มีรูปแบบการมอดูเลชันคือ 64-QAM และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง ที่มีรูปแบบการมอดูเลชันคือ BPSK รูปกราฟแสดงให้เห็นว่า กราฟที่เกิดจากการนำเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวมาใช้งานนั้น จะให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ลดลงกว่าการใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง เพียงรูปแบบเดียว และรูปแบบ C แสดงดังกราฟรูปที่ 4.11 มีรูปแบบที่สามารถสลับโมโม่กันได้คือ คือ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ที่มีรูปแบบการมอดูเลชันคือ 64-QAM และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง ที่มีรูปแบบการมอดูเลชันคือ QPSK จากรูปกราฟนั้นจะเห็นว่าที่ค่า E_b/N_0 มีค่ามากขึ้นตั้งแต่ 18 dB กราฟที่ใช้เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับรูปแบบของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ที่มีรูปแบบการมอดูเลชันแบบ 64-QAM แต่อย่างไรก็ตาม กราฟที่นำเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวนี้อีกยังมีค่าความผิดพลาดบิตไม่ต่างไปจากรูปแบบของเทคนิคเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ที่ใช้รูปแบบการมอดูเลชันที่ 64-QAM มากเท่าไร แต่ก็เป็นที่ยอมรับได้ว่ายังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสุดท้าย สำหรับระบบที่ใช้สายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้น และสายอากาศภาครับที่ 3 ต้นนั้น จากตารางที่ 4.2 พบว่า มีเพียงรูปแบบเดียวเท่านั้นที่สามารถสลับโมโม่กันได้คือ เทคนิคเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ที่มีรูปแบบการมอดูเลชันแบบ 64-QAM และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง ที่มีรูปแบบการมอดูเลชันแบบ QPSK ซึ่งจะ

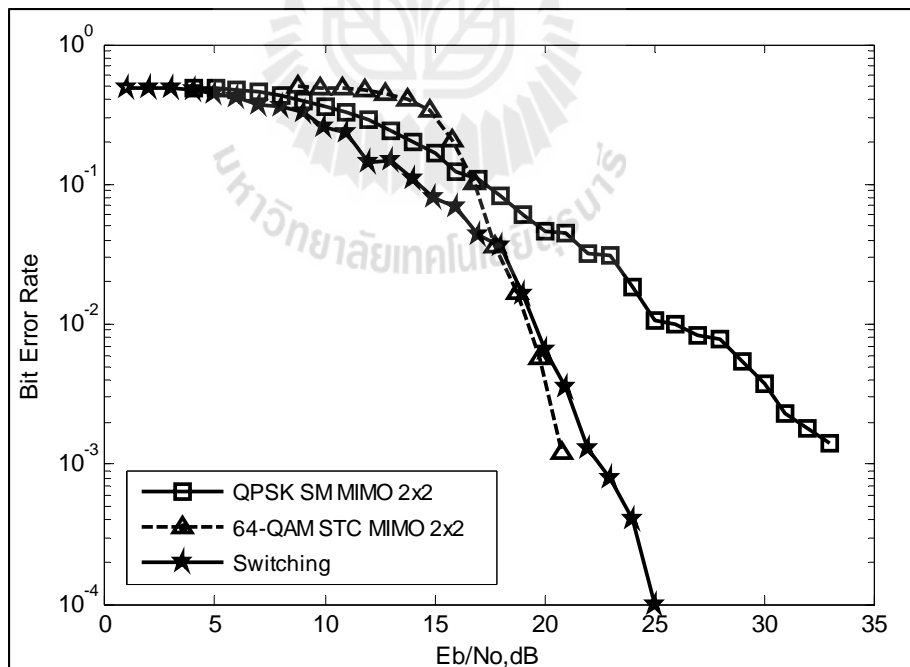
กำหนดให้เป็นรูปแบบ D จากกราฟรูปที่ 4.12 พบว่ารูปแบบที่ใช้เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัว นั้นยังคงให้ประสิทธิภาพการทำงานดีกว่ารูปแบบของเทคนิคเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง เพียงรูปแบบเดียว โดยจะมีค่าความผิดพลาดบิตที่น้อยกว่า แต่เมื่อค่า E_b/N_0 มีค่าที่ 25 dB เส้นกราฟจะมีค่าใกล้เคียงกับรูปแบบของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ที่ใช้การมอดูเลชันแบบ 64-QAM จากการจำลองแบบพบว่าเมื่อนำเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวมาใช้กับระบบไวแมกซ์ จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบได้ดีกว่าเทคนิคที่ไม่มีการปรับตัว



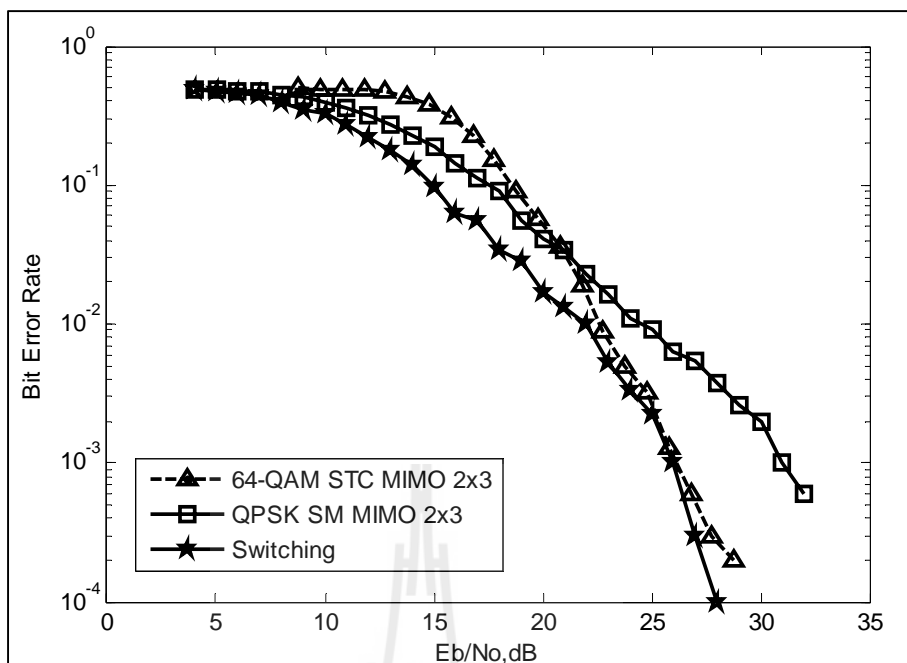
รูปที่ 4.9 รูปแบบ A ร่วมกับเทคนิค AMS



รูปที่ 4.10 รูปแบบ B ร่วมกับเทคนิค AMS



รูปที่ 4.11 รูปแบบ C ร่วมกับเทคนิค AMS

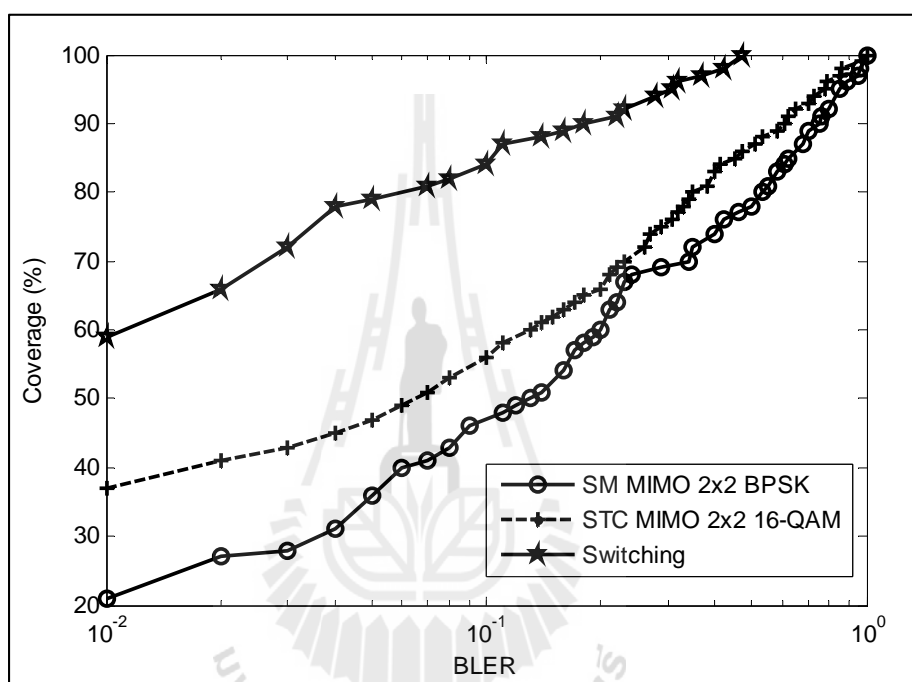


รูปที่ 4.12 รูปแบบ D ร่วมกับเทคนิค AMS

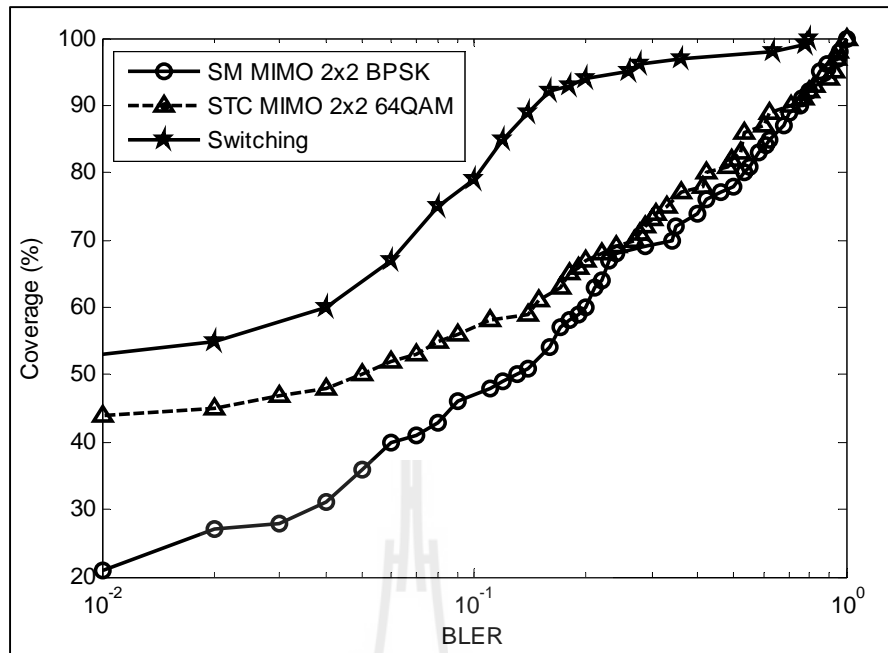
4.5 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมเมื่อใช้เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัว

การจำลองแบบเพื่อการทำนายพื้นที่ครอบคลุมนั้น จะจำลองแบบทั้ง 4 รูปแบบคือ A B C และ D ดังแสดงข้อมูลได้ดังตารางที่ 4.2 โดยการจำลองแบบเพื่อทำนายพื้นที่ครอบคลุมนั้นจะเน้นไปที่การนำเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวเข้ามาใช้งานในระบบไวแมกซ์ โดยจะอาศัยค่าอัตราความผิดพลาดบล็อกในการทำนายพื้นที่ครอบคลุม ดังสมการที่ (3.31) โดยจะสร้างบล็อกข้อมูลขึ้นมา 100 บล็อกในแต่ละบล็อกข้อมูลจะทำการส่งข้อมูลจำนวน 50 ครั้ง จากกราฟรูปที่ 4.13 ถึง 4.15 นั้นจะเป็นระบบที่ใช้สายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้น และสายอากาศภาครับ 2 ต้น จะเห็นได้ว่าพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ในแต่ละกราฟจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน คือจะให้พื้นที่ครอบคลุมอยู่ที่ประมาณ 40 - 50 เปอร์เซ็นต์ และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่งนั้นจะมีพื้นที่ครอบคลุมน้อยกว่าเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา โดยจะให้พื้นที่ครอบคลุมอยู่ที่ประมาณ 20 - 30 เปอร์เซ็นต์ และสำหรับเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวนั้นจากกราฟจะเห็นได้ว่าจะให้พื้นที่ครอบคลุมที่มากขึ้นกว่าการใช้เพียงเทคนิคโมโม่เพียงเทคนิคเดียว ซึ่งจะให้พื้นที่ครอบคลุมอยู่ที่ช่วงประมาณ 50 - 60 เปอร์เซ็นต์ ส่วนระบบที่ใช้จำนวนของสายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้น และสายอากาศภาครับที่ 3 ต้นนั้น เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลานั้นจะให้

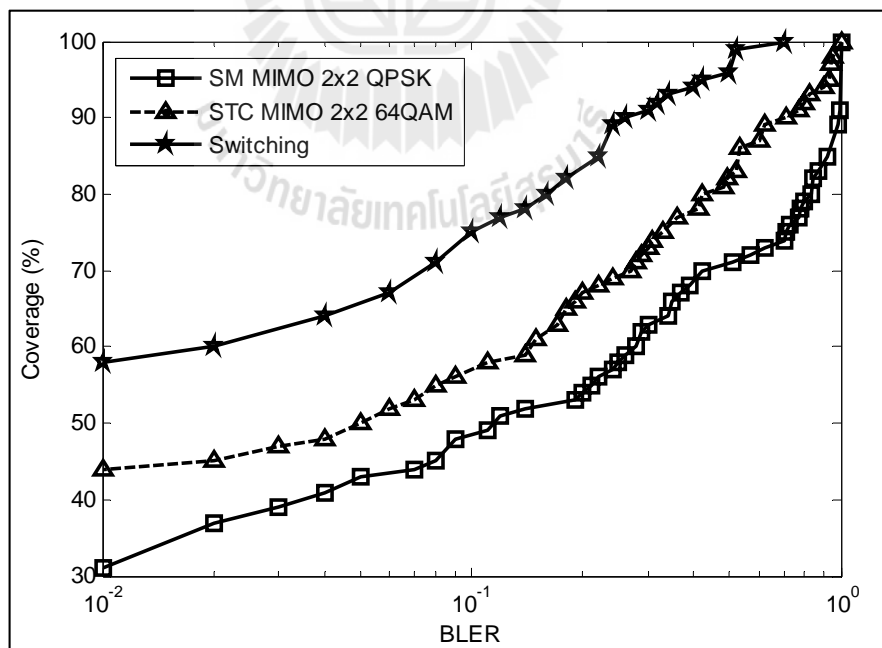
พื้นที่ครอบคลุมอยู่ที่ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง นั้นจะให้พื้นที่ครอบคลุมประมาณ 89 เปอร์เซ็นต์ ส่วนรูปแบบที่ใช้เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวนั้นจะให้พื้นที่ครอบคลุมมากกว่าทั้งสองรูปแบบ ซึ่งอยู่ที่ 92 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าการใช้เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวจะสามารถเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมให้แก่ระบบได้ และการเพิ่มจำนวนของสายอากาศภาครับให้เพิ่มขึ้นนั้นจะช่วยให้ระบบมีพื้นที่ครอบคลุมที่เพิ่มขึ้นด้วย



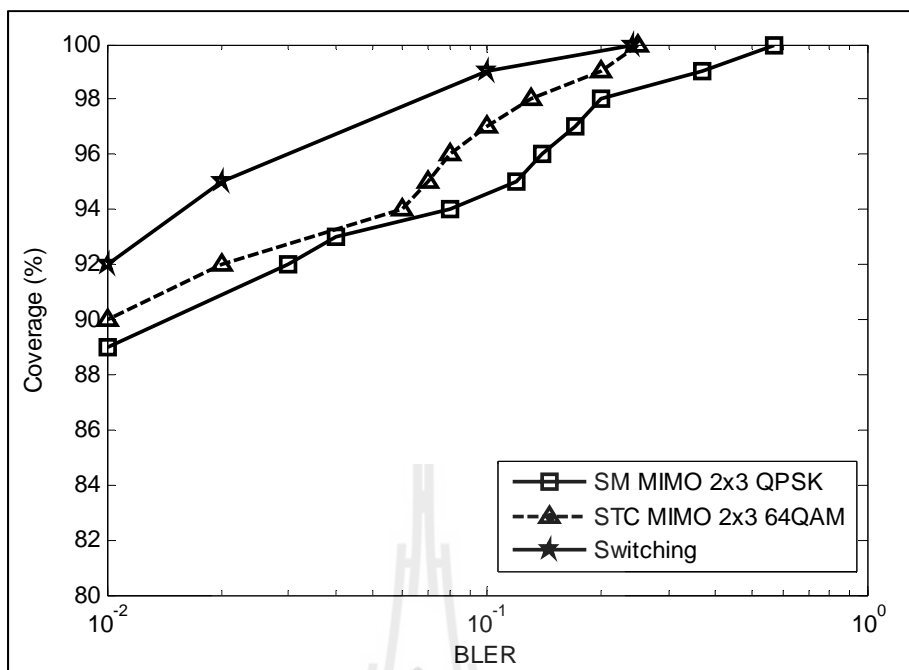
รูปที่ 4.13 การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค STC เทคนิค SM และเทคนิค AMS ของรูปแบบ A



รูปที่ 4.14 การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค STC เทคนิค SM และเทคนิค AMS ของรูปแบบ B



รูปที่ 4.15 การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค STC เทคนิค SM และเทคนิค AMS ของรูปแบบ C



รูปที่ 4.16 การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค STC เทคนิค SM และเทคนิค AMS ของรูปแบบ D

4.6 การจำลองแบบเพื่อทำนายพื้นที่ครอบคลุม

การทำนายพื้นที่ครอบคลุมในหัวข้อนี้ จะทำนายด้วยการใช้เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัว โดยจะใช้กราฟรูปที่ 4.17 ที่แสดงพื้นที่ครอบคลุมของการใช้เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวที่ค่า SNR ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะสามารถทำนายพื้นที่ครอบคลุมได้ดังนี้คือ

เมื่อกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุม และค่าระดับความผิดพลาดบล็อก

- 1) กำหนดค่าของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมที่ต้องการไว้ เช่น กำหนดไว้ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุม
- 2) กำหนดระดับค่าความผิดพลาดบล็อกที่ต้องการไว้ โดยกำหนดไว้ที่ค่า BLER = 10⁻²
- 3) จากนั้นนำค่าความผิดพลาดของบล็อกที่กำหนดไว้ และระดับของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมที่ต้องการ ไปดูระดับค่าที่แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 4.17 จากกราฟจะเห็นได้ว่าระดับที่ต้องการนั้นมีค่า SNR = 12 dB
- 4) จากค่า SNR = 12 dB นำค่านี้ไปหาค่าระยะทางออกมา ด้วยการใช้สมการของ Path Loss จากช่องสัญญาณ SUI
- 5) ได้ค่าของระยะทาง (Distance)

จากขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นนี้จะยกตัวอย่างเพื่อแสดงให้เห็นถึงวิธีการที่ใช้ในการ
คำนวณหาค่าระยะทาง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

- สายอากาศภาคส่งสูง 80 เมตร
- สายอากาศภาครับสูง 10 เมตร
- พลังงานที่ใช้ส่ง 46 dBm
- $d_0 = 100$ เมตร

จากสมการ Path Loss ของช่องสัญญาณ SUI จะคำนวณหาค่าของ Path loss ได้เป็น

$$PL = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + s \quad (4.1)$$

หาค่า A จาก

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad (4.2)$$

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi 100}{3 \times 10^8 / 2.5 \times 10^9}\right) = 80.4 \quad (4.3)$$

หาค่า γ จาก

$$\gamma = a - (bh_b) + \left(\frac{c}{h_b}\right) \quad (4.4)$$

$$\gamma = 4 - (0.0065 \times 80) + \left(\frac{17.1}{80}\right) = 3.69 \quad (4.5)$$

หาค่า X_f จาก

$$X_f = 6\log\left(\frac{f}{2000}\right) \quad (4.6)$$

$$X_f = 6\log\left(\frac{2.5 \times 10^9}{2000}\right) = 36.58 \quad (4.7)$$

หาค่า X_f จาก

$$X_h = -10.8\log\left(\frac{h_r}{2}\right) \quad (4.8)$$

$$X_h = -10.8\log\left(\frac{10}{2}\right) = -7.55 \quad (4.9)$$

จากนั้นนำค่าในสมการที่ (4.3), (4.5), (4.7) และ (4.9) แทนในสมการ Path loss จะได้

$$PL = 80.4 + 10(3.69)\log\left(\frac{d}{100}\right) + 36.58 - 7.55 + 8.2 \quad (4.10)$$

จากขั้นตอนที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่า SNR ที่สอดคล้องกับค่าที่กำหนดไว้คือ SNR = 12 dB นำค่า SNR นี้ มาหาค่าของพลังงานที่รับได้ ณ ภาครับ จาก

$$SNR(dB) = P_r(dB) - P_{noise}(dB) \quad (4.11)$$

หา P_{noise} จาก

$$P_{noise} = -174dBm/Hz + 10\log(BW(Hz)) \quad (4.12)$$

$$P_{noise} = -174dBm + 10\log(5 \times 10^6) \quad (4.13)$$

$$= -174dBm + 66.99dB$$

$$= -137dB$$

นำค่า SNR = 12 dB แทนค่าในสมการ (4.11)

$$12dB = P_r(dB) - (-137dB) \quad (4.14)$$

$$P_r(dB) = -125dB \quad (4.15)$$

จากสมการของ Path loss

$$PL(dB) = 10\log(P_t) - 10\log(P_r) \quad (4.16)$$

นำค่า P_t และ P_r แทนในสมการ (4.16) จะได้ค่า PL(dB) ดังนี้

$$PL(dB) = 10\log(40) - 10\log(3.155 \times 10^{-13}) \quad (4.17)$$

$$PL(dB) = 16.02 - (-125.01) = 141.03dB \quad (4.18)$$

นำค่า PL(dB) ที่ได้แทนค่าในสมการที่ (4.10) จะได้

$$141.03 = 80.4 + 10(3.69)\log\left(\frac{d}{100}\right) + 36.58 - 7.55 + 8.2 \quad (4.19)$$

$$0.634 = \log\left(\frac{d}{100}\right)$$

$$10^{0.634} = \frac{d}{100}$$

$$d = 430.69 \text{ m}$$

จากตัวอย่างการคำนวณข้างต้นนั้นเมื่อกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมไว้ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ และระดับค่าความผิดพลาดบล็อกที่ 10^{-2} นั้นพบว่าจะมีระยะทางของพื้นที่ครอบคลุมคือ 430 เมตร

เมื่อกำหนดค่าระยะทางที่ต้องการ

- 1) กำหนดค่าระยะทาง (d) ต้องการไว้
- 2) จากค่าระยะทาง (d) ที่กำหนด นำไปหาค่าของ Path Loss จากสมการ Path Loss ของช่องสัญญาณ SUI
- 3) เมื่อได้ค่าของ PL แล้วนำค่าที่ได้นี้ ไปหาค่าของ P_r เมื่อทราบค่าของ P_t แล้วนำไปหาความสัมพันธ์เพื่อให้ได้ค่า SNR ของระยะทางที่ได้กำหนดไว้ในข้อที่ 1
- 4) เมื่อได้ค่า SNR ที่สอดคล้องกับค่าที่กำหนดไว้แล้ว ใช้ค่า SNR ที่ได้ นำมาดูในกราฟรูปที่ 4.17 เพื่อดูว่าค่าระยะทางที่กำหนดขึ้นนั้นจะให้ค่าของพื้นที่ครอบคลุมเท่าไร

จากขั้นตอนดังกล่าวข้างต้น จะยกตัวอย่างเพื่อแสดงวิธีการคำนวณเพื่อหาค่า SNR ดังนี้ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็น

- สายอากาศภาคส่งสูง 80 เมตร
- สายอากาศภาครับสูง 10 เมตร
- พลังงานที่ใช้ส่ง 46 dBm
- $d_0 = 100$ เมตร
- $d = 550$ เมตร

จากสมการ Path loss ของช่องสัญญาณ SUI ที่ได้แทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในสมการที่ (4.10) แทนค่าระยะทาง (d) ที่กำหนดไว้ลงในสมการ จะได้

$$PL = 80.4 + 10(3.69) \log\left(\frac{550}{100}\right) + 36.58 - 7.55 + 8.2 \quad (4.20)$$

$$PL = 144.95 \text{ dB}$$

นำค่า PL ที่ได้ไปหาค่าของ P_r จากสมการ

$$PL(dB) = 10\log(P_t) - 10\log(P_r) \quad (4.21)$$

$$144.95dB = 10\log(40w) - P_r(dB)$$

$$P_r(dB) = -128.93dB$$

จากสมการของ SNR คือ

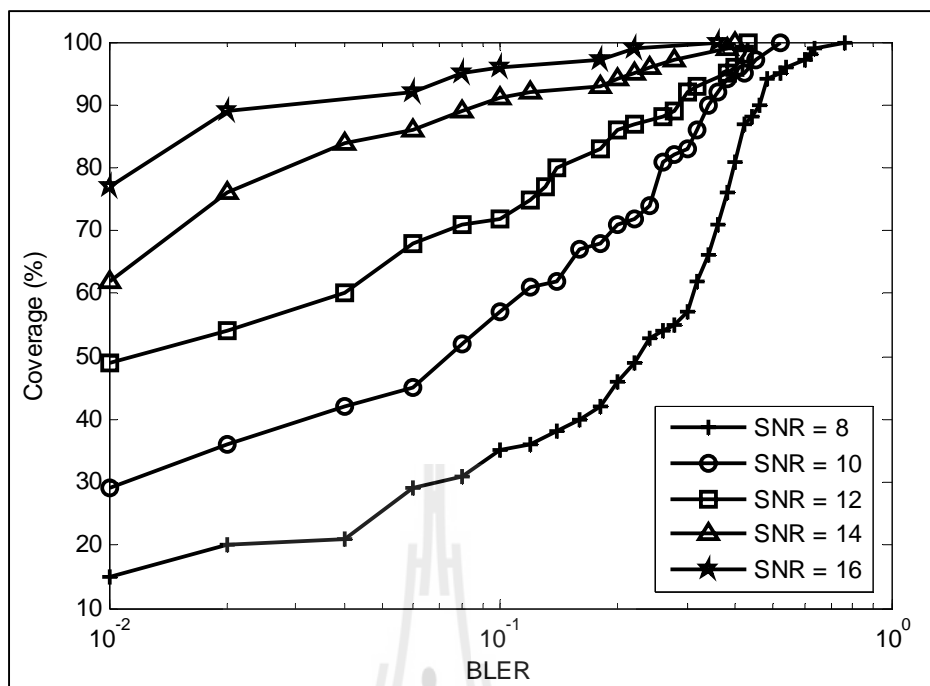
$$SNR(dB) = P_r(dB) - P_{noise}(dB) \quad (4.22)$$

เมื่อ P_{noise} แสดงวิธีการคำนวณไว้แล้วในสมการที่ (4.13) คือ -137 dB นำมาแทนค่าในสมการที่ (4.22) จะได้

$$SNR(dB) = -128.93 - (-137.01) \quad (4.23)$$

$$SNR(dB) = 8.08dB \approx 8dB \quad (4.24)$$

จากค่า SNR ที่ได้จากสมการที่ (4.24) นำค่า SNR ที่หาได้นี้ไปดูกราฟรูปที่ 4.17 เพื่อหาค่า SNR ดังกล่าวนี้ และระยะทางที่กำหนดไว้นั้น จะให้ค่าพื้นที่ครอบคลุมที่เท่าไร จากค่า SNR ที่คำนวณได้นั้นคือ 8 dB โดยกำหนดระยะทางไว้ที่ 550 เมตรนั้น นำค่า SNR = 8 dB ไปหาค่าเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมจากกราฟรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าที่ค่า SNR = 8 dB นั้นจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมอยู่ที่ 15 เปอร์เซ็นต์ที่ค่า BLER = 10^{-2}



รูปที่ 4.17 แสดงพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค AMS ที่ค่า SNR ต่างๆ กัน

4.7 สรุปเนื้อหาบทที่ 4

เนื้อหาที่สำคัญของบทนี้ จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบไวแมกซ์ ที่นำระบบโมโมแบบวงเปิดมาใช้ งาน โดยเทคนิคโมโมแบบวงเปิดนี้ ก็จะมีสองเทคนิคด้วยกันคือ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง เนื่องจากการทำงานของระบบโมโมที่มีการเลือกใช้เพียงรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งนั้น อาจจะยังไม่ได้ประสิทธิภาพที่ดีพอ ดังนั้นจึงได้นำเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัวเข้ามาเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ระบบ ซึ่งการทำงานในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัว ซึ่งการนำเทคนิคนี้เข้ามาใช้นั้น จะต้องทำการคัดเลือกรูปแบบที่สามารถที่จะเกิดการสลับโหมดกันได้จริง โดยโหมดที่สามารถสลับโหมดกันได้นั้นจะต้องเกิดจากการตัดกันของระบบโมโมทั้งสองเทคนิค ซึ่งถ้าเราไม่ทำการคัดเลือกรูปแบบดังที่ทำงานวิทยานิพนธ์นี้ ระบบก็ต้องใช้ระยะเวลาในการทำงานเยอะ และนานขึ้น แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการคัดเลือกรูปแบบที่สามารถสลับโหมดได้เพื่อเก็บไว้เป็นข้อมูล และตัดรูปแบบที่ไม่จำเป็นออกไป ซึ่งจะช่วยให้การทำงานของระบบสามารถประมวลผลได้รวดเร็วขึ้น จากนั้นจะเปรียบเทียบให้เห็นถึงสมรรถนะของการทำงานของระบบด้วยการวัดจากค่าความผิดพลาดบิต โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคของการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง และเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัว ซึ่ง

จากผลการจำลองแบบนั้นแสดงให้เห็นว่า การนำเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัวมาใช้งานในระบบไวแมกซ์นั้นจะสามารถทนต่อสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าเทคนิคโมโมทั้งสองรูปแบบ เนื่องจากเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัวนี้ จะสามารถปรับตัวให้เข้ากับการทำงานในแต่ละครั้ง และจะเลือกรูปแบบที่เหมาะสมในการส่งสัญญาณออกไปจึงทำให้เทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัวนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับ และส่งข้อมูลให้ดีขึ้นในระบบไวแมกซ์ได้ นอกจากนี้ยังทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ โดยจะเห็นว่า พื้นที่ครอบคลุมของเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัวนั้นจะให้พื้นที่ครอบคลุมที่ดีกว่าการใช้ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง ดังนั้นสำหรับการนำไปใช้งานจริงนั้นเทคนิคการสลับโมโมแบบปรับตัวถือได้ว่าเป็นเทคนิคที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของการทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดี ซึ่งจะทำให้การรับ และส่งข้อมูลมีประสิทธิภาพขึ้น และการให้พื้นที่ครอบคลุมที่เหมาะสมกับระบบไวแมกซ์มากที่สุด



บทที่ 5

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

สำหรับงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาการสื่อสารไร้สายระบบไวแมกซ์ เป็นระบบที่ให้อัตราเร็วในการรับ และส่งข้อมูลสูง และยังมีพื้นที่ให้บริการที่กว้าง และครอบคลุมมากขึ้น ซึ่งระบบไวแมกซ์นี้จะตอบสนองต่อความต้องการในการนำไปใช้งานในปัจจุบันได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามการที่จะทำให้ระบบการทำงานนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นก็ต้องอาศัยเทคนิค และวิธีการต่าง ๆ เข้ามาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการทำงานของระบบ ซึ่งระบบไวแมกซ์นี้ก็ยังคงรับกับการทำงานของระบบโมเด็มด้วย และแน่นอนว่าการนำระบบโมเด็มเข้ามาใช้งานร่วมกับระบบไวแมกซ์นั้นก็จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลได้ดีขึ้น

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เริ่มจากการศึกษาการทำงานของระบบไวแมกซ์ โครงสร้างการทำงานของระบบ ซึ่งในระบบไวแมกซ์นี้จะมี 256 subcarrier ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็นข้อมูลจำนวน 192 subcarrier pilot 8 subcarrier zero DC 1 subcarrier และ guard carrier 55 subcarrier จากนั้นศึกษาถึงโครงสร้างของระบบทั้งภาครับ และภาคส่ง เพื่อนำเทคนิคโมเด็มเข้าไปร่วมใช้งานกับระบบไวแมกซ์ โดยพบว่า หลังจากที่ข้อมูลผ่านการมอดูเลตแล้ว ในส่วนนี้จะนำข้อมูลที่ได้ออกไปใช้งานกับเทคนิคโมเด็มแบบวงเปิด ซึ่งเทคนิคโมเด็มแบบวงเปิดนี้ ก็มี 2 เทคนิคด้วยกันคือ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง เพื่อส่งสัญญาณออกไป ส่วนภาครับก็เช่นเดียวกัน ข้อมูลที่รับได้ที่ภาครับ ก็จะถูกนำไปเข้ากระบวนการสำหรับการถอดรหัสในแต่ละรูปแบบเพื่อให้ได้ข้อมูลออกมา จากนั้นก็จะเอาข้อมูลที่ผ่านการถอดรหัสนี้ มาดีมอดูเลตเพื่อให้ได้ข้อมูลจริงที่ถูกส่งมา แต่ถึงอย่างไรก็ตามสำหรับการใช้งานเทคนิคโมเด็มเพียงเทคนิคเดียวอาจจะยังไม่เพียงพอ จึงได้ศึกษาถึงเทคนิคการสลับโมเด็มแบบปรับตัว เพื่อนำมาเพิ่มประสิทธิภาพในการรับ และส่งข้อมูลให้กับระบบ โดยเทคนิคการสลับโมเด็มแบบปรับตัวนี้จะเป็นการรวมเอาเทคนิคในการส่งสัญญาณของระบบโมเด็มทั้งสองรูปแบบมารวมเข้าไว้ด้วยกัน โดยหลักเกณฑ์ในการเลือกรูปแบบนี้จะอาศัยการคำนวณค่าระยะยูคลิเดียนต่ำสุดของแต่ละรูปแบบเพื่อทำการเลือกรูปแบบที่เหมาะสมในขณะนั้น ในการส่งข้อมูลออกไป จากนั้นจะทำการศึกษาการทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ เมื่อนำเทคนิคการสลับโมเด็มแบบปรับตัวมาใช้งานในระบบ โดยการ

ทำนายพื้นที่ครอบคลุมนี้ จะทำนายจากค่าของความผิดพลาดบล็อก โดยจะกำหนดค่าความผิดพลาดบล็อกที่เป็นค่าเป้าหมายไว้ โดยค่าของพื้นที่ครอบคลุมจะถูกคิดออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ เพื่อให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่ารูปแบบใดจะให้พื้นที่ครอบคลุมที่ดี และเหมาะสมกับระบบไวแมกซ์

จากนั้นได้ทำการจำลองแบบของระบบไวแมกซ์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยการจำลองแบบของระบบไวแมกซ์นี้จะนำเอาเทคนิคของระบบโมโม่แบบวงเปิดเข้ามาใช้งานด้วย ซึ่งจะแบ่งการจำลองแบบออกเป็น 2 รูปแบบคือ ระบบไวแมกซ์ใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และระบบไวแมกซ์ ที่ใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง โดยการจำลองแบบนี้จะใช้รูปแบบการมอดูเลชัน 4 รูปแบบคือ BPSK QPSK 16-QAM และ 64-QAM จากนั้นเราจะนำข้อมูลที่ได้จากการจำลองแบบของเทคนิคโมโม่ทั้งสองรูปแบบนี้ มาทำการคัดเลือกรูปแบบที่สามารถเกิดการสลับโหมดกันได้จริง สำหรับขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เนื่องจากการคัดเลือกรูปแบบนี้จะทำให้รูปแบบที่ไม่สามารถสลับโหมดกันได้นั้นถูกตัดทิ้งออกไป เหลือไว้เพียงรูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้เท่านั้น ซึ่งกระบวนการนี้จะช่วยลดการทำงานของระบบให้มีการประมวลผลได้รวดเร็วขึ้น ถ้าไม่ทำการคัดเลือกรูปแบบที่ไม่จำเป็นออก ระบบก็จะต้องนำทุกรูปแบบที่ได้มาประมวลผล ซึ่งจะทำให้การทำงานของระบบใช้เวลานานขึ้น เมื่อได้รูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้แล้วก็จะนำรูปแบบดังกล่าวมาจำลองแบบโดยใช้เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ ซึ่งจะเห็นได้จากผลการจำลองแบบว่า การนำเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวเข้ามาใช้นั้นจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราความผิดพลาดบิตของระบบไวแมกซ์ที่มีการใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา การมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง และเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวนั้น จะเห็นว่า เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวนั้น จะมีอัตราความผิดพลาดบิตที่น้อยกว่าเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง จากนั้นก็ทำการจำลองแบบเพื่อทำนายพื้นที่ครอบคลุมที่เกิดขึ้นเมื่อนำเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวมาใช้กับระบบไวแมกซ์ จากผลการจำลองแบบพบว่า เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวนี้ จะให้พื้นที่ครอบคลุมที่ดีกว่าเทคนิคโมโม่ทั้งสองเทคนิค นั้นแสดงให้เห็นว่าการนำเทคนิคโมโม่มาใช้งานกับระบบไวแมกซ์นั้น จะทำให้ระบบไวแมกซ์มีประสิทธิภาพในการรับ และส่งข้อมูลดีขึ้น โดยเฉพาะเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับนี้ จะให้ประสิทธิภาพในการรับ และส่งข้อมูล และพื้นที่ครอบคลุมที่ดีขึ้น ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้กับระบบไวแมกซ์

จากผลการจำลองแบบทั้งหมดที่ได้กล่าวมา เราสามารถสรุปได้ว่า การนำเทคนิคโมโม่มาใช้งานกับระบบไวแมกซ์ โดยเฉพาะเทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ จะช่วยให้การรับ และส่งข้อมูลของระบบไวแมกซ์มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น อีกทั้งยังมีพื้นที่ครอบคลุมใน

การให้บริการที่ดีขึ้น จึงทำให้วิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้เหมาะที่จะนำไปใช้งานกับระบบไวแมกซ์ เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการทำงานของโปรแกรมสำหรับการจำลองแบบโดยใช้เทคนิคการสลับโมโม่แบบปรับตัวนั้นจะใช้เวลานานเนื่องจาก ระบบต้องการคำนวณเพื่อหาค่าระยะยูคลิเดียนต่ำสุด ซึ่งในการคำนวณนั้นจำเป็นต้องคำนวณค่าจากทุกจุดของคู่คอนสเทลเลชัน วิธีการแก้ไข คือ จำลองแบบโปรแกรมโดยเลือกกลุ่มตัวอย่างก่อนเพื่อดูค่าแนวโน้มของเส้นกราฟ โดยทำการเลือกค่า SNR ประมาณ 7-8 ค่า แล้วจำลองแบบโปรแกรม เมื่อโปรแกรมทำงานได้ถูกต้องแล้วก็ค่อยเพิ่มจำนวนค่า SNR ตามที่กำหนดไว้

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยนี้เป็นการจำลองแบบระบบไวแมกซ์ที่นำเทคนิคของระบบโมโม่มาใช้งาน โดยผ่านการจำลองแบบทางโปรแกรม MATLAB ด้วยการใช้สายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้น โดยในการพัฒนางานวิจัยในอนาคตอาจจะใช้จำนวนของสายอากาศภาคส่ง และภาครับที่เพิ่มขึ้น และควรทดสอบระบบนี้ด้วยฮาร์ดแวร์ และช่องสัญญาณจริง เพื่อนำผลที่ได้จากการจำลองแบบกับผลที่ได้จากฮาร์ดแวร์มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งจะทำให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- Hanzo, J.Akhtman, M.Jiang, L.Wang, **MIMO-OFDM for LTE, WIFI and WIMAX**. University of Southampton, p.43-55.
- Dominik Seethaler., Harold Art_es., and Franz Hlawatsch. (2005) **Detection Techniques for MIMO Spatial Multiplexing Systems**. Elektrotechnik and Informationstechnik (e&i), vol. 122, no. 3, pp. 91–96. Copyright 2005 Springer-Verlag.
- Siavash M. Alamouti, (1998) **A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications**. IEEE Journal on Select Areas in Communications, vol. 16, no. 8.
- Vahid Tarokh., Hamid Jafarkhani., and A. R. Calderbank, (1999) **Space–Time Block Codes from Orthogonal Designs**. IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY, VOL.45, NO. 5.
- R.W. Heath Jr., and A.J. Paulraj, (2005) **Switching Between Diversity and Multiplexing in MIMO Systems**. IEEE Transactions on Communications, Vol. 53, No. 6, (pp. 962-968).
- Prabaagarane.N., Ramakrishnan.M., Karthika.S., Janani.U.G., Janaki.S, (2008) **Adaptive MIMO switching for Mobile WiMAX OFDMA Systems: Performance Trade off**. WiCOM 4th, International Conference.
- Chanhong Kim., Jungwoo Lee, (2008) **Rate Adaptive Modulation with MIMO Mode Switching Between Spatial Multiplexing and Diversity**. International Symposium on Information Theory and its Applications, ISITA2008, Auckland, New Zealand.
- Ruifeng Wang, (2009) **MIMO: from Theory to Reality**. CodioLink White Paper.
- Luis Miguel Cortes Pena, (2009) **MIMO Space–Time Block Coding (STBC): Simulations and Results**. CORTES-PENA; ECE6604: PERSONAL & MOBILE COMMUNICATIONS; PRESENTED TO DR. GORDON STU BER.

- Mai Tran., David Halls., Andrew Nix., Angela Doufexi., Mark Beach, (2009) **Mobile WiMAX: Downlink Performance Analysis with Adaptive MIMO Switching**. IEEE Mobile WiMAX Symposium.
- Ludovic COLLIN., Student Member., IEEE Olivier BERDER., Student Member., IEEE Philippe ROSTAING., Gilles BUREL., Member IEEE, **Optimal Minimum Distance Based Precoder for MIMO Spatial Multiplexing Systems**. IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 52, No. 3, pp.617-627.
- IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, (2003) **Channel Models for Fixed Wireless Applications**.
- Louay M. A. Jalloul., *Senior Member., IEEE.*, and Sam P. Alex, (2008) **Coverage Analysis for IEEE 802.16e/WiMAX Systems**. IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS, VOL. 7, NO. 11.
- S. S. Jeng., J.M. Chen., C.W. Tsung., Y.F. Lu, (2010) **Coverage probability analysis of IEEE 802.16 system with smart antenna system over Stanford University Interim fading channels**. The Institution of Engineering and Technology Vol. 4, Iss. 1, pp. 91–101.
- Sakkarin Chaokuntod, (2009) **PAPR REDUCTION TECHNIQUE FOR ADAPTIVE MODULATION IN BROADBAND WIRELESS ACCESS**. Thesis for the Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering Suranaree University of Technology. p.4-41.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Pattaraporn Khakhai, Peerapong Uthansakul, Monthippa Uthansakul. (2012) **Adaptive MIMO Switching of 2x2 MIMO System for WiMAX Technology.** Computing, Communications and Applications Conference (ComComAp 2012). Hong Kong, China. January 11-13. (pp. 392-395)

Pattaraporn Khakhai, Peerapong Uthansakul, Monthippa Uthansakul. (2011) **MIMO Mode Switching of WiMAX Systems with fixed Transmit Antenna.** Burapha University National Conference 2011, Thailand. July 6-7. (pp. 1-10)



Adaptive MIMO Switching of 2x2 MIMO System for WiMAX Technology

Pattaraporn Khakhai
School of Telecommunication
Engineering
Suranaree University of Technology
NakhonRatchasima,Thailand
m5340590@g.sut.ac.th

Peerapong Uthansakul
School of Telecommunication
Engineering
Suranaree University of Technology
NakhonRatchasima,Thailand
uthansakul@sut.ac.th

Monthippa Uthansakul
School of Telecommunication
Engineering
Suranaree University of Technology
NakhonRatchasima, Thailand
mtp@sut.ac.th

Abstract— The growth in traffic volume and the increase in many new services have forced the change of wireless configuration and transmission schemes. WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) system is considered as one technology to ground the broadband access facility by providing a variety of modulation and transmission schemes. MIMO (Multiple Input Multiple Output) technique is employed in WiMAX system to provide a higher data rate and improve a spectral efficiency. The MIMO schemes based on WiMAX standard are determined by various choices of either space-time coding or spatial multiplexing in which each choice offers a different system performance. In this paper, the adaptive MIMO switching has been proposed to maintain the best BER (Bit Error Rate) efficiency of data transmission among various choices of MIMO schemes in WiMAX system. The results reveal that the proposed system achieves a significant improvement when using adaptive MIMO switching instead of using only either spatial multiplexing or space-time coding.

Keywords; Multiple-input multiple-output (MIMO), space-time coding (STC), spatial multiplexing (SM), WiMAX.

I. INTRODUCTION

Currently, the wireless communication becomes an important and necessary part of daily life. Therefore the service providers have to develop the advanced technology to support user requirements such as a higher data rate, reliability and increase of coverage area. One of the most interesting technologies is WiMAX [1]-[2] (World Wide Interoperability for Microwave Access) technology base on IEEE 802.16 standard which provides higher data rate up to 75 Mbps. Its coverage is 50 kilometers. The operating frequency between 2GHz-11GHz for fixed and between 2GHz - 6GHz for mobile applications. The standard supports single carrier transmission, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) [3] with 256 subcarriers and scalable OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) with 128, 512, 1,024, or 2,048 subcarriers. The modulation techniques are supported by BPSK, QPSK, 16-QAM, and 64-QAM. For OFDM technology, it is now widely recognized as the method of choice for mitigating multipath fading for broadband wireless. The OFDM modulation transforms a broadband, frequency-selective channel into a multiplicity of parallel narrow-band single channels. A guard interval (called Cyclic Prefix: CP) is inserted between the individual symbols. This guard interval

must be solving inter-symbol interference (ISI) in transmission channel. However, there are also techniques that can increase the efficiency of the system.

Multiple-input multiple-output (MIMO) is the use of multiple antennas at both the transmitter and receiver to improve communication performance. It gives high data rate through spatial multiplexing or diversity using space-time codes. In spatial multiplexing, a high rate signal is split into multiple lower rate streams and each stream is transmitted from a different transmit antenna in the same frequency channel. If these signals arrive at the receiver antenna array with sufficiently different spatial signatures, the receiver can separate these streams into (almost) parallel channels. Spatial multiplexing is a very powerful technique for increasing channel capacity at higher signal-to-noise ratios (SNR). In diversity methods, a single stream is transmitted, but the signal is coded using techniques called space-time coding. The signal is emitted from each of the transmit antennas with full or near orthogonal coding. Diversity coding exploits the independent fading in the multiple antenna links to enhance signal diversity. Both techniques have their advantages and disadvantages. Hence, the switching technique between diversity and multiplexing [7] is introduced to maintain the advantages from both diversity and multiplexing. This technique will bring the advantages of both formats come together which will give better performance than the choice of any one style. However, there are many choices of diversity and multiplexing to be employed in WiMAX standard. Hence, the choice of using switching technique between all of them might be difficult.

In this paper, the proposed switching scheme of 2x2 MIMO systems has been presented. By observing the performances of all schemes determined in WiMAX standard, the adaptive MIMO switching can be utilized. The results confirm that the proposed switching schemes gain the better BER performance than using only either diversity or multiplexing. In the next section, the details of space-time coding and spatial multiplexing are described and then followed by the results in Section III. Finally, the conclusion is given in Section IV.

II. 2x2 MIMO SYSTEMS

In the WiMAX standard, the MIMO technique is defined by both Spatial Multiplexing (SMX) and Space-Time Coding (STC). Spatial multiplexing is a very powerful technique for

increasing channel capacity at higher signal-to-noise ratios (SNR). In turn, a space-time coding technique is used to improve the performance of MIMO systems by exploiting the enormous diversity offered by multiple transmitting and receiving antennas. As a result, the mode of MIMO operations depends on the number of antennas which is described in Table I. The matrices remarked in the Table I are defined as shown in Table II. When there are two transmit antenna, two transmit modes are specified matrix A for Space-Time coding and matrix B for Spatial multiplexing. For four transmit antenna case, three transmit matrices are defined to support Matrix A (rate 1): space-time coding, Matrix B (rate 2): combination of space-time coding and spatial multiplexing and Matrix C (rate 4): pure spatial multiplexing.

As seen in Table I, there are only four cases which have two modes operating both SMX and STC. However, between 2 and 3 receiving antennas, the data rate transmissions are the same. Hence, the focus in this paper is paid to only 2 receiving antennas. In addition, to keep a compact antenna installment, the number of transmitting antenna is selected to 2 antennas. In summary, only 2x2 MIMO system is considered.

A. Spatial Multiplexing

In spatial multiplexing [4], a high rate signal is split into multiple streams and each stream is transmitted from a different transmit antenna in the same frequency channel. Multiplexing schemes are more robust at low SNR conditions. A mobile user located close to the base station benefits from multiplexing schemes. Spatial multiplexing scheme is implemented using VBLAST architecture. The second multiple antenna profile included in WiMAX systems in the 2x2 MIMO technique also known as Transmit Diversity rate = 2 base on matrix B = $(s_1, s_2)^T$. This system performs spatial multiplexing and does not offer any diversity gain from the transmitter side. But it does offer a diversity gain of 2 on the receiver side when detected using maximum-likelihood (ML) detection. A generic spatial multiplexing MIMO system (N_t transmitting antennas and N_r receiving antennas) can be written as:

$$r = H \cdot s + n \quad (1)$$

Where r is the received signal vector (N_r elements), s is the transmitted signal stream vector (N_t elements), H represents the $N_r \times N_t$ channel matrix and the N_r elements vector n is the additive white Gaussian noise from N_r receive chains.

B. Space-Time coding

Space-Time coding (STC) [5]-[7] is a scheme to improve the reliability of a message signal by utilizing two or more communication channels with different characteristics. It plays an important role in combating fading and co-channel interference and avoiding error bursts. Moreover, it is used to obtain gains due to spatial diversity via multiple transmit and receive antennas. A diversity gain proportional to the number of antennas at both transmit and receive sides can be achieved. One popular representation of these codes is the Alamouti scheme [5] for two transmitting antennas. In the WiMAX

standard, this scheme is referred to as Matrix A with a transmit diversity rate = 1. Let (s_1, s_2) represent a group of two consecutive symbols in the input data stream to be transmitted. During a first symbol period t_1 , transmit (Tx) antenna 1 transmits symbol s_1 and Tx antenna 2 transmits symbol s_2 . Next, during the second symbol period t_2 , Tx antenna 1 transmits symbol s_2^* and Tx antenna 2 transmits symbol $-s_1^*$. Denoting the channel response from Tx1 to the receiver (Rx) by h_1 and the channel response from Tx2 to the receiver by h_2 , the received signal samples corresponding to the symbol periods t_1 and t_2 can be written as:

$$\begin{aligned} r_1 &= h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1 \\ r_2 &= h_1 s_2^* - h_2 s_1^* + n_2 \end{aligned} \quad (2)$$

where n_1 and n_2 are additive noise terms.

Using zero forcing concepts, the receiver computes the following signals the symbols s_1 and s_2 :

$$\begin{aligned} x_1 &= h_1^* r_1 - h_2 r_2^* \\ x_2 &= h_2^* r_1 + h_1 r_2^* \end{aligned} \quad (3)$$

These expressions clearly show that x_1 and x_2 can be sent to a threshold detector to estimate symbol s_1 and s_2 without interference from the other symbol.

C. Switching between Multiplexing and Diversity

The switching between multiplexing and diversity techniques [7]-[8] is a technique that combines the advantages of both the above techniques. It can be used effectively when compared with the use of only one scheme. The choice of multiplexing or diversity depends on the matrix channel, the constellation and the desired rate. We compute the Euclidean distance for each of spatial multiplexing and space-time coding. We compute the minimum Euclidean distance by using the channel estimation and modulation parameter. Criterion minimum Euclidean distance based switching if minimum Euclidean distance for space-time coding more than minimum Euclidean distance for spatial multiplexing chooses spatial multiplexing, otherwise choose space-time coding.

D. MIMO Schemes in WiMAX Systems

The 802.16 specification also supports the antenna as shown in Table I. As mentioned earlier in this section, the choice of 2x2 MIMO is suitable for implementing in mobile applications. In Table I, the scheme of 2x2 MIMO offers with both SMX and STC techniques. Hence, the use of adaptive MIMO switching can utilize both benefits across the different types of modulations.

III. SIMULATION RESULTS

The BER performance of both MIMO techniques with two transmitting and two receiving antennas according to WiMAX standard shown in Table I are investigated. The modulations based on its standard are BPSK, QPSK, 16-QAM, and 64-QAM. It is interesting that the total number of all possible schemes for 2x2 MIMO is 8 cases. In general we have to

perform the adaptive MIMO switching by considering all 8 cases. However, it is the fact that the BER performance of some cases will not cross to each other. It means that the best performance is achieved by the specific case which the adaptive MIMO switching is not helpful. In this light, this paper starts investigating all cases in order to choose only schemes that can perform the switching.

TABLE I. MIMO SCHEMES ACCORDING TO NUMBER OF TRANSMITTING AND RECEIVING ANTENNAS

Tx	Rx			
	1	2	3	4
4	STC (Matrix A)	2xSMX (Matrix B) STC + 2xMRC (Matrix A)	2xSMX (Matrix B) STC + 3xMRC (Matrix A)	4xSMX (Matrix C)
2	STC (Matrix A)	2xSMX (Matrix B) STC + 2xMRC (Matrix A)	2xSMX (Matrix B) STC + 3xMRC (Matrix A)	STC + 4xMRC (Matrix A)
1	Baseline Case	MRC	MRC	MRC

TABLE II. THE DEFINITION OF MATRICES REFERED IN TABLE I.

Data rate	1x	2x	4x	
2 Tx	Tx Format	STC (Matrix A)	SMX(Matrix B)	N/A
	Matrix	$\begin{bmatrix} S_1 & S_2 \\ -S_2^* & S_1^* \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}$	N/A
4 Tx	Tx Format	STC (Matrix A)	STC and SMX (Matrix B)	SMX (Matrix C)
	Matrix	$\begin{bmatrix} S_1 & -S_2^* & 0 & 0 \\ S_2 & S_1^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 & -S_4^* \\ 0 & 0 & S_4 & S_3^* \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} S_1 & -S_2^* & S_5 & -S_6^* \\ S_2 & S_1^* & S_6 & -S_5^* \\ S_3 & -S_4^* & S_7 & S_8^* \\ S_4 & S_3^* & S_8 & S_7^* \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix}$

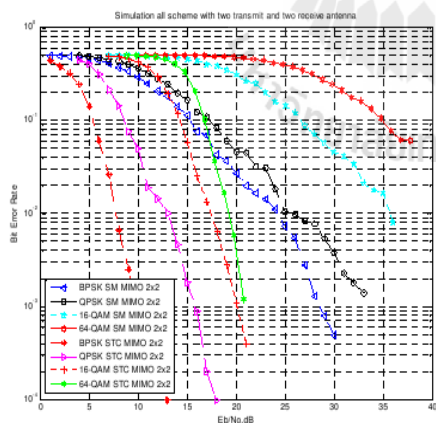


Figure 1. BER performance of all 2x2 MIMO schemes

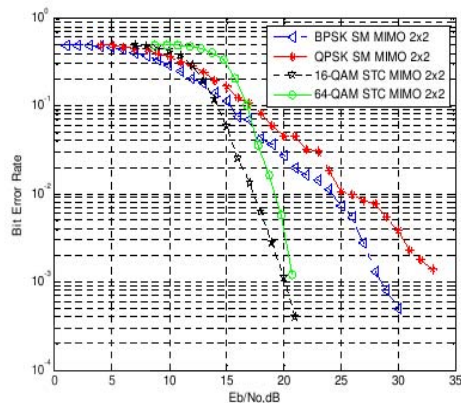


Figure 2. BER performance of only schemes that can perform switching

Figure 1 shows the BER performances of all 2x2 MIMO schemes. All 8 cases are presented. It is revealed that only some cases that their curves get cross. At this point, we can ignore the curves that cannot perform the adaptive switching out of our concern. This is helpful to screen non-related schemes out of considerations. As a result, it helps to improve the processing time of adaptive switching.

Figure 2 presents the schemes that can perform switching between spatial multiplexing and space-time coding. It is obvious that only 4 schemes is left which means that the processing time is reduced by a half of all possible cases.

After choosing the potential schemes for switching, the performance of adaptive switching can be examined. By using the information from Figure 2, the proposed switching schemes can be arranged as shown in Table III. There are three possible schemes that can switch between STC and SMX. For the case of 16-QAM and QPSK, it is almost useless to employ the switching because the best performance is always close to 16-QAM so it is deleted and not considered here.

TABLE III. THE PROPOSED SWITCHING SCHEMES BETWEEN SMX AND STC WITH DIFFERENCE MODULATIONS

Scheme	Modulation	
	STC	SMX
A	16-QAM	BPSK
B	64-QAM	BPSK
C	64-QAM	QPSK

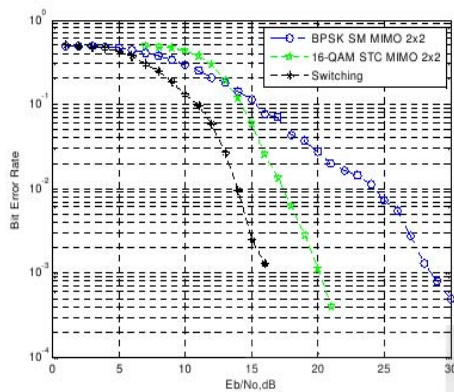


Figure 3. BER performance of scheme A described in Table III.

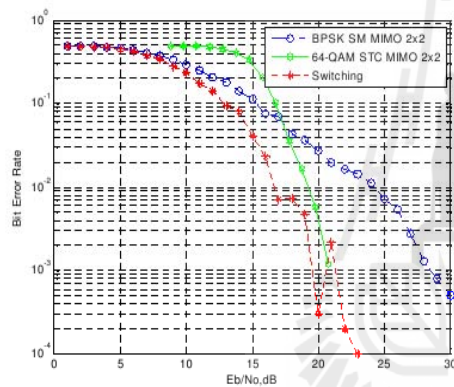


Figure 4. BER performance of scheme B described in Table III.

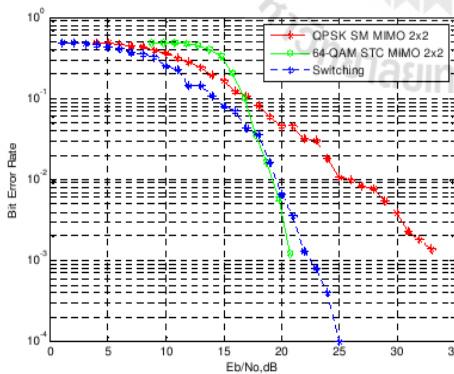


Figure 5. BER performance of scheme C described in Table III.

Figure 3 presents the BER performance of scheme A described in Table III. For criteria of switching between SMX and STC techniques, this paper uses the minimum Euclidean distance to be the condition parameter for choosing SMX or STC. In this figure, both techniques use the different modulation types, BPSK and 16-QAM. As seen in this figure, the best BER performance can be achieved by using the switching method.

Figure 4 presents the BER performance of scheme B described in Table III. The modulations between both techniques are BPSK and 64-QAM. The results still point that the best BER performance is obtained by the proposed switching scheme. For scheme C, presented in Figure 5, the results still show the benefit of using adaptive MIMO switching. However, when the power ration of Eb and noise per Hertz is high, then the BER performance is almost the same as the performance of 64-QAM.

In summary, the scheme A in Table III, provides the best BER performance while the scheme C offers the least BER performance.

IV. CONCLUSION

This paper presents the adaptive MIMO switching to maintain BER efficiency of data transmission among various choices of MIMO schemes in WiMAX system. The results reveal that the proposed system achieves a significant improvement when using adaptive MIMO switching instead of using only either spatial multiplexing or space-time coding.

ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge the financial support from Suranaree University of Technology, Thailand.

REFERENCES

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/WiMAX_MIMO
- [2] WiMAX Forum releases
- [3] L. Hanzo, J. Akhtman, M. Jiang, L. Wang, "MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMAX" University of Southampton, p.43-55.
- [4] Dominik Seethaler, Harold Art, es, and Franz Hlawatsch, " Detection Techniques for MIMO Spatial Multiplexing Systems" *Elektrotechnik und Informationstechnik (e&i)*, vol. 122, no. 3, March 2005, pp. 91–96. Copyright 2005 Springer-Verlag.
- [5] Siavash M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications" *IEEE Journal on Select Areas in Communications*, vol. 16, no. 8, October 1998
- [6] Vahid Tarokh, Member, IEEE, Hamid Jafarkhani, and A. R. Calderbank, Fellow, IEEE, "Space-Time Block Codes from Orthogonal Designs" *IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY*, VOL. 45, NO. 5, JULY 1999.
- [7] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas," *Bell Labs. Technical Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 41–59, 1996.
- [8] R.W. Heath Jr. and A.J. Paulraj, "Switching Between Diversity and Multiplexing in MIMO systems" *IEEE Transactions on Communication*, Vol. 53, No. 6, pp. 962-968
- [9] Prabaagarane.N,Ramakrishnan M,Karthika S,Janani.U,G,Janaki S, "Adaptive MIMO switching for Mobile WiMAX OFDM Systems: Performance Trade off" *WiCOM'08. 4th International Conference on 12-14 Oct.2008*

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มหาวิทยาลัยบูรพา ๒๕๕๔" ๖ - ๗ กรกฎาคม ๒๕๕๔ ณ มหาวิทยาลัยบูรพา

การสลับโหมดไม่โมสำหรับระบบไวแมกเมื่อสายอากาศด้านส่งคงที่

MIMO Mode Switching of WiMAX Systems with fixed Transmit Antenna

ภัทรพร คำชาย , พีระพงษ์ อุฑารสกุล และ มนต์ทิพย์พา อุฑารสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 0-4422-4392

E-mail: m5340590@g.sut.ac.th, {uthansakul, mtp}@sut.ac.th

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการเข้าถึงไร้สายบรอดแบนด์นับว่ามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมากซึ่งได้มีการพัฒนาเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นเรื่องความเร็วในการรับ/ส่งข้อมูลที่สูงขึ้น เรื่องของพื้นที่ให้บริการที่ครอบคลุมมากขึ้น โดยเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจก็คือเทคโนโลยีไวแมกซึ่งอยู่บนมาตรฐานของ IEEE802.16 นั้นมีความสามารถในการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้หลักการของเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งฉาก(Orthogonal Frequency Division Multiplex: OFDM) ที่สามารถแก้ปัญหาการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี นอกจากนี้ยังมีการนำเทคนิคโมโม(Multiple-Input Multiple-Output: MIMO) เข้ามาใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล อย่างไรก็ตามเทคนิคโมโมในมาตรฐานของไวแมกมีหลายโหมด แต่ละโหมดให้สมรรถนะของระบบที่ต่างกันซึ่งการใช้หลายโหมดนี้ก็จะต้องพิจารณาว่าการทำงานที่ใช้เพียงโหมดเดียว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการสลับโหมดไม่โมสำหรับระบบไวแมก เพื่อรักษาประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลให้ดีที่สุด

คำสำคัญ: WiMAX, OFDM, MIMO, STC

Abstract

The Wireless Broadband Access (WBA) technology is recently important and developed for user requirements such as a higher data rate, an increase of coverage area. One of the most interesting technology is WiMAX technology based on IEEE 802.16 standard. WiMAX technology uses the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technique to solve multipath fading and uses Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) technique to increase the efficiency of data transmission. However, there are a lot of MIMO schemes determined by WiMAX standards. But better than using just one mode. This paper proposes the switching scheme of MIMO systems for WiMAX technology in order to maintain the best efficiency of data transmission.

Keyword(s): WiMAX, OFDM, MIMO, STC

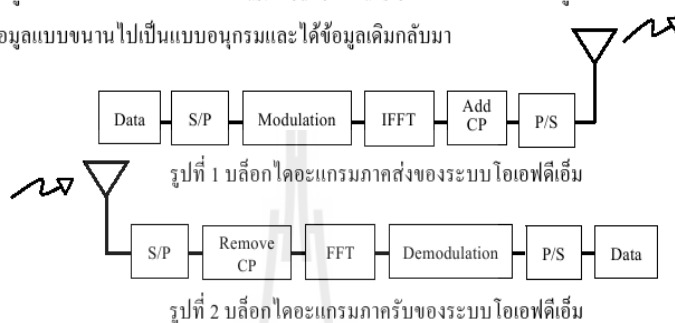
บทนำ

เทคโนโลยีการเข้าถึงสื่อสารไร้สายบรอดแบนด์ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลายที่ใช้สำหรับส่งข้อมูลข่าวสารแบบอนาล็อกหรือดิจิทัลจากภาคส่งไปยังภาครับผ่านช่องสัญญาณสื่อสารแบบไร้สายแต่เนื่องจากคุณลักษณะของช่องสัญญาณไร้สายที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบต่างๆ อย่างเช่นสิ่งแวดล้อมทางกายภาพความเร็วในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ภาครับหรือภาคส่งรวมถึงอุณหภูมิเป็นต้นเป็นผลให้สัญญาณข้อมูลที่ถูกรวบรวมได้แก่ภาครับมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิม ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีและวิธีการต่างๆ ขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวนี้ ในหลายๆงานวิจัยได้นำเอาระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งฉาก (OFDM) ซึ่งเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งมาใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าวได้ และอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่น่าสนใจก็คือ การใช้เทคนิคโมโม (Multiple-Input Multiple-Output: MIMO) ช่วยกันรับส่งสัญญาณวิทยุและผ่านกระบวนการในการจัดการสัญญาณที่ได้รับจนกระทั่งมีสัญญาณที่อยู่ในระดับที่ดี มีคุณภาพ ซึ่งก็มีผลดีในหลายๆด้าน เช่นระดับของสัญญาณที่ดีขึ้น และมีพื้นที่รับสัญญาณที่กว้างขึ้นและความเชื่อถือได้มากขึ้นอีกทั้งยังใช้พลังงานในการรับ/ส่งลดลงด้วย เทคโนโลยีไวแมกนั้นยังรองรับการทำงานของสายอากาศแบบหลายทางเข้าหลายทางออก โดยการใช้งานชุดสายอากาศที่มีมากกว่าหนึ่งตัวซึ่งการเพิ่มจำนวนของสายอากาศนี้จะส่งผลให้ระบบสามารถเพิ่มช่องทางการสื่อสารและเพิ่มทางเลือกในการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ดีที่สุด

เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งฉากสำหรับระบบไวแมกนี้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ประโยชน์จากความถี่เล็กๆซึ่งเรียกว่าคลื่นพาหะย่อย (Sub-carrier) เพื่อให้ได้มาซึ่งการใช้ประโยชน์สูงสุดของการใช้งานช่องสัญญาณ โดยมีการแบ่งความถี่ออกเป็นแถบความถี่ย่อยๆแล้วแยกส่งข้อมูลออกหลายๆช่องรูปที่ 1 เป็นบล็อกไดอะแกรมของภาคส่งโดยมีการแปลงชุดข้อมูลแบบอนุกรมให้เป็นแบบขนานและนำข้อมูลที่ได้ไปทำการมอดูเลตจากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้ไปทำการแปลง IFFT หรือ Inverse Fast Fourier Transform ซึ่งเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์จนกระทั่งได้แชนเนลสัญญาณที่มีความถี่ต่างๆที่ Orthogonal กันออกมาเนื่องจากสภาพแวดล้อมรอบๆภาคส่งและภาครับเช่นสิ่งกีดขวาง, ผนัง, กำแพง หรือตึกกรามบ้านช่องสิ่งเหล่านี้ก่อให้เกิดการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี (Multipath propagation) การแทรกสอดระหว่างสัญญาณเป็นอีกปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลกระทบดังกล่าวจึงมีการเสริมสร้างไซคลิกเข้าไปที่เฟรมข้อมูลและแปลงชุดข้อมูลจากแบบขนานไปเป็นแบบอนุกรมก่อนทำการส่งผ่านสายอากาศไปยังภาครับดังรูปที่ 1 เมื่อสัญญาณผ่านเข้ามาที่ภาครับแล้วจะมีการแปลงชุดข้อมูลจากแบบอนุกรมไปเป็นแบบขนานและทำการถอดไซคลิกออกจากรับนั้นจึงนำ

การประชุมวิชาการระดับชาติ “มหาวิทยาลัยบูรพา ๒๕๕๔” ๖ - ๗ กรกฎาคม ๒๕๕๔ ณ มหาวิทยาลัยบูรพา

ข้อมูลไปทำการแปลง FFT หรือ Fast Fourier Transform และทำการคิมอดูเลตพร้อมทั้งแปลงจากชุดข้อมูลแบบขนานไปเป็นแบบอนุกรมและได้ข้อมูลเดิมกลับมา



เทคนิคการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา (space-time coding: STC) นี้เป็นการทำไคเวอร์ซิติทางด้านส่งซึ่งเป็นการรวมเอาการออกเบรทรหัสช่องสัญญาณและการใช้สายอากาศหลายต้นเข้าด้วยกัน โดยจะใช้สายอากาศส่งหลายๆต้นและสายอากาศรับต้นเดียวหรือหลายๆต้นร่วมกับการใช้ไคเวอร์ซิติทางเวลาโดยอาศัยหลักการที่ว่าถ้าหากตั้งสายอากาศส่งและรับในปริภูมิให้มีความเป็นอิสระเชิงปริภูมิแล้วสัญญาณจากสายอากาศส่งแต่ละตัวที่ส่งไปยังสายอากาศรับแต่ละตัวจะต้องได้รับผลกระทบจากเฟดลิงที่แตกต่างกันเพื่อให้ข่าวสารที่ถูกส่งไปจนเวลาหนึ่งในแต่ละเส้นทางไม่ถูกรบกวนจนทำให้สูญเสียไปพร้อมกันหมดทุกเส้นทางดังนั้นการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาจึงมีประสิทธิภาพในการช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการจางหายและทำให้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือและมีความทนทานต่อการผิดพลาดมากขึ้นเมื่อช่องสัญญาณที่ส่งผ่านเป็นแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ซึ่งวิธีการส่งแบบนี้มีข้อดีคือมีรูปแบบการส่งสัญญาณที่ง่ายและมีความซับซ้อนต่ำ

ด้านงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องนั้น ในปี 1998 S.M. Alamouti ได้นำเสนอเทคนิคการส่งผ่านสัญญาณ โดยการใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น ในการส่งสัญญาณ 1 ชุดข้อมูล โดยที่ด้านเครื่องรับจะใช้สายอากาศกี่เสาก็ได้ ผลของการนำเสนอวิธีนี้ ทำให้ได้ค่าไคเวอร์ซิติสูงสุดในระบบคือค่าไคเวอร์ซิติสูงสุดจากทางด้านส่ง และจากความตั้งฉากกันของรหัสที่ใช้ และมีรูปแบบเรียบง่ายและให้สมรรถนะที่ดีขึ้นกว่าระบบที่มีการใช้แค่สายอากาศส่งเพียงต้นเดียว

ในปี 2005 R.W. Heath Jr. and A.J. Paulraj ได้นำเสนอเทคนิคที่สามารถใช้ในการสลบโหมดของสายอากาศระหว่างโหมด 2 โหมดได้ นั้นแสดงว่าสายอากาศสามารถเกิดการสลบโหมดกันได้เพื่อคงประสิทธิภาพการส่งข้อมูลให้ดีที่สุด

การประชุมวิชาการระดับชาติ “มหาวิทยาลัยบูรพา ๒๕๕๔” ๖ - ๗ กรกฎาคม ๒๕๕๔ ณ มหาวิทยาลัยบูรพา

จากปัญหาและความเป็นมาที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดว่า ถ้าหากนำเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งฉาก (OFDM) ร่วมกับเทคนิคการเข้ารหัสของสายอากาศเชิงปริภูมิ - เวลา (space-time coding: STC) เนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนสายอากาศทั้งด้านส่งและด้านรับได้ ส่วนเทคนิคการเข้ารหัสแบบ Alamuti นั้นจะใช้ได้กับสายอากาศส่งเพียงแค่ 2 คันเท่านั้น ดังนั้นเทคนิคการเข้ารหัสของสายอากาศเชิงปริภูมิ - เวลา (space-time coding: STC) จึงเหมาะสมกว่า เพื่อจะทำให้เกิดทางเลือกใหม่ ๆ สำหรับการปรับเปลี่ยนโหมดของสายอากาศในระบบไวแมก รวมทั้งยังสามารถใช้งานได้กับสายอากาศที่มีจำนวนของสายอากาศหลายคันได้ ทั้งนี้เพื่อเป็นทางเลือกในการเลือกใช้โหมดของสายอากาศและจำนวนของสายอากาศที่แตกต่างกันตามสถานการณ์ที่กำลังเผชิญอยู่ได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการแก้ปัญหาการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถีโดยใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งฉาก (OFDM) ในระบบไวแมก
2. เพื่อศึกษารูปแบบของการเข้ารหัสของสายอากาศเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานและเป็นที่ยอมรับของระบบไวแมก
3. เพื่อศึกษารูปแบบของการสลับโหมดของสายอากาศในระบบไวแมกได้

วิธีการวิจัย

ศึกษาวิธีการรับ/ส่งข้อมูลของเทคโนโลยีไวแมกเพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการรับ/ส่งข้อมูลของเทคโนโลยีไวแมกว่ามีขั้นตอนการทำงานอย่างไร จากนั้นทำการศึกษาถึงจำนวนของสายอากาศทั้งทางด้านรับและด้านส่งของเทคโนโลยีไวแมก เช่น สามารถรองรับสายอากาศมากที่สุดจำนวนเท่าไร และน้อยที่สุดที่สามารถทำงานได้นั้นเป็นจำนวนสายอากาศเท่าไร รวมถึงศึกษาเทคนิคที่ใช้ในการเข้ารหัสของสายอากาศทั้งเทคนิคการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา (space-time coding: STC) และการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti เพื่อเลือกรูปแบบของเทคนิคการเข้ารหัสของสายอากาศที่เหมาะสมกับงานวิจัย ทั้งนี้ในการส่งข้อมูลแบบไร้สายนั้นเป็นไปได้ที่จะไม่เกิดการรบกวนสัญญาณที่ถูกส่งออกไปในอากาศ ซึ่งเป็นผลให้สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับนั้นผิดเพี้ยนไปจากเดิม จึงได้

๕

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มหาวิทยาลัยบูรพา ๒๕๕๔" ๖ - ๗ กรกฎาคม ๒๕๕๔ ณ มหาวิทยาลัยบูรพา

ทำการศึกษาถึงเทคนิคที่สามารถช่วยแก้ปัญหาการจางหายของสัญญาณ นั่นก็คือเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งจาก(OFDM) สำหรับระบบไวแมกเพื่อที่จะช่วยแก้ปัญหาในจุดนี้ด้วย

สุดท้ายเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองระบบการรับ/ส่งข้อมูลของระบบไวแมก โดยใช้จำนวนสายอากาศทางด้านส่งนั้นจะคงที่ที่สายอากาศ 1,2 และ 4 ต้น ตามลำดับ ส่วนสายอากาศภาครับนั้นจะทำการปรับเปลี่ยนไปจากสายอากาศ 1,2,3 และ 4 ต้น ตามลำดับ โดยการจำลองผลนี้จะได้กราฟที่แสดงถึงค่าของจำนวนบิตที่ผิดพลาด (Bit error rate) กับค่า Eb/No(dB) และนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อดูว่ากราฟที่ได้นี้มีสายอากาศโหมคไหนบ้างที่สามารถสลับโหมคกันได้ คงจะได้แสดงในผลการวิจัยต่อไป

ผลการวิจัย

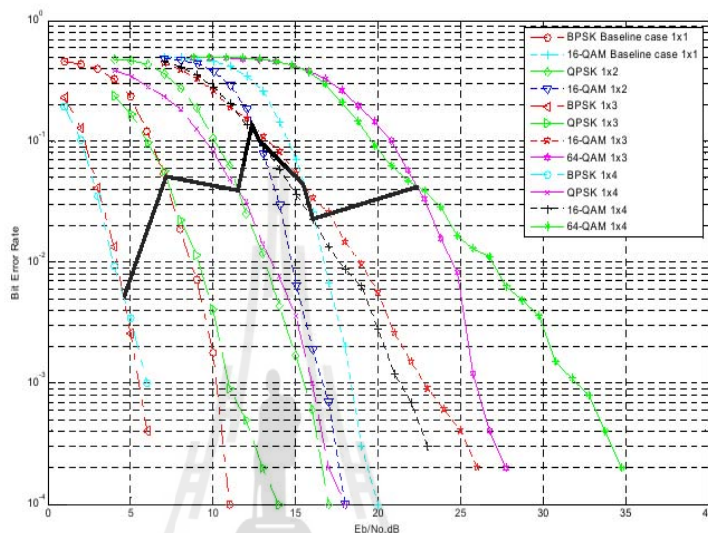
ในการจำลองผลนั้นจะแบ่งผลการวิจัยออกเป็น 3 กรณีคือ กรณีที่จำนวนของสายอากาศด้านส่งคงที่ที่ 1 ต้น, กรณีที่จำนวนของสายอากาศด้านส่งคงที่ที่ 2 ต้นและ กรณีที่จำนวนของสายอากาศด้านส่งคงที่ที่ 4 ต้น ส่วนสายอากาศทางภาครับนั้นจะทำการปรับเปลี่ยนจาก 1,2,3 และ 4 ต้น ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 นี้เป็นจำนวนของสายอากาศส่งและสายอากาศรับพร้อมทั้งรูปแบบของการเข้ารหัส

Tx	Rx			
	1	2	3	4
4	STC (Matrix A)	STC+2xMRC (Matrix A)	STC+3xMRC (Matrix A)	4xSMX (Matrix C)
2	STC (Matrix A)	STC+2xMRC (Matrix A)	STC+3xMRC (Matrix A)	STC+4xMRC (Matrix A)
1	Baseline Case	MRC	MRC	MRC

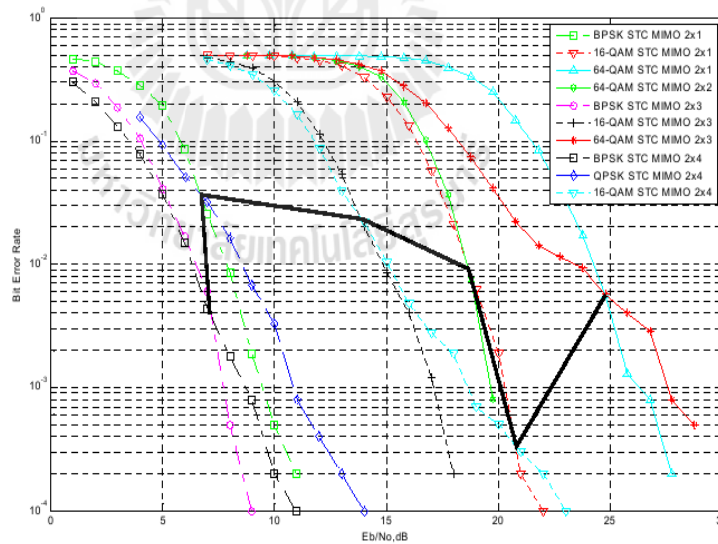
ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบจำนวนของสายอากาศส่งและสายอากาศรับและเทคนิคที่ใช้ในการเข้ารหัส

บ

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มหาวิทยาลัยบูรพา ๒๕๕๔" บ - ๗ กรกฎาคม ๒๕๕๔ ณ มหาวิทยาลัยบูรพา



รูปที่ 3 สายอากาศภาคส่งคงที่ ที่ 1 ต้น สายอากาศภาครับปรับเปลี่ยนจาก 1,2,3 และ 4 ต้นตามลำดับ



รูปที่ 4 สายอากาศภาคส่งคงที่ ที่ 2 ต้น สายอากาศภาครับปรับเปลี่ยนจาก 1,2,3 และ 4 ต้นตามลำดับ

๗

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มหาวิทยาลัยบูรพา ๒๕๕๔" ๖ - ๗ กรกฎาคม ๒๕๕๔ ณ มหาวิทยาลัยบูรพา

Eb/No (dB)	MIMO Mode Switching	Modulation Mode
4.5	1x3	BPSK
	1x4	QPSK
7	1x1	BPSK
	1x3	QPSK
11.5	1x2	QPSK
	1x4	QPSK
12	1x2	16-QAM
	1x3	16-QAM
13	1x2	16-QAM
	1x4	16-QAM
15.5	1x1	16-QAM
	1x3	16-QAM
16	1x1	16-QAM
	1x4	16-QAM

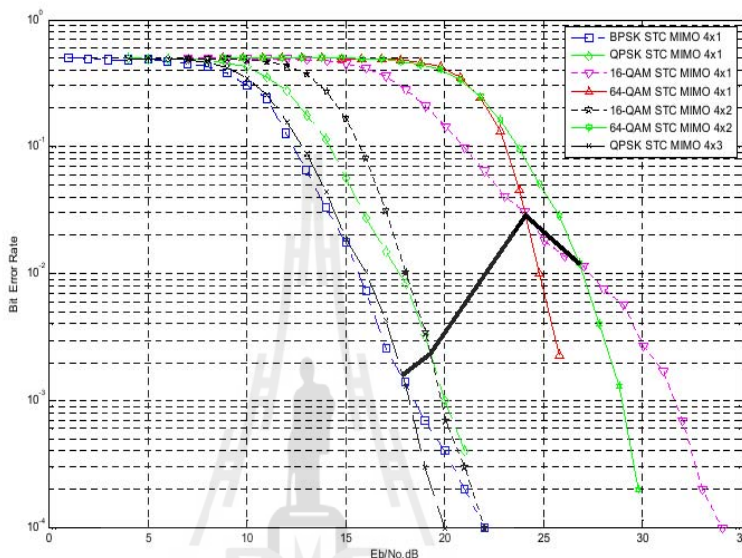
Eb/No (dB)	MIMO Mode Switching	Modulation Mode
7	2x3	BPSK
	2x4	BPSK
6.7	2x1	BPSK
	2x4	QPSK
14	2x3	16-QAM
	2x4	16-QAM
18.7	2x1	16-QAM
	2x2	64-QAM
21	2x1	16-QAM
	2x4	16-QAM
25	2x1	64-QAM
	2x3	64-QAM

ตารางที่ 3 แสดงค่ารูปแบบสำหรับการสลับโหมด

ตารางที่ 2 แสดงค่ารูปแบบสำหรับการสลับโหมด
ของรูปที่ 3

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มหาวิทยาลัยบูรพา ๒๕๕๔" ๖ - ๗ กรกฎาคม ๒๕๕๔ ณ มหาวิทยาลัยบูรพา

๘



รูปที่ 5 สายอากาศภาคส่งคงที่ที่ 4 ดัน สายอากาศภาครับปรับเปลี่ยนจาก 1,2,3 และ 4 ดันตามลำดับ

Eb/No (dB)	MIMO Mode Switching	Modulation Mode
18	4x1	BPSK
	4x3	QPSK
19	4x1	QPSK
	4x2	16-QAM
24	4x1	16-QAM
	4x1	64-QAM
27	4x1	16-QAM
	4x2	64-QAM

ตารางที่ 4 แสดงค่ารูปแบบสำหรับการสลับโหมดของรูปที่ 5

อภิปรายผล

จากการจำลองผลโดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีดังแสดงในผลการวิจัยนั้นจะเห็นได้ว่ากราฟในการจำลองผลในแต่ละโหมดนั้นเกิดการตัดกันของเส้นกราฟเกิดขึ้นจำนวนมากโดยจากรูปที่ 2 นั้นเป็นกราฟแสดงผลเมื่อคงที่สายอากาศส่งที่ 1 ดัน จะเห็นได้ว่ากราฟตัดกันหลายโหมดเมื่อเทียบกับ รูปที่ 3 และ รูปที่ 4 ซึ่งเป็นการจำลองผลเมื่อคงที่สายอากาศส่ง ที่ 2 และ 4 ดันตามลำดับ นั้นแสดงว่าการที่เราคงค่าสายอากาศส่งที่ 1 ดันนั้น สามารถที่จะเกิดการสลับโหมดของสายอากาศในระบบไวแมกได้หลายรูปแบบ ดังแสดงกราฟเส้นทึบสีดำที่แสดงในภาพ เป็นการสลับโหมดของสายอากาศเมื่อเราทำการปรับเปลี่ยนค่าของ E_b/N_0 ที่ค่าต่างๆกัน แสดงในตารางที่ 2 จะแสดงถึงจำนวนโหมดของสายอากาศที่สามารถสลับโหมดกันได้และรูปแบบของการมอดูเลชั่นที่ใช้ ส่วนรูปที่ 3 และ รูปที่ 4 นั้นจะเกิดการสลับโหมดของสายอากาศได้น้อยกว่ารูปแบบที่คงที่สายอากาศส่งที่ 1 ดัน แต่ก็ยังสามารถที่จะสลับโหมดเพื่อเป็นทางเลือกอื่น ๆ ในการเลือกใช้โหมดของสายอากาศเพื่อการนำไปใช้งานในรูปแบบที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 3,4 แสดงถึงรูปแบบของสายอากาศที่สามารถสลับโหมดของสายอากาศในแต่ละรูปแบบได้ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าบางรูปแบบสายอากาศโหมดเดียวกันเกิดการตัดกันเองอาจเป็นเพราะสัญญาณที่ถอดรหัสได้นั้นเกิดการผิดเพี้ยนไปบ้างแต่เส้นกราฟที่ได้ก็ยังมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันกับกราฟรูปแบบอื่นๆ จากกราฟรูปที่ 2,3 และ 4 นั้นจะแสดงให้เห็นว่ารูปแบบของการสลับโหมดของสายอากาศที่ดีที่สุดในแต่ละรูปแบบนั้นจะเป็นโหมดที่ทำให้ค่าของบิตผิดพลาด (Bit error rate: BER) มีค่าต่ำที่สุด ดังในกราฟรูปที่ 2 นั้นจะเห็นได้ว่าเส้นกราฟที่สายอากาศส่ง 1 ดัน สายอากาศรับ 3 ดันด้วยรูปแบบของการมอดูเลชั่นแบบ BPSK และ เส้นกราฟที่สายอากาศส่ง 1 ดัน สายอากาศรับ 4 ดัน ด้วยรูปแบบของการมอดูเลชั่นแบบ BPSK เป็นการสลับ โหมดของสายอากาศที่ดีที่สุดในรูปแบบนั้น และกราฟรูปที่ 3 และ 4 ก็สามารถดูการสลับโหมดที่ดีที่สุดได้ในลักษณะเดียวกัน

ข้อเสนอแนะ

1. การสลับ โหมดของสายอากาศในระบบไวแมกนั้นสามารถกำหนดค่าบิตผิดพลาด (Bit error rate: BER) ที่เป็นค่าเป้าหมายไว้ แล้วทำการสลับ โหมดเมื่อค่า E_b/N_0 มีค่าเปลี่ยนแปลงไป
2. สำหรับสายอากาศด้านส่งนั้นอาจจะทำการปรับเปลี่ยนไปตามความเหมาะสมหรือตามรูปแบบที่ผู้วิจัยต้องการว่าจะดูผลการจำลองในลักษณะไหน

การประชุมวิชาการระดับชาติ “มหาวิทยาลัยบูรพา ๒๕๕๔” ๖ – ๗ กรกฎาคม ๒๕๕๔ ณ มหาวิทยาลัยบูรพา

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

- Siavash M. Alamouti,(1998).“A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications”.IEEEJOURNAL ON SELECT AREAS IN COMMUNICATIONS,VOL.16,NO. 8
- VahidTarokh, Member, IEEE, Hamid Jafarkhani, and A. R. Calderbank, Fellow, IEEE, (1999). “Space – Time Block Codes from Orthogonal Designs”.IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY, VOL.45, NO. 5
- R.W. Heath Jr. and A.J. Paulraj, (2005).“Switching Between Diversity and Multiplexing in MIMO Systems”.IEEE Transactions OnCommunications, Vol. 53, No. 6, pp. 962-968
- Luis Miguel Cort'es-Pe'na, (2009). “MIMO Space-Time Block Coding (STBC): Simulations and Results”.CORTES-PENA; ECE6604: PERSONAL & MOBILE COMMUNICATIONS; PRESENTED TO DR.GORDON STU” BER
- Ruifeng Wang, (2009). “MIMO: from Theory to Reality”.CodioLink White Paper,

ประวัติผู้เขียน

นางสาวภัทรพร คำชาย เกิดเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิมายวิทยา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) เกียรตินิยมอันดับสอง จากมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2552 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อ ในระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม และได้รับทุนสนับสนุนสำหรับ การศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา ณ สถาบันการศึกษาเดิม

ขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ระดับชาติ 1 ฉบับ ในงาน Burapha University National Conference 2011, July 6-7 ในหัวข้อ **MIMO Mode Switching of WiMAX Systems with fixed Transmit Antenna.** และผลงานทาง วิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระดับนานาชาติ 1 ฉบับในงาน Computing, Communications and Applications Conference (ComComAp 2012), Hong Kong, China. January 11-13. 392-395. ใน หัวข้อ **Adaptive MIMO Switching of 2x2 MIMO System for WiMAX Technology.** โดยมี รายละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ก.