SUT7-709-55-12-15

รายงานการวิจัย

การวิเคราะห์พื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ที่ใช้การสลับโหมดไมโม

Coverage analysis of WiMAX system employing MIMO mode switching

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2556

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณผู้วิจัยในที่ปรึกษาของผู้วิจัยที่ช่วยเก็บผลการทดลองได้แก่ นางสาวภัทราภร ค้าขายและขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล สำหรับคำแนะนำในเชิงวิชาการที่เป็นประโยชน์

ผู้วิจัย

พฤษภาคม 2556

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการเข้าถึงสื่อสารไร้สายบรอดแบนด์ได้รับความนิยมในการใช้งานและมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก การสื่อสารที่ให้ทั้งความสะดวก รวดเร็ว และมีความถูกต้องมากขึ้นเท่าไหร่ ก็ยิ่งจะตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานมากขึ้นเท่านั้น รวมถึงการพัฒนาระบบการให้บริการที่ดี ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของประสิทธิภาพในการรับและส่งข้อมูลที่สูงขึ้น มีคุณภาพความน่าเชื่อถือในการให้บริการที่ดี อีกทั้งยังมีพื้นที่ในการให้บริการที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น ด้วยสมรรถนะของเทคโนโลยีไวแมกซ์ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจและสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้บริการเหล่านี้ได้ งานวิจัยนี้จึงนำเทคโนโลยีนี้มาพัฒนาขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับและส่งข้อมูลให้มีประสิทธิภาพตลอดการใช้งาน โดยจะนำเทคนิคไมโม (Multiple Input Multiple Output : MIMO) แบบวงเปิด (Open loop MIMO) เข้ามาใช้งานในระบบ ซึ่งเทคนิคไมโมแบบวงเปิดนี้ก็จะมีอยู่สองประเภทหลักๆ ก็คือ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง (Spatial Multiplexing : SM) เป็นเทคนิคที่สามารถเพิ่มความเร็วในการรับและส่งข้อมูลได้หลายเท่า และ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา (Space Time Coding : STC) เทคนิคนี้จะมีประสิทธิภาพในการช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการเฟด ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าทั้งสองเทคนิคนี้มีข้อดีข้อเสียที่ต่างกัน ทำให้เกิดเทคนิคใหม่ ซึ่งจะรวมเอาข้อดีของทั้งสองเทคนิคนี้ เข้ามาไว้ด้วยกัน ที่เรียกว่า การสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว (Adaptive MIMO mode Switching : AMS) นอกจากนี้งานวิจัยนำเสนอถึงสมรรถนะของพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์เมื่อนำเทคนิคไมโมมาใช้งานด้วย รวมถึงการเสนอแนวคิดของการนำเทคนิคไมโมแบบปรับตัวมาใช้ในการออกแบบระบบไวแมกซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับและส่งข้อมูลที่ดีขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Abstract

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 mode 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.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญรูปภาพ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฌ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 2
1.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย 2
1.4 ผลสำเร็จของโครงการ 3
1.5 การสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย 3
บทที่ 2 หลักการพื้นฐานของระบบไวแมกซ์ 6
2.1 กล่าวนำ 6
2.2 หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย 6
2.3 มาตรฐานไวแมกซ์ 7
2.3.1 แอร์อินเตอร์เฟสของมาตรฐานไวแมกซ์ 8
2.3.2 โครงสร้างของระบบไวแมกซ์ 11
2.4 เทคนิคไมโม 30
2.4.1 หลักการทำงานของระบบไมโม 32
2.5 เทคนิคการส่งสัญญาณด้วยระบบไมโม 34
2.5.1 ระบบไมโมแบบวงเปิด 34
2.6 แบบจำลองช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบไวแมกซ์ 38
2.6.1 แบบจำลอง Path Loss Modified Stanford University Interim (SUI) 38
2.6.2 RMS delay spread 39

2.6.3 Fade distribution หรือ K-Factor 40
2.6.4 Antenna Gain Reduction Factor (GRF) 40
2.7 กล่าวท้ายบท 42
บทที่ 3 เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวในระบบไวแมกซ์ 44
3.1 กล่าวนำ 44
3.2 เทคนิคไมโมในระบบไวแมกซ์ 44
3.3 โครงสร้างของระบบไวแมกซ์ที่ใช้เทคนิคไมโม 46
3.3.1 เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา 47
3.3.2 เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง 51
3.4 เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว (Adaptive MIMO mode Switching : AMS) 54
3.4.1 การคำนวณค่าระยะยูคลิเดียนต่ำสุด ของเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงปริภูมิ 55
3.4.2 การคำนวณค่าระยะยูคลิเดียนต่ำสุด ของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา 55
3.5 การทำนายพื้นที่ครอบคลุม 56
3.5.1 ขั้นตอนการทำนายพื้นที่ครอบคลุมเมื่อกำหนดระดับค่าอัตราความผิดพลาดบล็อก 57
3.5.2 ขั้นตอนการทำนายพื้นที่ครอบคลุมเมื่อกำหนดระยะทาง 58
3.6 กล่าวท้ายบท 60
บทที่ 4 ผลการทดสอบและบทวิเคราะห์ 61
4.1 กล่าวนำ 61
4.2 การจำลองแบบระบบไวแมกซ์ 61
4.3 การจำลองแบบระบบไวแมกซ์ที่ใช้เทคนิคไมโม 62
4.3.1 การจำลองแบบโดยใช้ระบบไมโมแบบวงเปิด 63
4.3.2 การจำลองแบบโดยใช้เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว 69
4.4 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมเมื่อใช้เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว 72
4.5 การจำลองแบบเพื่อทำนายพื้นที่ครอบคลุม 74
4.5.1 เมื่อกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมและค่าระดับความผิดพลาดบล็อก 74
4.5.2 เมื่อกำหนดค่าระยะทางที่ต้องการ 77
4.6 กล่าวท้ายบท 79
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ 81
5.1 สรุป 81

5.2 ข้อเสนอแนะ 83
บรรณานุกรม 84
ภาคผนวก ก การเผยแพร่ผลงานวิจัย 86
ภาคผนวก ข บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ 87
ประวัติผู้วิจัย 92

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย 7
รูปที่ 2.2 แผนภาพภาคส่งระบบไวแมกซ์ 11
รูปที่ 2.3 แผนภาพของการเข้ารหัส 12
รูปที่ 2.4 การเข้ารหัส Convolution K=3 14
รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมแสดงสถานะของการเข้ารหัส 16
รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมต้นไม้ของการเข้ารหัส 17
รูปที่ 2.7 ไดอะแกรม Trellis ของการเข้ารหัส 18
รูปที่ 2.8 การใช้งานไดอะแกรม Trellis 18
รูปที่ 2.9 Constellation Maps ของ BPSK และ QPSK 20
รูปที่ 2.10 Constellation Maps ของ 16-QAM และ 64-QAM 20
รูปที่ 2.11 การใส่ cyclic prefix ในสัญลักษณ์ของ OFDM 23
รูปที่ 2.12แผนภาพแสดงภาครับของระบบไวแมกซ์ 24
รูปที่ 2.13 การถอดรหัสแบบ Viterbi (1) 28
รูปที่ 2.14 การถอดรหัสแบบ Viterbi (2) 28
รูปที่ 2.15 การถอดรหัสแบบ Viterbi (3) 29
รูปที่ 2.16 การถอดรหัสแบบ Viterbi (4) 29
รูปที่ 2.17 การรับและส่งข้อมูลแบบสายอากาศต้นเดียว และสายอากาศหลายต้น 30
รูปที่ 2.18 ระบบไมโมที่ประกอบไปด้วยสายอากาศส่ง M ต้น และ สายอากาศรับ N ต้น 32
รูปที่ 2.19 การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา แบบ Alamouti 36
รูปที่ 2.20 การทำงานของการเข้ารหัสเทคนิค SM 37
รูปที่ 2.21 โครงสร้างแบบจำลองของช่องสัญญาณ SUI 42
รูปที่ 3.1 โครงสร้างภาคส่งของระบบไวแมกซ์ที่ใช้เทคนิคไมโม 47
รูปที่ 3.2 โครงสร้างภาครับของระบบไวแมกซ์ที่ใช้เทคนิคไมโม 47
รูปที่ 3.3 ภาคส่งและภาครับของเทคนิค STC ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 2 ต้น 48
รูปที่ 3.4 ภาคส่งและภาครับของเทคนิค STC ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น 50

รูปที่ 3.5 ภาคส่งและภาครับของเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 2 ต้น 52
รูปที่ 3.6 ภาคส่งและภาครับของเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น 53
รูปที่ 3.7 โครงสร้างการทำงานของเทคนิค AMS 55
รูปที่ 3.8 พื้นที่ครอบคลุมทั้งหมดของเซลล์ 57
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการทำนายพื้นที่ครอบคลุมเมื่อกำหนดค่าระดับความผิดพลาดบล็อก 59
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการทำนายพื้นที่ครอบคลุมเมื่อกำหนดค่าระยะทาง 59
รูปที่ 4.1 BER vs Eb/N0 ของเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับที่ 2 ต้น 64
รูปที่ 4.2 BER vs Eb/N0 ของเทคนิค STC ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 2 ต้น 65
รูปที่ 4.3 BER vs Eb/N0 ของเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น 65
รูปที่ 4.4 BER vs Eb/N0 ของเทคนิค STC ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น 66
รูปที่ 4.5 BER vs Eb/N0 ของเทคนิค STC และเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้นและสายอากาศรับ 2 ต้น 66
รูปที่ 4.6 BER vs Eb/N0 ของเทคนิค STC และเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้นและสายอากาศรับ 3 ต้น 67
รูปที่ 4.7 รูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้ระหว่างเทคนิค STC และ เทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 2 ต้น 67
รูปที่ 4.8 รูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้ระหว่างเทคนิค STC และ เทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น 68
รูปที่ 4.9 รูปแบบ A ร่วมกับเทคนิค AMS 70
รูปที่ 4.10 รูปแบบ B ร่วมกับเทคนิค AMS 71
รูปที่ 4.11 รูปแบบ C ร่วมกับเทคนิค AMS 71
รูปที่ 4.12 รูปแบบ D ร่วมกับเทคนิค AMS 71
รูปที่ 4.13 การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค STC เทคนิค SM และเทคนิค AMS ของรูปแบบ A 72
รูปที่ 4.14 การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค STC เทคนิค SM และเทคนิค AMS ของรูปแบบ B 73
รูปที่ 4.15 การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค STC เทคนิค SM และเทคนิค AMS ของรูปแบบ C 73
รูปที่ 4.16 การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค STC เทคนิค SM และเทคนิค AMS ของรูปแบบ D 74
รูปที่ 4.17 การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค AMS ที่ค่า SNR ต่างๆ กัน 79

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่าของเวคเตอร์พังเจอร์สำหรับอัตราเร็วที่ต่างกันของการเข้ารหัสคอนโวลูชั่น 19
ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ *a*, *b* และ *c* สำหรับช่องสัญญาณ SUI 39
ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI 41
ตารางที่ 2.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของช่องสัญญาณ SUI-3 43
ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบจำนวนของสายอากาศภาคส่งและอัตราเร็วในการส่งข้อมูล 45
ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบจำนวนของสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับกับเทคนิคที่ใช้ในการส่งข้อมูล 45
ตารางที่ 3.3 รูปแบบเมตริกซ์ที่ใช้ในการเข้ารหัสของเทคนิคต่าง ๆ 46
ตารางที่ 4.1 จำนวนของบิตข้อมูลในแต่ละรูปแบบของการมอดูเลชั่น 62
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลองของระบบไวแมกซ์ 62
ตารางที่ 4.3 รูปแบบของเท่คนิคไมโมและรูปแบบของการมอดูเลชั่นที่สามารถสลับโหมดได้ 68

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การเข้าถึงแบนกว้างแบบไร้สาย (Broadband Wireless Access) ที่กำลังได้รับความสนใจทั่วโลกคือระบบไวแมกซ์ (WiMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access) ซึ่งในประเทศสหรัฐอเมริกาได้เปิดให้บริการลูกค้าระบบไวแมกซ์อย่างเต็มรูปแบบ สำหรับประเทศไทยยังอยู่ในขั้นตอนของการออกใบอนุญาต เพื่อรองรับการให้บริการในอนาคตอันใกล้ อย่างไรก็ตามระบบไวแมกซ์ที่ให้บริการอยู่นี้ยังทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพตามกรอบมาตรฐานที่กำหนดไว้ เพราะยังไม่ได้ใช้เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพของสัญญาณด้วยไมโม (MIMO : Multiple Input Multiple Output) ดังนั้นถ้าความนิยมของผู้ใช้บริการเพิ่มมากขึ้นการนำเทคนิคไมโมมาใช้จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับระบบไวแมกซ์มาก โครงการวิจัยนี้จึงสนใจการใช้เทคนิคไมโมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสัญญาณในระบบไวแมกซ์ โดยสนใจการใช้วิธีการสลับโหมดไมโม ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพของไมโมกับระบบไวแมกซ์ได้เป็นอย่างดี และจุดประสงค์ของโครงการนี้คือต้องการวิเคราะห์พื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ที่ใช้การสลับโหมดไมโม ทั้งนี้เพราะการวิเคราะห์พื้นที่ครอบคลุมระบบไวแมกซ์ที่ไม่ใช้ไมโมนั้นจะคำนึงถึงช่องสัญญาณที่กำหนดด้วยแบบจำลองที่คงตัวทำให้รูปแบบของพื้นที่ครอบคลุมมีค่ากำหนดได้ง่าย แต่ถ้านำเทคนิคไมโมเข้ามาร่วมด้วยช่องสัญญาณจะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของสายอากาศที่ใช้ทั้งภาคส่งและภาครับ ทำให้ปัญหาในการกำหนดพื้นที่ซับซ้อนขึ้น นอกจากนี้เทคนิคไมโมยังมีการเข้ารหัสทั้งเชิงตำแหน่งและเวลาทำให้คุณภาพสัญญาณเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วย ด้วยเหตุนี้ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ครอบคลุมและคุณภาพสัญญาณที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้เทคนิคไมโมจึงเป็นเรื่องที่ต้องทำวิจัยเพื่อประโยชน์ในการออกแบบ ติดตั้งสถานีฐานไวแมกซ์ และยังเป็นการวิเคราะห์เพื่อปรับให้ใช้ทรัพยากรต่างๆ เช่น กำลังส่งสัญญาณ จำนวนช่องความถี่ ได้อย่างเหมาะสมอีกด้วย ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์พื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์จะพอมีงานวิจัยอื่นๆ เสนออยู่บ้างแต่ยังไม่มีงานวิจัยใดให้ความสำคัญกับการประยุกต์ใช้เทคนิคไมโมร่วมด้วย ทั้งนี้ผู้วิจัยเชื่อมั่นว่าเทคนิคไมโมจะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบต่างๆ ในอนาคตอย่างแน่นอน

จากที่คณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กทช.) มีมติเดือนมิถุนายน 2553 สนับสนุนและให้ความสำคัญกับมาตรฐานการเข้าถึงแบนกว้างแบบไร้สาย โดยกำลังพิจารณากรอบการให้ใบอนุญาตสำหรับระบบไวแมกซ์ ภายในปี 2553 นี้ ทำให้ประเทศไทยต้องเตรียมรับมือกับเทคโนโลยีไวแมกซ์มากขึ้น

ทั้งนี้ระบบไวแมกซ์สามารถใช้งานเป็นแกนเครือข่ายหลักที่ให้บริการไร้สายด้วยอัตราการส่งข้อมูลความเร็วสูง ซึ่งอยู่ในแผนงานหลักของรัฐบาลในการพัฒนาเครือข่ายสารสนเทศและการสื่อสาร ด้วยความสำคัญนี้ทำให้งานวิจัยที่เสนอสอดคล้องกับนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ (พ.ศ. 2555-2559) ยุทธศาสตร์การวิจัยที่ 2 การสร้างศักยภาพและความสามารถเพื่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจ กลยุทธ์การวิจัยที่ 7 เพิ่มสมรรถนะและขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร แผนงานวิจัยที่ 1 การวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มสมรรถนะและพัฒนาศักยภาพขีดความสามารถทางเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร นอกจากนี้ยังตรงตามนโยบายเร่งด่วนที่จะเริ่มดำเนินการในปีแรก เรื่อง 1.1 การสร้างความเชื่อมั่นและกระตุ้นเศรษฐกิจในภาพรวมเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นแก่ภาคประชาชนและเอกชนในการลงทุนและการบริโภค หัวข้อย่อย 1.1.4 เร่งสร้างความเชื่อมั่นของประเทศไทยในสายตาของชาวโลก และตรงตามนโยบายระยะการบริหารราชการ 3 ปี ของรัฐบาล เรื่อง 2.3 นโยบายเศรษฐกิจ ในหัวข้อ 2.3.5 นโยบายเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร

สำหรับปัญหาที่งานวิจัยนี้สนใจคือการวิเคราะห์พื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ เพื่อกำหนดคุณภาพของสัญญาณ โดยพิจารณาประยุกต์ใช้เทคนิคเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารข้อมูลที่เรียกว่าการสลับโหมดไมโม ซึ่งถือเป็นแนวทางใหม่ในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบไวแมกซ์ ซึ่งจะเป็นแกนหลักของการเข้าถึงแบนกว้างไร้สายในอนนาคต ทำให้นำไปสู่การสร้างฐานรากของอุตสาหกรรมด้านเทคโนโลยีสื่อสารอื่นๆ ของประเทศ จึงสอดคล้องกับกลุ่มเรื่องที่ควรวิจัยเร่งด่วนตามนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ (พ.ศ. 2555-2559) หัวข้อ 9. เทคโนโลยีใหม่และเทคโนโลยีที่สำคัญเพื่ออุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ที่ใช้การสลับโหมดไมโม
2. เพื่อสร้างองค์ความรู้ของการกำหนด ออกแบบ และติดตั้งสถานีฐานระบบไวแมกซ์
3. เพื่อสร้างเครื่องมือในการออกแบบระบบไวแมกซ์ที่ใช้การสลับโหมดไมโม ซึ่งถือว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีศักยภาพในการแข่งขันกับต่างประเทศได้

1.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาสมรรถนะของระบบไมโมโดยพิจารณาวิธีการสลับโหมด
2. ศึกษาการวิเคราะห์พื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3. ประยุกต์เทคนิคการสลับโหมดไมโมเข้ากับการวิเคราะห์พื้นที่ครอบคลุม
4. จำลองแบบระบบไวแมกซ์ในคอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรม MATLAB
5 ทดสอบสมรรถนะระบบไวแมกซ์ในคอมพิวเตอร์
6. ทดสอบสมรรถนะระบบไวแมกซ์ที่ใช้การสลับโหมดไมโมในคอมพิวเตอร์
7. ออกแบบ สร้างชุดทดสอบระบบไวแมกซ์ที่ใช้เทคนิคไมโม
8. วัดสัญญาณจริง และเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองแบบ
9. เสนอบทความในงานประชุมวิชาการ
10. นำข้อเสนอแนะในงานประชุมวิชาการมาปรับปรุงงานวิจัย
11. สรุปผลสำเร็จของโครงการและทำรายงานโครงการ

1.4 ผลสำเร็จของโครงการ

ผลสำเร็จของโครงการนี้คือโปรแกรมทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ทั้งที่ใช้และไม่ใช้การสลับโหมดไมโม ซึ่งช่วยให้การติดตั้งเครือข่ายในอนาคตมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยมีการเผยแพร่ผลงานวิจัยนี้ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติอย่างน้อย 1 บทความ ซึ่งเป็นการนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้เผยแพร่แก่นักวิจัยที่ทำงานใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดสำหรับงานวิจัยอื่นๆ ได้

1.5 การสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย

ปัจจุบันเทคโนโลยีการเข้าถึงสื่อสารไร้สายบรอดแบนด์ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลาย และมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก การสื่อสารที่ให้ทั้งความสะดวก รวดเร็ว และมีความถูกต้องมากขึ้นเท่าไร ก็ยิ่งจะตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานมากขึ้นเท่านั้น แต่การที่จะตอบสนองเพื่อให้เกิดประโยชน์กับผู้ใช้งานได้นั้น ยังต้องอาศัยการพัฒนาระบบอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของประสิทธิภาพในการรับและส่งข้อมูลที่สูงขึ้น มีคุณภาพความน่าเชื่อถือในการให้บริการที่ดีในระบบ อีกทั้งยังมีพื้นที่ในการให้บริการที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น จากการศึกษาพบว่า เทคโนโลยีไวแมกซ์นั้นเป็นเทคโนโลยีบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงที่ถูกพัฒนาขึ้นมาบนมาตรฐาน IEEE 802.16 ที่สามารถรองรับการใช้งานขณะที่เคลื่อนที่ได้ และยังสามารถกระจายสัญญาณในลักษณะจากจุดเดียวไปยังหลายจุด (Point-to-Multipoint) ได้พร้อม ๆ กัน โดยมีความสามารถรองรับกับการทำงานแบบที่ไม่อยู่ในระดับสายตา (Non-Line-of-Sight) จะทำงานได้แม้กระทั่งมีสิ่งกีดขวาง (ต้นไม้ และ อาคาร) ได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังสามารถส่ง

ข้อมูลได้ไกลถึง 50 กิโลเมตรโดยประมาณ ด้วยอัตราความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลถึง 75 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) โดยการรับและส่งข้อมูลนั้นก็จำเป็นต้องผ่านช่องสัญญาณสื่อสารแบบไร้สาย แต่เนื่องจากคุณลักษณะของช่องสัญญาณไร้สายที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบต่างๆ อย่างเช่น สิ่งแวดล้อมทางกายภาพ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ภาครับหรือภาคส่งรวมถึงอุณหภูมิ เป็นต้น เป็นผลให้สัญญาณข้อมูลที่ถูกตรวจจับได้ ณ ภาครับมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิม ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีและวิธีการต่างๆขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหานี้

เทคนิค OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) เป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่นำมาใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว เทคนิค OFDM สำหรับระบบไวแมกซ์เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ประโยชน์จากความถี่เล็กๆ ซึ่งเรียกว่า คลื่นพาหะย่อย (Sub-carrier) เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์สูงสุดจากการใช้งานช่องสัญญาณโดยมีการแบ่งความถี่ออกเป็นแถบความถี่ย่อยๆ แล้วแยกส่งข้อมูลออกหลาย ๆ ช่องโดยภาคส่งนั้นมีการแปลงชุดข้อมูลแบบอนุกรมให้เป็นแบบขนานและนำข้อมูลที่ได้ไปทำการมอดูเลต จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้ไปทำการแปลง IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) ซึ่งเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์จนกระทั่งได้แซมปลิงสัญญาณที่ความถี่ต่างๆที่ตั้งฉากกันออกมา เนื่องจากสภาพแวดล้อมรอบๆ ภาคส่งและภาครับ เช่น สิ่งกีดขวาง, ผนัง,กำแพง หรือตึกรามบ้านช่อง สิ่งเหล่านี้ก่อให้เกิดการเฟดของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี (Multipath propagation) การแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลกระทบดังกล่าว จึงมีการเสริมสร้างไซคลิกเข้าไปที่เฟรมข้อมูลและแปลงชุดข้อมูลจากแบบขนานไปเป็นแบบอนุกรมก่อนทำการส่งผ่านสายอากาศไปยังภาครับ เมื่อสัญญาณผ่านเข้ามาที่ภาครับแล้วจะมีการแปลงชุดข้อมูลจากแบบอนุกรมไปเป็นแบบขนานและทำการถอดไซคลิกออก จากนั้นจึงนำข้อมูลไปทำการแปลง FFT (Fast Fourier Transform) และทำการดีมอดูเลตพร้อมทั้งแปลงจากชุดข้อมูลแบบขนานไปเป็นแบบอนุกรมและได้ข้อมูลเดิมกลับมา อย่างไรก็ตามการที่จะทำให้ระบบไวแมกซ์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ก็ยังต้องอาศัยเทคนิคอื่นๆ เพิ่มเติม ซึ่งระบบไวแมกซ์นั้นได้นำเทคนิคไมโม (Multiple Input Multiple Output : MIMO) เข้ามาเป็นทางเลือกในการใช้งานจริง

เทคนิคไมโมแบบวงเปิด (Open loop MIMO) มีสองประเภทใหญ่ๆคือ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง (Spatial Multiplexing : SM) เป็นการส่งข้อมูลโดยการแยกสัญญาณที่จะส่งออกเป็นสองชุดแยกจากกันเพื่อส่งผ่านสายอากาศในแต่ละต้น ซึ่งจะสามารถเพิ่มความเร็วในการรับและส่งข้อมูลได้หลายเท่า และอีกประเภทก็คือ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา (Space Time Coding : STC) เป็นเทคนิคที่อยู่บนพื้นฐานของวิธีการทำไดเวอร์ซิตี้ทางด้านส่ง ซึ่งเป็นการรวมเอาการออกแบบรหัสช่องสัญญาณและการใช้สายอากาศหลายต้นเข้าด้วยกัน โดยจะใช้สายอากาศส่งหลายๆ ต้น และสายอากาศรับต้นเดียว หรือหลายๆ ต้น ร่วมกับการใช้ไดเวอร์ซิตี้ทางเวลา โดยอาศัยหลักการที่ว่า ถ้าหากตั้งสายอากาศส่งและรับให้มีความเป็นอิสระเชิงตำแหน่งแล้ว สัญญาณจากสายอากาศส่งแต่ละตัว ที่ส่งไปยังสายอากาศรับแต่ละตัว จะต้องได้รับ

ผลกระทบจากการเฟดที่แตกต่างกัน เพื่อให้ข้อมูลที่ถูกส่งไป ณ เวลาหนึ่งๆ ในแต่ละเส้นทาง ไม่ถูกรบกวนจนทำให้สูญเสียไปพร้อมกันหมดทุกเส้นทาง ดังนั้น การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา จึงมีประสิทธิภาพในการช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการเฟดของสัญญาณ การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา แบบ Alamouti เป็นรูปแบบหนึ่ง ในรูปแบบของการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ซึ่งเป็นรหัสที่ได้รับการออกแบบ โดยใช้หลักการของไดเวอร์ซิตี้เชิงตำแหน่ง (space diversity) ที่มีรูปแบบเรียบง่าย และให้สมรรถนะที่ดีขึ้นกว่าระบบที่มีการใช้สายอากาศส่งเพียงต้นเดียว รหัสเชิงตำแหน่งและเวลา แบบ Alamouti นี้ถูกคิดค้นขึ้นโดย (Siavash M, Alamouti., 1998; Vahid Tarokh, Hamid Jafarkhani, and A.R. Calderbank., 1999) ที่ออกแบบมาเพื่อใช้กับระบบสื่อสารที่ใช้สายอากาศภาคส่ง 2 ต้น ในขณะที่ภาครับจะใช้สายอากาศจำนวนเท่าใดก็ได้ตามต้องการ โดยรหัสดังกล่าวนี้มีคุณลักษณะเฉพาะตัวที่น่าสนใจคือ การถอดรหัสเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (optimal decoding) ซึ่งสามารถกระทำได้ โดยกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ด้วยเทคโนโลยีไวแมกนี้สามารถรองรับจำนวนสายอากาศส่งได้สูงสุดถึง 4 ต้น จึงมีงานวิจัยนำเสนอถึงการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา โดยการใช้สายอากาศภาคส่งที่ 2, 3 และ 4 ต้น ผ่านช่องสัญญาณไร้สายไปยังสายอากาศรับจำนวน n ต้น (Vahid Tarokh, Hamid Jafarkhani, and A.R. Calderbank., 1999) ทั้งนี้แล้วเทคนิคไมโมแบบวงเปิดทั้งสองรูปแบบก็มีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันจึงได้มีเทคนิคใหม่ที่สามารถนำเอาข้อดีของทั้งสองเทคนิคนี้มารวมเข้าไว้ด้วยกัน เทคนิคนี้เรียกว่า การสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว (Adaptive MIMO mode Switching : AMS) ได้นำเสนอหลักเกณฑ์สำหรับการเลือกระหว่างทั้ง 2 เทคนิคนี้เข้าไว้ด้วยกัน โดยใช้หลักการหาค่าระยะทางยูคลิดที่ต่ำที่สุดมาใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกรูปแบบเพื่อให้ได้ระบบที่ดีและเหมาะสมในการทำงานขณะนั้น (R.W. Heath Jr, and A.J. Paulraj., 2005) นอกจากนี้แล้วยังมีงานวิจัยอีกจำนวนหนึ่งที่นำเอาเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวเข้าไปใช้งาน และได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคดังกล่าวนี้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานได้ดีกว่าการเลือกใช้งานเทคนิคไมโมเพียงรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งเท่านั้น (Prabaagarane,N., Ramakrishnan,M., Karthika,S., Janani,U,G., Janaki,S., 2008) จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจที่จะนำเทคนิคดังกล่าวนี้มาใช้ในงานวิจัยโดยเป็นการเพิ่มประสิทธภาพในการรับและส่งข้อมูลในระบบไวแมกซ์ให้ยังคงมีประสิทธิภาพดีในการใช้งาน และยังได้ศึกษาถึงพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ที่เกิดขึ้น เมื่อเรานำเทคนิคไมโมดังกล่าวเข้ามาใช้งาน

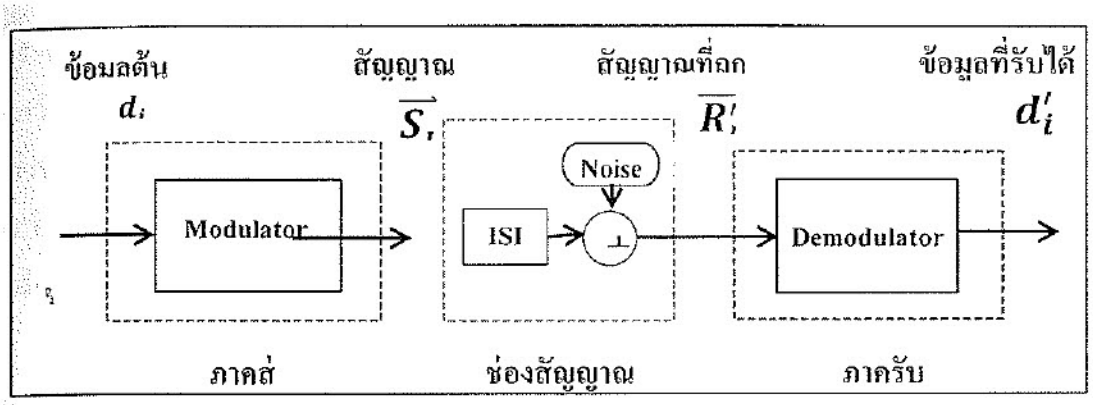
บทที่ 2 หลักการพื้นฐานของระบบไวแมกซ์

2.1 กล่าวนำ

สำหรับในบทนี้ จะกล่าวถึง หลักการพื้นฐานของไวแมกซ์ โดยจะกล่าวถึงการสื่อสารไร้สายระหว่างอุปกรณ์สื่อสารกับสถานีฐาน โครงสร้างเฟรม (Frame structure) และโครงสร้างของระบบไวแมกซ์ ซึ่งก็จะแบ่งออกเป็นโครงสร้างของภาคส่งและโครงสร้างของภาครับ พร้อมทั้งการนำเทคนิคไมโมเข้ามาใช้งานในระบบไวแมกซ์ นอกจากนี้เนื้อหาในบทนี้ยังกล่าวถึงการจำลองช่องสัญญาณที่ใช้ในการรับและส่งข้อมูลเพื่อใช้ศึกษาประสิทธิภาพต่อไป

2.2 หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย

ในการออกแบบและใช้งานระบบสื่อสารไร้สายเพื่อรับและส่งข้อมูลดิจิตอลนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบสื่อสาร เช่น ขนาดแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของช่องสัญญาณที่ใช้งาน อัตราเร็วในการส่งข้อมูล และ กำลังส่ง เป็นต้น โดยจะต้องมีการออกแบบให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้งานระบบสื่อสารนั้นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เป็นการรบกวนช่องสัญญาณอื่นๆ ดังนั้นข้อมูลดิจิตอล d_i ต้องผ่านกระบวนการมอดูเลชั่น (Modulation) ก่อนถูกส่งผ่านระบบสื่อสาร เพื่อแปลงข้อมูลให้กลายเป็นสัญญาณข้อมูล $\overline{S_i}$ ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการส่งผ่านช่องสัญญาณ และเมื่อสัญญาณข้อมูล $\overline{R_i}$ ถูกตรวจจับได้ที่ภาครับ ก็จะถูกนำมาผ่านกระบวนการ ดีมอดูเลชั่น (Demodulation) เพื่อแปลงสัญญาณข้อมูลให้กลายเป็นข้อมูลดิจิตอล d_i เพื่อนำไปใช้งานต่อไป โดยจะพบว่าข้อมูลดิจิตอลที่ได้จากทำงานของภาครับนั้นอาจมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไป เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ถูกส่งออกไปจากภาคส่ง ซึ่งเกิดมาจากผลขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบสื่อสาร สำหรับองค์ประกอบหลักที่ส่งผลให้ข้อมูลที่ถูกส่งผ่านมาเกิดความผิดพลาดขึ้นนั้น เกิดมาจากการถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวน (Noise) และเกิดจากลักษณะในการส่งข้อมูลที่สัญญาณข้อมูลสามารถเดินทางไปถึงภาครับได้จากหลายวิถีด้วยกัน (Multi-path) โดยที่ในแต่ละเส้นทางนั้น อาจจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณในลักษณะของการซ้อนทับระหว่างสัญญาณขึ้น



รูปที่ 2.1 การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย

2.3 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 มีเป้าหมายเพื่อสนับสนุนและพัฒนาอุปกรณ์เครือข่ายให้มาตรฐานในกลุ่ม IEEE 802.16 เป็นไปในแนวทางเดียวกัน โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้อุปกรณ์จากผู้ผลิตต่าง 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 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) IEEE 802.16a เป็นมาตรฐานที่แก้ไขปรับปรุงจาก IEEE 802.16 เดิม โดยใช้งานที่ความถี่ 2 - 11 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งคุณสมบัติเด่นที่ได้รับการแก้ไขจากมาตรฐาน 802.16 เดิมคือคุณสมบัติการรองรับการทางานแบบที่ไม่อยู่ในระดับสายตา (NLoS - Non-Line-of-Sight) ทั้งยังมีคุณสมบัติการทางานเมื่อมีสิ่งกีดขวาง อาทิเช่น ต้นไม้,

อาคาร ฯลฯ นอกจากนี้ก็ยังช่วยให้สามารถขยายระบบเครือข่ายเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตไร้สายความเร็วสูงได้อย่างกว้างขวางด้วยรัศมีทำการที่ไกลถึง 31 ไมล์หรือประมาณ 48 กิโลเมตร และมีอัตราความเร็วในการรับและส่งข้อมูลสูงสุดถึง 75 เมกะบิตต่อวินาที ทำให้สามารถรองรับการเชื่อมต่อการใช้งานระบบเครือข่ายของบริษัทที่ใช้สายประเภท ทีวี (T1-type) กว่า 60 รายและการเชื่อมต่อแบบ DSL ตามบ้านเรือนที่พักอาศัยอีกหลายร้อยครัวเรือนได้พร้อมกันโดยไม่เกิดปัญหาในการใช้งาน

IEEE 802.16e เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาให้สนับสนุนการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์พกพาประเภทต่างๆ เช่น อุปกรณ์พีดีเอ โน้ตบุ๊ก เป็นต้น โดยให้รัศมีทำงานที่ 1.6 – 4.8 กิโลเมตร มีระบบที่ช่วยให้ผู้ใช้งานนั้นสามารถสื่อสารได้โดยให้คุณภาพในการสื่อสารที่ดีและมีเสถียรภาพขณะใช้งาน แม้ว่ามีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาก็ตาม มีการตั้งเสาสัญญาณไวแมกซ์กระจายเป็นเครือข่ายครอบคลุมบริเวณที่ต้องการให้บริการหรือนำเอามาใช้เพื่อเพิ่มระยะทางในการให้บริการให้ไกลขึ้นถึงชานเมือง หรือตั้งเสาไวแมกซ์ เพื่อรับส่งข้อมูลและกระจายต่อให้กับผู้ใช้ ADSL, DSL ในพื้นที่ที่ลากสายสัญญาณหลักเข้ามาลำบาก โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1) นำเอาระบบมาให้บริการอินเทอร์เน็ต โดยผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า Fix wireless access อุปกรณ์ตัวนี้จะเป็นตัวรับสัญญาณที่สามารถติดที่ไหนก็ได้ เช่น ข้างตัวบ้าน หรือตัวตึกแล้วรับสัญญาณไวแมกซ์ นำไปกระจายต่อยังเครื่องคอมพิวเตอร์ต่าง ๆ ผ่านสวิตช์ซึ่งตัวอุปกรณ์จะอยู่กับที่ไม่ได้ขยับไปไหน

2) จะมีการพัฒนาอุปกรณ์ลูกข่ายให้ใช้งานมาตรฐาน IEEE 802.16e เพื่อให้ใช้งานในขณะที่มีการเคลื่อนที่ และสามารถใช้งานข้ามเสาส่งสัญญาณได้ เช่น ขับรถไปรอบเมืองก็ยังใช้งานได้

2.3.1 แอร์อินเตอร์เฟสของมาตรฐานไวแมกซ์

แอร์อินเตอร์เฟสของมาตรฐานไวแมกซ์ได้ถูกกำหนดโดยมาตรฐาน 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 สำหรับการส่งสัญญาณขาขึ้นและขาลง มีได้สอง รูปแบบหลัก ๆ คือ

1. TDD (Time Division Duplex) การส่งข้อมูลทางด้านขาขึ้นกับขาลงที่ความถี่เดียวกัน แต่แบ่งกันส่งคนละช่วงเวลา การส่งนั้นจะถูกแบ่งช่วงเวลาออกเป็นเฟรม และในแต่ละเฟรมนั้นจะมีการ

แบ่งช่วงเวลาย่อยเป็นสองซับเฟรม การส่งข้อมูลในทิศทางขาขึ้นจะถูกส่งในช่วงเวลาซับเฟรมขาขึ้น (uplink subframe) ขณะที่การส่งข้อมูลทิศทางขาลง ส่งในช่วงเวลาซับเฟรมขาลง (downlink subframe) ดังนั้น TDD สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลาเฟรมได้ คือ สัดส่วนช่วงเวลาของซับเฟรมขาขึ้น กับ ซับเฟรมขาลง มีการเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นกับปริมาณทราฟฟิกของสัญญาณขาขึ้นและขาลง ดังนั้น TDD จึงมีความยืดหยุ่นในการจัดการแบนด์วิดท์

2. FDD (Frequency Division Duplex) การส่งข้อมูลทางด้านขาขึ้นกับขาลงนั้นจะส่งในเวลาเดียวกัน แต่แบ่งกันส่งคนละความถี่ นอกจากนี้ FDD ยังรองรับอุปกรณ์ลูกข่ายที่เป็นแบบ Half - FDD คือ อุปกรณ์ลูกข่ายจะทำการส่งข้อมูลและรับข้อมูลคนละเวลากัน ขณะที่อุปกรณ์ลูกข่ายกำลังส่งข้อมูลจะไม่สามารถรับข้อมูลได้ แต่การส่งและรับข้อมูลยังใช้คนละความถี่กัน การใช้รูปแบบ Half - FDD อุปกรณ์จะมีราคาถูกกว่า Full - FDD เพราะส่วนประกอบภาครับสัญญาณกับภาคส่งสัญญาณของอุปกรณ์สามารถใช้ชุดเดียวกันร่วมกันได้ ภายในเฟรมของทั้ง TDD และ FDD จะมีการแบ่งย่อยออกเป็น time slot ซึ่งการส่งข้อมูลของทั้งสถานีฐานและสถานีลูกข่ายจะต้องส่งตรงตาม time slot ที่ว่านี้ ดังนั้นทั้งสถานีฐานและสถานีลูกข่ายจะต้องมีการตั้งเวลาให้ตรงกัน เพื่อให้ส่งข้อมูลลงใน time slot ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

การเข้าถึงช่องสัญญาณสำหรับในทิศทางขาลงจะไม่ซับซ้อน เพราะทิศทางขาลงนั้นมีเพียงสถานีฐานผู้เดียวเท่านั้น ที่เป็นผู้ส่งข้อมูลในช่วงเวลาซับเฟรมขาลง และกระจายข้อมูลไปทุก ๆ สถานีลูกข่าย ส่วนการเข้าถึงช่องสัญญาณในทิศทางขาขึ้นนั้นมีหลาย ๆ สถานีลูกข่ายที่มีโอกาสที่จะส่งได้ในช่วงเวลาซับเฟรมขาขึ้นได้ ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการส่งข้อมูลจากหลายสถานีลูกข่ายในเวลาพร้อมกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลเกิดขึ้น ดังนั้นในการส่งข้อมูลในทิศทางขาขึ้นจึงจำ เป็นต้องใช้ Time Division Multiple Access (TDMA) ช่วยจัดตารางเวลาของการส่งของสถานีลูกข่าย ตารางเวลาของการส่งนี้ถูกกำหนดและถูกควบคุมโดยสถานีฐาน ทุก ๆ ช่วงเวลา สถานีฐานจะส่งข้อความกระจายไปสถานีลูกข่าย ภายในข้อความจะประกอบไปด้วยตารางเวลาการส่งของสถานีลูกข่ายดังนั้นสถานีลูกข่ายจะทราบว่าควรจะส่งข้อมูลใน time slot ใด และจำนวน time slot เท่าไรซึ่งแสดงให้เห็นว่าสถานีฐานสามารถกำหนดช่วงเวลาและจำนวน time slot ให้แต่ละสถานีลูกข่ายให้เหมาะสมกับความต้องการแบนด์วิดท์ของแต่ละสถานีลูกข่าย

นอกจากไวแมกซ์มีความยืดหยุ่นในการจัดการแบนด์วิดท์แล้ว ยังมีความยืดหยุ่นในการจัดการรูปแบบการรับส่งข้อมูล คือ ในทุก ๆ Time frame สถานีฐานจะทำการปรับเปลี่ยนและกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของการรับส่งสำหรับแต่ละสถานีลูกข่าย เช่น ปรับเปลี่ยน Forward Error Correcting Code Rate ปรับเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลตให้เหมาะสมในแต่ละสภาพของช่องสัญญาณ ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลได้ดียิ่งขึ้น

ชั้นกายภาพ (Physical Layer : PHY)

มาตรฐาน IEEE 802.16 ได้กำหนด PHY เลเยอร์ไว้ทั้งหมด 5 รูปแบบด้วยกัน คือ

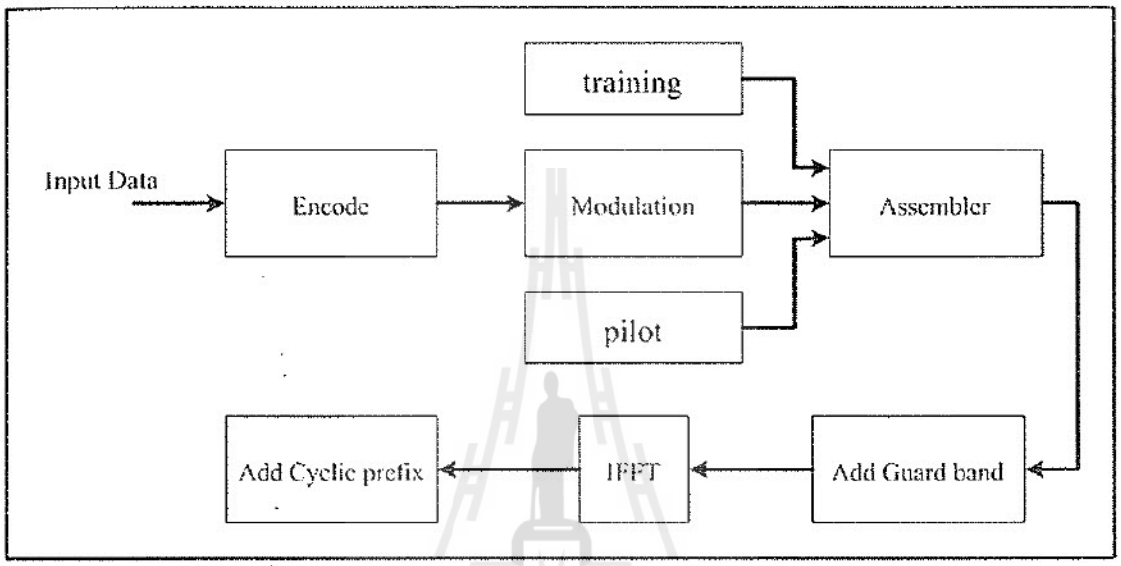
1. Wireless MAN SC จะเป็นลักษณะของ Single Carrier ซึ่งเป็นรูปแบบของ 802.16 ตัวแรกสุดที่ได้กำหนดขึ้น โดยความถี่ที่ใช้งานจะอยู่ในย่านที่สูงกว่า 11 GHz สามารถที่จะทำงานได้ทั้งแบบ FDD หรือ TDD และไม่มีการใช้งาน OFDM
2. Wireless MAN SCa ได้ปรากฏอยู่ใน 802.16a เป็นการใช้งานแบบ Single Carrier เช่นกัน จึงไม่มีการใช้งาน 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 Meshได้อีกด้วย
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

ซึ่งในงานนี้จะศึกษา มาตรฐานไวแมกซ์ IEEE 802.16e โดยจำใช้ FFT ขนาด 256 และสามารถทำงานได้ที่ความถี่ที่ 2 - 11 GHZ โดยให้รัศมีทำงานที่ 1.6 – 4.8 กิโลเมตร ในมาตรฐานนี้สถานีลูกข่ายสามารถติดต่อสื่อสารกับสถานีฐานได้โดยไม่จำเป็นต้องเป็นแบบ LOS

2.3.2 โครงสร้างของระบบไวแมกซ์

โครงสร้างของระบบไวแมกซ์ แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ภาคส่ง และ ภาครับ

ภาคส่ง



รูปที่ 2.2 แผนภาพภาคส่งระบบไวแมกซ์

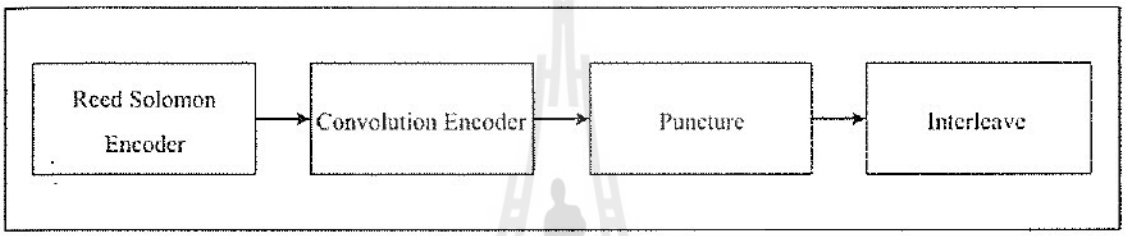
จากรูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพของภาคส่งของระบบไวแมกซ์ได้ดังนี้ คือ ขั้นตอนแรก จะทำการสุ่มข้อมูลขึ้นมา จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาเข้ารหัส (Encode) และก็นำข้อมูลไปมอดูเลตสัญญาณ (Modulation) โดยการมอดูเลตสัญญาณนี้จะมีทั้งหมด 4 รูปแบบที่ใช้คือ BPSK QPSK 16-QAM และ 64-QAM จากนั้นก็นำข้อมูลที่ได้มาทำการจัดเรียง (Assembling) ที่มีทั้งหมด 256 subcarriers จะประกอบไปด้วยข้อมูล 192 subcarrier 1 zero DC subcarrier 8 pilot subcarriers และ 55 guard carriers จากนั้นก็จะทำ การรวม subcarrier ทุก ๆ subcarrier เข้าด้วยกัน และนำไปผ่านการทำกระบวนการ IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) สุดท้ายก็จะทำการเพิ่ม cyclic prefix เข้าไปเพื่อช่วยลดผลกระทบจากการรบกวนกันระหว่างสัญญาณ

1. แหล่งกำเนิด (Source)

ข้อมูลจะถูกสร้างขึ้นเป็นบิต จากนั้นก็จะทำการ randomized ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นการเข้ารหัส (Encryption) ในระดับเลเยอร์แรกของข้อมูล เพื่อสร้างความปลอดภัยจากการดักฟังข้อมูลต่าง ๆ หลังจากนั้นก็จะส่งต่อไปยังส่วนการเข้ารหัส

2. การเข้ารหัส (Encoding)

เพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือและเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลจึงต้องมีการเพิ่มความสามารถที่จะตรวจจับและแก้ไขข้อมูลที่ผิดพลาด ในส่วนการเข้ารหัสนี้จะประกอบไปด้วย การเข้ารหัสหลาย ๆ แบบ สามารถแสดงดัง ซึ่งมีวัตถุประสงค์และการใช้งานแตกต่างกัน ซึ่งมีการเข้ารหัสดังนี้



รูปที่ 2.3 แผนภาพของการเข้ารหัส

2.1 การเข้ารหัสแบบรีดโซโลมอน (Reed Solomon Encoder)

รหัสนี้เป็นรหัสที่ไม่เป็นไบนารี (Nonbinary Cyclic Codes) ในส่วนสัญลักษณ์ ทำขึ้นบนลำดับ m - bit โดยที่ m เป็นจำนวนเต็มบวกมีค่ามากกว่า 2 รหัส RS (n, k) กระทำบนสัญลักษณ์ m - bit สำหรับทุก n และ k จะมีค่า $0 < k < n < 2^m+2$ โดยที่ k คือ จำนวนสัญลักษณ์ของข้อมูลเริ่มต้นในการเข้ารหัส และ n คือ จำนวนรวมของสัญลักษณ์รหัสในบล็อกการเข้ารหัสสำหรับรูปแบบการเข้ารหัส 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 จะกำหนดที่จำนวนสัญลักษณ์ ที่แตกต่าง ในลำดับจะได้ระยะห่างต่ำสุด (Minimum distance) เป็น $d_{min} = n-k+1$ รหัส เหมาะแก่การตรวจสอบ แก้ไขความผิดพลาดเท่ากับ t หรือมีข้อผิดพลาดที่น้อยกว่า t สามารถแสดงได้ดังนี้

$$t = \left[\frac{d_{\min} - 1}{2}\right] = \left[\frac{n-k}{2}\right] \qquad (2.1)$$

2.2 การเข้ารหัสแบบ Convolution

หลังจากที่เข้ารหัสแบบ RS แล้ว จากนั้นข้อมูลก็จะถูกเข้ารหัสConvolution อีกครั้งหนึ่ง การเข้ารหัสแบบ Convolution เป็นความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุทเรียงลำดับอย่างต่อเนื่อง โดยข้อมูลเข้ามาผ่านตัว shift register (Flip - Flop) และ Modulo-2 adder (Exclusive or) การหาเอาท์พุทของภาคเข้ารหัสจะทำโดยนำข้อมูลที่อยู่ใน 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 ที่จะนำมาหาค่าเอาท์พุทโดยการบวกแบบ Modulo-2 คือ g0 เท่ากับ 58 และ g1 เท่ากับ 78 โดยในการทำงานนั้น จะดึงข้อมูลที่จะเข้ารหัสมาครั้งละ 1 บิต (k = 1) เข้ามาภายในวงจร ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่อยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ ใน shift register ถูกเลื่อนเข้ามาอยู่ในตำแหน่งถัดไป ต่อจากนั้นจะมีการนำข้อมูลทั้งหมดที่เก็บไว้ใน shift register มาทำการหาเอาท์พุทจำนวน 2 บิต (n = 2) ซึ่งอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 (Rate = k/n = 1/2) ที่เป็นผลลัพธ์ส่งออกไปจากภาคเข้ารหัส

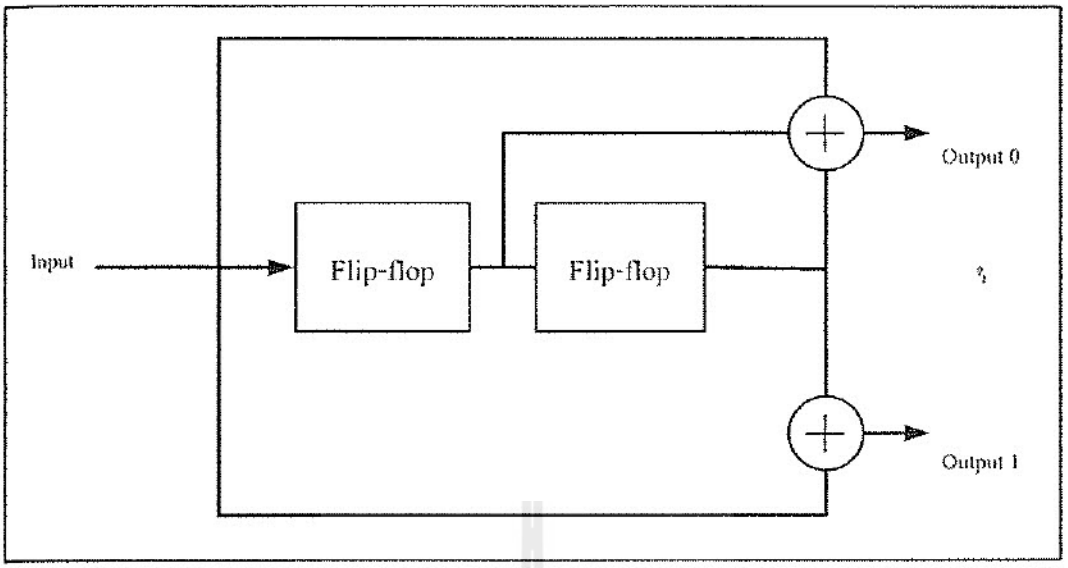
การวิเคราะห์การทำงานของวงจรการเข้ารหัสแบบ Convolution

จากวงจรการเข้ารหัสแบบ Convolution ที่มีการรับข้อมูลที่จะทำการเข้ารหัส เข้ามาภายในวงจรครั้งละ 1 บิต จากนั้นจึงทำการคำนวณหาค่าของ Codeword ที่จะถูกส่งออกไปเป็นผลลัพธ์ของภาคเข้ารหัสจำนวน 2 บิต โดยการคำนวณหาค่า Codeword ในแต่ละครั้งนั้น จะมีการนำข้อมูลที่อยู่ใน shift register จำนวน 3 บิต (K) มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรเข้ารหัสนั้น จะมีการแทนการทำงานต่าง ๆ ของวงจรด้วยตัวแปรที่เรียกว่า Generator Polynomial ซึ่งจะเป็นตัวแปรที่ใช้แสดงถึงลักษณะของการคำนวณหาค่าผลลัพธ์ในการเข้ารหัสของ O/P แต่ละตัว โดยในกรณีของวงจรเข้ารหัสตัวอย่างในรูปที่ 2.3 นั้น จะสามารถแสดงการทำงานต่าง ๆ ของวงจรได้ด้วย Generator Polynomial ต่อไปนี้

$$g1 = [1 \quad 1 \quad 1] \tag{2.2}$$

$$g2 = [1 \quad 0 \quad 1] \tag{2.3}$$

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.4 การเข้ารหัส Convolution K=3

ซึ่งในการคำนวณหาค่าของข้อมูลที่ได้หลังจากการเข้ารหัสนั้นจะสามารถนำข้อมูลที่ได้จากค่าของ Generator Polynomial มาทำการคำนวณหาค่าของผลลัพธ์ที่ได้จากการเข้ารหัส โดยการนำข้อมูลที่จะทำการเข้ารหัสมาทำการ Convolution กับค่าของ Generator Polynomial ดังสมการ

$$O/P = [input] * gi \tag{2.4}$$

$$O/P1 = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 1] * [1 \quad 0 \quad 1] = 1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \tag{2.5}$$

$$O/P2 = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 1] * [1 \quad 1 \quad 1] = 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \tag{2.6}$$

ดังนั้นค่าของ Codeword ที่ได้จากการเข้ารหัสข้อมูลนั้น จะเกิดจากข้อมูลที่คำนวณได้จาก O/P1 และตามด้วย O/P2 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 11 01 01 11 01 01 ซึ่งจากการคำนวณต่าง ๆ ในการหาผลลัพธ์ของวงจรเข้ารหัสนั้นสามารถที่จะคำนวณได้จากการหาค่า Convolution ดังนั้น จึงมีการเรียกรูปแบบในการเข้ารหัสข้อมูลในลักษณะนี้ว่าเป็นการเข้ารหัสแบบ Convolution และเมื่อนำมาเขียนรวมกันจะได้เป็น Generator Polynomial ของวงจรเข้ารหัสจะมีลักษณะดังนี้

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \tag{2.7}$$

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 ดังนั้นสำหรับการเข้ารหัสแบบ Convolution นั้นจะมีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ

$$R=\frac{nk_0}{(n+L-1)n_p} \tag{2.8}$$

และในกรณีที่ค่า n มีค่ามากกว่าค่า L มาก ๆ จะได้ค่าอัตราการเข้ารหัสมีค่าเท่ากับ

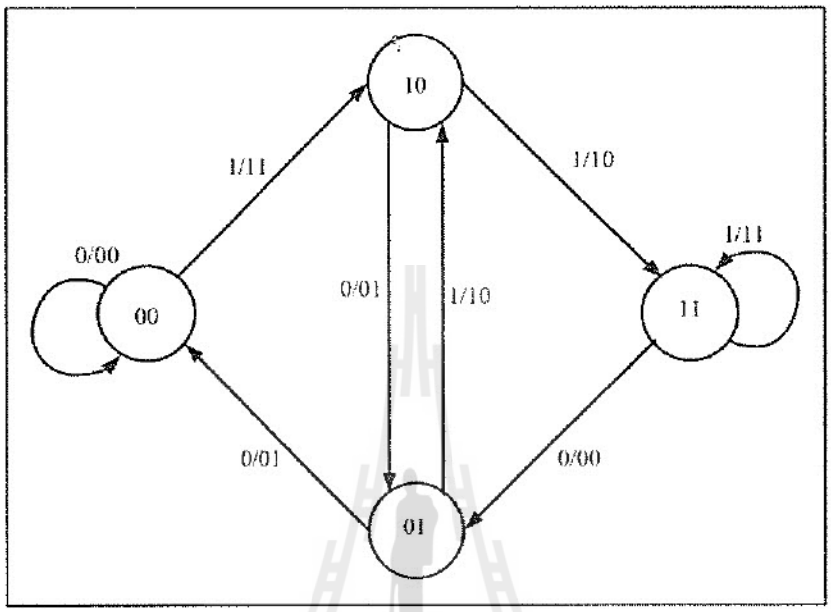
$$R=\frac{k_0}{n_0} \tag{2.9}$$

ในการวิเคราะห์การทำงานต่าง ๆ ของวงจรการเข้ารหัสแบบ Convolution นั้นนอกจากจะมีการใช้สมการของ Generator Polynomial แล้ว จะมีการแสดงการทำงานต่าง ๆ ของวงจรเข้ารหัส โดยการใช้รูปภาพในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ในวงจรเข้ารหัสที่ถูกป้อนเข้ามา ณ เวลานั้น และค่าของ Codeword ที่จะถูกส่งออกไป เมื่อมีข้อมูลในกรณีต่าง ๆ ป้อนเข้ามา ซึ่งรูปแบบแผนภาพที่ใช้ในการแสดงการทำงานของการเข้ารหัสข้อมูลนั้น จะมีอยู่ 3 รูปแบบ คือ State diagram, Tree diagram และ Trellis diagram ซึ่งมีรายละเอียดแสดงได้ดังต่อไปนี้

ไดอะแกรมสถานะ (State diagram)

ไดอะแกรมสถานะจะแสดงค่าของข้อมูลใน shift register และเอาท์พุทของตัวเข้ารหัส ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5 ตัวเลขที่อยู่ในวงกลมแต่ละวงนั้น จะหมายถึงสภาวะต่าง ๆของข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ใน shift register ซึ่งในกรณีของวงจรเข้ารหัสที่ใช้เป็นตัวอย่างนั้น จำนวนสถานะ (State) ทั้งหมดเท่ากับ 4 และสำหรับลูกศรที่แสดงไว้ในรูปนั้นจะแสดงถึงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงการทำงานจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ป้อนเข้ามา ณ เวลานั้น ๆ เช่น กรณีข้อมูลที่เก็บไว้มีค่าเป็น 00 เมื่อมีข้อมูล 1 เข้ามาจะมี

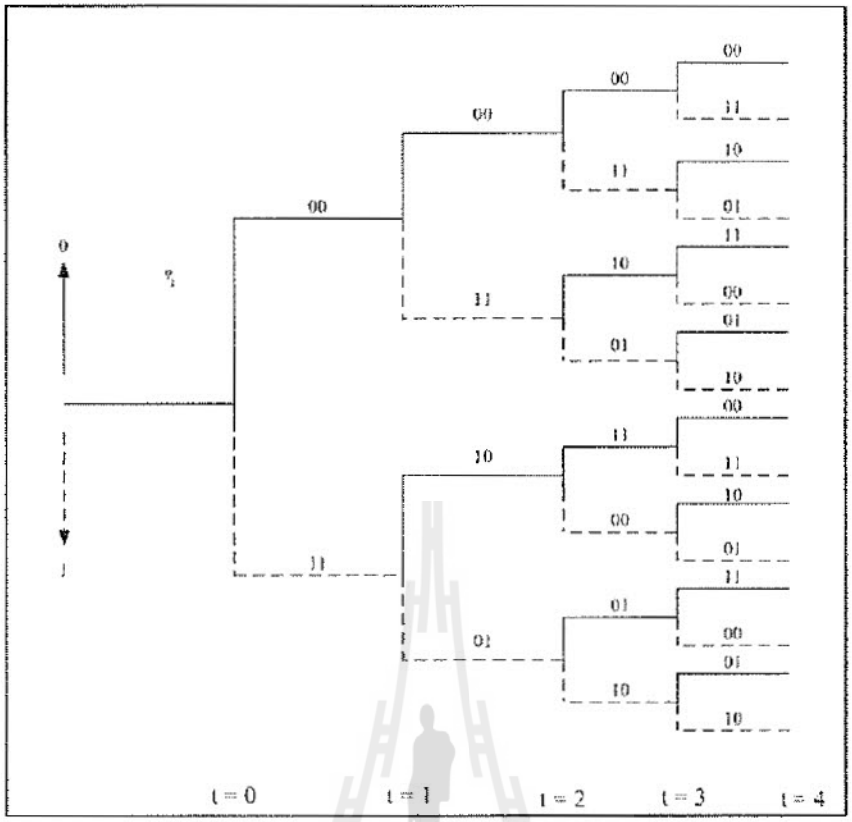
ผลทำให้ข้อมูลที่เก็บไว้ถูกเปลี่ยนเป็น 10 และจะมีการส่งค่า 11 ออกไปจากวงจร (แทนด้วยสัญลักษณ์ 1/11 ดังรูป) แต่ถ้าหากว่ามีการป้อนข้อมูล 0 เข้ามา วงจรก็จะยังมีสภาวะเป็น 00 เหมือนเดิมและจะมีการส่งค่า 00 ออกไปจากวงจร (แทนด้วยสัญลักษณ์ 0/00 ดังรูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมแสดงสถานะของการเข้ารหัส

ไดอะแกรมต้นไม้ (Tree diagram)

สำหรับไดอะแกรมต้นไม้นั้น เป็นการพิจารณาถึงลักษณะของการทำงานของวงจรเข้ารหัสข้อมูล โดยที่จะมีการพิจารณาถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการป้อนข้อมูลต่าง ๆ เข้าไปในวงจรการเข้ารหัสเป็นหลัก ซึ่งลักษณะของไดอะแกรมต้นไม้ มีลักษณะดังรูปที่ 2.6 ในการแสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัสแบบ Convolution โดยใช้ไดอะแกรมต้นไม้นั้นจะเป็นการพิจารณาการทำงานโดยการคำนึงถึงข้อมูลที่ป้อน เข้ามาและถูกส่งออกไปจากภาคเข้ารหัสเป็นหลัก ซึ่งในการพิจารณานั้น จะเริ่มต้นจากตำแหน่งรากของไดอะแกรมต้นไม้ ในกรณีของรูปที่ 2.6 นั้นจะอยู่ในตำแหน่งซ้ายมือสุดของรูป ซึ่งจะมีการนำข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามาภายในวงจรเข้ารหัส เป็นตัวกำหนดทิศทางการเดินของข้อมูลในไดอะแกรมต้นไม้ โดยในกรณีของไดอะแกรมต้นไม้ ตัวอย่างนั้นจะกำหนดให้มีการเลื่อนตำแหน่งไปข้างบน เมื่อมีการรับข้อมูล 0 เข้ามา และจะเลื่อนตำแหน่งลงล่างเมื่อมีการรับข้อมูล 1 เข้ามา ซึ่งหลังจากที่มีการเลื่อนตำแหน่งที่ใช้พิจารณาแล้ว จะมีการพิจารณาถึงข้อมูลที่ถูกส่งออกไปจากทางภาคเข้ารหัส ณ เวลานั้น ๆ จากข้อมูลที่อยู่เหนือเส้นทางในตำแหน่งที่มีการพิจารณา

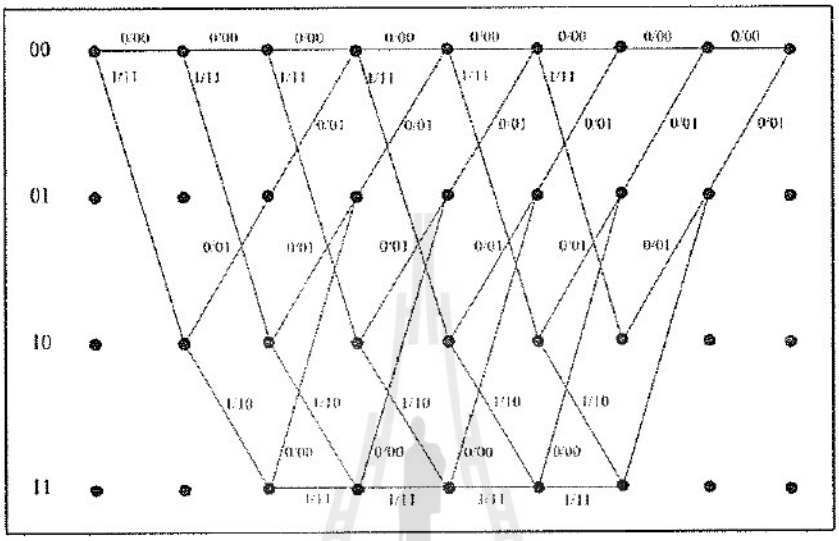


รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมต้นไม้ของการเข้ารหัส

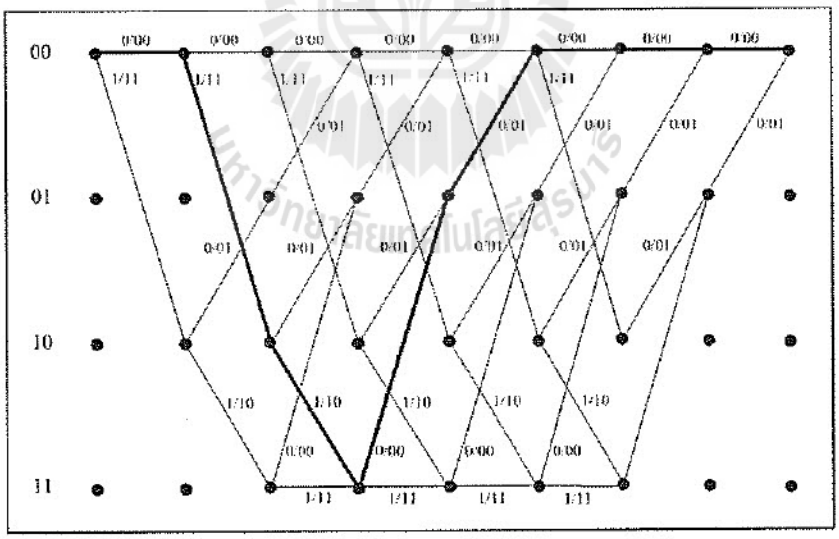
ไดอะแกรม Trellis

การแสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัสโดยใช้ไดอะแกรม Trellis นั้นจะเป็นการแสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัสโดยใช้ไดอะแกรมสถานะ มาเปลี่ยนแปลงลักษณะให้อยู่ในอีกลักษณะหนึ่งที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงข้อมูลต่าง ๆ ภายในวงจรเข้ารหัสข้อมูลที่ป้อนเข้ามา และ Codeword ที่จะถูกส่งออกไป ณ เวลาต่าง ๆ โดยลักษณะของไดอะแกรม Trellis จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นการนำข้อมูลในอดีตมาทำการประมวลผลร่วมกับข้อมูลในเวลานั้น และจะมีการป้อนข้อมูลเข้ามาภายในวงจรครั้งละ 1 บิต ($k_0 = 1$) ซึ่งในกรณีนี้จะมีข้อมูลที่จะเข้ารหัสทั้งหมด 6 บิต ซึ่งเส้นทางต่าง ๆ ที่อยู่ในไดอะแกรม Trellis นั้น จะแสดงถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงภาวะของวงจร และตัวเลข x/y ที่อยู่เหนือทางเดินในแต่ละเส้นทางนั้น จะแสดงถึงข้อมูลที่ป้อนเข้ามา และ Codeword ที่จะถูกส่ง ออกไปเมื่อมีการป้อนข้อมูลนั้นเข้ามา ซึ่งเมื่อพิจารณาลักษณะของไดอะแกรม Trellis แล้ว จะพบว่ารูปแบบของไดอะแกรม Trellis ในแต่ละสถานะการทำงานนั้นจะมีลักษณะที่คล้ายกัน แต่จะมีความแตกต่างกันเฉพาะส่วนหัวและส่วนท้ายซึ่งเป็นผลมาจากข้อมูลที่เก็บอยู่ในวงจรนั้นจะมีค่าเริ่มต้นจากภาวะที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมดและจะจบลงที่ภาวะข้อมูลเป็น 0 เช่นกัน ดังนั้นเส้นทางอื่น ๆ ที่ไม่ผ่านจุดที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด ณ จุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายนั้นจะไม่ถูกนำมาพิจารณา

ดังนั้นขนาดของความยาวในไดอะแกรม Trellis จึงขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ถูกนำมาเข้ารหัส ตัวอย่างในการใช้งานไดอะแกรม Trellis เช่น กรณีที่มีการป้อนข้อมูล 0 1 1 0 0 0 0 0 เข้ามาภายในวงจรจะสามารถใช้ Trellis diagram ในการหาลักษณะของ Codeword ได้ดังรูปที่ 2.8 ดังนั้นข้อมูลที่ได้หลังจากการเข้ารหัสแล้วจะมีค่าเท่ากับ 00 11 10 00 01 00 00 00



รูปที่ 2.7 ไดอะแกรม Trellis ของการเข้ารหัส



รูปที่ 2.8 การใช้งานไดอะแกรม Trellis

3. การทำพังเจอร์ (Puncturing)

กระบวนการในการทำพังเจอร์นี้ มีหน้าที่ในการสร้างอัตราเร็วการเข้ารหัสที่หลากหลายตามต้องการ โดยการลบบิตออกอย่างเป็นรูปแบบ เพื่อให้ระบบมีความหลากหลายในการแก้ไขความผิดพลาดหลายระดับโดยอัตราเร็วที่แตกต่างกันที่ใช้ คือ 1/2, 2/3, 3/4 และ 5/6 โดยเวกเตอร์พังเจอร์นั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ซึ่งบิต "0" หมายถึงบิตที่ตัดทิ้ง

ตารางที่ 2.1 ค่าของเวกเตอร์พังเจอร์สำหรับอัตราเร็วที่ต่างกันของการเข้ารหัสคอนโวลูชั่น

อัตราเร็ว	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]

4. การทำ Interleaving

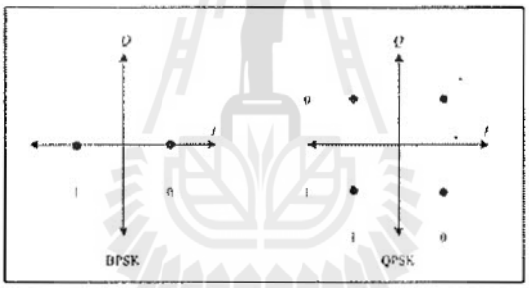
เป็นกระบวนการในการสลับย้ายตำแหน่งของข้อมูล เพื่อลดโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูล โดยไม่ต้องสูญเสียแบนด์วิดท์หรือขีดความสามารถในการรับส่งข้อมูลแต่อย่างใด สำหรับมาตรฐานไวแมกซ์ นั้นก็ได้ใช้วิธีนี้หลังจากการเข้ารหัสข้อมูลด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลยิ่งขึ้น ซึ่งการทำ Interleaving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

1) ทำการสลับหรือย้ายตำแหน่งบิตข้อมูลที่อยู่ติดกันไปไว้กับความถี่subcarrier ที่ไม่ติดกันของ OFDM ที่ใช้งานอยู่ เพื่อให้โอกาสที่จะถูกรบกวนจากความถี่อื่น ๆ ลดลงเป็นการกระจายความถี่ที่ดี และเพิ่มประสิทธิภาพในการถอดรหัสมากขึ้น

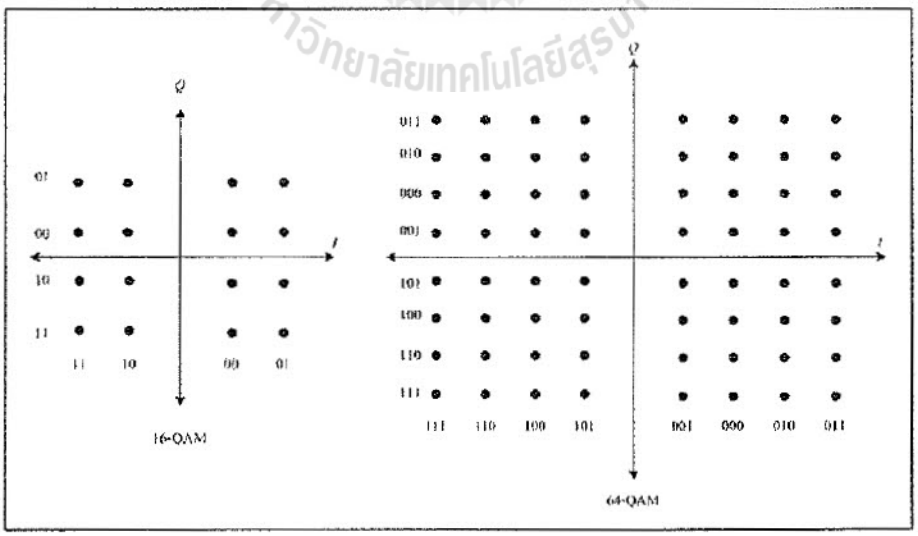
2) จากนั้นจะทำ การย้ายตำแหน่งบิตข้อมูลที่ติดกันให้ไปอยู่บนบิตที่ significant ต่างกันในการมอดูเลต เพื่อให้กระจายความเสี่ยงที่จะเกิดจากการรบกวนของสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลต เพราะโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดในแต่ละบิตของ 16-QAM และ 64-QAM จะแตกต่างกันออกไป บิตที่เป็น Most significant จะมีโอกาสเกิดความผิดพลาดได้น้อยกว่าบิตที่เป็น Least significant นั่นเอง

5.การมอดูเลชัน

หลังจากที่ผ่านการทำ interleaving ขั้นตอนต่อมาก็จะเป็นการมอดูเลตสัญญาณซึ่งในการสื่อสารแบบไร้สายนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการมอดูเลตสัญญาณ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณออกไปได้ การมอดูเลชันก็คือ การเปลี่ยนข้อมูลบิตให้มาอยู่ในรูปของแอมพลิจูดและเฟส ซึ่งถูกจัดอยู่ในรูปของเวคเตอร์เชิงซ้อน in-phase และ quadarature-phase (IQ) ซึ่งสามารถแสดงได้ในแผนภาพดวงดาว (Constellation diagram) โดยการวาด IQ สำหรับรูปแบบการมอดูเลชั่นนั้น แสดงให้เห็นถึงเวคเตอร์ที่ได้ทำการส่งออกไปสำหรับข้อมูลทั้งหมดที่รวมกัน ซึ่งวิธี Gray coding เป็นวิธีแบ่งแต่ละจุดของแผนภาพดวงดาวด้วยบิตที่แตกต่างกันเพียงบิตเดียวการเข้ารหัสนี้จะช่วยให้ BER ทั้งหมดลดน้อยลง โดยทำการลดความผิดพลาดบิตหลาย ๆ บิตที่เกิดจากความผิดพลาดของหนึ่งสัญลักษณ์ โดยมาตรฐานไวแมกซ์ใช้รูปแบบการมอดูเลชัน 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) ซึ่งรูปแบบการมอดูเลชั่นแบบต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 และ รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 แผนภาพดวงดาวของ BPSK และ QPSK



รูปที่ 2.10 แผนภาพดวงดาวของ 16-QAM และ 64-QAM

6.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 $k\ 1-2w_k$ และ $1-2\overline{w}_k$ โดย w_k คือ ข้อมูลที่เกิดจาก PRBS และ $\overline{w}_k$ คือการกลับบิตของ w_k ตำแหน่งที่ pilot แทรกอยู่นั้นคือ

$$p_{-88}=p_{-38}=p_{63}=p_{88}=1-2w_k \tag{2.10}$$

$$p_{-63}=p_{-13}=p_{13}=p_{38}=1-2\overline{w}_k \tag{2.11}$$

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

7.การใส่ Training Sequence

ในระบบไวแมกซ์นั้น ในส่วนที่เป็นพรีเอ็มเบิล (Preamble) ของข้อมูลขาขึ้นและขาลงจะประกอบด้วย Training Sequence ซึ่งสามารถแบ่ง Training Sequence ออกเป็น 3 ประเภท โดย Training Sequence นี้จะหาได้จากข้อมูลทางความถี่ ซึ่งข้อมูลนี้มีจำนวน 201 subcarrier (P_{ALL}) ในการส่งข้อมูลขาลงใช้พรีเอ็มเบิลแบบสั้น 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 ต้องใช้สายอากาศหลายต้น ดังนั้น จึงต้องส่งพรีเอ็มเบิลไปทุก ๆ สายอากาศพร้อม ๆ กัน

8.การรวมข้อมูล (Assembler)

ในระบบไวแมกซ์มี 256-point FFT ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ ข้อมูล pilot และจุดศูนย์ (null) 200 subcarrier ใช้สำหรับข้อมูลและ 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 ซึ่งแทรกเข้าไปที่

ตำแหน่ง subcarrier ที่ 13 38 63 88 114 139 164 และ 189 จากนั้นก็จะแบ่ง guard carrier ใส่ไว้ข้างหน้าและข้างหลังของข้อมูล

9. การใส่ guard band

หลังจากที่ผ่านกระบวนการการรวมข้อมูล ซึ่งมีข้อมูล 201 subcarrier ส่วนอีก 55 subcarrier นั้นเป็นส่วนที่ไม่มีข้อมูล และเป็น 0 ทั้งหมด ซึ่งหน้าที่ของส่วนนี้ก็คือช่วยลดการเกิดความถี่รบกวนให้แก่ช่องสัญญาณข้าง ๆ

10. การทำกระบวนการ IFFT

กระบวนการทำ IFFT นี้ถูกใช้เพื่อทำการสร้างสัญญาณไปอยู่ในปริภูมิเวลา โดยสัญลักษณ์ที่ได้รับหลังจากการมอดูเลชั่นแล้วนั้นจะถูกมองอยู่ในรูปแอมพลิจูดของสัญญาณของจุดศูนย์กลางของไซนูซอยด์ หมายความว่าแต่ละตัวอย่างที่ไม่ต่อเนื่องก่อนการใช้อัลกอริทึม IFFT ที่สอดคล้องกับแต่ละพาห์ย่อย

การทำ IFFT เป็นวิธีการที่รวดเร็วในการมอดูเลชั่นแต่ละพาห์ย่อยแบบขนาน ซึ่งเหมือนกับการใช้ตัวมอดูเลตและตัวดีมอดูเลตหลายตัว ดังนั้นกระบวนการ IFFT จึงเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาจำนวนมาก ซึ่งก่อนที่จะทำการจำลองแบบนั้นจะต้องมีการจัดเรียงพาห์ย่อยก่อน ซึ่งสมการในการทำ IFFT สามารถเขียนได้เป็น

$$x[n]=\frac{1}{\sqrt{N}}\sum_{k=0}^{N-1}X[k]e^{j2\pi kl/N}, n=0,1,...,N-1 \qquad (2.12)$$

11. การเสริมสร้าง cyclic prefix

การจะทำให้สัญญาณ OFDM มีความทนทานต่อการประวิงเวลาของสัญญาณหลายวิถีนั้น 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

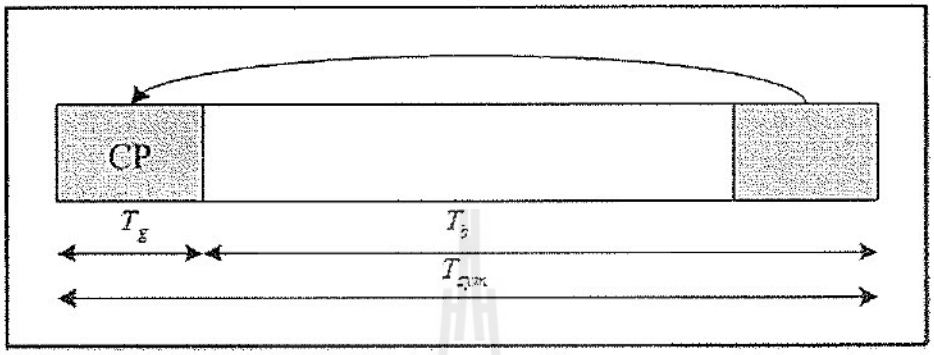
$$T_{sym}=T_b+T_g \qquad (2.13)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โดย T_{sym} คือ คาบทั้งหมดของสัญลักษณ์ OFDM

T_b คือ คาบของสัญลักษณ์ข้อมูลที่ใช้

T_g คือ คาบของ cyclic prefix



รูปที่ 2.11 การใส่ cyclic prefix ในสัญลักษณ์ของ OFDM

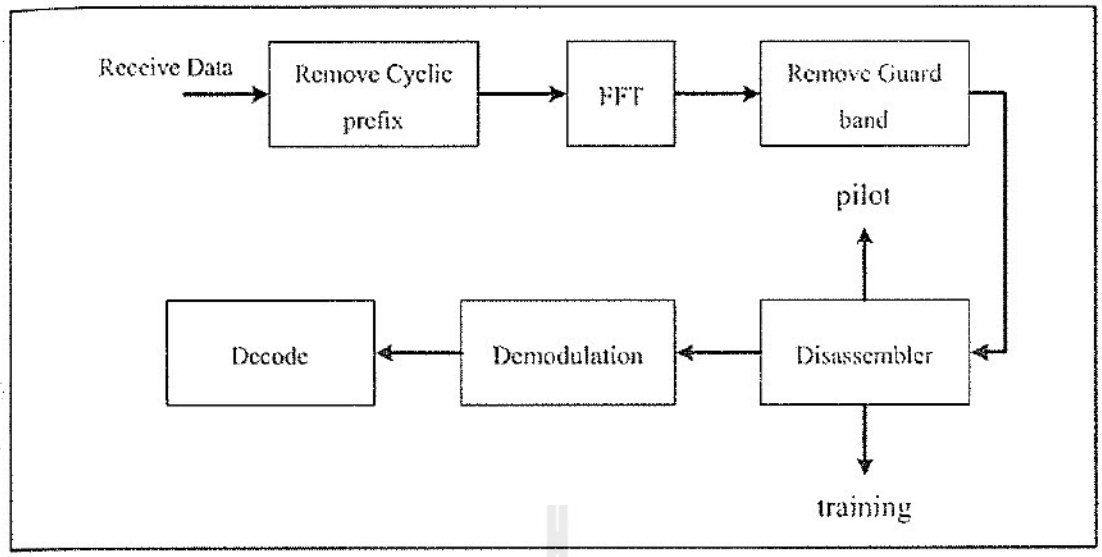
เมื่อ G คือ ค่าที่กำหนดอัตราส่วนความยาวของ cyclic prefix เพื่อกำจัดการรบกวนระหว่างสัญลักษณ์ และต้องคำนึงถึงช่วงเวลาของ cyclic prefix ว่าจะต้องมีเวลายาวกว่าการกระจายตัวของช่องสัญญาณ นอกจากนี้แล้วก็ควรจะมีขนาดที่เล็กที่สุดเท่าที่เป็นได้ เพราะมันจะใช้ค่านี้ในการส่งสัญญาณ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว G จะมีค่าน้อยกว่า 1/4 สามารถแสดงได้เป็น

$$G = \frac{T_g}{T_b} \tag{2.14}$$

ภาครับ

ภาครับในระบบไวแมกซ์แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งขั้นตอนแรกจะเป็นการเอาส่วนที่เป็น cyclic prefix ออก จากนั้นก็ทำกระบวนการ FFT (Fast Fourier Transform) ต่อจากนั้นก็นำข้อมูลที่ได้ มาตัดส่วน guard carrier ออก แล้วก็แยกข้อมูลที่มี pilot ออกจากกัน ส่วนสุดท้ายก็จะเป็นการถอดรหัส (decoder) การทำกระบวนการ FFT หลังจากข้อมูลที่ถูกตัดส่วน cyclic prefix ออก จากนั้นก็ทำกระบวนการ FFTซึ่งเป็นการทำกลับจากกระบวนการ IFFT

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.12แผนภาพแสดงภาครับของระบบไวแมกซ์

การตัดส่วน guard band ออก

หลังจากทำกระบวนการ FFT แล้ว จากนั้นจะตัดส่วนที่เป็น guard band ออกเพื่อจะได้ข้อมูลออกมา

การแยกข้อมูลออก (Disassembler)

หลังจากได้ข้อมูลออกมา จะต้องแยกข้อมูลนี้ออกอีก เนื่องจากข้อมูลส่วนนี้มีข้อมูล 3 ส่วนรวมกันอยู่ คือ ข้อมูล pilot และ training

การประมาณช่องสัญญาณ

ในการส่งข้อมูลแบบไร้สาย ข้อมูลที่ถูกส่งจากภาคส่งย่อมมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านช่องสัญญาณ ซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวน ส่วนที่ภาครับยังได้รับผลกระทบจากสัญญาณหลายวิถี ซึ่งมีสัญญาณมาถึงที่ภาครับหลาย ๆ สัญญาณพร้อม ๆ กัน ดังนั้นที่ภาครับจึงต้องมีวิธีการในการหาสัญญาณที่ถูกต้อง ในการหาสัญญาณที่ถูกต้องนี้จำเป็นต้องรู้ Channel Impulse Response (CIR) ซึ่งใช้ในการประมาณช่องสัญญาณ โดยปกติการประมาณช่องสัญญาณจะสามารถรู้จากลำดับบิตที่ส่งมาจากภาคส่ง ซึ่งจะส่งมาเป็นระยะ ๆ โดยจะนำมาเปรียบเทียบกับ CIR

การดีมอดูเลต

การดีมอดูเลตเป็นการเปลี่ยนจากสัญญาณในลักษณะรูปคลื่น เป็นสัญญาณในลักษณะตัวเลขหรือชุดของตัวเลข ซึ่งจะนำมาประมาณเป็นข้อมูลไบนารีหรือสัญลักษณ์ M-ary ต่อไป

การถอดรหัส

ในส่วนนี้เป็นส่วนสุดท้ายในกระบวนการทางภาครับ เป็นการถอดรหัสเพื่อจะได้ข้อมูลที่ส่งมาจากภาคส่ง ซึ่งจะถอดรหัส 3 รูปแบบคือ

การ Deinterleaving

การ Deinterleaving เป็นการจัดเรียงบิตใหม่ให้ถูกต้องเหมือนเดิม ซึ่งทำกลับกันจากกระบวนการ Interleaving

การถอดรหัสแบบ Viterbi

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

Hard decision สำหรับการทำงานของวงจรถอดรหัสที่ใช้กระบวน การตัดสินใจแบบ Hard decision นั้น จะเป็นการพิจารณาข้อมูลที่รับเข้ามาโดยการพิจารณาว่าข้อมูลที่รับเข้ามาในแต่ละบิตนั้น มีค่าของข้อมูลเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น

Soft decision การถอดรหัสที่มีการใช้กระบวนการตัดสินใจแบบ Soft decision จะเป็นการพิจารณาถึงข้อมูลที่รับเข้ามาได้โดยการทำการตัดสินใจระดับของข้อมูลที่รับเข้ามาได้โดยการแบ่งระดับของสัญญาณที่ใช้ในการคำนวณหาค่าเมตริกที่มากกว่า 2 ระดับ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นั้น จะได้ข้อมูลและรายละเอียดของข้อมูลที่ส่งมาที่มากกว่ากรณีของ Hard decision ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการตัดสินใจนั้น จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าเมตริก เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่รับเข้ามา ณ เวลานั้น ๆ กับข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางต่าง ๆ ณ เวลานั้น ซึ่งจะมีรูปแบบที่ใช้ในการคำนวณที่แตกต่างกันไป

อัลกอริทึมแบบ Viterbi โดยในการทำงานต่าง ๆ นั้นจะต้องมีการคำนวณหาความแตกต่าง ระหว่างข้อมูลที่รับเข้ามากับค่าที่อยู่ในเส้นทางต่าง ๆ เพื่อใช้ในกระบวนการตัดสินใจ โดยกระบวนการที่ใช้ในการทำการค้นหาเส้นทางที่อยู่ใน Trellis diagram ที่มีลักษณะกลี้เคียงกับข้อมูลที่รับได้มากที่สุด เพื่อจะได้นำข้อมูลที่ได้จากเส้นทางนั้นมาคำนวณหาค่าของข้อมูลที่ถูกส่งมา โดยในกระบวนการในการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้อัลกอริทึมแบบ Viterbi นั้น จะมีขั้นตอนดังนี้

1 พิจารณาแบ่งข้อมูลที่รับเข้ามาออกเป็นข้อมูลย่อย ๆ จำนวน m ช่วง ซึ่งแต่ละช่วงนั้นมีขนาดของข้อมูลเท่ากับ n_0 บิต

2 ทำการวาด Trellis diagram ที่มีจำนวนสถานะ ในการทำงานเท่ากับ m สถานะ โดยจะมีการพิจารณาเฉพาะเส้นทางที่มีความเป็นไปได้ว่าจะถูกส่งมาเท่านั้น โดยสำหรับที่สถานะของ Trellis diagram ตั้งแต่ L-1 ขึ้นไปนั้น ให้วาดเส้นทางที่พุ่งเข้าหาสภาวะของวงจรที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด

3 กำหนดค่าตัวแปร l = 1 และ ทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรเมตริก ในสภาวะเริ่มต้นที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด ให้มีค่าของเมตริกเท่ากับ 0

4 ทำการคำนวณหาค่าความแตกต่างของข้อมูล ระหว่างข้อมูลที่รับได้ชุดที่ 1 กับข้อมูลในเส้นทางในการเปลี่ยนแปลงสถานะใน Trellis diagram จากสถานะที่ l ไปเป็น l+1

5 นำค่าที่คำนวณได้นั้นไปบวกกับค่าเมตริกสะสมของสถานะ l เพื่อหาค่าของเมตริกสะสมในสถานะที่ l+1 เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดในการเปลี่ยนแปลงข้อมูลไปยังสถานะนั้น ๆ โดยในแต่ละสถานะนั้น จะมีจำนวนเส้นทางทั้งหมด จำนวน $2k_0$ เส้นทางที่จะพุ่งเข้าสู่สถานะเดียวกัน

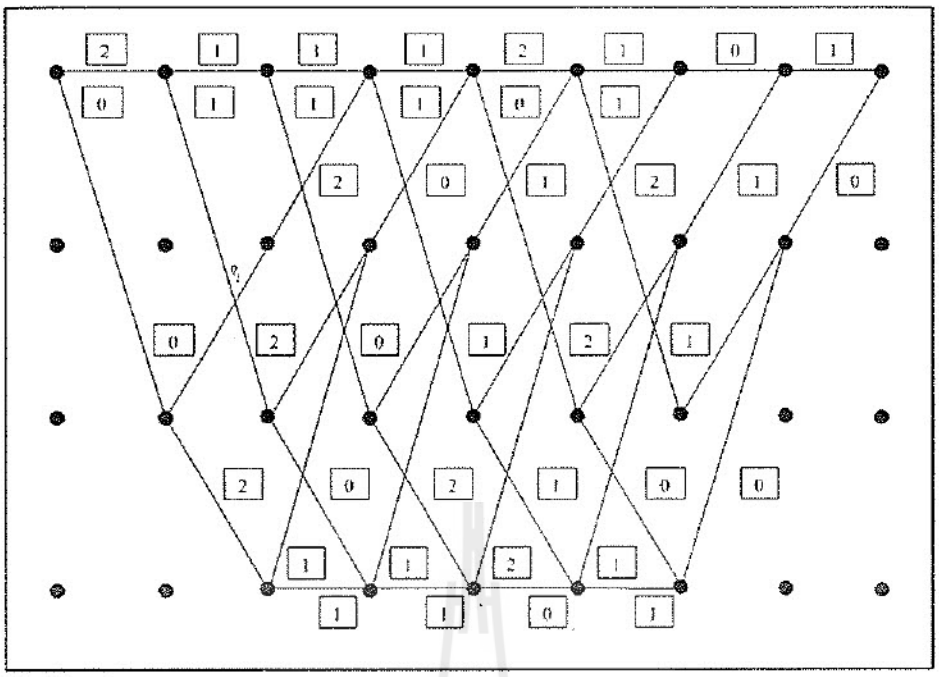
6 พิจารณา ณ ตำแหน่งในสถานะที่ l+1 ในแต่ละสถานะนั้นทำการเลือกเส้นทางที่มีค่าเมตริกสะสมที่มีค่าน้อยที่สุดที่จะพุ่งเข้าหาในแต่ละสถานะ โดยเส้นทางที่ถูกเลือกนั้นจะถูกเรียกว่า Survivor ซึ่งจะเป็นเส้นทางที่ถูกเก็บไว้ทำการคำนวณในแต่ละสถานะต่อไป และสำหรับเส้นทางอื่น ๆ ที่ไม่ได้ถูกเลือกนั้น จะถูกเรียกว่า Forgetting โดยจะถูกลบทิ้งออกไปจากระบบการตัดสินใจ

7 ถ้าหากว่า l นั้นมีค่าเท่ากับ m แล้ว ให้ทำงานในขั้นตอนต่อไปได้แต่ถ้ายังมีค่าน้อยกว่า จะต้องมีการเพิ่มค่า l ขึ้นไปอีก 1 จากนั้นจึงกลับไปทำงานในขั้นตอนที่ 4 ใหม่

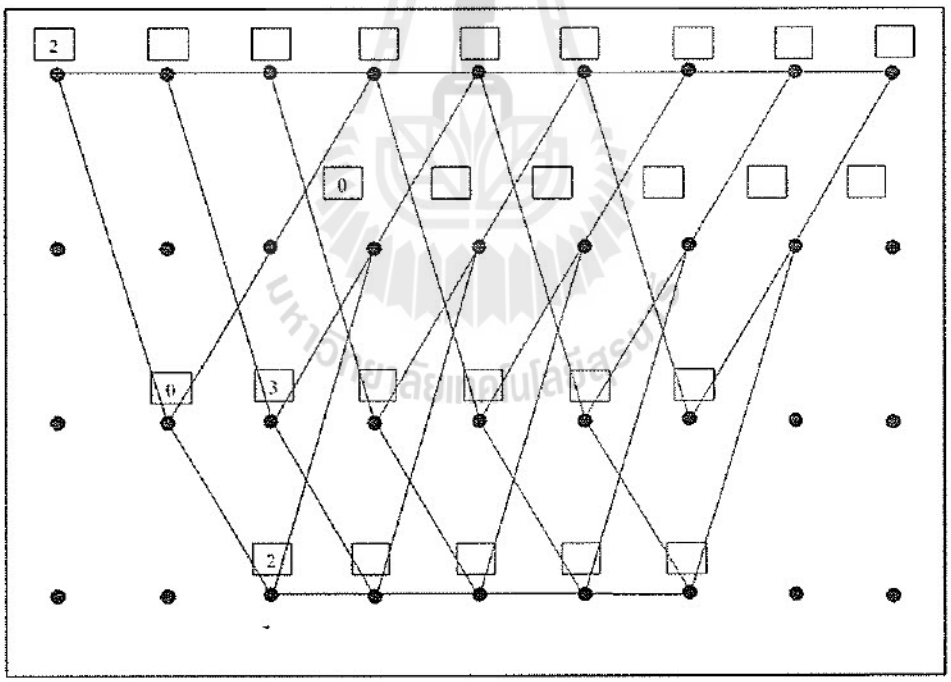
8 แต่ถ้ายังมีค่าน้อยกว่า จะต้องมีการเพิ่มค่า 1 ขึ้นไปอีก 1 จากนั้นจึงกลับไปทำงานในขั้นตอนที่ 4 ใหม่ เริ่มต้นพิจารณา ณ สถานะที่ m+1 ที่มีสภาวะของข้อมูลสถานะเป็น 0 ทั้งหมด ทำการเลือกเส้นทางที่เป็น Survivor ซึ่งเป็นเส้นทางที่ถูกเลือกที่เหลืออยู่ย้อนกลับไปจนกระทั่งถึงสภาวะเริ่มต้น ของการทำงานที่มีสภาวะในการทำงานเป็น 0 ทั้งหมด ซึ่งเส้นทางที่ได้นั้นจะเป็นเส้นทางที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่รับมามากที่สุด ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาข้อมูลข่าวสารที่ถูกส่งมา โดยข้อมูลข่าวสารที่จะถูกส่งออกไปจากภาคถอดรหัสนั้นจะเป็นการส่งข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในเส้นทางส่งออกไป ยกเว้นข้อมูล 0 จำนวน $k_0(L-1)$ บิต ที่อยู่ท้ายสุดนั้นจะถูกตัดทิ้งไป

ตัวอย่างเช่นในกรณีวงจรถอดรหัสสำหรับข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสด้วยวงจรในรูปที่ 2.5 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 0 1 จากนั้นพิจารณา ในกรณีที่ข้อมูลของ codeword ที่รับได้ที่ปลายทางนั้นเกิดความผิดพลาดในการตีความขึ้นจำนวน 1 บิต จึงทำให้ข้อมูลที่รับได้มีค่าเป็น 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 1 ดังนั้นในการถอดรหัสโดยใช้วิธีการ Viterbi นั้นจะทำงานโดยเริ่มต้นจากการนำข้อมูลที่ได้มาทำการแบ่งข้อมูลออกชุด ๆซึ่งมีขนาดเท่ากับจำนวนของ codeword ที่วงจรเข้ารหัสส่งออกมาในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 2 ดังนั้นข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็นชุดได้ดังนี้ 11 01 10 01 11 10 00 01 ซึ่งในการทำงานนั้น จะมีการพิจารณาข้อมูลทีละชุดเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางต่าง ๆ ใน Trellis diagram โดยการทำงานในช่วงแรกนั้นจะเป็นการหาความแตกต่างระหว่างข้อมูลที่รับได้และข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางต่าง ๆ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นการนำข้อมูลที่รับได้ในแต่ละช่วงเวลามาทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางต่าง ๆ โดยในช่วงเวลาที่ 1 นั้นจะเป็นการนำข้อมูล 11 ที่รับได้มาทำการเปรียบเทียบเพื่อหาจำนวนบิตของข้อมูลที่มีความแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นทางที่ลากจากโหนดเริ่มต้นที่มีข้อมูลเป็น 0

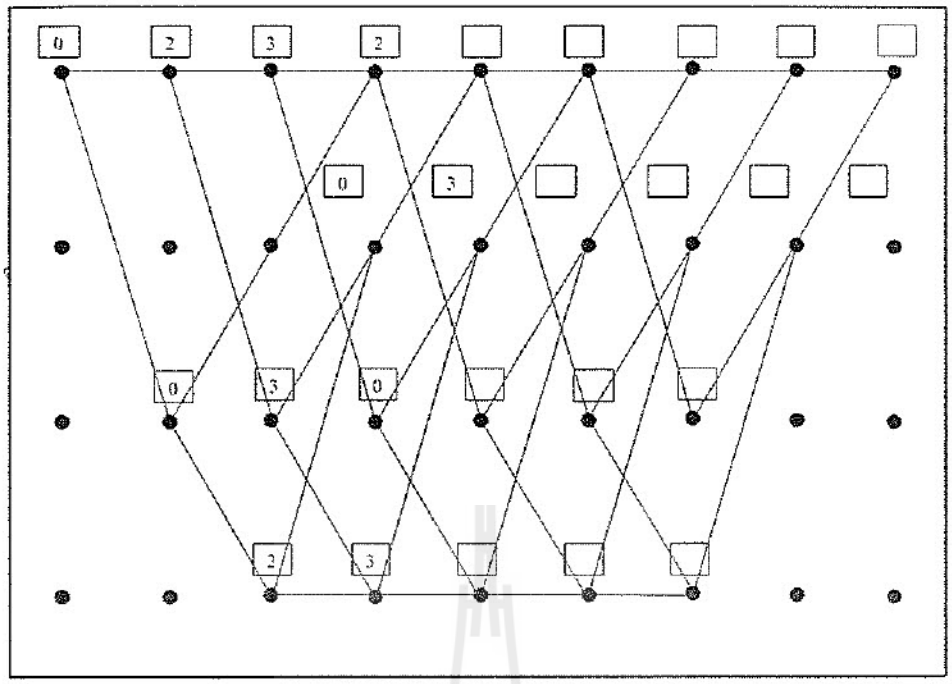
ทั้งหมด มายังโหนดที่มีข้อมูลเป็น 00 ในช่วงเวลาถัดไปซึ่งมีข้อมูลในเส้นทางเป็น 0/00 ซึ่งจะพบว่ามีค่า codeword ที่แตกต่างกันจำนวน 2 บิต และเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นทางที่ลากไปยังโหนดที่มีข้อมูลเป็น 10 จะพบว่ามีความแตกต่างเท่ากับ 0 บิต และในช่วงเวลาที่ 2 จะเป็นการนำข้อมูล 01 ที่รับได้ ณ เวลานั้นมาทำการเปรียบเทียบกับเส้นทางต่าง ๆ ทั้งหมด ณ เวลานั้น ๆ และจะมีการคำนวณเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบทุกเส้นทาง จากนั้นในการทำขั้นตอนต่อไปจะเป็นการคำนวณหาค่าเมตริกสะสมของเส้นทาง โดยสำหรับ 2 ช่วงเวลาแรกนั้นจะมีการทำงานดังรูปที่ 2.14 ในการทำงานนั้นจะเริ่มต้นที่โหนด 00 ที่อยู่ซ้ายบนสุดของรูป ซึ่งกำหนดค่าเมตริกใหม่เป็น 0 จากนั้นจึงพิจารณาโหนดถัดไปที่เชื่อมต่อกับโหนด 00 ซึ่งมี 2 โหนดด้วยกัน โดยจะทำการนำเมตริกที่อยู่ในเส้นทางนั้นมาบวกกับเมตริกสะสมที่ถูกเก็บไว้ยังโหนดที่พิจารณา ซึ่ง ณ เวลานี้คือ โหนด 00 ที่อยู่ซ้ายบนสุด และผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะถูกเก็บไว้ในโหนดที่อยู่ปลายทางของเส้นทางนั้น ๆ ซึ่งจะทำงานเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีการพบว่า มีเส้นทางมากกว่า 1 เส้นทาง ที่พุ่งเข้าหาโหนดเดียวกัน ดังเช่นในช่วงเวลาที่ 3 จนถึงช่วงเวลาที่ 8 ซึ่งเมื่อมีเหตุการณ์นี้เกิดขึ้น จะต้องมีกระบวนการตัดสินใจเพื่อเลือกเส้นทางที่ใช้ในการคำนวณเฉพาะเส้นทางที่มีค่าเมตริกสะสมน้อยที่สุดเท่านั้นมาพิจารณา โดยในช่วงเวลาที่ 3 นั้นจะมีการคำนวณดังรูปที่ 2.15 สำหรับการพิจารณาค่าเมตริกสะสมที่โหนด 00 ในช่วงเวลาที่ 3 นั้น จะเป็นการตัดสินใจเลือกเส้นทางระหว่างเส้นทางที่มาจากโหนด 00 และโหนด 01 ของช่วงเวลาที่ 2 ซึ่งจะทำการเลือกเส้นทางที่มีค่าเมตริกสะสมน้อยที่สุดเท่านั้น โดยสำหรับเส้นทางที่มาจากโหนด 00 จะมีค่าเมตริกสะสมเท่ากับ 3+1 เท่ากับ 4 และเส้นทางที่มาจากโหนด 01 มีค่าเท่ากับ 0+2 เท่ากับ 2 ดังนั้นจึงเลือกเส้นทางที่มาจากโหนด 01 มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งจะมีการทำงานในลักษณะนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งคำนวณเมตริกสะสมครบทุกช่วงเวลา จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการค้นหาเส้นทางโดยเริ่มต้นที่โหนด 00 ที่อยู่ขวาสุดของรูป จากนั้นจึงทำการมองย้อนกลับในโหนดที่อยู่ซ้ายมือที่มีเส้นทางต่อกับโหนด 00 โดยจะทำการเลือกเส้นทางที่ต่อกับโหนดที่มีค่าเมตริกสะสมที่มีค่าน้อยที่สุดเพื่อเลือกเป็นเส้นทางที่ใช้งาน หลังจากนั้นจึงย้ายจุดที่พิจารณาไปยังโหนดถัดไปทางซ้ายมือ ที่อยู่ปลายทางของเส้นทางที่เลือกไว้ ซึ่งจะมีกระบวนการตัดสินใจเช่นเดิมซ้ำอีกครั้งโดยจะมีการทำงานเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนมีการค้นหาเส้นทางครบทุกช่วงเวลา ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.16 หลังจากนั้น จะเป็นการนำข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางที่ถูกเลือกมาใช้ในการหาข้อมูลดิบที่ส่งมา โดยการพิจารณาถึงข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางส่วนต่าง ๆ ซึ่งจากรูปนั้นจะได้ว่า ข้อมูลดิบที่ถอดรหัสได้จะมีค่าเท่ากับ 1 0 1 0 1 1 0 0 โดยใน 2 บิตสุดท้ายจะไม่ถูกนำมาพิจารณาเนื่องจากเป็นข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามาเพื่อใช้ในการคำนวณ ดังนั้นข้อมูลดิบที่ได้จากการถอดรหัสจะมีค่าเท่ากับ 1 0 1 0 1 1



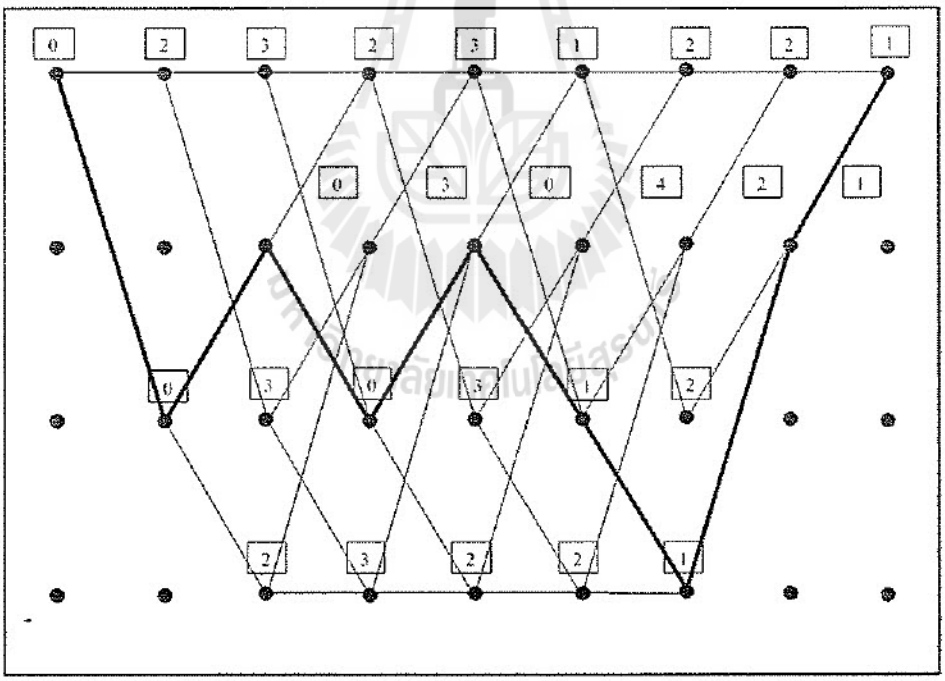
รูปที่ 2.13 การถอดรหัสแบบ Viterbi (1)



รูปที่ 2.14 การถอดรหัสแบบ Viterbi (2)



รูปที่ 2.15 การถอดรหัสแบบ Viterbi (3)



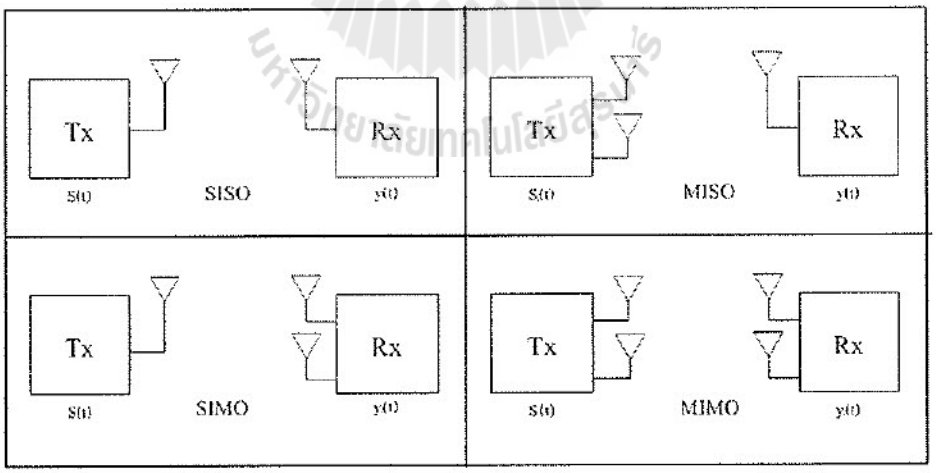
รูปที่ 2.16 การถอดรหัสแบบ Viterbi (4)

การถอดรหัสแบบรีดโซโลมอน

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

2.4 เทคนิคไมโม

การวิจัยในระบบการสื่อสารไร้สายในช่วงแรกนั้น จะเป็นการส่งผ่านข้อมูลในระบบโดยใช้สายอากาศที่ภาครับและภาคส่งเพียงแค่ต้นเดียว (Single -Input Single-Output system : SISO) ต่อมาได้มีการศึกษาและพัฒนางานวิจัย ระบบการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศ (Multiple Antennas) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งจะพบว่า เมื่อมีการส่งข้อมูลแบบสายอากาศหลายต้นนี้ ทำให้ความจุในระบบเพิ่มขึ้น สามารถรับและส่งข้อมูลได้มากขึ้น โดยในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ ระบบที่ใช้จำนวนสายอากาศภาคส่งหนึ่งต้น และ จำนวนสายอากาศภาครับหลายต้น (Single-Input Multiple-Output system : SIMO) ระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหลายต้น และ สายอากาศภาครับหนึ่งต้น (Multiple-Input Single-Output system : MISO) สุดท้ายคือ ระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศภาคส่งหลายต้น และสายอากาศภาครับหลายต้น หรือที่เรียกว่า ไมโม (Multiple-Input Multiple-Output system : MIMO)



รูปที่ 2.17 การรับและส่งข้อมูลแบบสายอากาศต้นเดียว และสายอากาศหลายต้น

ในระบบทั้ง 3 รูปแบบนี้ ระบบสายอากาศไมโม นี้จะให้สมรรถนะทางด้านความจุช่องสัญญาณสูงที่สุด จึงมีการวิจัยและพัฒนารูปแบบ เพื่อนำมาใช้งานแทนระบบที่ใช้สายอากาศภาคส่งต้นเดียว และสายอากาศภาครับต้นเดียว ซึ่งทำให้เกิดการพัฒนาสมรรถนะของระบบ ดังนี้

1.อัตราการขยายแถวลำดับ (Array Gain)

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

2.อัตราการขยายไดเวอร์ซิตี้ (Diversity Gain)

ค่ากำลังของสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนตามการลดทอนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ เทคนิคไดเวอร์ซิตี้จึงเป็นวิธีที่มีประโยชน์มากในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจางหายนั้น ๆ หรือที่เรียกว่า เฟดดิง (fading) ดังนั้นระบบสื่อสารที่ใช้สายอากาศส่งหลายต้น และสายอากาศรับหลายต้น (MIMO System) ที่ใช้สายอากาศภาคส่ง M_T ต้น และสายอากาศภาครับ M_R ต้น ที่มีการจางหายหรือเฟดดิงเป็นอิสระต่อกัน เมื่อส่งสัญญาณออกไปจะทำให้ภาครับสามารถรวมสัญญาณที่เข้ามาได้ โดยลดปัญหาเรื่องของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของสัญญาณในระบบออกไปได้มาก เมื่อเทียบกับระบบสื่อสารที่ใช้สายอากาศที่ภาครับและภาคส่งเพียงแค่ต้นเดียว (SISO System)

3.กำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (Spatial Multiplexing Gain)

ช่องสัญญาณในระบบสื่อสารที่ใช้สายอากาศส่งหลายต้น และสายอากาศรับหลายต้น นั้นจะมีการเพิ่มขึ้นของความจุช่องสัญญาณในระบบเป็นเส้นตรง และมีค่าเท่ากับค่าที่น้อยที่สุดระหว่างจำนวนสายอากาศที่ภาคส่งและภาครับ โดยไม่มีผลต่อค่ากำลังงาน หรือการใช้แบนด์วิดท์ ค่ากำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (Spatial Multiplexing Gain) จะส่งผลให้ความจุของช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการส่งแบบหลายระยะทางนั้น ทางภาคส่งจะทำการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกันออกจากสายอากาศแต่ละต้น ภายใต้เงื่อนไขของช่องสัญญาณที่มีการแพร่กระจายของสัญญาณมากพอ (rich scattering) ทำให้ทางภาครับสามารถแยกสัญญาณต่าง ๆ ออกจากกันได้

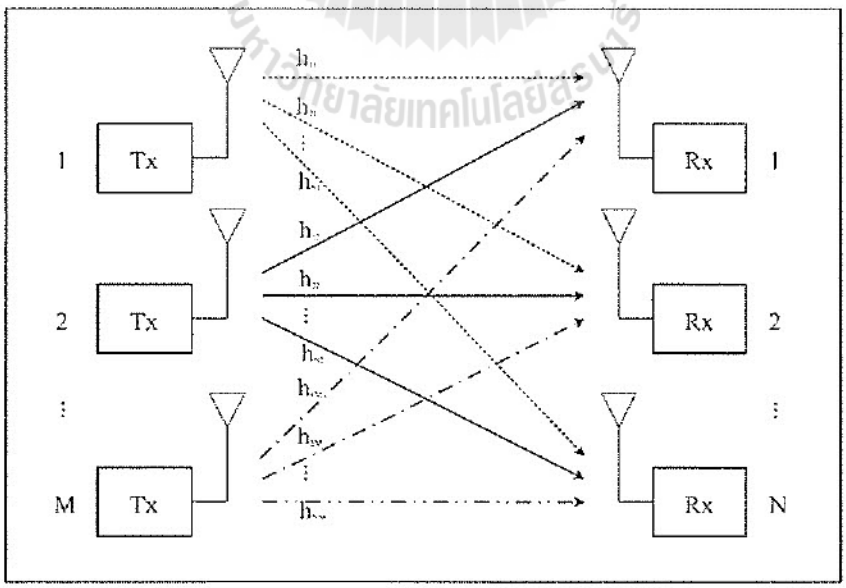
4. การลดการแทรกสอด (interference reduction)

การแทรกสอดแบบร่วมภายในช่องสัญญาณ (co-channel interference) เกิดจากการใช้ความถี่ซ้ำ (frequency reuse) เมื่อมีการใช้สายอากาศหลาย ๆ ต้นจะเกิดความแตกต่างระหว่างระยะห่างของสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่อยู่ในช่องสัญญาณข้างเคียง จึงทำให้สามารถลดการแทรกสอดได้

2.4.1 หลักการทำงานของระบบไมโม

ในระบบรับส่งสัญญาณไร้สายทั่วไป การส่งสัญญาณไร้สายไปที่ความถี่เดียวกันจะทำให้เกิดการรบกวนกัน หากเป็นกรณีของสถานีวิทยุ FM นั้น อาจพบว่าบางช่วงก็รับฟังได้ บางช่วงก็รับฟังไม่ได้ นั่นเกิดจากการตอบสนองของคลื่นความถี่นั้นเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งระบบไมโม (MIMO System) นั้นก็ใช้สายอากาศส่งและสายอากาศรับหลายชุดด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 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, ..., N และ j = 1, 2, 3,..., M ดังนั้นสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศต้นที่ i ของภาครับคือ y_i สามารถแสดงได้ดังนี้

$$y_i = \sum_{j=1}^{M} h_{ij} x_j + n_i \qquad (2.16)$$



รูปที่ 2.18 ระบบไมโมที่ประกอบไปด้วยสายอากาศส่ง M ต้น และ สายอากาศรับ N ต้น

เพื่อความสะดวกในการพิจารณาเราสามารถเขียนสมการที่ 2.16 ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \cdots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \cdots & h_{2N} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & \cdots & h_{3N} \\ . & . & . & \cdots & . \\ . & . & . & \cdots & . \\ h_{N1} & h_{N2} & h_{N3} & \cdots & h_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_N \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

สามารถเขียนให้กระชับได้เป็น

$$y = Hx + n \tag{2.18}$$

การวัดค่าตอบสนองของช่องสัญญาณนั้น ทำได้โดยการวัดความแรงของสัญญาณที่ได้ ในช่วงต้นของเฟรม คือ Preamble ซึ่งจะประกอบไปด้วย Training Sequence จำนวนหนึ่งซึ่งความแม่นยำของการวัดความแรงของสัญญาณนั้น ก็สามารถนำมาคำนวณกลับมาเป็นค่าการตอบสนองของช่องสัญญาณ ซึ่งจะนำมาใช้เพื่อแยกแยะสัญญาณที่ส่งออกมาจากสายอากาศหลาย ๆ ต้น

ในการทำงานของภาครับระบบไมโมจะเริ่มจากการวัดค่า y_0, y_1, y_2 ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งครบ y_N ค่านั่นก็ คือ การวัดระดับสัญญาณของสายอากาศภาครับทั้งหมด N ต้น ที่มีจากช่วงต้นของเฟรม 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

ปัญหาของระบบไมโมที่จะทำให้การสื่อสารล้มเหลว เนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนสูง หรือบางช่วงที่มีสัญญาณสะท้อนมาจากวัตถุที่เป็นโลหะ เช่น หลังคาเหล็ก ม่าน หรือตู้เหล็กที่ใช้เก็บเอกสาร จะทำให้ค่า y_N ที่วัดได้ผิดเพี้ยนไป นั่นหมายถึงการถอดสมการเพื่อแยกแยะหาค่า H นั้นอาจจะทำไม่ได้ ซึ่งก็ยังมีวิธีแก้ไข คือ การใช้กระบวนการ CSI (Channel State Information) ซึ่งเป็นการแจ้งสภาพของช่องสัญญาณร่วมกันระหว่างภาครับและภาคส่ง ซึ่งจะช่วยให้ระบบไมโมกลับมาทำงานได้ หรือการปรับลดความเร็วในการส่งข้อมูลลงก็ทำให้ระบบไมโมกลับมาทำงานได้เช่นกัน

2.5 เทคนิคการส่งสัญญาณด้วยระบบไมโม

วิธีการเพิ่มคุณภาพและระดับสัญญาณด้วยสายอากาศหลาย ๆ ต้นนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีและให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจจะแบ่งเทคนิคการส่งสัญญาณด้วยระบบไมโมออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ ระบบไมโมแบบวงเปิด (Opened-loop MIMO System) และ ระบบไมโมแบบวงปิด (Closed-loop MIMO System) ซึ่ง 2 วิธีนี้ต่างกันตรงที่มีการนำข้อมูลการรับสัญญาณของอีกด้านหนึ่งหรือยูสเซอร์ มาใช้ในการปรับแต่งกระบวนการปรับแต่งสัญญาณและการแพร่กระจายสัญญาณเพื่อให้ได้ระดับสัญญาณและคุณภาพที่มากขึ้น โดยระบบไมโมแบบวงเปิดจะไม่มีการรับสัญญาณของยูสเซอร์มาใช้ปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณ แต่ระบบไมโมแบบวงปิดจะมีการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณจากข้อมูลของผู้ใช้งาน ซึ่งทั้ง 2 เทคนิคนี้จะถูกนำไปใช้งานในมาตรฐาน IEEE 802.16 ด้วย โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาเทคนิคการส่งสัญญาณด้วยระบบไมโมแบบวงเปิด

2.5.1 ระบบไมโมแบบวงเปิด

สำหรับเทคนิคการส่งสัญญาณระบบไมโมแบบวงเปิดนั้น ก็จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน ถ้าเรียกตามมาตรฐานไวแมกซ์ก็คือ รูปแบบ Matrix A หรือ การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และ รูปแบบ Matrix B หรือ การมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง

1. การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา

เทคโนโลยีที่ใช้การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา (Space Time Coding : STC) เป็นเทคโนโลยีแบบ Spatial diversity โดยอาศัยชุดของสายอากาศหลายต้นวางในระยะห่างที่เหมาะสม และส่งข้อมูลซ้ำ ๆ ออกไปยังปลายทางที่มีสายอากาศรับหลายต้นเช่นกัน ซึ่งเทคนิคนี้จะใช้ความถี่ได้เต็มประสิทธิภาพเนื่องจากใช้ความถี่เดียวกันในการส่งสัญญาณไร้สายออกไปจากสายอากาศหลายต้นพร้อม ๆ กันโดยไม่ทำให้เกิดการรบกวนกัน ซึ่งเทคนิคนี้จะทำการต่อสู้กับปัญหาที่เกิดขึ้นในการรับและส่งสัญญาณไร้สายโดยเฉพาะ หรือปัญหาที่เรียกว่า Multipath fading ปัญหาในเรื่องของ Multipath fading เป็นปัญหาการสื่อสารไร้สายที่แพร่กระจายออกไปเมื่อส่งสัญญาณไปยังปลายทาง แต่ด้วยการแพร่กระจายออกไปนั้นสัญญาณก็จะออกไปในหลายทิศทาง สัญญาณที่ถูกส่งออกไปก็อาจจะไปกับกระทบกับสิ่งต่าง ๆ รอบตัว เช่น ตึกรามบ้านช่อง ต้นไม้ เป็นต้น การสะท้อนของสัญญาณไปในทิศทางต่าง ๆ มีบางส่วนที่สะท้อนแล้วมารวมกับสัญญาณที่ไม่สะท้อน และพุ่งตรงไปยังยูสเซอร์ที่รับสัญญาณนั้น ซึ่งการรวมกันของสัญญาณก็อาจจะมีทั้งเข้ามารวมกันเพื่อเสริมหรือหักล้างกัน ทำให้สัญญาณปลายทางที่รับได้ผิดเพี้ยนไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะทางที่สัญญาณนั้นเดินทางและเฟสของสัญญาณที่เข้ามา ดังนั้นหากมีการวางสายอากาศต้นที่สองซึ่งอยู่ห่างออกไปจากที่เคยหักล้างกันก็อาจจะรวมกันในลักษณะแตกต่างกัน ทำให้สัญญาณที่รับได้นั้นดีขึ้นจึงเกิดแนวคิดของ

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 ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงคุณภาพของสัญญาณที่เข้ามาและนำมารวมเข้าด้วยกัน ช่วยให้สัญญาณที่เข้ามามีคุณภาพดีและไม่ต้องกังวลหากสัญญาณที่เข้ามาจะมีปัญหา เพราะมีอีกสัญญาณหนึ่งคอยช่วยเหลือ

เมื่อมีภาครับสัญญาณก็ต้องมีภาคส่งสัญญาณด้วยเช่นกัน ดังนั้นก็จะมีกรณีของ Transmit diversity มาทำงานร่วมด้วย โดยมีเทคนิคในการเข้ารหัสที่นิยมใช้ดังนี้

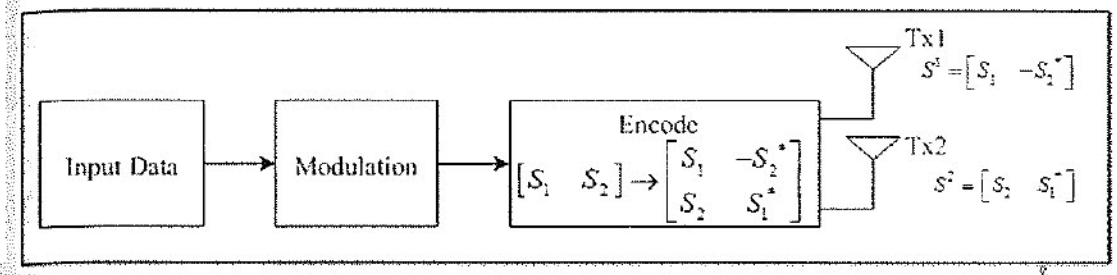
- การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา แบบเทรลลิส Space-Time Trellis Code (STTC)
- การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา แบบบล็อก Space-Time Block Code (STBC)
- การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา แบบ Alamouti

ในงานวิจัยนี้จะขอกล่าวถึงการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา แบบ Alamouti เนื่องจากมีคุณลักษณะเฉพาะตัวที่น่าสนใจ คือ การถอดรหัสเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน มีรูปแบบที่เรียบง่าย และให้ไดเวอร์ซิตี้ในระบบสูง

การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบ Alamouti นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.18 เมื่อข้อมูล (Input Data) สร้างสัญลักษณ์ข้อมูล และส่งเข้าสู่วงจรมอดูเลเตอร์ (Modulator) ครั้งละ จำนวน 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 คาบเวลาต่อเนื่องกัน ในการส่งของคาบเวลาแรกหรือที่เวลา t สัญญาณที่ส่งออกจากสายอากาศต้นที่ 1 และต้นที่ 2 ได้แก่ S_1 และ S_2 ตามลำดับ ส่วนในคาบเวลาที่ 2 หรือที่เวลา $t+T$ สัญญาณที่ส่งออกจากสายอากาศที่ 1 และ 2 ได้แก่ $-S_2^*$ และ S_1^* ตามลำดับ โดยคุณสมบัติที่น่าสนใจประการหนึ่งของรหัสแบบ Alamouti คือ การที่เราสามารถกำหนด หรือ เลือกชนิดของการมอดูเลตแบบใดก็ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ ใช้การมอดูเลตทั้งหมด 4 แบบคือ BPSK, QPSK, 16QAM และ 64QAM



รูปที่ 2.19 การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา แบบ Alamouti

การถอดรหัสข้อมูลสำหรับรหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบ Alamouti จะกล่าวถึงการถอดรหัสสำหรับการใช้สายอากาศรับหลายต้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบ Alamouti ที่มีจำนวนสายอากาศส่ง 2 ต้นและจำนวนสายอากาศรับ 2 และ 3 ต้น กระบวนการถอดรหัสสัญญาณนั้นอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณในช่วงเวลา t_1 และ t_2 มีค่าคงที่ นั่นหมายความว่าสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณจากสายอากาศส่งต้นแรกไปยังสายอากาศภาครับลำดับที่ j หรือ $h_{j,1}$ และรวมถึงสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณจากสายอากาศส่งต้นที่สองไปยังสายอากาศภาครับลำดับที่ j หรือ $h_{j,2}$ จะต้องเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} h_{j,1} &= h_{j,1}(t) = h_{j,1}(t+T) = h_{j,1}(t_1) = h_{j,1}(t_2) \\ h_{j,2} &= h_{j,2}(t) = h_{j,2}(t+T) = h_{j,2}(t_1) = h_{j,2}(t_2) \end{aligned} \tag{2.19}$$

และให้ระบบมีจำนวนของสายอากาศภาครับจำนวน n_R ต้น สัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศภาครับลำดับที่ j ของสองช่วงเวลาคือ r_j^1 และ r_j^2 สัญญาณที่รับได้อยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$\begin{aligned} r_j^1 &= h_{j,1}S_1 + h_{j,2}S_2 + n_j^1 \\ r_j^2 &= h_{j,1}S_2^* + h_{j,2}S_1^* + n_j^2 \end{aligned} \tag{2.20}$$

จากสมการที่ (2.20) องค์ประกอบ Additive White Gaussian Noise (AWGN) ถูกเพิ่มลงไปที่สายอากาศภาครับลำดับที่ j ในช่วงระยะเวลา t_1 และ t_2 แสดงโดย n_j^1 และ n_j^2 ตามลำดับ

กระบวนการถอดรหัสทำได้โดยอาศัยการรวมของสัญญาณและการถอดรหัสแบบ Maximum likelihood อย่างไรก็ตามด้วยวิธีการนี้ สัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณถูกพิจารณาว่าถูกรับรู้โดยถูกต้องสมบูรณ์ที่ภาครับ ในการรับรู้ข้อมูลสถานะช่องสัญญาณที่ภาครับสามารถทำได้โดยการใช้สัญญาณนำร่อง

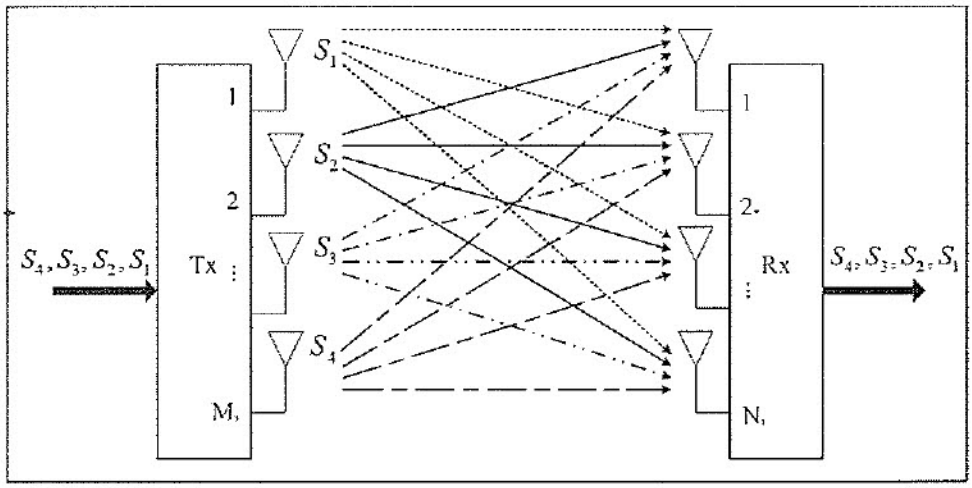
กระบวนการของการรวมสัญญาณแบบเชิงเส้น (Linear Combination) ของสัญญาณที่รับได้ สามารถแสดงได้เป็น

$$\tilde{S}_1 = \sum_{j=1}^{n_R}\left\{h_{j,1}^{*} r_j^1 + h_{j,2}(r_j^2)^{*}\right\} = \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{n_R}\left|h_{j,i}\right|^2 S_1 + \sum_{j=1}^{n_R}\left\{h_{j,1}^{*} n_j^1 + h_{j,2}(n_j^2)^{*}\right\}$$
$$\tilde{S}_2 = \sum_{j=1}^{n_R}\left\{h_{j,2}^{*} r_j^1 - h_{j,1}(r_j^2)^{*}\right\} = \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{n_R}\left|h_{j,i}\right|^2 S_2 + \sum_{j=1}^{n_R}\left\{h_{j,2}^{*} n_j^1 - h_{j,1}(n_j^2)^{*}\right\} \quad (2.21)$$

เราจะเห็นว่าสิ่งที่ส่งผลกระทบในการตัดสินใจจากการถอดรหัสประกอบด้วยขนาดของสัญญาณที่ถูกส่งและสัญญาณรบกวน ขนาดของสัญญาณมีค่าเท่ากับผลรวมของขนาดสัญญาณที่ได้จากสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ และสัญญาณรบกวนคือ ผลรวมของสัญญาณรบกวนที่สายอากาศภาครับคูณกับสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ

2. การมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง

เป็นเทคนิคในการส่งสัญญาณที่ให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูง เนื่องจากในการส่งข้อมูลนั้นจะมีการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระกันทั้งหมด M_T ค่า เท่ากับจำนวนสายอากาศที่อยู่ในภาคส่งต่อหนึ่งคาบสัญลักษณ์ คือ ข้อมูลที่ถูกส่งไปในแต่ละสายอากาศจะเป็นข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.19 เทคนิคการส่งสัญญาณแบบนี้จะอาจเรียกง่าย ๆ ว่าต่างคนต่างส่งข้อมูลโดยที่ส่งความถี่เดียวกันและช่วงเวลาเดียวกัน ผลที่ได้คือช่วยให้อัตราการส่งข้อมูลสามารถส่งได้เร็วขึ้น แต่ก็ยังพบปัญหาในด้านการรบกวนกันของสัญญาณอยู่ ทำให้เทคนิคการส่งสัญญาณแบบนี้ไม่เหมาะสมกับสภาพการส่งสัญญาณแบบแนวตรง Line of Sight และไม่สามารถเพิ่มพื้นที่การสื่อสารออกไปได้ไกลมากนัก โดยเทคนิคนี้จะใช้ Multipath ในการแยกสัญญาณออกจากกัน ซึ่งพื้นที่ที่เหมาะสมในการใช้เทคนิคนี้ก็คือ บริเวณในเมืองที่มีตึก, บ้าน หรือ สิ่งสะท้อนสัญญาณ ซึ่งจะสร้าง Multipath ได้มาก ทำให้การทำงานของเทคนิคนี้ดีขึ้น



รูปที่ 2.20 การทำงานของการเข้ารหัสเทคนิค SM

2.6 แบบจำลองช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบไวแมกซ์

ในการสื่อสารแบบไร้สายจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความแม่นยำในการอธิบายช่องสัญญาณแบบไร้สาย ซึ่งในแบบจำลองช่องสัญญาณนั้นขึ้นอยู่กับแต่ละสิ่งแวดล้อม เช่นในการสื่อสารยุคแรกจะมีสถาปัตยกรรมที่มีสถานีฐานและสถานีลูกข่ายสื่อสารกันแบบ LOS ซึ่งระบบมีเซลล์เดียวและไม่มีการคิด co channel interference ในการสื่อสารยุคที่สอง ระบบมีรูปแบบของสถาปัตยกรรมที่มีหลายเซลล์ ที่มีการติดต่อสื่อสารแบบ NLOS ซึ่งในเนื้อหาส่วนนี้จะกำหนดแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่มีสถาปัตยกรรมแบบหลายเซลล์ ในแบบจำลองนี้จะกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

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

ในช่องสัญญาณแบบไร้สายจะแสดงลักษณะดังนี้

- Path loss
- Delay spread Fiding
- Doppler spread
- Co channel interference

2.6.1 แบบจำลอง Path Loss Modified Stanford University Interim (SUI)

ภูมิประเทศที่มี Path loss มาก คือ บริเวณที่เต็มไปด้วยเนินเขา (ประเภท A) ส่วนภูมิประเทศที่มี 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

$$PL = A + 10\gamma \log(d / d_0) + X_f + X_h + s \qquad (2.23)$$

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 ค่าคงที่ในแต่ละภูมิประเทศ และผลกระทบจาก

shadowing แสดงโดย s ซึ่งมีการแจกแจงแบบ lognormal โดย s มีค่าตั้งแต่ 8.2 - 10.6 dB ขึ้นอยู่กับแต่ละภูมิประเทศ และ X_f และ X_h แสดงได้เป็น

$$X_f = 6\log\left(\frac{f}{2000}\right) \tag{2.24}$$

และ

$$X_h = -10.8\log\left(\frac{h_r}{2.0}\right) \tag{2.25}$$

$$X_h = -20.0\log\left(\frac{h_r}{2.0}\right) \tag{2.26}$$

จากสมการที่ (2.25) สำหรับ ประเภท A และ B สมการที่ (2.26) สำหรับประเภท C เมื่อ f คือ ความถี่ของสายอากาศภาครับ มีหน่วยเป็น MHz และ h_r คือความสูงของสายอากาศภาครับ 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

2.6.2 RMS delay spread

ค่า rms delay spread เป็นไปตามการแจกแจงแบบ lognormal ซึ่งแบบจำลองนี้มีค่า rms delay spread ดังสมการ

$$\tau_{rms} = T_l d^{\varepsilon} y \tag{2.27}$$

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

2.6.3 Fade distribution หรือ K-Factor

สัญญาณที่มีแบนแคบ จะมีลักษณะการแจกแจงแบบริเชียน (Ricean 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

$$K = F_s F_h F_b K_0 d^{\gamma} u \qquad (2.28)$$

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, γ = -0.5

u คือ ตัวแปร lognormal ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 dB และความเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่า เท่ากับ 8 dB

y คือ ความแปรปรวนของ lognormal

2.6.4 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

แบบจำลองช่องสัญญาณ Modified Stanford University Interim (SUI)

ในแบบจำลองนี้จะแบ่งรูปแบบของช่องสัญญาณออกเป็น 6 รูปแบบ ซึ่งถูกเลือกมาจากสามภูมิประเทศในสหรัฐอเมริกา ซึ่งแบบจำลองนี้เหมาะสำหรับใช้ในการจำลองผลออกแบบพัฒนาและใช้ในการทดสอบเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับการสื่อสารแบนกว้างแบบไร้สายแบบนิ่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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

ประเภทของภูมิประเทศ		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	Morderate delay spread	High delay spread
Low	SUI-3		SUI-5
High		SUI-4	SUI-6
ค่า *K-Factor* ต่ำ			
Doppler	Low delay spread	Morderate delay spread	High delay spread
Low	SUI-1 SUI-2		
High			

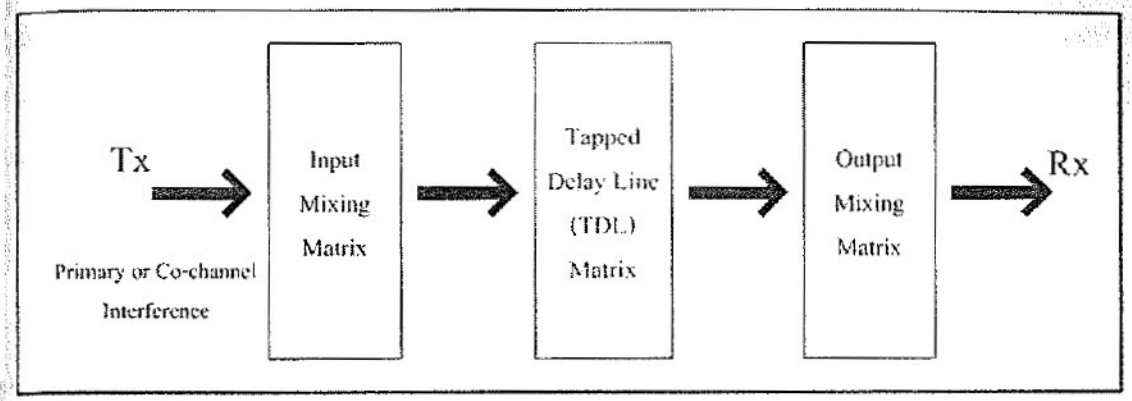
โครงสร้างของช่องสัญญาณ SUI ที่แสดงในรูปที่ 2.21 แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนดังนี้

1 Input Mixing Matrix ในส่วนนี้จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุทเมื่อใช้สายอากาศส่งหลายต้น

2 Tapped Delay Line Matrix ในส่วนนี้จะเป็น 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 ในส่วนนี้จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาท์พุทที่มีการใช้สายอากาศภาครับหลายต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.21 โครงสร้างแบบจำลองของช่องสัญญาณ SUI

ข้อกำหนดของช่องสัญญาณ SUI มีดังต่อไปนี้

- 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
- มีโพลาไรซ์ในแนวดิ่ง
- 90 เปอร์เซนต์ของพื้นที่ครอบคลุมเซลล์ มีความน่าเชื่อถือ 99.9 เปอร์เซนต์ในแต่ละพื้นที่ครอบคลุม

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ช่องสัญญาณ SUI-3 ในการจำลองแบบ รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI-3 แสดงได้ดังตารางที่ 2.4

2.7 กล่าวท้ายบท

เนื้อหาที่กล่าวถึงในบทนี้จะอธิบายการส่งสัญญาณแบบไร้สาย โดยจะเน้นไปที่ระบบไวแมกซ์ ซึ่งเป็นมาตรฐานที่มีอัตราในการรับและส่งข้อมูลสูง โดยในระบบไวแมกซ์นี้จะกล่าวถึงแอร์อินเตอร์เฟสของระบบไวแมกซ์ การทำงานในชั้น Medium Access Control และการทำงานในชั้น PHY Layer รวมถึงการอธิบายโครงสร้างการทำงานของระบบไวแมกซ์ ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น โครงสร้างของภาคส่งสัญญาณ และโครงสร้างของภาครับสัญญาณ จากนั้นจะเป็นการอธิบายถึงการนำระบบไมโมเข้ามาใช้งาน เพื่อเพิ่ม

ประสิทธิภาพในการรับและส่งข้อมูลให้แก่ระบบไวแมกซ์ รวมถึงเทคนิคของระบบไมโมแบบวงเปิด และเทคนิคการเข้ารหัสของข้อมูลที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ จากนั้นจะอธิบายถึงแบบจำลองช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบไวแมกซ์ ซึ่งก็คือ ช่องสัญญาณ SUI ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ช่องสัญญาณ SUI 3 ซึ่งอธิบายถึงรูปแบบและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้งาน

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 : $F_{0mni} = -1.5113$ 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%)		

บทที่ 3 เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวในระบบไวแมกซ์

3.1 กล่าวนำ

สำหรับเทคนิคไมโมที่รองรับกับการทำงานตามมาตรฐานไวแมกซ์นั้นก็จะมีอยู่ 3 รูปแบบด้วยกันคือ รูปแบบ Matrix A รูปแบบ Matrix B และรูปแบบ Matrix C ซึ่งแต่ละรูปแบบนี้จะมีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลและรองรับกับจำนวนของสายอากาศที่ใช้งานแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยงานวิจัยนี้ใช้จำนวนของสายอากาศส่งที่ 2 ต้น โดยการใช้งานสายอากาศส่งที่ 2 ต้นนี้ ก็จะรองรับกับการทำงานของระบบไมโมสองรูปแบบด้วยกันคือ รูปแบบ Matrix A และ รูปแบบ Matrix B ซึ่งทั้งสองรูปแบบนี้ก็จะมีการทำงานที่มีข้อดีที่แตกต่างกับไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เสนอ เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว เพื่อนำข้อดีของทั้งสองรูปแบบมาใช้งาน ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.2 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

โดยทำการเปรียบเทียบรูปแบบของจำนวนสายอากาศภาคส่งและจำนวนของสายอากาศภาครับด้วยอัตราเร็วในการส่งข้อมูลแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 และเปรียบเทียบกับเทคนิคที่ใช้ในการส่งข้อมูลของแต่ละรูปแบบแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบจำนวนของสายอากาศภาคส่งและอัตราเร็วในการส่งข้อมูล

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 การเปรียบเทียบจำนวนของสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับกับเทคนิคที่ใช้ในการส่งข้อมูล

จำนวนสายอากาศส่ง	จำนวนสายอากาศรับ			
	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

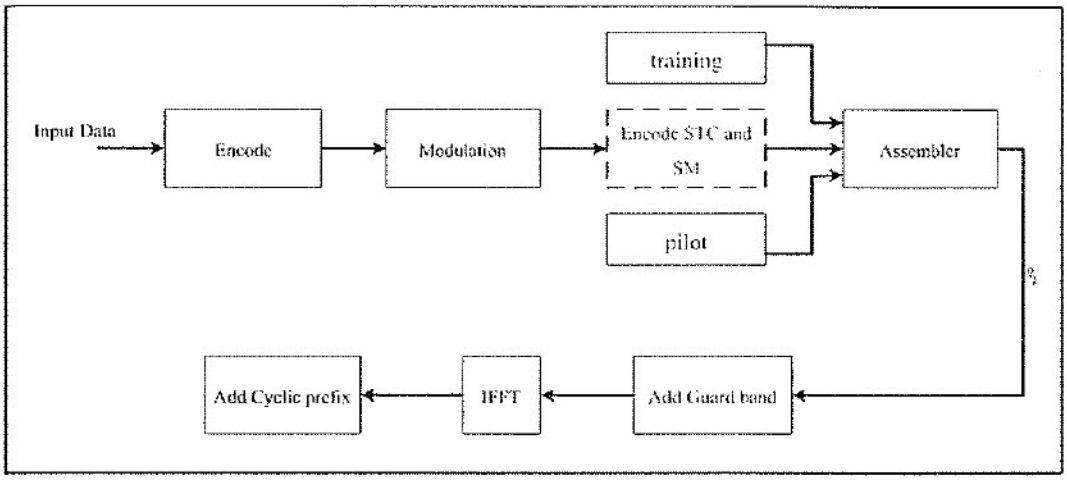
จากเทคนิคของระบบไมโม ในตารางที่ 3.2 นั้นจะมีรูปแบบของเมตริกซ์ในการเข้ารหัสที่แตกต่างกันตามจำนวนของสายอากาศภาคส่งและจำนวนของสายอากาศภาครับและอัตราเร็วในการส่งข้อมูลของแต่ละเทคนิคจึงสรุปใหม่ ได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 รูปแบบเมตริกซ์ที่ใช้ในการเข้ารหัสของเทคนิคต่าง ๆ

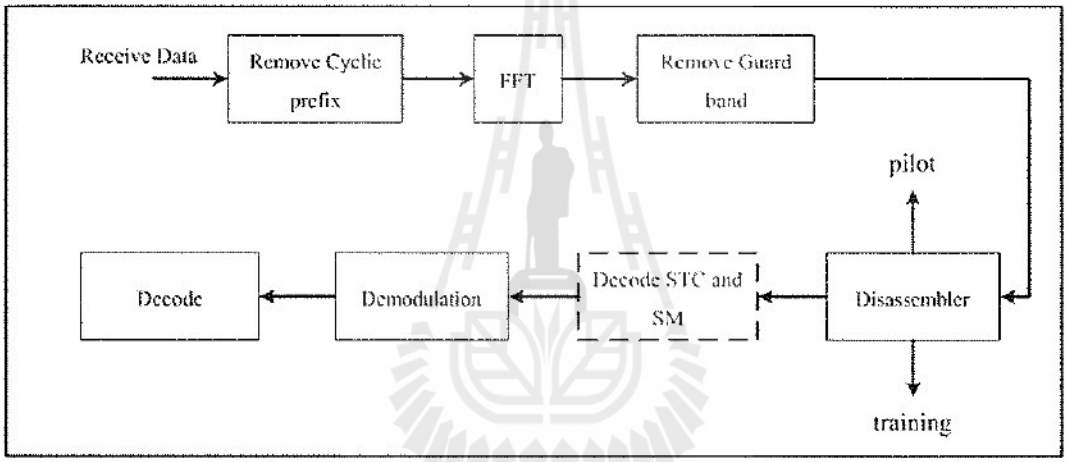
Data Rate		1x	2x	4x
สายอากาศภาคส่ง 2 ต้น	เทคนิคที่ใช้	STC (Matrix A)	Spatial Multiplexing (Matrix B)	-
	รูปแบบเมตริกซ์	$\begin{bmatrix} S_1 & -S_2^* \\ S_2 & S_1^* \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}$	-
สายอากาศภาคส่ง 4 ต้น	เทคนิคที่ใช้	STC (Matrix A)	STC และ Spatial Multiplexing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

3.3 โครงสร้างของระบบไวแมกซ์ที่ใช้เทคนิคไมโม

ระบบการสื่อสารไร้สายไวแมกซ์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ จะนำเสนอโครงสร้างของระบบโดยการนำเทคนิคไมโมเข้ามาใช้งาน เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการรับและส่งข้อมูลของระบบไวแมกซ์ ซึ่งจะแบ่งออกเป็นภาคส่งสัญญาณและภาครับสัญญาณ ที่ภาคส่งสัญญาณนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ในส่วนการทำงานของเทคนิคไมโมที่นำเสนอนั้นจะเป็นการเข้ารหัสทั้งสองเทคนิค คือ การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา (Space-Time coding : STC) และการมัลติเพล็กเชิงตำแหน่ง (Spatial Multiplexing : SM) เมื่อข้อมูลผ่านการมอดูเลตสัญญามาแล้ว จะนำข้อมูลนั้นมาเข้ารหัสสำหรับเทคนิคไมโมและทำการส่งข้อมูลออกไปตามลำดับ ในส่วนภาครับสัญญาณนั้นจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 เมื่อข้อมูลถูกรับได้ที่เครื่องรับ จะผ่านกระบวนการต่างๆ จากนั้นจะทำการแยก pilot และ training ออก เมื่อได้ข้อมูลออกมา ก็จะนำข้อมูลนั้นไปผ่านกระบวนการถอดรหัสเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกส่งมา ในส่วนของบล็อกไดอะแกรมต่าง ๆ นอกเหนือจากกระบวนการเข้ารหัสของเทคนิคไมโม และการถอดรหัสของเทคนิคไมโมนั้น เราได้อธิบายหลักการทำงานไว้แล้วในบทที่ 2



รูปที่ 3.1 โครงสร้างภาคส่งของระบบไวแมกซ์ที่ใช้เทคนิคไมโม



รูปที่ 3.2 โครงสร้างภาครับของระบบไวแมกซ์ที่ใช้เทคนิคไมโม

โดยในงานวิจัยนี้จะจำลองระบบโดยใช้จำนวนของสายอากาศที่ภาคส่งจำนวน 2 ต้น และสายอากาศที่ภาครับจำนวน 2 และ 3 ต้น ตามลำดับ ผ่านช่องสัญญาณที่ใช้คือ SUI-3 ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการส่งสัญญาณของระบบไมโมก็จะมี 2 เทคนิคดังนี้

3.3.1 เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา

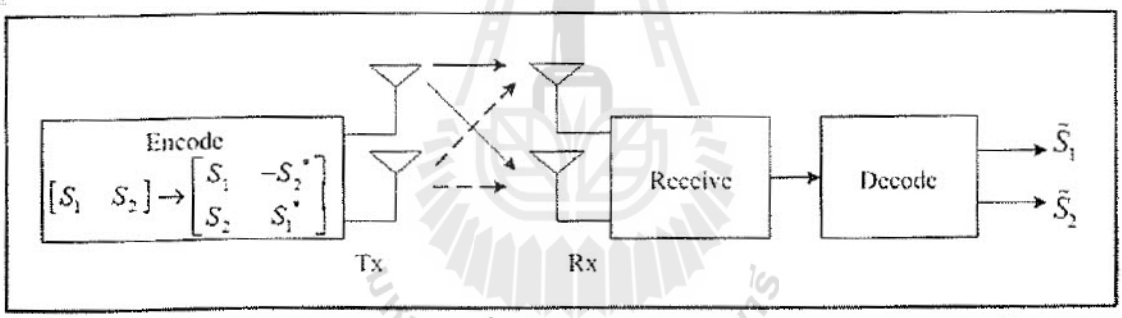
ในการจำลองแบบนั้นจะใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไวแมกซ์ ในการรับและส่งข้อมูล โดยรูปแบบที่เป็นที่นิยมใช้งานกันได้แก่ การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกในรูปแบบของ Alamouti เมื่อแหล่งกำเนิดข้อมูลสร้างสัญลักษณ์ข้อมูลส่งเข้าสู่

วงจรมอดูเลเตอร์ ครั้งละ 2 สัญลักษณ์ จากนั้นสัญลักษณ์ทั้ง 2 จะถูกส่งเข้าไปสู่วงจรการเข้ารหัสและถูกส่งผ่านไปยังสายอากาศส่งเพื่อส่งผ่านช่องสัญญาณสื่อสารไร้สายไปยังภาครับ การส่งสัญญาณในแต่ละครั้งหรือ สัญญาณหนึ่งบล็อกจะใช้เวลาในการส่ง 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

การเข้ารหัสเชิตำแหน่งและเวลาสำหรับระบบที่ใช้สายอากาศภาคส่ง 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^*



รูปที่ 3.3 ภาคส่งและภาครับของเทคนิค STC ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 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 $\tilde{S}_1$ และ $\tilde{S}_2$ ซึ่งมีค่าคือ

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

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

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

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

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

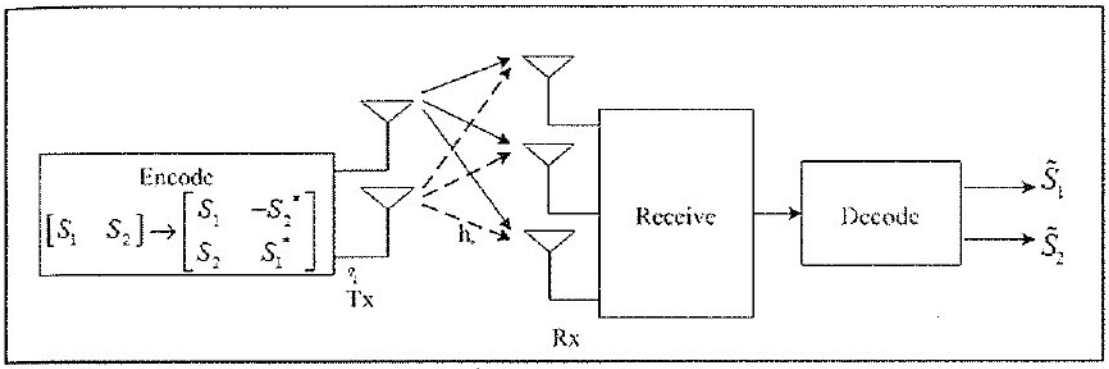
เมื่อ h_{11} และ h_{12} คือ ช่องสัญญาณสำหรับการส่งสัญญาณจากสายอากาศภาคส่งต้นที่ 1 ไปยังสายอากาศภาครับต้นที่ 1 และสายอากาศภาครับต้นที่ 2 เมื่อเวลาที่ t_1 และ t_2

h_{21} และ h_{22} คือ ช่องสัญญาณสำหรับการส่งสัญญาณจากสายอากาศภาคส่งต้นที่ 2 ไปยังสายอากาศภาครับต้นที่ 1 และสายอากาศภาครับต้นที่ 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

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

$$r_{11} = h_{11}S_1 + h_{21}S_2 + n_{11} \tag{3.9}$$

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

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

$$r_{12} = h_{12}S_1 + h_{22}S_2 + n_{12} \tag{3.11}$$

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

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

$$r_{13} = h_{13}S_1 + h_{23}S_2 + n_{13} \tag{3.13}$$

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

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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

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

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

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

$$\begin{aligned} Y_{\tilde{s}_2} &= (|h_{11}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{13}|^2 + |h_{21}|^2 + |h_{22}|^2 + |h_{23}|^2) s_2 \\ &\quad + h_{21}^* n_{11} - h_{11} n_{21}^* + h_{22}^* n_{12} - h_{21} n_{22}^* + h_{23}^* n_{13} - h_{13} n_{23}^* \end{aligned} \quad (3.18)$$

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

3.3.2 เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง

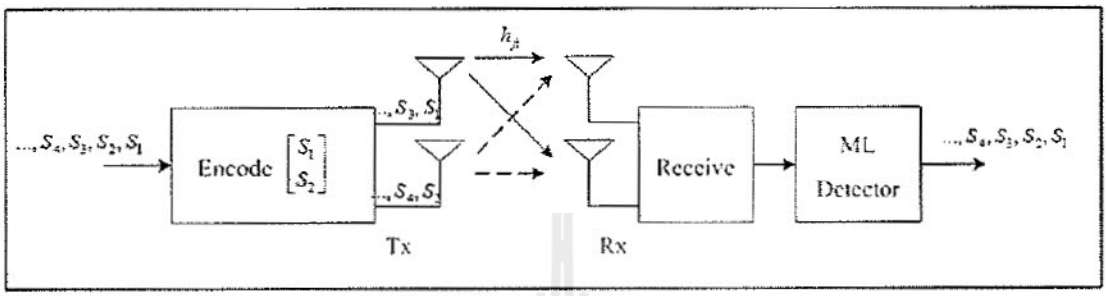
เป็นเทคนิคในการส่งสัญญาณที่ให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูง เนื่องจากในการส่งข้อมูลนั้นจะมีการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระกันทั้งหมด M_T ค่า เท่ากับจำนวนสายอากาศที่อยู่ในภาคส่งต่อหนึ่งคาบสัญลักษณ์ คือ ข้อมูลที่ถูกส่งไปในแต่ละสายอากาศจะเป็นข้อมูลที่แตกต่างกัน เทคนิคการส่งสัญญาณแบบนี้อาจจะเรียกง่าย ๆ ว่าต่างคนต่างส่งข้อมูล โดยที่ส่งความถี่เดียวกันและช่วงเวลาเดียวกัน ผลที่ได้คือช่วยให้อัตราการส่งข้อมูลสามารถส่งได้เร็วขึ้น โดยรูปแบบของเมตริกซ์ที่ใช้ในการเข้ารหัสสำหรับเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่งโดยใช้สายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้นนั้นแสดงเป็น

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

ที่ภาครับสัญญาณนั้นจะแบ่งออกเป็น ระบบที่ใช้สายอากาศภาครับที่ 2 ต้น และระบบที่ใช้สายอากาศภาครับที่ 3 ต้น ซึ่งกระบวนการในการถอดรหัสนั้นจะใช้เทคนิคการถอดรหัสเพื่อตัดสินเลือกสัญลักษณ์ 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 ภาคส่งและภาครับของเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 2 ต้น

ที่ภาครับสัญญาณจะรับสัญลักษณ์ S_1 และ S_2 ที่ถูกส่งผ่านช่องสัญญาณมายังภาครับ ซึ่งภาครับสัญญาณจะรับสัญญาณได้เป็น

$$r_1 = h_{11}S_1 + h_{12}S_2 + n_1 \tag{3.19}$$

$$r_2 = h_{21}S_1 + h_{22}S_2 + n_2 \tag{3.20}$$

สามารถจัดรูปสมการให้ง่ายขึ้นให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

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

เมื่อ r_i คือ สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับสัญญาณ

h_{ji} คือ ช่องสัญญาณที่ใช้ส่งข้อมูลจากภาคส่งไปยังภาครับ

n_i คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

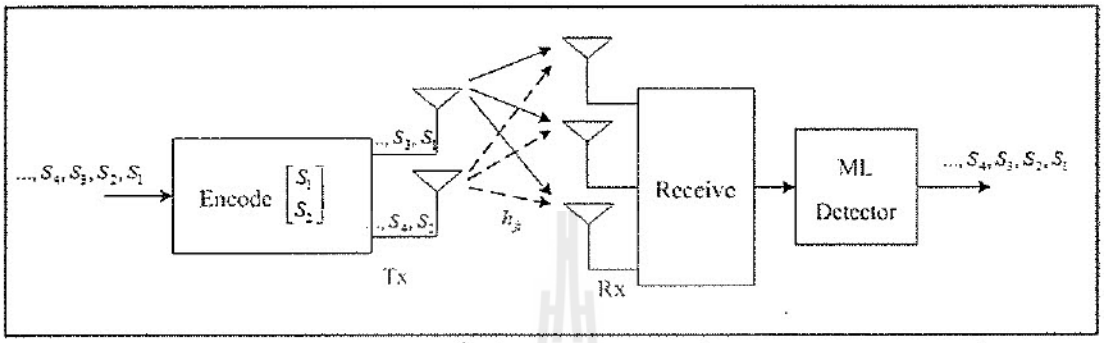
i = 1, 2 คือ จำนวนของสายอากาศภาครับ

j = 1, 2 คือ จำนวนของสายอากาศภาคส่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง สำหรับสายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น

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



รูปที่ 3.6 ภาคส่งและภาครับของเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น

ที่ภาครับสัญญาณจะรับสัญลักษณ์ S_1 และ S_2 ที่ถูกส่งผ่านช่องสัญญาณมายังภาครับ ซึ่งภาครับสัญญาณจะรับสัญญาณได้เป็น

$$r_1 = h_{11}S_1 + h_{12}S_2 + n_1 \tag{3.22}$$

$$r_2 = h_{21}S_1 + h_{22}S_2 + n_2 \tag{3.23}$$

$$r_3 = h_{31}S_1 + h_{32}S_2 + n_3 \tag{3.24}$$

สามารถจัดรูปสมการให้ง่ายขึ้นให้อยู่ในรูปของเมตริกได้เป็น

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

เมื่อ r_i คือ สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับสัญญาณ

h_{ji} คือ ช่องสัญญาณที่ใช้ส่งข้อมูลจากภาคส่งไปยังภาครับ

n_i คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

i = 1, 2, 3 คือ จำนวนของสายอากาศภาครับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

j = 1, 2 คือ จำนวนของสายอากาศภาคส่ง

ในการถอดรหัสนั้นจะขอกล่าวถึงกระบวนการถอดรหัสสำหรับภาครับสัญญาณที่สายอากาศรับ 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น ไปพร้อมกัน เนื่องจากทั้งสองระบบนี้จะใช้กระบวนการถอดรหัสวิธีเดียวกัน คือ การนำสัญญาณที่รับได้คือ r_i เมื่อ i = 1, 2, ...N_r ไปใช้ในการถอดรหัสเพื่อตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ S_1 และ S_2 โดยใช้ วิธีการพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นจริงสูงสุด (Maximum likelihood decoder) ดังแสดงได้เป็น

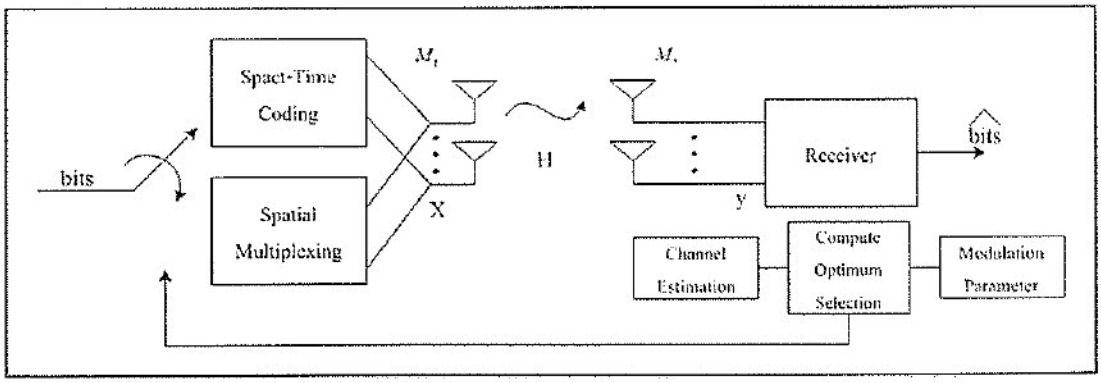
$$\hat{S} = \arg\min_{s \in C} \|r - Hs\|^2 \qquad (3.26)$$

เมื่อ s คือ จำนวนชุดของ constellation ทั้งหมดของแต่ละรูปแบบที่ใช้ในการมอดูเลชั่น

H คือ ช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งข้อมูล

3.4 เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว (ADAPTIVE MIMO MODE SWITCHING : AMS)

เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว ศึกษามาจากงานของ Robert W. Heath Jr. and Arogyaswami Paulraj (2005) เทคนิคนี้จะนำเทคนิคในการส่งสัญญาณของระบบไมโมทั้งสองรูปแบบเข้ามารวมไว้ด้วยกัน เพื่อเป็นวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพในการรับและส่งข้อมูลของระบบให้ดีขึ้นกว่าการเลือกใช้เทคนิคในการส่งข้อมูลเพียงรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง โดยเทคนิคนี้จะใช้การคำนวณค่าระยะยูคลิเดียนต่ำสุด (Minimum Euclidean Distance) ของทั้งสองรูปแบบคือ ระยะยูคลิเดียนต่ำสุดของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และระยะยูคลิเดียนต่ำสุดของเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง เพื่อเป็นการเลือกรูปแบบที่จะใช้ในการส่งข้อมูลในแต่ละครั้ง ซึ่งโครงสร้างของเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โครงสร้างการทำงานของเทคนิค AMS

3.4.1 การคำนวณค่าระยะยูคลิเดียนต่ำสุด ของเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงปริภูมิ

ในการคำนวณหาค่าระยะยูคลิเดียนต่ำสุดจะคำนวณจากค่าพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณ ค่าสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับ และค่าของจุดคอนสเตลเลชั่นในแต่ละรูปแบบที่ใช้ในการมอดูเลตสัญญาณ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$d^2_{\min,SM} = \min_{s_i, s_j \in S_{SM}, s_i \neq s_j} \frac{\left\| H(s_i - s_j) \right\|^2}{M_t} \tag{3.27}$$

โดยที่ $d^2_{\min,SM}$ คือ ค่าระยะยูคลิเดียนต่ำสุดของเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง

H คือ ช่องสัญญาณที่ใช้ในส่งข้อมูลจากภาคส่งไปยังภาครับ

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

M_t คือ จำนวนของสายอากาศภาคส่ง

3.4.2 การคำนวณค่าระยะยูคลิเดียนต่ำสุด ของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา

การคำนวณค่าระยะยูคลิเดียนต่ำสุดของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลานั้น จะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมือนกับเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง แต่จะมีลักษณะของสมการที่ใช้ในการคำนวณแตกต่างกัน โดยสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$d^2_{\min,STC} = \frac{\left\| H \right\|^2_F}{M_t} d^2_{\min,stc} \tag{3.28}$$

โดย $d^2_{\min,stc}$ สามารถแสดงได้เป็น

$$d^2_{\min,stc} = (s_i - s_j) \tag{3.29}$$

เมื่อ $d^2_{\min,STC}$ คือ ค่าระยะยูคลิเดียนต่ำสุดของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา

$d^2_{\min,stc}$ คือ ค่าระยะของความแตกต่างของคอนสเตลเลชั่น ซึ่ง $d^2_{\min,stc} \neq d^2_{\min,STC}$

$\|\bullet\|_F$ คือ Frobenius norm

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

H คือ ช่องสัญญาณที่ใช้ในส่งข้อมูลจากภาคส่งไปยังภาครับ

M_t คือ จำนวนของสายอากาศภาคส่ง

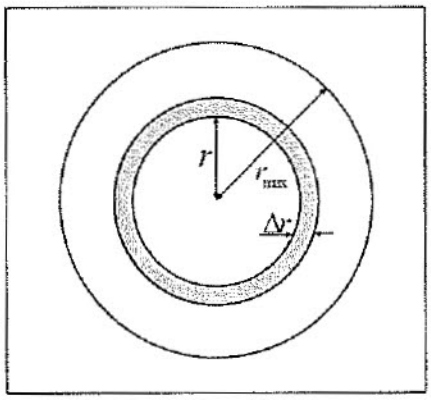
หลักการเลือกโหมด

หลักการเลือกโหมดนั้น จะคำนวณค่าระยะยุคลิดเดียนต่ำสุดของแต่ละรูปแบบ จากนั้นจะนำค่าระยะยูคลิดเดียนต่ำสุดของแต่ละรูปแบบมาเป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ เพื่อใช้เลือกรูปแบบที่จะใช้ในการส่งข้อมูลออกไป โดยมีหลักการเลือก คือ ถ้าค่า $d^2_{\min,STC} \leq d^2_{\min,SM}$ ระบบจะทำการเลือกรูปแบบของเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่งในการส่งข้อมูลออกไป นอกเหนือจากนี้แล้ว ระบบจะเลือกรูปแบบของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาในการส่งข้อมูลออกไป

3.5 การทำนายพื้นที่ครอบคลุม

พื้นที่ครอบคลุมของระบบนั้นสามารถหาได้จากการคาดคะเนเป็นเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่เซลล์ โดยศึกษาจาก Saunders, S., (2007) Antennas and propagation for wireless communication systems พิจารณารูปที่ 3.8 นั้นแสดงถึงรัศมีทั้งหมดของเซลล์ คือ $r_{\max}$ และรัศมีของเซลล์ขนาดเล็ก คือ 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 ($\pi r^2_{\max}$) ถ้ารัศมีของเซลล์มีขนาดลดลง จะได้ค่าของ $\Delta r \to 0$ ซึ่งจะได้ความน่าจะเป็นของการครอบคลุมทั้งหมดของเซลล์เป็น

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



รูปที่ 3.8 พื้นที่ครอบคลุมทั้งหมดของเซลล์

การทำนายพื้นที่ครอบคลุมที่แสดงในงานวิจัยนี้ จะเป็นการทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ที่ได้นำระบบไมโมแบบวงเปิดเข้ามาใช้งาน และยังรวมถึงเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว ซึ่งการทำนายพื้นที่ครอบคลุมนั้น จะทำนายพื้นที่ครอบคลุมของแต่ละรูปแบบทั้ง เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง จากนั้นก็ทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ที่นำเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวมาใช้งาน และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบดูว่า การนำเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวเข้ามาใช้งานในระบบนั้น ยังคงให้ประสิทธิภาพการทำงานดีกว่าการเลือกใช้งานเทคนิคไมโมเพียงรูปแบบเดียว การทำนายพื้นที่ครอบคลุมนั้น ได้ศึกษาจากงานวิจัยของ Louay M. A. Jalloul, Senior Member, IEEE, and Sam P. Alex (2008) การทำนายพื้นที่ครอบคลุมนั้นจะแสดงได้เป็น

$$P_{coverage} = \Pr(BLER_i \le BLER_{target}) \tag{3.31}$$

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

3.5.1 ขั้นตอนการทำนายพื้นที่ครอบคลุมเมื่อกำหนดระดับค่าอัตราความผิดพลาดบล็อก

การทำนายพื้นที่ครอบคลุมในส่วนนี้จะกำหนดค่าของความผิดพลาดบล็อกที่เป็นเป้าหมายไว้ก่อน เพื่อเป็นเกณฑ์ในการทำนายพื้นที่ครอบคลุม โดยมีขั้นตอนดังนี้

1.กำหนดระดับค่าเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมและระดับค่าอัตราความผิดพลาดบล็อกที่ต้องการไว้

2.จากเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมและระดับค่าของความผิดพลาดบล็อกที่กำหนดไว้นั้น นำมาหาค่าของ SNR ที่สอดคล้องกับค่าที่กำหนดไว้

3.เมื่อได้ค่า SNR แล้ว นำค่า SNR ดังกล่าวมาหาค่าระยะทางที่ได้จากการกำหนดเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมและค่าอัตราความผิดพลาดบล็อกไว้ ด้วยการใช้ Path loss ของช่องสัญญาณ SUI ซึ่งผลที่ออกมานั้นจะได้เป็นระยะทางที่ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมและระดับค่าความผิดพลาดบล็อกที่กำหนดไว้ข้างต้น ซึ่งขั้นตอนที่กล่าวมานี้สามารถเขียนแสดงได้ดังแผนภาพรูปที่ 3.9

3.5.2 ขั้นตอนการทำนายพื้นที่ครอบคลุมเมื่อกำหนดระยะทาง

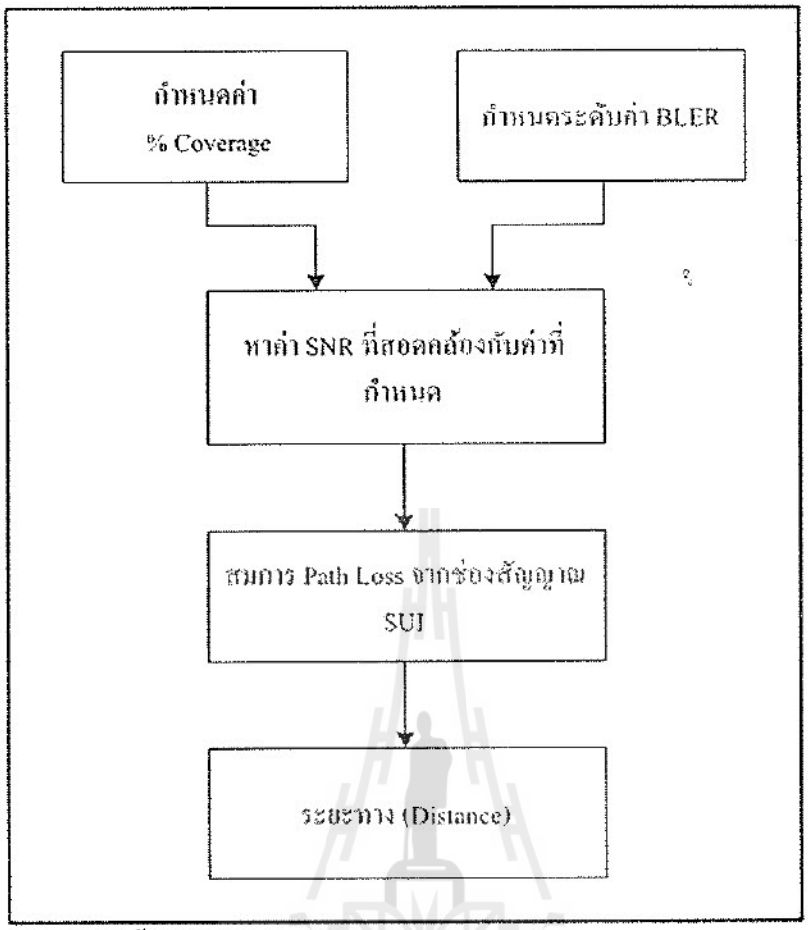
สำหรับการทำนายพื้นที่ครอบคลุมในหัวข้อนี้จะเป็นการทำนายพื้นที่ครอบคลุมโดยการกำหนดค่าของระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีรับสัญญาณ โดยเราจะกำหนดค่าของระยะทางที่ค่าต่างกันเพื่อดูถึงประสิทธิภาพของพื้นที่ครอบคลุมที่เกิดขึ้น โดยมีขั้นตอนดังนี้

1.เลือกค่าระยะทางที่ต้องการทดสอบเพื่อการทำนายพื้นที่ครอบคลุม

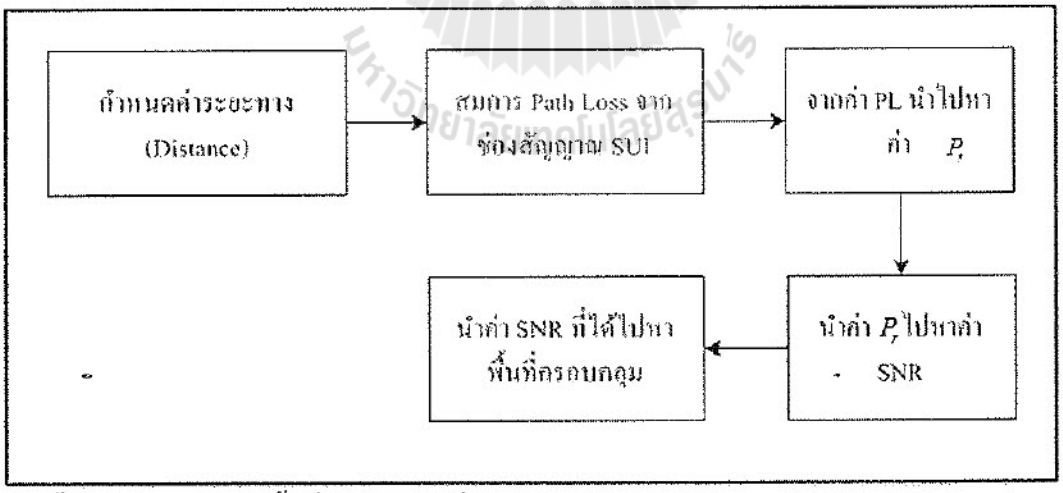
2.จากระยะทางที่กำหนดนำมาหาค่า Path Loss จากช่องสัญญาณ SUI ที่ใช้ในการจำลองแบบ เมื่อได้ค่า Path Loss แล้วนำค่าได้ไปหาค่า SNR

3.เมื่อได้ค่า SNR ที่ระยะทางที่กำหนดแล้ว นำค่า SNR ที่ได้นี้ มาดูว่าค่านี้จะสามารถให้พื้นที่ครอบคลุมได้เป็นกี่เปอร์เซ็นต์ จากทั้ง 3 ขั้นตอนที่ได้กล่าวมานี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.10

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการทำนายพื้นที่ครอบคลุมเมื่อกำหนดค่าระดับความผิดพลาดบล็อก



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการทำนายพื้นที่ครอบคลุมเมื่อกำหนดค่าระยะทาง

3.6 กล่าวท้ายบท

เนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงระบบไมโมที่รองรับกับการทำงานของเทคโนโลยีไวแมกซ์ ทั้งด้านอัตราเร็วในการส่งข้อมูล เทคนิคที่ใช้ในการส่งข้อมูล จำนวนของสายอากาศภาคส่ง และจำนวนของสายอากาศภาครับที่สามารถใช้งานในระบบไวแมกซ์ได้ จากนั้นก็จะกล่าวถึงการจำลองระบบด้วยการนำระบบไมโมมาใช้งานในระบบไวแมกซ์ ซึ่งจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ภาครับสัญญาณ และ ภาคส่งสัญญาณ พร้อมทั้งเทคนิคการเข้ารหัสของระบบไมโมแต่ละรูปแบบ การวิเคราะห์การเข้ารหัส และการถอดรหัสของภาครับสัญญาณ ทั้งเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา กับเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง จากนั้นนำเสนอถึงการนำเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว เพื่อนำมาใช้ในการจำลองระบบด้วย เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการทำงานที่ดีขึ้นในการนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้งาน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงพื้นที่ครอบคลุมที่เกิดขึ้นจากการนำเทคนิคดังกล่าวข้างต้นมาใช้งานกับระบบไวแมกซ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4 ผลการทดสอบและบทวิเคราะห์

4.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะแสดงผลการจำลองแบบของระบบไวแมกซ์ เมื่อใช้เทคนิคไมโม โดยจำลองระบบไวแมกซ์ ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งแบ่งการจำลองแบบออกเป็นดังนี้คือ ในส่วนแรกจะเป็นการจำลองแบบระบบโดยใช้เทคนิคไมโมสองเทคนิคคือ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา กับ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง และนำผลที่ได้จากการจำลองแบบของทั้งสองเทคนิคนี้มาเปรียบเทียบกัน เพื่อคัดเลือกรูปแบบที่สามารถเกิดการสลับโหมดกันได้เพื่อเก็บผลไปใช้ในการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป จากนั้นนำผลการจำลองแบบที่ทำการคัดเลือกไว้แล้วในส่วนแรก มาใช้กับเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบจากอัตราของความผิดพลาดบิต (Bit error rate : BER) และสุดท้ายนำเสนอการทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ เมื่อนำเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวมาใช้กับระบบไวแมกซ์

4.2 การจำลองแบบระบบไวแมกซ์

เป็นการจำลองระบบไวแมกซ์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งจะทำการสุ่มข้อมูลบิตขึ้นมา และผ่านการเข้ารหัส ด้วย Reed-Solomon Encode, Convolutional Encode, Puncturing และ Interleaving โดยข้อมูลที่ผ่านการเข้ารหัสมาก็จะถูกนำมามอดูเลชั่น ในการจำลองแบบนี้จะใช้รูปแบบของการมอดูเลชั่น 4 รูปแบบ คือ BPSK, QPSK, 16-QAM และ 64-QAM จากนั้นก็จะใส่ Zero Dc และ Guard Carrier แล้วนำไปผ่านกระบวนการ IFFT ซึ่งจำนวนบิตที่สร้างขึ้นมานี้ก็จะมีจำนวนไม่เท่ากัน เนื่องมาจากมาตรฐานไวแมกซ์นั้นได้มีการกำหนดอัตราเร็วในการเข้ารหัสที่แตกต่างกัน ซึ่งก็จะได้จำนวนของบิตที่แตกต่างกันด้วย และแต่ละรูปแบบของการมอดูเลชั่นก็จะให้จำนวนของสัญลักษณ์ที่ไม่เท่ากัน และมีความสามารถในการป้องกันความผิดพลาดบิตไม่เท่ากันจากนั้นก็จะนำข้อมูลที่ได้ไปผ่านกระบวนการ OFDM เพื่อปรับให้ขนาดของสัญลักษณ์มีจำนวนเท่ากัน ซึ่งตามมาตรฐานไวแมกซ์จะใช้จำนวนของสัญลักษณ์ คือ 256 ก่อนที่จะทำการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณออกไป ซึ่งจำนวนของบิตที่ได้ในแต่ละขั้นตอน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 จำนวนของบิตข้อมูลในแต่ละรูปแบบของการมอดูเลชั่น

	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[1]	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 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลองของระบบไวแมกซ์

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

4.3 การจำลองแบบระบบไวแมกซ์ที่ใช้เทคนิคไมโม

การจำลองระบบไวแมกซ์ที่นำเทคนิคไมโมมาใช้งานนั้นจะเป็นการทำงานหลังจากที่ข้อมูลผ่านการมอดูเลชั่นมาแล้ว จะนำข้อมูลดังกล่าวนั้นมาเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา (Space-Time Coding : STC) และ

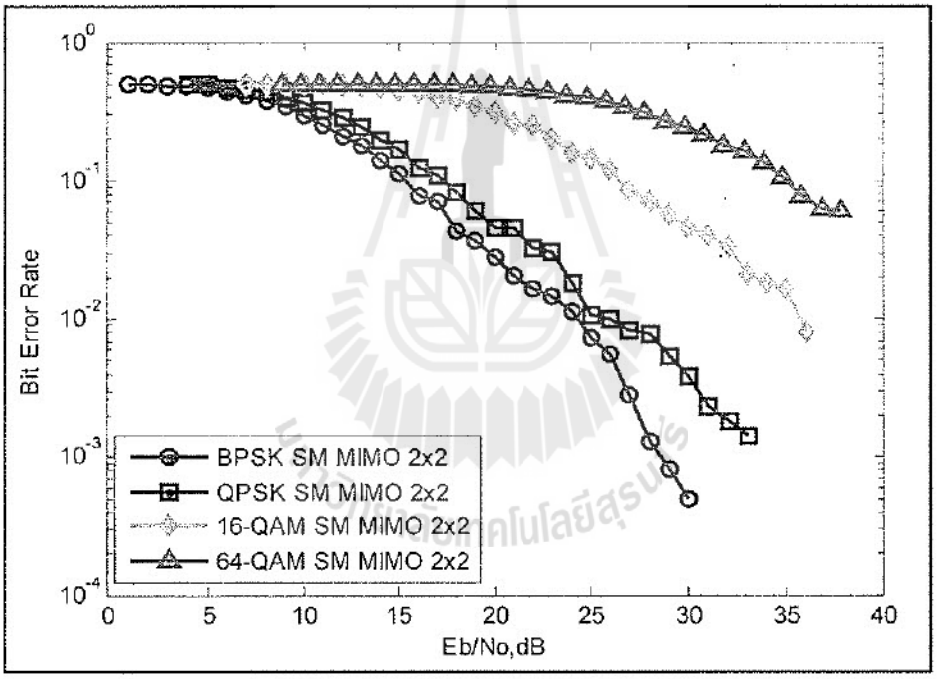
เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง (Spatial Multiplexing : SM) จากนั้นจะทำการคัดเลือกรูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้ โดยรูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้นั้นต้องเกิดจากการตัดกันของระบบไมโมทั้งสองเทคนิค เมื่อได้รูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้ ก็นำรูปแบบนั้นไปจำลองแบบกับเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว ซึ่งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละรูปแบบนั้น จะดูจากค่าอัตราความผิดพลาดบิต ซึ่งจะแสดงผลการจำลองแบบในหัวข้อถัดไป

4.3.1 การจำลองแบบโดยใช้ระบบไมโมแบบวงเปิด

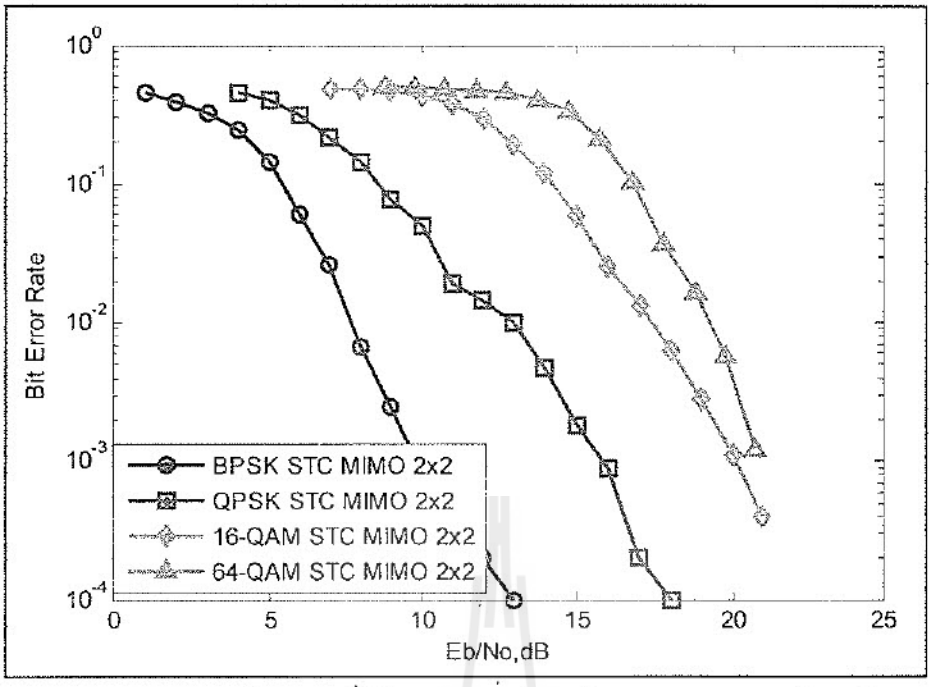
การจำลองแบบในส่วนนี้ จะนำระบบไมโมแบบวงเปิดที่มีเทคนิคการส่งข้อมูลสองรูปแบบคือ การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และ การมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง โดยทำการจำลองแบบซึ่งวัดค่าประสิทธิภาพของแต่ละรูปแบบด้วยค่าอัตราความผิดพลาดบิต โดยใช้จำนวนของสายอากาศที่ภาคส่งจำนวน 2 ต้น และสายอากาศภาครับจำนวน 2 ต้น และ 3 ต้นตามลำดับ ซึ่งมีรูปแบบการมอดูเลชั่นทั้งหมด 4 รูปแบบคือ BPSK, QPSK, 16-QAM และ 64-QAM ผลการจำลองแบบสามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 จากกราฟนี้แสดงถึงBER ที่แปรผันกับ Eb/N0 สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชั่น ด้วยความสามารถในการทนต่อสัญญาณรบกวนที่แตกต่างกัน ซึ่งจากรูปกราฟจะเห็นได้ว่ารูปแบบของ BPSK จะสามารถทนต่อสัญญาณรบกวนได้ดีที่สุด รองลงมาคือ QPSK, 16-QAM และ 64-QAM ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก รูปแบบของการมอดูเลชั่นแต่ละรูปแบบนั้นจะมีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ที่ต่างกัน โดย BPSK จะมีจำนวน 1 บิตต่อสัญลักษณ์ QPSK จะมีจำนวน 2 บิตต่อสัญลักษณ์ 16-QAM จะมีจำนวน 4 บิตต่อสัญลักษณ์ และ 64-QAM จะมีจำนวน 6 บิตต่อสัญลักษณ์ นั่นแสดงว่าการมอดูเลชั่นที่มีจำนวนของบิตต่อสัญลักษณ์น้อย จะสามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดีกว่า รูปแบบการมอดูเลชั่นที่มีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์มาก

จากนั้นนำกราฟที่ได้จากรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 นี้มามาพล็อตรวมกัน โดยจะแบ่งออกเป็นกราฟที่แสดงระบบที่ใช้สายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้น และสายอากาศภาครับที่ 2 ต้น และกราฟที่แสดงระบบที่ใช้สายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้น และสายอากาศภาครับที่ 3 ต้น โดยนำเทคนิคไมโมทั้งสองรูปแบบคือ การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และ การมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่งมาพล็อตรวมกัน ซึ่งผลการจำลองแบบนั้นสามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.5 และ 4.6 การนำกราฟของทั้งสองเทคนิคของระบบไมโมแบบวงเปิดมาพล็อตเข้าด้วยกันนั้น ก็เพื่อวัตถุประสงค์ในการคัดเลือกรูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้จริง โดยรูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้นั้นจะเป็นรูปแบบที่เส้นกราฟเกิดจากการตัดกันของทั้งสองเทคนิค ซึ่งถ้าเราไม่ทำการเลือกรูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้นั้น ระบบต้องใช้ระยะเวลาในการประมวลผลมากขึ้น เนื่องจากระบบไม่สามารถทราบได้ว่ารูปแบบไหนที่สามารถเกิดการสลับโหมดได้จริง ก็จำเป็นต้องทำการประมวลผลทุกๆ

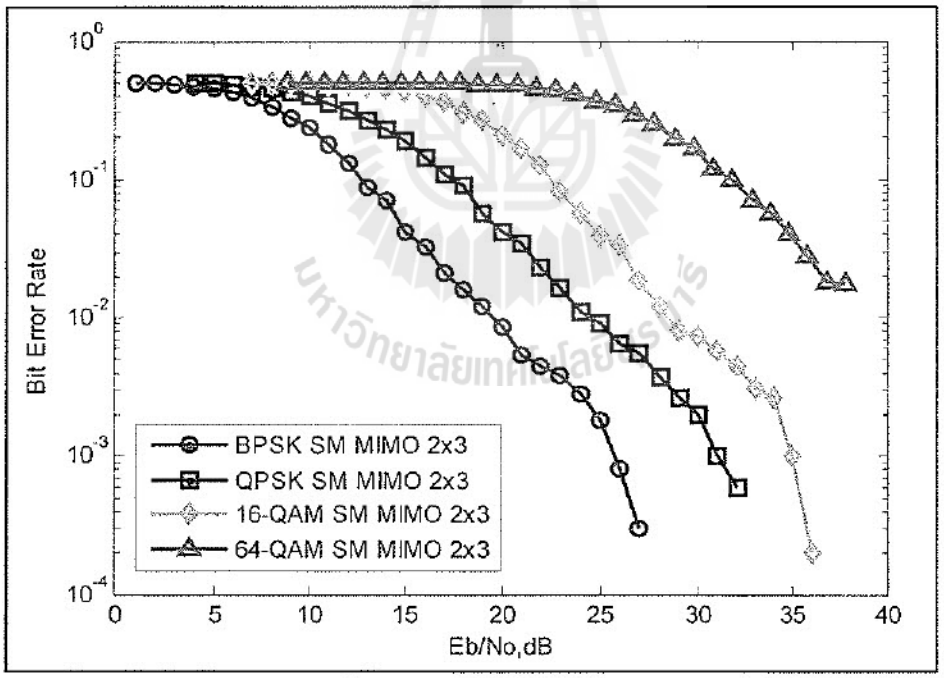
รูปแบบ แต่ในงานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นถึงการเลือกรูปแบบของระบบไมโมที่สามารถสลับโหมดกันได้จริง เพื่อเก็บผลไว้ และตัดรูปแบบที่ไม่จำเป็นออก ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดกระบวนการในการทำงานของระบบให้มีระยะเวลาการทำงานที่รวดเร็วขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องทำการประมวลผลในทุกรูปแบบ ผลการจำลองแบบที่ได้คัดเลือกรูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้นั้นสามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.7 และ 4.8 ส่วนรูปแบบที่ไม่สามารถสลับโหมดได้ก็ถูกตัดออกไป จากกราฟรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่ารูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้นั้นมีเพียง 3 รูปแบบ โดยเกิดการตัดกันของกราฟเพียง 4 รูปแบบ ซึ่งจากเดิมมีจำนวนรูปแบบทั้งหมดถึง 8 รูปแบบ จะเห็นได้ว่าผลจากการคัดเลือกรูปแบบนั้นสามารถลดรูปแบบที่ไม่จำเป็นออกได้ถึงครึ่งหนึ่งของรูปแบบทั้งหมด และกราฟรูปที่ 4.8 จะแสดงให้เห็นว่ามีเพียงรูปแบบเดียวเท่านั้นที่สามารถสลับโหมดกันได้ ซึ่งจะสามารถลดรูปแบบที่ไม่จำเป็นออกไปได้ถึง 6 รูปแบบ จึงสามารถช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น เพราะไม่ต้องทำการประมวลผลทุก ๆ รูปแบบ



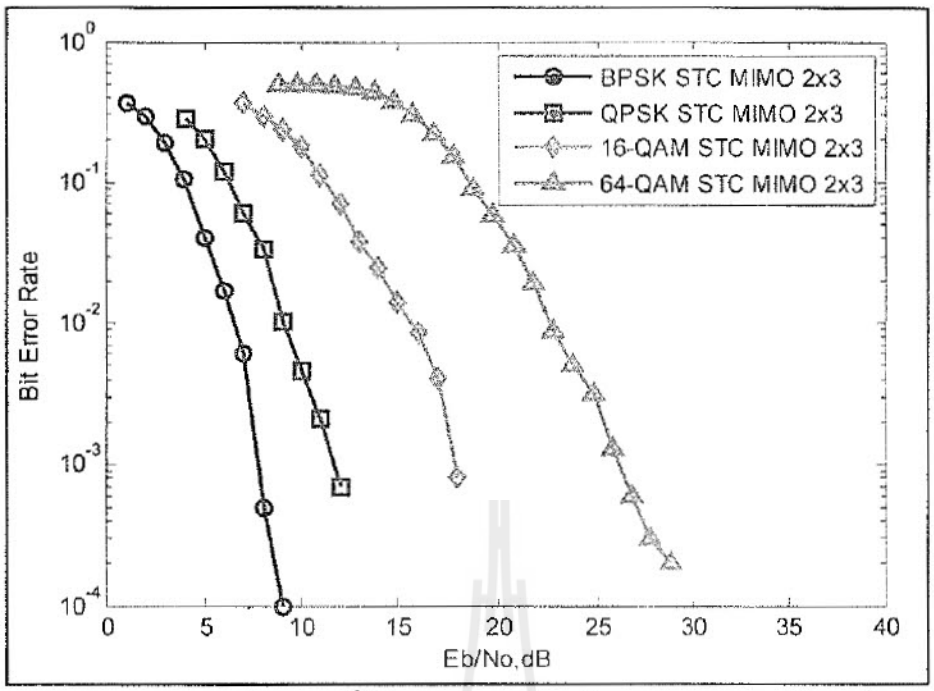
รูปที่ 4.1 BER vs Eb/N0 ของเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับที่ 2 ต้น



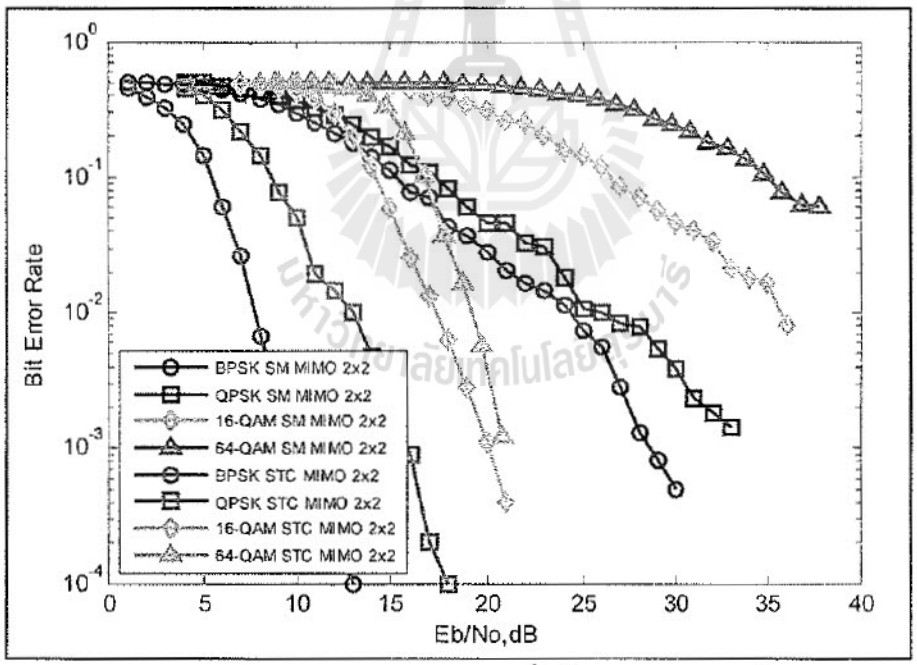
รูปที่ 4.2 BER vs Eb/N0 ของเทคนิค STC ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 2 ต้น



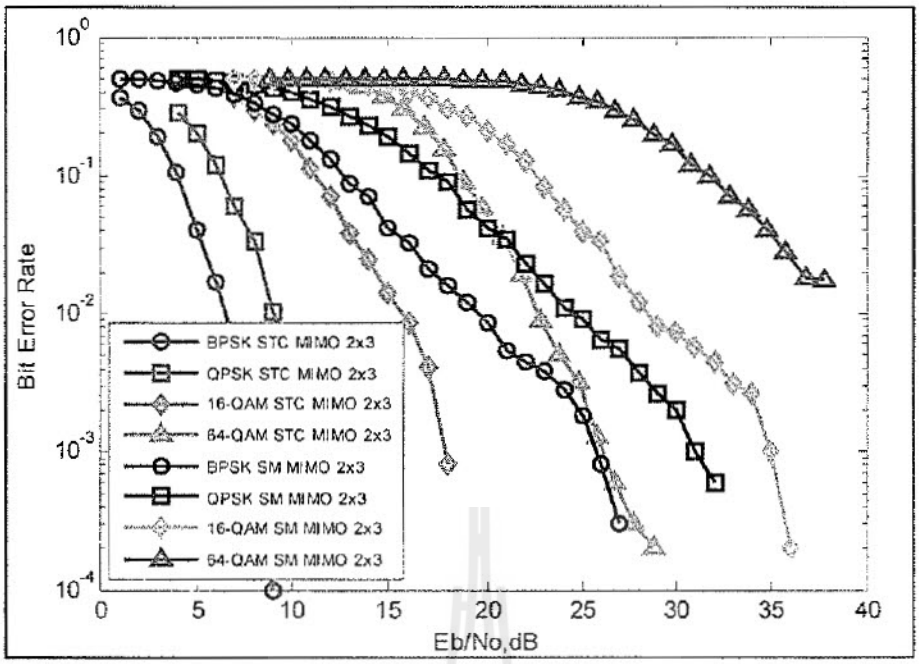
รูปที่ 4.3 BER vs Eb/N0 ของเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น



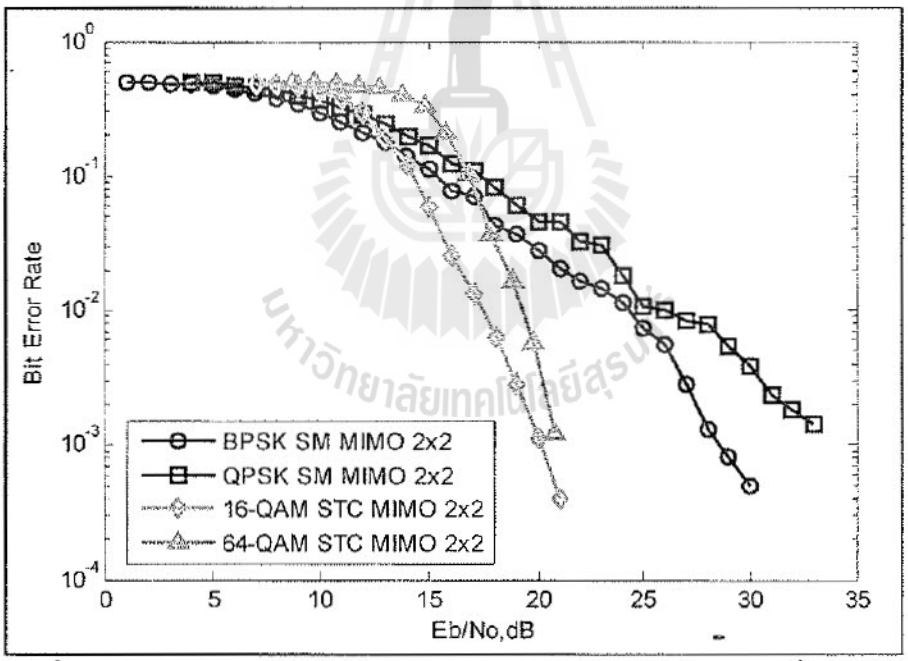
รูปที่ 4.4 BER vs Eb/N0 ของเทคนิค STC ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้น และสายอากาศรับ 3 ต้น



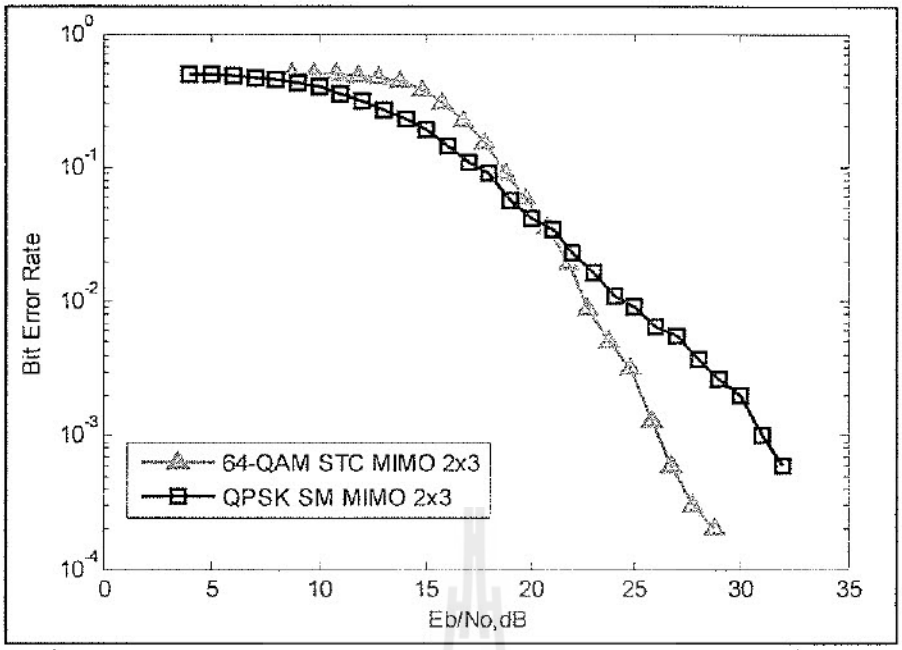
รูปที่ 4.5 BER vs Eb/N0 ของเทคนิค STC และเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้นและสายอากาศรับ 2 ต้น



ปที่ 4.6 BER vs Eb/N0 ของเทคนิค STC และเทคนิค SM ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ต้นและสายอากาศรับ 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 เพื่อที่จะสามารถเห็นรูปแบบที่สามารถเกิดการสลับโหมดกันได้ชัดเจนยิ่งขึ้น พร้อมทั้งรูปแบบของการมอดูเลชั่นที่สามารถสลับโหมดกันได้ โดยจะแบ่งเป็นรูปแบบ A, B, C และ D ทั้งนี้ระบบที่ใช้จำนวนของสายอากาศภาคส่ง 2 ต้น และสายอากาศภาครับ 2 ต้นนั้น จะถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบ A, B และ C ส่วนระบบที่มีจำนวนสายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้น และสายอากาศภาครับที่ 3 ต้นนั่นมีเพียงรูปแบบเดียว ซึ่งจัดให้อยู่ในรูปแบบ D โดยทุกรูปแบบนี้แสดงข้อมูลได้ดังตารางที่ 4.3

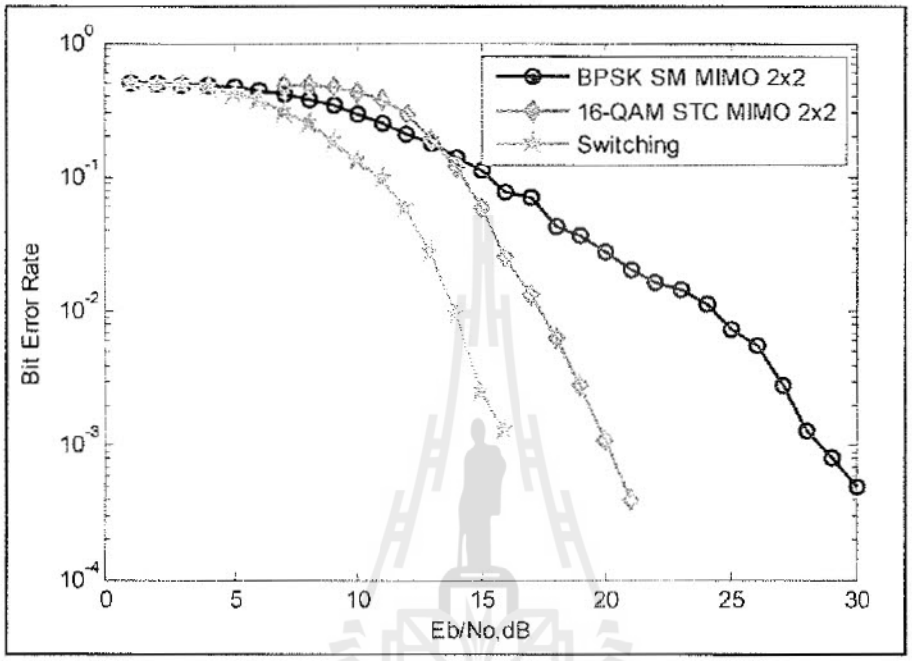
ตารางที่ 4.3 รูปแบบของเทคนิคไมโมและรูปแบบของการมอดูเลชั่นที่สามารถสลับโหมดได้

จำนวนของสายอากาศ		รูปแบบ	การมอดูเลชั่น	
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

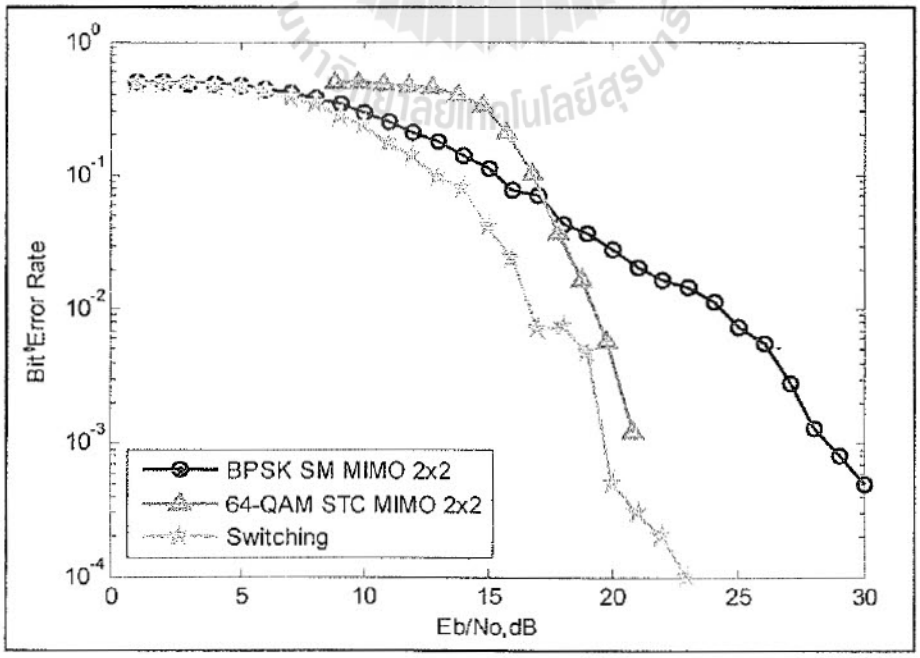
4.3.2 การจำลองแบบโดยใช้เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว

การจำลองแบบในส่วนนี้จะนำเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวเข้ามาใช้งาน ซึ่งหลักการทำงานของเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวและหลักเกณฑ์ในการเลือกแต่ละรูปแบบนั้น จะใช้การพิจารณาค่าระยะยูคลิเดียนต่ำสุดของแต่ละรูปแบบมาพิจารณา โดยค่าระยะยูคลิเดียนต่ำสุดของรูปแบบใดมีค่ามากก็จะเลือกรูปแบบนั้นในการส่งข้อมูลออกไป และในหัวข้อที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นได้ทำการคัดเลือกรูปแบบที่สามารถสลับโหมดได้ เรียบร้อยแล้ว ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 4.3 จากตารางที่ 4.3 นี้ จะนำรูปแบบดังกล่าวทั้ง 4 รูปแบบคือ A, B, C และ D มาทำการจำลองแบบโดยการใช้เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว ซึ่งผลจากการจำลองแบบนั้น แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.9 ถึง 4.12 จากกราฟรูปที่ 4.9 นั้นจะเป็นการจำลองแบบของรูปแบบ A โดยรูปแบบที่สามารถสลับโหมดได้นั้น คือ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ที่มีรูปแบบการมอดูเลชั่นคือ 16-QAM และ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง ที่มีรูปแบบการมอดูแลชั่นคือ BPSK จากรูปกราฟจะเห็นได้ว่า รูปกราฟที่เกิดจากการนำเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวมาใช้งานนั้นจะให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ลดลงกว่าการที่ใช้เพียงเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่งเพียงรูปแบบเดียว จากกราฟรูปที่ 4.10 นั้นจะเป็นการจำลองแบบของรูปแบบ B โดยรูปแบบที่สามารถสลับโหมดได้นั้น คือ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ที่มีรูปแบบการมอดูเลชั่นคือ 64-QAM และ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง ที่มีรูปแบบการมอดูแลชั่นคือ BPSK รูปกราฟแสดงให้เห็นว่า กราฟที่เกิดจากการนำเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวมาใช้งานนั้นจะให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ลดลงกว่าการที่ใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง เพียงรูปแบบเดียว และรูปแบบ C แสดงดังกราฟรูปที่ 4.11 มีรูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้คือ คือ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ที่มีรูปแบบการมอดูเลชั่นคือ 64-QAM และ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง ที่มีรูปแบบการมอดูแลชั่นคือ QPSK จากรูปกราฟนั้นจะเห็นว่าที่ค่า Eb/No มีค่ามากขึ้นนั้นตั้งแต่ 18 dB กราฟที่ใช้เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับรูปแบบของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ที่มีรูปแบบการมอดูเลชั่นแบบ 64-QAM แต่อย่างไรก็ตามกราฟที่นำเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวนี้ก็ยังมีค่าความผิดพลาดบิตไม่ต่างไปจากรูปแบบของเทคนิคเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ที่ใช้รูปแบบการมอดูเลชั่นที่ 64-QAM มากเท่าไร แต่ก็เป็นที่ยอมรับได้ว่ายังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสุดท้าย สำหรับระบบที่ใช้สายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้นและ สายอากาศภาครับที่ 3 ต้นนั้น จากตารางที่ 4.2 พบว่า มีเพียงรูปแบบเดียวเท่านั้นที่สามารถสลับโหมดกันได้คือ เทคนิคเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ที่มีรูปแบบการมอดูเลชั่นแบบ 64-QAM และ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง ที่มีรูปแบบการมอดูเลชั่นแบบ QPSK ซึ่งจะกำหนดให้เป็นรูปแบบ D จากกราฟรูปที่ 4.12 พบว่ารูปแบบที่ใช้เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว

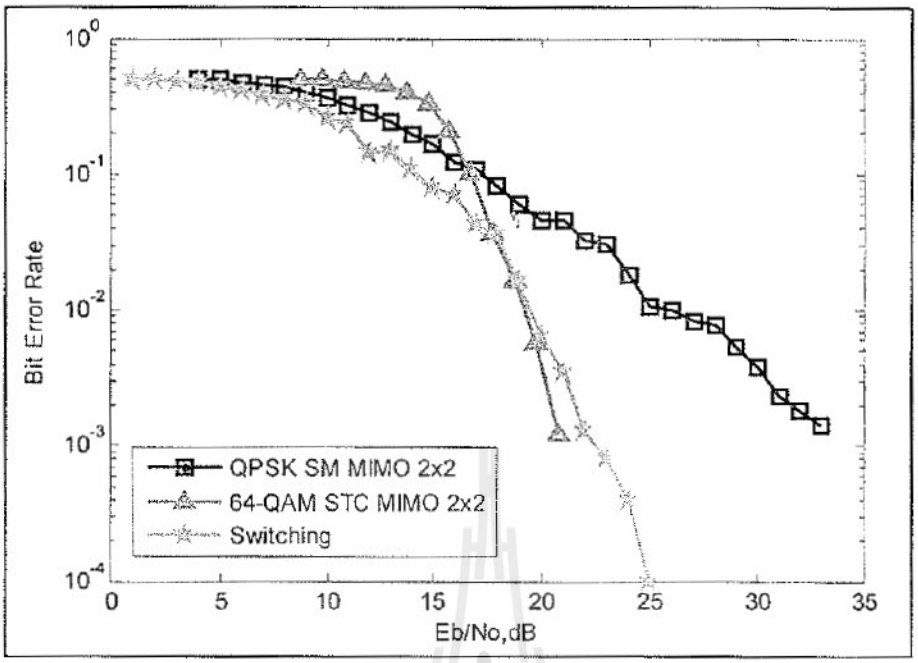
นั้นยังคงให้ประสิทธิภาพการทำงานดีกว่ารูปแบบของเทคนิคเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง เพียงรูปแบบเดียว โดยจะมีค่าความผิดพลาดบิตที่น้อยกว่า แต่เมื่อค่า Eb/No มีค่าที่ 25 dB เส้นกราฟจะมีค่าใกล้เคียงกับรูปแบบของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา ที่ใช้การมอดูเลชั่นแบบ 64-QAM



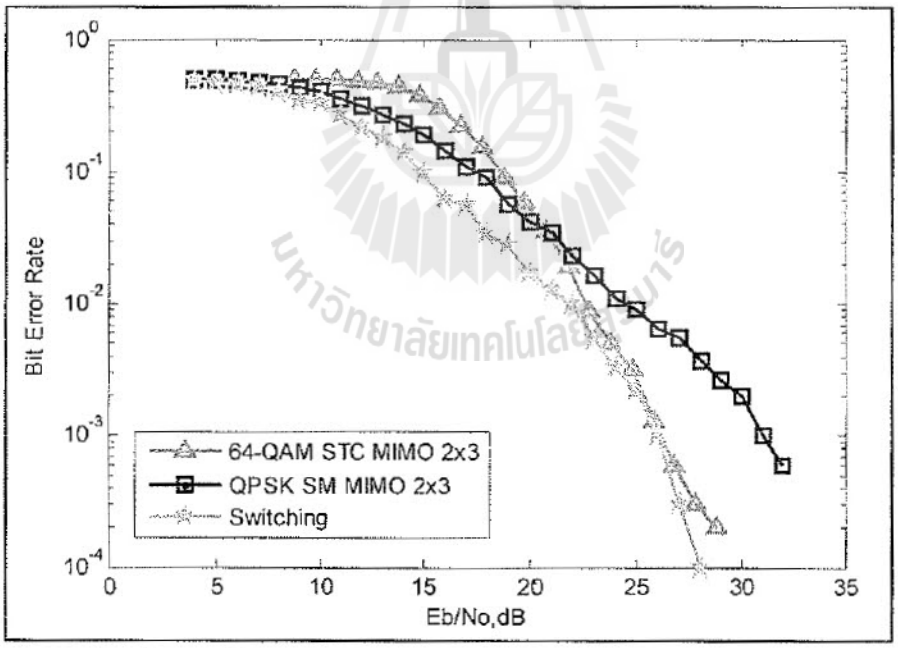
รูปที่ 4.9 รูปแบบ A ร่วมกับเทคนิค AMS



รูปที่ 4.10 รูปแบบ B ร่วมกับเทคนิค AMS



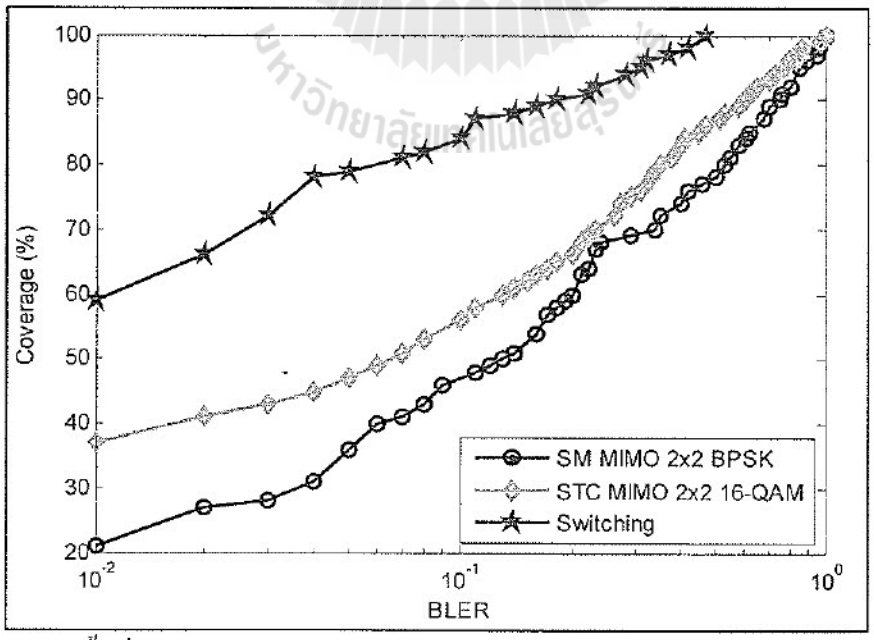
รูปที่ 4.11 รูปแบบ C ร่วมกับเทคนิค AMS



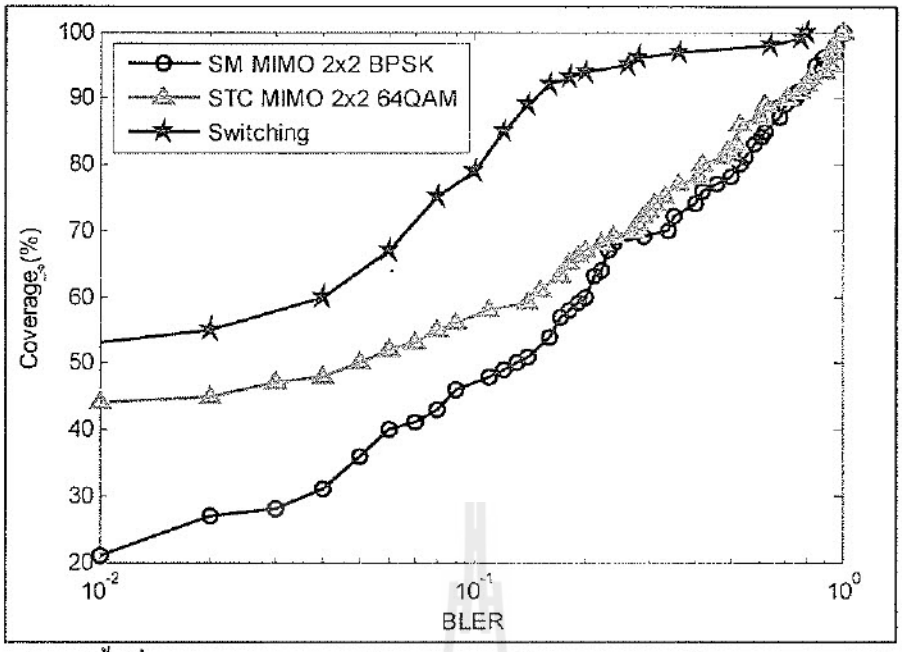
รูปที่ 4.12 รูปแบบ D ร่วมกับเทคนิค AMS

4.4 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมเมื่อใช้เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว

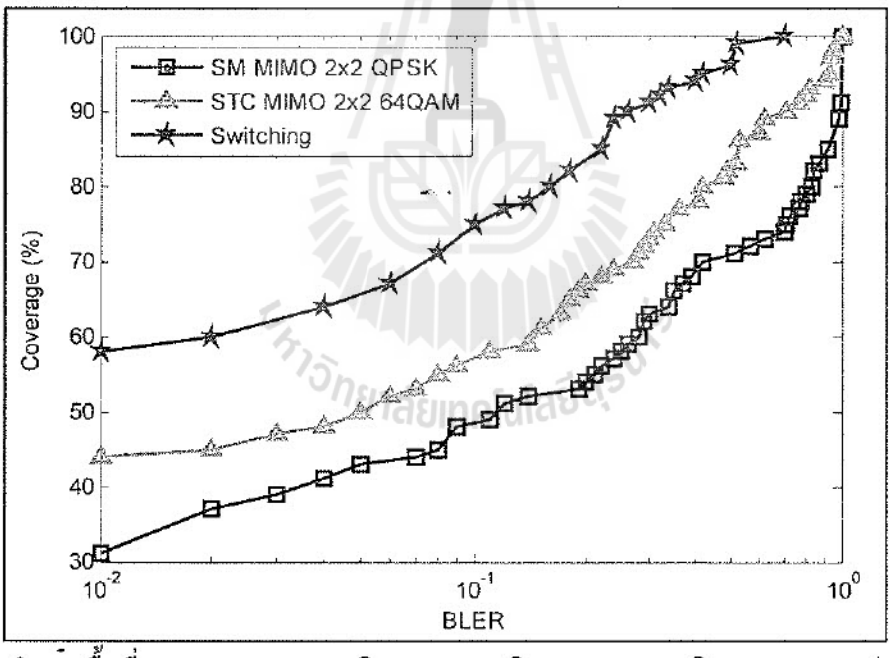
การจำลองแบบเพื่อการทำนายพื้นที่ครอบคลุมนั้น จะจำลองแบบทั้ง 4 รูปแบบคือ A, B, C และ D ดังแสดงข้อมูลได้ดังตารางที่ 4.2 โดยการจำลองแบบเพื่อทำนายพื้นที่ครอบคลุมนั้นจะเน้นไปที่การนำเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวเข้ามาใช้งานในระบบไวแมกซ์ โดยจะอาศัยค่าอัตราความผิดพลาดบล็อกในการทำนายพื้นที่ครอบคลุม ดังสมการที่ (3.30) โดยจะสร้างบล็อกขึ้นมา 100 บล็อกในแต่ละบล็อกจะทำการส่งข้อมูลจำนวน 50 ครั้ง จากกราฟรูปที่ 4.13 ถึง 4.15 นั้นจะเป็นระบบที่ใช้สายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้น และ สายอากาศภาครับ 2 ต้น จะเห็นได้ว่าพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาในแต่ละกราฟจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน คือจะให้พื้นที่ครอบคลุมอยู่ที่ประมาณ 40 - 50 เปอร์เซ็นต์ และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่งนั้นจะมีพื้นที่ครอบคลุมน้อยกว่าเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาโดยจะให้พื้นที่ครอบคลุมอยู่ที่ประมาณ 20 - 30 เปอร์เซ็นต์ และสำหรับเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวนั้นจากกราฟจะเห็นได้ว่าจะให้พื้นที่ครอบคลุมที่มากขึ้นกว่าการใช้เพียงเทคนิคไมโมเพียงเทคนิคเดียว ซึ่งจะให้พื้นที่ครอบคลุมอยู่ที่ช่วงประมาณ 50 - 60 เปอร์เซ็นต์ ส่วนระบบบที่ใช้จำนวนของสายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้น และสายอากาศภาครับที่ 3 ต้นนั้น เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลานั้นจะให้พื้นที่ครอบคลุมอยู่ที่ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง นั้นจะให้พื้นที่ครอบคลุมประมาณ 89 เปอร์เซ็นต์ ส่วนรูปแบบที่ใช้เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวนั้นจะให้พื้นที่ครอบคลุมมากกว่าทั้งสองรูปแบบ ซึ่งอยู่ที่ 92 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าการเพิ่มจำนวนของสายอากาศภาครับให้เพิ่มขึ้นนั้นจะช่วยให้ระบบมีพื้นที่ครอบคลุมที่เพิ่มขึ้นด้วย



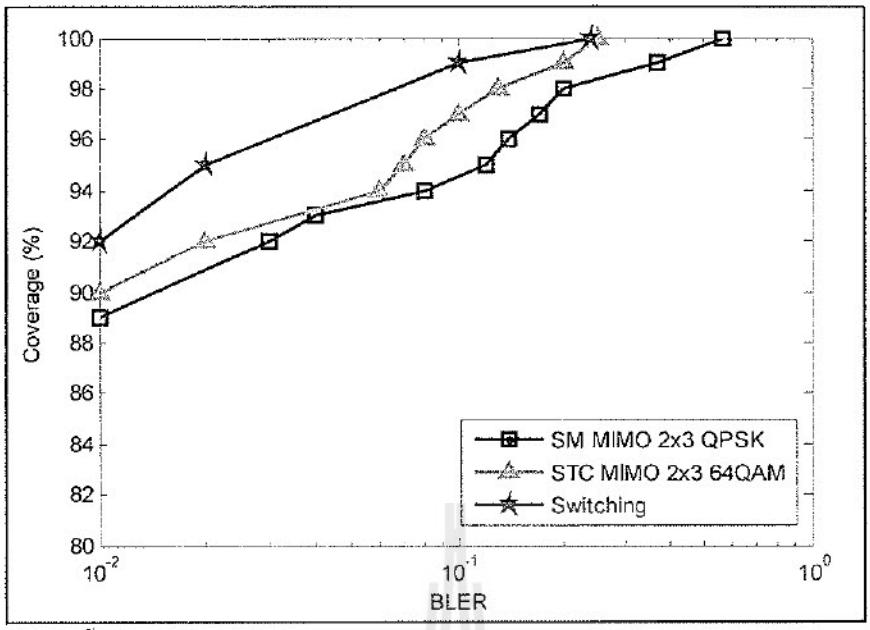
รูปที่ 4.13 การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค STC เทคนิค SM และเทคนิค AMS ของรูปแบบ A



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

4.5 การจำลองแบบเพื่อทำนายพื้นที่ครอบคลุม

การทำนายพื้นที่ครอบคลุมในหัวข้อนี้ จะทำนายด้วยการใช้เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว โดยจะใช้กราฟรูปที่ 4.17 ที่แสดงพื้นที่ครอบคลุมของการใช้เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวที่ค่า SNR ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะสามารถทำนายพื้นที่ครอบคลุมได้ดังนี้คือ

4.5.1 เมื่อกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมและค่าระดับความผิดพลาดบล็อก

มีขั้นตอนตามลำดับดังนี้

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)

จากขั้นตอนดังกล่าวขั้นต้นนี้จะยกตัวอย่างเพื่อแสดงให้เห็นถึงวิธีการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าระยะทาง 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

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

$$A = 20\log\left(\frac{4\pi 100}{3\times10^8 / 2.5\times10^9}\right) = 80.4 \quad (4.3)$$

หาค่า γ จาก

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

$$\gamma = 4 - (0.0065\times80) + \left(\frac{17.1}{80}\right) = 3.69 \quad (4.5)$$

หาค่า X_f จาก

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

$$X_f = 6\log\left(\frac{2.5\times10^9}{2000}\right) = 36.58 \quad (4.7)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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), (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 นี้มาหาค่าของพลังงานที่รับได้ ณ ภาครับ จาก

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

หา P_{noise} จาก

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

$$P_{noise} = -174dBm + 10\log(5\times10^6) \quad (4.13)$$

$$= -174dBm + 66.99dB$$

$$= -137dB$$

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

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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

$$PL(dB) = 10\log(40) - 10\log(3.155\times10^{-13}) \quad (4.17)$$

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

นำค่า PL(dB) ที่ได้แทนค่าในสมการที่ (4.10) จะได้

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

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

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

$$d = 430.69 \quad m$$

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

4.5.2 เมื่อกำหนดค่าระยะทางที่ต้องการ

มีขั้นตอนตามลำดับดังนี้

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_r แล้วนำไปหาความสัมพันธ์เพื่อให้ได้ค่า SNR ของระยะทางที่ได้กำหนดไว้ในข้อที่ 1
4. เมื่อได้ค่า SNR ที่สอดคล้องกับค่าที่กำหนดไว้แล้ว ใช้ค่า SNR ที่ได้ นำมาดูในกราฟรูปที่ 4.17 เพื่อดูว่าค่าระยะทางที่กำหนดขึ้นนั้นจะให้ค่าของพื้นที่ครอบคลุมเท่าไร

จากขั้นตอนดังกล่าวข้างต้น จะยกตัวอย่างเพื่อแสดงวิธีการคำนวณเพื่อหาค่า SNRดังนี้ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็น

- สายอากาศภาคส่งสูง 80 เมตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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

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

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

$$PL = 144.95dB$$

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

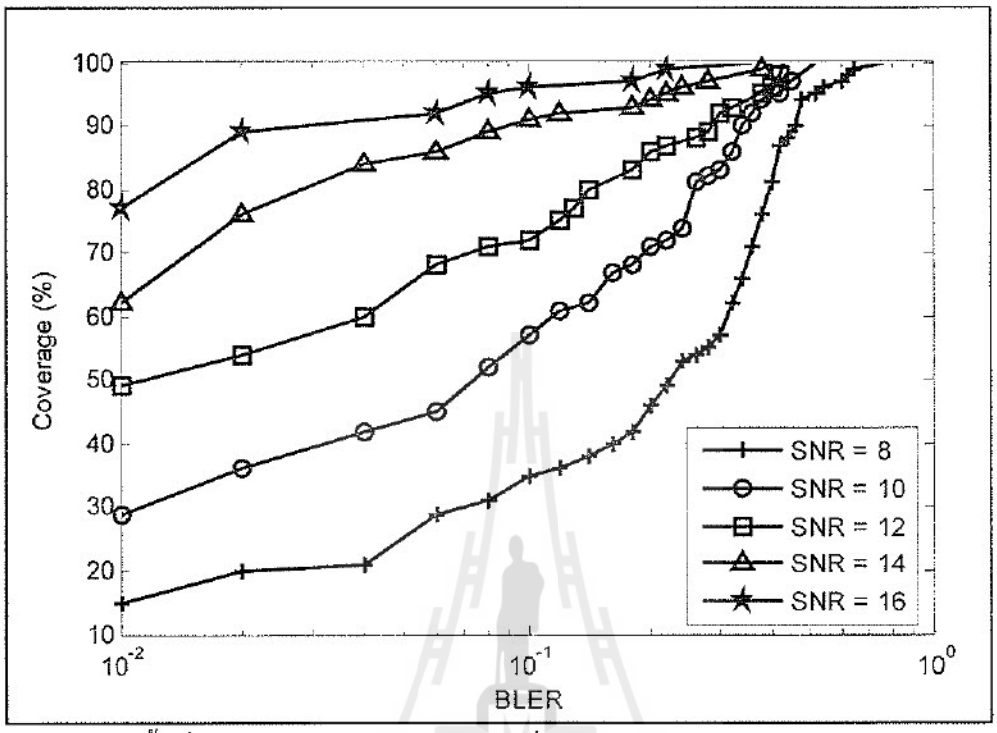
$$SNR(dB) = -128.93 - (-137.01) \quad (4.23)$$

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

จากค่า SNR ที่ได้จากสมการที่ (4.24) นำค่า SNR ที่หาได้นี้ไปดูกราฟรูปที่ 4.17 เพื่อดูว่าค่า SNR ดังกล่าวนี้และระยะทางที่กำหนดไว้นั้น จะให้ค่าพื้นที่ครอบคลุมที่เท่าไหร่ จากค่า SNR ที่คำนวณได้นั้นคือ 8 dB โดยกำหนดระยะทางไว้ที่ 550 เมตรนั้น นำค่า SNR = 8 dB ไปหาค่าเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมจากกราฟรูป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าที่ค่า SNR = 8 dB นั้นจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมอยู่ที่ 15 เปอร์เซ็นต์ที่ค่า BLER = 10^{-2}



รูปที่ 4.17 การทำนายพื้นที่ครอบคลุมของเทคนิค AMS ที่ค่า SNR ต่างๆ กัน

4.6 กล่าวท้ายบท

เนื้อหาที่สำคัญของบทนี้ จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบไวแมกซ์ ที่นำระบบไมโมแบบวงเปิดมาใช้งาน โดยเทคนิคไมโมแบบวงเปิดนี้ ก็จะมีสองเทคนิคด้วยกันคือ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง เนื่องจากการทำงานของระบบไมโมที่มีการเลือกใช้เพียงรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งนั้น อาจจะยังไม่ได้ประสิทธิภาพที่ดีพอ ดังนั้นจึงได้นำเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวเข้ามาเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ระบบ ซึ่งการทำงานในงานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว ซึ่งการนำเทคนิคนี้เข้ามาใช้งานนั้น จะต้องทำการคัดเลือกรูปแบบที่สามารถที่จะเกิดการสลับโหมดกันได้จริง โดยโหมดที่สามารถสลับโหมดกันได้นั้นจะต้องเกิดจากการตัดกันของระบบไมโมทั้งสองเทคนิค ซึ่งถ้าเราไม่ทำการคัดเลือกรูปแบบดังที่ทำในงานวิจัยนี้ ระบบก็ต้องใช้ระยะเวลาในการทำงานเยอะและนานขึ้น แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการคัดเลือก

รูปแบบที่สามารถสลับโหมดได้ เพื่อเก็บไว้เป็นข้อมูลและตัดรูปแบบที่ไม่จำเป็นออกไป ซึ่งจะช่วยให้การทำงานของระบบสามารถประมวลผลได้รวดเร็วขึ้น จากนั้นจะเปรียบเทียบให้เห็นถึงสมรรถนะของการทำงานของระบบด้วยการวัดจากค่าความผิดพลาดบิต โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคของการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง และเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว ซึ่งจากผลการจำลองแบบนั้นแสดงให้เห็นว่า การนำเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวมาใช้งานในระบบไวแมกซ์นั้นจะสามารถทนต่อสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าเทคนิคไมโมทั้งสองรูปแบบ เนื่องจากเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวนี้ จะสามารถปรับตัวให้เข้ากับการทำงานในแต่ละครั้งและจะเลือกรูปแบบที่เหมาะสมในการส่งสัญญาณออกไปจึงทำให้เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับและส่งข้อมูลให้ดีขึ้นในระบบไวแมกซ์ได้ นอกจากนี้ยังทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ โดยจะเห็นว่า พื้นที่ครอบคลุมของเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวนั้นจะให้พื้นที่ครอบคลุมที่ดีกว่าการใช้ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และ การมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง ดังนั้นสำหรับการนำไปใช้งานจริงนั้นเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวถือได้ว่าเป็นเทคนิคที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของการทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดี ซึ่งจะทำให้การรับและส่งข้อมูลมีประสิทธิภาพขึ้น และการให้พื้นที่ครอบคลุมที่เหมาะสมกับระบบไมแมกซ์มากที่สุด

โดยทั่วไปแล้วความน่าจะเป็นในการเลือกลายเซ็นมืออ้างอิงที่เหมาะสมที่สามารถใช้ตรวจสอบลายเซ็นได้อย่างน่าเชื่อถือ ขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวอย่างในกลุ่มที่ใช้ในการเลือกนั่นเอง นอกจากนี้ระดับการตัดสินใจยังขึ้นอยู่กับการคำนวณหาค่าของ FAR และ FRR จากค่าของลายเซ็นที่ใช้ทดสอบของฐานข้อมูลที่เก็บลายเซ็นมือผู้ใช้งานไว้ ถ้าจำนวนตัวอย่างที่เก็บไว้เลือกลายเซ็นอ้างอิงน้อยการเลือกระดับตัดสินใจก็กว้างมากขึ้นทำให้การแยกแยะลายเซ็นปลอมทำไม่มีประสิทธิภาพ

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

สำหรับงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาการสื่อสารไร้สายระบบไวแมกซ์ เป็นระบบที่ให้อัตราเร็วในการรับและส่งข้อมูลสูง และยังมีพื้นที่ให้บริการที่กว้างและครอบคลุมมากขึ้น ซึ่งระบบไวแมกซ์นี้จะตอบสนองต่อความต้องการในการนำไปใช้งานในปัจจุบันได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามการที่จะทำให้ระบบการทำงานนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นก็ต้องอาศัยเทคนิคและวิธีการต่าง ๆ เข้ามาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการทำงานของระบบ ซึ่งระบบไวแมกซ์นี้ก็ยังรองรับกับการทำงานของระบบไมโมด้วย และแน่นอนว่าการนำระบบไมโมเข้ามาใช้งานร่วมกับระบบไวแมกซ์นั้นก็จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลได้ดีขึ้น

สำหรับงานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษาการทำงานของระบบไวแมกซ์ โครงสร้างการทำงานของระบบซึ่งในระบบไวแมกซ์นี้จะมี 256 subcarrier ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็นข้อมูลจำนวน 192 subcarrier, pilot 8 subcarrier, zero DC 1 subcarrier และ guard carrier 55 subcarrier จากนั้นศึกษาถึงโครงสร้างของระบบทั้งภาครับและภาคส่ง เพื่อที่นำเทคนิคไมโมเข้าไปร่วมใช้งานกับระบบไวแมกซ์ โดยพบว่า หลังจากที่ข้อมูลผ่านการมอดูเลตแล้ว ในส่วนนี้จะนำข้อมูลที่ได้ไปใช้งานกับเทคนิคไมโมแบบวงเปิด ซึ่งเทคนิคไมโมแบบวงเปิดนี้ ก็มี 2 เทคนิคด้วยกันคือ เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง เพื่อส่งสัญญาณออกไป ส่วนภาครับก็เช่นเดียวกัน ข้อมูลที่รับได้ที่ภาครับ ก็จะถูกนำไปเข้ากระบวนการสำหรับการถอดรหัสในแต่ละรูปแบบเพื่อให้ได้ข้อมูลออกมา จากนั้นก็จะเอาข้อมูลที่ผ่านการถอดรหัสนี้ มาดีมอดูเลต เพื่อให้ได้ข้อมูลจริงที่ถูกส่งมา แต่ถึงอย่างไรก็ตามสำหรับการใช้งานเทคนิคไมโมเพียงเทคนิคเดียวอาจจะยังไม่เพียงพอ จึงได้ศึกษาถึงเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัว เพื่อนำมาเพิ่มประสิทธิภาพในการรับและส่งข้อมูลให้กับระบบ โดยเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวนี้จะเป็นการรวมเอาเทคนิคในการส่งสัญญาณของระบบไมโมทั้งสองรูปแบบมารวมเข้าไว้ด้วยกัน โดยหลักเกณฑ์ในการเลือกรูปแบบนั้นจะอาศัยการคำนวณค่าระยะยูคลิเดียนต่ำสุดของแต่ละรูปแบบเพื่อทำการเลือกรูปแบบที่เหมาะสมในขณะนั้น ในการส่งข้อมูลออกไป จากนั้นจะทำการศึกษาการทำนายพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ เมื่อนำเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวมาใช้งานในระบบ โดยการทำนายพื้นที่ครอบคลุมนี้ จะทำนายจากค่าของความผิดพลาดบล็อก โดยจะกำหนดค่าความผิดพลาดบล็อกที่เป็นค่าเป้าหมายไว้ โดยค่าของพื้นที่ครอบคลุมจะถูกคิดออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ เพื่อให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่ารูปแบบใดจะให้พื้นที่ครอบคลุมที่ดีและเหมาะสมกับระบบไวแมกซ์

ค่าของพื้นที่ครอบคลุมจะถูกคิดออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ เพื่อให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่ารูปแบบใดจะให้พื้นที่ครอบคลุมที่ดีและเหมาะสมกับระบบไวแมกซ์

จากนั้นได้ทำการจำลองแบบของระบบไวแมกซ์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยการจำลองแบบของระบบไวแมกซ์นี้จะนำเอาเทคนิคของระบบไมโมแบบวงเปิดเข้ามาใช้งานด้วย ซึ่งจะแบ่งการจำลองแบบออกเป็น 2 รูปแบบคือ ระบบไวแมกซ์ใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และระบบไวแมกซ์ ที่ใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง โดยการจำลองงแบบนี้จะใช้รูปแบบการมอดูเลชั่น 4 รูปแบบคือ BPSK, QPSK, 16-QAM และ 64-QAM จากนั้นเราจะนำข้อมูลที่ได้จากการจำลองแบบของเทคนิคไมโมทั้งสองรูปแบบนี้ มาทำการคัดเลือกรูปแบบที่สามารถเกิดการสลับโหมดกันได้จริง สำหรับขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เนื่องจากการคัดเลือกรูปแบบนี้จะทำให้รูปแบบที่ไม่สามารถสลับโหมดกันได้นั้นถูกตัดทิ้งออกไป เหลือไว้เพียงรูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้เท่านั้น ซึ่งกระบวนการนี้จะช่วยลดการทำงานของระบบให้มีการประมวลผลได้รวดเร็วขึ้น ถ้าไม่ทำการคัดเลือกรูปแบบที่ไม่จำเป็นออก ระบบก็จะต้องนำทุกรูปแบบที่ได้มาประมวลผล ซึ่งจะทำให้การทำงานของระบบใช้เวลาที่นานขึ้น เมื่อได้รูปแบบที่สามารถสลับโหมดกันได้แล้วก็จะนำรูปแบบดังกล่าวมาจำลองแบบโดยใช้เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวที่นำเสนอในงานวิจัย ซึ่งจะเห็นได้จากผลการจำลองแบบว่า การนำเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวเข้ามาใช้นั้นจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตของระบบไวแมกซ์ที่มีการใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา การมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง และเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวนั้น จะเห็นว่า เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวนั้น จะมีอัตราความผิดพลาดบิตที่น้อยกว่าเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงตำแหน่ง จากนั้นก็ทำการจำลองแบบเพื่อทำนายพื้นที่ครอบคลุมที่เกิดขึ้นเมื่อนำเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวมาใช้กับระบบไวแมกซ์ จากผลการจำลองแบบพบว่า เทคนิคการสลับไมโมแบบปรับตัวนี้ จะให้พื้นที่ครอบคลุมที่ดีกว่าเทคนิคไมโมทั้งสองเทคนิค นั้นแสดงให้เห็นว่าการนำเทคนิคไมโมมาใช้งานกับระบบไวแมกซ์นั้น จะทำให้ระบบไวแมกซ์มีประสิทธิภาพในการรับและส่งข้อมูลดีขึ้น โดยเฉพาะเทคนิคการสลับไมโมแบบปรับนี้ จะให้ประสิทธิภาพในการรับและส่งข้อมูลและพื้นที่ครอบคลุมที่ดีขึ้น ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้กับระบบไวแมกซ์

จากผลการจำลองแบบทั้งหมดที่ได้กล่าวมา เราสามารถสรุปได้ว่า การนำเทคนิคไมโมมาใช้งานกับระบบไวแมกซ์ โดยเฉพาะเทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวที่เสนอในงานวิจัยนี้ จะช่วยให้การรับและส่งข้อมูลของระบบไวแมกซ์มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น อีกทั้งยังมีพื้นที่ครอบคลุมในการให้บริการที่ดีขึ้น จึงทำให้วิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เหมาะที่จะนำไปใช้งานกับระบบไวแมกซ์ เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

5.2 ข้อแสนอแนะ

ในการทำงานของโปรแกรมสำหรับการจำลองแบบโดยใช้เทคนิคการสลับโหมดไมโมแบบปรับตัวนั้นจะใช้เวลานานเนื่องจาก ระบบต้องการคำนวณเพื่อหาค่าระยะยูคลิเดียนต่ำสุด ซึ่งในการคำนวณนั้นจำเป็นต้องคำนวณค่าจากทุกจุดของคู่คอนสเตลเลชั่น วิธีการแก้ไข คือ จำลองแบบโปรแกรมโดยเลือกกลุ่มตัวอย่างก่อนเพื่อดูค่าแนวโน้มของเส้นกราฟ โดยทำการเลือกค่า SNR ประมาณ 7 – 8 ค่า แล้วจำลองแบบโปรแกรม เมื่อโปรแกรมทำงานได้ถูกต้องแล้วค่อยเพิ่มจำนวนค่า SNR ตามที่กำหนดไว้

งานวิจัยนี้เป็นการจำลองแบบระบบไวแมกซ์ที่นำเทคนิคของระบบไมโมมาใช้งาน โดยผ่านการจำลองแบบทางโปรแกรม MATLAB ด้วยการใช้สายอากาศภาคส่งที่ 2 ต้น โดยในการพัฒนางานวิจัยในอนาคตอาจจะใช้จำนวนของสายอากาศภาคภาคส่งและภาครับที่เพิ่มขึ้น และควรทดสอบระบบนี้ด้วยฮาร์ดแวร์ และช่องสัญญาณจริง เพื่อนำผลที่ได้จากการจำลองแบบกับผลที่ได้จากฮาร์ดแวร์มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งจะทำให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บรรณานุกรม

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 mode 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.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

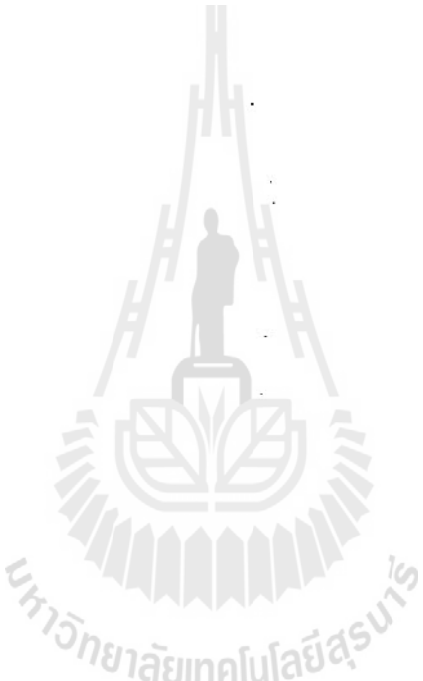
บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการนานาชาติ

Pattaraporn Khakhai, Monthippa Uthansakul and Peerapong Uthansakul, "Adaptive MIMO mode Switching of 2x2 MIMO System for WiMAX Technology," IEEE ComCompAp, January 11-13, 2012. Hongkong, China.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ช

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



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

978-1-4577-1719-2/12/$26.00 ©2012 IEEE

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 am 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:

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

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 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 interferenee and avoiding error bursts. Moreover, it used to obtain gains due to spatial diversity via multiple transmit and receive antenna. 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 $-s_2^*$. 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:

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

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:

$$\begin{aligned} s_1 &= h_1^* r_1 - h_2 r_2^* \\ s_2 &= h_2^* r_1 + h_1 r_2^* \end{aligned} \qquad (3)$$

These expressions clearly show that s_1 and s_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 used 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

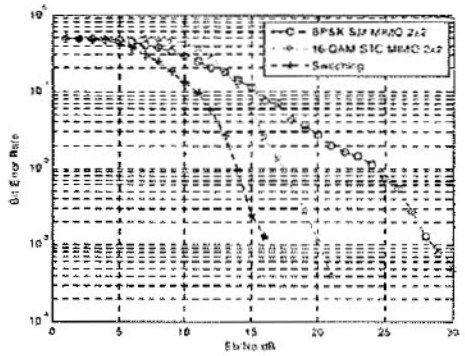


Figure 2. BER performance of scheme A described in Table III.

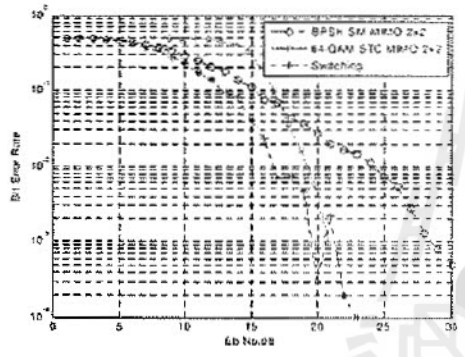


Figure 4. BER performance of scheme B described in Table III.

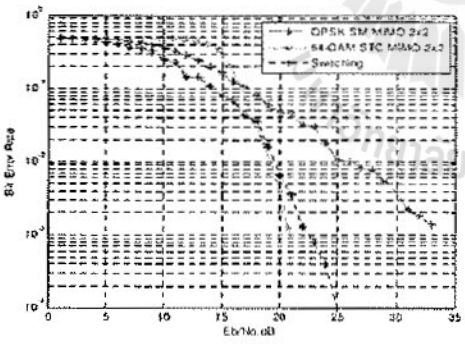


Figure 5. BER performance of scheme C described in Table III.

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, Harald Artes, 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] Prabagaranie.N,Ramakrishnan M.Karthika S.Janaki,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

ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2539 และ 2541 จากนั้นเข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรระบบโทรคมนาคมที่องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย จนกระทั้ง พ.ศ. 2543 จึงได้ย้ายมาเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้ลาศึกษาต่อระดับปริญญาเอกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ณ University of Queensland, Australia เมื่อ พ.ศ. 2549 จึงได้กลับเข้ามาปฏิบัติหน้าที่อาจารย์ตามเดิม ผู้วิจัยมีเชี่ยวชาญในด้านระบบ MIMO, Information Theory, Signal Processing, Radio Wave Modelling, Mobile Communication, Advance Wireless Communication ปัจจุบันมีบทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการ 26 บทความ และในการประชุมวิชาการ 90 บทความ หนังสือวิชาการในประเทศ 1 เล่มและต่างประเทศ 1 เล่ม มีลิขสิทธิ์ 1 รายการและ สิทธิบัตร 1 รายการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล ได้รับรางวัล Young Scientist Travel Grant Award จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ International Symposium on Antenna Propagation ปี พ.ศ. 2547 ณ ประเทศญี่ปุ่น และได้รับรางวัล Best Student Presentation Award จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ Australian Symposium on Antanna ปี พ.ศ. 2548 ณ ประเทศออสเตรเลีย ในปี พ.ศ. 2553 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล ได้รับรางวัลพนักงานดีเด่น ด้านการวิจัย สำหรับนักวิจัยรุ่นใหม่ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และในปี พ.ศ. 2556 บทความที่เป็นผู้ประพันธ์หลักเรื่อง Low-profile beamforming MIMO systems for wireless communications ได้รับรางวัลประกาศนียบัตร ผู้นำเสนอผลงานวิจัยดีมากแบบโปสเตอร์ ในงานการประชุมสุดยอดมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ครั้งที่ 2 (The Second Thailand National Research Universities Summit : NRU SUMMIT II) วันที่ 7-8 พฤษภาคม 2556 ณ ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพฯ

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี