



การปรับปรุงเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบร่วมมือ 2 ฮอฟ โดยอาศัยการเลือก
เส้นทางและรหัสบล็อกปริภูมิ-เวลา แบบที่มีวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า

เรือตรี ไพฑูรย์ พูลสวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

พ.ศ. 2556

**Improving Dual-Hop Cooperative Mobile Network
Based on Path Selection and STBC with Pre-Coding Scheme**

Sub.Lt.Paitoon Poonsawatt

เลขทะเบียน.....	0225737
วันลงทะเบียน.....	- 1 ก.ค. 2556
เลขเรียกหนังสือ.....	ว ๒๑. ๓๘๒ ๑
	พ ๑๖๕ ๗
	[๒๕๕๖]

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Computer and Telecommunication Engineering
Faculty of Engineering, Dhurakij Pundit University**

2013



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบร่วมมือ 2 ฮอป โดยอาศัย
การเลือกเส้นทางและรหัสบล็อกปริภูมิ-เวลาแบบที่มีวิธีการเข้ารหัส
ล่วงหน้า

เสนอโดย เรือตรีไพฑูรย์ พูลสวัสดิ์

สาขา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ปยุตวิวี จามจรีกุล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดยคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์แล้ว

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.ประศาสน์ จันทราทิพย์)

.....กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ปยุตวิวี จามจรีกุล)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชัยพร เขมะภาคะพันธ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.พีรเดช ฦ น่าน)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์รับรองแล้ว

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(อาจารย์ ดร.ชัยพร เขมะภาคะพันธ์)

วันที่ 21 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2556

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ปุณยวีร์ จามจรีกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด นอกจากนี้ กระผมใคร่ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ชัยพร เขมะภาคะพันธ์ ผู้อำนวยการหลักสูตรฯ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และเอาใจใส่นักศึกษาทุกๆ คนเสมอมา นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม ที่ได้ถ่ายทอดความรู้แก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ประศาสน์ จันทราทิพย์ และ อาจารย์ ดร.พีรเดช ฌ น่าน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านในสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม ที่ช่วยดำเนินการเรื่องต่างๆ ให้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ นายทศพร จันทร์เผือก ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่มีประโยชน์ อีกทั้งเพื่อนร่วมรุ่นปริญญาโททุกท่าน ที่คอยสนับสนุนและความเป็นห่วงเป็นใยที่มี จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ตลอดจนบุคคลในครอบครัวของผู้วิจัย ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยในทุกๆ ด้าน ตลอดระยะเวลาการศึกษาจนสำเร็จการศึกษา

เรือดรี ไพฑูรย์ พูลสวัสดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ผ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
2. แนวคิด ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย.....	4
2.2 ช่องสัญญาณและการจางหาย (Channel and Fading).....	6
2.3 ความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity).....	12
2.4 ระบบสื่อสารไร้สาย แบบหลายทางเข้า หลายทางออก.....	14
2.5 ความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ.....	16
2.6 การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา และการปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้า (Precoding)..	22
2.7 เทคนิคการรวมสัญญาณ.....	27
2.8 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ.....	31
2.9 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3. ระเบียบวิธีวิจัยและผลการทดสอบ.....	34
3.1 โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ	34
3.2 หลักการพิจารณาเลือกเส้นทางในการส่งผ่านข้อมูล (Path Selection).....	37
3.3 หลักการส่งข้อมูลที่เข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ด้วยวิธีการ เข้ารหัสล่วงหน้า.....	38
3.4 แผนการดำเนินงาน.....	44
3.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	45
4. ผลการศึกษา.....	46
4.1 ข้อกำหนดและตัวแปรที่ใช้ในการจำลองระบบ.....	46
4.2 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ระหว่างวิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) กับการสื่อสารแบบร่วมมือที่ไม่ใช้ STBC-PC.....	48
4.3 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ระหว่างวิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) ที่มีการเลือกเส้นทางกับวิธีที่ไม่มีการเลือกเส้นทาง.....	50
4.4 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ระหว่างวิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) เมื่อมีโหนดส่งผ่านจำนวนมากในระบบ.....	53
4.5 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ระหว่างวิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) ที่มีการเลือกเส้นทาง กับวิธีการส่งข้อมูลของ Ho-Jung An.....	57
5. สรุปผลการวิจัย.....	60
5.1 สรุปผลการศึกษาและวิจัย.....	60
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนางานวิจัย.....	61
5.3 องค์ความรู้ที่ได้รับจากการทำวิจัย.....	62
บรรณานุกรม.....	63
ประวัติผู้เขียน.....	66

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	44
4.1 พารามิเตอร์เริ่มต้นที่ใช้ในการทดสอบระบบ.....	47
4.2 ค่า Channel Capacity ในแต่ละฮอปที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ.....	51
4.3 ค่าความจุของช่องสัญญาณในการพิจารณาเลือกเส้นทาง เมื่อมีโหนดส่งผ่านเพิ่มขึ้น.....	54

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย.....	5
2.2 รูปแบบของการจางหาย.....	11
2.3 การรับส่งข้อมูลแบบสายอากาศเดี่ยว และหลายสายอากาศ.....	15
2.4 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ.....	17
2.5 การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ.....	18
2.6 การส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ.....	20
2.7 การส่งต่อสัญญาณแบบ Decode-and-forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ.....	21
2.8 โครงสร้างการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti.....	23
2.9 ภาพรวมของระบบรับ-ส่งสัญญาณที่ใช้รหัสเชิงปริภูมิ-เวลา.....	24
2.10 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือก.....	28
2.11 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด.....	29
2.12 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน.....	29
2.13 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับ จำนวนช่องสัญญาณของเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 แบบ.....	30
3.1 ระบบสื่อสารเคลื่อนที่แบบร่วมมือที่นำเสนอ.....	35
3.2 รูปแบบช่องสัญญาณระบบสื่อสารเคลื่อนที่แบบร่วมมือที่นำเสนอ.....	35
3.3 การแจ้งสภาพของช่องสัญญาณร่วมกันระหว่างภาครับและภาคส่ง.....	36
4.1 การเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอใช้การส่งที่ใช้เทคนิคการเข้ารหัส STBC-PC กับวิธีการส่งที่ไม่ใช้การเข้ารหัส STBC-PC.....	48
4.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างการส่งแบบใช้ STBC-PC และไม่ใช้ STBC-PC.....	49
4.3 รูปแบบที่ใช้การส่งที่ใช้การเข้ารหัส STBC-PC ที่มีการเลือกเส้นทาง กับวิธีที่ไม่มีการเลือกเส้นทาง.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง การส่งแบบเลือกเส้นทาง และไม่มีทางเลือกเส้นทาง.....	52
4.5 รูปแบบที่ใช้การส่งที่ใช้การเข้ารหัส STBC-PC ที่มีการเลือกเส้นทาง เมื่อจำลองให้ระบบ มีโหนดส่งผ่านเพิ่มมากขึ้น.....	53
4.6 การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง วิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) แบบมีการเลือกเส้นทาง เมื่อจำลองให้ระบบ มีโหนดส่งผ่านเพิ่มมากขึ้น.....	55
4.7 รูปแบบที่ใช้ในการส่งแบบวิธีที่นำเสนอ	57
4.8 รูปแบบที่ใช้ในการส่งแบบวิธีของ Ho-Jung An.....	57
4.9 การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง วิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) แบบมีการเลือกเส้นทางกับวิธีการส่งข้อมูลของ Ho-Jung An.....	58

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบร่วมมือ 2 ฮอป โดยอาศัยการเลือกเส้นทาง และรหัสบล็อกปริภูมิ-เวลา แบบที่มีวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า
ชื่อผู้เขียน	เรือดรี ไพฑูรย์ พูลสวัสดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ปุณยวีร์ จามจรีกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนออัลกอริทึมที่ใช้ในการเลือกเส้นทางในการติดต่อสื่อสารร่วมกับวิธีการเข้ารหัสบล็อกปริภูมิ-เวลา ที่มีวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า เพื่อที่จะปรับปรุงสมรรถนะของโครงข่ายการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่ส่งผ่านสัญญาณ 2 ฮอป ผ่านช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเรย์ลี อัลกอริทึมที่ใช้ในการเลือกเส้นทางที่นำเสนอนี้เป็นการออกแบบเพื่อใช้งานในอุปกรณ์ของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ที่มีเพียงเสาอากาศเดียว โดยพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณที่ดีที่สุดในการกำหนดเส้นทางในโครงข่าย

ผลการจำลองการทำงานของระบบที่นำเสนอ แสดงสมรรถนะของโครงข่าย โดยพิจารณาจากค่าอัตราความผิดพลาดบิต และอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเป็นหลัก ซึ่งผลการจำลองพบว่าการใช้การเข้ารหัสบล็อกปริภูมิ-เวลา ที่มีวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้าในการส่งข้อมูลให้อัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เทียบเท่ากับระบบที่ไม่มีการเข้ารหัสบล็อกปริภูมิ-เวลา แต่ต้องการอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) น้อยกว่า 12 dB

Thesis Title Improving Dual-Hop Cooperative Mobile Network Based on Relay
 Selection and STBC with Pre-Coding Scheme

Author Sub.Lt.Paitoon Poonsawatt

Thesis Advisor Assoc. Prof. Punyawit Jamjareekul

Department Computer and Telecommunication Engineering

Academic Year 2012

ABSTRACT

This thesis proposes an algorithm in association with Alamouti's space-time block code with pre-coding scheme (STBC-PC) to improve the network performance of a dual hop cooperative mobile network over Rayleigh fading channel. A path selection algorithm is designed to be used at the mobile station in order to employ STBC with single antenna by consider to an optimal the channel capacity and to provide better path in the network.

Findings from simulations of the proposed scheme show the performance mainly considered by Bit-Error-Rate (BER) and Signal-to-Noise Ratio (SNR). The simulation results show that STBC-PC scheme can achieve BER similar to non STBC-PC one. However, the STBC-PC scheme required lower SNR than the competitive one about 12 dB.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ระบบสื่อสารไร้สายในอนาคต มีความต้องการการส่งข้อมูลในอัตราความเร็วสูง ในช่องสัญญาณสื่อสารไร้สาย รองรับการสื่อสารข้อมูลมัลติมีเดีย ซึ่งประกอบไปด้วย ข้อมูลภาพ ข้อมูลเสียง และข้อมูลสื่อสารอื่นๆ ซึ่งได้มีการพัฒนาออกมาหลากหลายรูปแบบ เพื่อที่จะตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นเรื่องความเร็วในการรับ/ส่งข้อมูลที่สูงขึ้น เรื่องของความเป็นอิสระในการเคลื่อนที่ได้ หรือจะเป็นเรื่องของคุณภาพ ความน่าเชื่อถือในการให้บริการที่ดีในระบบ และเป็นที่ยอมรับเป็นอย่างดีว่าช่องสัญญาณไร้สายนั้น มีความไม่แน่นอนสูง อันเนื่องมาจากสาเหตุหลายประการ เช่น สภาพภูมิศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา การเคลื่อนที่ของเครื่องส่งและเครื่องรับ รวมไปถึงการสะท้อนของสัญญาณวิทยุกับสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาค้นคว้า พัฒนา และแก้ไขปัญหาดังกล่าวข้างต้น จึงเป็นสิ่งที่ท้าทายสำหรับนักวิจัย ที่ออกแบบระบบเพื่อที่จะส่งผลให้ระบบสื่อสารไร้สายมีความสามารถและประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

ปัจจุบันมีระบบสื่อสารไร้สายชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถรองรับความต้องการส่งข้อมูลในอนาคตและเพิ่มทางเลือกในการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ดีที่สุดได้เช่นเดียวกับระบบสื่อสารไร้สายหลายทางเข้าหลายทางออก (Multiple-Input Multiple Output หรือ MIMO) โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนของสายอากาศที่เครื่องส่งและเครื่องรับ การสื่อสารดังกล่าวนี้เรียกว่า การสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ (Cooperative Wireless Communication) ซึ่งอาศัยเทคนิคการส่งต่อข้อมูล (Relaying) โดยให้ผู้ใช้งานคนอื่นๆ ในระบบ ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยส่งต่อข้อมูลไปยังเครื่องรับปลายทาง ซึ่งจะทำให้เกิดระบบการสื่อสารที่มีข้อดีหรือประโยชน์หลายๆ ประการคล้ายกับระบบการสื่อสารแบบหลายทางเข้า หลายทางออก (MIMO Communication System) ขึ้นมา เทคนิคนี้ช่วยเพิ่มความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity) ให้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้อัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate หรือ BER) ของระบบโดยรวมลดลง และค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio หรือ SNR) ของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อุปกรณ์สื่อสารไร้สายจำพวก โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้งานในปัจจุบันและมีสายอากาศเพียงต้นเดียวเท่านั้น ก็สามารถที่จะติดต่อสื่อสารผ่านเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยอาศัยหลักการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือดังกล่าวนี้ได้ แต่ในการเลือกผู้ใช้งานคนอื่นๆ ในระบบเพื่อทำการส่งต่อข้อมูลนั้นย่อมต้องใช้ข้อพิจารณาที่แตกต่างกันไป

งานวิจัยฉบับนี้ เสนอแนวคิดในการเลือกโหนดส่งผ่านในเครือข่าย เพื่อส่งต่อข้อมูล โดยพิจารณาจากความจุของช่องสัญญาณที่ดีที่สุด โดยใช้ร่วมกับรหัส STBC ของ Alamouti¹ พร้อมทั้งวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) ในการส่งและรวมสัญญาณ โดยใช้วิธีการพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นจริงสูงสุด (Maximum Likelihood Decoder หรือ ML) ช่วยในการตัดสินใจ ทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ เพื่อให้ระบบสื่อสารไร้สายมีประสิทธิภาพการส่งข้อมูลที่คล้ายได้ช่องสัญญาณไร้สายที่เกิดการจางหายแบบเรย์ลี (Rayleigh Fading) โดยจะทำการจำลองสถานการณ์ของระบบสื่อสารเพื่อตรวจจับอัตราความผิดพลาดบิต (BER) และทำการเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของระบบที่นำเสนอ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการ Cooperative Transmission เพื่อที่จะนำประยุกต์ใช้งานกับ Mobile Network ปัจจุบัน ที่ซึ่งโทรศัพท์เคลื่อนที่มีสายอากาศใช้งานเพียงคันเดียว โดยใช้หลักการ Precoding ร่วมกับรหัส STBC ของ Alamouti
2. เพื่อสร้างแบบจำลองเครือข่ายสื่อสารแบบร่วมมือที่มีหลายโหนดส่งผ่าน แล้วใช้เงื่อนไขการเลือกใช้โหนดส่งผ่านที่มี ความจุของช่องสัญญาณเหมาะสมที่สุดเพื่อที่จะทำให้อัตราความผิดพลาดบิต (BER) จากโหนดต้นทางถึงโหนดปลายทางมีค่าต่ำที่สุด ประหยัดพลังงานที่สุด และพื้นที่ครอบคลุมมากขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. สร้างแบบจำลองเครือข่ายเซลลูลาร์โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการติดต่อสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือผ่านโหนดส่งผ่านที่มีจำนวนมาก และโทรศัพท์เคลื่อนที่หรืออุปกรณ์ปลายทางแบบไร้สายยังคงมีสายอากาศที่ใช้งานเพียงคันเดียว ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานแบบ Virtual MIMO Network โดยใช้วิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) ร่วมกับรหัส STBC ของ Alamouti
2. พัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ในการติดต่อระหว่างโหนดต้นทางผ่านโหนดส่งผ่าน ไปยังโหนดปลายทาง โดยใช้เงื่อนไขการเลือกใช้โหนดส่งผ่านที่มีความจุของช่องสัญญาณดีที่สุด เพื่อที่จะทำให้อัตราความผิดพลาดบิต (BER) จากโหนดต้นทางถึงโหนดปลายทางมีค่าต่ำที่สุด ประหยัดพลังงานที่สุด

¹ Ho-Jung An, Jee-Hoon Kim, and Hyoung-Kyu Songb. (September,2007). "Cooperative Transmission Scheme to Increase Gain by STBC." Engineering Letters.,Vol. 15, No. 1 (pp.135 - 139).

และพื้นที่ครอบคลุมมากขึ้น ซึ่งเป็นหลักการที่กำลังอยู่ระหว่างการวิจัยและพัฒนาในมาตรฐาน IEEE 802.16j²

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ และวิธีการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา ร่วมกับวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding)
2. เข้าใจการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรับและส่งต่อข้อมูล ของการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ
3. เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือกับจำนวนผู้ใช้งานในระบบทั้งหมด k คน ต่อไปในอนาคต
4. เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ ในการส่งสัญญาณแบบต่างๆ เช่น สัญญาณภาพ สัญญาณเสียง และข้อมูลสื่อสารอื่นๆ เป็นต้น
5. เข้าใจหลักการ เลือกเส้นทางในการส่งต่อข้อมูลของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ ที่ใช้เสาอากาศเดียว

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาวิธีการรับ/ส่งข้อมูลของระบบสื่อสารแบบร่วมมือ
2. ศึกษาโครงสร้างและหลักการเขียนโปรแกรมของระบบสื่อสารแบบร่วมมือ
3. ศึกษาความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา และวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า
4. วิเคราะห์ประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูลของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ
5. ทดสอบและวัดประสิทธิภาพ ผลของวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูล ด้วยการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา และวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า สำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่น่าสนใจ
6. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลจากการทดลอง
7. จัดทำรายงานความคืบหน้าและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

² F. M. Najmeh and K. Hossein, (December 2008) "Outage Probability of Relay Selection Methods for IEEE802.16j." ICECE'08. (pp.484 - 487).

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบสื่อสารไร้สาย เป็นรูปแบบหนึ่งในหลายๆ วิธีของระบบสื่อสารที่ใช้สำหรับส่งข้อมูลข่าวสารแบบอนาล็อกหรือดิจิทัล จากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง ผ่านช่องสัญญาณสื่อสารแบบไร้สาย ตัวอย่างเช่น การส่งข้อมูลแบบไมโครเวฟ (Microwave Communication) ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม (Satellite System) และระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile System) เป็นต้น แต่เนื่องจากคุณลักษณะของช่องสัญญาณไร้สายที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบต่างๆ อย่างเช่น สิ่งแวดล้อมทางกายภาพ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ภาครับหรือส่ง รวมถึงอุณหภูมิ เป็นต้น เป็นผลให้สัญญาณข้อมูลที่ถูกตรวจจับได้ที่โหนดปลายทางมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิม อีกทั้งในปัจจุบัน ความต้องการในการส่งข้อมูลในอัตราความเร็วสูง เพื่อรองรับการสื่อสารข้อมูลมัลติมีเดีย ซึ่งประกอบไปด้วย ข้อมูลภาพ ข้อมูลเสียง และข้อมูลสื่อสารอื่นๆ จากผลกระทบดังกล่าวทำให้ผู้ใช้งานอาจจะไม่ได้รับการตอบสนองตามความต้องการในการติดต่อสื่อสาร ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีและวิธีการต่างๆ ขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว

สำหรับในบทนี้ จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย ช่องสัญญาณและการจางหาย (Fading) ความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity) ความรู้เกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้า หลายทางออก ความรู้เบื้องต้นกับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา สุดท้ายจะอธิบายถึง ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเหตุผลจำเป็นที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเอาหลักการของการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา วิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) หลักการเลือกเส้นทาง (Path Selection) และวิธีการของการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือมาใช้ ก็เพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้น ดังกล่าวข้างต้น

2.1 หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย

การออกแบบและใช้งานระบบสื่อสารเคลื่อนที่เพื่อส่งข้อมูลดิจิทัลนั้น มีความจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบต่างๆ ของระบบสื่อสาร เช่น ขนาดแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของช่องสัญญาณที่ใช้งาน อัตราเร็วในการส่งข้อมูล และสัดส่วนกำลังสัญญาณที่ได้รับต่อกำลังสัญญาณรบกวน เป็นต้น โดยจะต้องมีการออกแบบให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้งานระบบสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เป็นการรบกวนช่องสัญญาณอื่นๆ ซึ่งข้อมูลที่เป็นสัญญาณดิจิทัล d , ต้องผ่าน

$$\begin{aligned}\bar{R}_i &= h(t)\bar{S}_i + \bar{n} \\ \bar{R}_i &= (\text{Fading} \times \text{Pathloss})\bar{S}_i + \bar{n}\end{aligned}\quad (2.1)$$

จากการศึกษาคุณสมบัติของช่องสัญญาณแบบไร้สาย พบว่าลักษณะของสัญญาณข้อมูล \bar{R}_i ที่ถูกตรวจจับได้ ณ โหนดปลายทาง อาจมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปได้จากสาเหตุต่างๆ จึงได้มีการพัฒนาวิธีการต่างๆ ขึ้นมาเพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูลที่ถูกส่งผ่านระบบสื่อสาร

2.2 ช่องสัญญาณและการจางหาย (Channel and Fading)^{2,3,4}

2.2.1 ช่องสัญญาณ (Channel)

ช่องสัญญาณ หมายถึง ตัวกลางที่ให้สัญญาณผ่าน จากสายอากาศโหนดต้นทางไปยังสายอากาศโหนดปลายทางซึ่งมีความเป็นไปได้หลากหลายรูปแบบ ทั้งที่เป็นอากาศ เป็นสายทองแดง หรือใยแก้วนำแสง โดยที่ช่องสัญญาณนั้นจะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณของข้อมูลอินพุตชุดหนึ่งให้เป็นสัญญาณของข้อมูลเอาต์พุตชุดหนึ่ง และในระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ คลื่นสัญญาณที่ถูกส่งออกมาทางโหนดต้นทางนั้น จะไม่ได้เดินทางมาถึงยังทางโหนดปลายทางเป็นแนวเส้นตรง เพราะจะต้องพบกับอุปสรรคและสิ่งกีดขวางในสภาพแวดล้อมที่สัญญาณจะต้องแพร่กระจายเคลื่อนที่ผ่าน โดยที่คลื่นสัญญาณที่มาถึงทางโหนดปลายทางจะเกิดขึ้นจากการรวมกันของคลื่นหลายวิถีที่มาจากหลายทิศทาง ซึ่งเกิดจากการผ่านอุปสรรคและสิ่งกีดขวางต่างๆ เช่นการสะท้อน (Reflection) การเลี้ยวเบน (Diffraction) และการกระจัดกระจาย (Scattering) ซึ่งมีตัวอย่างของการผ่านสิ่งกีดขวางต่างๆ เช่น สิ่งก่อสร้าง ต้นไม้ยานพาหนะ โดยจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดพหุวิถี (Multipath) และผลจากการเกิดพหุวิถีนี้ทำให้สัญญาณที่มาถึงโหนดปลายทางนั้น มีผลมาจากสัญญาณมากกว่าหนึ่งทาง ซึ่งในแต่ละทางนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่แตกต่างกันไป ทั้งในเชิงแอมพลิจูด และเฟส สัญญาณที่ได้รับจะประกอบไปด้วยผลจากวิถีต่างๆ สัญญาณในแต่ละทางอาจเขียนให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ของแอมพลิจูดและเฟสได้ ถ้าอุปกรณ์ที่โหนดปลายทางกำลังเคลื่อนที่หรือสภาพแวดล้อมรอบๆ มีการเปลี่ยนแปลงผลกระทบจากช่องสัญญาณอาจเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอตามเวลา ดังนั้น ณ ขณะหนึ่ง สัญญาณที่รับได้ อาจจะมีการรวมกันแบบหักล้าง และในอีกขณะหนึ่ง อาจจะมีการรวมกันแบบเสริม ซึ่งรูปแบบของการกระจายตัวที่ใช้กันทั่วไป ในการบอก

² Marvin K. Simon and Mohamed-Slim Alouini. (September, 1998). "Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis." Proceedings of the IEEE., Vol. 86, No. 9, (pp.1860 - 1877)

³ Matthias Pätzold. (2002). "Mobile Fading Channel." John Wiley & Sons, Ltd.

⁴ Simon Haykin, Michael Moher. (2005). Modern Wireless Communication. Pearson Education, Inc.

ลักษณะของการสุ่มแอมพลิจูด ที่เป็นผลมาจากช่องสัญญาณพหุวิถี จะมีอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ ได้แก่ การกระจายตัวแบบเรย์ลี (Rayleigh) และการกระจายตัวแบบไรเซียน (Ricean)

ถ้าในสัญญาณที่ได้รับไม่มีองค์ประกอบตามเส้นแนวสายตา (Line-of-Sight หรือ LOS) ซึ่งก็คือเมื่อวิถีตรงถูกบดบัง เช่น การแพร่กระจายสัญญาณระยะไกล ในสภาพแวดล้อมกลางแจ้ง (Outdoor) สัญญาณที่ได้รับจะประกอบไปด้วย องค์ประกอบที่กระจัดกระจาย (Scattered) อันเนื่องมาจากการสะท้อนที่ไม่มีวิถีหลักซึ่งสามารถแยกออกเป็นองค์ประกอบร่วมเฟส (In-Phase) และองค์ประกอบตั้งฉาก (Quadrature) ซึ่งวิถีแต่ละวิถีมีผลต่อทั้งสองส่วนนี้ด้วย จากทฤษฎีขีดจำกัดกลาง (Central - Limit Theorem) เมื่อวิถีมีจำนวนมาก จะทำให้สามารถอนุมานได้ว่าองค์ประกอบร่วมเฟส และองค์ประกอบตั้งฉากเป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ดังนั้นแอมพลิจูดทั้งหมดของสัญญาณที่ได้มาจากการบวกเวกเตอร์ขององค์ประกอบทั้งหมด จึงเป็นไปตามนิยามของการกระจายตัวแบบเรย์ลี นอกจากนี้เฟสก็มีการกระจายตัวแบบเอกรูปในช่วง $[0, 2\pi]$ การกระจายตัวแบบเรย์ลีของแอมพลิจูดของสัญญาณ ρ มีนิยามดังนี้

$$f_{\rho}(\rho) = \frac{\rho}{\sigma^2} e^{-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}} \quad (2.2)$$

โดยที่ σ^2 คือ แวเรียนซ์ขององค์ประกอบร่วมเฟส และองค์ประกอบตั้งฉาก ซึ่งปริมาณทางสถิติสองค่าที่เกี่ยวข้องในที่นี้คือ ค่าเฉลี่ยและ โมเมนต์ที่สองของตัวแปรสุ่มแบบเรย์ลี ซึ่งมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} E\{\rho\} &= \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma \\ E\{\rho^2\} &= 2\sigma^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.2.2 การจางหาย (Fading)

ในระบบการสื่อสารแบบเคลื่อนที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ คุณลักษณะของช่องสัญญาณไม่อยู่ในสภาพคงที่ (Stationary) และสามารถคาดเดาได้เหมือนช่องสัญญาณในระบบสื่อสารที่เชื่อมต่อด้วยสาย (Wired Channel) กล่าวคือ ในระบบการสื่อสารแบบไร้สายจะเป็นรูปแบบของช่องสัญญาณที่มีลักษณะเป็นเชิงสุ่ม (Random) และเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ทั้งนี้เนื่องจากการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไร้สายระหว่างโหนดปลายทางกับโหนดต้นทาง เกิดขึ้นสูงจากพื้นดินไม่มากนัก ดังนั้นสัญญาณที่ส่งอาจเกิดการสะท้อนกับสิ่งกีดขวาง ที่อยู่บริเวณนั้น เช่น อาคาร ต้นไม้ หรือ พื้นดิน ส่งผลให้สัญญาณที่ปลายทางได้รับ ประกอบไปด้วย

สัญญาณที่สะท้อนจากหลากหลายวิถี ซึ่งมีขนาดและเฟสที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ การเคลื่อนที่ของ โหนดต้นทางขณะที่มีการส่งสัญญาณ หรือการที่สภาพแวดล้อมที่อยู่ระหว่างโหนดปลายทางส่ง และเครื่องรับที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา อย่างเช่น การเคลื่อนที่ของรถยนต์ที่อยู่บริเวณรอบๆ โหนดต้นทาง ก็มีผลต่อสัญญาณที่ปลายทางจะได้รับด้วยเช่นกัน ปัจจัยต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลให้สัญญาณที่ปลายทางได้รับนั้น มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างรวดเร็ว ทั้งในแง่ของขนาดแอมพลิจูด และเฟสของสัญญาณ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การจางหายของสัญญาณ (Small Scaled Fading) หรือ การจางหาย (Fading) ทั้งนี้ในกรณีที่ช่องสัญญาณไร้สายมีสัญญาณการสะท้อนจากทิศทาง ต่างๆจำนวนมาก แต่ไม่มีสัญญาณที่มาทิศทางใดเลยที่มาจากวิถีตรง (Line Of Sight หรือ LOS) ระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทาง จะเรียกการจางหายที่เกิดขึ้นนี้ว่าการจางหายเรย์ลี (Rayleigh-Fading) ซึ่งปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดการจางหาย และรูปแบบของการจางหายมีดังนี้

2.2.3 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดการจางหาย

2.2.3.1 การแผ่การประวิงเวลา (Delay Spread)

เนื่องจากสัญญาณที่ถูกส่งมาจากต้นทางไปถึงปลายทาง จะพบกับอุปสรรคระหว่างการเดินทาง จะทำให้เกิดการสะท้อนและหักเห ทำให้สัญญาณที่ปลายทางได้รับประกอบด้วยสัญญาณ สะท้อนจากหลายวิถี จึงทำให้สัญญาณที่ถูกส่งมาจากต้นทางถึงปลายทางมาถึงในเวลาที่แตกต่างกัน ดังนั้นสัญญาณรวมได้ที่ปลายทาง จึงเป็นสัญญาณที่มีการประวิงเวลาไปหรืออาจเรียกว่า สัญญาณเกิดการแผ่ทางเวลา (Time Spread) ผลของการประวิงเวลานั้นทำให้การเดินทางไปยัง ปลายทางของสัญญาณ ใช้เวลานานกว่าปกติ ก่อให้เกิดการรบกวนกันของสัญญาณในแต่ละสัญลักษณ์ หรือการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ ทั้งนี้การประวิงเวลาของสัญญาณจะเกิดขึ้นมากหรือน้อย ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของช่องสัญญาณจากต้นทางถึงปลายทาง

2.2.3.2 การแผ่ดอปเปลอร์ (Doppler Spread)

เมื่อเครื่องรับมีการเคลื่อนที่ จะส่งผลให้สัญญาณที่เดินทางมาในแต่ละทิศทางเกิดการ เลื่อนทางความถี่ เรียกว่า การเลื่อนความถี่ดอปเปลอร์ (Doppler Shift) ซึ่งความถี่ที่เลื่อนไปจะมีค่า เป็นบวกหรือลบเล็กน้อยเพียงใด ก็ขึ้นอยู่กับทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องรับด้วย และนอกจากนี้การเคลื่อนที่ของวัตถุที่อยู่บริเวณรอบๆเครื่องรับก็ยังส่งผลให้มีเกิดการเลื่อนความถี่ ดอปเปลอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเหมือนกัน จึงกล่าวได้ว่าการแผ่ดอปเปลอร์นี้ ทำให้ ช่องสัญญาณมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Time Varying Channel) และอัตราการเปลี่ยนแปลง ที่เกิดขึ้นก็ส่งผลโดยตรงต่อความเร็วของการเกิดการจางหายด้วย

2.2.4 รูปแบบของการจางหาย

การจางหายที่เกิดขึ้นในการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไร้สายนั้น มีอยู่หลายประเภท การที่จะพิจารณาว่าเป็นการจางหายแบบใดนั้น จะพิจารณาจากลักษณะของสัญญาณที่ส่งเปรียบเทียบกับคุณลักษณะของช่องสัญญาณ (Channel Characteristic) เป็นหลักตัวแปรของช่องสัญญาณที่ใช้พิจารณาได้แก่ แบนด์วิดท์ (Bandwidth), ช่วงเวลาของสัญลักษณ์ (Symbol Period) หรือ อัตราการส่งสัญญาณ (Transmission Rate) ส่วนปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อลักษณะของการจางหายได้แก่ การแผ่การประวิงเวลา (Delay Spread) และการแผ่คอปเปิลเลอร์ (Doppler Spread) เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของการจางหายจากการแผ่การประวิงเวลา จะได้การจางหาย 2 ประเภทคือ การจางหายแบบแนวราบ (Flat Fading) และการจางหายแบบเลือกความถี่ (Frequency-Selective Fading) เมื่อพิจารณาถึงการแพร่ในขณะที่เป็นการแผ่คอปเปิลเลอร์ จะส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดปรากฏการณ์การจางหายอีก 2 ประเภทคือ การจางหายแบบเร็ว (Fast Fading) และการจางหายแบบช้า (Slow Fading) ซึ่งในการพิจารณา รูปแบบของการจางหายจากการแผ่การประวิงเวลา และการแผ่คอปเปิลเลอร์ดังกล่าว เกิดขึ้นอย่างเป็นอิสระต่อกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3

2.2.4.1 การจางหายเมื่อพิจารณาจากการแผ่การประวิงเวลา

การแผ่การประวิงเวลา อันเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นหลายวิถีทาง (Multipath) ทำให้เกิดการจางหายอยู่ 2 ประเภทคือ การจางหายแบบราบและการจางหายแบบเลือกความถี่

2.2.4.1.1 การจางหายแบบราบ (Flat Fading)

ถ้าช่องสัญญาณมีผลการตอบสนองของอัตราขยายคงที่ และมีผลการตอบสนองของเฟสที่เป็นเชิงเส้นในช่วงแบนด์วิดท์ที่กว้างกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณแล้ว จะทำให้การจางหายที่เกิดขึ้นเป็นแบบราบ กล่าวคือ สัญญาณที่ปลายทางได้รับจะมีลักษณะเชิงสเปกตรัม (Spectrum Characteristic) ที่เหมือนเดิม แต่ค่าของกำลังของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เนื่องจากผลของการเดินทางของคลื่นหลายวิถีทางที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ ดังนั้นผลของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นจะเป็นการจางหายแบบราบ การจางหายแบบราบนี้ จึงสามารถเรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า ช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูด (Amplitude Varying Channel) ซึ่งในการแจกแจงของแอมพลิจูดที่มักพบโดยทั่วไปจะเป็นรูปแบบการแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh Distribution)

2.2.4.1.2 การจางหายแบบเลือกความถี่ (Frequency-Selective Fading)

ถ้าช่องสัญญาณมีผลการตอบสนองของอัตราขยายคงที่ และมีผลการตอบสนองของเฟสที่เป็นเชิงเส้นในช่วงแบนด์วิดท์ที่แคบกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณแล้ว จะทำให้การจางหายที่จะได้รับผลกระทบที่แตกต่างออกไป ซึ่งช่วงพิสัยของความถี่ที่ช่องสัญญาณ จะส่งผลกระทบต่อส่วนประกอบของสเปกตรัมโดยที่มีค่าที่เท่ากันเรียกว่า แบนด์วิดท์ร่วมนัย (Coherent Bandwidth)

เมื่อช่องสัญญาณเกิดการจางหายแบบเลือกความถี่ ผลตอบสนองช่องสัญญาณจะเกิดการแผ่ออกทางเวลา ซึ่งยาวกว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์ ทำให้สัญญาณที่ได้รับนั้นถูกลดทอนขนาด และจะมีการประวิงทางเวลาเป็นการส่งผลให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Intersymbol Interference) เกิดขึ้น

2.2.4.2 การจางหายเมื่อพิจารณาจากการแผ่คอปเปลอร์

การเลื่อนความถี่คอปเปลอร์ เกิดขึ้นจากการมีการเคลื่อนที่ระหว่างเครื่องรับกับโหนดต้นทางนั้นจะส่งผลต่อความเร็วในการจางหายและจะทำให้เกิดการจางหายขึ้นมา การจางหายเมื่อพิจารณาจากการแผ่คอปเปลอร์สามารถที่จะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ การจางหายแบบเร็ว และการจางหายแบบช้า

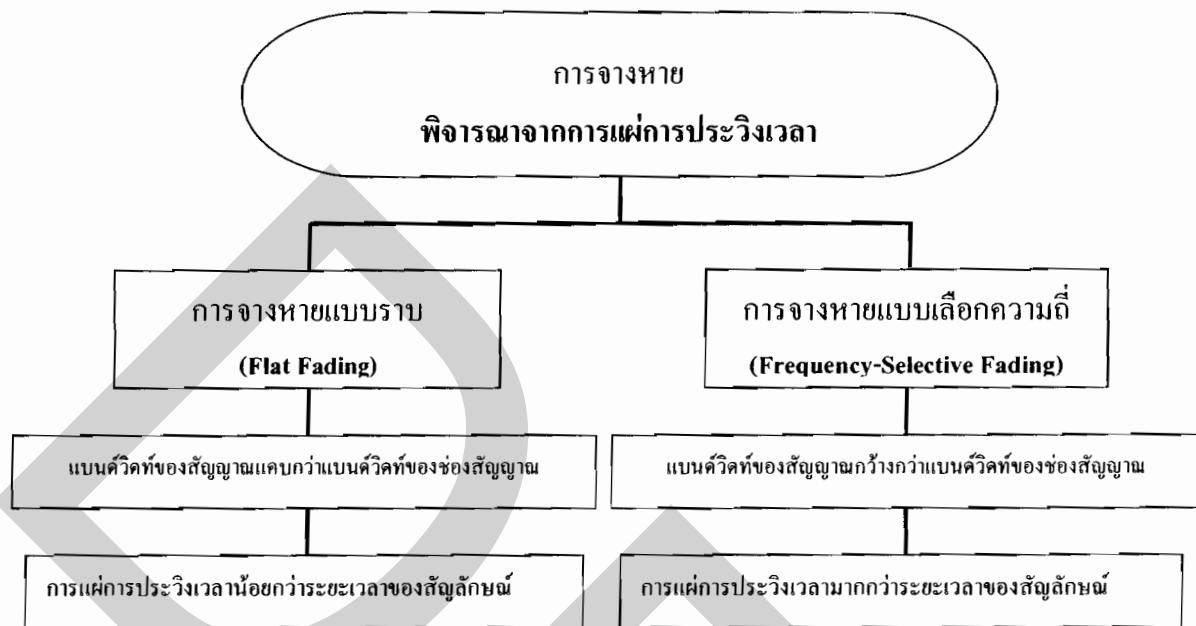
2.2.4.2.1 การจางหายแบบเร็ว (Fast Fading)

การแผ่คอปเปลอร์ และเวลาร่วมนัย (Coherence Time) เป็นตัวแปรที่ใช้บ่งชี้บอกถึงคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงที่ตามเวลาของช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของเครื่องรับที่ เวลาร่วมนัยคือ เวลาทางสถิติที่เป็นของผลการตอบสนองที่มีต่อช่องสัญญาณที่มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง และยังบอกให้ทราบถึง ความคล้ายกันของผลการตอบสนองของช่องสัญญาณในช่วงเวลาหนึ่งอีกด้วย ซึ่งคือ การที่สัญญาณที่มาถึงเครื่องรับในเวลาต่างกันแต่ไม่เกินเวลาร่วมนัย นั้นจะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณที่ใกล้เคียงกัน

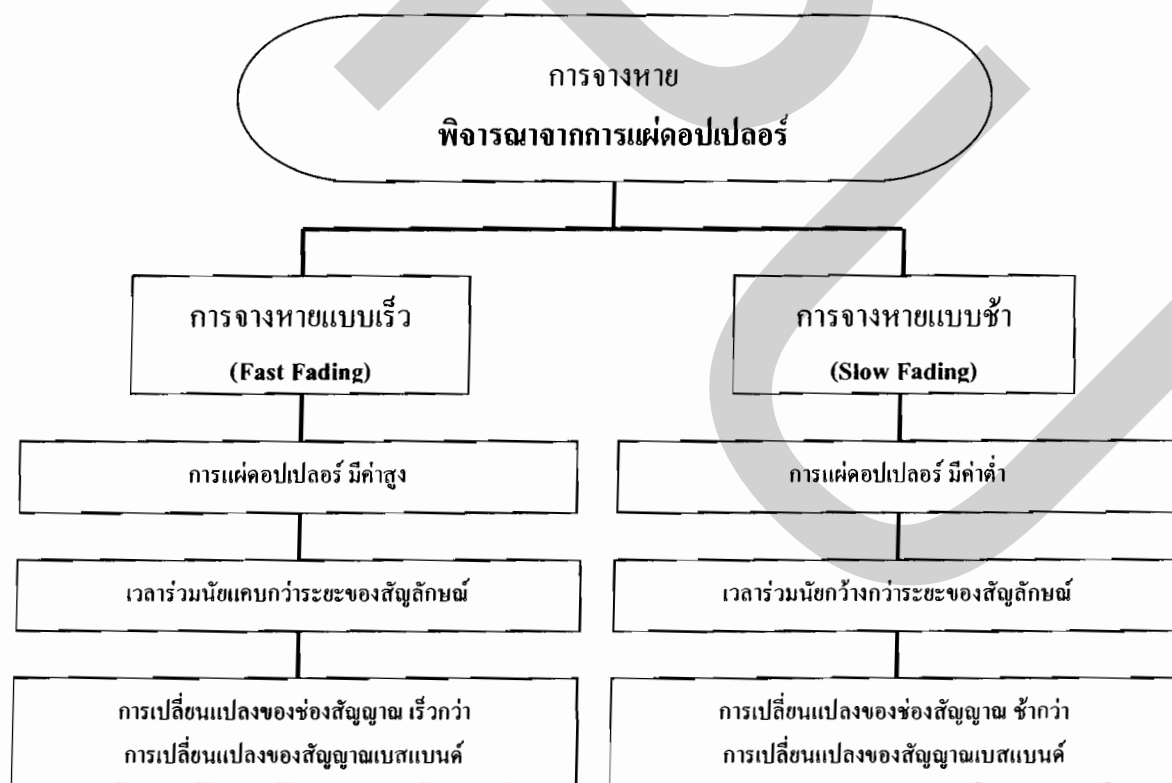
การจางหายแบบเร็ว ผลการตอบสนองของช่องสัญญาณนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วภายในช่วงเวลาที่ทำการส่งสัญญาณ ดังนั้นเวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณ จะมีค่าน้อยกว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์ และคุณลักษณะของการจางหายแบบนี้จะเปลี่ยนแปลงไปมาหลายๆครั้ง ในขณะที่สัญลักษณ์หนึ่งๆ ถูกส่งไป ซึ่งจะส่งผลให้รูปร่างของสัญญาณที่ถูกส่งออกไปในเบสแบนด์ผิดเพี้ยนไป

2.2.4.2.2 การจางหายแบบช้า (Slow Fading)

การจางหายแบบช้า เกิดขึ้นเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของผลการตอบสนองของช่องสัญญาณมีค่าที่น้อยกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ หรือ เวลาร่วมนัยนั้นมีค่ามากกว่าเวลาของสัญลักษณ์ ซึ่งในกรณีนี้ ช่องสัญญาณจะมีผลการตอบสนองที่คงที่ภายในช่วงเวลาหลายสัญลักษณ์ที่ถูกส่งออกไปในเบสแบนด์ ซึ่งทำให้ได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณนั้นติดกันเป็นช่วงยาว



(1) เมื่อพิจารณาการแผ่การประวิงเวลา



(2) เมื่อพิจารณาการแผ่คอปเปลอร์

รูปที่ 2.2 รูปแบบของการจางหาย

2.2.5 สัญญาณรบกวนไวต์เกาส์เซียนแบบบวก (Additive White Gaussian Noise หรือ AWGN)

เป็นสัญญาณไม่พัวประสงค์ที่ปะปน กับสัญญาณที่ต้องการในลักษณะบวกทับสัญญาณที่ต้องการ ทำให้สัญญาณที่ผู้รับได้รับผิดเพี้ยนไป โดยขนาดของสัญญาณไม่พัวประสงค์นี้ มีการกระจายโอกาสแบบเกาส์เซียนและมีสเปกตรัมระดับความเข้มที่คงที่ซึ่งมาจากหลายแหล่งกำเนิดในธรรมชาติ จึงเป็นอุปสรรคที่มีอยู่ในทุกระบบการสื่อสาร โดยมีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นในรูปของสมการ

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \varepsilon^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (2.4)$$

และมีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น คือ

$$\begin{aligned} F_x(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(\lambda-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} d\lambda \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\frac{(x-\bar{x})}{\sigma}} e^{-\frac{\lambda^2}{2}} d\lambda \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.3 ความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity)

ความหลากหลายของช่องสัญญาณ หรือไดเวอร์ซิตี (Diversity) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถช่วยให้การรับส่งสัญญาณมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องมีการเพิ่มบิตรหัส (Code - bits) รวมเข้ากับบิตข้อมูล (Data bits) อย่างที่ต้งใช้ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel Codes) และไม่มีการแบ่งเอาแบนด์วิธของช่องสัญญาณ ไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของการรับ/ส่งสัญญาณเลย นอกจากนี้ส่วนของอุปกรณ์ที่ต้องเพิ่มเข้ามา สำหรับการทำให้ไดเวอร์ซิตี ก็มีราคาที่ไม่แพงจนเกินไป ดังนั้นเทคนิคไดเวอร์ซิตีจึงมีประโยชน์อย่างมากในทางปฏิบัติ

หลักการของไดเวอร์ซิตี คือ การอาศัยคุณสมบัติพื้นฐาน ของการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สาย ซึ่งมักจะมีเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณหลายเส้นทาง และโดยทั่วไปแล้ว ถ้าหากการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นทางหนึ่ง ถูกรบกวนอย่างมากจากการจางหายทำให้สัญญาณที่รับมามีกำลังที่อ่อนมาก ก็อาจจะมีคลื่นสัญญาณจากเส้นทางอื่น ที่ให้สัญญาณที่รับมามีกำลังสูง ดังนั้นถ้าหากเราทำการติดตั้งจู่รับสัญญาณ มากกว่าหนึ่งแห่งก็จะสามารถรับสัญญาณได้จากหลายเส้นทาง จากนั้นระบบก็จะทำการเลือกเฉพาะสัญญาณที่มีกำลังสูงมาใช้ได้ ซึ่งวิธีการนี้สามารถช่วยทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของสัญญาณที่ภากรับมีคุณภาพที่ดีขึ้นได้ถึง 20-30 dB สังเกตว่าคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ดีขึ้น

โดยที่ทางภาครับสัญญาณมิได้มีส่วนเกี่ยวข้องกับด้วยเลย ซึ่งวิธีการไคเวอร์ซิตีชนิดที่นิยมใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้ คือ

2.3.1 ไคเวอร์ซิตีทางเวลา (Time Diversity)

ไคเวอร์ซิตีทางเวลา (Time Diversity) คือ การส่งสัญญาณข้อมูลเดิมซ้ำ มากกว่าหนึ่งครั้ง ที่เวลาแตกต่างกัน โดยการส่งแต่ละครั้งจะต้องเว้นช่วงเวลาให้ห่างกันมากพอ คือ ต้องมากกว่าช่วง coherence time ของช่องสัญญาณ ผลที่ได้คือ ภาครับจะได้รับสัญญาณข้อมูลซ้ำหลายครั้ง โดยสัญญาณข้อมูลที่ได้รับได้ในแต่ละครั้งนี้ จะได้รับผลกระทบจากการจางหายในช่องสัญญาณด้วยลักษณะที่แตกต่างกัน ค่าของ Coherence Time ขึ้นอยู่กับค่า Doppler Spread ของคลื่นสัญญาณ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่และความถี่ของคลื่นพาห์ ตัวอย่างเบื้องต้น ของการใช้งานเทคนิคไคเวอร์ซิตีทางเวลา คือ วงจร RAKE Receiver ในระบบ CDMA

2.3.2 ไคเวอร์ซิตีทางความถี่ (Frequency Diversity)

ไคเวอร์ซิตีชนิดนี้ จะใช้ความถี่ถึงสองช่องสัญญาณ ระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับ ข้อมูลจะถูกส่งโดยโหนดต้นทางสองตัว ที่ทำงานที่ความถี่แตกต่างกัน ซึ่งสัญญาณทั้งสองจะถูกรวมกัน ไปสู่ท่อนำคลื่นและสายอากาศตามลำดับ โดยสัญญาณจะถูกส่งออกไปในสายอากาศเดียวกัน (แต่อาจมีโพลาริเซชันต่างกัน) ที่ด้านรับสายอากาศจะรับสัญญาณและผ่านท่อนำคลื่นไปยังตัวกรองความถี่แยกความถี่ทั้งสองออกมา โหนดปลายทางแต่ละตัวก็จะแยกสัญญาณข้อมูลออกมา ด้วยวิธีการดังกล่าวก็จะทำให้สามารถลดผลกระทบจากการจางหายได้ ถ้าหากการแยกกันของความถี่ของโหนดต้นทางสัญญาณมีมาก การจางหายซึ่งเกิดเฉพาะที่ความถี่หนึ่งๆ จะมีโอกาสน้อยมากที่จะเกิดกับสัญญาณทั้งสองความถี่พร้อมๆกัน จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบสำหรับความถี่ที่ห่างกันประมาณ 2 เฮอร์เซ็นต์ ถือว่าเพียงพอ และถ้ายิ่งห่างกัน 5 เฮอร์เซ็นต์ ก็จะดีมากที่สุด ข้อเสีย ของไคเวอร์ซิตีทางความถี่คือ จะต้องใช้แถบความถี่มากกว่าปกติ จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับพื้นที่ในเมืองใหญ่ จำนวนช่องสัญญาณก็มีจำกัด การเพิ่มประสิทธิภาพของไคเวอร์ซิตีทางความถี่ถือว่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับไคเวอร์ซิตีแบบสเปซ จากการคำนวณพบว่าเพิ่มขึ้นเพียง 10 เท่าเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีไคเวอร์ซิตี

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

ไคเวอร์ซิตีชนิดนี้ โหนดปลายทางจะรับสัญญาณจากสายอากาศ ตั้งแต่สองต้นขึ้นไป ซึ่งติดตั้งอยู่ห่างกัน เป็นระยะหลายเท่าของความยาวคลื่น โดยสัญญาณที่ได้รับจากแต่ละสายอากาศจะถูกต่อเข้ากับตัวไคเวอร์ซิตีคอมไบเนอร์ (Diversity Combiner) ซึ่งหน้าที่ของตัวคอมไบเนอร์ก็คือ จะทำการเลือกสัญญาณที่ดีที่สุดหรือทำการรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน ซึ่งก็แล้วแต่การออกแบบ

สัญญาณจากด้านส่งจะเดินทางเป็นเส้นตรงสองเส้นทางไปยังสายอากาศทางด้านรับทั้งสองด้าน และสัญญาณจากโหนดต้นทางอาจจะเดินทางไปในอีกหลายเส้นทางที่แตกต่างกัน และเส้นทางที่สัญญาณเกิดมีความต่างเฟสกับสัญญาณทางตรง ก็จะทำให้เกิดมัลติพาทเฟดดิ้งขึ้นที่สายอากาศด้านรับ แต่สายอากาศทั้งสองต้นนั้น จะไม่เกิดมัลติพาทเฟดดิ้งที่เหมือนกัน เพราะระยะทางของสายอากาศทั้งสองต้นแตกต่างกัน นั่นคือ แม้ว่าสัญญาณที่เดินทางในระยะทางจากสายอากาศด้านส่งไปยังสายอากาศด้านรับข้างใดข้างหนึ่งอาจเกิดการหักล้างทางเฟสกัน แต่ในสายอากาศด้านรับอีกข้างหนึ่งก็จะไม่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าว จากสถิติพบว่า การใช้โคเวอเรจี้ตีแบบสเปซทำให้คุณภาพของสัญญาณดีขึ้นหลายร้อยเท่า ซึ่งเป็นที่น่าพอใจมากและสายอากาศมักติดตั้งห่างกันเป็นระยะทาง 200 เท่า ของความยาวคลื่นที่ใช้ จากการค้นพบล่าสุด การจัดสายอากาศโคเวอเรจี้ตีที่ดีที่สุดจะอยู่ในแนวนอนให้สายอากาศอยู่ข้างๆ กัน นอกจากนี้ การใช้โคเวอเรจี้ตีแบบสเปซยังมีประสิทธิภาพดีกว่าฟรีควอนซ์โคเวอเรจี้ตี เพราะว่าโคเวอเรจี้ตีแบบสเปซใช้ความถี่น้อยกว่าและใช้สำหรับช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวก็จะประหยัดกว่าด้วย อีกทั้งยังใช้ในการแก้ปัญหาผลกระทบจากการจางหายในช่องสัญญาณอีกด้วย

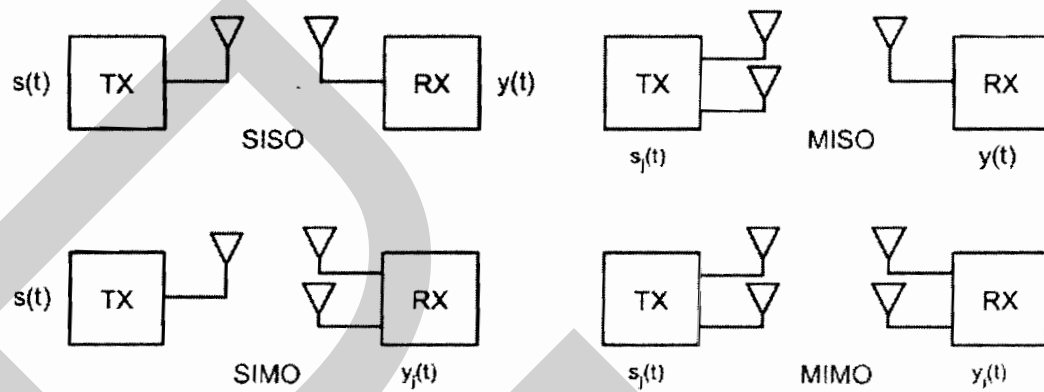
2.4 ระบบสื่อสารไร้สาย แบบหลายทางเข้า หลายทางออก

ช่วงแรกๆ ของงานวิจัยในระบบการสื่อสารไร้สาย จะเป็นการส่งผ่านข้อมูลในระบบโดยใช้สายอากาศที่ภาครับและภาคส่งเพียงแค่นั้นเดียว ที่เรียกว่า ระบบหนึ่งทางเข้า หนึ่งทางออก (Single-Input Single-Output system หรือ SISO) ต่อมาได้มีการพัฒนางานวิจัยมาศึกษา ระบบการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศ (Multiple Antennas) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศนี้ ทำให้ความจุช่องสัญญาณในระบบเพิ่มขึ้น สามารถรับ/ส่งข้อมูลได้มากขึ้น โดยในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

2.4.1 ระบบหนึ่งทางเข้า หลายทางออก (Single-Input Multiple-Output system หรือ SIMO) คือ ระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหนึ่งสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหลายสายอากาศ

2.4.2 ระบบหลายทางเข้า หนึ่งทางออก (Multiple-Input Single-Output system หรือ MISO) คือ ระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหลายสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหนึ่งสายอากาศ

2.4.3 ระบบหลายทางเข้า หลายทางออก (Multiple-Input Multiple-Output system หรือ MIMO) คือ ระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหลายสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหลายสายอากาศ เช่นกัน



รูปที่ 2.3 การรับส่งข้อมูลแบบสายอากาศเดี่ยวและหลายสายอากาศ

ในระบบทั้ง 3 รูปแบบนี้ ระบบหลายทางเข้า หลายทางออก (MIMO) จะให้สมรรถนะทางด้านความจุช่องสัญญาณสูงที่สุด จึงมีการวิจัยและพัฒนา รูปแบบ เพื่อนำมาใช้งานแทนระบบหนึ่งทางเข้า หนึ่งทางออก (SISO) ซึ่งทำให้เกิดการพัฒนาสมรรถนะของระบบ ดังนี้

1) อัตราการขยายแถวลำดับ (Array Gain)

การใช้สายอากาศหลายๆเสา จะทำให้อัตราการขยายของสัญญาณที่ออกมาจากสายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะทาง (Range) และพื้นที่ครอบคลุม (Coverage) ในการส่งสัญญาณเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในกรณีที่เพิ่มพื้นที่ที่ต้องการส่งสัญญาณให้กว้างขึ้น หรือกรณีที่จำนวนของผู้ใช้งานในพื้นที่นั้นมีอยู่ไม่มาก จะทำให้จำนวนการติดตั้งโหนดปลายทางลดลง เพราะพื้นที่ที่ครอบคลุมมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อดีที่ทำให้กำลังงานส่งจากโหนดต่างๆ (โทรศัพท์เคลื่อนที่) มีค่าลดลง ตามอัตราการขยายของสายอากาศที่โหนดปลายทางนั้นมีมากขึ้น หรือค่าความไวที่สายอากาศแถวลำดับที่โหนดปลายทางรับได้มีมากขึ้นนั่นเอง

2) อัตราการขยายไคเวอร์ซิตี (Diversity Gain)

ค่ากำลังของสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนตามการลดทอนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ เทคนิคไคเวอร์ซิตีจึงเป็นวิธีที่มีประโยชน์มากในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจางหายนั้นๆ (Fading) ดังนั้นระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออก (MIMO) จึงมีการใช้สายอากาศภาคส่ง M_T เสา และสายอากาศภาครับ M_R เสา ที่มีการจางหายเป็นอิสระต่อกัน

เมื่อส่งสัญญาณออกไปจะทำให้ภาครับสามารถรวมสัญญาณที่เข้ามาได้ โดยลดปัญหาเรื่องของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของสัญญาณในระบบออกไปได้มาก เมื่อเทียบกับระบบสื่อสารหนึ่งทางเข้าหนึ่งทางออก (SISO)

3) กำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (Spatial Multiplexing Gain)

ช่องสัญญาณในระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออก จะมีการเพิ่มขึ้นของความจุช่องสัญญาณในระบบเป็นเส้นตรง และมีค่าเท่ากับค่าที่น้อยที่สุดระหว่างจำนวนสายอากาศที่ภาคส่งและภาครับ โดยไม่มีผลต่อค่ากำลังงานหรือการใช้แบนด์วิดท์ ค่ากำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (Spatial Multiplexing Gain) จะส่งผลให้ความจุของช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการส่งแบบหลายระยะทางนั้น ทางภาคส่งจะทำการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกันออกจากสายอากาศแต่ละเสา ภายใต้เงื่อนไขของช่องสัญญาณที่มีการแพร่กระจายของสัญญาณมากพอ (Rich Scattering) ทำให้ทางภาครับสามารถแยกสัญญาณต่างๆ ออกจากกันได้

4) การลดการแทรกสอด (Interference Reduction)

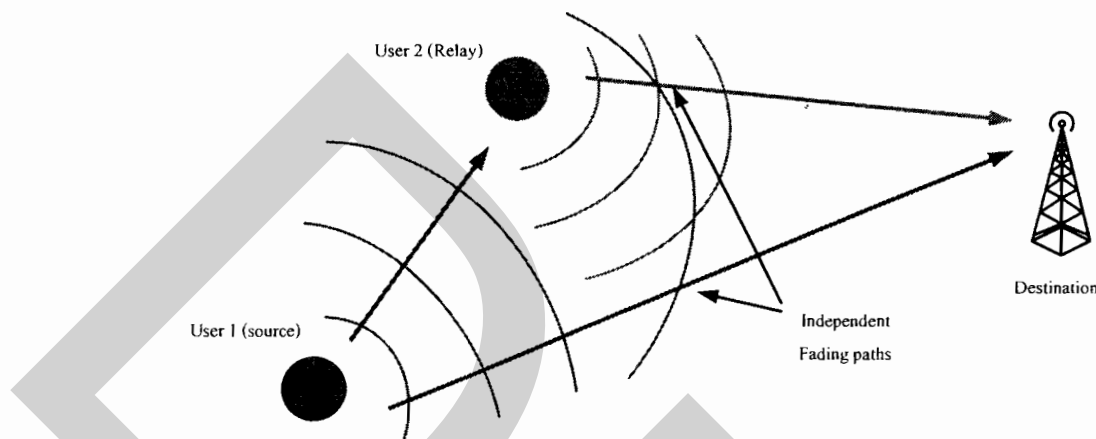
การแทรกสอดแบบร่วมภายในช่องสัญญาณ (Co-channel Interference) เกิดจากการใช้ความถี่ซ้ำ (Frequency Reuse) เมื่อมีการใช้สายอากาศหลายๆ เสา จะเกิดความแตกต่างระหว่างระยะห่างของสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่อยู่ในช่องสัญญาณข้างเคียง จึงทำให้สามารถลดการแทรกสอดได้

2.5 ความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ⁵

ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือคือระบบสื่อสารที่อาศัยผู้ใช้งานในโครงข่ายระบบสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication Network) ทำหน้าที่รับสัญญาณและช่วยส่งต่อข้อมูลที่รับได้ไปยังโหนดปลายทาง (Destination) ร่วมกัน โดยผู้ใช้ที่ส่งสัญญาณเป็นคนแรก เรียกว่า “โหนดต้นทาง (Source)” และผู้ใช้ที่ทำหน้าที่ช่วยส่งต่อข้อมูล เรียกว่า “โหนดส่งผ่าน (Relay)” ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งการช่วยส่งต่อข้อมูลจะทำให้เกิดการเพิ่มความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity Gain) ขึ้นเหมือนในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก และส่งผลทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดของบิต (BER) ลดลง ข้อดีของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมืออีกประการหนึ่งคือ การช่วยเพิ่มระยะทางในการสื่อสารของผู้ใช้งานในโครงข่ายสื่อสารไร้สาย เนื่องจากผู้ใช้งานที่อยู่ใกล้โหนดปลายทาง สามารถช่วยส่งต่อข้อมูลของผู้ส่งซึ่งอยู่ห่างไกลออกไปมากๆ ได้

⁵ Mischon Dohler and YonghuiLi (2010). Cooperative Communication Hardware, Channel & PHY. A John Wiley and Son, Ltd. Publication

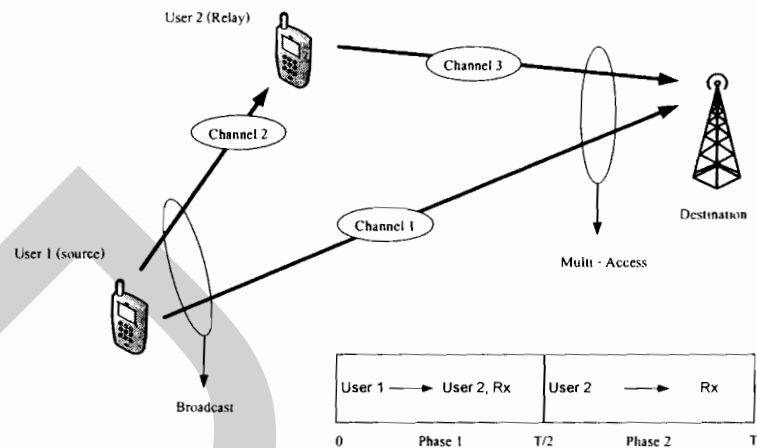
ซึ่งทำให้การใช้กำลังไฟฟ้าอันจำกัดจากแบตเตอรี่ของผู้ส่งข้อมูลในระบบลดลงได้ ส่งผลให้สามารถสื่อสารได้นานขึ้นแม้อยู่ในสภาวะที่มีกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่ำ



รูปที่ 2.4 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

2.5.1 แบบจำลองระบบและการเข้าถึงช่องสัญญาณ ของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

การส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ จะพิจารณาการส่งสัญญาณในแบบทิศทางเดียว คือ การสื่อสารในทิศทางจากผู้ใช้งานไปยัง โหนดปลายทาง โดยมีการแบ่งช่องสัญญาณออกเป็นหลายๆ ช่องสัญญาณที่ตั้งฉากกัน และมีการเข้าถึงช่องสัญญาณจากผู้ให้หลายคนได้ 3 แบบ คือ การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access หรือ FDMA) การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access หรือ TDMA) และการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access หรือ CDMA) เพื่อความสะดวกในการอธิบาย ในงานวิจัยฉบับนี้ จะพิจารณาการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และให้เวลาสำหรับการส่งสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานทั้งหมดไปยัง โหนดปลายทางมีกระบวนการซิงโครไนซ์ (Synchronization) อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.5 การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

การส่งสัญญาณแบบร่วมมือสำหรับระบบสื่อสารไร้สายในรูปที่ 2.6 ซึ่งกำหนดให้ผู้ใช้คนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นโหนดต้นทางและผู้ใช้คนที่ 2 ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่าน โดยมีช่วงเวลาของการเข้าถึงช่องสัญญาณที่ใช้ทั้งหมด คือ T ซึ่งสามารถแบ่งการส่งสัญญาณออกเป็น 2 เฟส ดังนี้

ช่วงเวลาที่ $1 \left(0 - \frac{T}{2}\right)$ เป็นช่วงเวลาที่ผู้ใช้คนที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นโหนดต้นทางกระจายสัญญาณไปยังโหนดปลายทางและผู้ใช้คนที่ 2 พร้อมๆ กัน โดยอาศัยคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปรอบทิศทางของช่องสัญญาณไร้สาย ดังสมการที่ (2.6) และ (2.7)

$$r_{SD}(n) = \sqrt{P_1} h_{SD} x_s(n) + n_{SD}(n) \quad (2.6)$$

$$r_{SR}(n) = \sqrt{P_1} h_{SR} x_s(n) + n_{SR}(n) \quad (2.7)$$

- เมื่อ $x_s(n)$ คือ ข้อมูลที่ส่งออกจากโหนดต้นทาง
 h_{SD} คือ ช่องสัญญาณระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง
 h_{SR} คือ ช่องสัญญาณระหว่างโหนดต้นทางและโหนดส่งผ่าน
 $n_{SD}(n)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง
 $n_{SR}(n)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างโหนดต้นทางและโหนดส่งผ่าน
 P_1 คือ กำลังส่งสัญญาณจากโหนดต้นทาง

ช่วงเวลาที่ 2 ($\frac{T}{2} - T$) เป็นช่วงเวลาที่ผู้ใช้คนที่ 2 ซึ่งทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่าน จะช่วยส่งต่อข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง ดังสมการที่ (2.6)

$$r_{RD}(n) = \sqrt{P_2} h_{RD} \hat{x}_s(n) + n_{RD}(n) \quad (2.8)$$

และ

$$r_{SRD}(n) = r_{SD}(n) + r_{RD}(n) \quad (2.9)$$

เมื่อ $\hat{x}_s(n)$ คือ ข้อมูลที่โหนดส่งผ่านทำการถอดรหัสได้

h_{RD} คือ ช่องสัญญาณระหว่างโหนดส่งผ่านและโหนดปลายทาง

$n_{RD}(n)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างโหนดส่งผ่านและโหนดปลายทาง

P_2 คือ กำลังส่งสัญญาณจากโหนดส่งผ่าน

2.5.2 โพรโทคอลสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

ในปัจจุบันได้มีการนำเสนอ โพรโทคอลสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือไว้ 3 รูปแบบ ตาม J. N. Laneman⁶ ดังต่อไปนี้

2.5.2.1 โพรโทคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง (Fixed Relaying Protocol) โพรโทคอลแบบนี้มีหลักการคือมีการกำหนดจำนวนและระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่านคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการสื่อสาร โพรโทคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนน้อยที่สุด

2.5.2.2 โพรโทคอลแบบเลือก (Selecting Relaying Protocol) โพรโทคอลแบบนี้จะมีหลักการ คือ ไม่มีการกำหนดจำนวนและระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่านที่คงที่ โดยมีวิธีการเลือกผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่านจากค่าขนาดของสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณระหว่างโหนดต้นทางและผู้ใช้ที่จะถูกเลือกเป็นโหนดส่งผ่านที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งโพรโทคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนมากกว่าโพรโทคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง

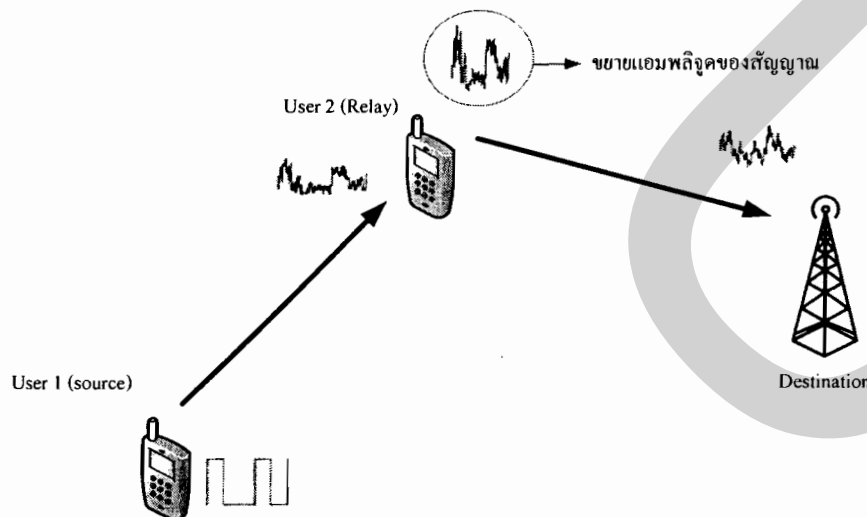
2.5.2.3 โพรโทคอลแบบมีการป้อนกลับ (Incremental Relaying Protocol) โพรโทคอลแบบนี้จะมีลักษณะคล้ายๆกับโพรโทคอลแบบเลือกโหนดส่งผ่านเพียงแต่มีการเพิ่มเงื่อนไข

⁶ J. N. Laneman, D.C. Tse, G.W. Wornell. "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior." *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 12, No. 9, (September 2005) . 597-600

การเลือกผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่านมากขึ้น และจุดเด่นของโพรโทคอลนี้ก็คือ โหนดปลายทาง จะทำการส่งข้อความตอบกลับไปยังผู้ใช้ทุกคน เพื่อให้ทราบสถานะของการส่งสัญญาณในแต่ละครั้ง หากการส่งข้อมูลนั้นไม่มีความผิดพลาด โหนดปลายทางจะส่งข้อความกลับมายังทุกโหนดในระบบ เพื่อให้รับทราบสถานะของการส่งที่สมบูรณ์ จึงทำให้ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่าน ไม่ต้องส่งต่อข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง แต่ถ้าหากการส่งข้อมูลเกิดความผิดพลาด โหนดปลายทาง จะส่งข้อความกลับมายังผู้ใช้ทุกคน เพื่อรับทราบสถานะของการส่งที่ไม่สมบูรณ์และมีการร้องขอให้มีการส่งข้อมูลใหม่จากผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่าน โพรโทคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนสูงที่สุด

การหาประสิทธิภาพของ โพรโทคอลทั้งหมดนี้สามารถทำได้โดย การหาความน่าจะเป็นของสัญญาณที่ขาดหาย (Outage probability) และจะเห็นได้ว่าโพรโทคอลในแต่ละแบบจะมีความซับซ้อนแตกต่างกัน และมีประสิทธิภาพที่ต่างกันด้วย โดยโพรโทคอลแบบมีการป้อนกลับจะมีประสิทธิภาพสูงสุด และโพรโทคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง จะมีประสิทธิภาพต่ำสุด โดยการส่งต่อสัญญาณจากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบด้วยกัน คือ Amplify-and-Forward (AF) และ Decode-and-Forward (DF)

1) Amplify-and-Forward ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่านจะทำการขยายสัญญาณที่ได้รับได้ ให้มีขนาดแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนด แล้วส่งต่อไปยังโหนดปลายทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 การส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

จากการจำลองและการเข้าถึงช่องสัญญาณในรูปที่ 2.7 โหนดส่งผ่านจะทำการขยายสัญญาณที่รับได้ให้มีแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนด และส่งต่อสัญญาณที่ได้รับไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งผลของข้อมูลที่ได้ จะเป็นดังสมการที่ (2.8)

$$x_R(n) = \beta r_{SR}(n) \quad ; n = \frac{T}{2} - T \quad (2.10)$$

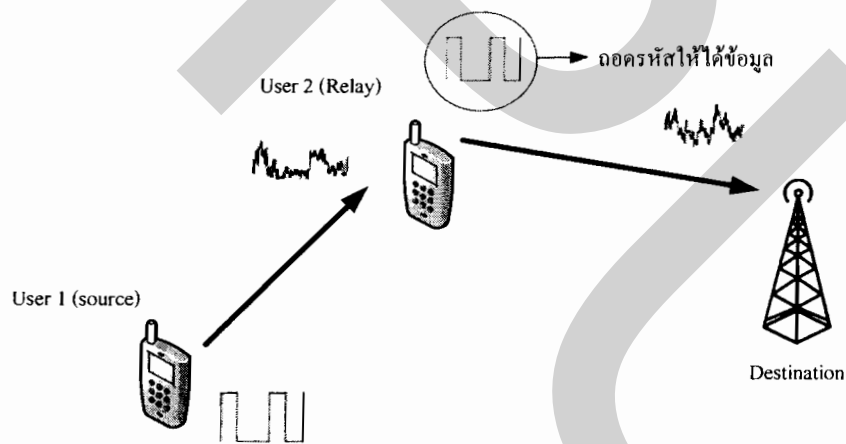
เมื่อ $r_{SR}(n)$ คือ สัญญาณที่โหนดส่งผ่านรับได้จากโหนดต้นทาง

$$\beta \text{ คือ อัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณ } \beta \leq \sqrt{\frac{1}{|h_{SR}|^2 P_1 + N_0}}$$

h_{SR} คือ ช่องสัญญาณสำหรับการส่งข้อมูลระหว่างโหนดต้นทางและโหนดส่งผ่าน

N_0 คือ แวเรียนซ์ของสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN)

2) Decode-and-Forward ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่านจะถอดรหัสสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณเดิมที่ส่งมาจากโหนดต้นทาง แล้วส่งต่อสัญญาณไปยังโหนดปลายทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 การส่งต่อสัญญาณแบบ Decode-and-forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

จากการจำลองและการเข้าถึงช่องสัญญาณในรูปที่ 2.8 โหนดส่งผ่านจะทำการถอดรหัสสัญญาณ เพื่อให้ได้สัญญาณเดิมที่ส่งมาจากโหนดต้นทาง แล้วส่งต่อสัญญาณไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งข้อมูลที่ได้ เป็นดังสมการที่ (2.11)

$$x_R(n) = \hat{x}_S(n) \quad ; n = \frac{T}{2} - T \quad (2.11)$$

เมื่อ $\hat{x}_S(n)$ คือ ข้อมูลจากโหนดต้นทาง ซึ่งถูกถอดรหัสจากโหนดส่งผ่านถอดรหัสให้ได้ข้อมูล

2.6 การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา และ วิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding)⁷

การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา (Space-Time Coding หรือ STC) เป็นวิธีที่อยู่บนพื้นฐานของวิธีการทำไควเวอร์ซิตีทางด้านส่ง ซึ่งเป็นการรวมเอาการออกแบบรหัสช่องสัญญาณและการใช้สายอากาศหลายต้นเข้าด้วยกัน โดยจะใช้สายอากาศส่งหลายๆต้น และสายอากาศรับต้นเดียว หรือหลายๆต้น ร่วมกับการใช้ไควเวอร์ซิตีทางเวลา โดยอาศัยหลักการที่ว่า ถ้าหากตั้งสายอากาศส่งและรับในปริภูมิให้มีความเป็นอิสระเชิงปริภูมิแล้ว สัญญาณจากสายอากาศส่งแต่ละตัว ที่ส่งไปยังสายอากาศรับแต่ละตัว จะต้องได้รับผลกระทบจากเฟดดิ้งที่แตกต่างกัน เพื่อให้ข่าวสารที่ถูกส่งไป ณ เวลาหนึ่งๆ ในแต่ละเส้นทาง ไม่ถูกรบกวนจนทำให้สูญเสียไปพร้อมกันหมดทุกเส้นทาง ดังนั้นการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา จึงมีประสิทธิภาพในการช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากเฟดดิ้ง ทำให้ระบบของการสื่อสารไร้สายมีสมรรถนะที่ดีขึ้น

โดยทั่วไปแล้ว การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา จะมีการแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ

- 1) รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบเทรลลิส (Space-Time Trellis Coding หรือ STTC)
- 2) รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบบล็อก (Space-Time Block Coding หรือ STBC) ซึ่งจะมี

เนื้อหาของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti (Alamouti Space – Time Codes) รวมอยู่ด้วย

สำหรับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบเทรลลิส (Space-Time Trellis Coding หรือ STTC) เป็นเทคนิคจากการทำไควเวอร์ซิตีทางด้านส่ง ที่มีประสิทธิภาพในการลดผลกระทบที่เกิดจากเฟดดิ้ง (Fading) สูงที่สุดในทั้ง 3 แบบ แต่มีข้อเสีย คือ นอกจากต้องมีสายอากาศรับ/ส่ง ที่คงที่ตายตัวแล้ว กระบวนการถอดรหัสของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบเทรลลิสก็ยังคงมีความซับซ้อนสูงมาก โดยความซับซ้อนในการถอดรหัสจะเพิ่มขึ้นอย่างเอกซ์โพเนนเชียล ตามอัตราความเร็วในการส่ง (Transmission Rate)

โดยในงานวิจัยฉบับนี้จะขออธิบายเฉพาะวิธีการของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti เท่านั้น ทั้งนี้ก็เป็นเพราะคุณลักษณะเฉพาะตัวที่น่าสนใจคือ การถอดรหัสเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน มีรูปแบบที่เรียบง่าย และให้ไควเวอร์ซิตีในระบบสูง

2.6.1 รหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti (Alamouti Space – Time Codes)

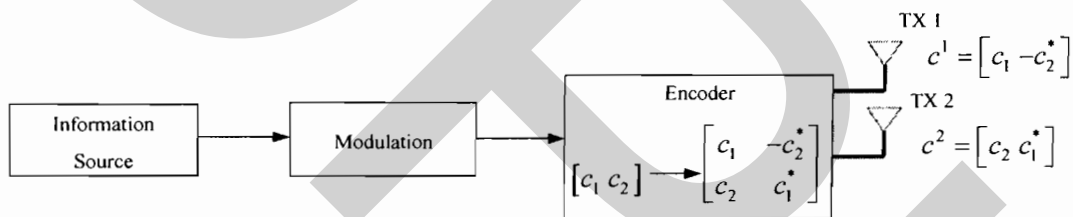
วิธีการเข้ารหัสสำหรับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.9 เมื่อแหล่งกำเนิดข่าวสาร (Information Source) ให้กำเนิดสัญลักษณ์ข้อมูล และส่งเข้าสู่วงจรมอดูเลเตอร์ (Modulator) ครั้งละ จำนวน 2 สัญลักษณ์ สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแล้ว ได้แก่

⁷ ชาญวิทย์ ไชยบัว. (2550). การเพิ่มประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูลในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมอโดยใช้การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา. วิทยานิพนธ์ครุศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาไฟฟ้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

c_1 และ c_2 จะได้รับการแปลงด้วยวงจรเข้ารหัส (Encoder) ให้ได้เป็นสัญญาณที่ใช้ส่งจริงในสายอากาศแต่ละต้น โดยรูปแบบการส่งสัญญาณสามารถเขียนแสดงในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & -c_2^* \\ c_2 & c_1^* \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

การส่งสัญญาณแต่ละครั้ง หรือการส่งสัญญาณหนึ่งบล็อกจะใช้เวลาในการส่ง 2 คาบเวลาต่อเนื่อง กัน ในการส่งของคาบเวลาแรกหรือที่เวลา t สัญญาณที่ส่งออกจากสายอากาศต้นที่ 1 และต้นที่ 2 ได้แก่ c_1 และ c_2 ตามลำดับ ส่วนในคาบเวลาที่ 2 หรือที่เวลา $t+T$ สัญญาณที่ส่งออกจากสายอากาศที่ 1 และ 2 ได้แก่ $-c_2^*$ และ c_1^* ตามลำดับ ทั้งนี้ คือ c_1^* ค่าเชิงซ้อนสังยุคของ c_1 จะเห็นว่ารูปแบบการเขียนเมตริกซ์ S นั้นกำหนดให้ หมายเลขแถวหมายถึงเวลาที่ส่ง และหมายเลขทางคอลัมน์หมายถึงสายอากาศ



รูปที่ 2.8 โครงสร้างการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti

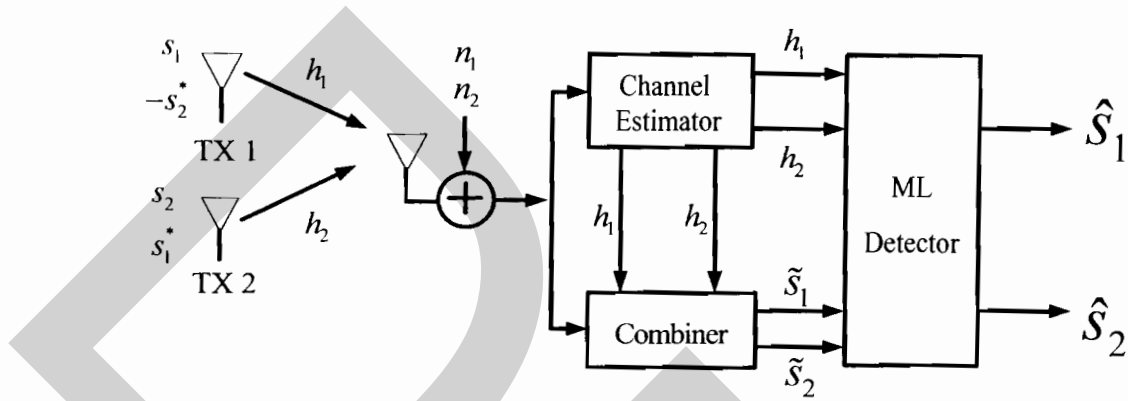
คุณสมบัติที่น่าสนใจประการหนึ่งของรหัสแบบ Alamouti คือ การที่เราสามารถกำหนดหรือเลือกชนิดของการมอดูเลตแบบใดก็ได้ เช่น M-PSK, M-QAM หรือ M-ASK เป็นต้น ดังนั้น เราจึงสามารถกำหนดจำนวนบิตข้อมูลที่จะส่ง ในแต่ละครั้งได้ตามต้องการ ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการส่งข้อมูลให้ได้ 1 บิต ต่อหนึ่งคาบเวลา ก็ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK (Binary Phase Shift Keying) หรือหากต้องการส่งให้ได้ความเร็วเพิ่มขึ้นเท่าตัว คือ 2 บิต ต่อหนึ่งคาบเวลา ก็ต้องใช้การมอดูเลตแบบ QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) สำหรับกรณีทั่วไปที่ใช้ M-PSK จำนวนบิตที่ระบบสามารถส่งได้ต่อหนึ่งคาบเวลา มีค่าเท่ากับ $m = \log_2 M$ การที่เราสามารถกำหนด อัตราบิตในการส่งผ่านข้อมูลได้ตามต้องการนั้น จัดว่าเป็นคุณลักษณะเฉพาะตัวที่เป็นประโยชน์ประการหนึ่งของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti

2.6.1.1 การถอดรหัสสำหรับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti

เมื่อพิจารณาสัญญาณที่สายอากาศรับในรูปที่ 2.9 จะได้ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่รับได้ r_1 และ r_2 ณ เวลา t และ $t+T$ ตามลำดับดังนี้

$$r_1 = h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1 \quad (2.8)$$

$$r_2 = -h_1 s_2^* + h_2 s_1^* + n_2 \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.9 ภาพรวมของระบบรับ-ส่งสัญญาณที่ใช้รหัสเชิงปริภูมิ-เวลา

โดยที่ n_1 และ n_2 คือสัญญาณรบกวน AWGN ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มเชิงซ้อนแบบเกาส์ที่เป็นอิสระต่อกันมีค่าเฉลี่ย(mean) เท่ากับศูนย์และค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power Spectral Density) เท่ากับ N_0

ในขั้นตอนการถอดรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาให้นำสัญญาณ r_1 และ r_2 ที่รับได้ไปใช้ในการถอดรหัสเพื่อตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ s_1 และ s_2 โดยใช้วิธีการพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นจริงสูงสุด (Maximum likelihood decoder) ซึ่งทำได้โดยการกำหนดฟังก์ชันต้นทุนให้อยู่ในรูปของระยะยูคลิดีเนียน (Euclidean distance) ระหว่างคู่สัญญาณที่รับได้ (r_1, r_2) กับคู่สัญลักษณ์ (s_1, s_2) ทำการคำนวณค่าฟังก์ชันต้นทุนของคู่สัญลักษณ์ (s_1, s_2) ที่เป็นไปได้ทั้งหมดให้ครบทุกรูปแบบจากนั้นให้ตัดสินใจเลือกคู่สัญลักษณ์โดยเลือกคู่สัญลักษณ์ที่มีค่าฟังก์ชันต้นทุนต่ำสุดหรือเทียบเท่ากับการมีระยะยูคลิดีเนียนต่ำสุด (Minimum Euclidean Distance) กระบวนการตัดสินใจเลือกนั้นสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$(\hat{s}_1, \hat{s}_2) = \arg \min_{(s_1, s_2) \in \mathcal{C}} |r_1 - h_1 s_1 - h_2 s_2|^2 + |r_2 + h_1 s_2^* - h_2 s_1^*|^2 \quad (2.10)$$

สังเกตว่าในขั้นตอนการคำนวณนี้จะทำได้ก็ต่อเมื่อภาครับทราบค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ h_1 และ h_2 ที่ถูกต้องสมบูรณ์ในทางปฏิบัติค่าดังกล่าวนี้จะได้จากการประมาณค่าด้วยวงจรแยกต่างหาก

2.6.1.2 ข้อดีของรหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti

Alamouti ได้ขยายผลของวิธีการนี้ออกไปเป็นกรณีของ 2 เสาอากาศส่งและหลากหลาย (M_R) เสาอากาศรับและได้แสดงผลวิธีการนั้น โดยได้กำหนดจำนวนของโคเวอริจี้เป็น $2 M_R$ ซึ่งลักษณะของวิธีการนี้ได้รวมถึง

- 1) ไม่ต้องมีการตอบกลับจากเครื่องรับมายังเครื่องส่งซึ่งเป็นที่ต้องการสำหรับระบบเพื่อที่จะได้โคเวอริจี้ทางด้านส่งสูงสุด
- 2) ไม่ต้องมีการขยายแบนด์วิดท์ (เพราะมีมากพอต่อการใช้ช่วงปริภูมิผ่านทางสายอากาศหลายเสาไม่ใช่ในเวลาหรือในความถี่)
- 3) กระบวนการถอดรหัสมีความซับซ้อนต่ำ
- 4) ให้ประสิทธิภาพเสมือนกับวิธีการรวมสัญญาณจากหลายทิศทางแบบปรับค่า SNR ให้สูงสุด (Maximum Ratio Combining หรือ MRC) ถ้าผลรวมของการแผ่กระจายกำลังงานเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับการใช้แบบ MRC เป็นเพราะว่าถ้ากำลังงานส่งเป็นค่าคงที่วิธีการนี้จะแยกกว่า 3 dB เพราะว่ากำลังงานส่งจะถูกแบ่งครึ่งให้กับเสาอากาศส่งทั้งสองต้น
- 5) ไม่ต้องมีการออกแบบใหม่สำหรับระบบเดิมที่มีอยู่เพียงแค่ควมรวมระบบเข้ากับวิธีการโคเวอริจี้ นี้ จึงเป็นวิธีที่นิยมอย่างมากสำหรับการทำให้คุณภาพการเชื่อมต่อดีขึ้นบนพื้นฐานของเทคนิคเสาอากาศส่งคู่ซึ่งไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนระบบมากมาย

2.6.2 การปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้า (Precoding)

การปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้า (Precoding) ที่โหนดปลายทาง หรือการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อมูลที่ผิดพลาดที่โหนดต้นทาง เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้สำหรับลดความผิดพลาดในการส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสาร ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานทำให้ข้อมูลที่ถูส่งผ่านระบบสื่อสารมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ซึ่งถูกนำมาใช้ในงานหลายประเภทด้วยกัน เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นต้น โดยมีวิธีการปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าที่ใช้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีนั้นมีจุดเด่นและจุดด้อยในลักษณะที่แตกต่างกันออกไป

สาเหตุหนึ่งที่ทำให้สัญญาณข้อมูลและข้อมูลที่ตรวจจับได้ที่โหนดปลายทางผิดเพี้ยนไปเนื่องจากผลของการทับซ้อนระหว่างสัญญาณที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสาร หนึ่งในวิธีการที่สามารถลดการผิดเพี้ยนของข้อมูลที่ตรวจจับได้ที่โหนดปลายทางคือการปรับแต่งสัญญาณ ดังนั้นวิธีการปรับแต่งสัญญาณจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดผลกระทบดังกล่าว และเป็นวิธีการที่ถูกนำไปใช้งานในระบบสื่อสารหลายประเภทด้วยกัน เช่น ระบบโทรศัพท์และอุปกรณ์ประเภทโมเด็ม เป็นต้น

2.6.2.1 วิธีการ Precoding แบบ Tomlinson-Harashima (TH-Precoding)

วิธีการ Precoding แบบ Tomlinson-Harashima เป็นวิธีการที่ถูกพัฒนามาจากรูปแบบการทำงานของวงจร Inverse Filter โดยการนำกระบวนการคำนวณค่ามอดุโล $-N$ (Modulo- N) เข้ามาใช้งานเพื่อให้สัญลักษณ์เข้ามาใช้งานเพื่อให้สัญญาณข้อมูลที่ได้รับจากการคำนวณ มีค่าอยู่ในขอบเขตที่จำกัดเป็นผลให้การทำงานมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น มีการนำสัญญาณข้อมูลที่ถูกส่ง ณ เวลาต่างๆ มาใช้งานโดยการนำข้อมูลผลกระทบของการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์มาลบออกจากสัญญาณที่ถูกส่งออกไป จากนั้นสัญญาณข้อมูลที่ถูกชดเชยผลกระทบของการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์ ถูกนำมาผ่านกระบวนการคำนวณค่ามอดุโล $-N$ เพื่อให้สัญญาณข้อมูลที่ถูกส่งออกไปในระบบสื่อสารอยู่ในช่วง $-N/2$ ถึง $N/2$ สำหรับการทำงานของภาคตรวจจับข้อมูลที่ภาครับ มีการนำสัญญาณข้อมูลที่ถูกตรวจจับได้ที่ภาครับมาทำการคำนวณค่ามอดุโล $-N$ เพื่อเปลี่ยนแปลงสัญญาณข้อมูลที่ถูกตรวจจับ ให้กลายเป็นสัญญาณข้อมูลที่สามารถนำไปใช้งานต่อไปได้สำหรับวิธีการ Precoding แบบ Tomlinson-Harashima (TH-Precoding) นั้นเป็นวิธีการที่สามารถใช้งานร่วมกับระบบสื่อสารที่มีการมอดุเลตแบบ QAM ได้อย่างดี และเนื่องจากการใช้วงจรที่ใช้ในการบวกแบบมอดุโล (Modulo) ในการคำนวณ ดังนั้นจึงทำให้ค่าของสัญญาณที่ได้จากการทำงานของวงจรมีอยู่ในช่วงที่จำกัด แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการ TH Precoding นั้นไม่สามารถนำมาใช้งานกับระบบสื่อสารแบบ Time-Vary Fading ซึ่งผลของการจางหายของขนาดของสัญญาณจะมีผลทำให้ข้อมูลที่ปลายทางนั้นเกิดความผิดพลาดได้ง่าย และนอกจากนั้น วิธีการ TH Precoding ไม่ได้มีการออกแบบมาเพื่อใช้งานกับระบบสื่อสารที่มีการมอดุเลตแบบเฟสมอดุเลชัน (Phase Modulation) ที่มีขนาดของสัญญาณที่ได้จากการทำงานคงที่

2.6.2.1 วิธีการ Precoding แบบ Dimension Partitioning

สำหรับวิธีการลดผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ ที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสาร โดยใช้วิธีการ Equalization นั้น จะเป็นการนำสัญญาณข้อมูลที่รับได้ ณ ปลายทางมาผ่านกระบวนการเพื่อเปลี่ยนแปลงสัญญาณ ให้อยู่ในรูปแบบที่คาดว่าเป็นรูปแบบของสัญญาณที่ปราศจากผลของการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ โดยสำหรับรูปแบบในการทำงานนั้น จะมีรูปแบบในการทำงานหลายชนิดด้วยกัน ซึ่งรูปแบบที่สำคัญในการทำงานได้แก่วิธีการ Equalization แบบ MLSE (Maximum Likelihood Sequence Estimation) ที่มีการพิจารณาของสัญญาณในรูปแบบของ Finite State Machine และใช้วิธีการ เช่น Viterbi Algorithm ในการหาค่าของสัญญาณที่คาดว่าถูกส่งมา ณ เวลาต่างๆ และ DFE (Decision Feedback equalization) ที่มีการนำข้อมูลที่ตรวจจับได้ในอดีต และตัวแปรที่แสดงถึงลักษณะของช่องสัญญาณ ณ เวลานั้นๆ มาใช้ในการประมวลผลเพื่อหาค่าของข้อมูลที่รับได้ ณ เวลานั้นๆ

สำหรับวิธีการ Precoding นั้น จะเป็นอีกวิธีการหนึ่งซึ่งถูกนำมาใช้สำหรับลดผลกระทบของการแทรกกระหว่างสัญลักษณ์ในระบบสื่อสาร โดยในการทำงานนั้น จะเป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะของสัญญาณที่จะทำการส่งผ่านช่องสัญญาณให้อยู่ในอีกลักษณะหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลทำให้เมื่อสัญญาณข้อมูลนั้นถูกส่งไปถึงปลายทาง จะสามารถนำสัญญาณไปใช้งานได้โดยมีผลของการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ที่มีค่าลดลง โดยจะมีรูปแบบในการทำงานหลายรูปแบบด้วยกัน เช่นวิธีการ Precoding แบบ Tomlinson-Harashima Precoding และ Spiral Curve Phase Precoding เป็นต้น การใช้วิธีการ Precoding ที่ใช้วิธีการ Dimension Partitioning ในการทำงาน ซึ่งเป็นวิธีการ Precoding ที่มีการพัฒนามาจากวิธีการ Precoding แบบ Tomlinson-Harashima (TH Precoding) โดยจะสามารถทำให้สามารถใช้วิธีการ Precoding ร่วมกับระบบสื่อสารที่มีการมอดูเลตแบบมีขนาดของสัญญาณคงที่ เช่น BPSK ได้ และมีความสามารถในการลดผลกระทบจากความผิดพลาดเนื่องจากการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์สูงกว่ากรณีของ Tomlinson-Harashima Precoding

2.7 เทคนิคการรวมสัญญาณ⁸

เนื่องจากเครื่องรับในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ มีการรับสัญญาณชุดเดียวกันทั้งจากเครื่องส่งและ เครื่องส่งผ่าน(Relay)ในแต่ละช่องสัญญาณที่แตกต่างกันดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการรวมสัญญาณทางด้านเครื่องรับเพื่อให้ได้สัญญาณรวมที่ดีที่สุดไปใช้งานพิจารณาในระบบสื่อสารไร้สายที่มีการรับสัญญาณที่มาจากช่องสัญญาณที่แตกต่างกันจำนวน N ช่องสัญญาณทั้งหมดนี้สามารถนำมารวมกันแบบเชิงเส้น (Linear Combination) เนื่องจากระบบที่ทำการศึกษาคือเป็นระบบที่มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการรวมแต่ละช่องสัญญาณคือ a_j แสดงได้ดังสมการที่ 2.11

$$f(t) = a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) + \dots + a_N f_N(t) = \sum_{j=1}^N a_j f_j(t) \quad (2.11)$$

โดยกำหนดให้

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

และ

$x_j(t)$ คือช่องสัญญาณที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูล

$m(t)$ คือข้อมูลที่ต้องการส่ง

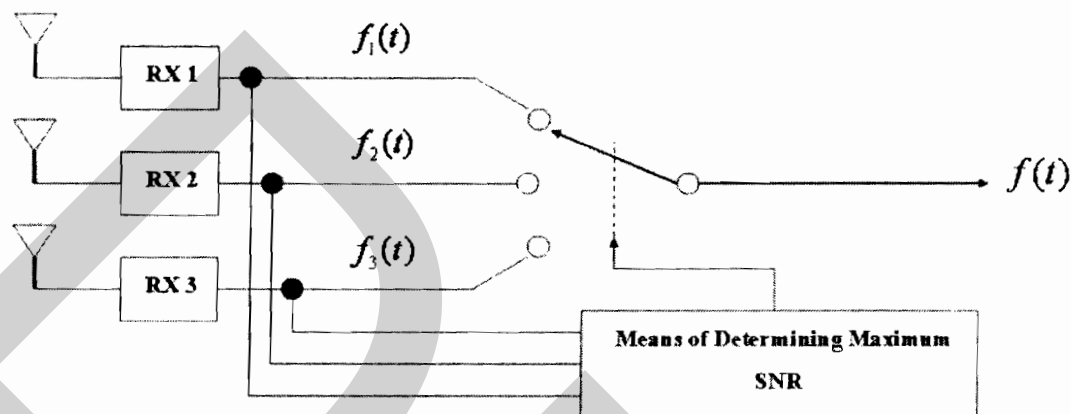
a_j คือ ค่าสัมประสิทธิ์การรวมของแต่ละช่องสัญญาณ

$n_j(t)$ คือสัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง

⁸ ชาญวิทย์ ไขบัว. (2550). การเพิ่มประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูลในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือโดยใช้การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา. วิทยานิพนธ์ครุศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาไฟฟ้าภาควิชาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ซึ่งเทคนิคการรวมสัญญาณมีดังนี้

2.7.1 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือก (Selection Combining หรือ SC)



รูปที่ 2.10 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือก

สำหรับเทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือกจะทำการรวมสัญญาณ โดยเลือกสัญญาณที่รับได้ จากช่องสัญญาณที่ดีที่สุดเพียง 1 สัญญาณเท่านั้น ซึ่งจะพิจารณาเลือกสัญญาณที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุดของสัญญาณที่รับมาทั้งหมดและจากสมการที่ 2.11 กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณได้ดังนี้

$$a_j(t) = \begin{cases} 1, & \text{for } j = k \\ 0, & \text{for } j \neq k \end{cases} \quad (2.12)$$

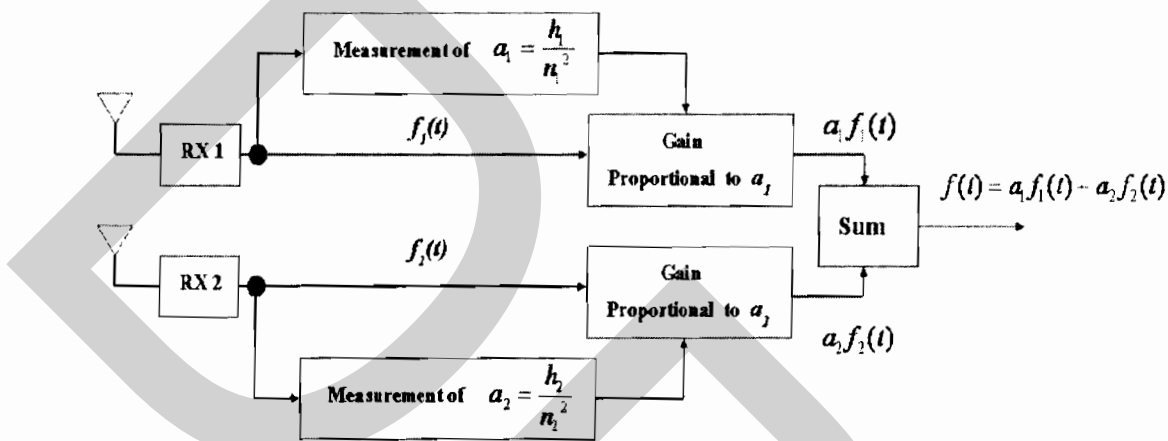
โดยที่ k คือดัชนีสำหรับสัญญาณที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุด

2.7.2 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด (Maximal-Ratio Combining หรือ MRC)

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด เป็นการรวมสัญญาณ โดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณให้มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด หลังจากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้ทั้งหมดบวกกัน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณ

รบกวนของสัญญาณรวมทั้งหมคมี่ค่าสูงที่สุดและสามารถปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณได้ดังนี้

$$a_j(t) = \frac{x_j}{n_j^2} \tag{2.13}$$

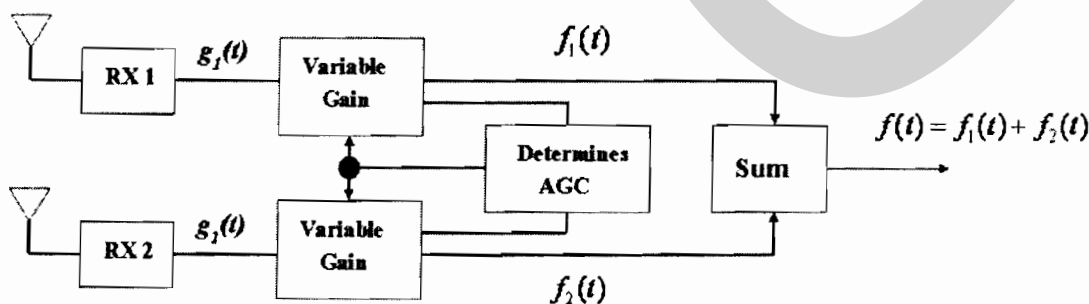


รูปที่ 2.11 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด

โดยเทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุดจะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเฉลี่ย ตามสมการที่ 2.14

$$\bar{\gamma}_t = \sum_{j=1}^N \gamma_j \tag{2.14}$$

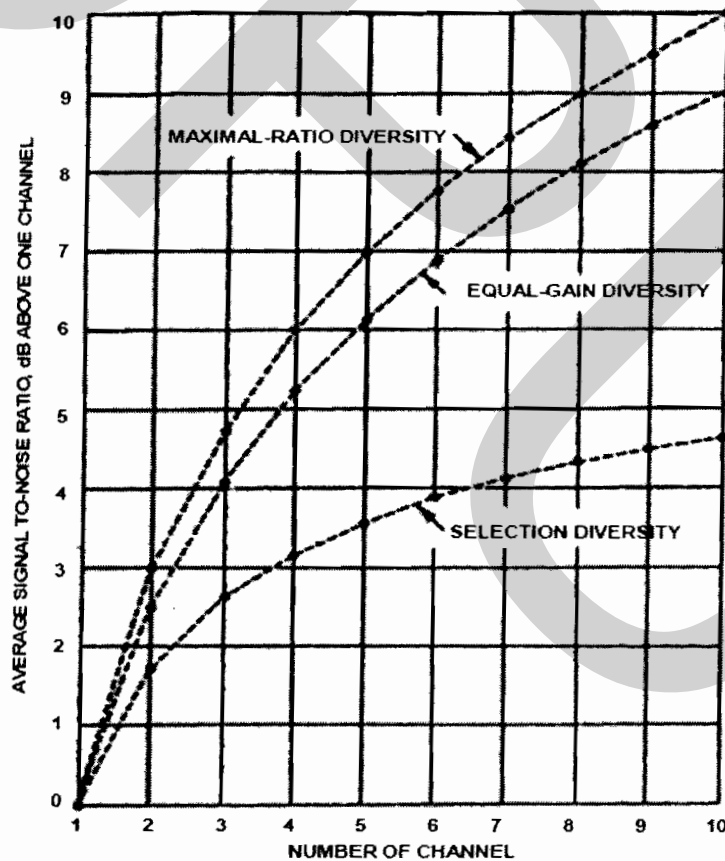
2.7.3 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (Equal Gain Combining หรือ EGC)



รูปที่ 2.12 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน จะทำการรวมสัญญาณโดยปรับค่าของอัตราขยาย (Gain) ของแต่ละช่องสัญญาณ เพื่อให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของทุกช่องสัญญาณเท่ากันหมด จากนั้นนำสัญญาณทั้งหมดรวมกันซึ่งจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณรวมเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนเท่ากับจำนวนของช่องสัญญาณทางด้านเครื่องรับ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากันนี้สามารถหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ตามสมการที่ 2.15

$$\bar{\gamma}_t = \frac{1}{N} \cdot \frac{\left[\sum_{j=1}^N x_j \right]^2}{\sum_{j=1}^N n_j} \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับจำนวนช่องสัญญาณของเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 แบบ

จากการเปรียบเทียบเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 เทคนิคดังรูปที่ 2.12 สามารถสรุปได้ว่าเทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด เป็นเทคนิคที่ทำให้ผลรวมของสัญญาณดีที่สุดเมื่อเทียบกับการรวมสัญญาณแบบเลือกและการรวมสัญญาณแบบให้อัตราขยายเท่ากัน

2.8 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

2.8.1 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (Bit Error Rate หรือ BER)

อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) หรืออัตราความน่าจะเป็นของบิตที่ผิดพลาด (Bit Error Probability หรือ BEP) คืออัตราส่วนของจำนวนบิตข้อมูลที่ทางภาครับคัสนผิดพลาดเมื่อเทียบกับจำนวนบิตข้อมูลทั้งหมดที่ถูกส่งมาจากภาคส่งเป็นค่าพารามิเตอร์สำคัญในการวัดสมรรถนะของระบบเป็นค่าที่แสดงถึงค่าความถูกต้องของการรับ/ส่งข้อมูลโดยตรงอัตราความผิดพลาดบิตเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่สนใจในสถานะต่างๆเช่นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนหรือเมื่อจำนวนผู้ใช้เปลี่ยนไปเป็นต้น

2.8.2 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio หรือ SNR)

ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) คืออัตราส่วนกำลังของสัญญาณเมื่อเทียบกับกำลังของสัญญาณรบกวนส่วนใหญ่ค่ากำลังของสัญญาณจะมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่ากำลังของสัญญาณรบกวนดังนั้นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจึงนิยมวัดกันในหน่วยเดซิเบล (Decibel: dB) โดยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสำหรับผู้ใช้งานที่ในค่าหน่วยของเดซิเบลสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$SNR = \frac{|h|^2 P}{N_0 W} = \frac{d^{-\alpha} P}{N_0 W} \quad (2.16)$$

เมื่อ	$ h ^2$	คือ สัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณ
	P	คือ กำลังส่งโดยเฉลี่ยจากแต่ละโหนด
	N_0	คือ ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power Spectrum Density) ของสัญญาณรบกวน
	W	คือ แบนด์วิธการส่งสัญญาณ
	$d^{-\alpha}$	คือ ค่า Path Loss และ α เป็น Path Loss Exponent

2.9 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคนิคการส่งต่อข้อมูล (Relaying) ในระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ อาศัยการส่งต่อข้อมูลผ่านโหนดส่งผ่านซึ่งเป็นผู้ใช้งานอื่นในระบบ ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยส่งต่อข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งเป็นการเพิ่มระยะครอบคลุมในสถานะที่มีพลังงานอย่างจำกัด อีกทั้งยังสามารถติดต่อสื่อสารได้ในพื้นที่อับสัญญาณ (Shadow Areas) แม้ผู้ใช้งานจะไม่สามารถติดต่อกับโหนดปลายทางได้ก็ตามหรือผู้ใช้งานที่เคลื่อนที่ ซึ่งมีความต้องการที่จะจัดการการแฮนด์ออฟ (Handoff) ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้อัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (Bit Error Rate หรือ BER) ของระบบโดยรวมลดลง และค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio หรือ SNR) ของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนของสายอากาศที่โหนดต้นทางและโหนดปลายทาง

Ho-Jung An et.al.⁹ ได้นำเสนอเทคนิคการส่งต่อข้อมูล (Relaying) โดยใช้วิธีการเข้ารหัสแบบรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti และหลักการ Precoding ซึ่งมีการส่งต่อสัญญาณจากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทางแบบ AF โดยให้มีผู้ใช้งานในโครงข่ายมีจำนวน 2 คน และมีโหนดปลายทาง 1 เครื่อง กำหนดให้ผู้ใช้งานคนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นโหนดต้นทาง ผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่าน และยังคงมีเชื่อมต่อสัญญาณที่มาจากวิถีตรง (Line Of Sight หรือ LOS) ผลจากการทดลองส่งผลให้ ค่าของอัตราความผิดพลาดของบิต (BER) ลดลง ที่สถานะของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ต่ำ แต่ในบางกรณีที่ผู้ใช้งานไม่สามารถติดต่อไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งอาจจะอยู่นอกพื้นที่บริการหรืออาจมีพลังงานที่ต่ำ จึงไม่สามารถทำการเชื่อมต่อสัญญาณที่มาจากวิถีตรง (LOS) ได้ ซึ่งอาจต้องเลือกใช้โหนดส่งผ่านโหนดอื่นในระบบ

E.Kudoh et.al.¹⁰ นำเสนอวิธีการใช้งานความถี่และกำลังหลายๆ วิธี เพื่อให้ได้รับอัตราการส่งข้อมูลที่ด้วยกำลังส่งที่ต่ำ ในการสื่อสาร VCN ที่สามารถเลือกใช้ การส่งต่อข้อมูลได้หลายๆ โหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทางที่ต้องการได้ ด้วยเหตุนี้เทคนิคการเลือกเส้นทางการส่งต่อข้อมูลจึงเป็นสิ่งที่ต้องศึกษาและค้นคว้าเพิ่มมากขึ้น

⁹ Ho-Jung An, Jee-Hoon Kim, and Hyoung-Kyu Song, (2007) "Cooperative Transmission Scheme to Increase Gain by STBC,"

Engineering Letters

¹⁰ E. Kudoh and F. Adachi, "Power and Frequency Efficient Wireless Multihop Virtual Cellular Concept," IEICE Trans. Comm.,

Vol. E88-B, No. 4, 2005, pp. 1613 – 1621

Zinan Lin et.al.¹¹ นำเสนอวิธีการเลือก โหนดส่งผ่านในเครือข่ายเพื่อใช้ในการส่งต่อข้อมูลแบบง่าย ๆ โดยทำการออกแบบ โครงสร้างการทำงานของระบบด้วยการใช้ประโยชน์จากการรู้ถึงค่าเฉลี่ยของสถานะของค่า SNR ของภาครับ ที่ โหนดปลายทางปลายทาง

A.Bletsas et.al.¹² นำเสนอเทคนิคโอกาสการส่งต่อข้อมูล ซึ่งพิจารณาเปรียบเทียบค่า SNR ที่มีค่ามากที่สุดระหว่างสถานีต่างๆ ที่มีมากมายในเครือข่าย แต่เทคนิคดังกล่าวข้างต้นพิจารณา โหนดส่งผ่านเพื่อใช้ในการส่งต่อข้อมูลมาใช้งานแค่ โหนดส่งผ่านเดียว

จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงได้เกิดแนวคิดในการที่จะวิเคราะห์และปรับปรุงเครือข่ายของการติดต่อในเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่อาศัยระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนของสายอากาศที่โหนดต้นทางและ โหนดปลายทางในการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทาง (Source) ที่อาจอยู่นอกพื้นที่บริการและมีพลังงานที่จำกัดและไม่สามารถเชื่อมต่อสัญญาณที่มาจากวิธีตรงได้โดยใช้วิธีการเข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ร่วมกับ Precoding ไปยังโหนดปลายทาง (Destination) โดยทำการเลือก โหนดส่งผ่านในระบบ (Path Selection) ที่มีอยู่มากมายในเครือข่ายเพื่อช่วยในการส่งต่อข้อมูล (Relaying) โดยพิจารณาจากค่าความจุของช่องสัญญาณที่ดีที่สุด (Channel Capacity) ทำการส่งต่อข้อมูล ในสภาวะที่ช่องสัญญาณมีการจางหายแบบเรย์ลี โดยการส่งต่อข้อมูลจากโหนดส่งผ่านแบบ AF ซึ่งจะผ่านขยายสัญญาณที่รับได้ให้มีขนาดแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนด แล้วส่งต่อไปยังโหนดปลายทาง ส่งผลให้ไม่เกิดความล่าช้า (Delay) ที่เกิดจากการประมวลผลที่โหนดส่งผ่าน อีกทั้ง ในภาครับยังสามารถรวมสัญญาณจากการส่งผ่านมาได้ โดยการใช้ ค่าความน่าจะเป็นจริงสูงสุด(Maximum Likelihood หรือ ML) ช่วยในการตัดสินใจโดยสมมติให้รูปแบบการจางหายของแต่ละลำดับในการส่งผ่านที่เป็นอิสระต่อกัน

¹¹ Zinan Lin and E. Erkip, "Relay Search Algorithms for Coded Cooperative Systems," GLOBECOM'05, Vol. 3, 2005, pp. 6 – 10

¹² Bletsas A., Hyundong Shin, and M. Z. Win, "Cooperative Communications with Outage-Optimal Opportunistic Relaying,"

IEEE Trans. on Wireless Communication, Vol. 6, Issue 9, 2007, pp. 3450 – 3460.

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

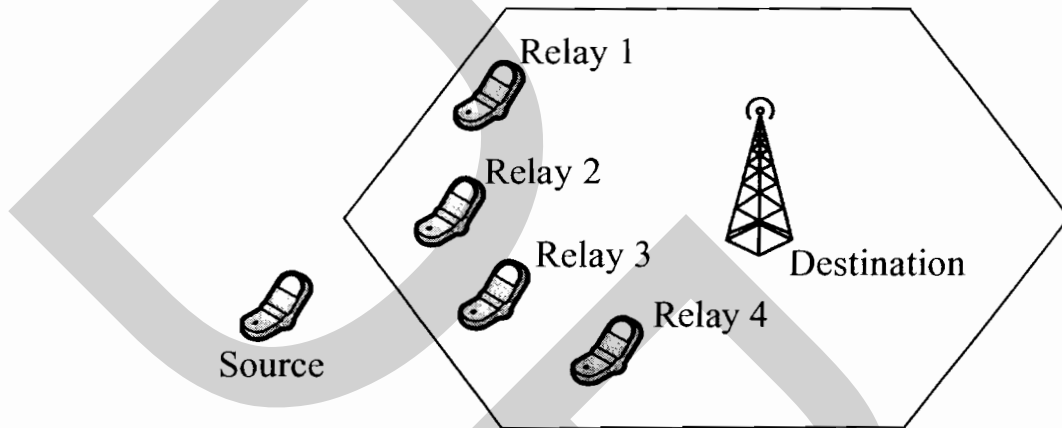
ในบทนี้จะเป็นการนำเสนองานวิจัย ซึ่งเป็นการพัฒนาเทคนิคการส่งต่อข้อมูล ของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ ในเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่บนช่องสัญญาณที่มีการจางหายแนวราบแบบเรย์ลี (Rayleigh-Flat Fading) ที่มีการส่งผ่าน 2 ฮอป โดยใช้วิธีการเข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ร่วมกับวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) และโพรโทคอลการส่งต่อสัญญาณแบบขยายและส่งต่อ (Amplify-and-Forward หรือ AF) การวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการเลือกเส้นทางด้วยการพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ของเส้นทางแต่ละโหนดส่งผ่าน เพื่อใช้ในการส่งต่อข้อมูลไปยังโหนดปลายทางต่อไป

ซึ่งในที่นี้จะขออธิบายถึงเนื้อหาของงานวิจัย โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ หลักในการพิจารณาเลือกเส้นทางด้วยค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) และการทำงานของระบบที่นำเสนอ รายละเอียดของแต่ละหัวข้อมีดังนี้

3.1 โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ

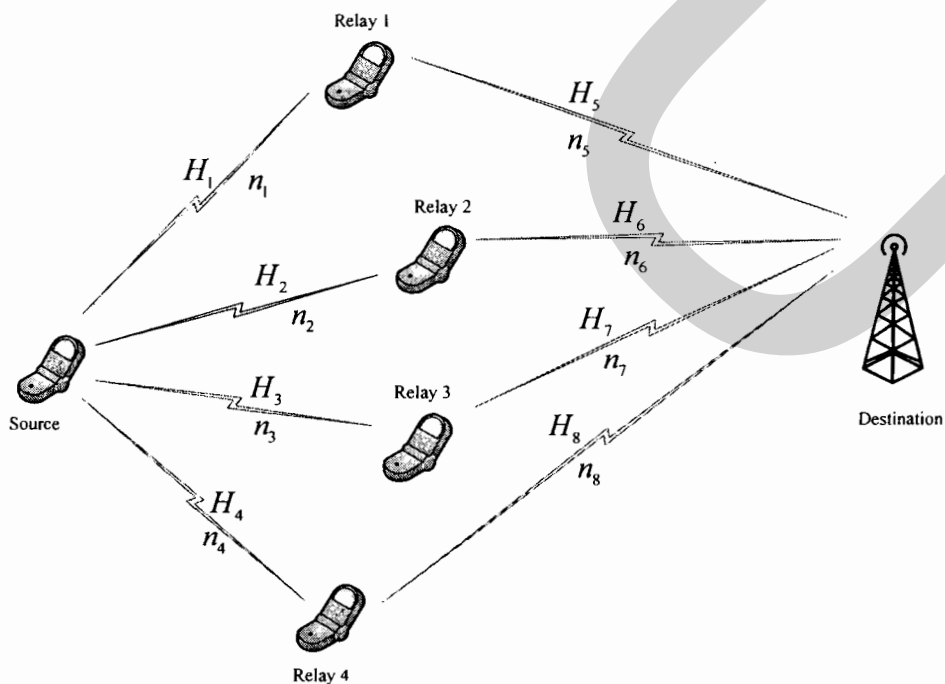
ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการสร้างแบบจำลองจากอุปกรณ์สื่อสารไร้สายจำพวกโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้งานในปัจจุบันซึ่งมีสายอากาศเพียงคันเดียว (Single Antenna) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยโครงสร้างระบบกำหนดให้มีโหนดปลายทาง (Destination) หรือ Base Station (BS), ผู้ใช้งาน (Source) ทำหน้าที่เป็นโหนดต้นทาง 1 เครื่อง และผู้ใช้งานที่เหลือ ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่านซึ่งในวิธีที่นำเสนอกำหนดให้มี 4 โหนดส่งผ่านโหนดต้นทางหรือผู้ส่งอยู่นอกพื้นที่ให้บริการจากโหนดปลายทางและไม่สามารถเชื่อมต่อสัญญาณที่มาจากวิถีตรงได้ (Non Line Of Sight หรือ NLOS) อีกทั้งด้วยพลังงานที่มีจำกัด จำเป็นที่จะต้องให้ผู้ใช้งานอื่น (โหนดส่งผ่าน) ที่กระจายตัวอยู่ในเครือข่าย ทำการส่งต่อข้อมูลออกไป โดยตลอดช่วงเวลาที่ทำการเลือกเส้นทางและส่งต่อข้อมูลนั้น ทุกๆ โหนดเปรียบเสมือนไม่มีการเคลื่อนที่หรือไม่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์คอปเปอร์ ซึ่งในการเลือกเส้นทางเพื่อส่งต่อข้อมูลจะพิจารณาจากค่าความจุของช่องสัญญาณในแต่ละเส้นทางของโหนดส่งผ่านทั้ง 4 และการส่งต่อข้อมูลของโหนดส่งผ่าน ทำการขยายสัญญาณที่รับได้ให้มีขนาดแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนดแล้วใช้การส่งต่อสัญญาณไปยังโหนดปลายทางซึ่งเป็นการส่งสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward (AF) และในการส่งข้อมูลใช้วิธีการเข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ร่วมกับวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) ซึ่งแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลาในการส่งเปรียบเสมือนการส่งข้อมูลโดยการ

ใช้หลายเสาอากาศส่ง หลายเสาอากาศรับ(MIMO) นั่นเอง ที่ปลายทางจะมีการรวมลำดับของบิต (Combine bit sequence) และจากหลายๆ โหนดส่งผ่าน โดยใช้วิธี Maximum Likelihood Detector (ML) เนื่องจากลำดับการส่งผ่านในแต่ละเส้นทางเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งช่องสัญญาณจากโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่านและจากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทางได้รับผลกระทบจากการจางหายแบบเรย์ลี (Rayleigh Fading) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1



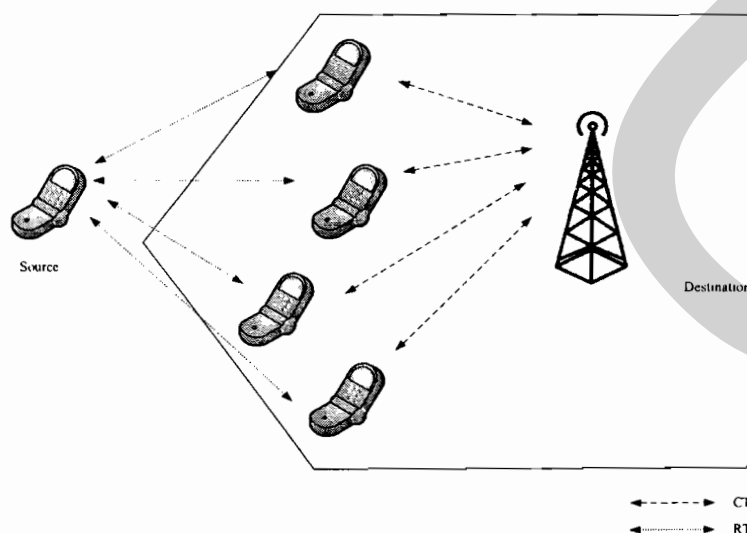
รูปที่ 3.1 ระบบสื่อสารเคลื่อนที่แบบร่วมมือที่นำเสนอ

โดยรูปแบบช่องสัญญาณที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปแบบช่องสัญญาณระบบสื่อสารเคลื่อนที่แบบร่วมมือที่นำเสนอ

จากรูปที่ 3.2 เป็นรูปแบบช่องสัญญาณระบบสื่อสารเคลื่อนที่แบบร่วมมือที่นำเสนอ โดยกำหนดให้โหนดต้นทาง (Source) และ โหนดส่งผ่าน (Relay) สามารถรู้ถึงข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณแบบสมบูรณ์ (Full Channel State Information หรือ CSI) ซึ่งเป็นการแจ้งสภาพของช่องสัญญาณร่วมกันระหว่างภาครับและภาคส่ง โดยแต่ละเส้นทางในแต่ละโหนดส่งผ่านได้รับผลกระทบจากการจางหายที่เป็นอิสระต่อกัน ในเบื้องต้น โหนดส่งผ่านทั้งหมดในเครือข่ายจะรับสัญญาณคลื่นพาห์อ้างอิง Ready to Send (RTS) จากโหนดต้นทาง และรับสัญญาณคลื่นพาห์อ้างอิง Clear to Send (CTS) จากโหนดปลายทาง จากคลื่นพาห์อ้างอิง RTS จะส่งผลทำให้โหนดต้นทางสามารถที่จะรู้คุณลักษณะเบื้องต้นของช่องสัญญาณไปยังแต่ละโหนดส่งผ่านเพื่อเป็นข้อมูลของช่องสัญญาณเพื่อใช้ในการเข้ารหัสล่วงหน้าล่วงหน้า (Precoding) และการวัดระดับสัญญาณอ้างอิง RTS จากโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่าน และ CTS จากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง จะเป็นค่าที่โหนดปลายทางนำมาเป็นข้อมูลในการคำนวณหาค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ของแต่ละเส้นทาง และนำค่าความจุของช่องสัญญาณที่ได้นั้นมาวิเคราะห์เลือกเส้นทางที่ดีที่สุด 2 เส้นทางที่จะทำการส่ง โดยทำการแจ้งข้อมูลกลับไปยังโหนดต้นทางผ่าน 2 เส้นทางนั้น เมื่อโหนดต้นทางทราบเส้นทางที่ดีที่สุดแล้ว จะทำการส่งข้อมูลตามเส้นทางที่เลือกด้วยวิธีการ STBC-PC โดยตลอดช่วงระยะเวลาที่ทำการเลือกโหนดส่งผ่าน และช่วงระยะเวลาการส่งต่อข้อมูลทุกๆ โหนดไม่มีการเคลื่อนที่และได้รับผลกระทบจากการจางหาย (Fading) น้อยมาก ดังที่แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การแจ้งสภาพของช่องสัญญาณร่วมกันระหว่างภาครับและภาคส่ง

3.2 หลักการพิจารณาเลือกเส้นทางในการส่งผ่านข้อมูล (Channel Capacity-Based Path Selection)

การพิจารณาเลือกเส้นทางในการส่งต่อข้อมูล (Path Selection) ด้วยการพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณ (C) ที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้ จะเริ่มต้นจากการสุ่มระยะทาง (d) ระหว่างโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่าน ($S \rightarrow R_i$) และโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง ($R_i \rightarrow D$) และพิจารณาโหนดส่งผ่านในโครงข่ายไร้สายมีจำนวน k ตัว โดยสมการที่ใช้ในการหาค่าความจุของช่องสัญญาณจะเป็นไปตาม Shannon Theorem ดังแสดงในสมการที่ (3.1)

$$C = \frac{1}{2} \log_2 (1 + SNR) \quad (3.1)$$

เมื่อ C คือ Channel Capacity

h คือ Channel Coefficient

SNR คือ Instantaneous Signal-to-Noise Ratio

โดยค่า SNR ในสมการที่ (3.1) มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณ ($|h|^2$), กำลังส่งโดยเฉลี่ยจากแต่ละโหนด (P), ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power Spectrum Density) ของสัญญาณรบกวน (N_0), แบนด์วิธการส่งสัญญาณ (W), และ Path Loss ($d^{-\alpha}$), ดังแสดงในสมการที่ (3.2)

$$SNR = \frac{|h|^2 P}{N_0 W} = \frac{d^{-\alpha} P}{N_0 W} \quad (3.2)$$

โดยวิธีที่นำเสนอจะทำการหาค่าต่ำที่สุดของค่าความจุของช่องสัญญาณหรือ Mutual Information¹ ในแต่ละเส้นทาง โดยวิเคราะห์จากค่าความจุของช่องสัญญาณจากโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่านตัวที่ i เปรียบเทียบกับความจุของช่องสัญญาณจากโหนดส่งผ่านตัวที่ i ไปยังโหนดปลายทาง ดังแสดงในสมการที่ (3.3)

$$C_{\min}^i = \min_i (C_{S \rightarrow R_i}, C_{R_i \rightarrow D}) \quad (3.3)$$

¹ Kampo Woradit, W. Suwansantisuk, and et. Al. (2009, August). "Outage Behavior of Selective Relaying Schemes" IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 8, NO.8, pp.3890-3895

หลังจากนั้น จะนำค่าความจุช่องสัญญาณที่ต่ำที่สุดที่หาได้ในแต่ละเส้นทางจากสมการที่ (3.3) มาทำการเปรียบเทียบเส้นทางที่มีค่าความจุช่องสัญญาณมากที่สุดและค่ารองลงไปตามลำดับ กล่าวคือ ในเส้นทางของโหนดส่งผ่านที่มีค่าความจุช่องสัญญาณมากที่สุดจะถูกกำหนดเป็น R_{sel1} ส่วนส่งผ่านที่มีค่าความจุช่องสัญญาณรองลงไปจะถูกกำหนดเป็น R_{sel2} ดังแสดงในสมการที่ (3.4) และ (3.5) ตามลำดับ ดังนั้น 2 เส้นทางที่ส่งผ่าน R_{sel1} และ R_{sel2} (2 Selected Paths) จะถูกเลือกออกมาท่ามกลางโหนดส่งผ่านจำนวน k ตัว ซึ่งกระบวนการเลือกเส้นทางในการส่งโดยการพิจารณาจากเส้นทางของโหนดส่งผ่านที่มีค่าความจุช่องสัญญาณที่ดีที่สุดจะเกิดขึ้นช่วงเริ่มต้นก่อนการส่งข้อมูลจริง (Pre-Transmission Phase) หรือ กระบวนการเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดก่อนที่จะส่งข้อมูลออกไปเพื่อให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลน้อยที่สุดนั่นเอง

$$R_{sel1} = \max_1 \{ C_{\min}^1, C_{\min}^2, \dots, C_{\min}^k \} \quad (3.4)$$

$$R_{sel2} = \max_2 \{ C_{\min}^1, C_{\min}^2, \dots, C_{\min}^k \} \quad (3.5)$$

3.3 หลักการส่งข้อมูลที่เข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ด้วยวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า

โดยแนวความคิดของหลักการส่งข้อมูลที่เข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ด้วยการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) โดยในที่นี้จะเขียนสัญลักษณ์ย่อว่า STBC-PC นี้ได้นำมาจาก Ho-Jung An *et.al.*² โดย Ho-Jung An *et.al.* ได้นำเสนอการรับส่งสัญญาณแบบร่วมมือที่มีการส่งต่อข้อมูลจากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทางแบบ AF โดยให้มีผู้ใช้งานในโครงข่าย มีจำนวน 2 คน และมีโหนดปลายทาง 1 เครื่อง กำหนดให้ผู้ใช้งานคนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นโหนดต้นทาง ผู้ใช้งานคนที่ 2 ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งผ่าน และยังคงมีเชื่อมต่อสัญญาณที่มาจากวิถีตรง (Line Of-Sight หรือ LOS) โดยสมการต่างๆ ที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณข้อมูลทั้งแบบมีเส้นทางตรงจากต้นทางไปยังปลายทาง (Direct Link) และแบบที่ส่งผ่านโหนดส่งผ่าน 1 ตัวจะไม่ขอแสดงในหัวข้อนี้ ซึ่งสามารถพิจารณาและดูสมการต่างๆ ได้ใน Ho-Jung An *et.al.* แต่ทั้งนี้การคำนวณและแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ของ Ho-Jung An *et.al.* จะเหมือนกับงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งหลักการส่งข้อมูลมีดังนี้

รูปแบบการส่งสัญญาณของการเข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti สามารถเขียนแสดงในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

² Ho-Jung An, Jee-Hoon Kim, and Hyoung-Kyu Song, (2007) "แหล่งเดิม"

$$\begin{bmatrix} c_1 & -c_2^* \\ c_2 & c_1^* \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

ในรูปแบบที่นำเสนอจะแบ่งรูปแบบการส่งเป็น 2 ช่วงเวลา โดยในคอลัมแรกเป็นการส่งในช่วงเวลาที่ 1 คอลัมที่สองทำการส่งในช่วงเวลาที่ 2 ตามลำดับ ทำการมอดูเลตแบบ BPSK จากนั้นเป็นกระบวนการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) จากรูปที่ 3.2 รูปแบบช่องสัญญาณที่นำเสนอทำการนำสัญลักษณ์เข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti คูณด้วยส่วนกลับของช่องสัญญาณ ซึ่งจะได้รูปแบบในการส่งในแต่ละสัญลักษณ์ เมื่อผ่านวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) ดังนี้

$$s_1 = H_1^+ c_1 + H_2^+ c_2 \quad (3.7)$$

$$s_2 = -H_1^+ c_2^* + H_2^+ c_1^* \quad (3.8)$$

$$s_3 = H_3^+ c_1 + H_4^+ c_2 \quad (3.9)$$

$$s_4 = -H_3^+ c_2^* + H_4^+ c_1^* \quad (3.10)$$

เมื่อ H_i^+ เป็นส่วนกลับของช่องสัญญาณ H_i หรือ เป็น Pseudo inverse โดยที่ $H^+ = (H^H H)^{-1} H^H$ และ $(\cdot)^*$ เป็นการสังยุคของจำนวนเชิงซ้อน

วิธีการส่งต่อข้อมูลจากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง โดยโหนดส่งผ่านจะรับข้อมูลสัญลักษณ์ที่ผ่านการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) ตามลำดับจากโหนดต้นทาง แล้วทำการขยายสัญญาณให้มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลเดิมที่โหนดส่งผ่านได้รับเพื่อให้เกิดความผิดเพี้ยนน้อยที่สุด จากนั้นทำการส่งต่อข้อมูลไปยังปลายทาง ที่โหนดปลายทางจะทำการรวมข้อมูลที่ได้รับตามลำดับจากโหนดต้นทางและโหนดส่งผ่าน ซึ่งโหนดปลายทางจะตรวจจับและตัดสินใจรับสัญลักษณ์ได้ดีเพราะมีลำดับการส่งที่เป็นอิสระต่อกัน โดยค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการจะแทนได้ดังต่อไปนี้

$r_{S,R_i} [s_i]$ และ $r_{R_i,D} [s_i]$ แสดงถึง การรับข้อมูลบิตแต่ละลำดับจากโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่านแต่ละตัวใน เครือข่าย (R_i) และจากโหนดส่งผ่านนั้นๆ (R_i) ไปยังโหนดปลายทางตามลำดับ

$n_1 - n_8$ คือ AWGN เชิงซ้อน ที่เกิดจากผลกระทบจากการแทรกสอดของสัญญาณ

$n_5 - n_8$ คือ สัญญาณรบกวนเมื่อผ่านการขยาย

β_{R_i} คือ อัตราการขยายของแต่ละโหนดส่งผ่าน (R_i)

ช่วงเวลาที่ 1 $\left(0 - \frac{T}{2}\right)$ เป็นสมการที่โหนดส่งผ่าน R_1, R_2 สามารถรับสัญญาณ s_1 และโหนดส่งผ่าน R_3, R_4 สามารถรับสัญญาณ s_3 จากโหนดต้นทางได้ ตามลำดับ โดยสัญญาณในแต่ละโหนดส่งผ่านรับได้แสดงได้ ดังนี้

สัญญาณ s_1 ที่รับได้จากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของโหนดส่งผ่าน R_1

$$r_{S,R_1}(s_1) = H_1 s_1 + n_1 \quad (3.11)$$

$$r_{R_1,D}(s_1) = H_5 \beta_{R_1} r_{S,R_1}(s_1) + n_5 \quad (3.12)$$

สัญญาณ s_1 ที่รับได้จากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของโหนดส่งผ่าน R_2

$$r_{S,R_2}(s_1) = H_2 s_1 + n_2 \quad (3.13)$$

$$r_{R_2,D}(s_1) = H_6 \beta_{R_2} r_{S,R_2}(s_1) + n_6 \quad (3.14)$$

สัญญาณ s_3 ที่รับได้จากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของโหนดส่งผ่าน R_3

$$r_{S,R_3}(s_3) = H_3 s_3 + n_3 \quad (3.15)$$

$$r_{R_3,D}(s_3) = H_7 \beta_{R_3} r_{S,R_3}(s_3) + n_7 \quad (3.16)$$

สัญญาณ s_3 ที่รับได้จากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของโหนดส่งผ่าน R_4

$$r_{S,R_4}(s_3) = H_4 s_3 + n_4 \quad (3.17)$$

$$r_{R_4,D}(s_3) = H_8 \beta_{R_4} r_{S,R_4}(s_3) + n_8 \quad (3.18)$$

ช่วงเวลาที่ 2 $\left(\frac{T}{2} - T\right)$ เป็นสมการที่โหนดส่งผ่าน R_1, R_2 สามารถรับสัญญาณ s_2 และโหนดส่งผ่าน R_3, R_4 สามารถรับสัญญาณ s_4 จากโหนดต้นทางได้ ตามลำดับ โดยสัญญาณในแต่ละโหนดส่งผ่านรับได้แสดงได้ ดังนี้

สัญญาณ s_2 ที่รับได้จากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของโหนดส่งผ่าน R_1

$$r_{S,R_1}(s_2) = H_1 s_2 + n_1 \quad (3.19)$$

$$r_{R_1,D}(s_2) = H_5 \beta_{R_1} r_{S,R_1}(s_2) + n_5 \quad (3.20)$$

สัญญาณ s_2 ที่รับได้จากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของโหนดส่งผ่าน R_2

$$r_{S,R_2}(s_2) = H_2 s_2 + n_2 \quad (3.21)$$

$$r_{R_2,D}(s_2) = H_6 \beta_{R_2} r_{S,R_2}(s_2) + n_6 \quad (3.22)$$

สัญลักษณ์ s_4 ที่รับได้จากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของโหนดส่งผ่าน R_3

$$r_{S,R_3}(s_4) = H_3 s_4 + n_3 \quad (3.23)$$

$$r_{R_3,D}(s_4) = H_7 \beta_{R_3} r_{S,R_3}(s_4) + n_7 \quad (3.24)$$

สัญลักษณ์ s_4 ที่รับได้จากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของโหนดส่งผ่าน R_4

$$r_{S,R_4}(s_4) = H_4 s_4 + n_4 \quad (3.25)$$

$$r_{R_4,D}(s_4) = H_8 \beta_{R_4} r_{S,R_4}(s_4) + n_8 \quad (3.26)$$

ผลจากสมการที่ (3.11) - (3.26) ในการส่งข้อมูลทั้ง 2 ช่วงเวลา สามารถแทนค่าสัญลักษณ์ s_i ที่ผ่านกระบวนการเข้ารหัสล่วงหน้าแล้ว ตามสมการที่ (3.7) - (3.10) ได้ดังนี้
แทนค่า s_i จากสมการ (3.7) ลงในสมการที่ (3.11) - (3.14) จะได้

$$r_{S,R_1}(s_1) = c_1 + H_1 H_2^+ + n_1 \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} r_{R_1,D}(s_1) &= \beta_{R_1} H_5 (c_1 + H_1 H_2^+ c_2 + n_1) + n_5 \\ &= \beta_{R_1} H_5 c_1 + \beta_{R_1} H_5 H_1 H_2^+ c_2 + n_5 \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$r_{S,R_2}(s_1) = H_1^+ H_2 c_1 + c_2 + n_2 \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} r_{R_2,D}(s_1) &= \beta_{R_2} H_6 (H_1^+ H_2 c_1 + c_2 + n_2) + n_6 \\ &= \beta_{R_2} H_6 H_1^+ H_2 c_1 + \beta_{R_2} H_6 c_2 + n_6 \end{aligned} \quad (3.30)$$

แทนค่า s_3 จากสมการ (3.9) ลงในสมการที่ (3.15) - (3.18) จะได้

$$r_{S,R_3}(s_3) = c_1 + H_3 H_4^+ + n_3 \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} r_{R_3,D}(s_3) &= \beta_{R_3} H_7 (c_1 + H_3 H_4^+ c_2 + n_3) + n_7 \\ &= \beta_{R_3} H_7 c_1 + \beta_{R_3} H_7 H_3 H_4^+ c_2 + n_7 \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$r_{S,R_4}(s_3) = H_3^+ H_4 c_1 + c_2 + n_4 \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} r_{R_4,D}(s_3) &= \beta_{R_4} H_8 (H_3^+ H_4 c_1 + c_2 + n_4) + n_8 \\ &= \beta_{R_4} H_8 H_3^+ H_4 c_1 + \beta_{R_4} H_8 c_2 + n_8 \end{aligned} \quad (3.34)$$

แทนค่า s_2 จากสมการ (3.8) ลงในสมการที่ (3.19) - (3.22) จะได้

$$r_{S,R_1}(s_2) = -c_2^* + H_1 H_2^+ c_1^* + n_1 \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} r_{R_1,D}(s_2) &= \beta_{R_1} H_5 (-c_2^* + H_1 H_2^+ c_1^* + n_1) + n_5 \\ &= \beta_{R_1} H_5 \cdot -c_2^* + \beta_{R_1} H_5 H_1 H_2^+ c_1^* + n_5 \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$r_{S,R_2}(s_2) = -H_1^+ H_2 c_2^* + c_1^* + n_2 \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} r_{R_2,D}(s_2) &= \beta_{R_2} H_6 (-H_1^+ H_2 c_2^* + c_1^* + n_2) + n_6 \\ &= -\beta_{R_2} H_6 H_1^+ H_2 c_2^* + \beta_{R_2} H_6 c_1^* + n_6 \end{aligned} \quad (3.38)$$

แทนค่า s_4 จากสมการ (3.10) ลงในสมการที่ (3.23) - (3.26) จะได้

$$r_{S,R_3}(s_4) = -c_2^* + H_3 H_4^+ c_1^* + n_3 \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} r_{R_3,D}(s_4) &= \beta_{R_3} H_7 (-C_2^* + H_3 H_4^+ C_1^* + n_3) + n_8 \\ &= \beta_{R_3} H_7 \cdot -C_2^* + \beta_{R_3} H_7 H_3 H_4^+ C_1^* + n_8 \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$r_{S,R_4}(s_4) = -H_3^+ H_4 c_2^* + c_1^* + n_4 \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} r_{R_4,D}(s_4) &= \beta_{R_4} H_8 (-H_3^+ H_4 c_2^* + c_1^* + n_4) + n_8 \\ &= -\beta_{R_4} H_8 H_3^+ H_4 c_2^* + \beta_{R_4} H_8 c_1^* + n_8 \end{aligned} \quad (3.42)$$

โดยที่

$$G = H_1 H_2^+$$

$$K = H_2 H_1^+$$

$$W = H_3 H_4^+$$

$$Y = H_4 H_3^+$$

สมการที่โหนดปลายทาง (Destination) เกิดจากการรวมบิตข้อมูลที่ได้รับได้ตามลำดับ (Combined bit sequence) จากทั้ง 4 เส้นทางของแต่ละโหนดส่งผ่าน ด้วยกระบวนการตัดสินใจที่น่าจะเป็นไปได้มากที่สุด (Maximum Likelihood หรือ ML) แสดงได้ดังนี้

บิตข้อมูลที่ได้รับจากการส่งต่อผ่านโหนดส่งผ่านที่ 1 (R_1) โดยที่บิตข้อมูล \tilde{c}_1 และ \tilde{c}_2 ที่ได้นั้นมาจากการรวมสัญลักษณ์ s_1 กับ s_2 จากสมการที่ 3.28 และ 3.36

$$\begin{aligned} \tilde{c}_1 &= H_5^* r_{R_1,D}(s_1) + H_5 \cdot G \cdot r_{R_1,D}(s_2) \\ &= H_5^* (H_5 c_1 + H_5 G c_2 + n_5) + H_5 \cdot G \cdot (-H_5 c_2^* + H_5 G c_1^* + n_5)^* \\ &= c_1 (H_5^* H_5 + H_5 G \cdot H_5^* G^*) + N_5 \end{aligned} \quad (3.43)$$

$$\begin{aligned} \tilde{c}_2 &= (H_5 \cdot G)^* r_{R_1,D}(s_1) - H_5 \cdot r_{R_1,D}(s_2) \\ &= (H_5 \cdot G)^* (H_5 c_1 + H_5 G c_2 + n_5) - H_5 \cdot (-H_5 c_2^* + H_5 G c_1^* + n_5)^* \\ &= c_2 (H_5^* G^* \cdot H_5 G + H_5^* H_5) + N_5 \end{aligned} \quad (3.44)$$

บิตข้อมูลที่ได้รับได้จากการส่งต่อผ่าน โหนดส่งผ่านที่ 2 (R_2) โดยที่บิตข้อมูล \tilde{c}_1 และ \tilde{c}_2 ที่ได้นั้นมาจากการรวมสัญญาณ s_1 กับ s_2 จากสมการที่ 3.30 และ 3.37

$$\begin{aligned}\tilde{c}_1 &= (H_6.K)^* r_{R_2,D}(s_1) + H_6 r_{R_2,D}^*(s_2) \\ &= (H_6.K)^* (H_6 K c_1 + H_6 c_2 + n_6') + H_6 (-H_6 K c_2^* + H_6 c_1^* + n_6')^* \\ &= c_1 (H_6^* K^* . H_6 K + H_6 H_6^*) + N_6\end{aligned}\quad (3.45)$$

$$\begin{aligned}\tilde{c}_2 &= H_6^* r_{R_2,D}(s_1) - (H_6.K) r_{R_2,D}^*(s_2) \\ &= H_6^* (H_6 K c_1 + H_6 c_2 + n_6') - (H_6.K) (-H_6 K c_2^* + H_6 c_1^* + n_6')^* \\ &= c_2 (H_6 H_6^* + H_6 K . H_6^* K^*) + N_6'\end{aligned}\quad (3.46)$$

บิตข้อมูลที่ได้รับได้จากการส่งต่อผ่าน โหนดส่งผ่านที่ 3 (R_3) โดยที่บิตข้อมูล \tilde{c}_1 และ \tilde{c}_2 ที่ได้นั้นมาจากการรวมสัญญาณ s_3 กับ s_4 จากสมการที่ 3.32 และ 3.40

$$\begin{aligned}\tilde{c}_1 &= H_7^* r_{R_3,D}(s_3) + (H_7.W) r_{R_3,D}^*(s_4) \\ &= H_7^* (H_7 c_1 + H_7 W c_2 + n_7') + (H_7.W) (-H_7 c_2^* + H_7 W c_1^* + n_7')^* \\ &= c_1 (H_7 H_7^* + H_7 W . H_7^* W^*) + N_7\end{aligned}\quad (3.47)$$

$$\begin{aligned}\tilde{c}_2 &= (H_7.W)^* r_{R_3,D}(s_3) - H_7 r_{R_3,D}^*(s_4) \\ &= (H_7.W)^* (H_7 c_1 + H_7 W c_2 + n_7') - H_7 (H_7 c_2^* + H_7 W c_1^* + n_7')^* \\ &= c_2 (H_7 W . H_7^* W^* + H_7 H_7^*) + N_7'\end{aligned}\quad (3.48)$$

บิตข้อมูลที่ได้รับได้จากการส่งต่อผ่าน โหนดส่งผ่านที่ 4 (R_4) โดยที่บิตข้อมูล \tilde{c}_1 และ \tilde{c}_2 ที่ได้นั้นมาจากการรวมสัญญาณ s_3 กับ s_4 จากสมการที่ 3.34 และ 3.42

$$\begin{aligned}\tilde{c}_1 &= (H_8.Y)^* r_{R_4,D}(s_3) + H_8 r_{R_4,D}^*(s_4) \\ &= (H_8.Y)^* (H_8 Y c_1 + H_8 c_2 + n_8') + H_8 (-H_8 Y c_2^* + H_8 c_1^* + n_8')^* \\ &= c_1 (H_8 Y . H_8^* Y^* + H_8 H_8^*) + N_8\end{aligned}\quad (3.49)$$

$$\begin{aligned}\tilde{c}_2 &= H_8^* r_{R_4,D}(s_3) - (H_8.Y) r_{R_4,D}^*(s_4) \\ &= H_8^* (H_8 Y c_1 + H_8 c_2 + n_8') - (H_8.Y) (-H_8 Y c_2^* + H_8 c_1^* + n_8')^* \\ &= c_2 (H_8 H_8^* + H_8 Y . H_8^* Y^*) + N_8'\end{aligned}\quad (3.50)$$

เมื่อ $N_5, N_5' - N_8, N_8'$ เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการรวมตัวกันเมื่อผ่านแต่ละ โหนดส่งผ่าน (R_i) ซึ่งมีค่าน้อยมากทำให้ไม่เกิดผลกระทบต่อระบบ หรือระบบสามารถขจัดสัญญาณรบกวนดังกล่าวได้นั่นเอง

3.4 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานวิจัยในการจัดทำงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นไปตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

งาน	เดือน										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ศึกษาหลักการของระบบสื่อสารแบบร่วมมือ การเข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti และ Precoding	■	■									
ศึกษาหลักการทำงานของโปรแกรมที่ใช้จำลองระบบ		■	■								
ศึกษาความน่าจะเป็นของช่องสัญญาณและการพิจารณาการเลือกส่งต่อข้อมูล(Path Selection)			■	■							
ออกแบบและพัฒนาระบบที่ทำการนำเสนอ				■	■	■					
สร้างแบบจำลองระบบที่ทำการนำเสนอ					■	■	■				
เปรียบเทียบ วิเคราะห์ผลที่ได้ และสรุป						■	■	■			
รวบรวมข้อมูลที่ได้ทั้งหมดจัดทำวิทยานิพนธ์								■	■	■	

3.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

3.5.1 ศึกษาหลักการของระบบสื่อสารแบบร่วมมือ การเข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti และหลักการของวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษาทฤษฎีวิธีการทำงานของระบบการสื่อสารแบบร่วมมือ และวิธีการเข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti พร้อมทั้งวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า ให้เป็นไปตามรูปแบบที่ทำการนำเสนอ

3.5.2 ศึกษาอุปกรณ์และโปรแกรมที่ใช้ทำการจำลองระบบ

ทำการศึกษาค้นหาและรวบรวมโปรแกรมที่จะทำการจำลองระบบเพื่อที่จะสามารถประยุกต์ใช้ในการจำลองการระบบที่นำเสนอได้อย่างถูกต้อง

3.5.3 ศึกษาความน่าจะเป็นของช่องสัญญาณและการพิจารณาการเลือกส่งผ่านข้อมูล (Path Selection)

ศึกษาทฤษฎีและหลักการของการจางหายของช่องสัญญาณ เพื่อที่จะนำรูปแบบการจางหายของช่องสัญญาณมาประยุกต์ใช้ให้แสดงถึงสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการจำลอง และการพิจารณาการเลือกเส้นทางส่งผ่านข้อมูล

3.5.4 ออกแบบและพัฒนาระบบที่ทำการนำเสนอ

ออกแบบระบบการพิจารณาเลือกเส้นทางส่งผ่านข้อมูล โดยใช้โปรแกรมที่ทำการศึกษาจากข้างต้น พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลในการออกแบบระบบ เพื่อที่จะทำการทดสอบระบบที่นำเสนอในการวัดประสิทธิภาพของระบบ

3.5.5 สร้างจำลองระบบที่นำเสนอ

หลังจากทำการออกแบบระบบและรวบรวมข้อมูลที่จะใช้ในการออกแบบ นำข้อมูลเหล่านั้นมาทำการจำลองระบบเพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบที่ทำการนำเสนอ

3.5.6 เปรียบเทียบ วิเคราะห์ผลที่ได้ และสรุป

เมื่อทำการจำลองระบบที่ทำการนำเสนอเสร็จแล้ว และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของระบบที่ทำการนำเสนอ เพื่อที่จะสรุปผลการจำลองระบบว่าประสิทธิภาพของระบบนั้นเป็นอย่างไร

3.5.7 รวบรวมข้อมูลที่ได้ทั้งหมดจัดทำวิทยานิพนธ์

ทำการรวบรวมข้อมูลของระบบที่ทำการนำเสนอ ที่ได้ทำมาตั้งแต่ต้น เพื่อจัดทำเป็นวิทยานิพนธ์

บทที่ 4

ผลการศึกษา

หลังจากที่ได้กล่าวถึง ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ตลอดจนระบบที่นำเสนอในบทที่ 3 ไปแล้ว ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบโดยใช้โปรแกรมจำลองระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ ที่นำเสนอ โดยในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารที่นำเสนอ ซึ่งเป็นการพัฒนาระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ ซึ่งเป็นการส่งต่อข้อมูลที่มีการมอดูเลตแบบ BPSK โดยใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ร่วมกับวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า(Precoding) ในที่นี้ จะเรียกเทคนิคดังกล่าวว่า Space-Time Block Coding - with Precoding หรือ STBC-PC และใช้โพรโทคอลการส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward (AF) ผ่านช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเรย์ลี (Rayleigh-Fading) พร้อมทั้งการพิจารณาเลือกเส้นทางของโหนดส่งผ่าน (Path Selection) ซึ่งกำหนดให้โหนดต้นทางและโหนดส่งผ่านรู้ถึงข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณ (Channel State Information หรือ CSI) เป็นแบบสมบูรณ์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ ML Decision ถอดรหัสข้อมูลออกมาในส่วนของ โหนดปลายทางกับระบบการสื่อสารแบบร่วมมือที่ผ่านมา

4.1 ข้อกำหนดและตัวแปรที่ใช้ในการจำลองระบบ

ในการจำลองระบบ จะทำการจำลองการส่งบิตข้อมูล BPSK จำนวน 1 ล้านบิต(1 Mbit) โดยการส่ง 1 ล้านบิตในแต่ละรอบ จะทำการแบ่งบิตข้อมูลออกเป็นบล็อกๆละ 10,000 บิต (ค่าความยาวของเฟรมเฉลี่ยที่ส่งออกไปเท่ากับ 1,250 ไบต์ สำหรับการทดสอบช่องสัญญาณก่อนส่งบิตข้อมูล โดย Pilot Signal ในช่วง Pre-Transmission Phase กล่าวคือ ระบบโครงข่ายจะใช้เวลาในการส่ง Pilot Signal ก่อนการส่งบิตข้อมูลจริง) โดยในที่นี้จะทำการเขียน โปรแกรม MATLAB 7.8.0 (R2009a) และทำการจำลองระบบสำหรับวิธี Channel Capacity-Based Path Selection ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ CPU แบบ Intel Core 2 Duo processor (T6500) ความเร็วคล็อก 2.1 GHz และเพื่อให้ระบบที่จะทำการจำลองออกมาใกล้เคียงกับระบบสื่อสารเคลื่อนที่แบบไร้สายที่ใช้งานอยู่จริงมากที่สุด จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลหลายส่วนมาประกอบเป็นตัวแปรที่ใช้ในการพัฒนาและปรับแต่งระบบดังตารางที่ 4.1 สำหรับการ Modulation เป็นแบบ BPSK (Binary Phase Shift Keying) ซึ่งเป็นการส่งข้อมูล 1 บิตต่อหนึ่งคาบเวลา โดยใช้โหนดส่งผ่านในระบบจำนวน 4 โหนด และมีแนวทาง

ในการพิจารณาการใช้งานเปรียบเทียบ เป็นการใช้งานในพื้นที่แหล่งชุมชนเมือง (Urban Area) ซึ่งกำหนดให้ค่า Alpha เท่ากับ 3 โดยค่าอัตราการส่งข้อมูลที่ได้นี้เกิดจากการเทียบบัญญัติไตรยางค์ แต่ทั้งนี้จำนวนบิตที่ส่งใน 1 เฟรมหรือเฟรมที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ อาจจะเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับขนาดความยาวของ 1 เฟรม และอัตราการส่งข้อมูลจริงที่ใช้งานในแต่ละเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายที่ติดตั้งใช้งาน

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์เริ่มต้นที่ใช้ในการทดสอบระบบ

Number of Symbols (bits)	1,000,000
Modulation	BPSK
Number of Relays	4
Symbol Processing	Alamouti's STBC with pre-coding scheme
Path Loss Exponent (Alpha)	3 (Urban Area and No LOS) ¹
Propagation Channel Model	Rayleigh fading + path loss with AWGN

ข้อกำหนดเบื้องต้นในการจำลองระบบ

1. ระยะห่างในการวางตำแหน่งระหว่างรีเลย์แต่ละตัวห่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่ง และถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีค่าอยู่ในสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณแล้ว
2. การส่งผ่านข้อมูลระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดส่งผ่าน และระหว่างโหนดส่งผ่านกับโหนดปลายทางเป็นแบบไม่มีเส้นทางเชื่อมต่อโดยตรง (No direct link)
3. การส่งข้อมูลในแต่ละเส้นทางมีความเป็นอิสระต่อกัน และใช้เวลาในการทำงาน (Processing time) ตลอดจนเวลาแฝง (Latency) ที่แต่ละโหนดน้อยมาก
4. โหนดต้นทางและโหนดส่งผ่านแต่ละตัวในระบบ สามารถรับรู้ข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณ (CSI) ได้อย่างสมบูรณ์ โดยมีการทำงาน รับ-ส่งสัญญาณแบบเต็มรูปแบบ (Full - duplex mode)

¹ E.M. van Eenennaam, 'A Survey of Propagation Models used in Vehicular Ad hoc Network (VANET) Research', University of Twente, June 2008.

5. ช่องสัญญาณในระบบมีการกระจายตัวแบบ Rayleigh และได้รับผลกระทบจากภาวะการจางหายแบบ Flat and Slow Fading โดยถือว่าไม่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect)

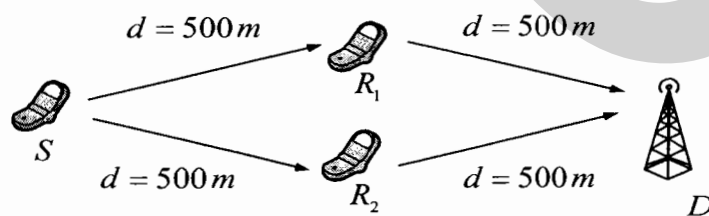
6. ทุกโหนดในระบบส่งสัญญาณด้วยกำลังส่งเฉลี่ยที่เท่ากัน $P \equiv E\{|x_t|^2\}$ และสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณเป็นแบบเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN) ที่มีความหนาแน่นของกำลังส่ง (PSD) เท่ากับ N_0 และ $[N]_{i,j} \cong CN(0,1)$

7. ผู้ใช้งานในระบบที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์หรือโหนดส่งผ่าน ใช้โปรโตคอลการส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward (AF)

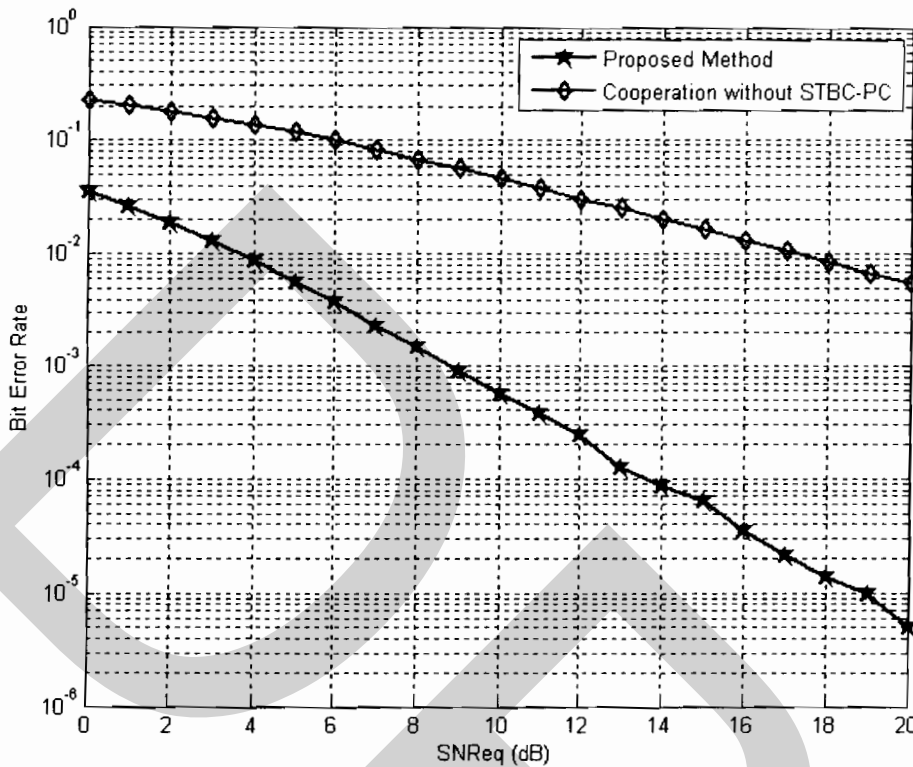
การศึกษาผลของการจำลองระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ จะเป็นผลลัพธ์ของค่าความผิดพลาดของบิต (Bit Error Rate หรือ BER) และอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio หรือ SNR) ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมรรถนะของระบบ รายละเอียดของหัวข้อต่างๆ มีดังนี้

4.2 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ระหว่างวิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) กับ การสื่อสารแบบร่วมมือที่ไม่ใช้ STBC-PC

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงถึงสมรรถนะของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ ที่นำเทคนิคการส่งผ่านข้อมูลมาใช้งานซึ่งเป็นวิธีที่นำเสนอ โคนใช้เทคนิคการส่งแบบ STBC-PC เปรียบเทียบกับระบบที่ทำการส่งโดยไม่ใช้เทคนิคการส่งแบบ STBC-PC โดยรูปแบบจำลองการติดต่อสื่อสารประกอบด้วยโหนดต้นทาง 1 ตัว โหนดส่งผ่าน 2 ตัว และโหนดปลายทาง 1 ตัว ระยะห่างระหว่างโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่าน ($S \rightarrow R_i$) และโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง ($R_i \rightarrow D$) ในแต่ละฮอปมีค่าเท่ากันทั้งหมดคือ 500 เมตร ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบที่นำมาพิจารณามีแบบจำลองโครงข่ายเดียวกัน ตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอใช้การส่งที่ใช้เทคนิคการเข้ารหัส STBC-PC กับวิธีการส่งที่ไม่ใช้การเข้ารหัส STBC-PC



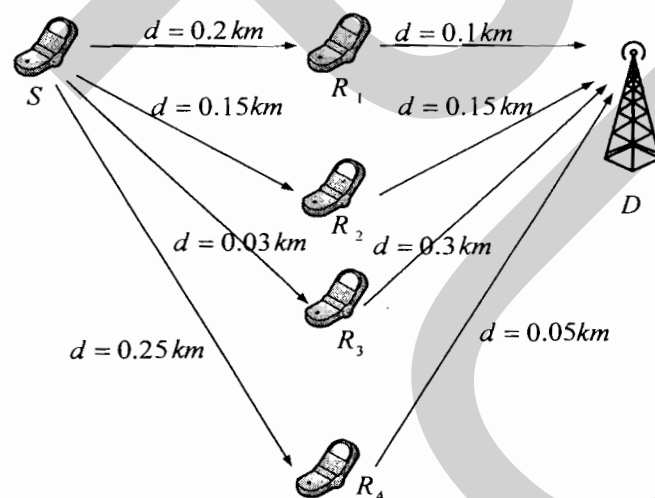
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างการส่งแบบใช้ STBC-PC และไม่ใช่ STBC-PC

จากการวิเคราะห์ผลการจำลองตามรูปที่ 4.1 เพื่อเปรียบเทียบผลของการส่งข้อมูลโดยการนำเทคนิคการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ร่วมกับวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า(Precoding) และการส่งข้อมูลโดยไม่ใช่เทคนิค STBC-PC ซึ่งระบบจะกำหนดให้มีโหนดส่งผ่านแค่ 2 โหนด และระยะห่างแต่ละฮอปเท่ากัน เพื่อให้เห็นผลการเปรียบเทียบอย่างชัดเจน ซึ่งผลการจำลองระบบจะเห็นได้ดังรูปที่ 4.2 พบว่าการส่งข้อมูลโดยวิธีการส่งที่ใช้เทคนิคการเข้ารหัส STBC-PC ที่ระดับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ที่ 4 dB จะมีอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ $1/100$ (10^{-2}) และเมื่อดูเส้นกราฟของการส่งที่ไม่ใช่เทคนิค STBC-PC จะมีอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) มากกว่าคือ $1/10$ (10^{-1}) นอกจากนี้เมื่ออัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ยิ่งมากขึ้นผลของอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) จะมีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด เช่นการส่งตามวิธีที่นำเสนอที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 16 dB จะมีอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ $1/100,000$ (10^{-5}) ซึ่งในวิธีการส่งที่ไม่ได้ไม่ใช้เทคนิค STBC-PC มีอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลถึง $1/100$ (10^{-2}) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอ และการสื่อสารแบบร่วมมือที่ไม่ใช่ STBC-PC แล้ว การส่งข้อมูลจะมีอัตราความผิดพลาดบิต (BER) ต่ำกว่ามาก อีกทั้งยังมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ต่ำกว่าถึง 12 dB ส่งผลให้

ประสิทธิภาพดีกว่าประมาณ 75% หรือประมาณ 15.84 เท่า และยังคงตอบสนองการใช้งานในปัจจุบัน ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้งานในระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ที่มีเสาอากาศเดี่ยว เป็นผลทำให้สามารถใช้งานในการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

4.3 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ระหว่างวิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) ที่มีการเลือกเส้นทาง กับวิธีที่ไม่มีการเลือกเส้นทาง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงถึงสมรรถนะของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ ที่นำเทคนิคการส่งต่อข้อมูลมาใช้งาน โดยการใช้การส่งสัญญาณ แบบ STBC-PC ในระบบที่มีการเลือกเส้นทาง และระบบที่ไม่มีการเลือกเส้นทาง โดยรูปแบบการจำลองจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เป็นโหนดต้นทาง 1 ตัว โหนดส่งผ่าน 4 ตัว และโหนดปลายทาง 1 ตัว โดยระยะห่างระหว่างโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่าน ($S \rightarrow R_i$) และโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง ($R_i \rightarrow D$) ของทั้ง 2 แบบ ที่นำมาเปรียบเทียบนั้นมีระยะห่างเดียวกัน ซึ่งจะส่งผลให้ระยะห่างระหว่างโหนดมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงลักษณะของแบบจำลอง ตามรูปที่ 4.3



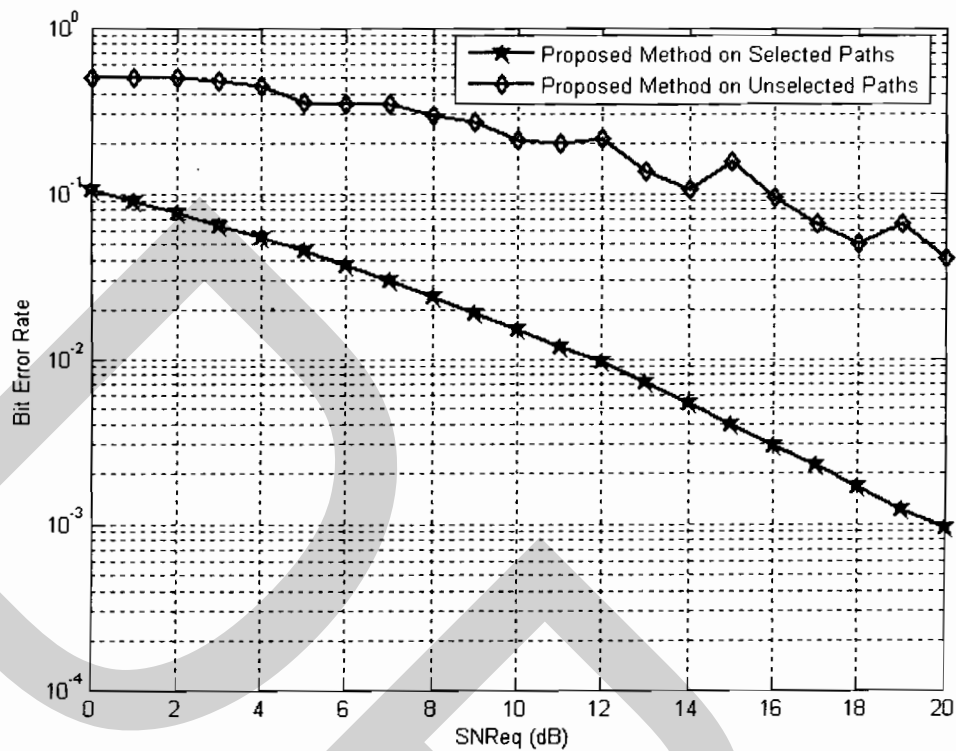
รูปที่ 4.3 รูปแบบที่ใช้การส่งที่ใช้การเข้ารหัส STBC-PC ที่มีการเลือกเส้นทาง กับวิธีที่ไม่มีการเลือกเส้นทาง

จากลักษณะของแบบจำลอง ตามรูปที่ 4.3 เมื่อทำการส่งข้อมูลผ่านระบบที่จะทำการทดสอบและเปรียบเทียบลักษณะการส่งข้อมูลตามวิธีการเลือกเส้นทางที่ดีที่สุด โดยการพิจารณาจากค่าความจุของช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ผลของค่าต่างๆที่ใช้ในการพิจารณาจะเป็นไปตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่า Channel Capacity ในแต่ละฮอปที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ

Relay Path	Channel Capacity		
	Hop 1 ($S \rightarrow R$)	Hop 2 ($R \rightarrow D$)	Best Channel Capacity
Path1 (R_1)	1.1776e-009	1.0800e-012	1.0800e-012
Path2 (R_2)	1.7831e-010	1.2617e-010	1.2617e-010
Path3 (R_3)	4.3082e-014	7.2278e-0016	4.3082e-014
Path4 (R_4)	2.5532e-008	3.3307e-013	3.3307e-013

จากตารางที่ 4.2 เป็นค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ที่ได้จากการทดสอบช่องสัญญาณก่อนส่งบิตข้อมูลโดย Pilot Signal จะถูกส่งผ่าน โหนดส่งผ่าน(Relay) ในแต่ละเส้นทางในระบบ โดยค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ของแต่ละฮอปของแต่ละโหนดส่งผ่านนั้น จะพิจารณาเลือกจากค่าน้อยกว่าจากสูตร $C_{\min}^i = \min(C_{S \rightarrow R_i}, C_{R_i \rightarrow D})$ จากนั้นระบบ จะทำการพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ที่มากที่สุดเปรียบเทียบทั้ง 4 เส้นทาง จากสูตร $R_{sel} = \max\{C_{\min}^1, C_{\min}^2, \dots, C_{\min}^k\}$ โดยทำการเลือก 2 เส้นทางที่ดีที่สุด เพื่อทำการส่งข้อมูลใน 2 เส้นทางนั้นต่อไป โดยผลจากการทดสอบช่องสัญญาณก่อนส่ง ค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ที่ดีที่สุดจะเป็น เส้นทางที่ 2 (Path 2) ที่มีระยะห่างจากโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่าน($S \rightarrow R_1$) และระยะห่างจากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง($R_1 \rightarrow D$) ที่เท่ากันคือ 150 เมตร ในลำดับต่อมาเป็นเส้นทางที่ 1 (Path 1) ที่มีระยะห่างจากโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่าน($S \rightarrow R_1$) เท่ากับ 200 เมตร และระยะห่างจากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง($R_1 \rightarrow D$) เท่ากับ 100 เมตร โดยทั้ง 2 เส้นทางที่เลือกนี้มีค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) คือ 1.2617e-010 และ 1.0800e-012 ตามลำดับ ในการเลือกเส้นทางที่จะช่วยส่งต่อข้อมูลนั้น เป็นไปตามเทคนิคการทำ Precoding STBC แบบ Alamouti โดยจำเป็นต้องใช้เส้นทางในการส่งต่อข้อมูล 2 เส้นทางหรือออร์เลย์ (ตามสมการที่ระบุไว้ในบทที่ 3) และระบบจะทำการเลือกเส้นทางใดนั้น เป็นผลมาจากช่องสัญญาณและค่าการจางหาย (Path loss) ในแต่ละเส้นทาง ซึ่งส่งผลต่อค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ที่โหนดปลายทางรับได้ และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของช่องสัญญาณที่ใช้ส่งตามวิธีที่นำเสนอกับวิธีที่ไม่มีการเลือกช่องสัญญาณก่อนส่งจะเป็นตามรูปที่ 4.4

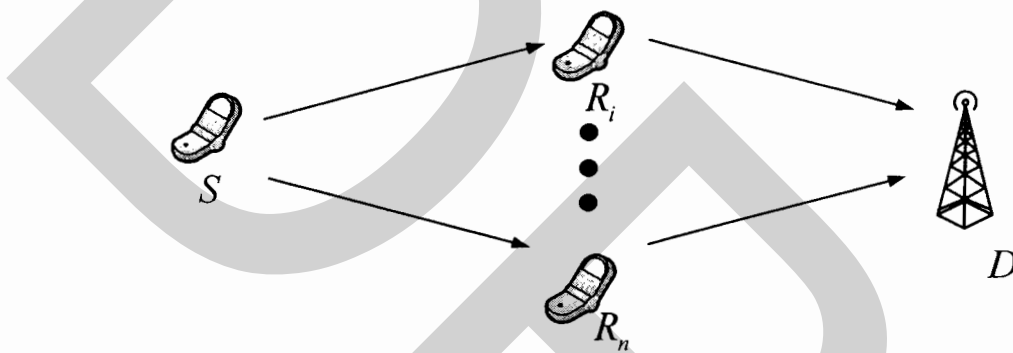


รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างการส่งแบบเลือกเส้นทางและไม่มีทางเลือกเส้นทาง

จากการวิเคราะห์ผลการจำลองที่ได้รับในรูปที่ 4.4 พบว่า การส่งข้อมูลโดยวิธีการส่งที่ใช้เทคนิคการเข้ารหัส STBC-PC ด้วยการเลือกเส้นทางโดยการพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณมีอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ต่ำกว่าวิธีที่ไม่มีทางเลือกเส้นทางก่อนส่งมากอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ $1/10$ (10^{-1}) มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของวิธีที่นำเสนอ จะอยู่ที่ 2 dB และการส่งโดยไม่มีทางเลือกเส้นทางก่อนส่งนั้นจะมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ที่ 14 dB โดยเมื่อเปรียบเทียบแล้วอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ดีกว่าถึง 12 dB ส่งผลให้ประสิทธิภาพดีกว่าประมาณ 75% หรือประมาณ 15.84 เท่า และเมื่อดูเส้นกราฟจากอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ที่น้อยลงนั้นวิธีการที่นำเสนอ จะมีอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มากขึ้นและผลของอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) จะมีค่าต่ำลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบวิธีการส่งโดยไม่มีทางเลือกเส้นทางเส้นกราฟที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ $1/100$ (10^{-2}) ลงไปจะไม่พบอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) จะต้องมีค่าอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มากกว่า 20 dB ซึ่งเป็นผลระดับกำลังงานที่สูงมากในการส่ง ทำให้สิ้นเปลืองกำลังในการส่งเป็นอย่างมาก ในส่วนวิธีการที่นำเสนอใช้กำลังในการส่งต่ำ อีกทั้งยังเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมการให้บริการ แม้จะอยู่ในบริเวณที่เป็นจุดอับสัญญาณก็ตาม

4.4 ผลการจำลองและการวิเคราะห์วิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) เมื่อมีโหนดส่งผ่านจำนวนมากในระบบ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงถึงสมรรถนะของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ ที่นำเทคนิคการส่งผ่านข้อมูลมาใช้งาน โดยการใช้การส่งสัญญาณแบบ STBC-PC แบบมีการเลือกเส้นทางก่อนส่ง ทำการเปรียบเทียบให้เห็นถึงกระบวนการส่งต่อข้อมูลด้วยการพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณในแต่ละโหนดส่งผ่านที่มีในระบบ โดยสมมติให้มีโหนดส่งผ่านอยู่ในเครือข่ายมีค่าเป็น 2,4 และ 8 โหนด ตามลำดับ ซึ่งมีแบบจำลองโครงข่าย ตามรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 รูปแบบที่ใช้การส่งที่ใช้การเข้ารหัส STBC-PC ที่มีการเลือกเส้นทางเมื่อจำลองให้ระบบ มีโหนดส่งผ่านเพิ่มมากขึ้น

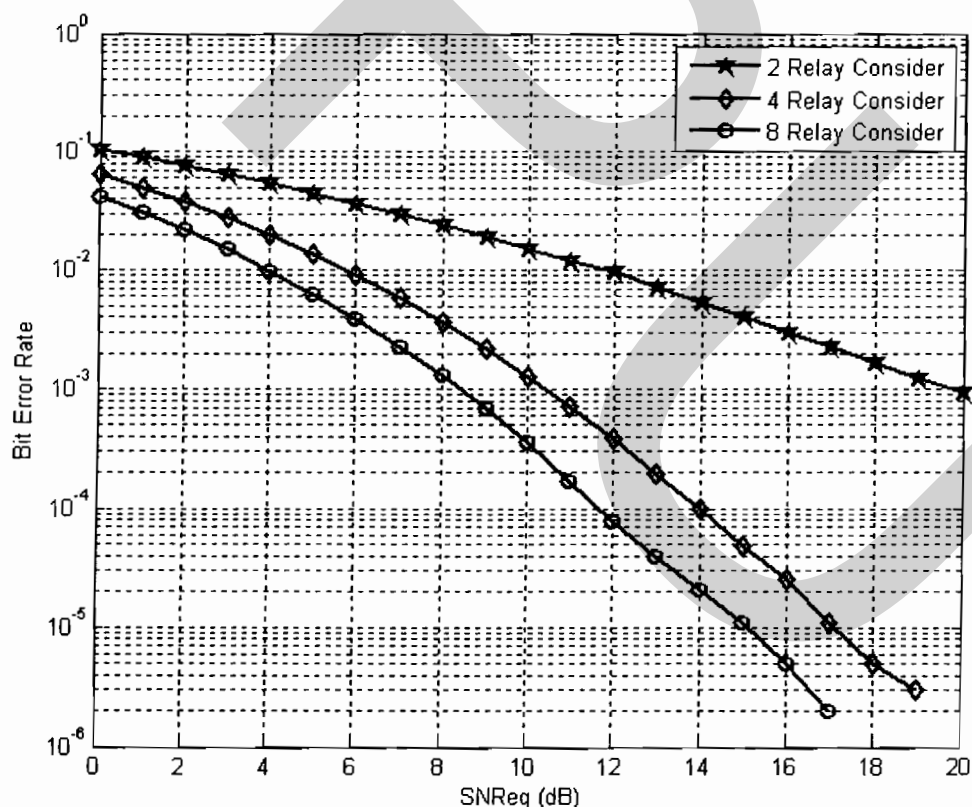
ในแบบจำลองตามรูปที่ 4.5 นี้ จะเป็นการกำหนดให้ระบบมีโหนดส่งผ่านที่จะเลือกใช้ในการส่งต่อข้อมูล มีจำนวน 2, 4 และ 8 โหนด เพื่อที่จะเปรียบเทียบให้เห็นถึงเมื่อโหนดต้นทางต้องการที่จะส่งต่อข้อมูลผ่านผู้ใช้คนอื่นๆ ในระบบ หรือ โหนดส่งผ่าน และระบบมีผู้ใช้งานในเครือข่ายจำกัดมากน้อยต่างกัน ในการเลือกเส้นทางที่จะช่วยส่งต่อข้อมูลด้วยวิธีพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณนั้น ซึ่งระยะห่างระหว่างโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่าน ($S \rightarrow R_i$) และโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง ($R_i \rightarrow D$) ในแต่ละฮอปของแต่ละโหนดส่งผ่านในระบบที่ใช้พิจารณา มีค่าเท่ากันทั้งหมดคือ 500 เมตร และผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลอง ที่เพิ่มจำนวนโหนดส่งผ่านในการพิจารณาเลือกเส้นทางในการส่งต่อข้อมูล จะมีค่าของความจุช่องสัญญาณเป็นไปตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความจุของช่องสัญญาณในการพิจารณาเลือกเส้นทางเมื่อมีโหนดส่งผ่านเพิ่มขึ้น

Number Relay Paths	Channel Capacity		
	Hop 1 ($S \rightarrow R$)	Hop 2 ($R \rightarrow D$)	Best Channel Capacity
2 Relay			
Path1 (R_1)	1.1776e-009	1.0800e-012	1.0800e-012
Path2 (R_2)	1.7831e-010	1.2617e-010	1.2617e-010
4 Relay			
Path1 (R_1)	1.2000e-010	3.9326e-008	1.2000e-010
Path2 (R_2)	2.3965e-010	5.3105e-012	5.3105e-012
Path3 (R_3)	2.6063e-010	7.8415e-011	7.8415e-011
Path4 (R_4)	1.0992e-008	2.0588e-011	2.0588e-011
8 Relay			
Path1 (R_1)	1.8343e-009	1.0807e-011	1.0807e-011
Path2 (R_2)	5.1579e-011	3.8720e-012	3.8720e-012
Path3 (R_3)	1.3933e-010	2.5485e-012	2.5485e-012
Path4 (R_4)	7.0795e-009	4.9960e-016	4.9960e-016
Path5 (R_5)	1.3776e-009	1.2292e-007	1.3776e-009
Path6 (R_6)	2.5323e-010	1.3278e-010	1.3278e-010
Path7 (R_7)	1.3842e-009	6.0319e-008	1.3842e-009
Path8 (R_8)	2.0562e-009	3.4972e-015	3.4972e-015

เมื่อพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ที่ได้จากการคำนวณจากการส่งบิตทดสอบช่องสัญญาณ (Pilot Signal) ก่อนส่งบิตข้อมูล นั้น ในกรณีที่ระบบมีโหนดส่งผ่านเพียงแค่ 2 โหนด โดยมีค่าที่ได้ 1.2617e-010 และ 1.0800e-012 จากเส้นทางที่ 2 และ 1 ตามลำดับ ส่วนในกรณีที่กำหนดให้มีโหนดส่งผ่านในระบบ 4 โหนด หรือ 4 เส้นทางที่จะใช้ทำการพิจารณาส่งต่อข้อมูล โดยเมื่อทำการการส่งบิตทดสอบช่องสัญญาณ (Pilot Signal) และทำการคำนวณค่า

ความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) แล้วพบว่าเส้นทางที่มีค่าความจุของช่องสัญญาณที่ดีที่สุดคือเส้นทางที่ 1 และ 4 โดยมีค่าที่ได้ $1.2000e-010$ และ $7.8415e-011$ ตามลำดับ และกรณีที่กำหนดให้มีโหนดส่งผ่านในระบบ 8 โหนด หรือ 8 เส้นทางที่จะใช้ในการพิจารณาในการส่งต่อข้อมูล เมื่อทำการการส่งบิตทดสอบช่องสัญญาณ (Pilot Signal) และทำการคำนวณค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) แล้วพบว่าเส้นทางที่มีค่าความจุของช่องสัญญาณที่ดีที่สุดคือเส้นทางที่ 7 และ 5 โดยมีค่าที่ได้ใกล้เคียงกันคือ $1.3842e-009$ และ $1.3776e-009$ ตามลำดับ ในการเลือกเส้นทางที่จะช่วยส่งต่อข้อมูลนั้นเป็นไปตามเทคนิคการทำ Precoding STBC แบบ Alamouti โดยจำเป็นต้องใช้เส้นทางในการส่งต่อข้อมูล 2 เส้นทางหรือรีเลย์ (ตามสมการที่ระบุไว้ในบทที่ 3) และระบบจะทำการเลือกเส้นทางใดนั้น เป็นผลมาจากช่องสัญญาณและค่าการจางหาย (Path loss) ในแต่ละเส้นทางซึ่งส่งผลต่อค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ที่โหนดปลายทางรับได้ ซึ่งผลของการเปรียบเทียบเมื่อระบบมีโหนดส่งผ่านหรือรีเลย์ให้พิจารณาใช้งานในจำนวนที่แตกต่างกัน เป็นไปตามรูปที่ 4.6



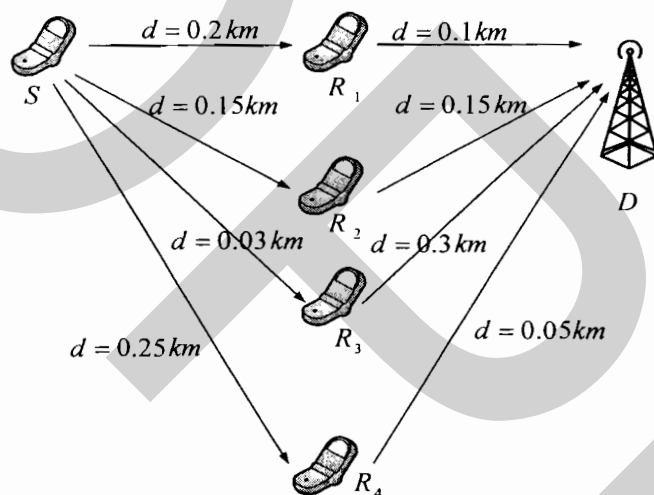
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง วิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) แบบมีการเลือกเส้นทาง เมื่อจำลองให้ระบบ มีโหนดส่งผ่านเพิ่มมากขึ้น

จากการวิเคราะห์ผลการจำลองที่ได้รับในรูปที่ 4.6 พบว่า การส่งข้อมูลด้วยวิธีที่นำเสนอ เมื่อระบบผู้ใช้อื่นๆ หรือ โหนดส่งผ่านให้พิจารณาใช้งานในจำนวนที่แตกต่างกันคือ 2, 4 และ 8 โหนด ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ $1/100$ (10^{-2}) อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) อยู่ที่ 12,6 และ 4 dB ตามลำดับ และเมื่อดูเส้นกราฟจำนวนของโหนดส่งผ่านที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มากขึ้นและผลของอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) จะมีค่าต่ำลง เช่นเมื่อสังเกตเส้นกราฟที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ $1/10000$ (10^{-4}) ของระบบที่มีโหนดส่งผ่านจำนวน 4 และ 8 โหนด อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) อยู่ที่ 14 และ 12 dB ตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของระบบที่มีโหนดส่งผ่านให้ใช้งานแค่ 2 โหนด จะมีค่ามากกว่า 20 dB ซึ่งเท่ากับว่าต้องใช้กำลังงานในการส่งมากขึ้นนั่นเอง โดยเมื่อพิจารณาแล้วการที่มีจำนวนโหนดส่งผ่านเพิ่มขึ้นในระบบจะทำให้สามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ต่ำลง โดยที่มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ดีขึ้นประมาณ 2 - 10 dB ประสิทธิภาพดีขึ้นประมาณ 66% หรือประมาณ 8.91 เท่า

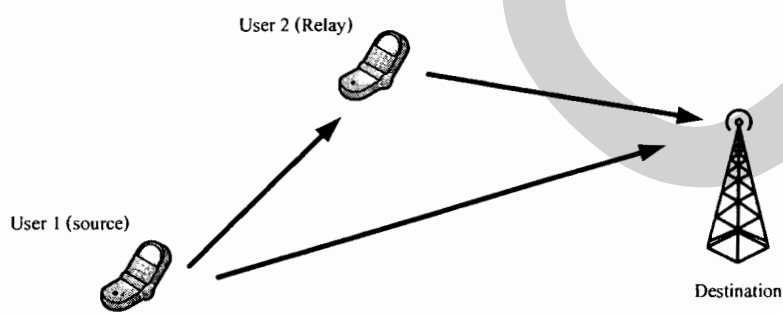
ในการส่งต่อข้อมูลด้วยวิธีที่นำเสนอ การพิจารณาเส้นทางก่อนส่งโดยการพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณของแต่ละเส้นทาง เมื่อในเครือข่ายมีผู้ใช้งานอื่นๆ หรือ โหนดส่งผ่านให้เลือกใช้งานเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้สามารถพิจารณาใช้งานเส้นทางที่ดีที่สุด ในการส่งต่อข้อมูลได้ดียิ่งขึ้น เป็นการเพิ่มอัตราขยายเนื่องจากความหลากหลายของสัญญาณ (Diversity Gain) ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์จากสัญญาณ ที่สะท้อนมาในทิศทางที่ต่าง ๆ กัน ทำให้ระบบมีโอกาสรับสัญญาณได้มากขึ้น และหากนำสัญญาณเหล่านั้นมาวิเคราะห์รวมกันจะทำให้ได้สัญญาณที่แรงหรือมีคุณภาพดีขึ้น และการนำเทคนิคการทำ Precoding STBC แบบ Alamouti โดยใช้เส้นทางในการส่งต่อข้อมูล 2 เส้นทางหรือรีเลย์ นั้นเป็นการลดปริมาณการใช้งานโหนดส่งผ่าน เพื่อให้โหนดอื่นๆ สามารถรองรับการใช้งานส่งต่อข้อมูลได้

4.5 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ระหว่างวิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) ที่มีการเลือกเส้นทาง และวิธีการส่งข้อมูลของ Ho-Jung An

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ ที่นำเทคนิคการส่งต่อข้อมูลมาใช้งาน โดยการใช้การส่งสัญญาณแบบ STBC-PC แบบมีการเลือกเส้นทางเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารไร้สายที่มีการส่งข้อมูลของ Ho-Jung An *et.al*² ซึ่งประกอบไปด้วย โหนดต้นทาง, โหนดส่งผ่าน และโหนดปลายทาง อย่างละ 1 โหนด และยังคงมีเชื่อมต่อสัญญาณที่มาจากวิถีตรง (Line Of Sight หรือ LOS) โดยสุ่มระยะห่างแต่ละโหนด ซึ่งมีแบบจำลองโครงข่ายตามรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



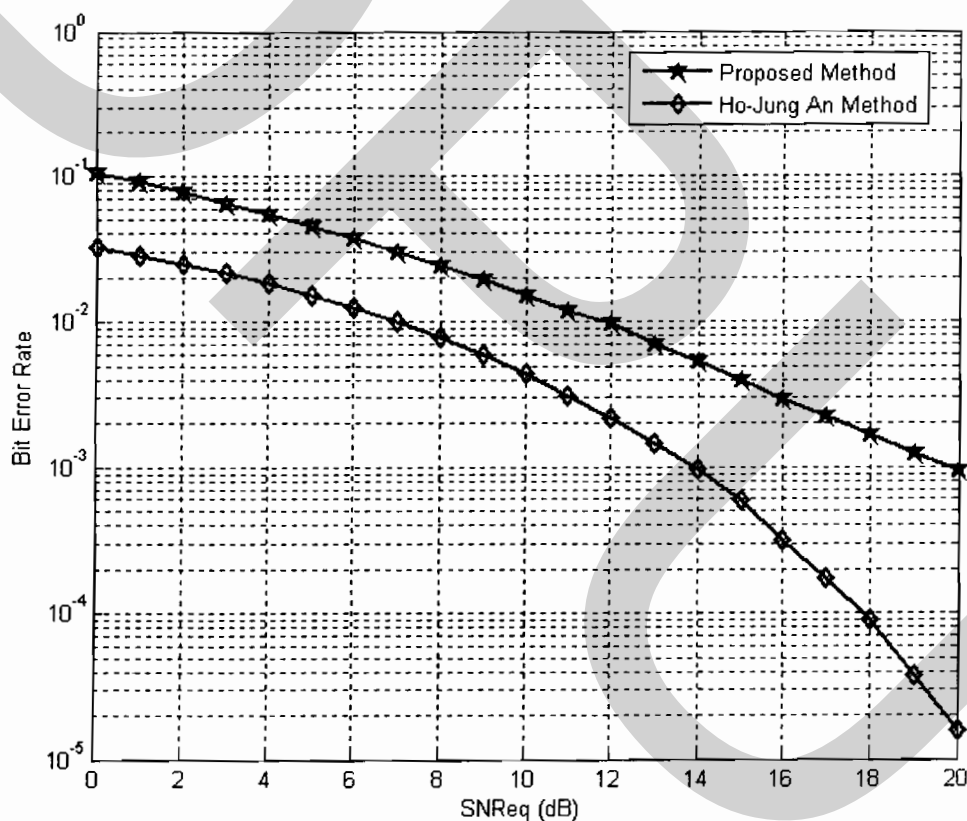
รูปที่ 4.7 รูปแบบที่ใช้ในการส่งแบบวิธีที่นำเสนอ



รูปที่ 4.8 รูปแบบที่ใช้ในการส่งแบบวิธีของ Ho-Jung An

² Ho-Jung An, Jee-Hoon Kim, and Hyoung-Kyu Song, "แหล่งเดิม"

โดยรูปแบบการส่งแบบวิธีที่นำเสนอจะมีระยะห่างแต่ละฮอปเป็นไปตามรูปที่ 4.8 และการเลือกเส้นทางและการคำนวณหาค่าความจุของช่องสัญญาณผลที่ได้เป็นไปตามตามรางที่ 4.2 สรุปรายละเอียดได้ดังนี้ ในกระบวนการเลือกเส้นทางก่อนส่งโดยการส่งบิตทดสอบช่องสัญญาณ (Pilot Signal) และทำการคำนวณค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ระบบเลือกใช้เส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 1 ช่วยในการส่งต่อข้อมูล โดยมีค่าความจุของช่องสัญญาณ $1.2617e-010$ และ $1.0800e-012$ ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองการส่งในวิธีของ Ho-Jung An ผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เป็นไปตามรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง วิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) กับวิธีการส่งข้อมูลของ Ho-Jung An

จากการวิเคราะห์ผลการจำลองในรูปที่ 4.9 พบว่า การส่งข้อมูลตามแบบวิธีที่นำเสนอ โดยการใช้การเข้ารหัส STBC-PC แบบมีการเลือกเส้นทางนั้น ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล

(BER) เท่ากับ $1/100$ (10^{-2}) อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) 12 dB สำหรับวิธีการส่งข้อมูลตามแบบจำลองของ Ho-Jung An จะให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ต่ำกว่า คือ ประมาณ 7 dB เป็นผลให้มีประสิทธิภาพต่ำกว่าประมาณ 40% หรือประมาณ 3.16 เท่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบตลอดเส้นกราฟพบว่าวิธีการส่งข้อมูลตามแบบจำลองของ Ho-Jung An ที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากัน จะมีอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ต่ำกว่า การส่งข้อมูลด้วยวิธีที่นำเสนอ ทั้งนี้เพราะตามแบบจำลองของ Ho-Jung An นั้น ยังสามารถเชื่อมต่อสัญญาณและส่งข้อมูลได้จากวิถีตรง (LOS) ซึ่งในแบบจำลองที่นำเสนอนั้นไม่สามารถทำได้ และอาจจะส่งผลให้มีอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ที่ต่ำกว่า แต่ทั้งนี้ในแบบจำลองที่นำเสนอนั้น มีการเลือกเส้นทางด้วยการพิจารณาช่องสัญญาณก่อนส่งข้อมูล และนำเทคนิคการทำ Precoding STBC แบบ Alamouti โดยใช้เส้นทางในการส่งต่อข้อมูล 2 เส้นทางหรือรีเลย์ ทำให้เกิดไดเวอร์ซิตีทางสเปซ (Space Diversity) ลดการจางหายของสัญญาณอันเกิดจาก Multipath และแก้ปัญหาเมื่อผู้ใช้งานอยู่นอกเขตพื้นที่การให้บริการ อีกทั้งยังสอดคล้องกับการใช้งานระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ในปัจจุบัน ในสถานะแวดล้อมที่เป็นชุมชนเมือง และอาคารสูงจำนวนมาก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการศึกษาและวิจัย

ระบบการสื่อสารไร้สาย ในปัจจุบันเป็นระบบสื่อสารข้อมูลที่มีความต้องการใช้เพิ่มมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของความต้องการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ และรูปแบบของการใช้บริการมัลติมีเดียแบบเคลื่อนที่ (Mobile Multimedia) ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการเพื่อให้ระบบการสื่อสารไร้สายมีความสามารถรองรับกับความต้องการรับส่งข้อมูลที่มีอัตราเพิ่มสูงขึ้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการพัฒนาระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือโดยใช้อุปกรณ์ที่มีเสาอากาศเพียงต้นเดียว โดยนำเสนอแบบจำลองแบบ 2 ฮอปและมีโหนดส่งผ่านในระบบจำนวน 4 ตัว ด้วยการส่งต่อข้อมูลที่มีการมอดูเลตแบบ BPSK โดยใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ร่วมกับวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) และโพรโทคอลการส่งผ่านสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward (AF) ผ่านช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเรย์ลี พร้อมทั้งนำเสนอวิธีการการพิจารณาเลือกเส้นทางของโหนดส่งผ่าน (Path Selection) โดยพิจารณาจากเส้นทางที่มีความจุช่องสัญญาณมากที่สุด ซึ่งจากผลการศึกษาในแต่ละกรณี แสดงอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ในขณะนั้น ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบการส่งข้อมูลแบบเข้ารหัสวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้าก่อนการส่ง และพิจารณาเลือกเส้นทางของโหนดส่งผ่าน จำนวน 2 โหนด เป็นเส้นทางในการส่งต่อข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง โดยกำหนดระยะห่างจากโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่าน และระยะห่างจากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทางเป็นค่าพารามิเตอร์แบบคงที่ในการจำลองระบบ

จากการทำวิจัยในครั้งนี้ พบว่า เมื่อนำระบบที่นำเสนอมาใช้งาน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับ/ส่งสัญญาณ รวมถึงสามารถปรับปรุงสมรรถนะอัตราผิดพลาดของบิตข้อมูลให้ลดต่ำลงได้ ซึ่งจากการศึกษาวิจัยได้พบว่า การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti เป็นรหัสที่ได้ออกแบบมา โดยใช้หลักการเทคนิคโคเดอร์ซีดีเชิงปริภูมิ ร่วมกับเทคนิคโคเดอร์ซีดีเชิงเวลา ซึ่งรหัสดังกล่าวนี้ มีคุณลักษณะเฉพาะตัวที่น่าสนใจ คือ การถอดรหัสเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยมีกระบวนการทางภาครับที่ไม่ซับซ้อน มีรูปแบบที่ง่าย อีกทั้งการนำวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) มาใช้งานร่วมกับการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ส่งผลให้ระบบสามารถทำการส่งข้อมูลได้แม้อุปกรณ์ที่ใช้งานมีเสาอากาศเดียวซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้อยู่ทั่วไป และจากการปรับปรุงโดยใช้วิธี STBC-PC ดังกล่าว จะมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR)

ดีกว่าถึง 12 dB ส่งผลให้ประสิทธิภาพดีกว่าประมาณ 75% หรือประมาณ 15.84 เท่า ที่อัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ $1/100$ (10^{-2}) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการใช้วิธี STBC-PC อีกทั้งกระบวนการเลือกเส้นทางก่อนส่งด้วยการพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ที่นำเสนอ นั้นมีผลทำให้อัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ต่ำกว่าการส่งที่ไม่มี การเลือกเส้นทางก่อนส่ง และมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ดีกว่าถึง 12 dB ส่งผลให้ประสิทธิภาพดีกว่าประมาณ 75% หรือประมาณ 15.84 เท่า ที่อัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ $1/10$ (10^{-1}) และเมื่อมีจำนวนโหนดส่งผ่านหรือผู้ใช้งานอื่นๆ ในเครือข่ายเพิ่มขึ้น สามารถเลือกใช้งานโหนดส่งผ่านได้หลากหลายยิ่งขึ้น ยิ่งจะทำให้ผลของอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ต่ำลง และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ดีขึ้นประมาณ 2 – 10 dB ประสิทธิภาพดีขึ้น ประมาณ 66% หรือประมาณ 8.91 เท่า ซึ่งจากคุณสมบัติเฉพาะของการส่งข้อมูล โดยการใช้วิธี STBC-PC นี้ สามารถส่งข้อมูลโดยใช้โหนดส่งผ่านแค่ 2 โหนด ในการทำการส่งข้อมูลได้อย่างสมบูรณ์ จากความร่วมมือกันในระบบจะพบว่าความสามารถของโหนดส่งผ่าน หรือ รีเลย์ จะมีผลอย่างมากต่อสมรรถนะโดยรวมของระบบ ด้านการใช้งานร่วมกับระบบการสื่อสารแบบร่วมมือ ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มสมรรถนะโดยรวมของระบบที่นำเสนอให้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากตัวระบบการสื่อสารแบบร่วมมือ จะได้ประโยชน์จากโคเวอรัจซีดีที่เสมือนที่เกิดขึ้น จากการส่งต่อสัญญาณในระบบ ซึ่งหากมีจำนวนของโหนดส่งผ่านเพิ่มขึ้น หรือโหนดส่งผ่านนั้นมีความสามารถที่ดีพอ สมรรถนะโดยรวมของระบบที่นำเสนอก็จะดีมากขึ้น คือ จะได้อัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ที่ลดต่ำลง และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ที่สูงขึ้น พร้อมกับพื้นที่ที่ครอบคลุมในการให้บริการที่เพิ่มขึ้น แก้ปัญหาผลกระทบจากของสัญญาณอันเกิดจาก Multipath เหมาะสมกับการใช้งานระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ในปัจจุบัน ที่มีสถานะแวดล้อมที่เป็นชุมชนเมือง และอาคารสูงจำนวนมาก

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนางานวิจัย

หลังจากที่ได้ทำการทดลองและเก็บผลการทดสอบให้ครบตามวัตถุประสงค์ และขอบเขตของการทำวิจัยในครั้งนี้แล้ว พบว่า ในระบบการสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่นั้น มีปัจจัยที่ต้องพิจารณาและมีผลกระทบต่อระบบมากมาย เพื่อระบบมีเสถียรภาพในการใช้งานสูง มีอัตราการรับ - ส่งข้อมูลที่สูงขึ้น การลดอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่ทำกรส่งจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับในงานวิจัยในอนาคตผู้วิจัยต้องการที่จะศึกษาระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือให้มากขึ้น เป็นแบบ Multihop โดยปรับปรุงอัลกอริทึมของการปรับตัวในการส่ง เพื่อเพิ่มสมรรถนะโดยรวมของระบบให้ดียิ่งขึ้น ควรมีการนำผลการทดลองที่เกิดขึ้น ไปเปรียบเทียบกับวิธีการที่มีการประมาณ

ค่าของช่องสัญญาณ (Channel Estimation) ที่แท้จริง โดยหาความแตกต่างที่เกิดขึ้น เพื่อการปรับปรุงระบบให้มีสมรรถนะดียิ่งขึ้น เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในปัจจุบัน และจากการวิเคราะห์ปัญหาของช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สายนั้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่ได้รับผลกระทบจากแวลลุ่มมีความไม่แน่นอนสูง อีกทั้งความซับซ้อนของระบบและอุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งการพัฒนาแบบที่มีผู้ร่วมใช้งานในเครือข่ายมากมาย ควรคำนึงถึงปัญหาการจัดสรรโหนดส่งผ่านเพื่อรองรับการใช้งานของผู้ใช้งานคนอื่นๆ รวมทั้งปัญหาการรบกวนกันระหว่างผู้ร่วมใช้งานในระบบ ก็เป็นอีกความท้าทายสำหรับนักวิจัยใหม่ที่จะต้องพัฒนาต่อเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในระบบ ที่จะรองรับความต้องการการส่งข้อมูลความเร็วสูงในอนาคต

5.3 องค์ความรู้ที่ได้รับจากการทำวิจัย

- 5.3.1 ระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ และข้อกำหนดในการสื่อสารไร้สาย
- 5.3.2 วิธีการเข้ารหัสก่อนส่งหน้าเชิงปริภูมิ-เวลา (STBC-PC)
- 5.3.3 คุณสมบัติของช่องสัญญาณและพารามิเตอร์ที่มีผลต่อช่องสัญญาณ
- 5.3.4 ขั้นตอนวิธีการเลือกโหนดส่งผ่านด้วยการพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity)
- 5.3.5 การพิจารณาประสิทธิภาพของระบบจากอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(SNR)

กรม
พัฒนา
การค้า

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

วิทยานิพนธ์

- ชาญวิทย์ ไชบัว. (2550). การเพิ่มประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูล ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ โดยใช้การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- กำพล วรดิษฐ์. (2552). พฤติกรรมสัญญาณขาดหายของแผนการสัญญาณซ้ำแบบร่วมมือพร้อมด้วยการเลือกกรีเดย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาต่างประเทศ

BOOK

- Mischan Dohler and YonghuimLi (2010). *Cooperative Communication .Hardware, Channel&PHY*. A John Wiley and Son,Ltd.Publication

ARTICLES

- Bletsas A., Hyundong Shin, and M. Z. Win,(september 2007) "Cooperative Communications with opportunistic Outage-Optimal relaying scheme." *IEEE Transactions on Wireless Communications.*,Vol. 6, No. 9,(pp.3450 - 3460).
- C. Douillard, M. Jezequel, C. Berrou, A. Picart, P.Didier, and A. Glavieux. (1995). "Iterative correction of intersymbol interference: Turbo-equalization." *European Transactions on Telecommunications.* ,Vol. 6 (pp.507-511).
- E. Kudoh and F. Adachi, (2005) "Power and Frequency Efficient Wireless Multihop Virtual

Cellular Concept," *IEICE Trans. Comm., Vol. E88-B, No. 4*, (pp.1613 – 1621).

E.M. van Eenennaam, 'A Survey of Propagation Models used in Vehicular Ad hoc Network (VANET) Research', University of Twente, June 2008.

F. M. Najmeh and K. Hossein,(December 2008) " Outage Probability of Relay Selection Methods for IEEE802.16j." *ICECE'08*. (pp.484 - 487).

Ho-Jung An, Jee-Hoon Kim, and Hyoung-Kyu Song,(September2007)"Cooperative Transmission Scheme to Increase Gain by STBC." *Engineering Letters, Vol. 15, No. 1* (pp.135 - 139).

J. N. Laneman, D.C. Tse, G.W. Wornell. (September 2005) "Cooperative Diversity in Wireless Networks. Efficient Protocols and Outage Behavior." *IEEE Signal Processing Letters, Vol. 12, No.9*, (pp.597-600).

Kampol Woradit, W. Suwansantisuk, and et. Al. (2009, August). "Outage Behavior of Selective Relaying Schemes" *IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 8, NO.8*, (pp.3890-3895).

Zinan Lin and E. Erkip,(2005) "Relay Search Algorithms for Coded Cooperative Systems," *GLOBECOM'05 Vol. 3*, (pp.6 – 10).

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

เรือตรี ไพฑูรย์ พูลสวัสดิ์

วัน เดือน ปีเกิด

24 พฤษภาคม 2524

ประวัติการศึกษา

สำเร็จการศึกษาหลักสูตร นักเรียนจำทหารเรือ

เหล่า อีเล็คทรอนิกส์ รุ่นที่ 43

ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยี

อีเล็คทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

นายทหารสื่อสาร แผนกอำนาจการสื่อสารและสารสนเทศ

กองการสื่อสาร สำนักแผนและอำนาจการสื่อสาร

กรมการสื่อสารทหาร กองบัญชาการกองทัพไทย

ทุนการศึกษา

ทุนข้าราชการ เจ้าหน้าที่ของรัฐ พนักงานรัฐวิสาหกิจ

และวิสาหกิจเอกชน ปีการศึกษา 2551