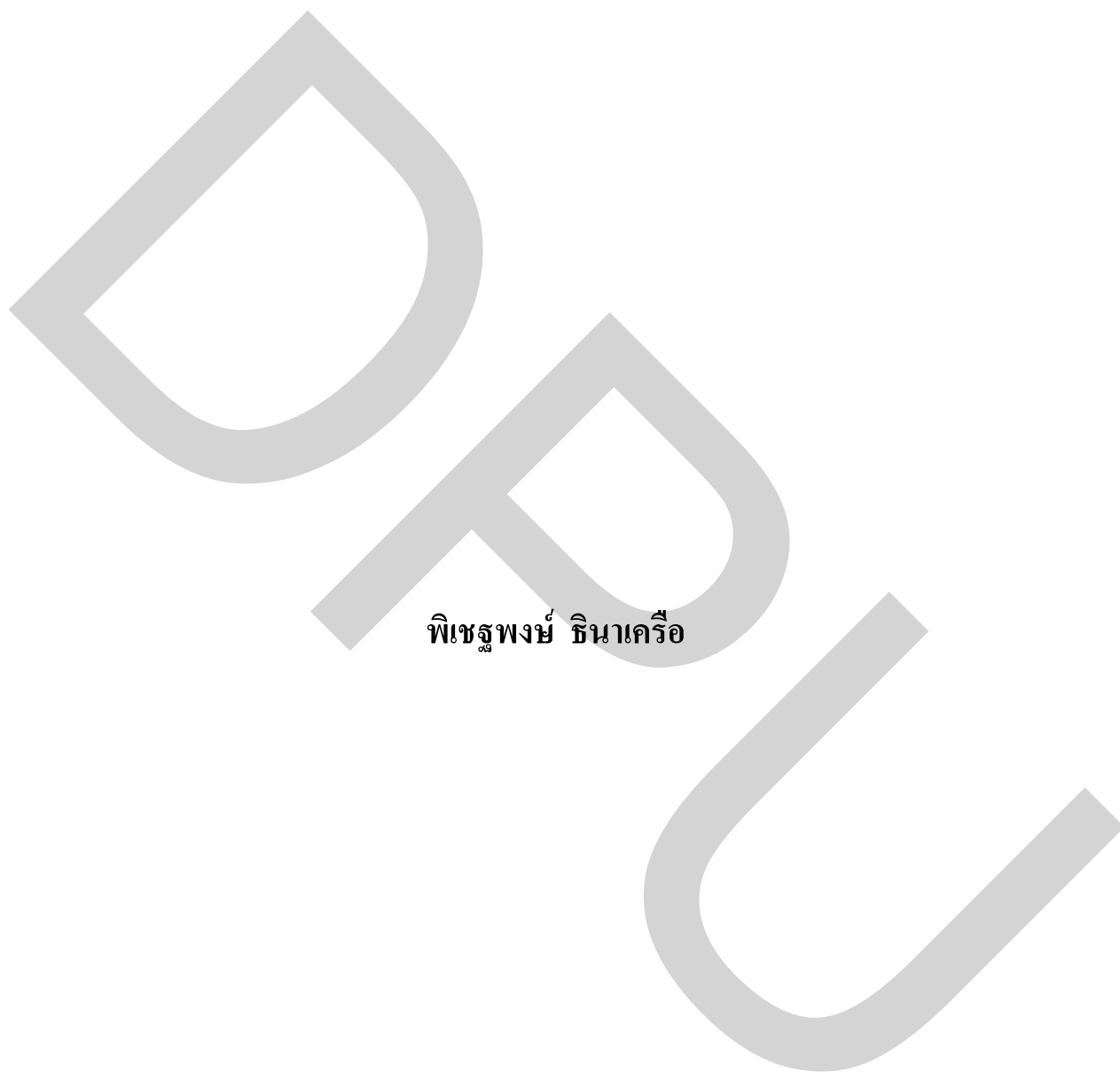


การเลือกเส้นทางบนพื้นฐานของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน
ในระบบความร่วมมือเครือข่ายไร้สายเคลื่อนที่แบบสองฮอป



พิเชษฐพงษ์ ชินาเครือ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

พ.ศ. 2555

Path SNRs-Based Relaying in Dual-Hop Cooperative Mobile Network



**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**

2012

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเลือกเส้นทางบนพื้นฐานของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในระบบความร่วมมือเครือข่ายไร้สายเคลื่อนที่แบบสองฮอป
ชื่อผู้เขียน	พิเชษฐพงษ์ ชินาเครือ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ปยุตย์วีร์ จามจรีกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

การนำระบบความร่วมมือมาใช้ในการสื่อสารแบบไร้สายทำให้มีความหลากหลายเชิงพื้นที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ทำให้การสื่อสารแบบเสอากาศเดี่ยวสามารถส่งสัญญาณในอัตราที่สูงได้ ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการเลือกกรีเลย์ในระบบความร่วมมือเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบสองฮอปโดยเลือกเส้นทางจากค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ผลการจำลองระบบได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการเลือกเส้นทางด้วยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกันกับวิธีการเลือกเส้นทางด้วยค่าความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity) เมื่อดูจากอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล และเมื่อวิเคราะห์ในเชิงเวลาแล้วพบว่าวิธีการเลือกเส้นทางด้วยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) จะใช้การส่งข้อมูลที่เร็วกว่าวิธีการเลือกเส้นทางด้วยค่าความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity) อยู่ประมาณ 1.7254 วินาที หรือเร็วกว่าโดยเฉลี่ย 33.23% และพิจารณาในเชิงอัตราการส่งข้อมูลพบว่าเร็วกว่าโดยเฉลี่ย 95.8 kbps หรือประมาณ 49.77% สำหรับสถานะแวดล้อมเป็นชุมชนเมือง (Urban Area) ซึ่งมีค่า Alpha เท่ากับ 3 และพบว่าวิธีการเลือกเส้นทางด้วยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ทำให้การส่งข้อมูลเร็วกว่าวิธีการเลือกเส้นทางด้วยค่าความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity) อยู่ประมาณ 1.7026 วินาที หรือเร็วกว่าโดยเฉลี่ย 31.63% และพิจารณาในเชิงอัตราการส่งข้อมูลพบว่าเร็วกว่าโดยเฉลี่ย 85.9 kbps หรือประมาณ 46.26% สำหรับสถานะแวดล้อมที่ไม่ปรากฏเส้นสายตา (No LOS) ซึ่งมีค่า Alpha เท่ากับ 5

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาค่าความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ (Imperfect CSI) โดยสังเกตผลประสิทธิภาพของระบบในรูปอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เมื่อเปลี่ยนค่าตัวประกอบความไม่สมบูรณ์ (Imperfect Factor) เป็นค่าต่างๆ พบว่าหากเพิ่มความไม่สมบูรณ์ในช่องสัญญาณมากขึ้นเท่าไรจะยิ่งทำให้มีอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลมากขึ้น

Thesis Title Path SNRs-Based Relaying in Dual-Hop Cooperative Mobile Network
Author Pichedpong Tinakrua
Thesis Advisor Assoc. Prof. Punyawit Jamjareekul
Department Computer and Telecommunication Engineering
Academic Year 2012

ABSTRACT

Since cooperative systems provided spatial diversity in wireless communications, especially for mobile networks, which enable a single-antenna communication to achieve higher data rate. In this study, the method to select relaying hop in cooperative mobile network based on path signal-to-noise ratios (SNRs) is proposed. The simulation results have been shown from the simulation results the proposed method can perform close to the channel capacity-based path selection method in term of bit error rate. The analysis shown that the proposed method can sent data faster than the channel capacity-based path selection method about 1.7254 sec or 33.23%, so data transfer rate is faster about 95.8 kbps or about 49.77% when urban area environment, path loss exponent (α) of 3, is considered. In addition, the proposed method can sent data faster than the channel capacity-based path selection method about 1.7026 sec or 31.63%, so data transfer rate is faster about 85.9 kbps or about 49.77% when urban area environment, path loss exponent (α) of 5, is considered

Imperfection of the channel state information (Imperfect CSI) to the channel was also studied and bit error rate is compared. Finally, the more imperfect factor, the more bit error rate is happened.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเอาใจใส่และดูแลเป็นอย่างมากจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์บุญยวีร์ จามจรีกุล ซึ่งท่านคอยให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ นอกจากนี้ กระผมใคร่ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ชัยพร เขมะภักตะพันธ์ ผู้อำนวยการหลักสูตรฯ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และเอาใจใส่นักศึกษาทุกๆ คนเสมอมา

ขอขอบคุณ อ.ดร.ประศาสน์ จันทราทิพย์ และ อ.ดร.พีรเดช ฌ น่าน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ช่วยดำเนินเรื่องต่างๆ ให้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ร่วมรุ่น และรุ่นพี่ ทุกๆ คน ที่คอยช่วยเหลือกันมาตลอด

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ตลอดจนบุคคลในครอบครัวของผู้วิจัย ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยในทุกๆ ด้าน ตลอดระยะเวลาการศึกษาจบจนสำเร็จการศึกษา

พิเชฐพงษ์ ชินาเครือ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	๗
กิตติกรรมประกาศ.....	๗
สารบัญตาราง.....	๗
สารบัญรูป.....	๗
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	4
1.6 เครื่องมือที่ใช้.....	5
1.7 แผนการดำเนินงาน.....	6
2. แนวคิด ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย.....	7
2.2 ความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity).....	8
2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สาย แบบหลายทางเข้า หลายทางออก.....	9
2.4 ความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ.....	12
2.5 การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา.....	18
2.6 เทคนิคการรวมสัญญาณ.....	22
2.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ.....	26
3. ระเบียบวิธีวิจัย.....	30
3.1 การออกแบบของระบบที่นำเสนอ.....	30
3.2 ขั้นตอนการส่งสัญญาณระหว่างโหนดใด ๆ ในระบบเครือข่ายเคลื่อนที่.....	31
3.3 หลักการพิจารณาเลือกเส้นทางด้วยค่า SNR.....	34

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.4 การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบบล็อก (Space-Time Block Coding: STBC).....	35
3.5 การพิจารณาความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ.....	38
3.6 ขั้นตอนวิธีการทำงานของโปรแกรมจำลองการเลือกเส้นทาง (Path Selection).....	39
4. ผลการศึกษา.....	42
4.1 ข้อกำหนดและตัวแปรที่ใช้ในการจำลองระบบ.....	42
4.2 การวิเคราะห์ผลของระบบที่นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเลือกเส้นทาง โดยความจุของช่องสัญญาณ เมื่อค่า Alpha = 3	44
4.3 การวิเคราะห์ผลของระบบที่นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเลือกเส้นทาง โดยความจุของช่องสัญญาณ เมื่อค่า Alpha = 5	47
4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ เมื่อค่า Alpha = 3 และ Alpha = 5	50
4.5 การวิเคราะห์ผลของระบบที่นำเสนอเมื่อเกิดความไม่สมบูรณ์ของ ช่องสัญญาณที่ค่าต่างๆ	52
5. สรุปผลการศึกษา.....	57
5.1 สรุปผลการศึกษาตามขอบเขตงานวิจัย.....	57
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	58
5.3 องค์ความรู้ที่ได้รับจากการทำวิจัย.....	59
บรรณานุกรม.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	64

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	6
4.1 พารามิเตอร์เริ่มต้นที่ใช้ในการทดสอบระบบ.....	43
4.2 ระยะห่างระหว่าง Relay ที่ตั้งค่าและค่า SNR ที่ได้จากการจำลองระบบ.....	44
4.3 เวลาเฉลี่ยในการส่งบิตข้อมูลจำนวนหนึ่งล้านบิตในแต่ละวิธีที่ได้จากการจำลองระบบ.....	44
4.4 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบในการเลือกเส้นทางแต่ละวิธี.....	45
4.5 ระยะห่างระหว่าง Relay ที่ตั้งค่าและค่า SNR ที่ได้จากการจำลองระบบ.....	47
4.6 เวลาเฉลี่ยในการส่งบิตข้อมูลจำนวนหนึ่งล้านบิตในแต่ละวิธีที่ได้จากการจำลองระบบ.....	47
4.7 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบในการเลือกเส้นทางแต่ละวิธี.....	48
4.8 เปรียบเทียบค่า SNR ที่ได้จากการจำลองระบบที่ระดับ BER = 10^{-3}	50
4.9 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองระบบที่ได้รับผลจากความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณเมื่อค่า Alpha = 3.....	52
4.10 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองระบบที่ได้รับผลจากความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณเมื่อค่า Alpha = 5.....	54
4.11 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองระบบที่ได้รับผลจากความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณเมื่อค่า Alpha = 3 และ Alpha = 5.....	56

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย.....	7
2.2 การรับส่งข้อมูลแบบสายอากาศเดี่ยว และหลายสายอากาศ.....	10
2.3 แบบจำลองการมัลติเพ็ล็กซ์เชิงปริภูมิ.....	12
2.4 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ.....	13
2.5 การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ.....	14
2.6 การส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ..	17
2.7 การส่งต่อสัญญาณแบบ Decode-and-forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ..	18
2.8 โครงสร้างการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti.....	20
2.9 ภาพรวมของระบบรับ/ส่งสัญญาณที่ใช้รหัสเชิงปริภูมิ-เวลา.....	21
2.10 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือก.....	23
2.11 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด.....	24
2.12 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน.....	25
2.13 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับจำนวน ช่องสัญญาณของเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 แบบ.....	26
2.14 โมเดลการส่งผ่านช่องสัญญาณสื่อสารไร้สายแบบสองฮอป (ไม่มีเส้นทางตรงระหว่างแหล่งกำเนิดถึงปลายทาง).....	28
3.1 การส่งสัญญาณแบบ 2-hop ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ.....	31
3.2 ขั้นตอนการส่งสัญญาณเพื่อหาเส้นทางที่ดีที่สุดในการส่งข้อมูล.....	32
3.3 ขั้นตอนการส่งสัญญาณระหว่างโหนดใดๆ ในระบบเครือข่ายเคลื่อนที่.....	33
3.4 ขั้นตอนการทำการของแบบจำลองวิธีการเลือกเส้นทางด้วยค่า SNR.....	41
4.1 แสดงประสิทธิภาพของระบบแสดงในรูปอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) โดยวิธีการเลือกเส้นทางในแต่ละแบบเปรียบเทียบกัน เมื่อค่า $\alpha = 3$	46
4.2 แสดงประสิทธิภาพของระบบแสดงในรูปอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) โดยวิธีการเลือกเส้นทางในแต่ละแบบเปรียบเทียบกัน เมื่อค่า $\alpha = 5$	49
4.3 แสดงประสิทธิภาพของระบบแสดงในรูปอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) เมื่อค่า $\alpha = 3$ และ $\alpha = 5$ โดยวิธีการเลือกเส้นทางแบบ SNR	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 แสดงประสิทธิภาพของระบบแสดงในรูปอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) เมื่อค่า $\text{Alpha} = 3$ และ $\text{Alpha} = 5$ โดยวิธีการเลือกเส้นทางแบบ SNR เปรียบเทียบกับวิธีการเลือกเส้นทางแบบ Channel capacity.....	51
4.5 แสดงประสิทธิภาพของระบบซึ่งได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณเมื่อค่า $\text{Alpha} = 3$	52
4.6 แสดงประสิทธิภาพของระบบซึ่งได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณเมื่อค่า $\text{Alpha} = 5$	54

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันและอนาคตความต้องการใช้โปรแกรมประยุกต์ และความต้องการในการเชื่อมต่อความเร็วสูงมีการเพิ่มขึ้นอย่างมากในระบบเครือข่ายไร้สายแบบเคลื่อนที่ เทคนิคการส่งข้อมูลแบบหลายเสาส่ง (MIMO) จึงได้ถูกนำมาช่วยในการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารแบบไร้สาย เนื่องจากสามารถส่งข้อมูลได้หลายทิศทางทั้งในแนวตรงและแนวสะท้อนจากสิ่งกีดขวางเรียกว่า ความหลากหลายของการส่งสัญญาณ ทำให้สามารถส่งข้อมูลในอัตราที่ส่งที่สูงได้ แม้ว่าการใช้เทคนิคการส่งแบบหลายเสาส่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงพื้นที่ แต่ไม่สามารถใช้ในการส่งข้อมูลในอุปกรณ์พกพาแบบไร้สาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีเสาส่งแบบเสาเดี่ยว และข้อจำกัดในการใช้พลังงานไฟฟ้า¹

จึงได้เกิดแนวความคิดในการใช้รีเลย์โหนด (Relay node) ตามมาตรฐาน IEEE802.16j (Mobile multi-hop relay) เข้ามาช่วยในการส่งผ่านข้อมูลจากต้นทาง (Source node) ไปยังปลายทาง (Destination node) ซึ่งเรียกว่าระบบการสื่อสารแบบร่วมมือ (Cooperative communication system) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความถี่และพลังงาน (Spectral and power efficiency) ทั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องพื้นที่การครอบคลุมของสัญญาณ โดยการใช้เทคนิคของ STBC-PC (Space time block code pre-coding scheme)²

เป็นที่รู้กันดีว่าระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก (Multiple-Input Multiple-Output: MIMO) สามารถรองรับความต้องการดังกล่าวในอนาคตได้ หลักการเบื้องต้นที่ทำให้ระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก มีคุณสมบัติดังที่กล่าวมา คือการใช้งานชุดสายอากาศที่มีมากกว่าหนึ่งตัว ติดตั้งทั้งที่เครื่องส่งและเครื่องรับ ซึ่งการเพิ่มจำนวนของสายอากาศนี้จะส่งผลให้ระบบสามารถเพิ่มช่องทางในการสื่อสารและเพิ่มทางเลือกในการส่งข้อมูล

¹ E. Zimmermann, P. Herhold and G. Fettweis, "A Novel Protocol for Cooperative Diversity in Wireless Networks," Proc. of the Fifth European Wireless Conference, 2004.

² Ho-Jung An, Jee-Hoon Kim, and Hyoung-Kyu Song, "Cooperative Transmission Scheme to Increase Gain by STBC," Engineering Letters, 2007.

ในช่องสัญญาณที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีระบบสื่อสารไร้สายชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถรองรับความต้องการ การส่งข้อมูลในอนาคตและเพิ่มทางเลือกในการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ดีที่สุดได้เช่นเดียวกับระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก และไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนของสายอากาศที่เครื่องส่งและเครื่องรับ การสื่อสารดังกล่าวนี้เรียกว่า การสื่อสาร ไร้สายแบบร่วมมือ (Cooperative communications)

การสื่อสาร ไร้สายแบบร่วมมือ เป็นเทคนิคการส่งต่อข้อมูล (Relaying) โดยให้ผู้ใช้งานคนอื่นๆในระบบ ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยส่งต่อข้อมูลไปยังเครื่องรับปลายทาง ซึ่งจะทำให้เกิดระบบการสื่อสารแบบหลายทางเข้า / ออกเสมือน (Virtual MIMO systems) ขึ้นมา เทคนิคนี้ช่วยเพิ่มความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity) ให้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้อัตราความผิดพลาดของการตัดสินใจตัดสินบิตข้อมูล (Bit error rate: BER) ของระบบโดยรวมลดลง แต่ปัญหาจากการจางหายหรือเฟดดิ้ง (Fading) ที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ จากสัญญาณรบกวน (Noise) ความล่าช้าของสัญญาณที่ส่งมา (Delays) และจากการสะท้อนในหลายทิศทาง (Multi-path) ของช่องสัญญาณ มีผลให้เกิดการลดทอนของสัญญาณ (Attenuations) เช่นกัน ทำให้อัตราความผิดพลาดของการตัดสินใจตัดสินบิตข้อมูลที่ภาครับมีค่าสูงขึ้น จนเกิดความผิดพลาดในการรับ/ส่งสัญญาณ

การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา (Space-time coding: STC) เป็นวิธีที่อยู่บนพื้นฐานของวิธีการทำโคเวอร์ซีตีทางด้านส่ง ซึ่งเป็นการรวมเอาการออกแบบรหัสช่องสัญญาณและการใช้สายอากาศหลายต้นเข้าด้วยกัน โดยจะใช้สายอากาศส่งหลายๆต้น และสายอากาศรับต้นเดียว หรือหลายๆต้นร่วมกับการใช้โคเวอร์ซีตีทางเวลา โดยอาศัยหลักการที่ว่า ถ้าหากตั้งสายอากาศส่งและรับในปริภูมิให้มีความเป็นอิสระเชิงปริภูมิแล้ว สัญญาณจากสายอากาศส่งแต่ละตัว ที่ส่งไปยังสายอากาศรับแต่ละตัว จะต้องได้รับผลกระทบจากเฟดดิ้งที่แตกต่างกัน เพื่อให้ข่าวสารที่ถูกส่งไป ณ เวลาหนึ่งๆ ในแต่ละเส้นทาง ไม่ถูกรบกวนจนทำให้สูญเสียไปพร้อมกันหมดทุกเส้นทาง ดังนั้นการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา จึงมีประสิทธิภาพในการช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการจางหายและมีข้อดีกว่าการเข้ารหัสข้อมูลด้วยวิธีอื่นๆ คือ ให้ความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลสูง มีความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดต่ำ ไม่เกิดผลกระทบต่ออัตราการขยายความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity gain) และออกแบบได้ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อนมากนัก เหมาะที่จะใช้งานกับช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

ปี 2009 H. Khoshbin³ และคณะ นำเสนอวิธีการเลือกกรีเลย์ โดยการใช้วิธีการเลือกกรีเลย์ที่ดีที่สุด, วิธีการเลือกกรีเลย์ที่ใกล้ที่สุด และวิธีการเลือกกรีเลย์ที่ดีที่สุดสองรีเลย์ ซึ่งใช้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เป็นตัวแปรสำคัญในการเลือกกรีเลย์เพราะว่ารีเลย์ที่ใกล้ที่สุดหรือเส้นทางที่สั้นที่สุด อาจจะไม่ใช่เส้นทางที่ดีที่สุดเสมอไปในการส่งผ่านเนื่องจากผลกระทบจากการลดทอนแบบสุ่ม

และ Kaiser M.S.⁴ และคณะได้นำเสนอวิธีการเลือกกรีเลย์โดยใช้ขั้นตอนวิธีคิดแบบฟัซซี่ในระบบความร่วมมือแบบสองฮอป ซึ่งยังใช้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) และเวลารวมที่ใช้ในการส่งข้อมูล (Total time delay) เป็นตัวแปรของวิธีคิดแบบฟัซซี่ แต่การเลือกกรีเลย์ยังอยู่บนพื้นฐานการตัดสินใจของสถานีฐานซึ่งไม่เหมาะกับระบบเครือข่ายเคลื่อนที่ซึ่งมีคุณสมบัติของช่องสัญญาณเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

จากปัญหาและความเป็นมาที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดว่า หากนำเอาระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา แบบ Alamouti น่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมให้กับระบบสูงขึ้น โดยจะมีอัตราความผิดพลาดของการตัดสินใจข้อมูลและสัญลักษณ์ต่ำลง และช่วยลดผลกระทบจากการจางหายที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการรับ/ส่งสัญญาณ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงนำเอาแนวความคิดดังกล่าวมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ และประยุกต์ใช้งานบนระบบเครือข่ายเคลื่อนที่ที่มีข้อจำกัดในเรื่องของสายอากาศในการรับ/ส่งข้อมูล โดยมีผู้ใช้งานทั้งหมดในระบบตั้งแต่ 2 คนขึ้นไป และมี 1 สถานีฐาน เพื่อให้ระบบการสื่อสารไร้สาย มีประสิทธิภาพของการรับ/ส่งข้อมูลที่ดีขึ้น ภายใต้สภาพภูมิศาสตร์ของช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และเพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยออกแบบประยุกต์ใช้งานกับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ ในการส่งสัญญาณแบบต่างๆ เช่นสัญญาณภาพ สัญญาณเสียง และสัญญาณข้อมูลใดๆ ต่อไปในอนาคต

³ H. Khoshbin Ghomash and NF. Mehr, "Outage Analysis of Relay Selection Methods for IEEE802.16j," ICEE Comm., Vol. 4, 2009, pp. 592 – 596.

⁴ Kaiser, M.S., Khan, I., Adachi, F. and Ahmed, K.M, "Fuzzy Logic Based Relay Search Algorithm for Cooperative Systems," Communication Systems and Networks and Workshops, 2009, pp. 1-7.

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อจำลองการเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดจากค่าอัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio) ในการส่งข้อมูลโดยใช้รีเลย์โหนด
2. ทำการเปรียบเทียบการเลือกเส้นทางที่เลือก จากการเลือกรีเลย์โหนดในแต่ละแบบ
3. เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ระบบการสื่อสารแบบร่วมมือในระบบอุปกรณ์ไร้สายพหุพาและนำมาทำโปรแกรมประยุกต์สำหรับการเลือกรีเลย์โหนดในอนาคต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองการเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดจากค่าอัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio)
2. ทำการเปรียบเทียบค่าอัตราการผิดพลาดของบิต จากแต่ละวิธีการเลือกเส้นทาง จากการเลือกรีเลย์โหนดในแต่ละแบบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดจากค่าอัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio) ในระบบการสื่อสารแบบร่วมมือได้อย่างถูกต้อง
2. ทำให้ผู้ใช้งานที่ไม่สามารถติดต่อกับสถานีฐาน สามารถติดต่อและส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานผ่านรีเลย์โหนดได้
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ในการเลือกรีเลย์โหนดเพื่อส่งผ่านข้อมูล

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. สำนักรวบรวมกรณีศึกษาที่เกี่ยวข้อง และศึกษาหลักการของระบบสื่อสารแบบร่วมมือ การเข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti และ หลักการของวิธีการเข้ารหัสก่อนการส่ง (Pre-coding) ตลอดจนเทคนิคการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลผ่านรีเลย์โหนดรวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาอุปกรณ์และโปรแกรมที่ใช้ทำการจำลองระบบ โดยทำการศึกษาค้นหาและรวบรวมโปรแกรมที่จะทำการจำลองระบบเพื่อที่จะสามารถประยุกต์ใช้ในการจำลองการระบบที่นำเสนอได้อย่างถูกต้อง
3. ศึกษาความน่าจะเป็นการจางหายในช่องสัญญาณและขั้นตอนวิธีการพิจารณาเลือกรีเลย์เพื่อที่จะนำรูปแบบการจางหายของช่องสัญญาณมาประยุกต์ใช้ในการแสดงถึงสถานะแวดล้อมที่ใช้ในการจำลอง และการพิจารณาการเลือกเส้นทางส่งผ่านข้อมูล

4. ออกแบบและพัฒนาระบบที่ทำการนำเสนอในการเลือกเส้นทางส่งผ่านข้อมูล โดยการเขียนโปรแกรมที่ทำการศึกษาจากข้างต้น ออกแบบขั้นตอนวิธีในการส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางผ่านรีเลย์โหนด โดยใช้รูปแบบการส่งชนิดสองฮอป พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลในการออกแบบระบบ เพื่อทำการจำลองและทดสอบระบบที่นำเสนอในการวัดประสิทธิภาพของระบบ

5. สร้างระบบระบบที่นำเสนอ โดยการรวบรวมข้อมูลที่จะใช้ในการออกแบบข้างต้น และนำข้อมูลเหล่านั้นมาเป็นตัวแปรในการจำลองระบบเพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบที่ทำการนำเสนอ

6. ทำการบันทึก วิเคราะห์เปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอ เพื่อที่จะสรุปผลการจำลองระบบว่าประสิทธิภาพของระบบนั้นเป็นอย่างไร โดยเปรียบเทียบผลการเลือกเส้นทางจากอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล สำหรับการเลือกรีเลย์โหนดในแต่ละแบบ

7. รวบรวมข้อมูลของระบบที่นำเสนอตลอดจนผลการทดสอบระบบที่ได้ทำมาตั้งแต่ต้นเพื่อจัดทำเป็นวิทยานิพนธ์

1.6 เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล CPU แบบ Intel Core 2 Duo (P7350) ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 2.0 GHz ใช้ในการคำนวณและเขียนโปรแกรม

2. ซอฟต์แวร์โปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB 7.8.0 (R2009a)

1.7 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

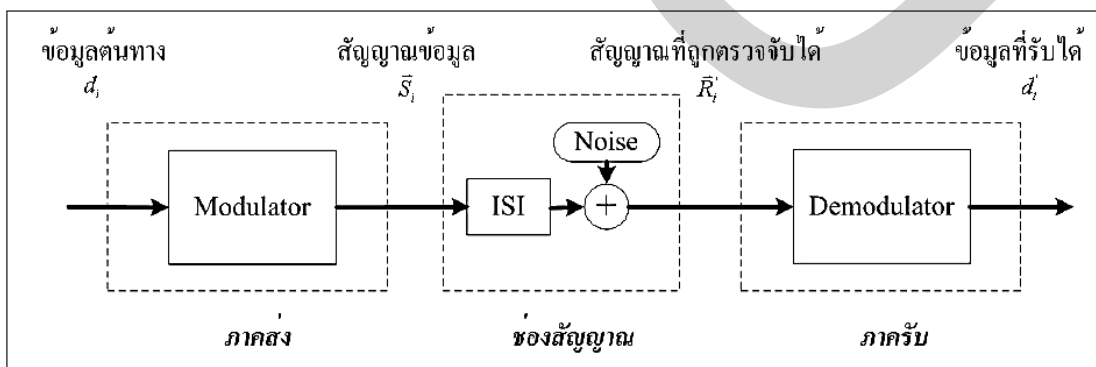
งาน	เดือน									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ศึกษาหลักการของระบบสื่อสารแบบร่วมมือการเข้ารหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti และ Precoding	■	■								
ศึกษาหลักการ ทำงาน ของโปรแกรม ที่ใช้จำลองระบบ		■	■							
ศึกษาความน่าจะเป็นของการจางหายในช่องสัญญาณและขั้นตอนวิธีการพิจารณาเลือกกรีเลย์			■	■						
ออกแบบและพัฒนาระบบที่ทำการนำเสนอ				■	■	■				
สร้างแบบจำลองระบบที่ทำการนำเสนอ					■	■	■			
เปรียบเทียบ วิเคราะห์ผลที่ได้และสรุป						■	■	■		
รวบรวมข้อมูลที่ได้ทั้งหมดจัดทำวิทยานิพนธ์								■	■	■

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย

ในการออกแบบและใช้งานระบบสื่อสารไร้สายเพื่อรับ/ส่งข้อมูลดิจิทัลนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบสื่อสาร เช่น ขนาดแบนด์วิดท์(Bandwidth) ของช่องสัญญาณที่ใช้งาน อัตราเร็วในการส่งข้อมูล และ กำลังส่ง เป็นต้น โดยจะต้องมีการออกแบบให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้งานระบบสื่อสารนั้นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เป็นการรบกวนช่องสัญญาณอื่นๆ ดังนั้นข้อมูลดิจิทัล d_i ต้องผ่านกระบวนการมอดูเลต (Modulate) ก่อนถูกส่งผ่านระบบสื่อสาร เพื่อแปลงข้อมูลให้กลายเป็นสัญญาณข้อมูล S_i ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการส่งผ่านช่องสัญญาณ และเมื่อสัญญาณข้อมูล R_i ถูกตรวจจับได้ที่ภาครับ ก็จะถูกนำมาผ่านกระบวนการ ดีมอดูเลต (Demodulate) เพื่อแปลงสัญญาณข้อมูลให้กลายเป็นข้อมูลดิจิทัล d_i เพื่อนำไปใช้งานต่อไป โดยจะพบว่า ข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากทำงานของภาครับนั้นอาจมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไป เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ถูกส่งออกไปจากภาคส่ง ซึ่งเกิดมาจากผลขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบสื่อสาร สำหรับองค์ประกอบหลักที่ส่งผลให้ข้อมูลที่ถูกส่งผ่านมาเกิดความผิดพลาดขึ้นนั้น เกิดมาจากการถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวน(Noise) และเกิดจากลักษณะในการส่งข้อมูลที่สัญญาณข้อมูล สามารถเดินทางไปถึงภาครับได้จากหลายวิธีด้วยกัน (Multi-path) โดยที่ในแต่ละเส้นทางนั้น อาจจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณในลักษณะของการทับซ้อนระหว่างสัญญาณขึ้น



รูปที่ 2.1 การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย

2.2 ความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity)

ความหลากหลายของช่องสัญญาณ หรือไดเวอร์ซิตี (Diversity) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถช่วยให้การรับส่งสัญญาณมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องมีการเพิ่มบิตรหัส (Code bits) รวมเข้ากับบิตข้อมูล (Data bits) อย่างที่ต้องใช้ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel Codes) และยังไม่ต้องการส่งสัญญาณ ที่เรียกว่า Training sequence สำหรับใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์การคูณของวงจรรีควอไลเซอร์ ซึ่งหมายถึงว่า ไม่มีการแบ่งเอาแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของการรับ/ส่งสัญญาณเลย นอกจากนี้ ส่วนของอุปกรณ์ที่ต้องเพิ่มเข้ามา สำหรับการทำให้ไดเวอร์ซิตี ก็มีราคาที่ไม่แพงจนเกินไป ดังนั้นเทคนิคไดเวอร์ซิตีจึงมีประโยชน์อย่างมากในทางปฏิบัติ

หลักการของไดเวอร์ซิตี คือ การอาศัยคุณสมบัติพื้นฐาน ของการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สาย ซึ่งมักจะมีเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณหลายเส้นทาง และโดยทั่วไปแล้ว ถ้าหากการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นทางหนึ่ง ถูกบกพร่องอย่างมากจากการจางหายทำให้สัญญาณที่รับมามีกำลังที่อ่อนมาก ก็อาจจะมีการรับสัญญาณจากเส้นทางอื่น ที่ให้สัญญาณที่รับมามีกำลังสูง ดังนั้นถ้าหากเราทำการติดตั้งจุดรับสัญญาณ มากกว่าหนึ่งแห่งก็จะสามารถรับสัญญาณได้จากหลายเส้นทาง จากนั้นระบบก็จะทำการเลือกเฉพาะสัญญาณที่มีกำลังสูงมาใช้ได้ ซึ่งวิธีการนี้สามารถช่วยทำให้ค่า SNR ของสัญญาณที่ภาครับมีคุณภาพที่ดีขึ้นได้ถึง 20-30 dB สังเกตว่าคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ดีขึ้น โดยที่ทางภาครับสัญญาณมิได้มีส่วนเกี่ยวข้องด้วยเลย ซึ่งวิธีการไดเวอร์ซิตีชนิดที่นิยมใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้ คือ

2.2.1 ไดเวอร์ซิตีทางเวลา (Time Diversity)

ไดเวอร์ซิตีทางเวลา (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 ของการใช้งานเทคนิคไดเวอร์ซิตีทางเวลา คือ วงจร RAKE receiver ในระบบ CDMA

2.2.2 ไดเวอร์ซิตีทางความถี่ (Frequency Diversity)

ไดเวอร์ซิตีชนิดนี้ จะใช้ความถี่ถึงสองช่องสัญญาณ ระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับข้อมูลจะถูกส่งโดยเครื่องส่งสองตัว ที่ทำงานที่ความถี่แตกต่างกัน ซึ่งสัญญาณทั้งสองจะถูกรวมกันไปสู่ท่อนำคลื่นและสายอากาศตามลำดับ โดยสัญญาณจะถูกส่งออกไปในสายอากาศ

เดียวกัน (แต่อาจมีโพลาริเซชันต่างกัน) ที่ด้านรับสายอากาศจะรับสัญญาณและผ่านท่อนำคลื่นไป ยังตัวกรองความถี่แยกความถี่ทั้งสองออกมา เครื่องรับแต่ละตัวก็จะแยกสัญญาณข้อมูลออกมา ด้วยวิธีการดังกล่าวก็จะทำให้สามารถลดผลกระทบจากการจางหายได้ ถ้าหากการแยกกันของความถี่ของเครื่องส่งสัญญาณมีมาก การจางหายซึ่งเกิดเฉพาะที่ความถี่หนึ่งๆ จะมีโอกาสน้อยมากๆที่จะเกิด กับสัญญาณทั้งสองความถี่พร้อมๆกัน จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบ สำหรับความถี่ที่ห่างกันประมาณ 2 เฮอร์เซ็นต์ ถือว่าเพียงพอ และถ้ายิ่งห่างกัน 5 เฮอร์เซ็นต์ ก็จะดีมากที่สุด ข้อเสียของ ไคเวอร์ซิตีทางความถี่คือ จะต้องใช้แถบความถี่มากกว่าปกติ จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับพื้นที่ในเมืองใหญ่ จำนวนช่องสัญญาณก็มีจำกัด การเพิ่มประสิทธิภาพของไคเวอร์ซิตีทางความถี่ถือว่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับไคเวอร์ซิตีแบบสเปซ

2.2.3 ไคเวอร์ซิตีทางสเปซหรือสายอากาศ (Space-Diversity)

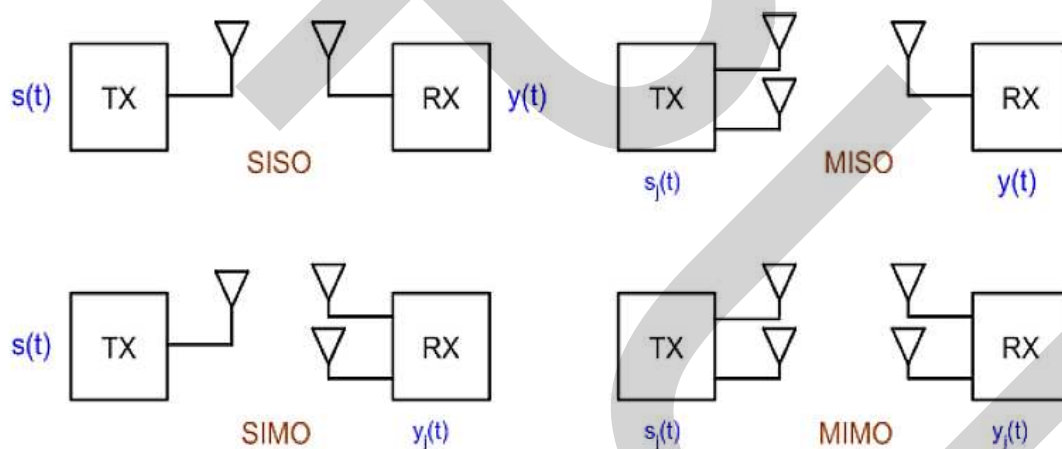
ไคเวอร์ซิตีชนิดนี้ เครื่องรับจะรับสัญญาณจากสายอากาศ ตั้งแต่สองต้นขึ้นไป ซึ่งติดตั้งอยู่ห่างกัน เป็นระยะหลายเท่าของความยาวคลื่น โดยสัญญาณที่ได้รับจากแต่ละสายอากาศจะถูกต่อเข้ากับตัวไคเวอร์ซิตีคอมไบเนอร์ (Diversity combiner) ซึ่งหน้าที่ของตัวคอมไบเนอร์ก็คือ จะทำการเลือกสัญญาณที่ดีที่สุดหรือทำการรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน ซึ่งก็แล้วแต่การออกแบบ สัญญาณจากด้านส่งจะเดินทางเป็นเส้นตรงสองเส้นทางไปยังสายอากาศทางด้านรับทั้งสองต้น และสัญญาณจากเครื่องส่งอาจจะเดินทางไปในอีกหลายเส้นทางที่แตกต่างกัน และเส้นทางที่สัญญาณเกิดมีความต่างเฟสกับสัญญาณทางตรง ก็จะทำให้เกิดมัลติพาธเฟดดิ้งขึ้นที่สายอากาศด้านรับ แต่สายอากาศทั้งสองต้นนั้น จะไม่เกิดมัลติพาธเฟดดิ้ง ที่เหมือนกัน เพราะระยะทางของสายอากาศทั้งสองต้นแตกต่างกัน นั่นคือ แม้ว่าสัญญาณที่เดินทางในระยะทางจากสายอากาศด้านส่งไปยังสายอากาศด้านรับ ข้างใดข้างหนึ่งอาจเกิดการหักล้างทางเฟสกัน แต่ในสายอากาศด้านรับอีกข้างหนึ่งก็จะไม่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าว จากสถิติพบว่า การใช้ไคเวอร์ซิตีแบบสเปซทำให้คุณภาพของสัญญาณดีขึ้นหลายร้อยเท่าซึ่งเป็นที่น่าพอใจมาก และสายอากาศมักติดตั้งห่างกันเป็นระยะทาง 200 เท่า ของความยาวคลื่นที่ใช้ จากการค้นพบล่าสุด การจัดสายอากาศไคเวอร์ซิตีที่ดีที่สุดจะอยู่ในแนวนอนให้สายอากาศอยู่ข้าง ๆ กัน นอกจากนี้ การใช้ไคเวอร์ซิตีแบบสเปซยังมีประสิทธิภาพดีกว่าฟรีควอนซีไคเวอร์ซิตีเพราะว่า ไคเวอร์ซิตีแบบสเปซ ใช้ความถี่น้อยกว่า และใช้สำหรับช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวก็จะประหยัดกว่า

2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สาย แบบหลายทางเข้า หลายทางออก

ช่วงแรกๆ ของงานวิจัยในระบบการสื่อสารไร้สาย จะเป็นการส่งผ่านข้อมูลในระบบโดยใช้สายอากาศที่ภาครับและภาคส่งเพียงแค่นั้นเดียว ที่เรียกว่า ระบบหนึ่งทางเข้า หนึ่งทางออก

(Single-Input Single-Output system: SISO) ต่อมาได้มีการพัฒนางานวิจัยมาศึกษา ระบบการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศ (Multiple Antennas) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศนี้ ทำให้ความจุในระบบเพิ่มขึ้น สามารถรับ/ส่งข้อมูลได้มากขึ้น โดยในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบดังต่อไปนี้

- 1) ระบบหนึ่งทางเข้า หลายทางออก (Single-Input Multiple-Output system: SIMO) คือระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหนึ่งสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหลายสายอากาศ
- 2) ระบบหลายทางเข้า หนึ่งทางออก (Multiple-Input Single-Output system: MISO) คือระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหลายสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหนึ่งสายอากาศ
- 3) ระบบหลายทางเข้า หลายทางออก (Multiple-Input Multiple-Output system: MIMO) คือระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหลายสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหลายสายอากาศ เช่นกัน



รูปที่ 2.2 การรับส่งข้อมูลแบบสายอากาศเดี่ยว และหลายสายอากาศ

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

- 1) อัตราการขยายแถวลำดับ (Array Gain)

การใช้สายอากาศหลายๆเสา จะทำให้อัตราการขยายของสัญญาณที่ออกมาจากสายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะทาง (Range) และพื้นที่ครอบคลุม (Coverage) ในการส่งสัญญาณเพิ่มมาก

ขึ้นด้วย ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในกรณีที่เพิ่มพื้นที่ที่ต้องการส่งสัญญาณให้กว้างขึ้น หรือกรณีที่จำนวนของผู้ใช้งานในพื้นที่นั้นมีอยู่มาก จะทำให้จำนวนการติดตั้งสถานีฐานลดลง เพราะพื้นที่ที่ครอบคลุมมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อดีที่ทำให้กำลังงานส่งจากตัวสถานีเคลื่อนที่ (โทรศัพท์มือถือ) มีค่าลดลง ตามอัตราการขยายของสายอากาศที่สถานีฐานนั้นมีมากขึ้น หรือค่าความไวที่สายอากาศแถวลำดับที่สถานีฐานรับได้มีมากขึ้นนั่นเอง

2) อัตราการขยายไคเวอร์ซิตี (Diversity Gain)

ค่ากำลังของสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนตามการลดทอนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ เทคนิคไคเวอร์ซิตีจึงเป็นวิธีที่มีประโยชน์มากในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจางหายนั้นๆ (หรือที่เรียกว่า Fading) ดังนั้นระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออก(MIMO) จึงมีการใช้สายอากาศภาคส่ง M_T เสา และสายอากาศภาครับ M_R เสา ที่มีการจางหายหรือเฟดดิ้งเป็นอิสระต่อกัน เมื่อส่งสัญญาณออกไปจะทำให้ภาครับสามารถรวมสัญญาณที่เข้ามาได้ โดยลดปัญหาเรื่องของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของสัญญาณในระบบออกไปได้มาก เมื่อเทียบกับระบบสื่อสารหนึ่งทางเข้า หนึ่งทางออก (SISO)

3) กำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (Spatial Multiplexing Gain)

ช่องสัญญาณในระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออก จะมีการเพิ่มขึ้นของความจุช่องสัญญาณในระบบเป็นเส้นตรง และมีค่าเท่ากับค่าที่น้อยที่สุดระหว่างจำนวนสายอากาศที่ภาคส่งและภาครับ โดยไม่มีผลต่อค่ากำลังงานหรือการใช้แบนด์วิดท์ ค่ากำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (Spatial Multiplexing Gain) จะส่งผลให้ความจุของช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการส่งแบบหลายระยะทางนั้น ทางภาคส่งจะทำการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกันออกจากสายอากาศแต่ละเสาภายใต้เงื่อนไขของช่องสัญญาณที่มีการแพร่กระจายของสัญญาณมากพอ (Rich scattering) ทำให้ทางภาครับสามารถแยกสัญญาณต่างๆ ออกจากกันได้

4) การลดการแทรกสอด (Interference reduction)

การแทรกสอดแบบร่วมภายในช่องสัญญาณ (Co-channel interference) เกิดจากการใช้ความถี่ซ้ำ (Frequency reuse) เมื่อมีการใช้สายอากาศหลายๆเสา จะเกิดความแตกต่างระหว่างระยะห่างของสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่อยู่ในช่องสัญญาณข้างเคียง จึงทำให้สามารถลดการแทรกสอดได้

2.3.1 เทคนิคการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้า หลายทางออก

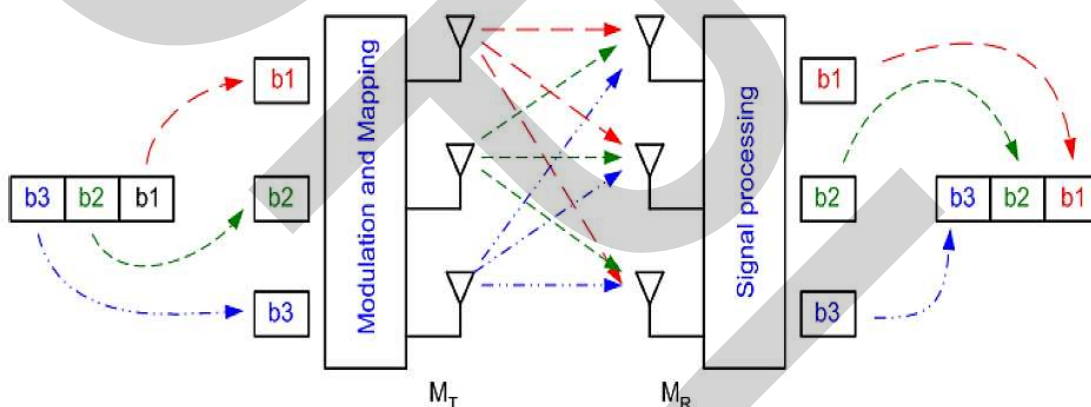
ในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีช่องสัญญาณเป็นแบบหลายทางเข้า หลายทางออก จะมีเทคนิคการส่งข้อมูลอยู่หลายเทคนิค แต่ก็สามารถจัดกลุ่มรวมกันตามเทคนิคหลักๆ ได้ 2 กลุ่ม คือ

1) การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา (Space-time coding)

เทคนิคนี้จะใช้สายอากาศที่เพิ่มเข้ามาในระบบ มาช่วยกันเข้ารหัส เพื่อให้ได้ไคเวอร์ซิตีทางปริภูมิ-เวลา ทำให้ข้อมูลที่ส่งมีความน่าเชื่อถือ และมีความทนทานต่อการผิดพลาดมากขึ้น เมื่อช่องสัญญาณที่ส่งผ่านเป็นแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ซึ่งวิธีการส่งแบบนี้มีข้อดี คือ มีรูปแบบการส่งสัญญาณที่ง่ายและมีความซับซ้อนต่ำ

2) การมัลติเพล็กซ์ทางปริภูมิ (Spatial multiplexing)

เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้า หลายทางออก ซึ่งเทคนิคการส่งข้อมูลแบบนี้จะให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูง โดยขั้นตอนการส่ง จะมีการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระกันทั้งหมด M_T ค่า (เท่ากับจำนวนของสายอากาศที่ภาคส่ง) ต่อหนึ่งคาบสัญลักษณ์ คือ ข้อมูลที่ถูกส่งไปในแต่ละสายอากาศจะเป็นข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.3



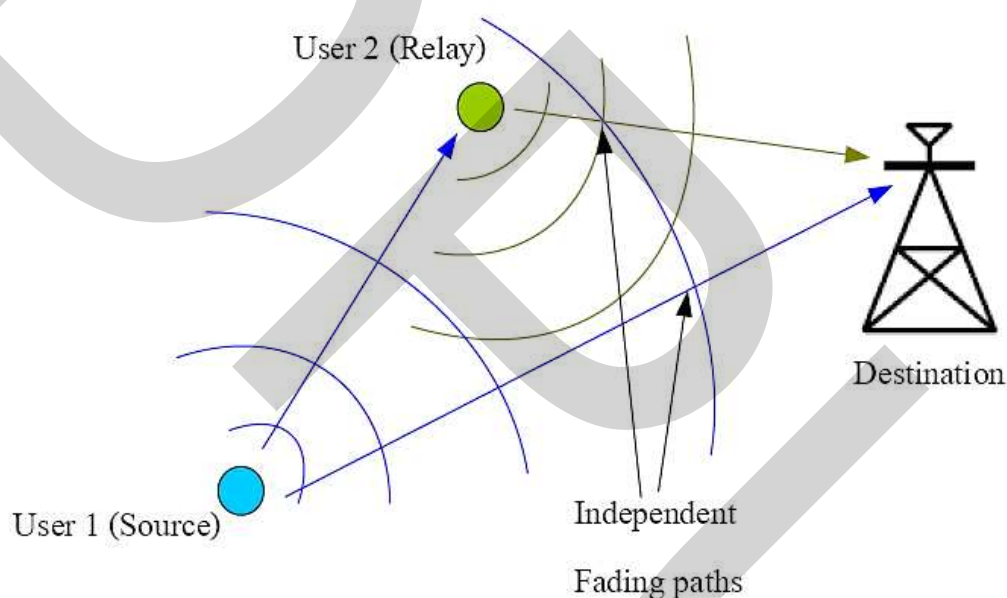
รูปที่ 2.3 แบบจำลองการมัลติเพล็กซ์เชิงปริภูมิ

2.4 ความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือคือ ระบบสื่อสารที่อาศัยผู้ใช้งานในโครงข่ายระบบสื่อสารไร้สาย (Wireless communication network)¹ ทำหน้าที่รับสัญญาณและช่วยส่งต่อสัญญาณที่รับได้ไปยังเครื่องรับปลายทางร่วมกัน โดยผู้ใช้ที่ส่งสัญญาณเป็นคนแรก เรียกว่า

¹ 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), pp.597-600.

“เครื่องส่ง (Source)” และผู้ใช้ที่ทำหน้าที่ช่วยส่งต่อสัญญาณ เรียกว่า “Relay”² ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งการช่วยส่งต่อสัญญาณจะทำให้เกิดการเพิ่มความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity gain) ขึ้น เหมือนในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก และส่งผลทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลลดลง ข้อดีของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมืออีกประการหนึ่งคือ การช่วยเพิ่มพิสัย (Range) ในการสื่อสารของผู้ใช้งานในโครงข่ายสื่อสารไร้สาย เนื่องจากผู้ใช้งานที่อยู่ใกล้เครื่องรับปลายทางสามารถช่วยส่งต่อข้อมูลของผู้ส่งซึ่งอยู่ห่างไกลออกไปมาก ๆ ได้ ซึ่งทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าอันจำกัด จากแบตเตอรี่ของผู้ส่งข้อมูลในระบบ ลดลงได้ ทำให้สามารถสื่อสารได้นานขึ้น



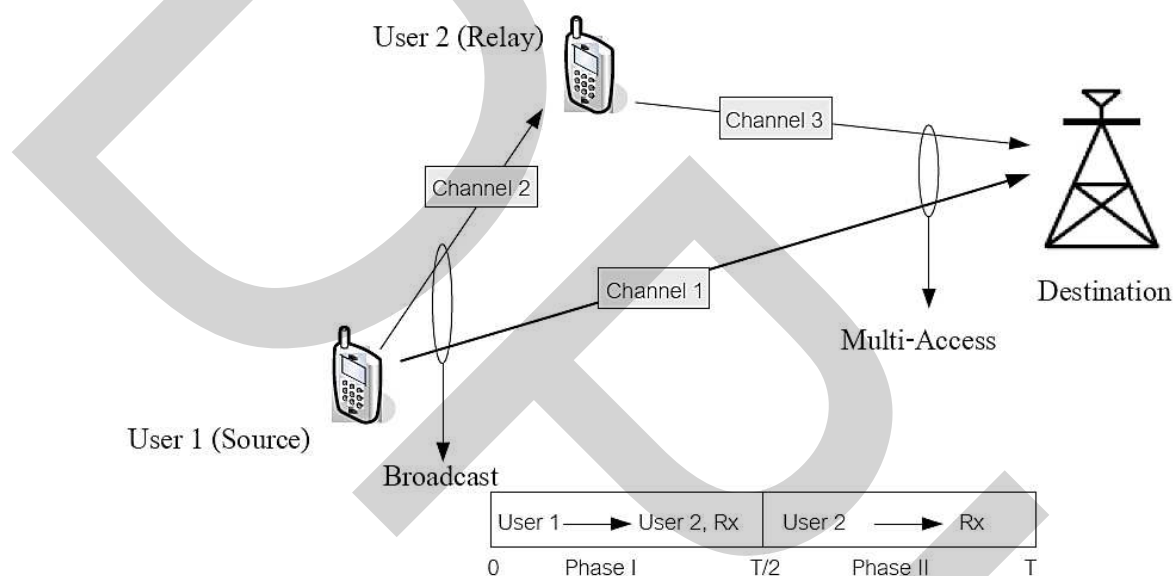
รูปที่ 2.4 ระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

2.4.1 แบบจำลองระบบและการเข้าถึงช่องสัญญาณ

การส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ จะพิจารณาการส่งสัญญาณในแบบทิศทางเดียว คือ การสื่อสารในทิศทางจากผู้ใช้งานไปยังเครื่องรับปลายทาง โดยมีการแบ่งช่องสัญญาณออกเป็นหลายๆ ช่องสัญญาณที่ตั้งฉากกัน และมีการเข้าถึงช่องสัญญาณจากผู้ใช้งานคนได้ 3 แบบคือ การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access:

² Chaiyod Pirak, Z.Jane Wang and K.J. Ray Liu. “An Adaptive protocol for cooperative communications achieving asymptotic minimum symbol-error-rate.” Proceeding of IEEE ICASSP06, (May 2006) : IV53-IV56.

FDMA) การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access: TDMA) และการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access: CDMA) เพื่อความสะดวกในการอธิบาย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะพิจารณาการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และให้เวลาสำหรับการส่งสัญญาณระหว่างผู้ใช้งานทั้งหมดไปยังเครื่องรับมีกระบวนการซิงโครไนซ์ (Synchronization) อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.5 การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ TDMA ของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

การส่งสัญญาณแบบร่วมมือสำหรับระบบสื่อสารไร้สายในรูปที่ 2.5 ซึ่งกำหนดให้ผู้ใช้คนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง และผู้ใช้คนที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Relay โดยมีช่วงเวลาของการเข้าถึงช่องสัญญาณที่ใช้ทั้งหมด คือ T สามารถแบ่งการส่งสัญญาณออกเป็น 2 เฟส ดังนี้

เฟสที่ 1 ($0 - T/2$) : เป็นช่วงเวลาที่ผู้ใช้คนที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งกระจายสัญญาณไปยังเครื่องรับปลายทางและผู้ใช้คนที่ 2 พร้อม ๆ กัน โดยอาศัยคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปรอบทิศทางของช่องสัญญาณไร้สาย สัญญาณที่รับได้ยังเครื่องรับปลายทาง และสัญญาณที่รับได้ที่รีเลย์ แสดงดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

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

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

เมื่อ	$x_S(n)$	คือ ข้อมูลที่ส่งออกจากเครื่องส่ง
	h_{SD}	คือ ช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ
	h_{SR}	คือ ช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและ Relay
	$n_{SD}(n)$	คือ สัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ
	$n_{SR}(n)$	คือ สัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องส่งและ Relay
	P_1	คือ กำลังส่งสัญญาณจากเครื่องส่ง
	n	คือ ลำดับเวลาในการส่งแต่ละครั้ง โดยที่ $n = \frac{nT}{4}$

เฟสที่ 2 ($T/2 - T$) : เป็นช่วงเวลาที่ผู้ใช้งานที่ 2 ซึ่งทำหน้าที่เป็น Relay ช่วยส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับปลายทาง โดยสัญญาณที่รับได้ยังเครื่องรับปลายทาง ดังสมการที่ 2.3

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

เมื่อ	$x_R(n)$	คือ ข้อมูลที่ Relay รับได้และส่งต่อไปยังปลายทาง
	h_{RD}	คือ ช่องสัญญาณระหว่าง Relay และเครื่องรับปลายทาง
	$n_{RD}(n)$	คือ สัญญาณรบกวนระหว่าง Relay และเครื่องรับปลายทาง
	P_2	คือ กำลังส่งสัญญาณจาก Relay

ดังนั้นการรวมสัญญาณแบบอัตราส่วนเท่ากัน (Equal Ratio Combining :ERC) ที่รับได้ที่เครื่องรับปลายทางสามารถเขียนได้เป็นไปตามสมการที่ 2.4

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

2.4.2 โพรโตคอลสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

ในปัจจุบันได้มีการนำเสนอโพรโตคอลสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือไว้ 3 รูปแบบตาม J. N. Laneman³ ดังต่อไปนี้

1) โพรโตคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง (Fixed Relaying Protocol) โพรโตคอลแบบนี้มีหลักการคือ มีการกำหนดจำนวนและระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็น Relay คงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการสื่อสาร โพรโตคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนน้อยที่สุด

³ J. N. Laneman, D.C. Tse, G.W. Wornell. (September 2005) Ibid.

2) โพรโตคอลแบบเลือก (Selective Relaying Protocol) โพรโตคอลแบบนี้จะมีหลักการ คือไม่มีการกำหนดจำนวนและระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็น Relay ที่คงที่ โดยมีวิธีการเลือกผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็น Relay จากค่าขนาดของสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและผู้ใช้ที่จะถูกเลือกเป็น Relay ที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งโพรโตคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนมากกว่าโพรโตคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง

3) โพรโตคอลแบบมีการป้อนกลับ (Incremental Relaying Protocol) โพรโตคอลแบบนี้จะมีลักษณะคล้ายๆกับโพรโตคอลแบบเลือก Relay เพียงแต่มีการเพิ่มเงื่อนไขการเลือกผู้ใช้งานที่ทำหน้าที่เป็น Relay มากขึ้น และจุดเด่นของโพรโตคอลนี้ก็คือ เครื่องรับจะทำการส่งข้อความตอบกลับไปยังผู้ใช้ทุกคน เพื่อให้ทราบสถานะของการส่งสัญญาณในแต่ละครั้ง หากการส่งข้อมูลนั้นไม่มีความผิดพลาด เครื่องรับจะส่งข้อความกลับมายังผู้ใช้ทุกคน เพื่อให้รับทราบสถานะของการส่งที่สมบูรณ์จึงทำให้ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay ไม่ต้องส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ แต่ถ้าหากการส่งข้อมูลเกิดความผิดพลาด เครื่องรับจะส่งข้อความกลับมายังผู้ใช้ทุกคน เพื่อรับทราบสถานะของการส่งที่ไม่สมบูรณ์และมีการร้องขอให้มีการส่งข้อมูลใหม่จากผู้ใช้งานที่ทำหน้าที่เป็น Relay โพรโตคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนสูงที่สุด

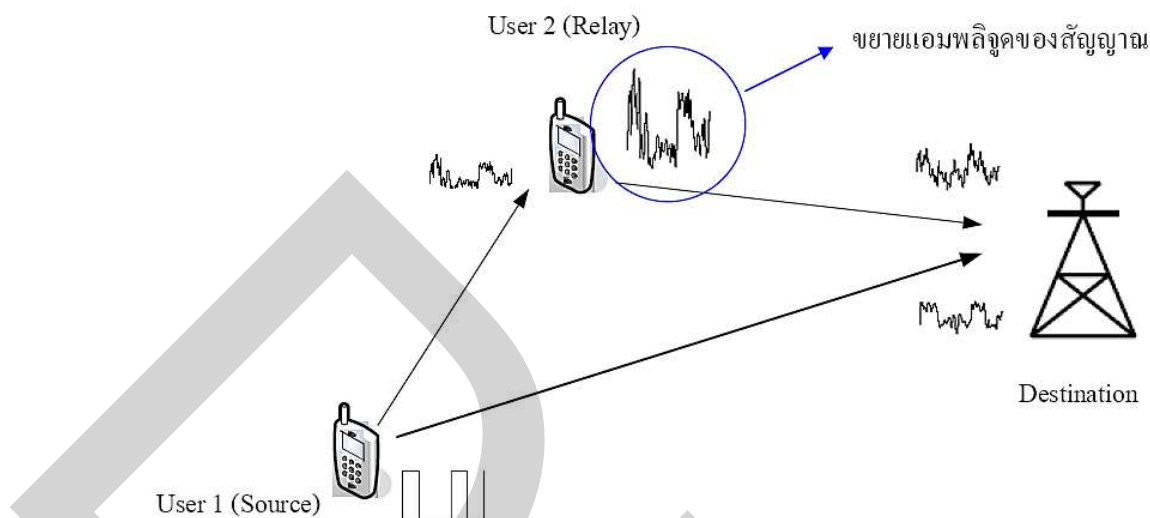
การหาประสิทธิภาพของโพรโตคอลทั้งหมดนี้สามารถทำได้โดย การหาความน่าจะเป็นของสัญญาณที่ขาดหาย (Outage probability) และจะเห็นได้ว่าโพรโตคอลในแต่ละแบบจะมีความซับซ้อนแตกต่างกัน และมีประสิทธิภาพที่ต่างกันด้วย โดยโพรโตคอลแบบมีการป้อนกลับจะมีประสิทธิภาพสูงสุด และโพรโตคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง จะมีประสิทธิภาพต่ำสุด

2.4.3 การส่งต่อสัญญาณจาก Relay ไปยังเครื่องรับปลายทาง

การส่งต่อสัญญาณจาก Relay ไปยังเครื่องรับ สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบด้วยกัน และสามารถใช้งานกับโพรโตคอลสำหรับการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือได้ทั้งสามแบบ คือ Amplify-and-Forward (AF) และ Decode-and-Forward (DF) ⁴

1) Amplify-and-Forward : การส่งต่อแบบขยายแล้วส่งต่อ โดยผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay จะทำการขยายสัญญาณที่รับได้ให้มีขนาด แอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนด แล้วส่งต่อไปยังเครื่องรับปลายทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และเนื่องจากการส่งข้อมูลแบบสำหรับการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือจะมีการแบ่งช่วงเวลาในการส่งเป็น 4 ช่วงเวลา (Time Slot) ดังนั้นจึงกำหนดให้ลำดับเวลาในการส่งแต่ละครั้งเป็น $n = \frac{nT}{4}$

⁴ J. N. Laneman, D.C. Tse, G.W. Wornell. (September 2005) Ibid.



รูปที่ 2.6 การส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

โดยจากสมการที่ 2.3 สามารถเขียน ข้อมูลที่ Relay รับได้และส่งต่อไปยังปลายทาง $x_R(n)$ ได้ใหม่ตามสมการที่ 2.5

$$x_R\left(\frac{nT}{4}\right) = \beta Y_{SR}\left(\frac{nT}{4}\right) \quad ; \quad n = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.5)$$

เมื่อ $Y_{SR}\left(\frac{nT}{4}\right)$ คือ สัญญาณที่ Relay รับได้จากเครื่องส่ง

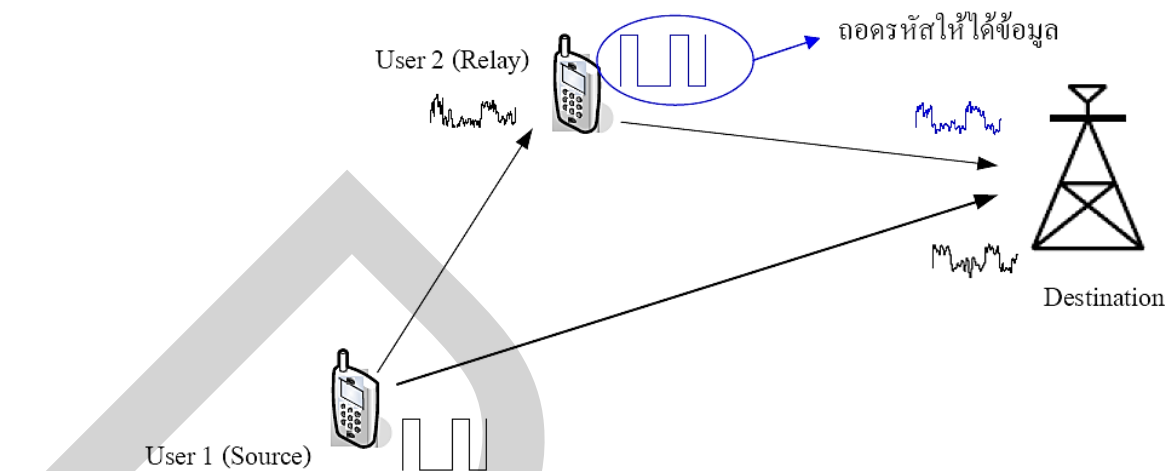
β คือ อัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณ; $\beta \leq \sqrt{\frac{P_1}{|h_{SR}|^2 P_1 + N_0}}$

และ

h_{SR} คือ ช่องสัญญาณสำหรับการส่งข้อมูลระหว่างเครื่องส่งและ Relay

N_0 คือ กำแพงของสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN)

2) Decode-and-Forward : การส่งต่อแบบถอดรหัสแล้วส่งต่อ ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็น Relay จะถอดรหัสสัญญาณ (re-encode) เพื่อให้ได้สัญญาณเดิมที่ส่งมาจากเครื่องส่ง แล้วส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การส่งต่อสัญญาณแบบ Decode-and-forward ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ

โดยจากสมการที่ 2.3 สามารถเขียน ข้อมูลที่ Relay รับผิดชอบและส่งต่อไปยังปลายทาง $x_R(n)$ ได้ใหม่ตามสมการที่ 2.6

$$x_R\left(\frac{nT}{4}\right) = x_s\left(\frac{nT}{4}\right) \quad ; \quad n=1,2,3,\dots,n \quad (2.6)$$

เมื่อ $x_s(n)$ คือข้อมูลจากเครื่องส่ง ซึ่งถูกถอดรหัสจาก Relay

2.5 การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา

การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา (Space-Time Coding: STC) เป็นวิธีที่อยู่บนพื้นฐานของวิธีการทำไคเวอร์ซิติ์ทางด้านส่ง ซึ่งเป็นการรวมเอาการออกแบบรหัสช่องสัญญาณและการใช้สายอากาศหลายต้นเข้าด้วยกัน โดยจะใช้สายอากาศส่งหลายๆต้น และสายอากาศรับต้นเดียว หรือหลายๆต้นร่วมกับการใช้ไคเวอร์ซิติ์ทางเวลา โดยอาศัยหลักการที่ว่า ถ้าหากตั้งสายอากาศส่งและรับในปริภูมิให้มีความเป็นอิสระเชิงปริภูมิแล้ว สัญญาณจากสายอากาศส่งแต่ละตัว ที่ส่งไปยังสายอากาศรับแต่ละตัว จะต้องได้รับผลกระทบจากเฟดดิ้งที่แตกต่างกัน เพื่อให้ข่าวสารที่ถูกส่งไป ณ เวลาหนึ่งๆ ในแต่ละเส้นทาง ไม่ถูกรบกวนจนทำให้สูญเสียไปพร้อมกันหมดทุกเส้นทาง ดังนั้นการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา จึงมีประสิทธิภาพในการช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากเฟดดิ้ง ทำให้ระบบของการสื่อสารไร้สายมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

โดยทั่วไปแล้ว การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา จะมีการแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบบล็อก (Space-Time Block Coding: STBC) กับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลา

แบบเทรลลิส (Space-Time Trellis Coding: STTC) และในรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบบล็อก ก็ยังมีเรื่องของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti อยู่ด้วย แต่ในบางครั้งก็จะแยกออกเป็น 3 กลุ่มดังกล่าวเพื่อความชัดเจนของเนื้อหา ในงานวิจัยฉบับนี้จะแบ่งการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา ออกเป็น 3 เรื่องใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ

1. รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบเทรลลิส (Space-Time Trellis Coding: STTC)
2. รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti (Alamouti Space – Time Codes)
3. รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบบล็อก (Space-Time Block Coding: STBC)

ซึ่งรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบเทรลลิส (Space-Time Trellis Coding: STTC) เป็นเทคนิคจากการทำไคเวอร์ซิติทางด้านส่ง ที่มีประสิทธิภาพในการลดผลกระทบที่เกิดจากเฟดดิ้ง (Fading) สูงที่สุดในทั้ง 3 แบบ แต่มีข้อเสีย คือ นอกจากต้องมีสายอากาศรับ/ส่ง ที่คงที่ตายตัวแล้ว กระบวนการถอดรหัสของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบเทรลลิสก็ยังมี ความซับซ้อนสูงมาก โดยความซับซ้อนในการถอดรหัสจะเพิ่มขึ้นอย่างเอกซ์โพเนนเชียล ตามอัตราความเร็วในการส่ง (Transmission Rate)

โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อธิบายเฉพาะวิธีการของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti (Alamouti Space – Time Codes)⁵ เท่านั้น ทั้งนี้ก็เป็นเพราะคุณลักษณะเฉพาะตัวที่น่าสนใจคือ การถอดรหัสเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน มีรูปแบบที่เรียบง่าย และให้ไคเวอร์ซิติในระบบสูง

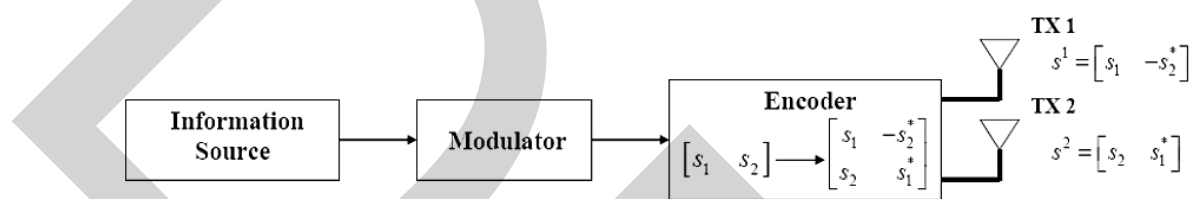
2.5.1. การเข้ารหัสสำหรับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti

วิธีการเข้ารหัสสำหรับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.8 เมื่อแหล่งกำเนิดข่าวสาร (Information Source) ให้กำเนิดสัญลักษณ์ข้อมูล และส่งเข้าตัววงจรมอดูเลเตอร์ (Modulator) ครั้งละ จำนวน 2 สัญลักษณ์ สัญลักษณ์ที่ผ่านการมอดูเลตแล้ว ได้แก่ s_1 และ s_2 จะได้รับการแปลงด้วยวงจรเข้ารหัส (Encoder) ให้ได้เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้ส่งจริงในสายอากาศแต่ละต้น โดยรูปแบบการส่งสัญญาณสามารถเขียนแสดงในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\hat{S} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

⁵ Paitoon Poonsawatt and Punyawee Jamjareekul, "Improving Dual-Hop Amplify-and-Forward Cooperative Mobile Network Based on Path selection and STBC with Pre-Coding Scheme" Proceeding of 2011 Eighth International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE), May 2011, Mahidol University Thailand, pp 409-413.

การส่งสัญญาณแต่ละครั้ง หรือการส่งสัญญาณหนึ่งบล็อกจะใช้เวลาในการส่ง 2 คาบเวลาต่อเนื่องกัน ในการส่งของคาบเวลาแรกหรือที่เวลา t สัญญาณที่ส่งออกจากสายอากาศต้นที่ 1 และต้นที่ 2 ได้แก่ s_1 และ s_2 ตามลำดับ ส่วนในคาบเวลาที่ 2 หรือที่เวลา $t+T$ สัญญาณที่ส่งออกจากสายอากาศที่ 1 และ 2 ได้แก่ $-s_2^*$ และ s_1^* ตามลำดับ ทั้งนี้ s_i^* คือ ค่าเชิงซ้อนสังยุคของ s_i จะเห็นว่ารูปแบบการเขียนเมตริกซ์ S นั้นกำหนดให้ หมายเลขแถวหมายถึงสายอากาศที่จะส่ง และ หมายเลขทางคอลัมน์หมายถึงเวลา



รูปที่ 2.8 โครงสร้างการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti

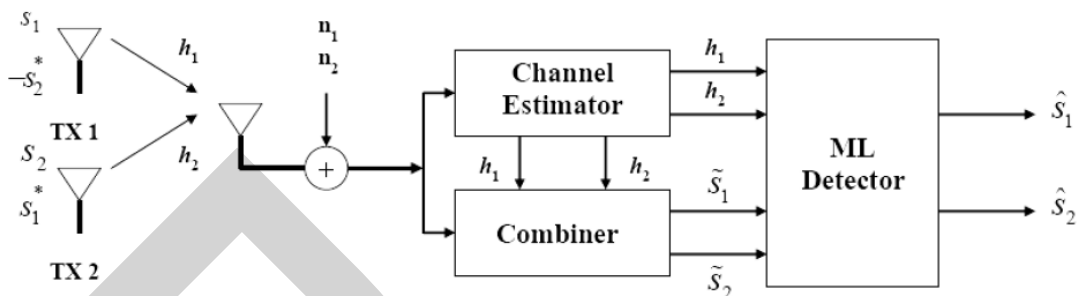
คุณสมบัติที่น่าสนใจประการหนึ่งของรหัสแบบ Alamouti คือ การที่เราสามารถกำหนดหรือเลือกชนิดของการมอดูเลตแบบใดก็ได้ เช่น M-PSK, M-QAM หรือ M-ASK เป็นต้น ดังนั้นเราจึงสามารถกำหนดจำนวนบิตข้อมูลที่จะส่ง ในแต่ละครั้งได้ตามต้องการ ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการส่งข้อมูลให้ได้ 1 บิต ต่อหนึ่งคาบเวลา ก็ใช้การมอดูเลตแบบ 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

2.5.2 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 คือ สัญญาณรบกวน AWGN ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มเชิงซ้อนแบบเกาส์ ที่เป็นอิสระต่อกัน มีค่าเฉลี่ย(mean) เท่ากับศูนย์ และค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power Spectral Density) เท่ากับ N_0

ในขั้นตอนการถอดรหัสเชิงปริภูมิ-เวลา ให้นำสัญญาณ r_1 และ r_2 ที่รับได้ไปใช้ในการถอดรหัสเพื่อตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ s_1 และ s_2 โดยใช้ วิธีการพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นจริงสูงสุด (Maximum likelihood decoder) ซึ่งทำได้ โดยการกำหนดฟังก์ชันต้นทุน ให้อยู่ในรูปของระยะยูคลิเดียน (Euclidean distance) ระหว่างคู่สัญญาณที่รับได้ (r_1, r_2) กับคู่สัญลักษณ์ (s_1, s_2) ทำการคำนวณหาค่า ฟังก์ชันต้นทุนของคู่สัญลักษณ์ (s_1, s_2) ที่เป็นไปได้ทั้งหมด ให้ครบทุกรูปแบบ จากนั้นให้ตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ โดยเลือกคู่สัญลักษณ์ที่มีค่าฟังก์ชันต้นทุนต่ำสุด หรือเทียบเท่ากับการมีระยะยูคลิเดียนต่ำสุด (Minimum Euclidean Distance) กระบวนการตัดสินใจเลือกนั้นสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

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

สังเกตว่า ในขั้นตอนการคำนวณนี้ จะทำได้ก็ต่อเมื่อภาครับทราบค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ h_1 และ h_2 ที่ถูกต้องสมบูรณ์ ในทางปฏิบัติ ค่าดังกล่าวนี้จะได้จากการประมาณค่าด้วยวงจรรแยกต่างหาก

2.5.3 ข้อดีของรหัสปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti

Alamouti ได้ขยายผลของวิธีการนี้ออกไป เป็นกรณีของ 2 เสาอากาศส่ง และ หลากหลาย (M_R) เสาอากาศรับ และได้แสดงผลวิธีการนั้นโดยได้กำหนด จำนวนของไดเวอร์ซิตี เป็น $2 M_R$ ซึ่งลักษณะของวิธีการนี้ได้รวมถึง

- 1) ไม่ต้องมีการตอบกลับ จากเครื่องรับมายังเครื่องส่ง ซึ่งเป็นที่ต้องการสำหรับระบบ เพื่อที่จะได้ไดเวอร์ซิตีทางด้านส่งสูงสุด
- 2) ไม่ต้องมีการขยายแบนด์วิดท์ (เพราะมีมากพอต่อการใช้ช่วงปริภูมิ ผ่านทาง สายอากาศหลายเสา ไม่ใช่ ในเวลา หรือ ในความถี่)
- 3) กระบวนการถอดรหัสมีความซับซ้อนต่ำ
- 4) ให้ประสิทธิภาพเสมือนกับ วิธีการรวมสัญญาณจากหลายทิศทางแบบปรับค่า SNR ให้สูงสุด (MRC) ถ้าผลรวมของการแผ่กระจายกำลังงาน เป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับการใช้แบบ MRC เป็นเพราะว่า ถ้ากำลังงานส่งเป็นค่าคงที่ วิธีการนี้จะแยกกว่า 3 dB เพราะว่าการส่งจะถูกแบ่ง ครึ่งให้กับเสาอากาศส่งทั้งสองด้าน
- 5) ไม่ต้องมีการออกแบบใหม่สำหรับระบบเดิมที่มีอยู่ เพียงแค่รวบรวมระบบเข้ากับ วิธีการไดเวอร์ซิตีนี้ จึงเป็นวิธีที่นิยมอย่างมาก สำหรับการทำให้คุณภาพการเชื่อมต่อดีขึ้น บน พื้นฐานของเทคนิคเสาอากาศส่งคู่ ซึ่งไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนระบบมากมาย

2.6 เทคนิคการรวมสัญญาณ⁶

เนื่องจากเครื่องรับในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ มีการรับสัญญาณชุดเดียวกันทั้ง จากเครื่องส่งและ Relay ในแต่ละช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการรวมสัญญาณ ทางด้านเครื่องรับ เพื่อให้ได้สัญญาณรวมที่ดีที่สุดไปใช้งาน พิจารณาระบบสื่อสารไร้สายที่มีการ รับสัญญาณที่มาจากช่องสัญญาณที่แตกต่างกันจำนวน N ช่อง สัญญาณทั้งหมดนี้สามารถนำมา รวมกันแบบเชิงเส้น (linear combination) เนื่องจากระบบที่ทำการศึกษาเป็นระบบที่มีคุณสมบัติเป็น เชิงเส้น โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการรวมแต่ละช่องสัญญาณคือ a_j แสดงได้ดังสมการที่ 2.11

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

⁶ ชาญวิทย์ ไขบัว. (2550). การเพิ่มประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูล ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือโดยใช้การเข้ารหัสเชิง ปริภูมิ-เวลา. วิทยานิพนธ์ครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าพระนครเหนือ.

โดยกำหนดให้

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

และ

$x_j(t)$ คือช่องสัญญาณที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูล

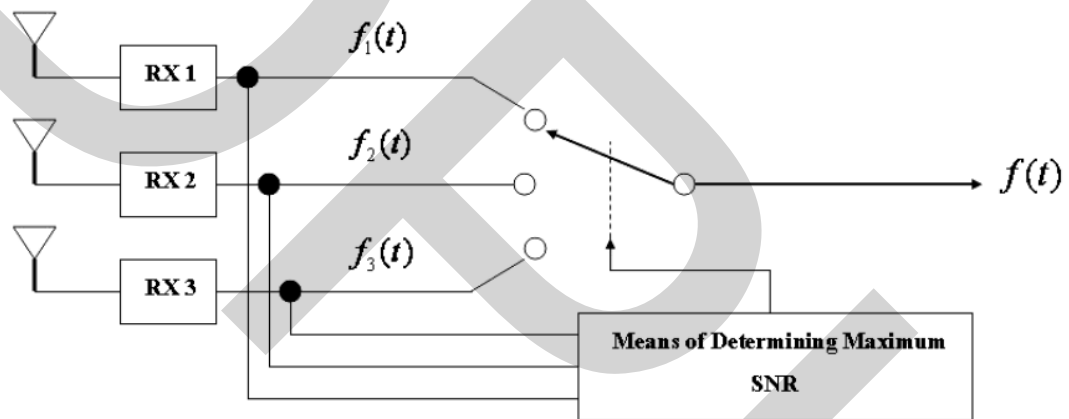
$m(t)$ คือข้อมูลที่ต้องการส่ง

a_j คือ ค่าสัมประสิทธิ์การรวมของแต่ละช่องสัญญาณ

$n_j(t)$ คือสัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง

ซึ่งเทคนิคการรวมสัญญาณมีดังนี้

2.6.1 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือก (Selection combining: SC)



รูปที่ 2.10 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือก

สำหรับเทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือกจะทำการรวมสัญญาณ โดยเลือกสัญญาณที่รับได้ จากช่องสัญญาณที่ดีที่สุดเพียง 1 สัญญาณเท่านั้น ซึ่งจะพิจารณาเลือกสัญญาณที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุดของสัญญาณที่รับมาทั้งหมด และจากสมการที่ 2.11 กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณ ได้ตามสมการที่ 2.12

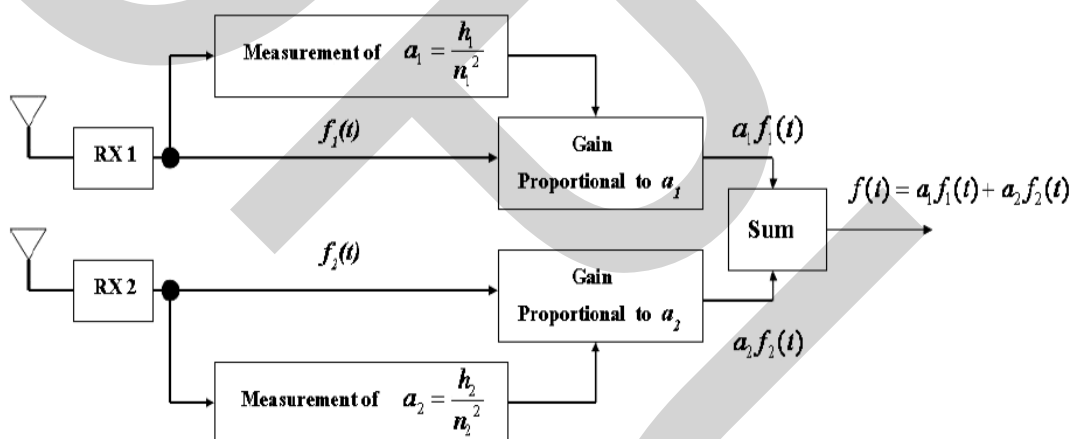
$$a_j(t) = \begin{cases} 1, & \text{for } j = k \\ 0, & \text{for } j \neq k \end{cases} \quad (2.12)$$

โดยที่ k คือดัชนีสำหรับสัญญาณที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุด

2.6.2 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด (Maximal-ratio combining: MRC)

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด เป็นการรวมสัญญาณโดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณให้มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด หลังจากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้ทั้งหมดบวกกัน ซึ่งจะส่งผลให้ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณรวมทั้งหมด มีค่าสูงที่สุดและสามารถปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณได้ดังนี้

$$a_j(t) = \frac{x_j}{n_j} \quad (2.13)$$

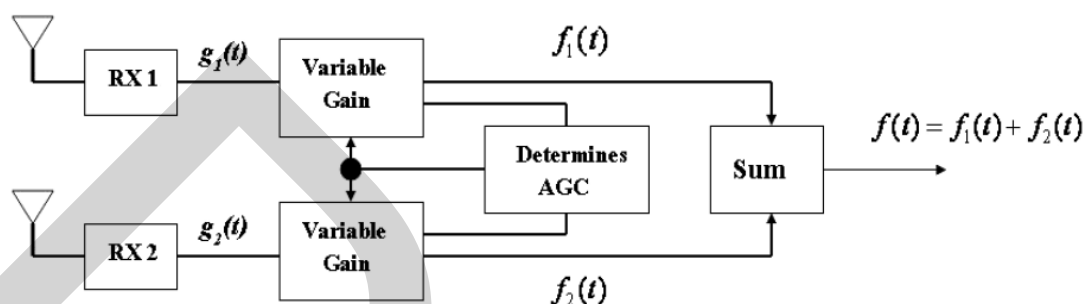


รูปที่ 2.11 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด

โดยเทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด จะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเฉลี่ย ตามสมการที่ 2.14

$$\bar{\gamma}_t = \sum_{j=1}^N \gamma_j \quad (2.14)$$

2.6.3 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (Equal gain combining: EGC)

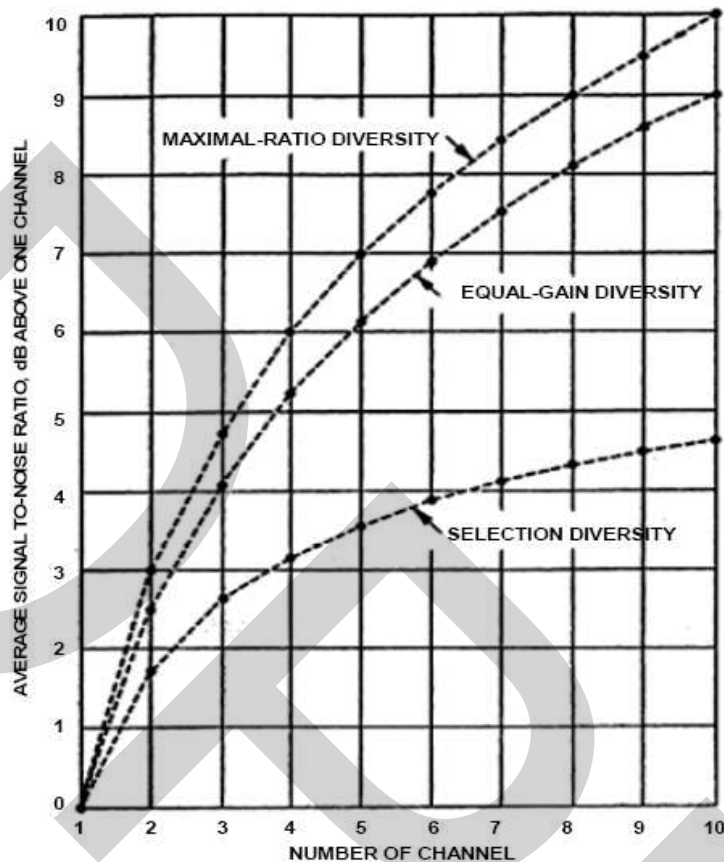


รูปที่ 2.12 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน จะทำการรวมสัญญาณโดยปรับค่าของอัตราขยาย (Gain) ของแต่ละช่องสัญญาณ เพื่อให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของทุกช่องสัญญาณเท่ากันหมด จากนั้นนำสัญญาณทั้งหมดรวมกัน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณรวมเพิ่มขึ้น ในอัตราส่วนเท่ากับจำนวนของช่องสัญญาณทางด้านเครื่องรับ

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 เทคนิค ดังรูปที่ 2.13 สามารถสรุปได้ว่า เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด (Maximal-ratio combining: MRC) เป็นเทคนิคที่ทำให้ผลรวมของสัญญาณดีที่สุด เมื่อเทียบกับการรวมสัญญาณแบบเลือกและการรวมสัญญาณแบบให้อัตราขยายเท่ากัน

2.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

2.7.1 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (Bit Error Rate : BER)

อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) หรืออัตราความน่าจะเป็นของบิตที่ผิดพลาด (Bit Error Probability: BEP) คือ อัตราส่วนของจำนวนบิตข้อมูล ที่ทางภากรับตัดสินผิดพลาดเมื่อเทียบกับจำนวนบิตข้อมูลทั้งหมดที่ถูกส่งมาจากภาคส่ง เป็นค่าพารามิเตอร์สำคัญในการวัด

สมรรถนะของระบบ เป็นค่าที่แสดงถึงค่าความถูกต้องของการรับ/ส่งข้อมูลโดยตรง อัตราความผิดพลาดบิตเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่สนใจในสถานะต่าง ๆ เช่น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน หรือเมื่อจำนวนผู้ใช้เปลี่ยนไป เป็นต้น

2.7.2 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio : SNR)

ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) คือ อัตราส่วนกำลังของสัญญาณเมื่อเทียบกับกำลังของสัญญาณรบกวน ส่วนใหญ่ค่ากำลังของสัญญาณจะมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่ากำลังของสัญญาณรบกวน ดังนั้นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน จึงนิยมวัดกันในหน่วยเดซิเบล (Decibel: dB) โดย ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสำหรับผู้ใช้งานที่ ในค่าหน่วยของเดซิเบล สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.16⁷

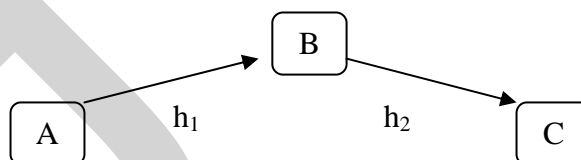
$$SNR = \frac{|h|^2 P}{N_0 W} = \frac{d^{-\alpha} P}{N_0 W} \quad (2.16)$$

เมื่อ

$ h ^2$	คือสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณ
P	คือกำลังส่งโดยเฉลี่ยจากแต่ละโหนด
N_0	คือค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power Spectrum Density) ของสัญญาณรบกวน
W	คือแบนด์วิธการส่งสัญญาณ
$d^{-\alpha}$	คือ ค่า Path Loss และ α เป็น Path Loss Exponent

⁷ กำพล วรรดิษฐ์. (2552). พฤติกรรมสัญญาณขาดหายของแผนการสัญญาณซ้ำแบบร่วมมือพร้อมด้วยการเลือกกรีเลซ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พิสูจน์สมการการเลือกเส้นทางด้วยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนแบบสองฮอป
โดยการใช้การส่งสัญญาณแบบสองฮอป⁸



รูปที่ 2.14 โมเดลการส่งผ่านช่องสัญญาณสื่อสารไร้สายแบบสองฮอป (ไม่มีเส้นทางตรงระหว่างแหล่งกำเนิดถึงปลายทาง)

ตามรูปที่ 2.14 โดยที่ โหนด A เป็นแหล่งกำเนิดส่งสัญญาณ S ใช้กำลังส่งเฉลี่ยปกติผ่านโหนด B ที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์หรือตัวส่งผ่าน และโหนด C เป็นผู้รับหรือปลายทาง

เมื่อ

r_B และ r_C สัญญาณที่รับได้ที่โหนด B และโหนด C ตามลำดับ

h_1 เป็นช่องสัญญาณของการจางหายระหว่างโหนด A และโหนด B

h_2 เป็นช่องสัญญาณของการจางหายระหว่างโหนด B และโหนด C

n_1 และ n_2 เป็นสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN) ของช่องสัญญาณ

ระหว่างโหนด A ถึงโหนด B และ โหนด B ถึงโหนด C ตามลำดับ ที่มีความหนาแน่น

สเปกตรัมกำลังของสัญญาณรบกวน (Power Spectrum Density) เท่ากับ N_0

G เป็นอัตราการขยายสัญญาณของรีเลย์ที่โหนด B

โดยที่กำลังส่งโดยเฉลี่ยจากแต่ละโหนด (P) มีค่าเท่ากัน จะได้ว่า สัญญาณที่รับได้ที่โหนด B สามารถเขียนได้เป็น

$$r_B = h_1 S + n_1 \quad (2.17)$$

และสัญญาณที่รับได้ที่โหนด C ปลายทางสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} r_C &= Gh_2 r_B + n_2 \\ &= Gh_2 (h_1 S + n_1) + n_2 \\ &= Gh_2 h_1 S + Gh_2 n_1 + n_2 \end{aligned} \quad (2.18)$$

⁸ Mazen O. Hasna and Mohamed-Slim Alouini, "Performance Analysis of Two-Hop Relayed Transmissions over Rayleigh Fading Channels", Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings. VTC 2002-Fall. 2002 IEEE 56th, Vol.4, pp.1992-1996.

ดังนั้นอัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวน สามารถเขียนได้เป็น

$$SNR_{eqv} = \frac{G^2 \frac{|h_1^2|}{N_0} \frac{|h_2^2|}{N_0}}{G^2 \frac{|h_2^2|}{N_0} + \frac{1}{N_0}} ; \text{ โดยที่ } G^2 = \frac{1}{|h_1^2| + N_0} \quad (2.19)$$

นำ G^2 หารทั้งเศษและส่วน ;

$$SNR_{eqv} = \frac{\frac{|h_1^2|}{N_0} \frac{|h_2^2|}{N_0}}{\frac{|h_2^2|}{N_0} + \frac{1}{G^2 N_0}} \quad (2.20)$$

แทนค่า G^2 ;

$$SNR_{eqv} = \frac{\frac{|h_1^2|}{N_0} \frac{|h_2^2|}{N_0}}{\frac{|h_2^2|}{N_0} + \frac{|h_1^2|}{N_0} + \frac{N_0}{N_0}} \quad (2.21)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.16 สามารถเขียนได้เป็น

$$SNR_{eqv} = \frac{SNR_1 SNR_2}{SNR_1 + SNR_2 + 1} \quad (2.22)$$

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

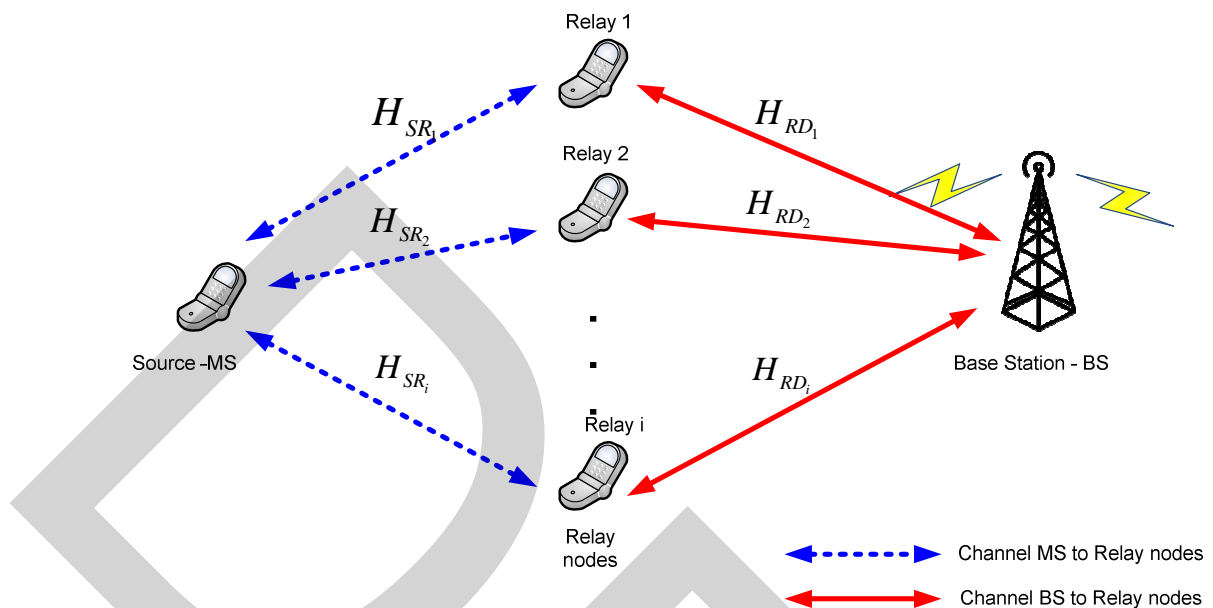
3.1 การออกแบบของระบบที่นำเสนอ

ระบบสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่แบบร่วมมือที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยจำนวนผู้ใช้งานในโครงข่ายทั้งหมด 5 คนและมีสถานีฐาน (Base station) 1 เครื่องโดยกำหนดให้ผู้ใช้งานคนที่ 1 ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง (Source) ผู้ใช้งานอื่นๆทำหน้าที่เป็นรีเลย์ (Relay) ซึ่งในการส่งต่อสัญญาณจากรีเลย์ไปยังเครื่องรับจะพิจารณาการส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward ผ่านช่องสัญญาณที่มีการจางหายแนวราบแบบเรย์ลี (Rayleigh fading) ในการสื่อสารแบบร่วมนี้ซึ่งมีการมอดูเลตแบบ BPSK

โดยกำหนดให้แต่ละโหนดมีสายอากาศสำหรับรับ/ส่งสัญญาณเพียงสายเดียว (Single Antenna) และผู้ใช้งานคนที่ 1 ที่เป็นเครื่องส่งที่อยู่นอกขอบเขตสัญญาณของสถานีฐานแต่สามารถตรวจจับความแรงของสัญญาณและเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานอื่น ๆ ที่เป็นรีเลย์จำนวน 4 โหนดได้จากข้อมูลสถานะช่องสัญญาณ (Channel State Information : CSI) และรีเลย์แต่ละโหนดได้รับข้อมูลสถานะช่องสัญญาณจากสถานีฐานเช่นเดียวกัน

สำหรับช่องสัญญาณแบ่งเป็นสองช่วง ได้แก่ ช่องสัญญาณจากผู้ใช้งานไปยังรีเลย์ (Source-to-Relay) และช่องสัญญาณจากรีเลย์ไปยังสถานีฐาน (Relay-to-Base Station) เมื่อ $H_{SR,i}$ เป็นเมทริกซ์คุณสมบัติของช่องสัญญาณจากแหล่งกำเนิดถึงรีเลย์ตัวที่ i และ $H_{RD,i}$ เป็นเมทริกซ์คุณสมบัติของช่องสัญญาณจากรีเลย์ตัวที่ i ถึงสถานีฐาน โดยในช่องสัญญาณแต่ละช่วงมีสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN) ที่มีความหนาแน่นของกำลังส่ง (PSD) เท่ากับ N_0 ตามรูปที่ 3.1

ในการทวนสัญญาณ ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์ (Relay) จะทำการขยายสัญญาณที่ได้รับได้ให้มีขนาดแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนดแล้วใช้การส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับปลายทางแบบ Amplify-and-Forward (AF) และที่สถานีฐานจะมีการรวมลำดับของบิต (Combine bit sequence) และจากหลายๆ รีเลย์โดยใช้วิธี Maximum Likelihood Detector (ML) เนื่องจากลำดับการส่งผ่านในแต่ละเส้นทางเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 3.1 การส่งสัญญาณผ่านรีเลย์แบบ 2-hop ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ

3.2 ขั้นตอนการส่งสัญญาณระหว่างโหนดใดๆในระบบเครือข่ายเคลื่อนที่

ก่อนที่จะมีการเลือกเส้นทางระหว่างแต่ละโหนดจะมีการส่งสัญญาณเพื่อรับรู้ระดับของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio : SNR) ตามรูปที่ 3.2 และ 3.3 โดยทำการปรับปรุงมาจาก IEEE 802.16j MMR Network Protocol¹ เพื่อให้สอดคล้องและสามารถใช้งานได้กับระบบเครือข่ายเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 : สถานีฐานจะกระจายสัญญาณ โดยการส่งแพ็คเกจอ้างอิง (Reference packet) ไปยังผู้ใช้งานที่เป็นรีเลย์แต่ละโหนดที่อยู่ในรัศมีพื้นที่ครอบคลุม และรีเลย์ที่อยู่ในรัศมีการส่งสัญญาณจะรับแพ็คเกจอ้างอิงและตรวจจับค่าข้อมูลสถานะช่องสัญญาณ (Channel State Information, CSI) ที่ได้จากสถานีฐาน

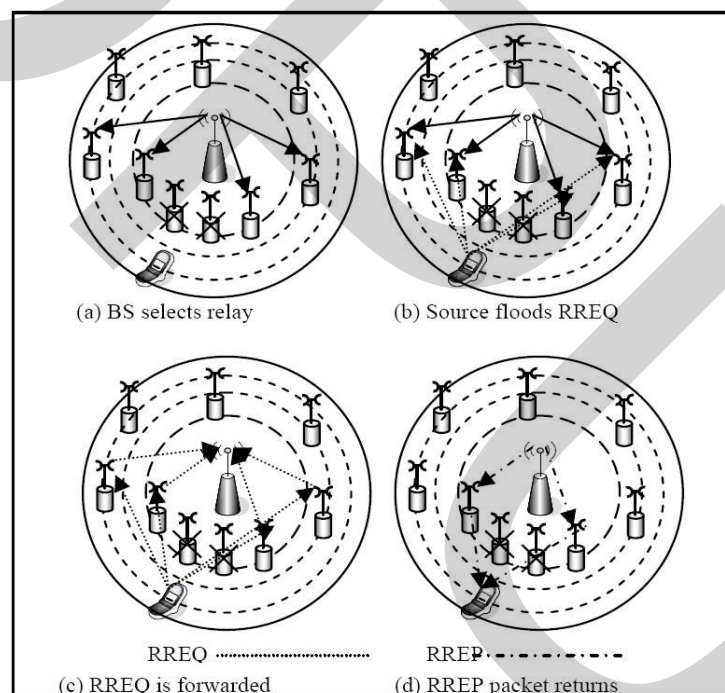
ขั้นที่ 2 : ผู้ใช้งานที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง (Source) ที่อยู่นอกรัศมีการส่งสัญญาณของสถานีฐานจะร้องขอการเชื่อมต่อไปยังสถานีฐาน โดยผ่านรีเลย์โหนดที่สามารถใช้งานได้จากการตรวจจับค่า CSI ที่ได้จากรีเลย์โหนดอื่นและทำการกระจายแพ็คเกจการร้องขอรีเลย์ (Relay request

¹ Bongkyoung Kwon, Yusun Chang, and John A. Copeland, "A Network Entry Protocol and an OFDMA Symbol Allocation Scheme for Non-Transparent Relay Stations in IEEE 802.16j MMR Networks," IEEE 2008.

packet : RREQ) ไปยังรีเลย์โหนดอื่นๆ และเมื่อรีเลย์โหนดได้รับแพคเกจการร้องขอรีเลย์แล้วจะส่งต่อไปยังสถานีฐาน

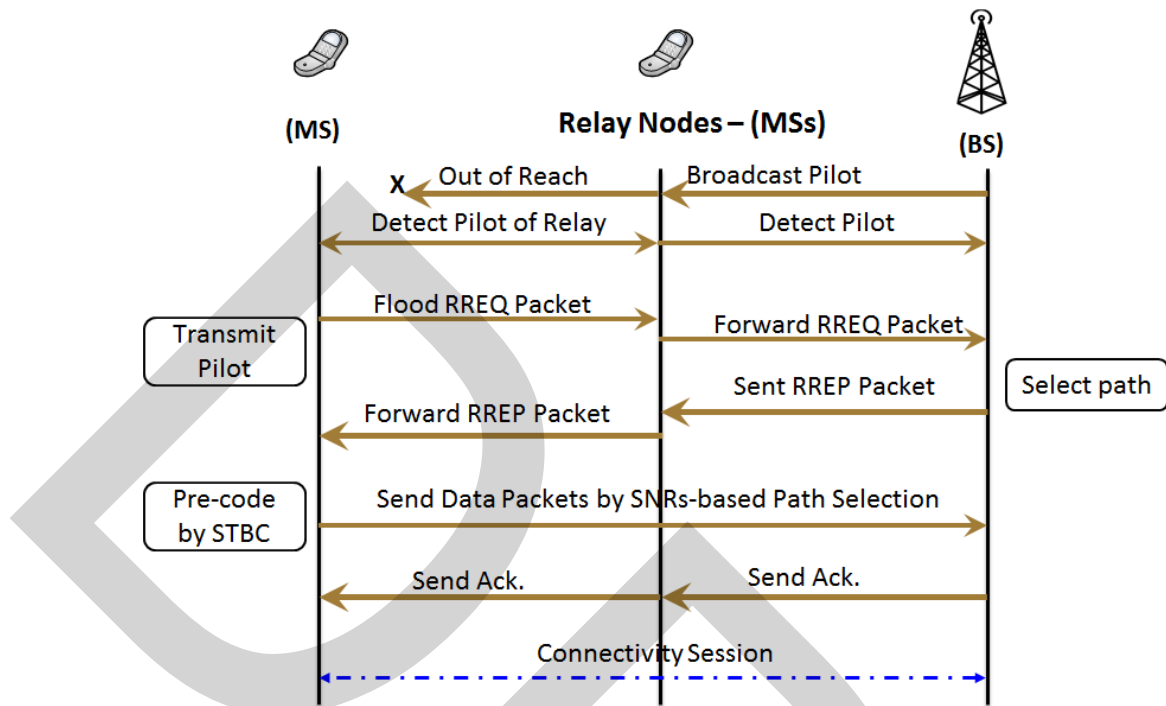
ขั้นที่ 3 : เมื่อสถานีฐานได้รับแพคเกจการร้องขอรีเลย์แล้วสถานีฐานจะทำการวัดคุณสมบัติของช่องสัญญาณจากทุกเส้นทาง และจะส่งแพคเกจการตอบรับเส้นทาง(Route reply packet : RREP) ไปยังผู้ใช้งานที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง โดยผ่านทางรีเลย์โหนดที่ส่งมาให้

ขั้นที่ 4 : หลังจากผู้ใช้งานที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง ได้รับแพคเกจการตอบรับรีเลย์จากสถานีฐานแล้ว จะทำการคำนวณการเลือกเส้นทางที่สถานีฐานส่งมาให้และส่งแพคเกจข้อมูล (Data packet) ไปยังสถานีฐานได้โดยตรงผ่านเส้นทางที่มีลำดับความแรงของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(SNR) สองลำดับแรก และสถานีฐานจะส่งแพคเกจการรับรู้ (Acknowledgement packet) หรืออนุญาตให้ทำการเชื่อมต่อกลับมาเพื่อเริ่มการส่งข้อมูล



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการส่งสัญญาณเพื่อหาเส้นทางที่ดีที่สุดในการส่งข้อมูล²

²Kaiser, M.S., Khan, I., Adachi, F. and Ahmed, K.M, "Fuzzy Logic Based Relay Search Algorithm for Cooperative Systems," Communication Systems and Networks and Workshops, 2009, pp. 1-7.



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการส่งสัญญาณระหว่างโหนดใดๆ ในระบบเครือข่ายเคลื่อนที่

ตามรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าระหว่างสถานีฐานถึงรีเลย์โหนด(BS-Relays : Downlink) คือมีการรับรู้สัญญาณซึ่งกันและกันได้จาก Clear-to-send โดยที่รีเลย์แต่ละตัวจะทำการอัปเดตข้อมูลกับสถานีฐานจากข้อมูลสถานะช่องสัญญาณ (CSI) อยู่ตลอดเวลา ทำให้สถานีฐานรู้ข้อมูลของช่องสัญญาณ

และระหว่างแหล่งกำเนิดถึงรีเลย์โหนด(Source-Relays : Uplink) มีการรับรู้สัญญาณซึ่งกันและกันได้จาก Ready-to-send โดยแหล่งกำเนิดสามารถรับรู้รีเลย์แต่ละตัวจากข้อมูลสถานะช่องสัญญาณ (CSI) และเมื่อต้องการส่งข้อมูลแหล่งกำเนิดจะทำการส่งแพ็คเกจการร้องขอเส้นทาง (RREQ) ไปที่รีเลย์และรีเลย์จะทำการส่งการร้องขอไปยังสถานีฐาน ซึ่งสถานีฐานจะทำการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์หาเส้นทางที่ดีที่สุดสองเส้นทางจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) แล้วจึงทำการส่งเส้นทางที่เลือกกลับไปให้แหล่งกำเนิดผ่านแพ็คเกจการตอบรับเส้นทาง (RREP) จากนั้นแหล่งกำเนิดที่ทำการ Pre-coding แบบ STBC แล้วจึงจะทำการส่งข้อมูลตามเส้นทางที่เลือก ซึ่งกำหนดให้แหล่งกำเนิดจะทำการเลือกเส้นทางทุก ๆ การส่งข้อมูล 10 kbit

3.3 หลักการพิจารณาเลือกเส้นทางด้วยค่า SNR

การพิจารณาเลือกเส้นทางในการส่งผ่านข้อมูล (Path Selection) ด้วยการพิจารณาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(SNR) ที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้ จะเริ่มต้นจากการสุ่มระยะทาง (d) ระหว่างแหล่งกำเนิดไปยังรีเลย์ ($MS \rightarrow R_i$) และจากรีเลย์ไปยังสถานีฐาน ($R_i \rightarrow BS$) และพิจารณารีเลย์ในโครงข่ายไร้สายของระบบที่นำเสนอมีจำนวน i ตัว โดยสมการที่ใช้ในการหาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(SNR) ของแต่ละเส้นทางแบบสองฮอปสามารถหาได้จากสมการที่ 3.1³

$$SNR_{two-hop,i} = \frac{SNR_{SR,i} SNR_{RD,i}}{1 + SNR_{SR,i} + SNR_{RD,i}} \quad (3.1)$$

โดยค่า SNR ในสมการที่ 3.1 มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณ $|h|^2$, กำลังส่งโดยเฉลี่ยจากแต่ละโหนด(P), ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power Spectrum Density) ของสัญญาณรบกวน N_0 , แบนด์วิดธ์การส่งสัญญาณ (W), และ Path Loss ($d^{-\alpha}$), ดังแสดงในสมการที่ 3.2⁴

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

ซึ่งหลังจากได้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(SNR)ของทุกเส้นทางแล้วนำมาจัดเรียงลำดับตามสมการที่ 3.2 เพื่อเลือกค่า SNR ที่ดีที่สุดสองค่าเพื่อใช้ในการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลที่มีการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาต่อไป

$$Path_{sel} = \arg \max_i (SNR_{two-hop,1}, \dots, SNR_{two-hop,i}) \quad (3.3)$$

³ Kaiser, M.S., Khan, I., Adachi, F. and Ahmed, K.M, "Fuzzy Logic Based Relay Search Algorithm for Cooperative Systems," Communication Systems and Networks and Workshops, 2009, pp. 1-7.

⁴ กำพลวรดิษฐ์. (2552). พฤติกรรมสัญญาณขาดหายของแผนการสัญญาณซ้ำแบบร่วมมือพร้อมด้วยการเลือกกรีเลย์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

3.4 การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบบล็อก (Space-Time Block Coding: STBC)

โดยทั่วไปในระบบการส่งสัญญาณจะต้องมีสองสายอากาศเพื่อที่จะใช้การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา (2,2) หรือเรียกว่า Alamouti's STBC และโดย Ho-Jung An⁵ และไพทูนย์ พูลสวัสดิ์⁶ ได้เสนอวิธีการเข้ารหัสก่อนการส่ง (Pre-coding) สำหรับการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา ซึ่งทำให้สามารถใช้สายอากาศเพียงเสาเดียวในการส่งสัญญาณ ทั้งยังสามารถใช้กระบวนการนี้ในเครื่องส่ง (Source node) เพื่อเป็นการสื่อสารแบบ Up-link

ลำดับของบิตจากเครื่องส่งในรูปของ Alamouti's STBC แสดงในสมการที่ 3.4

$$\begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

ซึ่งลำดับแรกของการเข้ารหัสก่อนการส่ง (Pre-coding) คือการนำค่าช่องสัญญาณ H_i ไปคูณและรวมกันเป็นสัญลักษณ์ (Symbol, z_i) โดยมีลำดับสัญลักษณ์ในการส่งในสมการที่ 3.5 – 3.8 โดยที่ H_i^+ เป็นส่วนกลับ (Pseudo inverse) ของ H_i และ $H^+ = (H^H H)^{-1} H^H$ และ $(.)^*$ เป็นการสังยุคของจำนวนเชิงซ้อน

$$z_1 = H_1^+ s_1 + H_2^+ s_2 \quad (3.5)$$

$$z_2 = -H_1^+ s_2^* + H_2^+ s_1^* \quad (3.6)$$

$$z_3 = H_3^+ s_1 + H_4^+ s_2 \quad (3.7)$$

$$z_4 = -H_3^+ s_2^* + H_4^+ s_1^* \quad (3.8)$$

วิธีการส่งต่อสัญญาณจากกรีเลย์ไปยังสถานีฐานใช้วิธีการส่งแบบ Amplify-and-Forward (AF) โดยกรีเลย์จะรับข้อมูลตามลำดับจากแหล่งกำเนิด แล้วทำการขยายและส่งต่อไปยังสถานีฐาน และสถานีฐานจะทำการรวมข้อมูลที่ได้รับตามลำดับจากกรีเลย์แต่ละตัว

⁵ Ho-Jung An, Jee-Hoon Kim, and Hyoung-Kyu Song, "Cooperative Transmission Scheme to Increase Gain by STBC," Engineering Letters, 2007.

⁶ Paitoon Poonsawatt and Punyawit Jamjarekul, "Improving Dual-Hop Amplify-and-Forward Cooperative Mobile Network Based on Path selection and STBC with Pre-Coding Scheme" Proceeding of 2011 Eighth International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE), May 2011, Mahidol University Thailand, pp 409-413.

พิจารณาที่รีเลย์คู่ที่ถูกเลือก (Selected pair of relays) ในช่วงเวลาแรก (T1) :

เครื่องส่ง(Source) จะทำการส่งสัญญาณ $z_1 = H_1^+ s_1 + H_2^+ s_2$ ผ่านช่องสัญญาณ H_1 และช่องสัญญาณ H_2 ไปยังรีเลย์ที่ถูกเลือกและสัญญาณที่ส่งออกมาจากเครื่องส่งและรับได้โดยรีเลย์ตัวที่ 1 และรีเลย์ตัวที่ 2 แสดงในสมการที่ 3.9 – 3.10 โดยที่ N คือระยะเวลาของสัญลักษณ์ (Symbol duration) , $m = 0, 1, \dots, N-1$ เป็นลำดับเวลาในการส่งแต่ละครั้ง และ r_{S,R_i} เป็นสัญญาณข้อมูลบิตแต่ละลำดับที่จากแหล่งกำเนิดที่รีเลย์แต่ละตัวรับได้

$$\begin{aligned} r_{S,R_1} [m] &= H_1 z_1 + n_1 \\ &= H_1 (H_1^+ s_1 + H_2^+ s_2) + n_1 \\ &= s_1 + H_1 H_2^+ s_2 + n_1 \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} r_{S,R_2} [m] &= H_2 z_1 + n_2 \\ &= H_2 (H_1^+ s_1 + H_2^+ s_2) + n_2 \\ &= H_1^+ H_2 s_1 + s_2 + n_2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

สัญญาณที่รับได้ที่สถานีฐาน (Destination, BS) จะรับได้จากรีเลย์ตัวที่ 1 และรีเลย์ตัวที่ 2 ผ่านช่องสัญญาณ H_5 และช่องสัญญาณ H_6 แสดงในสมการที่ 3.11 – 3.14 โดยที่ β_{R_i} เป็นอัตราการขยายสัญญาณที่รีเลย์แต่ละตัวและ $r_{R_i,D}$ เป็นสัญญาณข้อมูลบิตแต่ละลำดับที่จากรีเลย์แต่ละตัวที่สถานีฐานรับได้

$$r_{R_1,D} [m + N] = H_5 \beta_{R_1} r_{S,R_1} [m] + n_5 \quad (3.11)$$

แทนค่าสมการ 3.9 ในสมการที่ 3.11 จะได้

$$\begin{aligned} r_{R_1,D} [m + N] &= \beta_{R_1} H_5 (s_1 + H_1 H_2^+ s_2 + n_1) + n_5 \\ &= \beta_{R_1} H_5 s_1 + \beta_{R_1} H_5 H_1 H_2^+ s_2 + n_5' \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$r_{R_2,D} [m + N] = H_6 \beta_{R_2} r_{S,R_2} [m] + n_6 \quad (3.13)$$

แทนค่าสมการ 3.10 ในสมการที่ 3.13 จะได้

$$\begin{aligned} r_{R_2,D} [m + N] &= \beta_{R_2} H_6 (H_1^+ H_2 s_1 + s_2 + n_2) + n_6 \\ &= \beta_{R_2} H_6 H_1^+ H_2 s_1 + \beta_{R_2} H_6 s_2 + n_6' \end{aligned} \quad (3.14)$$

พิจารณาที่รีเลย์คู่ที่ถูกเลือก (Selected pair of relays) ในช่วงเวลาแรก (T2) :

เครื่องส่ง (Source) จะทำการส่งสัญญาณ $z_2 = -H_1^+ s_2^* + H_2^+ s_1^*$ ผ่านช่องสัญญาณ H_1 และช่องสัญญาณ H_2 ไปยังรีเลย์ที่ถูกเลือกและสัญญาณที่ส่งออกมาจากเครื่องส่งและรับได้โดยรีเลย์ตัวที่ 1 และรีเลย์ตัวที่ 2 แสดงในสมการที่ 3.15 – 3.16

$$r_{S,R_1} [m + 2N] = H_1 z_2 + n_1 \quad (3.15)$$

$$r_{S,R_2} [m + 2N] = H_2 z_2 + n_2 \quad (3.16)$$

สัญญาณที่รับได้ที่สถานีฐาน (Destination, BS) จะรับได้จากรีเลย์ตัวที่ 1 และรีเลย์ตัวที่ 2 ผ่านช่องสัญญาณ H_5 และช่องสัญญาณ H_6 แสดงในสมการที่ 3.17 – 3.18

$$r_{R_1,D} [m + 3N] = H_5 \beta_{R_1} r_{S,R_1} [m + 2N] + n_5 \quad (3.17)$$

$$r_{R_2,D} [m + 3N] = H_6 \beta_{R_2} r_{S,R_2} [m + 2N] + n_6 \quad (3.18)$$

และสัญญาณที่รับได้ที่สถานีฐาน (Destination, BS) จะรับได้จากรีเลย์ตัวที่ 3 และรีเลย์ตัวที่ 4 ผ่านช่องสัญญาณ H_7 และช่องสัญญาณ H_8 แสดงในสมการที่ 3.19 – 3.20

$$r_{R_3,D} [m + 3N] = H_7 \beta_{R_3} r_{S,R_3} [m + 2N] + n_7 \quad (3.19)$$

$$r_{R_4,D} [m + 3N] = H_8 \beta_{R_4} r_{S,R_4} [m + 2N] + n_8 \quad (3.20)$$

เพื่อให้ง่ายต่อการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ สามารถสมมติตัวแปรตามสมการที่ 3.21 – 3.24

$$G = H_1 H_2^+ \quad (3.21)$$

$$K = H_2 H_1^+ \quad (3.22)$$

$$W = H_3 H_4^+ \quad (3.23)$$

$$Y = H_4 H_3^+ \quad (3.24)$$

ที่สถานีฐานหรือปลายทางลำดับของบิตสัญญาณที่รับได้จากทั้งสี่รีเลย์สามารถนำมารวมกันแบบ Maximum Likelihood (ML) โดยลำดับของบิตที่รวมกันได้ (Combined bit sequence) จากรีเลย์ตัวที่ 1 เป็นไปตามสมการที่ 3.25 – 3.26

$$\tilde{c}_1 = H_5^* r_{R_1,D} (m + N) + H_5 G r_{R_1,D}^* (m + 3N) \quad (3.25)$$

$$\tilde{c}_2 = (H_5 G)^* r_{R_1,D} (m + N) - H_5 r_{R_1,D}^* (m + 3N) \quad (3.26)$$

ลำดับของบิตที่รวมกันได้ (Combined bit sequence) จากกริเลขตัวที่ 2 เป็นไปตามสมการที่ 3.27 – 3.28

$$\tilde{c}_1 = (H_6 \cdot K)^* r_{R_2,D}(m+N) + H_6 \cdot r_{R_2,D}^*(m+3N) \quad (3.27)$$

$$\tilde{c}_2 = H_6^* r_{R_2,D}(m+N) - (H_6 \cdot K) r_{R_2,D}^*(m+3N) \quad (3.28)$$

ลำดับของบิตที่รวมกันได้ (Combined bit sequence) จากกริเลขตัวที่ 3 เป็นไปตามสมการที่ 3.29– 3.30

$$\tilde{c}_1 = H_7^* r_{R_3,D}(m+N) + (H_7 \cdot W) r_{R_3,D}^*(m+3N) \quad (3.29)$$

$$\tilde{c}_2 = (H_7 \cdot W)^* r_{R_3,D}(m+N) - H_7 r_{R_3,D}^*(m+3N) \quad (3.30)$$

ลำดับของบิตที่รวมกันได้ (Combined bit sequence) จากกริเลขตัวที่ 4 เป็นไปตามสมการที่ 3.31 – 3.32

$$\tilde{c}_1 = (H_8 \cdot Y)^* r_{R_4,D}(m+N) + H_8 \cdot r_{R_4,D}^*(m+3N) \quad (3.31)$$

$$\tilde{c}_2 = H_8^* r_{R_4,D}(m+N) - (H_8 \cdot Y) r_{R_4,D}^*(m+3N) \quad (3.32)$$

3.5 การพิจารณาความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ⁷

เพื่อให้แบบจำลองระบบเป็นไปด้วยความเสมือนจริงในทางปฏิบัติ ในการพิจารณาค่าข้อมูลสถานะช่องสัญญาณ (CSI) จึงต้องประมาณค่าความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ (Imperfect channel estimation) มาใช้ในช่องสัญญาณที่จะส่งด้วย โดยปกติความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ จะเกิดจากการประมาณค่าช่องสัญญาณ (Channel estimation) ซึ่งช่องสัญญาณที่ประกอบด้วย สัญญาณรบกวนจะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบสุ่มในทิศทางที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้และการ สะท้อนกลับของสัญญาณ (Feedback) ทำให้เกิดความล่าช้า (Delay) และความผิดพลาดในการรับส่ง ข้อมูล โดยการประมาณช่องสัญญาณที่เป็นไปตามสมการที่ 3.33

$$\hat{H} = H + \Xi \quad (3.33)$$

เมื่อ \hat{H} คือ ช่องสัญญาณจากการประมาณ
 H คือ เมทริกซ์ของช่องสัญญาณที่แท้จริง

⁷ Jin Liang Huang, 'Adaptive MIMO Systems with Channel State Information at Transmitter', KTH School of Information and Communication Technology, 2009.

Ξ คือ ค่าประมาณสัญญาณรบกวนเชิงซ้อนปกติ (Complex Gaussian)
และ $[\Xi]_{i,j} \cong \text{CN}(0, \sigma_\epsilon^2)$

โดยสมการที่ประกอบด้วยความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณเป็นไปตามสมการที่ 3.34

$$H = \eta \hat{H} + \sqrt{1-\eta} W \quad (3.34)$$

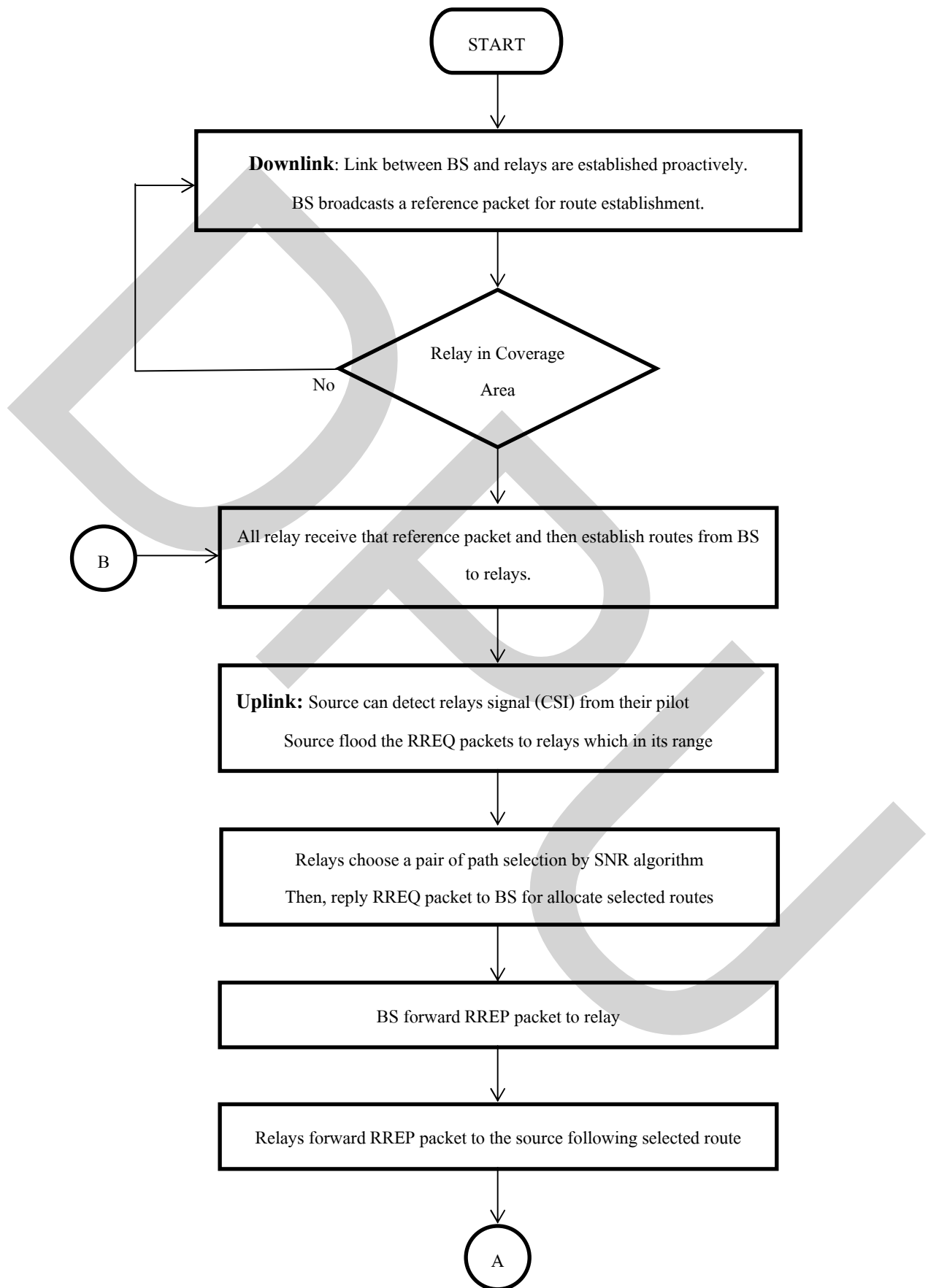
เมื่อ $\eta = \frac{1}{1+\sigma_\epsilon^2}$, เมื่อหาก $\eta=1$ หมายถึงช่องสัญญาณที่สมบูรณ์

W คือ สัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวแบบบวก(AWGN)

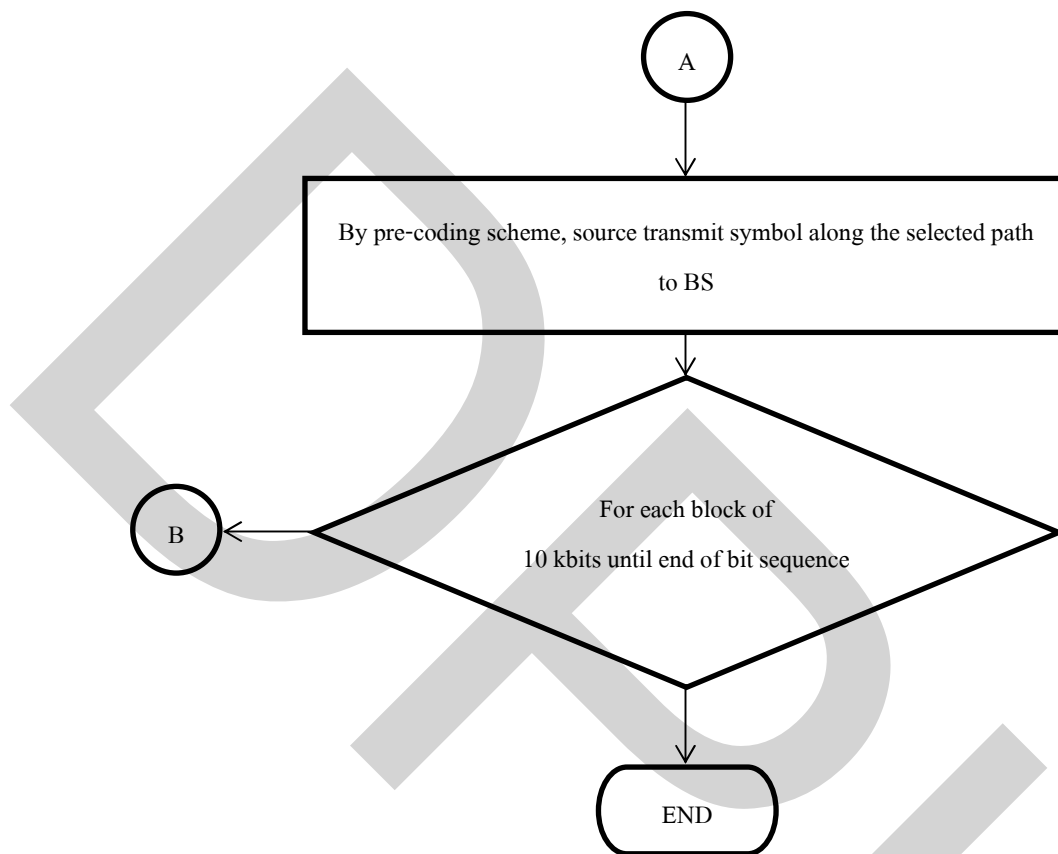
และ $[W]_{i,j} \cong \text{CN}(0,1)$

3.6 ขั้นตอนวิธีการทำงานของโปรแกรมจำลองการเลือกเส้นทาง (Path Selection)

- 1) สร้างข้อมูลบิตสัญลักษณ์สำหรับการส่งผ่านข้อมูลที่มีการมอดูเลตแบบ BPSK
- 2) สร้างช่องสัญญาณแบบ Rayleigh Fading Channel และสัญญาณรบกวนแบบ AWGN
- 3) คำนวณและเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่รับได้ในเวลาหนึ่ง ของทุกเส้นทางจากรีเลย์จำนวน M ตัวตามสมการที่ 3.1
- 4) เลือกเส้นทาง 2 เส้นทางผ่านคูรีเลย์จากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนดีที่สุดสองลำดับแรกตามสมการที่ 3.3
- 5) ให้นำข้อมูลบิตสัญลักษณ์ที่ผ่านการมอดูเลตมาแล้วนั้น มาทำการเข้ารหัสก่อนการส่ง (Pre-coding) โดยจัดลำดับของบิตสัญลักษณ์และคูณช่องสัญญาณในรูปแบบของ Alamouti's STBC ตามสมการที่ 3.5 ถึง 3.8
- 6) ที่สถานีฐานทำการรวมสัญญาณที่รับได้ในแต่ละเวลาของการส่งข้อมูลตามลำดับจากแต่ละเส้นทางโดยใช้วิธีตรวจจับลำดับของบิตสัญลักษณ์แบบ Maximum Likelihood
- 7) ทำการนับบิตผิดพลาดและคำนวณอัตราความผิดพลาดบิต (BER)
- 8) ทำการพล็อตข้อมูลระหว่างอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล(BER) กับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(SNR)
- 9) เก็บผลข้อมูลที่ได้เมื่อเปลี่ยนค่า Path Loss Exponent (α) และจำนวนรีเลย์ที่มีในระบบแล้วนำมาวิเคราะห์ผลที่ได้



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทำงานរបស់แบบจำลองวิธีการเลือกเส้นทางด้วยค่า SNR



รูปที่ 3.4 (ต่อ)

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบโดยใช้โปรแกรมจำลองระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอในบทที่ 3 โดยนำค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (Bit error rate) มาพิจารณา เมื่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio) เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่ระยะห่างและจำนวนของรีเลย์ที่มีในระบบแตกต่างกัน และวิเคราะห์ผลของการเลือกรีเลย์เพื่อนำมาใช้เป็นเส้นทางในการส่งข้อมูลไปยังสถานีฐาน

4.1 ข้อกำหนดและตัวแปรที่ใช้ในการจำลองระบบ

ในการจำลองระบบ จะทำการจำลองการส่งบิตข้อมูล BPSK จำนวน 1 ล้านบิต (1 Mbit) โดยการส่ง 1 ล้านบิตในแต่ละรอบ จะทำการแบ่งบิตข้อมูลออกเป็นบล็อก บล็อกละ 10,000 บิต (ค่าความยาวของเฟรมเฉลี่ย ที่ส่งออกไปเท่ากับ 1,250 ไบต์ สำหรับการทดสอบช่องสัญญาณก่อนส่งบิตข้อมูลโดย Pilot Signal ในช่วง Pre-Transmission Phase กล่าวคือ ระบบโครงข่ายจะใช้เวลาในการส่ง Pilot Signal ก่อนการส่งบิตข้อมูลจริง) โดยในที่นี้จะทำการเขียนโปรแกรม MATLAB 7.8.0 (R2009a) และทำการจำลองระบบสำหรับวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ CPU แบบ Intel Core 2 Duo (P7350) ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 2.0 GHz และข้อกำหนดเบื้องต้นที่ใช้ในการจำลองระบบเป็นไปตามที่ระบุไว้ในบทที่ 3 ส่วนที่ 3.1

และเพื่อให้ระบบที่จะทำการจำลองออกมาใกล้เคียงกับระบบสื่อสารเคลื่อนที่แบบไร้สายที่ใช้งานอยู่จริงมากที่สุด จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลหลายส่วนมาประกอบเป็นตัวแปรที่ใช้ในการพัฒนาและปรับแต่งระบบ ตามตารางที่ 4.1 ได้แก่ Modulation เป็นแบบ BPSK (Binary Phase Shift Keying) คือการส่งข้อมูลให้ได้ 1 บิต ต่อหนึ่งคาบเวลา โดยใช้จำนวนรีเลย์ที่มีในระบบจำนวน 4 รีเลย์ ซึ่งตัวแปรที่จะทำการเปรียบเทียบในการจำลองระบบ นอกจากจะทำการเปรียบเทียบกับวิธีการเลือกเส้นทางแบบใช้ช่องสัญญาณ (Channel capacity) แล้ว จะทำการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าการจางหายในเส้นทาง Path loss exponent (Alpha) โดยในพื้นที่แหล่งชุมชนเมือง (Urban Area) กำหนดให้ค่า Alpha เท่ากับ 3 และแหล่งชุมชนเมืองหนาแน่นที่มีอาคารสูงจำนวนมาก (No LOS) กำหนดให้ค่า Alpha เท่ากับ 5 นอกจากนั้นยังใช้ฟังก์ชันการจับเวลาแบบ Tic-Toc ที่เขียนขึ้นใน

โปรแกรม MATLAB 7.8.0 (R2009a) เพื่อใช้จับเวลาในการส่งข้อมูลในระบบที่จำลองขึ้นมา ทั้งนี้ จำนวนบิตที่ส่งใน 1 เฟรมหรือเฟรมที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับขนาดความยาวของ 1 เฟรมจริงที่ใช้งาน

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, 5 (Urban Area, No LOS) ¹
Propagation Channel Model	Rayleigh fading + path loss with AWGN

ข้อกำหนดเบื้องต้นในการจำลองระบบ

- 1) ระยะห่างในการวางตำแหน่งระหว่างรีเลย์แต่ละตัวห่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่ง และถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีค่าอยู่ในสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณแล้ว
- 2) การส่งผ่านข้อมูลระหว่างแหล่งกำเนิดกับรีเลย์ และรีเลย์กับสถานีฐานเป็นแบบไม่มีเส้นทางเชื่อมต่อโดยตรง (No direct link)
- 3) การส่งข้อมูลในแต่ละเส้นทางมีความเป็นอิสระต่อกัน และเวลาในการทำงาน (Processing time) ตลอดจนเวลาแฝง (Latency) ที่แต่ละโหนดน้อยมาก
- 4) แหล่งกำเนิดและรีเลย์แต่ละตัวสามารถรับรู้ข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณ (CSI) ได้ อย่างสมบูรณ์โดยมีการทำงานรับส่งสัญญาณแบบเต็มรูปแบบ (Full-duplex mode)
- 5) ช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบมีการกระจายตัวแบบ Rayleigh ที่มีการจางหายแบบ Flat and Slow Fading โดยถือว่าไม่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect)

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

6) ทุกโหนดในระบบส่งสัญญาณด้วยกำลังส่งเฉลี่ยที่เท่ากัน $P \cong E\{|x_i|^2\}$ และ สัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณเป็นแบบเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN) ที่มีความหนาแน่นของ กำลังส่ง (PSD) เท่ากับ N_0 และ $[N]_{i,j} \cong CN(0,1)$

7) ผู้ใช้งานในระบบที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์หรือโหนดส่งผ่านใช้โปรโตคอลการส่ง สัญญาณแบบ Amplify-and-Forward (AF)

4.2 การวิเคราะห์ผลของระบบที่นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเลือกเส้นทางโดยความจุของ ช่องสัญญาณ เมื่อค่า Alpha = 3

ตารางที่ 4.2 ระยะห่างระหว่าง Relay ที่ตั้งค่าและค่า SNR ที่ได้จากการจำลองระบบ

Relays	ระยะห่างจาก Source ถึง Relay ตัวที่ i (km)	ระยะห่างจาก Relay ตัวที่ i ถึง Base Station (km)	ค่า SNR equivalent
Relay 1	0.03	0.27	3.3932e-022
Relay 2	0.15	0.15	4.0575e-019
Relay 3	0.20	0.10	1.3452e-018
Relay 4	0.25	0.05	1.3227e-019

ตารางที่ 4.3 เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูลจำนวนหนึ่งล้านบิตในแต่ละวิธีที่ได้จากการจำลองระบบ

เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูล 1 Mb (SNR)	เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูล 1 Mb (Channel Capacity)
3.4667 วินาที	5.1921 วินาที

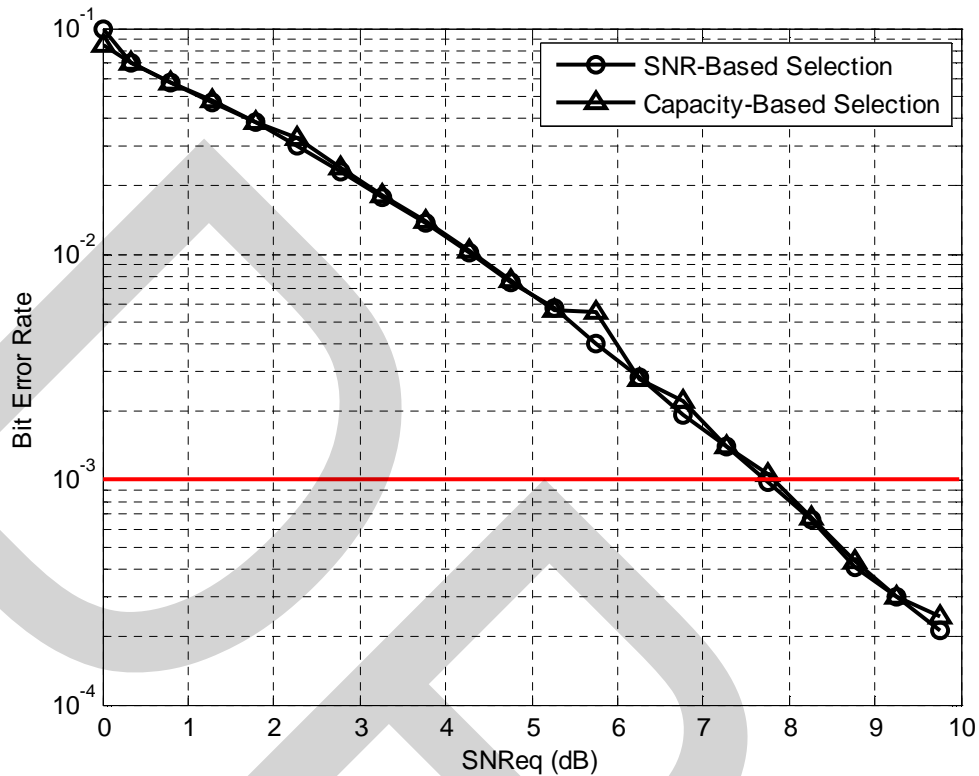
จากตารางที่ 4.2 การตั้งค่าระยะทางรวมจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีฐานปลายทางในทุก เส้นทางมีค่าเท่ากันหมดคือเท่ากับ 0.3 กิโลเมตร หรือ 300 เมตร และโดยวิธีการเลือกเส้นทางแบบ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ระบบจะทำการเลือกเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 จากทั้งหมด 4 เส้นทาง (เนื่องจากการทำ Pre-coding STBC แบบ Alamouti นั้นจำเป็นต้องใช้

เส้นทางในการส่งสองเส้นทางจากสองรีเลย์ตามสมการที่ระบุไว้ในบทที่ 3) ซึ่งระบบทำการเลือกเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 นั้น เป็นผลมาจากช่องสัญญาณและค่าการจางหาย (Path loss) ในแต่ละเส้นทางซึ่งส่งผลต่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสุดท้ายที่สถานีฐานปลายทางรับได้ (SNR equivalent) ซึ่งปรากฏว่าเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 มีค่า SNR equivalent มากที่สุดสองลำดับแรกจากทั้งหมด 4 ค่า ระบบจึงทำการเลือกเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 เพื่อใช้ส่งข้อมูลไปยังปลายทาง

จากตารางที่ 4.3 ด้วยวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ระยะเวลาที่ใช้ในการส่งบิตข้อมูลทั้งหมดจำนวน 1 ล้านบิต จะใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 3.4667 วินาที ดังนั้น อัตราการส่งข้อมูลในระบบไร้สายที่นำเสนอจะมีค่าประมาณ 0.2885 Mbps และด้วยวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ระยะเวลาที่ใช้ในการส่งบิตข้อมูลทั้งหมดจำนวน 1 ล้านบิต จะใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 5.1921 วินาที ดังนั้น อัตราการส่งข้อมูลจะมีค่าประมาณ 0.1926 Mbps และเมื่อทำการเปรียบเทียบกันจะเห็นว่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการส่งข้อมูลจำนวน 1 ล้านบิต ด้วยวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มีอัตราการส่งข้อมูลเร็วกว่าวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) อยู่โดยเฉลี่ย 0.0958 Mbps โดยใช้เวลาในการส่งเร็วกว่าประมาณ 1.7254 วินาที หรือเร็วกว่าโดยเฉลี่ย 33.23% ดังที่แสดงผลในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบในการเลือกเส้นทางแต่ละวิธี

เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูล 1 Mb (SNR)	เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูล 1 Mb (Channel Capacity)	ผลต่าง	เร็วกว่าคิดเป็นร้อยละ (%)
3.4667 วินาที	5.1921 วินาที	1.7254 วินาที	33.2313 %
อัตราการส่งข้อมูล	อัตราการส่งข้อมูล	ผลต่าง	เร็วกว่าคิดเป็นร้อยละ (%)
0.2885 Mbps	0.1926 Mbps	0.0958 Mbps	49.77 %



รูปที่ 4.1 แสดงประสิทธิภาพของระบบในรูปอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) โดยวิธีการเลือกเส้นทางในแต่ละแบบเปรียบเทียบกับกัน เมื่อค่า Alpha = 3

และเพื่อให้ระบบที่นำเสนอประยุกต์ใช้งานได้จริง จึงใช้ค่าความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ (Imperfection Channel) เท่ากับ 1 คือ ช่องสัญญาณผิดไปจากความเป็นจริงประมาณ 50% โดยเมื่อจำลองระบบแล้วจะได้กราฟที่แสดงประสิทธิภาพของระบบในรูปของอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) ตามรูปที่ 4.1 ซึ่งวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ก็วิธีการเลือกเส้นทางจากค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ให้อัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ที่ใกล้เคียงกันมาก เป็นผลมาจากในสมการของ Shannon-Hartley theorem จะใช้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และค่าความจุของช่องสัญญาณ ในการคำนวณเหมือนกัน ดังนั้นในการส่งข้อมูลแบบ Alamouti STBC จึงให้ประสิทธิภาพของระบบไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ $1/1000$ (10^{-3}) จะได้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 7.8 dB

4.3 การวิเคราะห์ผลของระบบที่นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเลือกเส้นทางโดยความจุของช่องสัญญาณ เมื่อค่า $\alpha = 5$

ตารางที่ 4.5 ระยะห่างระหว่าง Relay ที่ตั้งค่าและค่า SNR ที่ได้จากการจำลองระบบ

Relays	ระยะห่างจาก Source ถึง Relay ตัวที่ i (km)	ระยะห่างจาก Relay ตัวที่ i ถึง Base Station (km)	ค่า SNR equivalent
Relay 1	0.03	0.27	1.4607e-030
Relay 2	0.15	0.15	1.0399e-025
Relay 3	0.20	0.10	2.1523e-025
Relay 4	0.25	0.05	3.2294e-027

ตารางที่ 4.6 เวลาเฉลี่ยในการส่งบิตข้อมูลจำนวนหนึ่งล้านบิตในแต่ละวิธีที่ได้จากการจำลองระบบ

เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูล 1 Mb (SNR)	เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูล 1 Mb (Channel Capacity)
3.6803 วินาที	5.3829 วินาที

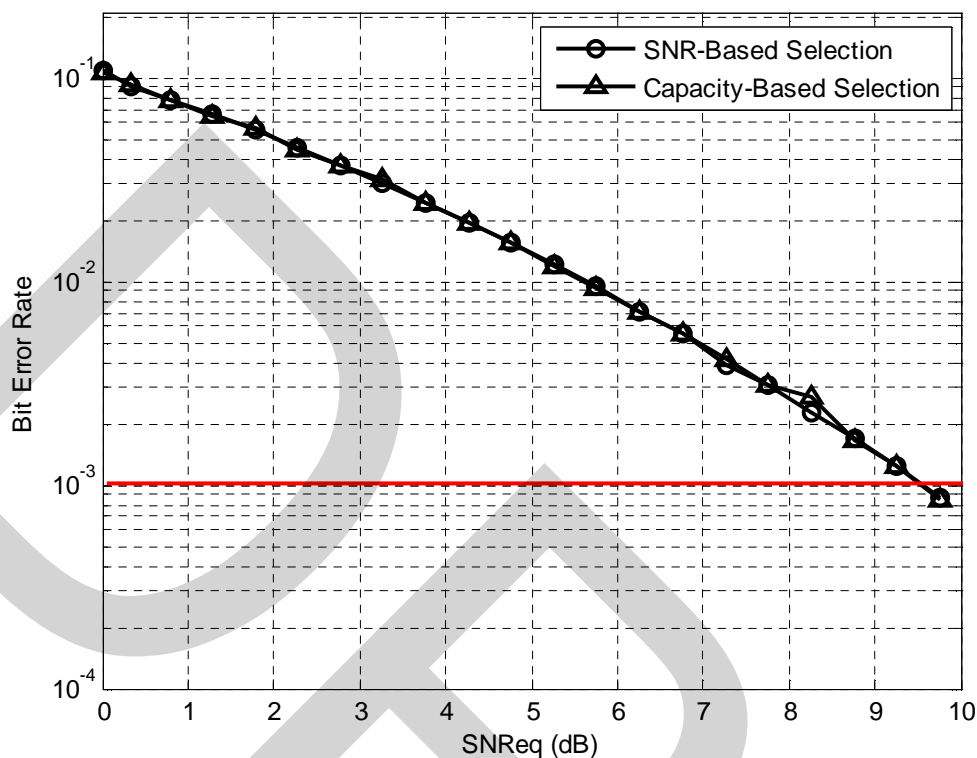
จากตารางที่ 4.5 การตั้งค่าสถานะแวดล้อมในการจำลองระบบเหมือนกันกับสถานะแวดล้อมเดิม เพียงแต่เปลี่ยนค่า Path loss exponent จาก 3 เป็น 5 คือเป็นสถานะแวดล้อมที่เป็นบริเวณที่มีอาคารสูงจำนวนมากที่ไม่มีเส้นสายตา (No Line of Sight, No LOS) โดยระยะทางรวมจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีฐานปลายทางในทุกเส้นทางมีค่าเท่ากันหมดคือเท่ากับ 0.3 กิโลเมตร หรือ 300 เมตร และโดยวิธีการเลือกเส้นทางแบบอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ระบบจะทำการเลือกเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 จากทั้งหมด 4 เส้นทาง (เนื่องจากการทำ Pre-coding STBC แบบ Alamouti นั้นจำเป็นต้องใช้เส้นทางในการส่งสองเส้นทางจากสองรีเลย์ตามสมการที่ระบุไว้ในบทที่ 3) ซึ่งระบบทำการเลือกเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 นั้น เป็นผลมาจากช่องสัญญาณและค่าการจางหาย (Path loss) ในแต่ละเส้นทางซึ่งส่งผลต่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสุดท้ายที่สถานีฐานปลายทางรับได้ (SNR equivalent) ซึ่งปรากฏว่าเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 มี

ค่า SNR equivalent มากที่สุดสองลำดับแรกจากทั้งหมด 4 ค่า ระบบจึงทำการเลือกเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 เพื่อใช้ส่งข้อมูลไปยังปลายทาง

จากตารางที่ 4.6 ด้วยวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ระยะเวลาที่ใช้ในการส่งบิตข้อมูลทั้งหมดจำนวน 1 ล้านบิต จะใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 3.6803 วินาที ดังนั้น อัตราการส่งข้อมูลในระบบไร้สายที่นำเสนอจะมีค่าประมาณ 0.2717 Mbps และด้วยวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าจากความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ระยะเวลาที่ใช้ในการส่งบิตข้อมูลทั้งหมดจำนวน 1 ล้านบิต จะใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 5.3829 วินาที ดังนั้น อัตราการส่งข้อมูลจะมีค่าประมาณ 0.1858 Mbps และเมื่อทำการเปรียบเทียบกันจะเห็นว่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการส่งข้อมูลจำนวน 1 ล้านบิต ด้วยวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มีอัตราการส่งข้อมูลเร็วกว่าวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) อยู่โดยเฉลี่ย 0.0859 Mbps โดยใช้เวลาในการส่งเร็วกว่าประมาณ 1.7026 วินาที หรือเร็วกว่าโดยเฉลี่ย 31.629 % ดังที่แสดงผลในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบในการเลือกเส้นทางแต่ละวิธี

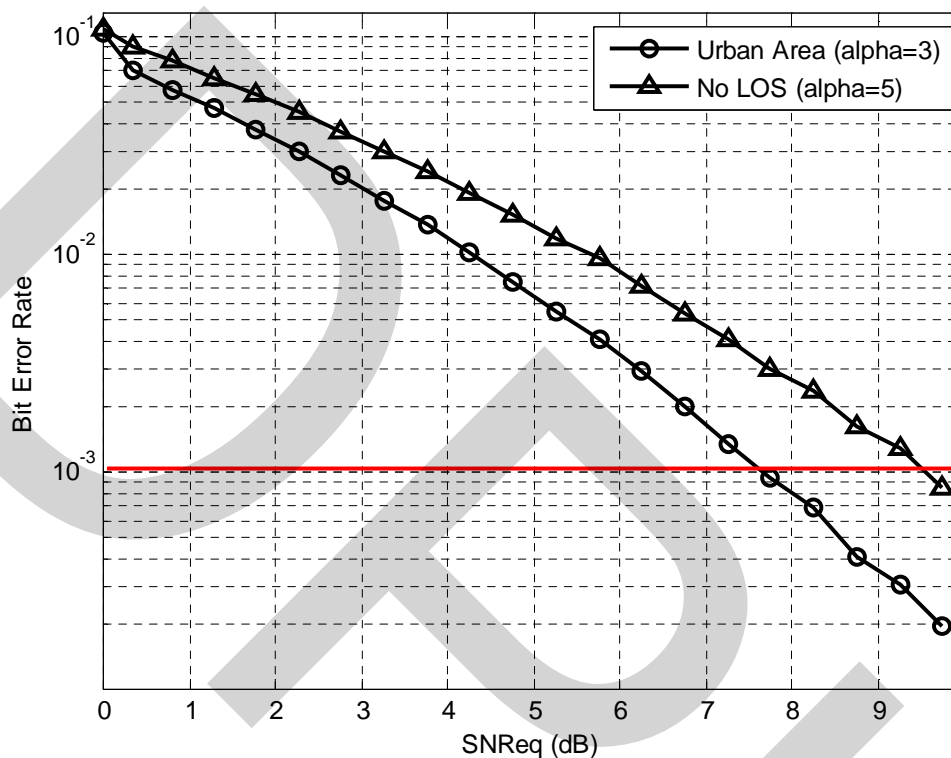
เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูล 1 Mb (SNR)	เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูล 1 Mb (Channel Capacity)	ผลต่าง	เร็วกว่าคิดเป็นร้อยละ (%)
3.6803 วินาที	5.3829 วินาที	1.7026 วินาที	31.629 %
อัตราการส่งข้อมูล	อัตราการส่งข้อมูล	ผลต่าง	เร็วกว่าคิดเป็นร้อยละ (%)
0.2717 Mbps	0.1858 Mbps	0.0859 Mbps	46.26 %



รูปที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพของระบบในรูปอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) โดยวิธีการเลือกเส้นทางในแต่ละแบบเปรียบเทียบกับกัน เมื่อค่า Alpha = 5

และเพื่อให้ระบบที่นำเสนอประยุกต์ใช้งานได้จริง จึงใช้ค่าความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ (Imperfection Channel) เท่ากับ 1 คือ ช่องสัญญาณผิดไปจากความเป็นจริงประมาณ 50% โดยเมื่อจำลองระบบแล้วจะได้กราฟที่แสดงประสิทธิภาพของระบบในรูปของอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) ตามรูปที่ 4.2 ซึ่งวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ก็วิธีการเลือกเส้นทางจากค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ให้อัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ที่ใกล้เคียงกันมาก เป็นผลมาจากในสมการของ Shannon-Hartley theorem จะใช้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และค่าความจุของช่องสัญญาณ ในการคำนวณเหมือนกัน ดังนั้นในการส่งข้อมูลแบบ Alamouti STBC จึงให้ประสิทธิภาพของระบบไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ $1/1000$ (10^{-3}) จะได้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 9.5 dB

4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ เมื่อค่า Alpha = 3 และ Alpha = 5



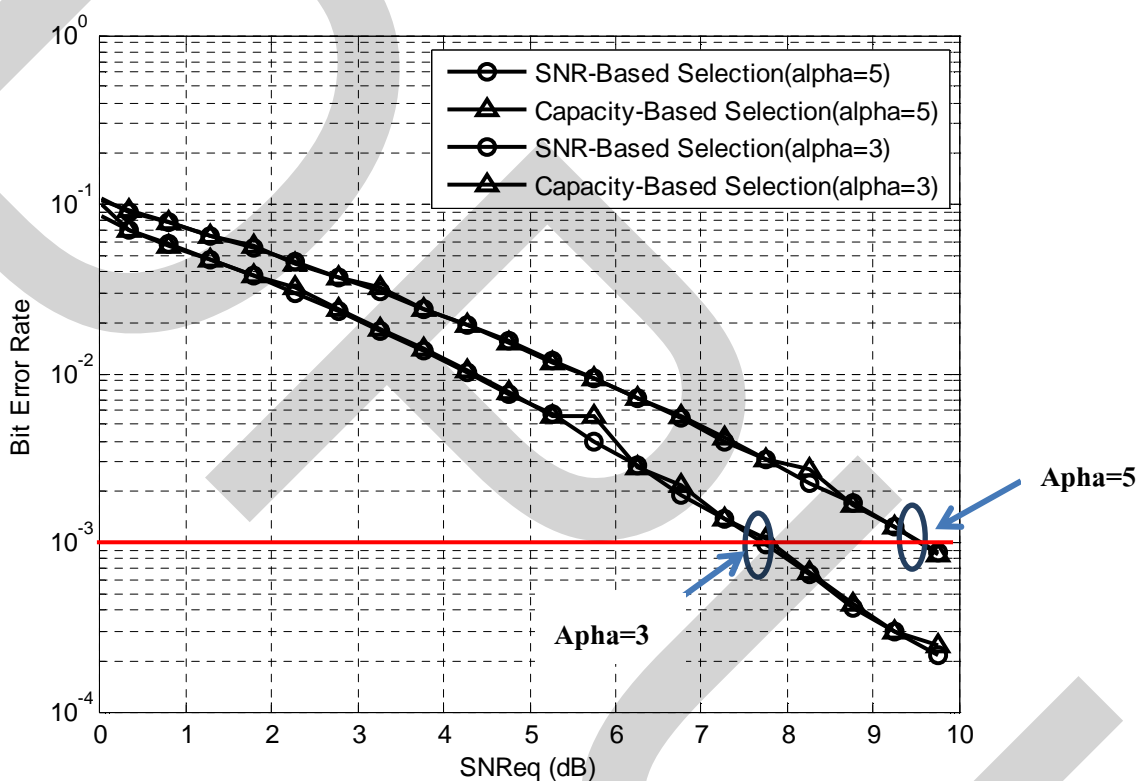
รูปที่ 4.3 แสดงประสิทธิภาพของระบบแสดงในรูปอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) เมื่อค่า Alpha = 3 และ Alpha = 5 โดยวิธีการเลือกเส้นทางแบบ SNR

จากรูปที่ 4.3 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างสถานะแวดล้อมที่เป็นชุมชนเมือง (Urban Area) ซึ่งมีค่า Alpha เท่ากับ 3 และสถานะแวดล้อมที่เป็นอาคารสูงจำนวนมาก (No LOS) ซึ่งมีค่า Alpha เท่ากับ 5 และที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ $1/1000$ (10^{-3}) จะได้ว่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เป็นไปตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่า SNR ที่ได้จากการจำลองระบบที่ระดับ BER = 10^{-3}

SNR at BER = 10^{-3} (Alpha = 3)	SNR at BER = 10^{-3} (Alpha = 5)
7.8 dB	9.5 dB

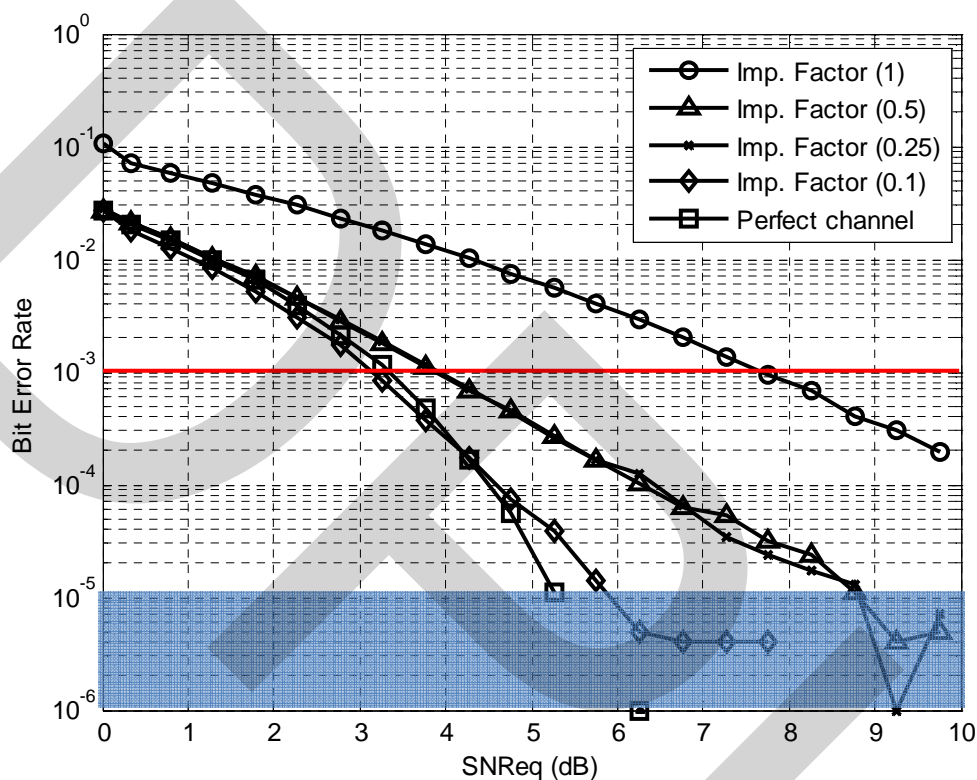
ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่า ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจากทั้งสองสถานะแวดล้อมที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) 10^{-3} มีค่าแตกต่างกันเท่ากับ 1.7 dB หมายถึงต้องใช้กำลังส่งมากขึ้น 1.49 เท่า จึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลในสถานะแวดล้อมแบบที่มีอาคารสูงจำนวนมาก (No LOS) เท่ากันกับประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลในสถานะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง (Urban Area)



รูปที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพของระบบแสดงในรูปอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) เมื่อค่า Alpha = 3 และ Alpha = 5 โดยวิธีการเลือกเส้นทางแบบ SNR เปรียบเทียบกับวิธีการเลือกเส้นทางแบบ Channel capacity

4.5 การวิเคราะห์ผลของระบบที่นำเสนอเมื่อเกิดความไม่สมบรูณ์ของช่องสัญญาณที่ค่าต่างๆ

กรณีที่ 1 : เมื่อค่า Alpha = 3



รูปที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพของระบบซึ่งได้รับผลกระทบจากความไม่สมบรูณ์ของช่องสัญญาณเมื่อค่า Alpha = 3

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองระบบที่ได้รับผลจากความไม่สมบรูณ์ของช่องสัญญาณเมื่อค่า Alpha = 3

BER = 10^{-3} ($\alpha = 3$)	Perfect Channel (100%)	Imp. Factor 0.10 (90%)	Imp. Factor 0.25 (80%)	Imp. Factor 0.50 (67%)	Imp. Factor 1.00 (50%)
SNR eq. (dB)	3.3	3.2	3.9	3.9	7.8

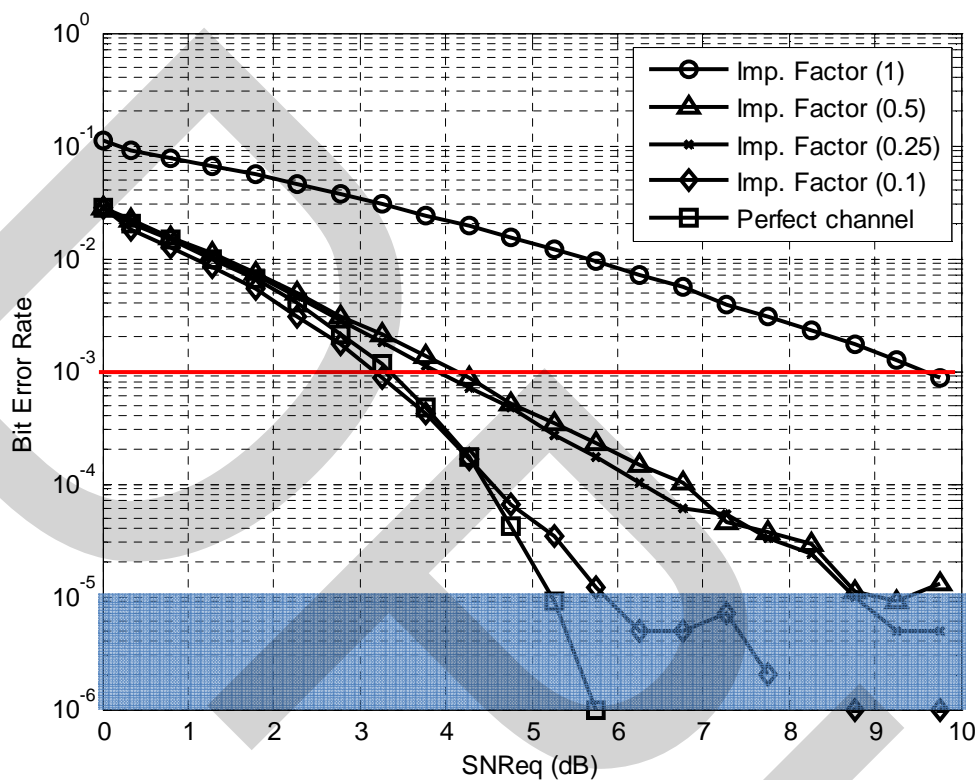
เมื่อวิเคราะห์ความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณที่ใส่ไว้ใน การจองระบบตามที่ระบุไว้ในบทที่ 3 ซึ่งจากรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.9 แสดงว่าช่องสัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ในช่องสัญญาณจะมีผลทำให้อัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลมากขึ้น โดยที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลเท่ากับ 10^{-3} จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 3.3 dB เมื่อช่องสัญญาณไม่ได้รับผลกระทบหรือเป็นช่องสัญญาณในอุดมคติ (Perfect Channel) แต่เมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 0.1 คือช่องสัญญาณมีความสมบูรณ์ 90% (ผิดเพี้ยนไป 10%) จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 3.2 dB ซึ่งมีผลต่างจากช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบเพียง 0.1 dB

เมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 0.25 คือช่องสัญญาณมีความสมบูรณ์ 80% (ผิดเพี้ยนไป 20%) จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 3.9 dB ซึ่งต่างจากช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ 0.6 dB และเมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 0.5 คือช่องสัญญาณมีความสมบูรณ์ 67% (ผิดเพี้ยนไป 33%) จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 3.9 dB ซึ่งต่างจากช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ 0.6 dB คือต้องใช้กำลังในการส่งมากขึ้นประมาณ 1.15 เท่า จึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเท่ากับการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ

และเมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 1.0 คือช่องสัญญาณมีความสมบูรณ์ 50% (ผิดเพี้ยนไป 50%) จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 7.8 dB ซึ่งต่างจากช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ 4.5 dB คือต้องใช้กำลังในการส่งมากขึ้นประมาณ 2.82 เท่า จึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเท่ากับการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ

ในรูปที่ 4.5 พบว่าที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ต่ำกว่า 10^{-5} รูปเส้นกราฟจะเริ่มผิดเพี้ยนไปจากแนวปกติเป็นผลมาจากสองปัจจัยหลักในการเขียนโปรแกรมได้แก่ จำนวนครั้งในการจำลองระบบไม่มากพอที่จะนำข้อมูลมาเฉลี่ยกันได้ และอีกปัจจัยเนื่องมาจากจำนวนข้อมูลที่ส่งนั้นมีเพียง 1 ล้านบิต ดังนั้นเมื่อพิจารณาอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลที่ระดับ $1/100,000$ (10^{-5}) ถึง $1/1,000,000$ (10^{-6}) จะถือว่าน้อยมากจนสามารถตัดออกจากการพิจารณาได้ ดังนั้นในการพิจารณาระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลจะพิจารณาที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ $1/1000$ (10^{-3})

กรณีที่ 2 : เมื่อค่า Alpha = 5



รูปที่ 4.6 แสดงประสิทธิภาพของระบบซึ่งได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ เมื่อค่า Alpha = 5

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองระบบที่ได้รับผลจากความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณเมื่อค่า Alpha = 5

BER = 10^{-3} ($\alpha = 5$)	Perfect Channel (100%)	Imp. Factor 0.10 (90%)	Imp. Factor 0.25 (80%)	Imp. Factor 0.50 (67%)	Imp. Factor 1.00 (50%)
SNR eq. (dB)	3.3	3.2	3.9	4.1	9.5

เมื่อวิเคราะห์ความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.10 แสดงว่าช่องสัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ในช่องสัญญาณจะมีผลทำให้อัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลมากขึ้น โดยที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลเท่ากับ 10^{-3} จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 3.3 dB เมื่อช่องสัญญาณไม่ได้รับผลกระทบหรือเป็นช่องสัญญาณในอุดมคติ (Perfect Channel) แต่เมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 0.1 คือช่องสัญญาณมีความสมบูรณ์ 90% (ผิดเพี้ยนไป 10%) จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 3.2 dB ซึ่งมีผลต่างจากช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบเพียง 0.1 dB

เมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 0.25 คือช่องสัญญาณมีความสมบูรณ์ 80% (ผิดเพี้ยนไป 20%) จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 3.9 dB ซึ่งต่างจากช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ 0.6 dB คือต้องใช้กำลังในการส่งมากขึ้นประมาณ 1.15 เท่า จึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเท่ากับการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ และเมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 0.5 คือช่องสัญญาณมีความสมบูรณ์ 67% (ผิดเพี้ยนไป 33%) จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 4.1 dB ซึ่งต่างจากช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ 0.8 dB คือต้องใช้กำลังในการส่งมากขึ้นประมาณ 1.2 เท่า จึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเท่ากับการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ

และเมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 1.0 คือช่องสัญญาณมีความสมบูรณ์ 50% (ผิดเพี้ยนไป 50%) จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 9.5 dB ซึ่งต่างจากช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ 6.2 dB คือต้องใช้กำลังในการส่งมากขึ้นประมาณ 4.17 เท่า จึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเท่ากับการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ

และเช่นเดียวกัน ในรูปที่ 4.6 ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ต่ำกว่า 10^{-5} รูปเส้นกราฟจะเริ่มผิดเพี้ยนไปจากแนวปกติเป็นผลมาจากสองปัจจัยหลักในการเขียน โปรแกรม ได้แก่ จำนวนครั้งในการจำลองระบบไม่มากพอที่จะนำข้อมูลมาเฉลี่ยกันได้ และอีกปัจจัยเนื่องมาจากจำนวนข้อมูลที่ส่งนั้นมีเพียง 1 ล้านบิต ดังนั้นเมื่อพิจารณาอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลที่ระดับ $1/100,000$ (10^{-5}) ถึง $1/1,000,000$ (10^{-6}) จะถือว่าน้อยมากจนสามารถตัดออกจากกราฟพิจารณาได้

และเมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างสภาวะแวดล้อมทั้งสองแบบคือสภาวะแวดล้อมที่เป็นชุมชนเมือง (Urban Area) ซึ่งมีค่า Alpha เท่ากับ 3 และสภาวะแวดล้อมที่เป็นอาคารสูงจำนวนมาก (No LOS) ซึ่งมีค่า Alpha เท่ากับ 5 จะได้ผลดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองระบบที่ได้รับผลจากความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณเมื่อค่า Alpha = 3 และ Alpha = 5

BER = 10^{-3}	Perfect Channel (100%)	Imp. Factor 0.10 (90%)	Imp. Factor 0.25 (80%)	Imp. Factor 0.50 (67%)	Imp. Factor 1.00 (50%)
SNR eq. (dB) ($\alpha = 3$)	3.3	3.2	3.9	3.9	7.8
SNR eq. (dB) ($\alpha = 5$)	3.3	3.2	3.9	4.1	9.5

จากตารางที่ 4.11 จะพบว่าที่ช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ (Perfect channel), ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 0.1 และช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 0.25 ที่ระดับอัตราผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ 10^{-3} จะได้ค่า SNR ที่ใกล้เคียงกัน และจะต่างกันเมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบมากกว่า 0.5 ขึ้นไป ซึ่งสอดคล้องกันกับการจำลองระบบที่ใช้ตัวแปรและออกแบบเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้กับการใช้งานจริงได้ตามที่วิเคราะห์แล้วในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการศึกษาตามขอบเขตงานวิจัย

ระบบเครือข่ายไร้สายแบบเคลื่อนที่ เทคนิคการส่งข้อมูลแบบหลายเสาส่งได้ถูกนำมาใช้ในการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารแบบไร้สาย เนื่องจากสามารถส่งข้อมูลได้หลายทิศทางทั้งในแนวตรงและแนวสะท้อนจากสิ่งกีดขวางเรียกว่าความหลายหลากของการส่งสัญญาณ ทำให้สามารถส่งข้อมูลในอัตรการส่งที่สูงได้ แม้ว่าการใช้เทคนิคการส่งแบบหลายเสาส่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงพื้นที่ แต่ยังไม่สามารถนำมาใช้ในการส่งในอุปกรณ์พกพาแบบเสาอากาศเดี่ยวได้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า การนำวิธีการเข้ารหัสก่อนการส่ง (Pre-coding) ซึ่งปริภูมิเวลา สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการส่งข้อมูลในการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ โดยใช้อุปกรณ์ที่มีเสาอากาศเพียงคันเดียวได้ และยังสามารถนำเสนอวิธีการเลือกเส้นทางการส่งข้อมูลผ่านรีเลย์โหนด โดยใช้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมาเป็นค่านัยสำคัญในการเลือกเส้นทาง โดยทำการเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ ซึ่งนำเสนอแบบจำลองแบบสองฮอปและมีรีเลย์ในระบบจำนวน 4 ตัว ซึ่งจากผลการศึกษาในแต่ละกรณี แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในขณะนั้น ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบการส่งข้อมูลแบบเข้ารหัสก่อนการส่งและใช้รีเลย์ที่ถูกเลือกเป็นเส้นทางในการส่งผ่านข้อมูลไปยังสถานีฐาน โดยกำหนดระยะห่างจากแหล่งกำเนิดต้นทางถึงรีเลย์และระยะห่างจากรีเลย์ถึงสถานีฐานเป็นค่าพารามิเตอร์แบบคงที่ในการจำลองระบบ และจำลองระบบในสองสถานะแวดล้อมคือสถานะแวดล้อมที่เป็นชุมชนเมือง (Urban Area) ซึ่งมีค่า Alpha เท่ากับ 3 และสถานะแวดล้อมที่เป็นตึกสูงจำนวนมาก (No LOS) ซึ่งมีค่า Alpha เท่ากับ 5

ที่สถานะแวดล้อมที่เป็นชุมชนเมือง (Urban Area) พบว่าวิธีการเลือกเส้นทางด้วยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกันกับวิธีการเลือกเส้นทางด้วยค่าความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity) เมื่อวิเคราะห์จากอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล และเมื่อวิเคราะห์ในเชิงเวลาแล้วพบว่าวิธีการเลือกเส้นทางด้วยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) จะใช้การส่งข้อมูลที่เร็วกว่าวิธีการเลือกเส้นทางด้วยค่าความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity) อยู่ประมาณ 1.7254 วินาที หรือเร็วกว่าโดยเฉลี่ย 33.23% และพิจารณาในเชิงอัตรการส่งข้อมูลพบว่าเร็วกว่าโดยเฉลี่ย 95.8 kbps หรือประมาณ 49.77%

ที่สภาวะแวดล้อมที่เป็นอาคารสูง (No LOS) พบว่าวิธีการเลือกเส้นทางด้วยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกันกับวิธีการเลือกเส้นทางด้วยค่าความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity) เมื่อวิเคราะห์จากอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล และเมื่อวิเคราะห์ในเชิงเวลาแล้วพบว่าวิธีการเลือกเส้นทางด้วยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) จะใช้การส่งข้อมูลที่เร็วกว่าวิธีการเลือกเส้นทางด้วยค่าความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity) อยู่ประมาณ 1.7026 วินาที หรือเร็วกว่าโดยเฉลี่ย 31.63% และพิจารณาในเชิงอัตราการส่งข้อมูลพบว่าเร็วกว่าโดยเฉลี่ย 85.9 kbps หรือประมาณ 46.26%

และยังพบอีกว่าค่า Path Loss Exponent (α) ยังมีผลต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยเมื่อค่า Path Loss Exponent (α) เพิ่มมากขึ้นคือได้รับผลกระทบจากการจางหายแบบหลายทิศทาง (Multipath fading) มากขึ้นจะทำให้อัตราความผิดพลาดบิตเพิ่มมากขึ้นด้วยดังจะเห็นจากการเปรียบเทียบข้อมูลในหัวข้อที่ 4.4 ซึ่งที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) 10^{-3} มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) แตกต่างกัน 1.7 dB หมายถึง ต้องใช้กำลังส่งมากขึ้น 1.49 เท่า จึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลในสภาวะแวดล้อมแบบที่มีอาคารสูงจำนวนมาก (No LOS) เท่ากันกับประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง (Urban Area)

นอกจากนี้งานวิจัยฉบับนี้ยังได้ทำการเพิ่มค่าความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ (Imperfect CSI) โดยสังเกตผลประสิทธิภาพของระบบในรูปอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เมื่อเปลี่ยนค่าตัวประกอบความไม่สมบูรณ์ (Imperfect Factor) เป็นค่าต่างๆ พบว่า หากเพิ่มความไม่สมบูรณ์ในช่องสัญญาณมากขึ้นเท่าไรจะยิ่งทำให้มีอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลมากขึ้นตามที่ได้เปรียบเทียบไว้ในหัวข้อที่ 4.5

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนางานวิจัยในอนาคต

หลังจากที่ได้ทำการทดลองและเก็บผลการทดสอบให้ครบตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของการทำวิจัยในครั้งนี้แล้ว พบว่าแบบจำลองในระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอยังมีข้อจำกัดบางประการ เพื่อการนำมาประยุกต์ใช้งานจริงโดยให้มีอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้น และทำการลดความผิดพลาดของบิตข้อมูลให้ได้มากขึ้น ผู้วิจัยได้เสนอแนะแนวทางการพัฒนาแบบจำลองในอนาคต ได้แก่

5.2.1 สามารถเพิ่มจำนวนช่วงการส่งต่อของรีเลย์ในระบบให้มากขึ้น จากสองฮอป (Dual Hop) เป็นแบบหลายฮอป (Multi Hop) โดยปรับปรุงอัลกอริทึมของโปรแกรมบางส่วนในการเลือกเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลไปยังปลายทาง เพื่อเพิ่มสมรรถนะโดยรวมของระบบให้ดียิ่งขึ้น

5.2.2 ในอนาคตสามารถปรับปรุงและเขียน โปรแกรมประยุกต์เพื่อตรวจจับค่าอัตราส่วน สัญญาณต่อสัญญาณรบกวนและเลือกเส้นทางได้จากแหล่งกำเนิดต้นทางเอง

5.2.3 ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของรีเลย์เป็นค่าที่สามารถนำมาพิจารณาในการเลือกเส้นทาง เพื่อให้ช่องสัญญาณไม่รบกวนกันและให้การส่งข้อมูลในแต่ละเส้นทางเป็นอิสระต่อกัน และให้ โปรแกรมจำลองมีความสมบูรณ์แบบมากขึ้น

5.2.4 สามารถทำการศึกษาค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function) จากค่าความน่าจะเป็นของการจางหายของช่องสัญญาณในแต่ละเส้นทาง

5.2.5 สามารถคำนวณอัตราการส่งข้อมูลของระบบ และอัตราการส่งข้อมูลจริงผ่านแต่ละ เส้นทางจากการกำหนดความถี่และความกว้างช่องสัญญาณเข้าไปใน โปรแกรมจำลองระบบ และ อาจจะพัฒนาการมอดูเลทในลำดับที่สูงขึ้นเพื่อให้เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน ได้จริง

5.3 องค์ความรู้ที่ได้รับจากการทำวิจัย

5.3.1 ระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ และข้อกำหนดในการสื่อสาร

5.3.2 วิธีการเข้ารหัสก่อนการส่ง (Pre-coding) เชิงปริภูมิเวลา

5.3.3 คุณสมบัติของช่องสัญญาณและพารามิเตอร์ที่มีผลต่อช่องสัญญาณ

5.3.4 ขั้นตอนวิธีการเลือกรีเลย์ในรูปแบบต่างๆ

5.3.5 การพิจารณาประสิทธิภาพของระบบจากอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล และสมการค่า ความไม่สมบูรณ์ช่องสัญญาณ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานจริง



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

วิทยานิพนธ์

ชาญวิทย์ ไยบัว. (2550). การเพิ่มประสิทธิภาพการรับ/ส่งข้อมูล ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือโดยใช้การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

กำพล วรดิษฐ์. (2552). พฤติกรรมสัญญาณขาดหายของแผนการสัญญาณซ้ำแบบร่วมมือพร้อมด้วยการเลือกกรีเลย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาต่างประเทศ

BOOK

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

ARTICLES

Bongkyoung Kwon, Yusun Chang, and John A. Copeland. (2008, November). “A Network Entry Protocol and an OFDMA Symbol Allocation Scheme for Non-Transparent Relay Stations in IEEE 802.16j MMR Networks” *Military Communications Conference, MILCON 2008 IEEE*, pp.1-6.

- E.M. van Eenennaam. (2008, June). "A Survey of Propagation Models used in Vehicular Ad hoc Network (VANET) Research" *Universitat Politècnica de Catalunya*, pp.1-7.
- E. Zimmermann, P. Herhold and G. Fettweis. (2004). "A Novel Protocol for Cooperative Diversity in Wireless Networks" *Proc. of the Fifth European Wireless Conference*, pp.1-7.
- Furuzan Atay Onat, Abdulkareem Adinoyi and et. Al. (2008, November). "Threshold Selection for SNR-based Selective Digital Relaying in Cooperative Wireless Networks" *IEEE Transaction on Wireless Communications*, Vol. 7, No. 11, pp.4226-4237.
- H. Khoshbin Ghomash and NF. Mehr. (2009). "Outage Analysis of Relay Selection Methods for IEEE802.16j" *ICEE Comm.*, Vol. 4, pp.592 – 596.
- Ho-Jung An, Jee-Hoon Kim, and Hyoung-Kyu Song. (2007, August). "Cooperative Transmission Scheme to Increase Gain by STBC" *Engineering Letters*, pp.1-5.
- Jin Liang Huang. (2009). "Adaptive MIMO Systems with Channel State Information at Transmitter" *KTH School of Information and Communication Technology*, pp.57-62.
- J. N. Laneman, D.C. Tse, G.W. Wornell. (2005, September). "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior" *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 12, No.9, pp.597-600.
- Kaiser, M.S., Khan, I., Adachi, F. and Ahmed, K.M. (2009). "Fuzzy Logic Based Relay Search Algorithm for Cooperative Systems" *Communication Systems and Networks and Workshops*, pp.1-7.
- 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.
- Mazen O. Hasna and Mohamed-Slim Alouini. (2002) "Performance Analysis of Two-Hop Relayed Transmissions over Rayleigh Fading Channels" *Vehicular Technology Conference Proceedings. VTC 2002-Fall. IEEE 56th*, Vol.4, pp.1992-1996.

Paitoon Poonsawatt and Punyawit Jamjareekul. (2011, May). "Improving Dual-Hop Amplify-and-Forward Cooperative Mobile Network Based on Path selection and STBC with Pre-Coding Scheme" *Proceeding of 2011 Eighth International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)*, Mahidol University Thailand, pp.409-413.

Raymond H. Y. Louie, Yonghui Li, and et. Al. (2009, June). "Performance Analysis of Beamforming in Two Hop Amplify and Forward Relay Networks with Antenna Correlation" *IEEE Transaction on Wireless Communications*, Vol. 8, No. 6, pp.3132-3141.

Yu Ge, Su Wen and Yew-Hock Ang. (2009, April). "Analysis of Optimal Relay Selection in IEEE 802.16 Multihop Relay Networks" *IEEE Communications in the WCNC proceedings*, pp.1-6.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

พิเชฐพงษ์ ชินาเครือ

วัน เดือน ปีเกิด

19 พฤศจิกายน 2523

ประวัติการศึกษา

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ปีการศึกษา 2545

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

วิศวกรแผนกขาย
บริษัท กนกสิน เอ็กซ์พอร์ต อิมพอร์ต จำกัด
51/1 อาคารกนกสิน ถนนรามอินทรา กม.4 แขวงอนุสาวรีย์
เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220
ทุนข้าราชการ เจ้าหน้าที่ของรัฐ พนักงานรัฐวิสาหกิจและ
วิสาหกิจเอกชน ปีการศึกษา 2552-2553

ทุนการศึกษา