



ความจุต์ลักษณะและความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของการรวมอัตราส่วนสูงสุด
สำหรับเมกะโมโมด้วยทอพอโลยีจุดต่อต่างกัน

ERGODIC CAPACITY AND OUTAGE PROBABILITY
OF MAXIMAL RATIO COMBINING FOR INDOOR MEGAMIMO
WITH DIFFERENT NODE TOPOLOGIES

กนกศิริ รัศมี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ความจู้ตลัษณ์และควาหน้าจะเป็นสัณญานขาดหายของการรวมอัตราส่วนสูงสูด
สำหรับเมกะไมมอด้วยทอพอโลยีจุดต้อต่ากัน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่ของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณทิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ERGODIC CAPACITY AND OUTAGE PROBABILITY
OF MAXIMAL RATIO COMBINING FOR INDOOR MEGAMIMO
WITH DIFFERENT NODE TOPOLOGIES



KANOKSIRI RASSAMEE

A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for MASTER OF ENGINEERING (Electrical Engineering)
Faculty of Engineering Srinakharinwirot University

2019

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

ความจืดลักษณะและความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของการรวมอัตราส่วนสูงสุด

สำหรับเมกะโมโมด้วยทอพอโลยีจุดต่อต่างกัน

ของ

กนกศิริ รัศมี

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.เวดิน ปิยรัตน์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กวีวัฒน์ อำนาจโชติ
พันธุ์)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญา ชัยปัญญา)

ชื่อเรื่อง	ความจุต์ลักษณะและความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของการรวมอัตราส่วนสูงสุด สำหรับเมกะโมโมด้วยทอพอโลยีจุดต่อต่างกัน
ผู้วิจัย	กนกศิริ รัชมี
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เวศิน ปิยรัตน์

การกำหนดรูปแบบสถานีฐานย่อยและสายอากาศรวมถึงจำนวนในระบบการกระจายของสายอากาศสามารถมีได้หลากหลายรูปแบบ การออกแบบตำแหน่งสถานีฐานย่อยและจำนวนสายอากาศให้ได้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ดีที่สุดยังมีความจำเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้การออกแบบตำแหน่งสถานีฐานย่อยและสายอากาศควรคำนึงถึงค่าความจุต์ลักษณะสูง และค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายต่ำ จึงเสนอวิธีการวิเคราะห์ค่าความจุต์ลักษณะและค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของการรวมอัตราส่วนสูงสุดสำหรับเมกะโมโมในสภาพแวดล้อมแบบในอาคารกับทอพอโลยีจุดต่อต่างกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากค่าในเชิงคำนวณถูกตรวจสอบความถูกต้องโดยเทียบกับค่าจากผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์พบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกัน

คำสำคัญ : ความจุต์ลักษณะ, ความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหาย, การรวมอัตราส่วนสูงสุด, เมกะโมโม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เวทิน ปิยรัตน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กำพล วรดิษฐ์ ที่ให้คำปรึกษาและสนับสนุนข้าพเจ้า ในการจัดทำงานวิจัยเรื่องความจืดลักษณะและความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของการรวมอัตราส่วนสูงสุดสำหรับเมกะโมโมด้วยทอพอโลยีจุดต่อต่างกันให้สำเร็จบรรลุตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาคั้งนี้รวมถึงบุคคลรอบตัวของข้าพเจ้า และหน่วยงานที่ให้โอกาสข้าพเจ้าได้ศึกษาเพิ่มเติมความรู้ทางด้านวิศวกรรม เพื่อต่อยอดองค์ความรู้ และสามารถนำเอาความรู้ในครั้งนี้ไปประยุกต์ใช้กับงานของข้าพเจ้าอีกด้วย สำหรับงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการเข้าร่วมประชุมและนำเสนอผลงานฯ จากบัณฑิตวิทยาลัย ประจำปีงบประมาณ 2562 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กนกศิริ รัศมี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทบทวนวรรณกรรม	4
2.2 เทคนิคความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity Techniques)	5
2.3 เทคนิคการรวมความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity Combining Techniques)	8
2.4 ระบบวิทยุแบบทั่วไป และระบบสายอากาศหลายต้น.....	14
2.5 การกระจายข้อมูลแบบเลขชี้กำลัง (Exponential Distribution)	18
2.6 ความจุอัตลักษณ์ และความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหาย (Ergodic Capacity and Outage Probability).....	18
2.7 แบบจำลองการแพร่กระจายในร่มไอทียู (ITU Indoor Propagation Model)	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	25

3.1 การวิเคราะห์ขอบเขตองค์ประกอบการเชื่อมต่อระบบเมกะโมโมภาพรวม	26
3.2 ห้องในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร	26
3.3 สถานีฐานย่อย และสายอากาศภาคส่ง.....	27
3.4 กำหนดการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ (Simulation) สำหรับวัดผลด้วยวิธีการสุ่มย้าย ตำแหน่งสายอากาศภาคส่ง และทำการวัดผลด้วยวิธีการสุ่มการจางหายในแต่ละตำแหน่ง	31
3.5 วัดสมรรถนะด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าความจุต์ลักษณะและความน่าจะเป็นสัญญาณขาด หาย.....	31
บทที่ 4 ผลดำเนินงานวิจัย.....	38
4.1 ค่าความจุต์ลักษณะ.....	38
4.2 ความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหาย	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	52
5.1 สรุปผลการวิจัย และอภิปรายผล	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	53
บรรณานุกรม	54
ภาคผนวก.....	57
ประวัติผู้เขียน.....	90

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน N สำหรับคำนวณการสูญเสียการส่งในร่ม	22
ตาราง 2 ค่าการสูญเสียผ่านทะลุชั้นอาคาร L_f สำหรับ n ที่จำนวนของการทะลุชั้นอาคารสำหรับ คำนวณการสูญเสียการส่งในร่ม ($n \geq 1$)	24
ตาราง 3 ผลค่าความจุอัตลักษณ์ของ 1 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง	58
ตาราง 4 ผลค่าความจุอัตลักษณ์ของหลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่ง	62
ตาราง 5 ผลค่าความจุอัตลักษณ์ของหลายหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่ แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน	66
ตาราง 6 ผลค่าความจุอัตลักษณ์ของหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละ สถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากัน	70
ตาราง 7 ผลค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของ 1 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง	74
ตาราง 8 ผลค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของหลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่ง	78
ตาราง 9 ผลค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศ ภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน	82
ตาราง 10 ผลค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศ ภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากัน	86

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 ความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลา	6
ภาพประกอบ 2 ความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งความถี่	7
ภาพประกอบ 3 ความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งในเชิงปริภูมิ แบบสายอากาศภาคส่ง จำนวน 1 ต้น และสายอากาศภาครับจำนวน 2 ต้น หรือจำนวนมากกว่า	7
ภาพประกอบ 4 ความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งในเชิงปริภูมิ แบบสายอากาศภาคส่ง จำนวน 2 ต้น หรือจำนวนมากกว่า และสายอากาศภาครับจำนวน 1 ต้น	8
ภาพประกอบ 5 การรวมสัญญาณแบบเลือก	9
ภาพประกอบ 6 การรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากัน	11
ภาพประกอบ 7 การรวมสัญญาณแบบปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้สูงสุด	12
ภาพประกอบ 8 กราฟการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของเทคนิค เทคนิคความหลากหลายของช่องสัญญาณทั้ง 3 เทคนิค [22].....	14
ภาพประกอบ 9 การส่งสัญญาณแบบ SISO.....	15
ภาพประกอบ 10 การส่งสัญญาณแบบ MIMO	16
ภาพประกอบ 11 แผนผังการดำเนินงาน	25
ภาพประกอบ 12 องค์ประกอบการเชื่อมต่อระบบเมกะโมโนภาพรวม.....	26
ภาพประกอบ 13 หนึ่งสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง	27
ภาพประกอบ 14 หลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่ง	28
ภาพประกอบ 15 หลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวน สายอากาศเท่ากัน	29
ภาพประกอบ 16 หลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวน สายอากาศไม่เท่ากัน	30

ภาพประกอบ 17 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุต์ลักษณะในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณี 1 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งภายในห้องขนาด 5x5,10x10, 15x15 และ 20x20 ตารางเมตร	38
ภาพประกอบ 18 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุต์ลักษณะในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่งภายในห้องขนาด 5x5,10x10, 15x15 และ 20x20 ตารางเมตร	39
ภาพประกอบ 19 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุต์ลักษณะในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากันภายในห้องขนาด 5x5,10x10, 15x15 และ 20x20 ตร.ม.	40
ภาพประกอบ 20 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุต์ลักษณะในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากันภายในห้องขนาด 5x5,10x10, 15x15 และ 20x20 ตร.ม.	41
ภาพประกอบ 21 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุต์ลักษณะในกรณี 1 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง และหลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่งภายในห้องขนาด 5x5 และ 20x20 ตร.ม.....	43
ภาพประกอบ 22 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุต์ลักษณะในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน และในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากันภายในห้องขนาด 5x5 และ 20x20 ตร.ม.....	44
ภาพประกอบ 23 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณี 1 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งภายในห้องขนาด 5x5,10x10, 15x15 และ 20x20 ตารางเมตร	45
ภาพประกอบ 24 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุต์ลักษณะในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่งภายในห้องขนาด 5x5,10x10, 15x15 และ 20x20 ตารางเมตร	46
ภาพประกอบ 25 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่	

แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากันภายในห้องขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 ตารางเมตร.....	47
ภาพประกอบ 26 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากันภายในห้องขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 ตารางเมตร.....	48
ภาพประกอบ 27 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในกรณี 1 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง และหลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่งภายในห้องขนาด 5x5 และ 20x20 ตร.ม.....	49
ภาพประกอบ 28 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน และในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากันภายในห้องขนาด 5x5 และ 20x20 ตร.ม.....	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารไร้สายได้เข้ามามีบทบาทมากในชีวิตประจำวัน เนื่องจากมีจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นในแต่ละวัน จึงส่งผลให้การรับ-ส่งข้อมูลมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย และด้วยวิวัฒนาการของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายนั้นสามารถรับ-ส่งข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ได้มากขึ้น พร้อมทั้งผู้ใช้งานมีแนวโน้มความต้องการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง (High Speed) และความเชื่อถือได้เพิ่มขึ้น (High Reliability) ในการสื่อสารไร้สายในทุกพื้นที่ เทคโนโลยีโมโม่ (Multiple Input and Multiple Output: MIMO) เป็นเทคโนโลยีที่เพิ่มความสามารถในการส่งข้อมูลจำนวนมากในเวลาเดียวกันในช่องสัญญาณเดียวกัน ด้วยจำนวนสายอากาศหลายต้นในการรับ-ส่งสัญญาณ ผลที่ได้คือสามารถรับ-ส่งข้อมูลในปริมาณที่มากขึ้นได้ เทคโนโลยีโมโม่ นั้นมีเสถียรภาพสูงเนื่องจากมีจำนวนสายอากาศหลายต้นในการรับ-ส่งสัญญาณจึงสามารถแก้ปัญหาการจางหาย (Fading) ของสัญญาณ ที่เกิดจากการสะท้อนหรือการลดทอนเมื่อผ่านตัวกลางวัสดุต่าง ๆ ด้วยการรับสัญญาณทดแทนจากสายอากาศต้นอื่น ๆ ที่ช่วยลดความผิดพลาดในการรับ-ส่งข้อมูล แต่ถ้าใช้จำนวนสายอากาศมากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อเรื่องการแทรกสอด (Interference) และหากใช้จำนวนสายอากาศน้อยเกินไปอาจทำให้ไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ซึ่งจะส่งผลถึงความสามารถในการใช้ปริมาณงาน (Throughput) ในเครือข่ายไร้สาย (Wireless Network) ควรจะมีค่าความจุอัตราลักษณะ (Ergodic Capacity) ที่สูง และความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหาย (Outage Probability) ที่ต่ำ ระบบเมกะโมโม่ (MegaMIMO System) เป็นอีกหนึ่งในเทคโนโลยีที่สามารถตอบสนองต่อค่าความจุอัตราลักษณะสูง และค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายต่ำได้ โดยสถานีฐาน (Base Station) เชื่อมต่อกับหลายสถานีฐานย่อย (Distributed Remote Nodes) ตามแต่ละพื้นที่ ซึ่งแต่ละพื้นที่อาจมีจำนวนสายอากาศ (Antenna) 1 ต้น หรือมากกว่า สถานีฐานยังมีข้อจำกัดในเรื่องขนาดและพื้นที่ในการติดตั้ง จึงส่งผลให้สัญญาณที่สถานีฐานแพร่กระจายออกไปนั้นไม่สามารถครอบคลุมในบางพื้นที่ ขนาดและพื้นที่ของสถานีฐานย่อย หรือการติดตั้งสถานีฐานย่อยเพิ่มเติมจึงเป็นหนึ่งในวิธีการแก้ปัญหาสัญญาณขาดหาย หรือสัญญาณไม่ครอบคลุมบางพื้นที่ที่สถานีฐานหลักไม่สามารถรองรับได้ โดยการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานกับสถานีฐานย่อยผ่านระบบเชื่อมโยงแบ็คฮอูล หรือแบ็คฮอูลลิงค์ (Backhaul Links)

เทคโนโลยีเมกะโมโม่ นั้น ถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถรับ-ส่งแบบทวีคูณ (Multiple) ได้ในเวลาเดียวกัน และความถี่เดียวกัน ด้วยอัลกอริทึมการปรับเฟส (Lightweight Distributed

Phase Alignment Algorithm) ให้เหมาะสมแล้วจึงส่งสัญญาณ แต่ในปัจจุบันการออกแบบจำนวนสายอากาศให้เหมาะสมในแต่ละพื้นที่นั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งยังคงมีปัญหว่าควรออกแบบจำนวนสายอากาศอย่างไรให้ได้ประโยชน์สูงสุดในพื้นที่จำกัด และยังไม่มีการที่แน่นอน จึงเป็นเรื่องยากที่จะพิจารณาการออกแบบในกรณีโครงแบบทั่วไป (General Configuration) ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงนำเสนอการวัดผลด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าความจุอัตราสัญลักษณ์และความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของการรวมอัตราส่วนสูงสุดสำหรับเมกะโมโมด้วยทอพอโลยีจุดต่อต่างกันในรูปแบบทั่วไป เพื่อให้ได้สมการการออกแบบจำนวนสายอากาศที่เหมาะสม และสามารถตอบสนองต่อค่าความจุอัตราสัญลักษณ์สูง และค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายต่ำได้

ในบริบทนิพนธ์เล่มนี้จะแบ่งหัวข้อการนำเสนอเรื่องความจุอัตราสัญลักษณ์และความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของการรวมอัตราส่วนสูงสุดสำหรับเมกะโมโมด้วยทอพอโลยีจุดต่อต่างกัน โดยบทที่ 1 จะกล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย บทที่ 2 จะกล่าวถึงวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 อธิบายถึงวิธีดำเนินการวิจัย บทที่ 4 และ บทที่ 5 จะกล่าวถึง ผลของงานวิจัย สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะของงานวิจัยตามลำดับ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 วิเคราะห์ความจุอัตราสัญลักษณ์และความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของข่ายงานไร้สายเมกะโมโมเมื่อมีทอพอโลยีจุดต่อต่างกันในสภาพแวดล้อมแบบในอาคารที่มีขนาดพื้นที่ใด ๆ โดยใช้การรวมสัญญาณเข้าแบบอัตราส่วนสูงสุด (Diversity with Maximum Ratio Combining)

1.2.2 สามารถออกแบบรูปแบบการกระจายตัวของสถานีฐานย่อยและสายอากาศให้ได้ประโยชน์สูงสุดในพื้นที่จำกัด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ใช้เทคนิคความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบการรวมอัตราส่วนสูงสุด

1.3.2 สภาพแวดล้อมที่พิจารณาเป็นห้องภายในอาคารแนวพื้นราบ

1.3.3 วิเคราะห์สัญญาณข่ายงานเดี่ยว ซึ่งปราศจากสัญญาณแทรกสอด

1.3.4 แบบจำลองช่องสัญญาณประกอบด้วยการสูญเสียในอวกาศว่าง (Free Space Loss) และการจางหายแบบเร็ว (Fast Fading)

1.3.5 จุดต่อทราบสถานะช่องสัญญาณ (Channel State Information: CSI)

1.3.6 ทวนสอบผลวิเคราะห์ด้วยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1.4.1 ทราบสมรรถนะในแง่ความจุต์ลักษณะและความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของข่ายงานไร้สายเมกะโมโมในสภาพแวดล้อมแบบในอาคารเมื่อใช้ทอพอโลยีจุดต่อแบบต่าง ๆ

1.4.2 สามารถออกแบบทอพอโลยีจุดต่อที่มีความจุต์ลักษณะสูง หรือความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายต่ำสำหรับข่ายงานไร้สายเมกะโมโมให้เหมาะสมตามสภาพแวดล้อมแบบในอาคาร



บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทบทวนวรรณกรรม

ในอดีตเทคโนโลยีที่ใช้การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา (Space-Time Coding: STC) ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากได้เปรียบในการเข้ารหัสพร้อมกับความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งในเชิงปริภูมิที่ฝั่งเครื่องส่งโดยปราศจากการสูญเสียประสิทธิภาพเชิงสเปกตรัม (Spectral Efficiency) [1] และช่วยลดผลกระทบจากการจางหาย เนื่องจากความหลากหลายด้านฝั่งส่ง [2] และทางด้านกายภาพ (Physical) สายอากาศ (Antenna) ของแต่ละสถานีฐาน หรือหลายสถานีฐาน สามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือของการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างสถานีเคลื่อนที่กับหลายสถานีฐานที่ให้บริการ โดยการรวมกันของหลายสถานีฐานนี้ใช้ประโยชน์จากความหลากหลายเชิงพื้นที่ [3] ดังนั้นการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา หรือสายอากาศ เป็นตัวเลือกของการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) เนื่องจากการเข้าจังหวะ (Synchronization) มีความยุ่งยากในการประมวลผลสัญญาณหากมีลักษณะตำแหน่งเชิงภูมิศาสตร์ต่างกัน ซึ่งด้วยประสิทธิภาพเทคนิคการเข้าจังหวะกัน (Efficient Synchronize Technique) และในทางอุดมคติของการเข้าจังหวะการช่วยเหลือการเข้ารหัส (Coding Assistance: CA) ต้องใช้ความรู้ของโครงสร้างรหัส และพารามิเตอร์การเข้าจังหวะ (Synchronization Parameters) เพื่อปรับปรุงคุณภาพการประมาณค่า [4] เมื่อส่งข้อมูลหรือสัญญาณจากหลายสถานีฐานระยะไกล (Remote Nodes) ตามแต่ละพื้นที่ หากข้อมูลมีขนาดใหญ่เพื่อลดความล่าช้าของแพ็กเก็ตและขนาดบัพเฟอร์ จึงถูกลดทอนโดยการจำกัดจำนวนครั้งของการส่งใหม่สูงสุด สามารถถูกประมวลผล และข้อมูลจะถูกรวมเข้าด้วยกันด้วยการรวมอัตราส่วนสูงสุด (Maximal Ratio Combining: MRC) หรือเทคนิคบีมฟอร์มมิง (Beamforming Techniques) [5] ดังนั้นระบบการกระจายตัวของสายอากาศ (Distributed Antenna System) สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ และคาดว่าจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น สถานีฐานถูกแยกไปตามแต่ละพื้นที่ทางภูมิศาสตร์เชื่อมต่อกับหน่วยประมวลผลและการตัดสินใจแบบรวมศูนย์ ซึ่งยืดหยุ่นสำหรับเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในอนาคต การประมวลผลสัญญาณและการประมวลผลทั้งหมดจะดำเนินการในหน่วยกลาง หรือ เครือข่ายการเข้าถึงการสื่อสารทางวิทยุแบบคลาวด์ (Cloud Radio Access Networks: C-RAN) [6],[7] นอกจากนี้ เครื่องมือผู้ใช้ร่วมกัน (Share User-Equipment: Share-UE) เป็นการจัดสรรทรัพยากรสำหรับอุปกรณ์ผู้ใช้ที่ใช้งานร่วมกัน [8] และการจัดสรรทรัพยากรสำหรับอุปกรณ์ผู้ใช้ที่ใช้งานร่วมกัน - ระบบสายอากาศแบบ

กระจายด้านข้าง (Shared-UE - Side Distributed Antenna System: SUDAS) สามารถลดข้อจำกัด โดยใช้คลื่นความถี่ที่ได้รับใบอนุญาต (Licensed Band) และคลื่นความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต (Unlicensed Band) ซึ่งใช้คลื่นความถี่ที่สองที่ไม่มีใบอนุญาตสำหรับการส่งสัญญาณภายในอาคารพร้อมแบนด์วิดท์ขนาดใหญ่ที่มีอยู่ เช่น คลื่นมิลลิเมตร เป็นต้น[9] อีกทั้งยังใช้ประโยชน์ของโมโม่ที่กินขอบเขตกว้าง (Large-Scale MIMO) [10] หรือโมโม่ขนาดใหญ่ (Massive MIMO) ได้รับการพิจารณาอย่างมากเนื่องจากสามารถส่งข้อมูลขนาดใหญ่ในอัตราการส่งข้อมูลที่สูงและมีความน่าเชื่อถือในการเชื่อมต่อสำหรับเครือข่ายไร้สายในอนาคต[11]

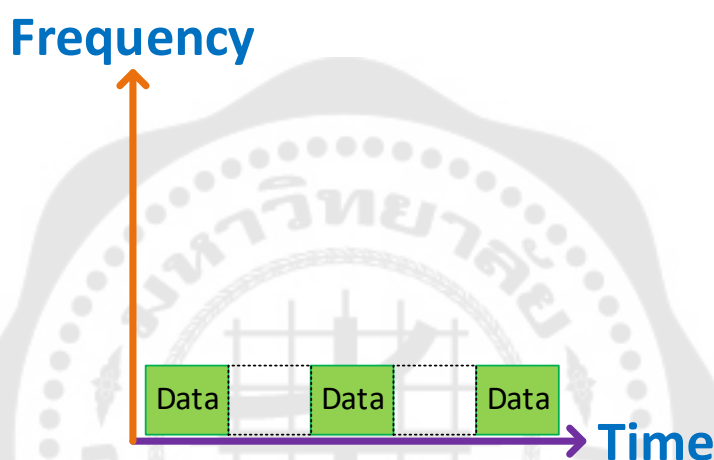
การออกแบบระบบการกระจายตัวของสายอากาศ โดยการวิเคราะห์ค่าความจุอัตลักษณ์และค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายควรมีการพัฒนาเพิ่มขึ้น และได้รับการเผยแพร่ไปประยุกต์ใช้ในอนาคต ในบางกรณีการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์เป็นเรื่องไม่น่าสนใจ และจาก [12] นำเสนออัลกอริทึมเพื่อกำหนดตำแหน่งสายอากาศ โดยพิจารณาระบบเชื่อมโยงขาลงการกระจายตัวของสายอากาศ (Down Link Distributed Antenna System) ด้วยการจำกัดจำนวนของเซลล์ (Cells Site) และยังไม่มีความพร้อมที่แน่นอน จึงเป็นเรื่องยากที่จะพิจารณาการออกแบบในกรณีโครงแบบทั่วไป (General Configuration)

2.2 เทคนิคความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity Techniques)

ในระบบการสื่อสารไร้สายการแพร่กระจายสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไร้สาย (Wireless Channel) หรือตัวกลางไร้สายจากสายอากาศด้านส่งไปยังสายอากาศด้านรับอย่างอิสระ และสามารถเดินทางได้หลากหลายเส้นทาง จึงถูกลดทอนไปตามเส้นทางที่สัญญาณเดินทางผ่าน ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในบริเวณนั้น ๆ และก่อให้เกิดการจางหายของสัญญาณ [13] ซึ่งการจางหายของสัญญาณ สร้างผลกระทบอย่างมากกับประสิทธิภาพของช่องสัญญาณไร้สาย และอาจทำให้ข้อมูลที่ภาครับได้นั้นไม่ตรงกับข้อมูลต้นฉบับจากภาคส่งหรือมีการผิดเพี้ยนไปจากเดิม ซึ่งมีโอกาสน้อยหรือความเป็นไปได้ต่ำที่สัญญาณนั้นจะถูกลดทอนอย่างหนักจากการจางหายของสัญญาณ ในทุกเส้นทาง โดยที่ความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity Combining) สามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการจางหายของสัญญาณ ในเส้นทางที่สัญญาณจางหายได้ด้วยเลือกสัญญาณที่แรงที่สุด [14], [15] โดยความหลากหลายของช่องสัญญาณแบ่งออกเป็น 3 เทคนิคหลัก ๆ ได้แก่ ความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลา, ความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งความถี่ และความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งในเชิงปริภูมิ

2.2.1 ความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลา (Time Diversity)

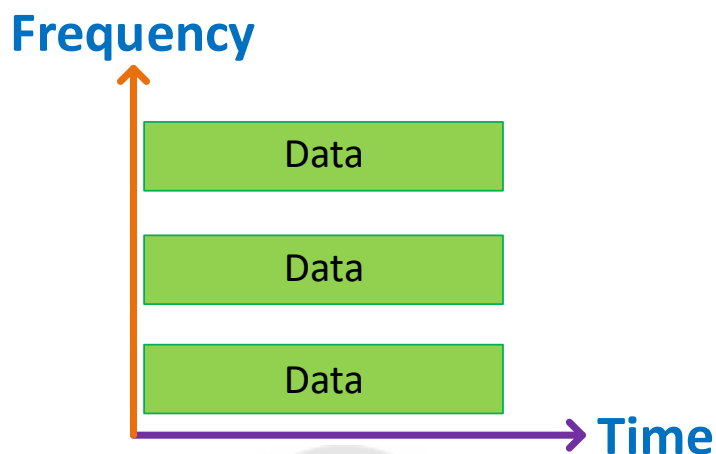
การส่งสัญญาณซ้ำ ๆ ด้วยข้อมูลชุดเดิมที่เวลาต่างกันโดยภาครับสามารถเก็บและรวมสำเนาข้อมูลได้หลายชุด [14], [16] ซึ่งเทคนิคความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลาควรต้องลดอัตราข้อมูล (Data Rate) ลง เมื่อข้อมูลถูกส่งซ้ำในช่วงเวลาใหม่ และไม่ต้องเพิ่มกำลังการส่งสัญญาณ [16] เพราะข้อมูลมีขนาดเล็กจึงส่งผลให้ใช้กำลังสำหรับการส่งสัญญาณออกไปไม่มากในแต่ละเวลา



ภาพประกอบ 1 ความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลา

2.2.2 ความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (Frequency Diversity)

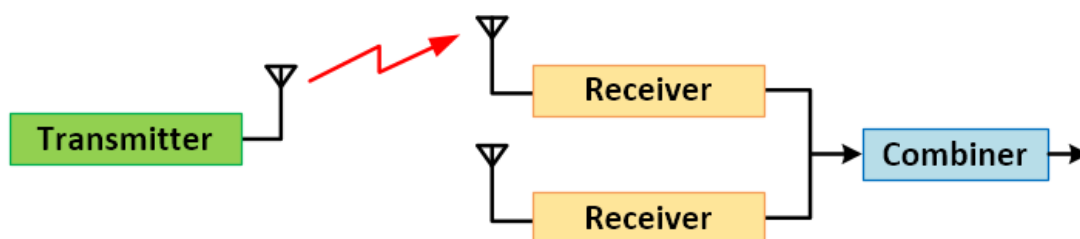
การส่งสัญญาณซ้ำ ๆ ด้วยข้อมูลชุดเดิมที่ความถี่ต่างกันซึ่งภาครับอาจได้รับข้อมูลที่สมบูรณ์ หรือได้ข้อมูลที่ผิดเพี้ยนไป จากคุณลักษณะของการจายของสัญญาณ [14], [16] ซึ่งเทคนิคความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งความถี่ส่งสัญญาณแถบแคบ (Narrow Band) ที่ขนาดเท่ากัน ซึ่งต้องรวมกำลังการส่งสัญญาณเนื่องจากมีความถี่หลากหลาย [16]



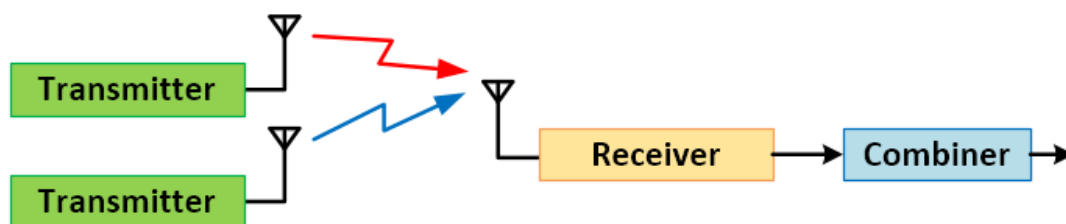
ภาพประกอบ 2 ความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งความถี่

2.2.3 ความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งในเชิงปริภูมิ (Space Diversity /Spatial Diversity)

เนื่องจากสัญญาณสามารถเดินทางได้หลากหลายเส้นทางหรือคลื่นหลายวิถี (Multipath) จากสายอากาศภาคส่งจำนวน 1 ต้น หรือจำนวนมากกว่า 1 ต้นไปยังสายอากาศภาครับที่มีจำนวนสายอากาศ 1 ต้น หรือจำนวนมากกว่า 1 ต้น โดยภาครับจะเลือกสัญญาณที่คุณภาพดีที่สุดจากสายอากาศทั้งหมดที่มาจากทุกเส้นทาง



ภาพประกอบ 3 ความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งในเชิงปริภูมิ แบบสายอากาศภาคส่งจำนวน 1 ต้น และสายอากาศภาครับจำนวน 2 ต้น หรือจำนวนมากกว่า



ภาพประกอบ 4 ความหลากหลายของช่องสัญญาณแบบแบ่งในเชิงปริภูมิ แบบสายอากาศภาคส่งจำนวน 2 ต้น หรือจำนวนมากกว่า และสายอากาศภาครับจำนวน 1 ต้น

ประโยชน์ของความหลากหลายของช่องสัญญาณ คือ สามารถแก้ไขปัญหการกลืนหายของสัญญาณ โดยมีหลักการ 3 แบบ

2.2.3.1 วิธีการรวมสัญญาณแบบเลือก

2.2.3.2 วิธีการรวมสัญญาณแบบปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

(Signal to Noise Ratio: SNR) ให้สูงสุด

2.2.3.3 วิธีการรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากัน

2.3 เทคนิคการรวมความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity Combining Techniques)

ด้วยคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณที่สามารถเดินทางได้หลายเส้นทางหรือคลื่นหลายวิถี ในระบบการสื่อสารไร้สาย จึงก่อให้เกิดความหลากหลายของช่องสัญญาณ โดยที่หลักการของความหลากหลายเชิงตำแหน่งถือว่ามีความเป็นไปได้น้อยที่สัญญาณจากทุกเส้นทางจะถูกรบกวนมากจนก่อให้เกิดการจางหายของสัญญาณในทุกสัญญาณ ดังนั้นต้องมีอย่างน้อยหนึ่งหรือมากกว่าสัญญาณ [14] ที่ยังสามารถใช้งานได้ โดยความสมบูรณ์ของข้อมูลขึ้นอยู่กับการลดทอนสัญญาณ (Loss) ที่ภาครับได้รับ ซึ่งเทคนิคความหลากหลายสามารถลดผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณที่ส่งผลอย่างมากกับประสิทธิภาพของช่องสัญญาณแบบไร้สาย Jack H. Winters, Jack Salz, Richard D. Gitlin ได้นำเสนอวิธีการรวมสายอากาศ และผลที่ได้คือ การเพิ่มของสถานีฐานและจำนวนของสายอากาศ ทำให้สัญญาณรบกวนลดลง [17]

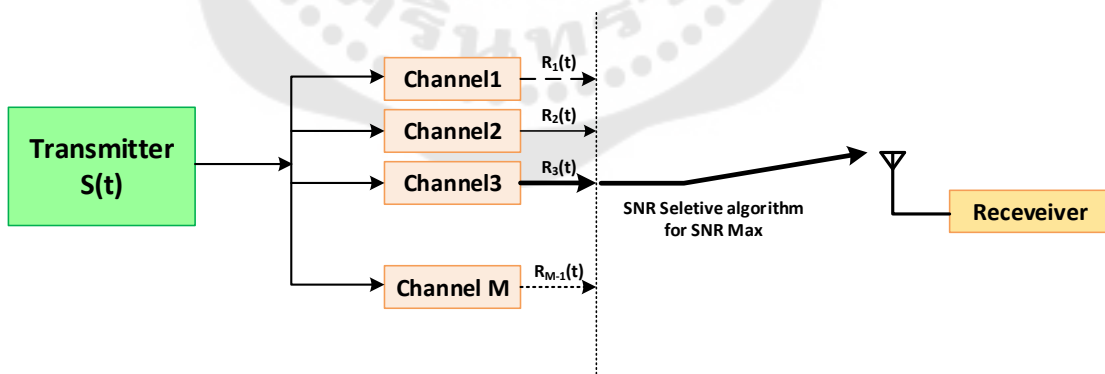
โดยทั่วไปสภาพแวดล้อมในเมืองหรือย่านธุรกิจนั้น มักมีอาคารสูงจำนวนมากอยู่ในบริเวณใกล้เคียงหรือติดกัน โดยแต่ละอาคารนั้นมีความสูงต่ำแตกต่างกันไป ซึ่งความหนาแน่นของอาคารตามสภาพแวดล้อมที่กล่าวนี้ส่งผลให้การเดินทางของสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับมีได้หลากหลายเส้นทาง ไม่ว่าจะเป็นการสะท้อนจากอาคารหรือวัสดุใกล้เคียง หรือการลดทอนเมื่อ

ผ่านตัวกลางต่าง ๆ หรือสามารถรับสัญญาณได้จากภาคส่งโดยตรง หรือเรียกว่าการกระจายคลื่นหลายวิถี (Multipath Propagation) ด้วยคุณลักษณะของคลื่นสัญญาณที่เดินทางผ่านตัวกลางจะมีการลดทอน จางหาย และแทบจะไม่สามารถรับสัญญาณได้โดยตรง หรือรับได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น สถานการณ์ที่กล่าวข้างต้นเรียกว่าการจางหายแบบเรย์ลี (Rayleigh Fading) การรบกวนของสถานีฐานขนาดเล็กหรือไมโครในสภาพแวดล้อมแบบนาคาгами (Nakagami) ถูกพิจารณาเนื่องจากเหมาะสมกับข้อมูลทดลองดีกว่าการจางหายแบบเรย์ลี หรือการจางหายแบบไรเซียน (Rician Fading) ในหลายกรณี [18] และสภาพแวดล้อมแบบการจางหายไรเซียนอาจถูกนำมาใช้เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมสถานีฐานขนาดเล็ก และช่องสัญญาณการจางหายดาวเทียมเคลื่อนที่ (Mobile Satellite Fading Channel) [19]

หลังจากภาครับได้รับสัญญาณผ่านช่องสัญญาณแล้วนั้น นำสัญญาณที่ได้มาประมวลผลด้วยเทคนิคการรวมความหลากหลายของช่องสัญญาณมี 3 วิธีหลักเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากสัญญาณจางหาย คือ การรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากัน, การรวมสัญญาณแบบเลือก และการรวมสัญญาณแบบปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้สูงสุด

2.3.1 การรวมสัญญาณแบบเลือก (Selection Combining: SC)

การรวมสัญญาณแบบเลือกจะทำการรวมสัญญาณ และเลือกรับสัญญาณที่ดีที่สุดเพียง 1 สัญญาณเท่านั้น เมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 5 การรวมสัญญาณแบบเลือก

$$r_i(t) = A_i e^{j\theta_i} s(t) + v_i(t) \quad \text{สำหรับ } i = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (1)$$

$r(t)$ สัญญาณที่รับได้ที่จำนวนช่องสัญญาณ i

$s(t)$ คือ สัญญาณต่ำผ่านเทียบเท่ากับสัญญาณส่ง
 $A_i e^{j\theta_i}$ คือ การลดทอนการจางหายที่สถานีฐานใดๆ
 $v_i(t)$ คือ สัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (Additive White Gaussian Noise: AWGN)

M คือ จำนวนช่องสัญญาณทั้งหมด
 และผลลัพธ์ของการรวมสัญญาณแบบเลือก จากค่าสัญญาณที่ได้รับสูงสุดของ A_i คือ

$$y(t) = A_i e^{j\theta_i} s(t) + v_i(t) \quad \text{สำหรับ } A = \text{Max}(A_0, A_1, A_2, \dots, A_{M-1}) \quad (2)$$

และที่เงื่อนไขความแรงของสัญญาณที่ได้รับมีค่าสูงสุด ดังนั้น

$$SNR_{\max} = \gamma_{\max} = A^2 \frac{E_b}{N_o} = \text{Max}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{M-1}) \quad (3)$$

โดยที่ E_b / N_o คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสำหรับสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก

ในกรณีที่แต่ละช่องสัญญาณอิสระต่อกันและมีการแจกแจงที่เหมือนกัน (Independent and Identically Distributed: IID) จะได้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเป็น

$$P_\gamma(x) = [P_{\gamma_0}(x)]^M \quad \text{และ} \quad P_\gamma(x) = M P_{\gamma_0}(x) [P_{\gamma_0}(x)]^{M-1} \quad (4)$$

สำหรับช่องสัญญาณการจางหายแบบเรย์ลี คือ

$$P_\gamma(x) = (1 - e^{-x/\gamma_0})^M \quad (5)$$

$$\gamma_0 = 2\sigma^2 (E_b / N_o) \quad (6)$$

การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของอัตราการผลิตบิต (Bit Error Rate: BER) เพื่อหาความน่าจะเป็นของความผิดพลาดสำหรับสายอากาศภาครับ นั่นคือความน่าจะเป็นที่อัตราส่วนของพลังงานบิตต่อสัญญาณรบกวนต่ำอย่างรวดเร็วกว่าเกณฑ์ โดยความน่าจะเป็นของความล้มเหลวสำหรับ i^{th} ในสายอากาศภาครับ

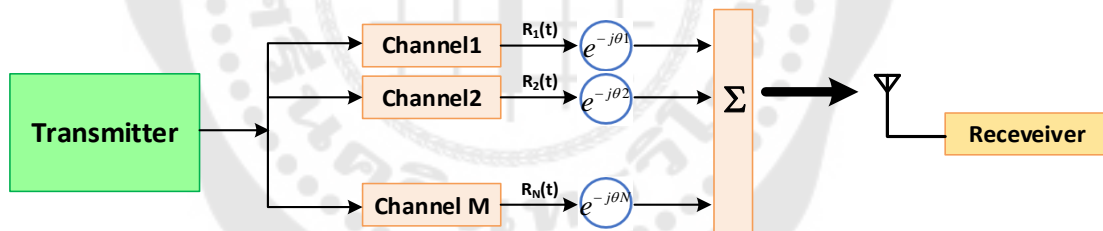
$$P_{\text{out}, \gamma_i} = P[\gamma_i < \gamma_s] = 1 - e^{\left(\frac{-\gamma_i}{E_b/N_o}\right)} \quad (7)$$

โดยที่ γ_s คือ ค่าเกณฑ์ที่กำหนดสำหรับอัตราของพลังงานบิตต่อสัญญาณรบกวน ในกรณีที่กำหนดจำนวนสายอากาศที่ภาครับ M และแต่ละช่องสัญญาณ สำหรับสายอากาศเป็นอิสระจากกัน จะได้ค่าความน่าจะเป็นร่วมกันจากการคูณของแต่ละความน่าจะเป็น

$$P_{out} = P[\gamma_1 < \gamma_s] \cdot P[\gamma_2 < \gamma_s] \dots P[\gamma_i < \gamma_s] = \prod_1^M P[\gamma_i < \gamma_s] = \left[1 - e^{\left(\frac{-\gamma_s}{E_b/N_0} \right)} \right]^M \quad (8)$$

2.3.2 การรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากัน (Equal Gain Combining: EGC)

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากันจะทำการรวมสัญญาณโดยการปรับค่าอัตราขยายของแต่ละสัญญาณ เพื่อให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของทุกสัญญาณเท่ากันหมด จากนั้นจะนำสัญญาณทั้งหมดรวมกัน ซึ่งจะส่งผลให้ได้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณรวมเพิ่มขึ้นด้วยในอัตราส่วนเท่ากับจำนวนของสัญญาณที่ภาครับ



ภาพประกอบ 6 การรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากัน

โดยสัญญาณของแต่ละสัญญาณเป็นการหมุนด้วย $e^{-j\theta_i}$ และทุกสัญญาณเป็นการรวมกัน ผลลัพธ์การรวม คือ

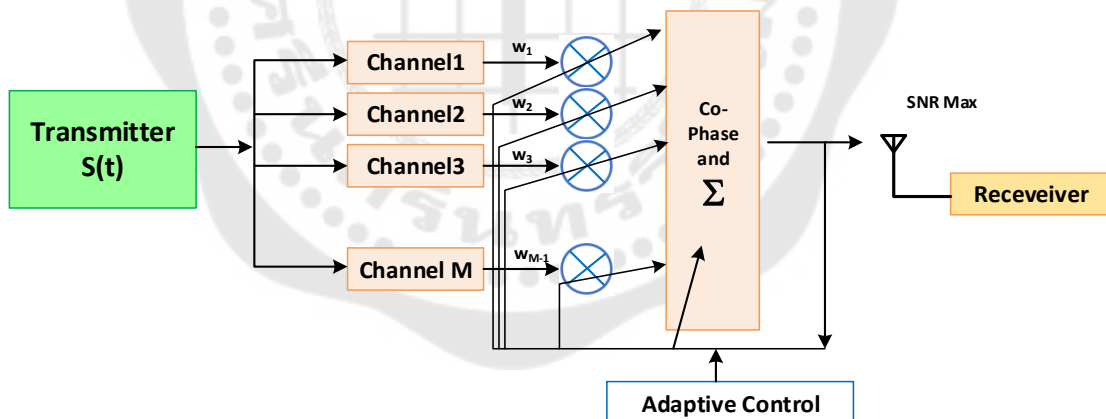
$$y(t) = \sum_{i=0}^{M-1} e^{-j\theta_i} r_i(t) = \left(\sum_{i=0}^{M-1} A_i \right) s_i(t) + \sum_{i=0}^{M-1} e^{-j\theta_i} v_i(t) \quad (9)$$

ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

$$\gamma = \left(\sum_{i=0}^{M-1} A_i \right)^2 E_b / MN_0 \quad (10)$$

2.3.3 การรวมสัญญาณแบบปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้สูงสุด (Maximal Ratio Combining: MRC)

การรวมสัญญาณแบบปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้สูงสุด เป็นกลยุทธ์ความหลากหลายเชิงพื้นที่ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อลดสาเหตุความผันผวนของสัญญาณ ที่เกิดจากการแพร่กระจายหลายวิถี ในระบบการสื่อสารไร้สาย เทคนิคการรวมสัญญาณแบบปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้สูงสุดจะรวมสัญญาณที่ได้รับที่ละเส้นทางเพื่อเพิ่มเอาต์พุตอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ขณะนั้น โดยวิธีการนี้สัญญาณจากทุกความหลากหลายช่องสัญญาณถูกถ่วงน้ำหนักตามแต่ละสัญญาณต่ออัตราส่วนสัญญาณรบกวนสำหรับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนและรวมสัญญาณไว้ ตามภาพประกอบ 7 ซึ่งสัญญาณความหลากหลายที่เลือกต้องเฟสตรงกัน (Co-Phase) ก่อนรวมสัญญาณ ผลลัพธ์ของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนคือการรวมค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ขณะนั้น และในทางสถิติการรวมสัญญาณแบบปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้สูงสุดถูกจัดว่าเป็นเทคนิคที่ดีที่สุดในการลดความจางหายแบบหลายวิถี และถูกนำมาใช้เป็นรูปแบบระบบการสื่อสาร [20]



ภาพประกอบ 7 การรวมสัญญาณแบบปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้สูงสุด

โดยผลลัพธ์ของการรวมสัญญาณแบบปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้สูงสุดสามารถแสดงได้เป็น

$$y(t) = \sum_{i=0}^M w_i r_i(t) \quad (11)$$

โดยที่ w_i คือ การสังยุคอัตราขยายช่องสัญญาณ (Channel Gain Conjugate)

$$y(t) = \sum_{i=0}^{M-1} A_i e^{-j\theta_i} r_i(t) = \sum_{i=0}^{M-1} A_i e^{-j\theta_i} [A_i e^{j\theta_i} s(t) + v_i(t)] = \sum_{i=0}^{M-1} A_i^2 s_i(t) + \sum_{i=0}^{M-1} A_i e^{-j\theta_i} v_i(t) \quad (12)$$

ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของการรวมสัญญาณ

$$\gamma_{\max} = \sum_{i=0}^{M-1} A_i^2 E_b / N_0 = \sum_{i=0}^{M-1} \gamma_i \quad (13)$$

โดยที่ E_b / N_0 คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสำหรับสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก

A_i คือ ค่าช่องสัญญาณอิสระต่อกันและมีการแจกแจงที่เหมือนกันแบบเรย์ลี สำหรับพารามิเตอร์ σ^2

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของช่องสัญญาณสำหรับการรวมสัญญาณแบบปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้สูงสุด

$$f_y(x) = \frac{x^{M-1} e^{-x/\gamma_0}}{(\gamma_0)^M (M-1)!} \quad \text{สำหรับ } x \geq 0 \quad (14)$$

โดยที่ $\gamma_0 = 2\sigma^2 E_b / N_0$ คือ ค่าเฉลี่ยต่อบิตในแต่ละช่องสัญญาณความหลากหลาย

$\gamma_c = M \gamma_0$ คือ ค่าเฉลี่ยต่อบิตหลังการรวมกัน

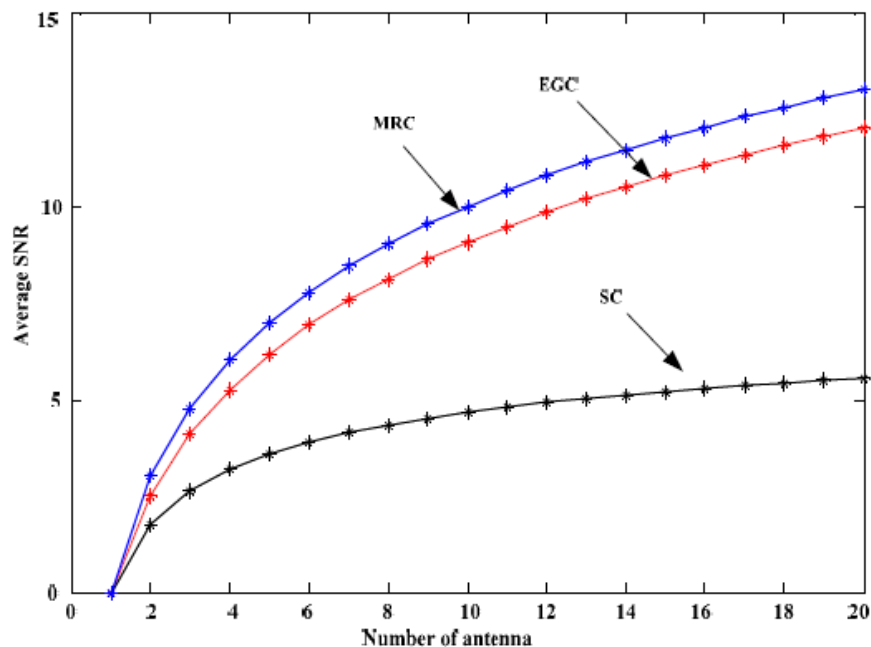
ความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหาย คือ

$$P_{\text{out}}(x) = 1 - e^{-x/\gamma_0} \sum_{m=1}^M (x/\gamma_0)^{M-1} / (M-1)! \quad (15)$$

การประเมินและเปรียบเทียบวิธีการที่หลากหลายในการรวมช่องสัญญาณการจางหายแบบเรย์ลี การรวมสัญญาณแบบเลือกมีค่าอัตราความผิดพลาดสูงกว่าของการรวมสัญญาณแบบปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้สูงสุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่เท่ากัน [21]

จากภาพประกอบ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของเทคนิคความหลากหลายของช่องสัญญาณทั้ง 3 เทคนิค โดยจะเห็นว่า การรวมสัญญาณแบบปรับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้สูงสุดมีค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงที่สุด เมื่อเทียบกับเทคนิคความหลากหลายของช่องสัญญาณอีก 2 เทคนิค โดยที่การรวมสัญญาณแบบเลือกมีค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่ำ

ที่สุด และการรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากันมีค่าอยู่ระหว่าง 2 เทคนิคที่ได้กล่าวมา [22]



ภาพประกอบ 8 กราฟการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของเทคนิคเทคนิคความหลากหลายของช่องสัญญาณทั้ง 3 เทคนิค [22]

2.4 ระบบวิทยุแบบทั่วไป และระบบสายอากาศหลายต้น

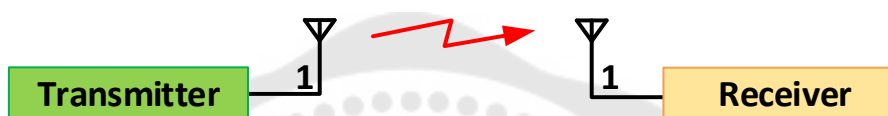
การส่งข้อมูลในระบบสื่อสารไร้สายนั้น สัญญาณหรือคลื่นที่ถูกแพร่กระจายออกไปมีหลายเส้นทางที่แตกต่างกัน เดินทางผ่านสิ่งกีดขวางมากมาย เช่น ตึก บ้าน ต้นไม้ เป็นต้น ดังนั้น สัญญาณที่มาถึงสายอากาศฝั่งรับ จะถูกประกอบด้วยสัญญาณที่สะท้อนผ่านสิ่งกีดขวางต่างๆ สัญญาณที่สามารถมาถึงฝั่งรับได้โดยตรง สัญญาณที่มาจากหลายเส้นทาง นี้เรียกว่า คลื่นหลายวิถี สัญญาณที่ได้รับจากคลื่นหลายวิถีถือว่าเป็นปัญหาในระบบสื่อสารเนื่องจากส่วนใหญ่เป็นการรบกวนของสัญญาณ ข้อมูลที่ฝั่งรับได้รับ บางครั้งถูกลดทอน หรือหักล้าง ผลกระทบทำให้ข้อมูลสูญหาย ไม่ครบถ้วน และมีโอกาสน้อยที่สัญญาณที่ฝั่งรับถูกเสริมและทับกันพอดี โดยระบบการสื่อสารทั่วไปใช้สายอากาศส่งสัญญาณและรับสัญญาณต้นเดียว เรียกว่า Single Input Single Output (SISO) ยังไม่สามารถแก้ไขปัญหาคือคลื่นหลายวิถี

โมโม่เป็นการเทคโนโลยีการสื่อสารแบบ Multiple Input Multiple Output คือการใช้สายอากาศหลายต้น ในการรับและส่งข้อมูลในเวลาเดียวกันเพื่อเพิ่มสมรรถนะอย่างทวีคูณ ของ

ลิงค์สัญญาณวิทยุ เทคโนโลยีโมโม ใช้ประโยชน์ และข้อได้เปรียบที่เกิดจากปรากฏการณ์คลื่นหลายวิถีที่การส่งข้อมูลสะท้อนออกจากผนัง เพดาน อาคาร บ้าน หรือ วัตถุอื่น โดยใช้สายอากาศหลายต้นสำหรับการรับ-ส่งข้อมูลในเฟสและเวลาที่ต่างกันรับข้อมูล จึงกลายเป็นองค์ประกอบสำคัญของมาตรฐานเครือข่ายไร้สาย

2.4.1 ระบบวิทยุแบบทั่วไป

ระบบการสื่อสารทั่วไปใช้สายอากาศส่งสัญญาณและรับสัญญาณต้นเดียว เรียกว่า Single Input Single Output (SISO)



ภาพประกอบ 9 การส่งสัญญาณแบบ SISO

ตามทฤษฎีบทของ Shannon-Hartley ความจุของช่องสัญญาณ ขึ้นอยู่กับความกว้างแถบ หรือแบนด์วิดท์ และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน โดยค่าความจุควรมีค่าสูงกว่าช่องสัญญาณขาดหาย

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (16)$$

โดยที่ C คือ ความจุของสัญญาณ
 B คือ ความกว้างแถบ หรือแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณ
 S คือ กำลังของสัญญาณ

N คือ กำลังของสัญญาณรบกวน

ประสิทธิภาพของระบบไซโซยังไม่เหมาะสมสำหรับในช่องสัญญาณขาดหาย หรือคลื่นหลายวิถี แต่คุณสมบัติช่องสัญญาณแบบไซโซสามารถใช้ประโยชน์ได้ง่าย เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพของระบบสามารถทำได้โดยการเตรียมเครื่องรับสำหรับสำเนาข้อมูลหลายชุด [23]

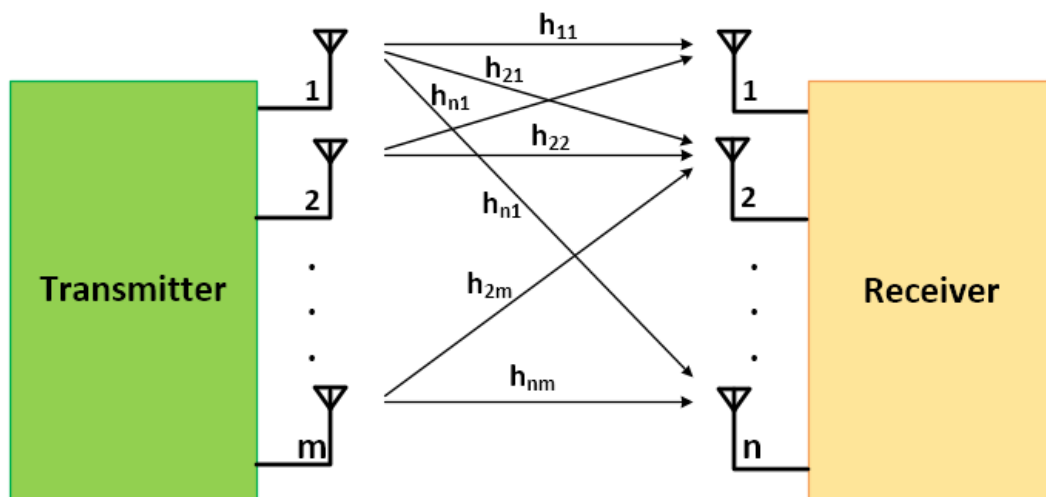
2.4.2 ระบบสายอากาศหลายต้น

2.4.2.1 ระบบไมโมทั่วไป

ระบบไมโมหมายถึงการใช้สายอากาศหลายต้นที่ภาครับและภาคส่ง ที่มีการส่งข้อมูลและรับข้อมูลมากกว่าหนึ่งสัญญาณพร้อมกันผ่านช่องสัญญาณวิทยุช่องเดียวกันโดยใช้ประโยชน์จากแพร่กระจายคลื่นหลายวิถี

ประกอบด้วย m สายอากาศส่งสัญญาณ และ n สายอากาศรับสัญญาณ โดยที่ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน ทุกสายอากาศรับสัญญาณไม่เพียงแค่อรับสัญญาณจากสายอากาศส่งหลักเท่านั้นแต่ยังรับสัญญาณจากสายอากาศอื่น ๆ ด้วย ค่าสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณของสายอากาศที่ 1 ไปยังสายอากาศที่ 1 กำหนดเป็น h_{11} ในขณะที่การเชื่อมแบบไมโดยตรงจากสายอากาศที่ 1 ไปยังสายอากาศที่ 2 จะนับเป็นการเชื่อมต่อข้ามส่วนประกอบกันกำหนดเป็น h_{12} ดังนั้นจะได้เมทริกซ์ H ขนาด $n \times m$

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & \dots & h_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & \dots & h_{nm} \end{pmatrix}$$



ภาพประกอบ 10 การส่งสัญญาณแบบ MIMO

สมการการสื่อสารเป็นผลมาจากการรับสัญญาณ เวกเตอร์ \bar{y} ส่งสัญญาณ เวกเตอร์ \bar{x} และสัญญาณรบกวน n

$$\bar{y} = H\bar{x} + n \quad (17)$$

จากสมการด้านบนเป็นการส่งข้อมูลแบบ MIMO ข้อมูลที่จะส่งถูกแบ่งออกเป็นสตรีมข้อมูลอย่างอิสระ จำนวนของสตรีม M น้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนของสายอากาศในกรณีของการไม่สมมาตรของสายอากาศ $m \neq n$ ซึ่งจะน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนต่ำสุดของสายอากาศ เช่น 3x3 ระบบจะส่งข้อมูลแบบ 3 สตรีมหรือน้อยกว่า ในขณะที่ถ้าเป็น 3x2 ระบบจะส่งข้อมูลแบบ 2 สตรีมหรือน้อยกว่า ในทางทฤษฎีความจุหรือปริมาณสูงสุดที่จะรับได้ (Capacity: C) เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามจำนวนของสตรีม (M) ตามทฤษฎีบท Shannon-Hartley สำหรับ MIMO

$$C = M \cdot B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (18)$$

2.4.2.2 ระบบเมกะไมโม 2.0 (Mega MIMO 2.0)

เมกะไมโม (Mega MIMO) เป็นการส่งข้อมูลโดยใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน ในช่วงเวลาเดียวกันจากเครื่องส่งสัญญาณหลายชุดที่กระจายสัญญาณไปยังเครื่องรับ โดยไม่แทรกสอด (Interference) ระหว่างกัน เครื่องส่งสัญญาณได้อย่างอิสระใช้คลื่นความถี่เดียวกัน ใช้การเข้าจังหวะแบบปรับเฟสช่วยให้สามารถส่งแพ็คเก็ตได้พร้อมกันหลายชุด เพื่อช่วยแก้ปัญหาเครือข่ายแออัด (Congested Networks) และสามารถส่งข้อมูลได้เร็วขึ้นเป็นเท่าตัว ซึ่งการทำงานของเมกะไมโม คือ สายอากาศ 1 ตัว ทำหน้าที่เป็นผู้นำ (Master Antenna) และสายอากาศที่เหลือทั้งหมดทำหน้าที่เป็นผู้ตาม (Slaves Antenna) โดยแต่ละสายอากาศผู้ตาม จะรักษาช่องสัญญาณอ้างอิง (Reference Channel) จากสายอากาศที่เป็นผู้นำ การส่งสัญญาณร่วมกันเริ่มต้นโดยสายอากาศที่เป็นผู้นำจะส่งหัวเรื่องการเข้าจังหวะ (Synchronization Header) ตามด้วยเวลาที่กำหนดโดยข้อมูล[24] แต่ละสายอากาศผู้ตาม จะทราบหัวเรื่องการเข้าจังหวะ จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับหัวเรื่องอ้างอิง (Reference Header) เพื่อประมาณแนวทางเฟสที่เบี่ยงเบนไป (Oscillator Phase Drift) จากสายอากาศผู้นำ และแก้ไขเฟสที่เบี่ยงเบนไป (Phase Drift) ให้ถูกต้องก่อนที่จะส่งข้อมูลร่วมกัน [25]

เมกะไมโมถูกออกแบบมาสำหรับช่องสัญญาณระบบเชื่อมต่อโยงขาลง (Downlink) ไร้สาย ใช้ได้กับโครงข่ายไร้สาย โดยเฉพาะในการปรับใช้กับบริเวณที่มีความหนาแน่นของผู้ใช้งาน เช่น สถานประกอบการ โรงแรม และห้องประชุม เป็นต้น ซึ่งจะช่วยลดความจุของการบีบอัด โดยการส่งบิตต่อหน่วยของสเปกตรัมมากขึ้น ทำให้ส่งข้อมูลในช่องสัญญาณเดียวกันได้โดยไม่เกิดการรบกวนกันของสัญญาณ และ ทำให้การส่งผ่านข้อมูลได้มากขึ้น

2.5 การกระจายข้อมูลแบบเลขชี้กำลัง (Exponential Distribution)

การกระจายข้อมูลแบบเลขชี้กำลัง หรือแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential Distribution) เป็นหนึ่งในรูปแบบการกระจายที่เป็นข้อมูลต่อเนื่อง (Continuous Probability Distribution) ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพความน่าจะเป็นของ ชิ้นส่วนหรือระบบ หรือศึกษาระยะห่างหรือช่วงเวลาที่จะเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ โดยนิยามการแจกแจงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลในเชิงคณิตศาสตร์ จากนั้นหาค่าเฉลี่ย และค่าที่คาดหวัง

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & x > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

โดยที่ x คือ ค่าความต่อเนื่องแบบสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล
 λ คือ ค่าที่สนใจศึกษา ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดลักษณะการกระจายตัว

2.5.1 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF)

การแจกแจงความน่าจะเป็นมักจะนิยามไว้ในรูปของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ซึ่งสามารถเขียนสมการคณิตศาสตร์ ของโอกาสใดๆ

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (20)$$

สำหรับ $x \geq 0$ และ $\lambda \geq 0$

2.5.2 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Density Function: CDF)

ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม คือความน่าจะเป็นที่ตัวแปรรับค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ ความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ซึ่งสามารถเขียนสมการคณิตศาสตร์ ของโอกาสใดๆ

$$F(x) = P(X \leq x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (21)$$

2.6 ความจุอัตลักษณ์ และความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหาย (Ergodic Capacity and Outage Probability)

2.6.1 ความจุอัตลักษณ์

ความจุอัตลักษณ์ คืออัตราข้อมูลสูงสุดที่สามารถส่งผ่านช่องสัญญาณด้วยความน่าจะเป็นที่มีข้อผิดพลาดต่ำ สำหรับความจุหรือปริมาณสูงสุดที่จะรับได้ของ Shannon ด้วยอัตราการส่งผ่านช่องสัญญาณคงที่ ความจุอัตลักษณ์ของช่องสัญญาณการจางหายในกรณีภาครับทราบสถานะช่องสัญญาณ (Channel State Information: CSI) คือ

$$C = \int_0^{\infty} B \log_2(1 + \gamma) p(\gamma) d\gamma \quad (22)$$

โดยที่ γ คือค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ขณะนั้น

$B \log_2(1 + \gamma)$ คือ ค่าเฉลี่ยการกระจายตัว

ในทางปฏิบัติไม่สามารถสรุปสมการ 24 ว่าเป็นค่าความจุเฉลี่ยที่สมบูรณ์ถ้าความจุ $B \log_2(1 + \gamma)$ ยังคงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ขณะนั้น คือ γ เนื่องจากภาครับเท่านั้นที่ทราบค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ขณะนั้น และอัตราข้อมูลที่ส่งผ่านช่องสัญญาณคงที่ ซึ่งไม่ได้คำนึงถึงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ขณะนั้น เนื่องจากการเข้ารหัสความจุต้องนานพอที่ภาครับจะได้รับผลกระทบจากสภาวะการจางหายทั้งหมดที่เป็นไปได้ ซึ่งส่งผลให้เกิดการประวิง (Delay) อย่างมีนัยสำคัญ

$$E[B \log_2(1 + \gamma)] = \int B \log_2(1 + \gamma) p(\gamma) d\gamma \leq B \log_2(1 + E[\gamma]) = B \log_2[1 + \bar{\gamma}] \quad (23)$$

โดยที่ $\bar{\gamma}$ คือค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนบนช่องสัญญาณ

2.6.2 ความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหาย

การกำหนดความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหาย ถูกกำหนดด้วยความน่าจะเป็นที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ภาครับต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ในทางคณิตศาสตร์ความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายคือฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน นั่นคือ

$$P_{out}(\gamma_{th}) = \Pr[SNR < \gamma_{th}] \quad (24)$$

โดยที่ γ_{th} คือ เกณฑ์ของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

ความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหาย P_{out} เมื่อเทียบกับ γ_0

$$P_{out} = p(\gamma_s < \gamma_0) = \int_0^{\gamma_0} p_{\gamma_s}(\gamma) d\gamma \quad (25)$$

โดยที่ γ_0 คือ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนขั้นต่ำที่สามารถยอมรับได้

ความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายสำหรับการจางหายแบบเรย์ลีจึงมีค่าเท่ากับ

$$P_{out} = \int_0^{\gamma_0} \frac{1}{\gamma_s} e^{-\gamma_s/\gamma_s} d\gamma_s = 1 - e^{-\gamma_0/\gamma_s} \quad (26)$$

เมื่อแปลงสมการ (28) แสดงให้เห็นว่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายจะได้ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน คือ

$$\overline{\gamma_s} = \frac{\gamma_o}{-\ln(1 - P_{out})} \quad (27)$$

ในหน่วยเดซิเบลเท่ากับ $10\log \gamma_s$ ต้องเกินเป้าหมาย (target) เท่ากับ $10\log \gamma_o$

2.7 แบบจำลองการแพร่กระจายในร่มไอทียู (ITU Indoor Propagation Model)

การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ (Radio Wave Propagation) เป็นการถ่ายโอนพลังงานโดยการแผ่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่วิทยุ [26] โดยคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจากสายอากาศนั้น จะมีการแพร่กระจายสัญญาณในลักษณะแพร่ออกไปทุกทิศทาง โดยการแพร่กระจายสัญญาณจะมีการสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจาย (Propagation Loss) ซึ่งการสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายมีหลายรูปแบบที่หลากหลาย ส่วนใหญ่รูปแบบการแพร่กระจายถูกพัฒนาโดยมีพื้นฐานจากการแพร่กระจายที่มีอยู่ เนื่องจากปรับเปลี่ยนหรือลดความสามารถได้ (Scalability) และความซับซ้อนที่ไม่มากจนเกินไป (Reasonable Complexity) [27]

โดยทั่วไปรูปแบบการสูญเสียในการส่งผ่าน (Transmission Loss) ภายในอาคารกำหนดให้สถานีฐาน และสถานีเคลื่อนที่ (Mobile Station) อยู่ภายในอาคารเดียวกัน โดยการสูญเสียในการส่งผ่านสัญญาณภายในอาคารมีทั้งการสูญเสียแบบค่าเฉลี่ยการสูญเสียในการส่งผ่านพื้นฐาน (Average Basic Transmission Loss) และความเชื่อมโยงทางสถิติการจางหายแบบเงา (Shadow Fading Statistics) [28]

แบบจำลองการแพร่กระจายในร่มไอทียู หรือรูปแบบไอทียูสำหรับการลดทอน เป็นรูปแบบการแพร่กระจายสัญญาณที่ประเมินค่าวิถีการสูญเสีย (Path Loss) ภายในห้อง หรือพื้นที่ปิด ที่อยู่ภายในอาคารเดียวกันถูกคั่นด้วยผนัง, กำแพง, ชั้นอาคารกรณี 1 ชั้นหรือมากกว่า 1 ชั้น หรือรูปแบบใด ๆ เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในการออกแบบพื้นที่ภายในอาคาร [27], [28] โดยที่ ITU-R P.1238-10 (P Series: Radiowave Propagation) กล่าวถึงการแพร่กระจายภายในร่มของย่านความถี่ตั้งแต่ช่วง 300 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) - 450 จิกะเฮิรตซ์ (GHz) ค่าแบบจำลองการแพร่กระจายไอทียู

$$L_{total} = L(d_o) + N \log_{10} \frac{d}{d_o} + L_f(n) \quad \text{dB} \quad (28)$$

โดยที่ N คือ ค่าสัมประสิทธิ์ระยะทางการสูญเสียพลังงาน (ดูตาราง 1 ประกอบ)

f คือ ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)

d คือ ระยะทาง (เมตร) ระหว่างสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ ($d > 1$ เมตร)

d_0 คือ ระยะอ้างอิง (เมตร)

$L(d_0)$ คือ ค่าการสูญเสียการส่งที่ d_0 (เดซิเบล: dB)

L_f คือ ค่าการสูญเสียผ่านทะลุชั้นอาคาร (ดูตาราง 2 ประกอบ)

n คือ จำนวนชั้นอาคารระหว่างสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ ($n \geq 1$)

เมื่อ d_0 ที่ 1 เมตร กำหนดค่าการแพร่กระจายในอวกาศว่าง (Free Space Propagation)

$$L(d_0) = 20 \log_{10} f - 28 \quad (29)$$

โดยที่ f คือ ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)

และ $L_f = 0$ สำหรับ $n = 0$

ปฏิญานินพนธ์นี้ ถือว่าสถานีฐานย่อย และสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ชั้นเดียวกัน ค่าแบบจำลองการแพร่กระจายในร่มไอทียู

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + N \log_{10} \frac{d}{d_0} - 28 \quad \text{dB} \quad (30)$$

ตาราง 1 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน N สำหรับคำนวณการสูญเสียการส่งในร่ม

Frequency (GHz)	Residential	Office	Commercial	Factory	Corridor	Data Centre
0.8	-	22.5(14)	-	-	-	-
0.9	-	33	20	-	-	-
1.25	-	32	22	-	-	-
1.9	28	30	22	-	-	-
2.1	-	25.5(4)	20	21.1	17(9)	-
2.2	-	20.7(14)	-	-	-	-
2.4	28	30	-	-	-	-
2.625	-	44(5)	-	33(6)	-	-
3.5	-	27	-	-	-	-
4	-	28	22	-	-	-
4.7	-	19.8(14)	-	-	-	-
5.2	30(2) 28(3)	31	-	-	-	-
5.8	-	24	-	-	-	-
26	-	19.5(14)	-	-	-	-
12.65-14.15	-	-	-	19.5(12,18) 39.3(12,18)	18.3(4,12,18) 44.5(4,12,18)	-
25.3-28.3	-	-	-	19.0(12,18) 37.8(12,18)	19.2(4,12,18) 37.7(4,12,18)	-
28	-	18.4(12) 29.9(12)	27.6(8) 17.9(12,13) 24.8(12,13)	-	-	-
37	-	15.6(14)	-	-	-	-

ตาราง 1 (ต่อ)

Frequency (GHz)	Residential	Office	Commercial	Factory	Corridor	Data Centre
38	–	20.3(12) 29.6(12)	18.6(12, 13) 25.9(12, 13)	–	–	–
51-57	–	15(10)	–	–	13(10) 16.3(4, 10)	–
60	–	22(1)	17(1)	–	16(1) (7)(9)	–
67-73	–	19(11)	–	18.3(12,18) 38.8(12,18)	18.8(4, 12,18) 35.1(4, 12,18)	–
70	–	22(1)	–	–	–	–
250		20.1(16)			19.0(9, 16)	
275		20(16)			19.2(9, 16)	
300	–	20(15)	–	–	19.5(9, 15)	20.2(15)
325		19.8(17)			19.6(9, 17)	

ตาราง 2 ค่าการสูญเสียผ่านทะลุชั้นอาคาร L_f สำหรับ n ที่จำนวนของการทะลุชั้นอาคารสำหรับ
 คำนวณการสูญเสียการส่งในร่ม ($n \geq 1$)

Frequency (GHz)	Residential	Office	Commercial
0.9	–	9 (1 Floor) 19 (2 Floors) 24 (3 Floors)	–
1.8-2	4 n	15 + 4 (n – 1)	6 + 3 (n – 1)
2.4	10 ⁽¹⁾ (Apartment) 5 (House)	14	–
3.5	–	18 (1 Floor) 26 (2 Floors)	–
5.2	13 ⁽¹⁾ (Apartment) 7 ⁽²⁾ (House)	16 (1 Floor)	–
5.8	–	22 (1 Floor) 28 (2 Floors)	–

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอการวัดสมรรถนะของสถานีฐานย่อยด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าความจุต์ลักษณะและความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของการรวมอัตราส่วนสูงสุดสำหรับเมกะโมโมด้วยทอพอโลยีจุดต่อกัน ในรูปแบบทั่วไป เพื่อให้ได้สมการวัดสมรรถนะที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบจำนวนสายอากาศที่เหมาะสมในอาคาร โดยใช้ทวนสอบผลวิเคราะห์ด้วยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB

ซึ่งกระบวนการและวิธีการออกแบบขั้นตอนการแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การวิเคราะห์ขอบเขตองค์ประกอบการเชื่อมต่อระบบเมกะโมโมภาพรวม

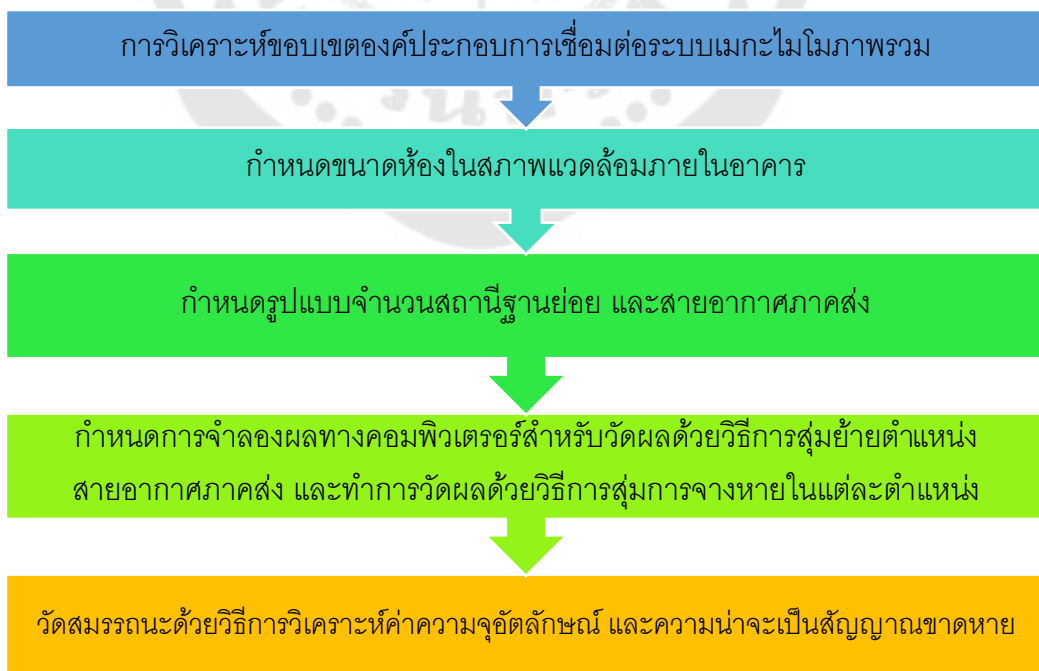
ขั้นตอนที่ 2 กำหนดขนาดห้องในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดรูปแบบจำนวนสถานีฐานย่อย และสายอากาศภาคส่ง

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดการจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับวัดผลด้วยวิธีการสุ่มย้าย

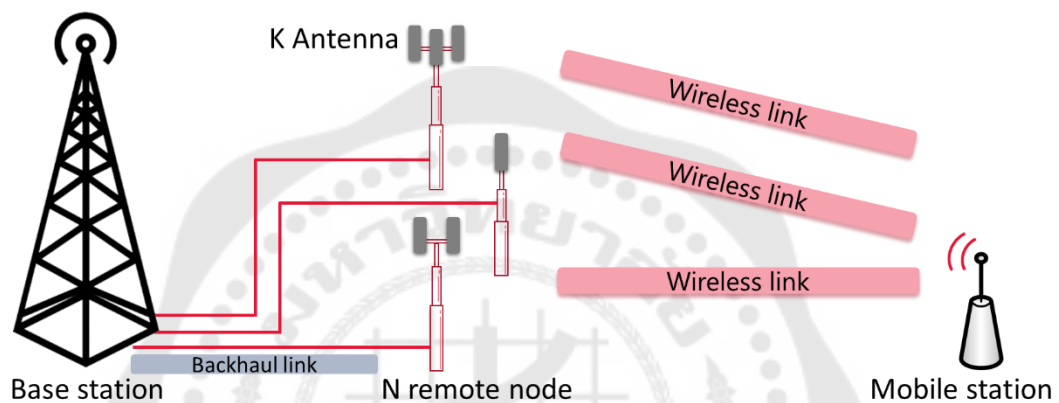
ตำแหน่งสายอากาศภาคส่ง และทำการวัดผลด้วยวิธีการสุ่มการจางหายในแต่ละตำแหน่ง

ขั้นตอนที่ 5 วัดสมรรถนะด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าความจุต์ลักษณะและความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหาย



3.1 การวิเคราะห์ขอบเขตองค์ประกอบการเชื่อมต่อระบบเมกะโมโมภาพรวม

องค์ประกอบสำหรับระบบเมกะโมโมประกอบด้วยหนึ่งสถานีฐานหลักที่ถูกเชื่อมต่อกับด้วย 1 สถานีฐานย่อย หรือมากกว่า 1 สถานีฐานย่อย (N Remote Nodes) ซึ่งสามารถมีสายอากาศจำนวน 1 ต้น หรือมากกว่า 1 ต้น โดยการเชื่อมโยงระหว่างสถานีฐานหลักกับสถานีฐานย่อยผ่านแบ็คฮอวลิงค์ และสถานีเคลื่อนที่ (Mobile Station) ที่มีสายอากาศจำนวน 1 ต้น โดยการเชื่อมโยงระหว่างสถานีฐานย่อยกับสถานีเคลื่อนที่ผ่านระบบเชื่อมโยงไร้สาย (Wireless Links)



ภาพประกอบ 12 องค์ประกอบการเชื่อมต่อระบบเมกะโมโมภาพรวม

3.2 ห้องในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร

ตามองค์ประกอบสำหรับระบบเมกะโมโม สถานีฐานหลักเชื่อมต่อกับสถานีฐานย่อยที่ถูกเชื่อมด้วยแบ็คฮอวลิงค์ โดยทั่วไปแต่ละอาคารสำนักงานมีขนาดของห้องที่แตกต่างออกไปตามความเหมาะสมและประเภทการใช้งาน เช่น ห้องประชุมขนาดต่าง ๆ ห้องเจ้าหน้าที่ระดับสูง ห้องเจ้าหน้าที่ระดับปฏิบัติการ ห้องพักผ่อนอาหาร เป็นต้น เพื่อให้เห็นผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสมรรถนะเมื่อขนาดของห้องมีการเปลี่ยนแปลง โดยจำลองสถานีฐานย่อยอยู่ในห้องที่ถูกกำหนดไว้จำนวน 4 ขนาด ได้แก่

3.2.1 20x20 ตารางเมตร

3.2.2 15x15 ตารางเมตร

3.2.3 10x10 ตารางเมตร

3.2.4 5x5 ตารางเมตร

3.3 สถานีฐานย่อย และสายอากาศภาคส่ง

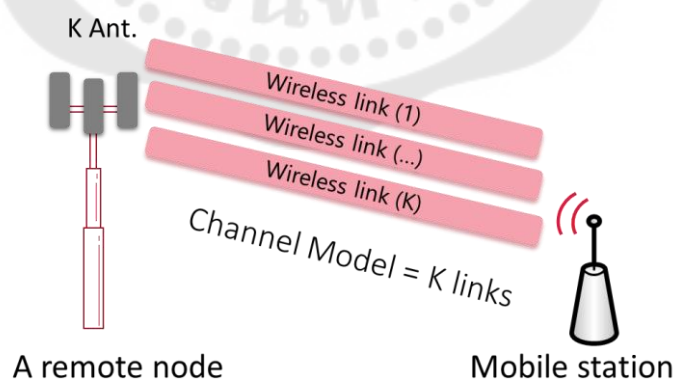
สถานีฐานย่อยภายในห้องถูกเชื่อมต่อกับหนึ่งสถานีฐานหลักถูกแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ ดังนี้

3.3.1 หนึ่งสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง (Single Remote Node with Multiple Antennas)

ในกรณีหนึ่งสถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน K ต้น โดยสายอากาศจะถูกแทนค่าด้วยตัวแปร k ที่ประกอบด้วยช่องสัญญาณ (Channel) จำนวน K ระบบเชื่อมโยงไร้สาย ซึ่งแต่ละระบบเชื่อมโยงไร้สายเป็นการลิงค์ระหว่างแต่ละสายอากาศกับสถานีเคลื่อนที่ โดยสายอากาศที่ภาคส่งทั้งหมดถือว่าอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน เนื่องจากอยู่ที่สถานีฐานย่อยตำแหน่งเดียวกันทั้งหมด แบบจำลองช่องสัญญาณ (Channel Models) ของระบบเชื่อมโยงสายอากาศมีลักษณะการจางหายแบบเรขาคณิตเชิงเส้นมีค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากัน โดยทั่วไปนั้นไม่สามารถสมมติการกระจายตัวของค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนได้ ดังนั้นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ขณะนั้นของแต่ละลิงค์จะอยู่ในรูปการกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponentially Distributed)

$$X \sim \lambda e^{-\lambda x} \quad (31)$$

โดยที่ X คือ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ขณะนั้น
 λ คือ ค่าส่วนกลับของค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน



ภาพประกอบ 13 หนึ่งสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง

จากทฤษฎีบทภาวะย้อนกลับ (Reciprocity Theorem) จึงสามารถสมมติได้ว่า สถานีฐานมีจุดต่อทราบสถานะช่องสัญญาณสมบรูณ์แบบ ดังนั้นสถานีฐานหลักสามารถรับการ

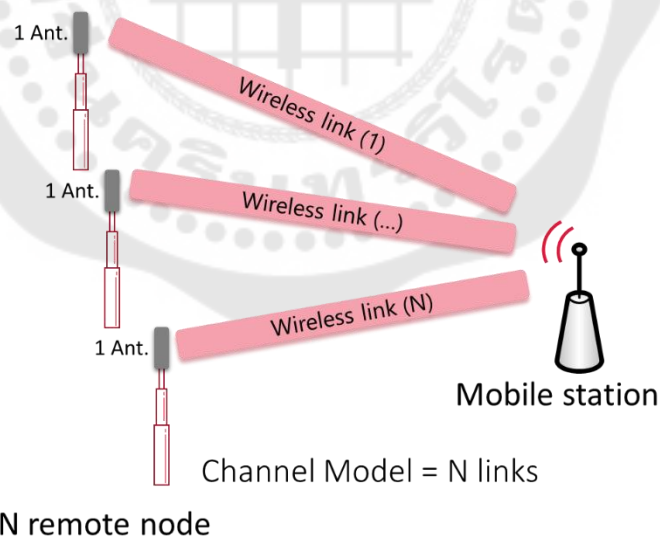
ส่งผ่านระบบเชื่อมโยงขาขึ้น (Uplink Transmission) จากสถานีเคลื่อนที่โดยใช้การรวมอัตราส่วนสูงสุด และสามารถส่งการส่งผ่านระบบเชื่อมโยงขาลง (Downlink Transmission) โดยใช้บีเอ็มฟอร์มมิง

3.3.2 หลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่ง (Multiple Remote Nodes with Single Antenna)

ในกรณี N สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 1 ต้น โดยสถานีฐานย่อยจะถูกแทนค่าตัวแปร g ที่ประกอบด้วยช่องสัญญาณจำนวน N ระบบเชื่อมโยงไร้สาย ซึ่งแต่ละระบบเชื่อมโยงไร้สายเป็นการลิงค์ระหว่างแต่ละสายอากาศกับสถานีเคลื่อนที่ โดยแต่ละสถานีฐานย่อยกระจายในหลายพื้นที่ ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของ N ระบบเชื่อมโยงไร้สายจึงมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ขณะนั้นของแต่ละลิงค์ในแต่ละสถานีฐานย่อยจะอยู่ในรูปการกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล

$$X_n \sim \lambda_n e^{-\lambda_n x} \quad (32)$$

โดยที่ λ_n คือ ค่าส่วนกลับของค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในแต่ละสถานีฐานย่อย



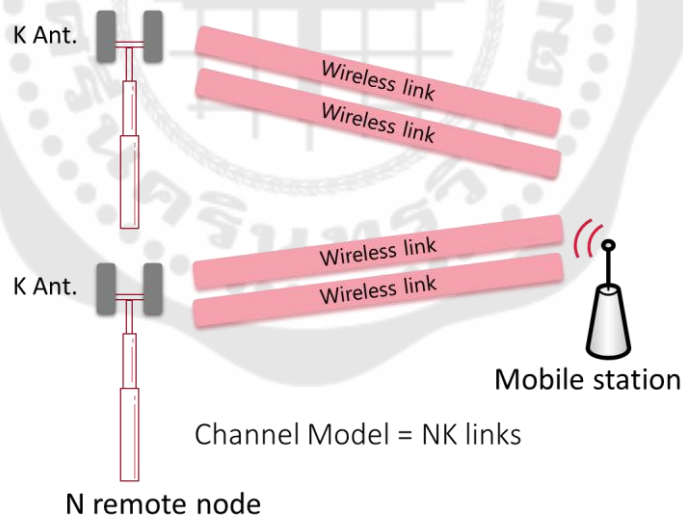
ภาพประกอบ 14 หลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่ง

3.3.3 หลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน (Multiple Remote Nodes with Equally Multiple Antennas)

ในกรณี N สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน K ต้น โดยสถานีฐานย่อยจะถูกแทนค่าตัวแปร n และสายอากาศในแต่ละสถานีฐานย่อยจะถูกแทนค่าด้วยตัวแปร k ที่ประกอบด้วยช่องสัญญาณจำนวน NK ระบบเชื่อมโยงไร้สาย ซึ่งแต่ละระบบเชื่อมโยงไร้สายเป็นการลิงค์ระหว่างแต่ละสายอากาศกับสถานีเคลื่อนที่ โดยแต่ละสถานีฐานย่อยกระจายในหลายพื้นที่ แต่สายอากาศที่ภาคส่งทั้งหมดถือว่าอยู่ในตำแหน่งเดียวกันในแต่ละสถานีฐานย่อย ดังนั้นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ขณะนั้นของแต่ละลิงค์ของสายอากาศในแต่ละสถานีฐานย่อยจะอยู่ในรูปการกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล

$$X_k \sim \lambda_n e^{-\lambda_n x}, \forall k \in \{1, 2, 3, \dots, K\} \quad (33)$$

โดยที่ λ_n คือ ค่าส่วนกลับของค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในแต่ละสถานีฐานย่อย



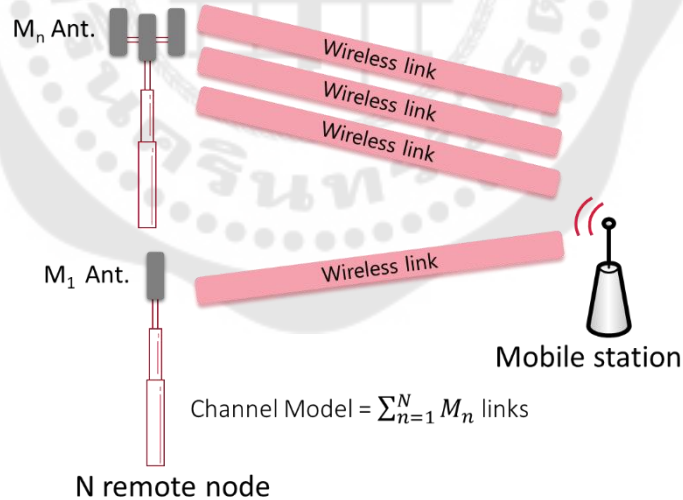
ภาพประกอบ 15 หลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีฐานย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน

3.3.4 หลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากัน (Multiple Remote Nodes with Unequal Multiple Antennas)

ในกรณี N สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศจำนวนไม่เท่ากัน โดยแต่ละสถานีฐานย่อย n^{th} จะมีสายอากาศจำนวน M_n ต้น โดยประกอบด้วยช่องสัญญาณจำนวน $\sum_{n=1}^N M_n$ ระบบเชื่อมโยงไร้สาย ซึ่งแต่ละระบบเชื่อมโยงไร้สายเป็นการลิงค์ระหว่างแต่ละสายอากาศกับสถานีเคลื่อนที่ โดยสถานีฐานย่อยทั้งหมดกระจายอยู่หลายพื้นที่ แต่สายอากาศที่ภาคส่งทั้งหมดกระจายในหลายพื้นที่ในแต่ละสถานีฐานย่อย ดังนั้นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ขณะนั้นของ M_n ระบบเชื่อมโยงไร้สายในแต่ละสถานีฐานย่อยจะอยู่ในรูปการกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล

$$X_k \sim \lambda_n e^{-\lambda_n x}, \forall k \in \{1, 2, 3, \dots, M_n\} \quad (34)$$

โดยที่ λ_n คือ ค่าส่วนกลับของค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในแต่ละสถานีฐานย่อย



ภาพประกอบ 16 หลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากัน

3.4 กำหนดการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ (Simulation) สำหรับวัดผลด้วยวิธีการสุ่มย้ายตำแหน่งสายอากาศภาคส่ง และทำการวัดผลด้วยวิธีการสุ่มการจางหายในแต่ละตำแหน่ง

สร้างแบบจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ เพื่อดำเนินการเปรียบเทียบผลระหว่าง การคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical) และแบบจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ เพื่อยืนยันความถูกต้อง สำหรับวัดผลด้วยวิธีการสุ่มย้ายตำแหน่งสายอากาศภาคส่ง และทำการวัดผลด้วยวิธีการสุ่มการจางหาย โดยการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB มากกว่า 1,000,000 ครั้งในแต่ละรูปแบบ

3.5 วัดสมรรถนะด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าความจุอัตลักษณ์และความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหาย

3.5.1 ค่าความจุอัตลักษณ์

3.5.1.1 หนึ่งสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง

ในกรณีหนึ่งสถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน K ต้น ค่าฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน γ ขณะนั้น หลังการรวมอัตราส่วนสูงสุดแสดงถึง X_1

$$X_1 \sim \frac{\lambda^K x_1^{K-1} e^{-\lambda x_1}}{(K-1)!} \quad (35)$$

ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน γ ขณะนั้น หลังการรวมอัตราส่วนสูงสุด

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{X_1\} &= \int_0^{\infty} \frac{\lambda^K x_1^{K-1} e^{-\lambda x_1}}{(K-1)!} dx_1 \\ &= \frac{K}{\lambda} \end{aligned} \quad (36)$$

ค่าความจุอัตลักษณ์สามารถเขียนการคำนวณเชิงตัวเลข

$$\begin{aligned} C_1 &= \mathbb{E}\{\log_2(1 + X_1)\} \\ &= \int_0^{\infty} \log_2(1 + x_1) \frac{\lambda^K x_1^{K-1} e^{-\lambda x_1}}{(K-1)!} dx_1 \end{aligned} \quad (37)$$

3.5.1.2 หลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่ง

ในกรณี N สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 1 ต้นค่าฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน γ ขณะนั้น หลังการรวมอัตราส่วนสูงสุดแสดงถึง X_2

$$X_2 \sim \left(\prod_{n=1}^N \lambda_{n^*} \right) \left(\sum_{n=1}^N \frac{e^{-\lambda_n x_2}}{\prod_{\substack{n'=1 \\ n' \neq n}}^N (\lambda_{n'} - \lambda_n)} \right) \quad (38)$$

ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ขณะนั้น หลังการรวมอัตราส่วนสูงสุด

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{X_2\} &= \int_0^\infty \left(\prod_{n=1}^N \lambda_{n^*} \right) \left(\sum_{n=1}^N \frac{e^{-\lambda_n x_2}}{\prod_{\substack{n'=1 \\ n' \neq n}}^N (\lambda_{n'} - \lambda_n)} \right) dx_2 \\ &= \sum_{n=1}^N \frac{1}{\lambda_n} \end{aligned} \quad (39)$$

ค่าความจุอัตลักษณ์สามารถเขียนการคำนวณเชิงตัวเลข

$$C_2 = \mathbb{E}\{\log_2(1 + X_2)\}$$

$$= \int_0^\infty \log_2(1 + x_2) \left(\prod_{n=1}^N \lambda_{n^*} \right) \left(\sum_{n=1}^N \frac{e^{-\lambda_n x_2}}{\prod_{\substack{n'=1 \\ n' \neq n}}^N (\lambda_{n'} - \lambda_n)} \right) dx_2 \quad (40)$$

3.5.1.3 หลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน

ในกรณี N สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน K ต้น ค่าฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ขณะนั้น หลังการรวมอัตราส่วนสูงสุดแสดงถึง X_3

$$X_3 \sim \Gamma^{-1} \left\{ \left(\prod_{n=1}^N \lambda_{n^*}^K \right) \prod_{n=1}^N \left(\frac{1}{s + \lambda_n} \right)^K \right\} \quad (41)$$

ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ขณะนั้น หลังการรวมอัตราส่วนสูงสุด

$$\begin{aligned}\mathbb{E}\{X_3\} &= \int_0^\infty \Gamma^{-1} \left\{ \left(\prod_{n=1}^N \lambda_n^K \right) \prod_{n=1}^N \left(\frac{1}{s + \lambda_n} \right)^K \right\} dx_3 \\ &= \sum_{n=1}^N \frac{K}{\lambda_n}\end{aligned}\quad (42)$$

ค่าความจุอัตลักษณ์สามารถเขียนการคำนวณเชิงตัวเลข

$$\begin{aligned}C_3 &= \mathbb{E}\{\log_2(1 + X_3)\} \\ &= \int_0^\infty \log_2(1 + x_3) \Gamma^{-1} \left\{ \left(\prod_{n=1}^N \lambda_n^K \right) \prod_{n=1}^N \left(\frac{1}{s + \lambda_n} \right)^K \right\} dx_3\end{aligned}\quad (43)$$

3.5.1.4 หลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากัน

ในกรณี N สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวนไม่เท่ากัน โดยแต่ละสถานีฐานย่อย n^{th} จะมีสายอากาศจำนวน M_n ต้นค่าฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ขณะนั้น หลังการรวมอัตราส่วนสูงสุดแสดงถึง X_4

$$X_4 \sim \Gamma^{-1} \left\{ \left(\prod_{n=1}^N \lambda_n^{M_n} \right) \prod_{n=1}^N \left(\frac{1}{s + \lambda_n} \right)^{M_n} \right\}\quad (44)$$

ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ขณะนั้น หลังการรวมอัตราส่วนสูงสุด

$$\begin{aligned}\mathbb{E}\{X_4\} &= \int_0^\infty \Gamma^{-1} \left\{ \left(\prod_{n=1}^N \lambda_n^{M_n} \right) \prod_{n=1}^N \left(\frac{1}{s + \lambda_n} \right)^{M_n} \right\} dx_4 \\ &= \sum_{n=1}^N \frac{M_n}{\lambda_n}\end{aligned}\quad (45)$$

ค่าความจุอัตลักษณ์สามารถเขียนการคำนวณเชิงตัวเลข

$$\begin{aligned}C_4 &= \mathbb{E}\{\log_2(1 + X_4)\} \\ &= \int_0^\infty \log_2(1 + x_4) \Gamma^{-1} \left\{ \left(\prod_{n=1}^N \lambda_n^{M_n} \right) \prod_{n=1}^N \left(\frac{1}{s + \lambda_n} \right)^{M_n} \right\} dx_4\end{aligned}\quad (46)$$

3.5.2 ความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหาย

3.5.2.1 หนึ่งสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง

ในกรณีหนึ่งสถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน K ต้น ค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหาย แสดงถึง P_1 ที่ ณ อัตราการส่งเป้าหมาย (Target Transmission Rate)

$$P_1(R_T) = 1 - \sum_{k=0}^{K-1} \frac{1}{k!} e^{-\lambda X} (\lambda X)^k \quad (47)$$

โดยที่

$$X = 2^{R_T} - 1 \quad (48)$$

และ R_T คือ อัตราการส่งเป้าหมาย (บิตต่อวินาทีต่อเฮิรตซ์ (b/s/Hz))

3.5.2.2 หลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่ง

ในกรณี N สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 1 ต้น ค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายแสดงถึง P_2 ที่ ณ อัตราการส่งเป้าหมาย

$$P_2(R_T) = 1 - \sum_{k=1}^K \frac{e^{-\lambda_k X} \left(\prod_{\substack{k'=1 \\ k' \neq k}}^K \lambda_{k'} \right)}{\prod_{\substack{k'=1 \\ k' \neq k}}^K (\lambda_{k'} - \lambda_k)} \quad (49)$$

โดยที่

$$X = 2^{R_T} - 1 \quad (50)$$

และ R_T คือ อัตราการส่งเป้าหมาย (บิตต่อวินาทีต่อเฮิรตซ์)

3.5.2.3 หลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน

ในกรณี N สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน K ต้น ค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายแสดงถึง P_3 ที่ ณ อัตราการส่งเป้าหมาย

$$P_3(R_T) = 1 - \left(\prod_{n=1}^N \lambda_n^K \right) \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{\Psi_{n,k}(-\lambda_n) X^{K-k} e^{-\lambda_n X}}{(K-k)!(k-1)!} \quad (51)$$

โดยที่

$$X = 2^{R_T} - 1 \quad (52)$$

ซึ่ง R_T คือ อัตราการส่งเป้าหมาย (บิตต่อวินาทีต่อเฮิรตซ์)

และ

$$\begin{aligned} \Psi_{n,k}(-\lambda_n) &= -\frac{\partial^{k-1}}{\partial(-\lambda_n)^{k-1}} \left(\prod_{\substack{n''=0 \\ n'' \neq n}}^N (\lambda_{n''} - \lambda_n)^{-K} \right) \\ &= (-1)^{k-1} (k-1)! \sum_{\Omega_2(0)} \prod_{n''} \binom{i_{n''} + K - 1}{i_{n''}} (\lambda_{n''} - \lambda_n)^{-(i_{n''} + K)} \end{aligned} \quad (53)$$

โดยที่ $\lambda_0 = 0$ และ

$$\Omega_2(0) = \left\{ i_{n''} : \sum_{n'' \neq n} i_{n''} = k-1, \quad \text{for } n'' = 0, 1, 2, \dots, N \right\} \quad (54)$$

โดยจากสมการ $P_3(R_T)$ ด้านบนสามารถเขียนได้อีกหนึ่งรูปแบบ

$$P_3(R_T) = 1 - \left(\prod_{n=1}^N \lambda_n^K \right) \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{\Phi_{n,k}(-\lambda_n)}{(k-1)! \lambda_n^{K-k+1}} \quad (55)$$

โดยที่

$$X = 2^{R_T} - 1 \quad (56)$$

ซึ่ง R_T คือ อัตราการส่งเป้าหมาย (บิตต่อวินาทีต่อเฮิรตซ์)

และ

$$\begin{aligned} \Phi_{n,k}(-\lambda_n) &= -\frac{\partial^{k-1}}{\partial(-\lambda_n)^{k-1}} \left(\prod_{\substack{n''=1 \\ n'' \neq n}}^N (\lambda_{n''} - \lambda_n)^{-K} \right) \\ &= (-1)^{k-1} (k-1)! \sum_{\Omega_2(1)} \prod_{n''} \binom{i_{n''} + K - 1}{i_{n''}} (\lambda_{n''} - \lambda_n)^{-(i_{n''} + K)} \end{aligned} \quad (57)$$

โดยที่ $\lambda_0 = 0$ และ

$$\Omega_2(1) = \left\{ i_{n''} : \sum_{n'' \neq n} i_{n''} = k-1, \quad \text{for } n'' = 0, 1, 2, \dots, N \right\} \quad (58)$$

3.5.2.4 หลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากัน

ในกรณี N สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวนไม่เท่ากัน โดยแต่ละสถานีฐานย่อย n^{th} จะมีสายอากาศจำนวน M_n ต้น ค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายแสดงถึง P_4 ที่ ณ อัตราการส่งเป้าหมายของ R_T

$$P_4(R_T) = 1 - \left(\prod_{n=1}^N \lambda_n^{M_n} \right) \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{\Psi_{n,k}(-\lambda_n) X^{M_n-k} e^{-\lambda_n X}}{(M_n - k)! (k-1)!} \quad (59)$$

โดยที่

$$X = 2^{R_T} - 1 \quad (60)$$

ซึ่ง R_T คือ อัตราการส่งเป้าหมาย (บิตต่อวินาทีต่อเฮิรตซ์)

และ

$$\begin{aligned} \Psi_{n,k}(-\lambda_n) &= -\frac{\partial^{k-1}}{\partial (-\lambda_n)^{k-1}} \left(\prod_{\substack{n''=0 \\ n'' \neq n}}^N (\lambda_{n''} - \lambda_n)^{-M_{n''}} \right) \\ &= (-1)^{k-1} (k-1)! \sum_{\Omega_2(0)} \prod_{n''} \binom{i_{n''} + M_{n''} - 1}{i_{n''}} (\lambda_{n''} - \lambda_n)^{-(i_{n''} + M_{n''})} \end{aligned} \quad (61)$$

โดยที่ $\lambda_0 = 0$, $M_0 = 1$

และ

$$\Omega_2(0) = \left\{ i_{n''} : \sum_{n'' \neq n} i_{n''} = k-1, \quad \text{for } n'' = 0, 1, 2, \dots, N \right\} \quad (62)$$

โดยจากสมการ $P_4(R_T)$ ด้านบนสามารถเขียนได้อีกหนึ่งรูปแบบ

$$P_4(R_T) = 1 - \left(\prod_{n=1}^N \lambda_n^{M_n} \right) \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{M_n} \frac{\Phi_{n,k}(-\lambda_n)}{(k-1)! \lambda_n^{M_n-k+1}} \quad (63)$$

โดยที่ $X = 2^{R_T} - 1$

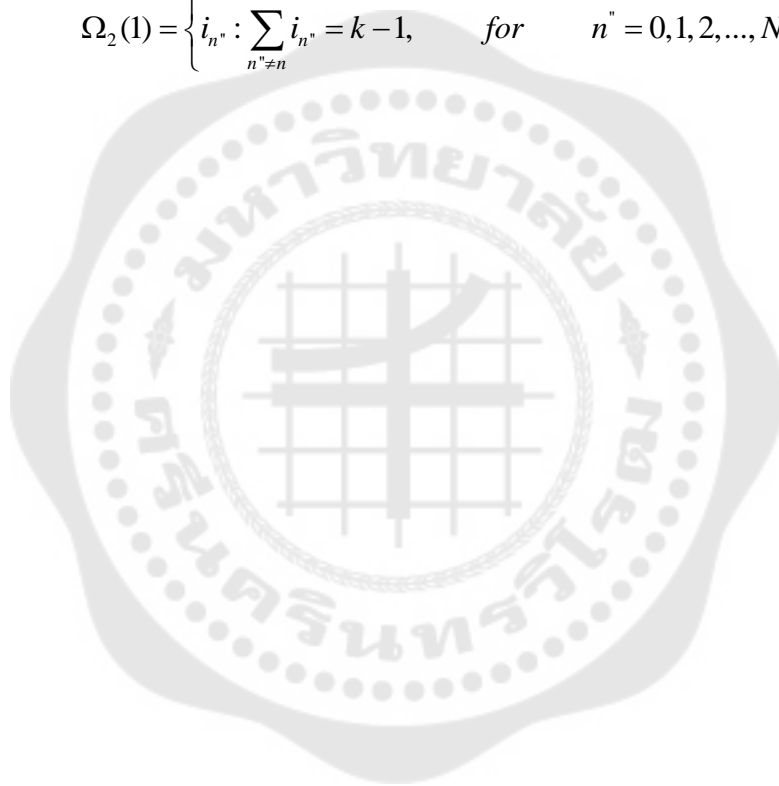
ซึ่ง R_T คือ อัตราการส่งเป้าหมาย (บิตต่อวินาทีต่อเฮิรตซ์)

และ

$$\begin{aligned}
\Phi_{n,k}(-\lambda_n) &= -\frac{\partial^{k-1}}{\partial(-\lambda_n)^{k-1}} \left(\prod_{\substack{n''=1 \\ n'' \neq n}}^N (\lambda_{n''} - \lambda_n)^{-M_{n''}} \right) \\
&= (-1)^{k-1} (k-1)! \sum_{\Omega_2(1)} \prod_{n''} \binom{i_{n''} + M_{n''} - 1}{i_{n''}} (\lambda_{n''} - \lambda_n)^{-(i_{n''} + M_{n''})}
\end{aligned} \tag{64}$$

โดยที่ $\lambda_0 = 0$, $M_0 = 1$ และ

$$\Omega_2(1) = \left\{ i_{n''} : \sum_{n'' \neq n} i_{n''} = k-1, \quad \text{for } n'' = 0, 1, 2, \dots, N \right\} \tag{65}$$



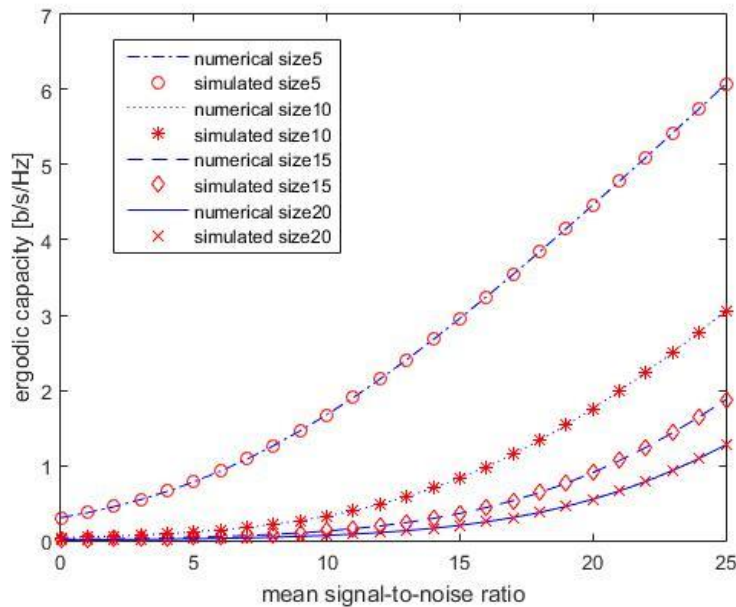
บทที่ 4 ผลดำเนินงานวิจัย

4.1 ค่าความจุอัตลักษณ์

ภาพประกอบ 17-22 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ แทนด้วยสัญลักษณ์เส้นตรง และการจำลองผล (Simulation Result) ทางคอมพิวเตอร์แทนด้วย สัญลักษณ์วงกลม ตามรูปแบบจำนวนสถานีฐานย่อย และสายอากาศภาคส่ง ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้จำนวน 4 ขนาด ได้แก่ขนาด 20x20 ตารางเมตร, 15x15 ตารางเมตร, 10x10 ตารางเมตรและ 5x5 ตารางเมตร ตามลำดับ

4.1.1 หนึ่งในสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง

ในกรณี 1 สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 4 ต้น ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้จำนวน 4 ขนาด จากภาพประกอบ 17 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณี 1 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง ผลการคำนวณตามสมการที่ 37

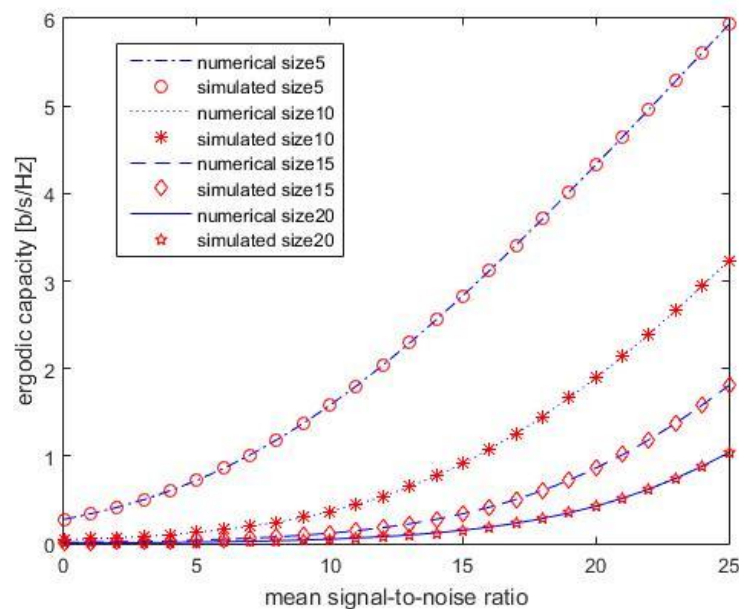


ภาพประกอบ 17 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณี 1 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งภายในห้องขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 ตารางเมตร

จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้ทั้ง 4 ขนาดพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นค่าความจุอัตลักษณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อประมวลผลใหม่โดยการเปลี่ยนขนาดห้องต่าง ๆ ผลจากการสุ่มวางตำแหน่งสถานีฐานย่อยจะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับค่าความจุอัตลักษณ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อห้องมีขนาดใหญ่มากขึ้น โดยอัตราความถูกต้องของการเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ กรณี 1 สถานีฐานย่อยมี 4 สายอากาศภาคส่งคิดเป็นร้อยละ 99.9839 ตามภาคผนวก ตาราง 3

4.1.2 หลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่ง

ในกรณี 4 สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 1 ต้น ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้จำนวน 4 ขนาด จากภาพประกอบ 18 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่งผลการคำนวณตามสมการที่ 40



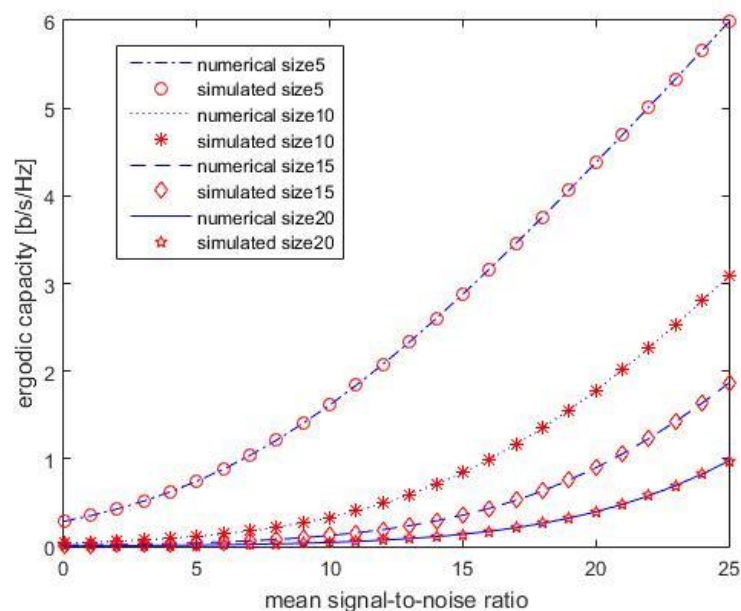
ภาพประกอบ 18 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่งภายในห้องขนาด

5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 ตารางเมตร

จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้ทั้ง 4 ขนาดพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นค่าความจุอัตลักษณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อประมวลผลใหม่โดยการเปลี่ยนขนาดห้องต่าง ๆ ผลจากการสุ่มวางตำแหน่งสถานีฐานย่อยจะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับค่าความจุอัตลักษณ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อห้องมีขนาดใหญ่มากขึ้น โดยอัตราความถูกต้องของการเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ กรณี 4 สถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่งคิดเป็นร้อยละ 99.9844 ตามภาคผนวก ตาราง 4

4.1.3 หลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน

ในกรณี 2 สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 2 ต้น ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้จำนวน 4 ขนาด จากภาพประกอบ 19 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน ผลการคำนวณตามสมการที่ 43

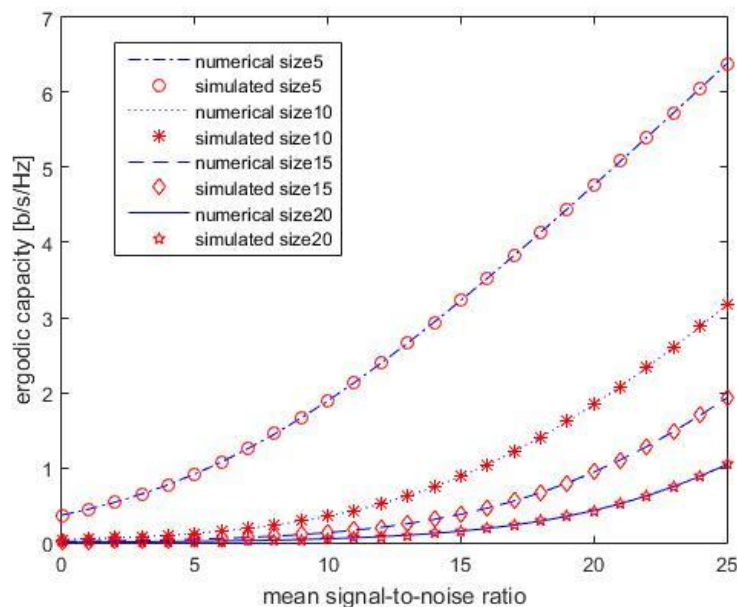


ภาพประกอบ 19 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากันภายในห้องขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 ตร.ม.

จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้ทั้ง 4 ขนาดพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นค่าความจุอัตลักษณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อประมวลผลใหม่โดยการเปลี่ยนขนาดห้องต่าง ๆ ผลจากการสุ่มวางตำแหน่งสถานีฐานย่อยจะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับค่าความจุอัตลักษณ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อห้องมีขนาดใหญ่มากขึ้น โดยอัตราความถูกต้องของการเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ กรณี 2 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศ 2 ต้น คิดเป็นร้อยละ 99.9907 ตามภาคผนวก ตาราง 5

4.1.4 หลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากัน

ในกรณี 2 สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวนไม่เท่ากัน โดยแต่ละสถานีฐานย่อย n^{th} จะมีสายอากาศจำนวน 1 และ 3 ต้น ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้จำนวน 4 ขนาด จากภาพประกอบ 20 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากัน ผลการคำนวณตามสมการที่ 46



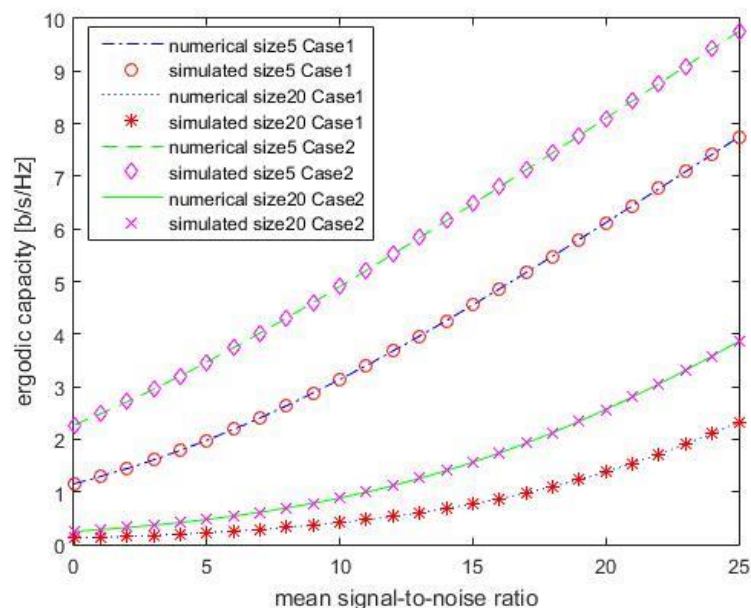
ภาพประกอบ 20 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากันภายในห้องขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 ตร.ม.

จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้ทั้ง 4 ขนาดพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นค่าความจุอัตลักษณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อประมวลผลใหม่โดยการเปลี่ยนขนาดห้องต่าง ๆ ผลจากการสุ่มวางตำแหน่งสถานีฐานย่อยจะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับค่าความจุอัตลักษณ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อห้องมีขนาดใหญ่มากขึ้น โดยอัตราความถูกต้องของการเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ กรณี 2 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศ 1 และ 3 ต้น คิดเป็นร้อยละ 99.9830 ตามภาคผนวกตาราง 6

4.1.5 ผลกระทบของจำนวนสถานีย่อยและจำนวนสายอากาศภาคส่งที่มีต่อค่าความจุอัตลักษณ์

4.1.5.1 การเปรียบเทียบ 1 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง และหลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่ง

ในกรณี 1 สถานีฐานย่อยมี 8 สายอากาศภาคส่งแทนด้วยกรณี 1 และในกรณี 8 สถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่งแทนด้วยกรณี 2 กำหนดให้อยู่ภายในห้องขนาด 5x5 และ 20x20 ตารางเมตร จากภาพประกอบ 21 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความจุอัตลักษณ์ในกรณีเหล่านี้



ภาพประกอบ 22 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุัต์ลักษณะในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน และในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากัน ภายในห้องขนาด 5x5 และ 20x20 ตร.ม.

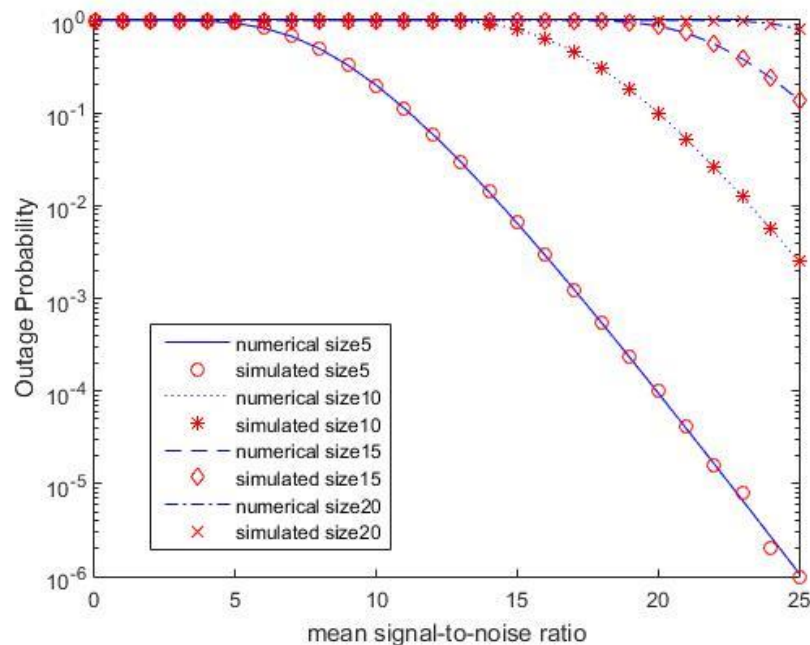
จากการเปรียบเทียบค่าความจุัต์ลักษณะโดยการทดสอบย้ายตำแหน่งระหว่างกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน และกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากัน จำนวน 200 ครั้ง หลังจากยืนยันความถูกต้องสำหรับการวัดผลระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ 1,000,000 ครั้ง ทั้งในกรณี 3 และกรณี 4 พบว่ากรณี 4 สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 2 ต้น มีค่าเฉลี่ยของค่าความจุัต์ลักษณะสูงกว่ากรณี 3 สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวนไม่เท่ากัน โดยแต่ละสถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 1, 2 และ 5 ต้น ร้อยละ 11.9108 ที่ขนาดห้อง 5x5 ตารางเมตร และร้อยละ 37.4974 ที่ขนาดห้อง 20x20 ตารางเมตร

4.2 ความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหาย

ภาพประกอบ 23-28 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผล (Simulation Result) ทางคอมพิวเตอร์ ตามรูปแบบจำนวนสถานีฐานย่อย และสายอากาศภาคส่ง ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้จำนวน 4 ขนาด ได้แก่ ขนาด 20x20 ตารางเมตร, 15x15 ตารางเมตร, 10x10 ตารางเมตรและ 5x5 ตารางเมตร ตามลำดับ

4.2.1 หนึ่งในสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง

ในกรณี 1 สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 4 ต้น และ อัตราการส่งเป้าหมาย (Target Transmission Rate) 1 บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์ ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้จำนวน 4 ขนาด จากภาพประกอบ 23 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณี 1 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง ผลการคำนวณตามสมการที่ 47

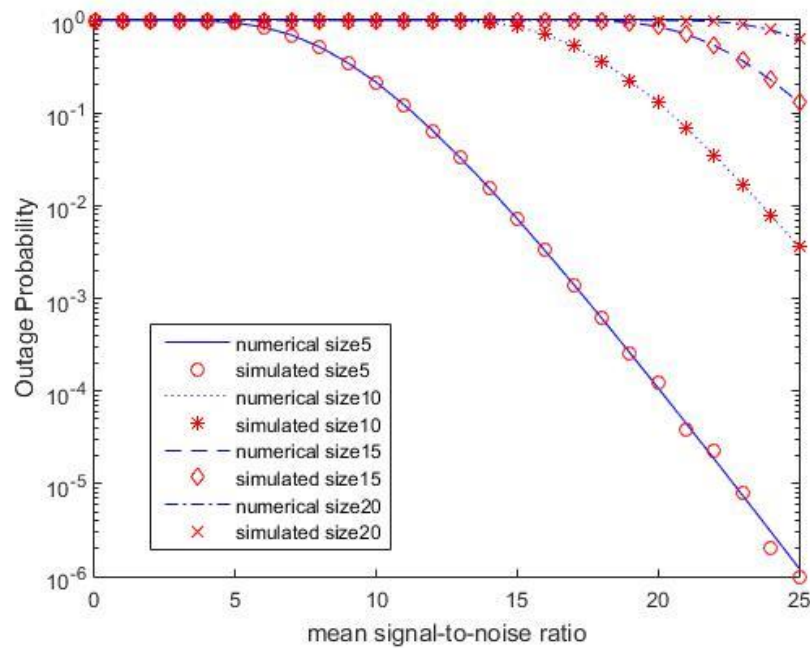


ภาพประกอบ 23 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณี 1 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งภายในห้องขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 ตารางเมตร

จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้ทั้ง 4 ขนาดพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายมีแนวโน้มลดลง และเมื่อประมวลผลใหม่โดยการเปลี่ยนขนาดห้องต่าง ๆ ผลจากการสุ่มวางตำแหน่งสถานีฐานย่อยจะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อห้องมีขนาดใหญ่มากขึ้น โดยอัตราความถูกต้องของการเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ กรณี 1 สถานีฐานย่อยมี 4 สายอากาศภาคส่งคิดเป็นร้อยละ 99.5740 ตามภาคผนวก ตาราง 7

4.2.2 หลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่ง

ในกรณี 4 สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 1 ต้น และ อัตราการส่งเป้าหมาย 1 บิตต่อวินาทีต่อเฮิรตซ์ ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้จำนวน 4 ขนาด จากภาพประกอบ 24 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่ง ผลการคำนวณตามสมการที่ 49



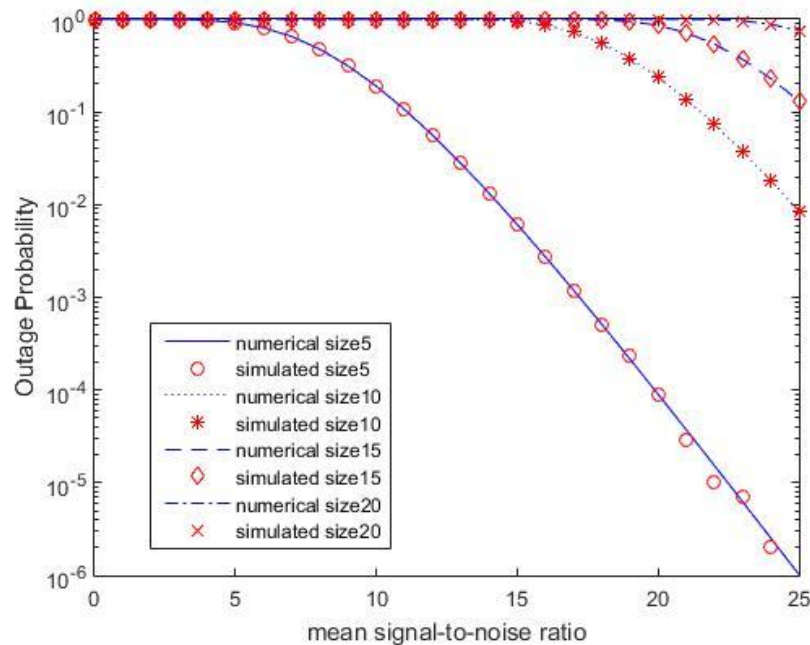
ภาพประกอบ 24 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุอัตลักษณ์ในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่งภายในห้องขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 ตารางเมตร

จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้ทั้ง 4 ขนาดพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายมีแนวโน้มลดลง และเมื่อประมวลผลใหม่โดยการเปลี่ยนขนาดห้องต่าง ๆ ผลจากการสุ่มวางตำแหน่งสถานีฐานย่อยจะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อห้องมีขนาดใหญ่มากขึ้น โดยอัตราความถูกต้องของการเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ กรณี 4 สถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่งคิดเป็นร้อยละ 98.6349 ตามภาคผนวก ตาราง 8

4.2.3 หลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน

ในกรณี 2 สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 2 ต้น และ อัตราการส่งเป้าหมาย 1 บิตต่อวินาทีต่อเฮิรตซ์ ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้จำนวน 4 ขนาด จากภาพประกอบ 25 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผล

ทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน ผลการคำนวณตามสมการที่ 51



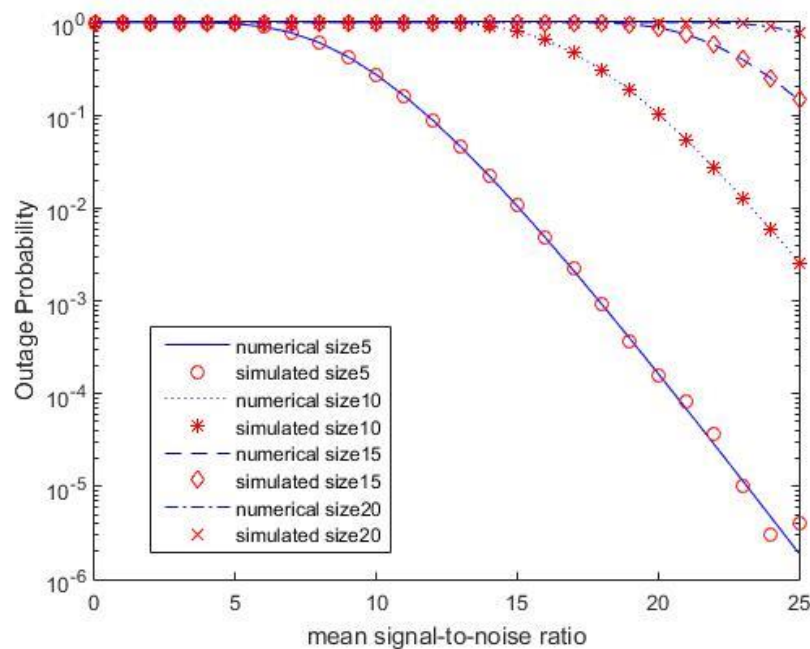
ภาพประกอบ 25 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากันภายในห้องขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20

ตารางเมตร

จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ที่อยู่ภายในห้องที่กำหนดไว้ทั้ง 4 ขนาดพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายมีแนวโน้มลดลง และเมื่อประมวลผลใหม่โดยการเปลี่ยนขนาดห้องต่าง ๆ ผลจากการสุ่มวางตำแหน่งสถานีฐานย่อยจะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อห้องมีขนาดใหญ่มากขึ้น โดยอัตราความถูกต้องของการเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ กรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากันคิดเป็นร้อยละ 98.9249 ตามภาคผนวก ตาราง 9

4.2.4 หลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากัน

ในกรณี 2 สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวนไม่เท่ากัน โดยแต่ละสถานีฐานย่อย n^{th} จะมีสายอากาศจำนวน 1 และ 3 ต้น และ อัตราการส่งเป้าหมาย 1 บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์ ที่อยู่ในห้องที่ถูกกำหนดไว้จำนวน 4 ขนาด จากภาพประกอบ 26 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากัน ผลการคำนวณตามสมการที่ 59



ภาพประกอบ 26 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากันภายในห้องขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 ตารางเมตร

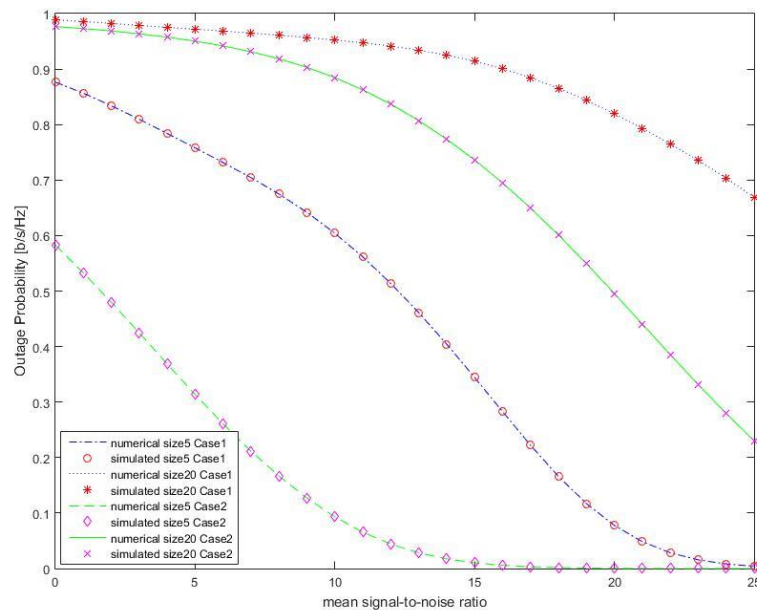
จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ที่อยู่ในห้องที่กำหนดไว้ทั้ง 4 ขนาดพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายมีแนวโน้มลดลง และเมื่อประมวลผลใหม่โดยการเปลี่ยนขนาดห้องต่าง ๆ ผลจากการสุ่มวางตำแหน่งสถานีฐานย่อยจะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาด

หยาบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อห้องมีขนาดใหญ่มากขึ้น โดยอัตราความถูกต้องของการเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ กรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากันคิดเป็นร้อยละ 99.3635 ตามภาคผนวก ตาราง 10

4.2.5 ผลกระทบของจำนวนสถานีย่อยและจำนวนสายอากาศภาคส่งที่มีต่อค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหาย

4.2.5.1 การเปรียบเทียบ 1 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง และหลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่ง

ในกรณี 1 สถานีฐานย่อยมี 8 สายอากาศภาคส่งแทนด้วยกรณี 1 และในกรณี 8 สถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่งแทนด้วยกรณี 2 กำหนดให้อยู่ภายในห้องขนาด 5x5 และ 20x20 ตารางเมตร และอัตราการส่งเป้าหมาย 1 บิตต่อวินาทีต่อเฮิรตซ์ จากภาพประกอบ 27 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในกรณีเหล่านี้



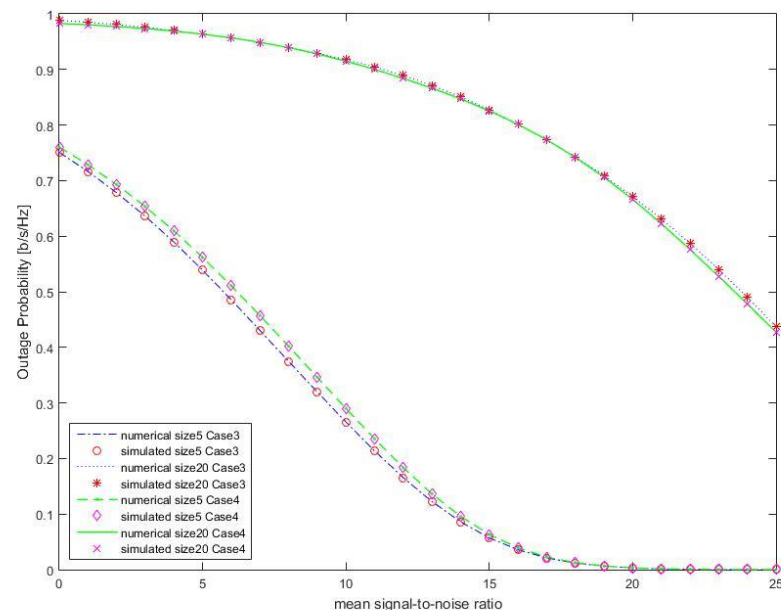
ภาพประกอบ 27 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในกรณี 1 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง และหลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่งภายในห้องขนาด 5x5 และ 20x20 ตร.ม.

จากการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายโดยการทดสอบย้ายตำแหน่งระหว่างกรณี 1 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง และกรณีหลายสถานีฐานย่อยมี

1 สายอากาศภาคส่ง จำนวน 200 ครั้งหลังจากยืนยันความถูกต้องสำหรับการวัดผลระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ 1,000,000 ครั้ง ทั้งในกรณี 1 และกรณี 2 พบว่ากรณี 8 สถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่ง มีค่าเฉลี่ยของค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายต่ำกว่า กรณี 1 สถานีฐานย่อยมี 8 สายอากาศภาคส่ง ร้อยละ 81.0293 ที่ขนาดห้อง 5x5 ตารางเมตร และร้อยละ 20.4456 ที่ขนาดห้อง 20x20 ตารางเมตร

4.2.5.2 การเปรียบเทียบหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน และหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากัน

ในกรณี 4 สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 2 ต้นแทนด้วยกรณี 3 และในกรณี 3 สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวนไม่เท่ากัน โดยแต่ละสถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 1, 2 และ 5 ต้นแทนด้วยกรณี 4 กำหนดให้อยู่ภายในห้องขนาด 5x5 และ 20x20 ตารางเมตร จากภาพประกอบ 28 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในกรณีเหล่านี้



ภาพประกอบ 28 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน และในกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากันภายในห้องขนาด 5x5 และ 20x20 ตร.ม.

จากการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายโดยการทดสอบย้ายตำแหน่งระหว่างกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน และกรณีหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากัน จำนวน 200 ครั้งหลังจากยืนยันความถูกต้องสำหรับการวัดผลระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขและแบบการจำลองทางคอมพิวเตอร์ 1,000,000 ครั้ง ทั้งในกรณี 3 และกรณี 4 พบว่ากรณี 4 สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 2 ต้น มีค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายต่ำกว่า กรณี 3 สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวนไม่เท่ากัน โดยแต่ละสถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 1, 2 และ 5 ต้น ร้อยละ 5.553 ที่ขนาดห้อง 5x5 ตารางเมตร และในทางกลับกัน กรณี 3 สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวนไม่เท่ากัน โดยแต่ละสถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 1, 2 และ 5 ต้น มีค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายต่ำกว่า กรณี 4 สถานีฐานย่อยมีสายอากาศจำนวน 2 ต้น ร้อยละ 0.6224 ที่ขนาดห้อง 20x20 ตารางเมตร



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย และอภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์สมรรถนะค่าความจุต์ลักษณะและความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของการรวมอัตราส่วนสูงสุดสำหรับเมกะโมโมด้วยทอพอโลยีจุดต่อต่างกัน ในรูปแบบทั่วไป โดยผลที่ได้ถูกยืนยันความถูกต้องด้วยการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ (Simulations) ค่าความจุต์ลักษณะในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้ทั้ง 4 ขนาดพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นค่าความจุต์ลักษณะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายในเชิงคำนวณ และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ที่อยู่ภายในห้องที่ถูกกำหนดไว้ทั้ง 4 ขนาดพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายมีแนวโน้มลดลง และเมื่อประมวลผลใหม่โดยการเปลี่ยนขนาดห้องต่าง ๆ ผลจากการสุ่มวางตำแหน่งสถานีฐานย่อยจะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับค่าความจุต์ลักษณะมีแนวโน้มลดลงเมื่อห้องมีขนาดใหญ่มากขึ้น และค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อห้องมีขนาดใหญ่มากขึ้น โดยอัตราความถูกต้องระหว่างค่าความจุต์ลักษณะเทียบกับการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ และค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายเทียบกับการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ คิดเป็นร้อยละ 99.9855 และร้อยละ 99.1243 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าผลในเชิงคำนวณที่ได้สอดคล้องไปกับผลการจำลอง

เมื่อมีการเปรียบเทียบเพื่อหาผลกระทบของจำนวนสถานีฐานย่อยและจำนวนสายอากาศภาคส่งที่มีต่อค่าความจุต์ลักษณะและค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหาย โดยทั้ง 4 รูปแบบสถานีฐานย่อยกำหนดให้อยู่ภายในห้องที่มีขนาดเท่ากัน และจำนวนสายอากาศรวมเท่ากัน มีความแตกต่างค่าเฉลี่ยของความจุต์ลักษณะที่ขนาดห้อง 5x5 และ 20x20 ตารางเมตร คิดเป็นร้อยละ 22.7499 และร้อยละ 43.594 ตามลำดับ และมีความแตกต่างค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายที่ขนาดห้อง 5x5 และ 20x20 ตารางเมตร คิดเป็นร้อยละ 43.2912 และร้อยละ 10.5339 ตามลำดับ โดยจากการทดสอบเพื่อหาผลกระทบของจำนวนสถานีย่อยที่มีจำนวนสายอากาศรวมเท่ากัน พบว่ากรณีหลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่งมีค่าเฉลี่ยของความจุต์ลักษณะสูงสุด และค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายต่ำที่สุด และกรณี 1 สถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งมีค่าเฉลี่ยของความจุต์ลักษณะต่ำที่สุด และค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายสูงสุด ดังนั้นจำนวนสายอากาศรวม และจำนวนสถานีฐานย่อยจึง

เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของค่าความจุอัตราลักษณะ และค่าเฉลี่ยของค่าความน่าจะเป็น สัญญาณขาดหายอย่างมีนัยสำคัญ ในการออกแบบระบบเมกะโมโม รวมถึงไปถึงระบบการกระจาย สายอากาศ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าในสถานการณ์จริงความสูงห้องที่ติดตั้งสายอากาศ อัตราขยาย (Gain) ของแต่ละสายอากาศ มีผลต่ออัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และมีความเป็นไปได้ที่มี ช่องสัญญาณมากกว่า 1 ช่องสัญญาณ อาจเกิดการแทรกสอดและสถานีเคลื่อนที่อยู่ตรงกลาง ระหว่างสถานีฐานที่หนึ่งและสถานีฐานที่สองโดยค่าเฉลี่ยอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ระหว่างสถานีฐานที่หนึ่งและสถานีฐานที่สองอาจมีค่าใกล้เคียงหรือหรือแตกต่างกัน เพื่อเพิ่มความ ถูกต้องเพื่อนำไปพัฒนาการออกแบบ และประยุกต์ใช้ต่อไป

บรรณานุกรม

1. Woradit, K., L. Wuttisittikulkij, and S. Siwamogsatham, *On the Design of Space-Frequency Codes from Super-Orthogonal Space-Time Trellis Codes via Mapping*, in *TENCON 2005 - 2005 IEEE Region 10 Conference*. 2005.
2. Khakhai, P., *Coverage Prediction of Adaptive MIMO Switching for Mobile WiMax Systems*, in *Suranaree University, Nakhon Ratchasima*. 2011.
3. Woradit, K., T.Q.S. Quek, and Z. Lei, *Cooperative Multicell ARQ - Packet Error Rate and Throughput Analysis*, in *2010 IEEE Wireless Communication and Networking Conference*. 2010.
4. Herzet, C., et al. *Code-Aided Maximum-Likelihood Ambiguity Resolution Through Free-Energy Minimization*. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010. **58**, 6238 - 6250.
5. Woradit, K., T.Q.S. Quek, and Z.Z. Lei, *Cooperative multicell ARQ in MIMO cellular systems*, in *2010 IEEE 11th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. 2010.
6. He, Y., et al., *SNR Threshold for Distributed Antenna Systems in Cloud Radio Access Networks*, in *2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall)*. 2015.
7. Cai, Y., F.R. Yu, and S. Bu. *Cloud radio access networks (C-RAN) in mobile cloud computing systems*. in *2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. 2014.
8. Krishnamoorthy, A., R. Schober, and M. Breiling, *Resource Allocation for Outdoor-to-Indoor Compress-and-Forward SUDAS with Independent Relay Processing*, in *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. 2017.
9. Ng, D.W.K., et al., *Energy-Efficient 5G Outdoor-to-Indoor Communication: SUDAS Over Licensed and Unlicensed Spectrum*. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016. **15**(5): p. 3170-3186.

10. Almelah, H.B. and K.A. Hamdi *Spectral Efficiency of Distributed Large-Scale MIMO Systems With ZF Receivers*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017. **66**, 4834 - 4844.
11. Mehmood, Y., et al. *Large scaled multi-user MIMO system so called massive MIMO systems for future wireless communication networks*. in *2013 19th International Conference on Automation and Computing*. 2013.
12. Park, E., S.-R. Lee, and I. Lee *Antenna Placement Optimization for Distributed Antenna Systems*. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012. **11**, 2468 - 2477.
13. มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, ส., การสื่อสารไร้สายและเครือข่าย : เอกสารการสอนชุดวิชา 99313 = *Wireless communication and networking*. พิมพ์ครั้งที่ 1.. ed. 2556: นนทบุรี : สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.
14. Goldsmith, A., *Wireless communications*. 2007, New York: Cambridge University Press.
15. จตุรงค์ เจริญภาพ, การเพิ่มประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูล ในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ โดยใช้ระบบสายอากาศที่ชาญฉลาด, in มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร. 2550.
16. Roy, S. and P. Fortier *Maximal-Ratio Combining Architectures and Performance With Channel Estimation Based on a Training Sequence*. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004. **3**, 1154-1164.
17. Winters, J.H., J. Salz, and R.D. Gitlin, *The impact of antenna diversity on the capacity of wireless communication systems*. IEEE Transactions on Communications, 1994. **42**(234): p. 1740-1751.
18. Yao, Y.-D. and A.U.H. Sheikh *Investigations into cochannel interference in microcellular mobile radio systems*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1992. **41**, 114-123.
19. Abu-Dayya, A.A. and N.C. Beaulieu *Microdiversity on rician fading channels*. IEEE Transactions on Communications, 1994. **42**, 2258 - 2267.

20. Misra, I.S., *Wireless Communications and Networks: 3G and Beyond*, ed. n. ed. 2013, New Delhi: McGraw Hill Education (India) Private.
21. Eng, T., N. Kong, and L.B. Milstein *Comparison of diversity combining techniques for Rayleigh-fading channels*. IEEE Transactions on Communications, 1996. **44**, 1117-1129.
22. Kumar, S., et al., *Performance Comparison of Various Diversity Techniques using Matlab Simulation*. 2013.
23. R.DEEPA, et al. *STUDY OF SPATIAL DIVERSITY SCHEMES IN MULTIPLE ANTENNA SYSTEMS*. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2009. **5**, 619-624.
24. Katabi, E.H.H.R.M.A.A.D. *Real-time Distributed MIMO Systems*. ACM SIGCOMM, 2016. 412–425.
25. Hariharan Rahul, S.K., and Dina Katabi *MegaMIMO: Scaling Wireless Capacity with User Demands*. ACM SIGCOMM, 2012.
26. ศ.ดร.มงคล เดชนครินทร์, พจนานุกรม ศัพท์วิศวกรรมไฟฟ้า. 2 ed. 2554, กรุงเทพฯ: โกลบอลกราฟฟิค.
27. Zulkefly, N.R., et al. *Indoor path loss model for 4G wireless network at 2.6 GHz*. in *2015 1st International Conference on Telematics and Future Generation Networks (TAFGEN)*. 2015.
28. Geneva. *Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz*. 2019; Available from: Retrieved from <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238>.



ตาราง 3 ผลค่าความจุัดลักษณะของ 1 สถานี่ฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่ง

อัตราส่วน	ห้องขนาด 5x5 ตารางเมตร				ห้องขนาด 10x10 ตารางเมตร				
	ผลค่านวมเชิง ตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลค่านวมเชิง ตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลค่านวมเชิง ตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
0	0.247448976	0.24766411	99.9131	0.042460577	0.042472695	99.9715			
1	0.30407827	0.30407013	100	0.053207347	0.053237791	99.9428			
2	0.37190099	0.372081064	99.9516	0.066598408	0.066579689	100			
3	0.452413217	0.452229654	100	0.08324341	0.083221047	100			
4	0.547062219	0.547130032	99.9876	0.103871233	0.103936284	99.9374			
5	0.657165101	0.657200728	99.9946	0.129342718	0.129340816	100			
6	0.783824188	0.783926512	99.9869	0.160659554	0.160639102	100			
7	0.927849234	0.927833633	100	0.198966541	0.198749984	100			
8	1.089696984	1.089267084	100	0.245543956	0.245628538	99.9656			
9	1.269436879	1.268938455	100	0.301786673	0.301724545	100			
10	1.466747874	1.466735277	100	0.369167339	0.369118718	100			
11	1.680946447	1.681081661	99.9920	0.449182404	0.449343758	99.9641			
12	1.911041003	1.910100826	100	0.543282353	0.543467094	99.9660			

ตาราง 3 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 5x5 ตารางเมตร				ห้องขนาด 10x10 ตารางเมตร			
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
13	2.1558044	2.155020147	100	0.652790639	0.65290501	99.9825		
14	2.413854663	2.413209892	100	0.778819021	0.77903396	99.9724		
15	2.683734432	2.684596217	99.9679	0.922189322	0.922060169	100		
16	2.963981627	2.964434969	99.9847	1.083372179	1.083647147	99.9746		
17	3.2531866	3.253444433	99.9921	1.262451656	1.262545633	99.9926		
18	3.550033787	3.549052423	100	1.459120882	1.458514215	100		
19	3.853328245	3.85323451	100	1.672708948	1.672777121	99.9959		
20	4.162008967	4.162832718	99.9802	1.902234477	1.901116294	100		
21	4.475151693	4.47503597	100	2.146477645	2.147135825	99.9693		
22	4.791964115	4.792243632	99.9942	2.404060767	2.40396155	100		
23	5.11177614	5.11023648	100	2.673527946	2.673974182	99.9833		
24	5.434027392	5.433792143	100	2.953416164	2.953765672	99.9882		
25	5.758253632	5.756418104	100	3.242312986	3.242318346	99.9998		

ตาราง 3 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 15x15 ตารางเมตร				ห้องขนาด 20x20 ตารางเมตร				
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
0	0.011908521	0.011916264	99.9350	0.005248339	0.005249494	99.9780			
1	0.014972079	0.014974564	99.9834	0.006603392	0.00660379	99.9940			
2	0.018817401	0.018811354	100	0.008307049	0.008307052	100			
3	0.023640347	0.023664196	99.8992	0.010448266	0.010441251	100			
4	0.029683787	0.029694489	99.9640	0.013138283	0.013139009	99.9945			
5	0.037247752	0.037218458	100	0.016515964	0.016514087	100			
6	0.046701136	0.046695901	100	0.020754284	0.020768743	99.9304			
7	0.058494858	0.058532572	99.9356	0.026068132	0.026054118	100			
8	0.073176128	0.073161947	100	0.032723576	0.03275201	99.9132			
9	0.091403135	0.091430298	99.9703	0.041048672	0.041072444	99.9421			
10	0.113958976	0.114008555	99.9565	0.051445825	0.051448692	99.9944			
11	0.141763069	0.14181867	99.9608	0.064405481	0.064469665	99.9004			
12	0.175877623	0.175877262	100	0.080520687	0.080504221	100			

ตาราง 3 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 15x15 ตารางเมตร				ห้องขนาด 20x20 ตารางเมตร			
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
13	0.217506147	0.21728741	100	0.100501624	0.100449833	100		
14	0.267980621	0.267997755	99.9936	0.125188716	0.125157576	100		
15	0.328734166	0.328718035	100	0.155562252	0.155411384	100		
16	0.401257014	0.401372103	99.9713	0.192745841	0.192732825	100		
17	0.487035544	0.486855518	100	0.238000472	0.238015276	99.9938		
18	0.587477014	0.587199597	100	0.292705817	0.292942319	99.9193		
19	0.703825869	0.704343234	99.9265	0.358325907	0.358188357	100		
20	0.83708049	0.837286779	99.9754	0.43635772	0.436353687	100		
21	0.987920864	0.987411287	100	0.528263564	0.528635536	99.9296		
22	1.15665733	1.156587556	100	0.635391287	0.635355673	100		
23	1.343207898	1.343455101	99.9816	0.758889549	0.759473913	99.9231		
24	1.547107332	1.548289349	99.9237	0.899627948	0.899082066	100		
25	1.767546092	1.767578285	99.9982	1.058132587	1.058057114	100		

ตาราง 4 ผลค่าความจุต์ลักษณะของหลายสถานีฐานย่อยมี 1 สายอากาศภาคส่ง

อัตราส่วน	ห้องขนาด 5x5 ตารางเมตร		ห้องขนาด 10x10 ตารางเมตร	
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
0	0.259990215	0.260137699	0.038942111	0.038955926
1	0.319140262	0.319060441	0.048815208	0.048815342
2	0.389836322	0.389783145	0.061126906	0.061123387
3	0.473568771	0.473596245	0.076444407	0.076476315
4	0.57176065	0.571463519	0.095448428	0.095430758
5	0.685684852	0.685833992	0.118946692	0.119047939
6	0.816380311	0.816573856	0.147884463	0.147848363
7	0.964577518	0.963851459	0.183349588	0.183305548
8	1.130643675	1.130370475	0.226568967	0.226474009
9	1.314555499	1.314160282	0.278893099	0.278820064
10	1.515903547	1.515715202	0.341765714	0.341604597
11	1.733926938	1.733837309	0.416676637	0.416787332
12	1.96757274	1.967402462	0.505098195	0.505019349

ตาราง 4 (ต่อ)

อัตราส่วน สัญญาณต่อ สัญญาณรบกวน	ห้องขนาด 5x5 ตารางเมตร			ห้องขนาด 10x10 ตารางเมตร		
	ผลคำนวณเชิง ตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิง ตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
13	2.215571176	2.21564448	100	0.608408368	0.607828198	100
14	2.476516717	2.476261868	100	0.727807137	0.727633595	100
15	2.74894594	2.750050115	99.9598	0.864235191	0.86440749	100
16	3.031405282	3.031331489	100	1.018305439	1.018604449	99.9706
17	3.322504599	3.323026279	99.9843	1.190256971	1.190201495	100
18	3.620955178	3.621706891	100	1.3799382	1.38052845	100
19	3.925592976	3.925350429	100	1.586821405	1.587102351	99.9823
20	4.235389246	4.23610281	99.9832	1.810045982	1.809915414	100
21	4.549451343	4.54984173	100	2.048483545	2.049746816	99.9384
22	4.867016577	4.86662415	100	2.300815562	2.30213417	100
23	5.187441676	5.186407169	100	2.565613782	2.566063629	99.9825
24	5.510189928	5.510765387	100	2.84141503	2.840562006	100
25	5.834817543	5.833668427	100	3.126784403	3.126711703	100

ตาราง 4 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 15x15 ตารางเมตร				ห้องขนาด 20x20 ตารางเมตร			
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
0	0.01347154	0.013465434	100	0.004936147	0.004933295	100		
1	0.016934237	0.01693673	99.9853	0.006210777	0.006217794	99.8872		
2	0.021278857	0.021277371	100	0.007813427	0.007812253	100		
3	0.026725393	0.026746621	99.9206	0.009827863	0.009825258	100		
4	0.033546107	0.033523939	100	0.012358865	0.012366903	99.9350		
5	0.042076516	0.042110619	100	0.015537294	0.015542732	100		
6	0.052727898	0.052796222	100	0.01952624	0.019530697	99.9772		
7	0.066001104	0.06601497	99.9790	0.024528445	0.024547418	100		
8	0.082501141	0.082531104	100	0.030795144	0.030801291	99.9800		
9	0.102951625	0.103032443	99.9216	0.03863643	0.038613607	100		
10	0.128207585	0.128154438	100	0.048433159	0.048477876	99.9078		
11	0.159264537	0.159221266	100	0.060650263	0.060660988	99.9823		
12	0.197261051	0.197288739	100	0.075851055	0.075839331	100		

ตาราง 4 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 15x15 ตารางเมตร				ห้องขนาด 20x20 ตารางเมตร				
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
13	0.243471569	0.243414796	100	0.094711776	0.094756464	100			
14	0.299286123	0.299159961	100	0.118035123	0.117925678	100			
15	0.366174219	0.366292066	100	0.146760892	0.146891143	100			
16	0.445631624	0.445375396	100	0.181971237	0.182073931	100			
17	0.539111278	0.538962333	100	0.224887484	0.224898582	99.9951			
18	0.647942684	0.647709128	100	0.276855152	0.276854851	100			
19	0.773247352	0.773925786	99.9123	0.339314203	0.339257781	100			
20	0.915860207	0.916306586	99.9513	0.413752598	0.413681147	100			
21	1.076267536	1.076472716	100	0.501643388	0.501890525	99.9508			
22	1.254570406	1.254671996	100	0.604368411	0.604380753	100			
23	1.450478929	1.450534445	99.9962	0.723134923	0.723349718	99.9703			
24	1.66333378	1.662786014	100	0.858894189	0.858446496	100			
25	1.892178743	1.89206335	100	1.012272433	1.012264014	100			

ตาราง 5 ผลค่าความจุััดลักษณะของหลายหลายสถานีฐานย่อยมีหลายหลายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน

อัตราส่วน	ห้องขนาด 5x5 ตารางเมตร				ห้องขนาด 10x10 ตารางเมตร				
	ผลค่านวมเชิง ตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลค่านวมเชิง ตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลค่านวมเชิง ตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
0	0.279733853	0.279630557	100	0.034543284	0.034549182	99.9829			
1	0.342811094	0.342904412	100	0.043322289	0.043327183	99.9887			
2	0.417968209	0.418041307	99.9825	0.05428133	0.054284936	100			
3	0.50668134	0.50666368	100	0.067933724	0.067927932	100			
4	0.610330562	0.61021344	100	0.084898779	0.084917413	99.9781			
5	0.730115527	0.729644259	100	0.105916092	0.105947765	100			
6	0.866973651	0.867058588	99.9902	0.131857979	0.131869356	100			
7	1.021511423	1.021407085	100	0.163737843	0.163801125	100			
8	1.193958613	1.194825675	100	0.20271164	0.202570083	100			
9	1.384152098	1.383962978	100	0.250069178	0.250016184	100			
10	1.591551428	1.591940812	100	0.307211933	0.30710902	100			
11	1.815283254	1.814606826	100	0.37561481	0.375484253	100			
12	2.05420756	2.053541219	100	0.456770856	0.45698828	99.9524			

ตาราง 5 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 5x5 ตารางเมตร				ห้องขนาด 10x10 ตารางเมตร			
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
13	2.30699618	2.306416349	100	0.552120523	0.552204092	99.9849	0.552204092	99.9849
14	2.572213771	2.571839029	100	0.662970261	0.662986602	99.9975	0.662986602	99.9975
15	2.848392771	2.848201527	100	0.790408335	0.790107121	100	0.790107121	100
16	3.134096441	3.133437333	100	0.935227951	0.934937365	100	0.934937365	100
17	3.427966921	3.427987622	99.9994	1.097868114	1.097234053	100	1.097234053	100
18	3.728757792	3.728975011	100	1.278380805	1.278543487	100	1.278543487	100
19	4.035352497	4.034900711	100	1.476429207	1.476727422	99.9798	1.476727422	99.9798
20	4.346771116	4.3478423	99.9754	1.691316829	1.691517963	100	1.691517963	100
21	4.662168349	4.662981058	100	1.922042619	1.921740442	100	1.921740442	100
22	4.980825514	4.981051764	99.9955	2.167373707	2.166801601	100	2.166801601	100
23	5.302138957	5.301298554	100	2.425925925	2.426008258	99.9966	2.426008258	99.9966
24	5.625606752	5.626656892	100	2.696242746	2.696134974	100	2.696134974	100
25	5.95081506	5.950207126	100	2.976865276	2.976538368	100	2.976538368	100

ตาราง 5 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 15x15 ตารางเมตร				ห้องขนาด 20x20 ตารางเมตร			
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
0	0.014217384	0.014222781	99.9621	0.005714335	0.005715342	99.9824	0.005714335	99.9824
1	0.017870291	0.017864703	100	0.00718929	0.007191052	99.9755	0.00718929	99.9755
2	0.022452712	0.022453938	100	0.009043455	0.009037752	100	0.009043455	100
3	0.028196023	0.028184305	100	0.011373462	0.011371937	100	0.011373462	100
4	0.035386309	0.035381096	100	0.014300065	0.014292791	100	0.014300065	100
5	0.044375712	0.044367835	100	0.017973884	0.017971523	100	0.017973884	100
6	0.055595263	0.055601846	100	0.022582349	0.022577769	100	0.022582349	100
7	0.069568927	0.069543144	100	0.028358009	0.028337991	100	0.028358009	100
8	0.086928256	0.086874184	100	0.035588344	0.035586888	100	0.035588344	100
9	0.108426587	0.108413483	100	0.044627122	0.044626978	100	0.044627122	100
10	0.134951171	0.134938822	100	0.055907239	0.055911916	99.9916	0.055907239	99.9916
11	0.16753097	0.1674896	100	0.069954741	0.069924907	100	0.069954741	100
12	0.207337222	0.207245162	100	0.087403414	0.087387969	100	0.087403414	100

ตาราง 5 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 15x15 ตารางเมตร				ห้องขนาด 20x20 ตารางเมตร				
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
13	0.255673456	0.255801364	100	0.109008875	0.108986043	100			
14	0.313951702	0.313931801	100	0.135660537	0.135607207	100			
15	0.383652414	0.383364967	100	0.168389164	0.168465989	100			
16	0.466267359	0.466169524	100	0.208367129	0.208536489	100			
17	0.563227372	0.56328151	100	0.256888093	0.256735234	100			
18	0.675820128	0.675487461	100	0.315392875	0.315270297	100			
19	0.805106134	0.805195601	99.9889	0.385329123	0.385193448	100			
20	0.951843176	0.952112046	99.9718	0.468194099	0.467912526	100			
21	1.116429589	1.116118269	100	0.56541258	0.565116246	100			
22	1.298874609	1.299361845	100	0.678265032	0.678219913	100			
23	1.498800067	1.499495817	99.9536	0.807804241	0.807363288	100			
24	1.715472706	1.71558434	99.9935	0.954780546	0.954531828	100			
25	1.94786175	1.948359594	99.9744	1.119585891	1.119978669	100			

ตาราง 6 ผลค่าความจุัดัดลักษณะของหลายสถานีฐานย่อยมีหลายอากาศส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากัน

อัตราส่วน	ห้องขนาด 5x5 ตารางเมตร				ห้องขนาด 10x10 ตารางเมตร				
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
0	0.265768724	0.265679991	100	0.032357311	0.032311203	100			
1	0.326077878	0.325908268	100	0.040590823	0.04063213	99.8983			
2	0.398094273	0.39817645	99.9794	0.050874484	0.050845441	100			
3	0.483305346	0.483405661	100	0.063694035	0.063723631	100			
4	0.583122679	0.582767538	100	0.079637087	0.079638104	99.9987			
5	0.698798569	0.698601787	100	0.099407682	0.099398127	100			
6	0.831342621	0.831449256	99.9872	0.123839514	0.123922307	100			
7	0.981448832	0.980840582	100	0.153905787	0.153937014	100			
8	1.149443337	1.148994778	100	0.19072304	0.190922276	99.8956			
9	1.335260477	1.334938853	100	0.23554576	0.235482151	100			
10	1.538450553	1.538376922	100	0.289748386	0.289697454	100			
11	1.758217593	1.758699545	99.9726	0.354791816	0.354687805	100			
12	1.993480968	1.995145946	100	0.432172839	0.432277716	99.9757			

ตาราง 6 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 5x5 ตารางเมตร				ห้องขนาด 10x10 ตารางเมตร			
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
13	2.24295179	2.243435782	100	0.5233357265	0.52352323	99.9683		
14	2.505214121	2.5056678	100	0.629700588	0.629818603	99.9813		
15	2.778802084	2.779565035	99.9726	0.752363299	0.752551378	100		
16	3.062266257	3.061153003	100	0.892230514	0.891893908	100		
17	3.354225591	3.354001004	100	1.049846548	1.049698902	100		
18	3.653403756	3.654163318	100	1.225373826	1.226201637	100		
19	3.958650885	3.958418565	100	1.418582154	1.418661049	99.9944		
20	4.268952983	4.268491308	100	1.628869623	1.628960777	100		
21	4.58343183	4.582335445	100	1.85531142	1.855096361	100		
22	4.901338225	4.902273726	99.9809	2.096728939	2.097261179	100		
23	5.2220411	5.222661214	100	2.351769457	2.351913173	99.9939		
24	5.545014495	5.545341408	100	2.618986649	2.618043558	100		
25	5.869823908	5.871492054	100	2.89691386	2.897044532	99.9955		

ตาราง 6 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 15x15 ตารางเมตร				ห้องขนาด 20x20 ตารางเมตร			
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)		
0	0.010781537	0.010780912	100	0.004549827	0.004553179	99.9264		
1	0.013556852	0.013552412	100	0.005724973	0.005723167	100		
2	0.017041345	0.017036855	100	0.007202694	0.007204253	100		
3	0.021413238	0.021418213	99.9768	0.00906035	0.009058206	100		
4	0.026893845	0.02689892	99.9811	0.011394762	0.011391768	100		
5	0.033757041	0.033743465	100	0.014326928	0.014319382	100		
6	0.042340294	0.042320029	100	0.018007776	0.01801174	99.9780		
7	0.053057217	0.053048951	100	0.02262513	0.022629624	100		
8	0.066411414	0.066441506	100	0.028412041	0.028422394	99.9636		
9	0.083011094	0.083058794	99.9426	0.035656629	0.035641204	100		
10	0.103583504	0.103576981	100	0.04471348	0.044708547	100		
11	0.128987689	0.12896336	100	0.056016533	0.056015996	100		
12	0.160223438	0.160299643	100	0.070093162	0.070114246	100		

อัตราส่วน	ห้องขนาด 15x15 ตารางเมตร				ห้องขนาด 20x20 ตารางเมตร			
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
13	0.198433645	0.19840931	100	0.087578834	0.087476028	100		
14	0.244896812	0.244743639	100	0.109231273	0.10922064	100		
15	0.301006367	0.300954944	100	0.1359425	0.136074773	100		
16	0.368234048	0.36838396	99.9593	0.168746438	0.168802421	100		
17	0.448076172	0.44786028	100	0.208819185	0.208817252	100		
18	0.54198407	0.541747281	100	0.257468626	0.25728539	100		
19	0.651283147	0.651142304	100	0.316110124	0.316128283	100		
20	0.777088249	0.777348841	99.9665	0.38622586	0.386042617	100		
21	0.920225299	0.919654777	100	0.469307136	0.469462021	99.9670		
22	1.081169784	1.081469902	100	0.566781665	0.566926727	100		
23	1.260011003	1.260150942	99.9889	0.679931078	0.679619581	100		
24	1.456447276	1.457496732	99.9280	0.809806984	0.809842371	100		
25	1.669812429	1.669992169	99.9892	0.957155842	0.95741452	100		

ตาราง 7 ผลค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของ 1 สถานีฐานโดยมีหลายสายอากาศภาคส่ง

อัตราส่วน	ห้องขนาด 5x5 ตารางเมตร				ห้องขนาด 10x10 ตารางเมตร			
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)		
0	1	0.999999	100	1	1	100		
1	1	0.999975	100	1	1	100		
2	1	0.999522	100	1	1	100		
3	0.999499	0.995769	100	1	1	100		
4	0.995453	0.977006	100	1	1	100		
5	0.976386	0.921162	100	1	1	100		
6	0.919613	0.810483	100	1	1	100		
7	0.80679	0.649625	100	1	1	100		
8	0.645373	0.470655	100	1	1	100		
9	0.467529	0.309946	100	0.999999888	1	99.99999879		
10	0.306971	0.187088	100	0.999998584	0.999998	100		
11	0.18473	0.104338	100	0.99994516	0.999952	99.999316		
12	0.103221	0.054556	100	0.999115392	0.999091	100		

ตาราง 7 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 5x5 ตารางเมตร				ห้องขนาด 10x10 ตารางเมตร				
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
13	0.05421	0.027174	100	0.992847142	0.992833	100			
14	0.026577	0.013032	100	0.96637241	0.966479	99.98897129			
15	0.012693	0.005957	100	0.896429411	0.896463	99.99625315			
16	0.005775	0.002588	100	0.769839236	0.769276	100			
17	0.002546	0.001123	100	0.60083037	0.601489	99.89050006			
18	0.001154	0.000512	100	0.424091055	0.424299	99.95099104			
19	0.000487	0.000195	100	0.272119705	0.272903	99.71297695			
20	0.000194	0.000085	100	0.160379468	0.16039	99.9934335			
21	0.000076	0.000031	100	0.087875439	0.087427	100			
22	0.000043	0.000021	100	0.045296075	0.045341	99.9009171			
23	0.000017	0.000005	100	0.02220142	0.022381	99.19762331			
24	0.000009	0.000001	100	0.010443634	0.010628	98.26527607			
25	0.000003	0.000004	75	0.004751824	0.004864	97.69375113			

ตาราง 7 (ต่อ)

อัตราส่วน สัญญาต่อ สัญญาครบถ้วน	ห้องขนาด 15x15 ตารางเมตร		ห้องขนาด 20x20 ตารางเมตร	
	ผลคำนวณเชิง ตัวเลข	ผลการจำลองผล (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิง ตัวเลข	ผลการจำลองผล (ร้อยละ)
0	1	1	1	1
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	1	1	1	1
5	1	1	1	1
6	1	1	1	1
7	1	1	1	1
8	1	1	1	1
9	1	1	1	1
10	1	1	1	1
11	1	1	1	1
12	1	1	1	1

ตาราง 7 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 15x15 ตารางเมตร				ห้องขนาด 20x20 ตารางเมตร				
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
13	1	1	99.99999996	1	1	100	1	1	100
14	0.9999999906	1	99.999999062	1	1	100	1	1	100
15	0.9999993151	0.999994	99.999991509	1	1	100	1	1	100
16	0.999817536	0.999804	100	1	1	100	1	1	100
17	0.997809115	0.997759	100	0.999999998	1	99.99999983	1	1	99.99999983
18	0.985955099	0.985924	100	0.999999686	0.999998	100	0.999998	0.999998	100
19	0.944930414	0.945104	99.98163311	0.99982705	0.999982	100	0.999982	0.999982	100
20	0.852631998	0.852929	99.96517859	0.999631019	0.999632	99.99990188	0.999632	0.999632	99.99990188
21	0.70584407	0.706303	99.93502363	0.996281457	0.996431	99.98499213	0.996431	0.996431	99.98499213
22	0.529204405	0.529171	100	0.9792248	0.979044	100	0.979044	0.979044	100
23	0.359243299	0.359469	99.93721262	0.926823913	0.926747	100	0.926747	0.926747	100
24	0.22252022	0.222655	99.93946711	0.819724537	0.819763	99.99530807	0.819763	0.819763	99.99530807
25	0.1272	0.1267	100.0000	0.6621	0.6618	100	0.6621	0.6618	100

ตาราง 8 ผลค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของหลายสถานีฐานโดยมี 1 สายอากาศภาคภาคส่ง

อัตราส่วน	ห้องขนาด 5x5 ตารางเมตร				ห้องขนาด 10x10 ตารางเมตร			
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล (ร้อยละ)	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล (ร้อยละ)	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล (ร้อยละ)
0	0.999999777	0.999998	100	1	1	1	1	100
1	0.999987058	0.999994	99.99930578	1	1	1	1	100
2	0.999708933	0.999705	100	1	1	1	1	100
3	0.996919454	0.997084	99.98349731	1	1	1	1	100
4	0.982031748	0.981958	100	1	1	1	1	100
5	0.93436233	0.934173	100	1	1	1	1	100
6	0.833401214	0.833467	99.99210694	1	1	1	1	100
7	0.680227293	0.679594	100	1	1	1	1	100
8	0.502576399	0.502608	99.99371266	1	1	1	1	99.99999996
9	0.336516951	0.337331	99.75867947	0.999999912	1	1	1	99.99999123
10	0.20593701	0.206074	99.93352372	0.999993837	0.999995	0.999995	0.999995	99.99988372
11	0.116519399	0.116633	99.90259941	0.999837737	0.999855	0.999855	0.999855	99.99827344
12	0.061693328	0.061274	100	0.998042538	0.997955	0.997955	0.997955	100

ตาราง 8 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 5x5 ตารางเมตร				ห้องขนาด 10x10 ตารางเมตร			
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
13	0.030913485	0.030925	99.9627657	0.987280394	0.987215	100	0.987215	100
14	0.014806024	0.014787	100	0.949255538	0.949053	100	0.949053	100
15	0.006835663	0.006938	98.52497514	0.861761714	0.862204	99.94870281	0.862204	99.94870281
16	0.003063624	0.003102	98.7628765	0.719501013	0.719416	100	0.719416	100
17	0.001340666	0.001348	99.45596778	0.544755813	0.544791	99.99354119	0.544791	99.99354119
18	0.000575556	0.000587	98.05046936	0.373506409	0.373556	99.98672462	0.373556	99.98672462
19	0.000243331	0.000241	100	0.233537524	0.232887	100	0.232887	100
20	0.000101622	0.000109	93.23129392	0.134628622	0.134857	99.83065183	0.134857	99.83065183
21	4.20276E-05	0.00005	84.05524204	0.072418912	0.072464	99.93777855	0.072464	99.93777855
22	1.72464E-05	0.00002	86.23194844	0.036769	0.036462	100	0.036462	100
23	7.03342E-06	0.000008	87.91778328	0.017802218	0.017957	99.13804037	0.017957	99.13804037
24	2.85424E-06	0.000001	100	0.008291787	0.00832	99.6608964	0.00832	99.6608964
25	1.15374E-06	0.000002	57.6867933	0.003742886	0.003701	100	0.003701	100

ตาราง 8 (ต่อ)

อัตราส่วน สัญญาณต่อ สัญญาณรบกวน	ห้องขนาด 15x15 ตารางเมตร		ห้องขนาด 20x20 ตารางเมตร	
	ผลคำนวณเชิง ตัวเลข	ผลการจำลองผล อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิง ตัวเลข	ผลการจำลองผล อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
0	1	1	1	1
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	1	1	1	1
5	1	1	1	1
6	1	1	1	1
7	1	1	1	1
8	1	1	1	1
9	1	1	1	1
10	1	1	1	1
11	1	1	1	1
12	1	1	1	1

ตาราง 8 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 15x15 ตารางเมตร				ห้องขนาด 20x20 ตารางเมตร				
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
13	0.999999999	1	99.99999993	1	1	100	1	1	100
14	0.99999985	1	99.99998496	1	1	100	1	1	100
15	0.999990344	0.999987	100	1	1	100	1	1	100
16	0.999765804	0.999781	99.99848007	1	1	99.99999999	1	1	99.99999999
17	0.997375424	0.997354	100	0.999999984	1	99.99999843	1	1	99.99999843
18	0.984011135	0.983957	100	0.999998628	0.999999	99.99996276	0.999999	0.999999	99.99996276
19	0.939632756	0.939373	100	0.99995438	0.999957	99.99973796	0.999957	0.999957	99.99973796
20	0.842910179	0.84279	100	0.999308527	0.999302	100	0.999302	0.999302	100
21	0.692813543	0.692999	99.97323854	0.99444865	0.994431	100	0.994431	0.994431	100
22	0.51559716	0.51473	100	0.973282238	0.973413	99.98656668	0.973413	0.973413	99.98656668
23	0.347589788	0.347658	99.98037945	0.914546018	0.91436	100	0.91436	0.91436	100
24	0.213994561	0.214223	99.89336392	0.802024023	0.802637	99.92362956	0.802637	0.802637	99.92362956
25	0.121699591	0.12163	100	0.642885581	0.642933	99.99262458	0.642933	0.642933	99.99262458

ตาราง 9 ผลค่าความน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของหลายสถานีฐานย่อยมีหลายสายอากาศภาคส่งโดยที่แต่ละสถานีย่อยมีจำนวนสายอากาศเท่ากัน

อัตราส่วน	ห้องขนาด 5x5 ตารางเมตร				ห้องขนาด 10x10 ตารางเมตร				
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบจำลองเชิงตัวเลข	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบจำลองเชิงตัวเลข	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบจำลองเชิงตัวเลข	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
0	0.999999867	1	99.99998669	1	1	100	1	1	100
1	0.999991055	0.999994	99.99970553	1	1	100	1	1	100
2	0.999776701	0.999806	99.99706957	1	1	100	1	1	100
3	0.997451481	0.997419	100	1	1	100	1	1	100
4	0.984295946	0.984224	100	1	1	100	1	1	100
5	0.940284405	0.940225	100	1	1	100	1	1	100
6	0.843920705	0.843618	100	1	1	100	1	1	100
7	0.693967236	0.693962	100	1	1	100	1	1	100
8	0.516633006	0.516036	100	1	1	99.99999997	1	1	99.99999997
9	0.348360657	0.349033	99.80736978	0.99999992	1	99.99999197	1	1	99.99999197
10	0.214490328	0.214017	100	0.999993922	0.999995	99.99989221	0.999995	0.999995	99.99989221
11	0.12198439	0.122561	99.52953201	0.999833423	0.999842	99.99914216	0.999842	0.999842	99.99914216
12	0.064861365	0.065187	99.50045962	0.997954474	0.997902	100	0.997902	0.997902	100

ตาราง 9 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 5x5 ตารางเมตร			ห้องขนาด 10x10 ตารางเมตร		
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
13	0.032613397	0.032396	100	0.986653125	0.986668	99.99849237
14	0.015663853	0.015769	99.33320272	0.946939016	0.947345	99.95714507
15	0.007247947	0.007314	99.09688996	0.856480118	0.855746	100
16	0.003254245	0.003244	100	0.711180709	0.711347	99.97662301
17	0.00142613	0.001419	100	0.534929893	0.53505	99.97755211
18	0.000612948	0.000632	96.98541885	0.364252962	0.364125	100
19	0.000259376	0.000236	100	0.226248144	0.225824	100
20	0.000108402	0.000093	100	0.129642483	0.129774	99.89865654
21	4.48574E-05	0.000042	100	0.069368999	0.069324	100
22	1.84161E-05	0.00001	100	0.035061621	0.034791	100
23	7.51319E-06	0.000011	68.30174418	0.016911266	0.017075	99.04108924
24	3.04983E-06	0.000003	100	0.007852078	0.007728	100
25	1.23308E-06	0.000002	61.65394472	0.00353527	0.003398	100

ตาราง 9 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 15x15 ตารางเมตร				ห้องขนาด 20x20 ตารางเมตร				
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
0	1	1	100	1	1	100	1	1	100
1	1	1	100	1	1	100	1	1	100
2	1	1	100	1	1	100	1	1	100
3	1	1	100	1	1	100	1	1	100
4	1	1	100	1	1	100	1	1	100
5	1	1	100	1	1	100	1	1	100
6	1	1	100	1	1	100	1	1	100
7	1	1	100	1	1	100	1	1	100
8	1	1	100	1	1	100	1	1	100
9	1	1	100	1	1	100	1	1	100
10	1	1	100	1	1	100	1	1	100
11	1	1	100	1	1	100	1	1	100
12	1	1	100	1	1	100	1	1	100

ตาราง 9 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 15x15 ตารางเมตร				ห้องขนาด 20x20 ตารางเมตร				
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
13	0.999999999	1	99.9999999	1	1	100	1	1	100
14	0.9999999797	1	99.99997972	1	1	100	1	1	100
15	0.999987911	0.999988	99.9999113	1	1	100	1	1	100
16	0.99972303	0.999714	100	1	1	100	1	1	100
17	0.997028408	0.997093	99.99352198	0.999999995	1	99.99999949	1	1	99.99999949
18	0.982491349	0.982677	99.98110766	0.999999283	1	99.99992833	1	1	99.99992833
19	0.93555589	0.935206	100	0.999967755	0.999975	99.9992755	0.999975	0.999975	99.9992755
20	0.835522355	0.835631	99.98699844	0.99941188	0.999416	99.99958773	0.999416	0.999416	99.99958773
21	0.682996249	0.683241	99.96417796	0.99474712	0.994755	99.99920784	0.994755	0.994755	99.99920784
22	0.50540988	0.504385	100	0.97325769	0.973376	99.98784537	0.973376	0.973376	99.98784537
23	0.338905914	0.339768	99.74627213	0.912286519	0.912658	99.95929676	0.912658	0.912658	99.95929676
24	0.207663668	0.20728	100	0.795307695	0.794395	100	0.794395	0.794395	100
25	0.117623529	0.117719	99.91889918	0.63154581	0.630604	100	0.630604	0.630604	100

ตาราง 10 ผลค่างานน่าจะเป็นสัญญาณขาดหายของหลายสถานีฐานโดยมีหลายสายอากาศส่งโดยที่แต่ละสถานีโดยมีจำนวนสายอากาศไม่เท่ากัน

อัตราส่วน	ห้องขนาด 5x5 ตารางเมตร		ห้องขนาด 10x10 ตารางเมตร	
	ผลค่างานเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	ผลค่างานเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล
0	0.999996258	0.999998	99.99982583	1
1	0.999887632	0.999899	99.99886305	1
2	0.998500528	0.998526	99.99744902	1
3	0.989486831	0.98933	100	1
4	0.95561881	0.955653	99.99642237	1
5	0.873965178	0.874161	99.97759881	1
6	0.736425513	0.736015	100	1
7	0.562901373	0.562338	100	1
8	0.38936616	0.389814	99.88511454	1
9	0.245324491	0.245513	99.92321849	1
10	0.14233093	0.142621	99.79661494	0.99999
11	0.076963409	0.077103	99.81895504	0.999767
12	0.039241565	0.039118	100	0.997307

ตาราง 10 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 5x5 ตารางเมตร				ห้องขนาด 10x10 ตารางเมตร			
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	แบบการจำลองผล	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	อัตราความถูกต้อง (ร้อยละ)
13	0.019063658	0.019041	100	0.984076341	0.98402	100		
14	0.008903297	0.008839	100	0.940421288	0.940326	100		
15	0.004027548	0.003947	100	0.845229017	0.844914	100		
16	0.001775695	0.001705	100	0.696840676	0.696559	100		
17	0.000766892	0.00074	100	0.520562305	0.520841	99.94649128		
18	0.000325778	0.000305	100	0.352358893	0.352355	100		
19	0.000136575	0.000135	100	0.217784487	0.217832	99.97818829		
20	5.66555E-05	0.000057	99.39560045	0.124300788	0.124046	100		
21	2.33056E-05	0.000029	80.36409741	0.066303635	0.066542	99.64178301		
22	9.52288E-06	0.000009	100	0.033430388	0.033122	100		
23	3.87044E-06	0.000005	77.40878682	0.016093635	0.016187	99.42321307		
24	1.56642E-06	0.000001	100	0.007461259	0.007522	99.19248963		
25	6.31815E-07	0.00000001	100	0.003355371	0.00333	100		

ตาราง 10 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 15x15 ตารางเมตร		ห้องขนาด 20x20 ตารางเมตร	
	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	ผลการจำลองผล (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิงตัวเลข	ผลการจำลองผล (ร้อยละ)
0	1	1	1	1
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	1	1	1	1
5	1	1	1	1
6	1	1	1	1
7	1	1	1	1
8	1	1	1	1
9	1	1	1	1
10	1	1	1	1
11	1	1	1	1
12	1	1	1	1

ตาราง 10 (ต่อ)

อัตราส่วน	ห้องขนาด 15x15 ตารางเมตร		ห้องขนาด 20x20 ตารางเมตร	
	ผลคำนวณเชิง ตัวเลข	ผลการจำลองผล (ร้อยละ)	ผลคำนวณเชิง ตัวเลข	ผลการจำลองผล (ร้อยละ)
13	0.999999998	1	99.99999977	1
14	0.999999646	1	99.99996464	1
15	0.999982126	0.999981	100	1
16	0.999634584	0.999632	100	1
17	0.996381503	0.996393	99.99884616	1
18	0.979868987	0.979533	100	0.99999792
19	0.928927085	0.929084	99.98311081	0.999988
20	0.824015752	0.823574	100	0.9997141
21	0.668214097	0.669129	99.86326962	0.99694294
22	0.490464876	0.490693	99.95350988	0.98207315
23	0.326420755	0.326228	100	0.93434725
24	0.198703186	0.199041	99.83027933	0.833197996
25	0.11192472	0.112156	99.79378752	0.679776559

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กนกศิริ รัศมี
วัน เดือน ปี เกิด	9 สิงหาคม 2532
สถานที่เกิด	นครนายก
วุฒิการศึกษา	วศ.บ. วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	44/4 ม.2 ถ.สุวรรณศร ต.บ้านนา อ.บ้านนา จ.นครนายก 26110
ผลงานตีพิมพ์	The 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON2019) https://ieeexplore.ieee.org/document/9024436

