

การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของตำแหน่งสายอากาศไมโคร  
บนโทรศัพท์เคลื่อนที่

นายคนัย อัสตานีก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2553

**OPTIMAL DESIGN OF MIMO ANTENNA POSITIONS  
ON MOBILE PHONE**

**Danai Assanuk**

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

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2010**

# การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของตำแหน่งสายอากาศไมโครบัพทรีฟเลกซ์เคลื่อนที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภิต)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ร.อ. ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปีจันทร์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

คณั ย อัสสานึก : การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของตำแหน่งสายอากาศไมโม  
บนโทรศัพท์เคลื่อนที่ (OPTIMAL DESIGN OF MIMO ANTENNA POSITIONS  
ON MOBILE PHONE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุซหารสกุล,  
106 หน้า.

ในปัจจุบันเทคโนโลยีติดต่อสื่อสารผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการเติบโตมากโดยมีความต้องการอัตราเร็วในการส่งข้อมูลที่สูง โดยงานวิทยานิพนธ์นี้จะประยุกต์ใช้ระบบไมโมเข้ามาเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วยเทคนิคไมโม ระบบไมโมเป็นเทคนิคที่มีการใช้สายอากาศแถวลำดับทั้งภาครับและภาคส่งมากกว่าหนึ่งต้นในการรับส่งข้อมูลหลายชุดพร้อมกันในเวลาเดียวกันโดยใช้ความถี่เดียวกัน เทคนิคไมโมนี้เพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องของ (Quality of Service: QoS) และอัตราเร็วในการส่งข้อมูล อย่างไรก็ตาม เนื่องจากระบบมีการใช้สายอากาศหลาย ๆ ต้นและอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่มีขนาดเล็ก การจัดวางสายอากาศจึงควรจัดวางในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยจะพิจารณาผลกระทบจากปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วม (Mutual coupling) ที่เกี่ยวข้องกับการกระทำร่วมกันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับซึ่งมีผลต่อตำแหน่งของการวางสายอากาศ ปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วม จะพิจารณาจากค่าอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ (Impedance Matrix: Z) ระหว่างสายอากาศแถวลำดับที่กระทำร่วมกันโดยจะพิจารณาจากระยะห่างของสายอากาศ วิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิค จินเนติกอัลกอริทึมหรือจำลองแบบทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) เพื่อหาดำแหน่งที่เหมาะสมในการจัดวางสายอากาศในอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบและการวัดจริงยืนยันว่าตำแหน่งการจัดเรียงสายอากาศที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ให้ผลค่าความจุช่องสัญญาณที่ดีที่สุด

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

DANAI ASSANUK : OPTIMAL DESIGN OF MIMO ANTENNA  
POSITIONS ON MOBILE PHONE THESIS ADVISOR : ASST.  
PROF. PEERAPONG UTHANSAKUL, Ph.D., 106 PP.

#### OPTIMAL DESIGN OF MIMO ANTENNA POSITIONS ON MOBILEPHONE

With the rapid growth of mobile communications, the new services are driven by users' demand requiring more and more data rate. In this thesis, the use of Multiple Input Multiple Output (MIMO) has promisingly supported such a requirement by providing enormous capacity as well as maintaining spectrum efficiency. The concept of MIMO systems is to apply multiple antennas on both transmitter and receiver. A greater number of antennas used, the more benefits are obtained. Since it requires multiple antenna elements to be closely spaced on a specific area of mobile terminal, this leads to both high correlation between received signals and high mutual coupling among antenna elements. Mutual coupling becomes a key design for multiple antenna systems because a strong coupling results in a loss of efficiency of the antenna systems. For mobile terminal, its dimension trends to be smaller. As a result, in this thesis, the optimal antenna positions specified by a use of genetic algorithms are determined by considering mutual coupling effect based on Z-parameter matching on all possible positions of a mobile terminal. The simulation and measurement results confirm that the proposed solution can provide the best channel capacity.

School of Telecommunication Engineering Student's Signature \_\_\_\_\_

Academic Year 2010 Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินวิทยานิพนธ์ จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ ปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไข วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา พรหมมาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย และผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระจงนอก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการและให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีต และปัจจุบันที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด นางสาวปณิษฐาท์ อาจหาญ ที่ช่วยดูแลในเรื่องเอกสารต่าง ๆ ระหว่างศึกษาจนสำเร็จการศึกษา ไปด้วยดี และขอขอบคุณ นายตำรวจ สันทาคุณัย และ นายปณดพล เข้มศรวล เป็นพิเศษสำหรับการให้คำแนะนำเกี่ยวกับรูปแบบการจัดทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่ง มาโดยตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และท้อใจ ทำให้ผู้วิจัย ประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัย ขอมอบให้กับบิดามารดา รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนจนครุอาจารย์ผู้สอน ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบัน จนสำเร็จ การศึกษาไปด้วยดี

คนัย อัสตานีก

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญรูป .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
บทที่	
<b>1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
1.5 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์ .....	3
<b>2 ทฤษฎีพื้นฐานในวิทยานิพนธ์</b> .....	<b>5</b>
2.1 ความเป็นมาของระบบโมโมที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ .....	5
2.2 แบบจำลองช่องสัญญาณเบื้องต้น .....	6
2.3 แบบจำลองช่องสัญญาณในระบบโมโม .....	7
2.3.1 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกัน และการแจกแจงเหมือนกัน .....	7
2.3.2 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบ “Two-Ring” .....	8
2.4 ความจุช่องสัญญาณในระบบโมโม (MIMO channel capacity) .....	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1	ช่องสัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลง (Static channel) ..... 13
2.4.2	ช่องสัญญาณที่มีการจางหาย (Fading channel) ..... 16
2.4.3	ช่องสัญญาณที่ใช้พิจารณาในวิทยานิพนธ์ ..... 17
2.5	อิมพีแดนซ์เมตริกซ์และคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ ..... 17
2.5.1	การนิยามอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ในวงจรที่นำคลื่น N พอร์ต ..... 17
2.6	ปรากฏการณ์เชื่อมต่อกัน (Mutual coupling) ..... 19
2.6.1	อิมพีแดนซ์เมตริกซ์ (impedance matrices) ..... 20
2.7	อิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างสายอากาศไดโพล ..... 22
2.8	สรุป ..... 31
<b>3</b>	<b>การหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ ..... 32</b>
3.1	จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) ..... 33
3.1.1	ขั้นตอนการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม ..... 34
3.1.2	โครโมโซมประชากรและการเข้ารหัส (Population and encoding scheme) ..... 35
3.1.3	การประเมินค่าความเหมาะสม (fitness evaluation) ..... 37
3.1.4	การคัดเลือกสายพันธุ์ ..... 40
3.1.5	ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ ..... 41
3.1.6	การแทนที่ (Replacement) ..... 44
3.1.7	ข้อดีของจินเนติกอัลกอริทึม ..... 45
3.2	การประยุกต์ใช้ GA ในการหาตำแหน่งของระบบโมโม ..... 46
3.3	การหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการวางสายอากาศ ด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ..... 48
3.3.1	ออปติไมซ์เซชันทูลบ็อกซ์ (optimization toolbox) ..... 48
3.3.2	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ..... 50
3.3.3	เงื่อนไข (Constraint) ..... 52
3.3.4	พารามิเตอร์ (Parameter) ..... 52



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 สรุป .....	53
<b>4 ผลจากการทดสอบหาตำแหน่งที่เหมาะสม .....</b>	<b>54</b>
4.1 รูปแบบสายอากาศ (antenna configuration) .....	54
4.2 ผลจากการหาตำแหน่งการวางสายอากาศด้วยเทคนิควิธีจิ้นเนติก อัลกอริทึมในช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกัน และมีการแจกแจงเหมือนกัน โดยพิจารณา ช่องสัญญาณการจางหายแบบเลย์ลี .....	58
4.3 ผลการจำลองการหาตำแหน่งโดยใช้โปรแกรม CST microwave studio เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบหาค่าความจุของช่องสัญญาณ .....	65
4.4 การทดสอบระบบโมโมในสถานการณ์จริง .....	71
4.5 การหาความจุช่องสัญญาณ .....	79
4.5.1 วิเคราะห์ผลการจำลองแบบและการทดสอบ .....	84
4.6 การหาตำแหน่งการวางสายอากาศด้วยเทคนิควิธีจิ้นเนติก อัลกอริทึมในช่องสัญญาณแบบ “Two-Ring” โดยพิจารณามุม ที่กระทำกันระหว่างภาครับและภาคส่ง .....	85
4.6.1 วิเคราะห์ผลการจำลองแบบและการทดสอบ .....	90
4.7 สรุป .....	91
<b>5 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>92</b>
5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์ .....	93
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	93
รายการอ้างอิง .....	94
ภาคผนวก .....	96
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	97
ประวัติผู้เขียน .....	106

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การรับส่งข้อมูลในระบบไมโม .....	6
2.2 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบ “Two-Ring” .....	9
2.3 แสดงการจำลองแบบจากโปรแกรมเมทแลป .....	12
2.4 วงจรท่อนำคลื่น N พอร์ต .....	18
2.5 แสดงระบบมัลติพอร์ต .....	20
2.6 แสดงเครือข่าย 2 พอร์ต .....	23
2.7 แสดง เครือข่าย 3 พอร์ต .....	23
2.8 แสดงรูปสายอากาศไดโพลที่ใช้คำนวณปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วม .....	25
2.9 แสดงการจัดวางสายอากาศไดโพลที่เหมือนกันสองตัว เพื่อคำนวณอิมพีแดนซ์ร่วม .....	27
3.1 แสดงการจัดวางสายอากาศบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ .....	32
3.2 แสดงขั้นตอนทั่วไปของจินเนติกอัลกอริทึม .....	35
3.3 การแก้ปัญหาในระบบจินเนติกอัลกอริทึมและระบบโลกจริง .....	37
3.4 แสดงตัวอย่างการเข้ารหัสโครโมโซม .....	37
3.5 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เชื่อมโยงจินเนติกอัลกอริทึม เข้ากับระบบในโลกจริง .....	38
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับฟังก์ชัน กำหนดค่าความเหมาะสม .....	39
3.7 ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ของจินเนติกอัลกอริทึม .....	41
3.8 การครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว .....	42
3.9 การครอสโอเวอร์แบบหลายจุด .....	43
3.10 การเปลี่ยนแปลงบนบิตที่ 4 ในโครโมโซม .....	43
3.11 แสดงหน้าต่างเครื่องมือ optimization toolbox .....	49
3.12 ตัวอย่างการวางสายอากาศในพิกัด บนพื้นที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ .....	51
4.1 แสดงผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST microwave studio .....	55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	ผลค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ s11 ที่ ที่ความถี่ 5.725 GHz ..... 55
4.3	ผลค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ s11 ที่ความถี่ 5.85 GHz ..... 56
4.4	แสดงตัวอย่างการจัดวางสายอากาศโมโนโพลบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ ..... 57
4.5	ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ s11 ที่ 5.725-5.85 GHz ..... 57
4.6	ผลของการหาตำแหน่งการวางสายอากาศ 3 ต้นที่ดีที่สุด ด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ..... 59
4.7	ผลของการหาตำแหน่งการวางสายอากาศ 4 ต้นที่ดีที่สุด ด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ..... 60
4.8	ผลของการหาตำแหน่งการวางสายอากาศ 4 ต้นที่ดีที่สุด ด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมในกรณีเปรียบเทียบ การเพิ่ม generation และ population..... 61
4.9	แสดงการวางสายอากาศ 3 ต้นในแต่ละกรณีบนพื้นที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ ..... 62
4.10	แสดงการวางสายอากาศ 4 ต้นในแต่ละกรณีบนพื้นที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ ..... 63
4.11	ความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในกรณีโมโม 4x4 โดยใช้ผลตำแหน่งจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึม แสดงความจุในกรณีสุ่มเปรียบเทียบ..... 64
4.12	แสดงการจำลองผลตำแหน่งการวางสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (a) ..... 65
4.13	แสดงการจำลองผลตำแหน่งการวางสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (b) ..... 66
4.14	แสดงการจำลองผลตำแหน่งการวางสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (c) ..... 67
4.15	แสดงการจำลองผลตำแหน่งการวางสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (d) ..... 68
4.16	แสดงการจำลองผลตำแหน่งการวางสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (a) ..... 69
4.17	แสดงการจำลองผลตำแหน่งการวางสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (b) ..... 70
4.18	แสดงการจำลองผลตำแหน่งการวางสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (c) ..... 71
4.19	แสดงการจำลองผลตำแหน่งการวางสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (d) ..... 72
4.20	แสดงการวัดผลค่า Z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศผ่านเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย ..... 73
4.21	แสดงการจัดวางสายอากาศ 3 ต้นในแต่ละกรณี ..... 73

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ s11 ที่ 5.85 GHz.....	74
4.23 แสดงผลวัดค่าเฟสของสายอากาศ s11 ที่ 5.85 GHz.....	75
4.24 แสดงการจัดวางสายอากาศ 4 ดันในแต่ละกรณี .....	77
4.25 ความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในกรณีโมโม 3x3 โดยใช้ผลตำแหน่งจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึม .....	79
4.26 ความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในกรณี โมโม 3x3 โดยใช้ผล Z อิมพีแดนซ์จากโปรแกรม CST microwave studio .....	80
4.27 ความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในกรณีโมโม 3x3 โดยใช้ผล Z อิมพีแดนซ์จากการวัดจริง .....	81
4.28 ความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในกรณีโมโม 4x4 โดยใช้ผลตำแหน่งจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึม.....	82
4.29 ความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในกรณี โมโม 4x4 โดยใช้ผล Z อิมพีแดนซ์จากโปรแกรม CST microwave studio .....	83
4.30 ความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในกรณีโมโม 4x4 โดยใช้ผล Z อิมพีแดนซ์จากการวัดจริง .....	84
4.31 ความจุช่องสัญญาณ CDF สำหรับมุมส่งที่ 360 และ มุมรับที่ 360 เปรียบเทียบกับกรณีอื่น .....	87
4.32 ความจุช่องสัญญาณ CDF สำหรับมุมส่งที่ 360 และ มุมรับที่ 60 เปรียบเทียบกับกรณีอื่น .....	88
4.33 ความจุช่องสัญญาณ CDF สำหรับมุมส่งที่ 60 และ มุมรับที่ 360 เปรียบเทียบกับกรณีอื่น.....	89
4.34 ความจุช่องสัญญาณ CDF สำหรับมุมส่งที่ 60 และ มุมรับที่ 60 เปรียบเทียบกับกรณีอื่น .....	90

## สารบัญตาราง

รูปที่	หน้า
3.1	แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้บนเครื่องมือ optimization toolbox ..... 52
4.1	แสดงการวางตัวของสายอากาศโดยพิจารณาช่องสัญญาณแบบมี ความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน ในระบบโมโม 3x3 และ 4x4 ..... 62
4.2	แสดงตำแหน่งของการวางสายอากาศในระบบโมโม 3x3 ..... 64
4.3	แสดงตำแหน่งของการวางสายอากาศในระบบโมโม 4x4 ..... 65
4.4	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (a) ..... 66
4.5	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (b) ..... 66
4.6	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (c) ..... 67
4.7	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (d) ..... 68
4.8	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (a) ..... 69
4.9	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (b) ..... 70
4.10	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (c) ..... 71
4.11	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (d) ..... 72
4.12	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (a) ..... 73
4.13	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (b) ..... 76
4.14	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (c) ..... 76
4.15	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (d) ..... 76
4.16	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (a) ..... 77
4.17	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (b) ..... 78
4.18	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (c) ..... 78
4.19	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (d) ..... 78
4.20	แสดงผลตำแหน่งการวางสายอากาศซึ่งได้จากวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม ในแต่ละกรณี ..... 85
4.21	แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณีมุมส่งที่ 360 และมุมรับที่ 360 ..... 85

## สารบัญตาราง (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 แสดงค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณีมุมส่งที่ 360 และมุมรับที่ 60 .....	86
4.23 แสดงค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณีมุมส่งที่ 60 และมุมรับที่ 360 .....	86
4.24 แสดงค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณีมุมส่งที่ 60 และมุมรับที่ 60 .....	86
4.25 แสดงค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณีค่าเฉลี่ย จากกรณีทั้งหมด.....	87

# บทที่ 1

## บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็น การอธิบายถึงประวัติความเป็นมาและเหตุจูงใจสำหรับวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตวิทยานิพนธ์ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีติดต่อสื่อสารผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการเติบโตมากโดยได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคไม่ว่าจะเป็นทางด้านเทคนิคความถี่ เทคนิคทางด้านเวลา และการเทคนิคการเข้ารหัส เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับส่งข้อมูลให้มีคุณภาพสูงขึ้นและมีอัตราการรับส่งข้อมูลที่มากขึ้น โดยวิทยานิพนธ์นี้สนใจการประยุกต์ใช้เทคนิค โมโม (MIMO) Foschini, G.J., and Gans, M.J. (1998) เข้ามาเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โทรศัพท์เคลื่อนที่

ระบบการสื่อสารไร้สายที่เป็นระบบโมโมเป็นเทคนิคที่สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบสื่อสารไร้สายให้ดีขึ้นได้ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีการใช้สายอากาศแถวลำดับทั้งภาครับและภาคส่ง มากกว่าหนึ่งต้นในการรับส่งข้อมูลหลายชุดพร้อมกันในเวลาเดียวกัน โดยใช้ความถี่เดียวกัน โดยในเทคนิคโมโมจะมีการเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องของ (Quality of Service: QoS) และอัตราเร็วในการส่งข้อมูลเนื่องจากโมโมอาศัยหลักการของการสลับเชิงตำแหน่ง (Spatial Multiplexing) และ ใดเวอร์ซิตี (Diversity) นอกจากนี้ความจุช่องสัญญาณในระบบโมโม สามารถเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามจำนวนคู่ของสายอากาศระหว่างภาครับและภาคส่ง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากระบบมีการใช้สายอากาศหลาย ๆ ต้นและอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่มีขนาดพื้นที่จำกัด การจัดวางสายอากาศจึงควรจัดวางในตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยจะพิจารณาจากผลกระทบจากปรากฏการณ์เชื่อมต่อกัน (Mutual coupling) Xu, Z., Sfar, S., and Blum, R.S. (2006) ที่เกี่ยวข้องกับการกระทำร่วมกันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับซึ่งมีผลต่อตำแหน่งของการจัดวางสายอากาศโดยปรากฏการณ์เชื่อมต่อกันจะพิจารณาจากค่าอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ (Impedance Matrix: Z) Fei, Y., Fan, Y., Lau, B.K., and

Thompson, J.S. (2008) ระหว่างสายอากาศแถวลำดับที่กระทำร่วมกัน ซึ่งจะพิจารณาจากระยะห่างของสายอากาศแต่ละตัวที่กระทำร่วมกัน โดยจะนำไปพิจารณาในช่องสัญญาณในระบบไมโมและจะใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Method) เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของระบบเพื่อจะทำการหาค่าสูงสุด (Maximum Value) ของระบบ โดยพิจารณาจากตำแหน่งที่ทำให้ระบบได้รับค่าความจุของช่องสัญญาณมีค่าที่มากที่สุด โดยเฉพาะเทคนิคจินเนติกอัลกอริทึมหรือจำลองแบบทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA) เป็นวิธีการค้นหาค่าตอบที่ดีที่สุดโดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาค่าตอบที่แม่นยำและถูกต้องซึ่งมีวิทยานิพนธ์จำนวนมากที่ได้ใช้เทคนิคนี้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic) Haupt, R.L., 1995; Bajwa, A., Williams, T., and Stuchly, M.A. (2001) จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจที่วิทยานิพนธ์นี้จะนำเอาเทคนิคการหาค่าตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมาใช้ในการหาค่าตำแหน่งของการจัดวางสายอากาศในพื้นที่ที่กำหนด

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอวิทยานิพนธ์ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบจากปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วม (Mutual coupling) ในระบบไมโมโดยพิจารณาถึงผลกระทบจากปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วมของสายอากาศแถวลำดับซึ่งจะมีผลทำให้ค่าความจุของช่องสัญญาณมีค่าที่เปลี่ยนไป ดังนั้นการจัดวางตัวของสายอากาศมากกว่าสองต้นขึ้นไปบนพื้นที่ที่กำหนดนั้นในแต่ละตำแหน่งที่วางตัวของสายอากาศจะมีผลกระทบต่อความสัมพันธ์ (Correlation) ของสัญญาณ โดยการหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการจัดวางสายอากาศในอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งในแต่ละตำแหน่งย่อมมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาในส่วนที่กล่าวมา

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาถึงการหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้เทคนิคจินเนติกอัลกอริทึมในการจัดวางสายอากาศในอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบบไมโมโดยรายละเอียดสามารถอธิบายได้ดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการท างานและทฤษฎีพื้นฐานความจุช่องสัญญาณของระบบไมโม

1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการจัดวางสายอากาศในตำแหน่งที่เหมาะสมบนพื้นที่ที่กำหนดบนอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบบไมโมโดยใช้เทคนิคจินเนติกอัลกอริทึม

1.2.3 เพื่อทำการทดสอบวัดผลภายใต้สภาพแวดล้อมจริงของการหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการจัดวางตัวของสายอากาศที่ได้ทำการวิเคราะห์จากการวัดทดสอบจริงและจำลองแบบ



### 1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1.3.1 ศึกษาหลักการงานรวมถึงทฤษฎีความจุช่องสัญญาณในระบบโมเด็มโดยนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่

1.3.2 ศึกษาปรากฏการณ์เชื่อมต่องานที่มีผลต่อตำแหน่งของการจัดวางสายอากาศ

1.3.3 ศึกษาวิธีการจัดวางสายอากาศในตำแหน่งที่เหมาะสมที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพเหมาะสมที่สุด

1.3.4 จำลองช่องสัญญาณเพื่อจำลองแบบ หาความจุของช่องสัญญาณด้วยโปรแกรมแมทแลป (MATLAB) โดยพิจารณาปรากฏการณ์เชื่อมต่องานเพื่อหาตำแหน่งการจัดวางของสายอากาศที่เหมาะสมที่สุด

1.3.5 ทำการประมวลผลด้วยโปรแกรมแมทแลป (MATLAB) โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อหาตำแหน่งการจัดวางสายอากาศในพื้นที่จำกัด

1.3.6 ทำการสร้างอุปกรณ์ชุดสายอากาศบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ในทางปฏิบัติ

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ความจุช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นจากการกำหนดตำแหน่งการจัดวางสายอากาศในตำแหน่งที่เหมาะสม

1.4.2 ได้แนวทางในการหาตำแหน่งของการจัดวางสายอากาศบนโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยประยุกต์ใช้ระบบโมเด็มเพื่อให้ใช้งานในทางปฏิบัติได้อย่างเหมาะสม

### 1.5 รายละเอียดวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

**บทที่ 1** เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ รวมถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตวิทยานิพนธ์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

**บทที่ 2** กล่าวถึงทฤษฎีความจุช่องสัญญาณในระบบโมเด็มซึ่งพิจารณาช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นจากวิธีการที่แตกต่างกัน การประยุกต์ใช้อิมพีแดนซ์เมตริกซ์ซึ่งอธิบายถึงปรากฏการณ์เชื่อมต่องานที่มีปัจจัยของระยะการจัดวางตัวของสายอากาศ และสุดท้ายอธิบายถึงอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างองค์ประกอบสายอากาศโมโนโพล

**บทที่ 3** กล่าวถึงการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการหาตำแหน่งการจัดวางสายอากาศบนโทรศัพท์เคลื่อนที่และหลักการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยการใช้เทคนิคจินเนติกอัลกอริทึม

**บทที่ 4** การออกแบบการทดลอง ผลการทดลองในส่วนของการวัดและจากการจำลองแบบ รวมถึงวิเคราะห์ผลที่ได้ทั้งหมด

**บทที่ 5** กล่าวถึงการสรุปผลทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ทั้งจากการจำลองแบบและการทดลอง รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้น ข้อเสนอแนะแนวทางแก้ไข และแนวทางการพัฒนาในอนาคต

## บทที่ 2

### ทฤษฎีพื้นฐานในวิทยานិพนธ์

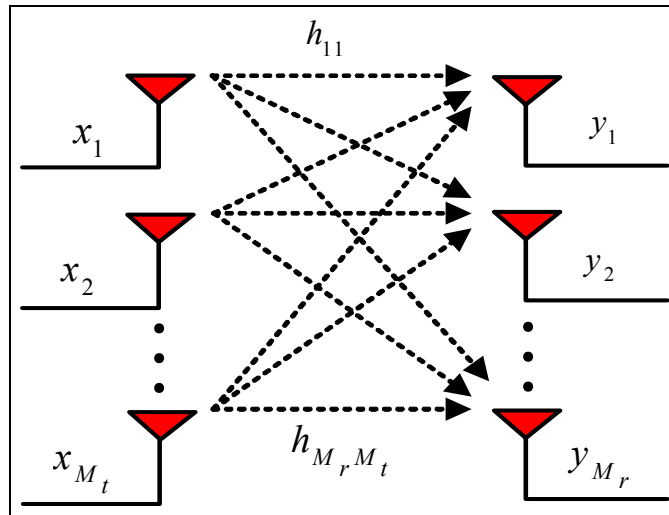
สำหรับในบทนี้แบ่งเนื้อหาของทฤษฎีเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของระบบโมโม (MIMO) ทฤษฎีความจุช่องสัญญาณในระบบโมโมโดยใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ซึ่งพิจารณาในช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน โดยจะอธิบายถึง แบบจำลองช่องสัญญาณการเฟดแบบเลย์ลี (Rayleigh fading channel) ที่มีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกันและแบบจำลองช่องสัญญาณแบบ “two-Ring” ซึ่งทฤษฎีความจุช่องสัญญาณ ซึ่งส่วนนี้ยังกล่าวถึงสหสัมพันธ์ของสัญญาณเมื่อมีปัจจัยของระยะการจัดวางตัวของสายอากาศมาเกี่ยวข้อง

ส่วนที่สองอธิบายผลกระทบจากปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศโดยประยุกต์ใช้ทฤษฎี N- พอร์ตและอธิบายถึงอิมพีพีแดนซ์ร่วมระหว่างสายอากาศโมโนโพล

#### 2.1 ความเป็นมาของระบบโมโมที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

ระบบโมโมเป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบันเนื่องจากความสามารถในการเพิ่มความจุของช่องสัญญาณและได้รับความน่าเชื่อถือในการสื่อสารไร้สายโดยปราศจากการใช้ทรัพยากรความถี่เพิ่มเติม โดยระบบโมโมเป็นระบบที่มีการใช้สายอากาศแบบหลายองค์ประกอบในการรับส่งสัญญาณทั้งในภาคส่งและภาครับ ซึ่งจะแตกต่างจากเทคโนโลยีเดิมที่ใช้ในระบบสื่อสารไร้สายประเภทสายอากาศฉลาด (Smart antenna System) ที่ใช้สายอากาศหลายต้นแค่เพียงด้านเดียวไม่ว่าจะเป็นที่ภาคส่งที่จะใช้สายอากาศหลายต้นแค่เพียงด้านเดียวไม่ว่าจะเป็นที่ภาคส่งอย่างเดียวหรือที่ภาครับอย่างเดียวก็ตาม โดยที่ระบบโมโมนี้สามารถดึงความสามารถทั้งการมัลติเพลกซ์ (Multiplexing) หรือพัฒนาคุณลักษณะด้วยไคเวอร์ซิตี (Diversity) ในระบบนี้สายอากาศส่งและรับช่วยในการเพิ่มอัตราขยายไคเวอร์ซิตี การมัลติเพลกซ์จะส่งเสริมในด้านโครงสร้างของอัตราขยายของช่องสัญญาณ ซึ่งจะมีความเป็นอิสระในแต่ละทิศทางการเดินทางของคลื่น โดยมีผู้ที่เริ่มใช้ระบบนี้ได้แก่ Win, M.Z., and Gans, M.J., 1999; Win, M.Z., and Winters, J.H. (1999) โดยระบบจะมีส่วนของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แบ่งสัญญาณข้อมูลออกเป็นส่วนย่อย ๆ เพื่อส่งไปยังระบบสายอากาศภาคส่งพร้อม ๆ กันและสัญญาณที่ส่งในแต่ละสายอากาศจะผ่านช่องสัญญาณไร้สายไปยังสายอากาศภาครับจากนั้นต้องผ่านหน่วยประมวลผลข้อมูลเพื่อแยกสัญญาณข้อมูลแต่ละชุดที่ได้รับที่สายอากาศภาครับแต่ละตัวแล้วทำการรวมข้อมูลที่ได้ออกมา

ที่ปลายทางซึ่งจะเปรียบเทียบได้กับการแบ่งข้อมูลออกเป็นหลาย ๆ เส้นทางแล้วส่งไปพร้อม ๆ กัน สำหรับแบบจำลองของระบบโมโมในวิทยานิพนธ์นี้ก่อนที่จะนำไปศึกษาผลกระทบจากปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการจัดวางสายอากาศต่อไป



รูปที่ 2.1 การรับส่งข้อมูลในระบบโมโม

## 2.2 แบบจำลองช่องสัญญาณเบื้องต้น

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาช่องสัญญาณระบบโมโมที่เป็นแถบแคบ ซึ่งใช้กับการสื่อสารจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง เราพิจารณาถึงระบบที่มีการใช้สายอากาศแถวลำดับที่มีสายอากาศที่ภาคส่ง  $M_T$  ต้นและสายอากาศที่ภาครับ  $M_R$  ต้นดังแสดงในรูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของสัญญาณที่ได้รับที่สายอากาศภาครับ และสัญญาณที่ส่งออกที่สายอากาศภาคส่ง สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2.1)$$

โดยที่  $\mathbf{y}$  คือ เวกเตอร์สัญญาณที่ภาครับขนาด  $M_R \times 1$   
 $\mathbf{x}$  คือ เวกเตอร์สัญญาณที่ภาคส่งขนาด  $M_T \times 1$

- $\mathbf{n}$  คือ เวกเตอร์สัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน (Gaussian noise) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีความแปรปรวนเท่ากับ  $\sigma^2$
- $\mathbf{H}$  คือ เวกเตอร์นอร์มอลไลซ์ (Normalize) ของช่องสัญญาณที่มีขนาด  $M_R \times M_T$  เขียนแทนได้ดังนี้

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1M_T} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2M_T} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{M_R1} & h_{M_R2} & \cdots & h_{M_R M_T} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

โดยในวิทยานิพนธ์จะพิจารณาช่องสัญญาณ  $\mathbf{H}$  มีการกระจายตัวแบบอิสระที่เหมือนกัน (identically independent distributed: iid) ด้วยกระบวนการ Complex Gaussian ที่มีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และมีความแปรปรวนของส่วนจริงเท่ากับส่วนจินตภาพที่ 0.5

### 2.3 แบบจำลองช่องสัญญาณในระบบโมโม่

ในการสื่อสารแบบไร้สาย สัญญาณที่ถูกส่งออกมาจะสมมุติให้ได้รับหลังจากที่ผ่านกระบวนการของการแผ่กระจายคลื่น ซึ่งจะประกอบด้วยผลของการกระจัดกระจาย การสะท้อน การแทรกสอด และการหักเหที่เกิดขึ้นจากวัตถุที่ปรากฏในแต่ละเหตุการณ์ของการสื่อสาร ผลจากความหลากหลาย และความยากในการหาแบบจำลองช่องสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับสถานะแต่ละชนิดได้ จึงได้นำเสนอแบบจำลองเบื้องต้นมาใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองระบบโมโม่ ซึ่งจะได้อธิบายแบบจำลองช่องสัญญาณแบบต่าง ๆ ในรายละเอียดต่อไป

#### 2.3.1 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกันและการแจกแจงเหมือนกัน

สำหรับแบบจำลองช่องสัญญาณการเฟดแบบเลย์ลี (Rayleigh fading channel) ที่มีความอิสระต่อกันและการแจกแจงเหมือนกันเกิดจากการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของระดับสัญญาณอย่างทันทีทันใดเนื่องจากการสะท้อน และการแทรกสอดระหว่างระหว่างคลื่นตรง และคลื่นสะท้อนที่มาถึงในสภาพแวดล้อม และระยะห่างระหว่างสายอากาศแถวลำดับที่ภาคส่งและภาครับในระบบสื่อสาร ซึ่งจะส่งผลให้ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากคลื่นหลายวิถีจำนวนมาก รูปแบบสัญญาณที่รับได้เป็นไปตามการแจกแจงแบบเลย์ลี (Rayleigh Distribution) ถือเป็นแบบจำลองพื้นฐานที่ง่ายและใช้กันมากสำหรับแบบจำลองช่องสัญญาณ โดยที่แบบจำลองช่องสัญญาณระบบ

โมโมที่เป็นช่องสัญญาณการเฟดแบบเลสลีย์ที่มีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกันจะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$h_{mn} = N(0, 1/\sqrt{2}) + jN(0, 1/\sqrt{2}) \quad (2.3)$$

โดยที่  $h_{mn}$  แทนค่าอัตราขยายเชิงซ้อนระหว่างสายอากาศภาคส่งตัวที่  $n$  กับสายอากาศภาครับตัวที่  $m$  ส่วน  $N(0, 1/\sqrt{2})$  แทนการแจกแจงปกติที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น  $1/\sqrt{2}$  โดยช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน สามารถเรียกเป็น ช่องสัญญาณขาว (White channel) แทนด้วยสัญลักษณ์  $H_w$  โดยที่คุณสมบัติของ  $H_w$  สามารถสรุปได้ดังนี้

$$E\{[H_w]_{i,j}\} = 0$$

$$E\{|[H_w]_{i,j}|^2\} = 1 \quad (2.4)$$

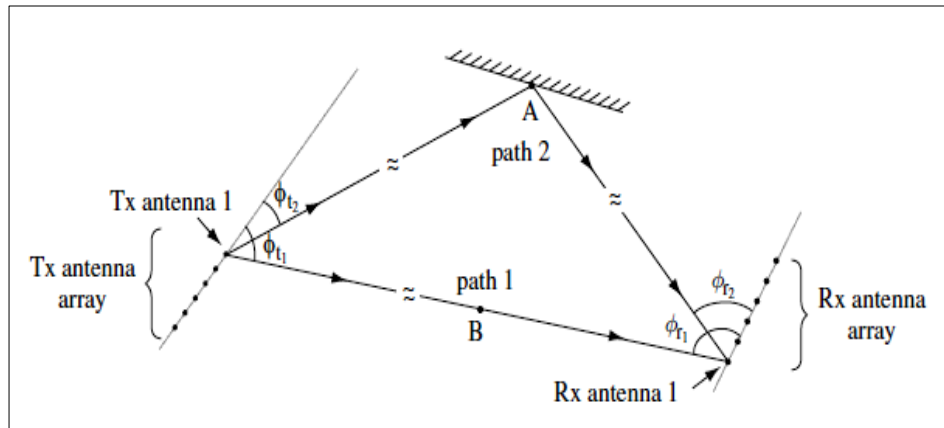
$$E\{[H_w]_{i,j}[H_w]_{m,n}^\dagger\} = 0, \text{ ถ้า } i \neq m \text{ และ } j \neq n$$

โดยที่  $E\{x\}$  คือ ค่าความคาดหวังของ  $x$

$[\cdot]^\dagger$  คือ ค่าคอนจูเกตทรานสโพสเชิงซ้อน (complex conjugate transpose)

### 2.3.2 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบ “Two-Ring”

แบบช่องสัญญาณแบบ “Two-Ring” ได้รับการอธิบายไว้ในงานของ Bakhshi, G., Saadat, R., and Shatalebi, K. (2008) โดยสำหรับแบบจำลองนี้จะใช้อธิบายการกระจัดกระจายของสัญญาณโดยเกิดจากการสะท้อนโดยวัตถุที่ทำให้เกิดการกระจัดกระจายของสัญญาณทั้งด้านภาครับและด้านภาคส่ง โดยจะแสดงการเดินทางของคลื่นในแต่ละทิศทางของระบบโมโม โดยที่พิจารณามุมที่กระทำกันระหว่างภาคส่งและภาครับ โดยที่มุมที่ภาคส่งและมุมที่ภาครับเกิดจากการใช้สัญญาณแบบสุ่ม (random channel) ดังแสดงในรูป 2.2



รูปที่ 2.2 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบ “Two-Ring”

จากรูปที่ 2.2 แสดงการเดินทางของคลื่นในแต่ละทิศทาง เมื่อมีการรับรู้สถานะช่องสัญญาณ โดยมีอัตราการลดทอนที่เกิดขึ้นในแต่ละทิศทาง แทนด้วย  $a_i$  มุมส่ง แทนด้วย  $\phi_{ti}$  ( $\Omega_{ti} = \cos \phi_{ti}$ ) และมุมรับ แทนด้วย  $\phi_{ri}$  ( $\Omega_{ri} = \cos \phi_{ri}$ ) ดังนั้นช่องสัญญาณ หาได้จาก

$$\mathbf{H} = \sum_i a_i^b \mathbf{e}_r(\Omega_{ri}) \mathbf{e}_t(\Omega_{ti})^H \quad (2.5)$$

โดย 
$$a_i^b = a_i \sqrt{M_t M_r} \exp\left(\frac{-j2\pi d_i}{\lambda_c}\right) \quad (2.6)$$

$$\mathbf{e}_t(\Omega_{ti}) = \frac{1}{M_t} \begin{bmatrix} 1 \\ \exp[-j(2\pi\Delta_t \Omega_{ti})] \\ \vdots \\ \exp[-j(M_t - 1)(2\pi\Delta_t \Omega_{ti})] \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{e}_r(\Omega_{ri}) = \frac{1}{M_r} \begin{bmatrix} 1 \\ \exp[-j(2\pi\Delta_r \Omega_{ri})] \\ \vdots \\ \exp[-j(M_r - 1)(2\pi\Delta_r \Omega_{ri})] \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

โดยที่  $d_i$  คือ ระยะทางระหว่างภาคส่ง ๆ ไปยังภาครับในแต่ละทิศการเดินทางของคลื่น

$\mathbf{e}_t(\Omega_i)$  คือ เวกเตอร์ใช้แทนการกระจายตัวในทิศทาง  $\Omega_i$

$\mathbf{e}_r(\Omega_i)$  คือ เวกเตอร์ใช้แทนการกระจายตัวในทิศทาง  $\Omega_i$

$\lambda_c$  คือ ความยาวคลื่นของความถี่กลาง

$\Delta_t$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศมีการนอร์มัลไลซ์ที่ภาคส่ง

$\Delta_r$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศมีการนอร์มัลไลซ์ที่ภาครับ

จากการส่งและรับข้อมูลในรูปแบบที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะ เป็นมุมที่ส่งออกไปหรือมุมที่รับเข้ามาเกิดจากองค์ประกอบของมุมทั้งสิ้น โดยสัญญาณที่รับเข้ามา จากมุม  $\Omega_i$  ที่ภาครับ และแทนเวกเตอร์หนึ่งหน่วยได้เป็น  $\mathbf{e}_r(\Omega_i)$  จากสมการ 2.8 ดังนั้นจะได้ เวกเตอร์มูลฐานที่ภาครับ

$$\xi_r = \left\{ \mathbf{e}_r(0), \mathbf{e}_r\left(\frac{1}{L_r}\right), \dots, \mathbf{e}_r\left(\frac{M_r-1}{L_r}\right) \right\} \quad (2.9)$$

ในทำนองเดียวกันการประมวลผลจะมีสัญญาณที่ส่งออกไปที่ภาคส่ง และมี เวกเตอร์หนึ่งหน่วยเป็น  $\mathbf{e}_t(\Omega_i)$  หาได้จากสมการ 2.7 ดังนั้นจะได้เวกเตอร์มูลฐานที่ภาคส่ง

$$\xi_t = \left\{ \mathbf{e}_t(0), \mathbf{e}_t\left(\frac{1}{L_t}\right), \dots, \mathbf{e}_t\left(\frac{M_t-1}{L_t}\right) \right\} \quad (2.10)$$

โดยที่  $L_t = M_t \Delta_t$  และ  $L_r = M_r \Delta_r$  คือการนอร์มัลไลซ์ระยะห่างระหว่าง สายอากาศที่ภาคส่งและภาครับ ส่วน  $\Delta_t$  และ  $\Delta_r$  คือระยะห่างระหว่างสายอากาศที่ภาคส่งและ ภาครับกำหนดให้  $\mathbf{U}_t$  และ  $\mathbf{U}_r$  เป็นเมทริกซ์ยูนิแทรี จะมีจำนวนคอลัมน์เป็นไปตามเวกเตอร์มูล ฐานตามสมการ 2.9 และ 2.10 จะได้สมการ 2.11 และ สมการ 2.12 ตามลำดับ

$$\mathbf{U}_t = \frac{1}{\sqrt{M_t}} \exp\left(\frac{-j2\pi kl}{M_t}\right) \quad k, l = 0, 1, \dots, M_t - 1 \quad (2.11)$$

$$\mathbf{U}_r = \frac{1}{\sqrt{M_r}} \exp\left(\frac{-j2\pi kl}{M_r}\right) \quad k, l = 0, 1, \dots, M_r - 1 \quad (2.12)$$



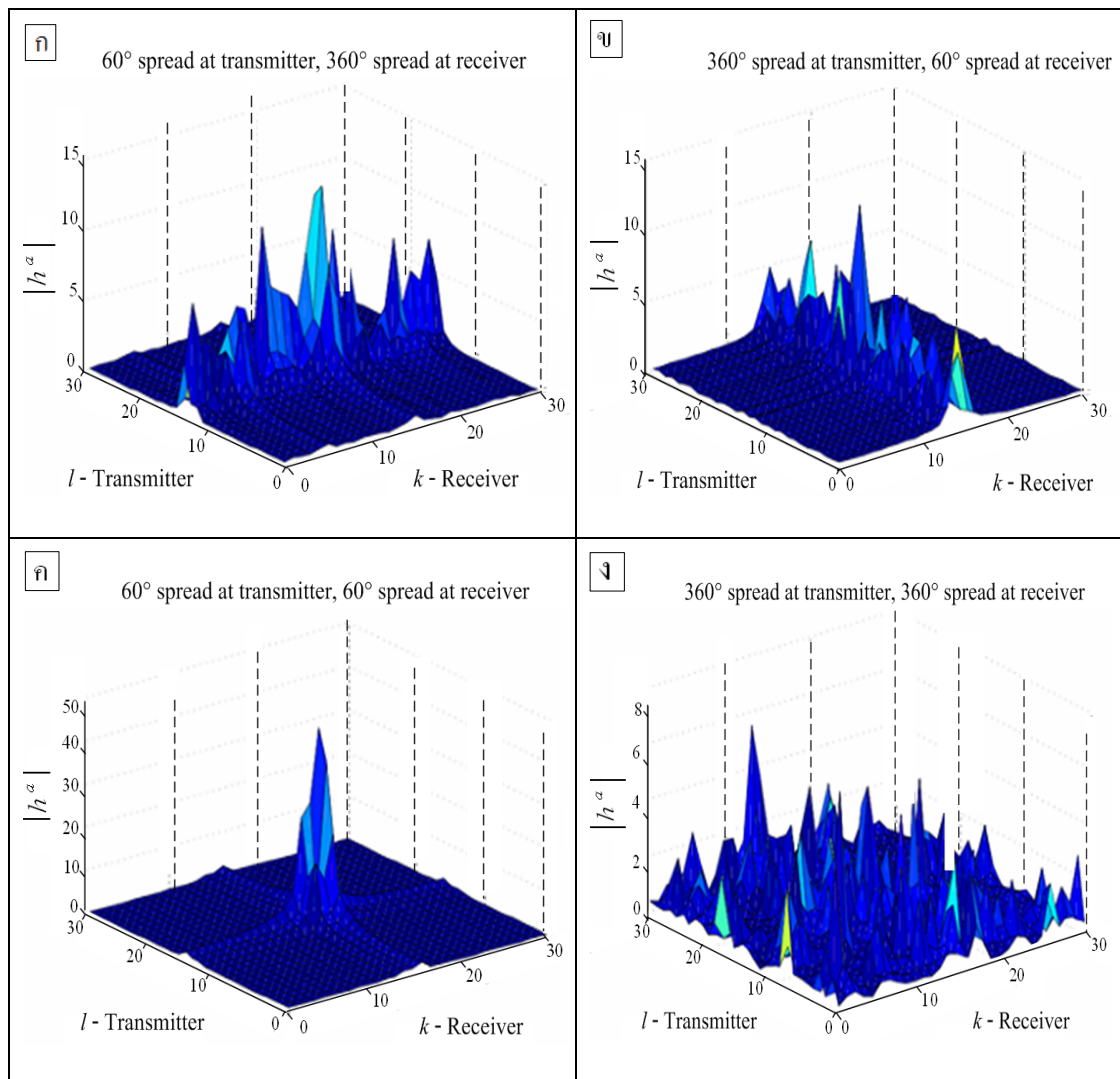
โดยช่องสัญญาณจะมีค่าดังสมการ 2.13

$$\mathbf{H}^a = \mathbf{U}_r^H \mathbf{H} \mathbf{U}_t \quad (2.13)$$

ในวิทยานิพนธ์ได้พิจารณาการส่งและรับ 4 กรณีได้แก่

- 1) มุมส่ง 60 องศา มุมรับ 360 องศา
- 2) มุมส่ง 360 องศา มุมรับ 60 องศา
- 3) มุมส่ง 60 องศา มุมรับ 60 องศา
- 4) มุมส่ง 360 องศา มุมรับ 360 องศา

เมื่อได้ช่องสัญญาณจากการพิจารณาที่มุมส่งและรับจะสามารถหาช่องสัญญาณได้ซึ่งเป็นที่ตามสมการที่ 2.13 เพื่อทดสอบว่าสมการที่ 2.13 มีความถูกต้องและสามารถนำมาใช้จริงได้จึงได้ทำการจำลองผลช่องสัญญาณผ่าน โปรแกรมแมทแลปซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการจำลองแบบจากโปรแกรมแมทแล็บ

รูปที่ 2.3 เป็นการแสดงการจำลองแบบจากโปรแกรมแมทแล็บ เพื่อพิสูจน์ช่องสัญญาณให้เป็นไปตามการอ้างอิง Tse, D., and Viswanath, P. (2005) โดยใช้สมการ 2.13 พิจารณาการส่งและรับ 4 กรณีได้แก่ (ก) มุมส่ง 60 องศา มุมรับ 360 องศา (ข) มุมส่ง 360 องศา มุมรับ 60 องศา (ค) มุมส่ง 60 องศา มุมรับ 60 องศา (ง) มุมส่ง 360 องศา มุมรับ 360 องศา

ทั้ง 4 กรณีนี้ใช้ในการหาช่องสัญญาณ “Two-Ring” โดยพิจารณามุมที่กระทำระหว่างภาครับและภาคส่งจากนั้นนำสมการ 2.5 2.11 และ 2.12 มาแปลงเป็นช่องสัญญาณ “Two-Ring” ที่พิจารณามุมที่กระทำกันระหว่างภาครับและภาคส่ง  $H^\alpha$  ในสมการ 2.13 และนำสมการ 2.13 คิดเฉพาะขนาดแล้วนำขนาดที่ได้พล็อตให้เห็นถึงความแตกต่างของการส่งและรับในแต่ละกรณี

## 2.4 ความจุช่องสัญญาณในระบบไมโม (MIMO channel capacity)

หัวข้อนี้เสนอความจุช่องสัญญาณ โดยทฤษฎีของ Shannon ซึ่งจะให้อัตราการส่งข้อมูลสูงสุด ภายใต้ช่องสัญญาณที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดน้อย ความจุช่องสัญญาณเทียบกับปริมาณที่สูญเสียอธิบายโดยอัตราเร็วการส่งข้อมูล ได้จากการส่งผ่านช่องสัญญาณซึ่งมีความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดไม่เป็นศูนย์ ความจุช่องสัญญาณอยู่ภายใต้การรับรู้สถานะช่องสัญญาณ รวมถึงอัตราขยายช่องสัญญาณทั้งภาคส่งและภาครับ ในส่วนแรกจะอธิบายถึงความจุช่องสัญญาณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้ความแตกต่างในการสมมติช่องสัญญาณที่รับรู้ได้

### 2.4.1 ช่องสัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลง (Static channel)

ความจุช่องสัญญาณในระบบไมโมสามารถกระจายได้จากสูตรของช่องสัญญาณในระบบที่มีสายอากาศส่งและรับภาคละ 1 ต้น โดยกำหนดให้มีการรับรู้สถานะช่องสัญญาณที่ภาครับ ช่องสัญญาณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถรับรู้ได้ที่ระยะไกล ๆ ภายใต้การสมมติความจุช่องสัญญาณในเทอมของข้อมูลร่วมกันระหว่างช่องสัญญาณที่ส่งจากภาคส่งไปยังภาครับ ขณะที่

$$C = \max_{p(x)} I(X; Y) = \max_{p(x)} [\mathbf{H}(Y) - \mathbf{H}(Y|X)] \quad (2.14)$$

สำหรับ  $\mathbf{H}(Y)$  และ  $\mathbf{H}(Y|X)$  อยู่ภายใต้  $y$  โดยที่  $\mathbf{H}(Y|X) = \mathbf{H}(n)$  เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น โดยสัญญาณรบกวน  $n$  มีความเป็นอิสระจากอินพุตที่ส่งเข้ามา

กำหนดความสัมพันธ์ของเมตริกซ์  $R_x$  อยู่บนอินพุตเวกเตอร์  $x$  และ  $R_y$  อยู่บนเอาต์พุตเวกเตอร์  $y$  จะได้

$$R_y = E[yy^H] = \mathbf{H}R_x\mathbf{H}^H + \mathbf{I}_{M_r} \quad (2.15)$$

$$\text{เมื่อ } I(X; Y) = B \log_2 \det[\mathbf{I}_{M_r} + \mathbf{H}R_x\mathbf{H}^H] \quad (2.16)$$

ดังนั้นความจุช่องสัญญาณหาได้จาก การแทน สมการ 2.16 ลงใน สมการ 2.14 จะได้

$$C = \max_{R_x: T_r(R_x) = \rho} B \log_2 \det[\mathbf{I}_{M_r} + \mathbf{H}R_x\mathbf{H}^H] \quad (2.17)$$

โดย  $T_r(R_x)$  มีค่าเท่ากับอัตราส่วนสัญญาณที่รับได้ต่อสัญญาณรบกวน

1. การรับรู้สถานะช่องสัญญาณที่ภาคส่ง โดยวิธีวอเตอร์ฟิวลิ่ง (Channel known at transmitter : Water filling) เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณ มีการรับรู้สถานะของช่องสัญญาณทั้งภาครับและภาคส่ง โดยเฉพาะความจุช่องสัญญาณมีค่าเท่ากับการรวมกันในแต่ละช่องสัญญาณ จะได้ว่า

$$C = \max_{\rho_i: \sum_i \rho_i \leq \rho} \sum_{i=1}^{R_H} B \log_2(1 + \sigma_i^2 \rho_i) \quad (2.18)$$

โดย  $R_H$  คือจำนวนค่าเฉพาะตัวที่ไม่ใช่ศูนย์ และในสมการ 2.18 แสดงให้เห็นในเทอมของการจัดสรร  $P_i$  ในแต่ละช่องสัญญาณ จะได้ว่า

$$C = \max_{P_i: \sum_i P_i \leq P} \sum_{i=1}^{R_H} B \log_2\left(1 + \frac{\sigma_i^2 P_i}{\sigma^2}\right) = \max_{P_i: \sum_i P_i \leq P} \sum_{i=1}^{R_H} B \log_2\left(1 + \frac{\sigma_i^2 \gamma_i}{P}\right) \quad (2.19)$$

เมื่อ  $\gamma_i = \sigma_i^2 P / \sigma^2$  คืออัตราส่วนสัญญาณที่รับได้ต่อสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในแต่ละช่องสัญญาณ แสดงให้เห็นว่า เมื่อ  $\gamma_i$  มีค่าสูง ๆ ความจุช่องสัญญาณที่รับได้ก็จะสูงตามไปด้วย ความจุช่องสัญญาณในสมการ 2.19 คล้ายกับกรณีของสัญญาณราบเรียบ หรือกรณีที่เลือกความถี่การจางหาย เมื่อใช้การจัดสรรด้วยวิธีการวอเตอร์ฟิวลิ่งจะได้ว่า

$$\frac{P_i}{P} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_0} - \frac{1}{\gamma_i} & \gamma_i \geq \gamma_0 \\ 0 & \gamma_i < \gamma_0 \end{cases} \quad (2.20)$$

และความจุช่องสัญญาณ

$$C = \sum_{i=\gamma_i \geq \gamma_0} B \log_2 \left( \frac{\gamma_i}{\gamma_0} \right) \quad (2.21)$$

2. การไม่รู้สถานะช่องสัญญาณที่ภาคส่ง: การจัดสรรกำลังที่สม่ำเสมอ (Channel unknown at transmitter : uniform power allocation) เมื่อรู้สถานะช่องสัญญาณที่ภาครับแต่ไม่รู้ที่ภาคส่ง ข้อมูลที่ภาคส่งไม่สามารถจัดสรรข้อมูลได้ โดยให้ความสัมพันธ์เป็นเมตริกซ์  $R_x(\rho/M_t)I_{M_t}$  ภายใต้การสมมติให้สัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าไปมีค่ามากที่สุด จะได้ข้อมูลร่วมกัน คือ

$$I(X;Y) = B \log_2 \det \left[ \mathbf{I}_{M_r} + \frac{\rho}{M_t} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right] \quad (2.22)$$

เมื่อใช้ SVD เทคนิคในโปรแกรมเมทแลปหาช่องสัญญาณ  $\mathbf{H}$  แล้วจะได้ข้อมูลเป็น

$$I(X;Y) = \sum_{i=1}^{R_H} B \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_i}{M_t} \right) \quad (2.23)$$

โดยที่  $\gamma_i = \sigma_i^2 \rho = \sigma_i^2 P / \sigma^2$  ข้อมูลที่ใช้ร่วมกันของระบบโมโนในสมการ 2.23 อยู่ภายใต้เมตริกซ์ช่องสัญญาณ  $\mathbf{H}$  ซึ่งในทางปฏิบัติจะได้ค่าเฉพาะตัว  $\sigma^2$  ในช่องสัญญาณแบบราบ ภาคส่งสามารถส่งด้วยอัตราเร็วที่เท่ากับค่าเฉลี่ยข้อมูลที่ใช้ร่วมกันและมีความถูกต้องด้วย แต่ช่องสัญญาณคงที่ ภาคส่งไม่สามารถรับรู้สถานะช่องสัญญาณ และไม่รู้อัตราการส่งข้อมูล ทำให้ค่าความจุช่องสัญญาณที่ไม่สามารถรับได้  $P_{out}$  ต้องมีความสัมพันธ์กับอัตราเร็วการส่งผ่าน  $R$  โดยข้อมูลที่ใช้ร่วมกันต้องมีค่าน้อยกว่า  $R$  จะได้ว่า

$$P_{out} = p(\mathbf{H} : B \log_2 \det \left[ \mathbf{I}_{M_r} + \frac{\rho}{M_t} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right] < R) \quad (2.24)$$

เราสามารถหาการกระจายค่าราคาของสมการที่มีลักษณะเฉพาะของ  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$  การกระจายค่านี้จะใช้วิธีการของ SVD จากเหตุผลที่ว่าจำนวนสายอากาศที่เพิ่มขึ้นทั้งภาครับและภาคส่งมีผลทำให้ความจุช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเป็นแบบจำนวนเชิงเส้น

### 2.4.2 ช่องสัญญาณที่มีการจางหาย (Fading channel)

หัวข้อนี้สมมติให้อัตราขยายของช่องสัญญาณได้จากช่องสัญญาณราบเรียบแทนด้วย  $\mathbf{H}_{ij}$  ในกรณีที่ช่องสัญญาณเป็นแบบคงที่ ความจุช่องสัญญาณจะขึ้นอยู่กับ การรับรู้สถานะช่องสัญญาณทั้งภาครับและภาคส่ง ซึ่งมีความสมบูรณ์แบบมากจึงได้ความจุช่องสัญญาณเท่ากับค่าเฉลี่ยช่องสัญญาณภายใต้การจัดสรรกำลังสูงสุด

1. การรับรู้สถานะช่องสัญญาณที่ภาคส่งโดยวิธีอเทอร์ฟิวลิ่ง (Channel known at transmitter: water filling) การรับรู้สถานะช่องสัญญาณที่ภาคส่งจะมีการส่งผ่านในแต่ละช่องสัญญาณ โดยค่ากำลังสูงสุด และค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณนี้เรียกว่า ความจุช่องสัญญาณ แบบเออร์กอร์ดิกมีค่าเฉลี่ยกำลังคงที่ในแต่ละพอร์ตแทนด้วย  $\bar{P}$  ดังนั้นจะได้ความจุช่องสัญญาณ

$$\begin{aligned} C &= E_{\mathbf{H}} \left[ \max_{R_x: T_r(R_x)=\rho} B \log_2 \det[\mathbf{I}_{M_r} + \mathbf{H}R_x\mathbf{H}^H] \right] \\ &= E_{\mathbf{H}} \left[ \max_{P_i: \sum_i P_i \leq \bar{P}} \sum_i B \log_2 \left( 1 + \frac{P_i \gamma_i}{P} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.25)$$

โดย  $\gamma_i = \sigma_i^2 \bar{P} / \sigma^2$

2. เมื่อไม่รู้ช่องสัญญาณที่ภาคส่ง: ความจุช่องสัญญาณแบบเออร์กอร์ดิกและความจุช่องสัญญาณแบบขาดหาย (Channel unknown at transmitter: Ergodic capacity and capacity with outage) พิจารณาเวลาแปรผันตามช่องสัญญาณ โดยมีการสุ่มใช้ช่องสัญญาณที่เกิดขึ้น มีการรับรู้สถานะข้อมูลที่ภาครับแต่ไม่รู้ที่ภาคส่ง หาความจุช่องสัญญาณได้จาก

$$C = \max_{R_x: T_r(R_x)=\rho} E_{\mathbf{H}} [B \log_2 \det[\mathbf{I}_{M_r} + \mathbf{H}R_x\mathbf{H}^H]] \quad (2.26)$$

โดยความจุช่องสัญญาณจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนสายอากาศที่มีค่าน้อยสุดของภาคส่งหรือภาครับ  $M = \min(M_t, M_r)$

3. เมื่อไม่รู้ช่องสัญญาณที่ภาคส่งหรือภาครับ (No CSI at transmitter or receiver) ความจุช่องสัญญาณจะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเชิงเส้นเช่นเดียวกับเมื่อรับรู้สถานะช่องสัญญาณ แต่จะให้ความจุช่องสัญญาณที่น้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตามความจุช่องสัญญาณจะมาก

หรือน้อยขึ้นอยู่กับช่องสัญญาณที่เปลี่ยนไป ซึ่งการหาช่องสัญญาณในแต่ละวิธีจะมีวิธีการที่แตกต่างกันออกไป

### 2.4.3 ช่องสัญญาณที่ใช้พิจารณาในวิทยานิพนธ์

เมื่อไม่มีการรับรู้สถานะข้อมูลที่ภาคส่ง ความจุช่องสัญญาณในระบบโมเด็มที่ใช้แสดงได้ดังนี้

$$C = \log_2 \det \left[ \mathbf{I}_{M_r} + \frac{P_t}{P_n M_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right] \quad (2.27)$$

โดยสมการ 2.27 มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาทีต่อเฮิรตซ์

$\det(\cdot)$  คือ การแทนการหาค่าดีเทอร์มิแนนต์ (determinant) ของเมทริกซ์

$\mathbf{I}_{M_t}$  คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์ ขนาด  $M_r \times M_r$

$\mathbf{H}$  คือ ช่องสัญญาณ ขนาด  $M_r \times M_t$

$\mathbf{H}^H$  คือ การทรานสโพอสคอนจูเกตของเมทริกซ์ช่องสัญญาณ

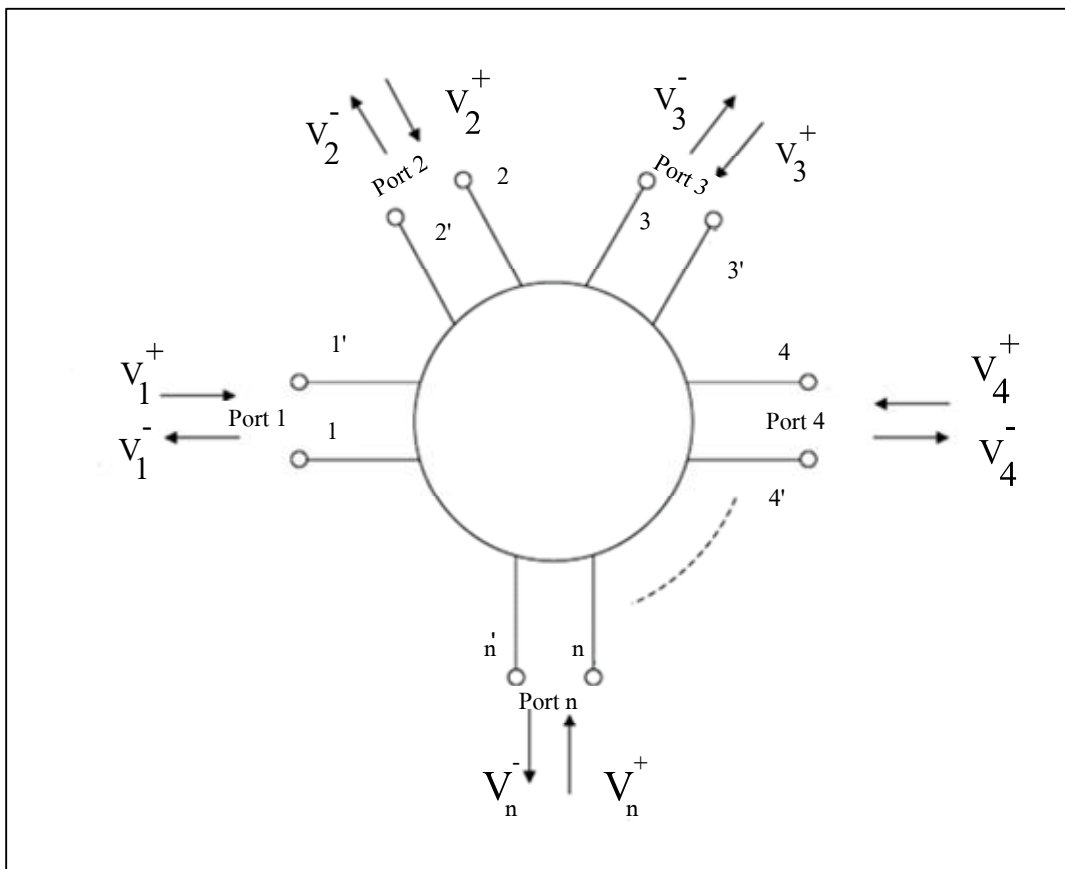
$P_t/P_n$  คือ อัตราส่วนสัญญาณที่รับได้ต่อสัญญาณรบกวน

## 2.5 อิมพีแดนซ์เมตริกซ์และคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการนิยามอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ในวงจรหลายพอร์ต และคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ ซึ่งก็จะนำไปสู่การอธิบายความหมายทางฟิสิกส์ของอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์

### 2.5.1 การนิยามอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ในวงจรท่อนำคลื่น N พอร์ต

ในวงจรท่อนำคลื่นที่มี N พอร์ตตามที่ได้อธิบายในหนังสือของ David, M. P. (1998) ซึ่งอธิบายว่าวงจรท่อนำคลื่นที่มีจุดเชื่อมต่อ (junction) ร่วมกันแสดงดังรูปที่ 2.4 เมื่อเราเลือกกระนาบอ้างอิงในแต่ละท่อนำคลื่นอย่างเหมาะสม เราจะสามารถนิยามอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ขึ้นมาเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าสมมูลและกระแสไฟฟ้าสมมูลของแต่ละพอร์ตได้ ในการสร้างอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ซึ่งเปรียบเหมือนการสร้างวงจรสมมูลขึ้นนั้น ถ้าท่อนำคลื่นที่เกี่ยวข้องสามารถส่งผ่านได้หลายโหมด จำนวนพอร์ตของวงจรสมมูลก็จะมากกว่าจำนวนพอร์ตของท่อนำคลื่นที่มีจริงทางกายภาพ ดังนั้นเพื่อสะดวกในการพิจารณากรณีที่นำคลื่นส่งผ่านเพียงโหมดเดียว ซึ่งทำให้จำนวนพอร์ตของวงจรสมมูลและวงจรจริงเท่ากัน



รูปที่ 2.4 วงจรท่อนำคลื่น N พอร์ต

ในการนิยามอิมพีแดนซ์เมตริกซ์นั้นเราอาจจะอาศัยหลักความจริงที่ว่ากำลังคลื่นที่ส่งเข้าทางพอร์ตใดพอร์ตหนึ่ง เช่น พอร์ตที่  $i$  นอกจากจะส่งผลให้เกิดการสะท้อนกลับมาในพอร์ตที่  $i$  แล้วยังสามารถทำให้เกิดคลื่นส่งผ่านออกไปในพอร์ตอื่น ๆ อีกด้วย การที่กำลังคลื่นจากพอร์ตที่  $i$  จะส่งผลให้เกิดการส่งผ่านออกไปทางพอร์ตที่  $j$  มากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของจุดเชื่อมต่อนั้น อันที่จริงภายในจุดเชื่อมต่อนั้นอาจจะเป็นวงจรท่อนำคลื่นที่มีความสลับซับซ้อนอย่างไรก็ได้ เพียงแต่ต้องมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นเท่านั้น ในสภาพที่ชิ้นส่วนของวงจรทั้งหมดมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นดังกล่าวนี้นี้ เนื่องจากสมการ แมกซ์เวลล์ก็มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นผลกระทบรวมที่เกิดขึ้นที่พอร์ตที่  $i$  ที่เกิดจากคลื่นที่ส่งเข้าไปในพอร์ตที่  $j$  ก็จะเป็นผลบวกเชิงเส้นของผลกระทบจากแต่ละพอร์ต ดังนั้นถ้าเราทำให้  $V_i$  และ  $I_i$  เป็นแรงดันไฟฟ้าสมมูลและกระแสไฟฟ้าสมมูลที่เกิดขึ้นที่พอร์ตที่  $i$  เราจะสามารถผูกความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง



กระแสไฟฟ้าสมมูลและแรงดันไฟฟ้าสมมูลของพอร์ตต่าง ๆ ได้ในรูปของอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ดังต่อไปนี้

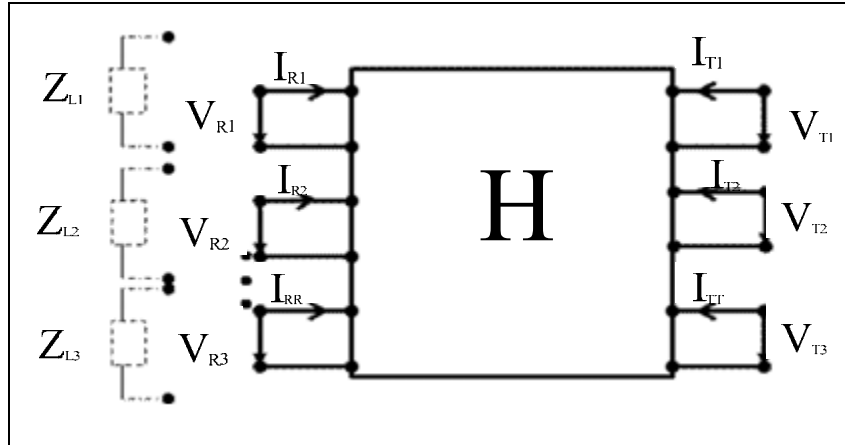
$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \cdots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} \cdots & Z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} \cdots & Z_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

$Z_{ij}$  ซึ่งเป็นตัวประกอบของเมตริกซ์ก็จะเป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่พอร์ต  $j$  กับแรงดันไฟฟ้าที่พอร์ต  $i$  และเนื่องจาก  $Z_{ij}$  โดยทั่วไปเป็นค่าเชิงซ้อน ดังนั้นอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ของวงจร  $N$  พอร์ตก็จะมีพารามิเตอร์รวมกันทั้งหมด  $2N^2$  ตัว ที่จะมากำหนดคุณสมบัติของจุดเชื่อมโยงได้ครบถ้วน โดยจะนำมาประยุกต์ใช้ในการพิจารณาปรากฏการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศซึ่งจะกล่าวต่อไป

## 2.6 ปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วม (Mutual coupling)

ปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วม (Mutual coupling) เกิดขึ้นจากการกระทำร่วมกันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับที่อยู่ในบริเวณตำแหน่งที่ใกล้เคียง โดยสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Electromagnetic Force: EMF) ตามที่ได้อธิบายในหนังสือของ Constantine, A. B. (1997) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบโมโมโดยจะส่งผลต่อค่าความจุของช่องสัญญาณวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เทคนิค  $N$  พอร์ต ที่กล่าวไปในหัวข้อที่ผ่านมา เข้ามาเพื่อใช้ในการพิจารณาดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดของการจัดวางสายอากาศ

### 2.6.1 อิมพีแดนซ์เมตริกซ์ (impedance matrices)



รูปที่ 2.5 แสดงระบบมัลติพอร์ต

เพื่อทำการศึกษาปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศในระบบไม่โมทาง ผู้วิจัยได้พิจารณาระบบทั้งหมดเป็นระบบมัลติพอร์ตขนาดใหญ่โดยสายอากาศแต่ละต้นที่เชื่อมโยกันจะเรียกว่า  $i$  พอร์ต โดยจะพิจารณาช่องสัญญาณที่ติดต่อกันด้วยรูปแบบของ Z-parameter

รูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงระบบมัลติพอร์ตโดยจะจัดวางสายอากาศภาคส่งอยู่ทางขวามือและบอกถึงสายอากาศภาครับอยู่ทางด้านซ้ายมือโดยกำหนดให้  $v_T = [v_{T1}, v_{T2}, \dots, v_{TN}]^T$  และ  $i_T = [i_{R1}, i_{R2}, \dots, i_{RN}]^T$  คือแรงดันและกระแสของภาคส่งและในทำนองเดียวกัน  $v_R = [v_{R1}, v_{R2}, \dots, v_{RN}]^T$  และ  $i_R = [i_{R1}, i_{R2}, \dots, i_{RN}]^T$  คือแรงดันและกระแสของภาครับระบบมัลติพอร์ตจะสามารถอธิบายผ่านระบบ Z-parameter ได้ตามสมการ 2.29

$$\begin{pmatrix} \mathbf{V}_R \\ \mathbf{V}_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Z}_{RR} & \mathbf{Z}_{RT} \\ \mathbf{Z}_{TR} & \mathbf{Z}_{TT} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_R \\ \mathbf{I}_T \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

และเมตริกซ์ขนาด  $N \times N$  ของ  $\mathbf{Z}_{TT}$  และ  $\mathbf{Z}_{RR}$  คืออิมพีแดนซ์เมตริกซ์ของสายอากาศที่บรรจุด้วยอิมพีแดนซ์ของตัวเองและอิมพีแดนซ์ที่กระทำร่วมกันของภาคส่งและภาครับตามอันดับและเมตริกซ์  $\mathbf{Z}_{RT}$  แทนค่าโดยอิมพีแดนซ์การส่งผ่านจากภาคส่งแถวลำดับไปยังภาครับแถวลำดับเช่นเดียวกับ  $\mathbf{Z}_{TR}$  แทนค่าโดยอิมพีแดนซ์การส่งผ่านจากภาครับแถวลำดับไปยัง

ภาคส่งแถวลำดับโดยสมมุติให้แรงดันที่ภาคส่งและภาครับมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของโหลดโดยกำหนดให้เมตริกซ์ทแยงมุม (diagonal matrix) ของโหลดที่ภาครับมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของโหลด โดย  $Z_L = \text{diag}[Z_{L1}, Z_{L2}, \dots, Z_{LN}]$  ภายใต้สถานการณ์ของกระแสและแรงดันที่ภาครับผ่านความสัมพันธ์ผ่านโหลด  $V_R = -Z_L I_R$  โคนแทนในสมการ 2.29 ซึ่งจะได้

$$V_R = (I_r + Z_{RR} Z_L^{-1} - Z_{RT} Z_{TT}^{-1} Z_{TR} Z_L^{-1})^{-1} Z_{RT} Z_{TT}^{-1} V_T \quad (2.30)$$

โดยกำหนด  $I_r$  หมายถึงเมตริกซ์เอกลักษณ์ขนาด  $r$  มิติ โดยเมตริกซ์  $Z_{TT}$ ,  $Z_{RT}$ ,  $Z_{TR}$  และ  $Z_{RR}$  เกี่ยวข้องกับระยะทางระหว่างสายอากาศตั้งนั้นระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับโดยทั่วไปมาขนาดใหญ่มากว่าระยะทางระหว่างสายอากาศแถวอันดับตั้งนั้นจึงมีเหตุผลที่สามารถละเลย  $Z_{RT}$  และ  $Z_{TR}$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} V_R &= Z_L (Z_L + Z_{RR})^{-1} Z_{RT} Z_{TT}^{-1} V_T \\ V_R &= Z_L (Z_L + Z_{RR})^{-1} Z_{RT} I_T \end{aligned} \quad (2.31)$$

ดังนั้นรูปแบบของช่องสัญญาณที่ง่ายและสะดวกโดยพิจารณาด้วยการออกแบบสายอากาศแถวลำดับ

$$\mathbf{H} = Z_L (Z_L + Z_{RR})^{-1} Z_{RT} Z_{TT}^{-1} \quad (2.32)$$

โดย  $\mathbf{H}$  คือรูปแบบของสัญญาณการแผ่กระจายคลื่นทางกายภาพหรือทางสถิติซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของภาคส่งและภาครับที่กำหนดโดย  $Z_{RT}$  ดังนั้นความจุช่องสัญญาณที่ถูกอธิบายโดยเงื่อนไขการแพร่กระจายคลื่นวิทยุของระบบช่องสัญญาณไมโมลักษณะและการสร้างแบบจำลองของระบบไมโมสำหรับสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันจึงเป็นปัญหาสำคัญดังนั้นรูปแบบของช่องสัญญาณควรจะต้องมีความถูกต้องเพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบโดยวิทยานิพนธ์นี้ โดย  $\mathbf{H}$  สามารถพิจารณาโดยใช้ช่องสัญญาณแบบกำหนดขึ้นเอง

(Deterministic channel) โดยเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเกิดภายใต้กฎเกณฑ์ที่แน่นอนและได้มีการกำหนดเวลาที่แน่นอนโดยช่องสัญญาณที่พิจารณาการเชื่อมต่อรวมจะแทนด้วย  $\mathbf{H}_{mc}$  โดย

$$\mathbf{H}_{mc} = \mathbf{Z}_L (\mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{RR})^{-1} \mathbf{H} \mathbf{Z}_{TT}^{-1} \quad (2.33)$$

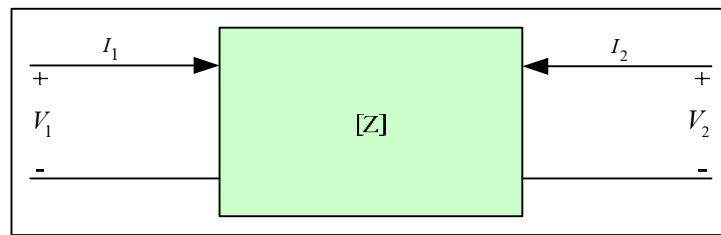
$$\mathbf{Z}_{RR}, \mathbf{Z}_{TT} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \dots \\ Z_{12} & Z_{22} & Z_{23} & \dots \\ Z_{13} & Z_{23} & Z_{33} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \ddots \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

โดย  $Z_{ii}$  คืออิมพีแดนซ์ตัวเอง ขององค์ประกอบ  $i$  และ  $Z_{ij}$  คืออิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างองค์ประกอบ  $i$  และองค์ประกอบ  $j$  ในวิทยานิพนธ์นี้สมมติให้  $Z_{ij}$  มีค่าเท่ากับ  $Z_{ji}$  เป็นไปตามทฤษฎีบทภาวะย้อนกลับ (Reciprocity theorem) ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไปโดยเมตริกซ์การแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Matching-impedance matrix) ซึ่ง  $\mathbf{Z}_L$  จะมีค่าเท่ากับสมการ 2.35

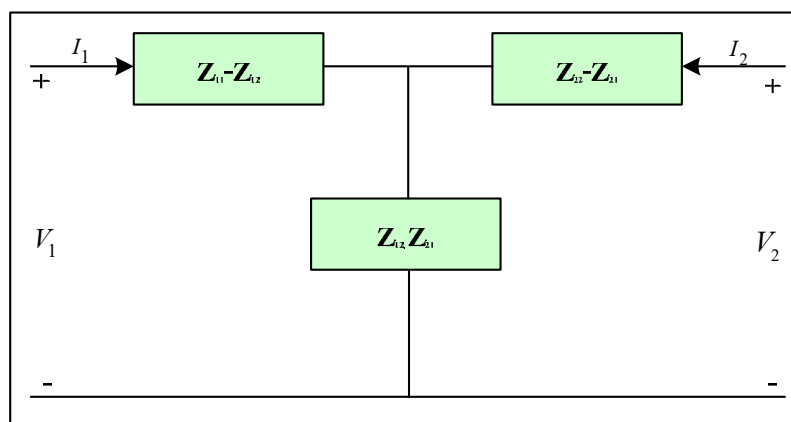
$$\mathbf{Z}_L = \begin{pmatrix} Z_{L1} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & Z_{L2} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & Z_{L3} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \ddots \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

## 2.7 อิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างสายอากาศไดโพล

ในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมต่อรวมระหว่างสายอากาศ การเชื่อมต่อรวมระหว่างสายอากาศจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีองค์ประกอบข้างเคียงจึงทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์ร่วม (mutual impedance) เกิดขึ้นด้วยทำให้อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเป็นอิมพีแดนซ์จุดขับ (driving-point impedance) ซึ่งประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ตัวเอง (self impedance) และอิมพีแดนซ์ร่วมในการวิเคราะห์จะสมมติว่ามี 2 องค์ประกอบแสดงด้วยเครือข่าย 2 ทางเข้าออก



รูปที่ 2.6 แสดงเครือข่าย 2 พอร์ต



รูปที่ 2.7 แสดง เครือข่าย 3 พอร์ต

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2$$

(2.36)

เมื่อ

$$Z_{11} \left| \begin{array}{l} = \frac{V_1}{I_1} \\ I_2 = 0 \end{array} \right. = \text{อินพุตด้านเข้าที่ทางเข้า 1 เมื่อทางเข้า 2 เปิดวงจร}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{12} & \left| \begin{array}{l} = \frac{V_1}{I_2} \\ I_1 = 0 \end{array} \right. = \text{อิมพีแดนซ์ร่วมที่ทางเข้า 1 ที่เกิดจากกระแสที่} \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{ทางเข้า 1 เมื่อทางเข้า 1 เปิดวงจร} \\
 Z_{21} & \left| \begin{array}{l} = \frac{V_2}{I_1} \\ I_2 = 0 \end{array} \right. = \text{อิมพีแดนซ์ร่วมที่ทางเข้า 2 ที่เกิดจากกระแส} \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{ที่ทางเข้า 1 เมื่อ ทางเข้า 2 เปิดวงจร} \\
 Z_{22} & \left| \begin{array}{l} = \frac{V_2}{I_2} \\ I_1 = 0 \end{array} \right. = \text{อินพุตด้านเข้าที่ทางเข้า 2 เมื่อทางเข้า 1 เปิดวงจร}
 \end{aligned} \tag{2.37}$$

สำหรับวงจรข่ายภาวะย้อนกลับ (Reciprocal network)  $Z_{12} = Z_{21}$  เมื่อมีองค์ประกอบอื่นจะทำให้อิมพีแดนซ์ด้านเข้าเปลี่ยนไป ซึ่งจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้คือ

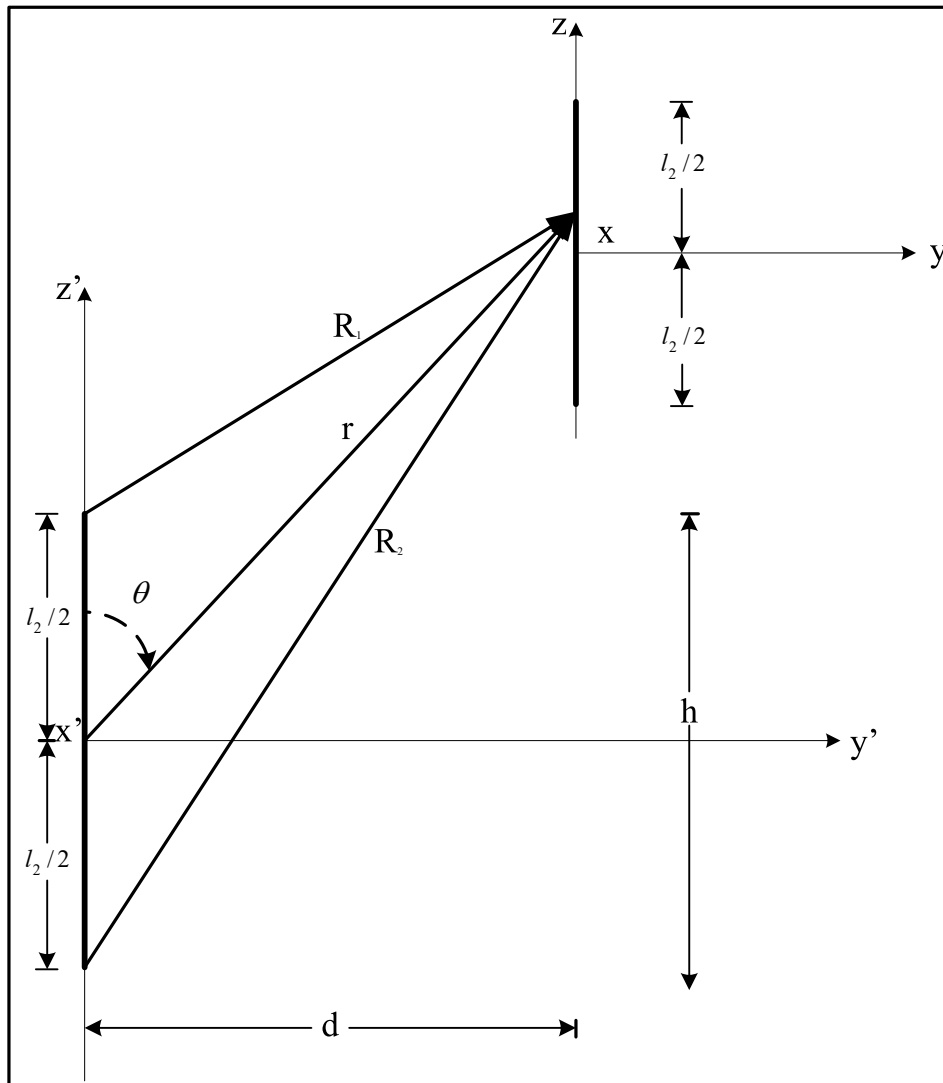
1. ชนิดของสายอากาศ
2. ตำแหน่งการจัดวางของสายอากาศแต่ละตัว
3. ลักษณะการป้อนกระแสให้แก่สายอากาศแต่ละตัว

เราสามารถเขียนสมการ 2.37 ได้อีกรูปหนึ่งคือ

$$\begin{aligned}
 Z_{1d} &= \frac{V_1}{I_1} = Z_{11} + Z_{12} \left( \frac{I_2}{I_1} \right) \\
 Z_{2d} &= \frac{V_2}{I_2} = Z_{22} + Z_{21} \left( \frac{I_1}{I_2} \right)
 \end{aligned} \tag{2.38}$$

เมื่อ  $Z_{1d}$  และ  $Z_{2d}$  เป็น อิมพีแดนซ์จุดจับของสายอากาศ 1 และสายอากาศ 2 ตามลำดับจะเห็นว่าอิมพีแดนซ์จุดจับของสายอากาศของสายอากาศแต่ละตัวจะมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ

กระแส  $\frac{I_1}{I_2}$  อิมพีแดนซ์ร่วมและอิมพีแดนซ์ตัวเองของสายอากาศนั้น ๆ เมื่อกระจายในการส่งผ่าน  
 อากาศว่าง (free space))



รูปที่ 2.8 แสดงรูปสายอากาศไดโพลที่ใช้คำนวณปรากฏการณ์เชื่อมต่อกัน

$$V_{21} = \frac{-1}{I_{2i}} \int_{-l_2/2}^{l_2/2} E_{z21}(z') I_2(z') dz' \quad (2.39)$$

เมื่อ  $E_{z21}$  เป็นส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายของสายอากาศ 1 ซึ่งมีทิศทางขนานกับสายอากาศ 2 โดยคิดเมื่อไม่มีสายอากาศ 2  $I_2(z')$  โดย

$$E_z = \frac{-j\eta I}{4\pi} \left[ \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} + \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} - 2 \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \frac{e^{-jkr}}{r} \right] \quad (2.40)$$

ซึ่งจะเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_{21} = \frac{-j\eta I_{1m} I_{2m}}{4\pi I_{2i}} \int_{-l/2}^{l/2} \sin\left[k\left(\frac{l}{2} - |z|\right)\right] \left[ \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} + \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} - 2 \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \frac{e^{-jkr}}{r} \right] dz \quad (2.41)$$

และอิมพีแดนซ์ร่วมเมื่อคิดกระแสอินพุท  $I_{1i}$  ของสายอากาศ 1 จะเป็นดังนี้

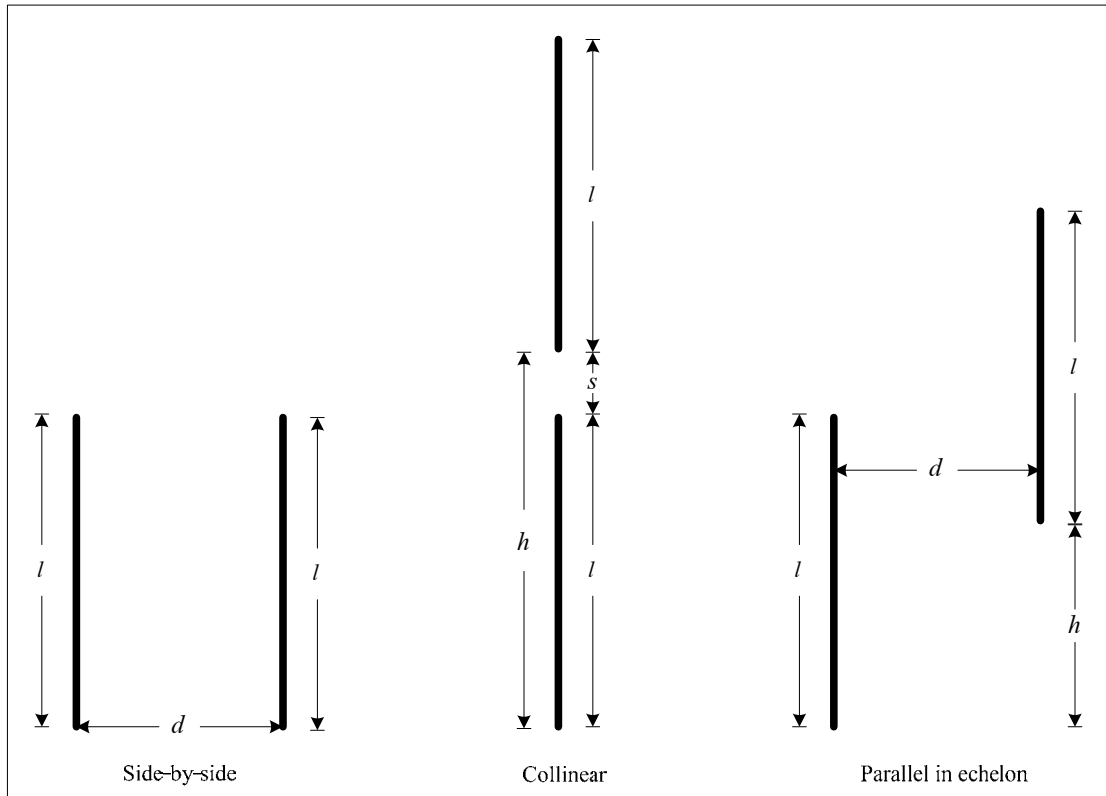
$$Z_{21i} = \frac{V_{21}}{I_{1i}} = \frac{-j\eta I_{1m} I_{2m}}{4\pi I_{2i}} \int_{-l/2}^{l/2} \sin\left[k\left(\frac{l}{2} - |z|\right)\right] \times \left[ \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} + \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} - 2 \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \frac{e^{-jkr}}{r} \right] dz \quad (2.42)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} R_1 &= \sqrt{x^2 + y^2 + (z - l/2)^2} = \sqrt{y^2 + (z - l/2)^2} \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{y^2 + z^2} \\ R_2 &= \sqrt{x^2 + y^2 + (z + l/2)^2} = \sqrt{y^2 + (z + l/2)^2} \end{aligned} \quad (2.43)$$



แต่ถ้า  $r = d$  และ  $l = l_1, l_{1m}, l_{2m}$  และ  $l_{1i}, l_{2i}$  จะแทนกระแสสูงสุดและกระแสที่ชั่ว  
อินพุทของสายอากาศ 1 และ สายอากาศ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.9 แสดงการจัดวางสายอากาศไดโพลที่เหมือนกันสองตัวเพื่อคำนวณอิมพีแดนซ์ร่วม

ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมที่คำนวณได้จากสมการ 2.42 เป็นค่าที่จากกระแสที่ชั่วขาเข้าของสายอากาศนั้น และจะถ่ายโอนไปยังค่าที่กระแสมีค่าสูงสุดได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$Z_{21m} = Z_{21i} \frac{I_{1i} I_{2i}}{I_{1m} I_{2m}} \quad (2.43)$$

หรือ

$$Z_{2im} = \frac{-j\eta}{4\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \sin \left[ k \left( \frac{l_2}{2} - |z| \right) \right] \left[ \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} + \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} - 2 \cos \left( \frac{kl}{2} \right) \frac{e^{-jkr}}{r} \right] dz$$

ในกรณีที่สายอากาศเหมือนกัน (แต่ละตัวยาว  $l = \frac{n\lambda}{2}$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ ) จะมีรูปแบบที่ง่าย  
ดังแสดงต่อไปนี้

การจัดวางสายอากาศในระนาบข้างถึงข้าง (side by side configuration)

$$\text{Re}_{21m} = \frac{\eta}{4\pi} [2C_i(u_0) - Ci(u_1) - Ci(u_2)],$$

$$\text{Im}_{21m} = -\frac{\eta}{4\pi} [2S_i(u_0) - Si(u_1) - Si(u_2)],$$

$$u_0 = kd_{ij},$$

$$u_1 = k(\sqrt{d_{ij}^2 + l^2} + l),$$

$$u_2 = k(\sqrt{d_{ij}^2 + l^2} - l), \quad (2.44)$$

การจัดวางสายอากาศในระนาบร่วมแนว (Collinear configuration)

$$\text{Re}_{21m} = -\frac{\eta}{8\pi} \cos(v_0) [-2C_i(2v_0) + C_i(v_2) + Ci(v_1) - \ln(v_3)]$$

$$+ \frac{\eta}{8\pi} \sin(v_0) [2S_i(2v_0) - S_i(v_2) - Si(v_1)]$$

$$\text{Im}_{21m} = -\frac{\eta}{8\pi} \cos(v_0) [2S_i(2v_0) - S_i(v_2) - S_i(v_1)]$$

$$+ \frac{\eta}{8\pi} \sin(v_0) [2C_i(2v_0) - C_i(v_2) - Ci(v_1) - \ln(v_3)]$$

$$w_2 = k(\sqrt{d^2 + h^2} - h)$$

$$v_1 = 2k(h + l)$$

$$v_2 = 2k(h - l)$$

$$v_3 = (h^2 - l^2) / h^2 \quad (2.45)$$

การจัดวางสายอากาศแบบขนาน (Parallel in echelon configuration)

$$\text{Re}_{21m} = -\frac{\eta}{8\pi} \cos(w_0) [-2C_i(w_1) - 2C_i(w_{1'}) + C_i(w_2) + C_i(w_{2'}) + C_i(w_3) + C_i(w_{3'})]$$

$$-\frac{\eta}{8\pi} \cos(w_0) [2S_i(w_1) + 2S_i(w_{1'}) - S_i(w_2) - S_i(w_{2'}) - S_i(w_3) - S_i(w_{3'})]$$

$$\text{Im}_{21m} = -\frac{\eta}{8\pi} \cos(w_0) [2S_i(w_1) + 2S_i(w_{1'}) - S_i(w_2) - S_i(w_{2'}) - S_i(w_3) - S_i(w_{3'})]$$

$$+\frac{\eta}{8\pi} \sin(w_0) [2C_i(w_1) - 2C_i(w_{1'}) - C_i(w_2) + C_i(w_{2'}) - C_i(w_3) + C_i(w_{3'})]$$

$$w_0 = kh$$

$$w_1 = k(\sqrt{d^2 + h^2} + h)$$

$$w_{1'} = k(\sqrt{d^2 + h^2} - h)$$

$$w_2 = k[\sqrt{d^2 + (h-l)^2} + (h-l)]$$

$$w_{2'} = k[\sqrt{d^2 + (h-l)^2} - (h-l)]$$

$$w_3 = k[\sqrt{d^2 + (h+l)^2} + (h+l)]$$

$$w_{3'} = k[\sqrt{d^2 + (h+l)^2} - (h+l)] \tag{2.46}$$

ในงานพิจารณานี้ จะพิจารณาการจัดวางสายอากาศในแนวระนาบข้างถึงข้าง (side by side) ดังนั้น  $Z_{ij}$  จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(Z_{ij}) &= \frac{\eta}{4\pi} [2C_i(u_0) - Ci(u_1) - Ci(u_2)], \\ \operatorname{Im}(Z_{ij}) &= -\frac{\eta}{4\pi} [2S_i(u_0) - Si(u_1) - Si(u_2)], \\ u_0 &= kd_{ij}, \\ u_1 &= k(\sqrt{d_{ij}^2 + l^2} + l), \\ u_2 &= k(\sqrt{d_{ij}^2 + l^2} - l), \end{aligned} \quad (2.47)$$

เมื่อ  $\operatorname{Re}(Z_{ij})$  คือ ค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ในตำแหน่ง  $ij$

$\operatorname{Im}(Z_{ij})$  คือ ค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ในตำแหน่ง  $ij$

$\eta$  คือ ค่าสูญเสียของอิมพีแดนซ์ในอากาศว่าง

$d_{ij}$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศในตำแหน่ง  $ij$

$l$  คือ ความยาวสายอากาศ

$k$  คือ หมายเลขคลื่น

$C_i(u)$  และ  $S_i(u)$  คือการหาปริพันธ์ของไซน์และโคไซน์ตามที่ได้แสดงในสมการ

ต่อไปนี้

$$C_i(u) = \int_{\infty}^u \frac{\cos(x)}{x} dx; \quad (2.48)$$

$$S_i(u) = \int_0^u \frac{\sin(x)}{x} dx; \quad (2.49)$$

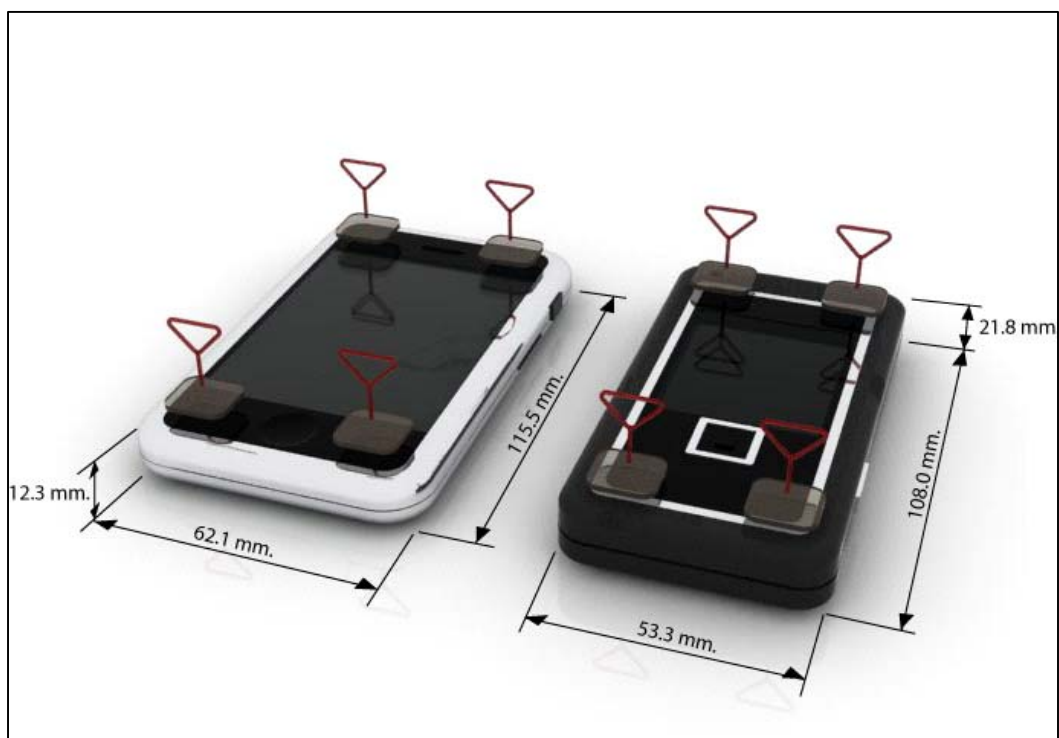
## 2.8 สรุป

สำหรับเนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายถึงความเป็นมาของระบบไมโมที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ และอธิบายถึงระบบไมโมพื้นฐานและอธิบายถึงแบบจำลองช่องสัญญาณที่ใช้ในวิจัยได้แก่ แบบจำลองช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกันและแบบจำลองช่องสัญญาณ “Two-Ring” และได้กล่าวถึงสมการคำนวณหาค่าความจุของช่องสัญญาณระบบไมโมและอธิบายถึงเทคนิค N-port โดยนำมาพิจารณาปรากฏการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์ ในส่วนสุดท้ายอธิบายถึงอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

### บทที่ 3

#### การหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดบนโทรศัพท์เคลื่อนที่

กล่าวนำ ปัญหาของการจัดวางสายอากาศให้เหมาะสมบนโทรศัพท์เคลื่อนที่คืออุปกรณ์โทรศัพท์ที่มีขนาดที่แตกต่างกันและมีรูปร่างที่ต่างกันจึงทำให้ตำแหน่งของการจัดวางสายอากาศไม่มีรูปแบบที่ตายตัว โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีจินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) มาเพื่อประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งเพื่อจะใช้ในการหาตำแหน่งการจัดวางสายอากาศในตำแหน่งที่เหมาะสมไม่ว่ารูปแบบของโทรศัพท์เคลื่อนที่จะมีรูปร่างและขนาดเท่าใด



รูปที่ 3.1 แสดงการจัดวางสายอากาศบนโทรศัพท์เคลื่อนที่

### 3.1 จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm)

จินเนติกอัลกอริทึมเป็นเทคนิคการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ์จินเนติกอัลกอริทึมเป็นการคำนวณอย่างหนึ่งที่ถูกกล่าวได้ว่ามีวิวัฒนาการ อยู่ในขั้นตอนของการค้นหาคำตอบและได้รับการจัดให้เป็นวิธีหนึ่งในกลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ ซึ่งที่ยอมรับและมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในทางด้านปัญหาประคิษฐ์

จินเนติกอัลกอริทึมถูกพัฒนาขึ้นในช่วงทศวรรษที่ 60 โดยจำลองเอาแนวคิดของการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตในระบบชีววิทยามาใช้ในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ จินเนติกอัลกอริทึมได้รับความนิยมโดยการเผยแพร่ของ John Holland ในหนังสือชื่อ *Adaptation in Natural and Artificial Systems* ซึ่งตีพิมพ์เป็นครั้งแรกปี ค.ศ. 1975 หลังจากนั้นจึงมีการนำเอาจินเนติกอัลกอริทึมไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆกันอย่างแพร่หลายพร้อมๆกับการศึกษาและพัฒนาองค์ประกอบต่าง ๆ ของจินเนติกอัลกอริทึมให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น จินเนติกอัลกอริทึมถือว่าเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเชิงสมผสาน (combinatorial optimization method) แบบปัญหาประคิษฐ์ที่มีความสามารถในการค้นหาคำตอบอย่างชาญฉลาดและลดความยุ่งยากในขั้นตอนต่าง ๆ ของการค้นหาลงไป ซึ่งวิธีแบบปัญหาประคิษฐ์นี้มีข้อได้เปรียบและความแตกต่างไปจากวิธีดั้งเดิมเช่น การคำนวณเชิงตัวเลข การโปรแกรมเชิงเส้น ปัจจุบันจึงได้เห็นว่ามีมีการนำเอาจินเนติกอัลกอริทึมไปใช้เกือบทุกสาขาวิชา เช่น การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล Man, K. F., Tang, K. S., Kwong, S., and Halang, W. A. (1997) ระบบควบคุม Visioli, A. (2001) การสื่อสารและโทรคมนาคม Bajwa, A., Williams, T., and Stuchly, M. A. (2001) อิเล็กทรอนิกส์ ไฟฟ้ากำลัง คอมพิวเตอร์ การแพทย์ การขนส่ง และอื่น ๆ อีกมากมาย จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพและสมรรถนะของจินเนติกอัลกอริทึมได้เป็นที่ยอมรับและมีการนำไปประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย

จินเนติกอัลกอริทึมเป็นขั้นตอนในการค้นหาคำตอบให้กับระบบ เราสามารถมองเป็นเครื่องมือในการช่วยคำนวณอย่างหนึ่ง โดยธรรมชาติแล้วประกอบไปด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญได้แก่ การคัดเลือกสายพันธุ์ (selection) คือขั้นตอนในการคัดเลือกประชากรที่ดีไปเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ การปฏิบัติทางสายพันธุ์ (genetic operation) คือกรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมด้วยวิธีการทางสายพันธุ์เป็นขั้นตอนการสร้างลูกหลานซึ่งได้จากการรวมพันธุ์ของต้นกำเนิดสายพันธุ์เพื่อให้เพื่อให้ได้ลูกหลานที่มีส่วนผสมได้จากการผสมมาจากพ่อแม่หรือได้จากการแปรผันยีนของพ่อแม่เพื่อให้ได้ลูกหลานสายพันธุ์ใหม่เกิดขึ้น การแทนที่ (replacement) เป็นขั้นตอนการนำเอาลูกหลานกำเนิดใหม่ไปแทนที่ประชากรเก่าในรุ่นก่อน เป็นขบวนการในการคัดเลือกที่ควรเอาลูกหลานในกลุ่มใดไปแทนประชากรเก่าในกลุ่มใด จินเนติกอัลกอริทึมมีการจำลอง

วิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตในระบบธรรมชาติกล่าวคือ กระบวนการภายในของจีโนมดิพลอยด์ทำให้คำตอบของระบบที่มีอยู่เกิดวิวัฒนาการในตัวเอง อันจะนำไปสู่การปรับตัวให้กลายเป็นคำตอบที่ดีกว่าและดีที่สุดได้ รายละเอียดขององค์ประกอบในวัฏจักรจีโนมดิพลอยด์ที่มีดังนี้

1) ประชากร (population) ประกอบไปด้วยกลุ่มของโครโมโซม (chromosome) ซึ่งเป็นตัวแทนคำตอบในระบบที่ต้องการค้นหา

2) ต้นกำเนิดสายพันธุ์ (parents) กลุ่มประชากรที่ถูกคัดเลือกเพื่อเป็นตัวแทนในการให้กำเนิดสายพันธุ์ใหม่ในรุ่นถัดไป (next generation) ประชากรกลุ่มนี้จะเปรียบเสมือนกันเป็นพ่อแม่สำหรับใช้ในการสืบทอดสายพันธุ์ให้ลูกหลานต่อไป

3) สายพันธุ์ใหม่ (offspring) หรือลูกหลาน เป็นประชากรกลุ่มใหม่ที่ได้รับการถ่ายทอดสายพันธุ์มาจากพ่อแม่ โดยคาดหวังที่จะได้รับสายพันธุ์ที่ดีที่สุดเพื่อถ่ายทอดต่อ ๆ กันในประชากรรุ่นถัดไป

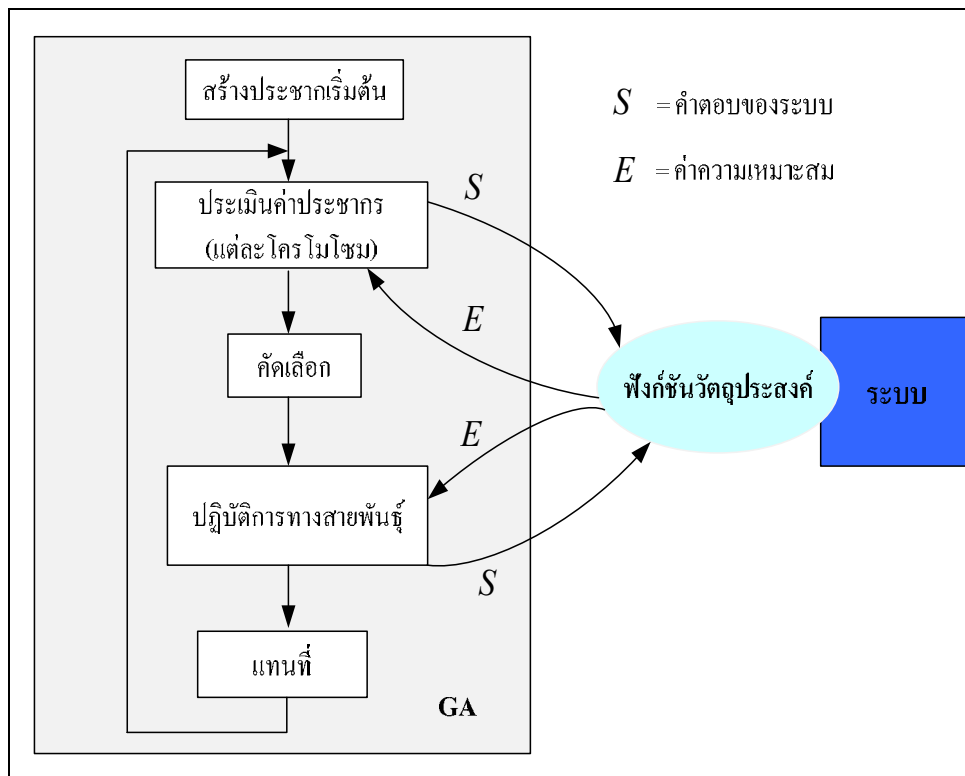
### 3.1.1 ขั้นตอนการทำงานของจีโนมดิพลอยด์

สำหรับแผนภาพในรูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนทั่วไปของจีโนมดิพลอยด์และการเชื่อมโยงเข้ากับระบบในโลกจริงเพื่อทำการค้นหาคำตอบของโครโมโซมในกลุ่มของประชากรซึ่งคำตอบที่ต้องการจะเป็นโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่ม ดังนั้นระบบจะสามารถรู้ได้ว่าคำตอบที่มีอยู่ในจีโนมดิพลอยด์ ณ เวลานั้น ๆ นั้นดีหรือไม่ดีอย่างไรด้วยการประเมินค่าของโครโมโซมผ่านฟังก์ชันวัตถุประสงค์ สำหรับขั้นตอนทั่วไปของจีโนมดิพลอยด์มีดังนี้

- 1) สร้างประชากร โดยปกติจะใช้การสุ่ม
- 2) ประเมินค่าโครโมโซมของกลุ่มประชากรทั้งหมดด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เนื่องจากระบบไม่สามารถเข้าใจค่าของโครโมโซมภายใน ดังนั้นโครโมโซมจะต้องผ่านการถอดรหัสก่อนที่จะทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
- 3) คำนวณหาค่าความเหมาะสมแล้วส่งกลับไปยังจีโนมดิพลอยด์
- 4) ใช้ค่าความเหมาะสมทำการคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่ม เพื่อนำโครโมโซมมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ เพื่อเป็นตัวแทนในการถ่ายทอดสายพันธุ์ให้รุ่นถัดไป
- 5) นำต้นกำเนิดสายพันธุ์มาทำการสร้างลูกหลานด้วยปฏิบัติการทางสายพันธุ์โครโมโซมที่ได้ในขั้นตอนนี้ก็คือ โครโมโซมลูกหลาน
- 6) คำนวณค่าความเหมาะสมของโครโมโซมลูกหลานใช้ขั้นตอนเดียวกับข้อ 3
- 7) โครโมโซมในประชากรเดิมจะถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมลูกหลานที่ได้จากข้อ 5 ประชากรเพียงบางส่วนเท่านั้นที่จะถูกแทนที่ด้วยกลวิธีเฉพาะสำหรับขั้นตอนของการแทนที่โดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสินใจ



8) เริ่มต้นทำซ้ำจากขั้นตอนในข้อ 2 เรื่อย ๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ต้องการ คำตอบที่ได้จะมาจากโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มประชากร โดยที่สามารถใช้ค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการประเมินว่าคำตอบที่ได้เป็นที่ต้องการหรือไม่



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนทั่วไปของจินเนติกอัลกอริทึม

### 3.1.2 โครโมโซมประชากรและการเข้ารหัส (Population and encoding scheme)

การเข้ารหัสประชากรเป็นขั้นตอนแรกและเป็นขั้นตอนสำคัญของเทคนิคนี้เพราะเป็นการออกแบบให้โครโมโซมเป็นตัวแทนของคำตอบจากระบบ ในจินเนติกอัลกอริทึมทั่วไปจะให้โครโมโซมอยู่ในรูปของตัวแปรแบบสตริง (string variables)

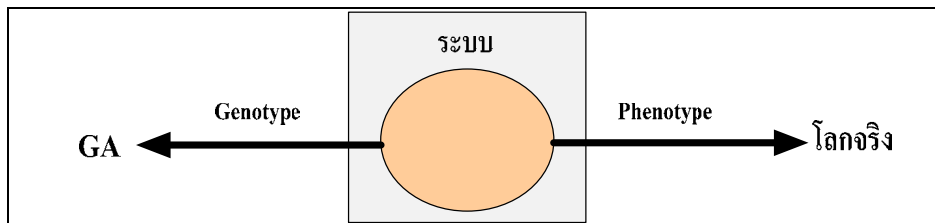
$$S = (s_1, s_2, \dots, s_L) \quad (3.1)$$

โดยที่  $s$  คือโครโมโซมหนึ่ง ๆ และแต่ละ  $s_i, i = 1, 2, \dots, L$  คือแต่ละตัวแปรในชุดคำตอบของระบบ

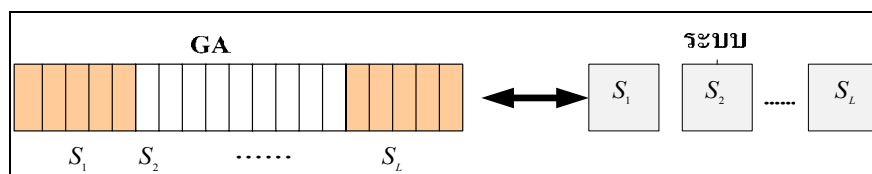
เมื่อพิจารณาโครโมโซมหนึ่ง ๆ เราสามารถมองได้ว่าเป็นการนำเอาคำตอบทั้งชุดของระบบวางเรียงต่อกันเป็นสาย จินเนติกอัลกอริทึมจะมองโครโมโซมเป็นหนึ่งคำตอบประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่เรียกว่ายีน (gene) ซึ่งในทางชีววิทยาถือว่าเป็นส่วนที่เก็บคุณลักษณะสำคัญของสิ่งมีชีวิตเอาไว้เช่น สีของตาหรือผม เป็นต้น ดังนั้นโครโมโซมจินเนติกอัลกอริทึมจึงเป็นที่เก็บคุณลักษณะของคำตอบของระบบเอาไว้เพื่อใช้ในการสืบทอดสายพันธุ์ให้ประชากรรุ่นถัดไป ขบวนการภายในของจินเนติกอัลกอริทึมจะมองคำตอบของระบบอยู่ในรูปของโครโมโซมที่เรียกว่า phenotype เช่น ตัวแปรชนิดจำนวนจริงหรือจำนวนเต็มดังแสดงในรูปที่ 3.3 การเข้ารหัสจึงเป็นการจัดวางรูปแบบคำตอบของระบบให้อยู่ในรูปที่จินเนติกอัลกอริทึมสามารถเข้าใจและทำงานด้วยได้ดี ตัวอย่างวิธีการเข้ารหัสวิธีหนึ่งก็คือแบบฐานสอง (binary string) Holland, H. (1975) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โครโมโซมจะได้มาจากการเรียงกันด้วยคำตอบของระบบแบบบิตต่อบิต การเข้ารหัสแบบนี้เป็นวิธีที่ง่ายและเป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไปวิธีหนึ่ง วิธีการเข้ารหัสอื่น ๆ ก็มีเช่นการเข้ารหัสแบบ integer และการเข้ารหัสแบบค่าจริง (real-valued) เป็นต้น ข้อดีของการเข้ารหัสทั้งสองแบบคือ สามารถเข้าใจและตรวจดูค่าได้ทันทีโดยไม่ต้องถอดรหัส วิธีการเข้ารหัสแบบค่าจริงเป็นอีกวิธีที่มีข้อดีเหนือกว่าวิธีอื่น ๆ ในแง่ของการคำนวณเชิงตัวเลขอันเนื่องมาจากวิธีดังกล่าว สามารถใช้ตัวแปรแบบจำนวนจริงในการคำนวณโดยตรง จึงไม่มีการสูญเสียความละเอียดของตัวเลขแต่อย่างใดเลย นอกจากนั้นยังสามารถใช้วิธีคำนวณที่หลากหลายกว่าต่อโครโมโซมได้โดยตรงอีกด้วย

วิธีการเข้ารหัสแต่ละวิธีนั้นจะมีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกันซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ เช่น ชนิดของคำตอบหรือวิธีการคำนวณในระบบ โดยปกติแล้วถ้าจินเนติกอัลกอริทึมใช้โครโมโซมที่อยู่รูปของ phenotype การเข้ารหัสเป็นขั้นตอนที่ไม่จำเป็นเนื่องจากโครโมโซมที่เป็น phenotype จะอยู่ในรูปเดียวกันกับคำตอบของระบบซึ่งสามารถเข้าใจได้ทันที ปกติแล้วในจินเนติกอัลกอริทึมจะใช้โครโมโซมหลาย ๆ ชุดแทนคำตอบของระบบคือ  $S_i, i=1,2,\dots,N$  นั่นคือ วัฏจักรหนึ่ง ๆ จะมีประมาณ 30-100 โครโมโซม ในระบบที่เป็นเวลาจริง (real time system) มีการใช้ไมโครจินเนติกอัลกอริทึม (micro-genetic algorithm) ซึ่งมีขนาดของจำนวนประชากรเพียงประมาณ 10 โครโมโซม เพื่อเพิ่มความเร็วในการคำนวณขนาดของประชากรอาจจะกล่าวได้ว่าเป็นสิ่งแรกที่ต้องการกำหนดก่อนแน่นอนว่าคำตอบของระบบควรเป็นคำตอบที่ดีที่สุดจากประชากรที่มีอยู่ ดังนั้นจำนวนของโครโมโซมที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นอยู่กับระบบและการออกแบบจึงไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอนในการระบุจำนวนที่เหมาะสมของโครโมโซมในแต่ละครั้งได้ อย่างไรก็ตามมีหลักแนวคิดที่ว่าจำนวนโครโมโซมที่น้อยเกินไปอาจจะส่งผลทำให้ประชากรที่มีอยู่ทั้งหมดไม่สามารถขยายพันธุ์ครอบคลุมไปถึงคำตอบของระบบได้ตามที่ต้องการ ในขณะที่จำนวน

โครโมโซมที่มากเกินไปก็จะก่อให้เกิดความล่าช้าในการคำนวณและทำให้เกิดความซ้ำซ้อนของโครโมโซมซึ่งอาจจะมีผลให้ไม่สามารถหาคำตอบได้อย่างที่คาดคิด



รูปที่ 3.3 การแก้ปัญหาในระบบจินเนติกอัลกอริทึมและระบบโลกจริง



รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างการเข้ารหัสโครโมโซม

### 3.1.3 การประเมินค่าความเหมาะสม (fitness evaluation)

การประเมินค่าความเหมาะสมเป็นขั้นตอนในการประเมินว่าโครโมโซมหนึ่ง ๆ ดีหรือไม่ดีอย่างไรเทียบกับโครโมโซมอื่น ๆ ที่อยู่ในกลุ่มประชากรนั้น ๆ โดยปกติแล้วการประเมินค่าความเหมาะสมของโครโมโซมจะประกอบไปด้วยการคำนวณค่าของสองฟังก์ชันดังนี้

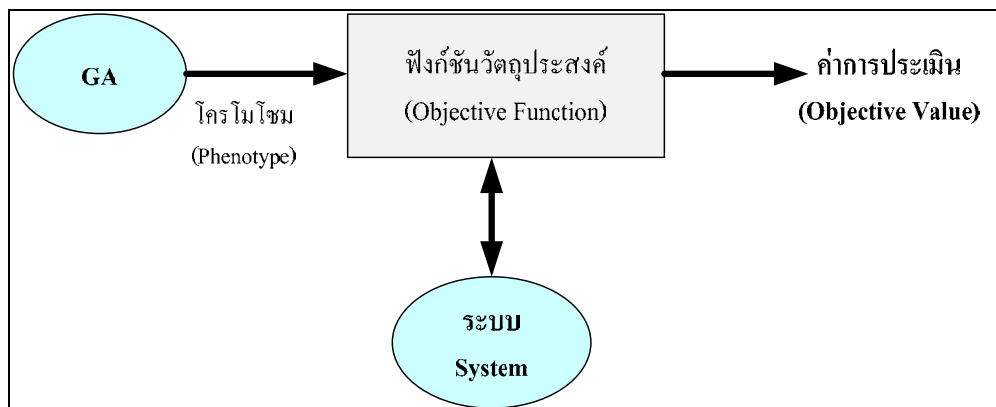
#### 1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกระบวนการสำคัญที่ใช้ในการประเมินผลคำตอบของระบบว่าดีหรือไม่ดีแค่ไหน ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันที่ทำการประเมินคำตอบจากโครโมโซม โดยเทียบเป้าหมายของระบบ ในกรณีที่ระบบเป็นปัญหาของการค้นหาค่าต่ำสุด (minimization) โครโมโซมที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดของระบบจะมีค่าตัวเลขจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุด ตัวอย่างของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้แก่ ฟังก์ชันทั่ว ๆ ไปที่ใช้คำนวณค่าความผิดพลาดของระบบ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของระบบดังกล่าวก็คือต้องการให้ค่าความผิดพลาดของระบบมีค่าน้อยที่สุด ค่าประเมินที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเป็นตัวบอกว่าคำตอบของระบบขณะนั้นดีหรือไม่เท่าไร ในกรณีนี้สำหรับคำตอบหนึ่ง ๆ แล้ว ค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่าหมายถึงคำตอบนั้น

เป็นคำตอบที่ดีกว่า เนื่องมาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องใช้ตัวระบบเป็นที่คำนวณค่าการประเมิน ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์จึงถือว่าเป็นส่วนสำคัญ โดยเชื่อมโยงจินเนติกอัลกอริทึมเข้ากับระบบในโลกจริงดังแสดงในรูปที่ 3.5 สังเกตว่าโครโมโซมที่นำไปประเมินค่าด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะต้องอยู่ในรูปที่ระบบเข้าใจ (นั่นคืออยู่ในรูป phenotype) ดังนั้นถ้ากำหนดให้โครโมโซม  $S$  ที่เวลา  $t$  ใด ๆ คือ  $S(t)$  เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่าการประเมินของโครโมโซมนี้กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

$$P(S(t)) = P(s_1, s_2, \dots, s_L) \quad (3.2)$$

โดยที่  $s_1, s_2, \dots, s_L$  คือคำตอบของระบบที่ได้ผ่านการถอดรหัสให้อยู่ในรูปของ Phenotype เรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.5 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เชื่อมโยงจินเนติกอัลกอริทึมเข้ากับระบบในโลกจริง

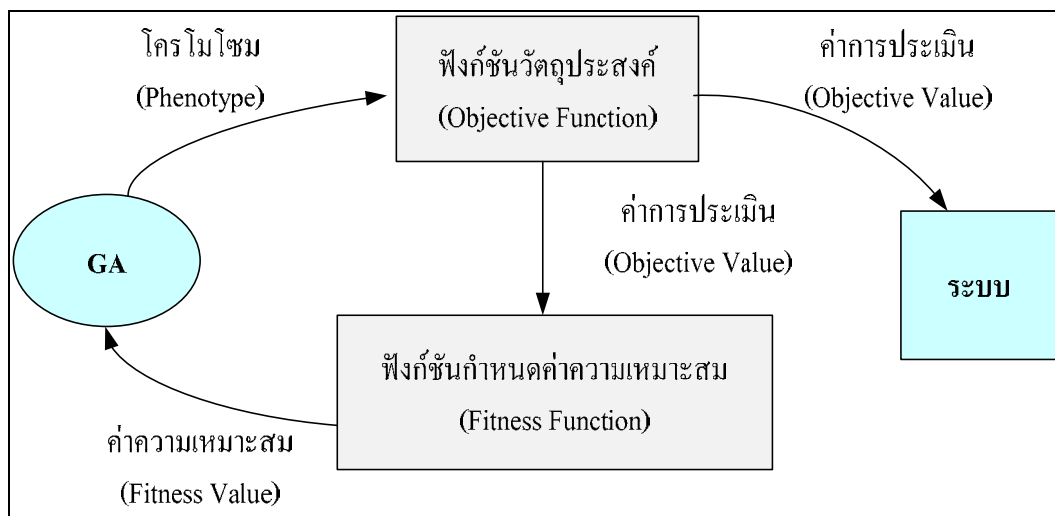
## 2) ฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสม (Fitness function)

เป็นฟังก์ชันที่ทำการจับคู่ค่าการประเมินที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไปเป็นค่าความเหมาะสม จุดประสงค์ของฟังก์ชันนี้เพื่อทำการกำหนดค่าความเหมาะสมให้กับโครโมโซมแต่ละตัวจากค่าเปรียบเทียบกันภายในกลุ่มประชากร ค่าความเหมาะสมนี้จะถูกนำไปใช้ในการสืบพันธุ์ในรุ่นถัดไป สาเหตุที่จินเนติกอัลกอริทึมไม่ใช่ค่าการประเมินในการคัดเลือกโครโมโซมก็เพราะว่าค่าการประเมินที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับระบบ จึงทำให้ตัวเลขที่ได้มีความหลากหลายและแตกต่างกันเกินไป ยกตัวอย่างเช่น ขนาดค่าความผิดพลาดของระบบ

สามารถมีค่าน้อยที่สุดคือศูนย์และมากที่สุดที่จำกัดขนาดและเครื่องหมาย จะเห็นได้ชัดว่าเป็นการไม่สะดวกนักที่จะนำเอาค่าดังกล่าวมาใช้ในการคัดเลือกโครโมโซม เนื่องจากค่านั้นอาจมีความแตกต่างกันเกินไป (โดยเฉพาะในแต่ละรอบของจินเนติกอัลกอริทึมที่มีการประเมินโครโมโซม ค่าความผิดพลาดอาจแตกต่างกันโดยสิ้นเชิงได้) ฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสมจึงเป็นการคำนวณค่าการประเมินของโครโมโซมทั้งหมดเทียบกับโครโมโซมด้วยตัวเองและทำให้มีค่าที่อยู่บนบรรทัดฐานเดียวกันคือ

$$E(F_i) \in [E_{\min}, E_{\max}], i = 1, 2, \dots, N \quad (3.3)$$

โดยที่  $E(F)$  คือฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสมจากค่าการประเมิน  $F_i$  (ของโครโมโซมตัวที่  $i$ )  $E_{\min}$  และ  $E_{\max}$  เป็นค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของค่าความเหมาะสม



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสม

โดยปกติจะมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม ต่างกับค่าการประเมินที่จะสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะของคำตอบที่คำนวณได้ในแต่ละรอบของจินเนติกอัลกอริทึม รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสม ฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสมมีอยู่หลายแบบ เทคนิคที่ง่ายและนิยม

ใช้เช่น วิธีกำหนดอย่างเป็นสัดส่วน (proportional) วิธีกำหนดบรรทัดฐานเชิงเส้น (linear normalization) เป็นต้น รายละเอียดโดยสังเขปของเทคนิคดังกล่าวมีดังนี้

1) เทคนิควิธีกำหนดอย่างเป็นสัดส่วน กำหนดให้ประชากรประกอบไปด้วยโครโมโซมทั้งหมด  $N$  ตัวคือ  $S_i, i=1,2,\dots,N$  และค่าการประเมินของโครโมโซมตัวที่  $i$  คือ  $F_i = P(S)$  จะได้ว่าค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมคือ

$$E(F_i) \in [E_{\min}, E_{\max}], i=1,2,\dots,N \quad (3.5)$$

ค่าความเหมาะสมที่ได้จากวิธีนี้จะถูกทำให้ในในบรรทัดฐานเดียวกัน นั่นคือมีค่าไม่เกิน 1 ใดๆก็ตามวิธีนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับค่าการประเมินที่มีค่าเป็นลบ

2) เทคนิควิธีการกำหนดบรรทัดฐานเชิงเส้น ทำการจัดเรียงโครโมโซมด้วยค่าการประเมินตามลำดับโดยเรียงจากมากไปน้อย ถ้าระบบต้องการหาคำตอบที่มีค่ามากที่สุด ในขณะที่เรียงจากน้อยไปมากจะใช้สำหรับระบบที่ต้องการหาคำตอบที่มีค่าน้อยที่สุด กำหนดให้ตัวชี้ที่แสดงลำดับของการเรียงเป็น  $r$  ให้โครโมโซมที่ดีที่สุดมีค่าความเหมาะสมคือ

$$E_i = E_{best} - (r-1) \times \lambda_d \quad (3.6)$$

โดยที่  $\lambda_d$  คือค่าอัตราการลดลง (decrement rate) ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมที่ได้จะมีค่าไม่เกิน  $E_{best}$  ในขณะที่โครโมโซมที่อยู่ในอันดับแรก ๆ จะมีค่าความเหมาะสมที่ดีกว่าตามสัดส่วนของอัตราการลดลงจะมีค่าแตกต่างกันไปตามลักษณะของค่าการประเมิน วิธีนี้จะเห็นได้ว่าสุดท้ายแล้วค่าการประเมินของระบบจะอยู่ในบรรทัดฐานเดียวกัน โดยมีค่า  $E_{best}$  เป็นหลักค่าการประเมินอื่น ๆ จะถูกจับคู่ไปเป็นค่าความเหมาะสมที่ไม่ขึ้นอยู่กับค่าการประเมิน แต่จะขึ้นอยู่กับลำดับของค่าการประเมินที่บ่งบอกว่าโครโมโซมนั้นดีหรือไม่ดี

### 3.1.4 การคัดเลือกสายพันธุ์

การคัดเลือกสายพันธุ์เป็นขั้นตอนในการเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดจากภายในกลุ่มประชากรทั้งหมดที่ได้จะนำไปใช้เป็นตัวกำเนิดสายพันธุ์เพื่อใช้ในการให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป โดยปกติแล้วเพื่อให้ได้สายพันธุ์ที่ดีต้นกำเนิดของสายพันธุ์จะต้องดีด้วย จึงกลายเป็นปัญหาว่าจะทำการคัดเลือกต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ดีได้อย่างไร การคัดเลือกสายพันธุ์เป็นการจำลองการคัดเลือกโครโมโซมที่จะสามารถอยู่รอดได้ในแต่ละรุ่นสำหรับจินเนติกอัลกอริทึม จะทำการคัดเลือกโครโมโซมโดยการพิจารณาที่ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้น ๆ ดังนั้น โครโมโซม

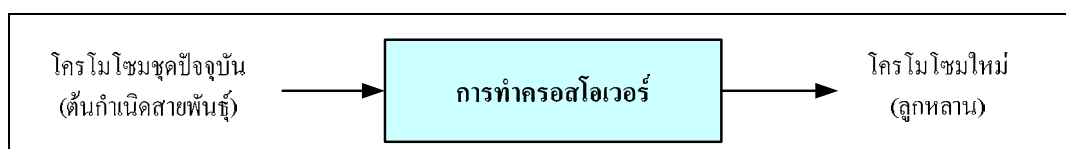
ไหนมีค่าความเหมาะสมที่ดีย่อมหมายความว่า การเป็นโครโมโซมที่ดีและมีโอกาสที่จะให้ลูกหลานในจำนวนที่มากกว่าได้ ซึ่งย่อมเป็นการบ่งบอกว่าโอกาสในการอยู่รอดในรุ่นถัดไปก็จะมีเพิ่มมากขึ้นด้วย

ขั้นตอนในการคัดเลือกสายพันธุ์ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ได้แก่ การกำหนดค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกเพื่อเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ให้กับโครโมโซมและการแปลงค่าโอกาสไปเป็นจำนวนของโครโมโซมลูกหลาน โครโมโซมที่มีโอกาสในการถูกคัดเลือกสูงจะให้จำนวนของโครโมโซมลูกหลานที่สูงด้วย

### 3.1.5 ปฏิบัติการทางสายพันธุ์

หลังจากกระบวนการคัดเลือกได้ดำเนินไปจนเสร็จสมบูรณ์ โครโมโซมลูกหลานจะถูกสร้างจากโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ โดยการนำเอาโครโมโซมที่เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์มาเปลี่ยนแปลงให้เกิดโครโมโซมใหม่ขึ้นมาเรื่อยๆ เป็นโครโมโซมลูกหลาน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เป็นขั้นตอนสำคัญอีกขั้นตอนหนึ่งในวัฏจักรของจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งมีการคาดหวังว่าโครโมโซมลูกหลานที่เกิดขึ้นมานั้นจะได้รับส่วนดีของโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ โดยผ่านปฏิบัติการทางสายพันธุ์นี้ ถ้าพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากปฏิบัติการทางสายพันธุ์ที่เกิดขึ้นกับประชากรซึ่งเป็นคำตอบระบบแล้ว เราสามารถเปรียบเทียบปฏิบัติการทางสายพันธุ์ได้กับการก้าวเดินไปสู่คำตอบของระบบนั่นเอง

โดยปกติทั่วไปปฏิบัติการทางสายพันธุ์ในจินเนติกอัลกอริทึมจะมีอยู่ 2 วิธีหลัก ๆ คือ การทำครอสโอเวอร์ (crossover) และการทำมิวเทชัน (mutation) ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้มีรายละเอียดพอสังเขปต่อไปนี้

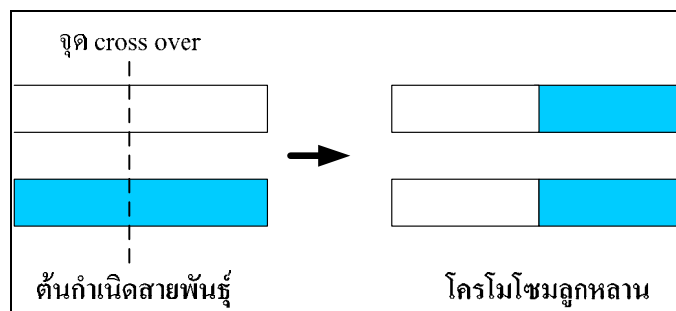


รูปที่ 3.7 ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ของจินเนติกอัลกอริทึม

1) ครอสโอเวอร์เป็นวิธีการรวมตัวใหม่ของโครโมโซม (recombination operator) โดยทำการรวมส่วนย่อยระหว่างโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ตั้งแต่สองโครโมโซมขึ้นไปเพื่อให้กลายเป็นโครโมโซมลูกหลานที่ได้จากการครอสโอเวอร์นี้จะมีพันธุกรรมจากต้นกำเนิดสายพันธุ์อยู่ในตัวโดยปกติทั่วไปแล้วจะมีการกำหนดอัตราการทำครอสโอเวอร์เอาไว้ด้วย ซึ่งส่วน

ใหญ่จะใช้ความน่าจะเป็น ( $P_c$ ) เป็นตัวกำหนดอัตราดังกล่าว วิธีการทำครอสโอเวอร์มีได้หลายแบบดังแสดงรายละเอียดในตัวอย่างต่อไปนี้

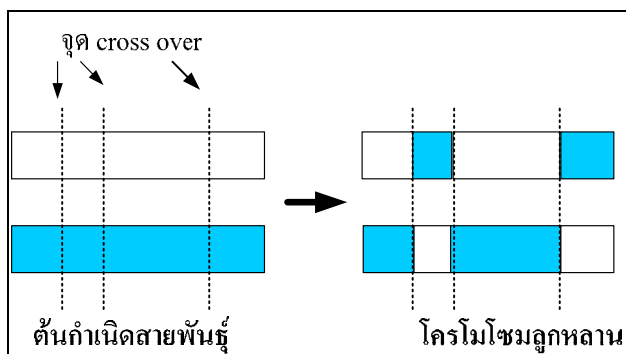
❖ การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว (single point crossover) สำหรับการทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดี่ยวนี้โครโมโซมลูกหลานจะมีสายพันธุ์ของต้นกำเนิดอยู่อย่างละหนึ่งส่วน จุดตัดในการทำครอสโอเวอร์นั้นโดยปกติจะได้มาจากการสุ่มเลือก ตัวอย่างการครอสโอเวอร์จุดเดียวสามารถแสดงอยู่ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว

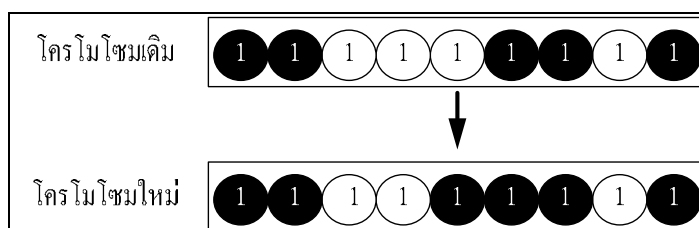
❖ การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด (multiple point crossover) ตัวอย่างการทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุดดังแสดงในรูปที่ 3.9 มีการใช้จุดตัดทั้งหมด 3 ดังนั้นโครโมโซมลูกหลานจะมีสายพันธุ์ของต้นกำเนิดมากกว่าหนึ่งส่วน หลักการเลือกจุดของครอสโอเวอร์นั้นมีอยู่หลายแบบ แต่ละแบบจะให้ผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสายพันธุ์ในโครโมโซมลูกหลานที่แตกต่างออกไปด้วย วิธีที่นิยมใช้ทั่วไปคือการสุ่มเลือกจุดครอสโอเวอร์ การทำครอสโอเวอร์หลายจุดจะให้ผลของลูกหลานที่มีความหลากหลายกว่าการทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว อันจะมีผลให้การคู่เข้าคำตอบของระบบสามารถครอบคลุมพื้นที่ของคำตอบได้มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุดซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมลูกหลานได้มากกว่าการทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดี่ยวนั้น อาจทำให้โอกาสเบี่ยงเบนของคำตอบที่มีอยู่ในโครโมโซมลูกหลานมีอัตราที่สูงกว่าเช่นกัน การทำครอสโอเวอร์ที่นิยมอีกชนิดหนึ่งคือ ครอสโอเวอร์แบบสม่ำเสมอ (uniform crossover) ซึ่งมีข้อดีในการลดปัญหาความไม่สมดุลในการแบ่งจุดครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวของโครโมโซมที่มีขนาดต่าง ๆ กัน





รูปที่ 3.9 การครอสโอเวอร์แบบหลายจุด

2) มิวเทชันเป็นวิธีการแปรผันยีนหรือส่วยย่อยของโครโมโซม ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตในทางชีววิทยานั้นเอง มิวเทชันคือการเปลี่ยนแปลงยีนในโครโมโซมซึ่งในทางปฏิบัติแล้วยีนก็คือบิตในระบบตัวเลขของคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.10 การเปลี่ยนแปลงบนบิตที่ 4 ในโครโมโซม

การทำมิวเทชันเปรียบเสมือนกับการก้าวเดินไปสู่คำตอบของระบบ เช่นเดียวกับการทำครอสโอเวอร์ นอกเหนือไปจากนั้นแล้วมิวเทชันยังสามารถมองเป็นการทำให้เกิดความหลากหลายขึ้นในกลุ่มประชากร มีผลให้คำตอบที่เกิดขึ้นในกระบวนการของจักรอบคลุมพื้นที่การค้นหาคำตอบทั่วถึงยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามในการทำมิวเทชันเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเพราะจะมีผลต่อพฤติกรรมการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม มีผลการค้นคว้ารายงานว่าอัตราการทำมิวเทชันจะขึ้นอยู่กับขนาดของประชากรเพื่อให้การสำรวจพื้นที่ในการค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างทั่วถึง ดังนั้นการกำหนดอัตราการทำมิวเทชันต้องมีความเหมาะสม

ที่สุดต่อระบบด้วยเพื่อก่อให้เกิดผลในการค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้ว การทำมิวเทชันจะมีอัตราการใช้งานค่อนข้างต่ำ

### 3.1.6 การแทนที่ (Replacement)

การแทนที่เป็นขั้นตอนหลังจากที่จินเนติกอัลกอริทึมโครโมโซมลูกหลาน เรียบร้อยแล้วและจะมีการนำโครโมโซมใหม่ไปแทนที่ประชากรรุ่นเก่า จุดประสงค์ในการแทนที่ นั้นค่อนข้างชัดเจน กล่าวคือการนำโครโมโซมลูกหลานมาแทนที่ประชากรรุ่นก่อนจะทำให้ ประชากรรุ่นใหม่ประกอบไปด้วยโครโมโซมใหม่ ๆ ซึ่งเป็นโครโมโซมใหม่ ๆ ซึ่งเป็นโครโมโซม ที่ดีกว่าอันเนื่องมาจากการได้สืบสายพันธุ์ที่ดีจากต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ผ่านการคัดเลือกแล้ว กลยุทธ์ ในการคัดเลือกโครโมโซมไหนจะถูกทดแทนที่นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ

1) การแทนที่ประชากรทั้งรุ่น (Generational GA) เป็นการนำประชากร ลูกหลานไปแทนที่ประชากรเก่าทั้งหมด ดังนั้นถ้าในระบบหนึ่งมีประชากรขนาด  $N$  จำนวนของ โครโมโซมลูกหลานที่จะมาแทนที่จะต้องมีความ  $N$  เช่นกัน วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายเนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนของการคัดเลือกว่าประชากรส่วนไหนจะถูกแทนที่ แต่การที่ไม่มีขั้นตอนดังกล่าว กลายเป็นข้อเสีย นั่นคือ โครโมโซมที่ดี ๆ ในรุ่นก่อนจะถูกแทนที่ไปด้วยวิธีที่ง่าย ๆ คือก่อนที่ จะทำการแทนที่ให้คัดเลือกเก็บโครโมโซมที่ดีที่สุด 2-3 ตัวแรกเอาไว้โดยอาจจะใช้วิธีการคัดเลือก ดังที่อธิบายมาแล้วก่อนหน้านี้ วิธีดังกล่าวอาจเรียกได้ว่าเป็นกลยุทธ์คัดเลือก หัวกระทิ (elitist strategy) อย่างไรก็ตามประชากรที่เหลืออยู่อาจจะถูกรอบงำด้วยโครโมโซม หัวกระทินี้ได้โดยง่าย กล่าวคือถ้าไม่มีโครโมโซมใหม่ที่ดีกว่าเกิดขึ้น โครโมโซมที่ดีที่สุดจากรุ่น ก่อนก็จะถูกเก็บไว้อยู่ตลอดไปและไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ขึ้นอีกต่อไปทำให้จินเนติก อัลกอริทึมไม่สามารถสร้างวิวัฒนาการโครโมโซมใหม่ ๆ ขึ้นมาได้ ถึงแม้ว่าผลของโครโมโซม หัวกระทิจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้ แต่วิธีนี้ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าทำให้ระบบโดยรวมดีขึ้น

2) การแทนที่ประชากรแบบคงตัว (Steady-state GA) เป็นการเอาประชากร ลูกหลานไปแทนที่ประชากรเดิมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจะต้องมีการคัดเลือกประชากรที่จะถูก แทนที่ซึ่งโดยปกติจะพิจารณาจากค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้นเอง โครโมโซมเก่าจะถูก แทนที่ด้วยโครโมโซมใหม่เพียง 1 หรือ 2 ตัวเท่านั้น กลวิธีในการแทนที่มีอยู่หลายวิธีเช่น การ แทนที่ประชากรที่ด้อยที่สุดหรือแทนที่ประชากรโดยการสุ่มเลือก เป็นต้น

### 3.1.7 ข้อดีของจินเนติกอัลกอริทึม

เมื่อพิจารณาถึงความสามารถและโครงสร้างของจินเนติกอัลกอริทึมแล้วสามารถสรุปข้อดีต่าง ๆ ของจินเนติกอัลกอริทึมได้ดังนี้

1) มีโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการประมวลแบบขนาน โดยโครงสร้างของจินเนติกอัลกอริทึมแล้วสามารถถูกออกแบบให้ทำงานในลักษณะของการประมวลผลแบบขนานได้จึงสามารถทำให้ความเร็วในการคำนวณเพิ่มขึ้น จินเนติกอัลกอริทึมสามารถแบ่งการคำนวณเป็นหน่วยย่อย โดยที่แต่ละหน่วยเป็นจินเนติกอัลกอริทึม ที่ทำงานได้สมบูรณ์ในตัวเองและแยกกันทำการค้นหาคำตอบของระบบพร้อม ๆ กันได้ นอกจากนี้แล้วจินเนติกอัลกอริทึมยังสามารถแบ่งตัวเองเป็นหน่วยย่อยที่แต่ละหน่วยแยกทำหน้าที่ตามขั้นตอนของจินเนติกอัลกอริทึมต่าง ๆ ได้ เช่น หน่วยคำนวณค่าความเหมาะสม หน่วยการคัดเลือก หน่วยทำปฏิบัติการทางสายพันธุ์ เป็นต้น

2) มีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือ เป็นที่ยืนยันแล้วว่าเทคนิคหลาย ๆ อย่างที่สามารถใช้ทำให้จินเนติกอัลกอริทึมมีการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ถึงแม้ว่าสถานะแวดล้อมของระบบจะมีการเปลี่ยนแปลง

3) สามารถให้คำตอบที่เหมาะสมในวงกว้าง (global optimum) ปัญหาหลาย ๆ อย่างจะมีคำตอบอยู่หลายชุดซึ่งเป็นคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นที่เหมาะสมที่สุด แต่สำหรับจินเนติกอัลกอริทึมได้รับการพิสูจน์ให้เห็นว่าสามารถเอาชนะปัญหาของระบบดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4) มีความยืดหยุ่นในการออกแบบชนิดของโครโมโซม ยีนของโครโมโซมสามารถถูกออกแบบให้เป็นตัวเลขชนิดใด ๆ ก็ได้ตามความเหมาะสมกับระบบไม่ว่าจะเป็นแบบฐานสองหรือเลขจำนวนจริง จึงทำให้จินเนติกอัลกอริทึมสามารถใช้งานกับระบบต่าง ๆ ได้หลากหลาย

5) เหมาะสำหรับระบบที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดต่าง ๆ ในหลายระบบจะมีการระบุเงื่อนไขของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อจำกัดให้ระบบมีเสถียรภาพและเป็นการจำกัดพื้นที่สำหรับการค้นหาคำตอบด้วยจินเนติกอัลกอริทึมมีโครงสร้างที่สามารถออกแบบให้มีการจำกัดขอบเขตของโครโมโซมได้อย่างสะดวก จึงเหมาะกับการแก้ไขปัญหาค่าที่ต้องมีเงื่อนไขแบบต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี

6) เหมาะสำหรับระบบที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบพหุคูณ จินเนติกอัลกอริทึมสามารถใช้กับระบบที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่าหนึ่งเช่น การออกแบบตัวกรองชนิด IIR ที่ต้องมีการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับทั้งค่าความผิดพลาดขนาด (magnitude error) และค่าความผิดพลาดของเวลา (delay error) ลักษณะดังกล่าวทำให้จินเนติกอัลกอริทึมมีความเหมาะสมในการแก้ปัญหาค่าจริงได้หลากหลายซึ่งส่วนใหญ่จะมีเป้าหมายในการแก้ปัญหามากกว่าหนึ่งอย่าง

7) ใช้แก้ปัญหาของระบบได้โดยที่ไม่จำเป็นจะต้องรู้หรือคำนวณหาผลเฉลยรูปแบบปิด (close form solution) ของระบบ โดยปกติแล้วการคำนวณหาผลเฉลยดังกล่าวจะมีความยุ่งยากและต้องใช้เวลามาก การนำเอาจินเนติกอัลกอริทึมมาประยุกต์ใช้งาน จึงช่วยลดความยุ่งยากในส่วนนี้ได้เป็นอย่างดี

ถึงแม้ว่าจินเนติกอัลกอริทึมจะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดในช่วงกว้าง ตัวจินเนติกอัลกอริทึมเองก็ยังมีจุดอ่อนอยู่เช่นกัน โดยเฉพาะเมื่อนำจินเนติกอัลกอริทึมไปใช้กับระบบที่มีการเชื่อมโยงกับสภาพแวดล้อมที่เป็นโลกจริง เนื่องจากคุณลักษณะของจินเนติกอัลกอริทึมที่มีอยู่หลายขั้นตอนที่การคำนวณเป็นแบบสุ่ม ในบางครั้งจึงไม่ใช่เรื่องง่ายที่จะคาดหวังให้ผลลัพธ์จากจินเนติกอัลกอริทึมนั้นทำงานได้แล้วเสร็จโดยการกำหนดเวลาไว้อย่างแน่นอน ดังนั้นจินเนติกอัลกอริทึมอาจจะไม่เหมาะสมกับระบบที่เป็นแบบเวลาจริงหรือระบบที่มีระยะเวลาในช่วงของการประมวลผลที่ค่อนข้างจำกัด อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ยังถือว่าเป็นเครื่องมือที่มีความชาญฉลาดในแง่ของปัญญาประดิษฐ์และเหมาะสมสำหรับระบบที่มีข้อจำกัดแบบต่าง ๆ หรือระบบที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่าหนึ่ง รวมไปถึงคุณลักษณะสำคัญของจินเนติกอัลกอริทึมที่สามารถเอาชนะปัญหาของการถูกล็อกโดยคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นที่เหมาะสมที่สุด ปัจจุบันจึงนำเอาจินเนติกอัลกอริทึมไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ

วิทยานิพนธ์นี้ได้้นำเอาเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมาประยุกต์ใช้เพื่อหาตำแหน่งในการจัดวางสายอากาศที่เหมาะสมบนพื้นที่จำกัดอ้างอิงขนาดอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งผู้วิจัยได้คุ้นเคยกับการใช้โปรแกรมแมทแลปที่เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ง่ายและมีประสิทธิภาพ เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายด้วย โดยมีผู้พัฒนา GA Toolbox ขึ้นมาเพื่อใช้กับโปรแกรมแมทแลปได้ ดังนั้นจึงเป็นง่ายที่ผู้วิจัยจะนำอัลกอริทึมนี้ไปใช้ในการหาตำแหน่งของการจัดวางตัวของสายอากาศที่ดีที่สุดบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบบโมโมสำหรับการประยุกต์เข้ากับปัญหาในระบบที่ได้สนใจต่อไป

### 3.2 การประยุกต์ใช้ GA ในการหาตำแหน่งของระบบโมโม

การหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยจากกระบวนการและหลักการนี้จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งในการจัดวางตัวของสายอากาศที่เหมาะสมบนพื้นที่โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยพิจารณาผลกระทบจากปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วมที่กระทำระหว่างสายอากาศแล้วลำดับในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการพิจารณาช่องสัญญาณ โดยใช้ช่องสัญญาณแบบจำลองแบบกำหนดขึ้นอย่างแน่นอน (Deterministic model) โดยพิจารณา 2 ระบบช่องสัญญาณ คือ

1. ช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกันโดยพิจารณาช่องสัญญาณการจางหายแบบเลขีติ โดยพิจารณาจากสมการที่ 2.33 ซึ่งค่าช่องสัญญาณที่พิจารณาการเชื่อมต่อร่วมจะมีค่าเท่ากับสมการที่ 3.7

$$\mathbf{H}_{mc} = \mathbf{Z}_L (\mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{RR})^{-1} \mathbf{H} \mathbf{Z}_{TT}^{-1} \quad (3.7)$$

โดยที่ช่องสัญญาณที่มีการกระจายตัวแบบอิสระที่เหมือนกัน (identically independent distributed ; iid) จะมีค่าเท่ากับสมการที่ 2.2

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1M_T} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2M_T} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{M_R1} & h_{M_R2} & \cdots & h_{M_R M_T} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

โดยในวิทยานิพนธ์จะพิจารณาช่องสัญญาณ  $\mathbf{H}$  มีการกระจายตัวแบบอิสระที่เหมือนกัน (identically independent distributed: iid) ด้วยกระบวนการ Complex Gaussian ที่มีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และมีค่าความแปรปรวนของส่วนจริงเท่ากับส่วนจินตภาพที่ 0.5

2. แบบช่องสัญญาณแบบ “Two-Ring”

โดยพิจารณามุมที่กระทำระหว่างภาครับและภาคส่งจะมีค่าเท่ากับสมการ 2.13

$$\mathbf{H}^a = \mathbf{U}_r^H \mathbf{H} \mathbf{U}_t \quad (3.9)$$

ดังนั้น ค่าช่องสัญญาณที่พิจารณาปรากฏการเชื่อมต่อร่วมจะมีค่าเท่ากับ

$$\mathbf{H}_{mc} = \mathbf{Z}_L (\mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{RR})^{-1} \mathbf{H}^a \mathbf{Z}_{TT}^{-1} \quad (3.10)$$

ดังนั้นค่าความจุช่องสัญญาณในทั้ง 2 กรณีจะมีค่าเท่ากับ

$$C = \log_2 \det \left[ \mathbf{I}_{M_r} + \frac{P_t}{P_n M_t} \mathbf{H}_{mc} \mathbf{H}_{mc}^H \right] \quad (3.11)$$

ซึ่งจะนำไปคำนวณหาตำแหน่งของการจัดวางสายอากาศบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ในโปรแกรม จินเนติกอัลกอริทึมสมการความฟิตของความจุช่องสัญญาณ โดยพิจารณาจากตำแหน่งการจัดวาง สายอากาศที่ทำให้ระบบมีค่าความจุของช่องสัญญาณสูงสุด

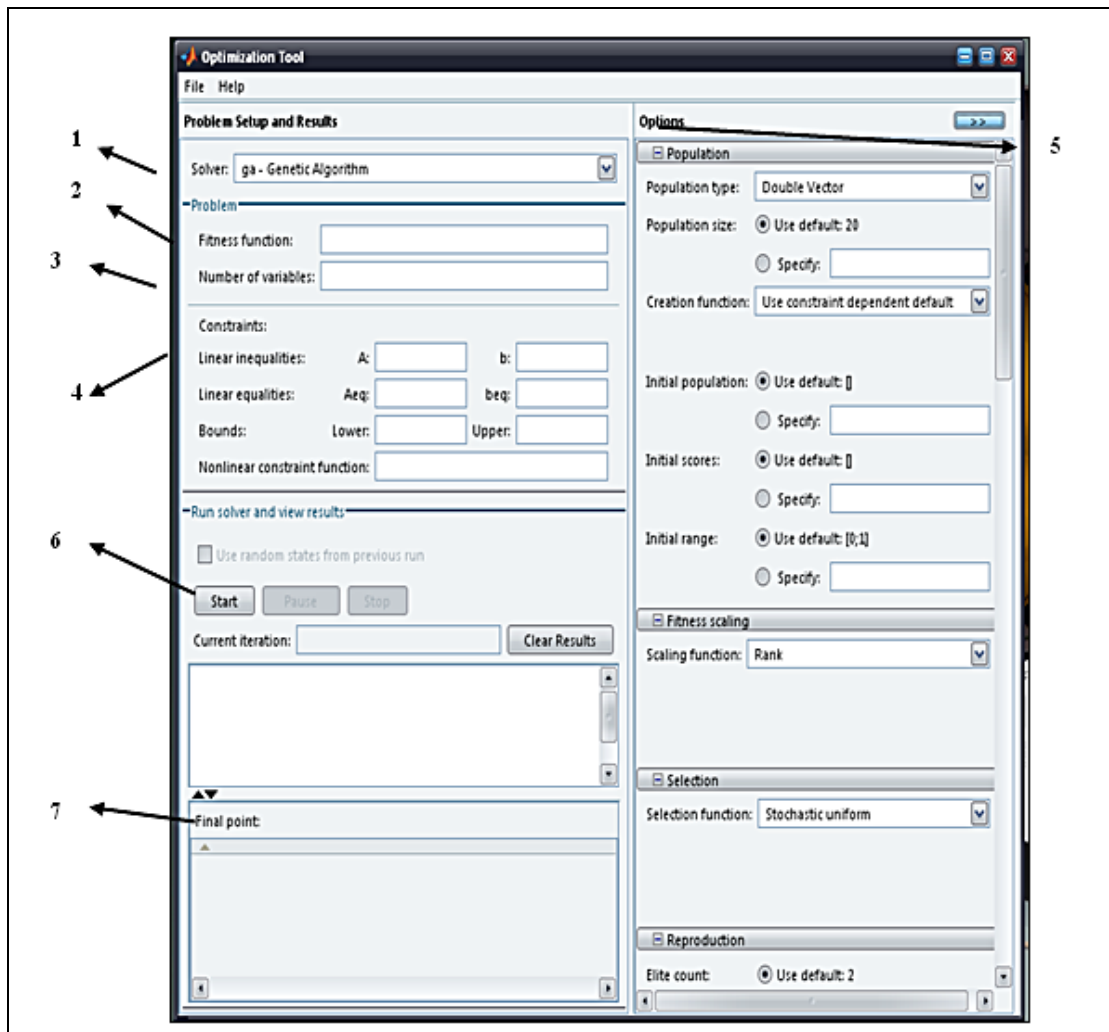
$$Fitness = \max \left[ \log_2 \left( \det \left[ \mathbf{I}_{N_r} + \rho \frac{\mathbf{H}_{mc} \mathbf{H}_{mc}^H}{N_T} \right] \right) \right] \quad (3.12)$$

### 3.3 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการจัดวางสายอากาศด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยจาก กระบวนการและหลักการนี้จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งในการจัดวางตัวของ สายอากาศที่เหมาะสมบนพื้นที่โทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อให้สมรรถนะของระบบมีประสิทธิภาพที่ดี ที่สุด ในหัวข้อนี้รายละเอียดมีดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 ออบติไมซ์เซชันทูลบ็อกซ์ (optimization toolbox)

สำหรับเครื่องมือประยุกต์ที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดในปัจจุบันมีมากมาย ซึ่งผู้วิจัยได้คุ้นเคยกับการใช้โปรแกรมแมทแลปเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ง่าย มีประสิทธิภาพและเป็นที่ นิยมอย่างแพร่หลาย ในโปรแกรมแมทแลปยังมี optimization toolbox โดยเครื่องมือดังกล่าว มีฟังก์ชันของการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมอยู่ด้วย ดังนั้นจึงเป็นเรื่องง่ายที่ผู้วิจัย จะนำไปใช้ในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของการจัดวางตัวของสายอากาศบน โทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยรายละเอียดของหน้าต่างเครื่องมือ optimization toolbox สามารถอธิบายได้ ในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงหน้าต่างเครื่องมือ optimization toolbox

1) หมายเลข 1 (Solver) แสดงอัลกอริทึมของการหาคำตอบที่ดีที่สุดที่ต้องการเลือกใช้ ซึ่งก็จะมีให้เลือกอยู่หลายอัลกอริทึม ในวิชานี้พบได้เลือกใช้วิธีจินเนติกอัลกอริทึมในฟังก์ชันที่แสดงในหน้าต่างเครื่องมือแสดงเป็นชื่อ ga – Genetic Algorithm

2) หมายเลข 2 (Fitness function) เป็นคำสั่งที่เราต้องใส่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาที่เราต้องการหาคำตอบ โดยจะทำการเขียนฟังก์ชันของปัญหาให้อยู่ในไฟล์ m-file ของแมทแลป ตัวอย่างเช่นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ชื่อ objective เราจะเรียกใช้ฟังก์ชันนี้เราต้องเขียนคำสั่งว่า @objective ก็จะสามารเรียกใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้

3) หมายเลข 3 (Number of variables) เป็นการใส่จำนวนตัวแปรที่ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการหาจากหมายเลข 2

4) หมายเลข 4 (Constraints) ในส่วนนี้จะทำการใส่เงื่อนไขของคำตอบที่ต้องการค้นหา โดยจะประกอบไปด้วยเงื่อนไขที่เป็นสมการเชิงเส้น (Linear equalities) เงื่อนไขที่เป็นอสมการเชิงเส้น (Linear inequalities) และขอบเขตของคำตอบที่ค้นหา รวมไปถึงสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันของเงื่อนไขที่ต้องการค้นหาในรูปของ m-file แล้วเรียกใช้งานได้

5) หมายเลข 5 (Options) ในส่วนนี้ถือว่ามีความสำคัญอย่างมากของการค้นหาคำตอบคือเป็นการตั้งค่าต่าง ๆ ที่ของอัลกอริทึม ซึ่งจะมีผลต่อคำตอบของระบบด้วย ตัวอย่างเช่น จำนวนประชากร การคัดเลือกสายพันธุ์ การผ่าเหล่า รวมไปถึงการตั้งค่าการแสดงผลของคำตอบด้วย เป็นต้น

6) หมายเลข 6 (Run solver and view results) จะทำการแสดงสถานะของการค้นหาคำตอบ เมื่อการค้นหามีการผิดพลาดหน้าต่างนี้จะเตือนและแสดงจุดที่ผิดพลาดกระบวนการค้นหาด้วย มากไปกว่านั้นยังได้แสดงจำนวนรอบของการค้นหาคำตอบของระบบด้วย

7) หมายเลข 7 (Final point) จะทำการแสดงคำตอบของการการค้นหาที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดของระบบในรูปของตัวแปรที่เรากำหนดในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในหมายเลข 1

จากการที่ได้อธิบายรายละเอียดเข้าใจมาพอสังเขป optimization toolbox ถือว่าเป็นเครื่องมือที่ใช้ง่ายและสามารถเข้าใจง่ายสำหรับการหาคำตอบที่ดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตามผู้ใช้อย่างต้องศึกษาหลักการและการบวนการใช้เครื่องมือนี้อย่างละเอียดใน Optimization toolbox User Guide Coleman, T., Branch, M., and Grace, A. (1999) ไม่ว่าจะเป็นการเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์เงื่อนไขและขอบเขตที่ต้องการค้นหา ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความถูกต้องของคำตอบตามวัตถุประสงค์

### 3.3.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function)

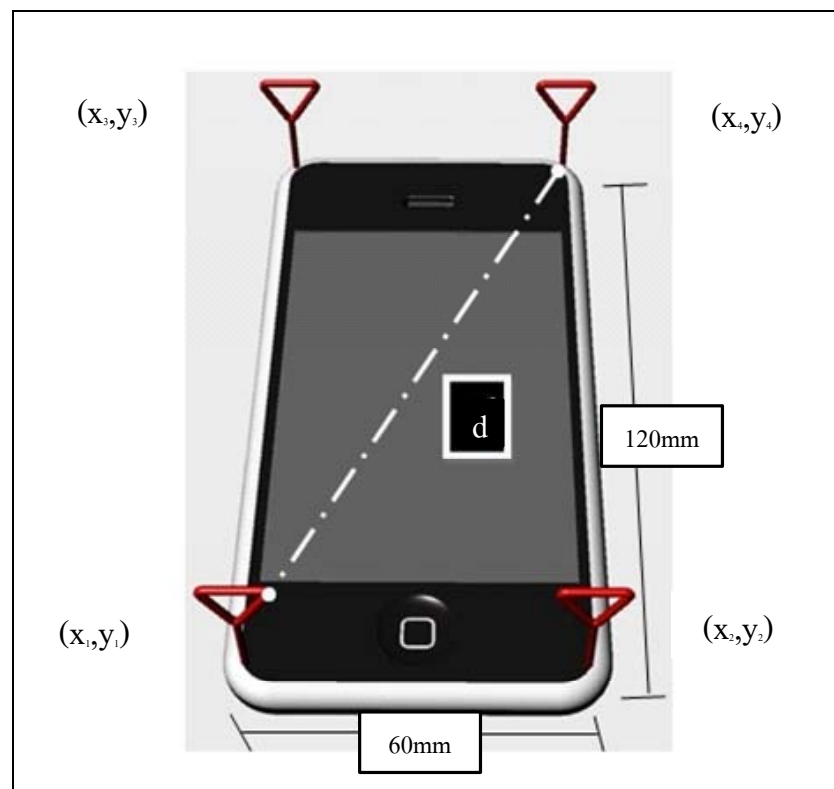
สำหรับวัตถุประสงค์ของการค้นหาคำตอบของการจัดวางตัวของสายอากาศบนพื้นที่จำกัดโดยพิจารณาช่องสัญญาณในระบบไมโม ฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะประกอบไปด้วยตัวแปรที่แสดงตำแหน่งการจัดวางตัวของสายอากาศแต่ละต้น คำตอบที่ดีที่สุดของการค้นหาจะสิ้นสุดเมื่อระบบมี ค่าความจุของช่องสัญญาณ ค่าสูงที่สุด (maximize) ในการกำหนด ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตำแหน่งการจัดวางสายอากาศแต่ละต้นนั้นจะประกอบด้วยตัวแปร 2 ตัวแปร ซึ่งตัวแปร  $x$  แทนความยาว และ  $y$  แทนความกว้างของพื้นที่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำแหน่งการจัดวางสายอากาศนี้ระบุพิกัดของแกน  $x$   $y$  การหาระยะห่าง  $d$  ของสายอากาศแต่ละต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์สมรรถนะของระบบที่ดีที่สุด สามารถใช้ทฤษฎีปีทาโกรัสซึ่งหาได้ดังนี้



Maximize  $f(x)$  กรณีปัญหาค่าสูงสุดโดยพิจารณาจากค่าความจุของช่องสัญญาณที่มีค่ามากที่สุด  
 $x \in S$   $S$  แทนเซตหรือปริภูมิการซึ่งคือค่าขอบเขตของพื้นที่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3.13)$$

โดยนำสมการที่ 3.13 ไปใช้ในการพิจารณาดำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดบนโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยพิจารณาความจุช่องสัญญาณในระบบโมโมในสมการที่ 3.10 ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะมีรูปแบบเดียวกันเลยกับการวิเคราะห์ผลกระทบซึ่งพิจารณาปรากฏการณ์เชื่อมต่อยุ่ร่วมกันที่กระทำระหว่างสายอากาศเพียงแต่เพิ่มตัวแปรตำแหน่งพิกัดบนแกน  $x$   $y$  ของสายอากาศแต่ละต้นเพื่อหาค่า  $d$  ก่อนเท่านั้น



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างการจัดวางสายอากาศในพิกัด  $x$   $y$  บนพื้นที่โทรศัพท์เคลื่อนที่

### 3.3.3 เงื่อนไข (Constraint)

สำหรับเงื่อนไขในการค้นหาตำแหน่งที่ดีที่สุดในการจัดวางสายอากาศที่สำคัญจุดเดียวคือพื้นที่จำกัดบนอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยเงื่อนไขของการค้นหาพิกัดตำแหน่งการจัดวางความยาว  $x$  เท่ากับ 0 มิลลิเมตรถึง 120 มิลลิเมตร และความกว้าง  $y$  เท่ากับ 0 มิลลิเมตรถึง 60 มิลลิเมตร ซึ่งพิจารณาจากขนาดของอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ขนาดจริงดังแสดงในรูปที่ 3.12

### 3.3.4 พารามิเตอร์ (Parameter)

หลังจากได้อธิบายหลักการของการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมในหัวข้อที่ผ่านมาแล้ว ซึ่งก็จะเข้าใจถึงความสำคัญของอัลกอริทึมที่ต้องทำการพิจารณาค่าต่าง ๆ ให้เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด เมื่อทำการเชื่อมโยงหลักและกระบวนการของอัลกอริทึมมาสู่การพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะทำการกำหนดบนเครื่องมือ optimization toolbox ที่ได้ เราได้นำมาประยุกต์ใช้ ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดในการจัดวางสายอากาศด้วยการใช้เทคนิคจินเนติกอัลกอริทึมในเครื่องมือ optimization toolbox สามารถแสดงดังตารางที่ 3.1 ได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้บนเครื่องมือ optimization toolbox

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
Generation	200
Population	200
Probability of crossover	0.8
Probability of mutation	0.01
Population type	Bit string
Encoding	Binary string
Selection	Stochastic uniform
Crossover	Multiple point
Fitness function	Proportional

### 3.4 สรุป

ในบทนี้การอธิบายหลักการประยุกต์ใช้วิธีจินเนติกอัลกอริทึม ในการหาตำแหน่งของระบบโมโมซึ่งพิจารณาช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน 2 ช่องสัญญาณ นอกจากนั้นยังอธิบายถึงผลกระทบของปรากฏการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยระยะห่างระหว่างสายอากาศและขนาดของอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบบโมโม โดยแสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากระหว่างระยะห่างการจัดวางสายอากาศจะมีผลต่อค่าปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วม โดยอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญของบทนี้ก็คือทฤษฎีของเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมอย่างละเอียด เพื่อที่จะได้เข้าใจและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการหาตำแหน่งในการจัดวางสายอากาศบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบบโมโม โดยเนื้อหาที่กล่าวมาทั้งหมดในบทนี้จะนำไปเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์เกี่ยวกับงานวิจัยของเราที่ได้นำเสนอไปซึ่งจะอธิบายในบทถัดไป

## บทที่ 4

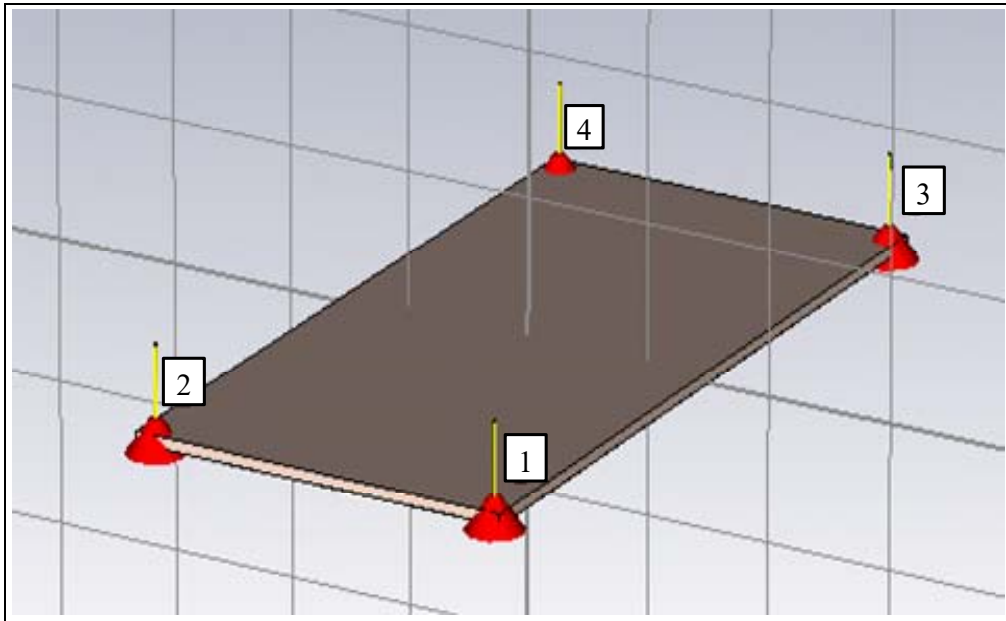
### ผลการทดสอบหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสม

เนื้อหาก่อนหน้านี้อธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานการสื่อสารในระบบไมโม โดยกล่าวถึงทฤษฎีความจุช่องสัญญาณ โดยได้ทำการแสดงสมการช่องสัญญาณ 2 แบบจำลองคือ ช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน โดยพิจารณาช่องสัญญาณการจางหายแบบเลย์ลี

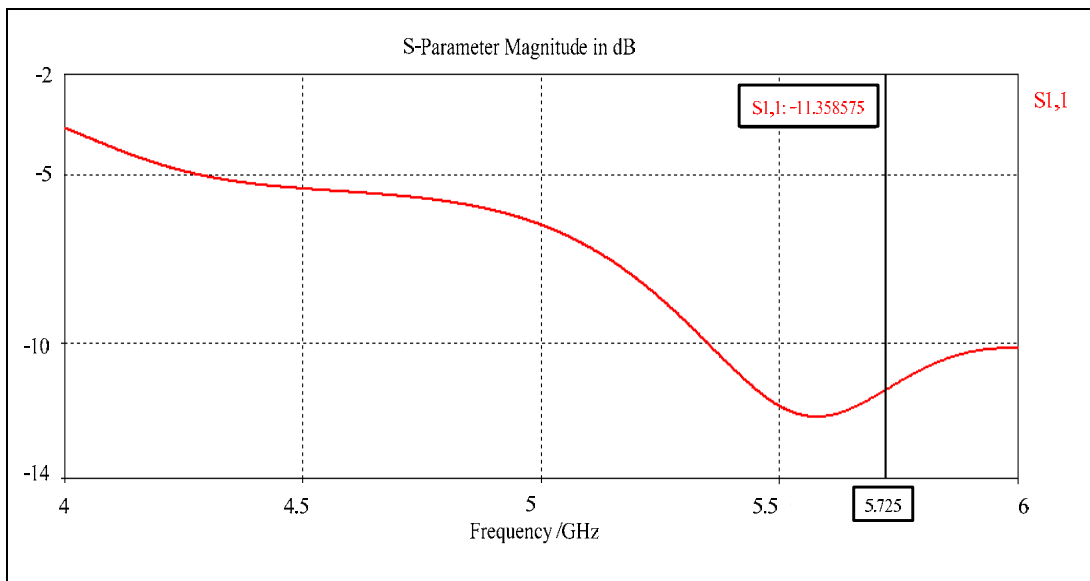
และช่องสัญญาณแบบ “Two-Ring” โดยพิจารณามุมที่กระทำกันระหว่างภาครับและภาคส่งจากนั้นได้อธิบายถึงปรากฏการณ์การเชื่อมต่อยุบรวมที่ผลต่อการจัดวางสายอากาศโดยประยุกต์ทฤษฎี N-พอร์ต โดยใช้การพิจารณา Z อิมพีแดนซ์ เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบของการจัดวางสายอากาศโดยพิจารณาค่าความจุช่องสัญญาณในระบบไมโม โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดระเบียบวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมาใช้ในการหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมของการจัดวางสายอากาศบนโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยได้ใช้ optimization toolbox ในโปรแกรมแมทแลป เพื่อหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการจัดวางสายอากาศ จากนั้นได้ใช้โปรแกรม CST microwave studio ในการจำลองแบบก่อนทำการวัดจริง

#### 4.1 รูปแบบสายอากาศ (antenna configuration)

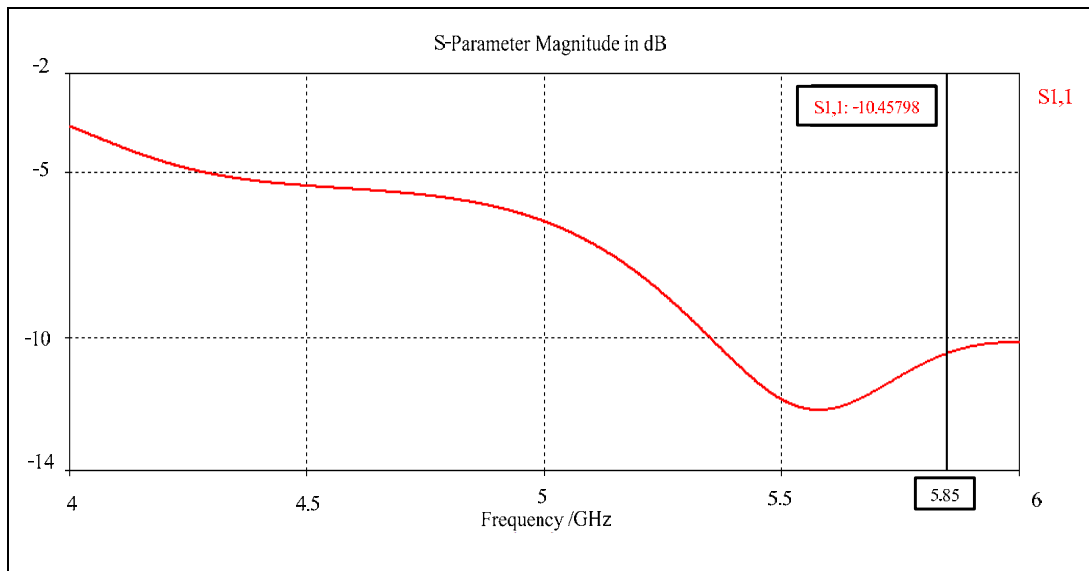
ในเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของการจัดวางตัวของสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้ สายอากาศที่ใช้คือ สายอากาศโมโนโพลซึ่งเป็นสายอากาศเส้นลวดตรงที่มีต้นแบบมาจากสายอากาศไดโพล เพียงแต่นำมาใช้เพียงครึ่งหนึ่งของความยาวไดโพลและมีการป้อนสัญญาณเข้าที่กึ่งกลางของไดโพล โดยเทียบกับระนาบกราวด์ (ground plane) ดังนั้นความยาวของโมโนโพลจึงเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นใช้งาน โดยได้ทำการออกแบบสายอากาศในย่านความถี่ 5.725-5.85 GHz ซึ่งสามารถรองรับคลื่นความถี่ตามมาตรฐาน IEEE 802.16e (Mobile wimax) ได้จำลองผลจากโปรแกรม CST microwave studio ก่อนทำการสร้างวัดจริง



รูปที่ 4.1 แสดงผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST microwave studio

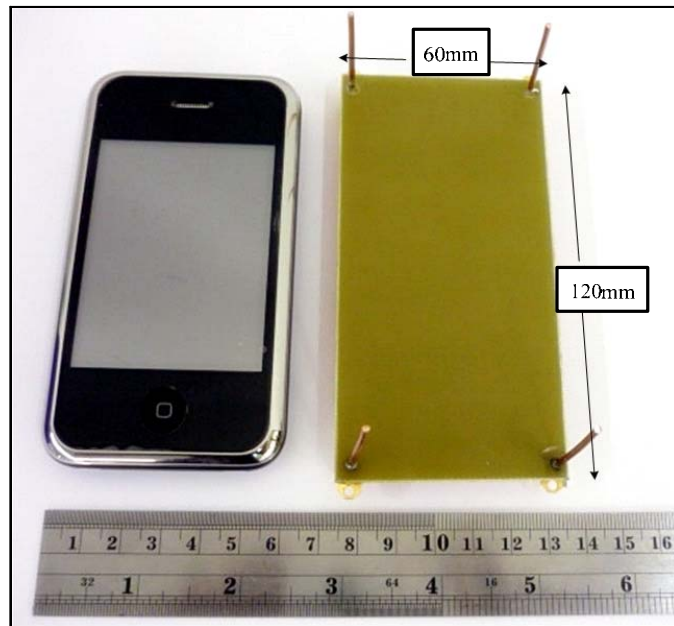


รูปที่ 4.2 ผลค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ s11 ที่ ที่ความถี่ 5.725 GHz

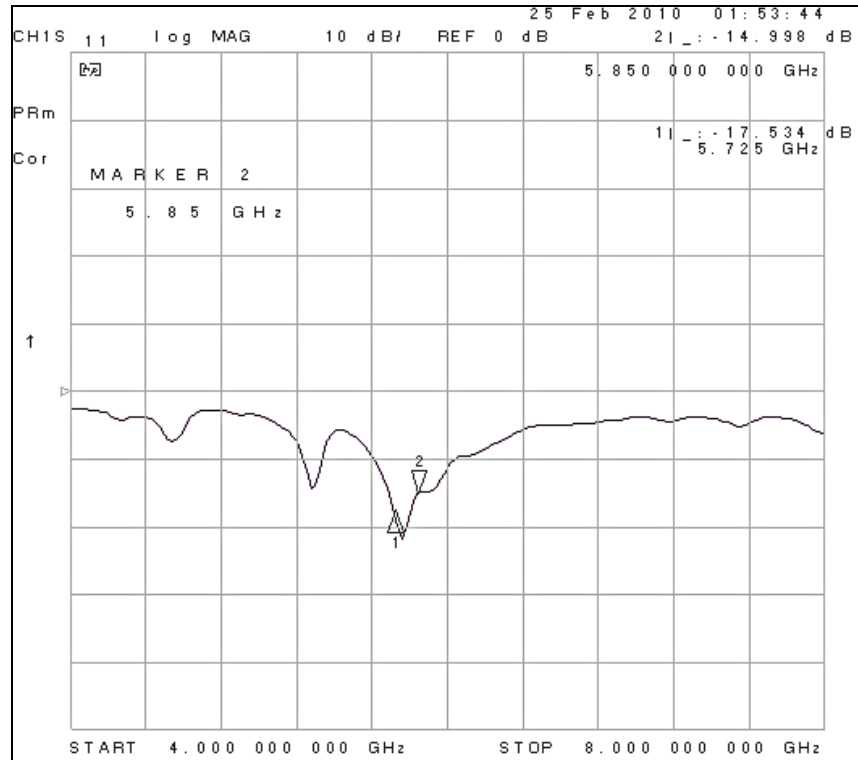


รูปที่ 4.3 ผลค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ s11 ที่ความถี่ 5.85GHz

เมื่อได้ทำการจำลองการสร้างสายอากาศในโปรแกรม CST microwave studio จากรูป 4.1 ซึ่งได้แสดงผลค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ s11 ในช่วงความถี่ที่ใช้งานจากรูปที่ 4.2 4.3 แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ s11 มีค่าที่ต่ำกว่า -10db ซึ่งถือว่าใช้งานได้ และต่อมาจึงได้มาทำการสร้างวัดจริง



รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างการจัดวางสายอากาศโมนโพลบนโทรศัพท์เคลื่อนที่

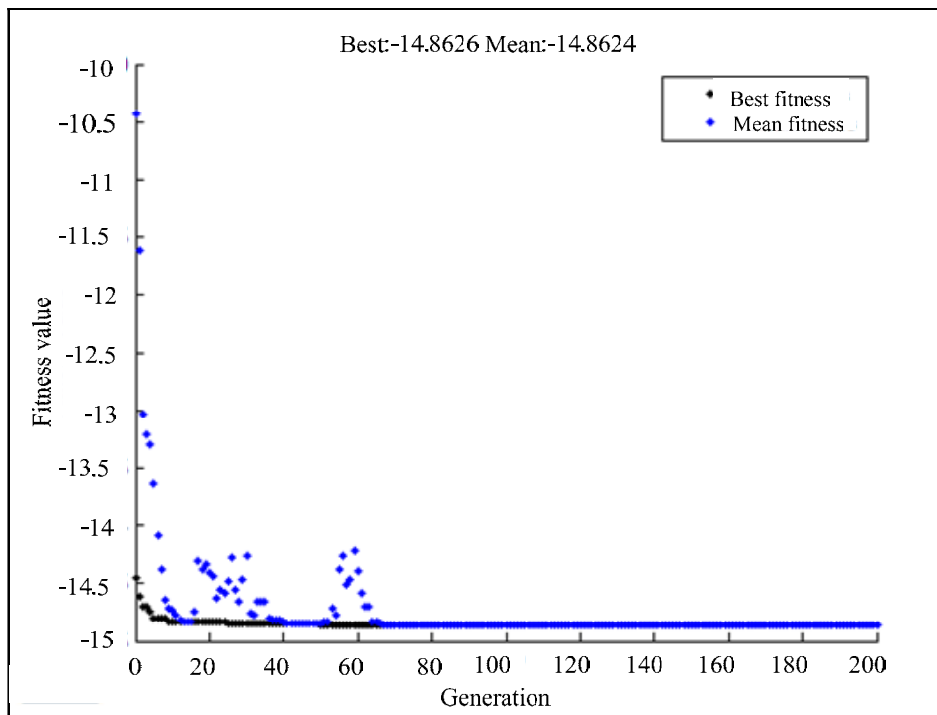


รูปที่ 4.5 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ s11 ที่ 5.725-5.85 GHz

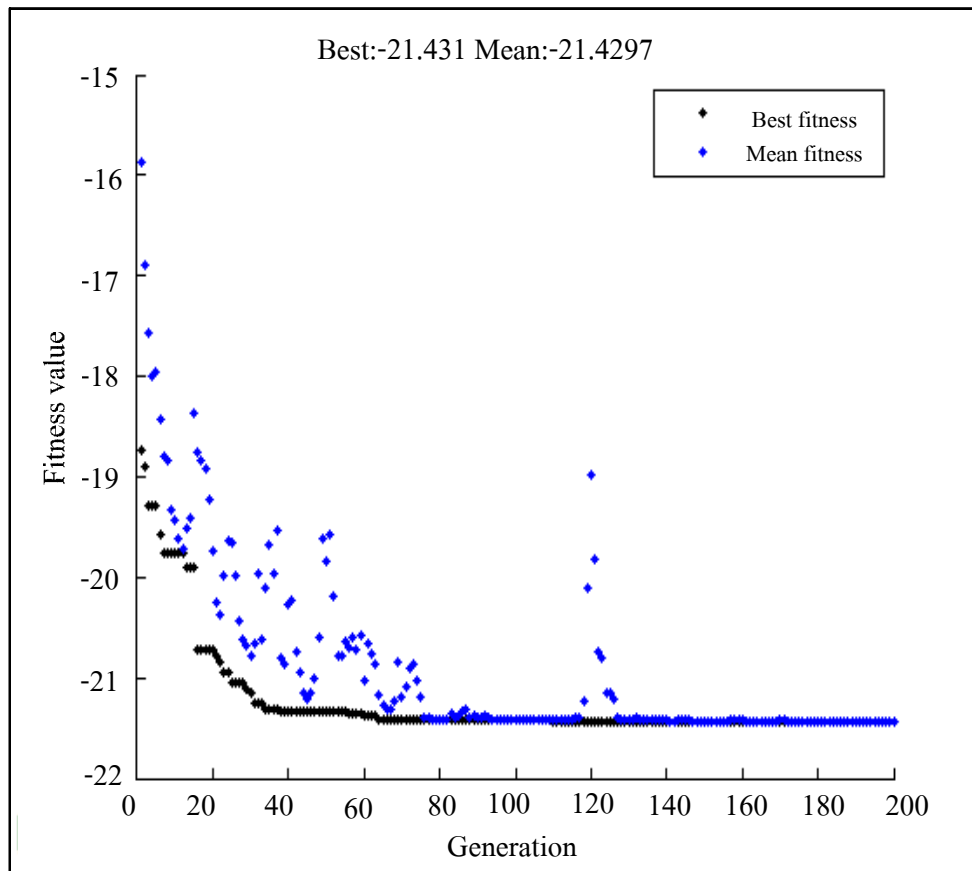
## 4.2 ผลจากการหาตำแหน่งการจัดวางสายอากาศด้วยเทคนิควิชันเนติกอัลกอริทึม ในช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกันโดย พิจารณาช่องสัญญาณการจางหายแบบเฉลี่ยดี

ผลจากการจำลองแบบในการหาระยะและตำแหน่งการจัดวางตัวของสายอากาศบน  
โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยใช้ optimization toolbox ใน โปรแกรมเมทแลป โดยหาตำแหน่งการจัดวาง  
สายอากาศในช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกันโดยพิจารณา  
ช่องสัญญาณการจางหายแบบเฉลี่ยดีในระบบโมโม 3x3 และ 4x4 ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 จาก  
รูปค่าของ Generation เปรียบเสมือนจำนวนรอบของการค้นหาค่าตอบดังที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่  
3.1 ค่า Best fitness เป็นค่าจางของช่องสัญญาณ ที่ดีที่สุดในแต่ละรอบของการค้นหาค่าตอบ ส่วน  
ค่า Mean fitness เป็นค่าเฉลี่ย ความจางของช่องสัญญาณจากค่าตอบทั้งหมดของการค้นหาในแต่ละ  
รอบเช่นกัน ค่าตอบที่ดีที่สุดของการค้นหาจะสิ้นสุดที่ Generation ที่ได้กำหนดไว้ ซึ่ง  
ค่า Best fitness และ Mean fitness จะไม่มีค่าตอบที่สามารถปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพของ  
ระบบได้ดีกว่านี้แล้วดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.6 สำหรับการหาตำแหน่งที่ดีที่สุดของสายอากาศ  
จำนวน 3 ต้น จะเห็นได้จากช่วง Generation ตั้งแต่ 70 กราฟจะเป็นเส้นตรงไม่มีการปรับปรุง  
ประสิทธิภาพของค่าความจางของช่องสัญญาณ โดยค่าความจางของช่องสัญญาณ ที่ดีที่สุด หรือสำหรับ  
ค่า Best fitness อยู่ที่ 14.8626 dB เช่นเดียวกับค่าความจางของช่องสัญญาณเฉลี่ย หรือค่า  
Mean fitness เท่ากับ 14.8624 dB ซึ่งในส่วนนี้ก็จะได้ค่าตอบของตำแหน่งและระยะสำหรับการจัด  
วางสายอากาศที่ให้สมรรถนะของระบบมีประสิทธิภาพดีที่สุดในรูปที่ 4.7 สำหรับการหาตำแหน่ง  
ที่ดีที่สุดของสายอากาศ 4 ต้น จะเห็นได้ว่า จะเห็นได้จากช่วง Generation ตั้งแต่ 130 กราฟจะเป็น  
เส้นตรงไม่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของค่าความจางของช่องสัญญาณ แล้ว โดยค่าความจางของ  
ช่องสัญญาณ ที่ดีที่สุด หรือสำหรับค่า Best fitness อยู่ที่ 21.43 dB เช่นเดียวกับค่าความจางของ  
ช่องสัญญาณ เฉลี่ยหรือค่า Mean fitness เท่ากับ 21.4297 dB ซึ่งในส่วนนี้ก็จะได้ค่าตอบของ  
ตำแหน่งและระยะสำหรับการจัดวางสายอากาศที่ให้สมรรถนะของระบบมีประสิทธิภาพดีที่สุดซึ่ง  
ได้ทำการเปรียบเทียบจำนวน Generation และจำนวน Population เพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 300 ซึ่งแสดง  
ในรูปที่ 4.8 ผลที่ได้ไม่ทำให้ค่า Best fitness เพิ่มขึ้นแต่อย่างใดในทางกลับกันจะเสียเวลาในการหา  
คำตอบที่นานขึ้นมาก

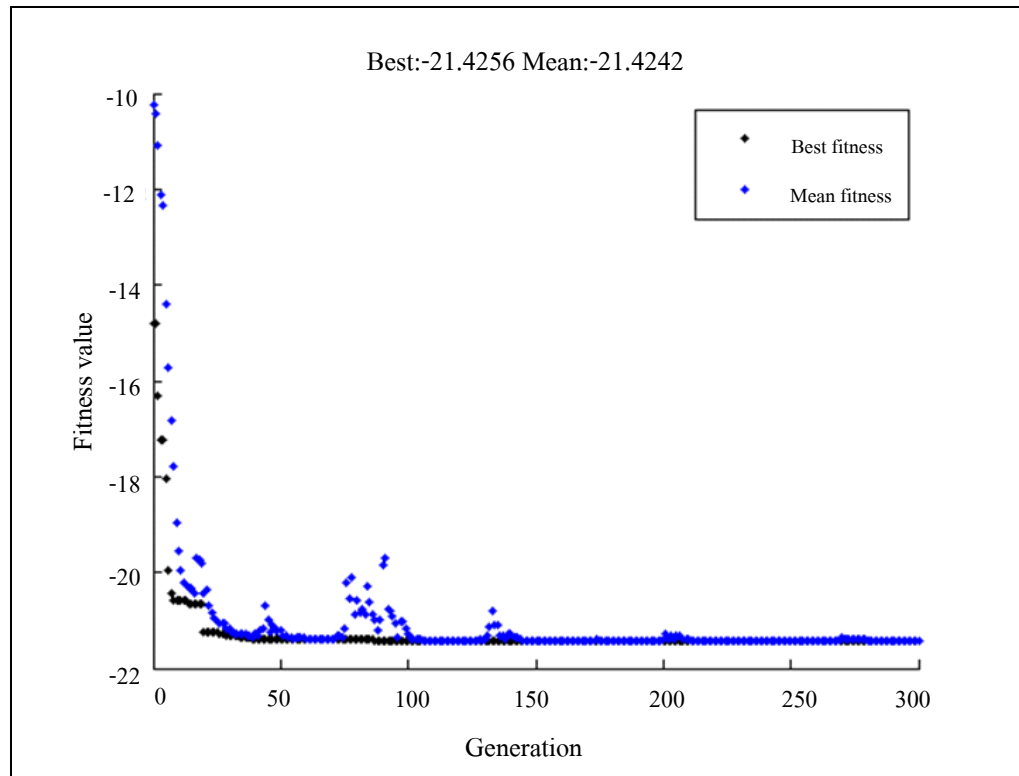




รูปที่ 4.6 ผลของการหาคำแหน่งการจัดวางสายอากาศเริ่มต้นที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมบนเครื่องมือ optimization toolbox ในช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกัน และมีการแจกแจงเหมือนกัน โดยพิจารณาช่องสัญญาณการจางหายแบบเลย์ลี



รูปที่ 4.7 ผลของการหาค่าเหมาะการจัดวางสายอากาศ 4 ต้นที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมบนเครื่องมือ optimization toolbox ในช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกัน และมีการแจกแจงเหมือนกัน โดยพิจารณาช่องสัญญาณการจางหายแบบเลย์ลี

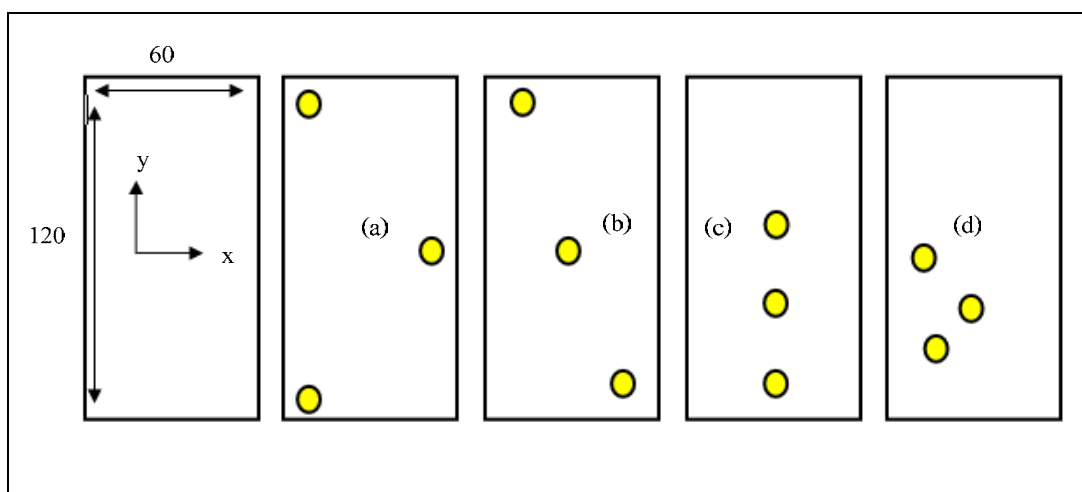


รูปที่ 4.8 ผลของการหาตำแหน่งการจัดวางสายอากาศ 4 ต้นที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมบนเครื่องมือ optimization toolbox ในช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกัน และมีการแจกแจงเหมือนกัน โดยพิจารณาช่องสัญญาณการจางหายแบบเฉลี่ยในการเปรียบเทียบการเพิ่ม generation และ population

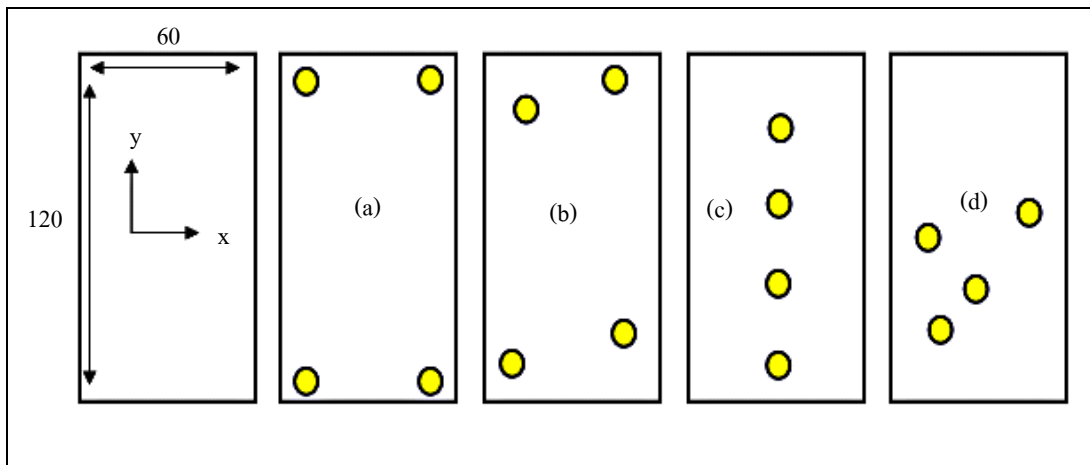
ตารางที่ 4.1 แสดงการจัดวางตัวของสายอากาศโดยพิจารณาช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกัน และมีการแจกแจงเหมือนกัน ในระบบไมโม 3x3 และ 4x4

ผลตำแหน่ง	ตำแหน่งการจัดวางสายอากาศบนพิกัด $x$ $y$ (มิลลิเมตร)			
	1	2	3	4
MIMO 3x3	(56,8)	(19,59)	(3,117)	
MIMO 4x4	(4,7)	(48.25,15)	(13,97.75)	(45.5,118.5)

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะการจัดวางสายอากาศจากการหาคำแหน่งการจัดวางบนพื้นที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วยเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึม จึงได้ทำการสุ่มการจัดวางตัวของสายอากาศของระบบไมโม 3x3 และ 4x4 ขึ้นมาในการเปรียบเทียบสมรรถนะว่ามีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าจริงโดยการสุ่มการจัดวางสายอากาศของแต่ละจำนวนของสายอากาศที่จะนำมาเปรียบเทียบมีรายละเอียดดังนี้

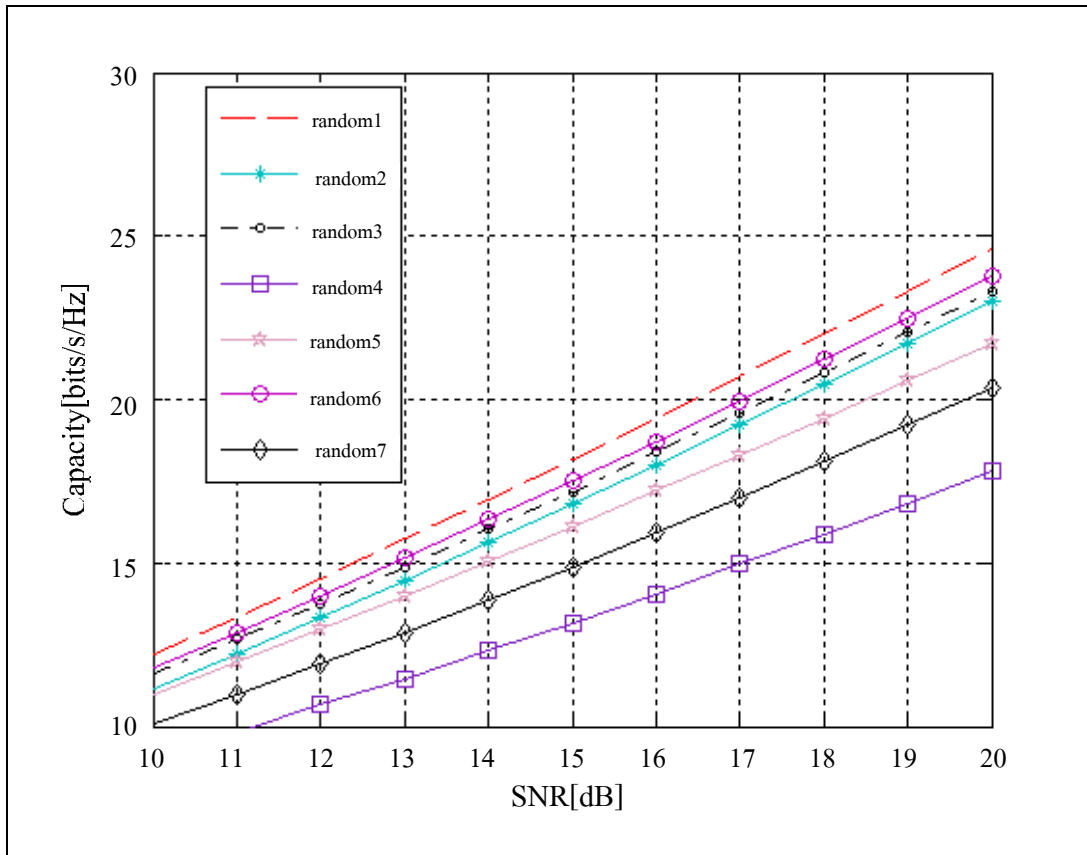


รูปที่ 4.9 แสดงการจัดวางสายอากาศ 3 ต้นในแต่ละกรณีบนพื้นที่โทรศัพท์เคลื่อนที่



รูปที่ 4.10 แสดงการจัดวางสายอากาศ 4 ต้นในแต่ละกรณีบนพื้นที่โทรศัพท์เคลื่อนที่

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงการจัดวางสายอากาศ 3 ต้นในแต่ละกรณีบนพื้นที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยในกรณี (a) แสดงการจัดวางสายอากาศไว้ที่มุมของพื้นที่กรณี (b) แสดงการจัดวางสายอากาศในตำแหน่งที่ได้ผลมาจากเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมกรณี (c) แสดงการจัดวางสายอากาศแบบเส้นตรงซึ่งมีระยะห่างแอมป์ / 2 กรณี (d) แสดงการจัดวางสายอากาศในรูปแบบสุ่มโดยในกรณี (d) ได้ทำการสุ่มทั้งหมด 7 ครั้ง ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.11 โดยเลือกครั้งที่ดีที่สุดที่สุดมาเปรียบเทียบซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมแมทแลปโดยพิจารณาค่าความจุช่องสัญญาณ



รูปที่ 4.11 ความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน  
ในกรณีโมโม 4x4 ในกรณีสุ่มเปรียบเทียบ

ตารางที่ 4.2 แสดงตำแหน่งของการจัดวางสายอากาศในระบบโมโม 3x3

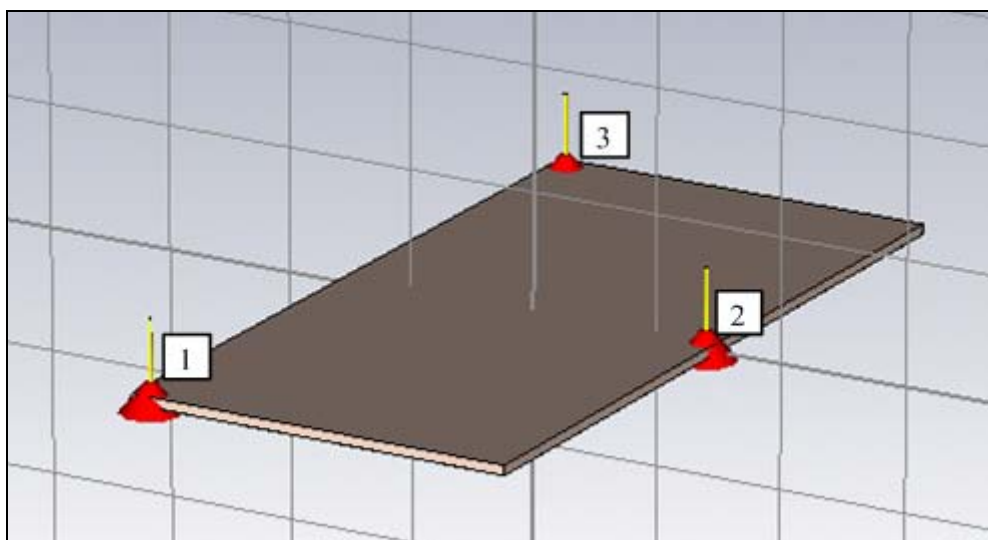
MIMO 3x3 Case	ตำแหน่งการจัดวางสายอากาศบนพิกัด $x$ $y$ (มิลลิเมตร)		
	Antenna (1)	Antenna (2)	Antenna (3)
(a) corner	5,5	55,60	5,115
(b) GA	56,8	19,59	3,117
(c) linear	30,5	30,31.2	30,57.4
(d) random	17,35	34,48	15,62

ตารางที่ 4.3 แสดงตำแหน่งของการจัดวางสายอากาศในระบบไมโม 4x4

MIMO 4x4 Case	ตำแหน่งการจัดวางสายอากาศบนพิกัด $x$ $y$ (มิลลิเมตร)			
	Antenna (1)	Antenna (2)	Antenna (3)	Antenna (4)
(a) corner	5,5	55,5	5,115	55,115
(b) GA	4,7	48.25,15	13,97.75	45.5,118.5
(c) linear	30,5	30,31.2	30,57.4	30,83.6
(d) random	17,35	34,48	15,62	50,76

### 4.3 ผลการจำลองการหาตำแหน่งโดยใช้โปรแกรม CST microwave studio เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบหาค่าความจุของช่องสัญญาณ

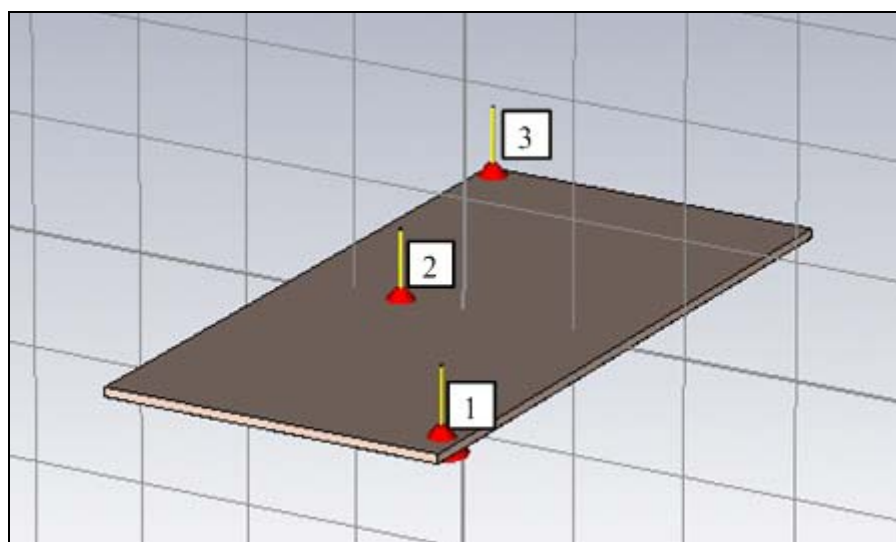
เนื่องจากหัวข้อที่ 4.2 ได้ค่าตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของการจัดวางสายอากาศบนโทรศัพท์เคลื่อนที่จากโปรแกรมวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึมแล้วได้ทำการเปรียบเทียบในกรณีอื่น ๆ ในส่วนนี้จะทำการจำลองผลของตำแหน่งของการจัดวางสายอากาศในแต่ละกรณีโดยใช้โปรแกรม CST microwave studio เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบว่าผลตำแหน่งที่ได้จากระเบียบวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึมจะเป็นผลตำแหน่งที่ดีที่สุดหรือไม่



รูปที่ 4.12 แสดงการจำลองผลตำแหน่งการจัดวางสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (a)

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (a)

ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ		
$82.9106 + 19.1599i$	$60.7859 + 9.0942i$	$62.859 - 9.0942i$
$61.4237 + 8.4030i$	$87.3967 - 10.3660i$	$61.3426 - 16.2045i$
$61.4237 + 8.4030i$	$61.3426 - 16.2045i$	$86.4104 - 12.7832i$

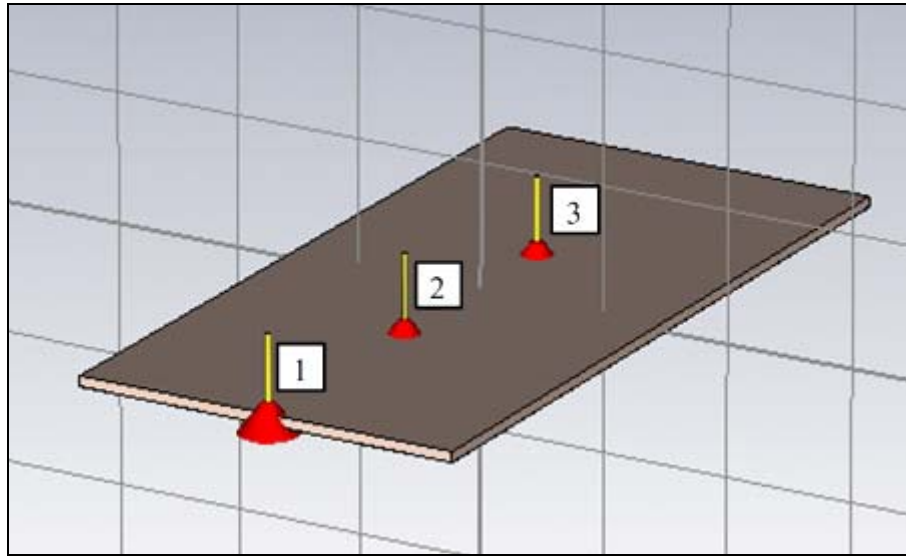


รูปที่ 4.13 แสดงการจำลองผลตำแหน่งการจัดวางสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (b)

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (b)

ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ		
$67.1701 + 7.9998i$	$24.7015 - 16.6921i$	$36.3233 - 3.2461i$
$24.7015 - 16.6921i$	$79.3011 + 32.9975i$	$21.1141 - 1.0218i$
$36.3233 - 3.2461i$	$21.1141 - 1.0218i$	$44.6995 + 2.5203i$

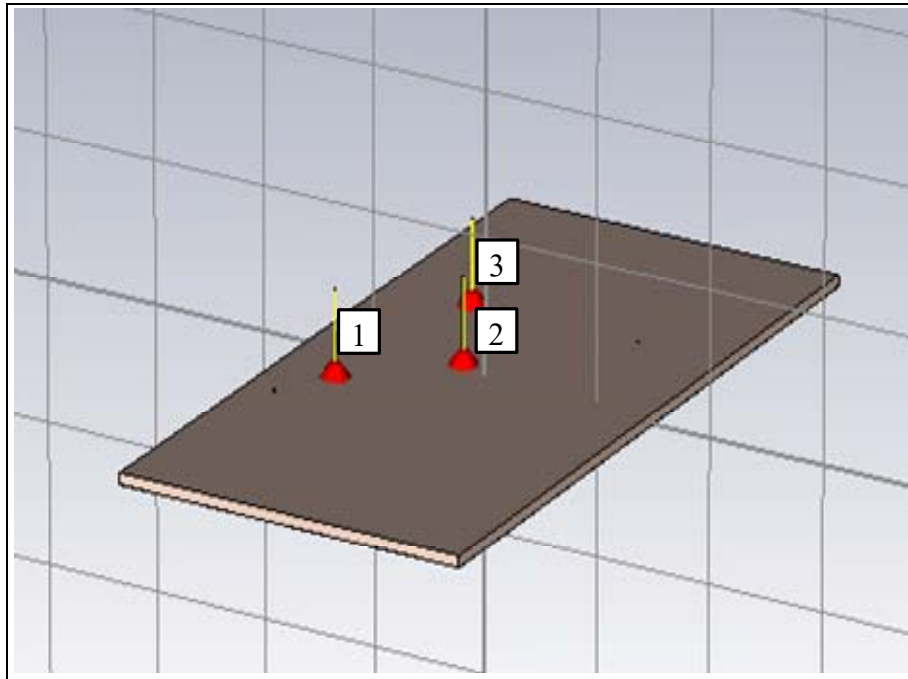




รูปที่ 4.14 แสดงการจำลองผลตำแหน่งการจัดวางสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (c)

ตารางที่ 4.6 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (c)

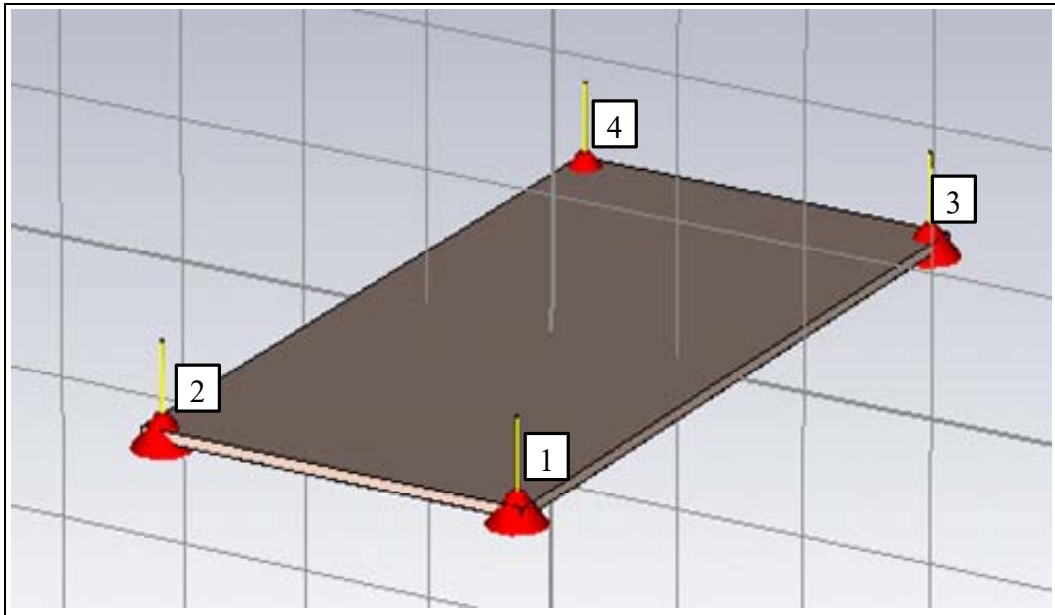
ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ		
$35.7580 + 6.7937i$	$39.1246 + 4.1474i$	$49.6078 - 5.3033i$
$39.1246 + 4.1474i$	$34.1137 + 6.1019i$	$32.5709 + 1.9579i$
$49.6078 - 5.3033i$	$32.5709 + 1.9579i$	$33.9153 - 20.2793i$



รูปที่ 4.15 แสดงการจำลองผลตำแหน่งการจัดวางสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (d)

ตารางที่ 4.7 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (d)

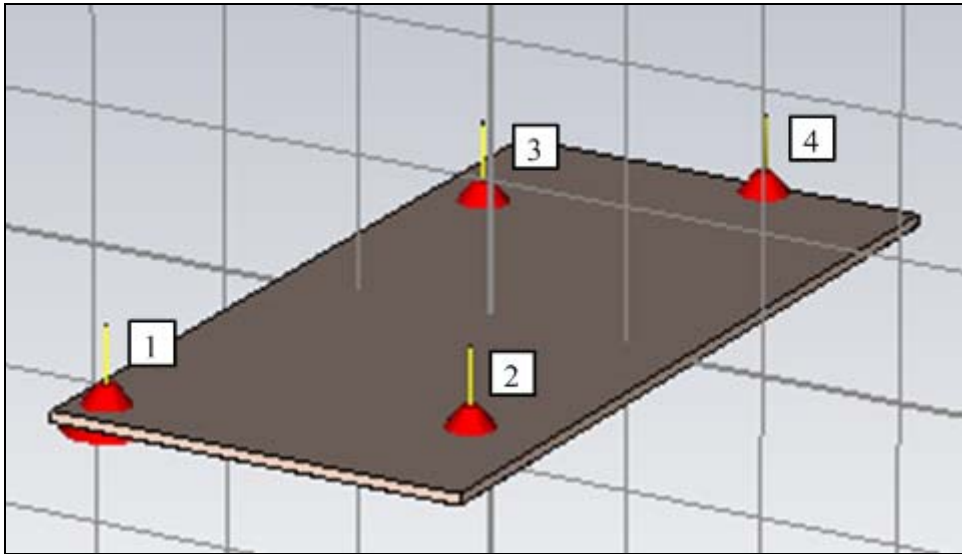
ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ		
$35.7580 + 6.7937i$	$39.1246 + 4.1474i$	$49.6078 - 5.3033i$
$39.1246 + 4.1474i$	$34.1137 + 6.1019i$	$32.5709 + 1.9579i$
$49.6078 - 5.3033i$	$32.5709 + 1.9579i$	$33.9153 - 20.2793i$



รูปที่ 4.16 แสดงการจำลองผลตำแหน่งการจัดวางสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (a)

ตารางที่ 4.8 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (a)

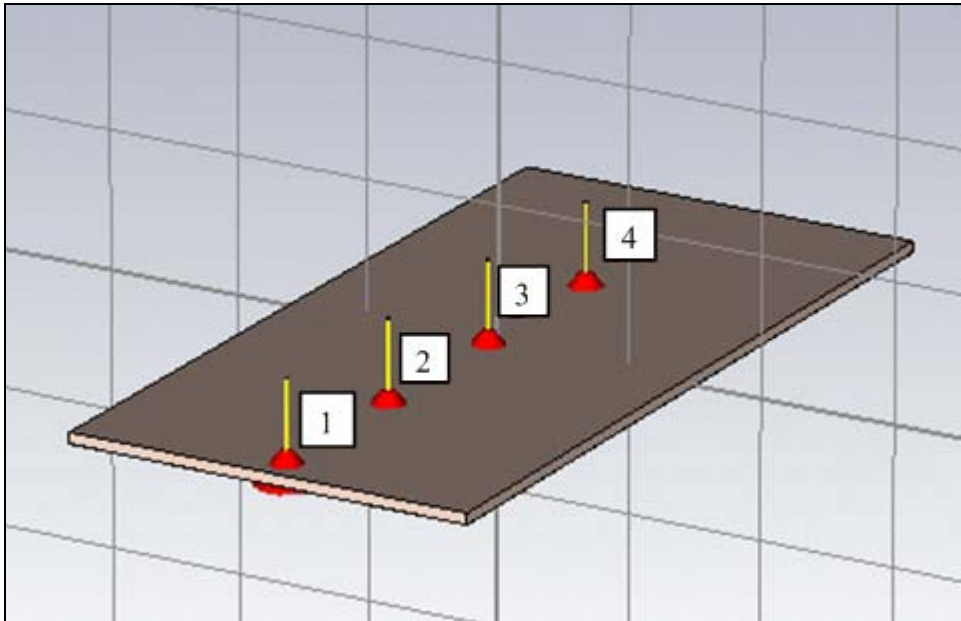
ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ			
$32.315 - 7.051i$	$49.277 - 1.027i$	$48.815 + 0.163i$	$50.976 + 1.177i$
$49.277 - 1.027i$	$35.860 - 62.375i$	$50.532 + 0.836i$	$49.070 - 0.006i$
$48.815 + 0.163i$	$50.532 + 0.836i$	$33.204 - 39.147i$	$48.596 - 1.080i$
$50.976 + 1.177i$	$49.079 - 0.006i$	$48.596 - 1.080i$	$31.056 - 16.724i$



รูปที่ 4.17 แสดงการจำลองผลตำแหน่งการจัดวางสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (b)

ตารางที่ 4.9 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (b)

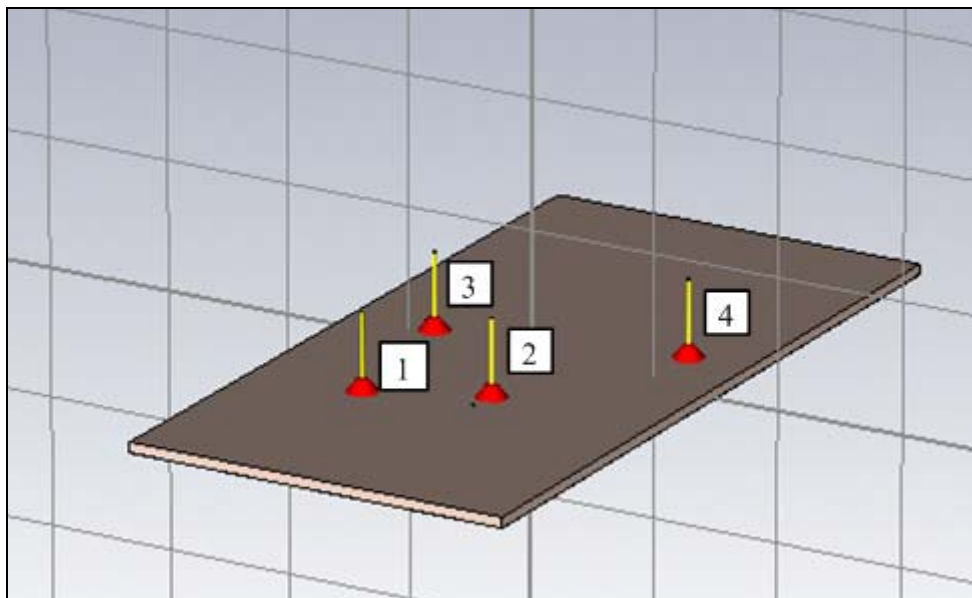
ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ			
$28.718 - 12.426i$	$49.675 + 0.278i$	$50.379 - 0.469i$	$49.632 - 0.173i$
$49.675 + 0.278i$	$35.627 - 7.659i$	$50.957 + 1.077i$	$51.131 - 0.385i$
$50.379 - 0.469i$	$50.957 + 1.077i$	$27.971 - 6.877i$	$49.078 - 2.259i$
$49.632 - 0.173i$	$55.357 - 4.001i$	$49.078 - 2.259i$	$30.138 - 8.137i$



รูปที่ 4.18 แสดงการจำลองผลตำแหน่งการจัดวางสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (c)

ตารางที่ 4.10 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (c)

ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ			
$47.274 + 7.243i$	$52.639 - 1.831i$	$49.669 - 0.681i$	$48.719 + 0.019i$
$52.639 - 1.831i$	$80.427 - 1.941i$	$53.068 - 2.170i$	$48.862 + 0.543i$
$50.646 - 0.423i$	$53.068 - 2.170i$	$71.0518 - 37.868i$	$50.964 - 1.833i$
$47.274 + 7.243i$	$52.639 - 1.831i$	$49.669 - 0.681i$	$48.719 + 0.019i$



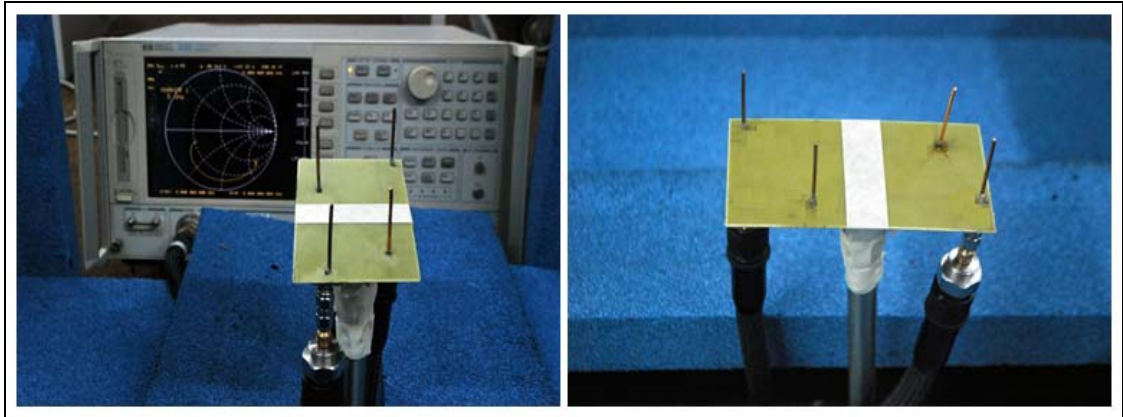
รูปที่ 4.19 แสดงการจำลองผลตำแหน่งการจัดวางสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (d)

ตารางที่ 4.11 แสดงค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (d)

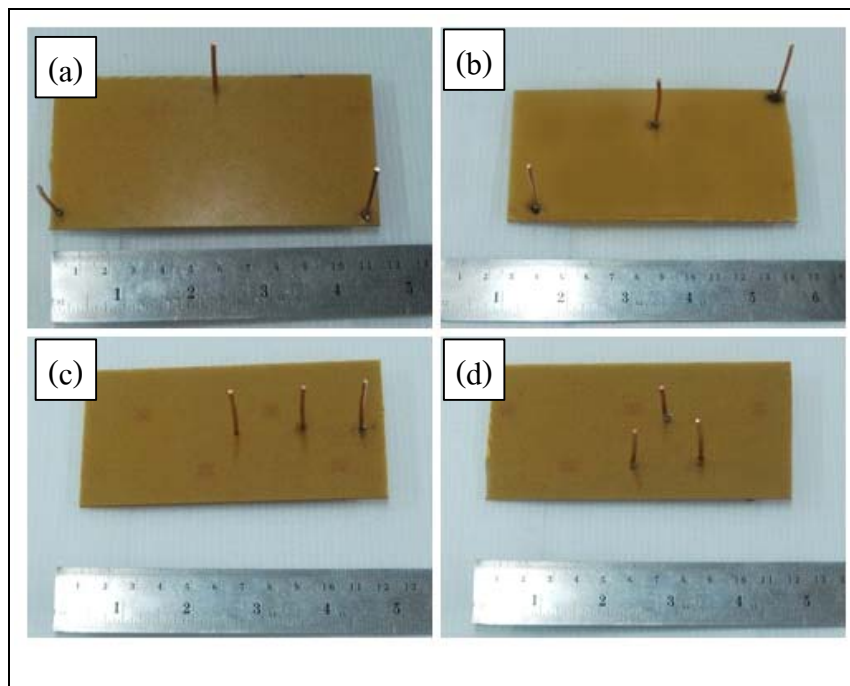
ค่า z อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ			
37.533 -14.186i	62.268 - 2.181i	55.434 - 4.269i	48.447 - 0.675i
62.268 - 2.181i	77.724 -21.634i	50.566 + 0.329i	51.925 - 4.045i
55.434 - 4.269i	50.566 + 0.329i	90.910 + 6.197i	53.481+ 0.758i
48.447 - 0.675i	51.925 - 4.045i	53.481 + 0.758i	37.322 -24.040i

#### 4.4 การทดสอบระบบไมโมในสถานการณ์จริง

จากหัวข้อที่ 4.3 ได้แสดงการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST microwave studio เพื่อเปรียบเทียบผลความจุของช่องสัญญาณในหัวข้อนี้ได้เสนอการวัดผลจริงโดยผ่านเครื่องวิเคราะห์วงจรข่าย (Network Analyzer) เพื่อวัดผลค่า Z อิมพีแดนซ์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบหาค่าความจุของช่องสัญญาณในระบบไมโมต่อไป

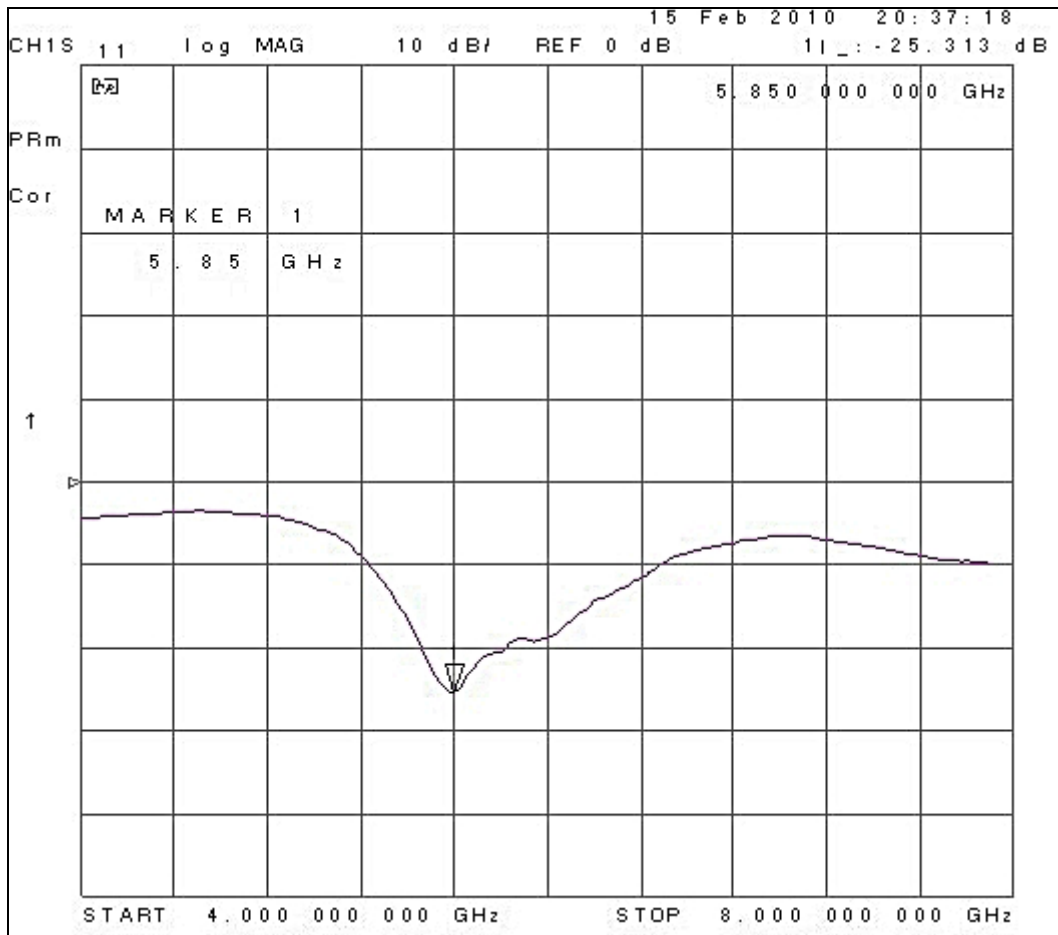


รูปที่ 4.20 แสดงการวัดผลค่า  $Z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศผ่านเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย



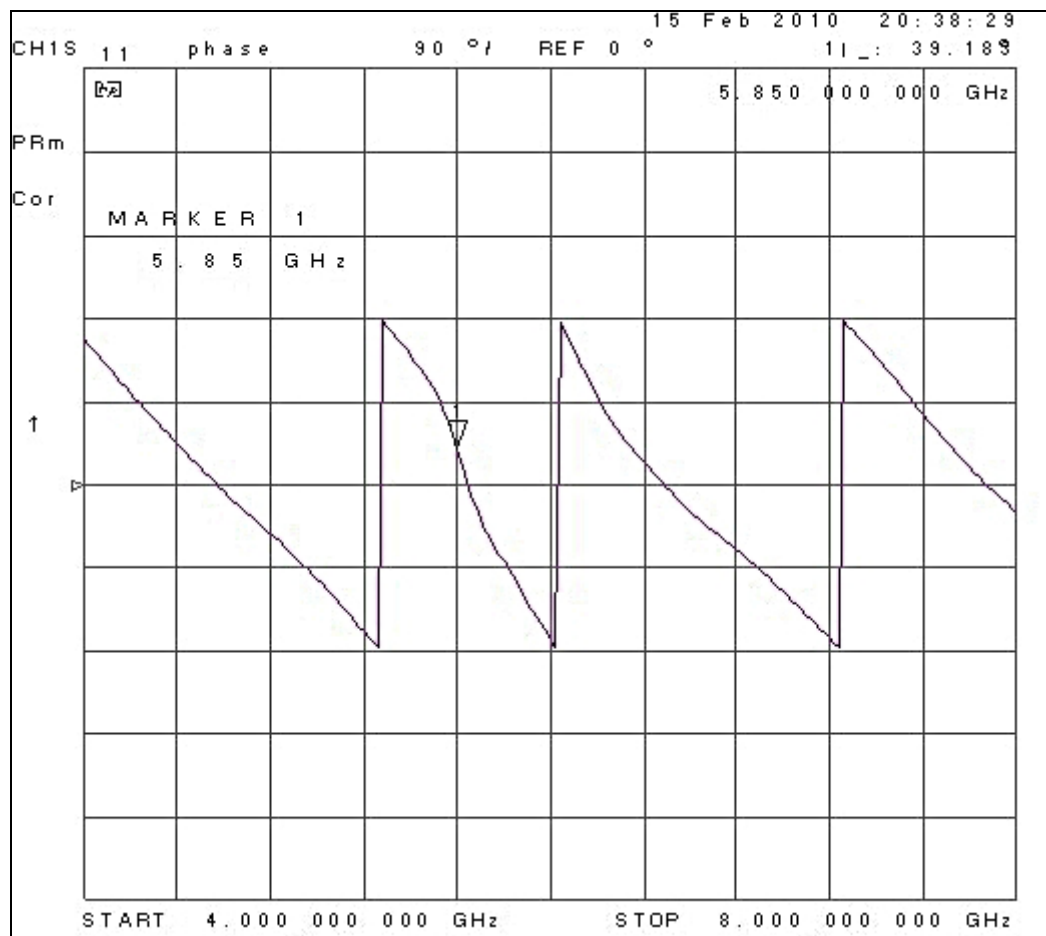
รูปที่ 4.21 แสดงการจัดวางสายอากาศ 3 ต้นในแต่ละกรณี

ตัวอย่างผลวัดค่าโดยค่า  $Z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศทั้งขนาดและเฟสถูกวัดจากเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย ( $S_{ii}, S_{ij}$ ) โดยแต่ละอิมพีแดนซ์จะวัดทั้งหมด 5 ครั้ง โดยกำหนดให้ ( $S_{ij} = S_{ji}$ ) เป็นไปตามทฤษฎีบทภาวะย้อนกลับ (Reciprocity theorem)



รูปที่ 4.22 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ s11 ที่ 5.85 GHz





รูปที่ 4.23 ผลวัดค่าเฟสของสายอากาศ s11 ที่ 5.85 GHz

ตารางที่ 4.12 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (a)

ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ		
44.4545 - 5.9706i	55.6711 + 5.8918i	45.5511 - 2.2106i
55.6711 + 5.8918i	39.1023 + 3.9536i	36.7929 - 4.2588i
45.5511 - 2.2106i	36.7929 - 4.2588i	41.1227 - 0.3986i

ตารางที่ 4.13 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (b)

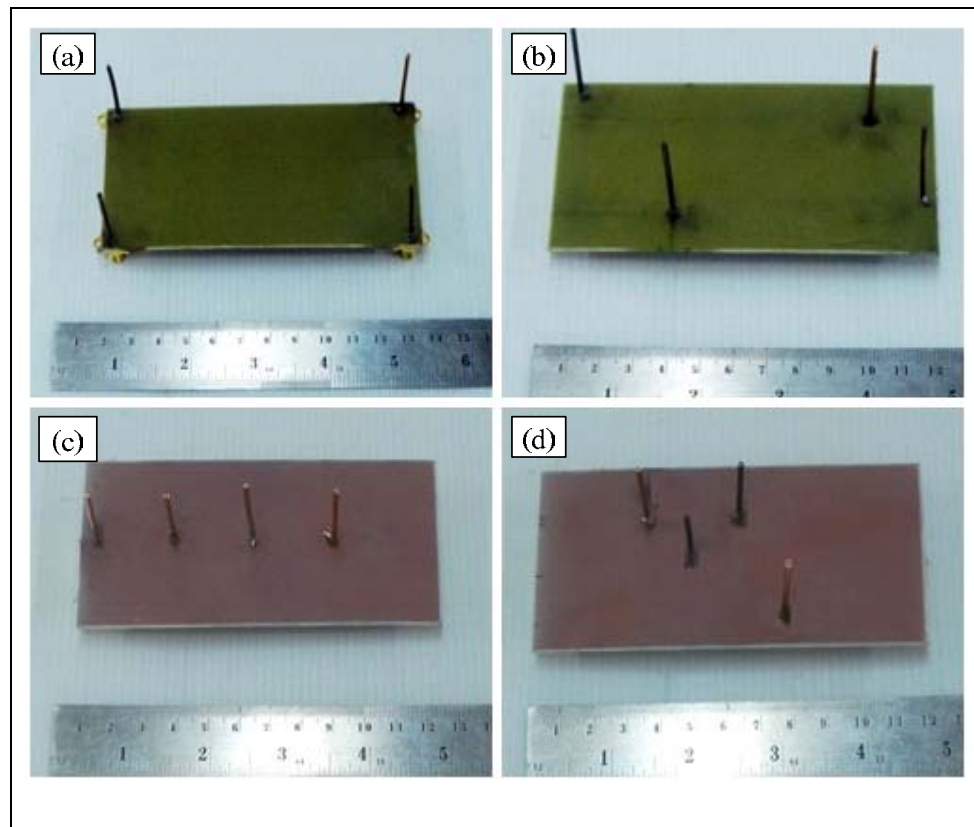
ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ		
$45.2170 + 1.9319i$	$46.2529 - 6.4398i$	$49.6559 + 3.3805i$
$46.2529 - 6.4398i$	$48.7856 + 5.1962i$	$58.2485 - 0.0352$
$49.6559 + 3.3805i$	$58.2485 - 0.0352$	$43.8575 + 2.6449i$

ตารางที่ 4.14 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (c)

ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ		
$43.5483 + 9.8344i$	$57.3383 + 34.6093i$	$43.9455 - 0.6267i$
$57.3383 + 34.6093i$	$32.7836 - 3.5909i$	$39.0168 - 15.5302i$
$43.9455 - 0.6267i$	$39.0168 - 15.5302i$	$40.5706 + 12.5839i$

ตารางที่ 4.15 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 3 ต้นในกรณี (d)

ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ		
$66.2659 - 2.1630i$	$44.8552 - 17.8197i$	$52.7667 - 2.5044i$
$44.8552 - 17.8197i$	$62.3751 - 7.3388i$	$68.6169 - 38.8172i$
$44.8552 - 17.8197i$	$52.7667 - 2.5044i$	$54.7666 + 1.0867i$



รูปที่ 4.24 แสดงการจัดวางสายอากาศ 4 ต้นในแต่ละกรณี

ตารางที่ 4.16 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (a)

ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ			
$35.322 - 22.040i$	$62.268 - 2.181i$	$55.434 - 4.269i$	$48.447 - 0.675i$
$62.268 - 2.181i$	$37.724 - 21.634i$	$50.566 + 0.329i$	$51.925 - 4.045i$
$55.434 - 4.269i$	$50.566 + 0.329i$	$38.533 - 14.186i$	$53.481 + 0.758i$
$48.447 - 0.675i$	$51.925 - 4.045i$	$53.481 + 0.758i$	$37.322 - 24.040i$

ตารางที่ 4.17 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (b)

ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ			
$40.274 + 7.243i$	$52.639 - 1.831i$	$49.669 - 0.681i$	$48.719 + 0.019i$
$52.639 - 1.831i$	$42.427 - 1.941i$	$53.068 - 2.170i$	$48.862 + 0.543i$
$49.669 - 0.681i$	$53.068 - 2.170i$	$41.051 - 37.868i$	$50.964 - 1.833i$
$48.719 + 0.019i$	$48.862 + 0.543i$	$50.964 - 1.833i$	$43.465 - 31.376i$

ตารางที่ 4.18 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (c)

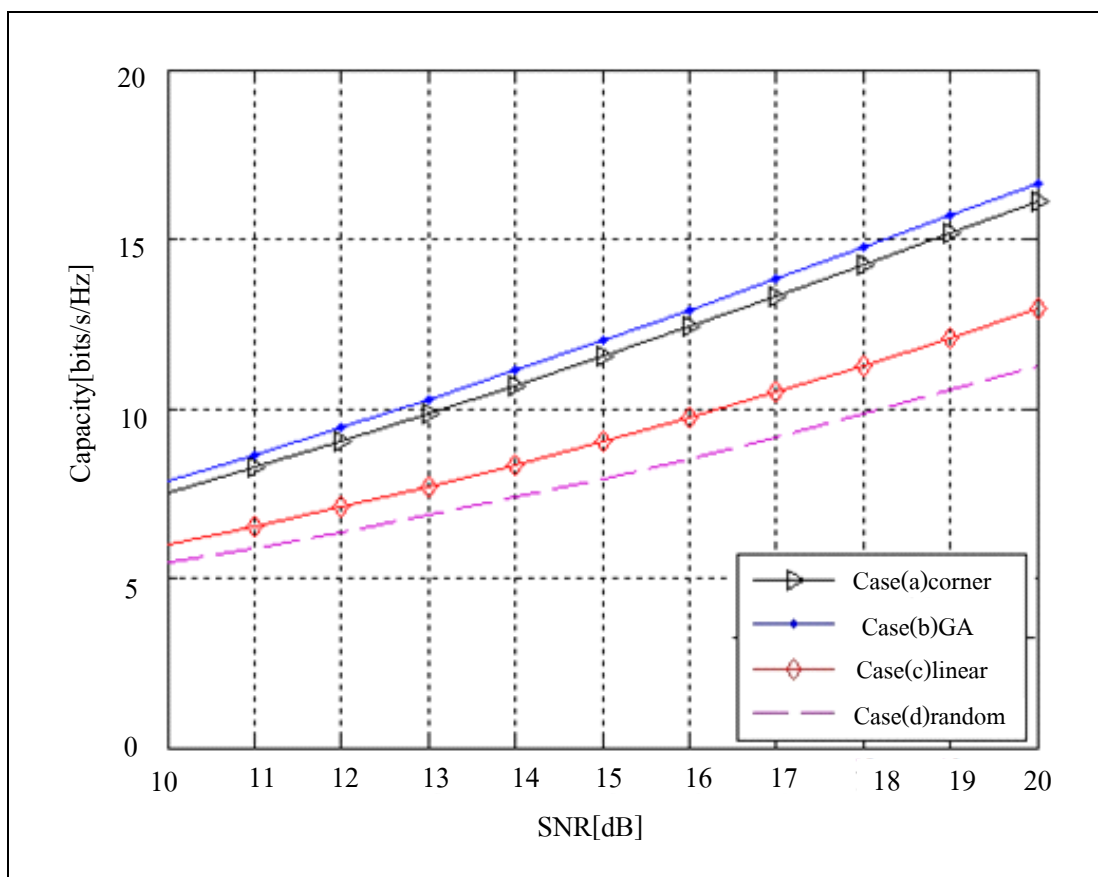
ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ			
$30.718 - 12.426i$	$49.675 + 0.278i$	$50.379 - 0.469i$	$49.632 - 0.173i$
$49.675 + 0.278i$	$35.627 - 7.659i$	$50.957 + 1.077i$	$51.131 - 0.385i$
$50.379 - 0.469i$	$50.957 + 1.077i$	$27.971 - 6.877i$	$49.078 - 2.259i$
$49.632 - 0.173i$	$51.131 - 0.385i$	$49.078 - 2.259i$	$30.138 - 8.137i$

ตารางที่ 4.19 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณี (d)

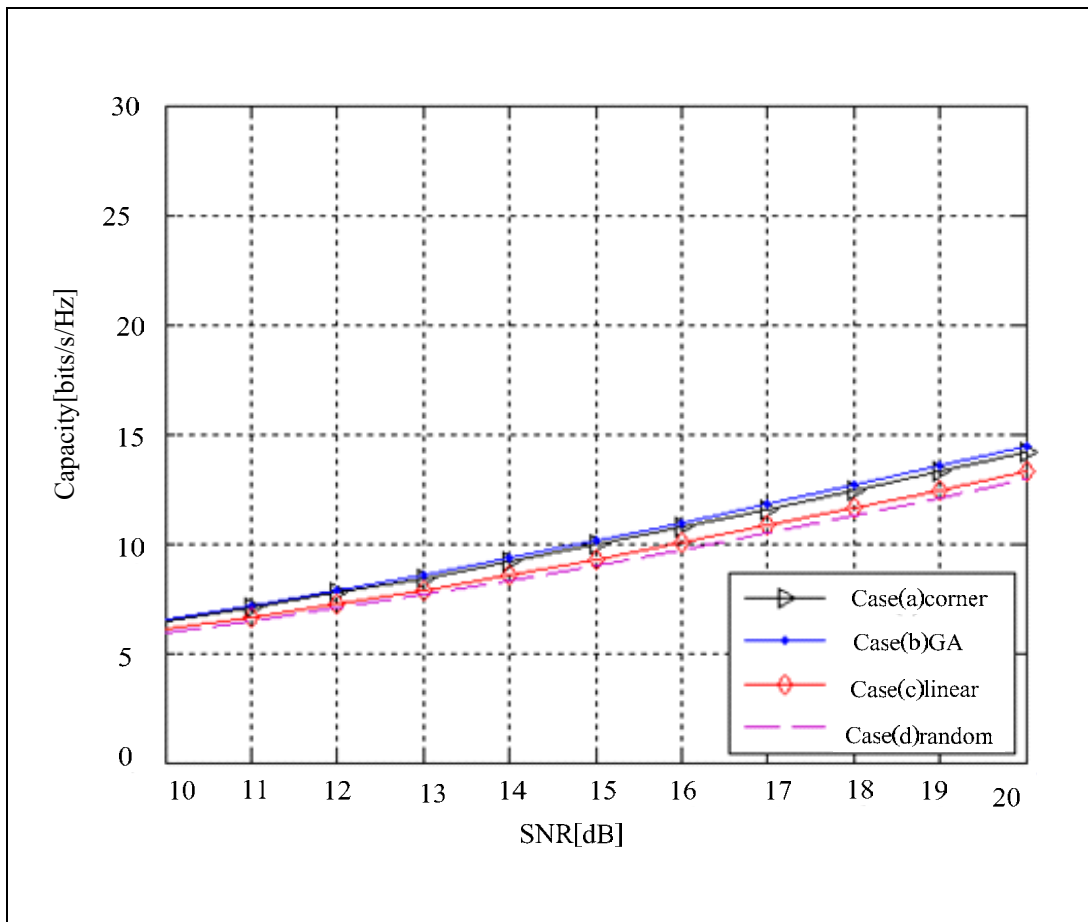
ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ			
$62.350 - 14.028i$	$51.925 - 9.527i$	$45.059 - 4.120i$	$49.856 + 3.626i$
$51.925 - 9.527i$	$42.760 - 5.224i$	$49.856 + 3.626i$	$45.059 - 4.120i$
$45.059 - 4.120i$	$49.856 + 3.626i$	$68.557 - 9.958i$	$51.925 - 9.527i$
$49.856 + 3.626i$	$45.059 - 4.120i$	$51.925 - 9.527i$	$70.192 - 9.163i$

#### 4.5 การหาความจุช่องสัญญาณ

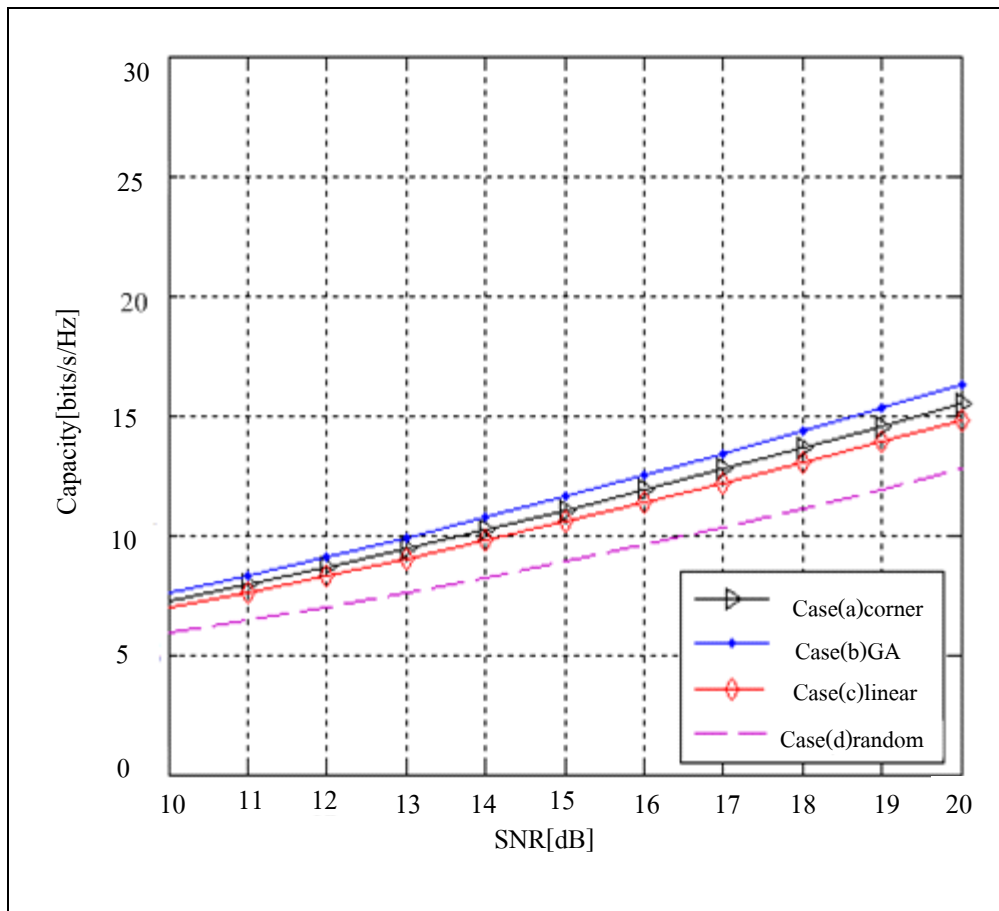
การหาความจุของช่องสัญญาณในวิทยานิพนธ์นี้จะเปรียบเทียบผลความจุช่องสัญญาณ 3 ส่วนเมื่อได้ค่าผลตำแหน่งการจัดวางสายอากาศจากโปรแกรมวิธีจินเนติกอัลกอริทึม สามารถนำมาหาความจุของช่องสัญญาณนำมาเปรียบเทียบกับการจัดวางสายอากาศในกรณีอื่น ๆ ได้และเมื่อได้ผลตำแหน่งของการจัดวางสายอากาศจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึม และได้นำมาจำลองผลตำแหน่งผ่านโปรแกรม CST microwave studio และวัดจริง ซึ่งจะได้อิมพีแดนซ์เพื่อนำไปแทนในสมการ 3.10 แล้วทำการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมเมทแลป จะสามารถหาความจุของช่องสัญญาณได้ดังต่อไปนี้



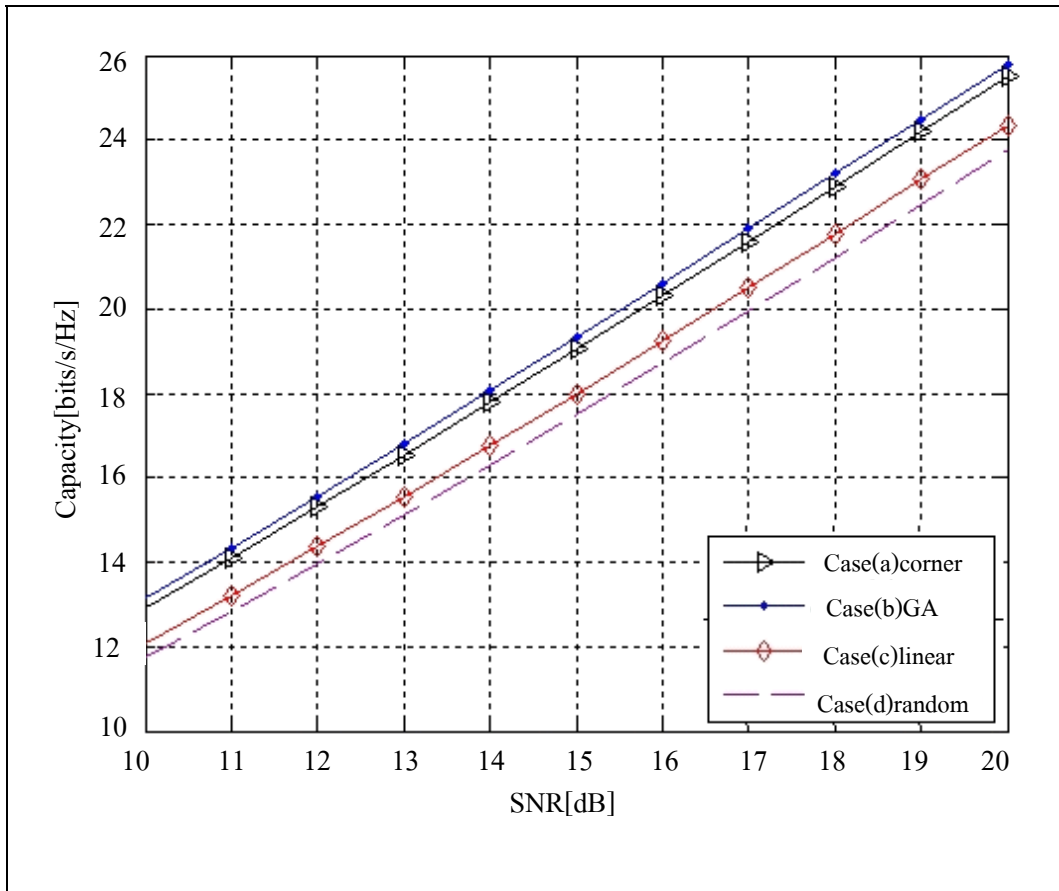
รูปที่ 4.25 ความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในกรณีโมโม 3x3 โดยใช้ผลตำแหน่งจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึม



รูปที่ 4.26 ความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในกรณี  
โมโม 3x3 โดยใช้ผล Z อิมพีแดนซ์จากโปรแกรม CST microwave studio

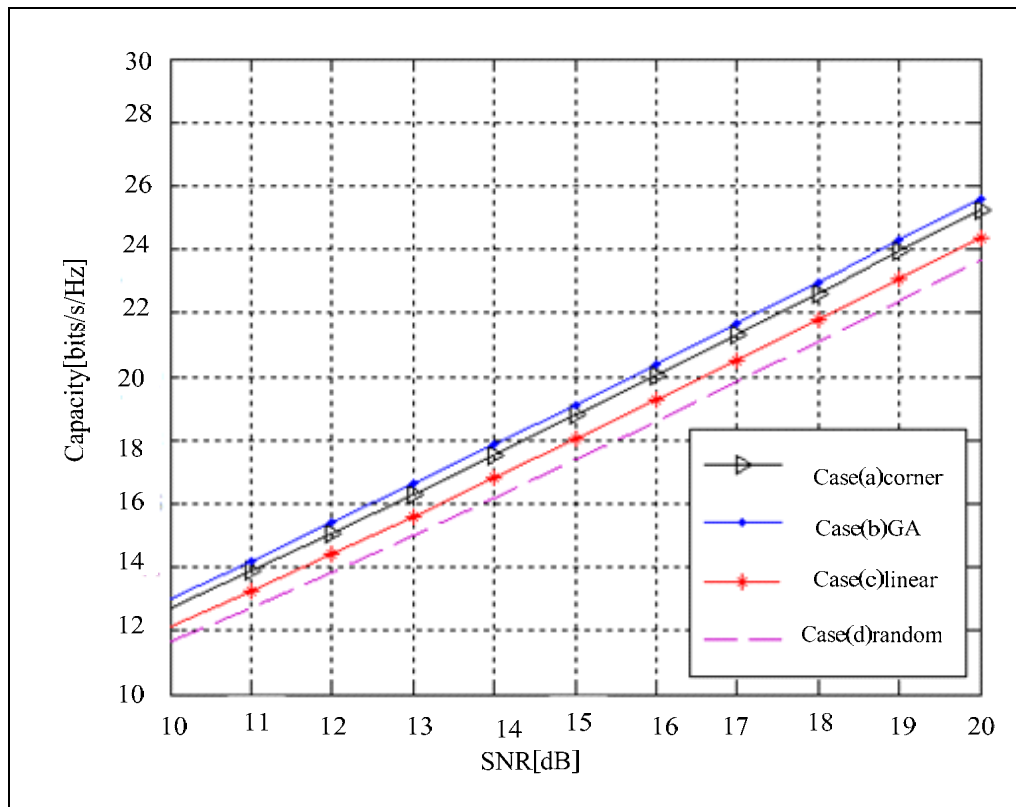


รูปที่ 4.27 ความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในกรณี  
โมโม 3x3 โดยใช้ผล Z อิมพีแดนซ์จากการวัดจริง

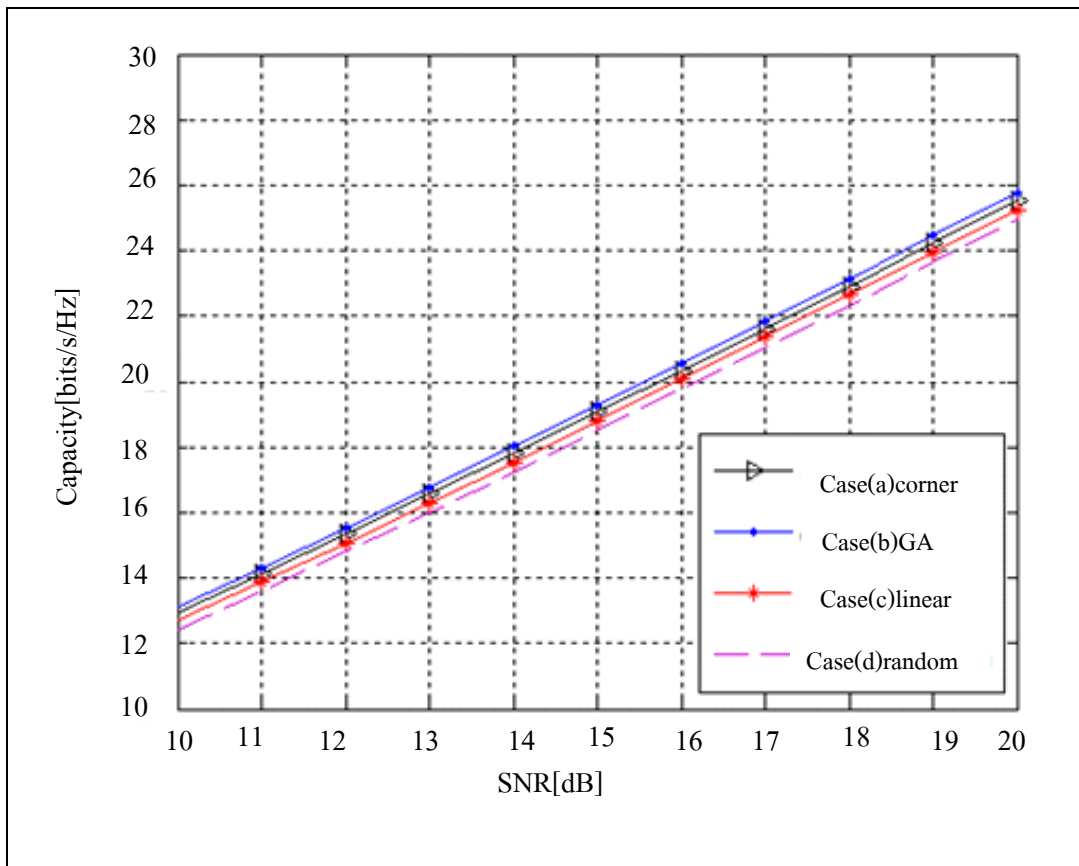


รูปที่ 4.28 ความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน  
ในกรณีโม โม 4x4 โดยใช้ผลตำแหน่งจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึม





รูปที่ 4.29 ความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในกรณีโมโม 4x4 โดยใช้ผล Z อิมพีแดนซ์จากโปรแกรม CST microwave studio



รูปที่ 4.30 ความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน  
ในกรณีโมโม 4x4 โดยใช้ผล Z อิมพีแดนซ์จากจากการวัดจริง

#### 4.5.1 วิเคราะห์ผลการจำลองแบบและการทดสอบ

จากการทดสอบการจำลองแบบโดยโปรแกรมเมทแลปเพื่อหาตำแหน่งการจัดวางสายอากาศบนอุปกรณ์โทรศัพท์ที่เคลื่อนในระบบ MIMO 3x3 และ 4x4 ซึ่งใช้วิธีจินเนติกอัลกอริทึมเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดซึ่งผลตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมได้ผลค่าความจุช่องสัญญาณที่ดีที่สุดเปรียบเทียบกับตำแหน่งในกรณีอื่น ๆ ทั้งผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST microwave studio และการวัดจริง ซึ่ง ผลการทดสอบแสดงว่าผลของตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีความถูกต้องและให้ผลค่าความจุช่องสัญญาณมากกว่ากรณีเปรียบเทียบอื่นๆกรณีการทดลองดังกล่าวสามารถเป็นที่ยืนยันว่าการจัดวางสายอากาศด้วยตำแหน่งที่ได้จากการหาคำตอบที่ดีที่สุดจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึม สามารถมาเพิ่มความจุของช่องสัญญาณได้

#### 4.6 จากการศึกษาตำแหน่งการจัดวางสายอากาศด้วยเทคนิควิธีจีนเนติกอัลกอริทึมในช่องสัญญาณแบบ “Two-Ring” โดยพิจารณามุมที่กระทำกันระหว่างภาครับและภาคส่ง

ผลจากการจำลองแบบในการหาระยะและตำแหน่งการจัดวางตัวของสายอากาศบนโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยใช้ optimization toolbox ในโปรแกรมแมทแล็บโดยหาตำแหน่งการจัดวางสายอากาศในช่องสัญญาณแบบ “Two-Ring” โดยพิจารณามุมที่กระทำกันระหว่างภาครับและภาคส่งจากรูปที่ 2.3 โดยจะทำการหาตำแหน่งของการจัดวางสายอากาศในระบบ MIMO 4x4 ซึ่งจะได้ตำแหน่งในแต่ละกรณีดังตารางที่ 4.20 โดยได้ทำการจำลองผลผ่านโปรแกรมแมทแล็บ และทำการวัดจริงโดยผ่านเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย เพื่อวัดค่าอิมพีแดนซ์

ตารางที่ 4.20 แสดงผลตำแหน่งการจัดวางสายอากาศซึ่งได้จากวิธีจีนเนติกอัลกอริทึมในแต่ละกรณี

MIMO 4x4 Case	ตำแหน่งการจัดวางสายอากาศบนพิกัด $x$ $y$ (มิลลิเมตร)			
	Antenna (1)	Antenna (2)	Antenna (3)	Antenna (4)
360-360	11.94,14.14	59.85,1.77	16.48,97.08	46.84,104.99
360-60	16.52,19.36	49.27,12.478	19.87,95.20	48.19,97.82
60-360	14.08,16.68	52.51,8.11	16.83,99.42	44.2,94.48
60-60	16.38,10.4	51.91,12.38	15.58,88.96	47.37,87.62
average	14.73,15.14	53.39,8.68	17.19,95.17	46.65,96.23

ตารางที่ 4.21 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณีมุมส่งที่ 360 และมุมรับที่ 360

ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ			
$44.137 + 2.431i$	$52.324 - 3.974i$	$51.552 - 1.493i$	$48.457 - 0.011i$
$52.324 - 3.974i$	$47.164 + 5.033i$	$50.782 - 1.465i$	$49.133 - 1.681i$
$51.552 - 1.493i$	$50.782 - 1.465i$	$47.943 + 0.896i$	$52.894 - 1.401i$
$48.4578 - 0.011i$	$49.133 - 1.681i$	$52.894 - 1.401i$	$46.435 - 1.148i$

ตารางที่ 4.22 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณีมุมส่งที่ 360 และมุมรับที่ 60

ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ			
$44.124 + 0.430i$	$47.387 - 3.394i$	$52.197 + 1.595i$	$51.779 - 0.340i$
$47.387 - 3.394i$	$46.786 + 5.059i$	$50.450 - 1.085i$	$52.630 + 0.130i$
$52.197 + 1.595i$	$50.450 - 1.085i$	$45.254 + 3.870i$	$52.701 + 0.232i$
$51.779 - 0.340i$	$52.630 + 0.130i$	$52.701 + 0.239i$	$46.715 + 1.057i$

ตารางที่ 4.23 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณีมุมส่งที่ 60 และมุมรับที่ 360

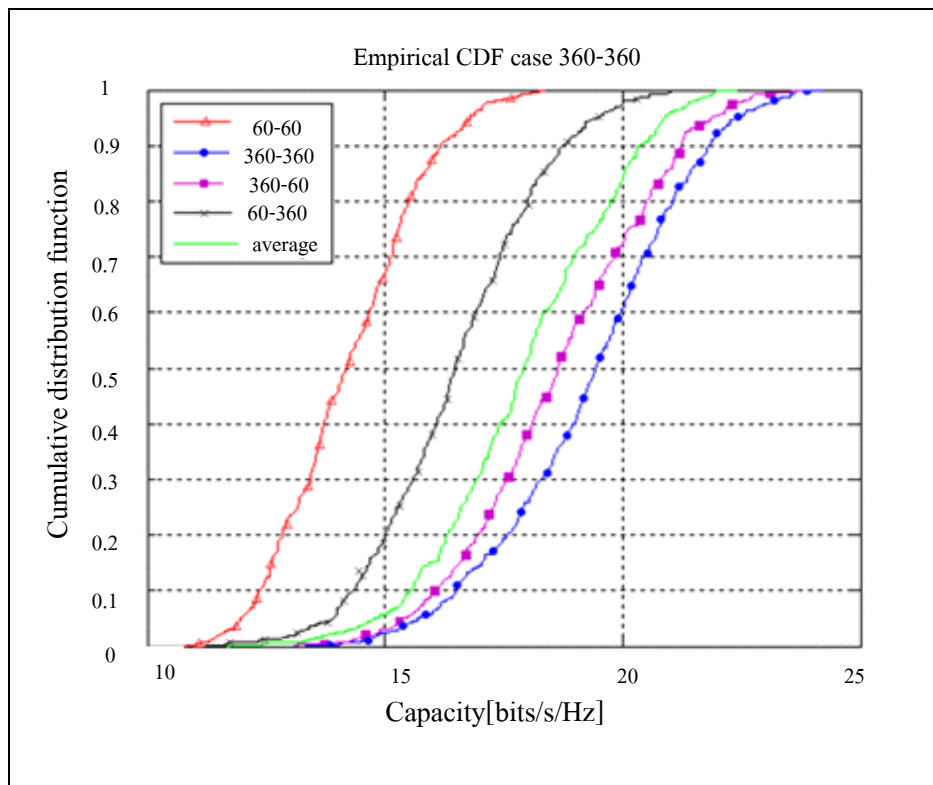
ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ			
$44.351 - 1.377i$	$49.451 - 4.223i$	$51.872 + 1.608i$	$52.324 + 2.592i$
$49.451 - 4.227i$	$45.205 + 2.726i$	$50.436 - 1.071i$	$53.174 - 1.174i$
$51.872 + 1.601i$	$50.436 - 1.071i$	$43.185 + 2.633i$	$53.195 - 0.344i$
$52.324 + 2.599i$	$53.174 - 1.174i$	$53.195 - 0.344i$	$47.849 - 0.716i$

ตารางที่ 4.24 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณีมุมส่งที่ 60 และมุมรับที่ 60

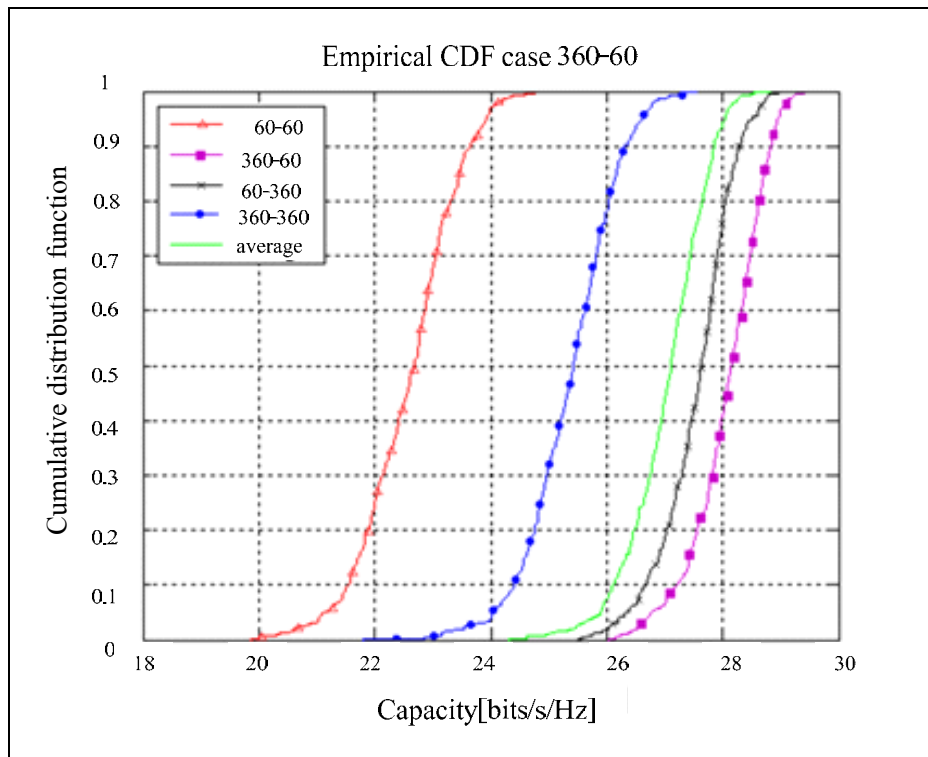
ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ			
$46.021 + 2.017i$	$53.447 - 3.407i$	$51.645 + 1.425i$	$52.020 + 0.781i$
$53.447 - 3.407i$	$50.245 + 4.352i$	$51.572 - 0.365i$	$52.101 + 0.654i$
$51.645 + 1.425i$	$51.572 - 0.365i$	$45.677 - 0.470i$	$53.937 - 1.697i$
$52.020 + 0.781i$	$52.101 + 0.654i$	$53.937 - 1.697i$	$50.620 - 2.089i$

ตารางที่ 4.25 แสดงค่า  $z$  อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 4 ต้นในกรณีค่าเฉลี่ยจากกรณีทั้งหมด

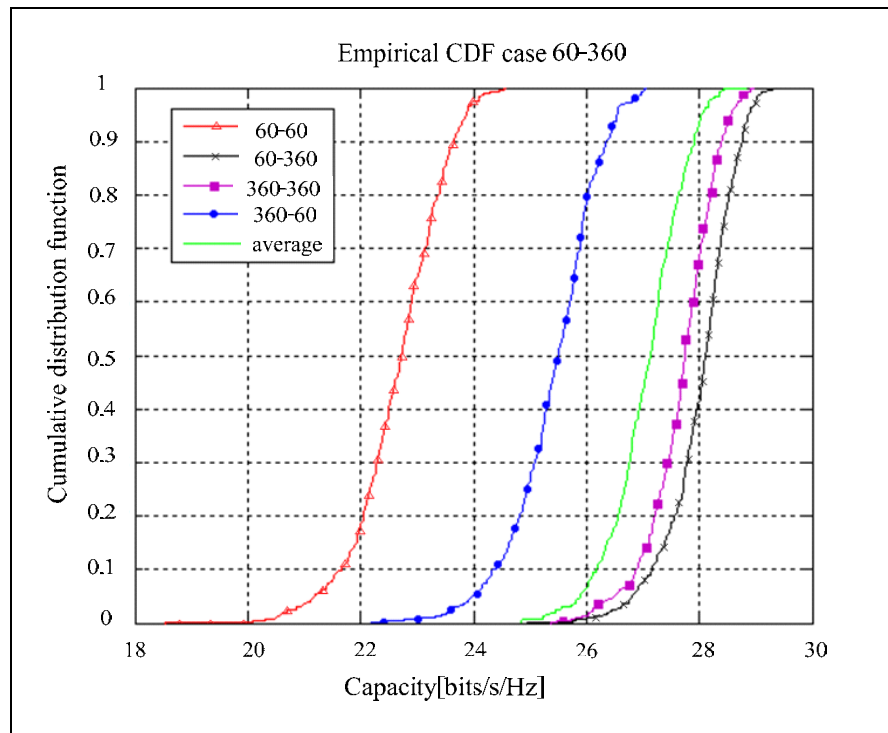
ค่า $z$ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ			
43.331 - 1.339i	48.559 - 3.923i	52.873 + 1.729i	52.334 - 4.512i
48.559 - 3.923i	42.215 + 4.723i	49.426 - 1.271i	52.234 + 1.224i
52.873 + 1.729i	49.426 - 1.271i	44.292 - 2.613i	51.421 + 1.239i
52.334 - 4.512i	52.234 + 1.224i	51.421 + 1.239i	43.849 - 0.216i



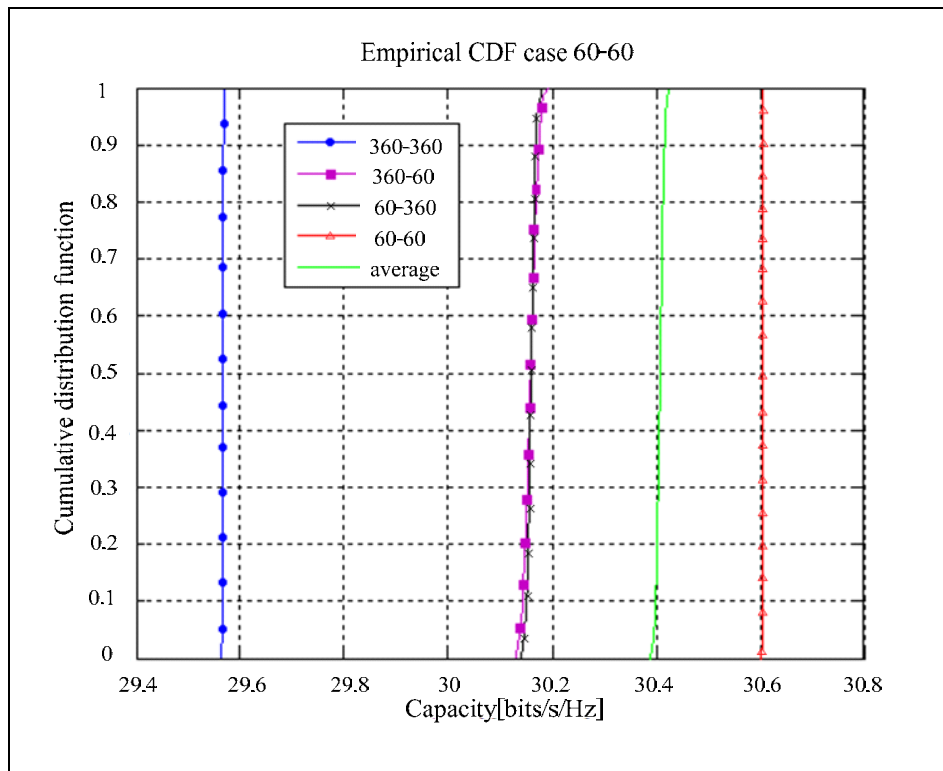
รูปที่ 4.31 ความจุช่องสัญญาณ CDF สำหรับมุมส่งที่ 360 และมุมรับที่ 360 เปรียบเทียบกับกรณีอื่น



รูปที่ 4.32 ความจุช่องสัญญาณ CDF สำหรับมอดูมส์ที่ 360 และมอดูมส์ที่ 60 เปรียบเทียบกับกรณีอื่น



รูปที่ 4.33 ความจุช่องสัญญาณ CDF สำหรับมอดูมส์ที่ 60 และมอดูมส์ที่ 360 เปรียบเทียบกับกรณีอื่น



รูปที่ 4.34 ความจุช่องสัญญาณ CDF สำหรับมุมส่งที่ 60 และมุมรับที่ 60 เปรียบเทียบกับกรณีอื่น

#### 4.6.1 วิเคราะห์ผลการจำลองแบบและการทดสอบ

จะเห็นว่าผลตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมจะได้ผลของค่าความจุช่องสัญญาณที่ดีที่สุดในการณ์ของตัวเองซึ่งเปรียบเทียบกับกรณีอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าผลตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมให้ผลที่ถูกต้องและผลของค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเป็นผลที่สามารถใช้ได้จริงซึ่งดูจากรูปที่ 4.31 4.32 4.33 และ 4.34 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยจะให้ผลความจุช่องสัญญาณที่ดีเป็นอันดับต้น ๆ ซึ่งแสดงถึงว่าค่าเฉลี่ยของตำแหน่งก็สามารถนำมาใช้งานได้ การทดลองดังกล่าวสามารถเป็นที่ยืนยันว่าการจัดวางสายอากาศด้วยตำแหน่งที่ได้จากการหาคำตอบที่ดีที่สุดจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมโดยพิจารณาในช่องสัญญาณที่แตกต่างกันก็ยังคงให้ผลดีและแม่นยำ



#### 4.7 สรุป

ในบทนี้แสดงผลที่ได้จากการจำลองผลโดยวิเคราะห์ผลจากการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการจัดวางตัวของสายอากาศโดยพิจารณาถึงผลกระทบจากปรากฏการณ์การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศรวมถึงการจำลองผลและการทดลองสำหรับการวัดจริงโดยพิจารณาใน 2 ช่องสัญญาณที่แตกต่างกันคือในช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกันโดยพิจารณาช่องสัญญาณการจางหายแบบเลย์ลีและช่องสัญญาณแบบ “Two-Ring” โดยพิจารณามุมที่กระทำกันระหว่างภาครับและภาคส่ง จากผลที่ได้จากการค้นหาตำแหน่งการจัดวางสายอากาศในการพิจารณาความจุช่องสัญญาณ ผลที่ได้จากการจัดวางสายอากาศด้วยตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าตำแหน่งการจัดวางสายอากาศในกรณีอื่น ๆ ไม่ว่าจะพิจารณาช่องสัญญาณแบบไหน

## บทที่ 5

### สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการเพิ่มความจุของช่องสัญญาณในระบบไมโมโดยพิจารณาถึงการหาตำแหน่งการจัดวางสายอากาศในตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดบนโครงสร้างเคลื่อนที่ โดยพิจารณาถึงผลกระทบของปรากฏการณ์การเชื่อมต่อร่วมที่กระทำกันระหว่างสายอากาศโดยใช้ทฤษฎี N พอร์ตเข้ามาเพื่อพิจารณาผลกระทบของปรากฏการณ์การเชื่อมต่อร่วมซึ่งปรากฏการณ์การเชื่อมต่อร่วมเกิดขึ้นจากการกระทำร่วมกันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับที่อยู่ในบริเวณตำแหน่งที่ใกล้เคียงซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบไมโมโดยจะส่งผลกระทบต่อค่าความจุของช่องสัญญาณ ซึ่งไม่มีวิทยานิพนธ์ใดศึกษาถึงผลกระทบของตำแหน่งการจัดวางสายอากาศบนโครงสร้างเคลื่อนที่ในระบบไมโม จึงทำการเริ่มวิเคราะห์ผลกระทบของตำแหน่งการจัดวางสายอากาศบนอุปกรณ์โครงสร้างเคลื่อนที่โดยพิจารณา 2 ระบบช่องสัญญาณที่แตกต่างกันคือช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน โดยพิจารณาช่องสัญญาณการจางหายแบบเลย์ลีและช่องสัญญาณช่องสัญญาณแบบ “Two-Ring” โดยพิจารณามุมที่กระทำกันระหว่างภาครับและภาคส่ง ในวิทยานิพนธ์นี้จึงการนำเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดมาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งสำหรับการจัดวางสายอากาศโดยเลือกเทคนิคจินเนติกอัลกอริทึมซึ่งมีการค้นหาคำตอบที่ประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับแม่เหล็กไฟฟ้าและการออกแบบสายอากาศในวิทยานิพนธ์ต่าง ๆ และสำคัญการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ยังมีหน้าต่างเครื่องมือที่พร้อมใช้งานในโปรแกรมแมทแล็บที่เรียกว่า optimization toolbox ซึ่งสามารถใช้งานได้ง่าย มีแม่นยำและความถูกต้องของคำตอบ จากผลการจัดวางสายอากาศด้วยตำแหน่งที่ได้ทำการค้นหาด้วยเทคนิคดังกล่าวเมื่อมาเปรียบเทียบกับ การจัดวางสายอากาศ ในกรณีอื่น ๆ เพื่อเป็นการยืนยันผลตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ผู้วิจัยได้ทำการจำลองผลตำแหน่งโดยใช้โปรแกรม CST microwave studio ทดสอบผลก่อนทำการสร้างวัดจริง

จากผลทั้งหมดที่ได้กล่าวมานี้ เราสามารถสรุปได้ว่าตำแหน่งของการจัดวางสายอากาศมีผลต่อค่าความจุของช่องสัญญาณในระบบไมโมซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการหาตำแหน่งของการจัดวางสายอากาศโดยใช้วิธีจินเนติกอัลกอริทึม ให้ผลที่น่าเชื่อถือโดยได้เปรียบเทียบกับระบบ

2 ช่องสัญญาณที่แตกต่างกันซึ่งผลที่ได้ก็ได้อาจแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของการจัดวางสายอากาศซึ่งได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมสามารถให้ผลที่เชื่อถือได้ ในเบื้องต้นวิทยานิพนธ์นี้ก็ได้ทำการหาดำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการจัดวางสายอากาศบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบบโมโม ซึ่งก็จะเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติเพื่อเพิ่มสมรรถนะของการรับสัญญาณในระบบการสื่อสารไร้สายได้

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการหาดำแหน่งของการจัดวางสายอากาศที่เหมาะสมบนพื้นที่จำกัดโดยอ้างอิงโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยได้เลือกใช้สายอากาศโมโนโพลซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์จากการคำนวณซึ่งในโทรศัพท์เคลื่อนที่ไม่ได้ใช้สายอากาศชนิดนี้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นสำหรับวิทยานิพนธ์อนาคตจึงควรมีการใช้สายอากาศชนิดที่ใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่เช่น สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna) สายอากาศพื้ (pifa antenna) เป็นต้นเพื่อนำมาพิจารณาสำหรับการหาดำแหน่งที่เหมาะสมของการจัดวางสายอากาศบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ต่อไป

## รายการอ้างอิง

- รังสรรค์ วงศ์สวรรค์. (2552). **วิศวกรรมสายอากาศ**. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชา  
วิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- Andrea, G. (2005) **Wireless Communications**, Stanford University, Chap. 10.
- Andera, Goldsmith. Senior Member. (2003) **Capacity limits of MIMO Channels**, Vol.21 ,no.5,  
: pp.684-702
- Constantine, A. Balanis. (1997). **Antenna Theory: Analysis And Design 2<sup>nd</sup>** , John Wiley &  
Sons,Inc. 1997
- Da-Shan, S., Foschini, G. J., Gans, M. J., and Kahn, J. M. (2000) **Fading Correlation and its  
Effect on the Capacity of Multielement Antenna Systems**. IEEE Transactions on  
Communications, vol. 48, no. 3 : pp. 502-513.
- David, M. Pozar. (1998).**Microwave Engineering 2<sup>nd</sup> edition**, John Wiley & Sons,Inc. 1998
- Foschini, G., J. (1996) **Layered space-time architecture for wireless communication  
in a fading environment when using multielement antennas**. Bell Labs Technical Journal. : p  
p41-59.
- Foschini, G. L., and Gans, M. J. (1998) **On limit of wireless communications in a fading  
environment when using multiple antennas**. Wireless Personal Communications. : pp 311-  
335.
- Goldberg, D. E. (1989) **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**,  
Reading, MA: Addison-Wesley,
- Innok, A., Uthansakul, P., and Uthansakul, M. (2009) **The Enhancement of MIMO Capacity  
using Angle Domain Processing Based on Measured Channels**. APMC Singapore,  
: pp. 2172-2175.
- Kermoal, J.P., Mogensen, E., Jensen, S.H., Andersen, J.B., Frederiksen, F., Sorensen, T.B., and  
Pedersen, K.I. (2000) **Experimental investigation of multipath richness for multi-  
element transmit and receive antenna array**. IEEE 51<sup>st</sup> Vehicular Technology  
Conference Proceedings, No. 3 : pp 2004-2008.

- Ming, K., and Alouini, M.S. (2003) **Impact of correlation on the capacity of MIMO channels.** IEEE International Conference on Communications, Vol. 4 : pp 2623-2627.
- Molisch, A.F., Steinbauer, M., Toeltsch, M., Bonek, E., and Thoma, R.S. (2002) **Capacity of MIMO systems based on measured wireless channel.** IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 20, No. 3 : pp 561-569.
- Okano, Y., and Cho, K. ( 2004) **Monopole antenna array arrangement for card-type mobile Terminal.** Radio and Wireless Conference, IEEE 19-22 : pp. 415 – 418.
- Rahmat-Samii, Y., and Michielssen, E. (1999) **Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms,** New York, Wiley, Chapter 8.
- Svantesson, T., and Ranheim, A. (2001) **Mutual coupling effects on the capacity of multielement antenna systems.** in Proc.IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'01), Salt Lake City, UT : pp. 2485–2488.
- Srikaew, A. (2002) **Genetic algorithm –Part I,** Suranaree J. Sci. Techno, : pp.69-83.
- Svantesson T., and Ranheim, A. (2001) **Mutual coupling effects on the capacity of multielement antenna systems.** in Proc.IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'01), Salt Lake City, UT : pp. 2485–2488.

ภาคผนวก ก

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

## บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Assanuk, D., Uthansakul, M. and Uthansakul, P. (2009) **Optimal antenna positions on mobile terminal for 4×4 MIMO systems.** International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology, Pattaya, Thailand, 6-9 May 2009 : pp 840-843.

Assanuk, D., Uthansakul, P., and Uthansakul, M. (2010) **The use of genetic algorithm for designing MIMO antenna placement.** International Conference on Computer and Information Application, Tianjin, China 3-5 December, 2010. (accepted)

# Optimal Antenna Positions on Mobile Terminal for 4x4 MIMO Systems

Danai Assanuk, Monthippa Uthansakul and Peerapong Uthansakul  
School of Telecommunication Engineering Suranaree University of Technology  
Muang,Nakhon Ratchasima ,Thailand 30000  
E-mail: m5140817@g.sut.ac.th, mtp@sut.ac.th and uthansakul@sut.ac.th

**Abstract**—The topic on practical implementation of MIMO systems for mobile communications gains a lot of attention, recently. Due to the area constraint on mobile terminal, the number of antennas is limited by antenna layout. The problem of how to design such a system in order to achieve the best benefit is still a huge challenge. In this paper, the attempt to realize the optimal antenna positions on mobile terminal for 4x4 MIMO systems is presented. The analysis is focused on the all possible positions of arranging four antennas on rectangular area. The spatial fading correlation and mutual coupling effects are the main considerations used for examining the maximum MIMO capacity obtained by optimal antenna positions. The simulation results indicate that the best capacity performance can be obtained when four antennas are located at four corners.

**Index terms**—MIMO; mutual coupling; spatial fading correlation; capacity.

## I. INTRODUCTION

With the rapid growth of mobile communications, the new services are driven by users' demand requiring more and more data rate. In this light, the user of Multiple Input Multiple Output (MIMO) has been promisingly supported such a requirement by providing enormous capacity as well as maintaining spectrum efficiency. The concept of MIMO systems is to apply multiple antennas on both transmitter and receiver in order to achieve diversity and beamforming gains [1]-[2]. The more antennas are used, the more benefits are obtained. For mobile communications, the main concern of applying MIMO systems is on the size of mobile terminal. In general, the size has to be as small as comfortably handled by users. Therefore, the limited area on mobile terminal is the key constraint of designing MIMO systems. As a result, the challenge is to design configuration of MIMO antennas on mobile terminal in order to achieve the best performance.

In [3], the design of multiple antennas on mobile handset to devise small antenna for mobile handset was presented. The modified PIFA and PCE antennas reducing the influence of PCB on the antenna were also proposed in [3]. In [4]-[6], the modified PIFA antennas applied for MIMO systems on mobile handset was presented. The results indicated the increase of channel capacity by using the modified PIFA while the antenna configuration provided a low mutual coupling and low correlation coefficient. A 2x2 MIMO antennas built for mobile terminal was proposed in [7] by using a folded loop antenna with balanced feed and a parallel plane antenna with

unbalanced feed. In [8], the effect of antenna placement on PDA and the proximity of the human hand were presented. It indicates that the MIMO performance is significantly influenced by different antenna layouts. The work in [7] can provide the best antenna placement by comparing between two different antenna layouts. However, the studies in literature do not search all possible antenna positions to gain the best MIMO performance.

In this paper, the optimal antenna positions are determined by considering the spatial fading correlation and mutual coupling effect on all possible positions of mobile terminal. The 4x4 MIMO systems is considered on the rectangular shape of mobile handset. The operating frequency band is in 5GHz which support the spectrum of both IEEE 802.11 (WLAN) [9] and IEEE 802.16-2004 (WiMAX) [10].

## II. ANTENNA CONFIGURATION

The paper aims to find the optimal position of antennas so the design on antenna types is out of this scope. In this work, the modified PIFA proposed in [5] are adopted. The reason to choose the modified PIFA is that it is small in size and its characteristic of radiation pattern is omni-directional. The example of four modified PIFA mounted on PCB of mobile terminal is shown in Fig. 1 which the dimension of each modified PIFA is  $12 \times 7 \text{ mm}^2$ . The height of the PIFA is 4 mm. All four modified PIFA antennas are on the same ground plane. The relative permittivity of PCB is 4.7 with 1 mm thickness. The modified PIFA was designed to operate at 5GHz band. A  $50 \Omega$  RG 402 coaxial cable is used as feeding cable for modified PIFA.

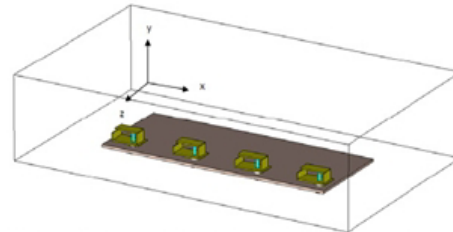


Fig.1 Example of four modified PIFA antennas on mobile terminal.





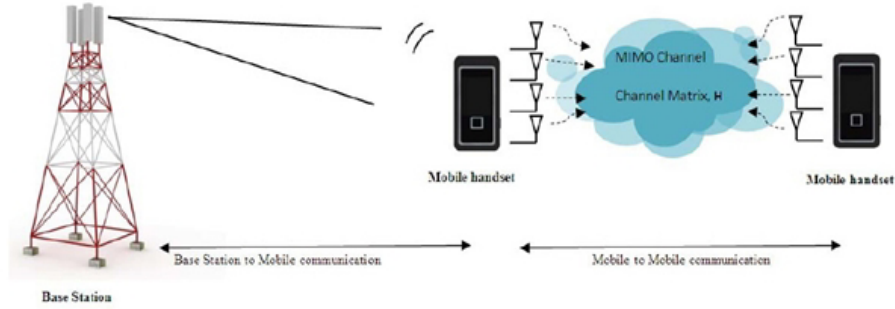


Fig. 2 MIMO systems for mobile communications.

### III. MIMO MODEL

Fig. 2 shows the basic concept of using MIMO systems for mobile communications. There are two approaches, base station to mobile station and mobile to mobile communications. Both approaches are influenced by spatial fading correlation and mutual coupling effect. The basic expression of MIMO systems with  $n_t$  transmit antennas and  $n_r$  receive antennas can be represented by

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

Where  $\mathbf{y}$  is the complex receive array output,  $\mathbf{H}$  is  $n_r \times n_t$  channel matrix,  $\mathbf{x}$  is transmit array vector and  $\mathbf{n}$  is additive Gaussian noise with unit covariance matrix. Then the channel matrix ( $\mathbf{H}$ ) is given by [11]

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_R^{1/2} \mathbf{C}_R \mathbf{H}_W \mathbf{C}_T \mathbf{R}_T^{1/2} \quad (2)$$

where  $\mathbf{H}_W$  is a stochastic  $n_r \times n_t$  MIMO channel matrix with independent, identically distributed (i.i.d) Complex Gaussian random variables with zero mean and unit variance,  $\mathbf{C}_R$  is a coupling matrix at receiver,  $\mathbf{C}_T$  is a coupling matrix at transmitter,  $\mathbf{R}_R$  is a correlation matrix at receiver and  $\mathbf{R}_T$  a correlation matrix at transmitter.

#### A. Spatial Fading Correlation

The spatial fading correlation is the correlation between antennas due to the channel fading. This mainly involves the angular spread at transmitter and receiver. The matrices representing the spatial fading correlations of the transmit antennas and receive antennas are given in (3) and (4), respectively [11].

$$\mathbf{R}_T = \begin{bmatrix} r_{(d_{1,1})} & r_{(d_{1,2})} & \dots & r_{(d_{1,n_t})} \\ r_{(d_{2,1})} & r_{(d_{2,2})} & \dots & r_{(d_{2,n_t})} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{(d_{n_t,1})} & r_{(d_{n_t,2})} & \dots & r_{(d_{n_t,n_t})} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_R = \begin{bmatrix} r_{(d_{1,1})} & r_{(d_{1,2})} & \dots & r_{(d_{1,n_r})} \\ r_{(d_{2,1})} & r_{(d_{2,2})} & \dots & r_{(d_{2,n_r})} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{(d_{n_r,1})} & r_{(d_{n_r,2})} & \dots & r_{(d_{n_r,n_r})} \end{bmatrix} \quad (4)$$

where  $r(d_{i,j})$  is the fading correlation between two contiguous antenna element given in (5).

$$r(d_{i,j}) = \exp(-23 \Delta^2 d_{i,j}^2) \quad (5)$$

where  $\Delta$  is the angular spread and  $d_{i,j}$  is the distance in wavelengths between the  $i$ th and  $j$ th antenna elements [12]. For very small  $r(d_{i,j})$ , the higher order terms of the above matrices can be excluded. Thus the correlation matrices are reduced to diagonal matrices.

#### B. Mutual Coupling Effect

Mutual coupling effect is the interaction between antenna elements. The effects of mutual coupling can be represented in term of coupling matrix  $\mathbf{C}_{T,R}$  which is written as

$$\mathbf{C}_{T,R} = (\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_L)(\mathbf{Z}_{T,R} + \mathbf{Z}_L \mathbf{I})^{-1} \quad (6)$$

where  $Z_A$  is the antenna impedance,  $\mathbf{Z}$  is the mutual impedance matrix,  $Z_L$  is the load impedance of terminal at



each element chosen as the complex conjugate of  $Z_A$  to get an impedance matching for maximum transfer and  $\mathbf{I}$  is the identity matrix. In this paper, the antenna impedances are evaluated by using commercial program named as Computer Simulation Technology (CST) Microwave studio.

### C. Channel Capacity

The ergodic capacity of MIMO Systems is given in [14] and shown here in (7).

$$C = \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I}_{N_k} + \rho \frac{\mathbf{H}\mathbf{H}^H}{N_T} \right) \right] \quad (7)$$

where  $\rho$  denotes the Signal to Noise Ratio (SNR) and  $(.)^H$  denotes the complex conjugate transpose.

### IV. SEARCHING METHOD FOR OPTIMAL ANTENNA POSITIONS

In this paper, the size of mobile terminal is determined to be as small as size of mobile phone with dimension of  $100 \times 40 \text{ mm}^2$ . The searching method for optimal antenna positions is performed by calculating MIMO capacity of all cases which are possible for arranging four antennas on the space of mobile terminal. Only antenna arrangement on two dimensions is examined. Fig. 3 shows the configuration of mobile terminal which each antenna can be located on any grids. Hence, all possible 6,561 cases of antenna arrangement are considered.

Next, the task to find the maximum capacity from all cases can be reduced to concern only the maximum of determinant of correlation matrix  $\mathbf{R}$  and mutual coupling matrix  $\mathbf{C}$ , illustrated in (8).

$$\begin{aligned} \text{Max} C &\Rightarrow \text{Max} \left| \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I}_{N_k} + \rho \frac{\mathbf{H}\mathbf{H}^H}{N_T} \right) \right] \right| \\ &\Rightarrow \text{Max} |\mathbf{H}\mathbf{H}^H| \\ &\Rightarrow \text{Max} |\mathbf{H}| \\ &\Rightarrow \text{Max} |\mathbf{R}_R^{1/2} \mathbf{C}_R \mathbf{H}_W \mathbf{C}_T \mathbf{R}_T^{1/2}| \\ &\Rightarrow \text{Max} |\mathbf{R}| |\mathbf{C}| \end{aligned} \quad (8)$$

First the correlation matrix  $\mathbf{R}$  is investigated. The determinant of matrix  $\mathbf{R}$  versus all cases of antenna positions is shown in Fig. 4. It can be noticed that the determinant value of every case is almost equal to 1 when angle spread is large and it is close to 0 when angle spread is small. It means that the searching of four antenna positions to gain the maximum capacity is meaningless for small and large angle spread.

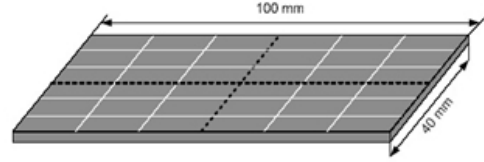


Fig. 3 All possible antenna positions on mobile terminal.

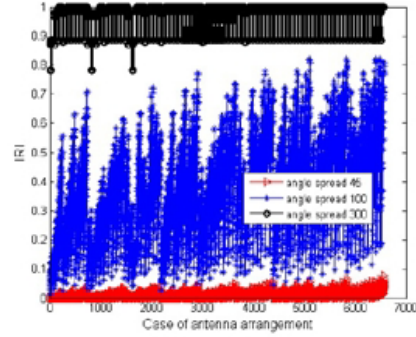


Fig. 4  $|\mathbf{R}|$  vs. all cases of antenna arrangement for  $\Delta = 45, 100, 300$ .

This is because every antenna arrangement provides the similar performance in such an angle spread. For angle spread of 100 degree, the maximum of determinant value can be found by several cases of antenna arrangement. Therefore, in this paper, five cases of the critical antenna positions shown in Fig. 5 are selected to find the optimal antenna positions achieving the best capacity. For mutual coupling effect, the mutual impedance is obtained by using CST Microwave studio.

### V. SIMULATION RESULTS

The capacity is calculated by using (7) with 1,000 runs of channel matrix  $\mathbf{H}_W$ . It is assumed that both transmitter and receiver are under the same condition for 4x4 MIMO systems. From all considerations in the previous section, there are only 5 position cases which are selected to be examined. Five cases are named as (a), (b), (c), (d) and (e) according to the antenna positions referred in Fig. 5. The average capacity versus SNR in dB is presented in Fig. 6. The result reveals that case (a) provides the highest capacity in comparing with other cases. In turn, case (c) gives the lowest capacity. The results emphasizes that the design of antenna positions is very important because it can provide the different performance only if the location of antennas are changed. For example, the gap between capacities of case (a) and (c), at



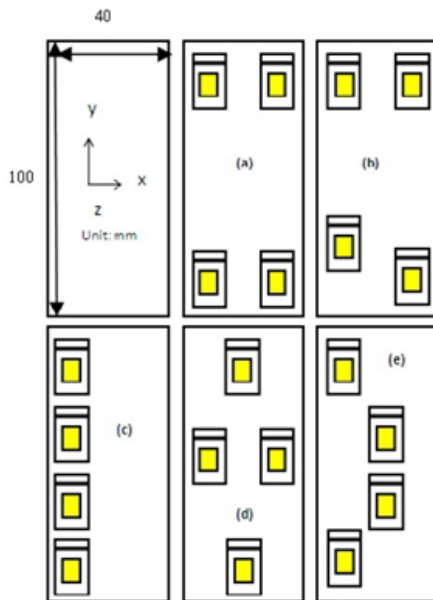


Fig. 5 Five cases of antenna arrangements on mobile terminal.

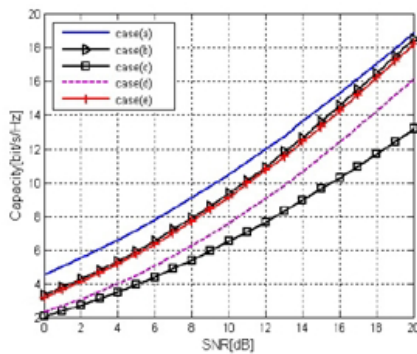


Fig. 6 The average capacity vs. SNR in dB for five cases of antenna positions referred in Fig. 5.

SNR = 10 dB, is about 4 bps/Hz. Also noticed in Fig. 6, the conventional linear array offers the worst capacity performance. This emphasizes that MIMO researchers have to be aware of implementing antenna layout on mobile terminal otherwise the performance is degraded from theoretical results.

Moreover, the authors try to investigate other sizes of rectangular shape. However, the results still indicate that the optimal antenna positions are achieved when four antennas are arranged at the corners as shown in case (a). This investigation is interesting to point out the optimal design on the layout of mobile terminal.

## VI. CONCLUSION

In this paper, the optimal antenna position on mobile terminal for 4x4 MIMO system is presented by searching from all possible antenna positions. The simulation results show that the case of having antennas at four corners of rectangular shape provides the best capacity performance. This investigation reveals an interesting antenna layout for implementing MIMO systems on mobile terminal in practice.

## REFERENCES

- [1] G.J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas", Bell Labs Tech. J., Vol. 1, no 2, pp41-59, Autumn 1996.
- [2] Yonghua Li; Zhiqing He; Kai Niu; Jian Lin; "Cluster-Based Double Bounce MIMO Channel Model and Capacity Wireless Communications, Networking and Mobile Computing", 2007. WiCom 2007. International Conference on Volume, Issue, 21-25 Sept. 2007 Page(s):153-156
- [3] Byung Chan Kim, Ju Derk Park, and Hyung Do Choi, "Tapered Type PIFA Design for Mobile Phones at 1800 MHz", Radio & Broadcasting Technology Lab, Electronics and Telecommunications Research Institute, 161 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350, Korea
- [4] S. Vergerio, J.P. Rossi, P. Sabouroux; "A two-pifa antenna systems for mobile phone at 2 GHz with MIMO applications"; Proc. 'EuCAP 2006', Nice, France 6-10 November 2006 (ESA SP-626, October 2006)
- [5] Y. Gao, C.C. Chiau, X. Chen and C.G. Parini "Modified PIFA and its array for MIMO terminals"; IEE Proc.-Microw. Antennas Propag. Vol. 152, No.4, August
- [6] Gomez-Calero, C.; Gonzalez-Diaz, L.; Martinez-Rodriguez-Osorio, R. Antennas and Propagation Society International Symposium; "Multi-band Planar Inverted-F Antennas for MIMO Mobile Terminal", 2007 IEEE Volume, Issue, 9-15 June 2007 Page(s):2413 - 2416
- [7] Sato, H. Hayashi, T. Koyanagi, Y. Morishita, H. Tokyo; "Small array antenna for 2x2 MIMO terminal using folded loop antenna" Panasonic Mobile Commun. Co., Ltd. in Japan on publication Date: 6-10 Nov. 2006; on page(s): 1-5
- [8] Sema Dumanli, Yasemin Tabak, Chris Railton, Dominique Paul, and Geoff Hilton "The effect of antenna position and environment on MIMO channel capacity for a 4 element array mounted on a PDA." Department of Electrical and Electronics Engineering, Middle East Technical University, TR-06531 Ankara, Turkey; Proceedings of the 9th European Conference on Wireless Technology
- [9] Kapp, S. "802.11a. More bandwidth without the wires", Internet Computing, IEEE, Volume 6, Issue 4, Jul/Aug 2002 Page(s): 75 - 79
- [10] Nuaymi, L. WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access, John Wiley and Sons, 2007
- [11] Da-Shan Shiu, G.J. Foschini, M.J. Gans and J.M. Kahn, "Fading Correlation and its Effect on the Capacity of Multielement Antenna Systems", IEEE Transactions on Communications, vol. 48, no. 3, March 2000, pp. 502-513.
- [12] G.D. Durgin and T.S. Rappaport, "Effects of Multipath Angular Spread on the Spatial Cross-Correlation of Received Voltage Envelopes", 49th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), 1999, vol. 2, pp. 996-1000.
- [13] COA. Balanis, Antenna theory Analysis and Design, 2nd JOHN Wiley, 1997.
- [14] Andera Goldsmith, Senior Member, "Capacity limits of MIMO Channels", Vol. 21, no 5, JUNE 2003, pp. 684-702.



# THE USE OF GENETIC ALGORITHM FOR DESIGNING MIMO ANTENNA PLACEMENT

Peerapong Uthansakul, Danai Assanuk and Monthippa Uthansakul

School of Telecommunication Engineering Suranaree University of Technology NakhonRatchasima, Thailand  
e-mail: uthansakul@sut.ac.th, m5140817@g.sut.ac.th and mtp@sut.ac.th

**Abstract**—The topic of practical implementation of MIMO systems mobile communications has recently gained a lot of attention. Due to the area constraint on a mobile terminal, the problem of how to design such a system in order to achieve the best benefit is still a huge challenge. In this paper, the Genetic Algorithm (GA) is employed to find the optimal antenna placement in order to achieve the best capacity benefit. The effect of mutual coupling based on Z-parameter is the main factor to determine the MIMO capacity systems employconcerning as the objective function of GA search. Two cases of 3x3 and 4x4 MIMO systems are experimentally studied. Both simulation and measurement results confirm the success of the proposed method to design MIMO antenna placement.

**Keywords**—component; MIMO, Genetic algorithm, mutual coupling Z-parameter

## I. INTRODUCTION

With the rapid growth of wireless communications, the new services are driven by user demands which require more and more data rates. In this light, the use of Multiple Input Multiple Output (MIMO) has promisingly supported such a requirement by providing enormous capacity as well as maintaining spectrum efficiency. The concept of MIMO systems has to apply multiple antennas on both transmitter and receiver in order to achieve diversity and beamforming gains [1]. The greater number of antennas used, the more benefits are obtained. Since it requires multiple antenna elements to be closely spaced on a specific area of wireless terminal, this leads to both high correlation between received signals and high mutual coupling among antenna elements. Mutual coupling becomes a key design for multiple antenna systems because a strong coupling results in a loss of efficiency of the antenna systems [2]. For wireless terminal, its dimension trends to be smaller. As a result, this paper focuses on how to arrange multiple antennas under such a condition in order to achieve the best MIMO performance.

In literatures, the study on optimal spacing of linear array was presented in [3]. The fundamental multiple monopole antennas were mounted on an actual mobile terminal. This work concluded that the optimal spacing should be greater than  $0.2 \lambda$ . However, the study was performed on the linear problem in which the arbitrary positions of antenna elements were not studied. In [4], the authors had shown three optimization of multiple antenna positions to increase MIMO capacity by using particle swarm method. The drawback of using particle swarm method is to have a lot of evolution times and it always suffers from boundary

problem. Moreover, the work in [4] provided only simulation results so it lacked some experimental validations.

In this paper, the new approaches using Genetic Algorithm (GA) [5] has been adopted to find the optimal placement of multiple antennas. GA is a class of searching techniques that use the mechanics of natural selection and genetics to conduct a global search of a solution space. The goal of the search is to find a good solution to the given problem. Also, GA is very powerful and can be used in many applications to solve problems. Only in recent years, GA was applied to the field of electromagnetic researches [6]. It was shown that GA was effectively employed to get the optimal solution. In this work, the goal of using GA is to find the optimal antenna placement for MIMO system. The interactions between antenna elements as a function of distance formulate a complex problem on arranging the antenna positions. For such a complex problem, GA has become an attractive approach to conduct a global search for a solution that satisfies specified performance criteria. Both simulation and experimental results are undertaken to confirm the proposed method.

## II. MIMO CAPACITY ANALYSIS

A MIMO system with an antenna array on both ends is considered in this letter. The basic expression of MIMO systems with  $n_t$  transmit antennas and  $n_r$  receive antennas can be represented by

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

Where  $\mathbf{y}$  is the complex receive array output,  $\mathbf{H}$  is a  $n_r \times n_t$  channel matrix,  $\mathbf{x}$  is a transmit array vector and  $\mathbf{n}$  is an additive Gaussian noise with a unit covariance matrix. Now we can focus on the direct impact of mutual coupling (MC) of the compact receive end on the MIMO channel  $\mathbf{H}$  excluding other possible factors which would affect the channel performance. Consider by n-port theory, the channel transfer function between transmit and receive arrays can be represented as [7]

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_T \\ \mathbf{v}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{TT} & \mathbf{Z}_{TR} \\ \mathbf{Z}_{RT} & \mathbf{Z}_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_T \\ \mathbf{i}_R \end{bmatrix} \quad (2)$$





Where  $V_T = [V_{T1}, V_{T2}, \dots, V_{TN}]^T$ ,  $i_T = [i_{R1}, i_{R2}, \dots, i_{RN}]^T$  are the voltage and current at the transmitter, respectively. Similarly,  $V_R = [V_{R1}, V_{R2}, \dots, V_{RN}]^T$ ,  $i_R = [i_{R1}, i_{R2}, \dots, i_{RN}]^T$  are the voltage and current at the receiver. The  $N \times N$  matrices  $Z_{TT}$  and  $Z_{RR}$  are antenna impedance matrices containing the self and mutual impedances of the transmitter and receiver, respectively. The matrix  $Z_{RT}$  stands for the transmission impedance from the transmit array to receive array. Similarly,  $Z_{TR}$  stands for the transmission impedance from the receive array to the transmit array. We assume that we fix voltage  $V_T$  at the transmitter and at the receiver we put loads. We denote the diagonal matrix of loads at the receiver by  $Z_L = \text{diag}[Z_{L1}, Z_{L2}, \dots, Z_{LN}]$ . Under these situation the currents and voltages at the receiver are related through the loads  $V_R = -Z_L I_R$  plugging this into equation (2)

$$V_R = (I_r + Z_{RR}Z_L^{-1} - Z_{RT}Z_{TT}^{-1}Z_{TR}Z_L^{-1})^{-1}Z_{RT}Z_{TT}^{-1}V_T \quad (3)$$

Where  $I_r$  denote the r-dimensional identify matrix. The entries of the matrix  $Z_{TT}$ ,  $Z_{RT}$ ,  $Z_{TR}$  and  $Z_{RR}$  are related to the distance between the corresponding antennas. Since the distance between transmitter and receiver is generally much larger than the distance between elements of an array. Since the last term inside the brackets contains the product of  $Z_{RT}$  and  $Z_{TR}$  it is reasonable to neglect it, thereby obtaining

$$\begin{aligned} V_R &= Z_L(Z_L + Z_{RR})^{-1}Z_{RT}Z_{TT}^{-1}V_T \\ V_R &= Z_L(Z_L + Z_{RR})^{-1}Z_{RT}I_T \end{aligned} \quad (4)$$

Thus, we obtain a very simple and intuitive channel model which agrees with the models considered by antenna array designers [8]

$$H = Z_L(Z_L + Z_{RR})^{-1}Z_{RT}Z_{TT}^{-1} \quad (5)$$

Where the channel  $H$  can be any physical or statistical propagation model which properly reflects the relation of transmitter and receiver defined by  $Z_{RT}$ . Since the channel capacity is determined by the radio propagation conditions of MIMO channel, characterization and modeling of MIMO radio channels for different environments are critical issues. Accuracy of the model used in design plays a vital role in the validity of predicted system performance. For fixed

wireless application, the channel  $H$  can be considered as an deterministic channel.

$$H_{mc} = Z_L(Z_L + Z_{RR})^{-1}HZ_{TT}^{-1} \quad (6)$$

$$Z_{RR}, Z_{TT} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \dots \\ Z_{12} & Z_{22} & Z_{23} & \dots \\ Z_{13} & Z_{23} & Z_{33} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \ddots \end{pmatrix} \quad (7)$$

Where  $Z_{ii}$  is the self-impedance of  $i$ th element and  $Z_{ij}$  is the mutual-impedance between the  $i$ th and  $j$ th elements. In this paper,  $Z_{ji}$  is assumed to be equal to  $Z_{ij}$  according to reciprocity theorem [9]. Where the matching-impedance matrix  $Z_L$  is given as

$$Z_L = \begin{pmatrix} Z_{L1} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & Z_{L2} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & Z_{L3} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \ddots \end{pmatrix} \quad (8)$$

Consider a MIMO system with both ends being a self-conjugated matched system ( $Z_L = Z_{L1}^*$ ) [10]. The real and imaginary parts of  $Z_y$  [11] are given by

$$\text{Re}(Z_y) = \frac{\eta}{4\pi} [2C_i(u_0) - Ci(u_1) - Ci(u_2)], \quad (9)$$

$$\text{Im}(Z_y) = -\frac{\eta}{4\pi} [2S_i(u_0) - Si(u_1) - Si(u_2)], \quad (10)$$

$$u_0 = kd_y, \quad (11)$$

$$u_1 = k(\sqrt{d_y^2 + l^2} + l), \quad (12)$$

$$u_2 = k(\sqrt{d_y^2 + l^2} - l), \quad (13)$$

Where  $\eta$  is the intrinsic impedance of the medium,  $l$  is the length of the monopole,  $k$  is the circular wave number equal to  $2\pi/\lambda$ ,  $d_y$  is the distance in unit wavelength and  $C_j$

and  $S_j$  are cosine and sine integrals.

### III. GENETIC ALGORITHM

GA is an adaptive heuristic search algorithm premised on the evolutionary ideas of natural selections and genetics. GA is designed to simulate processes in a natural system which is necessary to evolution, specifically those that follow the principles of survival of the fitness first laid down by Charles Darwin. A concept can be concluded as follows, (i) genes are normally the code of the optimization parameter, (ii) a bit string of these genes generates the chromosome and (iii) the iteration optimization, called as generation, in GA is performed. The



parents are pairs of an individual that can generate a new individual of the next generation. Children are then generated from the selected pair of parents by applying crossover and mutation process. The objective function which determines the optimization goal is called the fitness function. The goal of this design in determining the design parameter is to solve for the optimal antennas positions. The design parameter is a distance ( $d_y$ ) between antenna elements. The maximum channel capacity can be achieved by considering the effect of mutual coupling between antenna elements. The fitness function can be determined by using the ergodic capacity of MIMO systems given in [12].

$$Fitness = \max \left[ \log_2 \left( \det \left[ \mathbf{I}_{N_R} + \rho \frac{\mathbf{H}_{mc} \mathbf{H}_{mc}^H}{N_T} \right] \right) \right] \quad (14)$$

where  $\rho$  denotes the Signal to Noise Ratio (SNR) and  $(.)^H$  denotes the complex conjugate transpose.

#### IV. ANTENNA CONFIGURATION

The paper aims to find the optimal positions of antennas so the design on antenna types is out of this scope. In this work, the simple antennas, half-wave monopoles, are chosen to be implemented in this paper. The operating frequency band is in a 5.725-5.85GHz range which supports the spectrum of IEEE 802.16d (Fixed WiMAX). The example of four antennas mounted on PCB is shown in Fig. 1. The size of a ground plane is 60 x 120 mm<sup>2</sup>. The loss of expected frequency band is below -10 dB which is in an acceptable condition for implementing

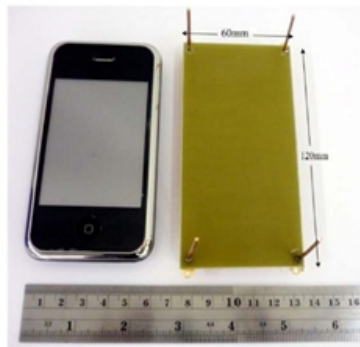


Fig. 1. Example of antenna positions on limited area for case (a) four antennas on four corners.

#### V. RESULTS AND DISCUSSION

The simulations of GA method to find the optimal antenna positions on a limited area are undertaken by MATLAB programming. Basic parameters of evolving process are set as follows. The crossover and mutational probabilities are 0.8 and 0.2 respectively. The population includes 200 individuals. A number of generations is 200. Fig. 2 shows an example of GA simulation. In this figure the optimal solution is achieved after 130 generations. This solution provides the coordination of either three or four antennas described as case (b) in Table I, respectively. The other cases detailed in Table I are as follows: case (a) each antenna is located at the corners, case (c) a linear antenna array is spaced by a half wave length and case (d) all antennas are randomly located. All cases are illustrated in Fig. 3 and Fig. 4 for 3x3 and 4x4 MIMO systems, respectively.

For simulation results, the antenna impedances are evaluated by using a CST Microwave Studio program. The results in Fig. 5(a) and Fig. 6(a) reveals that case (b) provides the highest capacity in comparison with other cases. In turn, case (d) gives the lowest capacity. This confirms that the right antenna position is necessary to be designed in order to achieve a good MIMO capacity.

For measurements, the antenna impedances are measured by Agilent 8722D Network Analyzer. In Fig. 5(b) and Fig. 6(b), the result of case (b) still provides the highest capacity than any other cases. Both simulation and measurement results indicate a similar trend that antenna positions from GA optimization offer the best capacity performance.

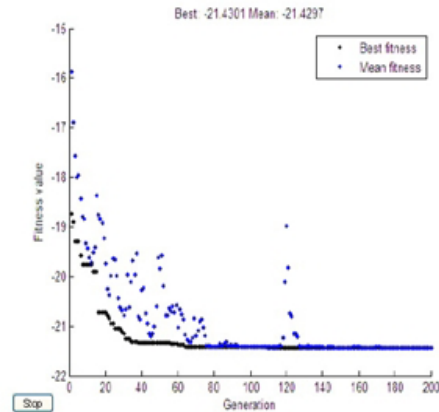


Fig. 2. Example of GA simulations

TABLE I  
ANTENNA POSITIONS OF 3 x 3, 4 x 4 MIMO SYSTEM

MIMO	Pos.	Position of antenna coordinate (x,y):mm			
		corner	GA	linear	random
MIMO3x3	Pos.1	5,5	56.8	30,5	17,35
	Pos.2	55,60	19,59	30,31.2	34,48
	Pos.3	5,115	3,117	30,57.4	15,62
MIMO4x4	Pos.1	5,5	4,7	30,5	17,35
	Pos.2	55,5	48,25,15	30,31.2	34,48
	Pos.3	5,115	13,97,75	30,57.4	15,62
	Pos.4	55,115	45,5,118,5	30,83,6	50,76

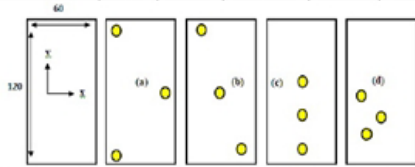


Fig. 3 Four cases of three antenna arrangements on mobile terminal

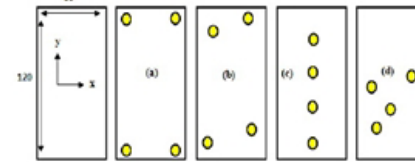


Fig. 4 Four cases of four antenna arrangements on mobile terminal

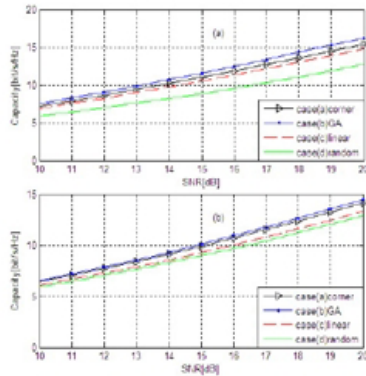


Fig. 5. Capacity vs. SNR in dB for four cases of antenna positions for MIMO 3x3 (a) simulations by CST (b) measurements

## VI. CONCLUSION

In this paper, the optimal antenna positions on a limited area for MIMO systems are presented by using Genetic Algorithm. The success of proposed method is confirmed by both simulations and experimental results. This investigation reveals an interesting antenna layout for implementing MIMO systems on a limited area in practice.

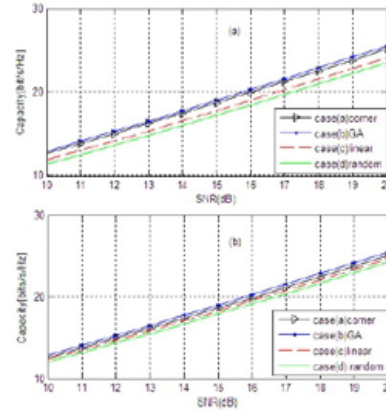


Fig. 6. Capacity vs. SNR in dB for four cases of antenna positions for MIMO 4x4 (a) simulations by CST (b) measurements

## REFERENCES

- [1] G.J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas", Bell Labs Tech. J., Vol. 1, no 2, pp41-59, Autumn 1996.
- [2] T. Svantesson and A. Ranheim, "Mutual coupling effects on the capacity of multielement antenna systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'01)*, Salt Lake City, UT, May 2001, pp. 2485-2488.
- [3] Okano, Y and K.cho, "Monopole antenna array arrangement for card-type mobile terminal" Radio and Wireless Conference, 2004 IEEE 19-22 Sept. 2004, pp. 415 - 418
- [4] Olgun, U., C. A. Tunc, D. Aktas, V. B. Erturk, and A. Altintas, "Optimization of linear wire antenna arrays to increase MIMO capacity using swarm intelligence," *The Second European Conference on Antennas and Propagation, 2007. EuCAP 2007*, 1-6, Nov. 11-16, 2007.
- [5] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [6] Y. Rahmat-Samii and E. Michielssen, *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms*, New York, Wiley, 1999, Chapter 8.
- [7] N. Chiurtu, B. Rimoldi, E. Telatar, and V. Pauli, "Impact of correlation Int. Symp. Signal Processing and Inf. Technol. (ISSPIT'03), Darmstadt, Germany, Dec. 14-17, 2003, pp. 154-157
- [8] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, *Introduction to Space-time Wireless Communication*, 1<sup>st</sup> ed. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2003
- [9] J.D Kraus, *Antenna*, 2<sup>nd</sup> ed New York: McGraw-Hill, 1988
- [10] W. C. Y. Lee, "Effect of mutual coupling on a mobile-radio maximal ratio combiner with a large number of branches," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-20, pp. 1188-1193, Dec. 1972.
- [11] COA. Balanis, *Antenna theory Analysis and Design*, 2<sup>nd</sup> JOHN Wiley, 1997
- [12] Andera Goldsmith, Senior Member, "Capacity limits of MIMO channels", Vol.21, no.5, JUNE 2003, pp.684-702.

## ประวัติผู้เขียน

นายคนัย อัสสานิก เกิดเมื่อวันที่ 7 กรกฎาคม 2528 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนลาซาลกรุงเทพ และสำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2551 จากนั้นได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ณ สถาบันเดิม โดยขณะศึกษาระดับปริญญาโท ได้เป็นผู้ช่วยวิจัยในการวิเคราะห์ออกแบบเพื่อพัฒนาสายอากาศย่านความถี่ 662-669 MHz ช่องสัญญาณ 45 ในโครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย (iTAP) และมีบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระดับนานาชาติในการประชุมวิชาการ ปี 2552 จำนวน 1 เรื่องและบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระดับนานาชาติในการประชุมวิชาการ ปี 2553 1 เรื่อง ตามลำดับ ดังนี้

1. OPTIMAL ANTENNA POSITIONS ON MOBILE TERMINAL FOR 4×4 MIMO SYSTEMS

2. THE USE OF GENETIC ALGORITHM FOR DESIGNING MIMO ANTENNA PLACEMENT (accepted)