

การเพิ่มความแรงของสัญญาณในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย  
ด้วยการใช้โดเวอร์ซิติแบบอีจีซีที่เฟสไม่ร่วม

นายทงศักดิ์ งามเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2552

**SIGNAL STRENGTH ENHANCEMENT IN WLAN  
SYSTEM USING NON-COPHASE EGC DIVERSITY**

**Tanongsak Ngamjaroen**

**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 2009**

การเพิ่มความแรงของสัญญาณในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย  
ด้วยการใช้ไดเวอร์ซิตีแบบอิมูโนโลยีที่เฟสไม่รวม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นหน่วยงานหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภิต)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ชุติมา พรหมมาก)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ทงศักดิ์ งามเจริญ : การเพิ่มความแรงของสัญญาณในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย  
ด้วยการใช้ไคเวอร์ซิตีแบบอีจีซีที่เฟสไม่ร่วม (SIGNAL STRENGTH ENHANCEMENT  
IN WLAN SYSTEM USING NON CO-PHASE EGC DIVERSITY)  
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล, 111 หน้า

ไคเวอร์ซิตี (diversity) เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่จะช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของการรับสัญญาณให้ดีขึ้นในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้สนใจเทคนิคไคเวอร์ซิตีด้วยการใช้วิธีการรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากัน (Equal Gain Combining : EGC) ซึ่งให้ประสิทธิภาพของการรับสัญญาณที่ดีใกล้เคียงกับวิธีการรวมสัญญาณแบบปรับค่าอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้สูงสุด (Maximal Ratio Combining : MRC) แต่วิธีอีจีซีมีความซับซ้อนน้อยกว่า การใช้อีจีซีทางทฤษฎีและทางปฏิบัตินั้นต้องมีการกำหนดให้เฟสร่วม (co-phase) ในทุกสัญญาณของสายอากาศก่อนทำการรวมสัญญาณ ทำให้เกิดความยุ่งยากในเรื่องของฮาร์ดแวร์ (hardware) ในทางปฏิบัติ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิธีการรวมสัญญาณแบบอีจีซีที่มีเฟสไม่ร่วม (non co-phase) โดยที่เริ่มจากการวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับสัญญาณระหว่างการใช้เฟสร่วมกับเฟสไม่ร่วมทั้งในทางทฤษฎีและการจำลองแบบผลที่ได้พบว่าการใช้อีจีซีเฟสไม่ร่วมสามารถเพิ่มความแรงของสัญญาณได้จริง จากนั้นจะนำวิธีการรวมสัญญาณแบบอีจีซีที่เฟสไม่ร่วมนี้มาประยุกต์ใช้กับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายซึ่งมีปัญหาเกี่ยวกับพื้นที่บนเครื่องรับสัญญาณที่มีจำกัด ทำให้การวางตัวของสายอากาศมีพื้นที่จำกัด รวมถึงการเพิ่มจำนวนของสายอากาศที่มากขึ้นทำได้ไม่มากนัก แต่ละตำแหน่งที่วางตัวของสายอากาศจะส่งผลกระทบต่อสหสัมพันธ์ (correlation) ของสัญญาณ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาคำแนะนำที่เหมาะสมในการวางตัวของสายอากาศบนพื้นที่จำกัด โดยที่ผลจากการจำลองแบบได้แสดงให้เห็นถึงการวางตัวของสายอากาศที่ต่างกันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการรับสัญญาณด้วย นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดสัญญาณภายใต้สภาพแวดล้อมจริงเพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองแบบและผลที่ได้จากการวัดสัญญาณจริง

TANONGSAK NGAMJAROEN : SIGNAL STRENGTH ENHANCEMENT  
IN WLAN SYSTEM USING NON CO-PHASE EGC DIVERSITY.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PEERAPONG UTHANSAKUL, Ph.D.,  
111 PP.

#### DIVERSITY / EQUAL GAIN COMBINING / CORRELATION

Diversity is a well-known technique to improve the performance of received signals in Wireless Local Area Network (WLAN). This thesis focuses on Equal Gain Combining (EGC) diversity because it provides a good performance close to Maximal Ratio Combining (MRC) diversity which MRC is accepted as the best diversity technique in both theoretical and practical viewpoints. In addition, EGC also offers a less complexity for practical implementation than MRC. For EGC diversity, the first step is to make all signals co-phased before being combined. Therefore, it is better to delete this co-phase step in order to reduce hardware complexity. In this light, this thesis introduces non co-phase EGC diversity by firstly investigating whether non co-phase EGC diversity is able to provide an acceptable performance in comparison with a co-phase method. After that, the issue of employing non co-phase EGC into a limited area for WLAN terminals is on focus. As a result, this thesis proposes the method to find a suitable antenna configuration of non co-phase EGC on a limited area. Both simulation and measurement results confirm that signal strength in WLAN systems is able to be enhanced by using an optimal antenna configuration.

School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2009

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณนายมงคล ม่วงรัตน์ เพื่อนบัณฑิตศึกษาร่วมสถาบันที่กรุณาตรวจทานรูปแบบการจัดพิมพ์เล่มวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จเรียบร้อยสวยงาม

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาโดยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

ทนางศักดิ์ งามเจริญ

# สารบัญ

หน้า

|   |          |
|---|----------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....                                | ก        |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....                             | ข        |
| กิตติกรรมประกาศ .....                                   | ค        |
| สารบัญ .....  | ง        |
| สารบัญตาราง .....                                       | ช        |
| สารบัญรูป .....   | ซ        |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....                         | ฉ        |
| <b>บทที่</b>  |          |
| <b>1 บทนำ .....</b>                                     | <b>1</b> |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ .....                        | 1        |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....                       | 3        |
| 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น .....                              | 4        |
| 1.4 ขอบเขตงานวิจัย .....                                | 4        |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....                     | 5        |
| 1.6 รายละเอียดวิทยานิพนธ์ .....                         | 5        |
| <b>2 ทฤษฎีไคเวอร์ซิตีและเงินเนติกอัลกอริทึม .....</b>   | <b>6</b> |
| 2.1 ความหลากหลายของช่องสัญญาณ .....                     | 6        |
| 2.1.1 ไคเวอร์ซิตีทางเวลา (Time diversity) .....         | 7        |
| 2.1.2 ไคเวอร์ซิตีทางความถี่ (Frequency diversity) ..... | 7        |
| 2.1.3 ไคเวอร์ซิตีทางสายอากาศ (Antenna diversity) .....  | 7        |
| 2.2 ไคเวอร์ซิตีทางสายอากาศ .....                        | 8        |
| 2.2.1 การรวมสัญญาณแบบเลือก .....                        | 10       |
| 2.2.2 การรวมสัญญาณแบบปรับค่า SNR ให้สูงสุด .....        | 12       |
| 2.2.3 การรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากัน .....     | 15       |
| 2.3 ช่องสัญญาณและการจางหาย .....                        | 19       |

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.3.1    | ช่องสัญญาณ (Channel) .....  | 19        |
| 2.3.2    | การจางหาย (Fading) .....  | 21        |
| 2.4      | สหสัมพันธ์ของสัญญาณ .....   | 24        |
| 2.5      | จินเนติกอัลกอริทึม .....  | 26        |
| 2.5.1    | ขั้นตอนการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม .....                                  | 27        |
| 2.5.2    | โครโมโซมประชากรและ<br>การเข้ารหัส (Population and encoding scheme) .....    | 29        |
| 2.5.3    | การประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness Evaluation) .....                         | 31        |
| 2.5.4    | การคัดเลือกสายพันธุ์ .....  | 34        |
| 2.5.5    | ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ .....  | 38        |
| 2.5.6    | การแทนที่ .....   | 41        |
| 2.5.7    | ข้อดีของจินเนติกอัลกอริทึม .....  | 42        |
| 2.6      | สรุป .....  | 44        |
| <b>3</b> | <b>เทคนิคการรวมสัญญาณแบบอีจีเฟสไม่รวม .....</b>                             | <b>45</b> |
| 3.1      | การวิเคราะห์สมรรถนะของการรวมสัญญาณแบบอีจีเฟสไม่รวม .....                    | 45        |
| 3.1.1    | การวิเคราะห์สมการอีจีเฟสไม่รวม .....  | 46        |
| 3.1.2    | การวิเคราะห์จากการจำลองแบบ .....  | 49        |
| 3.1.3    | เทคนิคอีจีเฟสไม่รวมในทางปฏิบัติ .....                                       | 51        |
| 3.2      | การวิเคราะห์ผลกระทบสหสัมพันธ์ของสัญญาณ .....                                | 54        |
| 3.3      | สรุป .....  | 60        |
| <b>4</b> | <b>การหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางสายอากาศและผลการทดลอง .....</b>            | <b>62</b> |
| 4.1      | การหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการวางสายอากาศ<br>ด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ..... | 62        |
| 4.1.1    | ออปติไมซ์เซชันทูลบ็อกซ์ (Optimization toolbox) .....                        | 62        |
| 4.1.2    | ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) .....                             | 64        |
| 4.1.3    | เงื่อนไข (Constraint) .....   | 66        |



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4.1.4 | พารามิเตอร์ (Parameter) .....                            | 66  |
| 4.2   | การวัดความแรงสัญญาณ .....                                | 66  |
| 4.3   | การออกแบบการทดลอง .....                                  | 68  |
| 4.3.1 | สายอากาศ .....   | 68  |
| 4.3.2 | ตัวรวมสัญญาณ .....                                       | 68  |
| 4.3.3 | ซอฟต์แวร์สำหรับการวัด .....                              | 68  |
| 4.3.4 | การวางสายอากาศ .....                                     | 70  |
| 4.4   | ผลจากการทดลองและการจำลองแบบ .....                        | 75  |
| 4.4.1 | ผลจากการจำลองแบบ .....                                   | 75  |
| 4.4.2 | ผลที่ได้จากการทดลอง .....                                | 86  |
| 4.5   | สรุป .....   | 91  |
| 5     | สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....                          | 93  |
| 5.1   | สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์ .....                             | 93  |
| 5.2   | ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....                                 | 95  |
| 5.3   | แนวทางการพัฒนาในอนาคต .....                              | 95  |
|       | รายการอ้างอิง .....                                      | 97  |
|       | ภาคผนวก  |     |
|       | ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ..... | 100 |
|       | ประวัติผู้เขียน .....                                    | 111 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า  |
|----------|---|
| 3.1      | การเปรียบเทียบสมรรถนะของการใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีแบบอีจีซี<br>เฟสไม่รวมและเฟสรวมด้วยการวิเคราะห์ทางสมการคณิตศาสตร์ ..... 49 |
| 3.2      | การประมาณค่าโพลีโนเมียลอันดับ $n$ ..... 55  |
| 4.1      | แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้บนเครื่องมือ optimization toolbox ..... 66   |
| 4.2      | แสดงตำแหน่งการวางสายอากาศจำนวน 3 ต้นจากเทคนิคการหา<br>คำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ..... 80                 |
| 4.3      | แสดงตำแหน่งการวางสายอากาศจำนวน 4 ต้นจากเทคนิคการหา<br>คำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ..... 80                 |
| 4.4      | แสดงตำแหน่งการวางสายอากาศจำนวน 5 ต้นจากเทคนิคการหา<br>คำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ..... 81                 |
| 4.5      | แสดงตำแหน่งการวางสายอากาศจำนวน 6 ต้นจากเทคนิคการหา<br>คำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ..... 81                 |

## สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า  |
|--------|---|
| 2.1    | แสดงการรวมสัญญาณแบบเอสซี ..... 10   |
| 2.2    | แสดง cdf ของ SNR ที่เอาต์พุตสำหรับการรวมสัญญาณแบบเอสซี ..... 11   |
| 2.3    | แสดงการรวมสัญญาณแบบเอ็มอาร์ซี ..... 12  |
| 2.4    | แสดง cdf ของ SNR ที่เอาต์พุตสำหรับการรวมสัญญาณแบบเอ็มอาร์ซี ..... 14  |
| 2.5    | แสดงการรวมสัญญาณแบบอีจีซี ..... 15  |
| 2.6    | แสดง cdf ของ SNR ที่เอาต์พุตสำหรับการรวมสัญญาณแบบอีจีซี ..... 18  |
| 2.7    | เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย SNR ของเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 เทคนิค ..... 19  |
| 2.8    | ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $\rho$ กับระยะห่างสายอากาศ $d$ ..... 25                                     |
| 2.9    | แสดงขั้นตอนทั่วไปของจินเนติกอัลกอริทึม ..... 28   |
| 2.10   | การแก้ปัญหาในระบบจินเนติกอัลกอริทึมและระบบโลกจริง ..... 30  |
| 2.11   | แสดงตัวอย่างการเข้ารหัสโคโรโมโซม ..... 30   |
| 2.12   | ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เชื่อมโยงจินเนติกอัลกอริทึม<br>เข้ากับระบบในโลกจริง ..... 31                               |
| 2.13   | ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับ<br>ฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสม ..... 32                                |
| 2.14   | ค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมในการคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต ..... 37  |
| 2.15   | แสดงวิธีการชักตัวอย่างแบบกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล ..... 38  |
| 2.16   | ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ของจินเนติกอัลกอริทึม ..... 39  |
| 2.17   | การครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว ..... 39  |
| 2.18   | การครอสโอเวอร์แบบหลายจุด ..... 40   |
| 2.19   | การเปลี่ยนแปลงบนบิตที่ 4 ในโครโมโซม ..... 40  |
| 3.1    | การรวมสัญญาณแบบอีจีซีเฟสร่วม ..... 45   |
| 3.2    | การรวมสัญญาณแบบอีจีซีเฟสไม่ร่วม ..... 46  |
| 3.3    | การเปรียบเทียบ pdf ของ SNR ระหว่างเทคนิคอีจีซีเฟสร่วมและ<br>เฟสไม่ร่วมด้วยการวิเคราะห์ทางสมการคณิตศาสตร์ ..... 49 |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า   |
|--------|--|
| 3.4    | การเปรียบเทียบ pdf ของ SNR ระหว่างเทคนิคอีซีซีเฟสร่วม และเฟสไม่ร่วมด้วยการวิเคราะห์จากการจำลองแบบ ในช่องสัญญาณเฟดดิ้ง ..... 50 |
| 3.5    | แสดงส่วนประกอบของฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการวัดความแรงสัญญาณ ..... 51   |
| 3.6    | แสดงการวางตัวของสายอากาศแบบเรียงตัวเป็นเส้นตรงบนพื้นที่จำกัด ..... 52  |
| 3.7    | แสดงแผนที่และจุดที่ทำการวัดความแรงสัญญาณจริง ..... 52  |
| 3.8    | แสดง pdf ของความแรงสัญญาณสำหรับการใช้เทคนิคอีซีซีเฟสไม่ร่วม จากการวัดความแรงสัญญาณจริง ..... 53                                |
| 3.9    | ค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณสำหรับการใช้เทคนิคอีซีซีเฟสไม่ร่วม จากการวัดความแรงสัญญาณจริง ..... 53                                |
| 3.10   | แสดงตัวอย่าง 2 สัญญาณในช่องสัญญาณเฟดดิ้งเรย์ลี ..... 57  |
| 3.11   | แสดงตัวอย่าง 4 สัญญาณในช่องสัญญาณเฟดดิ้งเรย์ลี ..... 58  |
| 3.12   | pdf ของ SNR สำหรับใช้เทคนิคแบบอีซีซีเฟสไม่ร่วม ในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN ..... 59  |
| 3.13   | pdf ของ SNR สำหรับใช้เทคนิคแบบอีซีซีเฟสไม่ร่วม ในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบริเชียน ..... 59  |
| 3.14   | แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ SNR สำหรับใช้เทคนิคอีซีซีเฟสร่วม และเฟสไม่ร่วมในช่องสัญญาณเฟดดิ้ง ..... 60                      |
| 4.1    | แสดงหน้าต่างเครื่องมือ optimization toolbox ..... 63   |
| 4.2    | ตัวอย่างการวางสายอากาศในพิกัด $x, y$ บนพื้นที่คอมพิวเตอร์แบบพกพา ..... 65  |
| 4.3    | แผนที่อาคารวิชาการชั้น 4 ซึ่งได้มีการกำหนดตำแหน่งในการวัดสัญญาณ ..... 67   |
| 4.4    | ตัวรวมสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัย ..... 68  |
| 4.5    | แสดงหน้าต่างโปรแกรม Wireless Mon ..... 69  |
| 4.6    | แสดงการวางสายอากาศ 3 ต้นแบบลุ่มบนพื้นที่คอมพิวเตอร์แบบพกพา ..... 70  |
| 4.7    | แสดงการวางสายอากาศ 4 ต้นแบบลุ่มบนพื้นที่คอมพิวเตอร์แบบพกพา ..... 71  |
| 4.8    | แสดงการวางสายอากาศ 5 ต้นแบบลุ่มบนพื้นที่คอมพิวเตอร์แบบพกพา ..... 72  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า   |
|--------|--|
| 4.9    | แสดงการวางสายอากาศ 6 ต้นแบบสุ่มบนพื้นที่คอมพิวเตอร์แบบพา ..... 73  |
| 4.10   | แสดงส่วนประกอบของฮาร์ดแวร์สำหรับเทคนิคอีซีพีเอสไม่ร่วม ..... 74  |
| 4.11   | ผลของการหาคำแหน่งการวางสายอากาศที่ดีที่สุด<br>ด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมบนเครื่องมือ optimization toolbox<br>ในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN ..... 76              |
| 4.12   | ผลของการหาคำแหน่งการวางสายอากาศที่ดีที่สุด<br>ด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมบนเครื่องมือ optimization toolbox<br>ในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบรีเซียน ..... 78            |
| 4.13   | แสดงการเปรียบเทียบของ pdf ของ SNR สำหรับการวางสายอากาศ<br>ด้วยตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมและการวางแบบสุ่ม<br>ในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN ..... 82   |
| 4.14   | แสดงการเปรียบเทียบของ pdf ของ SNR สำหรับการวางสายอากาศ<br>ด้วยตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมและการวางแบบสุ่ม<br>ในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบรีเซียน ..... 84 |
| 4.15   | แสดงการวางสายอากาศจำนวน 4 ต้นบนคอมพิวเตอร์แบบพกพา<br>ด้วยตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมในช่องสัญญาณเฟดดิ้ง ..... 87                                    |
| 4.16   | แสดงการวางสายอากาศจำนวน 6 ต้นบนคอมพิวเตอร์แบบพกพา<br>ด้วยตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมในช่องสัญญาณเฟดดิ้ง ..... 88                                    |
| 4.17   | แสดงการเปรียบเทียบของ pdf ของ SNR สำหรับการวางสายอากาศ<br>ด้วยตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมและการวางแบบสุ่มใน<br>การวัดสัญญาณจริง ..... 89            |
| 4.18   | การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณของการวางสายอากาศ<br>ด้วยตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมและการวางแบบสุ่มใน<br>การวัดสัญญาณจริง ..... 90             |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

|            |  |
|------------|--|
| SNR        | Signal to Noise Ratio  |
| SC         | Selection Combining  |
| MRC        | Maximum Ratio Combining                                      |
| EGC        | Equal Gain Combining   |
| AWGN       | Additive White Gaussian Noise                                |
| GA         | Genetic Algorithm  |
| CDMA       | Code Division Multiple Access                                |
| $r_i$      | สัญญาณเฟดดิ้งที่รับได้ในแต่ละสายอากาศ                        |
| $N_i$      | กำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวนในแต่ละสายอากาศ                        |
| $N$        | กำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวนรวม                                    |
| $\sigma^2$ | ค่าความแปรปรวนของสัญญาณ                                      |
| $\gamma_0$ | อัตราส่วนของกำลังเฉลี่ยของสัญญาณและกำลังเฉลี่ยของสัญญาณรบกวน |
| $E_0$      | แอมพลิจูดของคลื่น  |
| $\Gamma$   | ค่า SNR ที่กำหนด   |
| $M$        | จำนวนสายอากาศ  |
| $\Gamma_s$ | ค่า SNR ที่กำหนดในเทคนิคเอสซี เอ็มอาร์ซี อีจีซี              |
| $a_i$      | อัตราขยายของสัญญาณในสายอากาศแต่ละต้น                         |
| $erf$      | Error function   |
| LOS        | Line of Sight  |
| $a$        | แอมพลิจูดของสัญญาณ   |
| $K$        | เฟคเตอร์ของช่องสัญญาณแบบรีเซียน                              |
| $I_0$      | ฟังก์ชันเบสเซลดัดแปลงอันดับศูนย์                             |
| $I_1$      | ฟังก์ชันเบสเซลดัดแปลงอันดับหนึ่ง                             |
| $d$        | ระยะห่างระหว่างสายอากาศ                                      |
| $\rho$     | สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์                                       |
| $\lambda$  | ความยาวของคลื่นพาห์  |
| $J$        | ฟังก์ชันเบสเซล   |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

|             |                                     |
|-------------|-------------------------------------|
| $S$         | คำตอบของระบบ                        |
| $E$         | ค่าความเหมาะสม                      |
| $\lambda_d$ | ค่าอัตราการลดลง                     |
| $\mu$       | ค่ากลางของสัญญาณ                    |
| SSID        | Service Set Identifier              |
| RSSI        | Received Signal Strength Indication |
| LAN         | Local Area Network                  |

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงความสำคัญและความเป็นมา เหตุจูงใจสำหรับงานวิจัย โดยที่เนื้อหาจะประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและรายละเอียดของวิทยานิพนธ์นี้

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันเทคโนโลยีระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) ได้มีการพัฒนาออกมาหลากหลายรูปแบบเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นเรื่องความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้นหรือจะเป็นเรื่องของคุณภาพ ความน่าเชื่อถือในการให้บริการที่ดีของระบบ ทั้งนี้เพื่อรองรับกับความต้องการใช้งานที่มีมากเพิ่มขึ้น ดังนั้นการปรับปรุงสมรรถนะของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายให้มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดจึงมีความจำเป็นอย่างมาก

ความหลากหลายของช่องสัญญาณหรือไดเวอร์ซิตี (diversity) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถช่วยให้การรับสัญญาณมีคุณภาพที่ดีขึ้น หลักการของไดเวอร์ซิตีอาศัยคุณสมบัติพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สาย ซึ่งมักจะมีเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณหลายเส้นทาง โดยทั่วไปแล้วถ้าหากการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นทางหนึ่งถูกรบกวนอย่างมากจากการจางหาย (fading) ทำให้สัญญาณที่รับมามีกำลังที่อ่อนมาก ก็อาจจะมีคลื่นสัญญาณจากเส้นทางอื่นที่ให้สัญญาณที่รับมามีกำลังสูง ดังนั้นถ้าหากทำการติดตั้งจุดรับสัญญาณที่มากกว่าหนึ่งแห่งก็จะสามารถรับสัญญาณได้จากหลายเส้นทาง จากนั้นระบบก็สามารถที่จะทำการเลือกเฉพาะสัญญาณที่มีกำลังสูงมาใช้ได้ วิธีการนี้สามารถช่วยทำให้ค่าอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio : SNR) ของสัญญาณที่ภาครับมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยสำหรับเทคนิคไดเวอร์ซิตีทางตำแหน่ง (space diversity) หรือไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศ (antenna diversity) ซึ่งเป็นไดเวอร์ซิตีที่นิยมใช้และให้ประโยชน์ในการแก้ไขปัญหาผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากความง่าย ไม่ซับซ้อนและค่าใช้จ่ายน้อยในทางปฏิบัติ

สำหรับไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศจะรับสัญญาณจากสายอากาศตั้งแต่สองต้นขึ้นไปซึ่งทำการติดตั้งอยู่ห่างกันเป็นระยะหลายเท่าของความยาวคลื่น โดยสัญญาณที่ได้รับจากแต่ละสายอากาศจะถูกต่อเข้ากับตัวไดเวอร์ซิตีภาครับ (diversity receiver) และภาครับมีหน้าที่ทำการเลือกสัญญาณที่ดีที่สุดหรือทำการรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน ซึ่งส่วนใหญ่สำหรับไดเวอร์ซิตีจะมีอยู่ 3 เทคนิคหลักคือ



เทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือก (Selection Combining : SC) เทคนิคการรวมสัญญาณแบบปรับค่า SNR ให้สูงสุด (Maximal Ratio Combining : MRC) และเทคนิคการรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากัน (Equal Gain Combining : EGC) เมื่อเปรียบเทียบกับสมรรถนะของการรับส่งสัญญาณทั้ง 3 เทคนิคในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติแล้ว วิธีการรวมสัญญาณแบบเอ็มอาร์ซีนั้นให้ประสิทธิภาพดีที่สุด (Lee, W. C. Y., 1982; Yacoub, M., 1993) แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้ว เทคนิคการรวมสัญญาณแบบเอ็มอาร์ซีมีความซับซ้อนและยุ่งยากของฮาร์ดแวร์เมื่อเทียบกับวิธีการรวมสัญญาณแบบอีจีซีที่ง่ายกว่าและให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันซึ่งให้ค่า SNR น้อยกว่าประมาณ 1-2 dB (Halpern, S., 1977) ซึ่งเป็นเหตุผลให้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศด้วยวิธีการรวมสัญญาณแบบอีจีซีเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการรับสัญญาณในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

จากที่ Brennan, D. G. (1959) ได้เสนอเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 เทคนิคดังกล่าวขึ้นมา สำหรับเทคนิคการรวมสัญญาณแบบอีจีซีสัญญาณที่สายอากาศรับได้เข้ามานั้น ก่อนทำการรวมสัญญาณเข้าด้วยกันต้องทำการกำหนดให้เฟสรวมกัน (co-phase) ของสัญญาณก่อนในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ โดยในทางปฏิบัติแล้วจะเกิดการยุ่งยาก ซับซ้อนในเรื่องของฮาร์ดแวร์ (hardware) ตามมาด้วย ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมามีส่วนใหญ่มักจะใช้เทคนิคการรวมสัญญาณแบบอีจีซีโดยเฟสรวมทั้งหมด ไม่มีงานวิจัยใดเลยที่ใช้เฟสไม่รวม (non co-phase) สำหรับเทคนิคนี้ ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาแนวทางการทำเทคนิคการรวมสัญญาณแบบอีจีซีที่มีเฟสไม่รวมเพื่อลดปัญหาในส่วนนี้ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของการใช้เฟสรวมในทางทฤษฎีและเทียบผลที่ได้จากการจำลองแบบ จากนั้นจะนำเทคนิคนี้มาเป็นแนวทางประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงสมรรถนะของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายต่อไป

ในปัจจุบันพื้นที่บนเครื่องรับสัญญาณของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายมีแนวโน้มในขนาดที่มีขนาดเล็กลงและจำกัด ทำให้การวางตัวของสายอากาศมีพื้นที่จำกัดตามมาด้วย รวมถึงการเพิ่มจำนวนของสายอากาศที่มากขึ้นทำได้ไม่มากนัก ดังนั้นการวางสายอากาศตั้งแต่สองต้นขึ้นไปบนพื้นที่จำกัดนั้น แต่ละตำแหน่งที่ทำการวางตัวของสายอากาศจะส่งผลกระทบต่อสหสัมพันธ์ (correlation) ของสัญญาณอีก (Tsunekawa, K., 1989; Lefevre, M., Jensen, M. A., and Rice, M. D., 1989; Uthansakul, P., Ngamjaroen, T., and Uthansakul, M., 2009) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของสหสัมพันธ์สำหรับการใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศจึงมีความสำคัญมากสำหรับงานวิจัยของ Uthansakul, P. ได้ใช้ไดเวอร์ซิตีด้วยเทคนิคการรวมสัญญาณแบบอีจีซีทำการวิเคราะห์ผลกระทบสหสัมพันธ์ของสัญญาณในช่องสัญญาณเฟดดิ้งเมื่อมีการวางสายอากาศเรียงตัวกันเป็นเส้นตรง (linear array antenna) บนพื้นที่จำกัดอ้างอิงขนาดคอมพิวเตอร์แบบพกพา ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นสหสัมพันธ์ของสัญญาณส่งผลให้สมรรถนะของระบบมี

ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อทำการเพิ่มจำนวนของสายอากาศสำหรับในช่องสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาว (Additive White Gaussian Noise : AWGN) แต่ในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบริเซียน (Rician fading channel) ความเป็นสหสัมพันธ์กันของสัญญาณไม่ส่งผลกระทบต่อระบบเลย จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงความจำเป็นในการคำนึงถึงสหสัมพันธ์ของสัญญาณเมื่อมีปัจจัยของระยะการวางตัวของสายอากาศมาเกี่ยวข้องด้วยในระบบ

โดยทั่วไปแล้วการวางตัวของสายอากาศแบบเรียงตัวกันเป็นแนวเส้นตรง ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นจะต้องเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น จึงจะให้ประสิทธิภาพของระบบที่ดีและเพื่อลดสหสัมพันธ์ของสัญญาณที่เกิดขึ้น (Winters, J., Salz, J., and Gitlin, R. D., 1994; Teal, P. D., Abhayapala, T. D., and Kennedy, R. A., 2002) แต่สำหรับในโดเวอร์ซิตีทางสายอากาศนั้น การวางสายอากาศไม่จำเป็นต้องวางสายอากาศเรียงตัวเป็นเส้นตรงก็ได้ ซึ่งสามารถวางในรูปแบบไหนก็ได้ที่จะทำให้สมรรถนะของระบบดีที่สุด การหาค่าตำแหน่งและระยะที่เหมาะสมสำหรับการวางตัวของสายอากาศแต่ละต้นย่อมมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการรับสัญญาณที่ดีด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการนำเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุด (optimization technique) มาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยเฉพาะเทคนิคจินเนติกอัลกอริทึมหรือจำลองแบบทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA) ที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่แม่นยำและถูกต้อง ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ใช้เทคนิคนี้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic) และการออกแบบสายอากาศ (Samii, Y. R., and Michielssen, E., 1999; Marcano, J. D., and Duran, F., 2000; Haupt, R. L., 1994) จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจที่วิทยานิพนธ์นี้จะนำเอาเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมาใช้ในการหาค่าตำแหน่งและระยะของการวางตัวของสายอากาศบนพื้นที่จำกัดในโดเวอร์ซิตีทางสายอากาศด้วยวิธีรวมสัญญาณแบบอิจิเฟสไม่รวม ทั้งการจำลองแบบและทางปฏิบัติในการวัดผลจริงในสภาพแวดล้อมจริงภายในอาคาร (indoor) ผลที่ได้จะช่วยเพิ่มความแรงของการรับสัญญาณที่ดีขึ้นในภาครับและสามารถนำไปใช้ได้จริงในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาถึงการเพิ่มความแรงของสัญญาณในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายด้วยการใช้โดเวอร์ซิตีแบบอิจิเฟสไม่รวม โดยรายละเอียดสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทํางานและทฤษฎีพื้นฐานของเทคนิคโดเวอร์ซิตีทางสายอากาศด้วยวิธีการรวมสัญญาณแบบอิจิเฟส
- 1.2.2 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์วิธีรวมสัญญาณแบบอิจิเฟสโดยที่สัญญาณเฟสไม่รวม
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นสหสัมพันธ์ของสัญญาณเมื่อมีปัจจัยของระยะและตำแหน่งใน

การวางตัวของสายอากาศมาเกี่ยวข้อง รวมถึงการหาตำแหน่งการวางตัวของสายอากาศที่เหมาะสมบนพื้นที่จำกัดเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการรับสัญญาณมากที่สุดในการจำลองแบบ

- 1.2.4 เพื่อทำการทดสอบวัดผลภายใต้สภาพแวดล้อมจริงของการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางตัวของสายอากาศที่ได้ทำการวิเคราะห์จากการจำลองแบบและเปรียบเทียบผล

### 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 ใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศด้วยวิธีการรวมสัญญาณแบบอิจิซีโดยวิเคราะห์สัญญาณแบบเฟสไม่รวม
- 1.3.2 ใช้สายอากาศโมโนโพล (monopole antenna) ตั้งแต่ 2-6 ต้น ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งการวางตัวของสายอากาศที่เหมาะสม เพื่อให้เห็นความแตกต่างถึงผลกระทบสหสัมพันธ์ของสัญญาณและประสิทธิภาพของการรับสัญญาณในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
- 1.3.3 ใช้พื้นที่ขนาดคอมพิวเตอร์แบบพกพาจริงในการวางตัวของสายอากาศแต่ละตำแหน่ง
- 1.3.4 ใช้โปรแกรมแมทแลบ (Matlab) ในการจำลองแบบวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรับสัญญาณ
- 1.3.5 วัดสัญญาณภายใต้สภาพแวดล้อมจริงของการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางตัวของสายอากาศบนพื้นที่จำกัดในแต่ละตำแหน่งจากการจำลองแบบ

### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีของไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศด้วยการรวมสัญญาณแบบอิจิซี
- 1.4.2 ศึกษาและวิเคราะห์การใช้วิธีการรวมสัญญาณแบบอิจิซีโดยวิเคราะห์สัญญาณแบบเฟสไม่รวม
- 1.4.3 ศึกษาความเป็นสหสัมพันธ์ของสัญญาณเมื่อมีปัจจัยของระยะและตำแหน่งในการวางตัวของสายอากาศมาเกี่ยวข้อง
- 1.4.4 จำลองแบบการทดลองเพื่อพิจารณาหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางตัวของสายอากาศบนพื้นที่จำกัดของสายอากาศแต่ละต้น

- 1.4.5 วัดสัญญาณภายใต้สภาพแวดล้อมจริงของการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางตัวสายอากาศบนพื้นที่จำกัดในแต่ละตำแหน่ง เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้เทคนิคการวิเคราะห์ห้วงวิธรรวมสัญญาณแบบอีจีซีโดยสัญญาณเฟสไม่รวม รวมถึงความเป็นสหสัมพันธ์ของสัญญาณ
- 1.5.2 ผลที่ได้ช่วยในการตัดสินใจในการเลือกวางตำแหน่งของสายอากาศที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการรับสัญญาณระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายมากขึ้น
- 1.5.3 เป็นแนวทางการวิจัยและประยุกต์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการรับสัญญาณระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายต่อไป

## 1.6 รายละเอียดวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

**บทที่ 1** เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย รวมถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

**บทที่ 2** กล่าวถึงทฤษฎีของโคเวอรัชิตี รวมทั้งเทคนิคการรวมสัญญาณที่นิยมใช้กันสำหรับโคเวอรัชิตีทางสายอากาศ สหสัมพันธ์ของสัญญาณเมื่อมีปัจจัยของระยะการวางตัวของสายอากาศ และสุดท้ายอธิบายหลักการหาค่าตอบที่ดีที่สุดด้วยการใช้เทคนิคจินเนติกอัลกอริทึม

**บทที่ 3** กล่าวถึงการวิเคราะห์สมรรถนะโคเวอรัชิตีแบบอีจีซีเฟสไม่รวมทั้งทางสมการการจำลองแบบและในทางปฏิบัติ รวมถึงการนำเอาเทคนิคนี้ไปวิเคราะห์ถึงผลกระทบของสหสัมพันธ์เมื่อมีปัจจัยของระยะการวางตัวของสายอากาศมากเกี่ยวข้องในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเชียนด้วย

**บทที่ 4** กล่าวถึงการหาตำแหน่งของการวางสายอากาศที่เหมาะสมที่สุดบนพื้นที่คอมพิวเตอร์แบบพกพาด้วยเทคนิคการหาค่าตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม การออกแบบการทดลอง ผลการทดลองในส่วนของกรณีวัดและจากการจำลองแบบ รวมถึงวิเคราะห์ผลที่ได้ทั้งหมด

**บทที่ 5** กล่าวถึงการสรุปผลทั้งหมดของของงานวิจัยทั้งจากการจำลองแบบและการทดลอง รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้น ข้อเสนอแนะแนวทางแก้ไข และแนวทางการพัฒนาในอนาคต

## บทที่ 2

### ทฤษฎีไคเวอร์ซิตีและเงินเนติกอัลกอริทึม

สำหรับในบทนี้แบ่งเนื้อหาของทฤษฎีเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของไคเวอร์ซิตี ทฤษฎีการรวมสัญญาณด้วยเทคนิคต่าง ๆ ทางสมการทางคณิตศาสตร์ที่บอกถึงสมรรถนะที่แตกต่างแต่ละเทคนิค นอกจากนี้ช่องสัญญาณและการจางหาย ได้ถูกนำมาอธิบายถึงผลกระทบของการสื่อสารในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายด้วย และส่วนนี้ยังกล่าวถึงสหสัมพันธ์ของสัญญาณเมื่อมีปัจจัยของระยะเวลาวางตัวของสายอากาศมาเกี่ยวข้อง

ส่วนที่สองอธิบายถึงเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีเงินเนติกอัลกอริทึมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการหาคำแหน่งที่ดีที่สุดของการวางตัวของสายอากาศบนเครื่องรับสัญญาณปลายทาง โดยเนื้อหาทั้งหมดในบทนี้จะทำเข้าใจถึงปัญหาและแนวทางการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายต่อไป

#### 2.1 ความหลากหลายของช่องสัญญาณ

ความหลากหลายของช่องสัญญาณหรือไคเวอร์ซิตีเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถช่วยให้การรับส่งสัญญาณมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องมีการเพิ่มบิตรหัส (code bits) รวมเข้ากับบิตข้อมูล (data bits) อย่างที่ต้องใช้ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณ (channel codes) และยังไม่ต้องการส่งสัญญาณที่เรียกว่า training sequence สำหรับใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์การคูณของวงจรอิกวอลไลเซอร์ (equalizer) ซึ่งหมายถึงว่าไม่มีการแบ่งเอาแบนด์วิดท์ (bandwidth) ของช่องสัญญาณไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของการรับส่งสัญญาณเลย นอกจากนี้ส่วนของฮาร์ดแวร์สำหรับการทำไคเวอร์ซิตีก็มีความซับซ้อนน้อยและราคาที่ไม่แพงจนเกินไป ดังนั้นการใช้เทคนิคไคเวอร์ซิตีจึงมีประโยชน์อย่างมากในทางปฏิบัติ

หลักการของไคเวอร์ซิตีคือ การอาศัยคุณสมบัติพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สาย ซึ่งมักจะมีเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณหลายเส้นทางและโดยทั่วไปแล้ว ถ้าหากการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นทางหนึ่งถูกรบกวนอย่างมากจากการจางหาย ทำให้สัญญาณที่รับมามีกำลังที่อ่อนมาก ก็อาจจะมีการรับสัญญาณจากเส้นทางอื่นที่ให้สัญญาณที่รับมามีกำลังสูง ดังนั้นถ้าหากเราทำการติดตั้งจุดรับสัญญาณมากกว่าหนึ่งแห่งก็จะสามารถรับสัญญาณได้จากหลายเส้นทาง จากนั้นระบบก็สามารถที่จะทำการเลือกเฉพาะสัญญาณที่มีกำลังสูงใช้ได้ ซึ่งวิธีการไคเวอร์ซิตีส่วนใหญ่ที่นิยมใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้

### 2.1.1 ไคเวอร์ซิตีทางเวลา (Time diversity)

ไคเวอร์ซิตีทางเวลา คือ การส่งสัญญาณข้อมูลเดิมซ้ำมากกว่าหนึ่งครั้งในเวลาแตกต่างกัน โดยการส่งแต่ละครั้งจะต้องเว้นช่วงเวลาให้ห่างกันมากพอคือ ต้องมากกว่าช่วงเวลาร่วมกัน (coherence time) ของช่องสัญญาณ ผลที่ได้คือภาครับจะได้รับสัญญาณข้อมูลซ้ำหลายครั้ง โดยสัญญาณข้อมูลที่รับได้ในแต่ละครั้งนี้ จะได้รับผลกระทบจากการจางหายในช่องสัญญาณด้วยลักษณะที่ต่างกัน ค่าของเวลาร่วมกันขึ้นอยู่กับค่าการแผ่แบบคอปเพลอร์ (doppler spread) ของคลื่นสัญญาณ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่และความถี่ของคลื่นพาห์ ตัวอย่างเบื้องต้นของการใช้งานเทคนิคไคเวอร์ซิตีทางเวลา คือ วงจรชุดรับสัญญาณ (RAKE receiver) ในระบบ CDMA (Code Division Multiple Access)

### 2.1.2 ไคเวอร์ซิตีทางความถี่ (Frequency diversity)

ไคเวอร์ซิตีชนิดนี้จะใช้ความถี่ถึงสองช่องสัญญาณระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับ ข้อมูลจะถูกส่งโดยเครื่องส่งสองตัวที่ทำงานที่ความถี่แตกต่างกัน ซึ่งสัญญาณทั้งสองจะถูกรวมกันไปสู่ท่อนำคลื่นและสายอากาศตามลำดับ โดยสัญญาณจะถูกส่งออกไปในสายอากาศเดียวกัน ที่ด้านรับสายอากาศจะรับสัญญาณและผ่านท่อนำคลื่นไปยังตัวกรองความถี่แยกความถี่ทั้งสองออกมา เครื่องรับแต่ละตัวก็จะแยกสัญญาณข้อมูลออกมา ด้วยวิธีการดังกล่าวก็จะทำให้สามารถลดผลกระทบจากการจางหายได้ ถ้าหากการแยกกันของความถี่ของเครื่องส่งสัญญาณมีมาก โดยการจางหายซึ่งเกิดเฉพาะที่ความถี่หนึ่ง ๆ จะมีโอกาสน้อยมาก ๆ ที่จะเกิดกับสัญญาณทั้งสองความถี่พร้อม ๆ กัน จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบ ข้อเสียของไคเวอร์ซิตีทางความถี่คือ จะต้องใช้แถบความถี่มากกว่าปกติ จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับพื้นที่ในเมืองใหญ่ที่มีช่องสัญญาณจำกัด การเพิ่มประสิทธิภาพของไคเวอร์ซิตีทางความถี่ถือว่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับไคเวอร์ซิตีทางสายอากาศจากการคำนวณพบว่าเพิ่มขึ้นเพียง 10 เท่าเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีไคเวอร์ซิตี

### 2.1.3 ไคเวอร์ซิตีทางสายอากาศ (Antenna diversity)

ไคเวอร์ซิตีชนิดนี้เครื่องรับจะรับสัญญาณจากสายอากาศตั้งแต่สองต้นขึ้นไป ซึ่งจะติดตั้งอยู่ห่างกันเป็นระยะหลายเท่าของความยาวคลื่น โดยสัญญาณที่ได้รับจากแต่ละสายอากาศจะถูกต่อเข้ากับตัวไคเวอร์ซิตีคอมไบเนอร์ (diversity combiner) ซึ่งหน้าที่ของตัวคอมไบเนอร์ก็คือ จะทำการเลือกสัญญาณที่ดีที่สุดหรือทำการรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน ก็แล้วแต่การออกแบบสัญญาณจากด้านส่งจะเดินทางเป็นเส้นตรงสองเส้นทางไปยังสายอากาศทางด้านรับทั้งสองต้น สัญญาณจากเครื่องส่งอาจจะเดินทางไปในอีกหลายเส้นทางที่แตกต่างกันและเส้นทางที่สัญญาณเกิดมีความต่างเฟสกับสัญญาณทางตรง ก็จะทำให้เกิดมัลติพาธเฟดดิ้ง (multipath fading) ขึ้นที่สายอากาศด้านรับ แต่สายอากาศทั้งสองต้นนั้นจะไม่เกิดมัลติพาธเฟดดิ้งที่เหมือนกันเพราะระยะทางของสายอากาศทั้ง

สองคันแตกต่างกัน นั่นคือแม้ว่าสัญญาณที่ได้เดินทางในระยะทางจากสายอากาศด้านส่งไปยังสายอากาศด้านรับข้างใดข้างหนึ่งอาจเกิดการหักล้างทางเฟสกัน แต่ในสายอากาศด้านรับอีกข้างหนึ่งก็จะไม่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าว จากสถิติพบว่าการใช้ไคเวอร์ซิตีทางสายอากาศทำให้คุณภาพของสัญญาณดีขึ้นหลายร้อยเท่า ซึ่งเป็นที่น่าพอใจมากและสายอากาศมักติดตั้งห่างกันเป็นระยะทาง 200 เท่าของความยาวคลื่นที่ใช้ จากการค้นพบล่าสุดการจัดสายอากาศไคเวอร์ซิตีที่ดีที่สุดจะอยู่ในแนวนอนให้สายอากาศอยู่ข้าง ๆ กัน สำหรับการใช้นี้เทคนิคไคเวอร์ซิตีทางสายอากาศยังมีประสิทธิภาพดีกว่าไคเวอร์ซิตีทางความถี่เพราะใช้ความถี่น้อยกว่าและใช้สำหรับช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวก็จะประหยัดกว่าด้วย

## 2.2 ไคเวอร์ซิตีทางสายอากาศ

ไคเวอร์ซิตีทางสายอากาศใช้ในการแก้ปัญหาผลกระทบจากการจางหาย จึงใช้เทคนิคการรวมความหลากหลายของสัญญาณจากไคเวอร์ซิตีคอมไบเนอร์ โดยสามารถแบ่งเป็น 3 วิธีการหลัก ๆ ดังที่กล่าวมาคือ วิธีการรวมสัญญาณแบบเอสซี วิธีการรวมสัญญาณแบบเอ็มอาร์ซีและวิธีการรวมสัญญาณแบบอีจีซี โดยทั้งหมดนี้จะอธิบายอย่างละเอียดดังต่อไปนี้ ก่อนอื่นเราจะเข้าใจคุณลักษณะเบื้องต้นของสัญญาณก่อน โดยทำการพิจารณาสัญญาณเฟดดิ้งแบบเรย์ลีที่แอมพลิจูด  $r_i$  กำลังเฉลี่ยสัญญาณ  $r_i^2 / 2$  ซึ่งมีสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน ค่ากำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวนเป็น  $N_i$  ดังนั้นค่า SNR ของสัญญาณสามารถแสดงได้เป็น

$$\gamma_i = \frac{r_i^2}{2N_i} = \frac{r_i^2}{2N} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $N$  เป็นกำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวนรวมของสายอากาศทั้งหมด กำหนดให้  $p(r_i)$  เป็นฟังก์ชันการหนาแน่นความน่าจะเป็น (probability density function : pdf) ของสัญญาณ ดังนั้น pdf ของ SNR สามารถหาได้ดังนี้

$$p(\gamma_i) | d\gamma_i | = p(r_i) | dr_i | \quad (2.2)$$

จากการแจกแจงสัญญาณแบบเรย์ลี (Rayleigh distribution) แสดงได้ดังนี้

$$p(r_i) = \frac{r_i}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r_i^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.1 โดย  $d\gamma_i = (r_i / N) dr_i$  กับสมการที่ 2.2 แทนลงในสมการที่ 2.3 จะได้

$$p(\gamma_i) = \frac{N}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r_i^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.4)$$

หาค่า  $\gamma_0$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนของกำลังเฉลี่ยของสัญญาณและกำลังเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนได้ดังนี้

$$\gamma_0 = \frac{E_0^2 / 2}{N} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $E_0$  เป็นแอมพลิจูดของคลื่นวิทยุ จากที่  $\sigma^2 = E_0^2 / 2$  จะได้

$$\gamma_0 = \frac{\sigma^2}{N} \quad (2.6)$$

ดังนั้น pdf ของ  $\gamma_i$  สามารถหาได้ดังนี้

$$p(\gamma_i) = \frac{1}{\gamma_0} \exp\left(-\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\right) \quad (2.7)$$

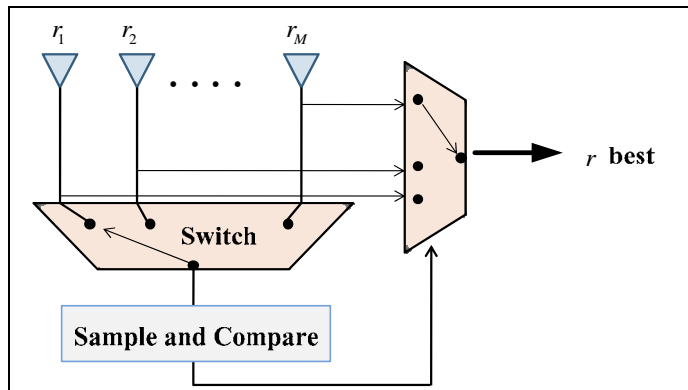
ความน่าจะเป็นที่  $\gamma_i$  น้อยกว่าหรือเท่ากับ SNR ที่กำหนด  $\Gamma$  ฟังก์ชันการแจกแจงของความน่าจะเป็น (cumulative density function : cdf)  $P(\Gamma)$  สามารถแสดงได้ดังนี้

$$P(\Gamma) = \text{prob}(\gamma_i \leq \Gamma) = \int_0^{\Gamma} p(\gamma_i) d\gamma_i = 1 - \exp\left(-\frac{\Gamma}{\gamma_0}\right) \quad (2.8)$$

### 2.2.1 การรวมสัญญาณแบบเลือก

สำหรับเทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือกจะทำการรวมสัญญาณ โดยเลือกสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณที่ดีที่สุดเพียง 1 สัญญาณเท่านั้น ซึ่งจะพิจารณาเลือกสัญญาณที่มีค่า SNR ดีที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.1





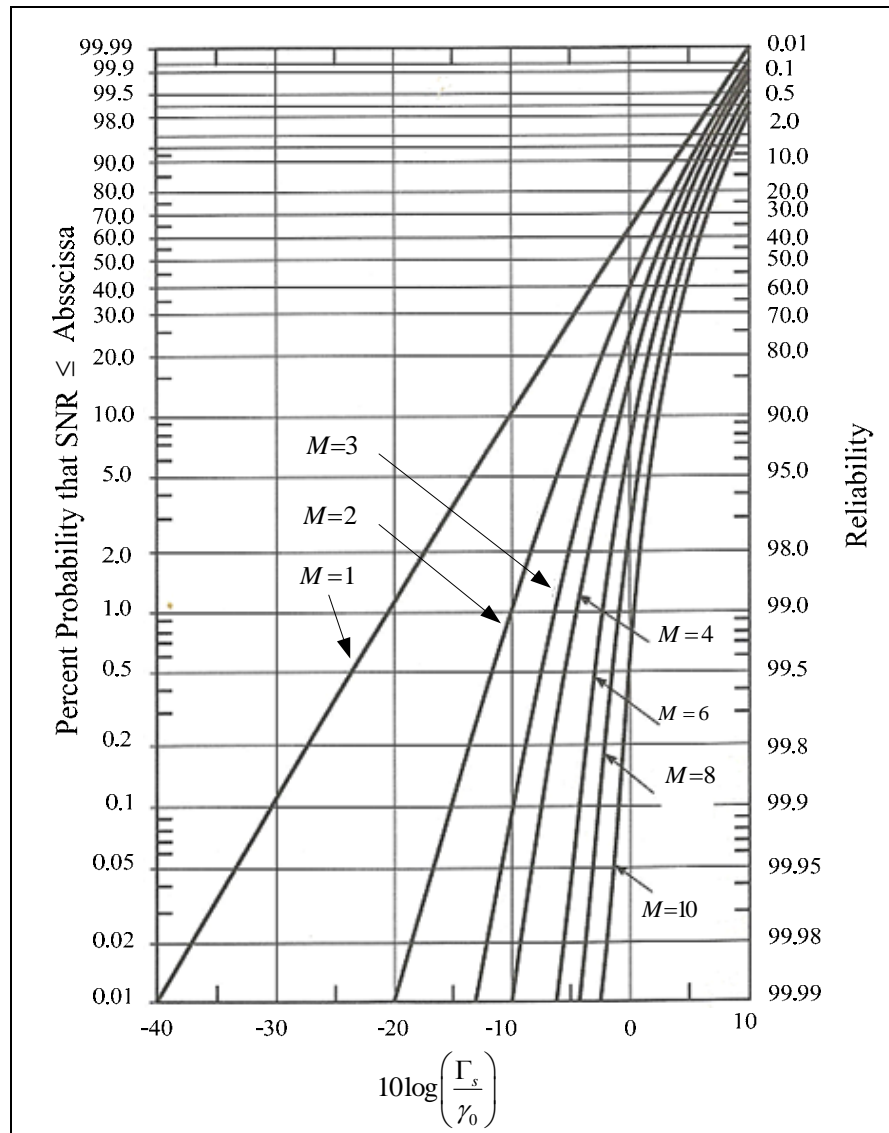
รูปที่ 2.1 แสดงการรวมสัญญาณแบบเอสซี

$$r = \text{one out of } \{r_1, r_2, \dots, r_M\} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $r$  เป็นผลที่ได้จากการเลือกสัญญาณที่ดีที่สุดและ  $r_i, i=1, \dots, M$  เป็นสัญญาณที่รับได้จากภาครับ จากสมการที่ 2.9 สามารถหาความน่าจะเป็นของ SNR ทั้งหมดในจำนวนสายอากาศ  $M$  ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ SNR ที่กำหนด  $\Gamma_s$  แสดงได้ดังนี้

$$P_{SEC}(\Gamma_s) = \text{prob}(\gamma_1, \dots, \gamma_M \leq \Gamma_s) = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Gamma_s}{\gamma_0}\right) \right]^M \quad (2.10)$$

ความน่าจะเป็นของสายอากาศมากกว่าหนึ่งที่ SNR มากกว่า  $\Gamma_s$  สามารถเขียนได้เป็น  $1 - P_{SEL}(\Gamma_s)$  หรือเรียกว่าความน่าเชื่อถือ (reliability) ดังในรูปที่ 2.2 แสดงกราฟของสมรรถนะของการใช้สายอากาศ  $M = 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10$  ต้น เส้นโค้งที่ได้เป็นการพล็อตบนพื้นฐานของการศึกษาเรย์ลี เมื่อการแจกแจงแบบเรย์ลี (เส้นโค้ง  $M = 1$ ) ที่แสดงเป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถสังเกตเห็นการปรับปรุงสมรรถนะของระบบได้ด้วยการใช้เทคนิคไดเวอร์ซิติ การใช้สายอากาศที่มากกว่าส่งผลให้ได้สมรรถนะของระบบที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนสายอากาศสำหรับไดเวอร์ซิติจะสามารถปรับปรุงค่า SNR ให้ดีขึ้น แต่ในทางปฏิบัติก็ยังไม่สามารถบอกชัดเจนได้ เพราะแนวโน้มของสมรรถนะอาจมีด้อยกว่าดังแสดงตัวอย่าง ที่ความน่าเชื่อถือ 99.9% ค่า SNR ที่ได้เท่ากับ -30 dB สำหรับเมื่อ  $M = 1$  (ไม่ใช่ไดเวอร์ซิติ) สำหรับค่า SNR เท่ากับ -15 dB เมื่อ  $M = 2$  และค่า SNR เท่ากับ -7.1 dB เมื่อ  $M = 4$  อัตราขยายสัญญาณที่ได้เมื่อทำการเปลี่ยน  $M = 1$  เป็น  $M = 2$  หรือจาก  $M = 2$  เป็น  $M = 3$  ถึง  $M = 4$  เท่ากับ 50% 35% 28% ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 แสดง cdf ของ SNR ที่เอาต์พุตสำหรับการรวมสัญญาณแบบเอสซี (Yacoub, M., 1993)

### 2.2.2 การรวมสัญญาณแบบปรับค่า SNR ให้สูงสุด

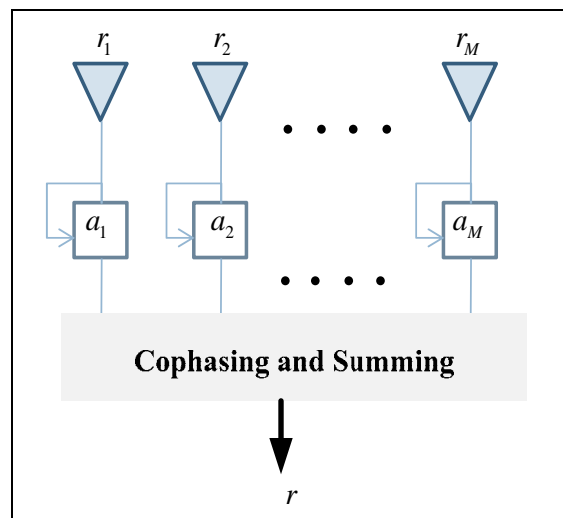
จากรูปที่ 2.3 แสดงไดอะแกรมของเทคนิคการรวมสัญญาณแบบเอ็มอาร์ซี ดังนั้น สัญญาณรวมที่ได้สามารถแสดงได้เป็น

$$r = \sum_{i=1}^M a_i r_i \quad (2.11)$$

เมื่อ  $a_i$  คืออัตราขยายที่สายอากาศ  $i$

เมื่อกำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวนรอบๆเท่ากับ  $N$  แต่ละสัญญาณ ซึ่งกำลังสัญญาณรบกวนรวมที่เอาต์พุตสามารถแสดงดังนี้

$$N = N \sum_{i=1}^M a_i^2 \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.3 แสดงการรวมสัญญาณแบบเอ็มอาร์ซี

ดังนั้นค่า  $\gamma$  ที่ได้มีค่าเท่ากับ

$$\gamma = \frac{r^2 / 2}{N} = \frac{1}{2} \frac{\left( \sum_{i=1}^M a_i r_i \right)^2}{N \sum_{i=1}^M a_i^2} \quad (2.13)$$

ถ้าอัตราขยาย  $a_i$  ที่เลือกมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของแรงดันสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวนของสายอากาศแต่ละต้น ดังนั้น

$$a_i = \frac{r_i}{N} \quad (2.14)$$

นำสมการที่ 2.14 แทนสมการที่ 2.13 จะได้

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{\left( \sum_{i=1}^M r_i^2 / N \right)^2}{N \sum_{i=1}^M (r_i / N)^2} = \sum_{i=1}^M \frac{r_i^2}{2N} = \sum_{i=1}^M \gamma_i \quad (2.15)$$

ในสมการที่ 2.15 แสดงผล SNR ที่เอาต์พุตของการรวมสัญญาณโดยเป็นการรวมค่า SNR ของจำนวนสายอากาศ  $M$  ต้น เมื่อ  $r_i$  เป็นฟังก์ชันของสองสัญญาณที่มีความอิสระต่อกันแบบเกาส์เซียน กล่าวคือ  $x_i$  และ  $y_i$  มีค่ากลางอยู่ที่ 0 และค่าความแปรปรวน  $\sigma^2$  เท่ากับ  $E_0^2 / 2$  เมื่อ  $r_i^2 = x_i^2 + y_i^2$  ดังนั้น

$$\gamma = \sum_{i=1}^M \gamma_i = \sum_{i=1}^M \frac{1}{2N} r_i^2 = \sum_{i=1}^M \frac{x_i^2}{2N} + \sum_{i=1}^M \frac{y_i^2}{2N} \quad (2.16)$$

ในสมการที่ 2.16 เรามีสอง  $M$  พจน์ของการรวมกัน ค่าชั้นของความอิสระ (degree of freedom) เท่ากับ  $2M$  โดย Yacoub, M. (1993) ได้แสดงวิธีรวมกันของการแจกแจงแบบไคสแควร์ (Chi-square distribution) เมื่อค่าความแปรปรวนเป็น  $\sigma^2 / 2N = \frac{1}{2} \gamma_0$  ดังนั้น pdf ของ  $\gamma$  สามารถแสดงได้ดังนี้

$$p_{MAX}(\gamma) = \frac{\gamma^{M-1} \exp(-\gamma / \gamma_0)}{\gamma_0^M (M-1)!}, \gamma \geq 0 \quad (2.17)$$

สำหรับค่า SNR ที่ต่ำ

$$p_{MAX}(\gamma) = \frac{\gamma^{M-1}}{\gamma_0^M (M-1)!} \quad (2.18)$$

ฟังก์ชันแจกแจง  $p_{MAX}(\Gamma_s)$  แสดงได้ดังนี้

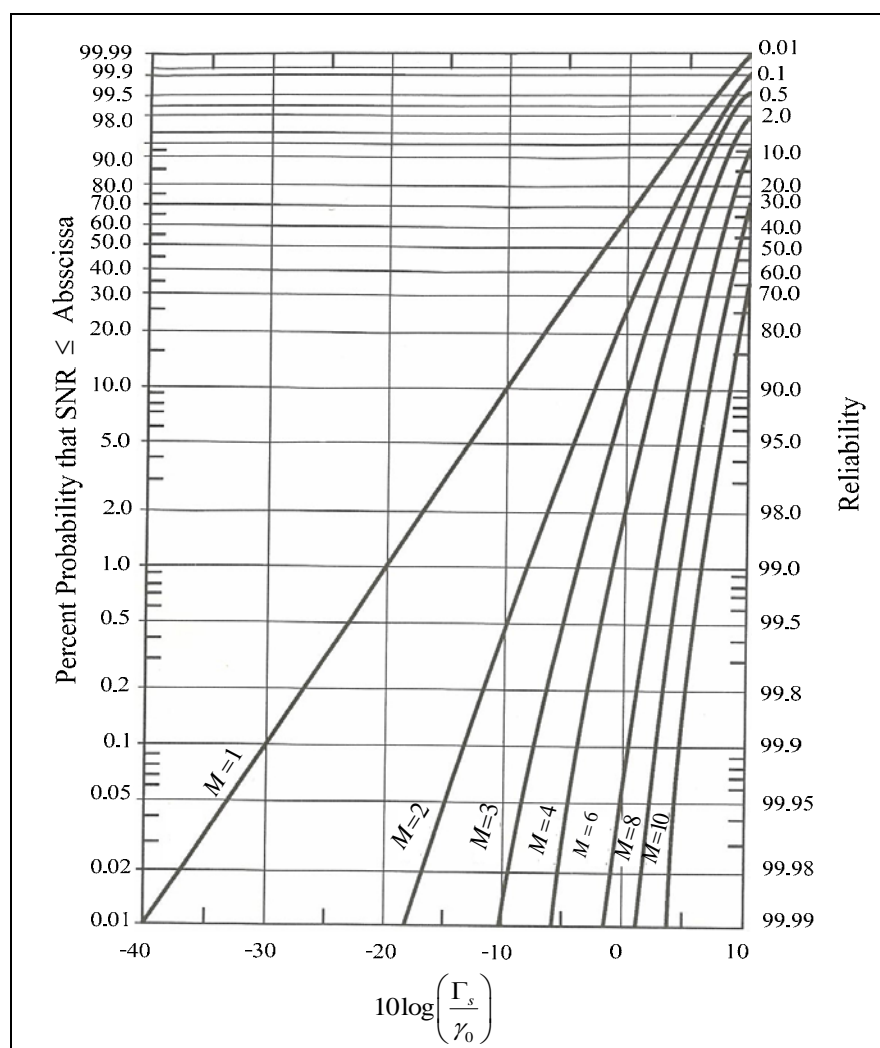
$$p_{MAX}(\Gamma_s) = \text{prob}(\gamma \leq \Gamma_s) = \int_0^{\Gamma_s} p_{MAX}(\gamma) d\gamma \quad (2.19)$$

แทนสมการที่ 2.17 ลงในสมการที่ 2.19 จะได้

$$P_{MAX}(\Gamma_s) = 1 - \exp\left(-\frac{\Gamma_s}{\gamma_0}\right) \sum_{i=1}^M \frac{(\Gamma_s / \gamma_0)^{i-1}}{(i-1)!} \quad (2.20)$$

สำหรับค่า SNR ต่ำในสมการที่ 2.18 แทนในสมการที่ 2.19 จะได้

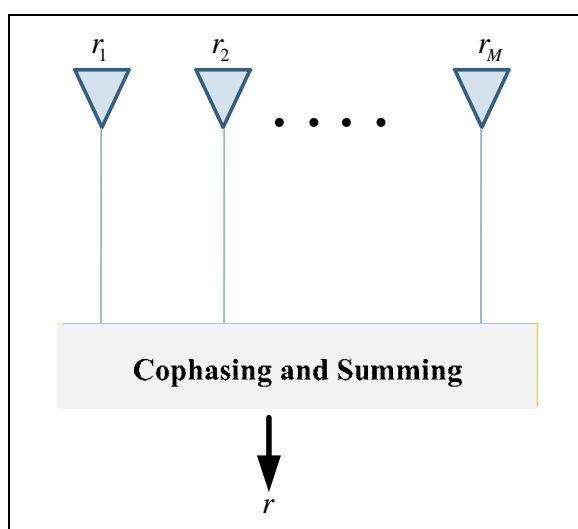
$$P_{MAX}(\Gamma_s) = \frac{(\Gamma_s / \gamma_0)^M}{M!} \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.4 แสดง cdf ของ SNR ที่เอาต์พุตสำหรับการรวมสัญญาณแบบเอ็มอาร์ซี (Yacoub, M., 1993)

ฟังก์ชันการแจกแจงดังกล่าวสามารถแสดงการพล็อตได้ดังรูปที่ 2.4 จากการเปรียบเทียบเส้นโค้งที่ได้จากรูปที่ 2.2 กับรูปที่ 2.4 จะเห็นถึงสมรรถนะของเทคนิคการรวมสัญญาณแบบเอ็มอาร์ซีที่ดีกว่าเอสซีอย่างชัดเจน

### 2.2.3 การรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากัน



รูปที่ 2.5 แสดงการรวมสัญญาณแบบอีจีซี

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากันจะทำการรวมสัญญาณโดยการปรับค่าอัตราขยายของแต่ละสัญญาณ เพื่อให้ค่า SNR ของทุกสัญญาณเท่ากันหมด จากนั้นจะนำสัญญาณทั้งหมดรวมกัน ซึ่งจะส่งผลให้ได้ค่า SNR ของสัญญาณรวมเพิ่มขึ้นด้วยในอัตราส่วนเท่ากับจำนวนของสัญญาณภาครับดังแสดงในรูปที่ 2.5 (Halpern, S. W., 1974) โดยจากสมการที่ 2.11 และสมการที่ 2.12 เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย  $a_i = 1$  สัญญาณรวมที่ได้จะเท่ากับ

$$r = \sum_{i=1}^M r_i \quad (2.22)$$

และ

$$\gamma = \frac{r^2 / 2}{N} = \frac{r^2}{2NM} \quad (2.23)$$

เมื่อสัญญาณ  $r$  เป็นตัวแปรสุ่ม ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการรวมกันของความอิสระแบบเรย์ลีจำนวน  $M$  กำหนดให้  $p(r)$  เป็น pdf ของ  $r$  ดังนั้น pdf ของ  $\gamma$  สามารถหาได้จาก

$$p_{EGC}(\gamma) | d\gamma | = p(r) | d(r) | \quad (2.24)$$

นำสมการที่ 2.23 แทนลงในสมการที่ 2.24 จะได้

$$p_{EGC}(\gamma) = NM \frac{p(r)}{r} = NM \frac{p(\sqrt{2\gamma NM})}{\sqrt{2\gamma NM}} \quad (2.25)$$

ทำการหา  $p(r)$  สำหรับกรณีสายอากาศ 2 ต้น ( $M = 2$ ) สามารถหาได้ง่ายโดย pdf ร่วม  $p(r_1, r_2)$  ของสัญญาณเรย์ลีที่ได้ทำการหาโดย Yacoub, M. (1993) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$p(r_1, r_2) = \frac{r_1 r_2}{\sigma^4} \exp\left[-\frac{r_1^2 + r_2^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2.26)$$

เมื่อ  $M = 2$  จะได้  $r = r_1 + r_2$  หรือ  $r_2 = r - r_1$  ดังนั้น  $p(r)$  สามารถหาได้จาก

$$p(r) = \int_0^r p(r_1, r_2) |_{r_2=r-r_1} dr = \int_0^r p(r_1, r - r_1) dr_1 \quad (2.27)$$

ภายใต้การอินทิเกรตในสมการที่ 2.27 และแทนค่าลงในสมการที่ 2.25 ดังนั้น pdf ของ  $\gamma$  สามารถแสดงได้ดังนี้

$$p_{EGC}(\gamma) = \frac{1}{\gamma_0} \exp\left(-\frac{2\gamma}{\gamma_0}\right) + \sqrt{\pi}^{-\frac{\gamma}{\gamma_0}} \left(\frac{1}{2\sqrt{\gamma\gamma_0}} - \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_0}}\right) \left(1 + 2Q\left(\sqrt{2\frac{\gamma}{\gamma_0}}\right)\right) \quad (2.28)$$

และสามารถหา cdf ของ  $\Gamma_s$  ได้ดังนี้

$$P_{EGC}(\Gamma_s) = 1 - \exp(-2\Gamma_s) - \sqrt{\pi\Gamma_s} \exp(-\Gamma_s) \text{erf}(\sqrt{\Gamma_s}) \quad (2.29)$$

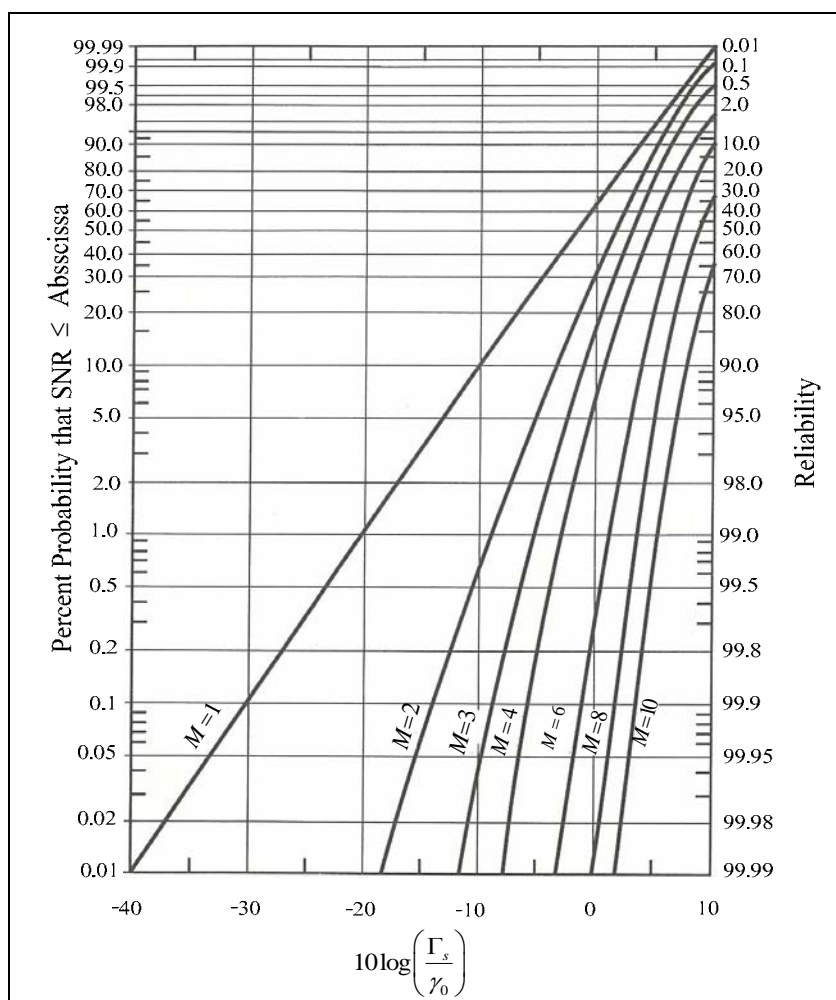
เมื่อ  $erf(.)$  คือฟังก์ชันความผิดพลาด สำหรับกรณี  $M > 2$  ซึ่งไม่สามารถใช้การแก้ปัญหาด้วย  
 กระจวนนี้ได้อย่างไรก็ตามเราสามารถใช้อักรวนการทางคอมพิวเตอร์หรือเทคนิคการจำลองแบบ  
 ในการแก้ปัญหานี้ได้ถูกนำเสนอโดย Schwrtz, M. (1996) เมื่อค่า SNR ค่ำสามารถแสดงได้ดังนี้

$$P_{EGC}(\gamma) = \frac{2^{M-1} M^M \gamma^{M-1}}{(2M-1)! \gamma^M} \quad (2.30)$$

$$P_{EGC}(\gamma) \approx \frac{(M/2)^M \sqrt{\pi}}{(M-1/2)! M!} \left( \frac{\Gamma_s}{\gamma_0} \right)^M \quad (2.31)$$

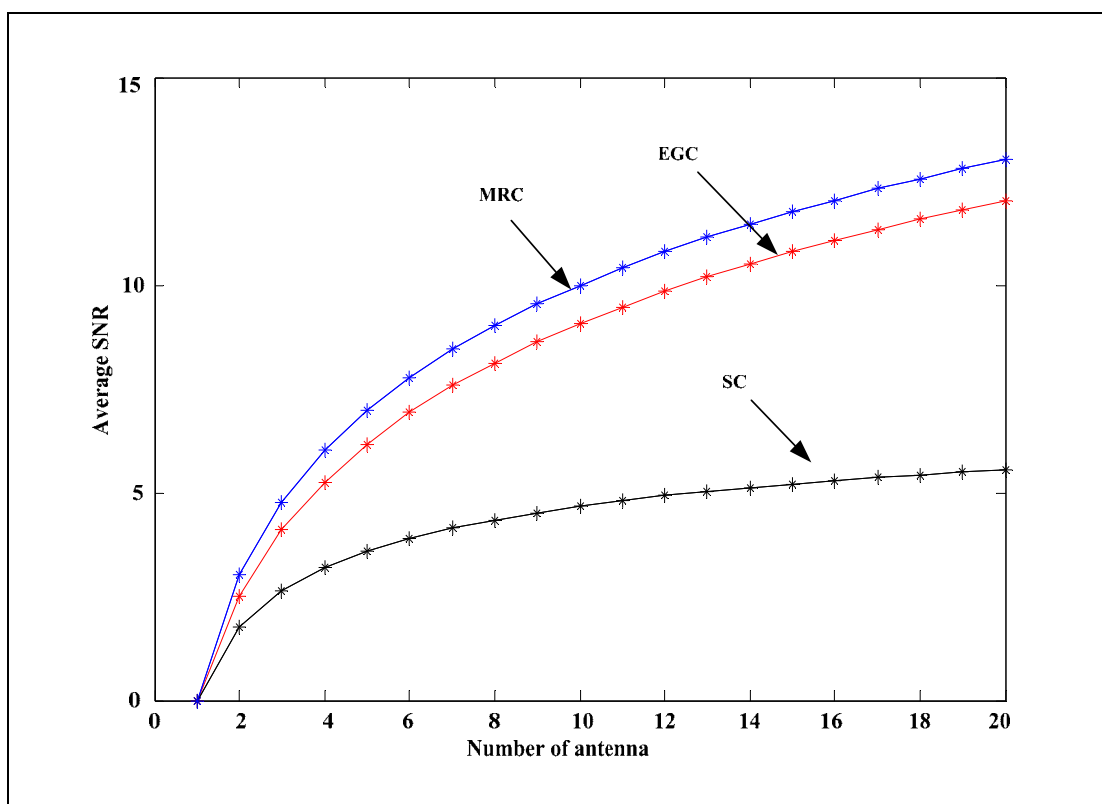
เมื่อ  $(.)!$  ป็นฟังก์ชันแกมมา ซึ่งเราสามารถแสดงได้คือ  $(M-1)! = \frac{1.3.5.7...(2M-1)!}{2^M}$  โดยสำหรับ  
 สมการที่ 2.31 แตกต่างจากสมการที่ 2.21 โดยแฟคเตอร์เท่ากับ  $(M/2)^M \sqrt{\pi} [(M-1/2)!]$  และ  
 การแจกแจงของ  $\Gamma_s$  สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 2.6 ซึ่งจะสังเกตเห็นถึงการใช้อักรวนการรวม  
 สัญญาณแบบอิจีซีนั้นมีประสิทธิภาพค่ำกว่าการใช้อักรวนเอ็มอาร์ซี แต่มีประสิทธิภาพดีกว่าเทคนิค  
 เอสซีอย่างชัดเจน (Halpern, S., 1977)





รูปที่ 2.6 แสดง cdf ของ SNR ที่เอาต์พุตสำหรับการรวมสัญญาณแบบอ็ีจีซี (Yacoub, M., 1993)

เมื่อมาเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 เทคนิคดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าเทคนิคเอ็มอาร์ซีให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเพราะจะทำการปรับค่าแอมพลิจูดและเฟสของแต่ละช่องสัญญาณเพื่อให้ได้ SNR มีค่าสูงสุด ส่งผลให้ค่า SNR รวมทั้งหมดมีค่าสูงสุด รองลงมาเป็นเทคนิคอ็ีจีซีและเอสซีตามลำดับ เนื่องจากเทคนิคเอสซีจะทำการรวมสัญญาณโดยเลือกสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณที่ดีที่สุดเพียง 1 สัญญาณเท่านั้น พิจารณาเลือกสัญญาณที่มีค่า SNR ที่ดีที่สุด ทำให้ประสิทธิภาพนี้ดีกว่าเทคนิคทั้งสอง แต่อย่างไรก็ตามการใช้เทคนิคอ็ีจีซีก็ยังมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับเทคนิคเอ็มอาร์ซี ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับความยุ่งยากและซับซ้อนที่น้อยกว่าของฮาร์ดแวร์ในทางปฏิบัติ เมื่อเทียบกับเทคนิคเอ็มอาร์ซีและเอสซี ด้วยเหตุผลนี้ทำให้เทคนิคอ็ีจีซีจึงเป็นที่น่าใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการรับสัญญาณ (Stuber, G. L., 1996)



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย SNR ของเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 เทคนิค

## 2.3 ช่องสัญญาณและการจางหาย

### 2.3.1 ช่องสัญญาณ (Channel)

ช่องสัญญาณ คือตัวกลางที่ให้สัญญาณผ่านจากสายอากาศภาคส่งยังสายอากาศภาครับซึ่งมีความเป็นไปได้หลายรูปแบบ โดยที่ช่องสัญญาณนั้นจะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณอินพุตชุดหนึ่งให้เป็นสัญญาณเอาต์พุตชุดหนึ่ง ในระบบการสื่อสารไร้สาย สัญญาณที่ถูกส่งออกมาทางภาคส่งจะไม่ได้เดินทางมาถึงยังทางภาครับปลายทางเป็นแนวเส้นตรงเพราะสัญญาณจะต้องพบกับสิ่งกีดขวางในสภาพแวดล้อมที่สัญญาณจะต้องเคลื่อนที่ผ่าน โดยที่คลื่นสัญญาณที่มาถึงทางภาครับจะเกิดขึ้นจากการรวมกันของคลื่นหลายวิถีที่มาจากหลายทิศทาง ซึ่งเกิดจากการสะท้อน (reflection) การเลี้ยวเบน (diffraction) และการกระจัดกระจาย (scattering) ผ่านสิ่งกีดขวางต่าง ๆ เช่น สิ่งก่อสร้าง ต้นไม้ ยานพาหนะ โดยจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดพหุวิถี (multipath) และผลจากการเกิดพหุวิถีนี้ทำให้สัญญาณที่มาถึงภาครับนั้นมีผลมาจากสัญญาณมากกว่าหนึ่งทาง ซึ่งแต่ละทางนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่แตกต่างกันไปทั้งในเชิงแอมพลิจูดและเฟสสัญญาณที่ได้รับจะประกอบไปด้วยผลจากวิถีต่าง ๆ สัญญาณแต่ละเส้นทางอาจเขียนให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ของ

แอมพลิจูดและเฟสได้ ถ้าอุปกรณ์ปลายทางกำลังเคลื่อนที่หรือสภาพแวดล้อมรอบ ๆ นั้นได้เกิดเปลี่ยนแปลง ผลกระทบจากช่องสัญญาณอาจเปลี่ยนแปลงอย่างสุ่มไปตามเวลา ดังนั้น ณ ขณะหนึ่งสัญญาณที่รับได้อาจจะมีการรวมกันแบบหักล้างและในอีกขณะหนึ่งอาจรวมกันแบบเสริมรูปแบบของการกระจายตัวที่ใช้กันทั่วไป ในการบอกลักษณะของแอมพลิจูดสุ่มที่เป็นผลมาจากช่องสัญญาณพหุวิถีจะมีอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบได้แก่ การกระจายตัวแบบเรย์ลี (Rayleigh) และการกระจายตัวแบบริเซียน (Rician)

ถ้าสัญญาณที่ได้รับไม่มีองค์ประกอบตามเส้นแนวสายตา (Line-of-Sight : LOS) ซึ่งก็คือ เมื่อวิถีตรงถูกบดบังเช่น การแพร่กระจายสัญญาณระยะไกลในสภาพแวดล้อมกลางแจ้ง (outdoor) สัญญาณที่ได้รับจะประกอบไปด้วย องค์ประกอบที่กระจัดกระจาย (scattered) เป็นผลมาจากการสะท้อนที่ไม่มีวิถีหลัก ซึ่งสามารถแยกออกเป็นองค์ประกอบร่วมเฟส (in-phase) และองค์ประกอบตั้งฉาก (quadrature) ซึ่งวิถีแต่ละวิถีมีผลต่อทั้งสองส่วนนี้ด้วย จากทฤษฎีขีดจำกัดกลาง (central limit theorem) เมื่อวิถีมีจำนวนมากจะทำให้สามารถอนุมานได้ว่าองค์ประกอบร่วมเฟสและองค์ประกอบตั้งฉากเป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ (Gaussian random variable) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ดังนั้นแอมพลิจูดทั้งหมดของสัญญาณที่ได้มาจากการบวกเวกเตอร์ขององค์ประกอบทั้งหมดจึงเป็นไปตามนิยามของการกระจายตัวแบบเรย์ลี นอกจากนี้เฟสก็มีการกระจายตัวแบบเอกรูปในช่วง  $[0, 2\pi]$  การกระจายตัวแบบเรย์ลีของแอมพลิจูดของสัญญาณ  $a$  มีนิยามดังนี้

$$f_p(a) = \frac{a}{\sigma^2} e^{-\left(\frac{a^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (2.32)$$

โดยที่  $\sigma^2$  คือแอมพลิจูดขององค์ประกอบร่วมเฟสและองค์ประกอบตั้งฉาก ซึ่งปริมาณทางสถิติสองค่าที่เกี่ยวข้องในที่นี้คือ ค่าเฉลี่ยและโมเมนต์ที่สองของตัวแปรสุ่มแบบเรย์ลีซึ่งมีค่าเป็น

$$E[a] = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma \quad (2.33)$$

$$E[a^2] = 2\sigma^2 \quad (2.34)$$

ถ้ามีองค์ประกอบ LOS แนวตรงตั้งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร สัญญาณที่ได้รับจะมีองค์ประกอบตาม LOS หลัก และองค์ประกอบกระเจิงอันเนื่องมาจากการสะท้อน เมื่อเรา

กำหนดให้องค์ประกอบ LOS อยู่ในแนวร่วมเฟส โดยแอมพลิจูดของสัญญาณที่ได้รับ  $a$  จะมีการกระจายตัวแบบริเชียนดังนี้

$$f_{\rho}(a) = \frac{a}{\sigma^2} e^{-\left(\frac{a^2+a_0^2}{2\sigma^2}\right)} I_0\left(\frac{a_0 a}{\sigma^2}\right) \quad (2.35)$$

โดยที่  $\sigma^2$  แทนกำลังขององค์ประกอบร่วมเฟสและองค์ประกอบตั้งฉากกระเจิงคือ แอมพลิจูดขององค์ประกอบ LOS และ  $I_0(a)$  เป็นฟังก์ชันเบสเซลดัดแปลงอันดับศูนย์ (zero order modified Bessel function) การกระจายตัวแบบริเชียนนี้มักจะใช้ตัวประกอบ  $K$  ของริเชียนเป็นตัวกำหนดลักษณะดังนี้

$$K = \frac{a_0^2}{2\sigma^2} \quad (2.36)$$

จากการวัดในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารต่าง ๆ พบว่าโดยทั่วไปค่าของ  $K$  จะมีค่าเป็น 10 ปริมาณทางสถิติที่เกี่ยวข้องในที่นี้คือ ค่าเฉลี่ยของการกระจายตัวแบบริเชียนซึ่งมีค่าเป็น

$$E[a] = e^{-K/2} \sqrt{\frac{\pi}{2(K+1)}} \left[ (1+K)I_0\left(\frac{K}{2}\right) + KI_1\left(\frac{K}{2}\right) \right] \quad (2.37)$$

โดยที่  $I_1(K)$  แทนฟังก์ชันเบสเซลดัดแปลงอันดับหนึ่ง (first order modified Bessel function)

### 2.3.2 การจางหาย (Fading)

ในระบบการสื่อสารแบบไร้สายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ คุณลักษณะของช่องสัญญาณไม่อยู่ในสภาพคงที่ (stationary) และสามารถคาดเดาได้เหมือนช่องสัญญาณในระบบสื่อสารที่เชื่อมต่อด้วยสาย (wired channel) แต่ช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเชิงสุ่ม (random) และเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ทั้งนี้เนื่องจากการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไร้สายระหว่างภาครับไปยังภาคส่งที่เกิดการสะท้อนกับสิ่งกีดขวางที่อยู่ในบริเวณนั้น เช่น อาคาร ต้นไม้หรือพื้นดิน ส่งผลให้สัญญาณที่ปลายทางได้รับประกอบไปด้วยสัญญาณสะท้อนจากหลากหลายเส้นทางซึ่งมีขนาดและเฟสที่แตกต่างกัน นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของสถานีส่งขณะที่มีการส่งสัญญาณหรือการที่สภาพแวดล้อมที่อยู่ระหว่างภาคส่งและภาครับนั้นได้

เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ปัจจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมาส่งผลให้สัญญาณที่ปลายทางได้รับมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างรวดเร็วทั้งในแง่ของขนาดแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การจางหายของสัญญาณ (small-scaled fading) หรือเฟดดิ้ง ทั้งนี้ในกรณีที่ช่องสัญญาณไร้สายมีสัญญาณสะท้อนจากทิศทางต่าง ๆ จำนวนมาก แต่ไม่มีสัญญาณ LOS ระหว่างภาคส่งกับภาครับจะเรียกการจางหายที่เกิดขึ้นนี้ว่า เรย์ลีเฟดดิ้ง (Rayleigh fading) ทั้งนี้เนื่องจากสภาพของเอนVELOPE ของสัญญาณที่ได้รับมีการกระจายตัวทางสถิติเป็นแบบเรย์ลี ปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดการจางหายมีอยู่ 2 ประการดังนี้

#### 1) การแผ่แบบประวิงเวลา (Delay spread)

เนื่องจากสัญญาณที่ถูกส่งมาจากต้นทาง เมื่อไปกระทบกับสิ่งกีดขวางที่อยู่ระหว่างภาคส่งกับภาครับ ก็จะทำให้เกิดการสะท้อนและหักเหทำให้สัญญาณที่ปลายทางได้รับประกอบด้วยสัญญาณสะท้อนจากหลายเส้นทางซึ่งมาถึงยังปลายทางในเวลาที่แตกต่างกัน ดังนั้นสัญญาณรวมที่ปลายทางจึงเป็นสัญญาณที่มีการประวิงเวลาไปหรืออาจเรียกได้ว่า สัญญาณเกิดการแผ่ทางเวลา (time spread) ผลของการประวิงเวลานั้นทำให้การเดินทางไปยังปลายทางของสัญญาณใช้เวลานานกว่าปกติ ก่อให้เกิดการรบกวนกันของสัญญาณในแต่ละสัญลักษณ์หรือการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ ทั้งนี้การประวิงเวลาของสัญญาณจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของช่องสัญญาณ

#### 2) การแผ่แบบดอปเพลอร์ (Doppler spread)

การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างภาครับกับกับภาคส่งส่งผลให้สัญญาณที่เดินทางมาในแต่ละเส้นทางเกิดการเลื่อนทางความถี่เรียกว่า การเลื่อนความถี่แบบดอปเพลอร์ (doppler shift) ซึ่งความถี่ที่เลื่อนไปจะมีค่าเป็นบวกหรือลบเล็กน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนที่ภาครับด้วย นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของวัตถุที่อยู่บริเวณรอบ ๆ ภาครับก็ยังสามารถทำให้เกิดการเลื่อนความถี่แบบดอปเพลอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเหมือนกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการแผ่แบบดอปเพลอร์นี้ทำให้ช่องสัญญาณมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (time-varying channel) และอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นก็ส่งผลโดยตรงต่อความเร็วของการเกิดการจางหาย

การจางหายที่เกิดขึ้นในการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไร้สายนั้นมีอยู่หลายประเภท การที่จะพิจารณาว่าเป็นการจางหายแบบใดจะพิจารณาจากลักษณะของสัญญาณที่ส่งเปรียบเทียบกับคุณลักษณะของช่องสัญญาณ (channel characteristic) เป็นหลัก พารามิเตอร์ของสัญญาณที่ใช้พิจารณาได้แก่ แบนด์วิดท์ ช่วงเวลาของสัญลักษณ์ (symbol period) ส่วนปัจจัยของช่องสัญญาณที่ส่งผลต่อลักษณะของการจางหาย เมื่อทำการพิจารณาลักษณะของการจางหายจากการแผ่แบบประวิงเวลาอันเนื่องมาจากหลายวิธีทางทำให้เกิดจางหายอยู่ 2 รูปแบบดังนี้

### 1) การจางหายแบบราบ (Flat fading)

ถ้าช่องสัญญาณมีผลตอบสนองอัตราขยายคงที่และมีผลตอบสนองเฟสที่เป็นเชิงเส้นในช่วงแบนด์วิดท์ที่กว้างกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณแล้ว จะทำให้การจางหายที่เกิดขึ้นเป็นแบบราบซึ่งสัญญาณที่ปลายทางได้รับจะมีคุณลักษณะเชิงสเปกตรัม (spectrum characteristic) เหมือนเดิมแต่ค่ากำลังของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เนื่องจากผลของคลื่นหลายวิถีทางที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ ดังนั้นช่องสัญญาณที่เกิดการจางหายแบบราบนี้จึงสามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่า ช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูด (amplitude varying channel) การแจกแจงของแอมพลิจูดที่มักพบโดยทั่วไปจะเป็นการแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh distribution)

### 2) การจางหายแบบเลือกความถี่ (Frequency-selective fading)

ถ้าช่องสัญญาณมีผลตอบสนองอัตราขยายคงที่และมีผลตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นในช่วงแบนด์วิดท์ที่แคบกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณแล้ว การจางหายที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบเลือกความถี่กล่าวคือ สเปกตรัมของสัญญาณจะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณไม่เท่ากันทั้งหมด ส่วนประกอบสเปกตรัมที่อยู่นอกช่วงแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบที่แตกต่างออกไป ซึ่งช่วงพิสัยของความถี่ที่ช่องสัญญาณมีผลกระทบต่อส่วนประกอบของสเปกตรัมเท่าเทียมกันเรียกว่า แบนด์วิดท์ร่วมนัย (coherent bandwidth) เมื่อช่องสัญญาณเกิดการจางหายแบบเลือกความถี่ ผลตอบสนองช่องสัญญาณจะเกิดการแผ่ออกทางเวลาซึ่งยาวกว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์ ทำให้สัญญาณที่ได้รับถูกลดทอนขนาดและมีการประวิงทางเวลา ส่งผลให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (intersymbol interference) ขึ้น

ในขณะที่การแผ่แบบคอปเพลอร์จะส่งผลกระทบต่อการจางหายอีก 2 รูปแบบคือการจางหายแบบเร็ว (fast fading) และการจางหายแบบช้า (slow fading) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 1) การจางหายแบบเร็ว

การแผ่แบบคอปเพลอร์และเวลาร่วมนัย (coherence time) ใช้บ่งบอกถึงคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของช่องสัญญาณ ซึ่งมีผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ เวลาร่วมนัยนั้นคือ ช่วงเวลาทางสถิติที่ผลตอบสนองต่อช่องสัญญาณมีค่าไม่เปลี่ยน ทั้งนี้ยังเป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงความคล้ายคลึงกันของผลตอบสนองช่องสัญญาณในช่วงเวลาหนึ่งอีกด้วย กล่าวคือ สัญญาณที่มาถึงภาครับที่เวลาต่างกันแต่ไม่เกินเวลาร่วมนัยจะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณใกล้เคียงกัน

ในกรณีของการจางหายแบบเร็ว ผลตอบสนองช่องสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วภายในช่วงเวลาที่ตั้งสัญญาณ ดังนั้นเวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณจะมีค่าน้อยกว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์และคุณลักษณะของการจางหายจะเปลี่ยนแปลงไปมาหลายครั้ง ในขณะที่สัญลักษณ์หนึ่ง ๆ ถูกส่งไป ส่งผลให้รูปร่างของสัญญาณเบสแบนด์ผิดเพี้ยนไป

## 2) การจางหายแบบช้า

สำหรับการจางหายแบบช้า นั้นเกิดขึ้นเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองของช่องสัญญาณมีค่าน้อยกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณหรือเวลารวมกันมีค่ามากกว่าเวลาของสัญลักษณ์ ในกรณีนี้ช่องสัญญาณจะมีผลตอบสนองคงที่ภายในช่วงเวลาหลายสัญลักษณ์ทำให้ได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณติดกันเป็นช่วงยาว

## 2.4 สหสัมพันธ์ของสัญญาณ

การศึกษาผลกระทบของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันในการเรียงตัวของสายอากาศสำหรับไดเวอร์ซิตีตั้งแต่ปี 1950 โดย Brennan, D. G. (1959) ปัญหาของความสัมพันธ์กันของการจางหายสำหรับสายอากาศสองต้นในเทคนิคการรวมสัญญาณแบบเอสซีในระบบไดเวอร์ซิตีนั้นเป็นสิ่งที่ควรพิจารณาอย่างยิ่ง จากที่ Pierce, J. N. (1960) ได้ศึกษาอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate : BER) ของเทคนิคไดเวอร์ซิตีแบบเอ็มอาร์ซีและอีจีซีสำหรับการมอดูเลตแบบ BPSK ในความสัมพันธ์กันของช่องสัญญาณแบบเรย์ลีและแสดงการเพิ่มขึ้นของความสัมพันธ์กันของสัญญาณส่งผลกระทบต่อค่า BER ที่เพิ่มขึ้นด้วยโดยมีงานวิจัยอีกมากมายที่ได้เสนอผลของสหสัมพันธ์ของการจางหายสำหรับการใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีที่แตกต่างกันไปอีกด้วย (Shiu, D. S., Foschini, G. J., Gans, M. J., and Kahn, J. M., 2000; Lee, W. C. Y., 1973; Luo, J., Zeidler, J. R., and McLaughlin, S., 2001)

ในระบบไดเวอร์ซิตีที่มีสายอากาศสองต้น ค่ากำลังความสัมพันธ์ของสัญญาณระหว่างสองสัญญาณสามารถหาได้ดังนี้ (Dietze, K., Dietrich, C. B., and Stutzman, W. L., 2002)

$$\rho = \frac{E\left[\left(r_1^2 - \bar{r}_1^2\right)\left(r_2^2 - \bar{r}_2^2\right)\right]}{\sqrt{E\left[\left(r_1^2 - \bar{r}_1^2\right)^2\right]}E\left[\left(r_2^2 - \bar{r}_2^2\right)^2\right]} \quad (2.40)$$

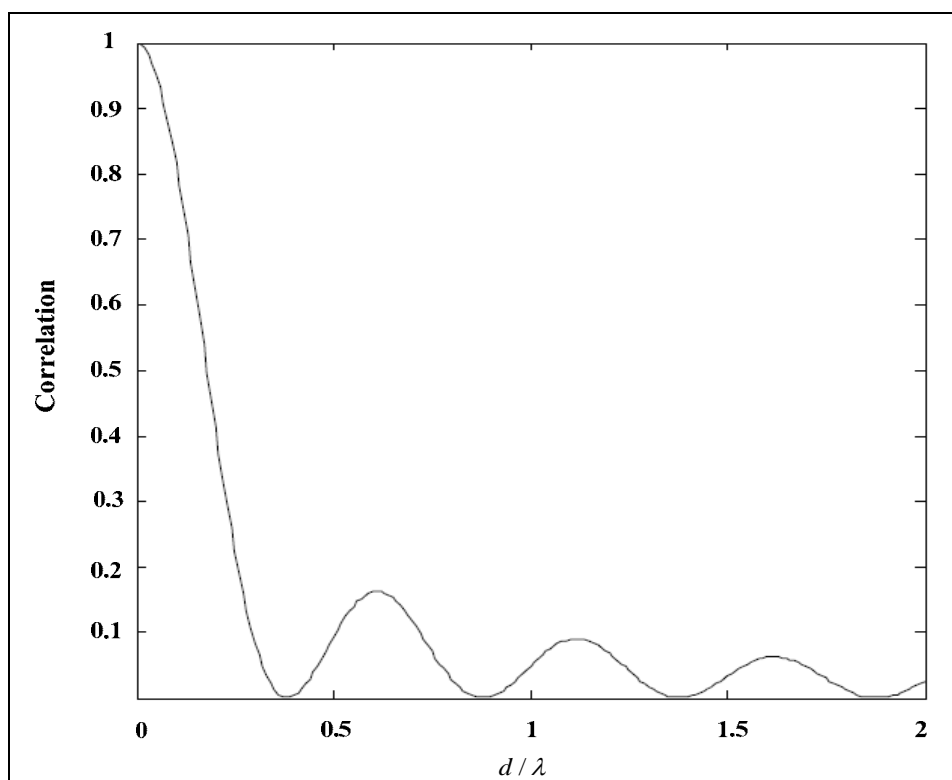
เมื่อ  $r_1$  และ  $r_2$  คือ สัญญาณเฟดดิ้งสหสัมพันธ์สำหรับไดเวอร์ซิตีสายอากาศ 2 ต้นและ  $E[\cdot]$  คือค่าความหวังของระบบ,  $\bar{r}_l^2 = E[r_l^2]$  ( $l \in \{1, 2\}$ ) ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเอเวนโบลพบได้จาก

$$\rho_e = \frac{E\left[\left(r_1 - E[r_1]\right)\left(r_2 - E[r_2]\right)\right]}{\sqrt{E\left[\left(r_1 - E[r_1]\right)^2\right]}E\left[\left(r_2 - E[r_2]\right)^2\right]} \quad (2.41)$$

สหสัมพันธ์ระหว่างแต่ละสัญญาณของสายอากาศแต่ละต้นนั้นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้น โดยระยะห่างของสายอากาศที่มากจะส่งผลให้เกิดสหสัมพันธ์ที่น้อยซึ่งความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  $\rho$  และระยะการวางตัวของสายอากาศ  $d$  ซึ่งสามารถหาได้โดย Clarke, R. H. (1968)

$$\rho = J_0^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \quad (2.42)$$

เมื่อ  $J_0(\cdot)$  คือฟังก์ชันเบสเซลอันดับศูนย์และ  $\lambda$  เป็นความยาวของคลื่นพาห์ ยกตัวอย่างที่ความถี่อยู่ที่ 1.8 GHz ระยะ  $d$  เท่ากับ 3.8 ซม. ดังนั้น  $\rho$  มีค่าเป็น 0.3 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\rho$  และระยะ  $d$  แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  $\rho$  กับระยะห่างสายอากาศ  $d$



ในภาครับซึ่งมีจำนวนสายอากาศหลายต้นบนพื้นที่ที่จำกัดจึงมีความจำเป็นที่ต้องพิจารณาการวางระยะห่างของสายอากาศเพื่อหลีกเลี่ยงการสับสนพัวพันของสัญญาณด้วย ซึ่งในวิจัยที่ผ่านมา (Dietrich, C. B., Dietze, K., Nealy, J. R., and Stutzman, W. L., 2001) ได้อธิบายการสับสนพัวพันของแต่ละเอเว่น โลปในระบบไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้น โดยทั่วไปแล้วค่าสับสนพัวพันจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มระยะที่ห่างขึ้นด้วยสมรรถนะของระบบไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศนั้นผลกระทบของการสับสนพัวพันของสัญญาณนั้นมีผลต่อระบบอย่างมาก ซึ่งจะเป็นสิ่งที่ดีมากเมื่อมีการวางสายอากาศที่ระยะที่เหมาะสม ในบทความต่อไปจะกล่าวถึงการพิจารณาสับสนพัวพันของสัญญาณเมื่อมีปัจจัยของระยะการวางตัวของสายอากาศในระบบไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศ

## 2.5 จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm)

จินเนติกอัลกอริทึมเป็นเทคนิคการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ จินเนติกอัลกอริทึมเป็นการคำนวณอย่างหนึ่งทีกล่าวได้ว่ามีวิวัฒนาการ อยู่ในขั้นตอนของการค้นหาคำตอบและได้รับการจัดให้เป็นวิธีหนึ่งในกลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ ซึ่งที่ยอมรับและมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในทางด้านปัญญาประดิษฐ์

จินเนติกอัลกอริทึมถูกพัฒนาขึ้นในช่วงทศวรรษที่ 60 โดยจำลองเอาแนวคิดของการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตในระบบชีววิทยามาใช้ในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ จินเนติกอัลกอริทึมได้รับความนิยมโดยการเผยแพร่ของ John Holland ในหนังสือชื่อ Adaptation in Natural and Artificial Systems ซึ่งตีพิมพ์เป็นครั้งแรกปี ค.ศ. 1975 หลังจากนั้นจึงมีการนำเอาจินเนติกอัลกอริทึมไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆกันอย่างแพร่หลายพร้อมๆกับการศึกษาและพัฒนาองค์ประกอบต่างๆของจินเนติกอัลกอริทึมให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น จินเนติกอัลกอริทึมถือว่าเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเชิงผสมผสาน (combinatorial optimization method) แบบปัญญาประดิษฐ์ที่มีความสามารถในการค้นหาคำตอบอย่างชาญฉลาดและลดความยุ่งยากในขั้นตอนต่างๆ ของการค้นหาลงไป ซึ่งวิธีแบบปัญญาประดิษฐ์นี้มีข้อได้เปรียบและความแตกต่างไปจากวิธีดั้งเดิมเช่น การคำนวณเชิงตัวเลข การโปรแกรมเชิงเส้น ปัจจุบันจึงได้เห็นว่ามีมีการนำเอาจินเนติกอัลกอริทึมไปใช้เกือบทุกสาขาวิชาเช่น 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 การขนส่งและอื่น ๆ อีกมากมาย จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพและสมรรถนะของจินเนติกอัลกอริทึมได้เป็นที่ยอมรับและมีการนำไปประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย

จินเนติกอัลกอริทึมเป็นขั้นตอนในการค้นหาคำตอบให้กับระบบ เราสามารถมองเป็นเครื่องมือในการช่วยคำนวณอย่างหนึ่ง โดยธรรมชาติแล้วประกอบไปด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ ได้แก่ การคัดเลือกสายพันธุ์ (selection) คือขั้นตอนในการคัดเลือกประชากรที่ดีไปเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ การปฏิบัติทางสายพันธุ์ (genetic operation) คือกรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมด้วยวิธีการทางสายพันธุ์เป็นขั้นตอนการสร้างลูกหลานซึ่งได้จากการรวมพันธุ์ของต้นกำเนิดสายพันธุ์ เพื่อให้เพื่อให้ได้ลูกหลานที่มีส่วนผสมได้จากการผสมมาจากพ่อแม่หรือได้จากการแปรผันยีนของพ่อแม่เพื่อให้ได้ลูกหลานสายพันธุ์ใหม่เกิดขึ้น การแทนที่ (replacement) เป็นขั้นตอนการนำเอาลูกหลานกำเนิดใหม่ไปแทนที่ประชากรเก่าในรุ่นก่อน เป็นขบวนการในการคัดเลือกที่ว่าควรจะเอาลูกหลานในกลุ่มใดไปแทนประชากรเก่าในกลุ่มใด จินเนติกอัลกอริทึมมีการจำลองวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตในระบบธรรมชาติกล่าวคือ กระบวนการภายในของจินเนติกอัลกอริทึมทำให้คำตอบของระบบที่มีอยู่เกิดวิวัฒนาการในตัวเอง อันจะนำไปสู่การปรับตัวให้กลายเป็นคำตอบที่ดีกว่าและดีที่สุดได้ รายละเอียดขององค์ประกอบในวัฏจักรจินเนติกอัลกอริทึมมีดังนี้

1) ประชากร (population) ประกอบไปด้วยกลุ่มของโครโมโซม (chromosome) ซึ่งเป็นตัวแทนคำตอบในระบบที่ต้องการค้นหา

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

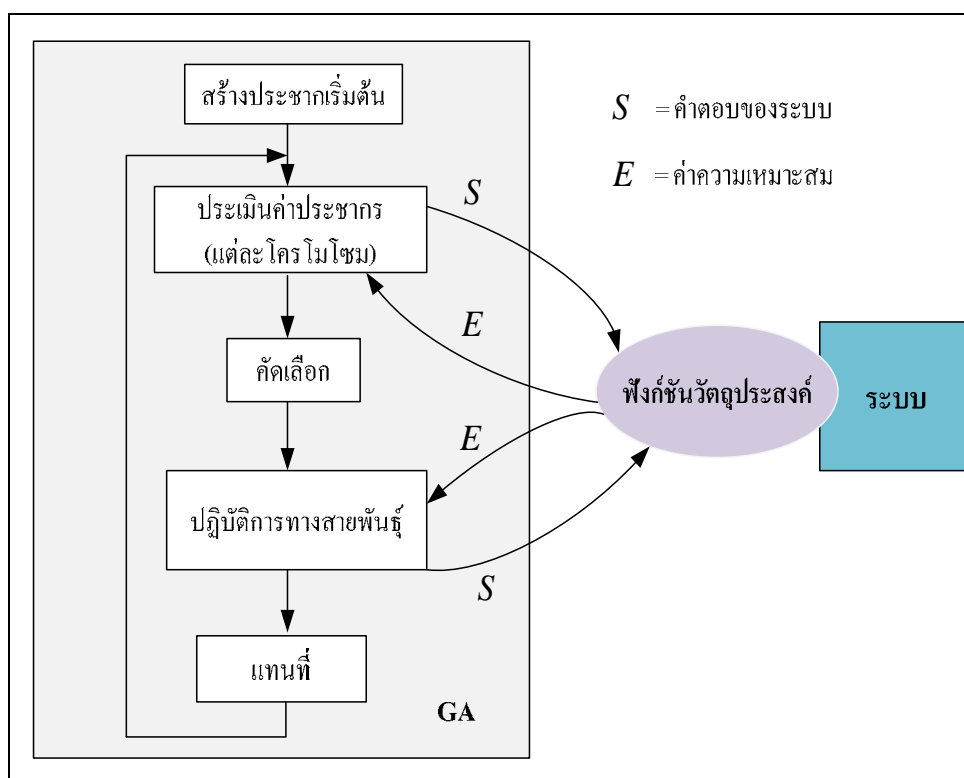
3) สายพันธุ์ใหม่ (offspring) หรือลูกหลาน เป็นประชากรกลุ่มใหม่ที่ได้รับการถ่ายทอดสายพันธุ์มาจากพ่อแม่ โดยคาดหวังที่จะได้รับสายพันธุ์ที่ดีที่สุดเพื่อถ่ายทอดต่อ ๆ กันในประชากรรุ่นถัดไป

### 2.5.1 ขั้นตอนการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม

สำหรับแผนภาพในรูปที่ 2.9 แสดงขั้นตอนทั่วไปของจินเนติกอัลกอริทึมและการเชื่อมโยงเข้ากับระบบในโลกจริงเพื่อทำการค้นหาคำตอบของโครโมโซมในกลุ่มของประชากรซึ่งคำตอบที่ต้องการจะเป็นโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่ม ดังนั้นระบบจะสามารถรู้ได้ว่าคำตอบที่มีอยู่ในจินเนติกอัลกอริทึม ณ เวลานั้น ๆ นั้นดีหรือไม่ดีอย่างไรด้วยการประเมินค่าของโครโมโซมผ่านฟังก์ชันวัตถุประสงค์ สำหรับขั้นตอนทั่วไปของจินเนติกอัลกอริทึมมีดังนี้

- 1) สร้างประชากร โดยปกติจะใช้การสุ่ม
- 2) ประเมินค่าโครโมโซมของกลุ่มประชากรทั้งหมดด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เนื่องจากระบบไม่สามารถเข้าใจค่าของโครโมโซมภายใน ดังนั้นโครโมโซมจะต้องผ่านการถอดรหัสก่อนที่จะทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
- 3) ค้นหาหาค่าความเหมาะสมแล้วส่งกลับไปยังจินเนติกอัลกอริทึม

- 4) ใช้ค่าความเหมาะสมทำการคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่ม เพื่อนำโครโมโซมมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ เพื่อเป็นตัวแทนในการถ่ายทอดสายพันธุ์ให้รุ่นถัดไป
- 5) นำต้นกำเนิดสายพันธุ์มาทำการสร้างลูกหลานด้วยปฏิบัติการทางสายพันธุ์โครโมโซมที่ได้ในขั้นตอนนี้ก็คือ โครโมโซมลูกหลาน
- 6) คำนวณค่าความเหมาะสมของโครโมโซมลูกหลานใช้ขั้นตอนเดียวกับข้อ 3
- 7) โครโมโซมในประชากรเดิมจะถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมลูกหลานที่ได้จากข้อ 5 ประชากรเพียงบางส่วนเท่านั้นที่จะถูกแทนที่ด้วยกลวิธีเฉพาะสำหรับขั้นตอนของการแทนที่โดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสินใจ
- 8) เริ่มต้นทำซ้ำจากขั้นตอนในข้อ 2 เรื่อย ๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ต้องการคำตอบที่ได้จะมาจากโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มประชากร โดยที่สามารถใช้ค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการประเมินว่าคำตอบที่ได้เป็นที่ต้องการหรือไม่



รูปที่ 2.9 แสดงขั้นตอนทั่วไปของจินเนติกอัลกอริทึม

## 2.5.2 โครโมโซมประชากรและการเข้ารหัส (Population and encoding scheme)

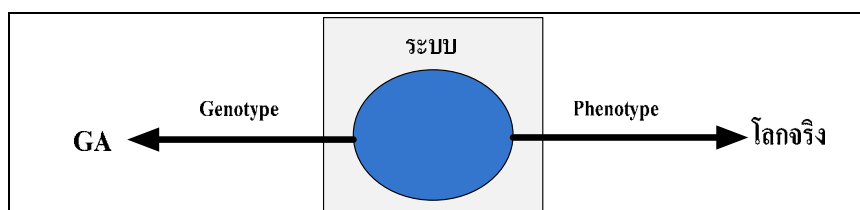
การเข้ารหัสประชากรเป็นขั้นตอนแรกและเป็นขั้นตอนสำคัญของเทคนิคนี้เพราะเป็นการออกแบบให้โครโมโซมเป็นตัวแทนของคำตอบจากระบบ ในจินเนติกอัลกอริทึมทั่ว ๆ ไปจะให้โครโมโซมอยู่ในรูปของตัวแปรแบบสตริง (string variables)

$$S = (s_1, s_2, \dots, s_L) \quad (2.43)$$

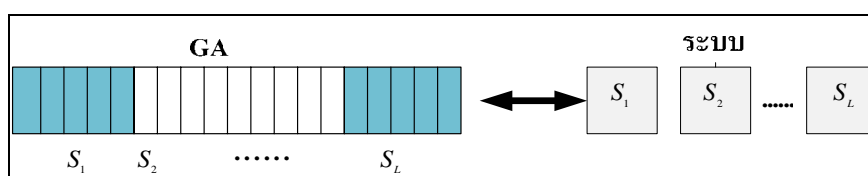
โดยที่  $S$  คือโครโมโซมหนึ่ง ๆ และแต่ละ  $s_i, i = 1, 2, \dots, L$  คือแต่ละตัวแปรในชุดคำตอบของระบบ เมื่อพิจารณาโครโมโซมหนึ่ง ๆ เราสามารถมองได้ว่าเป็นการนำเอาคำตอบทั้งชุดของระบบวางเรียงต่อกันเป็นสาย จินเนติกอัลกอริทึมจะมองโครโมโซมเป็นหนึ่งคำตอบประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่เรียกว่ายีน (gene) ซึ่งในทางชีววิทยาถือว่าเป็นส่วนที่เก็บคุณลักษณะสำคัญของสิ่งมีชีวิตเอาไว้เช่น สีของตาหรือผม เป็นต้น ดังนั้นโครโมโซมจินเนติกอัลกอริทึมจึงเป็นที่เก็บคุณลักษณะของคำตอบของระบบเอาไว้เพื่อใช้ในการสืบทอดสายพันธุ์ให้ประชากรรุ่นถัดไป ขบวนการภายในของจินเนติกอัลกอริทึมจะมองคำตอบของระบบอยู่ในรูปของโครโมโซมที่เรียกว่า phenotype เช่น ตัวแปรชนิดจำนวนจริงหรือจำนวนเต็มดังแสดงในรูปที่ 2.10 การเข้ารหัสจึงเป็นการจัดวางรูปแบบคำตอบของระบบให้อยู่ในรูปที่จินเนติกอัลกอริทึมสามารถเข้าใจและทำงานด้วยได้ดี ตัวอย่างวิธีการเข้ารหัสวิธีหนึ่งก็คือแบบฐานสอง (binary string) (Holland, H., 1975) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โครโมโซมจะได้มาจากการเรียงกันด้วยคำตอบของระบบแบบบิตต่อบิต การเข้ารหัสแบบนี้ เป็นวิธีที่ง่ายและเป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไปวิธีหนึ่ง 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 อย่างไรก็ตามมีหลักแนวคิดอยู่ว่าจำนวนโครโมโซมที่น้อยเกินไปอาจจะมีผลทำให้ประชากรที่มีอยู่ทั้งหมดไม่สามารถขยายพันธุ์ครอบคลุมไปถึงคำตอบของระบบได้ตามที่ต้องการ ในขณะที่จำนวนโครโมโซมที่มากเกินไปก็จะก่อให้เกิดความล่าช้าในการคำนวณและทำให้เกิดความซ้ำซ้อนของโครโมโซมซึ่งอาจจะมีผลให้ไม่สามารถค้นหาคำตอบได้อย่างที่คาดคิด



รูปที่ 2.10 การแก้ปัญหาในระบบจินเนติกอัลกอริทึมและระบบโลกจริง



รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างการเข้ารหัสโครโมโซม

### 2.5.3 การประเมินค่าความเหมาะสม (fitness evaluation)

การประเมินค่าความเหมาะสมเป็นขั้นตอนในการประเมินว่าโครโมโซมหนึ่ง ๆ ดีหรือไม่คืออย่างไรเทียบกับโครโมโซมอื่น ๆ ที่อยู่ในกลุ่มประชากรนั้น ๆ โดยปกติแล้วการประเมินค่าความเหมาะสมของโครโมโซมจะประกอบไปด้วยการคำนวณค่าของสองฟังก์ชันดังนี้

#### 1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

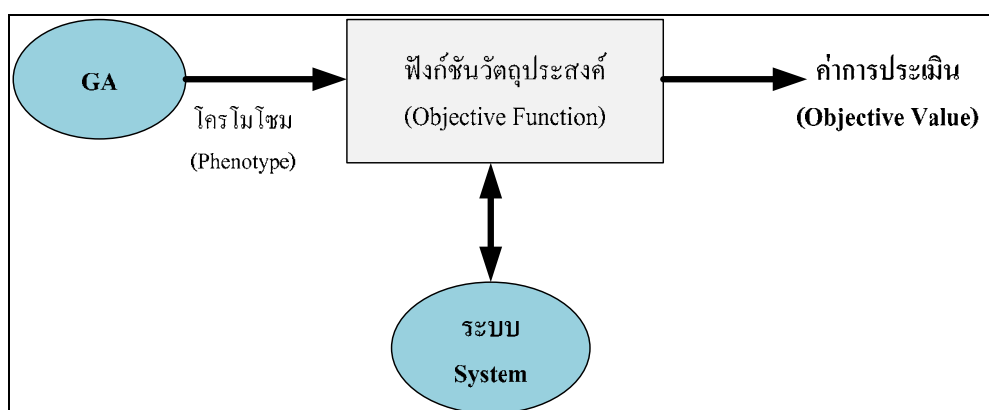
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นกระบวนการสำคัญที่ใช้ในการประเมินผลคำตอบของระบบว่าดีหรือไม่ดีแค่ไหน ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันที่ทำการประเมินคำตอบจาก

โครโมโซมโดยเทียบเป้าหมายของระบบ ในกรณีที่ระบบเป็นปัญหาของการค้นหาค่าต่ำสุด (minimization) โครโมโซมที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดของระบบจะมีค่าตัวเลขจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุด ตัวอย่างของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้แก่ ฟังก์ชันทั่ว ๆ ไปที่ใช้คำนวณค่าความผิดพลาดของระบบ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของระบบดังกล่าวก็คือต้องการให้ค่าความผิดพลาดของระบบมีค่าน้อยที่สุด ค่าประเมินที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเป็นตัวบอกว่าคำตอบของระบบขณะนั้นดีหรือไม่เท่าไร ในกรณีนี้สำหรับคำตอบหนึ่ง ๆ แล้ว ค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่าหมายถึงคำตอบนั้นเป็นคำตอบที่ดีกว่า เนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องใช้ตัวระบบเป็นที่คำนวณค่าการประเมิน ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์จึงถือว่าเป็นส่วนสำคัญ โดยเชื่อมโยงเงินเนติกอัลกอริทึมเข้ากับระบบในโลกจริงดังแสดงในรูปที่ 2.12

สังเกตว่าโครโมโซมที่นำไปประเมินค่าด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะต้องอยู่ในรูปที่ระบบเข้าใจ (นั่นคืออยู่ในรูป phenotype) ดังนั้นถ้ากำหนดให้โครโมโซม  $s$  ที่เวลา  $t$  ใด ๆ คือ  $s(t)$  เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่าการประเมินของโครโมโซมนี้กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

$$P(S(t)) = P(s_1, s_2, \dots, s_L) \quad (2.44)$$

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



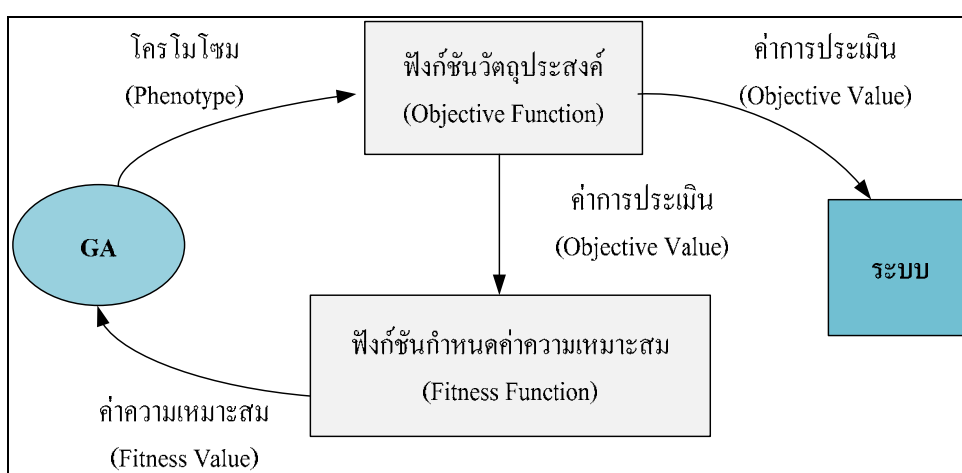
รูปที่ 2.12 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เชื่อมโยงเงินเนติกอัลกอริทึมเข้ากับระบบในโลกจริง

## 2) ฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสม (Fitness function)

เป็นฟังก์ชันที่ทำการจับคู่ค่าการประเมินที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไปเป็นค่าความเหมาะสม จุดประสงค์ของฟังก์ชันนี้เพื่อทำการกำหนดค่าความเหมาะสมให้กับโครโมโซมแต่ละตัวจากค่าเปรียบเทียบกับภายในกลุ่มประชากร ค่าความเหมาะสมนี้จะถูกนำไปใช้ในการสืบพันธุ์ในรุ่นถัดไป สาเหตุที่จินเนติกอัลกอริทึมไม่ใช้ค่าการประเมินในการคัดเลือกโครโมโซมก็เพราะว่าค่าการประเมินที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับระบบ จึงทำให้ตัวเลขที่ได้มีความหลากหลายและแตกต่างกันเกินไป ยกตัวอย่างเช่น ขนาดค่าความผิดพลาดของระบบสามารถมีค่าน้อยที่สุดคือศูนย์และมากที่สุดที่จำกัดขนาดและเครื่องหมาย จะเห็นได้ชัดว่าเป็นการไม่สะดวกนักที่จะนำเอาค่าดังกล่าวมาใช้ในการคัดเลือกโครโมโซม เนื่องจากค่านั้นอาจจะมีความแตกต่างกันเกินไป (โดยเฉพาะในแต่ละรอบของจินเนติกอัลกอริทึมที่มีการประเมินโครโมโซม ค่าความผิดพลาดอาจแตกต่างกันโดยสิ้นเชิงได้) ฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสมจึงเป็นการคำนวณค่าการประเมินของโครโมโซมทั้งหมดเทียบกับโครโมโซมด้วยกันเองและทำให้มีค่าที่อยู่บนบรรทัดฐานเดียวกันคือ

$$E(F_i) \in [E_{\min}, E_{\max}], i = 1, 2, \dots, N \quad (2.45)$$

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



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสม

โดยปกติจะมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาการทำงานของเงินเนติกอัลกอริทึม (ซึ่งต่างกับค่าการประเมินที่จะสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะของคำตอบที่คำนวณได้ในแต่ละรอบของเงินเนติกอัลกอริทึม) รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสม ฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสมมีอยู่หลายแบบ เทคนิคที่ง่ายและนิยมใช้ เช่น 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

$$E(F_i) \in [E_{\min}, E_{\max}], i = 1, 2, \dots, N \quad (2.46)$$

ค่าความเหมาะสมที่ได้จากวิธีนี้จะถูกทำให้ในในบรรทัดฐานเดียวกัน นั่นคือมีค่าไม่เกิน 1 อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับค่าการประเมินที่มีค่าเป็นลบ

2) เทคนิควิธีการกำหนดบรรทัดฐานเชิงเส้น ทำการจัดเรียงโครโมโซมด้วยค่าการประเมินตามลำดับโดยเรียงจากมากไปน้อย ถ้าระบบต้องการหาคำตอบที่มีค่ามากที่สุด ในขณะที่เรียงจากน้อยไปมากจะใช้สำหรับระบบที่ต้องการหาคำตอบที่มีค่าน้อยที่สุด กำหนดให้ตัวชี้ที่แสดงลำดับของการเรียงเป็น  $r$  ให้โครโมโซมที่ดีที่สุดมีค่าความเหมาะสมคือ

$$E_i = E_{best} - (r-1) \times \lambda_d \quad (2.47)$$

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



### 2.5.4 การคัดเลือกสายพันธุ์

การคัดเลือกสายพันธุ์เป็นขั้นตอนในการเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดจากภายในกลุ่มประชากรทั้งหมดที่ได้จะนำไปใช้เป็นตัวกำเนิดสายพันธุ์เพื่อใช้ในการให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป โดยปกติแล้วเพื่อให้ได้สายพันธุ์ที่ดีต้นกำเนิดของสายพันธุ์จะต้องดีด้วย จึงกลายเป็นปัญหาว่าจะทำการคัดเลือกต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ดีได้อย่างไร การคัดเลือกสายพันธุ์เป็นการจำลองการคัดเลือกโครโมโซมที่จะสามารถอยู่รอดได้ในแต่ละรุ่นสำหรับจินเนติกอัลกอริทึม จะทำการคัดเลือกโครโมโซมโดยการพิจารณาที่ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้น ๆ ดังนั้นโครโมโซมไหนมีค่าความเหมาะสมที่ดีย่อมหมายความว่าความเป็นโครโมโซมที่ดีและมีโอกาสที่จะให้ลูกหลานในจำนวนที่มากกว่าได้ ซึ่งย่อมเป็นการบ่งบอกว่าโอกาสในการอยู่รอดในรุ่นถัดไปก็จะมีเพิ่มมากขึ้นด้วย

ขั้นตอนในการคัดเลือกสายพันธุ์ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ได้แก่ การกำหนดค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกเพื่อเป็นตัวกำเนิดสายพันธุ์ให้กับโครโมโซมและการแปลงค่าโอกาสไปเป็นจำนวนของโครโมโซมลูกหลาน โครโมโซมที่มีโอกาสในการถูกคัดเลือกสูงจะให้จำนวนของโครโมโซมลูกหลานที่สูงด้วย วิธีการกำหนดโอกาสในการถูกคัดเลือกที่ใช้กันแพร่หลายทั่ว ๆ ไปเช่น วิธีการแบ่งเป็นสัดส่วน (proportionate) วิธีการของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann) วิธีการจัดอันดับ (ranking) และวิธีการจัดการแข่งขัน (tournament) เป็นต้น สำหรับการแปลงค่าโอกาสหรือที่เรียกว่าการซักร้อย (sampling) จะใช้วิธีของล้อรูเล็ต (roulette wheel sampling) หรือวิธีการกระบวนการสุ่มครอบคลุมจักรวาล (Stochastic Universal Sampling : SUS) หลักการโดยทั่วไปของกำหนดโอกาสจะใช้ค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมเพื่อช่วยในการคัดเลือกดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 1) วิธีการแบ่งเป็นสัดส่วน

วิธีการนี้จะทำการคัดเลือกโครโมโซมอย่างเป็นสัดส่วนจากค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้น ๆ ถ้ากำหนดให้โครโมโซม  $s$  มีค่าความเหมาะสมเป็น  $E(s)$  ค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกของโครโมโซมนี้คือ

$$P(s) = \frac{E(s)}{E_{avg}} \quad (2.48)$$

โดยที่  $E_{avg}$  คือค่าความเหมาะสมเฉลี่ยของโครโมโซมทั้งหมด ค่า  $P(s)$  แสดงให้เห็นว่าโครโมโซมแต่ละตัวสามารถเป็นตัวกำเนิดสายพันธุ์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากก็จะมีโอกาสในการสืบพันธุ์ในอัตราสูงกว่าโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสม

น้อยกว่าข้อจำกัดของการคัดเลือกสายพันธุ์ด้วยวิธีการนี้คือ ค่าความเหมาะสมจะต้องมีค่าเป็นบวกเท่านั้น อย่างไรก็ตามเราสามารถใส่ค่าเอกซ์โพเนนเชียลของค่าความเหมาะสมซึ่งจะมีค่าเป็นบวกเสมอแทนได้ (วิธีดังกล่าวจะกลายเป็นวิธีของโบลต์ซมันน์นั่นเอง) วิธีการแบ่งเป็นสัดส่วนเป็นวิธีที่ง่ายแต่อาจจะสามารถนำไปสู่คำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ (local optimum) วิธีการแบบอื่น ๆ จึงถูกพัฒนาและศึกษาในประสิทธิภาพต่อการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึมดังเช่นวิธีของโบลต์ซมันน์ หรือวิธีแบบจัดอันดับวิธีของโบลต์ซมันน์

### 2) วิธีของโบลต์ซมันน์

เป็นวิธีการแก้ปัญหาโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมเป็นลบ นอกจากนี้แล้วยังมีจุดประสงค์เพื่อลดความแตกต่างของค่าความเหมาะสมของประชากรโดยรวม พิจารณาค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกของโครโมโซม  $s$  ที่มีค่าความเหมาะสมเป็น  $E(s)$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$P(s) = \frac{e^{E(s)}}{E_{avg}} \quad (2.49)$$

สมการข้างต้นได้มาจากการคำนวณค่าเอกซ์โพเนนเชียลของค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั่นเอง

### 3) วิธีการจัดอันดับ

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่าย โดยโครโมโซมจะถูกจัดเรียงให้มีอันดับ  $r$  ตามค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดจะมีอันดับ  $N$  โดยที่  $N$  คือจำนวนโครโมโซมทั้งหมด ( $N$  จะเป็นค่าอันดับที่มากที่สุด) ในขณะที่โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่ด้อยที่สุดจะมีอันดับ 1 โอกาสในการถูกคัดเลือกของโครโมโซมจะมีค่าเท่ากับ

$$P(s) = \frac{r}{E_{avg}} \quad (2.50)$$

วิธีการจัดอันดับมีข้อดีที่ค่า  $P$  จะไม่แปรผันกับขนาดของค่าความเหมาะสมแต่จะขึ้นกับอันดับของโครโมโซม อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวจะมีผลทำให้การลู่เข้าสู่คำตอบของจินเนติกอัลกอริทึมช้า เนื่องจากโครโมโซมที่ด้อยกว่ามีโอกาสในการถูกคัดเลือกที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่กล่าวมาก่อนข้างต้น

#### 4) วิธีการจัดการแข่งขัน

เป็นวิธีการเดียวกับการแข่งขันกีฬาทั่ว ๆ ไป ทำได้โดยการสุ่มแบ่งกลุ่มคัดเลือกโครโมโซมแล้วเลือกเอาโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มนั้นเพื่อเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ จำนวนของโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มนั้นเพื่อเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ จำนวนของโครโมโซมในแต่ละกลุ่มนั้นจะแตกต่างกันออกไป โดยปกติแล้วจะใช้วิธีสุ่มแบบจับคู่โครโมโซม (นั่นคือมีเพียง 2 โครโมโซมที่ถูกสุ่มเลือกเข้ามาในแต่ละการแข่งขัน) วิธีการแข่งขันมีความเหมาะสมในการทำให้อายุความเหลือมล้ำของค่าความเหมาะสมของโครโมโซมหมดไป หลังจากที่ได้มีการกำหนดค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกให้กับแต่ละโครโมโซมจนหมดแล้ว

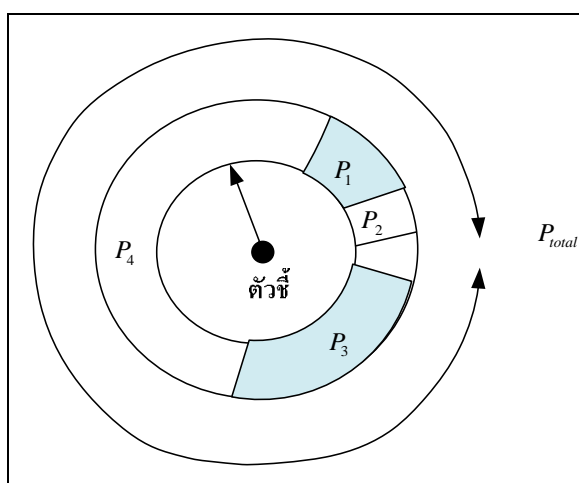
ขั้นตอนต่อไปก็คือการชักตัวอย่าง ซึ่งเป็นการนำเอาค่าโอกาสนั้นไปทำการแปลงให้เป็นค่าตัวเลข ตัวเลขดังกล่าวจะแสดงถึงจำนวนของลูกหลานที่โครโมโซมนั้น ๆ จะสามารถให้กำเนิดในขั้นตอนต่อไป สำหรับวิธีชักตัวอย่างสามารถแสดงรายละเอียดพอสังเขปดังนี้

##### ❖ วิธีการชักตัวอย่างแบบวงล้อรูเล็ต

ในขั้นตอนแรกจะทำการสร้างวงล้อรูเล็ตขึ้นมาก่อน โดยกำหนดให้  $P_{total}$  คือผลรวมของโอกาสในการถูกเลือกของโครโมโซมในประชากรทั้งกลุ่ม ค่านี้จะมีค่าเท่ากับเส้นรอบวงของวงล้อรูเล็ต หลังจากนั้นค่า  $P$  ของโครโมโซมแต่ละตัวจะถูกแปลงไปยังบนวงล้อรูเล็ตภายในช่วง  $[0, P_{total}]$  โดยที่ขนาดบนวงล้อรูเล็ตสำหรับแต่ละโครโมโซมจะสัมพันธ์กับค่า  $P$  ของโครโมโซมนั้น ๆ รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างของวงล้อรูเล็ตสำหรับประชากร  $S$  ที่มีค่าความเหมาะสม  $E = (3 \ 1 \ 5 \ 20 \ 8)$  ค่า  $P$  คือค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกของโครโมโซมตัวที่  $i$  ซึ่งได้มาจากวิธีการแบ่งเป็นสัดส่วน สังเกตว่าค่า  $P$  ของโครโมโซมจะสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเหมาะสมของโครโมโซม

จากรูปข้างต้น โครโมโซม  $S_4$  ซึ่งมีค่าความเหมาะสมเท่ากับ 20 เป็นค่าสูงที่สุดในกลุ่มจะมีขนาดบนวงล้อรูเล็ตมากที่สุดและมีโอกาสในการถูกคัดเลือกสูงที่สุด (ด้วยค่า  $P_4$ ) ในขณะที่โครโมโซม  $S_2$  ซึ่งมีค่าความเหมาะสมเท่ากับ 1 เป็นค่าต่ำที่สุดในกลุ่มจะมีขนาดบนวงล้อรูเล็ตเล็กที่สุดและมีโอกาสในการถูกคัดเลือกต่ำที่สุด (ด้วยค่า  $P_2$ ) ขั้นตอนในการคัดเลือกโครโมโซมจะเริ่มจากการสุ่มค่าตัวชี้ซึ่งเป็นตัวเลขระหว่าง 0 ถึง  $P_{total}$  และถ้าตัวเลขดังกล่าวตรงกับโครโมโซมใดบนวงล้อรูเล็ต โครโมโซมนั้นจะถูกเลือก กระบวนการนี้เปรียบได้กับการหมุนวงล้อก็จะได้โครโมโซมที่จะเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์มาหนึ่งตัว การสุ่มตัวเลขเพื่อคัดเลือกโครโมโซมจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ต้นกำเนิดสายพันธุ์เท่ากับจำนวนที่ต้องการ ดังนั้นสำหรับการคัดเลือกต้นกำเนิดสายพันธุ์จำนวน  $N$  โครโมโซมจะต้องทำการหมุนวงล้อรูเล็ตทั้งหมด  $N$  ครั้ง เราจะเห็นได้ว่าโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่สูงจะมีโอกาสถูกคัดเลือกมากกว่าโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำกว่าเป็นปรากฏการณ์ปกติในธรรมชาติทั่ว ๆ ไป

ค่า  $P$  ที่ได้จากตัวอย่างในรูปที่ 2.14 ได้มาจากวิธีการแบ่งเป็นสัดส่วนเราจะเห็นได้ชัดเจนว่าโอกาสของโครโมโซมตัวที่สองจะถูกเลือกนั้นอาจมีค่าน้อยมาก อันจะทำให้เกิดความเหลื่อมล้ำในการคัดเลือกขึ้น วิธีอื่น ๆ ที่มีประสิทธิภาพดีกว่าจึงเป็นที่นิยมใช้มากกว่า ยกตัวอย่างเช่น วิธีการจัดอันดับซึ่งจะให้ค่าของโอกาสในการถูกเลือกที่ไม่แปรผันไปตามขนาดของค่าความเหมาะสม

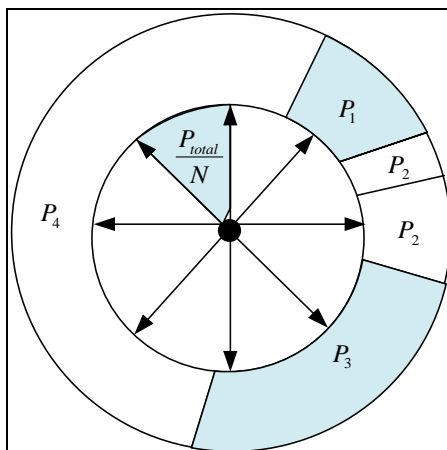


รูปที่ 2.14 ค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมในการคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต

วิธีวงล้อรูเล็ตเป็นกระบวนการสุ่มคัดเลือกโครโมโซมในบางโอกาสอาจจะมีโครโมโซมใดโครโมโซมหนึ่งเท่านั้นที่บังเอิญถูกสุ่มในการคัดเลือกทุกครั้ง ถ้าเกิดกรณีดังกล่าวขึ้นประชากรในรุ่นถัดไปจะประกอบไปด้วยโครโมโซมชนิดเดียวกันหมดทั้งกลุ่มซึ่งไม่เป็นประโยชน์ต่อการค้นหาคำตอบแต่อย่างใด วิธีวงล้อรูเล็ตสามารถปรับปรุงได้หลายวิธี วิธีหนึ่งที่ย่างและมีประสิทธิภาพคือกำหนดให้ในแต่ละครั้งที่โครโมโซมถูกคัดเลือก ขนาดของโครโมโซมนั้น ๆ บนวงล้อรูเล็ตจะมีค่าลดลงจนกระทั่งมีขนาดเป็นศูนย์ วิธีนี้ทำให้แต่ละโครโมโซมที่เหลือมีขอบเขตในการถูกเลือกที่เท่าเทียมกันและลดโอกาสความเป็นใหญ่ในหมู่ประชากรโครโมโซมตัวใดตัวหนึ่งได้

❖ วิธีการชักตัวอย่างแบบกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล

SUS เป็นวิธีการชักตัวอย่างที่ถูกเรียกใช้เพียงครั้งเดียวก็สามารถคัดเลือกโครโมโซมตามจำนวนที่ต้องการได้ นั่นคือสำหรับการคัดเลือก  $N$  โครโมโซมจะมีตัวชี้ทั้งหมด  $N$  ตัว โดยที่ตัวชี้แต่ละตัวจะมีระยะห่างเท่ากันและมีค่าเท่ากับ  $\frac{P_{total}}{N}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.15



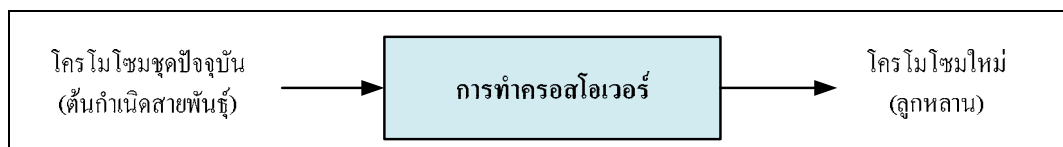
รูปที่ 2.15 แสดงวิธีการชักตัวอย่างแบบกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล

SUS จะเริ่มจากการสุ่มสลัดที่โครโมโซมบนวงล้อรูเล็ก ถัดมาตัวชี้  $ptr$  ซึ่งเป็นตัวชี้เริ่มต้นจะถูกสุ่มขึ้นมาในช่วง  $[0, P_{total}]$  ตัวชี้ที่เหลือจำนวน  $N-1$  ตัวถัดจากตัวชี้  $ptr$  จะถูกคำนวณโดยมีระยะห่างระหว่างตัวชี้ที่ติดกันเท่ากับ  $\frac{P_{total}}{N}$  โครโมโซมที่จะถูกคัดเลือกได้แก่ โครโมโซมจำนวนทั้งสิ้น  $N$  โครโมโซมซึ่งถูกตัวชี้  $N$  ตัวชี้อยู่ วิธีนี้ทำให้ลดความเหลื่อมล้ำในของแต่ละโครโมโซมสำหรับการคัดเลือกลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิมของวงล้อรูเล็ก โครโมโซมที่มีค่า  $P$  สูงจะถูกชี้ด้วยจำนวนตัวชี้ในจำนวนที่มากกว่าโครโมโซมที่มีค่า  $P$  ที่ต่ำกว่า

### 2.5.5 ปฏิบัติการทางสายพันธุ์

หลังจากกระบวนการคัดเลือกได้ดำเนินไปจนเสร็จสมบูรณ์ โครโมโซมลูกหลานจะถูกสร้างจากโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ โดยการนำเอาโครโมโซมที่เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์มาเปลี่ยนแปลงให้เกิดโครโมโซมใหม่ขึ้นมาเรื่อยๆ เป็นโครโมโซมลูกหลาน ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เป็นขั้นตอนสำคัญอีกขั้นหนึ่งในวัฏจักรของจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งมีการคาดหวังว่าโครโมโซมลูกหลานที่เกิดขึ้นมานั้นจะได้รับส่วนดีของโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ โดยผ่านปฏิบัติการทางสายพันธุ์นี้ ถ้าพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากปฏิบัติการทางสายพันธุ์ที่เกิดขึ้นกับประชากรซึ่งเป็นคำตอบระบบแล้ว เราสามารถเปรียบเทียบปฏิบัติการทางสายพันธุ์ได้กับการก้าวเดินไปสู่คำตอบของระบบนั่นเอง

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

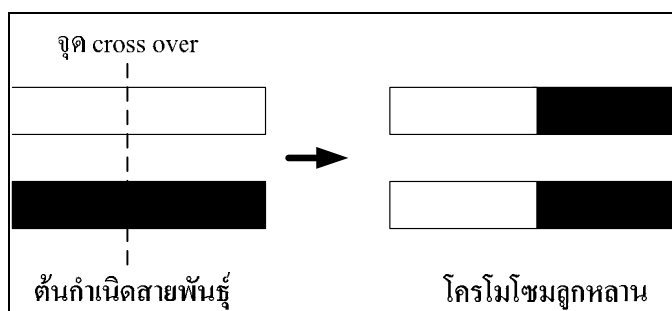


รูปที่ 2.16 ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ของจินเนติกอัลกอริทึม

### 1) ครอสโอเวอร์

เป็นวิธีการรวมตัวใหม่ของโครโมโซม (recombination operator) โดยทำการรวมส่วนย่อยระหว่างโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ตั้งแต่สองโครโมโซมขึ้นไปเพื่อให้กลายเป็นโครโมโซมลูกหลานที่ได้จากการครอสโอเวอร์นี้จะมีพันธุกรรมจากต้นกำเนิดสายพันธุ์อยู่ในตัวโดยปกติทั่วไปแล้วจะมีการกำหนดอัตราการทำครอสโอเวอร์เอาไว้ด้วย ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ความน่าจะเป็น ( $p_c$ ) เป็นตัวกำหนดอัตราดังกล่าว วิธีการทำครอสโอเวอร์มีได้หลายแบบดังแสดงรายละเอียดในตัวอย่างต่อไปนี้

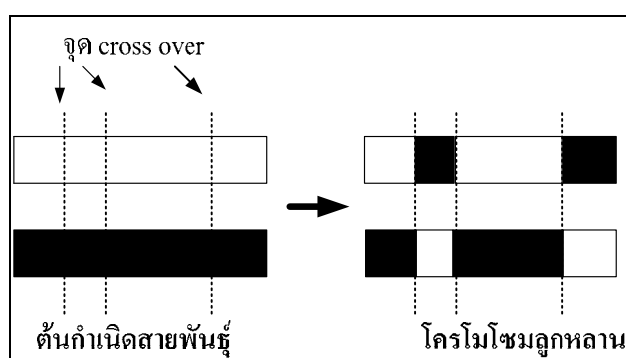
❖ การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว (single point crossover) สำหรับการทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดี่ยวนี้โครโมโซมลูกหลานจะมีสายพันธุ์ของต้นกำเนิดอยู่อย่างละหนึ่งส่วน จุดตัดในการทำครอสโอเวอร์นั้นโดยปกติจะได้อมาจากการสุ่มเลือก ตัวอย่างการครอสโอเวอร์จุดเดียวสามารถแสดงอยู่ในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว

❖ การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด (multiple point crossover) ตัวอย่างการทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุดดังแสดงในรูปที่ 2.18 มีการใช้จุดตัดทั้งหมด 3 ดังนั้นโครโมโซมลูกหลานจะมีสายพันธุ์ของต้นกำเนิดมากกว่าหนึ่งส่วน หลักการเลือกจุดของครอสโอเวอร์นั้นมีอยู่หลายแบบ แต่ละแบบจะให้ผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสายพันธุ์ในโครโมโซมลูกหลานที่แตกต่าง

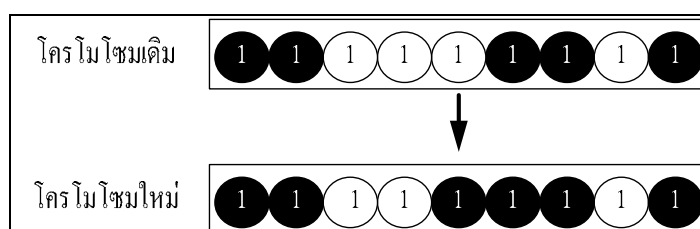
ออกไปด้วย วิธีที่นิยมใช้ทั่วไปคือการสุ่มเลือกจุดครอสโอเวอร์ การทำครอสโอเวอร์หลายจุดจะให้ผลของลูกหลานที่มีความหลากหลายกว่าการทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว อันจะมีผลให้การเข้าสู่คำตอบของระบบสามารถครอบคลุมพื้นที่ของคำตอบได้มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมลูกหลานได้มากกว่าการทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวนั้น อาจทำให้โอกาสเบี่ยงเบนของคำตอบที่มีอยู่ในโครโมโซมลูกหลานมีอัตราที่สูงกว่าเช่นกัน การทำครอสโอเวอร์ที่นิยมอีกชนิดหนึ่งคือ ครอสโอเวอร์แบบสม่ำเสมอ (uniform crossover) ซึ่งมีข้อดีในการลดปัญหาความไม่สมดุลในการแบ่งจุดครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวของโครโมโซมที่มีขนาดต่าง ๆ กัน



รูปที่ 2.18 การครอสโอเวอร์แบบหลายจุด

## 2) มิวเทชัน

เป็นวิธีการแปรผันยีนหรือส่วยย่อยของโครโมโซม ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตในทางชีววิทยานั้นเอง มิวเทชันคือการเปลี่ยนแปลงยีนในโครโมโซมซึ่งในทางปฏิบัติแล้วยีนก็คือบิตในระบบตัวเลขของคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การเปลี่ยนแปลงบนบิตที่ 4 ในโครโมโซม

การทำมิวเทชันเปรียบเสมือนกับการก้าวเดินไปสู่คำตอบของระบบ เช่นเดียวกับการทำครอสโอเวอร์ นอกเหนือไปจากนั้นแล้วมิวเทชันยังสามารถมองเป็นการทำให้เกิดความหลากหลายขึ้นในกลุ่มประชากร มีผลให้คำตอบที่เกิดขึ้นในกระบวนการของจินครอบคลุมพื้นที่การค้นหาคำตอบทั่วถึงยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามในการทำมิวเทชันเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเพราะจะมีผลต่อพฤติกรรมการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม มีผลการค้นคว้ารายงานว่าอัตราการทำมิวเทชันจะขึ้นอยู่กับขนาดของประชากรเพื่อให้การสำรวจพื้นที่ในการค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างทั่วถึง ดังนั้นการกำหนดอัตราการทำมิวเทชันต้องมีความเหมาะสมที่สุดต่อระบบด้วยเพื่อก่อให้เกิดผลในการค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วการทำมิวเทชันจะมีอัตราการใช้งานค่อนข้างต่ำ

### 2.5.6 การแทนที่ (Replacement)

การแทนที่เป็นขั้นตอนหลังจากที่จินเนติกอัลกอริทึมโครโมโซมลูกหลานเรียบร้อยแล้วและจะมีการนำโครโมโซมใหม่ไปแทนที่ประชากรรุ่นเก่า จุดประสงค์ในการแทนที่นั้นข้างชัดเจน กล่าวคือการนำโครโมโซมลูกหลานมาแทนที่ประชากรรุ่นก่อนจะทำให้ประชากรรุ่นใหม่ประกอบไปด้วยโครโมโซมใหม่ ๆ ซึ่งเป็นโครโมโซมใหม่ ๆ ซึ่งเป็นโครโมโซมที่ดีกว่าอันเนื่องมาจากการได้สืบสายพันธุ์ที่ดีจากต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ผ่านการคัดเลือกแล้ว กลยุทธ์ในการคัดเลือกโครโมโซมไหนจะถูกทดแทนที่นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ

#### 1) การแทนที่ประชากรทั้งรุ่น (Generational GA)

เป็นการนำประชากรลูกหลานไปแทนที่ประชากรเก่าทั้งหมด ดังนั้นถ้าในระบบหนึ่งมีประชากรขนาด  $N$  จำนวนของโครโมโซมลูกหลานที่จะมาแทนที่ที่จะต้องมีความ  $N$  เช่นกัน วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายเนื่องจากไม่จำเป็นจะต้องมีขั้นตอนของการคัดเลือกกว่าประชากรส่วนไหนจะถูกแทนที่ แต่การที่ไม่มีขั้นตอนดังกล่าวกลายเป็นข้อเสีย นั่นคือ โครโมโซมที่ดี ๆ ในรุ่นก่อนจะถูกแทนที่ไปด้วยวิธีที่ง่าย ๆ คือก่อนที่จะทำการแทนที่ให้คัดเลือกเก็บโครโมโซมที่ดีที่สุด 2-3 ตัวแรกเอาไว้โดยอาจจะใช้วิธีการคัดเลือกดังที่อธิบายมาแล้วก่อนหน้านี้ วิธีดังกล่าวอาจเรียกได้ว่าเป็นกลยุทธ์คัดเลือกหัวกระทิ (elitist strategy) อย่างไรก็ตามประชากรที่เหลืออยู่อาจจะถูกครอบงำด้วยโครโมโซมหัวกระทินี้ได้โดยง่าย กล่าวคือถ้าไม่มีโครโมโซมใหม่ที่ดีกว่าเกิดขึ้น โครโมโซมที่ดีที่สุดจากรุ่นก่อนก็จะถูกเก็บไว้อยู่ตลอดไปและไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ขึ้นอีกต่อไปทำให้จินเนติกอัลกอริทึมไม่สามารถสร้างวิวัฒนาการโครโมโซมใหม่ ๆ ขึ้นมาได้ ถึงแม้ว่าผลของโครโมโซมหัวกระทิจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้ แต่วิธีนี้ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าทำให้ระบบโดยรวมดีขึ้น

#### 2) การแทนที่ประชากรแบบคงตัว (Steady-state GA)

เป็นการเอาประชากรลูกหลานไปแทนที่ประชากรเดิมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจะต้องมีการคัดเลือกประชากรที่จะถูกแทนที่ซึ่งโดยปกติจะพิจารณาจากความเหมาะสมของ



โครโมโซมนั่นเอง โครโมโซมเก่าจะถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมใหม่เพียง 1 หรือ 2 ตัวเท่านั้น กลวิธีในการแทนที่มีอยู่หลายวิธีเช่น การแทนที่ประชากรที่ด้อยที่สุดหรือแทนที่ประชากรโดยการสุ่มเลือก เป็นต้น

### 2.5.7 ข้อดีของจินเนติกอัลกอริทึม

เมื่อพิจารณาถึงความสามารถและ โครงสร้างของจินเนติกอัลกอริทึมแล้วสามารถสรุปข้อดีต่าง ๆ ของจินเนติกอัลกอริทึมได้ดังนี้

1) มีโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการประมวลผลแบบขนาน โดยโครงสร้างของจินเนติกอัลกอริทึมแล้วสามารถถูกออกแบบให้ทำงานในลักษณะของการประมวลผลแบบขนานได้ จึงสามารถทำให้ความเร็วในการคำนวณเพิ่มขึ้น จินเนติกอัลกอริทึมสามารถแบ่งการคำนวณเป็นหน่วยย่อย โดยที่แต่ละหน่วยเป็นจินเนติกอัลกอริทึม ที่ทำงานได้สมบูรณ์ในตัวเองและแยกกันทำการค้นหาคำตอบของระบบพร้อม ๆ กันได้ นอกจากนี้แล้วจินเนติกอัลกอริทึมยังสามารถแบ่งตัวเองเป็นหน่วยย่อยที่แต่ละหน่วยแยกทำหน้าที่ตามขั้นตอนของจินเนติกอัลกอริทึมต่าง ๆ ได้ เช่น หน่วยคำนวณค่าความเหมาะสม หน่วยการคัดเลือก หน่วยทำปฏิบัติการทางสายพันธุ์ เป็นต้น

2) มีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือ เป็นที่ยืนยันแล้วว่า มีเทคนิคหลาย ๆ อย่างที่สามารถใช้ทำให้จินเนติกอัลกอริทึมมีการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ถึงแม้ว่าสภาวะแวดล้อมของระบบจะมีการเปลี่ยนแปลง

3) สามารถให้คำตอบที่เหมาะสมในวงกว้าง (global optimum) ปัญหาหลาย ๆ อย่างจะมีคำตอบอยู่หลายชุด ซึ่งเป็นคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นที่เหมาะสมที่สุด แต่สำหรับจินเนติกอัลกอริทึมได้รับการพิสูจน์ให้เห็นว่าสามารถเอาชนะปัญหาของระบบดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4) มีความยืดหยุ่นในการออกแบบชนิดของโครโมโซม ยีนของโครโมโซมสามารถถูกออกแบบให้เป็นตัวเลขชนิดใด ๆ ก็ได้ตามความเหมาะสมกับระบบไม่ว่าจะเป็นแบบฐานสองหรือเลขจำนวนจริง จึงทำให้จินเนติกอัลกอริทึมสามารถใช้งานกับระบบต่าง ๆ ได้หลากหลาย

5) เหมาะสำหรับระบบที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดต่าง ๆ ในหลายระบบจะมีการระบุเงื่อนไขของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อจำกัดให้ระบบมีเสถียรภาพและเป็นการจำกัดพื้นที่สำหรับการค้นหาคำตอบด้วยจินเนติกอัลกอริทึมมีโครงสร้างที่สามารถออกแบบให้มีการจำกัดขอบเขตของโครโมโซมได้อย่างสะดวก จึงเหมาะกับการแก้ไขปัญหที่ต้องมีเงื่อนไขแบบต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี

6) เหมาะสำหรับระบบที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบพหุคูณ จินเนติกอัลกอริทึมสามารถใช้กับระบบที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่าหนึ่งเช่น การออกแบบตัวกรองชนิด IIR ที่ต้องมีการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับทั้งค่าความผิดพลาดขนาด (magnitude error) และ

ค่าความผิดพลาดของเวลา (delay error) ลักษณะดังกล่าวทำให้จินเนติกอัลกอริทึมมีความเหมาะสมในการแก้ปัญหาจริงได้หลากหลายซึ่งส่วนใหญ่จะมีเป้าหมายในการแก้ปัญหามากกว่าหนึ่งอย่าง

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

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

งานวิจัยนี้ได้นำเอาเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมาประยุกต์ใช้เพื่อหาตำแหน่งในการวางสายอากาศที่เหมาะสมบนพื้นที่จำกัดอ้างอิงขนาดคอมพิวเตอร์แบบพกพา ซึ่งผู้วิจัยได้คุ้นเคยกับการใช้โปรแกรมแมทแลบที่เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้งานง่ายและมีประสิทธิภาพ เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายด้วย โดยมีผู้พัฒนา GA Toolbox ขึ้นมาเพื่อใช้กับโปรแกรมแมทแลบได้ ดังนั้นจึงเป็นง่ายที่ผู้วิจัยจะนำอัลกอริทึมนี้ไปใช้ในการหาตำแหน่งของการวางตัวของสายอากาศที่ดีในระบบของไดเวอร์ซิตีแบบอีจีซี สำหรับการประยุกต์เข้ากับปัญหาในระบบที่ได้สนใจต่อไป

## 2.6 สรุป

เนื้อหาที่ได้กล่าวในบทนี้จะอธิบายถึงเทคนิคไดเวอร์ซิตี ส่วนสำคัญจะพูดถึงไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศที่มีประสิทธิภาพที่ดีเมื่อเทียบกับไดเวอร์ซิตีทางเวลาและความถี่ ที่สำคัญไม่ยุ่งยากซับซ้อนด้วย สำหรับเทคนิคไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศนี้จะใช้เทคนิคการรวมสัญญาณที่นิยมใช้กันอยู่ 3 เทคนิคคือ เอสซี เอ็มอาร์ซีและอีจีซี ซึ่งจากการเปรียบเทียบสมรรถนะของทั้ง 3 เทคนิคนี้แล้วเทคนิคเอ็มอาร์ซีมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับอีจีซีและเอสซี แต่เทคนิคอีจีซีในทางปฏิบัตินั้น

ง่ายกว่า ไม่ยุ่งยาก ที่สำคัญยังมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงเทคนิคเอ็มอาร์ซี ดังนั้นเทคนิคอีจีซีจึงเป็นเทคนิคที่น่าเลือกใช้จริงในทางปฏิบัติจริง นอกจากนี้ผลกระทบของสหสัมพันธ์ของสัญญาณเมื่อมีปัจจัยระยะห่างการวางสายอากาศในโดเวอร์ซิตีทางสายอากาศยังได้ถูกอธิบาย โดยแสดงให้เห็นถึงการแปรผกผันกันระหว่างระยะห่างการวางสายอากาศและสหสัมพันธ์ของสัญญาณด้วยอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญของบทนี้ก็คือ การอธิบายหลักการและทฤษฎีของเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมอย่างละเอียด เพื่อที่จะได้เข้าใจและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการหาคำแหน่งในการวางสายอากาศบนพื้นที่จำกัดในระบบโดเวอร์ซิตีทางสายอากาศ โดยเนื้อหาที่กล่าวมาทั้งหมดในบทนี้จะนำไปเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์เกี่ยวกับงานวิจัยของเราที่ได้นำเสนอไปซึ่งจะอธิบายในบทถัดไป

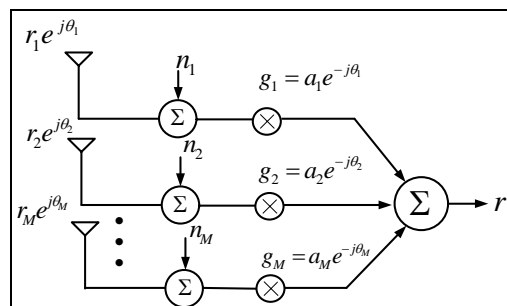
### บทที่ 3

## เทคนิคการรวมสัญญาณแบบออร์โธโกนัลเฟสไม่ร่วม

หลังจากได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 มาแล้ว การใช้เทคนิคการรวมสัญญาณแบบออร์โธโกนัลให้สมรรถนะที่ดี ไม่ซับซ้อนในทางปฏิบัติด้วย ในบทนี้จะนำเอาเทคนิคการรวมสัญญาณแบบออร์โธโกนัลวิเคราะห์สมรรถนะโดยที่ระบบมีเฟสไม่ร่วม ซึ่งระบบที่มีเฟสไม่ร่วมนั้นจะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับระบบเฟสร่วมแต่ที่เหนือกว่าคือ ความยุ่งยาก ซับซ้อนในส่วนของฮาร์ดแวร์ในทางปฏิบัติน้อยกว่า โดยจะทำการวิเคราะห์โดยทางสมการทางคณิตศาสตร์เป็นสิ่งแรก จากนั้นผลจากการวิเคราะห์จากการจำลองแบบจำเป็นที่ยืนยันว่าสมรรถนะของระบบที่ได้เสนอคือ ไดเวอร์ซิตีแบบออร์โธโกนัลเฟสไม่ร่วมนั้นมีสมรรถนะที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับระบบออร์โธโกนัลเฟสร่วมและสิ่งสำคัญที่ขาดไม่ได้ที่ต้องทำการวิเคราะห์ในทางปฏิบัติที่จะยืนยันว่าถึงประสิทธิภาพของระบบที่ได้เสนอไป นอกจากนี้ในบทนี้จะนำเอาเทคนิคไดเวอร์ซิตีแบบออร์โธโกนัลเฟสไม่ร่วมที่ได้เสนอไปนั้น ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของสหสัมพันธ์ของสัญญาณเมื่อพิจารณาการวางตัวของสายอากาศบนพื้นที่จำกัดในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเขียนด้วย

### 3.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของการรวมสัญญาณแบบออร์โธโกนัลเฟสไม่ร่วม

ดังที่ได้กล่าวถึงหลักการเทคนิคไดเวอร์ซิตีแบบออร์โธโกนัลในบทที่ผ่านมา ทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติของเทคนิคนี้ ก่อนการรวมสัญญาณระบบต้องมีกระบวนการที่ทำให้เฟสร่วมกัน เมื่อพิจารณาในรูปที่ 3.1 สัญญาณต้องทำการถ่วงน้ำหนัก (weight) ด้วย  $g_i = a_i e^{-j\theta_i}$



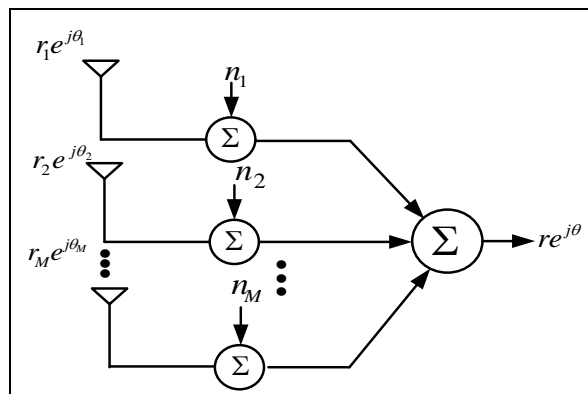
รูปที่ 3.1 การรวมสัญญาณแบบออร์โธโกนัลเฟสร่วม

แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการของการร่วมเฟสในทางปฏิบัตินั้นต้องมีฮาร์ดแวร์ที่ซับซ้อนมากขึ้น การที่จะลดภาระในส่วนของการร่วมเฟสนี้จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ในเบื้องต้นการวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่มีเฟสไม่ร่วมและเฟสร่วมก่อนว่ามีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน เพื่อเป็นที่ยืนยันว่าเทคนิคอีจีซีเฟสไม่ร่วมนั้นสามารถนำไปวิเคราะห์การเพิ่มความแรงของสัญญาณต่อไป โดยแนวทางการวิเคราะห์สามารถแบ่งได้โดยการวิเคราะห์ทางสมการคณิตศาสตร์และจากการจำลองแบบ โดยรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

### 3.1.1 การวิเคราะห์สมการอีจีซีเฟสไม่ร่วม

จากรูปที่ 3.2 เมื่อสัญญาณ ไม่มีการร่วมเฟสกัน สัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศแต่ละต้นจะทำการรวมกันโดยตรง ซึ่งไม่ผ่านกระบวนการของการทำเฟสร่วม เมื่อพิจารณาจำนวนสายอากาศสองต้น ดังนั้นสัญญาณรวมที่จะมีทั้งสัญญาณและเฟสด้วย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$re^{j\theta} = \sum_{i=1}^M re^{j\theta_i} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 การรวมสัญญาณแบบอีจีซีเฟสไม่ร่วม

จาก pdf ร่วมของสัญญาณและเฟสของสัญญาณ  $p(r_1, r_2, \theta_1, \theta_2)$  สามารถหาได้โดย Yacoub, M. (1999) แสดงดังนี้

$$p(r_1, r_2, \theta_1, \theta_2) = \frac{r_1 r_2}{4\pi^2 \sigma^4 (1-\rho^2)} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^8 (1-\rho^2)^2} [\sigma^2 (r_1^2 + r_2^2) - 2r_1 r_2 \mu_1 \cos(\theta_2 - \theta_1) - 2r_1 r_2 \mu_2 \cos(\theta_2 - \theta_1)] \right\} \quad (3.2)$$

โดย  $\mu_1, \mu_2$  คือค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่ 1 และ 2 ตามลำดับ และค่า  $\rho$  หาได้จาก

$$\rho^2 = \frac{\mu_1^2 + \mu_2^2}{\sigma^4} \quad (3.3)$$

เมื่อสัญญาณแต่ละสัญญาณเป็นอิสระต่อกัน ทำให้  $\mu_1 = \mu_2 = \rho = 0$  ดังนั้นสมการที่ 3.2 จะลดรูปเหลือดังแสดงได้ดังนี้

$$p(r_1, r_2, \theta_1, \theta_2) = \frac{r_1 r_2}{4\pi^2 \sigma^4} \exp\left[-\frac{r_1^2 + r_2^2}{2\sigma^6}\right] \quad (3.4)$$

จากสมการที่ 3.1 เมื่อพิจารณาที่จำนวนสายอากาศ 2 ต้น ดังนั้นสัญญาณรวมที่ได้จะสามารถแสดงได้โดย

$$re^{j\theta} = r_1 e^{j\theta_1} + r_2 e^{j\theta_2} \quad (3.5)$$

หรือ

$$r_2 e^{j\theta_2} = re^{j\theta} - r_1 e^{j\theta_1} \quad (3.6)$$

ดังนั้นพิจารณาเฉพาะสัญญาณจะได้

$$r_2 = \sqrt{(r \cos \theta - r_1 \cos \theta_1)^2 + (r \sin \theta - r_1 \sin \theta_1)^2} \quad (3.7)$$

แทนสมการที่ 3.7 ในสมการ 3.4 เพื่อทำการจัดรูปให้อยู่ในรูปของ  $r, r_1$  และ  $\theta, \theta_1$  ซึ่งจะง่ายต่อการอินทิกรัล โดยขอบเขตและรูปแบบสมการของการอินทิกรัลสามารถแสดงได้ดังนี้

$$p(r, \theta) = \int_0^r \int_0^\theta p(r_1, r_2, \theta_1, \theta_2) \Big|_{r_2 = \sqrt{(r \cos \theta - r_1 \cos \theta_1)^2 + (r \sin \theta - r_1 \sin \theta_1)^2}} d\theta_1 dr_1 \quad (3.8)$$

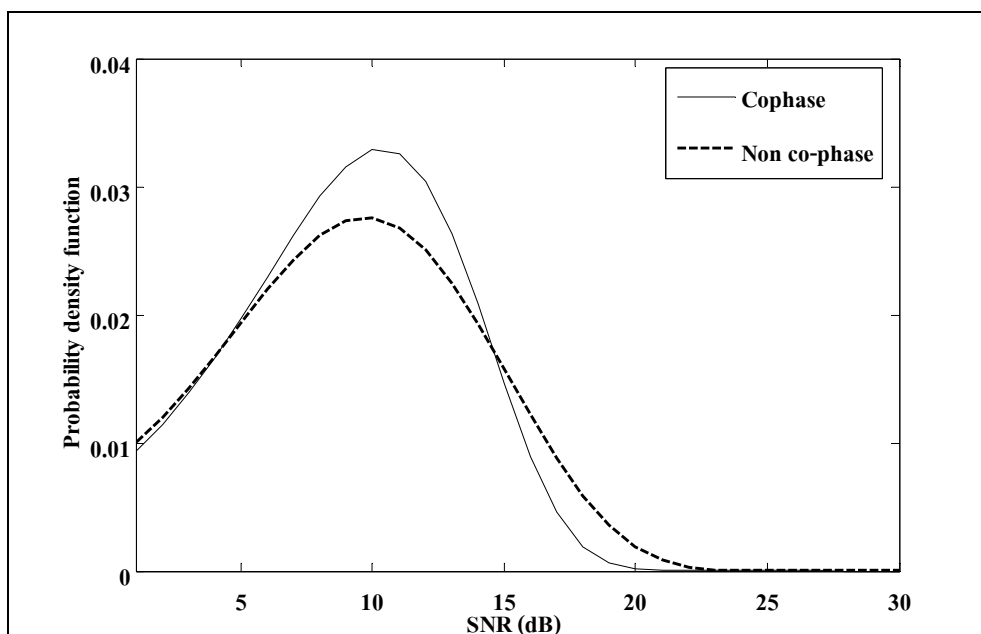
ภายใต้การอินทิกรัลในสมการที่ 3.8 จะเห็นได้ว่ารูปแบบสมการนั้นมีความซับซ้อนและยุ่งยาก จึงไม่สามารถใช้การอินทิกรัลด้วยวิธีแบบธรรมดาได้ รวมถึงการใช้โปรแกรมคำนวณการอินทิกรัลของสมการได้ ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคนิคการอินทิกรัลโดยการประมาณสำหรับฟังก์ชันใด ๆ ของทฤษฎีซิมป์สัน (Süli, E., and Mayers, D., 2003) จากผลการอินทิกรัลในสมการที่ 3.8 จะทำให้พจน์ของ  $r, \theta_1$  นั้นถูกตัดไป ซึ่งก็จะอยู่ในรูปของ  $r, \theta$  สมการที่ได้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$p(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p(r, \theta) d\theta \quad (3.9)$$

ทำการอินทิกรัลเช่นเดียวกับขั้นตอนการอินทิกรัลในสมการที่ 3.8 เพื่อทำการตัดเฟสของสัญญาณออกไป ดังนั้นก็จะได้  $p(r)$  อย่างเดียวซึ่งไม่มีเฟสมาเกี่ยวข้อง เพื่อนำไปหา  $p(\gamma)$  ของสัญญาณรวมในสมการที่ 2.25 ซึ่งกล่าวมาบทที่แล้วคือ  $p_{EGC}(\gamma) = NM \frac{p(r)}{r} = NM \frac{p(\sqrt{2\gamma NM})}{\sqrt{2\gamma NM}}$

ดังนั้นก็จะสามารถหา  $p(\gamma)$  ของการใช้เทคนิคอีจีซีโดยที่สัญญาณไม่รวมเฟสได้ จากนั้นจะนำผลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วยการเปรียบเทียบสมรรถนะกับกรณีที่มีสัญญาณรวมเฟสอีกต่อไป

จากรูปที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบไคเวอร์ซิตีแบบอีจีซีโดยเฟสไม่รวมและเฟสรวมจาก pdf ของ SNR ในเบื้องต้นจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการที่เฟสไม่รวมนั้นใกล้เคียงกันกับที่กรณีที่สัญญาณมีเฟสรวมกัน แต่เมื่อมาพิจารณาอย่างละเอียดในตารางที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุดของสัญญาณ รวมถึงค่าความน่าจะเป็นที่สัญญาณมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุดด้วยของทั้งสองกรณีด้วย ซึ่งยืนยันถึงสมรรถนะที่ใกล้เคียงกันสำหรับการวิเคราะห์ทางสมการทางคณิตศาสตร์ อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ที่จำนวนสายอากาศมากกว่าสองต้นนั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยากและซับซ้อน ทำให้การวิเคราะห์ไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยกระบวนการนี้ได้และที่ผ่านมายังไม่มีงานวิจัยและทฤษฎีไหนทำการศึกษา ดังนั้นเราจึงทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบไคเวอร์ซิตีแบบอีจีซี เพียงใช้สายอากาศแค่สองต้นก็เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ทางสมการคณิตศาสตร์



รูปที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบ pdf ของ SNR ระหว่างเทคนิคอีซีซีเฟสร่วมและเฟสไม่ร่วม ด้วยการวิเคราะห์ทางสมการคณิตศาสตร์

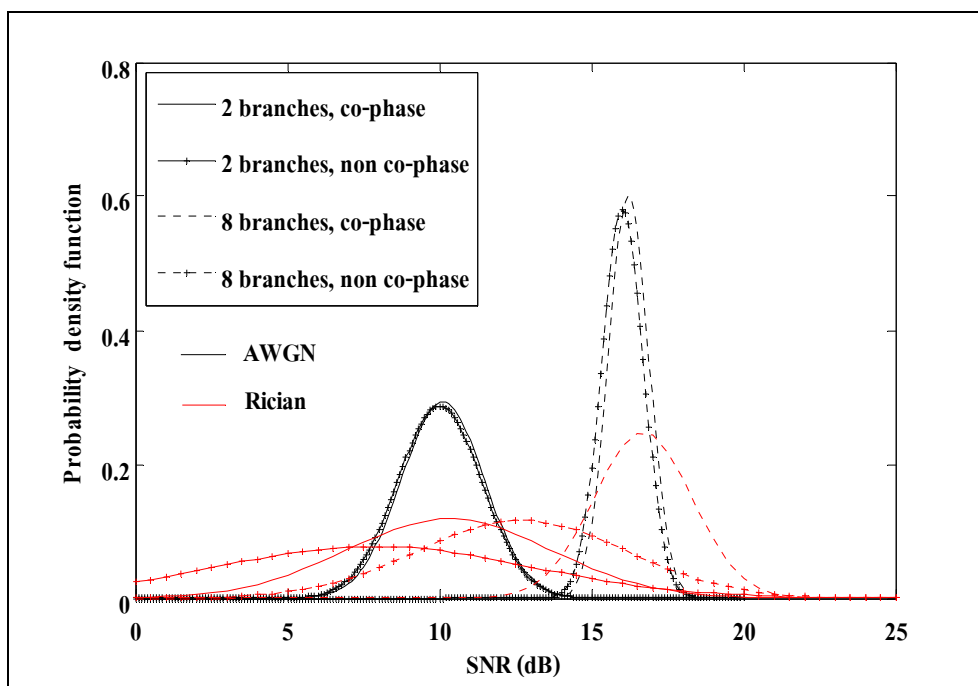
ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีแบบอีซีซีเฟสร่วมและเฟสไม่ร่วมด้วยการวิเคราะห์ทางสมการคณิตศาสตร์

| ค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบ | เฟสร่วม | เฟสไม่ร่วม |
|---------------------------|---------|------------|
| Peak (dB)                 | 10.4    | 9.9        |
| Prob (> Peak)             | 0.427   | 0.466      |
| Average (dB)              | 9.8     | 9.3        |
| Prob (> Average)          | 0.482   | 0.522      |

### 3.1.2 การวิเคราะห์จากการจำลองแบบ

จากการวิเคราะห์สมรรถนะของไดเวอร์ซิตีแบบอีซีซีเฟสไม่ร่วมว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับกรณีเฟสร่วมทางสมการคณิตศาสตร์มาแล้ว แต่อย่างไรก็ตามผลจากการวิเคราะห์ก็ยังไม่เพียงพอสำหรับการพิสูจน์ว่าสมรรถนะของระบบนั้นมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นการที่วิเคราะห์ผลด้วยการจำลองแบบจึงจะเป็นการยืนยันถึงสมรรถนะของสองกรณีว่ามีประสิทธิภาพที่





รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบ pdf ของ SNR ระหว่างเทคนิคอีจีซีเฟสร่วมและเฟสไม่ร่วมด้วยการวิเคราะห์จากการจำลองแบบในช่องสัญญาณเฟดดิ้ง

ใกล้เคียงกัน โดยจะทำการพิจารณาเมื่อมีผลกระทบของเฟดดิ้งมาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเซียนเป็นสิ่งที่เราสนใจ

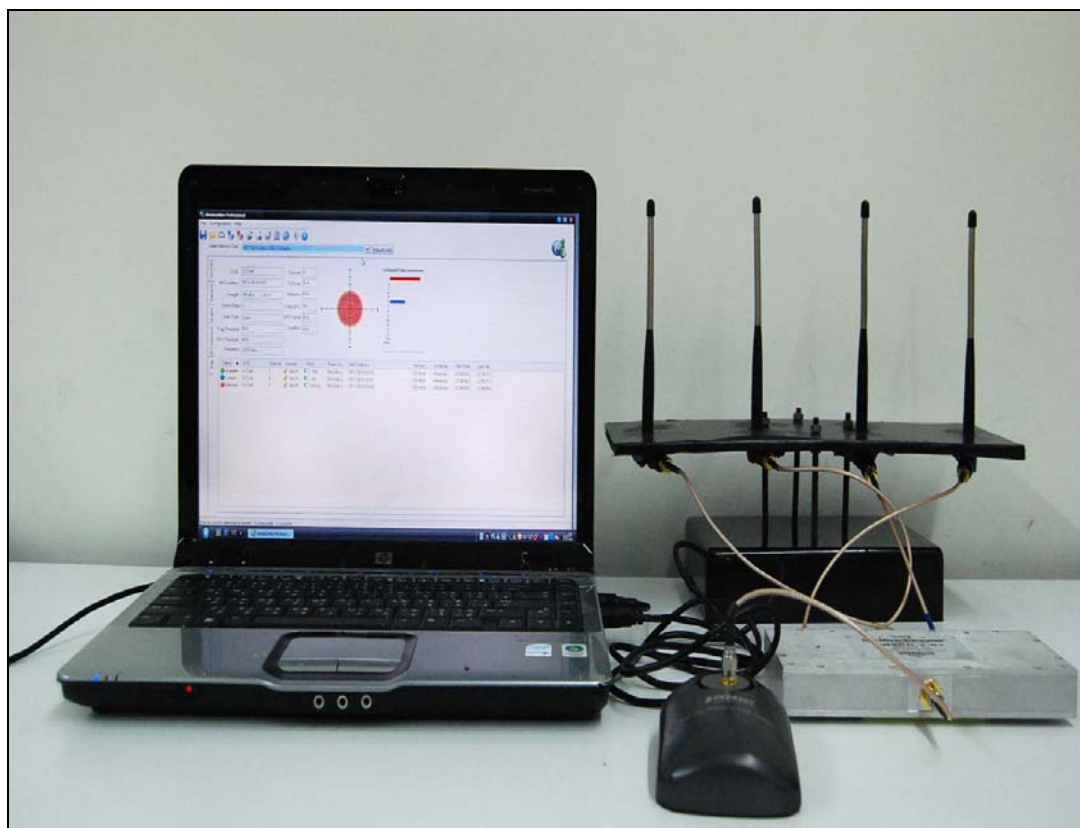
จากรูปที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างการใช้สัญญาณเฟสร่วมกันและเฟสไม่ร่วมกันทั้งช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเซียน เมื่อพิจารณาที่ช่องสัญญาณแบบ AWGN ประสิทธิภาพของทั้งสองกรณีนั้นก็ยิ่งใกล้เคียงกัน ไม่ว่าจะเพิ่มจำนวนสายอากาศเป็น 8 ต้นก็ตาม แต่เมื่อมาพิจารณาที่ช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบริเซียนนั้น จะเห็นได้ชัดว่าการใช้โคเวอร์ซีตีแบบอีจีซีโดยเฟสไม่ร่วมมีสมรรถนะที่ต่ำกว่ากรณีเฟสร่วมกัน ไม่ว่าจะเพิ่มจำนวนสายอากาศเป็น 8 ต้นอีกก็ตาม โดยประสิทธิภาพที่ต่ำกว่านั้นควรมีช่องว่างของค่าเฉลี่ย SNR ไม่เกิน 4 dB จึงจะถือว่ายอมรับได้เมื่อแลกกับการลดความซับซ้อนในเรื่องของฮาร์ดแวร์ในส่วนของการทำเฟสร่วมในทางปฏิบัติออกไป

ดังนั้นทั้งผลการวิเคราะห์จากสมการและการจำลองแบบทำให้ได้ข้อสรุปที่เห็นได้ชัดว่าสมรรถนะของการใช้เทคนิคโคเวอร์ซีตีแบบอีจีซีเฟสไม่ร่วมนั้นมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้สัญญาณเฟสร่วมกัน แต่ช่องสัญญาณเฟดดิ้งมีผลกระทบต่อการใช้เทคนิคอีจีซีเฟสไม่ร่วมให้สมรรถนะต่ำลงแต่ก็ถือว่ายอมรับได้ในเบื้องต้น เมื่อมาพิจารณาในสภาพแวดล้อมจริงภายในอาคาร

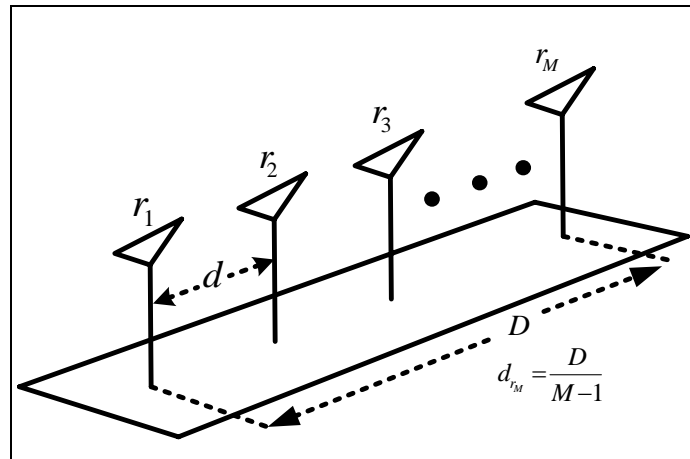
ซึ่งเราไม่สามารถคาดคะเนหรือบอกได้ว่าเป็นช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบใด จึงเป็นที่น่าสนใจถึงสมรรถนะของไดเวอร์ซิตีแบบอิมูนิตีเฟสไม่ร่วม

### 3.1.3 เทคนิคอิมูนิตีเฟสไม่ร่วมในทางปฏิบัติ

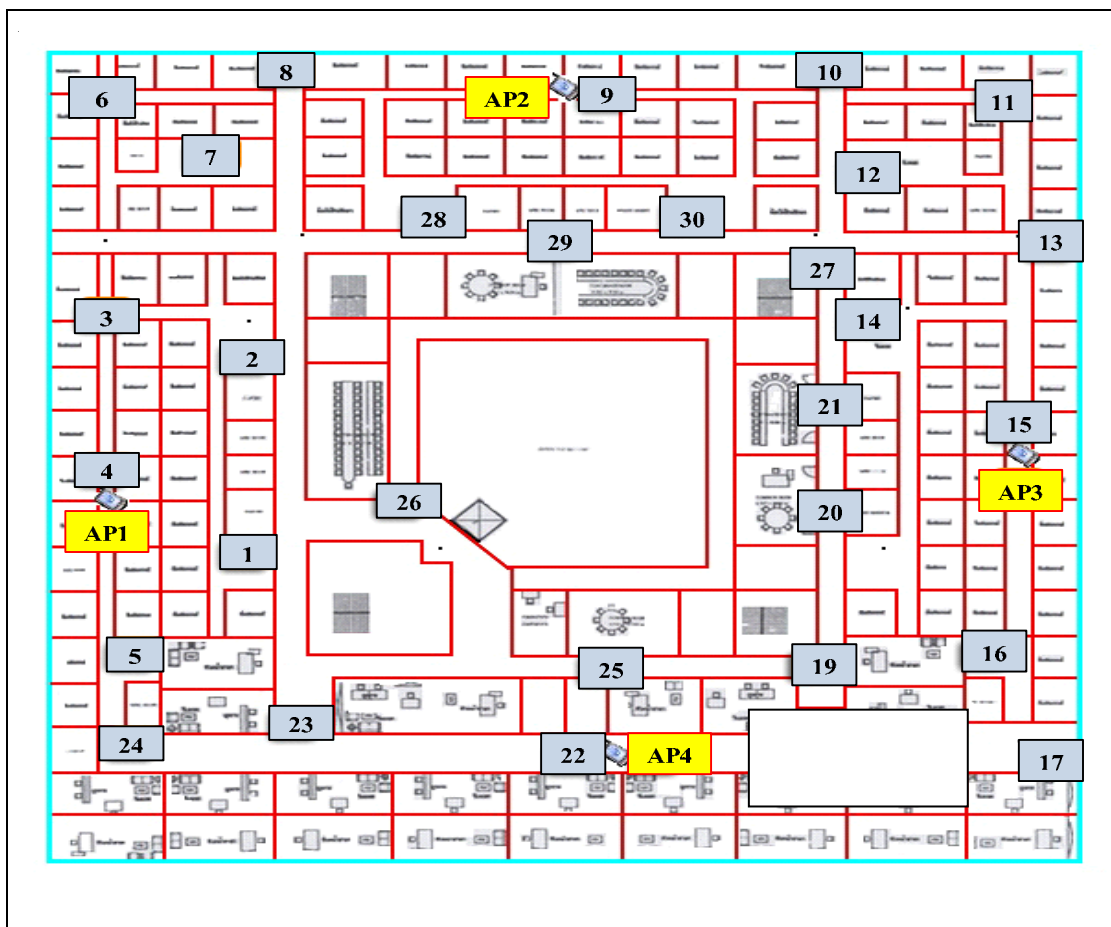
ในทางปฏิบัติสำหรับการใช้เทคนิคอิมูนิตีเฟสไม่ร่วมนั้น อย่างที่ได้กล่าวมาว่ามีความง่าย ไม่ซับซ้อนมากในเรื่องของฮาร์ดแวร์เมื่อเทียบกับกรณีเทคนิคอิมูนิตีเฟสร่วมกัน โดยในส่วนของฮาร์ดแวร์สามารถแสดงดังรูปที่ 3.5 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ ๆ ส่วนที่หนึ่งก็คือสายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศโมโนโพลที่มีอัตราขยาย 5 dBi ส่วนที่สองจะเป็นตัวรวมสัญญาณ (combiner) ที่เป็นอุปกรณ์สำเร็จรูปของบริษัทมินิเซอร์กิตและส่วนที่สามคือ โปรแกรมที่ใช้วัดความแรงของสัญญาณ โดยจะใช้ซอฟต์แวร์ที่ชื่อว่า Wireless Mon 3.0 ที่เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถดาวน์โหลดได้ในอินเทอร์เน็ต ซึ่งเห็นได้ว่าในทางปฏิบัตินั้นเป็นสิ่งที่ง่ายมากสำหรับการใช้เทคนิคอิมูนิตีเฟสไม่ร่วมและก็คือจุดเด่นของเทคนิคนี้



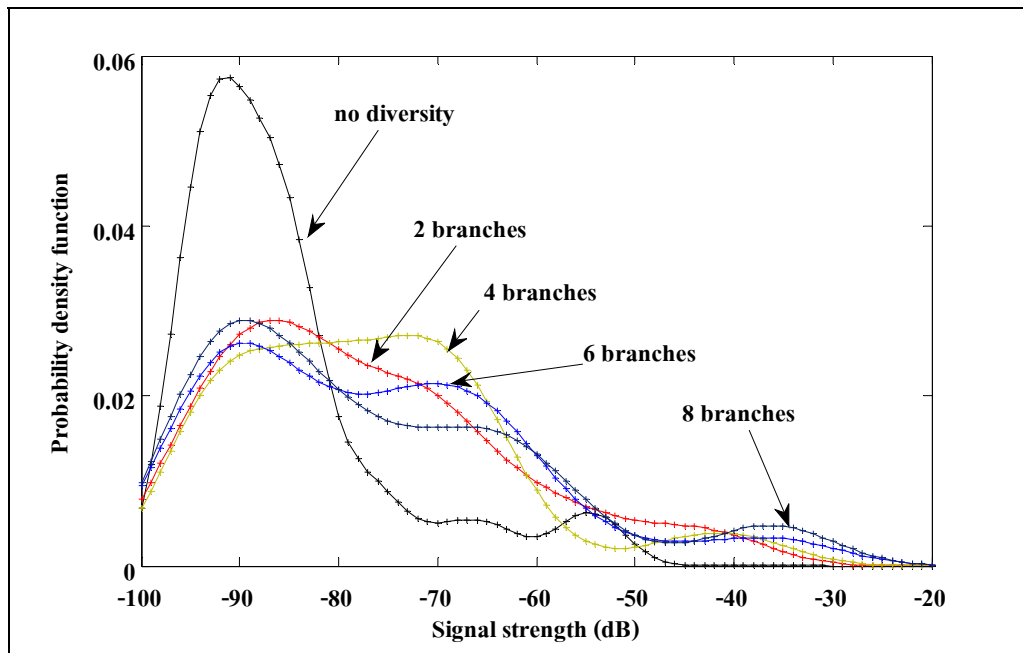
รูปที่ 3.5 แสดงส่วนประกอบของฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการวัดความแรงสัญญาณ



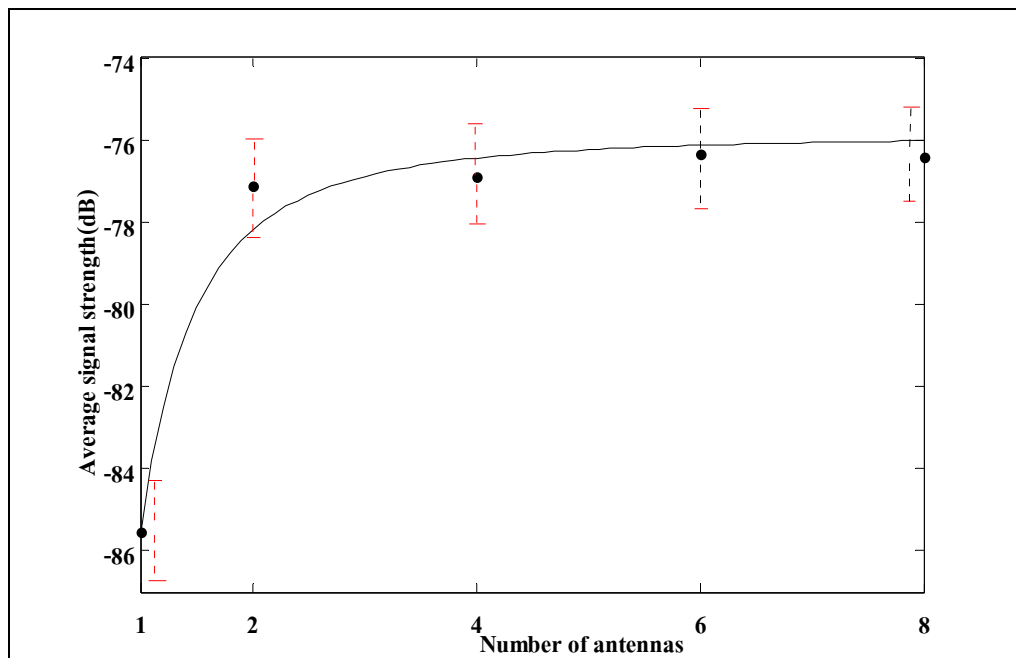
รูปที่ 3.6 แสดงการวางตัวของสายอากาศแบบเรียงตัวเป็นเส้นตรงบนพื้นที่จำกัด



รูปที่ 3.7 แสดงแผนที่และจุดที่ทำการวัดความแรงสัญญาณจริง



รูปที่ 3.8 แสดง pdf ของความแรงสัญญาณสำหรับการใช้เทคนิคแบบอิจิซีเฟสไม่ร่วม จากการวัดความแรงสัญญาณจริง



รูปที่ 3.9 ค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณสำหรับการใช้เทคนิคอิจิซีเฟสไม่ร่วม จากการวัดความแรงสัญญาณจริง

เมื่อมาพิจารณาการเพิ่มจำนวนสายอากาศขึ้นเรื่อย ๆ จนถึง 8 ต้น ซึ่งการวางสายอากาศจะทำการวางเรียงตัวเป็นเส้นตรงบนพื้นที่จำกัดในคอมพิวเตอร์แบบพกพา รูปที่ 3.6 แสดงการวางตัวของสายอากาศบนพื้นที่จำกัดที่จะทำการวัดสำหรับอีจีซีแบบเฟสไม่ร่วมภายใต้สภาพแวดล้อมจริงภายในอาคารวิชาการชั้น 4 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในรูปที่ 3.7 แสดงแผนที่จะการวัดภายในอาคารที่ประกอบไปด้วยจุดเข้าถึงสัญญาณ (access point) 4 จุดและตำแหน่งในการวัดแสดงได้แสดงดังรูปทั้ง 30 จุด โดยทำการวัดความแรงสัญญาณแต่ละจุด 5 ครั้งในเวลาที่แตกต่างกันไป

จากผลการวัดความแรงของสัญญาณภายใต้สภาพแวดล้อมจริงสำหรับการใช้เทคนิคโคเวอรัจตีแบบอีจีซีเฟสไม่ร่วม โดยนำค่าความแรงของสัญญาณที่วัดได้ในแต่ละจุดและแต่ละครั้งของการวัดทั้งหมดมาทำการพล็อตกราฟ pdf เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับสัญญาณดังรูปที่ 3.8 แสดง pdf ของความแรงสัญญาณที่ได้จากการวัดจริงสำหรับการใช้สายอากาศ 1 2 4 6 และ 8 ต้นตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่าการใช้จำนวนสายอากาศที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สมรรถนะของการรับสัญญาณที่ดีขึ้นแตกต่างกันไป ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าการที่ใช้สายอากาศที่จำนวนมากว่าย่อมมีประสิทธิภาพรับสัญญาณที่แรงกว่าการใช้สายอากาศที่จำนวนน้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตามสำหรับการใช้เทคนิคโคเวอรัจตีแบบอีจีซีเฟสไม่ร่วมโดยแสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดในรูปที่ 3.9 แสดงค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณที่รับได้จากการวัดที่ทำการเพิ่มจำนวนสายอากาศขึ้นถึง 8 ต้น ซึ่งจากการเพิ่มสายอากาศหนึ่งต้น ไปเป็น 2 ต้นจะเห็นได้ชัดว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการรับสัญญาณได้ดีมาก โดยค่าเฉลี่ยของความแรงของสัญญาณเพิ่มขึ้น 3-4 dB แต่เมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศจาก 2 ต้นไปจนถึง 8 ต้นนั้น ค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณที่รับได้นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการเพิ่มจำนวนสายอากาศจาก 1 ต้นเป็น 2 ต้นอย่างเห็นได้ชัด

จากผลทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าในทางปฏิบัติการใช้เทคนิคโคเวอรัจตีแบบอีจีซีที่เฟสไม่ร่วมนั้น เราไม่จำเป็นต้องใช้สายอากาศมากกว่า 2 ต้นก็ได้ เพราะการเพิ่มจำนวนสายอากาศที่มากขึ้นไปนั้น ประสิทธิภาพของการรับสัญญาณก็มีความแตกต่างกันไม่มาก จึงทำให้เกิดการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเมื่อเทียบกับสมรรถนะของการรับสัญญาณ ดังนั้นการใช้สายอากาศเพียง 2 ต้นก็เพียงพอสำหรับเทคนิคโคเวอรัจตีแบบอีจีซีเฟสไม่ร่วม

### 3.2 การวิเคราะห์ผลกระทบสหสัมพันธ์ของสัญญาณ

หลังจากได้กล่าวถึงเทคนิคโคเวอรัจตีแบบอีจีซีกรณีเฟสไม่ร่วมว่าสมรรถนะที่ใกล้เคียงกรณีของเฟสรวมแล้วนั้น ซึ่งจะนำเทคนิคนี้ไปใช้สำหรับการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของสหสัมพันธ์สัญญาณที่เกิดขึ้นในการวางสายอากาศบนพื้นที่จำกัดต่อไป โดยจะทำการพิจารณาการวาง

สายอากาศเรียงตัวเป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 3.6 และทำการเพิ่มจำนวนสายอากาศขึ้นจนถึง 8 ต้น โดยระยะ  $d$  ที่แตกต่างกันของการวางตัวสายอากาศนั้นจะนำไปพิจารณาผลกระทบของสหสัมพันธ์ต่อไป

จากความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  $\rho$  และระยะการวางตัวของสายอากาศ  $d$  ในสมการที่ 2.42 ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\rho = J_0^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \quad (3.10)$$

เมื่อ  $J(\cdot)$  คือฟังก์ชันเบสเซลอันดับศูนย์และ  $\lambda$  เป็นความยาวของคลื่นพาห์ สำหรับงานวิจัยของ Richard, B. E. (1998) ได้ทำการหาความสัมพันธ์ของ  $\rho$  ของแต่ละสัญญาณ ซึ่งสมการสามารถแสดงได้ดังนี้

$$p_n(\lambda_c) - \rho = 0 \quad (3.11)$$

เมื่อ  $p_n(\lambda_c)$  คือ โพลีโนเมียลอันดับ  $n$

ตารางที่ 3.2 การประมาณค่าโพลีโนเมียลอันดับ  $n$

| $n$ | โพลีโนเมียล  |
|-----|--|
| 2   | $p_2 = 1.0585\lambda_c^2 - 0.0828\lambda_c + 0.0082$                     |
| 3   | $p_3 = 0.2155\lambda_c^3 + 0.7352\lambda_c^2 - 0.0465\lambda_c + 0.0026$ |

เมื่อตารางที่ 3.2 แสดงรูปแบบสมการโพลีโนเมียลแต่ละอันดับโดยอยู่ในรูปตัวแปร  $\lambda_c$  ซึ่งตัวแปรนี้จะเป็ประโยชน์สำหรับนำไปใช้ในเมทริกซ์สหสัมพันธ์พิเศษ ที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์หาผลกระทบความสหสัมพันธ์ของสัญญาณแต่ละสัญญาณ เมทริกซ์สหสัมพันธ์แสดงได้ดังนี้

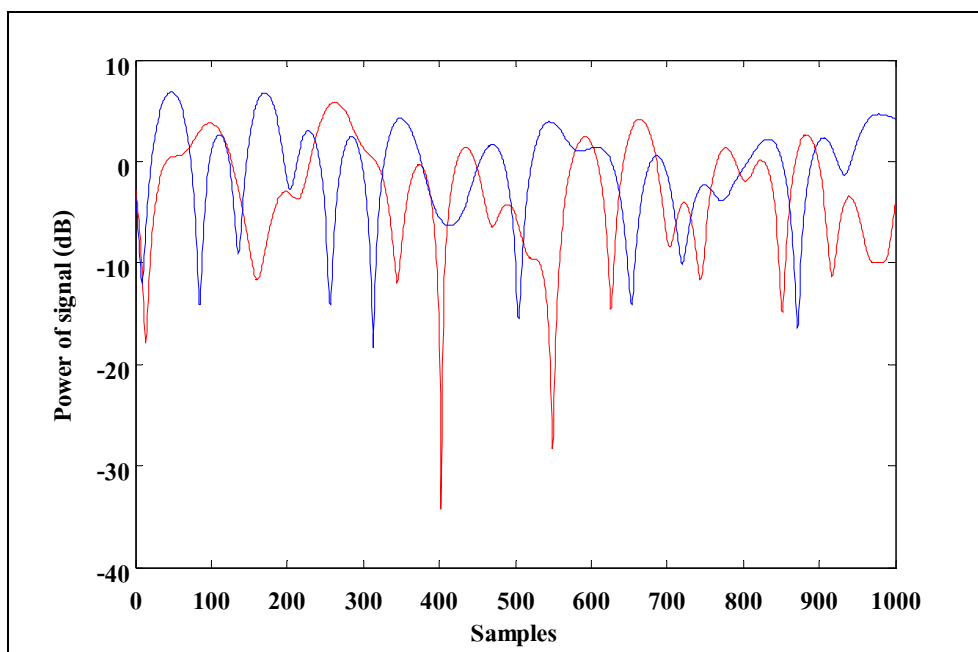
$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\lambda_c\sigma_x(1+j) & \sigma_x\sqrt{1-\lambda_c^2} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

เมื่อ  $\sigma_x$  คือกำลังของสัญญาณที่ต้องการพิจารณา จากนั้นจะนำเมทริกซ์สหสัมพันธ์นี้คูณกับสัญญาณที่ต้องการพิจารณาสหสัมพันธ์ ดังนั้นสัญญาณที่ได้จากการพิจารณาสหสัมพันธ์สามารถแสดงได้โดย

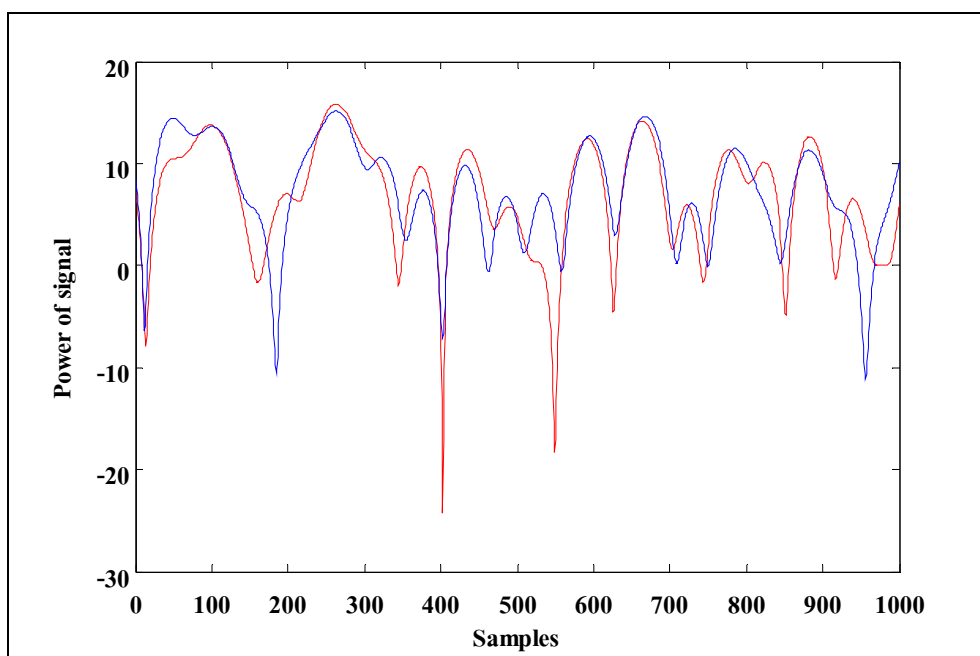
$$\mathbf{X} = \mathbf{L}\mathbf{r} \quad (3.13)$$

เมื่อ  $\mathbf{r} = [r_1 \ r_2]^T$  คือสัญญาณที่ต้องการพิจารณาสหสัมพันธ์ ดังนั้นเราก็จะสามารถพิจารณาสหสัมพันธ์ของสัญญาณได้โดยง่าย แต่อย่างไรก็ตามเพื่อยืนยันว่าหลักการนี้สามารถนำไปใช้ประยุกต์ในการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของสหสัมพันธ์กับระยะเวลาวางตัวของสายอากาศได้จริง โดยเราจะทำการกำหนดค่า  $\rho$  เท่ากับ 0.9 ซึ่งหมายความว่าสัญญาณมีความเป็นสหสัมพันธ์กันมากแล้วพิจารณาเปรียบเทียบสัญญาณกรณีที่ไม่มีความสัมพันธ์และสัญญาณเป็นสหสัมพันธ์กันเมื่อพิจารณาการใช้เมทริกซ์สหสัมพันธ์ในสมการที่ 3.12

ในรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 แสดงสัญญาณการเปรียบเทียบสัญญาณของ 2 และ 4 สัญญาณตามลำดับ โดยรูปที่ 3.10 ก. และรูปที่ 3.11 ก. สัญญาณยังไม่ไม่มีความเป็นสหสัมพันธ์กัน ซึ่งจะเห็นความแตกต่างของแต่ละสัญญาณชัดเจน เมื่อพิจารณาในรูปที่ 3.10 ข. และ 3.11 ข. ให้  $\rho$  เท่ากับ 0.9 โดยใช้สมการที่ 3.13 พิจารณาความเป็นสหสัมพันธ์ของสัญญาณ จะเห็นได้ว่าสัญญาณแต่ละสัญญาณมีลักษณะใกล้เคียงกัน นั่นหมายถึงการที่สัญญาณมีความเป็นสหสัมพันธ์กันมาก ดังนั้นจากผลในรูปที่ 3.12 และ 3.13 ยืนยันได้ว่าเราสามารถนำหลักการนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับผลกระทบความเป็นสหสัมพันธ์ของสัญญาณกับระยะเวลาวางตัวของสายอากาศต่อไปได้



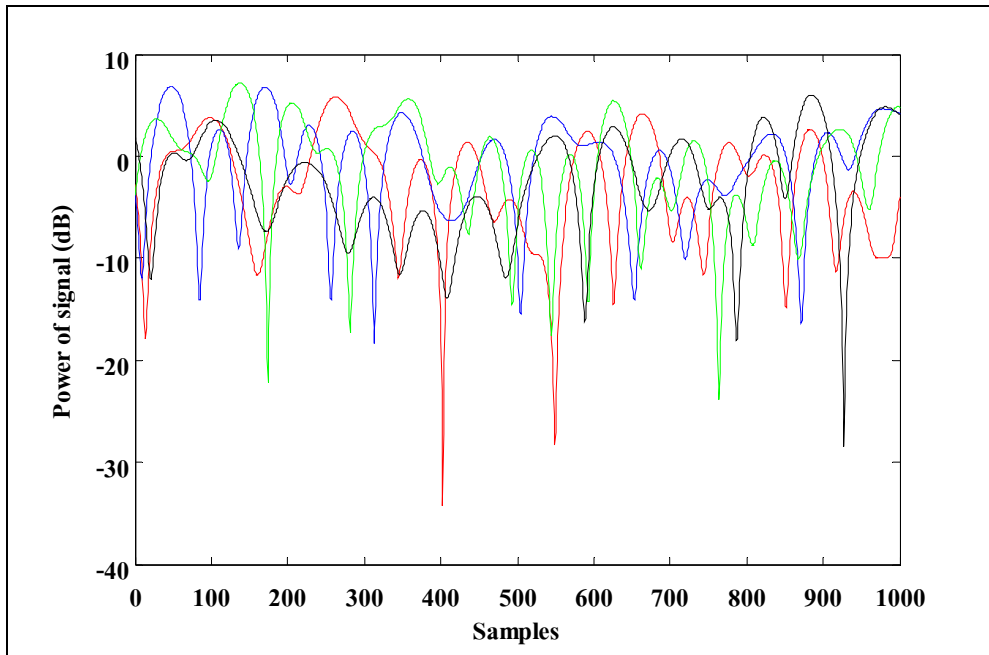
ก. ไม่พิจารณาสหสัมพันธ์



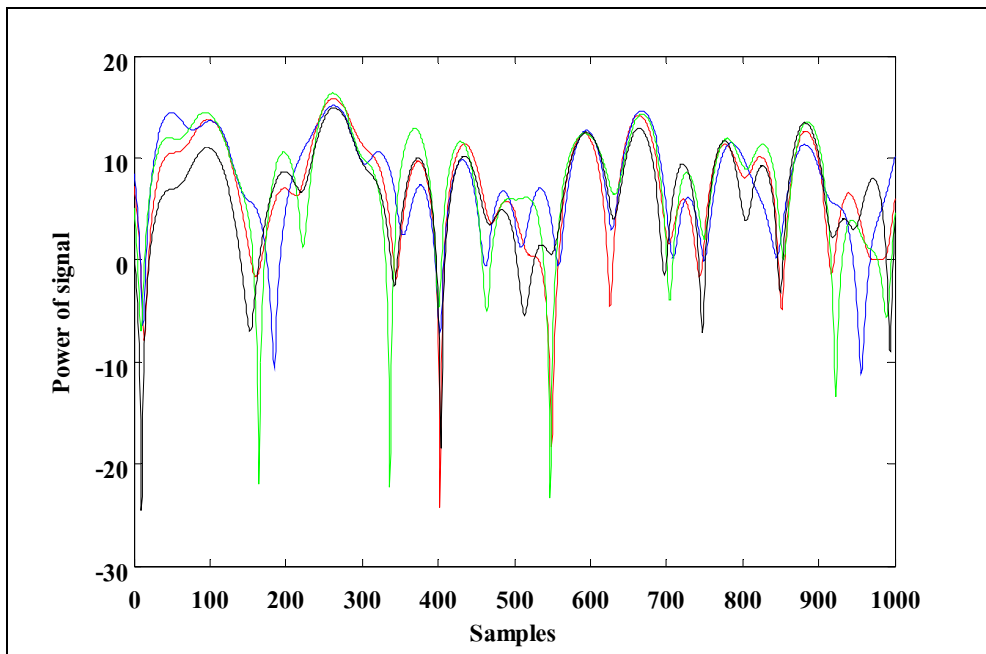
ข. พิจารณาสหสัมพันธ์

รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่าง 2 สัญญาณ ในช่องสัญญาณเฟดดิ้งเรย์ลี



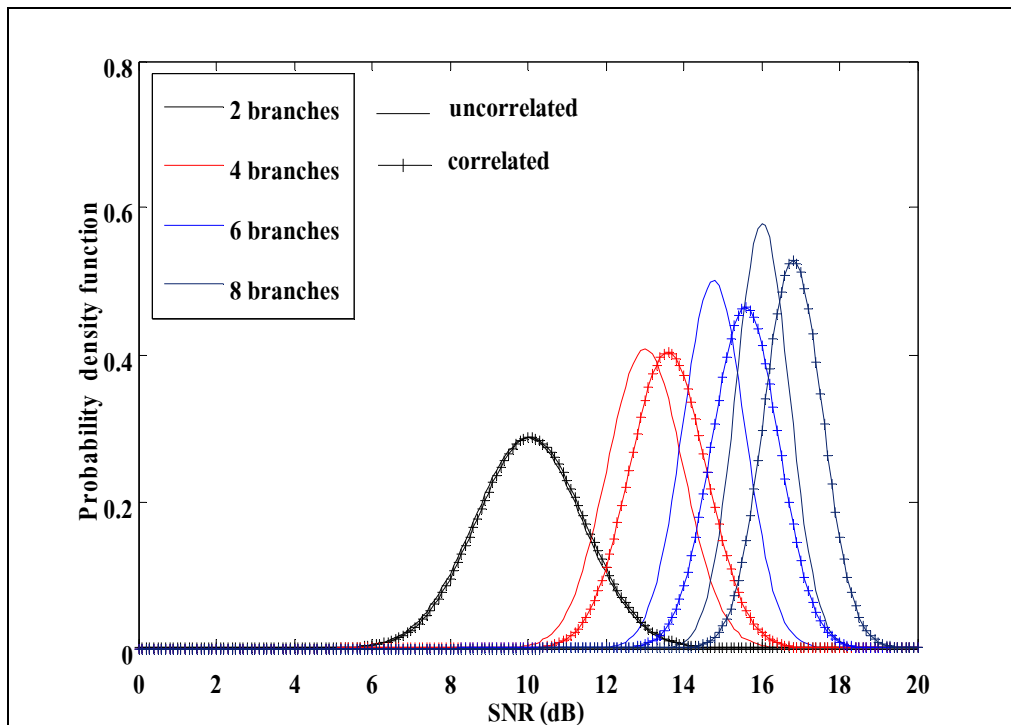


ก. ไม่พิจารณาหสัมพันธ์

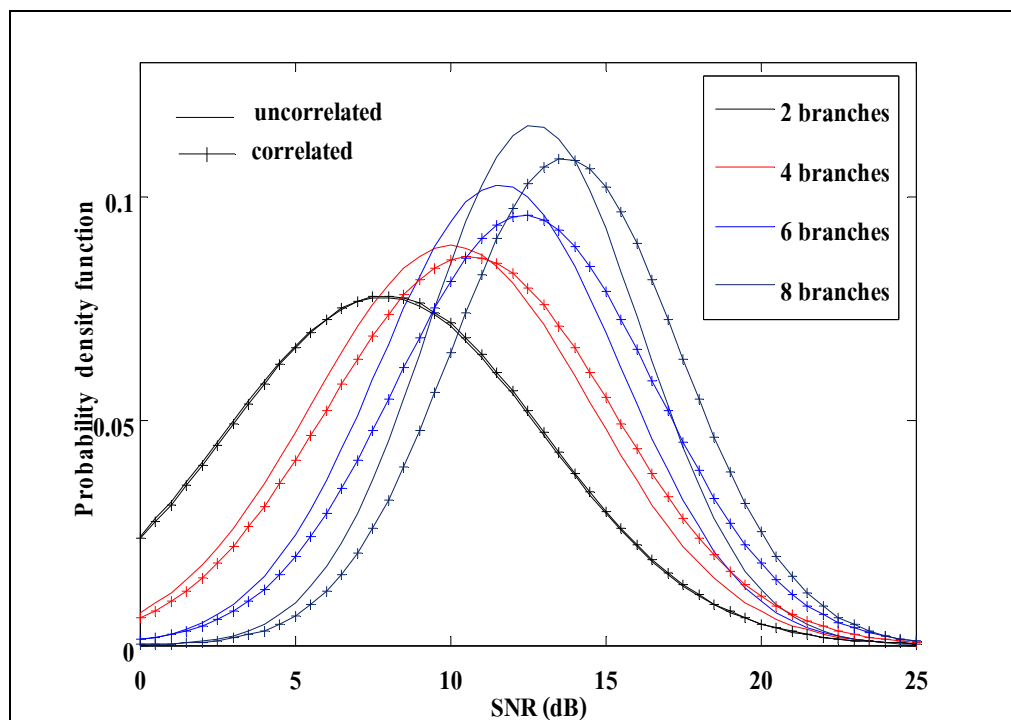


ข. พิจารณาหสัมพันธ์

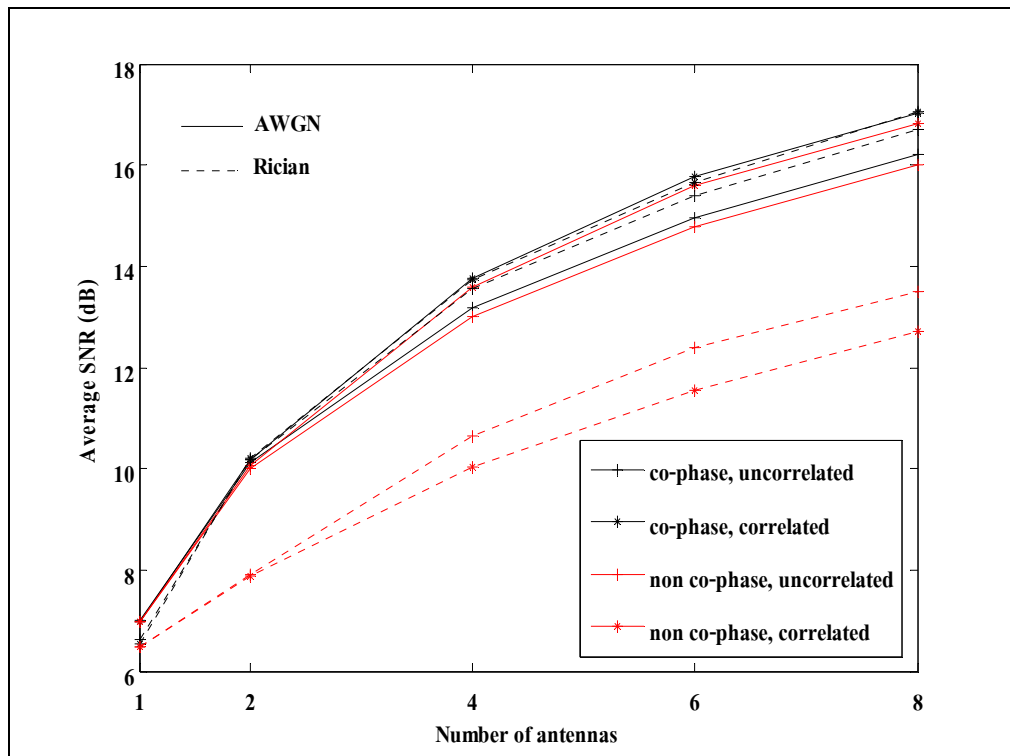
รูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่าง 4 สัญญาณในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเรย์ลี



รูปที่ 3.12 pdf ของ SNR สำหรับใช้เทคนิคอีจีซีเฟสไม่รวมในช่องสัญญาณแบบ AWGN



รูปที่ 3.13 pdf ของ SNR สำหรับใช้เทคนิคอีจีซีเฟสไม่รวมในช่องสัญญาณแบบริเชียน



รูปที่ 3.14 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ SNR สำหรับใช้เทคนิคอีจีซีเฟสรวมและเฟสไม่รวม  
ในช่องสัญญาณเฟดดิ้ง

เมื่อมาพิจารณาผลกระทบของความเป็นสหสัมพันธ์กันของสัญญาณ โดยมีปัจจัยของระยะการวางสายอากาศมาเกี่ยวข้อง จากรูปที่ 3.6 เมื่อวางสายอากาศเรียงตัวแบบเส้นตรงบนพื้นที่จำกัดแล้ววิเคราะห์โดยเพิ่มจำนวนสายอากาศขึ้น ระยะ  $d$  จะเปลี่ยนไปตามด้วย โดยการใช้กระบวนการวิเคราะห์ผลกระทบของความเป็นสหสัมพันธ์ของสัญญาณดังที่กล่าวผ่านมาในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเซียน จากรูปที่ 3.12 แสดงผลกระทบสหสัมพันธ์ของสัญญาณในช่องสัญญาณเฟดดิ้ง AWGN จะเห็นได้ว่าการใช้เทคนิคอีจีซีแบบเฟสไม่รวมนั้น ความเป็นสหสัมพันธ์ของแต่ละสัญญาณนั้นทำให้สมรรถนะระบบมีประสิทธิภาพดีกว่าการพิจารณาสัญญาณไม่มีความเป็นสหสัมพันธ์ เมื่อมีการเพิ่มจำนวนสายอากาศที่มากขึ้น เช่นกันกับรูปที่ 3.13 แสดงผลกระทบสหสัมพันธ์ของสัญญาณในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบริเซียนที่ความเป็นสหสัมพันธ์ของสัญญาณทำให้ระบบดีขึ้น แต่จากรูปจะเห็นถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่น้อยกว่าช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN สาเหตุก็เป็นเพราะผลกระทบของเฟดดิ้งที่ทำให้สมรรถนะของระบบด้อยลง เมื่อมาพิจารณาถึงค่าเฉลี่ยของ SNR สัญญาณสำหรับการใช้เทคนิคอีจีซีทั้งเฟสไม่รวมและเฟสรวมในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเซียน ทั้งสองระบบมีแนวโน้มของค่าเฉลี่ย SNR สัญญาณที่

ดีกว่าเมื่อพิจารณาความเป็นสหสัมพันธ์อย่างเห็นได้ชัดในรูปที่ 3.14 ที่แสดงค่าเฉลี่ยของ SNR เมื่อพิจารณาความเป็นสหสัมพันธ์และไม่พิจารณาความเป็นสหสัมพันธ์ในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเชียน ทั้งการใช้เทคนิคอ็ีซีแบบเฟสไม่ร่วมและเฟสร่วม

### 3.3 สรุป

สำหรับเนื้อหาในบทนี้โดยภาพรวมจะกล่าวถึงการวิเคราะห์สมรรถนะของไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศที่ใช้เทคนิคการรวมสัญญาณแบบอ็ีซีเฟสไม่ร่วม โดยได้เปรียบเทียบกับเทคนิคอ็ีซีแบบเฟสร่วมทั้งทางสมการทางคณิตศาสตร์และการจำลองแบบ ซึ่งจากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าการใช้เทคนิคอ็ีซีแบบเฟสไม่ร่วมมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันกับกรณีที่เฟสร่วมสำหรับในการวิเคราะห์ทางสมการคณิตศาสตร์ แต่เมื่อมาพิจารณาจากการจำลองแบบในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเชียน ผลกระทบจากเฟดดิ้งทำให้การใช้เทคนิคอ็ีซีแบบเฟสไม่ร่วมมีประสิทธิภาพที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับกรณีเฟสร่วม แต่ก็ถือว่ายอมรับได้เมื่อแลกกับความง่ายและไม่ซับซ้อนในทางปฏิบัติ เมื่อมาพิจารณาในทางปฏิบัติของการใช้เทคนิคอ็ีซีแบบเฟสร่วม โดยการเพิ่มจำนวนสายอากาศสำหรับการวางสายอากาศเป็นแนวเส้นตรงบนพื้นที่จำกัดในสภาพแวดล้อมจริง ผลที่ได้ทำให้ทราบว่า การใช้ไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศด้วยเทคนิคการรวมสัญญาณแบบอ็ีซีเฟสไม่ร่วมนั้น การเพิ่มจำนวนสายอากาศที่มากขึ้นนั้นไม่มีความจำเป็นเพราะทำให้สมรรถนะของระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งทำให้ไม่คุ้มค่ากับค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในส่วนของฮาร์ดแวร์ ใช้สายอากาศเพียง 2 ต้นก็เพียงพอสำหรับเทคนิคนี้ในทางปฏิบัติแล้ว

เมื่อนำเทคนิคอ็ีซีแบบเฟสไม่ร่วมมาวิเคราะห์ถึงผลกระทบสหสัมพันธ์ของสัญญาณสำหรับการวางสายอากาศเรียงตัวแนวเส้นตรงบนพื้นที่จำกัด จากการจำลองแบบผลที่ได้จากการพิจารณาสหสัมพันธ์ของสัญญาณสามารถเพิ่มสมรรถนะให้ระบบได้ทั้งในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเชียน ซึ่งจะเห็นการปรับปรุงสมรรถนะได้อย่างชัดเจนเมื่อมีการเพิ่มจำนวนของสายอากาศขึ้นอีก ส่งผลให้ระยะห่างการวางสายอากาศที่น้อยลงทำให้เกิดสหสัมพันธ์ของสัญญาณมากขึ้นด้วย ปัญหาการวางตัวของสายอากาศบนพื้นที่จำกัดที่มีผลกระทบต่อสหสัมพันธ์สัญญาณนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์หาตำแหน่งที่ดีที่สุดของการวางในบทต่อไป

## บทที่ 4

### การหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางสายอากาศและผลการทดลอง

เนื่อหาก่อนหน้านี้เป็นการอธิบายถึงสมรรถนะของการใช้เทคนิคอิจิซีแบบเฟสไม่ร่วมและที่สำคัญการใช้เทคนิคเฟสไม่ร่วมนั้นง่ายไม่ซับซ้อนด้วย โดยได้ทำการวิเคราะห์ทางสมการการจำลองแบบและได้ทำการวัดผลจริงภายใต้สภาพแวดล้อมจริงภายในอาคารเพื่อศึกษาสมรรถนะของระบบด้วย จากนั้นได้นำเทคนิคนี้ไปศึกษาผลกระทบของความเป็นสหสัมพันธ์ของสัญญาณต่อระบบโคเวอรัชิตีแบบอิจิซีเฟสไม่ร่วมเมื่อมีปัจจัยของระยะการวางตัวของสายอากาศมาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณและระยะห่างการวางตัวของสายอากาศ รวมถึงแสดงวิธีการวิเคราะห์ผลกระทบของสหสัมพันธ์ต่อระบบด้วย ซึ่งหลักการและกระบวนการที่ได้แสดงอย่างละเอียดในการวิเคราะห์ที่ผ่านมานำมาประยุกต์ใช้เพื่อทำการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางสายอากาศบนพื้นที่จำกัด โดยได้สมมติพื้นที่บนคอมพิวเตอร์แบบพกพามาใช้ในการจำลองแบบ สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการวางสายอากาศบนพื้นที่จำกัดเมื่อมีสายอากาศจำนวน 2-6 ต้น การใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมจะถูกนำมาใช้แก้ปัญหาการวางตัวของสายอากาศเพื่อให้ได้สมรรถนะเทคนิคอิจิซีเฟสไม่ร่วมที่ดีที่สุด ผลจากการจำลองแบบและผลการวัดความแรงของสัญญาณภายใต้สภาพแวดล้อมจริงจะถูกกล่าวในบทนี้

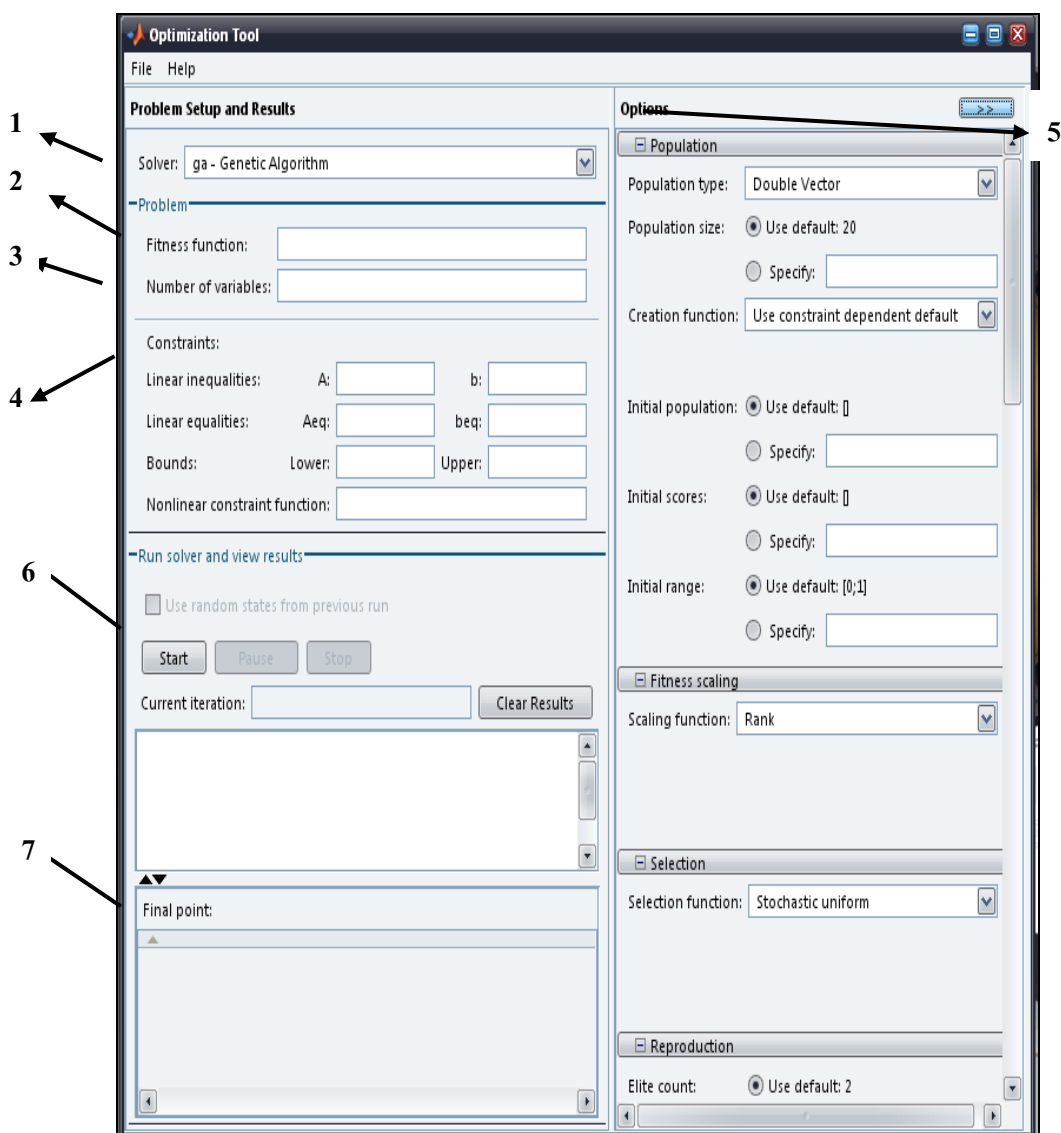
#### 4.1 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการวางสายอากาศด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม

ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ถึงการหาค่าตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม โดยจากกระบวนการและหลักการนี้จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งในการวางตัวของสายอากาศที่เหมาะสมบนพื้นที่คอมพิวเตอร์แบบพกพาเพื่อให้สมรรถนะของระบบมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ในหัวข้อนี้รายละเอียดมีดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 ออบติไมซ์เซชันทูลบ็อกซ์ (optimization toolbox)

สำหรับเครื่องมือประยุกต์ที่ใช้ในการหาค่าตอบที่ดีที่สุดในปัจจุบันมีมากมาย ซึ่งผู้วิจัยได้คุ้นเคยกับการใช้โปรแกรมแมทแล็บเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้งาน มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย ในโปรแกรมแมทแล็บยังมี optimization toolbox โดยเครื่องมือดังกล่าวมีฟังก์ชันของการหาค่าตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมอยู่ด้วย ดังนั้นจึงเป็นเรื่องง่ายที่ผู้วิจัย

จะนำไปใช้ในการหาตำแหน่งของการวางตัวของสายอากาศที่ดีในเทคนิคอิมูมิชชีแบบเฟสไม่ร่วม โดยรายละเอียดของหน้าต่างเครื่องมือ optimization toolbox สามารถอธิบายได้ในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงหน้าต่างเครื่องมือ optimization toolbox

1) หมายเลข 1 (Solver) แสดงอัลกอริทึมของการหาคำตอบที่ดีที่สุดที่ต้องการเลือกใช้ ซึ่งก็จะมีให้เลือกอยู่หลายอัลกอริทึม ในงานวิจัยได้เลือกใช้วิธีจินเนติกอัลกอริทึม ในฟังก์ชันที่แสดงในหน้าต่างเครื่องมือแสดงเป็นชื่อ ga – Genetic Algorithm

2) หมายเลข 2 (Fitness function) เป็นคำสั่งที่เราต้องใส่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาที่เราต้องการค้นหาคำตอบ โดยจะทำการเขียนฟังก์ชันของปัญหาให้อยู่ในไฟล์ m-file ของ

แมทแลบ 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 ตัวอย่างเช่นจำนวนประชากร 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 แต่อย่างไรก็ตามผู้ใช้งานยังต้องศึกษาหลักการและการบวนการใช้เครื่องมือนี้อย่างละเอียดใน Optimization toolbox User Guide (Coleman, T., Branch, M., and Grace, A., 1999) ไม่ว่าจะเป็นการเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์เงื่อนไขและขอบเขตที่ต้องการค้นหา ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความถูกต้องของคำตอบตามวัตถุประสงค์

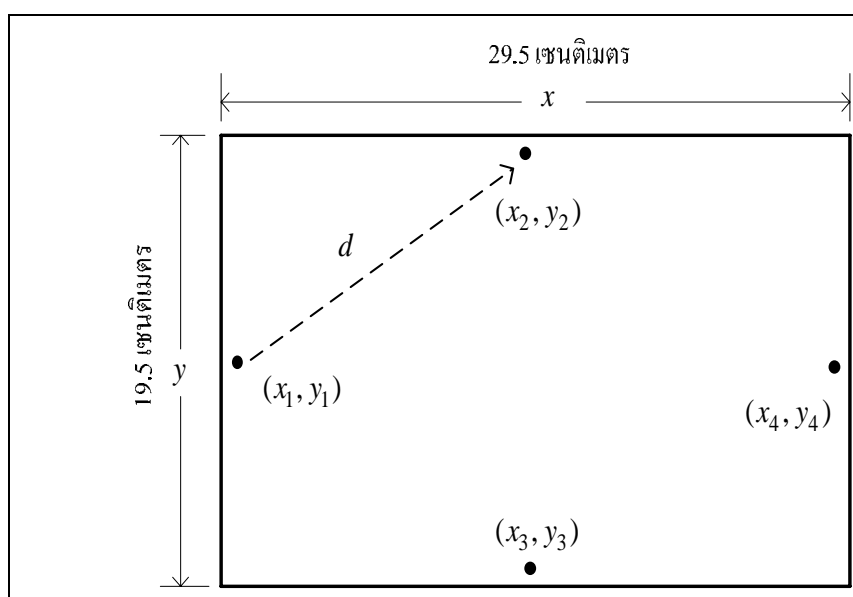
#### 4.1.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function)

สำหรับวัตถุประสงค์ของการค้นหาคำตอบของเทคนิคจีซีแบบเฟสไม่รวม โดยการวางตัวของสายอากาศของแต่ละจำนวนบนพื้นที่จำกัด ฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะประกอบไปด้วยตัวแปรที่แสดงตำแหน่งการวางตัวของสายอากาศแต่ละต้น คำตอบที่ดีที่สุดของการค้นหาจะสิ้นสุดเมื่อระบบมี SNR ค่าสูงที่สุด (maximize) ในการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตำแหน่งการวางสายอากาศแต่ละต้นนั้นจะประกอบด้วยตัวแปร 2 ตัวแปร ซึ่งตัวแปร  $x$  แทนความยาว และ  $y$  แทนความกว้างของพื้นที่คอมพิวเตอร์แบบพกพา จากรูปแสดงตัวอย่างสายอากาศที่สุ่มการวางขึ้นมาสำหรับสายอากาศ 4 ต้นในภาพสองมิติ ทำให้ตำแหน่งการวางสายอากาศนี้ระบุ

พิกัดของแกน  $x$   $y$  การหาระยะห่าง  $d$  ของสายอากาศแต่ละต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์สรณะของระบบที่ดีที่สุด สามารถใช้ทฤษฎีพีทาโกรัสซึ่งหาได้ดังนี้

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (4.1)$$

โดยจะนำเอาสมการที่ 4.1 ไปเชื่อมโยงกับกระบวนการวิเคราะห์ผลกระทบความเป็นสหสัมพันธ์ของสัญญาณในสมการที่ 3.13 ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะมีรูปแบบเดียวกันเลยกับการวิเคราะห์ผลกระทบสหสัมพันธ์ของสัญญาณเพียงแค่เพิ่มตัวแปรตำแหน่งพิกัดบนแกน  $x$   $y$  ของสายอากาศแต่ละต้นเพื่อหาค่า  $d$  ก่อนเท่านั้น ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ก็คือฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสมที่มีความเป็นเชิงเส้นนั่นเอง โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ย SNR ของระบบในสมการที่ 2.1 ของแต่ละสัญญาณหลังการวิเคราะห์เทคนิคอีซีแบบเฟสไม่รวมที่ได้ทำการสุ่มขึ้นมาให้มีค่าสูงที่สุด



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการวางสายอากาศในพิกัด  $x$   $y$  บนพื้นที่คอมพิวเตอร์แบบพกพา



### 4.1.3 เงื่อนไข (Constraint)

สำหรับเงื่อนไขในการค้นหาตำแหน่งที่ดีที่สุดในการวางสายอากาศที่สำคัญจุดเดียวคือพื้นที่จำกัดบนคอมพิวเตอร์แบบพกพา โดยเงื่อนไขของการค้นหาพิกัดตำแหน่งการวางความยาว  $x$  เท่ากับ 0 เซนติเมตรถึง 29.5 เซนติเมตร และความกว้าง  $y$  เท่ากับ 0 เซนติเมตรถึง 19.5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2

### 4.1.4 พารามิเตอร์ (Parameter)

หลังจากได้อธิบายหลักการของการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมในบทที่ 2 ผ่านมาแล้ว ซึ่งก็จะเข้าใจถึงความสำคัญของอัลกอริทึมที่ต้องทำการพิจารณาค่าต่าง ๆ ให้เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด เมื่อทำการเชื่อมโยงหลักและกระบวนการของอัลกอริทึมมาสู่การพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะทำการกำหนดบนเครื่องมือ optimization toolbox ที่เราได้นำมาประยุกต์ใช้ ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดในการวางสายอากาศด้วยการใช้เทคนิคจินเนติกอัลกอริทึมในเครื่องมือ optimization toolbox สามารถแสดงดังตารางที่ 4.1 ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้บนเครื่องมือ optimization toolbox

| พารามิเตอร์              | ค่าที่ใช้      |
|--------------------------|----------------|
| Generation               | 70,100         |
| Population               | 200            |
| Probability of crossover | 0.7            |
| Probability of mutation  | 0.01           |
| Population type          | Bit string     |
| Encoding                 | Binary string  |
| Selection                | Tournament     |
| Crossover                | Multiple point |
| Fitness function         | Proportional   |

## 4.2 การวัดความแรงของสัญญาณ

ดังที่ได้แสดงรูปแบบของการวัดความแรงสัญญาณของการใช้เทคนิคอีจีซีแบบเฟสไม่ร่วมในบทก่อนหน้านี้มาพอสังเขปแล้ว สำหรับการวัดความแรงของสัญญาณจะทำการวางสายอากาศแต่ละแบบที่ได้ทำการสุ่มการวางและจากการหาตำแหน่งการวางสายอากาศบนพื้นที่จำกัดในคอมพิวเตอร์แบบพกพาภายใต้สภาพแวดล้อมจริงภายในอาคารวิชาการชั้น 4 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในรูปที่ 4.3 แสดงแผนที่มีการวัดภายในอาคารที่ประกอบไปด้วยจุดเข้าถึงสัญญาณ 4 จุด และมี MAC address ดังนี้

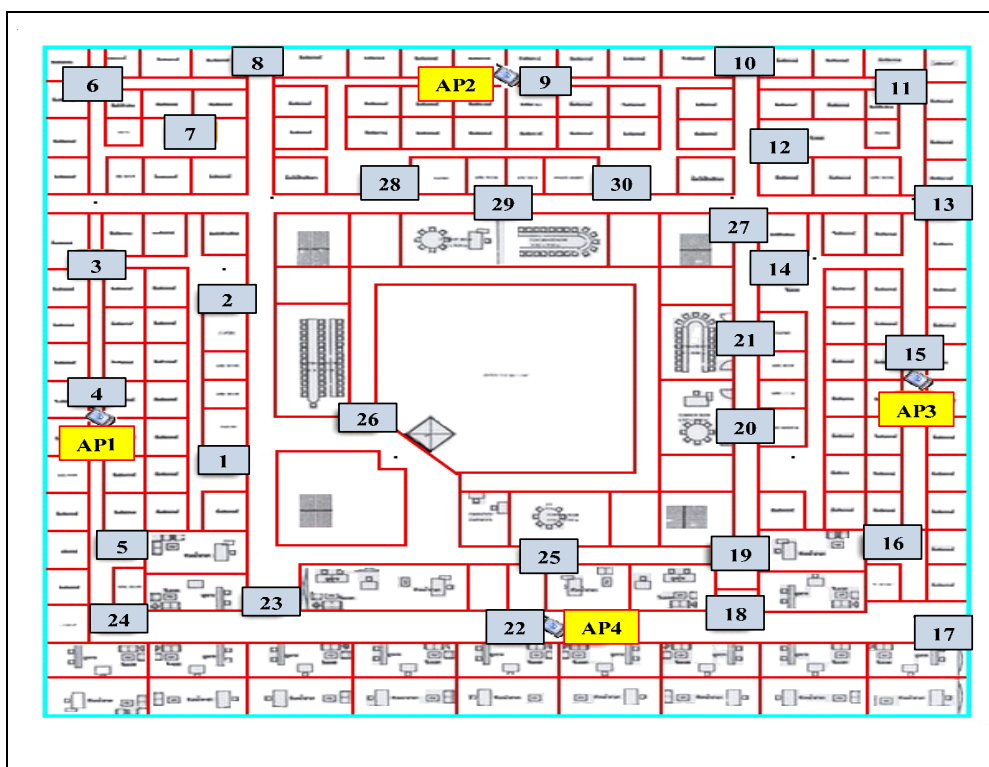
จุดที่ 1 MAC address คือ 00 1b d4 f5 15 70

จุดที่ 2 MAC address คือ 00 1b d4 f5 16 90

จุดที่ 3 MAC address คือ 00 1b d4 f5 18 50

จุดที่ 4 MAC address คือ 00 1b d4 f5 17 10

ตำแหน่งในการวัดแสดงได้แสดงดังรูปทั้ง 30 จุด โดยทำการวัดความแรงแต่ละจุด 5 ครั้ง ในเวลาที่แตกต่างกันไปของสายอากาศที่ได้สุ่มวางแต่ละแบบ รวมถึงการวางสายอากาศที่ได้จากการหาตำแหน่งที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม



รูปที่ 4.3 แผนที่อาคารวิชาการชั้น 4 ซึ่งได้มีการกำหนดตำแหน่งในการวัดสัญญาณ

### 4.3 การออกแบบการทดลอง

#### 4.3.1 สายอากาศ

ในเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของการวางตัวของสายอากาศในงานวิจัยนี้สายอากาศที่ใช้คือ สายอากาศโมโนโพลซึ่งเป็นสายอากาศเส้นลวดตรงที่มีต้นแบบมาจากสายอากาศไดโพล เพียงแต่นำมาใช้เพียงครึ่งหนึ่งของความยาวไดโพลและมีการป้อนสัญญาณเข้าที่กึ่งกลางของไดโพล โดยเทียบกับระนาบกราวด์ (ground plane) ดังนั้นความยาวของโมโนโพลจึงเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นใช้งานและมีอัตราขยายเท่ากับ 5 dB

#### 4.3.2 ตัวรวมสัญญาณ

เป็นตัวรวมสัญญาณที่ได้ทำสำเร็จรูปขึ้นมาโดยบริษัทมินิเซอร์กิต มีย่านความถี่ที่ใช้งานคือ 2000-4200 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่าการลดทอนของสัญญาณต่ำที่ผ่านจุดต่อมีค่าเท่ากับ 0.8 dB ดังสามารถแสดงในรูปที่ 4.4 โดยจะทำหน้าที่ในการรวมสัญญาณที่สายอากาศรับได้แต่ละต้นเพื่อให้เป็นสัญญาณรวมเพียงสัญญาณเดียว

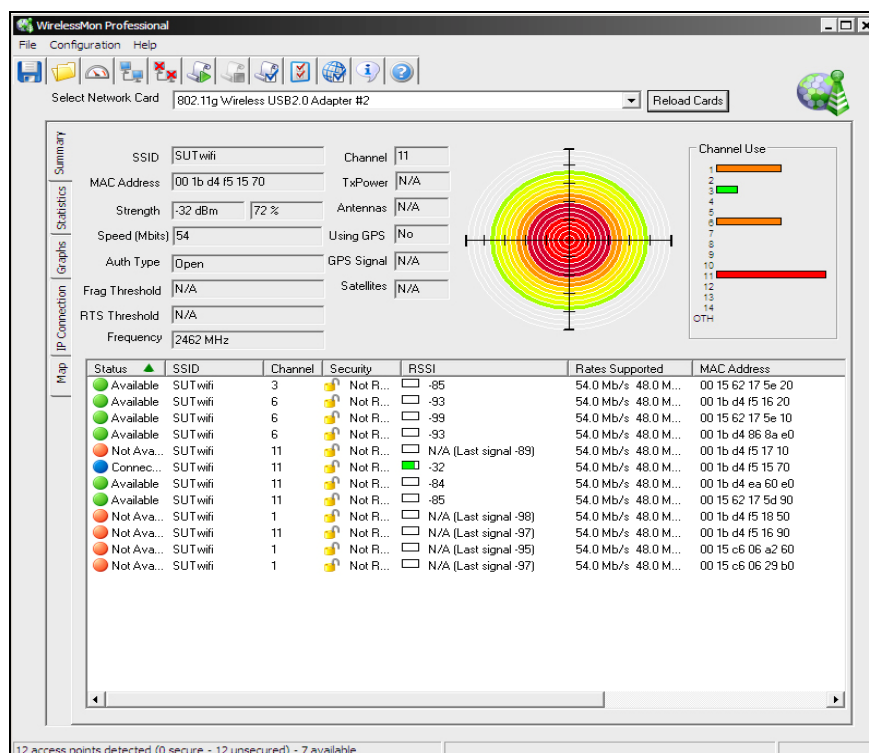


รูปที่ 4.4 ตัวรวมสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัย

#### 4.3.4 ซอฟต์แวร์สำหรับการวัด

สำหรับโปรแกรมที่ใช้สำหรับการวัดความแรงของสัญญาณที่ผู้วิจัยได้เลือกใช้ก็คือ Wireless Mon 3.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถใช้งานง่าย รวมถึงสามารถดาวน์โหลดได้จากอินเทอร์เน็ตทั่วไป ในรูปที่ 4.5 ได้แสดงหน้าต่างโปรแกรม พร้อมทั้งอธิบายส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญของโปรแกรม อาทิเช่น การแสดงสถานะของสัญญาณที่มีความแรงของสัญญาณสูงสุดพร้อมทั้งระบุ MAC address ของจุดเข้าถึงสัญญาณ ในส่วนของโปรแกรมจะแสดงค่าต่าง ๆ โดยอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้

- 1) Status เป็นการบอกสถานะของจุดเข้าถึงสัญญาณแต่ละตัวว่าเชื่อมต่ออยู่หรือไม่



รูปที่ 4.5 แสดงหน้าต่างโปรแกรม Wireless Mon

2) Service Set Identifier (SSID) ทำหน้าที่โดยเป็นชื่อเรียกของเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN แต่ละเครือข่ายโดยการตั้งชื่อ SSID นั้นต้องไม่เกิน 32 ตัวอักษรและตัวพิมพ์ใหญ่ ตัวพิมพ์เล็กก็มีค่าต่างกันด้วย

3) Channel เป็นค่าที่บอกถึงช่องสัญญาณที่ใช้ ซึ่งในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนี้จะมีการใช้ทั้งหมด 11 ช่องสัญญาณ ส่วนมากนิยมใช้ช่องสัญญาณที่ 1 6 และ 11 เพื่อป้องกันการซ้อนทับกันของช่องสัญญาณ

4) Security แสดงความปลอดภัยของเครือข่าย

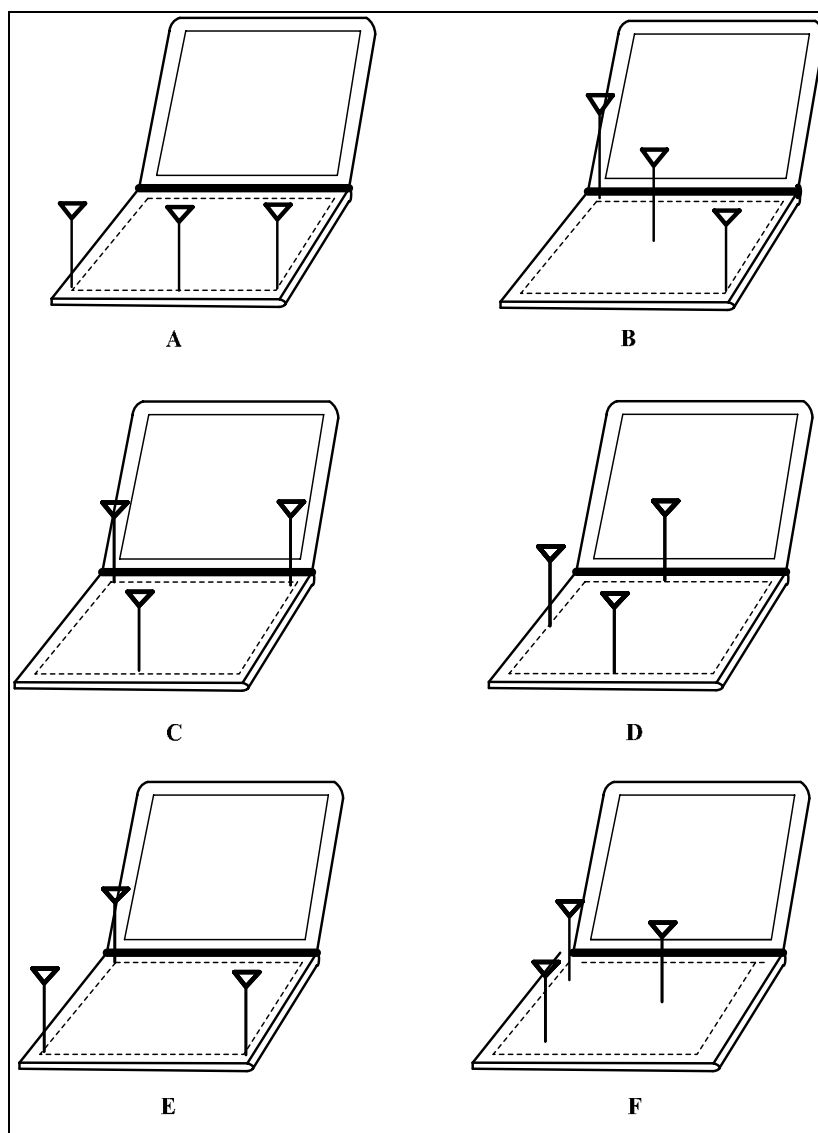
5) Received signal strength indication (RSSI) ทำหน้าที่บอกระดับกำลังงาน ความแรงสัญญาณที่รับได้ในหน่วย dBm

6) Rates Supported บอกถึงอัตราการรับส่งข้อมูลที่รองรับ

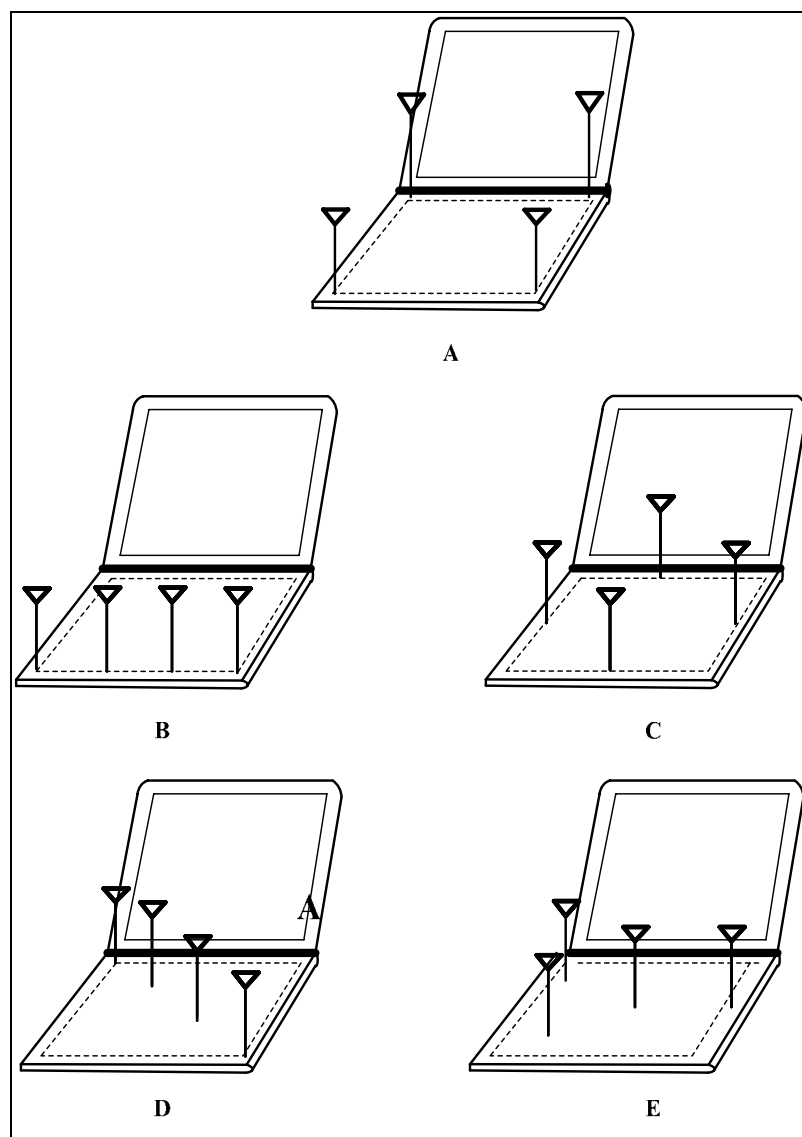
7) MAC address เป็นแอดเดรสที่มาพร้อมการ์ด LAN (Local Area Network) ซึ่งเป็นแอดเดรสที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้และเป็นแอดเดรสที่ไม่มีโอกาสซ้ำกันไม่ว่าจะอยู่ในเครือข่ายใดก็ตาม เนื่องจากเป็นแอดเดรสที่ถูกบรรจุอยู่บนไมโครชิปและถูกกำหนดไว้เรียบร้อยแล้วจากบริษัทผู้ผลิตการ์ด LAN

#### 4.3.2 การวางสายอากาศ

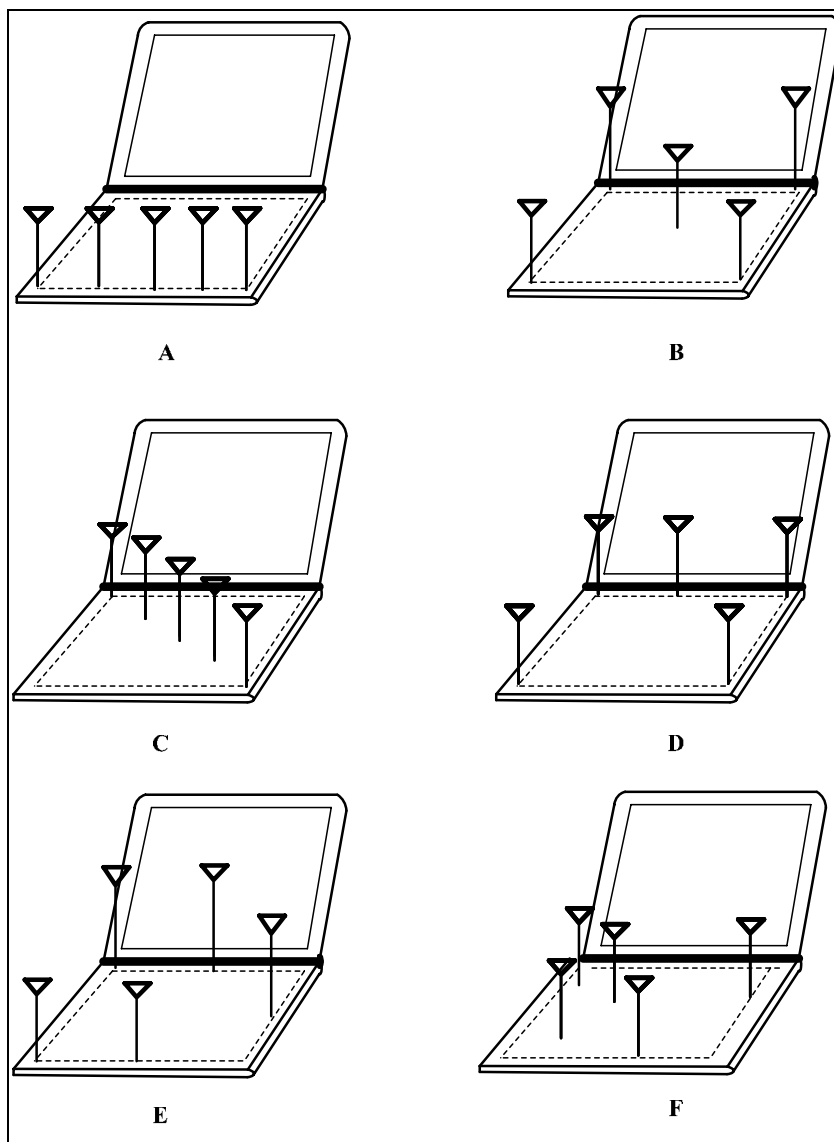
เพื่อเป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะการวางสายอากาศจากการหาคำแหน่งการวางบนพื้นที่คอมพิวเตอร์แบบพกพาด้วยเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึม จึงได้ทำการสุ่มการวางตัวของสายอากาศของแต่ละจำนวนที่ได้ทำการพิจารณาจาก 2-6 ต้นขึ้นมาในการเปรียบเทียบสมรรถนะว่ามีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าจริงโดยการสุ่มการวางสายอากาศของแต่ละจำนวนของสายอากาศที่จะนำมาเปรียบเทียบมีรายละเอียดดังนี้



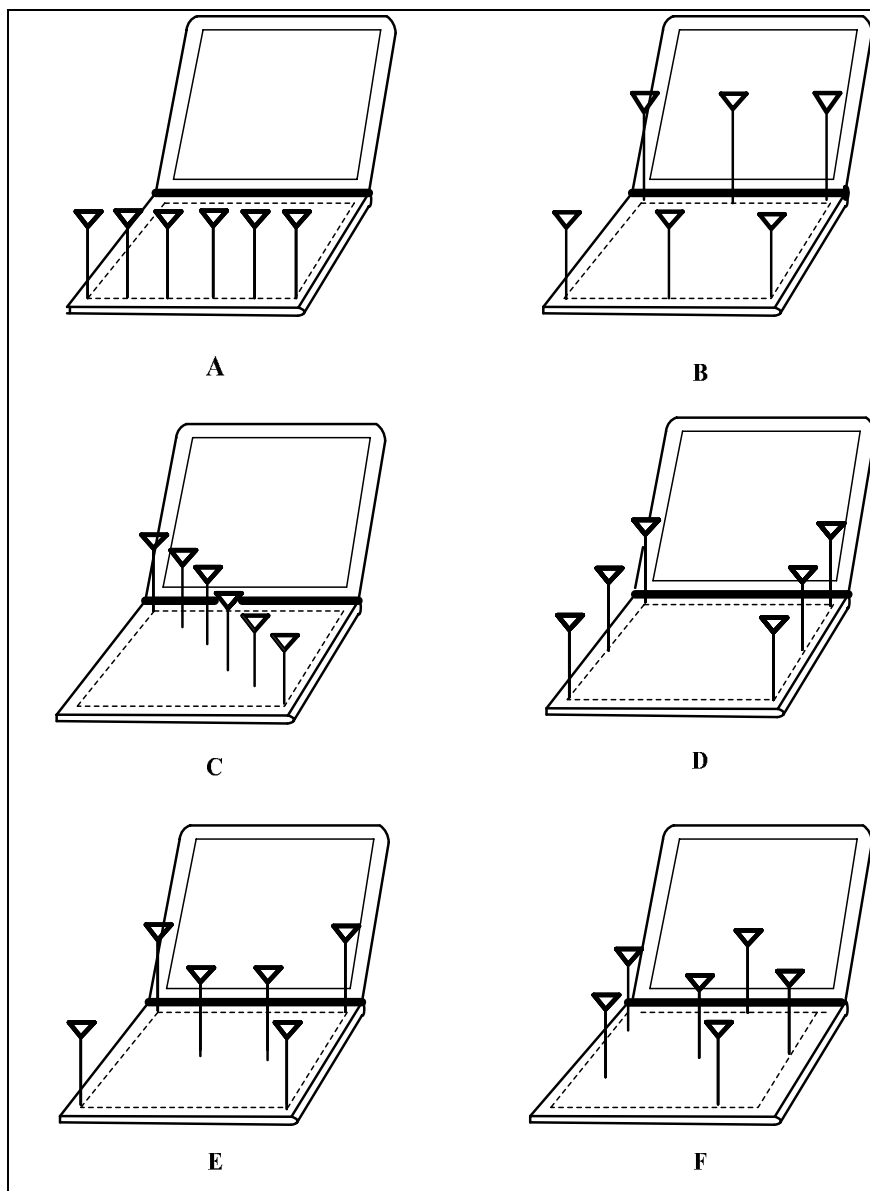
รูปที่ 4.6 แสดงการวางสายอากาศ 3 ต้นแบบสุ่มบนพื้นที่คอมพิวเตอร์แบบพา



รูปที่ 4.7 แสดงการวางสายอากาศ 4 ดันแบบสุ่มบนพื้นที่คอมพิวเตอร์แบบพา



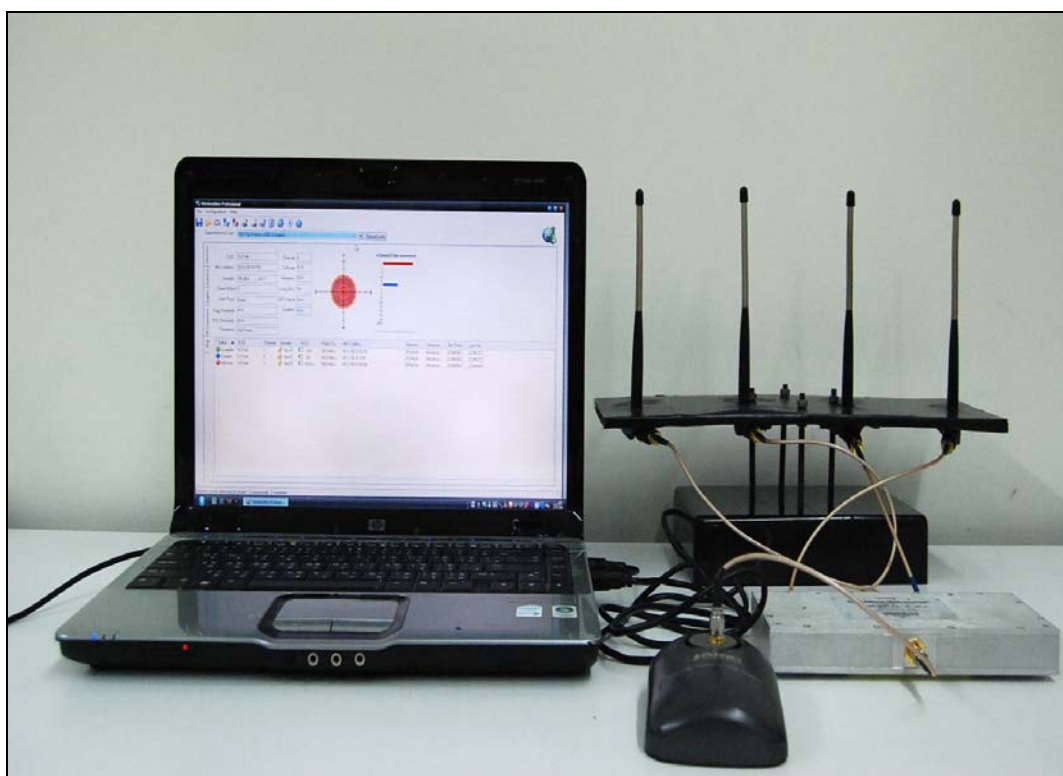
รูปที่ 4.8 แสดงการวางสายอากาศ 5 ต้นแบบสุ่มบนพื้นที่คอมพิวเตอร์แบบพา



รูปที่ 4.9 แสดงการวางสายอากาศ 6 ดันแบบสุ่มบนพื้นที่คอมพิวเตอรืแบบพา



จากการออกแบบการทดลองสำหรับการใช้เทคนิคอีซีแบบเฟสไม่ร่วมในทางปฏิบัติที่ได้กล่าวมานั้น โดยในส่วนของฮาร์ดแวร์สามารถแสดงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ ส่วนที่หนึ่งก็คือสายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศโมโนที่มีอัตราขยาย 5 dB ซึ่งจากรูปเป็นตัวอย่างการใช้สายอากาศ 4 ต้นวางเรียงตัวเป็นเส้นตรงบนพื้นที่จำกัดอ้างอิงขนาดคอมพิวเตอร์แบบพกพา ส่วนที่สองจะเป็นตัวรวมสัญญาณที่เป็นอุปกรณ์สำเร็จรูป ส่วนที่สามคือโปรแกรมที่ใช้วัดความแรงของสัญญาณ โดยจะใช้ซอฟต์แวร์ที่ชื่อว่า Wireless Mon 3.0 ที่เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถดาวน์โหลดได้ในอินเทอร์เน็ต ซึ่งเห็นได้ว่าในทางปฏิบัตินี้เป็นสิ่งง่ายและไม่ซับซ้อนมากสำหรับการใช้เทคนิคอีซีแบบเฟสไม่ร่วมและนี่คือจุดเด่นของเทคนิคนี้



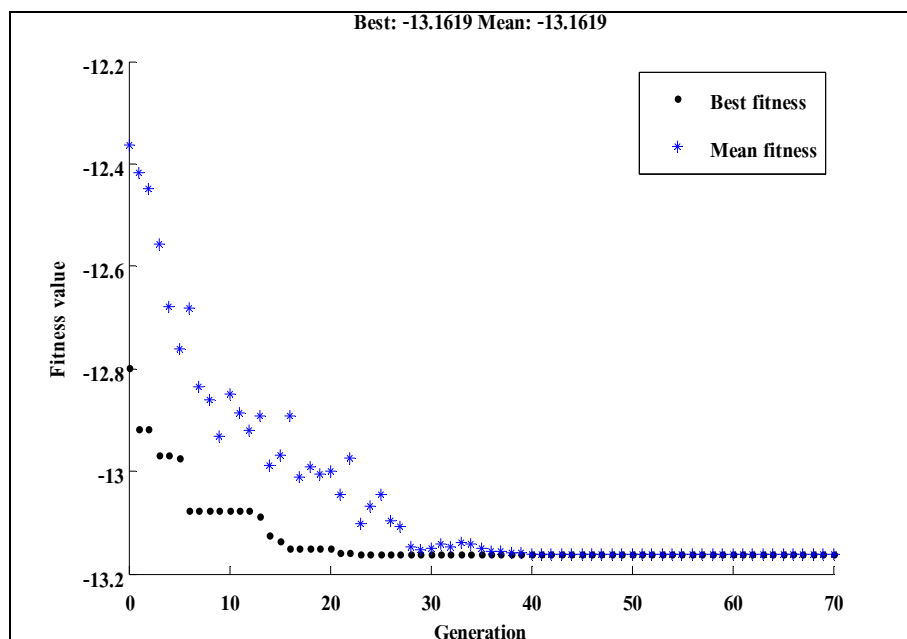
รูปที่ 4.10 แสดงส่วนประกอบของฮาร์ดแวร์สำหรับเทคนิคการรวมสัญญาณแบบอีซีเฟสไม่ร่วม

## 4.4 ผลจากการทดลองและการจำลองแบบ

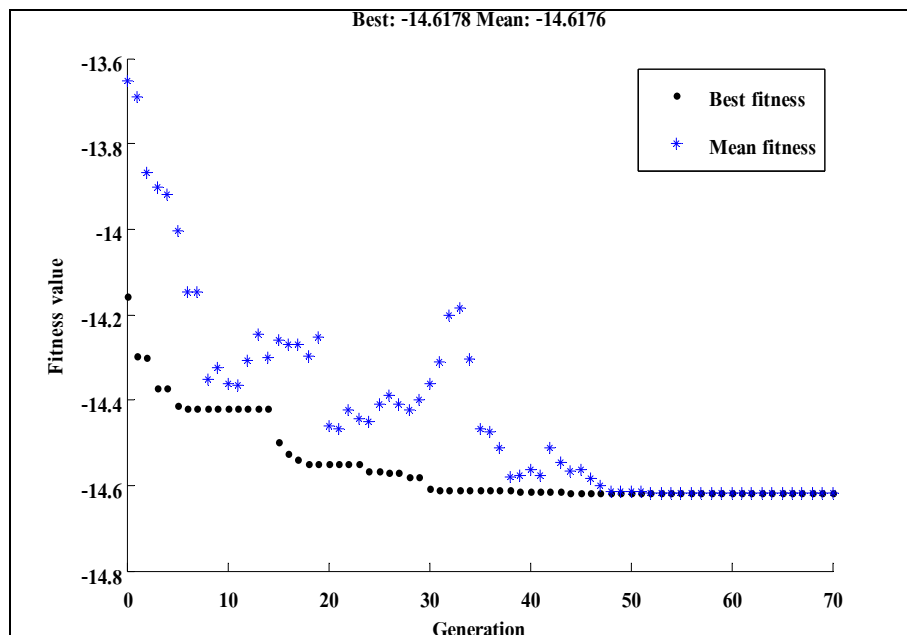
### 4.4.1 ผลจากการจำลองแบบ

ผลจากการจำลองแบบในการหาระยะและตำแหน่งการวางตัวของสายอากาศบนพื้นที่คอมพิวเตอรืแบบพกพาสำหรับการใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีด้วยการรวมสัญญาณแบบอ็ีซีเฟสไม่ร่วมนั้นจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งจะแสดงผลของการค้นหาตำแหน่งที่ดีที่สุดของการวางตัวของสายอากาศจากการใช้เครื่องมือ optimization toolbox ในโปรแกรมแมทแล็บ โดยจะแสดงกราฟของฟังก์ชันการประเมินค่าคำตอบของแต่ละจำนวนสายอากาศในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเชียนดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ จากรูปค่าของ Generation เปรียบเสมือนจำนวนรอบของการค้นหาคำตอบที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 4.1 ค่า Best fitness เป็นค่า SNR ที่ดีที่สุดในแต่ละรอบของการค้นหาคำตอบ ส่วนค่า Mean fitness เป็นค่าเฉลี่ย SNR จากคำตอบทั้งหมดของการค้นหาในแต่ละรอบเช่นกัน คำตอบที่ดีที่สุดของการค้นหาจะสิ้นสุดที่ Generation ที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งค่า Best fitness และ Mean fitness จะไม่มีคำตอบที่สามารถปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ดีกว่านี้แล้วดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.11 ก. สำหรับการหาตำแหน่งที่ดีที่สุดของสายอากาศจำนวน 3 ต้น จะเห็นได้จากช่วง Generation ตั้งแต่ 40-70 กราฟจะเป็นเส้นตรงไม่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของ SNR แล้ว โดยค่า SNR ที่ดีที่สุดหรือสำหรับค่า Best fitness อยู่ที่ 13.16 dB เช่นเดียวกับค่า SNR เฉลี่ยหรือค่า Mean fitness เท่ากับ 13.16 dB ซึ่งในส่วนนี้ก็จะได้คำตอบของตำแหน่งและระยะสำหรับการวางสายอากาศที่ให้สมรรถนะของระบบมีประสิทธิภาพดีที่สุดดังแสดงในตารางที่ 4.2 4.3 4.4 และ 4.5 สำหรับสายอากาศจำนวน 3 4 5 และ 6 ต้นตามลำดับ

ในส่วนที่สองจะแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่มีการวางสายอากาศในตำแหน่งที่ได้จากการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดจากเทคนิคจินเนติกอัลกอริทึมในตารางที่ 4.2 4.3 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ ซึ่งระบุตำแหน่งของการวางสายอากาศแต่ละต้นเป็นพิกัด  $x, y$  บนพื้นที่คอมพิวเตอรืแบบพกพา ดังนั้นก็จะได้ระยะห่างการวางสายอากาศแต่ละต้นหรือค่า  $d$  มาทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของการรับสัญญาณของระบบได้ นำค่า  $d$  มาวิเคราะห์ผลกระทบของสหสัมพันธ์ของสัญญาณดังที่อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 3.2 โดยเริ่มจากสมการที่ 3.10 ทำให้ได้สัญญาณที่มีปัจจัยของระยะการวางตัวของสายอากาศมาเกี่ยวข้อง นำสัญญาณดังกล่าวที่ได้ในสมการที่ 3.13 มาสู่กระบวนการวิเคราะห์เทคนิคอ็ีซีเฟสแบบเฟสไม่รวม แล้วพิจารณาค่า SNR ของสัญญาณที่ได้ทำการสุ่มโดยใช้สมการที่ 2.1 นำค่า SNR ที่ได้มาทำการพล็อตเป็นกราฟ pdf เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับสัญญาณสำหรับการวางสายอากาศด้วยตำแหน่งที่ได้จากการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมและการวางแบบสุ่มในช่องสัญญาณเฟดดิ้งต่อไป

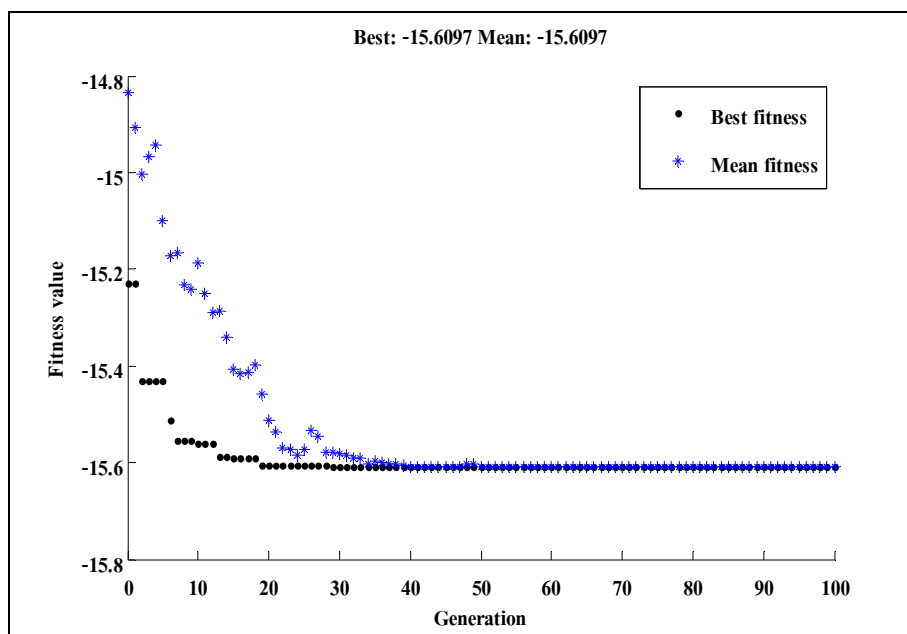


ก. สายอากาศ 3 ต้น

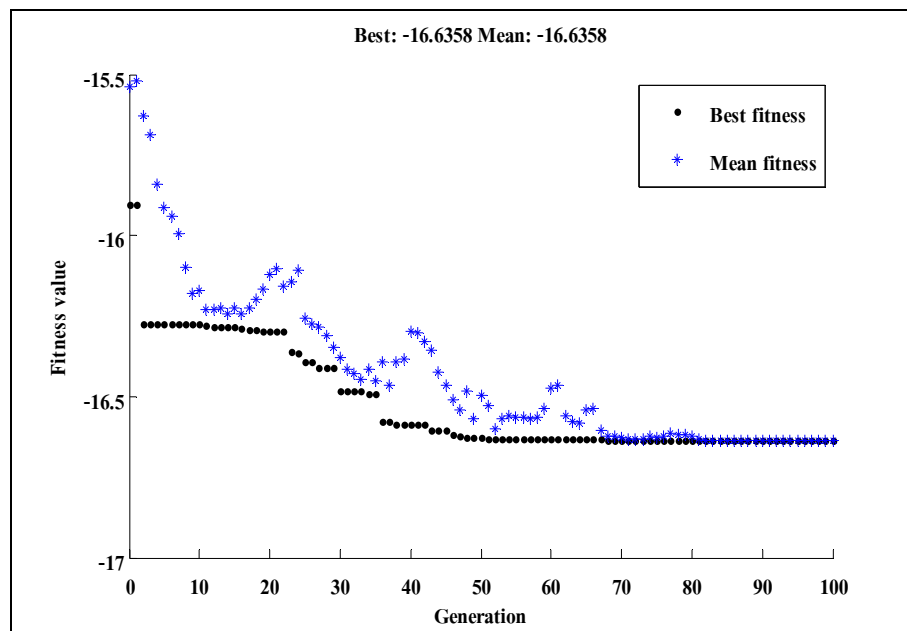


ข. สายอากาศ 4 ต้น

รูปที่ 4.11 ผลของการหาตำแหน่งการวางสายอากาศที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมบนเครื่องมือ optimization toolbox ในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN

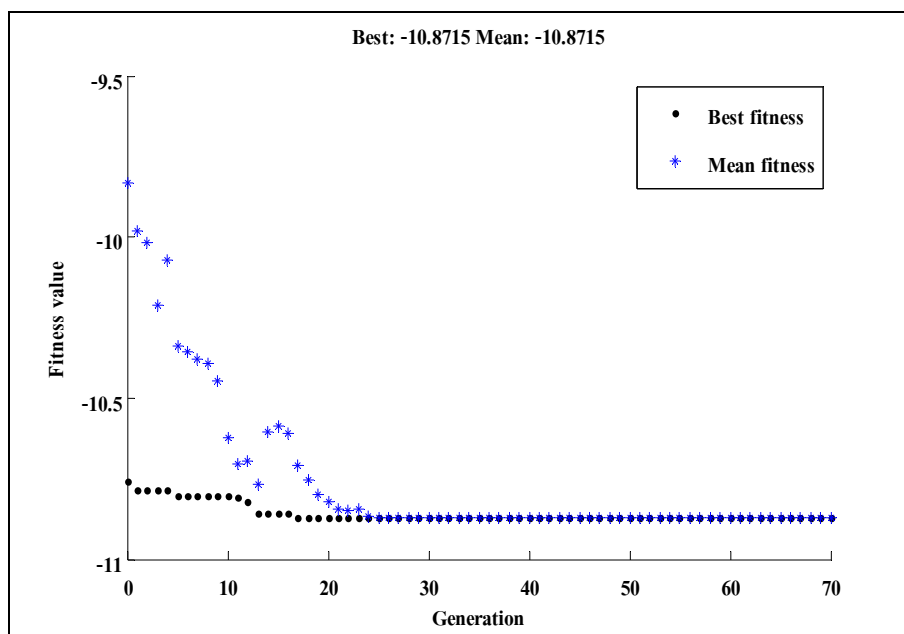


ก. สายอากาศ 5 ต้น

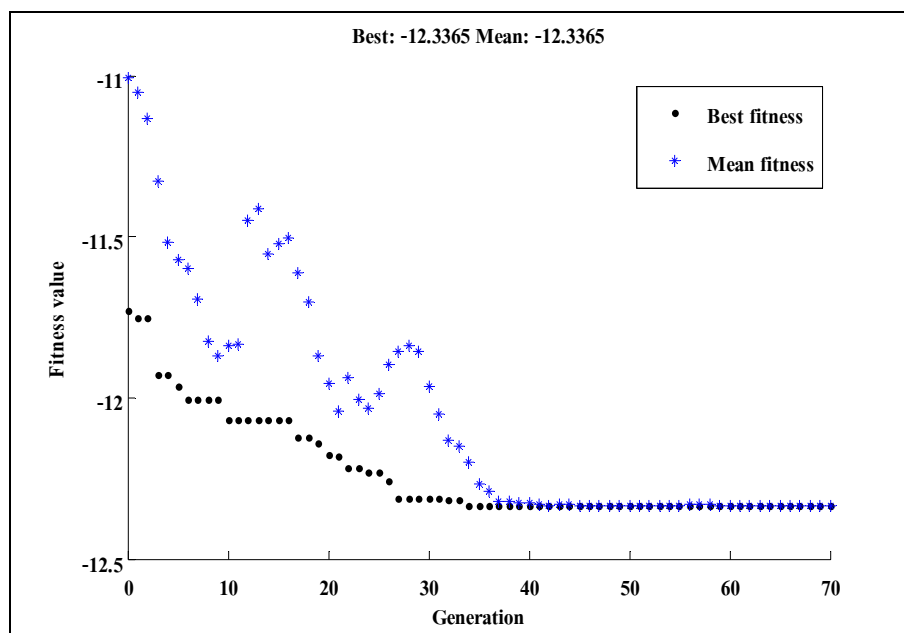


ง. สายอากาศ 6 ต้น

รูปที่ 4.11 ผลของการหาตำแหน่งการวางสายอากาศที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมบนเครื่องมือ optimization toolbox ในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN (ต่อ)

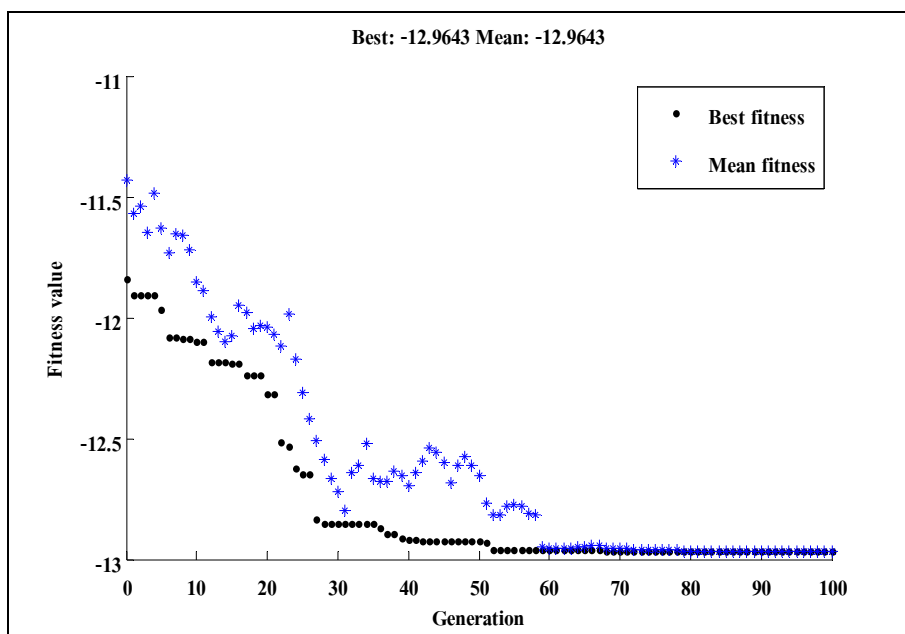


ก. สายอากาศ 3 ต้น

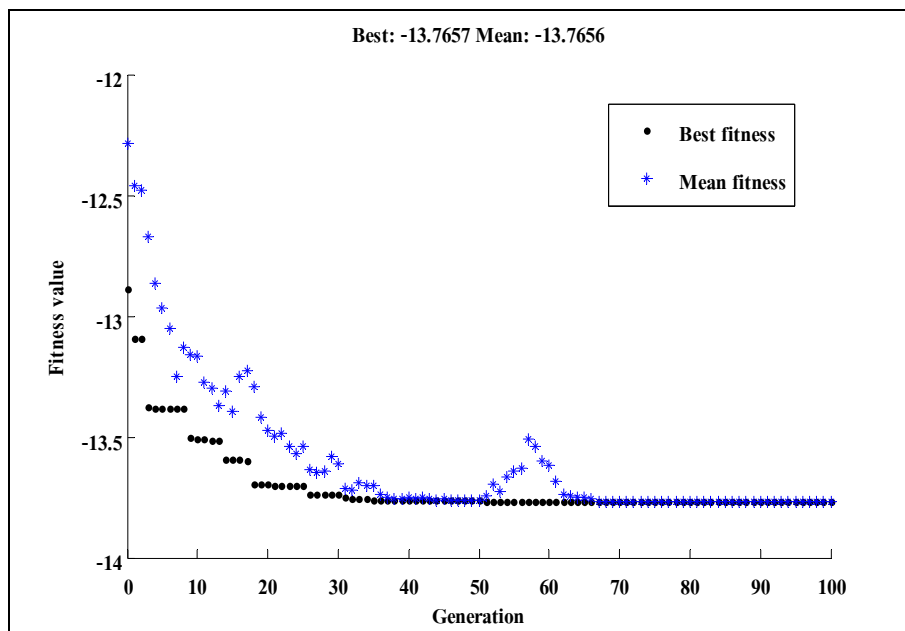


ข. สายอากาศ 4 ต้น

รูปที่ 4.12 ผลของการหาค่าเหมาะที่สุดการวางสายอากาศที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมบนเครื่องมือ optimization toolbox ในห้องสัญญาณเฟดดิ้งแบบวีเซียน



ค. สายอากาศ 5 ต้น



ง. สายอากาศ 6 ต้น

รูปที่ 4.12 ผลของการหาตำแหน่งการวางสายอากาศที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมบนเครื่องมือ optimization toolbox ในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบริเซียน (ต่อ)

จากผลการค้นหาตำแหน่งที่ดีที่สุดในการวางสายอากาศสำหรับพื้นที่คอมพิวเตอร์แบบพกบนเครื่องมือ optimization toolbox แสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 เมื่อพิจารณาช่องสัญญาณเฟดดิ้ง AWGN และริเซียน ตามลำดับ ผลของการค้นหาสามารถแสดงตำแหน่งการวางสายอากาศได้ในระนาบ  $x$   $y$  ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 4.3 4.4 และ 4.5 สำหรับสายอากาศ 3 4 5 และ 6 ตามลำดับ ทั้งช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเซียน อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการยืนยันถึงการวางสายอากาศดังกล่าวว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรับสัญญาณได้ดีขึ้นจริง จึงได้ทำการเปรียบเทียบ pdf ของ SNR ในระบบมีการวางสายอากาศตามตำแหน่งที่ได้จากการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมและจากการสุ่มวางสายอากาศซึ่งสามารถแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 สำหรับการวางสายอากาศแต่ละจำนวนในช่องสัญญาณเฟดดิ้ง

ตารางที่ 4.2 แสดงตำแหน่งการวางสายอากาศจำนวน 3 ต้นจากเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม

| ช่องสัญญาณ<br>เฟดดิ้ง | ตำแหน่งการวางสายอากาศบนพิกัด $x$ $y$ (เซนติเมตร) |           |             |
|-----------------------|--|-----------|-------------|
|                       | 1  | 2         | 3           |
| AWGN                  | (5.6,12.3)                                       | (2,11.7)  | (2.4,14.1)  |
| ริเซียน               | (17.7,13.9)                                      | (15,11.4) | (20.1,16.6) |

ตารางที่ 4.3 แสดงตำแหน่งการวางสายอากาศจำนวน 4 ต้นจากเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม

| ช่องสัญญาณ<br>เฟดดิ้ง | ตำแหน่งการวางสายอากาศบนพิกัด $x$ $y$ (เซนติเมตร) |             |             |            |
|-----------------------|--|-------------|-------------|------------|
|                       | 1  | 2           | 3           | 4          |
| AWGN                  | (13,10.7)  | (16.7,10.4) | (10.1,8.5)  | (12.2,7.1) |
| ริเซียน               | (9.9,15.3)                                       | (11.4,18.5) | (13.5,15.8) | (6.6,13.6) |

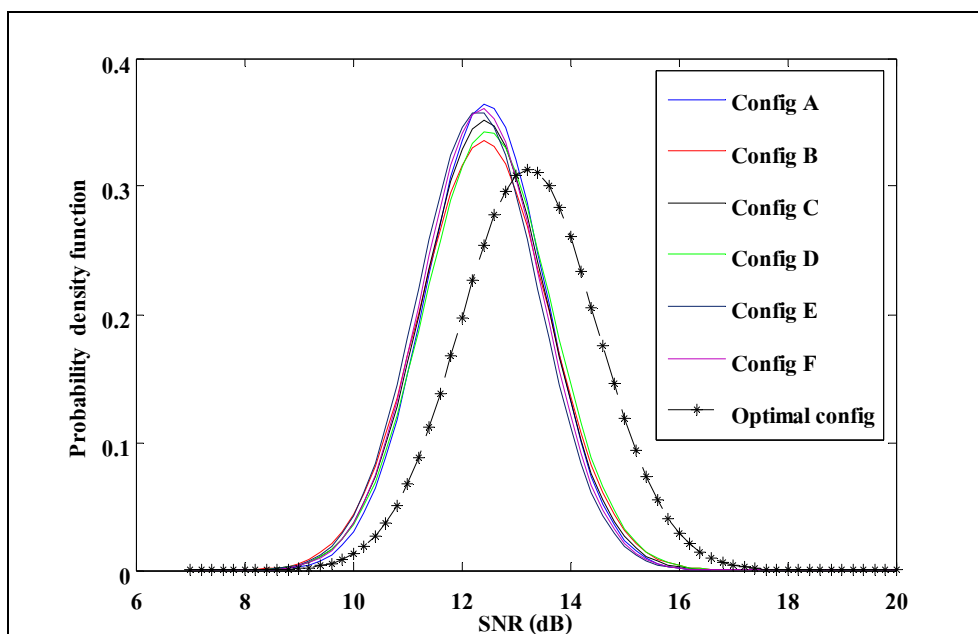
ตารางที่ 4.4 แสดงตำแหน่งการวางสายอากาศจำนวน 5 ต้นจากเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุด  
ด้วยวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม

| ช่องสัญญาณ<br>เฟดดิ้ง | ตำแหน่งการวางสายอากาศบนพิกัด $x$ $y$ (เซนติเมตร) |             |             |             |             |
|-----------------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                       | 1  | 2           | 3           | 4           | 5           |
| AWGN                  | (24.9,5.6)                                       | (28.5,6.7)  | (27,8.6)    | (15.9,0)    | (21.7,3.9)  |
| ริเซชัน               | (22.8,13.2)                                      | (19.7,11.2) | (25.2,10.4) | (23.4,18.8) | (21.5,16.7) |

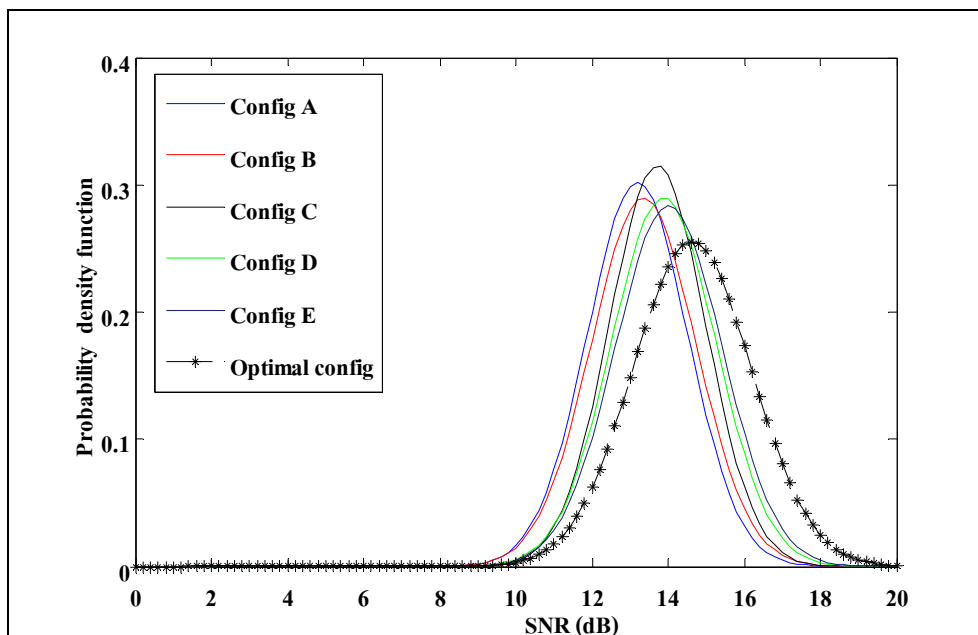
ตารางที่ 4.5 แสดงตำแหน่งการวางสายอากาศจำนวน 6 ต้นจากเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุด  
ด้วยวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม

| ช่องสัญญาณ | ตำแหน่งการวางสายอากาศบนพิกัด $x$ $y$ (เซนติเมตร) |            |            |           |            |            |
|------------|--|------------|------------|-----------|------------|------------|
|            | 1  | 2          | 3          | 4         | 5          | 6          |
| AWGN       | (13,10.7)  | (16.5,1.7) | (11.5,14)  | (14.2,14) | (9.6,12.4) | (9.7,8.7)  |
| ริเซชัน    | (11.5,6)   | (14.9,4.6) | (10.5,9.5) | (8.2,4.4) | (8.6,8.2)  | (15.5,6.2) |



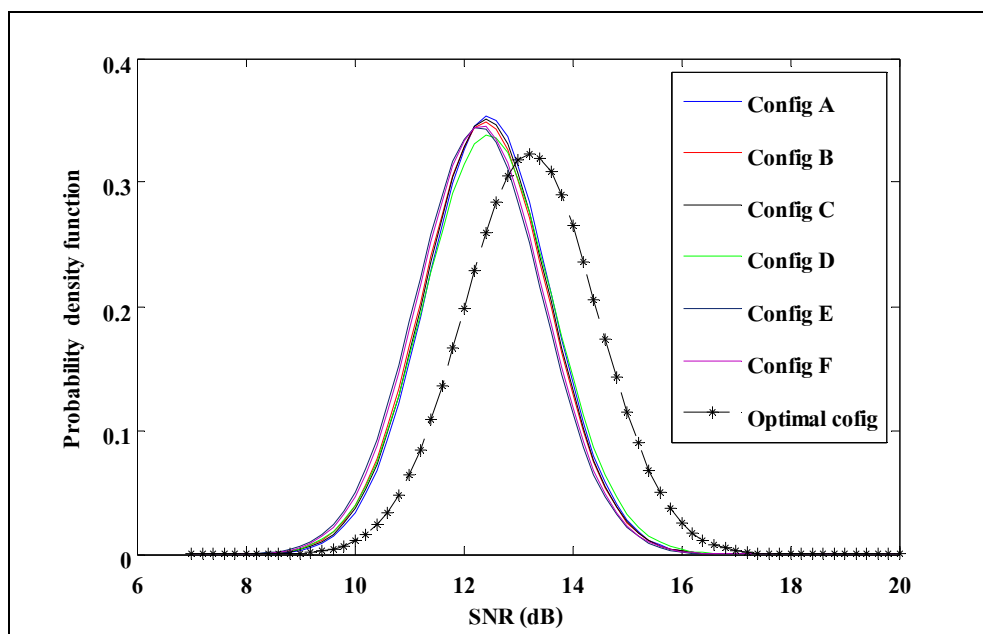


ก. สายอากาศ 3 ต้น

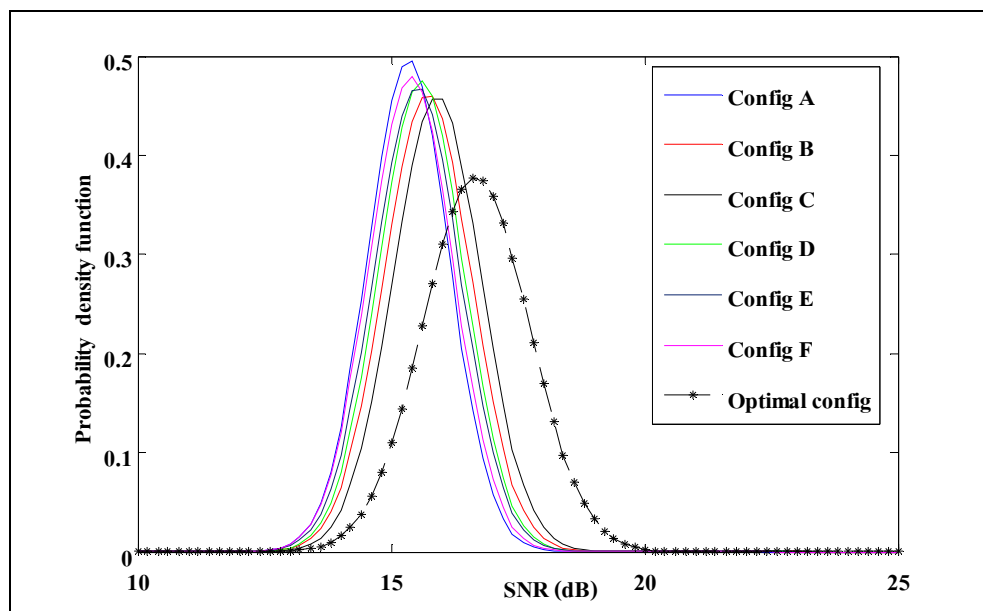


ข. สายอากาศ 4 ต้น

รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบ pdf ของ SNR สำหรับการวางสายอากาศด้วยตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมและการวางแบบสุ่มในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN

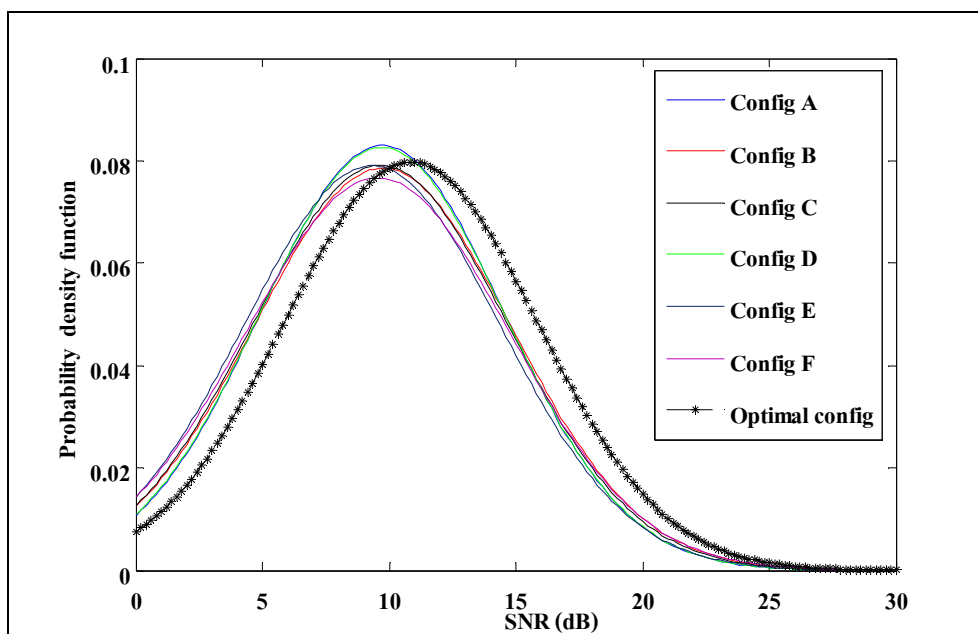


ก. สายอากาศ 5 ต้น

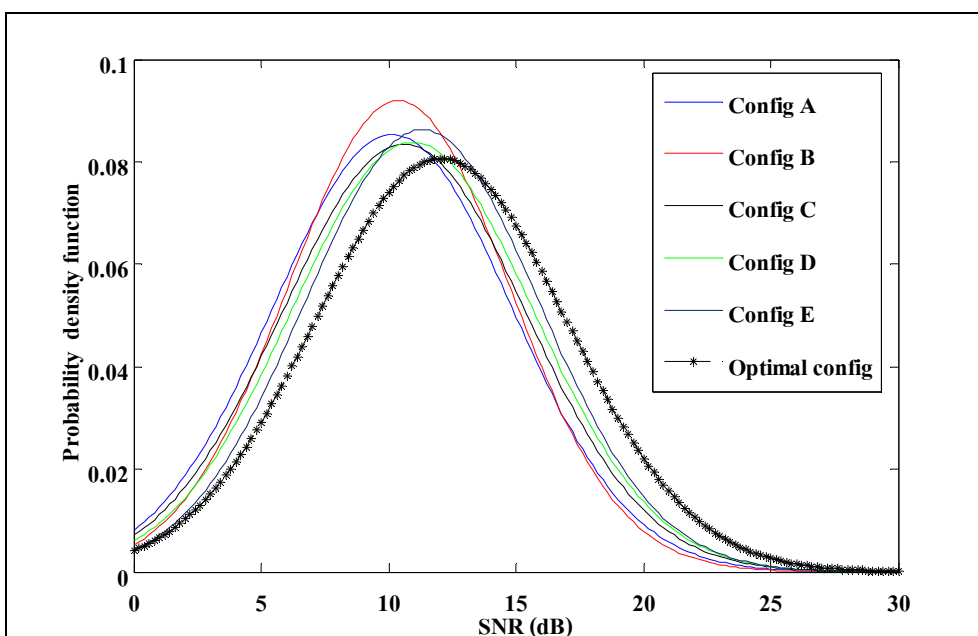


ง. สายอากาศ 6 ต้น

รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบ pdf ของ SNR สำหรับการวางสายอากาศด้วยตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมและการวางแบบสุ่มในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN (ต่อ)

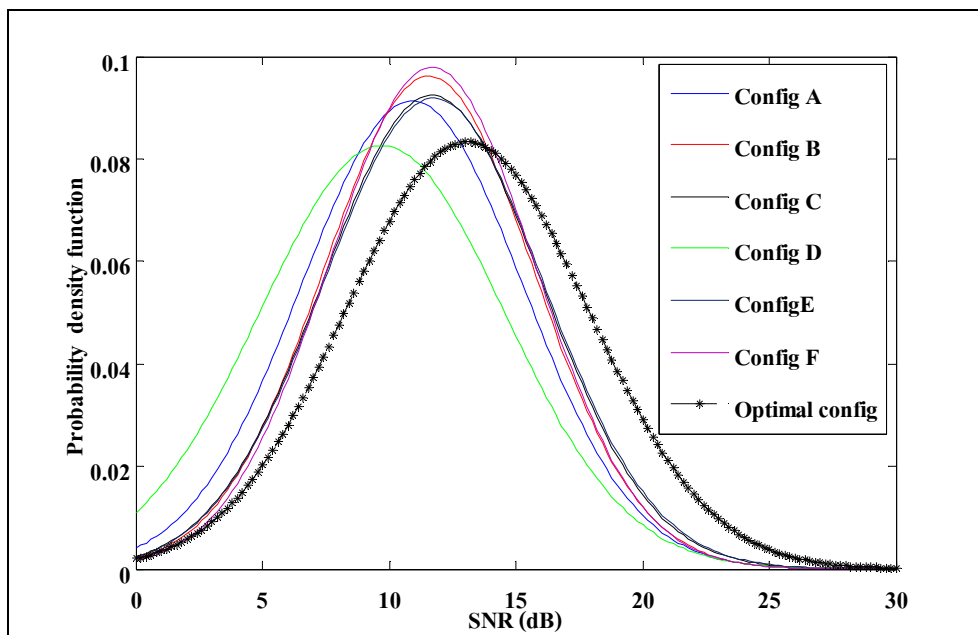


ก. สายอากาศ 3 ต้น

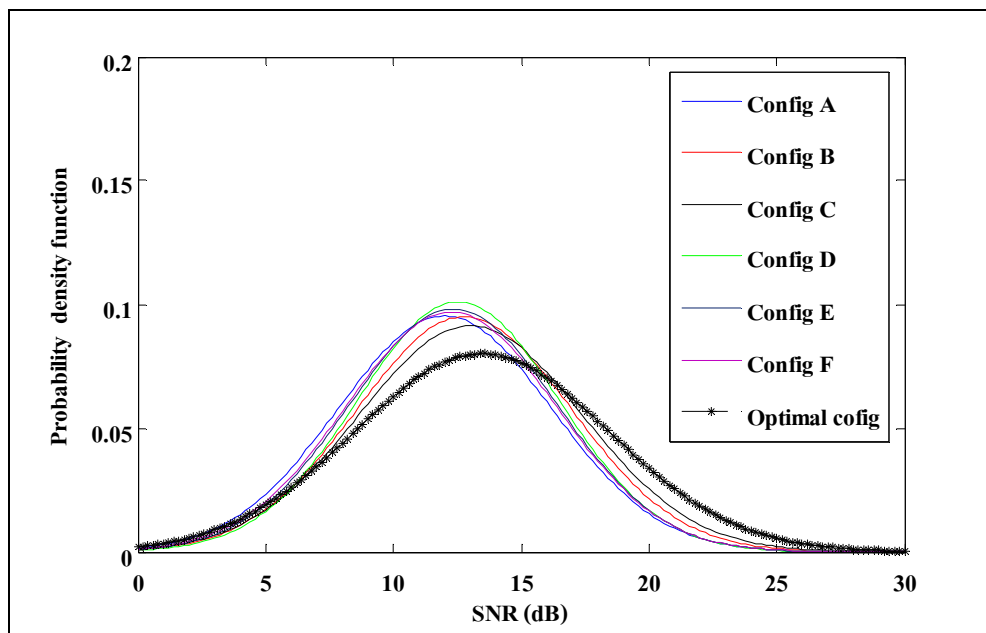


ข. สายอากาศ 4 ต้น

รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบ pdf ของ SNR สำหรับการวางสายอากาศด้วยตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมและการวางแบบสุ่มในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบบริเชียน



ก. สายอากาศ 5 ต้น



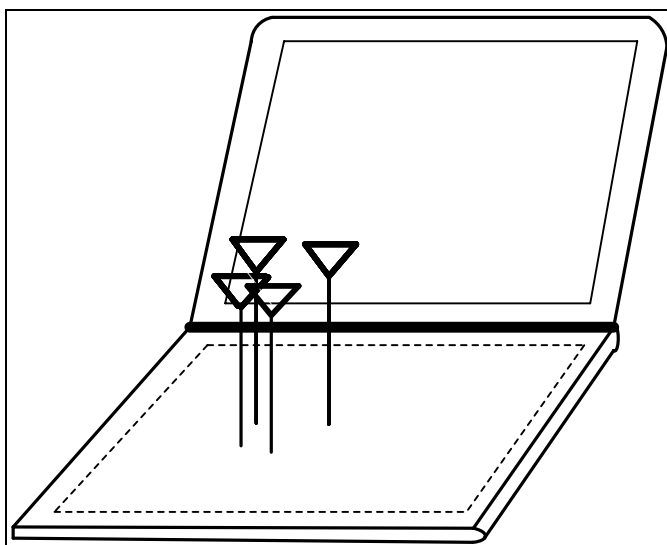
ง. สายอากาศ 6 ต้น

รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบ pdf ของ SNR สำหรับการวางสายอากาศด้วยตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมและการวางแบบสุ่มในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบริเชียน (ต่อ)

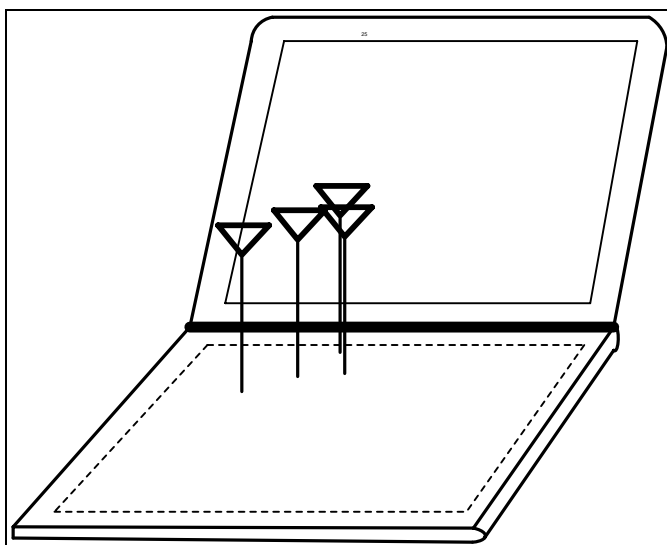
จากผลการจำลองแบบเปรียบเทียบ pdf ของ SNR สำหรับการวางสายอากาศแต่ละแบบที่ได้ทำการสุ่มมา จะเห็นได้ว่าการวางสายอากาศตามตำแหน่งที่ได้จากการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบโคเวอรัลตีแบบอีจีซีเฟสไม่รวมได้อย่างชัดเจน ไม่ว่าจะเป็นสายอากาศกี่ต้นก็ตามในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเชียน โดยตำแหน่งสำหรับการวางสายอากาศบนพื้นที่คอมพิวเตอร์แบบพกพาที่ได้จากการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมทั้ง 2 ช่องสัญญาณเฟดดิ้งนี้ถูกนำไปใช้ในการวัดความแรงของสัญญาณภายใต้สภาพแวดล้อมจริงภายในอาคาร ซึ่งจะแสดงผลในส่วนถัดไป

#### 4.4.2 ผลที่ได้จากการทดลอง

จากผลการจำลองแบบจะได้ตำแหน่งการวางสายอากาศที่แสดงในระนาบ  $x, y$  ของแต่ละช่องสัญญาณเฟดดิ้งดังแสดงในตารางที่ 4.2 4.3 4.4 และ 4.5 ตามลำดับโดยในส่วนของผลจากการทดลองจะนำตำแหน่งดังกล่าวมาทำการวางบนพื้นที่อ้างอิงขนาดคอมพิวเตอร์แบบพกพา ซึ่งทำการเลือกพิจารณาสายอากาศ 4 และ 6 ต้นเท่านั้นและจะใช้การวางด้วยตำแหน่งที่ได้จากการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมทั้งในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเชียน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 สำหรับสายอากาศ 4 ต้นและรูปที่ 4.16 สำหรับสายอากาศ 6 ต้น เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบโคเวอรัลตีแบบอีจีซีเฟสไม่รวมด้วยการวางสายอากาศในตำแหน่งดังกล่าวว่ามีสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการรับสัญญาณได้ดีจริงในสภาพแวดล้อมจริงภายในอาคาร โดยรูปแบบการวัดสัญญาณได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.2 ผลที่ได้จากการทดลองสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

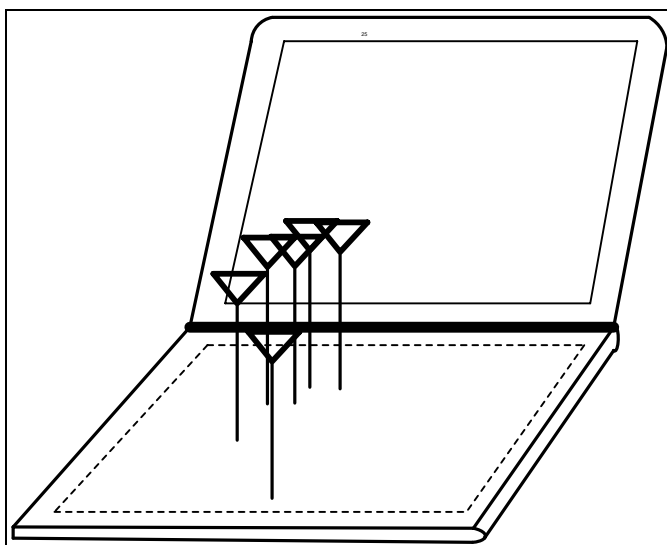


ก. ช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN

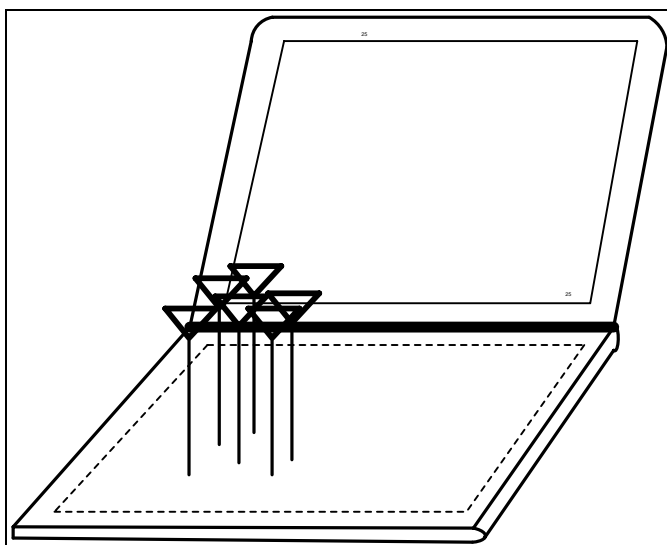


ข. ช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบบริเซียน

รูปที่ 4.15 แสดงการวางสายอากาศจำนวน 4 ต้นบนคอมพิวเตอร์แบบพกพาด้วยตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมและการวางแบบสุ่มในช่องสัญญาณเฟดดิ้ง

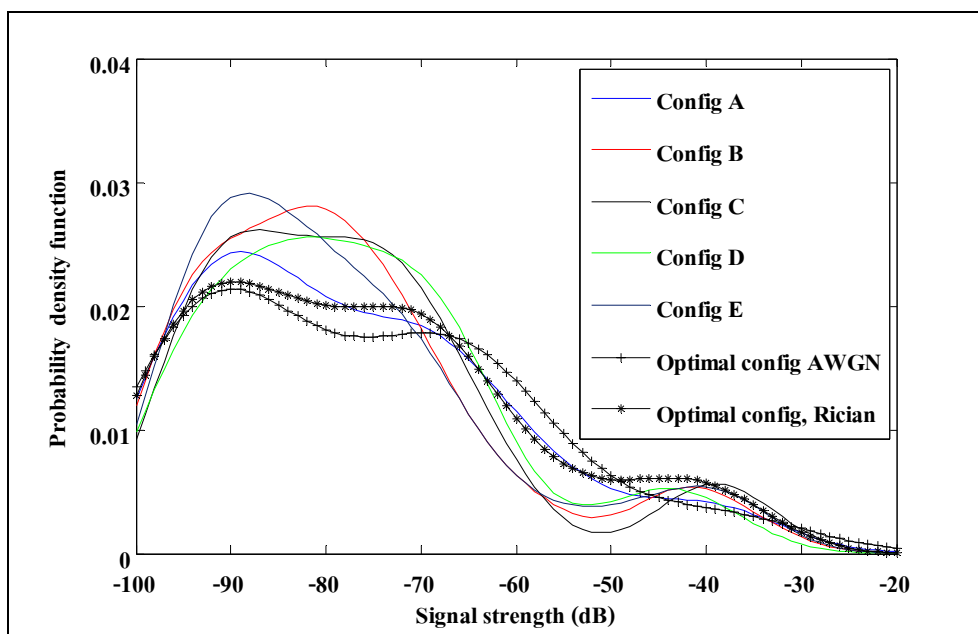


ก. ช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN

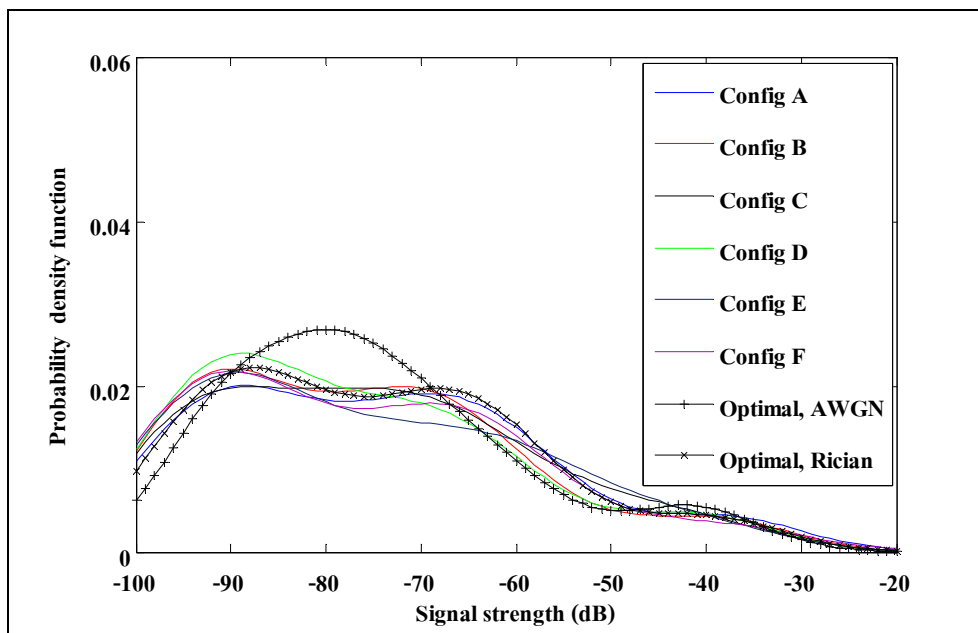


ข. ช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบริเชียน

รูปที่ 4.16 แสดงการวางสายอากาศจำนวน 6 ต้นบนคอมพิวเตอร์แบบพกพาด้วยตำแหน่งที่ได้จากวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึมและการวางแบบสุ่มในช่องสัญญาณเฟดดิ้ง



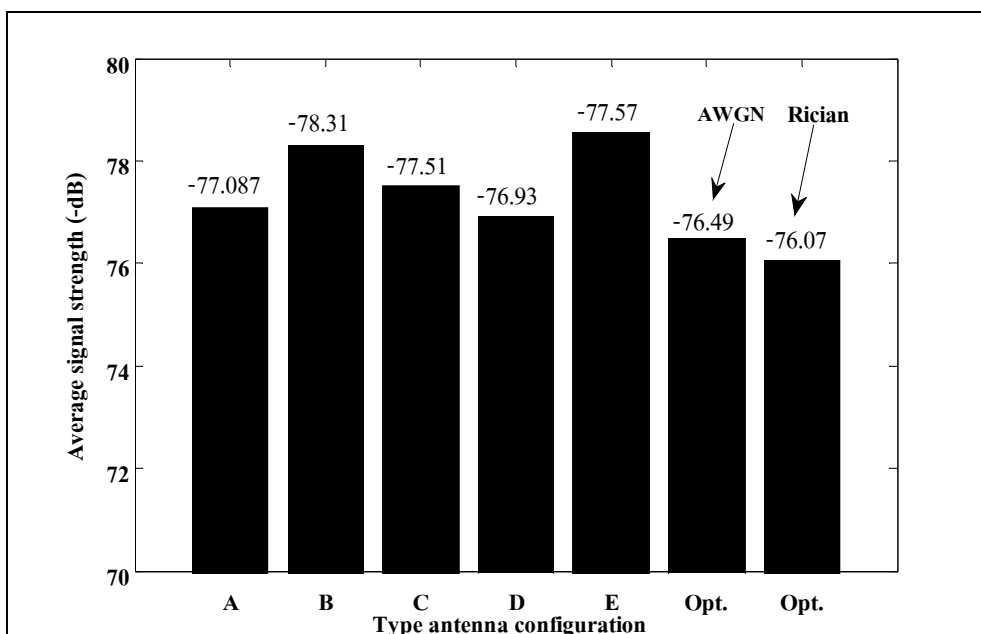
ก. สายอากาศ 4 ต้น



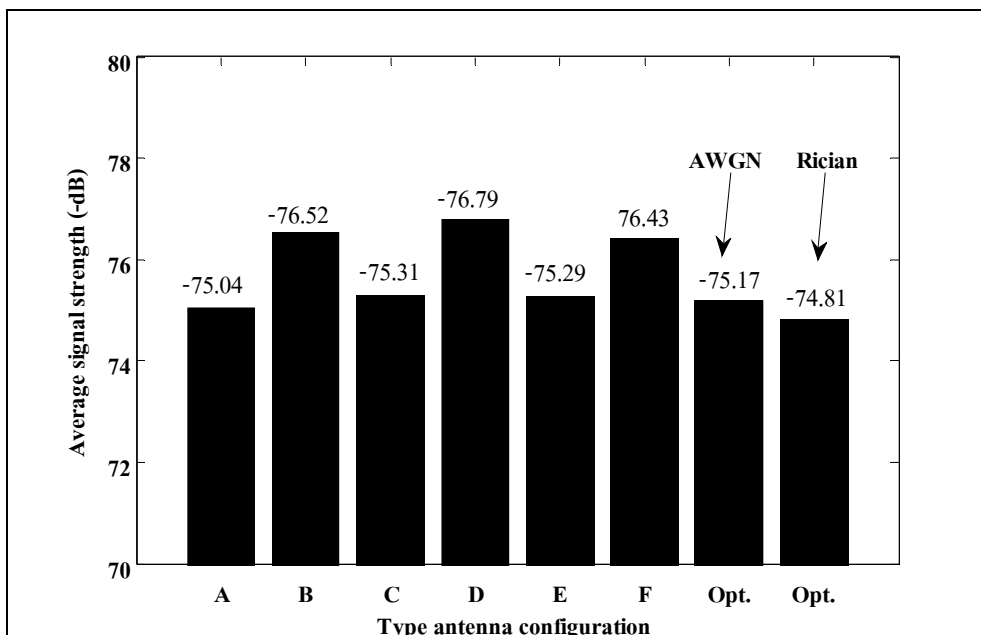
ข. สายอากาศ 6 ต้น

รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบ pdf ของความแรงสำหรับการวางสายอากาศด้วยตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมและการวางแบบสุ่มในการวัดสัญญาณจริง





ก. สายอากาศ 4 ต้น



ข. สายอากาศ 6 ต้น

รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความแรงสำหรับการวางสายอากาศด้วยตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมและการวางแบบสุ่มในการวัดสัญญาณจริง

จากผลที่ได้จากทดลองสามารถแสดงการเปรียบเทียบ pdf ของความแรงสัญญาณที่วัดได้ภายในอาคารดังรูปที่ 4.17 ก. สำหรับการไร้สายอากาศ 4 ต้นและรูปที่ 4.15 ข. สำหรับการไร้สายอากาศ 6 ต้น โดยจะเห็นถึงความแตกต่างของ pdf ที่ไม่เหมือนกับผลจากการจำลองแบบทั้งในช่องสัญญาณเฟดดิ้ง AWGN และริเชียน เนื่องด้วยในสภาพแวดล้อมจริงช่องสัญญาณเฟดดิ้งที่เกิดขึ้นอาจไม่ใช่ช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเชียนก็ได้ เราไม่สามารถคาดเดาได้ว่าจะเกิดช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบใด ซึ่งจากรูปทั้งสองการวางสายอากาศด้วยตำแหน่งที่ได้จากการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมที่เหนือกว่าอย่างชัดเจนเมื่อมาเปรียบค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณดังรูปที่ 4.18 ก. สำหรับการไร้สายอากาศจำนวน 4 ต้นวางด้วยตำแหน่งการวางของทั้งช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และช่องสัญญาณแบบริเชียนที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการวางสายอากาศแบบสุ่ม เมื่อมาพิจารณาค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณเมื่อมีการไร้สายอากาศ 6 ต้นในรูปที่ 4.18 ข. นั้น การวางสายอากาศด้วยตำแหน่งการวางของช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบริเชียนค่าเฉลี่ยความแรงของสัญญาณที่ดีกว่าการวางแบบสุ่มดังเช่นการไร้สายอากาศ 4 ต้น แต่สำหรับการวางสายอากาศด้วยตำแหน่งการวางแบบช่องสัญญาณ AWGN นั้น ค่าเฉลี่ยของความแรงของสัญญาณยังน้อยกว่าการวางสายอากาศแบบสุ่มที่มีการวางแบบเรียงตัวเป็นแนวเส้นตรงอีก ซึ่งก็เป็นผลเนื่องจากการวางสายอากาศด้วยตำแหน่งการวางของช่องสัญญาณเฟดดิ้งที่ได้ทำการวิเคราะห์จากการจำลองแบบสำหรับช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN นั้นการรับส่งสัญญาณจากภาครับไปยังภาคส่งจะมีแค่สัญญาณรบกวนมาเกี่ยวข้องเท่านั้น ไม่ได้พิจารณาผลกระทบของเฟดดิ้ง ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถคาดเดาว่าจะเป็นช่องสัญญาณแบบไหนได้ ดังนั้นการใช้การวางสายอากาศด้วยตำแหน่งการวางแบบช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN จึงให้ประสิทธิภาพของการรับสัญญาณที่ต่ำกว่า

#### 4.5 สรุป

เนื้อหาที่สำคัญของบทนี้ได้กล่าวถึงการใช้เทคนิคอีจีซีแบบเฟสไม่รวมมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการรับสัญญาณในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยการหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการวางสายอากาศบนพื้นที่จำกัดโดยอ้างอิงขนาดของคอมพิวเตอร์แบบพกพาจริงด้วยการใช้เทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึม รวมถึงการออกแบบการทดลองสำหรับการวัดความแรงสัญญาณภายใต้สภาพแวดล้อมจริง จากผลที่ได้จากการค้นหาคำแหน่งการวางสายอากาศเมื่อพิจารณาช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเชียนในการจำลองแบบแล้ว เมื่อนำตำแหน่งดังกล่าวไปเปรียบเทียบ pdf ของ SNR ของระบบกับการวางสายอากาศแบบสุ่มแล้วนั้น การวางสายอากาศด้วยตำแหน่งที่ได้จากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าการวางสายอากาศแบบสุ่มอย่างชัดเจนไม่ว่าจะเป็นการไร้สายอากาศกี่ต้นก็ตาม สำหรับในทางปฏิบัติแล้ว

เราได้ทำการเลือกใช้สายอากาศ 4 และ 6 ดันในการพิจารณา ผลของการใช้สายอากาศ 4 ดันในการวางสายอากาศด้วยตำแหน่งที่ได้จากการค้นหาทั้งการวางแบบพิจารณาช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเชียนให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเช่นเดียวกับการจำลองแบบ แต่เมื่อใช้สายอากาศ 6 ดันจะเห็นได้ถึงผลกระทบของเฟดดิ้งในสภาพแวดล้อมจริงที่ทำให้การใช้การวางสายอากาศแบบพิจารณาช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN นั้นมีประสิทธิภาพที่ด้อยกว่าการวางสายอากาศที่ได้ทำการสุ่มมา ดังนั้นสามารถบอกได้ว่าสำหรับการใช้เทคนิคอีจีซีแบบเฟสไม่ร่วม ผลการจำลองแบบและการทดลองดังกล่าวสามารถเป็นที่ยืนยันว่าการวางสายอากาศด้วยตำแหน่งที่ได้จากการหาคำตอบที่ดีที่สุดจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึม สามารถมาเพิ่มประสิทธิภาพของสัญญาณได้จริงทั้งในการจำลองแบบและทางปฏิบัติ แต่ต้องคำนึงถึงผลกระทบของเฟดดิ้งของระบบด้วย

## บทที่ 5

### สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเพิ่มความแรงสัญญาณในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายด้วยการใช้เทคนิคโคแอดจูชันแบบอีจีซีเฟสไม่ร่วม โดยเทคนิคอีจีซีนี้นั้นมีประสิทธิภาพใกล้เคียงเทคนิคเอ็มอาร์ซีที่มีสมรรถนะดีที่เมื่อเทียบกับเทคนิคการรวมสัญญาณอื่น ๆ ที่สำคัญเทคนิคอีจีซีมีความง่ายและไม่ซับซ้อนในทางปฏิบัติด้วย ซึ่งในเทคนิคการรวมสัญญาณแบบอีจีซีนี้นั้นทั้งในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติก่อนการรวมสัญญาณต้องมีการทำให้สัญญาณแต่ละสัญญาณมีเฟสร่วมกัน ดังนั้นจะเป็นเรื่องที่ดีอย่างมากเมื่อลดปัญหาเกี่ยวกับการทำเฟสร่วมในส่วนของฮาร์ดแวร์ ที่จะทำให้เทคนิคนี้ง่ายขึ้นอีกกว่าเดิม ซึ่งงานวิจัยที่นำเทคนิคอีจีซีไปใช้ส่วนใหญ่จะพิจารณาที่สัญญาณมีเฟสร่วมกันทั้งหมด ไม่มีงานวิจัยใดศึกษากรณีที่สัญญาณมีเฟสไม่ร่วมกันก่อนการรวมสัญญาณเลย งานวิจัยนี้จึงนำเทคนิคการรวมสัญญาณแบบอีจีซีเฟสไม่ร่วมมาเพิ่มประสิทธิภาพการรับสัญญาณในภาครับแทนการใช้เทคนิคอีจีซีเฟสร่วม เพื่อเป็นการยืนยันถึงสมรรถนะของการใช้เทคนิคทั้งสองว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน จึงทำการเริ่มวิเคราะห์สมรรถนะของเทคนิคดังกล่าวทางสมการคณิตศาสตร์ รวมถึงการวิเคราะห์ด้วยการจำลองแบบที่นำเอาผลกระทบของเฟดดิ้งมาเกี่ยวข้องด้วย ที่สำคัญการนำเทคนิคอีจีซีเฟสไม่ร่วมไปใช้จริงในสภาพแวดล้อมจริงภายในอาคารจึงเป็นสิ่งที่เราควรพิจารณาในทางปฏิบัติด้วย

จากผลการวิเคราะห์ทางสมการคณิตศาสตร์ทำให้เห็นถึงสมรรถนะเทคนิคการรวมสัญญาณแบบอีจีซีเฟสร่วมและเฟสไม่ร่วมที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันอย่างเห็นได้ชัด เมื่อมาพิจารณาผลของการวิเคราะห์จากการจำลองแบบ ผลกระทบของเฟดดิ้งต่อการใช้เทคนิคอีจีซีมีผลต่อสมรรถนะของระบบ โดยในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN สมรรถนะของเทคนิคทั้งสองเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วมีความใกล้เคียงกันดังเช่นการวิเคราะห์ทางสมการคณิตศาสตร์ แต่เมื่อมาพิจารณาในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบริเชียนแล้ว สมรรถนะของการใช้เทคนิคอีจีซีกรณีที่เฟสไม่ร่วมนั้นดูดีกว่ากรณีที่เฟสร่วมอย่างชัดเจน แต่สมรรถนะที่ต่ำกว่าก็ถือว่ายอมรับได้เมื่อแลกกับความง่ายและไม่ยุ่งยากในส่วนของฮาร์ดแวร์ในทางปฏิบัติ ผลจากการวิเคราะห์ทางสมการคณิตศาสตร์และจากการจำลองแบบทำให้ทราบว่า การใช้เทคนิคอีจีซีแบบเฟสไม่ร่วมนั้น เฟดดิ้งมีผลกระทบต่อสมรรถนะการใช้เทคนิคนี้ แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเราไม่สามารถคาดเดาว่าสัญญาณจะมีเฟดดิ้ง

แบบใด ผลที่ได้จากการวัดความแรงสัญญาณภายในอาคารด้วยการใช้เทคนิคอีจีซีเฟสไม่รวม โดยการวางสายอากาศเป็นแนวเส้นตรงบนพื้นที่จำกัดและทำการเพิ่มจำนวนสายอากาศขึ้นจนถึง 8 ต้น ทำให้ทราบว่า การใช้สายอากาศจำนวน 2 ต้นก็เพียงพอสำหรับเทคนิคนี้ ซึ่งจากผลวัดการเพิ่มจำนวนสายอากาศจาก 2 ต้นจนถึง 8 ต้นประสิทธิภาพการรับสัญญาณของระบบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งในทางปฏิบัติจะทำให้เกิดความไม่คุ้มค่าและสิ้นเปลืองในส่วนของฮาร์ดแวร์ด้วย เมื่อเทียบกับกรณีการเพิ่มสายอากาศจาก 1 เป็น 2 ต้นที่มีการเพิ่มประสิทธิภาพของการรับสัญญาณที่มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน

นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้นำเทคนิคอีจีซีแบบเฟสไม่รวมไปทำการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของสหสัมพันธ์สัญญาณเมื่อมีปัจจัยของระยะการวางตัวสายอากาศมาเกี่ยวข้องบนพื้นที่จำกัด ซึ่งสำหรับการวางสายอากาศที่ได้ทำการวิเคราะห์จะวางตัวเป็นแนวเส้นตรงจากผลการวิเคราะห์จากการจำลองแบบเมื่อพิจารณาในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเชียน เมื่อได้เปรียบเทียบการไม่มีพิจารณาสหสัมพันธ์และพิจารณาสหสัมพันธ์ในช่องสัญญาณทั้งสองนี้ จากการใช้เทคนิคนี้เมื่อมีการพิจารณาสหสัมพันธ์ส่งผลให้สมรรถนะของระบบมีประสิทธิภาพดีขึ้นตามจำนวนสายอากาศที่เพิ่มตามขึ้นด้วย โดยทั่วไประยะการวางของสายอากาศจะแปรผกผันกับสหสัมพันธ์ของสัญญาณ ระยะห่างที่มากขึ้นจะส่งผลให้ความเป็นสหสัมพันธ์น้อยลง ดังนั้นสำหรับโดเวอร์ซิตีทางสายอากาศจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องวางสายอากาศระยะที่เหมาะสมเพื่อให้ประสิทธิภาพของการรับสัญญาณที่ดีขึ้น การหาตำแหน่งของการวางสายอากาศบนพื้นที่จำกัดโดยอ้างอิงขนาดคอมพิวเตอร์แบบพกพาจึงเป็นสิ่งที่จะพิจารณาเมื่อมีการใช้เทคนิคอีจีซีแบบเฟสไม่รวม

ในงานวิจัยนี้จึงการนำเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดมาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งสำหรับการวางสายอากาศ โดยเลือกเทคนิคจินเนติกอัลกอริทึมซึ่งมีการค้นหาคำตอบที่ประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับแม่เหล็กไฟฟ้าและการออกแบบสายอากาศในงานวิจัยต่าง ๆ และสำคัญการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ยังมีหน้าตาเครื่องมือที่พร้อมใช้งานในโปรแกรมแมทแลบที่เรียกว่า optimization toolbox ซึ่งสามารถใช้งานได้ง่าย มีแม่นยำและความถูกต้องของคำตอบ จากผลการวางสายอากาศด้วยตำแหน่งที่ได้ทำการค้นหาด้วยเทคนิคดังกล่าว เมื่อมาเปรียบเทียบกับ การวางสายอากาศที่ได้ทำการสุ่มการวางแล้ว ประสิทธิภาพของการรับสัญญาณที่ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัดจากการจำลองแบบในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเชียน โดยสอดคล้องกันกับทางปฏิบัติที่ได้เลือกการใช้สายอากาศ 4 และ 6 ต้นวางตำแหน่งที่ได้จากเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ในการจำลองแบบทั้งการวางที่พิจารณาช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ AWGN และริเชียน ซึ่งให้ประสิทธิภาพของการรับสัญญาณที่ดีขึ้นจริงสำหรับการใช้สายอากาศ 4 ต้น แต่สำหรับการใช้สายอากาศ 6 ต้นนั้นการวางสายอากาศที่พิจารณาในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบริเชียนให้

ประสิทธิภาพการรับสัญญาณที่ต่ำกว่าการวางสายอากาศแบบสุ่ม ซึ่งเป็นการวางแบบเรียงตัวกันเป็นแนวเส้นตรง โดยในทางปฏิบัติเราไม่สามารถคาดเดาว่าเกิดเฟดดิ้งแบบใด ผลที่ได้บ่งบอกถึงการหาตำแหน่งการวางสายอากาศที่เหมาะสมควรคำนึงถึงผลกระทบของเฟดดิ้งที่เกิดขึ้นสำหรับการใช้เทคนิคอีจีซีแบบเฟสไม่ร่วมด้วย

จากผลทั้งหมดที่ได้กล่าวมานี้ เราสามารถสรุปได้ว่าการใช้เทคนิคอีจีซีแบบเฟสไม่ร่วมในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายสามารถเพิ่มความแรงของสัญญาณได้จริง แม้ประสิทธิภาพของเทคนิคนี้จะไม่เทียบเท่าการใช้เทคนิคอีจีซีแบบเฟสร่วมก็ตาม แต่สิ่งที่เหนือกว่าคือความง่ายและไม่ซับซ้อนในส่วนของฮาร์ดแวร์ในทางปฏิบัติ นอกจากนี้การวางสายอากาศบนพื้นที่จำกัดสำหรับการใช้เทคนิคนี้เป็นสิ่งที่ควรคำนึงอย่างยิ่ง การหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการวางบนเครื่องรับสัญญาณปลายทางจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการรับสัญญาณของระบบดีขึ้นด้วย ในเบื้องต้นงานวิจัยนี้ได้ทำการหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการวางสายอากาศบนพื้นที่คอมพิวเตอร์แบบพกพาสำหรับการใช้สายอากาศแต่ละจำนวนแล้ว ซึ่งก็จะเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติเพื่อเพิ่มสมรรถนะของการรับสัญญาณในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการวัดความแรงของสัญญาณภายในอาคารสำหรับงานวิจัยนี้ ค่าความแรงของสัญญาณที่แสดงบนหน้าจอโปรแกรม Wireless Mon ไม่นิ่งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ทำให้ยากต่อการอ่านค่านั้น ซึ่งสาเหตุก็อาจเป็นเพราะการเปลี่ยนจุดการวัดที่ต้องรอให้ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้คงที่ก่อน รวมถึงประสิทธิภาพของโปรแกรม Wireless Mon ที่ไม่สามารถแสดงค่าของความแรงสัญญาณที่คงที่ได้ เนื่องจากโปรแกรมนี้เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถดาวน์โหลดได้ทั่วไปในอินเทอร์เน็ต โดยไม่มีลิขสิทธิ์ จึงมีข้อจำกัดของการใช้งานแต่ก็ถือว่ายอมรับได้ในส่วนหนึ่ง อย่างไรก็ตามสาเหตุดังกล่าวไม่ใช่ปัญหาที่ยากจะแก้ไขและจะส่งผลต่อความผิดพลาดของผลการวัดสำหรับงานวิจัยนี้ ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนจุดการวัดในแต่ละจุดต้องรอให้โปรแกรมแสดงค่าความแรงสัญญาณคงที่ก่อนจึงจะทำการบันทึกผล การเพิ่มจำนวนครั้งของการวัดที่มากขึ้นจะทำให้ได้ค่าแน่นอนมากขึ้นด้วย

## 5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเพิ่มความแรงสัญญาณในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายด้วยการใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีแบบอีจีซีเฟสไม่ร่วม ซึ่งส่วนหนึ่งได้ทำการหาตำแหน่งการวางสายอากาศที่เหมาะสมบนพื้นที่จำกัดโดยอ้างอิงขนาดคอมพิวเตอร์แบบพกพา สำหรับสายอากาศที่ได้เลือกใช้พิจารณาเบื้องต้นได้ใช้สายอากาศโมโนโพล ซึ่งคอมพิวเตอร์แบบพกพาไม่ได้ใช้สายอากาศชนิดนี้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นสำหรับงานวิจัยอนาคตจึงควรมีการใช้สายอากาศชนิดที่ใช้ในคอมพิวเตอร์แบบ

พทพจจริง เช่น สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna) พิจารณาสำหรับการใช้เทคนิคอีจีซีแบบเฟสไม่ร่วม รวมถึงการหาตำแหน่งการวางสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการวางสายอากาศชนิดดังกล่าวด้วยการใช้หลักและกระบวนการวิเคราะห์เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ ซึ่งจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรับสัญญาณในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้ในอนาคต

## รายการอ้างอิง

- Bajwa, A., Williams, T., and Stuchly, M. A. (2001). **Design of Broadband Radar absorbers of Genetic Algorithm**. International Symposium of Antennas and Propagations Society. Vol. 4: 672–675.
- Brennan, D. G. (1959). **Linear Diversity Combining**. In Proc. IRE. Vol. 47: 1075–1102.
- Clarke, R. H. (1968). **A Statistical Theory of Mobile Radio Reception**. Bell System Technical Journal. Vol. 47, No. 6: 957-1000.
- Coleman, T., Branch, M. A., Grace, A. (1999). **Optimization Toolbox User Guide**. USA: The Mathworks. Inc., MA.
- Dietze, K., Dietrich, C. B., and Stutzman, W. L. (2001). **Analysis of a Two Branch Maximal Ratio and Selection Diversity System with Unequal SNRs and Correlated Inputs for a Rayleigh Fading Channel**. IEEE Transactions on Wireless Communications: 274-281.
- Douglas, M. G, Okoniewski, M., and Stuchly, M. A. (1998). **A planar diversity antenna for handheld PCS devices**. IEEE Trans. On Vehicular Technology. Vol. 47: 447–454.
- Halpern, S. W. (1974). **The theory of operation of an equal-gain predetection regenerative diversity combiner with Rayleigh fading channels**. IEEE Trans. Commun: 1099-1106.
- Haupt, R. L. (1994). **Thinned arrays using genetic algorithms**. IEEE Transactions on Antenna and Propagation. Vol. 42, No. 7: 993-999.
- Holland, H. (1975). **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. Ann Arbor: The University of Michigan Press.
- Lee, W. C. Y., (1973). **Effects on Correlation between two Mobile Radio Base Station Antennas**. IEEE Transactions on Communications: 1214-1224.
- Lee, W. C. Y. (1982). **Mobile Communications Engineering**. New York: McGraw-Hill.
- Lefevre, M., Jensen, M. A., and Rice, M. D. (1989). **Indoor measurement of handset dual antenna diversity performance**. VTC 89: 1763-1767.
- Man, K F., Tang, K. S., Kwong, S., and Halang, W. A. (1997). **Genetic Algorithms for Control and Signal Processing**. London: Springer-Verlag.



- Marcano, J. D., and Duran, D. (2000). **Synthesis of Antenna arrays using genetic algorithms**. IEEE Antenna and Propagation Magazine. Vol. 42, No. 3.
- Misra, I. S., Chakrobarty, R. S., and Mangaraj, B. B. (2006). **Design analysis and optimization of V Dipole and its three element Yagi-Uda array**. Progress in Electromagnetic Research: 137-156.
- Ngamjaroen, T., Uthansakul, M., and Uthansakul, P., (2009). **Performance of EGC diversity technique with multiple antennas on limited space**. ISAP 2009: 61–64.
- Pierce, J. N., and Stien, S. (1960). **Multiple Diversity with Non-Independent Fading**. In Proc. IRE: 89-104.
- Richard, B. E., Jeffrey, H. R. (1998). **Generation of Two Equal Power Correlated Rayleigh Fading Envelopes**. IEEE Communication. Vol. 2, No. 10: 276–278.
- Samii, Y. R., and Michielssen, E. (1999). **Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithm**. USA: John Wiley and Sons.
- Schwartz, M., Bennett, W. R., and Stein, S. (1974). **Communications Systems and Techniques**. New York: McGraw-Hill.
- Shiu, D. S., Foschini, G. J., Gans, M. J., and Kahn, J. M. (2000). **Fading Correlation and its Effects on the Capacity of Multielement Antenna Systems**. IEEE Transactions on Communications: 502-512.
- Srikaew, A. (2002). **Genetic Algorithm—Part I**. Suranaree J. Sci. Technol: 69-83.
- Stuber, G. L. (1996). **Principles of Mobile Communication**. Kluwer: Academic Publishers.
- Süli, E., and Mayers, D. (2003). **An Introduction to Numerical Analysis**. Cambridge: Cambridge University Press.
- Teal, P. D., Abhayapala, T. D., and Kennedy, R. A. (2002). **Spatial Correlation for General Distributions of Scatterers**. IEEE Signal Processing Letters: 305-308.
- Tsunekawa, K. (1989). **Diversity antennas for portable telephones**. VTC 89: 50-56.
- Visioli, A. (2001). **Optimal Tuning of PID Controllers for Integral and Unstable Processes**. IEEE Proceedings of Control Theory and Applications: 180–184.
- Win, M. Z., and Winters, J. H. (1977). **The effect of having unequal branch gains in practical predetection diversity systems for mobile radio**. IEEE Trans. On Vehicula Technology Vol. VT-26, No. 1: 94-105.

- Winter, J., Salz, J., and Gitlin, R. D. (1994). **The Impact of Antenna Diversity on the Capacity of Wireless Communication Systems**. IEEE Transactions on Communications: 1740-1751.
- Yacoub, M. (1993). **Foundations of Mobile Radio Engineering**. Boca Raton: CRC Press.
- Zeidler, J. R., and McLaughlin, S. (2001). **Performance Analysis of Compact Antenna Arrays with MRC in Correlated Nakagami Fading Channel**. IEEE Transactions on Vehicular Technology: 267-277.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Ngamjaroen, T., Uthansakul, M., and Uthansakul, P. (2009). **Performance of EGC diversity technique with multiple antennas on limited space**. International Symposium on Antennas and Propagations. Bangkok, Thailand.

Ngamjaroen, T., Uthansakul, M., and Uthansakul, P. (2010). **Antenna Configuration Effect on EGC Diversity Performance in WLAN systems**. Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. Chiangmai, Thailand.

## **Performance of EGC Diversity Technique with Multiple Antennas on Limited Space**

<sup>#</sup>Tanongsak Ngamjaroen<sup>1</sup>, Monthippa Uthansakul<sup>2</sup> and Peerapong Uthansakul<sup>3</sup>  
School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology  
Nakhon Ratchasima Thailand 30000,

<sup>1</sup>t.ngamjaroen@hotmail.com, <sup>2</sup>mtp@sut.ac.th and <sup>3</sup>uthansakul@sut.ac.th

### **1. Abstract**

In this paper, Equal Gain Combining (EGC) technique is considered because it provides performance comparable to the optimal Maximal ratio combining (MRC) technique but with greater simplicity. Although, performance evaluation of EGC diversity is a much more difficult task in comparison with other classical techniques but it has been presented several times in literature. However, the problem concerning multiple antennas on limited space has never been presented. This is because the correlation between multiple antennas can be neglected if the antenna spacing is large enough. In practice, the dimension of user terminal is fixed with the trend of small in size. Therefore, it is impossible to avoid the effect of antenna correlation due to limited space. In this paper, the performance investigation of EGC diversity technique is presented by considering the problem of multiple antennas on limited space. The simulation results reveal the significant differences observed if neglecting the antenna correlation.

### **2. Introduction**

Space diversity with multiple antennas is a well known technique to improve performance in fading channel for wireless systems. This technique includes maximal ratio combining (MRC), equal gain combining (EGC), and selection diversity [1]. The EGC receiver is generally known to have a performance close to a MRC receiver while at the same time being less complex from the implementation point of view. Hence, the performance analysis of this receiver is of interest.

In literature on EGC performance, there is surprisingly limited works in comparing with popular diversity combining methods. Most of them evaluate the EGC performance with the assumption of neglecting the antenna correlation. However, this assumption cannot be accepted in practice because the size of user terminal is so small that multiple antennas on this limited space are unavoidably correlated. The literature on correlated diversity branches is quite a few and all of them studied on dual antenna diversity. In [2], the problem of correlated fading for a two branch selection combining scheme was considered. Amongst the initial works of gain combining schemes, Pierce and Stein [3] studied the performance of MRC and EGC in a correlated Rayleigh fading channel and showed that an increase in correlation had adverse effects on the system performance. In [4-6], practical implementations of spatial diversity at the mobile handsets are usually restricted to second order diversity with closely spaced antennas that result in correlation between the diversity branches. As explained in [7], the correlation between the branch envelopes in spatial diversity systems is a function of the spacing between the antennas. The general trend is that correlation decreases with increasing antenna spacing. The authors in [8] consider a procedure for generating two equal power Rayleigh-fading envelopes with any desired cross-correlation coefficient. These works in literature have been useful in analyze of the correlated signals to ground the basis formula in this paper. However, the problem of multiple antennas on limited space has never been addressed before. In this paper, the EGC performance is investigated by changing the number of antennas on a limited space. Both uncorrelated and correlated signals for EGC diversity with multiple branches in presence of Rayleigh fading and AWGN fading are considered.

### 3. EGC diversity and antenna correlation

#### 3.1 EGC model

EGC techniques are known to combine the signals from multiple diversity branches. The signal output of the combiner is the direct sum of the received signals, which co-phase the signals on each branch and then combines them with equal weighting  $g_k$  in each branch of receivers. The signal plus noise in each branch is then multiplied by a voltage gain factor  $g_k$  and then added in a linear combiner which is subsequently demodulated through receiver. Thus the predetection diversity signal output equal gain system can be written as

$$\mathbf{r}(t) = \sum_{k=1}^M g_k \{r_k(t) + n_k(t)\}, \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

Where  $g_k = e^{-j\phi_k}$

The EGC receiver performance is superior to other diversity performance and only marginally inferior compared to MRC. EGC is often used in practice because of its reduced complexity relative to the optimum MRC scheme.

#### 3.2 Antenna correlation on limited space

Figure 1 shows the multiple antennas on limited space. The linear array with  $M$  antenna elements is configured on a fixed length  $D$ .

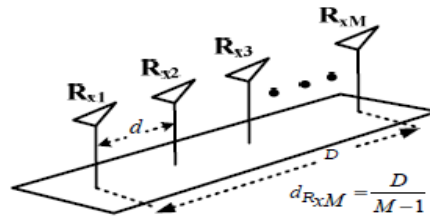


Figure 1: Configuration of multiple antennas

The relation between power correlation coefficient  $\rho$  and antenna separation  $d$  derived by Clarke [9] can be expressed by

$$\rho = J_0^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \quad (2)$$

Where  $J_0(\cdot)$  is the zero order Bessel function of first kind, and  $\lambda$  is the carrier wavelength. This relationship is used to determine the correlation properties of the signal on each branch which is expressed as

$$p_n(\gamma) - \rho = 0 \quad (3)$$

Where  $p_n(\gamma)$  is the least squares  $n$  degree polynomial given in [8]. The parameter  $\gamma$  has been useful in analyze of the correlation signals. In [9], the authors found the special case of the correlation matrix given by

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \gamma \sigma_x (1+j) & \sigma_x \sqrt{1-\gamma^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Where  $\sigma_x$  is an absolute desired signal power. Now, the correlated signals between two branches can be easily generated. Figure 2 shows the uncorrelated and correlated signals in a Rayleigh fading channel. For the correlated signals, the power correlation coefficient is 0.9. Figure 2(a) and 2(b) present the uncorrelated and correlated signals for two branches while Figure 2(c) and 2(d) present for four branches. It is clearly noticed the difference between correlated and uncorrelated signals.

*The 2009 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2009)  
October 20-23, 2009, Bangkok, THAILAND*

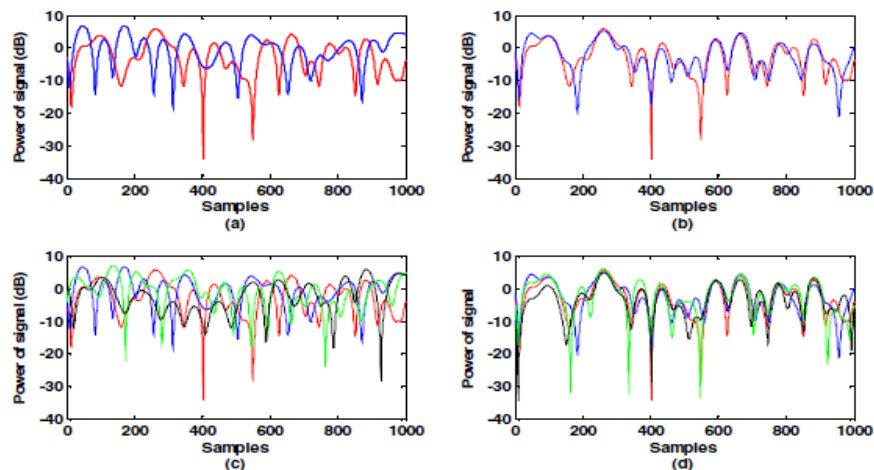


Figure 2: The uncorrelated and correlated signals in a Rayleigh fading channel, (a) two uncorrelated signals, (b) two correlated signals, (c) four uncorrelated signals and (d) four correlated signals.

For the problem on limited space, the total length  $D$  is a fixed distance and the correlation coefficient is changed by number of antennas with an equal spacing.

#### 4. Simulation Results

For sake of saving space in the paper, only output SNR performance of EGC diversity technique is presented here. This is because BER performance is simply predicted as a direct proportional function of SNR. The comparison between probability density function of the uncorrelated and correlated signals is provided. For all simulations, the limited distance  $D$  is set to 30 cm as the average length of notebook.

Figure 3 shows the output SNR of EGC diversity technique as a function of number of antennas in Rayleigh and AWGN fading channels. The results show that the increase of output SNR depends on the number of antennas. The significant differences between uncorrelated and correlated signals are noticed in AWGN fading but this finding is not pronounced for Rayleigh fading. This is because under a rich multipath the fluctuation of signals due to fading plays a major role on EGC performance whether antenna correlation is existed or not.

Figure 4 shows the probability density function of output SNR for uncorrelated and correlated signals in Rayleigh and AWGN fading channels. It can be noticed that the variance of signal is smaller when applying more antennas. In addition, the probability density functions of uncorrelated and correlated signals are more diverse if the number of antennas increase.

From all simulation results, the effect of correlated signals due to limited space is seriously significant in AWGN channel but not Rayleigh channel. However, the real propagation channel is in between AWGN and Rayleigh. Thus, these results are helpful for any researchers using EGC diversity technique to design the available margin due to antenna correlations in practice.

#### 5. Conclusion

In this paper, the performance investigation of EGC diversity technique is presented by considering the problem of multiple antennas on limited space. The simulation results reveal the significant differences observed if neglecting or including the antenna correlations. In future work, the measurement of EGC diversity technique will be undertaken to verify the simulation results in this paper.

The 2009 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2009)  
October 20-23, 2009, Bangkok, THAILAND

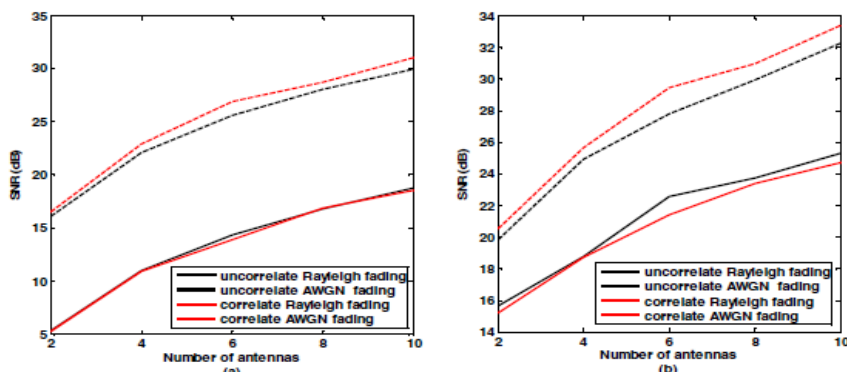


Figure 3: Output SNR of EGC diversity technique as a function of number of antennas in Rayleigh and AWGN fading. (a) Average SNR, (b) Peak SNR

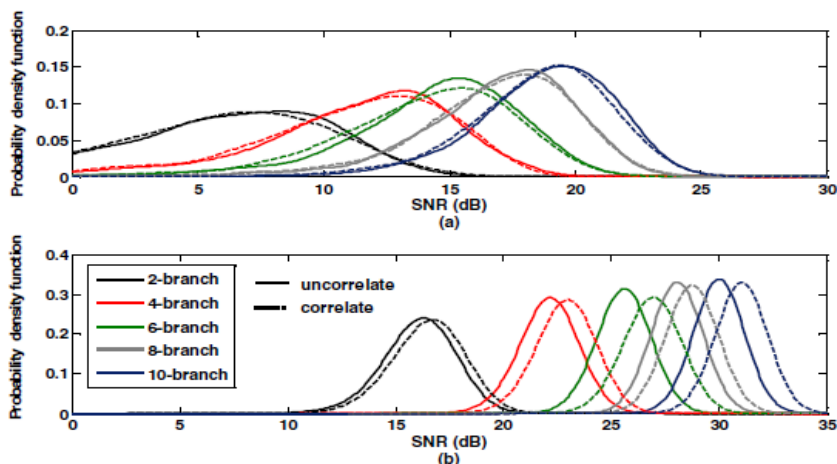


Figure 4: Probability density function of uncorrelated and correlated signals in fading channels (a)Rayleigh fading (b)AWGN fading

## References

- [1] M. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*. CRC Press, Boca Raton, 1993.
- [2] D. G. Brennan. *Linear Diversity Combining Techniques*. In Proc. IRE, pp. 1075-1102, 1959.
- [3] J. N. Pierce and S. Stien. *Multiple Diversity with Non-Independent Fading*. In Proc. IRE, pp. 89-104, 1960.
- [4] M. Lefevre, M. A. Jensen, and M. D. Rice, "Indoor measurement of handset dual antenna diversity performance," in *VTC '97*, pp. 1763-1767, 1997.
- [5] M. G. Douglas, M. Okoniewski, and M. A. Stuchly, "A planar diversity antenna for handheld PCS devices," *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, Vol. 47, pp. 747-754, 1998.
- [6] C. N. Zhang, W. K. Lam, and C. C. Ling, "A low-complexity antenna diversity receiver suitable for TDMA handset implementation", in *VTC'97*, pp. 1753-1757, 1997.
- [7] C. B. Dietrich, Jr., K. Dietze, J. R. Nealy, and W. L. Stutzman, "Spatial, Polarization, and Pattern Diversity for Wireless Handheld Terminals," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 49, (9), pp. 1271-1281, 2001.
- [8] Richard B. Ertel and Jeffrey H. Reed, "Generation of Two Equal Power Correlated Rayleigh Fading Envelopes," *IEEE COMMUNICATIONS LETTERS*, vol.2, no. 10, pp. 276-278, 1998.
- [9] R. H. Clarke, "A Statistical Theory of Mobile-Radio Reception", *The Bell System Technical Journal*, Vol. 47, No. 6, pp. 957-1000, 1968.



# Antenna Configuration Effect on EGC Diversity Performance in WLAN systems

T. Ngamjaroen, M. Uthansakul, P. Uthansakul

School of telecommunication Engineering, Suranaree University of technology  
Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

*Abstract*– The Equal Gain Combining (EGC) diversity technique is generally known to have a performance close to an optimal Maximal Ratio Combining (MRC) technique while being less complex for realization. Hence, the implementation of EGC in practice is of interest. As the dimension constraint on WLAN terminal, the problem of how to configure multiple antennas on such a limited area arises. In this paper, the study of correlation between each antenna signal under restricted area is presented to evaluate the performance of EGC diversity technique. The measurements of WLAN signals are also undertaken in order to justify the simulation results. The investigations reveal that the antenna configurations provide the different performance depending on the type of fading channels.

## I. INTRODUCTION

In practice, EGC technique provides performance comparable to the MRC receiver but with greater simplicity. However, performance evaluation of EGC diversity is known to be a much more difficult task in comparing with other techniques [1]. Hence, it is interesting to choose EGC diversity for implementing in wireless systems. Generally, the dimension of wireless devices is limited by the trend of smaller size. Therefore, the problem to configure multiple antennas on area constraint is necessary to be investigated. This problem deals with the correlation between each antenna which can greatly affect the performance of wireless system. Thus, performance analysis of antenna configuration on limited area is of interest both practical and theoretical.

The literature on correlated diversity branches is meager despite its importance from both practical and theoretical viewpoints. The general trend is that correlation decrease with increasing antenna spacing between antennas. The correlation between the signal branches is a function of the spacing between antennas. The study of the relative effects of correlation between signals arriving at different array elements dates back to the early [2]. Amongst the initial works of gain combining schemes, Pierce and Stein [3] studied the BER for MRC and EGC for BPSK modulation in a correlated Rayleigh fading channel and showed that an increase in correlation had adverse effects on the BER of the system. As explained in [4], the correlation between the branch envelopes in spatial diversity systems is a function of the spacing between the antennas. For [5] consider procedure for generating two equal power Rayleigh-fading envelopes with any desired cross-correlation coefficient is given. This literature has been useful in analyze of the correlation signals for this paper. For indoor wireless system, the author in [6] has presented the measured and simulated performance of dual-antenna diversity on prototype

transceiver handsets in an indoor environment. However, the problem of multiple antennas arranging with the different configurations has never been reported.

In this paper, the different configurations of four antennas on notebook operating in WLAN system are investigated. The performance comparison of EGC signals for each case of antenna configuration in presence of Rayleigh and AWGN fading channels is presented. In addition, the measured results of those configurations are undertaken to justify the simulation results. The remainder of paper is organized as follows. Section II provides the details of EGC diversity and its antenna correlation. The measurement of EGC on WLAN terminal is given in Section III. Section IV describes the results and finally Section V presents the conclusions of this paper and comments for future work.

## II. SYSTEM MODELS

### A. EGC diversity

EGC diversity is known to combine the signals from multiple diversity branches. The signal output of the combiner is the direct sum of the received signals, which a co-phase signal on each branch is performed and then it is combined with equal weighting in each branch of receivers. Figure 1 illustrates a configuration of EGC diversity technique.

The signal output of the combiner is the direct sum of the received signals with weighting  $g_i = a_i e^{-j\theta_i}$  on the  $i$ th antenna branch. For EGC diversity, the amplitude of weighting is equally set to 1 for all branches. Hence, the combined signal is expressed as

$$r = \sum_{i=1}^M r_i \quad (1)$$

Where  $M$  is the total number of diversity antenna branches.

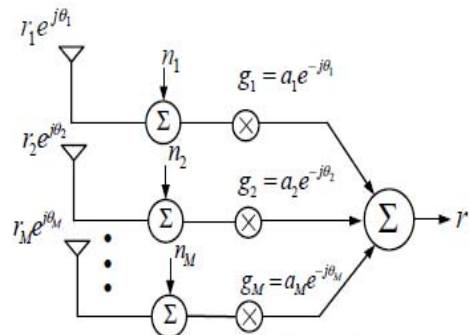


Figure 1. Equal gain combining diversity.

### B. Antenna correlation

The relation between power correlation coefficient  $\rho$  and antenna spacing  $d$  is derived by Clarke [7] as

$$\rho = J_0^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \quad (2)$$

Where  $J_0(\cdot)$  is the zero order Bessel function of first kind, and  $\lambda$  is the carrier wavelength. From (2) we will use this relationship to determine the correlation properties of the signal on each branch, expressed as

$$p_n(\lambda) - \rho = 0 \quad (3)$$

Where  $p_n(\lambda)$  is the least squares  $n$  degree polynomial given in [5]. The parameter  $\lambda$  has been useful in analyze of the correlation signals. In [5] the authors found the special case of the correlation matrix given by

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \lambda \sigma_x (1+j) & \sigma_x \sqrt{1-\lambda^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Where  $\sigma_x$  is absolute desired signal power. By assuming that

$r_1$  and  $r_2$  are samples of two uncorrelated signals, the correlated signals are easily determined by

$$\mathbf{X} = \mathbf{L}\mathbf{r} \quad (5)$$

Where  $\mathbf{r} = [r_1 \ r_2]^T$ . Hence, the correlated signals between two branches can be easily generated.

Figure 2 and Figure 4 show the examples of uncorrelated and correlated signals in a Rayleigh fading channel. For the correlated signals, the power correlation coefficient is 0.9. Figure 2(a) and 2(b) present the uncorrelated and correlated signals for two branches while Figure 4(a) and 4(b) present for four branches. It is clearly noticed the difference between correlated and uncorrelated signals. These figures are performed to confirm the concept of using correlation matrix in (4) for simulations.

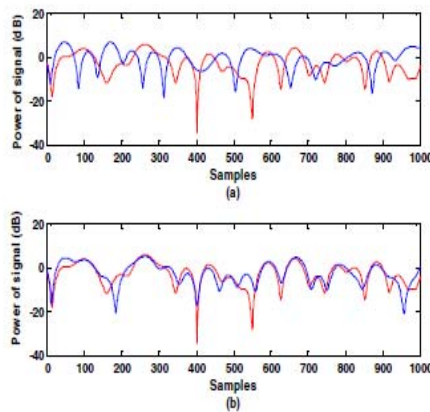


Figure 2. Example of two signals in a Rayleigh fading channel, (a) uncorrelated signals, (b) correlated signals

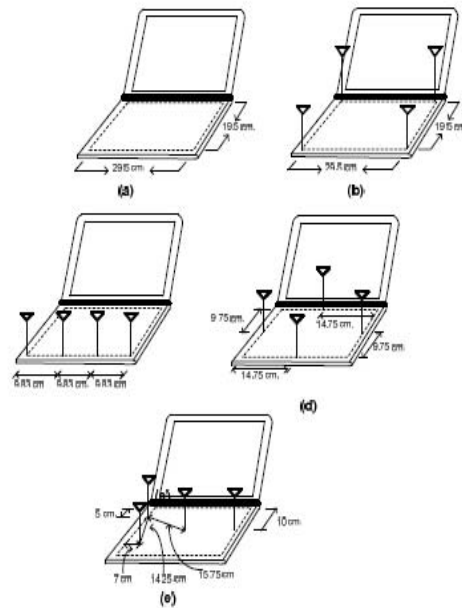


Figure 3. Antenna configurations of EGC diversity on notebook.

### C. Average probability of bit error

The average probability of bit error in fading channel can be written as [8]

$$\bar{P}_b = \int_0^{\infty} P_b(\gamma) p_{\Sigma\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (6)$$

Where  $P_b(\gamma)$  is the probability of bit error with SNR  $\gamma$  and  $p_{\Sigma\gamma}(\gamma)$  is the conditional probability density function of the output  $\gamma$  for a given  $\mathbf{r}$  and the combining of diversity signals. When the receiver employs the QPSK modulation, the conditional probability of error is then given by [8]

$$P_b(\gamma) \approx Q(\sqrt{2\gamma}) \quad (7)$$

Where  $Q(\cdot)$  is Q-function.

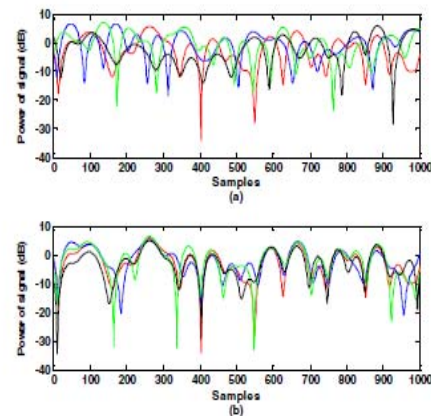


Figure 4. Example of four signals in a Rayleigh fading channel, (a) uncorrelated signals, (b) correlated signals

### III. MEASUREMENT SETUP

#### A. Antenna configurations

Each configuration is located on fixed area of notebook with dimension of 19.5 cm x 29.5 cm shown in Figure 3(A). The antenna configurations investigated in this paper are illustrated in Figure 3(B), Figure 3(C), Figure 3(D) and Figure 3(E). Both simulations and measurements are performed by using these configurations.

#### B. Measurement scenarios

In order to justify the simulation results, the measurements of EGC diversity signals based on antenna configurations shown in Figure 3 are undertaken. The measurements are performed at 4<sup>th</sup> floor of C Building, Suranaree University of Technology. The signal strength of WLAN signal is measured under the normally operating system.

The map of measurement area is illustrated in Figure 5 in which black spots indicate the measurement position. The total positions of measurements are 30 points. In each position the repeated measurements are performed by 5 times for each antenna configuration.



Figure 5. Map of measurement area

### IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

With area constraint on computer notebook, the relation between antennas can be found by calculating the antenna spacing  $d$  according to each configuration shown in Figure 3. Then the power correlation coefficient of each signal receivers is determined by using (2). Consequently, the correlation matrix is available to perform the correlated signals by using (5).

For simulations, two fading channels (Rayleigh and AWGN) are considered here because both are often used as a reference for indoor wireless system. The simulation results present the

probability density function of EGC signals to noise ratio as well as the probability of bit error for each antenna configuration illustrated in Figure 3. For measurements, the monopole antennas with 5 dBi gain are configured by using power combiner of Minicircuit Company to operate EGC diversity on notebook.

Figure 6 shows probability density function of SNR for all configurations in AWGN fading channel. It is clearly noticed that the different configurations provide the different distributions even all configurations use the same number of antenna. In AWGN fading channel, configuration D offers the best SNR distribution while configuration B gives the worst SNR distribution. The deviation of average SNR is range from 22.8 dB to 23.4 dB. Although the average SNR is changed by antenna configuration but the variances of all configurations are similar. In contrast to Rayleigh fading channel shown in Figure 7, the probability density functions are varied in both average and variance values. In Rayleigh fading channel, configuration B offers the best SNR distribution while configuration D gives the worst SNR distribution.

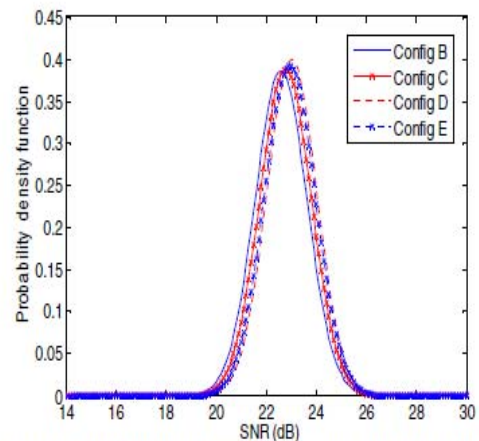


Figure 6. Probability density functions of EGC diversity in AWGN fading channel.

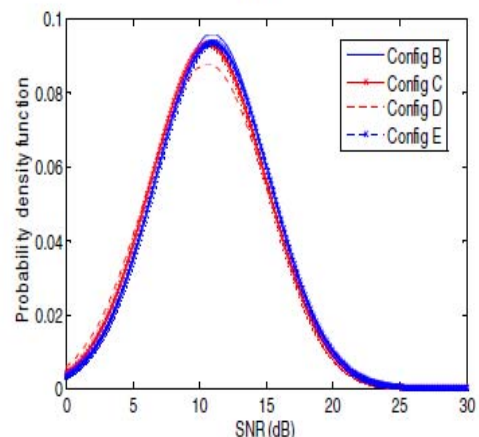


Figure 7. Probability density functions of EGC diversity in Rayleigh fading channel.

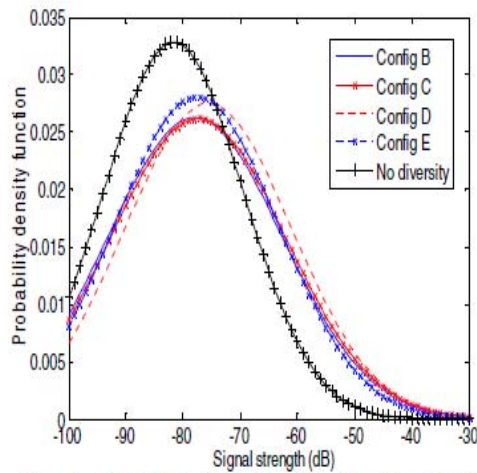


Figure 8. Probability density functions of EGC diversity realized from measurements.

For measurement results, the probability density function of SNR is presented in Figure 8. It is obvious that the SNR distribution of each configuration is totally different in both average and variance values. These variations are not similar to either AWGN or Rayleigh fading channels. It means that the propagation of WLAN signals in an indoor environment cannot be modeled by using simple mathematic models. In Figure 8, the measurement of one antenna operating no diversity is also undertaken. The results show the benefit of using four antennas as EGC diversity over one antenna with average gain of 5.83 dB. This gain is close to ideal achievement of EGC diversity with four antennas (around 6 dB). Therefore to use EGC diversity in WLAN system efficiently improves the quality of signals.

Figure 9 and Figure 10 show the average probability of bit error in AWGN and Rayleigh fading channels, respectively. These results indicate the same finding as Figure 6 and Figure 7. However, it is interesting to observe that performances in AWGN channel are much better than Rayleigh channel. For measured results shown in Figure 11, the probabilities of bit errors are between AWGN and Rayleigh channels. This implies that the propagation of indoor scenarios consists of multipath signals which more diverse than AWGN channel but less number of paths than Rayleigh channel. Also in Figure 11, configuration D provides the best performance with 1.2 dB over configuration B at  $10^{-3}$ . In summary, the results reveal that the choice of antenna configuration can greatly affect the performance of wireless system.

## V. CONCLUSION

This paper presents both simulation and measurement results of EGC diversity technique with four antennas on limited dimension of WLAN terminal like notebook. Both AWGN and Rayleigh fading channels are considered. The results show that effect of correlated signals due to antenna configuration is

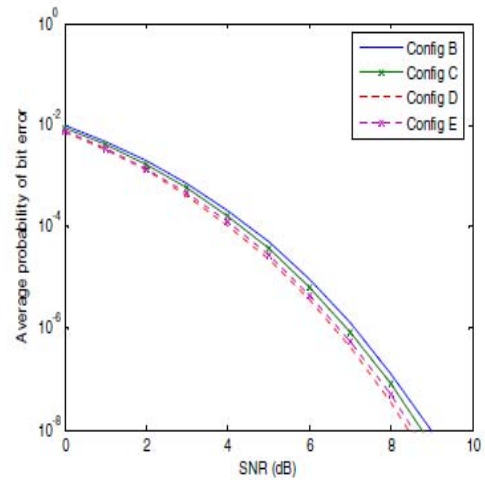


Figure 9. Average probability of bit error in AWGN fading channel.

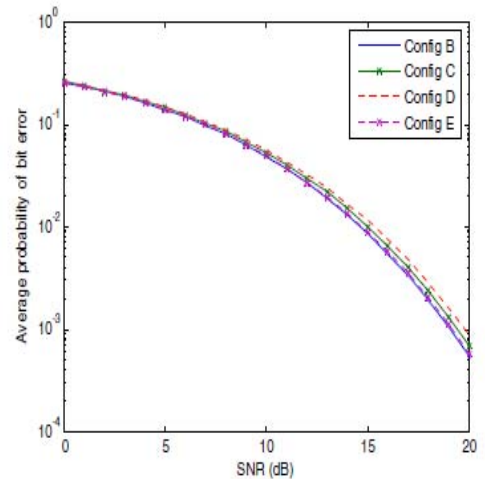


Figure 10. Average probability of bit error in Rayleigh fading channel.

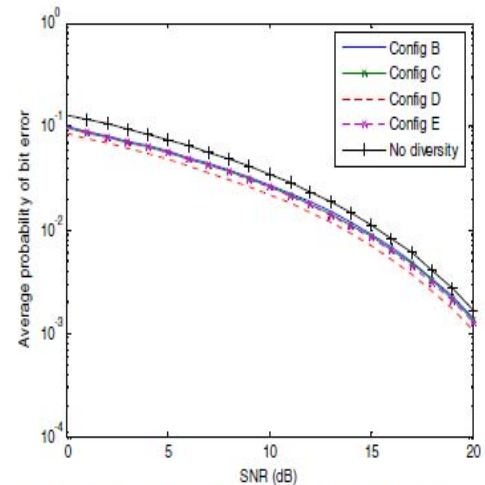


Figure 11. Average probability of bit error evaluated from measured results.

seriously significant. Therefore, the good quality of WLAN signals can be achieved if the right antenna configuration is properly designed. In future work, the study focuses on analytic solution of correlated signals based on area constraint. A mathematical framework is useful to determine the best antenna configuration for EGC diversity performance in practice.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge the financial support from Suranaree University of Technology, Thailand.

#### REFERENCES

- [1] M. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*, CRC Press, Boca Raton, 1993.
- [2] D. G. Brennan, *Linear Diversity Combining Techniques*. In Proc. IRE, pages 1075-1102, 1959.
- [3] J. N. Pierce and S. Stien, *Multiple Diversity with Non-Independent Fading* in Proc. IRE, pages 89-104, 1960.
- [4] C. B. Dietrich, Jr., K. Dietze, J. R. Nealy, and W. L. Stutzman, "Spatial, Polarization, and Pattern Diversity for Wireless Handheld Terminals," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 49, (9), pp. 1271-1281, Sept. 2001.
- [5] Richard B. Ertel and Jeffrey H. Reed, "Generation of Two Equal Power Correlated Rayleigh Fading Envelopes," *IEEE COMMUNICATIONS LETTERS*, vol.2, no. 10, pp. 276-278, Oct. 1998.
- [6] M. Lefevre, M. A. Jensen, and M. D. Rice, "Indoor measurement of handset dual antenna diversity performance," *ITC '97*, pp. 1763-1767, 1989.
- [7] R. H. Clarke, "A Statistical Theory of Mobile-Radio Reception," *The Bell System Technical Journal*, Vol. 47, No. 6, pp. 957-1000, July-Aug. 1968.
- [8] Andrea Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.

## ประวัติผู้เขียน

นายทงศักดิ์ งามเจริญ เกิดเมื่อวันที่ 23 กันยายน พ.ศ. 2528 ที่อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนปงรัชดาภิเษก จังหวัดพะเยา และสำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2551 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระดับนานาชาติ 2 ฉบับ ในงาน International Symposium on Antennas and Propagation 2009 (ISAP 2009) ในหัวข้อ “**Performance of EGC Diversity Technique with Multiple Antennas on Limited Space**” ณ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 20-23 ตุลาคม พ.ศ. 2552 และในงาน Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology 2010 (ECTI 2010) ในหัวข้อ “**Antenna Configuration Effect on EGC Diversity Performance in WLAN systems**” ณ จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 19-21 พฤษภาคม พ.ศ. 2553 มีรายละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ก.