การค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริทึม

ROUTING OPTIMIZATION USING GENETIC ALGORITHMS

จิตตนันท์ กุลศิริ
JITTANUN KULSIRI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-010-072

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริทึม

ROUTING OPTIMIZATION USING GENETIC ALGORITHMS

จิตตนันท์ กุลศิริ

JITTANUN KULSIRI

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 76761
วัน,เดือน,ปี..... - 6 S.A. 2550

.b..... 11842361
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2550

KMITL-2007-EN-M-010-072

ROUTING OPTIMIZATION USING GENETIC ALGORITHMS

JITTANUN KULSIRI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATION ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2007

KMITL-2007-EN-M-010-072

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริทึม

Routing Optimization Using Genetic Algorithms

นักศึกษา นางสาวจิตตนันท์ กุลศิริ

รหัสประจำตัว 48060912

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุวิพล สิทธิชีวภาค

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.พิเชฐ	ม่วงนวล	
ผศ.นภัทร	สระเอี่ยม	
ผศ.ดร.เผ่าภัค	ศิริสุข	
ผศ.เกรียงไกร	วงศ์โรจนภรณ์	
รศ.ดร.สุวิพล	สิทธิชีวภาค	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ 11 ตุลาคม 2550 เวลา 11.30-13.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 6

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๒๕.....**เดือน**.....ตุลาคม.....**พ.ศ.**.....๒๕๕๐.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริทึม
นักศึกษา	นางสาวจิตตนันท์ กุลศิริ
รหัสประจำตัว	48060912
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สุวิพล สิทธิชีวภาค

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายแบบแอดฮอก (Ad Hoc Network) ด้วยวิธีการจีเนติกอัลกอริทึม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของโครงข่าย โดยพิจารณาออกมาในรูปของค่าประวิงเวลาที่ใช้ส่งแพ็กเกตข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือของแต่ละเส้นทาง ภายใต้แบบจำลองที่คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากอัตราการเกิดความผิดพลาดแพ็กเกต (Packet error rate: BER) บนข่ายเชื่อมโยง และคุณภาพของช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลามาเป็นเงื่อนไขในการพิจารณาเส้นทาง จากผลการของการจำลองแบบ พบว่าการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในด้านของเวลาการส่งแพ็กเกตข้อมูลที่โครงข่ายต้องใช้ และค่าวิสัยสามารถดีกว่าการค้นหาเส้นทางแบบ Shortest Path และ จีเนติกอัลกอริทึมธรรมดาทั้งในโครงข่ายขนาด 50 โหนด และ 100 โหนด

Thesis Title	Routing Optimization using Genetic Algorithms
Student	Miss Jittanun Kulsiri
Student ID.	48060912
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunication Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Suvepol Sittichevapak

ABSTRACT

This thesis presents the optimum routing for ad-hoc wireless networks with Genetic Algorithm which enhances the network efficiency and network link reliability. Our scheme is evaluated based upon a critical factor as packet error rate and wireless channel quality to decide whether delay time of each packet is successfully sent in determining path. Simulation results show that the time efficiency and throughput of our scheme outperforms the shortest path and GA normal routing, both for 50 and 100 networking nodes.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไดเป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ.ดร. สุวิพล สิทธิชีวภาค ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้อง T304 ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยเป็นกำลังใจให้เสมอมา

ขอขอบคุณคุณธนานนท์ ฟักจีน และคุณวรัญญู รุ่งประดับวงศ์ ที่เป็นที่ปรึกษาด้านการเขียนโปรแกรมที่ใช้ในการจำลอง รวมถึงคำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ จนทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จิตตนันท์ กุลศิริ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VII

สารบัญรูป VIII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 สมมติฐานของการศึกษา 2

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย 3

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน 3

1.6 ขอบเขตการศึกษา 3

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา 4

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 กล่าวนำ 5

2.2 คุณลักษณะของโครงข่ายแบบแอดฮอก (Characteristic of Ad Hoc Networks) 7

2.3 การส่งผ่านคลื่นสัญญาณผ่านตัวกลางไร้สาย 9

2.3.1 การสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) 10

2.4 การประมาณค่าความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยง (Estimation of Link Error Rate) 12

2.4.1 แบบจำลองความผิดพลาดข่ายเชื่อมโยง (Link Error Rate Model) 12

2.4.2 การแก้ไขความผิดพลาดแบบ Automatic Repeat Request (ARQ) 16

2.5 โปรโตคอลการจัดสรรเส้นทางสำหรับโครงข่ายแบบแอดฮอก

(Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Network) 18

2.6 ปัญหาการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Solution) 19

2.6.1 การหาจุดเหมาะสมที่สุด (Optimization) 19

2.6.2 พันธุศาสตร์ทางชีววิทยา 20

2.6.2.1 จีเนติกอัลกอริทึมเบื้องต้น 24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.2.2 ฟังก์ชันเป้าหมายกับฟังก์ชันความเหมาะสม 26
2.6.2.3 รูปแบบโครโมโซม 26
2.6.2.4 วัฏจักรจีเนติกอัลกอริทึม 27
2.6.2.5 พันธุศาสตร์ทางชีววิทยา กับ จีเนติกอัลกอริทึม 29
2.6.2.6 จีเนติกอัลกอริทึมแบบง่าย 32
2.6.2.7 การประยุกต์จีเนติกอัลกอริทึมแบบง่าย 42
2.6.3 การค้นหาแบบตาบู (Tabu Search algorithm) 49
2.6.3.1 หลักการพื้นฐานของวิธีการค้นหาแบบตาบู 49
2.6.3.2 องค์ประกอบของวิธีการค้นหาแบบตาบู 52

บทที่ 3 กระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ 54
3.1 กระบวนการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริทึม
(Routing Optimization using Genetic Algorithms) 54
3.1.1 การคำนวณค่าประวิงเวลาของข่ายเชื่อมโยง (Transmission Link Cost Computation) 54
3.1.2 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Process) 57
3.1.3 กลไกการทำงานของกระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism) 63
3.1.4 กระบวนการดูแลเส้นทาง (Route Maintenance) 68
3.2 สรุป 71

บทที่ 4 สภาพแวดล้อมการจำลอง ผลการจำลอง และวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ 72
4.1 สภาพแวดล้อมของการจำลอง (Simulation Environment) 72
4.1.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล
ของโหนดต้นทาง 72
4.1.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการบอกประสิทธิภาพของกระบวนการค้นหาเส้นทาง 73
4.1.3 ลักษณะของโครงข่ายที่ใช้ในการจำลอง (Architecture of simulation network) 74
4.2 ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองสำหรับกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ 75
4.2.1 กระบวนการค้นหาเส้นทางที่คำนึงถึงคุณภาพช่องสัญญาณไร้สาย
ด้วยจีเนติกอัลกอริทึม 76

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโหนดต้นทาง 76
4.2.1.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความน่าจะเป็นของตัวดำเนินการทางพันธุศาสตร์ของจีเนติกอัลกอริทึม 81
4.2.1.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ใช้ในการจำลอง 86

บทที่ 5 บทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ 93
5.1 สรุปผลการวิจัย 93
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต 94

รายการอ้างอิง 95

ภาคผนวก 97
บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ 98

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 103

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ SNR ภายใต้การมอดูเลตแบบต่าง ๆ	15
2.2	แสดงคำศัพท์ทางพันธุศาสตร์กับจีเนติกอัลกอริทึม	31
2.3	การกำหนด SGA พารามิเตอร์เปรียบเทียบผลการทำงานในการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $y = x^n$ ที่ $n = 10$	46
3.1	ความหมายของตัวแปรในสมการที่ 3.1 ถึงสมการที่ 3.4	56
3.2	ตารางเส้นทางเดินข้อมูลของโหนด F	71
4.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในกรณีเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลของโหนดต้นทาง	73
4.2	คุณสมบัติของโหนดที่ใช้ในโครงข่ายจะอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 802.11b	75
4.3	พารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละกระบวนการค้นหาเส้นทาง	75
4.4	เปรียบเทียบค่าประวิงเวลาและเส้นทางที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูลของทั้ง 3 กระบวนการที่ขนาดโครงข่าย 50	81
4.5	เปรียบเทียบค่าประวิงเวลาและเส้นทางที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูลของทั้ง 3 กระบวนการที่ขนาดโครงข่าย 100	85
4.6	พารามิเตอร์ที่ใช้ในกรณีเปลี่ยนแปลงโอกาสการเกิดมิวเตชัน	86
4.7	เปรียบเทียบค่าประวิงเวลา และเส้นทางที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูลของทั้ง5 กระบวนการที่ขนาดโครงข่าย 50	89
4.8	เปรียบเทียบค่าประวิงเวลา และเส้นทางที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูลของทั้ง5 กระบวนการที่ขนาดโครงข่าย 100	92
5.1	สรุปประสิทธิภาพในด้านคุณภาพการให้บริการระหว่างกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ SP, GA ธรรมดา และ Proposed-GA โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ที่ชี้วัดประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน	94

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ	9
2.2	แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ	11
2.2(ก)	แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศว่าง	11
2.2(ข)	แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากพื้นผิวเรียบ	11
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ SNR ภายใต้การมอดูเลตแบบต่าง ๆ	14
2.4	การสื่อสารจากโนด S ไปยังโนด D ด้วยความผิดพลาดแพ็กเกตบนข่ายเชื่อมโยง	17
2.5	แสดงโครโมโซมทางพันธุกรรม	21
2.6	แสดงการแบ่งตัวของเซลล์	22
2.6(ก)	การเพิ่มจำนวนเซลล์	22
2.6(ข)	การแบ่งตัวของเซลล์สืบพันธุ์	22
2.7	แสดงการครอสโอเวอร์ทางพันธุศาสตร์	23
2.8	แสดงการมิวเตชันทางพันธุศาสตร์	24
2.9	แสดงหลักการเบื้องต้นของ GA	25
2.10	แสดงวัฏจักรจีเนติกอัลกอริทึม	27
2.11	แสดงรายละเอียดทางพันธุศาสตร์ กับ จีเนติกอัลกอริทึม	30
2.11(ก)	ลักษณะทางพันธุศาสตร์ของโครโมโซมควบคุมลักษณะของเมล็ดถั่ว ซึ่งมียีนส์ลักษณะผิวของเมล็ดคือ มีลักษณะเรียบ (R) หรือขรุขระ (w) และยีนส์ลักษณะสีของเมล็ด คือมีสีเหลือง (Y) หรือ สีเขียว (g)	30
2.11(ข)	ลักษณะทางจีเนติกอัลกอริทึมของปัญหาในการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $f(x) = x^2$ ซึ่งค่า x มีค่าอยู่ในช่วง [0, 4] โดยพารามิเตอร์ x จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปไบนารีสตริง	30
2.12	แสดงไดอะแกรมการทำงานของ จีเนติกอัลกอริทึมแบบง่าย	32
2.13	ครอสโอเวอร์แบบ 1 จุด	37
2.14	ไบนารีมิวเตชัน	38
2.15	รายละเอียดผลการทำงานของ SGA ในการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $y = x^n$ ที่ $n = 10$	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.15(ก)	วิวัฒนาการรุ่นที่ 1	40
2.15(ข)	วิวัฒนาการรุ่นที่ 6	41
2.16	แสดงกราฟค่าความเหมาะสมสูงสุดของ SGA ในการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $y = x^n$ ที่ $n = 10$	42
2.17	รีโพรดักชันแบบรักษาค่าความเหมาะสมที่ดี	43
2.17(ก)	รักษาค่าความเหมาะสมที่ดี 1 โครโมโซม	43
2.17(ข)	รักษาค่าความเหมาะสมที่ดี 2 โครโมโซม	43
2.18	ครอสโอเวอร์แบบ 2 จุด	44
2.19	อินเวอร์ชัน	45
2.20(ก-ง)	ผลการทำงานโดยสรุปของ GA ในการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $y = x^n$ ที่ $n = 10$	47
2.20(จ-ช)	ผลการทำงานโดยสรุปของ GA ในการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $y = x^n$ ที่ $n = 10$	48
2.21	ผังการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบู	51
2.22	ลักษณะการเก็บคำตอบของตัวเก็บคำตอบ	52
2.23	ลักษณะของตัวเก็บสถานะของรายการตาบู	52
3.1	โครงสร้างของแพ็กเกตร้องขอเส้นทาง RREQ ในโปรโตคอลที่นำเสนอ	58
3.2	ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดต้นทางสำหรับการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงคุณภาพช่องสัญญาณด้วย GA (Proposed-GA)	60
3.3	ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดปลายทางสำหรับการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงคุณภาพช่องสัญญาณด้วย GA (Proposed-GA)	60
3.4	ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดระหว่างทาง สำหรับการค้นหาเส้นทางแบบคำนึงถึงคุณภาพช่องสัญญาณด้วย GA (Proposed-GA)	61
3.5	ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางรวมทั้งหมด สำหรับการค้นหาเส้นทางแบบคำนึงถึงคุณภาพช่องสัญญาณด้วย GA (Proposed-GA)	62
3.6	โครงสร้างของแพ็กเกตร้องขอเส้นทาง (Route Request)	64
3.7	กระบวนการค้นหาเส้นทางแบบที่นำเสนอ	66
3.7(ก)	ระยะการส่งข้อมูลและการแพร่กระจายแพ็กเกต RREQ ของโหนด A	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.7(ข)	การสร้างเส้นทางย้อนกลับหลังจากได้รับสัญญาณแพ็กเกต RREQ	65
3.7(ค)	ภายหลังจากที่โนด K F และ E ได้รับสัญญาณแพ็กเกต RREQ	65
3.7(ง)	ภายหลังจากแพ็กเกต RREQ แรกไปถึงยังโนดปลายทาง B	66
3.7(จ)	สัญลักษณ์และความหมายที่ใช้ในรูปที่ 2.11 (ก) – (ง)	66
3.8	โครงสร้างของแพ็กเกตการตอบรับเส้นทาง (Route Reply หรือ RREP)	67
3.9	กระบวนการดูแลเส้นทางของกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ	70
3.9(ก)	ทอพอโลยีของโครงข่ายหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการค้นหาเส้นทาง	69
3.9(ข)	โนด H เคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางการสื่อสาร	69
3.9(ค)	โนด H ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่หมดระหว่างการสื่อสาร	69
3.9(ง)	โนด F แจ้งความเสียหายที่เกิดขึ้นของข่ายเชื่อมโยง F-H ให้กับโนดที่เกี่ยวข้อง	70
3.9(จ)	สัญลักษณ์และความหมายที่ใช้ในรูปที 2.13 (ก) – (ง)	70
4.1	ลักษณะของโครงข่ายที่ใช้ในการจำลอง	74
4.2	ค่าวิสัยสามารถเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายสามารถทำงานได้เป็นปกติ 50 โหนด)	76
4.3	ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายสามารถทำงานได้เป็นปกติ 50 โหนด)	77
4.4	จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกตเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายสามารถทำงานได้เป็นปกติ 50 โหนด)	78
4.5	ค่าวิสัยสามารถเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่บางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ)	79
4.6	ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่บางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ)	80
4.7	จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกตเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่บางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ)	80
4.8	ค่าวิสัยสามารถเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายสามารถทำงานได้เป็นปกติ 100 โหนด)	82
4.9	ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายสามารถทำงานได้เป็นปกติ 100 โหนด)	83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.10	จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกตเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายสามารถทำงานได้เป็นปกติ 100 โหนด)	83
4.11	ค่าวิสัยสามารถเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่บางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ)	84
4.12	ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่บางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ)	84
4.13	จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกตเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่บางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ)	85
4.14	ค่าวิสัยสามารถเมื่อเปลี่ยนแปลงโอกาสการเกิดมิวเตชัน (กรณีโครงข่ายมีขนาด 50 โหนด)	87
4.15	ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงโอกาสการเกิดมิวเตชัน (กรณีโครงข่ายมีขนาด 50 โหนด)	87
4.16	จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกตเมื่อเปลี่ยนแปลงโอกาสการเกิดมิวเตชัน (กรณีโครงข่ายมีขนาด 50 โหนด)	88
4.17	ค่าวิสัยสามารถเมื่อเปลี่ยนแปลงโอกาสการเกิดมิวเตชัน (กรณีโครงข่ายมีขนาด 100 โหนด)	90
4.18	ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงโอกาสการเกิดมิวเตชัน (กรณีโครงข่ายมีขนาด 100 โหนด)	90
4.19	จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกตเมื่อเปลี่ยนแปลงโอกาสการเกิดมิวเตชัน (กรณีโครงข่ายมีขนาด 100 โหนด)	91

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงข่ายแอดฮอกเป็นโครงข่ายที่ก่อรูปขึ้นโดยไม่มีการอำนวยความสะดวกจากส่วนกลาง (Infrastructureless) และเป็นการทำงานแบบกระจายศูนย์ (Distributed) โดยโครงข่ายจะประกอบด้วย โหนดเคลื่อนที่ (Mobile nodes) ที่มีการติดต่อกันแบบไร้สายเพื่อส่งข้อมูลในรูปของแพ็กเกตข้อมูลระหว่างกัน อีกทั้งโหนดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ทั้งการเคลื่อนของโหนดและคุณภาพของช่องสัญญาณไร้สายที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทำให้รูปแบบการเชื่อมต่อของโหนดหรือทอพอโลยีของโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและไม่สามารถทำนายได้ล่วงหน้า สิ่งที่โครงข่ายแอดฮอกแตกต่างจากโครงข่ายเซลลูลาร์ที่เห็นได้ชัดนอกจากไม่ต้องอาศัยโครงสร้างพื้นฐานแล้วคือ การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-hop communication) นั้นหมายถึง ถ้าโหนดต้นทางต้องการสื่อสารกับโหนดปลายทางที่ไม่อยู่ในระยะการส่งของโหนดต้นทาง โหนดต้นทางจำเป็นต้องส่งแพ็กเกตผ่านโหนดระหว่างทาง (Intermediate nodes) แล้วให้โหนดระหว่างทางทำหน้าที่ส่งแพ็กเกตนั้นต่อไปยังโหนดปลายทาง ดังนั้นจึงทำให้ทุกโหนดในโครงข่ายต้องมีความสามารถในการจัดสรรเส้นทางเพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารกันในโครงข่าย (ซึ่งโหนดต้องทำหน้าที่เสมือนรูเทอร์ (Router)) เมื่อในอดีตที่ผ่านมาโครงข่ายแอดฮอกได้ถูกใช้ในงานด้านการทหารเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากการวางโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นแบบศูนย์กลางในสนามรบนั้นมีความยากลำบาก อีกทั้งความน่าเชื่อถือของโครงข่ายต่ำมากเนื่องจากเสี่ยงต่อการถูกทำลาย แต่เนื่องจากข้อดีหลาย ๆ ประการทำให้ในภาคธุรกิจได้หันมาให้ความสนใจและพัฒนามากขึ้น ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้ในสถานการณ์ของพื้นที่ที่ไม่มีโครงข่ายรองรับ (ไม่ว่าจะเป็นโครงข่ายแบบคงที่หรือแบบเซลลูลาร์) คือ การปฏิบัติการช่วยเหลือกู้ภัยในพื้นที่ห่างไกล หรือเมื่อความต้องการใช้งานระบบสื่อสารเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในสถานที่ก่อสร้างที่อยู่ห่างไกล หรือต้องการต่อขยายพื้นที่ที่ให้บริการเดิมให้มากขึ้นและการวางระบบการสื่อสารในสนามบินเพื่อทำให้การสื่อสารมีความคล่องตัวมากขึ้น

การออกแบบโปรโตคอลการจัดสรรเส้นทาง (Routing Protocol) สำหรับโครงข่ายแบบแอดฮอกเพื่อทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพในด้านต่าง ๆ เป็นประเด็นสำคัญที่ควรจะตระหนักถึงเป็นอับดับต้น ๆ และยังเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจในการพัฒนามากขึ้น เนื่องจากโหนดใน

โครงข่ายแอดฮอกจะสื่อสารกันผ่านข่ายเชื่อมโยงไร้สาย ซึ่งข่ายเชื่อมโยงไร้สายจะมีความจุที่ต่ำกว่าข่ายเชื่อมโยงแบบใช้สายเนื่องจากหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น ผลกระทบของการเข้าถึงหลายทาง (Multiple access) มัลติพาทเฟดดิง (Multipath fading) สัญญาณรบกวน (Noise) และสัญญาณแทรกสอด (Signal interference) เป็นต้น ซึ่งปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้อาจจะส่งผลทำให้ข่ายเชื่อมโยงไร้สายลดประสิทธิภาพอยู่ตลอดเวลาและยังส่งผลต่อค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ของระบบโดยรวมอีกด้วย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้นำเสนอรูปแบบการค้นหาเส้นทางในการส่งแพ็กเกตข้อมูลด้วยกระบวนการจีเนติกอัลกอริทึมในการเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดซึ่งคำนึงถึงคุณภาพของช่องสัญญาณร่วมด้วย โดยเส้นทางที่ถูกเลือกนั้นจะมีค่าประวิงเวลาในการส่งแพ็กเกตข้อมูลต่ำ มีความถูกต้องของข้อมูลสูง และให้ค่าวิสัยสามารถของระบบสูงด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. นำเสนอกระบวนการค้นหาเส้นทางสำหรับโครงข่ายแอดฮอกด้วยจีเนติกอัลกอริทึม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งแพ็กเกตข้อมูลและค่าวิสัยสามารถของโครงข่าย

2. เปรียบเทียบสมรรถนะกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอกับการค้นหาเส้นทางที่เคยถูกนำเสนอไว้ในประเภทเดียวกัน นั่นคือ การค้นหาเส้นทางแบบเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest path) และ การค้นหาเส้นทางด้วยจีเนติกอัลกอริทึมแบบง่าย (Simple Genetic Algorithms)

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จีเนติกอัลกอริทึมเป็นการหาคำตอบที่เหมาะสมวิธีหนึ่งในวิธีการแบบปัญญาประดิษฐ์ที่กำลังได้รับความนิยม และเป็นที่แพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากจีเนติกอัลกอริทึมสามารถหาคำตอบใกล้เคียงที่เหมาะสมแม้ว่าปัญหานั้นจะมีขนาดใหญ่ก็ตาม ทำให้วิธีการดังกล่าวจึงถูกนำไปใช้ในการหาคำตอบกับหลายๆ ปัญหา ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเอาจีเนติกอัลกอริทึมมาใช้ค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งแพ็กเกตข้อมูลสำหรับโครงข่ายแอดฮอกในช่องสัญญาณไร้สาย โดยคำนึงถึงคุณภาพช่องสัญญาณร่วมด้วย ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเลือกเส้นทาง ในขณะเดียวกันก็ใช้การเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA เพื่อลดการชนกันของข้อมูล และใช้เทคนิคการควบคุมการผิดพลาดแบบ Automatic Repeat Request (ARQ) ซึ่งน่าจะส่งผลให้เส้นทางที่ถูกเลือกขึ้นมานั้นมีค่าประวิงเวลาต่ำ ให้ความถูกต้องของข้อมูลสูง รวมถึงค่าวิสัยสามารถของโครงข่ายสูงขึ้นด้วย

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยาพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการค้นหาเส้นทางที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูลสำหรับโครงข่ายแอดฮอกด้วยจีเนติกอัลกอริทึม เพื่อเพิ่มโครงข่ายมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายทางคณิตศาสตร์ด้านเวลา เพื่อใช้คำนวณค่าประวิงเวลาในการส่งแพ็กเกตข้อมูลที่ได้รับผลกระทบจากคุณภาพช่องสัญญาณ

ในขั้นตอนการจำลองจะใช้โปรแกรม Visual Basic (VB) โดยทำการจำลองให้ทำงานในสถานะเสมือนจริงจากผลกระทบจากสัญญาณรบกวน และให้เหมาะกับเงื่อนไขที่จะต้องใช้ในการประเมินสมรรถนะของกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ ซึ่งได้พิจารณาแบบจำลองความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยง (Link error rate model) ร่วมด้วยโดยจะทำการทดสอบกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอกับกระบวนการค้นหาเส้นทางที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันภายใต้เงื่อนไขของโครงข่ายแบบต่าง ๆ เช่น จำนวนโหนดในโครงข่าย และอัตราการส่งข้อมูล

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

หลักการในการค้นหาเส้นทางสำหรับโครงข่ายแอดฮอกเดิมนั้นจะพิจารณาเฉพาะเส้นทางที่สั้นที่สุด โดยไม่คำนึงถึงคุณภาพช่องสัญญาณเลย สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการนำเสนอกระบวนการค้นหาเส้นทางด้วยจีเนติกอัลกอริทึมที่พิจารณาแบบจำลองความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยง และใช้เทคนิคการควบคุมการผิดพลาดแบบ Automatic Repeat Request (ARQ) และการส่งซ้ำแบบระหว่างช่วงเชื่อมต่อ (Hop-by-Hop Retransmission or HHR) เพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของโครงข่ายที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับหลักการเดิมบนช่องสัญญาณไร้สายที่มีสัญญาณรบกวน

1.6 ขอบเขตการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการค้นหาเส้นทางในชั้นเครือข่ายสำหรับโครงข่ายแอดฮอกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของโครงข่าย โดยพิจารณาค่าประวิงเวลาที่ใช้ส่งแพ็กเกตข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือแต่ละเส้นทาง ภายใต้แบบจำลองที่คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากอัตราการเกิดความผิดพลาดแพ็กเกต (Packet Error Rate) บนข่ายเชื่อมโยงมาเป็นเงื่อนไขในการพิจารณาเส้นทาง

การค้นหาเส้นทางที่นำเสนอจะอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าโหนดต้นทางจะต้องทราบจำนวนแพ็กเกตที่ต้องการสื่อสารกับโหนดปลายทางเพื่อให้โหนดอื่น ๆ ในโครงข่ายได้ใช้ประโยชน์ในการคำนวณค่าประวิงเวลาที่ต้องใช้ในการสื่อสารในระหว่างกระบวนการค้นหาเส้นทาง และโหนดใน

โครงข่ายทุกโหนดอยู่ในตำแหน่งคงที่ ณ เวลาที่ต้องการสื่อสารข้อมูล โดยตัววัดที่ใช้เปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอกับกระบวนการค้นหาเส้นทางในกลุ่มเดียวกัน ดังนี้ ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) การประวิงเวลา (Delay) และความยาวของเส้นทาง (Path length)

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ที่ใช้ในการวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงกระบวนการค้นหาเส้นทางด้วยจีเนติกอัลกอริทึมที่นำเสนอ

บทที่ 4 กล่าวถึงสภาพแวดล้อมการจำลอง ผลที่ได้การการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลอง เพื่อแสดงให้เห็นสมรรถนะของวิธีที่นำเสนอ

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารแบบไร้สายได้รับความนิยมในการติดต่อสื่อสารอย่างแพร่หลาย เนื่องจากความสะดวกสบายของอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารและความยืดหยุ่นในการใช้งาน ที่เห็นได้ชัดเจนคือ การเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ใช้บริการโทรศัพท์ไร้สายและผู้ใช้บริการอินเตอร์เน็ตผ่านเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless Local Area Network ,WLAN) ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานของระบบที่ใช้รองรับการสื่อสารแบบไร้สายในปัจจุบันยังคงจำกัดอยู่ในระดับที่เราเรียกว่า ผู้ใช้ (end-user) คือ ลักษณะการส่งผ่านข้อมูลแบบไร้สายจะเกิดขึ้นเฉพาะจากผู้ใช้บริการปลายทางไปยังสถานีฐาน (Base station) หรือจากคอมพิวเตอร์ไปยังจุดเข้าถึง (Access Point, AP) เท่านั้น ส่วนการให้บริการในภาคอื่น ๆ ยังคงเป็นแบบใช้สาย ซึ่งหากปริมาณข้อมูลข่าวสารเพิ่มมากขึ้นจนเครือข่ายที่มีอยู่ในปัจจุบันไม่สามารถรองรับได้อีก ผู้ให้บริการเครือข่ายจำเป็นต้องขยายโครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับกับความต้องการที่เพิ่มขึ้นนี้ อีกทั้งยังต้องรักษาคุณภาพการให้บริการ (Quality of service, QoS) ให้อยู่ในระดับที่กำหนดไว้ ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการขยายโครงข่ายพบว่าส่วนมากจะเกิดจากการวางโครงสร้างพื้นฐาน อีกทั้งยังใช้ระยะเวลานานในการติดตั้ง โครงข่ายแอดฮอก (Ad hoc Network) จึงเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจเนื่องจากข้อดีหลาย ๆ ประการทั้งในด้านค่าใช้จ่ายและความซับซ้อนในการติดตั้งโครงข่ายที่ต่ำ จึงทำให้ใช้เวลาการติดตั้งน้อยลง ในลำดับต่อไปจะกล่าวถึงข้อดีและข้อเสียของระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบใช้สายทั่วไป

ข้อดีของระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายมีดังนี้

- ความยืดหยุ่นในการใช้งาน (Installation flexibility): ภายในระยะการครอบคลุมของการให้บริการผู้ใช้สามารถติดต่อสื่อสารถึงกันได้ โดยปราศจากข้อจำกัดใดๆ คลื่นหรือสัญญาณวิทยุสามารถที่จะส่งผ่านผนังหรือกำแพงต่างๆ ได้ ผู้ส่งและผู้รับข้อมูลสามารถติดต่อถึงกันได้แม้ว่าจะไม่สามารถมองเห็นได้ก็ตาม (LOS: Line of Sight) นอกจากนี้ ระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายยังเอื้อประโยชน์ให้สามารถใช้งานได้ในบริเวณที่ยากแก่การเข้าถึงหรือการติดตั้งสายเคเบิล

- ความคล่องตัว (Mobility improves productivity and service): ในบางครั้งการเคลื่อนย้ายของผู้ใช้อาจไม่เฉพาะเจาะจงอยู่ในพื้นที่ใดพื้นที่เดียว อาจครอบคลุมไปยังที่ต่าง ๆ ใกล้เคียง เช่น เจ้าหน้าที่ ห้องสมุดสามารถสำรวจทรัพยากรสารนิเทศภายในห้องสมุดแบบระบบออนไลน์ผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์แบบโน้ตบุ๊กกับเครื่องอ่านบาร์โค้ด ส่วนผู้ใช้ห้องสมุดสามารถย้ายจากที่นั่งได้โดยสามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายได้ตลอดเวลา ตราบใดที่ยังอยู่ในระยะการส่งข้อมูล เป็นต้น
- การขยายเครือข่าย (Scalability): ระบบเครือข่ายแบบไร้สายทำให้เครือข่ายขององค์กรสามารถปรับขนาดและความเหมาะสมได้ง่ายไม่ยุ่งยาก เพราะสามารถโยกย้ายตำแหน่งการใช้งาน โดยเฉพาะระบบที่มีการเชื่อมระหว่างจุดต่อจุด เช่น ระหว่างตึก
- การติดตั้งง่ายและรวดเร็ว(Installation speed and simplicity): ระบบเครือข่ายไร้สายสามารถครอบคลุมพื้นที่เล็ก ๆ โดยมีการเชื่อมโยงระหว่างอาคารได้ด้วยระบบแบบจุดต่อจุด ทำให้ดำเนินการได้เร็วและสะดวกต่อการติดตั้ง เพราะไม่ต้องเดินสายไฟสายเคเบิลหรือสายสื่อสารข้อมูล
- ลดค่าใช้จ่ายโดยรวมในระยะยาว (Reduced cost of ownership): ในระยะแรกอาจจะต้องลงทุนค่อนข้างสูง เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้กับระบบเครือข่ายไร้สายมีราคาสูง แต่เมื่อต้องการขยายเครือข่าย สามารถทำได้ด้วยเงินลงทุนที่น้อยกว่าเดิมหลายเท่า เนื่องด้วยความง่ายในการติดตั้ง อีกทั้งระบบเครือข่ายไร้สายยังไม่ต้องเสียค่าบำรุงรักษาด้วย
- สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์การสื่อสารที่หลากหลาย (Multiple equipment): อุปกรณ์การสื่อสารเหล่านี้เป็นทางผ่านที่ทำให้ผู้ใช้ติดต่อกับระบบเครือข่ายได้ ซึ่งได้แก่ เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพีซีหรือเครื่องคอมพิวเตอร์แบบโน้ตบุ๊ค, PDA หรือ Pocket PC โทรศัพท์มือถือที่รองรับการทำงานกับระบบเครือข่ายไร้สาย อุปกรณ์อื่นๆ เช่น เครื่องพิมพ์ (printer), แฟกซ์ (Fax), กล้องโทรทัศน์วงจรปิด เป็นต้น

- มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมโดยรอบ (Robustness): โครงข่ายของระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายจะมีความคงทนถาวรมากกว่าระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบใช้สาย เช่น ในสภาวะที่เกิดแผ่นดินไหวอาจจะทำให้สายเคเบิลขาดได้ ส่งผลให้ระบบโดยรวมเกิดการขัดข้องได้ แต่ในกรณีที่เป็นระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายนั้นยังสามารถที่จะทำงานได้

ในส่วนข้อเสียของระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายมีดังนี้

- คุณภาพของการบริการ (Quality of Service): โดยทั่วไปแล้วระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายจะมีคุณภาพของการบริการต่ำกว่าระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบใช้สาย เหตุผลที่สำคัญก็คือ ความกว้างแถบที่ขนาดไม่มากนัก เนื่องจากข้อกำหนดของการส่งสัญญาณวิทยุ

(ความเร็วโดยประมาณคือ 1-10 Mbps) นอกจากนี้แล้วยังมีอัตราความผิดพลาดในการส่งข้อมูลสูงกว่าแบบมีสาย เพราะว่ามีสัญญาณรบกวน (Interference) มากกว่า (ประมาณ 10^{-4} เมื่อเทียบ 10^{-10} ในเส้นใยนำแสง) อีกทั้งยังมีการหน่วงข้อมูลที่สูงกว่า

- ราคาแพง (Cost): ขณะที่อะแดปเตอร์ของระบบอีเทอร์เนตความเร็วสูง (High-Speed Ethernet Adapter) จะอยู่ที่ประมาณ 10 ปอนด์ (Pound) แต่สำหรับในอะแดปเตอร์ของระบบแลนแบบไร้สายนั้น เช่น PC-Card จะมีราคาอยู่ที่ 100 ปอนด์
- การพัฒนาที่ไม่ร่วมกัน (Proprietary Solutions): เนื่องจากความล่าช้าของการกำหนดมาตรฐานซึ่งเกิดจากการที่บริษัทผู้ผลิตต่างๆ ที่มีการจดสิทธิบัตรในการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ในระบบนี้ ได้เสนอวิธีการต่างๆ ในการกำหนดมาตรฐานตามเทคโนโลยีที่ตนเองพัฒนาขึ้น ซึ่งโดยมากแล้วจะมีคุณลักษณะที่ไม่เหมือนกัน ทำให้ในการใช้งานจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ที่ผลิตมาจากบริษัทผู้ผลิตเดียวกัน จึงจะสามารถทำงานร่วมกันได้
- ข้อจำกัดของแต่ละประเทศ (Restrictions): อุปกรณ์ต่างๆในระบบไร้สายโดยมาก จะถูกจำกัดด้วยข้อกำหนดต่างๆ ของแต่ละประเทศนั้นๆ เนื่องจากในแต่ละประเทศจะมีการกำหนดความถี่ใช้งานในด้านต่างๆ ไว้ เพื่อให้การใช้งานความถี่จะไม่เกิดการรบกวนกัน หรือให้เกิดการรบกวนกันน้อยที่สุด ในปัจจุบันได้มีการกำหนดมาตรฐานระดับโลกในการใช้ความถี่ขึ้นมา เช่น IMT-2000 เพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ ระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายนั้นจะถูกจำกัดให้มีกำลังส่งต่ำๆ และจะใช้ช่วงความถี่ที่ไม่ได้กำหนดให้มีการใช้งาน (Unlicensed Band หรือ ISM Band นั่นเอง)
- ความปลอดภัยและความเป็นส่วนตัว (Safety and Security): การใช้คลื่นหรือสัญญาณวิทยุในการส่งข้อมูลนั้น อาจจะเข้าไปรบกวนกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาดได้ การทำงานที่ผิดพลาดนี้อาจจะมีความสำคัญมากๆ ก็ได้ เช่น ภายในโรงพยาบาลซึ่งเป็นสถานที่ที่ต้องมีการควบคุมปัญหานี้เป็นอย่างมาก เป็นต้น นอกจากนี้แล้ว การสื่อสารกันโดยใช้สัญญาณวิทยุนั้นมักจะถูกดักฟังได้ง่ายกว่าแบบมีสาย ซึ่งก็เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก

2.2 คุณลักษณะของโครงข่ายแบบแอดฮอก (Characteristic of Ad Hoc Networks)

โครงข่ายแอดฮอกมีข้อแตกต่างจากโครงข่ายแบบมีสาย (Wire network) คือ โหนดในโครงข่ายมีความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) ได้อย่างอิสระไม่ขึ้นกับโหนดอื่น ๆ อีกทั้งโหนดจะสื่อสารกันผ่านตัวกลางแบบไร้สาย โดยสัญญาณที่ผ่านตัวกลางไร้สายอาจจะถูกลดทอนเนื่องจากหลาย ๆ สาเหตุทำให้ทอพอโลยีของโครงข่ายแอดฮอกมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา นอกจากนี้โหนดในโครงข่ายยังมีความสามารถในการจัดสรรเส้นทางสำหรับการส่งข้อมูลได้ด้วยตัวเอง ทำให้

โครงข่ายแอดฮอกจึงไม่จำเป็นต้องอาศัยสถานีฐานเป็นตัวกลางเพื่อส่งสัญญาณควบคุมเหมือนกับระบบเซลลูล่าร์ เพราะฉะนั้นโหนดทุกโหนดในโครงข่ายจึงทำหน้าที่เปรียบเสมือนกับอุปกรณ์หาเส้นทาง (Router) ซึ่งจะหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของแพ็กเกตข้อมูลและหน้าที่อย่างที่สองคือ การส่งต่อ (Forward) แพ็กเกตไปยังโหนดอื่น ๆ ในโครงข่าย จากคุณสมบัติและเงื่อนไขต่าง ๆ ทำให้สามารถสรุปคุณลักษณะที่สำคัญของโครงข่ายได้ดังนี้ [1]

- ทอพอโลยีแบบพลวัติ (Dynamic Topology)

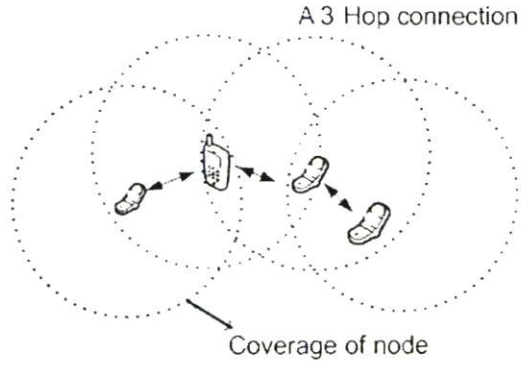
การที่โหนดในโครงข่ายแอดฮอกแต่ละโหนดจะเคลื่อนที่อย่างอิสระ และจากเงื่อนไขการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุผ่านตัวกลางไร้สายที่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอยู่ตลอดเวลาทำให้ทอพอโลยีของโครงข่ายแอดฮอกมีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม (Random) หรือมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างรวดเร็วไม่สามารถที่จะทำนายล่วงหน้าได้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่นับว่าท้าทายต่อการออกแบบโปรโตคอลการจัดสรรเส้นทางเพื่อทำให้โครงข่ายมีการทำงานอย่างประสิทธิภาพ

- เงื่อนไขบังคับทางแบนด์วิดท์ (Bandwidth-Constraints)

โหนดในโครงข่ายแอดฮอกจะสื่อสารกันผ่านข่ายเชื่อมโยงไร้สาย ซึ่งข่ายเชื่อมโยงไร้สายจะมีความจุที่ต่ำกว่าข่ายเชื่อมโยงแบบใช้สายเนื่องจากหลายสาเหตุด้วยกันเช่น ผลกระทบของการเข้าถึงหลายทาง (Multiple access) มัลติพาทเฟดดิง (Multipath fading) สัญญาณรบกวน (Noise) และสัญญาณแทรกสอด (Signal interference) เป็นต้น ซึ่งปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้อาจจะส่งผลทำให้ข่ายเชื่อมโยงไร้สายลดประสิทธิภาพอยู่ตลอดเวลาและยังส่งผลต่อปริมาณงาน (Throughput) ของระบบโดยรวมอีกด้วย

- การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-Hop Communication)

จากคุณลักษณะการแพร่กระจายสัญญาณของเครื่องรับส่งแบบไร้สายที่มีข้อจำกัดในเรื่องของระยะทางในการส่งและความแรงของสัญญาณที่ขึ้นอยู่กับระยะทาง ทำให้โหนดจะสามารถสื่อสารกันได้โดยตรงถ้าคู่โหนดที่ต้องการสื่อสารอยู่ในช่วงระยะการส่งของกันและกัน ในทางตรงกันข้าม ถ้าคู่โหนดที่ต้องการสื่อสารอยู่ห่างกันออกไปไกล การสื่อสารนั้นจำเป็นต้องอาศัยโหนดอื่นเป็นตัวกลางเพื่อจะส่งข้อมูลต่อไปถึงยังโหนดปลายทาง โดยกำหนดให้การสื่อสารระหว่างตัวส่งและตัวรับคู่หนึ่ง ๆ เรียกว่า การสื่อสารแบบหนึ่งช่วงเชื่อมต่อ (Hop) และการสื่อสารระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทางที่มากกว่าหนึ่งช่วงเชื่อมต่อจะเรียกว่า การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-Hop Communication) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ

- เงื่อนไขบังคับด้านพลังงานของแบตเตอรี่ของโหนดเคลื่อนที่ (Energy-Constraints)

โหนดสามารถปฏิบัติงานได้โดยการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่และเนื่องจากการทำงานของโหนดภายใต้โครงข่ายแอดฮอกที่โหนดจะต้องช่วยกันปฏิบัติงาน ดังนั้นถ้าระดับพลังงานของโหนด (แบตเตอรี่) เหล่านี้ถูกใช้งานจนหมด มันไม่เพียงส่งผลกระทบต่อการทำงานของโหนดนั้นเพียงอย่างเดียวแต่จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะโดยรวมของโครงข่าย เพราะฉะนั้นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบโปรโตคอลการจัดสรรเส้นทางภายใต้ข้อจำกัดพลังงานคือ การทำให้โหนดหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานประหยัดพลังงานให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

อย่างไรก็ตามยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่มีผลกระทบต่อสรรถนะของระบบแต่จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่นักวิจัยได้ให้ความสนใจและนำไปสู่การออกแบบการทำงานด้านต่าง ๆ เช่น ความสามารถในการจัดสรรเส้นทาง ความสามารถในการหาตำแหน่งของโหนดปลายทาง และการใช้อุปกรณ์ที่สามารถให้พลังงานด้านแบตเตอรี่ได้นาน เป็นต้น แต่การออกแบบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพส่วนต่าง ๆ ควรที่จะต้องคำนึงถึงผลกระทบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริงตัวอย่างเช่น การส่งผ่านสัญญาณผ่านตัวกลางไร้สาย คุณลักษณะของช่องสัญญาณและรูปแบบการใช้พลังงานเป็นต้น ซึ่งควรใช้แบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือมาพิจารณา ต่อไปในหัวข้อที่ 2.3 จะอธิบายแบบจำลองการส่งผ่านคลื่นสัญญาณและการลดทอนของสัญญาณผ่านตัวกลางไร้สายที่ได้รับความน่าเชื่อถือในการนำมาใช้ทั้งในทางปฏิบัติและการจำลองการทำงาน

2.3 การส่งผ่านคลื่นสัญญาณผ่านตัวกลางไร้สาย

การส่งผ่านสัญญาณจากตัวส่งไปยังตัวรับสัญญาณผู้ส่งมีความคาดหวังว่าสัญญาณที่ได้รับ ณ ตัวรับมีกำลังของสัญญาณที่แรง เพราะนั้นหมายถึงว่าข้อมูลที่ส่งออกไปนั้นมีความถูกต้องหรือไม่ โดยถ้าตัวรับได้รับสัญญาณที่มีความแรงสูงโอกาสที่ตัวรับจะได้รับข้อมูลอย่างถูกต้องนั้นก็สูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามความแรงของสัญญาณ ณ ตัวรับขึ้นอยู่กับตัวกลางที่ใช้เป็นหลัก ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้

จะใช้ตัวกลางไร้สายซึ่งเป็นตัวกลางที่มีหลาย ๆ ปัจจัยส่งผลกระทบต่อสัญญาณมากกว่าตัวกลางแบบอื่น ๆ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการลดทอนของสัญญาณสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท [2, 3] คือ การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss): เป็นการลดทอนของสัญญาณที่แปรตามระยะทางระหว่างตัวส่งและตัวรับ การลดทอนแบบที่สองคือ ชาโดว์อิง (Shadowing): เกิดจากสัญญาณบางส่วนถูกบดบังไปชั่วขณะจากสิ่งแวดล้อมรอบข้างและแบบสุดท้ายคือ มัลติ-พาทเฟดดิง (Multipath fading): เป็นการลดทอนที่เกิดจากสายอากาศของเครื่องรับสัญญาณอยู่ใกล้พื้นผิวมากเกินไป เพื่อลดความซับซ้อนในการพิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้จะไม่พิจารณาผลกระทบของ ชาโดว์อิงและมัลติพาทเฟดดิง โดยจะจำลองเฉพาะการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากการสูญเสียเชิงวิถีเท่านั้น ซึ่งก็มีหลายบทความที่พยายามสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสูญเสียเชิงวิถีเพื่อให้เป็นไปตามความเป็นจริงซึ่งจะกล่าวในส่วนถัดไป

2.3.1 การสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss)

ในระบบการสื่อสารไร้สายกำลังส่งที่ต้องใช้ในการส่งแพ็กเกตจากตัวส่งไปยังตัวรับแทนด้วย P_t โดยความแรงของสัญญาณ ณ ตัวรับ (P_r) สามารถจำลองได้ด้วยสมการ $1/d^{\alpha}$ เมื่อ d เป็นระยะห่างระหว่างตำแหน่งของตัวส่งและตัวรับสัญญาณ และ α เป็นค่าการสูญเสียเชิงวิถี (Path loss coefficient) จากแบบจำลองดังกล่าวหมายความว่า กำลังของสัญญาณที่รับได้ ณ ตัวรับ จะมีค่าลดลงเมื่อระยะทางที่ทำการพิจารณาสัญญาณนั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งมีหลายแบบจำลองถูกนำเสนอเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประมาณค่าต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาการส่งคลื่นสัญญาณผ่านอวกาศว่าง (Free space propagation) และการสะท้อนกับผิวเรียบ (Plane propagation)

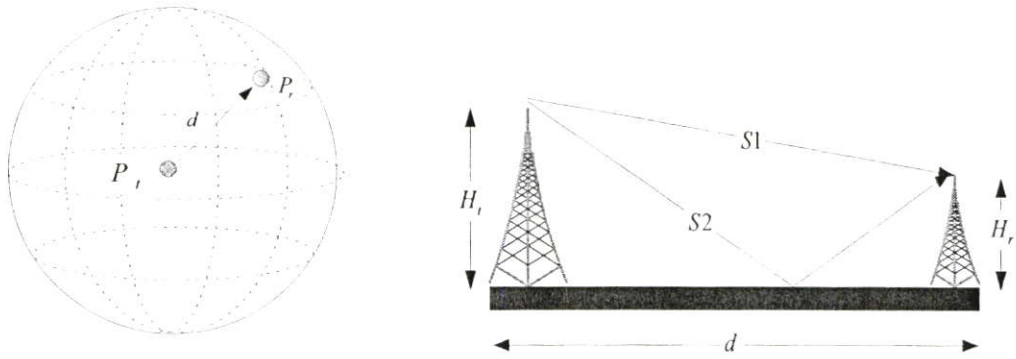
- การสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศ (Free Space path loss)

กำหนดให้ตัวส่งทำการส่งสัญญาณแบบทุกทิศทุกทางผ่านตัวกลางที่เป็นอวกาศว่าง เมื่อเราใช้เครื่องรับไปรับสัญญาณที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งตามที่แสดงดังรูปที่ 2.2(ก) ก็จะสามารถคำนวณหาขนาดหรือความแรงของสัญญาณที่ได้รับ ณ ตัวรับซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.1) ซึ่งสมการความสัมพันธ์นี้มีชื่อเรียกกันทั่วไปว่า “Friis transmission equation”

$$P_r = \frac{P_t \times G_t \times G_r \times \lambda^2}{(4\pi)^2 \times d^2} \tag{2.1}$$

โดยที่ G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง, G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ, λ คือ ความยาวคลื่น, h_t คือ ความสูงของสายอากาศส่ง, h_r คือ ความสูงของสายอากาศรับและค่า α เป็นค่าการสูญเสียเชิงวิถีมีค่าแตกต่างกันไปตามสภาพของบริเวณที่สัญญาณถูกส่งผ่าน โดยในกรณีที่ค่า

$\alpha = 2$ จะเหมาะสำหรับระยะทางสั้น ๆ (น้อยกว่า 100 เมตร) และ d คือ ระยะระหว่างตัวรับและตัวส่ง (เมตร)



(ก) การสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศว่าง (ข) การสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากพื้นผิวเรียบ

รูปที่ 2.2 แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ

- การสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากพื้นผิวเรียบ (Plan path loss)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลกระทบของการส่งสัญญาณเนื่องจากการกระทบกับพื้นผิวเรียบ ทั้งนี้สมมุติให้การส่งสัญญาณนี้เกิดขึ้นในบริเวณที่มีพื้นผิวเรียบไม่มีสิ่งก่อสร้างใด ๆ หรือเนินเขาในบริเวณนั้นเลย ดังนั้นสัญญาณที่ได้รับจะประกอบไปด้วยสัญญาณเพียง 2 ส่วนแสดงดังรูปที่ 2.2 (ข) คือ ส่วนที่แพร่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณโดยตรงจากรูปแทนด้วย $S1$ และส่วนที่กระทบจากพื้นผิวแล้วมาถึงตัวรับแทนด้วย $S2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะมีความแตกต่างจากกรณีของการส่งผ่านสัญญาณในอวกาศว่างตรงที่สัญญาณที่ได้รับมีเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งสัญญาณซึ่งจะทำให้ขนาดของสัญญาณที่ได้ก็จะเปลี่ยนแปลงไป โดยกำลังของสัญญาณที่ได้รับ ณ ตัวรับสามารถแสดงด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2.2)

$$P_r = P_t \times G_t \times G_r \times \left(\frac{H_t \times H_r}{d^2} \right)^2 \tag{2.2}$$

โดยที่ H_t คือ ความสูงของสายอากาศส่ง (เมตร) และค่า H_r คือ ความสูงของสายอากาศรับ สิ่งที่แตกต่างจากกรณีการสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศว่างคือ อัตราการลดทอนของสัญญาณมากกว่าและขนาดความสูงของสายอากาศมีผลกระทบต่อค่าการสูญเสียเชิงวิถี

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้การส่งผ่านคลื่นสัญญาณผ่านตัวกลางไร้สายที่พิจารณาถึงผลกระทบของทั้ง 2 แบบ โดยกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเพื่อนำมาใช้พิจารณาว่า ณ ขณะเวลานั้นควรจะใช้แบบจำลองใดเนื่องจากถ้าระยะระหว่างโหนดสองโหนดอยู่ห่างกันมากนั้น การนำแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศ (สมการที่ (2.2)) มาใช้ในการพิจารณานั้นจะไม่เหมาะสมและค่าที่ได้ไม่

แน่นยำ โดยค่าขีดเริ่มเปลี่ยนนี้เราเรียกว่า cross-over distance แทนด้วย d_c ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.3)

$$d_c = \frac{4\pi \times H_t \times H_r}{\lambda} \tag{2.3}$$

โดยกำหนดว่าถ้าระยะระหว่างตัวส่งและตัวรับ d มากกว่าค่า d_c จะใช้สมการที่ (2.2) (การสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากพื้นผิวเรียบ) แต่ถ้าระยะห่าง d มีค่าน้อยกว่า d_c ก็จะใช้สมการที่ (2.1) (การสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศว่าง) เพื่อใช้คำนวณหากำลังของสัญญาณที่ได้รับ ณ ตัวรับ อย่างไรก็ตามยังมีอีกหลายแบบจำลองที่ให้ความแม่นยำ ณ สถานการณ์ต่าง ๆ อีกมากเช่น แบบจำลองการสูญเสียกำลังของ Okumura และแบบจำลองชาโดว์อิง [2] เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองเหล่านี้ก็จะมีความซับซ้อนในการพิจารณามากยิ่งขึ้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้แก้ไขหรือเพิ่มสมรรถนะในส่วนนี้จึงพิจารณาเฉพาะรูปแบบที่ไม่มีความซับซ้อนมากนัก

2.4 การประมาณค่าความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยง (Estimation of Link Error Rate)

สัญญาณที่ถูกส่งไปบนตัวกลางไร้สายอาจจะถูกลดทอนเนื่องจากหลายสาเหตุเช่น สัญญาณรบกวนบริเวณรอบข้างตัวรับสัญญาณ (Ambient noise) การลดทอนเนื่องจากสภาพแวดล้อมของตัวกลางและการเคลื่อนที่ของโหนดเป็นต้น สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้สัญญาณหรือข้อมูลที่ส่งจากโหนดแหล่งกำเนิดไปยังโหนดปลายทางมีความผิดพลาดเกิดขึ้น เพราะฉะนั้นขนาดความแรงของสัญญาณที่ตัวรับนอกจากจะถูกลดทอนตามระยะทางแล้วยังเกี่ยวข้องกับคุณภาพของช่องสัญญาณ (Channel Quality) ณ ขณะเวลานั้นด้วย ถ้าข้อมูลที่ส่งไปนั้นเกิดความผิดพลาดขึ้นบนช่องสัญญาณ (ข่ายเชื่อมโยง) ผลกระทบที่เกิดขึ้นไม่เพียงแต่เสียเวลาในการส่งแต่ยังส่งผลกระทบในเรื่องของพลังงานที่จะต้องสูญเสียอีกด้วย ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการคำนวณค่าคุณภาพของข่ายเชื่อมโยงและวิธีการแก้ไขข้อผิดพลาดรวมไปถึงผลกระทบในเรื่องของการสูญเสียพลังงาน

2.4.1 แบบจำลองความผิดพลาดข่ายเชื่อมโยง (Link Error Rate Model)

คุณภาพของช่องสัญญาณ (Channel Quality) บนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนดสองโหนดนั้นสามารถพิจารณาได้จากค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate หรือ BER) [4] ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความน่าจะเป็นที่บิตข้อมูลที่ส่งออกไปนั้นจะเกิดความผิดพลาดขึ้น ถ้าบนข่ายเชื่อมโยงใด มีค่า BER สูงแสดงว่าคุณภาพของช่องสัญญาณ (ข่ายเชื่อมโยง) ที่พิจารณาอยู่นั้นไม่ดีหรือเลวร้าย โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตบนข่ายเชื่อมโยงแบบไร้สายจะมีค่ามากกว่ากรณีบนข่ายเชื่อมโยงแบบมีสายหลายเท่า เนื่องมากจากบนข่ายเชื่อมโยงไร้สายนั้นมีหลายปัจจัยที่ส่งผล

กระทบต่อสัญญาณที่ส่งออกไปอย่างเช่น สัญญาณรบกวน สัญญาณแทรกสอด สิ่งกำบังและอื่น ๆ อีกมากมาย

อัตราความผิดพลาดบิตแสดงถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณหรือข่ายเชื่อมโยง ณ ขณะเวลานั้น เพราะฉะนั้นต่อไปจะกล่าวถึงวิธีการคำนวณค่าอัตราความผิดพลาดบิต โดยค่าอัตราความผิดพลาดบิตนั้นสามารถพิจารณาได้จาก อัตราตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio, SNR) มอดูเลชัน (Modulation) และวิธีการเข้ารหัสสัญญาณ (Code Scheme) [4]

ค่า SNR เป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน โดยที่ค่าสัญญาณ (Signal) นั้นจะเป็นขนาดความแรงของสัญญาณที่วัดได้ ณ ที่ตัวรับสัญญาณ ส่วนสัญญาณรบกวนนั้นจะรวมสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่ตัวรับสัญญาณ สัญญาณรบกวนจากสภาพแวดล้อมและสัญญาณแทรกสอดจากที่โหนดส่งสัญญาณมายังตัวรับสัญญาณพร้อมกัน โดยที่สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่ตัวรับนั้นจะรวมถึงสัญญาณรบกวนแบบเทอเมอร์ (Thermal noise) และสัญญาณรบกวนแบบแพลตฟอร์ม (Platform noise) การเลือกแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่ายที่จะมาใช้งานก็สำคัญ เพราะว่าแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่ายต่างกันก็ทำให้ได้สัญญาณรบกวนแบบแพลตฟอร์มต่างกัน และแน่นอนว่าการส่งด้วยอัตราการส่งต่างกันก็จะทำให้สัญญาณรบกวนที่ได้ก็จะแตกต่างกัน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อ้างอิงจาก ORiNOCO 11b PC Card [5] ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b โดย IEEE 802.11 [6] เป็นมาตรฐานที่สำคัญสำหรับโครงข่ายไร้สาย (WLANs) ซึ่งถูกนำมาใช้โดยผู้ผลิตผลิตภัณฑ์อุปกรณ์เกี่ยวกับโครงข่ายไร้สาย ซึ่งรุ่นล่าสุดของมาตรฐานนี้คือ IEEE 802.11b ที่ถูกเรียกในทางการค้าว่า Wi-Fi (Wireless Fidelity) มาตรฐาน IEEE 802.11 นี้เป็นการจัดการระหว่างชั้นสื่อสารกายภาพ (Physical Layer) และชั้นสื่อสารย่อย MAC (MAC Layer) ซึ่งมีการเผยแพร่ในปี 1997 ซึ่งมาตรฐาน IEEE 802.11 มีตัวกลางที่ใช้ในระดับกายภาพสนับสนุนอยู่สามรูปแบบ ซึ่งรูปแบบแรกนั้นของอินฟราเรด (Infared) และอีกสองรูปแบบนั้นอยู่บนพื้นฐานของการส่งสัญญาณวิทยุ (Radio Transmission) ซึ่งหลักการของโปรโตคอลชั้นสื่อสารกายภาพนั้นถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ Physical Medium Dependent Sublayer (PMD) and Physical Layer Convergence Protocol (PLCP) โดยที่ PMD เกี่ยวข้องกับการเข้ารหัส ถอดรหัส การมอดูเลตสัญญาณ และการจัดการกับความผิดปกติของสัญญาณ ตามรายการที่ระบุไว้ใน ORiNOCO 11b นั้นมีอัตราการส่งข้อมูล 4 ระดับ 1 Mbps (Differential Binary Phase Shift Keying แทนด้วย DBPSK), 2 Mbps (Differential Quadrature Phase Shift Keying แทนด้วย DQPSK), 5.5 และ 11 Mbps (Complementary Code Keying แทนด้วย CCK) ซึ่งอัตราการส่งข้อมูลแตกต่างกันก็จะใช้มอดูเลชันที่แตกต่างกันออกไปด้วย

เนื่องจาก IEEE 802.11 ไม่ได้พิจารณาการเข้ารหัสเพื่อใช้ในการแก้ไขเมื่อข้อมูลเกิดความผิดพลาด เพราะฉะนั้นอัตราความผิดพลาดบิตก็จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนและมอดูเลชันหรืออัตราการส่งข้อมูล (Data Rate or Transmission Rate) ซึ่งค่าอัตราความผิดพลาด

บิตสามารถหาได้จากทั้งทางทฤษฎี [4] และทางการวัดจากการทำงานจริงของแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่ายที่นำมาใช้งาน โดยการคำนวณค่าจากทฤษฎีจะมีสมการในการคำนวณภายใต้วิธีการมอดูเลชันที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมีหลาย ๆ มอดูเลชันได้แสดงความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.4)

$$P_b \; \alpha \; erfc\left(\sqrt{\frac{\beta \times P_r}{N \times f}}\right) \tag{2.4}$$

เมื่อ P_b เป็นอัตราความผิดพลาดบิต (BER)

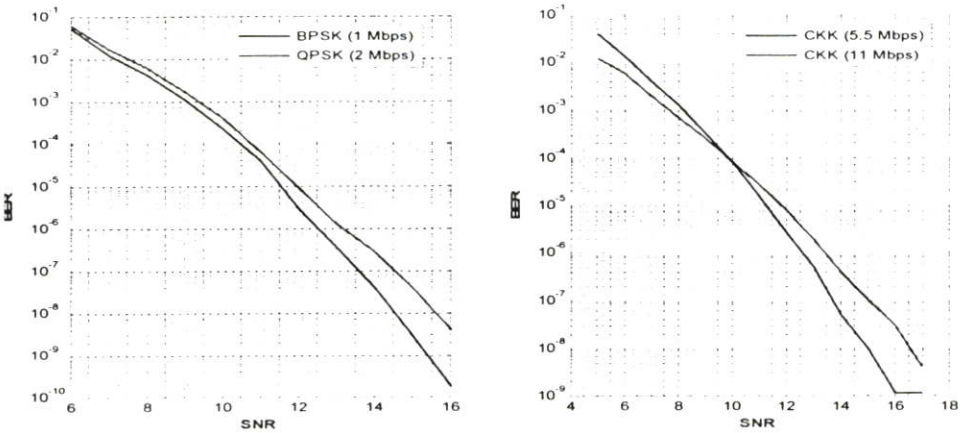
β เป็นค่าคงที่ใด ๆ

P_r เป็นความแรงของสัญญาณที่วัดได้ ณ ตัวรับสัญญาณ

N เป็น noise spectral density (noise power per Hz)

f เป็น อัตราเร็วการส่งข้อมูล (Data Rate) และ

$erfc(x)$ เป็น ฟังก์ชัน complementary ที่คำนวณได้จาก $erfc(x)=1-\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-t^2}\,dt$



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ SNR ภายใต้การมอดูเลตแบบต่าง ๆ

แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่ได้สนใจหรือเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องการมอดูเลชันเพียงแต่ศึกษาและสนใจความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตและระดับของสัญญาณ (หรือ SNR) ณ ตัวรับ เพราะฉะนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ค่าที่ทางผู้ผลิตอุปกรณ์ได้ทำการวัดภายใต้สภาวะการทำงานจริง โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตและอัตราส่วนระหว่างสัญญาณ

ต่อสัญญาณรบกวน (BER *vs* SNR) ภายใต้วิธีการมอดูเลตแบบต่างได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 หรือแสดงในรูปที่ 2.3 [4]

การส่งข้อมูลจากโหนดหนึ่งไปยังอีกโหนดหนึ่งนั้นจะส่งเป็นเฟรมหรือแพ็กเกต โดยในแต่ละแพ็กเกตประกอบไปด้วยข้อมูลขนาด s บิตเพราะฉะนั้นแทนที่เราจะพิจารณาคุณภาพของช่องสัญญาณหรือข่ายเชื่อมโยงด้วยค่าอัตราความผิดพลาดบิตแต่จะต้องใช้ค่าอัตราความผิดแพ็กเกต (Packet Error Rate, PER หรือ Frame Error Rate, FER) ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าค่า SNR มีค่าเท่ากันทุกบิตในแพ็กเกตหนึ่ง ดังนั้นเราสามารถคำนวณอัตราความผิดพลาดแพ็กเกตซึ่งแสดงแทนด้วย p ได้จากสมการที่ (2.5)

$$p = 1 - (1 - p_b)^s \tag{2.5}$$

จากที่กล่าวมาข้างต้นเราสามารถสรุปขั้นตอนการหาค่าอัตราความผิดแพ็กเกตได้ดังนี้ เมื่อโหนดปลายทางได้รับแพ็กเกตข้อมูลจากโหนดที่ส่งข้อมูลมาให้โหนดปลายทางก็จะต้องวัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ (P_r) หลังจากนั้นโหนดก็จะนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา SNR ต่อจากนั้นนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.1 ก็จะได้ค่าอัตราความผิดพลาดบิต เมื่อได้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากการคำนวณออกมาแล้วโหนดจะต้องใช้สมการที่ (2.5) ในคำนวณหาอัตราความผิดพลาดแพ็กเกตต่อไป

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ SNR ภายใต้การมอดูเลตแบบต่าง ๆ

SNR (dB)	BPSK (1Mbps)	QPSK (2 Mbps)	CCK (5.5 Mbps)	CCK (11 Mbps)
5	5.00e-2	6.00e-2	4.00e-2	1.20e-2
6	5.00e-2	6.00e-2	1.30e-2	6.00e-3
7	1.20e-2	1.70e-2	4.10e-3	2.00e-3
8	4.10e-3	6.00e-3	1.30e-3	7.00e-4
9	1.10e-3	1.70e-3	3.30e-4	2.50e-4
10	2.20e-4	4.00e-4	8.00e-5	8.00e-5
11	4.00e-5	6.30e-5	1.50e-5	2.70e-5
12	2.90e-6	8.90e-6	2.70e-6	8.00e-6

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

SNR (dB)	BPSK (1Mbps)	QPSK (2 Mbps)	CCK (5.5 Mbps)	CCK (11 Mbps)
13	3.60e-7	1.30e-6	5.00e-7	1.90e-6
14	4.00e-8	2.70e-7	5.00e-8	3.90e-7
15	3.00e-9	4.00e-8	1.00e-8	1.02e-7
16	1.80e-10	4.00e-9	1.10e-9	3.00e-8
17	1.80e-10	4.00e-9	1.10e-9	4.00e-9

2.4.2 การแก้ไขความผิดพลาดแบบ Automatic Repeat Request (ARQ)

มาตรฐาน IEEE802.11 กำหนดให้ชั้นควบคุมการเข้าใช้ช่องสัญญาณมีหน้าที่ในการให้ความน่าเชื่อในการสร้างการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point Connection) และได้แบ่งการทำงานออกเป็น 2 โหมด คือ โหมด DCF (Distributed Coordinate Function) เป็นวิธีการเข้าถึงตัวกลางแบบไม่ใช้ศูนย์กลางในการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง โดย DCF จะใช้โปรโตคอล CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) ร่วมกับ binary exponential back-off เพื่อเป็นการลดการชนกันของข้อมูล ส่วนการเข้าถึงตัวกลางอีกแบบหนึ่งเรียกว่า PCF (Point Coordinate Function) การเข้าถึงตัวกลางแบบนี้เป็นการเข้าถึงแบบใช้ศูนย์กลางในการควบคุมการเข้าถึง ซึ่งเหมาะสำหรับการส่งข้อมูลแบบ real time โดยการทำงานแบบAd Hoc จะต้องใช้โหมด DCF เพราะเป็นโครงข่ายที่ไม่จำเป็นต้องใช้สถานีฐานในการทำงาน โดยโปรโตคอลที่นำมาใช้เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูลคือ CSMA/CA ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่กำหนดให้โหนดที่ได้รับข้อมูลจะต้องมีการตอบรับ (Acknowledgement, ACK) เมื่อได้รับข้อมูลนั้นอย่างถูกต้องกลับไปยังโหนดที่ส่งข้อมูลมาให้เพื่อให้ผู้ส่งได้ทราบว่าข้อมูลที่ส่งไปนั่นผู้รับได้รับอย่างถูกต้อง ถ้าผู้ส่งไม่ได้รับแพ็กเกต ACK ก็จะทำการส่งข้อมูลเดิมซ้ำ (Retransmission) อีกครั้ง ซึ่งโปรโตคอลได้จำกัดจำนวนของการส่งซ้ำและความเสียหายจะถูกรายงานถึงชั้นที่สูงกว่าหลังจากจำนวนของการส่งซ้ำเกินค่าที่จำกัดเอาไว้

เทคนิคการควบคุมความผิดพลาดดังกล่าวเรียกว่า Automatic Repeat Request (ARQ) โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาแบบจำลองการส่งซ้ำที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบคือ การส่งซ้ำระหว่างช่วงเชื่อมต่อ (Hop-by-Hop Retransmission or HHR) และการส่งซ้ำระหว่างปลายทาง (End-to-End Retransmission or EER) แต่ละแบบจะมีลักษณะที่แตกต่างกันดังนี้ [6, 7]

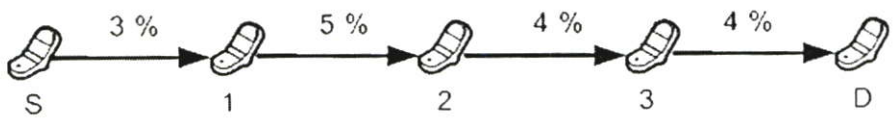
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

- การส่งซ้ำระหว่างช่วงเชื่อมต่อ (Hop-by-Hop Retransmission or HHR)

เมื่อแต่ละข่ายเชื่อมโยงรองรับการส่งต่ออย่างน่าเชื่อถือ (Reliable forwarding) ไปยังช่วงเชื่อมต่อถัดไปโดยใช้การส่งแพ็กเกตซ้ำภายใน (Localized packet retransmission) นั้นคือ การส่งซ้ำจะต้องส่งโดยโหนดที่ส่งแพ็กเกตออกไปแล้วเกิดความผิดพลาดของแพ็กเกตขึ้น ดังนั้นอัตราความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยงจะเป็นอิสระออกจากกันบนเส้นทางหนึ่ง ๆ เพราะฉะนั้นจำนวนแพ็กเกตที่ควรจะถูกส่งโดยแต่ละโหนดบนเส้นทางสามารถหาได้จากสมการที่ (2.6) ดังนี้

$$N_i = \frac{N_{req}}{1 - p_{link}^{i,i+1}} \tag{2.6}$$

เมื่อ N_{req} เป็นจำนวนแพ็กเกตที่ต้องการส่ง $p_{link}^{i,i+1}$ เป็นอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกตบนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i กับโหนด $i+1$ และ N_i เป็นจำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่จะต้องส่งด้วยโหนด i จากตัวอย่างในรูปที่ 2.4 ถ้าโหนด S ต้องการส่ง 1,000 แพ็กเกตไปยังโหนด D จากสมการที่ (2.6) จำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่ส่งจากโหนด S ไปยังโหนด D จะเท่ากับ N_{total} = $1{,}030.9(N_S) + 1{,}052.6(N_1) + 1{,}041.7(N_2) + 1{,}041.7(N_3) \approx 4{,}164$ แพ็กเกต หรือจำนวนแพ็กเกตที่ต้องส่งซ้ำจำนวน 164 แพ็กเกต



รูปที่ 2.4 การสื่อสารจากโหนด S ไปยังโหนด D ด้วยความผิดพลาดแพ็กเกตบนข่ายเชื่อมโยง

- การส่งซ้ำระหว่างปลายทาง (End-to-End Retransmission or EER)

เมื่อการกู้คืนแพ็กเกตที่เกิดความผิดพลาดบนเส้นทาง (ไม่ว่าจะเกิดขึ้นบนข่ายเชื่อมโยงใดก็ตาม) โหนดแหล่งกำเนิดจะต้องทำหน้าที่ในการส่งข้อมูลซ้ำอีกครั้งเท่านั้นและข่ายเชื่อมโยงไม่ได้รองรับการงานแบบ Link-layer retransmission เพราะฉะนั้นการส่งแพ็กเกตที่เกิดความผิดพลาดซ้ำบนข่ายเชื่อมโยงใด ๆ บนเส้นทางจะถูกส่งด้วยโหนดแหล่งกำเนิด ดังนั้นจำนวนการส่งแพ็กเกตทั้งหมดจากโหนดแหล่งกำเนิดไปยังโหนดปลายทางสามารถหาได้ดังนี้

สมมุติว่าแต่ละ N ข่ายเชื่อมโยงบนเส้นทางใด ๆ ที่มีอัตราความผิดพลาดแพ็กเกตที่เป็นอิสระจากกันเป็น $p_{link}^{i,i+1}$ ดังนั้นความน่าจะเป็นของการส่งแพ็กเกตที่ผิดพลาดตลอดทั้งเส้นทางเป็น p สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.7)

$$p = 1 - \prod_{i=1}^{N} \left(1 - p_{link}^{i,i+1}\right) \tag{2.7}$$

76761

จำนวนของการส่งรวมถึงการส่งซ้ำที่จำเป็นเพื่อให้การส่งแพ็กเกตจากโหนดแหล่งกำเนิด (S) ไปยังโหนดปลายทาง (D) อย่างน่าเชื่อถือสามารถแสดงได้ด้วย ตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบ Geometric และมีค่าความคาดหวัง (Mean) ของจำนวนการส่งแต่ละแพ็กเกตมีค่าเป็น $1/(1-p)$ เพราะฉะนั้นจำนวนแพ็กเกตเฉลี่ยทั้งหมดที่ควรจะถูกส่งด้วยแต่ละโหนดบนเส้นทางจะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.8) ดังนี้

$$N_t = \frac{N_{req}}{1-p} = \frac{N_{req}}{\prod_{i=1}^{N}\left(1-p_{link}^{i,i+1}\right)} \tag{2.8}$$

จากตัวอย่างในรูปที่ 2.4 ถ้าใช้วิธี EER จากสมการที่ (2.8) จำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่ส่งจากโหนด S ไปยังโหนด D จะเท่ากับ N_{total} = 1,177.5 * 4 ≈ 4,710 แพ็กเกต ซึ่งเป็นแพ็กเกตที่จะต้องส่งซ้ำเป็นจำนวน 710 แพ็กเกต

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการแบบ HHR กับ EER แล้วจะพบว่าการใช้วิธีการแบบ HHR จะเหมาะสมกับการใช้งานในโครงข่าย Ad Hoc มากกว่าเนื่องจากข่ายเชื่อมโยงไร้สายมีอัตราความผิดพลาดค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาถึงพลังงานที่แต่ละวิธีจะต้องใช้นั้น จากตัวอย่างที่แสดงข้างต้นแสดงให้เห็นว่าวิธีการแบบ EER จะใช้จำนวนแพ็กเกตที่ต้องส่งซ้ำเป็นจำนวนมากกว่าแบบ HHR ดังนั้นวิธีการแบบ HHR จะสามารถช่วยประหยัดพลังงานมากกว่าแบบ EER และยังใช้เวลาในการส่งแพ็กเกตไปยังโหนดปลายอย่างถูกต้องต่ำกว่า จากเหตุผลดังกล่าวในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้โหนดใช้วิธีการส่งซ้ำระหว่างช่วงเชื่อมต่อ (HHR) ในการควบคุมความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

2.5 โปรโตคอลการจัดสรรเส้นทางสำหรับโครงข่ายแบบแอดฮอก (Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Network)

โครงข่ายแอดฮอกยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ อีกมากมายที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย โดยหน้าที่การทำงานที่สำคัญที่ทุกโหนดในโครงข่ายจะต้องมีความสามารถในการทำงานนี้คือ การจัดสรรเส้นทางซึ่งเป็นหน้าที่หลักของชั้นเครือข่ายตามสถาปัตยกรรม OSI เนื่องจากไม่มีสถานีฐานเหมือนกับระบบเซล์ลูลาร์และโหนดมีระยะของกำลังส่งที่จำกัด ถ้าโหนดไม่มีความสามารถนี้ก็จะไม่เกิดการทำงานในลักษณะโครงข่ายแอดฮอกขึ้นมา

โปรโตคอลการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอกถูกแบ่งตามคุณสมบัติกว้าง ๆ ออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบการเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้า (Proactive) และแบบการจัดเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูล (Reactive or On-demand) โดยในรูปแบบการเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้านั้นทุกโหนดจะปรับปรุงข้อมูลเส้นทางของโครงข่ายอย่างต่อเนื่องและเมื่อโหนดหนึ่งโหนดใดต้องการที่จะส่งแพ็กเกตเส้นทางจะมีไว้เรียบร้อยแล้ว ดังนั้นวิธีนี้จะไม่ก่อให้เกิดการประวิงเวลาในการจัดเส้นทาง อย่างไรก็ตามสำหรับรูปแบบที่มีการเคลื่อนที่ของโหนดที่สูง การเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้าจะทำให้ขาด

แคลนจำนวนทรัพยากรที่จะใช้ในการให้ได้ซึ่งเส้นทางที่พร้อมจะใช้งานได้อยู่ตลอดเวลา ซึ่งตัวอย่างของโปรโตคอลการทำงานแบบ Proactive เช่น โปรโตคอล link state routing (LSR) และโปรโตคอล Distance vector routing (Bellman-Ford) ที่ไม่เคยที่ถูกนำมาใช้ในโครงข่ายเคลื่อนที่ เพราะว่าโปรโตคอลเหล่านี้มีความเร็วไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีของโครงข่าย จากนั้นได้มีการพยายามนำโปรโตคอลพื้นฐานทั้งสอง (Link state routing, distance vector routing) มาพัฒนาเพื่อให้เข้ากับโครงข่ายแอดฮอกคือโปรโตคอลแบบ Destination-Sequenced Distanced Vector Routing (DSDV) อีกประเภทหนึ่งคือ โปรโตคอลการจัดสรรเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูล (Reactive or demand) มีวิธีการทำงานคือ เส้นทางจะถูกหาเมื่อมีความต้องการในการส่งข้อมูล ดังนั้นโอเวอร์เฮดของการสื่อสารจะลดลง แต่จะเสียการประวิงเวลาเนื่องจากการจัดสรรเส้นทาง โดยตัวอย่างของโปรโตคอลที่ทำงานแบบวิธีนี้ คือ โปรโตคอล Dynamic Source Routing protocol (DSR) และอีกแบบคือ โปรโตคอลแบบ Ad hoc On-demand Distance Vector routing protocol (AODV) เป็นต้น ซึ่งโปรโตคอลที่นำเสนอข้างต้นส่วนใหญ่จะใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นเงื่อนไขการตัดสินเส้นทาง (Shortest Path; SP) มีส่วนน้อยที่พิจารณาถึงการหาเส้นทางที่มีคุณภาพสูง (high-quality path) สำหรับการเชื่อมต่อแบบไร้สาย [8]

ในวิทยานิพนธ์นี้สนใจเรื่องการเลือกเส้นทางที่ใช้เวลาในการสื่อสารแพ็กเกตข้อมูลเร็วและให้ความถูกต้องสูง ภายใต้สภาวะความเป็นจริงของช่องสัญญาณไร้สาย โดยใช้วิธีการแบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligent: AI) เข้ามาร่วมพิจารณาในการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ เช่น ค่าวิสัยสามารถ, ค่าประวิงเวลา เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดวิธีการการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการแบบปัญญาประดิษฐ์จะกล่าวในลำดับถัดไป

2.6 ปัญหาการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Solution)

ในปัจจุบันนี้ปัญหาที่ต้องการคำตอบที่สุด (Optimum Solution) ทางวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ คอมพิวเตอร์ หรือการทำงานต่างๆ ที่เกิดขึ้นมากมายนั้นสามารถหาคำตอบได้หลายวิธีซึ่งแตกต่างกันออกไปตามชนิดของปัญหา ความคิด เทคนิค วิธีการวิเคราะห์ปัญหานั้นๆ และความแพร่หลายในการพัฒนาศักยภาพของคอมพิวเตอร์ให้รู้จักเรียนรู้เพื่อช่วยหาคำตอบ หรือช่วยตัดสินคำตอบในขั้นต้นก็มีมากขึ้น วิธีการหาคำตอบแบบปัญญาประดิษฐ์ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจอยู่ในขณะนี้

2.6.1 การหาจุดเหมาะสมที่สุด (Optimization)

ในงานด้านต่างๆ เช่น งานวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ การจัดการ และ อื่นๆ บ่อยครั้งที่เราจะเกี่ยวข้องกับการหาจุดที่เหมาะสมที่สุด หรือจุดที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น การออกแบบเครื่องบินให้มี

น้ำหนักต่ำสุดและมีความแข็งแกร่งสูงสุด การหาเส้นทางโคจรของดาวเทียมให้ได้ระยะที่เหมาะสมที่สุด การออกแบบโครงสร้างของอาคารให้มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุด หาจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวางแผนและจัดการเวลา เป็นต้น มีวิธีการทางคณิตศาสตร์มากมายที่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อหาจุดที่ดีที่สุด การหาจุดที่ดีที่สุด (optimization or mathematical programming) ก็คือ การหาค่า x ซึ่งทำให้ $f(x)$ มีค่าต่ำสุดหรือสูงสุด

โดยที่ $$d_i(x) \le a_i, i = 1,2,...,m \tag{2.9}$$

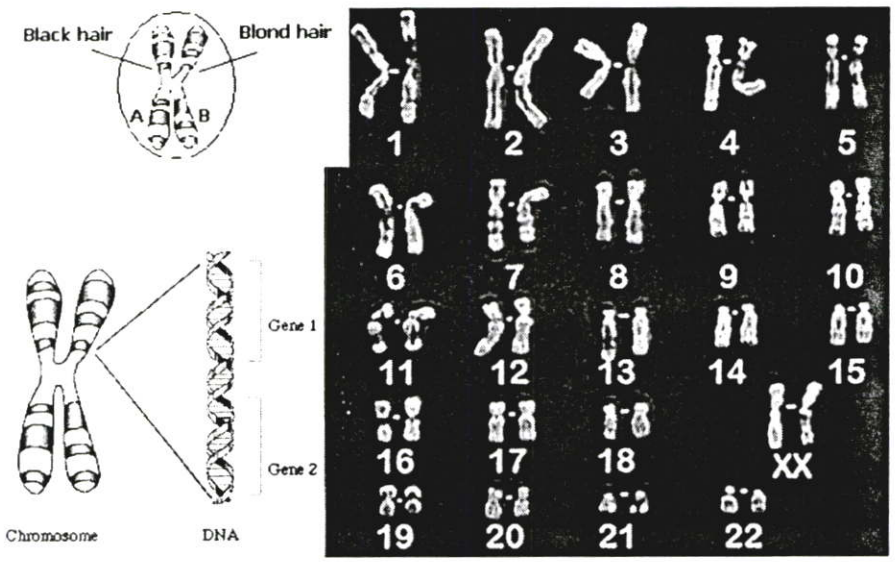
$$e_i(x) = b_i, i = 1,2,..., p \tag{2.10}$$

โดยที่ x เป็นเวคเตอร์ n มิติของฟังก์ชั่นเป้าหมาย (objective function) $d_i(x)$ เป็นข้อจำกัดที่ไม่เท่ากัน (inequality constraints) $e_i(x)$ เป็นข้อจำกัดที่เท่ากัน (equality constraints) และ a_i และ b_i เป็นค่าคงที่ การหาจุดที่ดีที่สุดสามารถแยกเป็นรูปแบบพื้นฐานของ $f(x)$ ถ้า $f(x)$ และข้อจำกัดเป็นเชิงเส้นจะเป็นการแก้ปัญหาแบบเชิงเส้น (linear programming) ถ้า $f(x)$ เป็นพจน์กำลังสอง (quadratic) และข้อจำกัดเป็นเชิงเส้น จะเป็นการแก้ปัญหาแบบกำลังสอง (quadratic programming) ถ้า $f(x)$ ไม่เป็นเชิงเส้นและข้อจำกัดไม่เป็นเชิงเส้น จะเป็นการแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear programming)

การหาจุดที่ดีที่สุด (global optimum) แบ่งเป็นสองลักษณะ คือ การหาจุดสูงสุด (global maximum) และการหาจุดที่ต่ำที่สุด (global minimum) ของฟังก์ชัน ฟังก์ชันที่ต้องการหาจุดที่สูงที่สุดหรือจุดที่ต่ำที่สุดนั้นอาจจะมีหลายจุด ที่เป็นลักษณะคล้ายกับจุดที่สูงที่สุด (local maximum) หรือ จุดที่คล้ายกับจุดที่ต่ำที่สุด (local minimum) เราเรียกเป็น multi-modal functions ในการแยกจุดที่เป็นจุดที่ดีที่สุดจริงๆ (global optimum) ออกจาก จุดที่ดีที่สุดบริเวณแคบ (local optimum) นั้นเป็นปัญหาที่ยากมาก ซึ่งวิธีการหาจุดที่ดีที่สุดนั้นก็มีขั้นตอนวิธีการต่าง ๆ มากมาย เช่น เช่น อาณาจักรมด (Ant Colony System)โดยมีพื้นฐานมาจากพฤติกรรมการหาอาหารของมด หรือการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค(Particle Swarm Optimization) โดยมีพื้นฐานมาจากพฤติกรรมการอพยพของฝูงนก หรือการเรียนรู้ของฝูงปลา เพื่อนำมาใช้แก้ปัญหาแทนวิธีการทางคณิตศาสตร์ เป็นต้น จีเนติกอัลกอริทึมเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จำลองรูปแบบวิธีการทางชีววิทยา ในการให้กำเนิดประชากรรุ่นใหม่หรือขยายเผ่าพันธุ์ในรุ่นลูก รุ่นหลานต่อไป ซึ่งอาศัยพื้นฐานความคิดของวิวัฒนาการทางธรรมชาติถ่ายทอดลักษณะต่างๆ ทางพันธุกรรม โดยปฏิบัติตามกระบวนการทางพันธุศาสตร์ เพื่อจะใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงที่สุดของปัญหาด้วยคอมพิวเตอร์

2.6.2 พันธุศาสตร์ทางชีววิทยา

เมนเดล (Mendel) บิดาแห่งวิชาพันธุศาสตร์ ค้นพบว่ายีนส์ (Genes) หน่วยเก็บลักษณะทางกรรมพันธุ์เป็นตัวกำหนดลักษณะภายนอก ซึ่งยีนส์หลายๆ ยีนส์จะเรียงตัวกันอยู่บนเส้นโครโมโซม (Chromosome) อีกทีหนึ่งในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต โดยจะอยู่กันเป็นคู่ๆ แต่จะแตกต่างกันที่ค่าลักษณะต่างๆ ในแต่ละยีนส์ที่เรียกว่าแอลลี (Allele) ซึ่งแบบต่างๆ ของยีนส์ที่มีแอลลีต่างกันในแต่ละตำแหน่งยีนส์เดียวกันเรียกว่า จีโนไทป์ (Genotype) สำหรับลักษณะภายนอกที่ปรากฏออกมาให้เห็นเรียกว่า ฟีโนไทป์ (Phenotype) เช่น ในคนจะมีโครโมโซม 23 คู่ 46 โครโมโซม ซึ่งแต่ละโครโมโซมจะประกอบด้วยยีนส์ต่างๆ กันราว 1250 ยีนส์ ตัวอย่างคู่โครโมโซมที่ 1 ในคนดังรูปที่ 2.5 ซึ่งประกอบด้วยยีนส์ลักษณะสีผม สีตา และอื่นๆ อีกประมาณ 1247 ลักษณะ และโครโมโซม 1A มีแอลลีของยีนส์ลักษณะสีผมคือ สีดำ ส่วนโครโมโซม 1B มีแอลลีของยีนส์ลักษณะสีผมคือ ผมสีบลอนด์



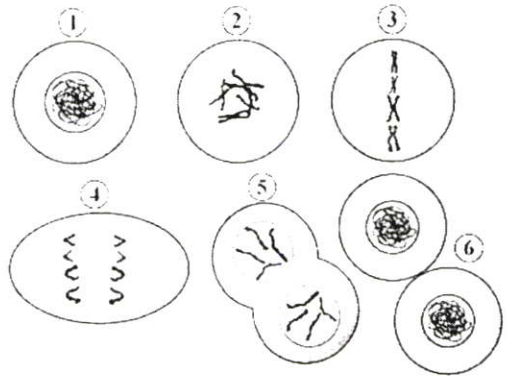
รูปที่ 2.5 แสดงโครโมโซมทางพันธุกรรม

การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมเป็นการถ่ายทอดลักษณะต่างๆ ของสิ่งมีชีวิตที่เกิดขึ้น เมื่อมีการแบ่งตัวของเซลล์สิ่งมีชีวิต ซึ่งมี 2 แบบ คือ

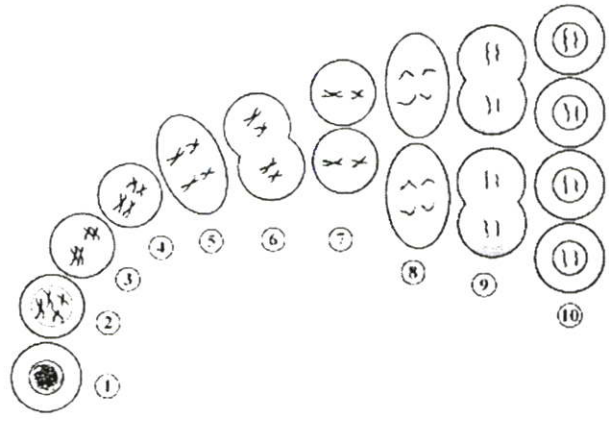
(1) การเพิ่มจำนวนเซลล์ เป็นการแบ่งตัวแบบไมโตสิส (Mitosis) โดยโครโมโซมแต่ละตัวจะขยายตัวเพิ่มจำนวนตัวเองขึ้นมาเป็นสอง และเยื่อหุ้มนิวเคลียส (Nucleolus) จะสลายลงเพื่อดึงแยกโครโมโซมที่เพิ่มจำนวนขึ้นออกจากโครโมโซมเดิมเป็นสองด้าน แล้วเยื่อหุ้มนิวเคลียสจะถูกสร้างขึ้นใหม่กลายเป็นเซลล์ใหม่ 2 เซลล์ ที่มีโครโมโซมเหมือนเดิม ดังรูปที่ 2.6 (ก)

(2) การแบ่งตัวของเซลล์สืบพันธุ์ เป็นการแบ่งตัวแบบไมโอสิส (Meiosis) โดยโครโมโซมจากเซลล์พ่อ 1 โครโมโซมและโครโมโซมจากเซลล์แม่ 1 โครโมโซม จะเริ่มจับคู่กันที่โครโมโซม

ชนิดเดียวกัน ในขณะเดียวกันโครโมโซมแต่ละตัวทั้งที่มาจากพ่อและแม่ ต่างก็จำลองแบบของตนเพิ่มขึ้นมาอีกแต่ละโครโมโซม ทำให้ได้จำนวนโครโมโซมทั้งหมดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า และดำเนินการทางพันธุกรรมจนถึงระยะแบ่งตัว โครโมโซมพ่อพร้อมกับแบบจำลองและโครโมโซมแม่พร้อมกับแบบจำลองที่ได้จะแยกคู่ไปรวมกันเป็น 2 นิวเคลียส กลายเป็นเซลล์ใหม่ 2 เซลล์ ซึ่งจะแบ่งตัวต่อทันที โดยแต่ละโครโมโซมพ่อแยกตัวออกจากแบบจำลอง และโครโมโซมแม่ก็แยกตัวออกจากแบบจำลองรวมกันเป็นเซลล์ใหม่ 4 เซลล์ ดังรูปที่ 2.6 (ข)



(ก) การเพิ่มจำนวนเซลล์

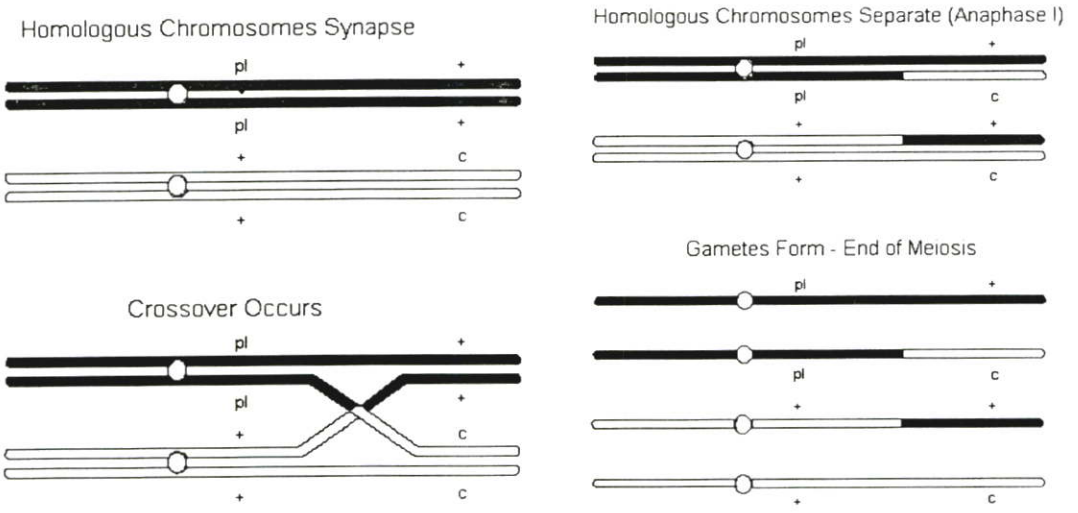


(ข) การแบ่งตัวของเซลล์สืบพันธุ์

รูปที่ 2.6 แสดงการแบ่งตัวของเซลล์ทางพันธุกรรม

วิธีการทางพันธุศาสตร์ในระหว่างที่เกิดการแบ่งตัวของไมโอสิสนั้น โครโมโซมจะมีโอกาสแลกเปลี่ยนส่วนบางส่วนซึ่งกันและกัน อันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ครอสโอเวอร์ (Crossover) ของลักษณะต่างๆ ขึ้น ซึ่งการครอสโอเวอร์นั้นเกิดขึ้นขณะที่มีการจำลองแบบเพิ่มขึ้น และเกิดขึ้นระหว่างโครโมโซมพ่อกับโครโมโซมแม่ ไม่ใช่เกิดขึ้นระหว่างโครโมโซมพ่อกับแบบจำลอง ซึ่งการครอสโอเวอร์จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนลักษณะของยีนส์ต่างๆ ของคู่

โครโมโซมพ่อกับแม่ โดยเนื่องจากยีนส์แต่ละยีนส์เรียงตัวกันบนเส้นโครโมโซมนั้นไม่ได้อยู่กันอย่างหนาแน่น แต่มีระยะห่างกันอย่างไม่สม่ำเสมอ เพราะคุณสมบัติของยีนส์นั้นเป็นโมเลกุลของสารโปรตีนประกอบตัวกันทางเคมี ช่องว่างระหว่างยีนส์นี่เองจะเป็นตำแหน่งที่แตกต่างออกมาได้เวลาครอสโอเวอร์ และแลกเปลี่ยนยีนส์ของโครโมโซมตรงส่วนที่อยู่หลังรอยแตก โดยจะถูกย้ายไปอยู่อีกโครโมโซมหนึ่งทั้งหมด นอกจากนี้ยังจะสามารถแตกอีกกี่แห่งก็ได้ ซึ่งผลนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถที่จะเชื่อมกันมากน้อยเพียงไรของช่องว่างระหว่างยีนส์ ดังรูปที่ 2.7

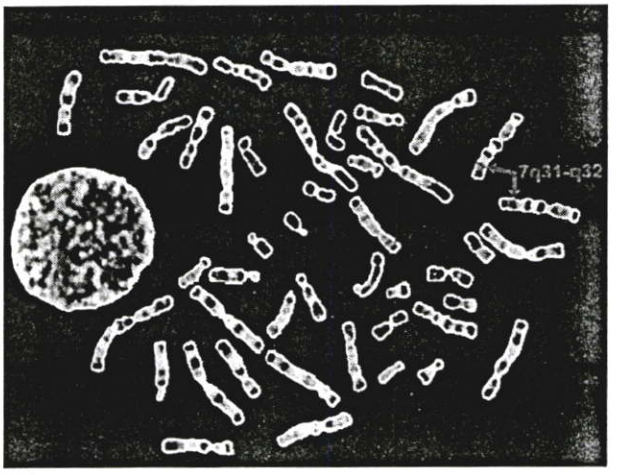


รูปที่ 2.7 แสดงการครอสโอเวอร์ทางพันธุศาสตร์

ประโยชน์ที่เกิดจากการครอสโอเวอร์ที่เราจะเห็นได้ คือ ทำให้มีโอกาสที่จะได้ลักษณะต่างๆ มาอยู่รวมกันได้หลายแบบมากขึ้น ทำให้สิ่งมีชีวิตรุ่นลูกที่เกิดขึ้นมามีความหลากหลายมากขึ้น และอาจทำให้มีโอกาสเกิดสิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะต่างๆ ที่ดีพอเหมาะรวมอยู่ด้วยกันได้อย่างพอดี เหมาะสมกับสิ่งแวดล้อม ถ้าการเกิดเซลล์ใหม่โดยถ่ายทอดโครโมโซมไม่มีการครอสโอเวอร์แล้ว โครโมโซมใดเคยมียีนส์ลักษณะใดก็จะมีลักษณะนั้นอยู่เรื่อยๆ รุ่นลูกก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน โอกาสที่สิ่งมีชีวิตนั้นจะเจริญหรือปรับตัวให้ดีขึ้นย่อมมีได้ยากกว่าการเปลี่ยนลักษณะยีนส์ ใหม่หลายๆ แบบมากขึ้น

ลักษณะต่างๆ ของสิ่งมีชีวิตจะสามารถอยู่รอดได้โดยการคัดเลือกทางธรรมชาติคือ คัดเลือกโครโมโซมที่มีลักษณะที่ทำให้สิ่งมีชีวิตแข็งแรงเพียงพอ หรือเหมาะสมต่อสภาพแวดล้อม ซึ่งจะสามารถอยู่รอดและถ่ายทอดไปยังลูกหลาน ดังนั้นการคัดเลือกของธรรมชาติเพื่อถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมเป็นเพียงส่วนประกอบของการเปลี่ยนแปลงลักษณะของยีนส์ไปจากเดิมที่ควรเป็นไปตามการถ่ายทอด ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดลักษณะที่แปลกๆ ออกไปมากมายสำหรับสิ่งมีชีวิตหนึ่งๆ ซึ่งเท่ากับเป็นการให้โอกาสแก่ธรรมชาติในการที่จะเลือกลักษณะแปลกๆ มากขึ้น เนื่องจากขบวนการวิวัฒนาการโดยธรรมชาติเองนั้นช้ามาก เพราะกว่าที่ธรรมชาติจะปรับสภาพแวดล้อมให้สิ่งมีชีวิตค่อยๆ ปรับตัวเองให้เหมาะสมนั้นมีโอกาสน้อยมาก การผ่าเหล่านั้นทุก

ลักษณะในแต่ละยีนส์ย่อมมีโอกาสที่จะเกิดความเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมได้พอๆ กัน และถ้าเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมขณะนั้นก็จะคงอยู่ต่อไป แต่ถ้าการเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะใดเกิดผิดจังหวะ คือไม่เหมาะสมกับสภาพนั้นๆ ก็จะไม่ถูกคัดเลือกและหายไป ซึ่งข้อสรุปนี้ได้จากการทดลองโดยการนำเอายีนส์ของแบคทีเรียมาผสมกัน และจัดสภาพแวดล้อมที่ไม่อำนวยต่อการผสมกันแล้ว ยีนส์จะปรับตัวเองเพื่อเร่งขบวนการผสมพันธุ์จนได้ผลดีในรุ่นหลัง ตัวอย่างของการผ่าเหล่าในอดีตคือ การกำเนิดของปลาทองนั้นมีต้นกำเนิดมาจากการกลายพันธุ์หรือผ่าเหล่าของปลาชิว และในปัจจุบันลักษณะใหม่ที่เกิดจากการผ่าเหล่าก็ยังคงมีให้เห็นอยู่ เช่น ความสามารถของเชื้อแบคทีเรียในการต้านทานต่อยาฆ่าเชื้อ หรือเซลล์ผิดปกติอันเกิดจากกัมมันตภาพรังสีต่างๆ ซึ่งมีผลต่อสารภายในเซลล์ ทำให้ลักษณะของยีนส์ในเซลล์เปลี่ยนไป ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.8 เป็นต้น



รูปที่ 2.8 แสดงการมิวเตชันทางพันธุศาสตร์

2.6.2.1 จีเนติกอัลกอริทึมเบื้องต้น

ปี ค.ศ. 1975 John Holland เริ่มสนใจศึกษาในทฤษฎีวิวัฒนาการทางธรรมชาติ (Natural Evolution) ในการกำเนิดประชากร (Population) สิ่งมีชีวิตในรุ่นต่อๆ ไปโดยกระบวนการธรรมชาติทางชีววิทยา ประกอบด้วย การคัดเลือกทางธรรมชาติ (Natural Selection) คือสิ่งมีชีวิตใดแข็งแรงกว่า ย่อมมีโอกาสอยู่รอดได้มากกว่า นั่นหมายถึงการมีโครโมโซมซึ่งประกอบด้วยยีนส์ต่างๆ ที่มีลักษณะที่ดีนั้นจะมีโอกาสอยู่รอดได้มากกว่า โครโมโซมที่สามารถอยู่รอดได้ก็จะถูกถ่ายทอดยีนส์ที่มีลักษณะที่ดีเหล่านี้ไปยังลูกหลานได้มากกว่าเช่นกัน และกระบวนการทางพันธุศาสตร์ (Genetic Operation) คือการกำเนิดโครโมโซมใหม่โดยการผสมพันธุ์เพื่อถ่ายทอดยีนส์จากครอสโอเวอร์หรือกลายพันธุ์จากมิวเตชัน

จากความเชื่อในวิวัฒนาการทางธรรมชาติ ที่แสดงถึงคุณลักษณะที่เป็นอยู่ของสิ่งมีชีวิตโดนการถ่ายทอดลักษณะต่างๆ บนโครโมโซมนั้นมีคุณสมบัติทั่วไปที่ยอมรับกันคือ

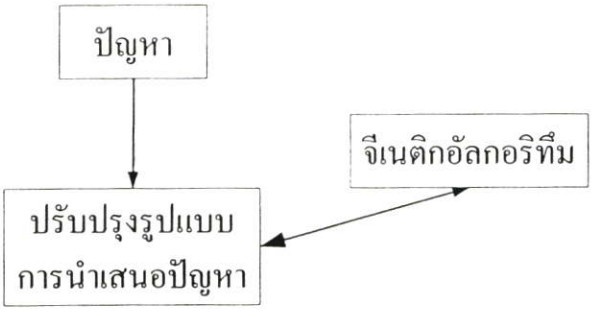
(1) วิวัฒนาการเป็นผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเปลี่ยนแปลงบนโครโมโซม ที่เป็นอยู่ซึ่งแดงลักษณะของสิ่งมีชีวิตนั้นๆ

(2) ธรรมชาติทางการคัดเลือกมีความสัมพันธ์กับโครโมโซมที่แสดงถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างที่ดี ที่จะคัดเลือกเพื่อถ่ายทอดส่วนของโครงสร้างที่ดี

(3) การถ่ายทอดในขณะที่เกิดวิวัฒนาการนั้นโครโมโซมพ่อ-แม่มีการแลกเปลี่ยนส่วนโครงสร้างเพื่อสร้างโครโมโซมลูก และเหตุผลที่ทำให้เกิดโครโมโซมลูกที่แตกต่างออกไปคือขบวนการผ่าเหล่า

(4) วิวัฒนาการทางธรรมชาติมิได้เป็นสิ่งที่เกิดจากความจดจำ แต่เป็นกระบวนการที่เกิดจากโครงสร้างต่างๆ ในโครโมโซมที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นในขณะนั้น

Holland คิดว่าแนวความคิดจากคุณสมบัติเหล่านี้ น่าจะนำมาปรับใช้กับคอมพิวเตอร์ให้ช่วยแก้ปัญหาที่ยุ่งยากต่างๆ ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงที่สุด เขาจึงได้ทำการวิจัยโดยจำลองแบบเพื่อทดสอบกับปัญหาแบบต่างๆ โดยมีจุดหมายที่จะศึกษาระบบปรับปรุงการประมวลผลเอง (self adaptive process) และเพื่อสร้างโปรแกรมระบบผู้เชี่ยวชาญ (artificial system software) เพื่อแก้ปัญหา โดยอาศัยแนวความคิดของระบบทางธรรมชาติ และค้นพบวิธีการใหม่ซึ่งเรียกว่า จีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms: GA)



รูปที่ 2.9 แสดงหลักการเบื้องต้นของ GA

รูปที่ 2.9 แสดงหลักการเบื้องต้นในการใช้ GA แก้ปัญหา โดยจะต้องมีการปรับปรุงรูปแบบปัญหาในการนำเสนอ GA ในลักษณะที่เหมาะสม เพราะ GA เป็นวิธีการค้นหาคำตอบโดยอาศัยวิธีการเลียนแบบการคัดเลือกทางธรรมชาติ และธรรมชาติทางพันธุกรรมโดยการรวมกันหรือการสลับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ อันเป็นองค์ประกอบโครงสร้างของปัญหาที่ให้คำตอบที่ต้องการอาศัยหลักการสุ่ม เพื่อปรับปรุงความสามารถในการค้นหาคำตอบที่ดีขึ้น การค้นหาคำตอบจากรุ่นหนึ่งถัดไปตามวิวัฒนาการทางธรรมชาตินั้น คำตอบในรุ่นใหม่เกิดขึ้นจากการสร้างความสัมพันธ์ของโครงสร้างต่างๆ ที่ประกอบด้วยค่าตัวแปรที่เหมาะสมดีในรุ่นก่อน ดังนั้นจึงได้คำตอบที่ดีขึ้น จะเห็นได้ว่าวิธีการพื้นฐานของ GA เป็นแบบการสุ่ม แต่มีหลักการและประสิทธิภาพจากการคาดเดาคำตอบใหม่จากสถิติคำตอบเดิมที่ดี ซึ่งแตกต่างจากวิธีการทั่วไป คือ

(1) GA ค้นหาคำตอบภายใต้โครงสร้างของปัญหาอันเกิดจากการกำหนดรหัส (coding) รูปแบบโครงสร้างจากกลุ่มตัวแปรต่างๆ ของปัญหานั้น ไม่ใช่ค้นหาคำตอบจากค่าของกลุ่มตัวแปรนั้น

(2) GA ค้นหาคำตอบโดยพิจารณาจากประชากรคำตอบ หรือกลุ่มคำตอบ ไม่ใช่พิจารณาจากคำตอบใดคำตอบหนึ่ง

(3) GA ค้นหาคำตอบจากผลลัพธ์ของกลุ่มค่าตัวแปรที่เป็นฟังก์ชั่นเป้าหมายของปัญหา

(4) GA ค้นหาคำตอบโดยอาศัยการถ่วงน้ำหนักความเหมาะสมของแต่ละคำตอบจากกลุ่มคำตอบนั้นๆ

2.6.2.2 ฟังก์ชันเป้าหมายกับฟังก์ชันความเหมาะสม

การหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาของ GA มีพื้นฐานอยู่บนผลลัพธ์จากการหาคำตอบที่ผ่านมา วิธีการของ GA จะไม่พิจารณาจากขั้นตอนของการแก้ปัญหาแต่จะพิจารณาโดยตัดสินว่าคำตอบใหม่ที่ได้รับดีขึ้นหรือไม่ หรือเป็นคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ต้องการหรือไม่ จากฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function: *f*) เนื่องจากแต่ละปัญหาจะสามารถกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายซึ่งเป็นฟังก์ชันที่แสดงความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปร พารามิเตอร์ เงื่อนไข หรือข้อกำหนดต่างๆ ของปัญหานั้นๆ ที่ระบุคำตอบใดคำตอบหนึ่งที่สามารถเป็นไปได้ ณ ค่าพารามิเตอร์ เงื่อนไข หรือข้อกำหนดชุดดังกล่าว สำหรับฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness Function: *F*) เป็นฟังก์ชันที่กำหนดค่าความเหมาะสม (fitness) ของแต่ละโครโมโซม เปรียบเสมือนค่าความสามารถในการอยู่รอดของแต่ละโครโมโซมและเป็นฟังก์ชันที่กำหนดโอกาส หรือสัดส่วนที่แต่ละโครโมโซมเหมาะสมจะถูกคัดเลือกมากน้อยเพียงใด นั่นคือ ฟังก์ชันความเหมาะสมจะเป็นฟังก์ชันที่แสดงถึงค่าคำตอบที่เกิดขึ้นจากชุดตัวแปรของปัญหาของโครโมโซมนั้นดีเพียงใด โดยทั่วไปแล้วเรามักใช้ฟังก์ชันเป้าหมายเป็นฟังก์ชันความเหมาะสมหรืออาจจะใช้ฟังก์ชันเป้าหมายที่ถูกปรับให้เหมาะสมกับการนำเสนอ GA เป็นฟังก์ชันความเหมาะสมก็ได้

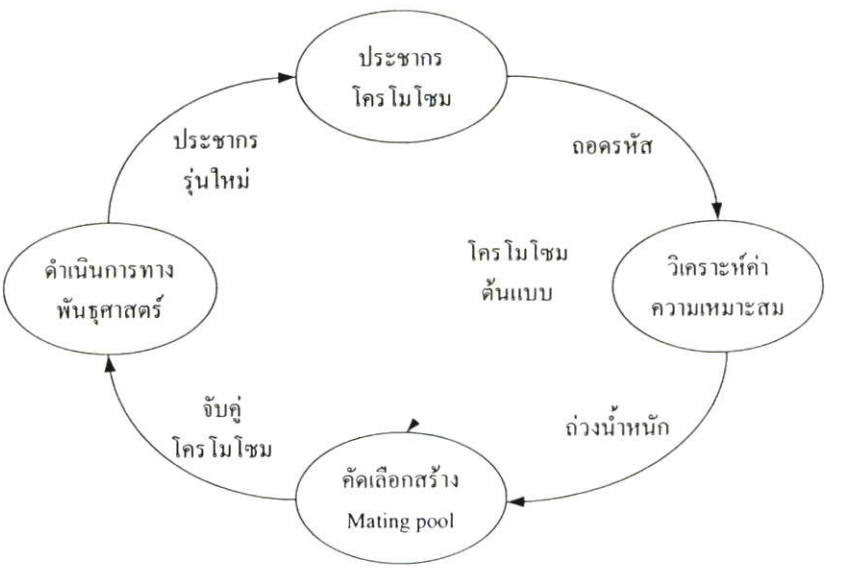
2.6.2.3 รูปแบบโครโมโซม

เราทราบกันแล้วว่าวิวัฒนาการทางธรรมชาติชีววิทยานั้นเป็นความเปลี่ยนแปลงต่างๆของสิ่งมีชีวิตเกิดขึ้นในโครโมโซม ดังนั้นจุดเริ่มต้นของการจำลองแบบทางธรรมชาติของ GA เพื่อใช้แก้ปัญหาจึงเริ่มจากการมองปัญหาเทียบเท่ากับโครโมโซมชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยยีนส์ลักษณะต่างๆ ซึ่งหมายถึงลำดับข้อมูลต่างๆ ที่จะแปลความหมายแล้วให้ค่าคำตอบของปัญหาค่าหนึ่ง การมองภาพยีนส์ของ GA ให้ถือเสมือนยีนส์ทางพันธุกรรมที่แสดงความหมายหรือเป็นตัวแทนคำตอบในคำตอบหนึ่งหรือลักษณะใดลักษณะหนึ่งทางพันธุ์ ในทางพันธุศาสตร์นั้นยีนส์ เป็นตัวแสดงลักษณะที่อยู่รอดในสภาพแวดล้อมขณะนั้น สำหรับ GA นั้นยีนส์เป็นตัวแสดงค่าคำตอบของปัญหา

ที่แปรผันไปตามการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งโดยทั่วไปยีนส์หมายถึงตัวแปร พารามิเตอร์ เงื่อนไข หรือข้อกำหนดต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปัญหา ดังนั้นการกำหนดรูปแบบโครโมโซมของแต่ละปัญหาโดยการแปลงตัวแปร พารามิเตอร์ เงื่อนไข หรือข้อกำหนดต่างๆ ให้อยู่ในรูปลำดับของยีนส์บนโครโมโซมหรือเรียกว่าสตริงค์ (string) อันประกอบด้วยบิท (bit) หรือเรียกว่าอักขระ (character) ซึ่งลักษณะต่างๆ ที่เป็นไปได้ของแต่ละยีนส์คือค่าของบิท (bit value) หรือค่าตัวแปรพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นไปได้ และรูปแบบของบิทที่จัดเรียงบนโครโมโซมคือ จีโนไทป์ (genotype) ที่จะแสดงถึงค่าของตัวแปรพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นไปได้ชุดหนึ่งหรือ ฟีโนไทป์ (phenotype) นั่นเอง การกำหนดรูปแบบโครโมโซมของปัญหาให้เป็นไปตามธรรมชาติ โดยกำหนดรหัสในรูปแบบตัวเลขหรือตัวอักษรในช่วงที่จำกัดตามค่าตัวแปรหรือพารามิเตอร์ และประกอบรวมกันในจำนวนยีนส์หรือความยาวของโครโมโซมที่คงที่ เช่น หากต้องการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ $y = x^2$ ที่ x เป็นจำนวนเต็มอยู่ในช่วง [0,31] แล้ววิธีการของ GA ในการแก้ปัญหาโดยกำหนดรูปแบบโครโมโซมจากการกำหนดรหัสตัวแปร x เป็นตัวเลขไบนารี 0 หรือ 1 จำนวน 5 ตำแหน่งซึ่ง x จะมีค่าตั้งแต่ 00000 ถึง 11111 เป็นค่า 0 ถึง 31 ตามต้องการ เป็นต้น

2.6.2.4 วัฏจักรจีเนติกอัลกอริทึม

เมื่อกำหนดรูปแบบโครโมโซม และฟังก์ชันความเหมาะสมของปัญหาแล้ว GA จะสามารถประมวลผลหาคำตอบของปัญหาได้ โดยสร้างวิวัฒนาการกลุ่มคำตอบในรุ่นต่อไปตามวัฏจักรการทำงานของ GA (Genetic Algorithm Cycle) ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งมี 4 ขั้นตอน คือ



รูปที่ 2.10 แสดงวัฏจักรจีเนติกอัลกอริทึม

(1) สร้างประชากรโครโมโซมรุ่นเก่าตามรูปแบบโครโมโซมที่กำหนดไว้ โดยประชากรต้นกำเนิด (Initial Population) เกิดจากการสร้างชุดโครโมโซมต้นกำเนิด จากการสุ่มสร้างค่าแต่ละบิทของแต่ละโครโมโซม

(2) วิเคราะห์ค่าความเหมาะสมแต่ละโครโมโซม โดยถอดรหัสค่าตัวแปร พารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละบิทในโครโมโซมและคำนวณค่าความเหมาะสมจากฟังก์ชันความเหมาะสมที่กำหนดไว้

(3) สร้าง mating pool คือ ชุดโครโมโซมต้นแบบหรือชุมโครโมโซมพ่อ-แม่ ที่สามารถอยู่รอดเป็นต้นแบบ ซึ่งอาศัยการจำลองการคัดเลือกทางธรรมชาติ โดยพิจารณาถ่วงน้ำหนักจากค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม หากโครโมโซมมีค่าความเหมาะสมมากก็จะมีโอกาสถูกคัดเลือกเป็นต้นแบบมาก

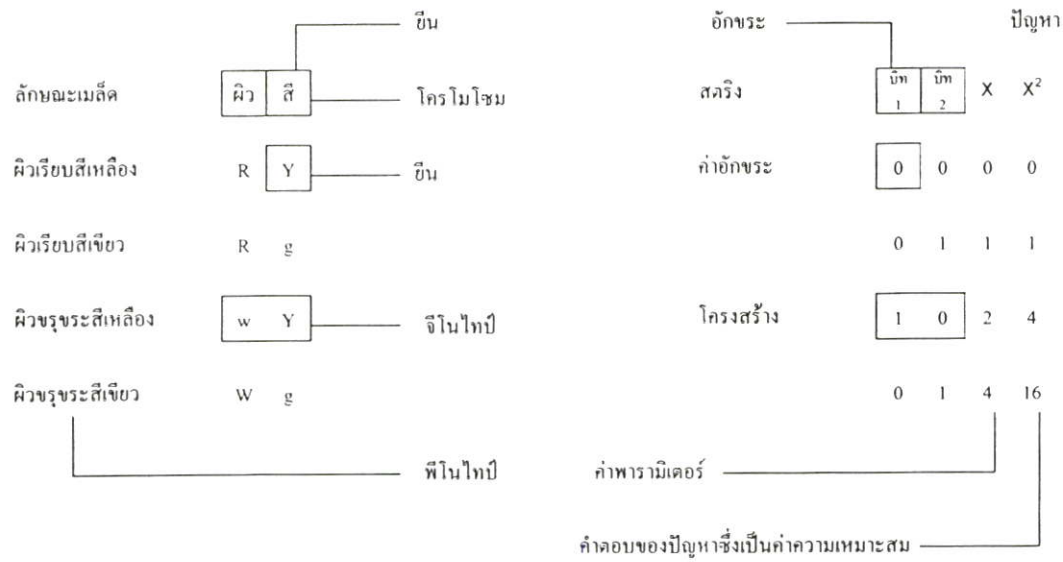
(4) ดำเนินการทางพันธุศาสตร์โดยสุ่มจับคู่โครโมโซมต้นแบบใน mating pool เพื่อสร้างประชากรโครโมโซมรุ่นใหม่ ซึ่งตัวดำเนินการทางพันธุศาสตร์ประกอบด้วย ครอสโอเวอร์ โดยการแลกเปลี่ยนค่าบิทบางส่วนของโครโมโซมซึ่งกันและกัน หรือมิวเตชัน โดยสุ่มเปลี่ยนค่าบิทของแต่ละโครโมโซม เป็นต้น

การค้นหาคำตอบของ GA จะประมวลผลซ้ำตามวัฏจักร GA จนกว่าจะได้รับคำตอบที่พอใจตามกฎเกณฑ์ที่ตั้งไว้ หรือในระยะเวลาตามจำนวนรุ่นที่ดำเนินการที่ต้องการ ซึ่งแสดงอัลกอริทึมการทำงานของ GA ดังนี้

```
อัลกอริทึม GA
        t:=0;
        //สร้างประชากรโครโมโซมต้นกำเนิดโดยการสุ่ม
        Initpopulation P(t);
        //วิเคราะห์ค่าความเหมาะสมแต่ละโครโมโซมประชากรต้นกำเนิด
        Evaluate P(t);
        //ตรวจสอบเงื่อนไขความพอใจ (เช่น เวลา, ค่าความเหมาะสม เป็นต้น)
        while not terminate
        begin
            t:t+1;
            //คัดเลือกโครโมโซมต้นแบบจากประชากรรุ่นก่อน
            P'(t):=Selectparents P(t-1);
            //แลกเปลี่ยนส่วนยีนส์ภายในโครโมโซมต้นแบบ
            Recombine P'(t);
            //มิวเตชันโครโมโซมต้นแบบ
            Mutate P'(t);
            //วิเคราะห์ค่าความเหมาะสมของประชากรรุ่นใหม่
            Evalutate P'(t);
            //ประชากรรุ่นใหม่กลายเป็นประชากรรุ่นเก่าต่อไป
            P(t):=P'(t);
        end;
END
```

2.6.2.5 พันธุศาสตร์ทางชีววิทยา กับ จีเนติกอัลกอริทึม

เพื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางพันธุศาสตร์ กับ จีเนติกอัลกอริทึมแล้ว เรากล่าวโดยสรุปได้คือ ในทางพันธุศาสตร์ แต่ละโครโมโซมประกอบด้วยหน่วยเก็บลักษณะหรือยีนส์ ซึ่งเก็บค่าแสดงลักษณะ หรือ แอลลี และแต่ละแบบของชุดยีนส์เรียกว่าจีโนไทป์ ซึ่งแสดงลักษณะภายนอกที่ปรากฏเรียกว่า ฟีโนไทป์ ดังรูปที่ 2.11(ก)



(ก) ลักษณะทางพันธุศาสตร์ของโครโมโซมควบคุมลักษณะของเมล็ดถั่ว ซึ่งมียีนส์ลักษณะผิวของเมล็ดคือ มีลักษณะเรียบ (R) หรือขรุขระ (w) และยีนส์ลักษณะสีของเมล็ดคือมีสีเหลือง (Y) หรือ สีเขียว (g)

(ข) ลักษณะทางจีเนติกอัลกอริทึมของปัญหาในการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $f(x) = x^2$ ซึ่งค่า x มีค่าอยู่ในช่วง [0, 4] โดยพารามิเตอร์ x จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปไบนารีสตริง

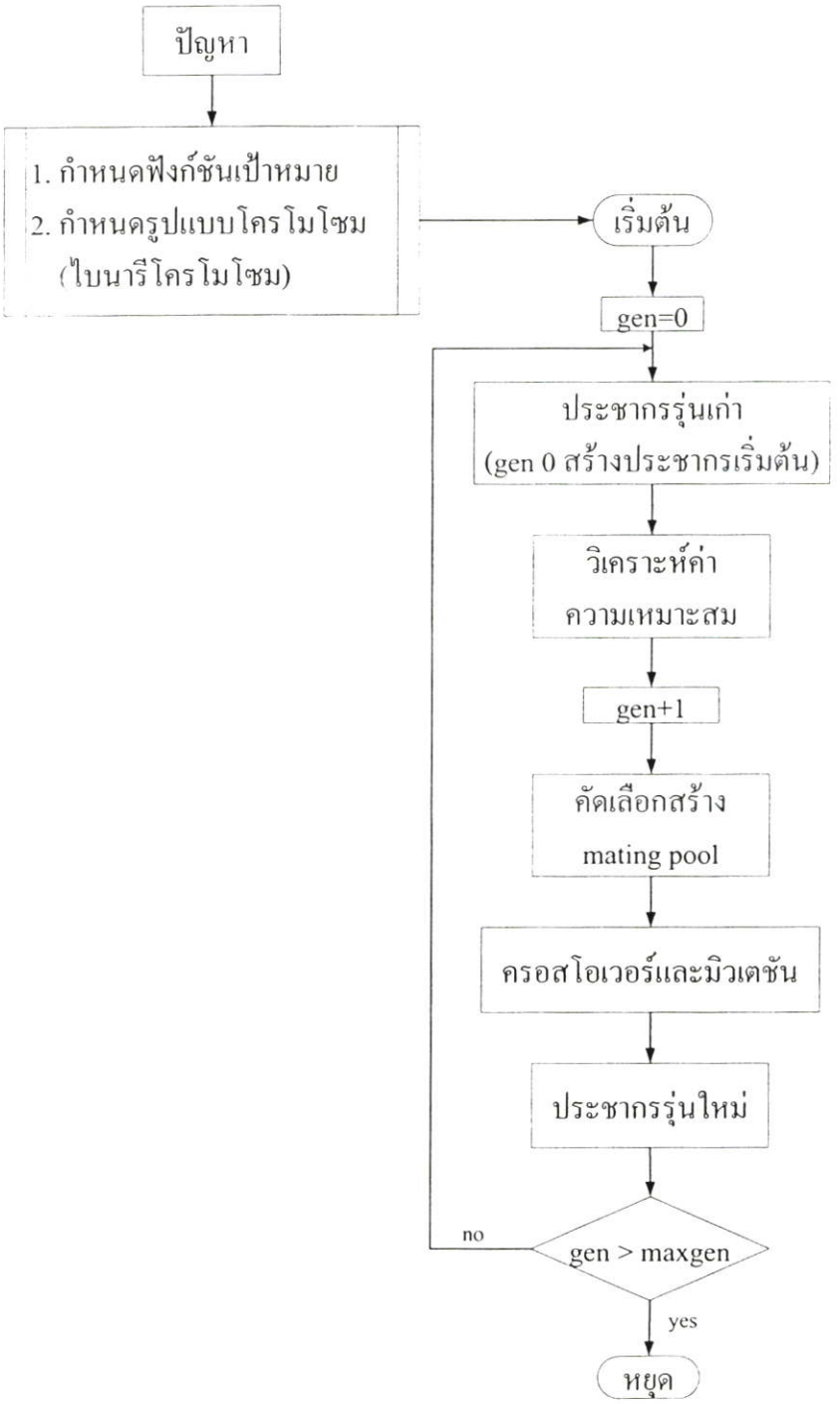
รูปที่ 2.11 แสดงรายละเอียดทางพันธุศาสตร์ กับ จีเนติกอัลกอริทึม

สำหรับในทางจีเนติกอัลกอริทึม ตัวแปรหรือพารามิเตอร์ของปัญหาจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของสตริง ซึ่งมักเรียกว่า โครโมโซม ประกอบด้วยอักขระหรือบิท แต่ละตำแหน่งของโครโมโซมจะเก็บค่าอักขระหรือบิท ที่แสดงถึงโครงสร้างของแต่ละโครโมโซมที่มีค่าตัวแปรหรือพารามิเตอร์ของปัญหาแตกต่างกัน และเป็นตัวกำหนดค่าความเหมาะสมตามฟังก์ชันความเหมาะสมของแต่ละปัญหา ดังรูปที่ 2.11(ข) ซึ่งสรุปความหมายเปรียบเทียบคำศัพท์ ที่ใช้ทางพันธุศาสตร์กับทางจีเนติกอัลกอริทึม ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงคำศัพท์ทางพันธุศาสตร์กับทางจีเนติกอัลกอริทึม

Natural Genetic	Genetic Algorithm
chromosome	string
gene	character, bit
allele	character value, bit value
locus	string position
genotype	structure
phenotype	A decode structure

2.6.2.6 จีเนติกอัลกอริทึมแบบง่าย



รูปที่ 2.12 แสดงไดอะแกรมการทำงานของ จีเนติกอัลกอริทึมแบบง่าย

GA ในยุคเริ่มแรกของ Holland นั้นคือ จีเนติกอัลกอริทึมแบบง่าย (Simple Genetic Algorithm: SGA) ซึ่งมีขั้นตอนพื้นฐานที่มีกระบวนการไม่มากนักและง่ายในการศึกษาความเข้าใจในแต่ละขั้นตอนการทำงานของ GA เพื่อแก้ปัญหาในการหาคำตอบ แสดงดังไดอะแกรมในรูปที่ 2.12 แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ขั้นเตรียมการและขั้นตอนการทำงาน

สำหรับในส่วนของขั้นเตรียมการนั้นเป็นส่วนของการปรับรูปแบบของปัญหาให้เหมาะสมสำหรับการนำเสนอ GA เพื่อใช้ในการแก้ปัญหานั้นๆ ประกอบด้วย

1. **กำหนดฟังก์ชันความเหมาะสม** เพื่อความสะดวกและง่ายต่อความเข้าใจในขั้นตอนการทำงานต่างๆ จะกำหนดตัวอย่างปัญหาสำหรับอธิบายรายละเอียดการหาคำตอบของ SGA คือ ปัญหาการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $y = x^2$ ที่ x มีค่าระหว่างจำนวนเต็ม I [0, 31] ดังนั้น

ตัวอย่าง: ฟังก์ชันเป้าหมายคือ $f = x^2$

และกำหนดให้ฟังก์ชันความเหมาะสมคือ $F = x^2$

ซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดคือ ค่า x ที่มีค่าความเหมาะสมสูงสุด (***MAX(F)***)

2. **กำหนดรูปแบบโครโมโซม** รูปแบบโครโมโซมของ SGA นั้นเป็นแบบไบนารี โดยค่าตัวแปรหรือพารามิเตอร์ของปัญหาจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของไบนารีโครโมโซม คือประกอบด้วยบิทที่มีค่าเป็น 0 หรือ 1 ซึ่งเป็นค่าในเลขฐานสองและมีความยาว (Chromosome Length: *lchrom*) ตามแต่จะกำหนด ซึ่งแสดงด้วยสัญลักษณ์ได้ดังนี้

ซึ่ง $B_i \in I[0,1]$

ตัวอย่าง: วิธีการเข้ารหัสแบบไบนารีโดยการแปลงค่าพารามิเตอร์ x ให้อยู่ในรูปไบนารีบิท 5 บิท ($lchrom$ = 5) ดังนั้นโครโมโซมของปัญหาจะมีค่าอยู่ในช่วง 00000 ถึง 11111 ซึ่งเมื่อถอดรหัสแล้วจะทำให้ x มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 31 ตามที่ต้องการ

ในส่วนของรายละเอียดขั้นตอนการทำงานของ SGA จะเป็นขั้นตอนพื้นฐานเบื้องต้นแบบง่ายประกอบด้วย

1. **ประชากรรุ่นเก่า (Old Population)** เป็นชุดโครโมโซมที่จะถูกคัดเลือกไปเป็นต้นแบบสำหรับสร้างประชากรรุ่นใหม่ (New Population) ในวิวัฒนาการรุ่น (generation: gen) ต่อไป โดยประชากรเริ่มต้นที่ gen=0 จะถูกสร้างขึ้นโดยการสุ่มตามจำนวนโครโมโซมในแต่ละรุ่น (Population Size: popsize) ที่กำหนด

ตัวอย่าง :

ลำดับ	โครโมโซม
1	01110
2	11001
3	01000

ชุดโครโมโซมในรุ่นเริ่มต้นนี้เป็นชุดโครโมโซมที่กำหนดให้ในแต่ละรุ่นประกอบด้วย 4 โครโมโซม ซึ่งแต่ละโครโมโซมเกิดจากการสุ่มค่าไบนารี 0 หรือ 1

2. **วิเคราะห์ค่าความเหมาะสม** เป็นขั้นตอนของการถอดรหัสจากรูปแบบโครโมโซมที่กำหนดไว้ เพื่อคำนวณค่าความเหมาะสมตามฟังก์ชันความเหมาะสม คือ $F = x^2$ ดังนั้นการวิเคราะห์ค่าความเหมาะสมของ SGA โดยถอดรหัสเลขฐานสองของแต่ละโครโมโซมเป็นค่าของตัวแปร x และคำนวณค่าความเหมาะสมคือ ค่า x^2

ตัวอย่าง :

ลำดับ	โครโมโซม	x	ค่าความเหมาะสม
1	01110	14	196
2	11001	25	625
3	01000	8	64
4	10011	19	361

ชุมโครโมโซมในรุ่นเริ่มต้นมีค่าเหมาะสมเป็น 196, 625, 64 และ 361 ตามลำดับ

3. **การคัดเลือก** เป็นขั้นตอนที่จำลองแบบการคัดเลือกทางธรรมชาติเพื่อสร้าง mating pool โดยคัดเลือกชุดโครโมโซมรุ่นเก่าให้เป็นโครโมโซมต้นแบบหรือโครโมโซมพ่อ-แม่ เพื่อใช้สร้างโครโมโซมลูกรุ่นต่อไป สำหรับการคัดเลือกของ SGA เป็นแบบอ้างอิงค่าความเหมาะสม (Fitness-base Selection) โดยพิจารณาค่าความเหมาะสมเป็นตัวตัดสินว่าโครโมโซมใดในรุ่นเก่ามีโอกาสถูกเลือกเป็นโครโมโซมพ่อ-แม่มากน้อยเพียงใด โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีจะถูกเลือกต่อการสุ่มเลือกแต่ละครั้งสูง การกำหนดค่าความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกต่อการสุ่มเลือกแต่ละครั้ง (Probability of Selected Value: *pselect*) ของแต่ละโครโมโซมโดยกำหนดจากค่าความเหมาะสมเทียบกับผลรวมของค่าความเหมาะสมทั้งหมด ดังสมการที่ 2.11

$$pselect_i = \frac{F_i}{\sum F} \tag{2.11}$$

ซึ่งสามารถคำนวณค่าที่คาดหวังว่าจะสุ่มได้ (Expected Value: ***E***) ของแต่ละโครโมโซมแต่ละรุ่นดังสมการที่ 2.12

$$E_i = pselect_i * popsize = \frac{F_i}{F} \tag{2.12}$$

สำหรับวิธีการสุ่มโครโมโซมต้นแบบของ SGA เป็นแบบจำลองการหมุนวงล้อถ่วงน้ำหนัก (Roulette Wheel: RW) ซึ่งกำหนดขนาดแต่ละช่องของวงล้อนั้นตามค่าความน่าจะเป็นที่จะสุ่มได้ในแต่ละครั้งของแต่ละโครโมโซม ซึ่งมีวิธีการดังนี้

(1) หาค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม

(2) หาค่าความน่าจะเป็นที่จะสุ่มได้ในแต่ละครั้งของแต่ละโครโมโซม

(3) หาความถี่สะสม (q) ของค่าความน่าจะเป็นของแต่ละโครโมโซมดังสมการที่ 2.13

$$q_i = \sum_{j=1}^{i} pselect_j \tag{2.13}$$

(4) สร้างเลขสุ่มจำนวนจริง (r) มีค่าอยู่ในช่วง [0.0,0.1]

(5) เลือกโครโมโซมลำดับที่ r ซึ่ง r มีค่าอยู่ระหว่าง q_{i-1} และ q_i

ตัวอย่าง:

ลำดับ	โครโมโซม	x	ค่าความเหมาะสม (F)	ค่าความน่าจะเป็น ($pselect_i$)	จำนวนที่คาดหวัง (E_i)	จำนวนที่สุ่มได้จาก RW
1	01110	14	196	0.157	0.628	1
2	11001	25	625	0.502	2.008	2
3	01000	8	64	0.051	0.204	0
4	10011	19	361	0.290	1.160	1
	รวม		1246	1.000	4.000	
	ค่าเฉลี่ย		312	0.250	1.000	
	ค่าสูงสุด		625	0.502	2.008	

ตัวอย่างการกำหนดค่าความน่าจะเป็น โดยกำหนดจากค่าความเหมาะสมเทียบกับผลรวมของค่าความเหมาะสมทั้งหมด จะเห็นได้ว่าในการคัดเลือกโครโมโซมต้นแบบจาก 4 โครโมโซมนี้ โอกาสที่จะสุ่มได้โครโมโซมลำดับที่ 1 ต่อการสุ่มแต่ละครั้งเท่ากับ 0.157 และโอกาสที่จะสุ่มได้โครโมโซมลำดับที่ 2, 3, 4 ต่อการสุ่มแต่ละครั้งเท่ากับ 0.502, 0.051 และ 0.290 ตามลำดับ และจำนวนโครโมโซมต้นแบบที่สุ่มได้โดยจำลองการหมุนวงล้อดังนี้

ลำดับโครโมโซม	1	2	3	4
ค่าความเหมาะสม (F)	196	625	64	361
ค่าความน่าจะเป็นที่สุ่มได้แต่ละครั้ง ($pselect_i$)	0.157	0.502	0.051	0.290
ความถี่สะสมค่าความน่าจะเป็น (q_i)	0.157	0.659	0.710	1.000
สร้างเลขสุ่มในหารหมุนวงล้อแต่ละครั้ง (r)	0.333	0.844	0.456	0.128
ลำดับโครโมโซมที่ถูกเลือก $q_{i-1} \le r \le q_i$	2	4	2	1

ซึ่งจำนวนที่สุ่มได้เป็นโครโมโซมต้นแบบใน mating pool ของแต่ละโครโมโซมเป็น 1, 2, 0 และ 1 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าโครโมโซมลำดับที่ 2 มีค่าความเหมาะสมสูงที่สุดจะมีโอกาสถูกเลือกในจำนวนที่มากที่สุด ส่วนโครโมโซมลำดับที่ 3 มีค่าความเหมาะสมต่ำมากจึงมีโอกาสที่จะไม่ถูกเลือกเลย

4. **ดำเนินการทางพันธุศาสตร์** เป็นขั้นตอนที่จำลองแบบธรรมชาติทางพันธุกรรม ซึ่งตัวดำเนินการทางพันธุศาสตร์ของ SGA คือ ครอสโอเวอร์และมิวเตชัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

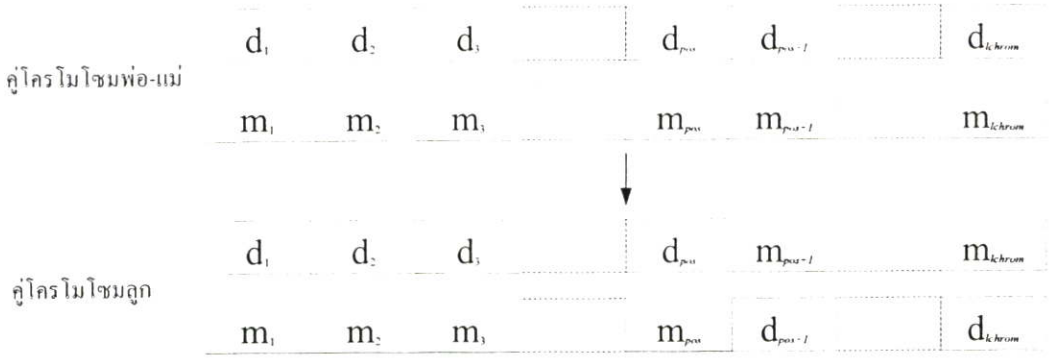
4.1 **ครอสโอเวอร์** เป็นตัวดำเนินการในการแลกเปลี่ยนส่วนของโครโมโซมพ่อ-แม่ ตามการกำหนดอัตราความน่าจะเป็นของการครอสโอเวอร์ (Probability of Crossover: P_c) เพื่อสร้างชุดโครโมโซมรุ่นใหม่หรือโครโมโซมลูก มีขั้นตอนการทำงานคือ

ขั้นตอนแรก : สุ่มจับคู่โครโมโซมพ่อ-แม่ใน mating pool ที่สร้างไว้จากการเลือก

ขั้นตอนที่สอง : สร้างเลขสุ่มจำนวนจริง (r) มีค่าอยู่ในช่วง [0.0, 0.1] โดย ถ้า $r \le P_c$ แล้วโครโมโซมพ่อ-แม่นั้นจึงมีการครอสโอเวอร์

ขั้นตอนที่สาม : ครอสโอเวอร์โดยการแลกเปลี่ยนส่วนของคู่โครโมโซมพ่อ-แม่นั้นซึ่งการครอสโอเวอร์ของ SGA เป็นการครอสโอเวอร์แบบ 1 จุด (One-point Crossover) แสดงดังรูปที่ 2.13 ดังนี้

- สุ่มเลือกตำแหน่ง pos เป็นตำแหน่งที่จะครอสโอเวอร์ซึ่ง pos มีค่าในช่วง $[1, lchrom-1]$
- แลกเปลี่ยนค่าในแต่ละบิทของคู่โครโมโซมพ่อ-แม่ตั้งแต่ตำแหน่งที่ $pos+1$ ถึง $lchrom$ ซึ่งจะทำให้เกิดโครโมโซมลูกใหม่ 2 โครโมโซม



(pos คือตำแหน่งที่สุ่มได้ซึ่ง $pos \in [1, lchrom-1]$)

รูปที่ 2.13 ครอสโอเวอร์แบบ 1 จุด

จำนวนการครอสโอเวอร์ในแต่ละรุ่นดำเนินการขึ้นอยู่กับการกำหนดค่า P_c ซึ่งแตกต่างกันในแต่ละปัญหา เช่น ถ้าจำนวนประชากรแต่ละรุ่น popsize เท่ากับ 30 โครโมโซม และกำหนดให้ P_c = 0.6 แล้วจำนวนการครอสโอเวอร์ในแต่ละรุ่นเท่ากับ P_c * (popsize/2)=0.6*(30/2)=9 ครั้ง (การครอสโอเวอร์ 1 ครั้งเกิดจากโครโมโซม 2โครโมโซม)

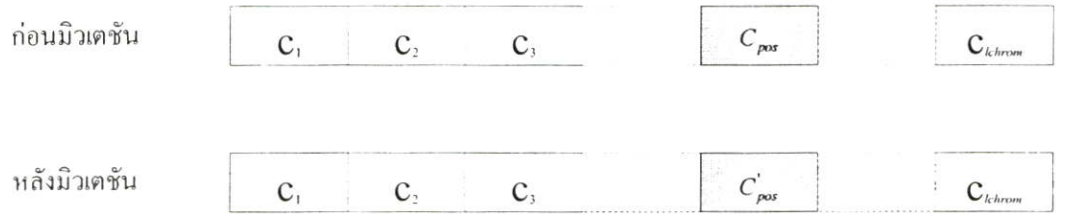
ตัวอย่าง: กำหนด P_c = 0.5 โครโมโซมพ่อ-แม่ใน mating pool จากการคัดเลือกครอสโอเวอร์

ลำดับที่คัดเลือก	Mating pool	สุ่มจับคู่พ่อแม่	เลขสุ่ม (r)	ก่อนครอสโอเวอร์	สุ่มตำแหน่ง (pos)	หลังครอสโอเวอร์	x	ค่าความเหมาะสม (F)	ลำดับโครโมโซมลูก
2	11001	1,2	0.321	01110	2	01001	9	81	1
4	10011		≤ 0.5	11001		11110	30	**900**	2
2	11001	2,4	0.654	ไม่ครอสโอเวอร์		11001	25	625	3
1	01110		>0.5			10011	19	361	4
	รวม							1967	
	ค่าเฉลี่ย							492	
	ค่าสูงสุด							900	

จากการสุ่มจับคู่โครโมโซมพ่อ-แม่ใน mating pool ได้โครโมโซมลำดับที่ 1 คู่ลำดับที่ 2 และ ลำดับที่ 2 คู่กับลำดับที่ 4 แต่เฉพาะในโครโมโซมคู่แรกจะเกิดการครอสโอเวอร์ เนื่องจากเลขสุ่ม $r \leq 0.5$ ตามอัตราการครอสโอเวอร์ที่กำหนด โดยตำแหน่งในการครอสโอเวอร์ที่สุ่มได้คือ pos =2 จะเห็น

ได้ว่าโครโมโซมพ่อ-แม่ทั้งหมดในรุ่นก่อนเป็น 900 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการจำลองแบบกระบวนการครอสโอเวอร์ ตามธรรมชาติทางพันธุศาสตร์ของ SGA ช่วยสร้างคำตอบที่ดีขึ้น

4.2 **มิวเตชัน** เป็นตัวดำเนินการผ่าเหล่าตัวหนึ่งที่อาจช่วยให้เกิดโครโมโซมมีค่าความเหมาะสมดีขึ้น หลังจากการครอสโอเวอร์ โดยกลับค่าของบิทเป็นค่าใหม่ในตำแหน่งบิทที่สุ่มได้ ตามอัตราความน่าจะเป็นของการมิวเตชันในตาละบิท (Probability of Mutation: P_m) ที่กำหนด สำหรับการมิวเตชันของ SGA นั้นเป็นแบบไบนารีมิวเตชัน (Binary Mutation) โดยกลับค่าบิทเป็นคอมพลิเมนต์คือ จาก 0 เป็น 1 หรือจาก 1 เป็น 0 ดังรูปที่ 2.14



(pos คือตำแหน่งที่สุ่มได้ซึ่ง $pos \in 1[1.lchrom]$ และ C'_{pos} คือค่าคอมพลิเมนต์ของ C_{pos})

รูปที่ 2.14 ไบนารีมิวเตชัน

จำนวนการมิวเตชันในแต่ละรุ่นขึ้นอยู่กับการกำหนดค่า P_m ซึ่งแตกต่างกันในแต่ละปัญหา เช่น ถ้าจำนวนประชากรแต่ละรุ่น popsize เท่ากับ 30 โครโมโซม ซึ่งแต่ละโครโมโซมประกอบด้วย 5 บิท และกำหนดให้ P_m = 0.02 แล้ว จำนวนมิวเตชันในแต่ละรุ่นเท่ากับ P_m* popsize* $lchrom$ = 0.02*30*5 = 3 บิท

ตัวอย่าง: กำหนด P_m = 0.1 ดำเนินการมิวเตชันโครโมโซมลูกที่ได้จากการครอสโอเวอร์ดังนี้

ลำดับ	ก่อน มิวเตชัน	เลขสุ่ม (r)					หลัง มิวเตชัน	x	ค่าความเหมาะสม (F)
1	01001	0.581	0.346	0.062	0.785	0.401	01101	13	169
2	11110	0.829	0.534	0.947	0.308	0.277	11110	30	900
3	11001	0.398	0.646	0.494	0.765	0.029	01000	24	576
4	10011	0.175	0.335	0.837	0.577	0.308	11110	19	361
	รวม								2006
	ค่าเฉลี่ย								**502**
	ค่าสูงสุด								900

จากการสุ่มตำแหน่งที่จะมิวเตชันโดยสร้างเลขสุ่ม r ของแต่ละตำแหน่งบิทในแต่ละโครโมโซมแล้ว ตำแหน่งบิทที่ 3 ของโครโมโซมลำดับที่ 1 และตำแหน่งบิทที่ 4 ของโครโมโซมลำดับที่ 3 เป็นตำแหน่งที่ $r \leq 0.1$ ตามอัตราการมิวเตชันที่กำหนดจึงเกิดมิวเตชัน ทำให้โครโมโซมที่มีความเหมาะสมจาก 81 และ 625 เป็น 169 และ 576 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามิวเตชันเป็นตัวดำเนินการที่อาจทำให้โครโมโซมมีความเหมาะสมสูงขึ้นหรือลดลงได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยของค่าความเหมาะสมดีขึ้นจาก 492 เป็น 502 แสดงถึงการหาคำตอบของ SGA โดยส่วนมากดีขึ้น และความสำคัญของการหาคำตอบของ GA นั้นเป็นความต้องการได้คำตอบโดยพิจารณาจากคำตอบที่ดีขึ้นเกิดขึ้น ซึ่งจะมีโอกาสอยู่รอดเพื่อถ่ายทอดส่วนที่ดีในรุ่นต่อไป

5. **ประชากรรุ่นใหม่** เป็นชุดโครโมโซมลูกที่เกิดจากขั้นตอนของวิวัฒนาการต่าง ๆ ทั้งหมด ซึ่งประชากรรุ่นใหม่ทั้งหมดที่เกิดขึ้น จะถูกถ่ายทอดกลายเป็นประชากรรุ่นเก่าสำหรับวิวัฒนาการในรุ่นถัดไป ซึ่งเรียกวิวัฒนาการแบบนี้ว่า การถ่ายทอดแบบทั่วไปหรือ รีโพรดักชันแบบทั่วไป (General Reproduction) กระบวนการต่างๆ จะถูกปฏิบัติซ้ำๆ จนกระทั่งถึงรุ่นที่มากที่สุด (max generation: maxgen) ที่ต้องการ

การทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของ SGA จะทดสอบโดยใช้การหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $y = x^n$ ที่ x มีค่าระหว่าง [1, 2^l-1] ซึ่ง l คือจำนวนบิทของโครโมโซม ด้วยวิธีการของ SGA กำหนดให้ฟังก์ชันเป้าหมายคือ $f = x^n$ เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์การทำงานของ SGA จึงปรับให้ค่าความเหมาะสมอยู่ในช่วง [0, 1] ซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดจะมีค่าความเหมาะสมเป็น 1 ดังนั้น ฟังก์ชันความเหมาะสมคือ $F = \left(\frac{x}{2^l - 1} \right)^n$

SGA Parameter

Population size (popsize)	= 30
Chromosome length (l)	= 30
Maximum # of generation (maxgen)	= 80
Crossover probability (Pc)	= 8.0000000000E-01
Mutation probability (Pm)	= 3.3300000000E-02

Intial Generation Statistics

Intial population max fitness	= 9.4811791207E-01
intial population average fitness	=1.0300239870E-01
intial population minimum fitness	=5.3711099438E-21
intial population sum fitness	=3.0900719609E+00

Population Report

	Generation 0			pos			Generation 1		
#	String	x	fitness	#	parents	1 2	String	x	fitness
1)	111111101010001111000110101101	1.068E+09	0.9481	1)	(1, 2)	5 30	111001101010001111000110101101	9.674E+08	0.3523
2)	111101110011111100110101101111	1.037E+09	0.7062	2)	(1, 2)	5 30	111101111011111100110101100101	1.039E+09	0.7206
3)	111011000011011100101110001111	9.908E+08	0.4474	3)	(3, 3)	16 30	111101000011011110101110001111	1.024E+09	0.6243
4)	111000111100010110000110110011	9.553E+08	0.3109	4)	(3, 3)	16 30	111011000011011100101110001111	9.908E+08	0.4474
5)	110111111011000110101100100000	9.382E+08	0.2595	5)	(1, 4)	18 30	111111101010001111000110101101	1.068E+09	0.9481
6)	110101110011111110111101011101	9.028E+08	0.1766	6)	(1, 4)	18 30	101000111100010110000110110011	6.869E+08	0.0115
7)	110011101000000001101110001011	8.661E+08	0.1166	7)	(3, 6)	13 30	111011000011011100101110000111	9.908E+08	0.4474
8)	101111101100010111110001000111	8.002E+08	0.0528	8)	(3, 6)	13 30	110100110011111110111101011011	8.860E+08	0.1464
9)	101100000010001111110111000111	7.388E+08	0.0238	9)	(6, 4)	11 30	110101110011111110111000110111	9.028E+08	0.1766
10)	101100000000011001111010011111	7.383E+08	0.0236	10)	(6, 4)	11 30	111000111100010110000110110011	9.553E+08	0.3109
11)	101001010001010111110101101000	6.924E+08	0.0124	11)	(2, 5)	1 30	111101110011111101110101101111	1.037E+09	0.7062
12)	100111101011111001111001110111	6.658E+08	0.0084	12)	(2, 5)	1 30	110111110011000110101100100001	9.361E+08	0.2538
13)	100001010111001101111111111100	5.597E+08	0.0015	13)	(3, 7)	12 30	111010001011011100101110101111	9.761E+08	0.3853
14)	011111101001000100110100101000	5.309E+08	0.0009	14)	(3, 7)	12 30	110011101010000001101110001011	8.667E+08	0.1173
15)	011111000000010111110010010011	5.202E+08	0.0007	15)	(6, 1)	6 30	110101110011111110111101011011	9.028E+08	0.1766
16)	011101010011100101000001001100	4.917E+08	0.0004	16)	(6, 1)	6 30	111111101010001111000110101101	1.068E+09	0.9481
17)	011011100111010100101011111001	4.633E+08	0.0002	17)	(1, 1)	15 30	111111111010001111000110101101	1.072E+09	0.9860
18)	010010110000111100001010010000	3.148E+08	0.0000	18)	(1, 1)	15 30	111111101010001111000110101101	1.068E+09	0.9481
19)	001111001001000101110000111000	2.540E+08	0.0000	19)	(1, 2)	5 30	111111101010001111000110101101	1.068E+09	0.9481
20)	001101110101001001011100010111	2.320E+08	0.0000	20)	(1, 2)	5 30	111101110011101100110101111111	1.037E+09	0.7057
21)	001100110011010000110111111101	2.148E+08	0.0000	21)	(3, 6)	1 30	111011000011011100101110000111	9.908E+08	0.4474
22)	001100110010111111110011000111	2.147E+08	0.0000	22)	(3, 6)	1 30	110101110011111110111101011111	9.028E+08	0.1766
23)	001100010110001010001010100101	2.071E+08	0.0000	23)	(1, 3)	18 30	111110101010001111000110101101	1.051E+09	0.8093
24)	001011100001100001101101110000	1.933E+08	0.0000	24)	(1, 3)	18 30	111011000011011100101110011111	9.908E+08	0.4474
25)	000111110110001111101001100111	1.317E+08	0.0000	25)	(1, 4)	3 30	111111101100001111000101101101	1.069E+09	0.9528
26)	000100101101001000001110111101	7.894E+08	0.0000	26)	(1, 4)	3 30	111000111100010110000010110011	9.553E+08	0.3109
27)	000011010100111011000000000001	5.582E+08	0.0000	27)	(1, 5)	1 30	111111101010001111000110101101	1.068E+09	0.9481
28)	000001100001110011011100000001	2.564E+08	0.0000	28)	(1, 5)	1 30	110111111111000110101100100001	9.393E+08	0.2624
29)	000001011011011001110111110001	2.396E+08	0.0000	29)	(6, 2)	21 30	110101110011111110111101011011	9.028E+08	0.1766
30)	000000100110011111011101101111	1.009E+07	0.0000	30)	(6, 2)	21 30	111101110011111100110101100111	1.037E+09	0.7062

Note Generation 1& Accumulated Statistics: max=0.9860, min=0.0115, avg=0.5199, sum=15.5984, nmutation=32, ncross=12

(ก) วิวัฒนาการรุ่นที่ 1

Population Report

	Generation 5			pos				Generation 6		
#	String	x	fitness	#	parents	1	2	String	x	fitness
1)	1111111110100011110001101011 00	1.072E+09	0.9860	1)	(4,20)	1	30	1110011110100011110001101011 00	9.716E+08	0.3679
2)	1111111110100011110001101011 00	1.072E+09	0.9860	2)	(4,20)	1	30	0111110010000111110000101010 10	5.223E+08	0.0007
3)	1111111110100011110001101011 00	1.072E+09	0.9860	3)	(18,3)	27	30	1111101000100001110001101011 00	1.049E+09	0.7930
4)	1111111110100011110001101011 00	1.072E+09	0.9860	4)	(18,3)	27	30	1111111110100011110001101011 00	1.072E+09	0.9860
5)	1111111110000011111001001011 01	1.072E+09	0.9812	5)	(16,6)	11	30	1111110000110110101011100001 10	1.058E+09	0.8616
6)	1111111110000011110001101011 01	1.072E+09	0.9812	6)	(16,6)	11	30	0111111110000011110001101011 00	5.348E+08	0.0009
7)	1111111110000011110001100011 01	1.072E+09	0.9812	7)	(21,5)	20	30	1111110000100011010001001010 00	1.058E+09	0.8590
8)	1111111010010111010110101100	1.071E+09	0.9728	8)	(21,5)	20	30	1111111110000011111010010010 1	1.072E+09	0.9812
9)	1111111011000011110001001001 01	1.069E+09	0.9528	9)	(26,16)	7	30	1110110000110111101011100001 10	9.908E+08	0.4474
10)	1111111010100010110001101001 00	1.068E+09	0.9480	10)	(26,16)	7	30	0111110000100110101011100001 10	5.207E+08	0.0007
11)	1111111010001011110001101011 01	1.068E+09	0.9446	11)	(26,4)	5	30	1110110000110111101011110001 10	9.908E+08	0.4474
12)	1111111011000001111000111011 00	1.063E+09	0.9071	12)	(26,4)	5	30	1111111110100011110001101011 00	1.072E+09	0.9860
13)	1111110010100011110011001110 00	1.060E+09	0.8762	13)	(1,2)	14	30	1111111110100011110001101011 00	1.072E+09	0.9860
14)	1111110010100011110011001010 00	1.060E+09	0.8762	14)	(1,2)	14	30	1111111111100011110011101011 00	1.073E+09	0.9957
15)	1111110010100011100111001010 00	1.060E+09	0.8762	15)	(17,12)	1	30	1111101010110001110001101011 00	1.051E+09	0.8110
16)	1111110000110110101011100001 10	1.058E+09	0.8616	16)	(17,12)	1	30	1111110110000011110001111011 00	1.063E+09	0.9071
17)	1111101010110001110001101011 00	1.051E+09	0.8110	17)	(15,21)	27	30	1111110010100011100111001010 00	1.060E+09	0.8762
18)	1111101000100001110001101011 00	1.049E+09	0.7930	18)	(15,21)	27	30	1111010000100011110011001010 00	1.024E+09	0.6223
19)	1111100100111010001101011111	1.045E+09	0.7648	19)	(1,14)	6	30	1111111110100011110001101001 00	1.072E+09	0.9860
20)	1111010010000111110000101010 00	1.026E+09	0.6323	20)	(1,14)	6	30	1111010010100011110011001010 00	1.026E+09	0.6351
21)	1111010000100011110011001010 00	1.024E+09	0.6223	21)	(21,29)	7	30	1111010000100011110011001010 10	1.024E+09	0.6223
22)	1111000010001011110000001011 00	1.009E+09	0.5365	22)	(21,29)	7	30	1110010001110111001011100011	9.583E+08	0.3205
23)	1110111011010011110001011001 00	1.002E+09	0.4994	23)	(21,13)	22	30	1111010000101011110011001010 00	1.024E+09	0.6231
24)	1110111010000011110001001011 01	1.000E+09	0.4929	24)	(21,13)	22	30	1101110010101011110011001110 00	9.256E+08	0.2265
25)	1110110110000011110001110011 00	9.962E+08	0.4726	25)	(13,6)	22	30	1111110010100011110011001110 00	1.060E+09	0.8762
26)	1110110000110111101011100001 10	9.908E+08	0.4474	26)	(13,6)	22	30	1111111110000011110011101011 01	1.072E+09	0.9812
27)	1110110000110111001011100001 10	9.908E+08	0.4474	27)	(19,11)	5	30	1111100100111110001101011111	1.045E+09	0.7653
28)	1110101111100101100101101000 10	9.894E+08	0.4414	28)	(19,11)	5	30	1111111010001011110001101011 01	1.068E+09	0.9446
29)	1110010001110111001011100011	9.853E+08	0.3205	29)	(19,3)	1	30	1111100100111010001101011111	1.045E+09	0.7648
30)	0110011011010011110011011011 00	4.313E+08	0.0001	30)	(19,3)	1	30	1111101110100011110001101011 00	1.055E+09	0.8422

Note: Generation 6& Accumulated Statistics: max=0.9957, min=0.0007, avg=0.6839, sum=20.5181, nmutation=185, ncross=74

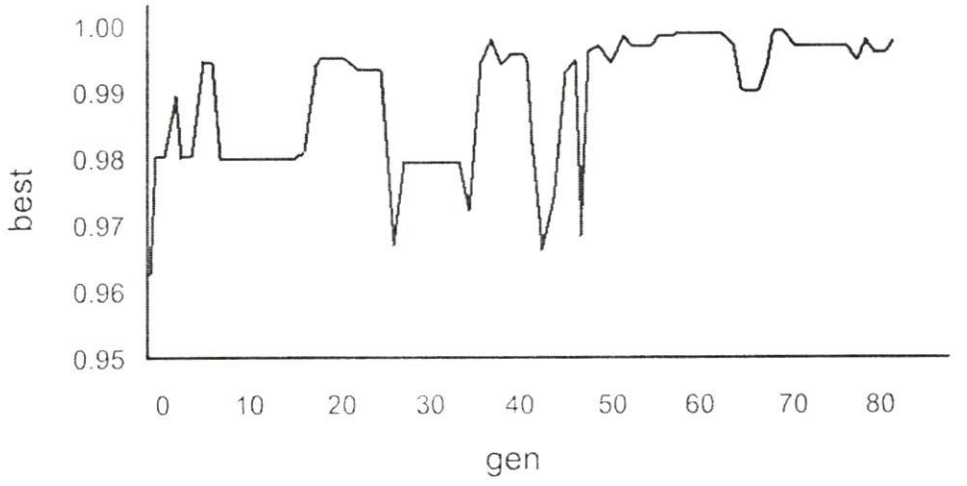
(ข) วิวัฒนาการรุ่นที่ 6

รูปที่ 2.15 รายละเอียดผลการทำงานของ SGA ในการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $y = x^n$ ที่ $n = 10$

ผลการทดสอบการทำงานของ SGA ในการหาคำตอบ เมื่อกำหนดให้ $n = 10$ และกำหนดค่า SGA พารามิเตอร์คือ 1=30, popsize=30, maxgen=30, P_c = 0.8, P_m =0.0333 จะเห็นว่าในรุ่นเริ่มต้น (gen=0) ซึ่งประชากรโครโมโซมเกิดจากการสุ่มนั้นคำตอบที่ดีที่สุดคือ 0.9481 ดังรูปที่ 2.15 (ก) และผลการหาคำตอบของ SGA ในรุ่นที่ 1 ซึ่งแสดงรายละเอียดการจับคู่โครโมโซมพ่อ-แม่ในคู่ลำดับของ parent และตำแหน่งในการครอสโอเวอร์แลกเปลี่ยนค่าบิทตั้งแต่ตำแหน่ง pos_1 ที่สุ่มได้

ถึง pos_2=30 ซึ่งหาก pos_1 มีค่าเป็น 1 และ pos_2 มีค่าเป็น 30 นั่นหมายถึงคู่โครโมโซมพ่อ-แม่คู่นั้นไม่มีการครอสโอเวอร์ จะเห็นว่าการครอสโอเวอร์ทำให้โครโมโซมมีความเปลี่ยนแปลงรูปแบบของบิทให้คล้ายคลึงกันมากขึ้นในแบบของโครโมโซมที่ดีซึ่งมีค่าความเหมาะสมสูง และแสดงผลจำนวนการครอสโอเวอร์และจำนวนบิทที่เกิดมิวเตชันทั้งหมดคือ ncross และ mmutation ตามลำดับ รวมทั้งสรุปผลค่าความเหมาะสมสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ย คือ max, min และ avg ตามลำดับ ซึ่งในรุ่นที่ 1 นี้ SGA สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดคือ max เท่ากับ 0.9860 รูปที่ 2.15(ข) แสดงผลวิวัฒนาการของ SGA ในรุ่นที่ 6 จะเห็นได้ว่า รูปแบบโครโมโซมที่ดีเกิดมากยิ่งขึ้นและ SGA สามารถหาคำตอบได้ดีขึ้นเป็น 0.9957

2.6.2.7 การประยุกต์จีเนติกอัลกอริทึมแบบง่าย



รูปที่ 2.16 แสดงกราฟค่าความเหมาะสมสูงสุดของ SGA ในการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $y = x^n$ ที่ $n = 10$

การวิเคราะห์การทำงานของ SGA ซึ่งเป็น GA ในยุคแรกๆ แล้วจะเห็นว่าวิธีการของ GA เป็นการหาคำตอบแบบสุ่ม ซึ่งเป็นวิธรการที่ไม่มีการบันทึกหรือจดจำคำตอบที่ดีที่สุดของรุ่นก่อน จึงทำให้การหาคำตอบของ SGA ได้คำตอบที่ดีมากขึ้นหรือน้อยลงได้ ดังรูปที่ 2.16 แสดงกราฟคำตอบค่าความเหมาะสมสูงสุดแต่ละรุ่นภายใน 30 รุ่นในการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $y = x^n$ ที่ $n = 10$ จะเห็นได้ว่าคำตอบค่าความเหมาะสมสูงสุดของ SGA มีค่าสูงขึ้นและลดลงด้วยวิธีการทำงานที่อาศัยการสุ่ม ดังนั้นหากสามารถพัฒนาวิธีการค้นหาคำตอบของ GA ให้ดีขึ้นแล้วก็จะปรับปรุงสมรรถนะของ GA ยิ่งขึ้น สำหรับการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $y = x^n$ เราปรับปรุงการค้นหาคำตอบของ GA โดย

รูปที่ 2.17 รีโพรดักชันแบบรักษาค่าความเหมาะสมที่ดี

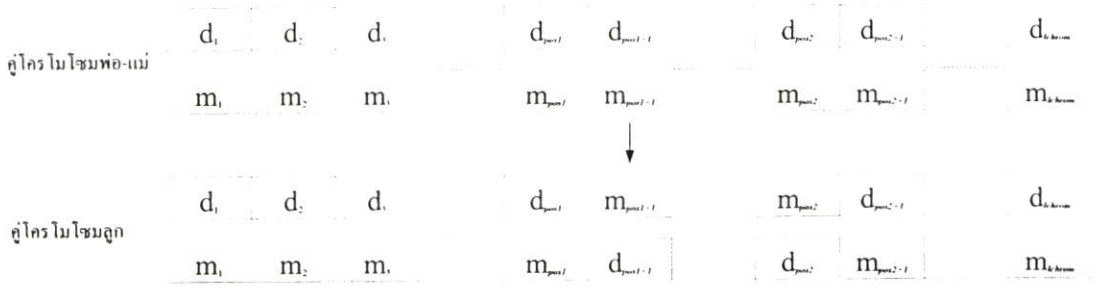
1. โพรดักชันแบบรักษาค่าเหมาะสมที่ดี เนื่องจากในการค้นหาคำตอบของ SGA นั้นมีโอกาสที่จะสูญเสียโครโมโซมในรุ่นเก่า ที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีไปได้ ซึ่งจะทำให้คำตอบในรุ่นถัดไปนั้นดีมากขึ้นหรือน้อยลง ดังนั้นหากปรับปรุง SGA ให้ควบคุมการค้นหาคำตอบ โดยรักษาโครโมโซมที่ดีไว้แล้ว จะช่วยให้วิวัฒนาการคำตอบในรุ่นถัดไปดีขึ้นเรื่อยๆ โดยมีวิธีการดังนี้

- กำหนดจำนวนโครโมโซมที่ดีที่สุด (# best) ของรุ่นเก่าที่ต้องการรักษา เป็น 1, 2, 4 ...
- ถ้าจำนวนโครโมโซมที่กำหนดเป็น 1 ให้สร้างโครโมโซมรุ่นใหม่ทั้งหมดแล้วจึงคัดลอก (copy) โครโมโซมที่ดีที่สุดของรุ่นเก่ามาแทนที่โครโมโซมรุ่นใหม่ที่มีค่าค่าเหมาะสมน้อยที่สุด

- ถ้าจำนวนโครโมโซมที่กำหนดเป็น 2, 4... ให้คัดลอกโครโมโซมที่ดีที่สุดในรุ่นเก่าตามจำนวนที่กำหนดมาเป็นโครโมโซมรุ่นใหม่แล้วจึงสร้างโครโมโซมรุ่นใหม่ส่วนที่เหลือต่อไป

ดังรูปที่ 2.17a แสดงวิธีการรีโพรดักชันแบบรักษาค่าความเหมาะสมที่ดี 1 โครโมโซม และรูปที่ 2.17b แสดงวิธีการรีโพรดักชันแบบรักษาค่าความเหมาะสมที่ดี 2 โครโมโซม

2. ครอสโอเวอร์แบบ 2 จุด การแลกเปลี่ยนส่วนของโครโมโซมพ่อ-แม่นั้น บางครั้งหากแลกเปลี่ยนค่าบิทเพียงบางช่วงของโครโมโซมแล้วจะสร้างโครโมโซมที่ดีกว่า เช่น การหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $y = x^n$ ของคู่โครโมโซมพ่อ-แม่ 01110 และ 11001 ซึ่งมีค่าความเหมาะสมเป็น 196 และ 625 หากแลกเปลี่ยนค่าบิทตำแหน่งที่ 3 และ 4 เท่านั้น จะทำให้เกิดโครโมโซมลูกคือ 01000 และ 11111 มีค่าความเหมาะสมเป็น 64 และ 961 ซึ่งโครโมโซม 11111 เป็นโครโมโซมที่ให้คำตอบที่ดีที่สุดที่ต้องการ ดังนั้นการประยุกต์ SGA โดยพัฒนาตัวดำเนินการครอสโอเวอร์ให้เป็นแบบ 2 จุด (Two-point Crossover) จะทำให้ SGA ค้นหาคำตอบที่ดีขึ้นได้ ดังรูปที่ 2.18 มีวิธีการดังนี้



pos_1, pos_2 คือตำแหน่งที่สุ่มได้ซึ่ง $pos_1 \varepsilon [1, lchrom-1]$, $pos_2 \varepsilon [1, lchrom]$

และ $pos_1 \neq pos_2$

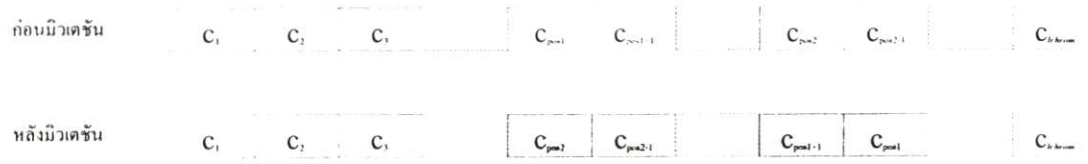
รูปที่ 2.18 ครอสโอเวอร์แบบ 2 จุด

- สุ่มเลือกตำแหน่ง pos_1 และ pos_2 คือตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้ายที่จะครอสโอเวอร์ตามลำดับ ซึ่ง pos_1 มีค่าอยู่ในช่วง $[1, lchrom-1]$ และ pos_2 มีค่าอยู่ในช่วง $[1, lchrom]$ โดยที่ pos_1 มีค่าน้อยกว่า pos_2
- แลกเปลี่ยนค่าในแต่ละบิทของคู่โครโมโซมพ่อ-แม่ ตั้งแต่ตำแหน่งที่ $pos_1 + 1$ ถึง pos_2

3. ไบนารีมิวเตชันแบบกำหนดค่าบิท เนื่องจากการหาคำตอบของ SGA นั้น กระบวนการไบนารีมิวเตชันอาจทำให้โครโมโซมที่เปลี่ยนแปลงไปให้คำตอบที่ดีลดลงและทำให้สูญเสีย

โครโมโซมที่ดีไป เช่น โครโมโซม 11110 มีค่าความเหมาะสมเป็น 900 หากสุ่มได้บิทตำแหน่งที่ 1 เกิดมิวเตชันแล้ว โครโมโซมที่เกิดขึ้นจากการมิวเตชันคือ 01110 ทำให้มีความเหมาะสมลดลงเป็น 196 แต่ในบางครั้งข้อดีหรือจุดเด่นของปัญหาจะสามารถนำมาปรับใช้เข้ากับการค้นหาคำตอบที่ดีขึ้นได้ สำหรับในการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $y = x''$ นี้ ค่าบิทของโครโมโซมที่เป็น 1 จะทำให้ค่าความเหมาะสมสูงขึ้นเสมอ ดังนั้นหากปรับปรุงไบนารีมิวเตชันให้เป็นแบบกำหนดค่าแน่นอนให้กับบิทที่เกิดมิวเตชัน โดยกำหนดให้บิทที่เกิดมิวเตชันมีค่าบิทเป็น 1 เสมอจะช่วยปรับแนวทางการค้นหาคำตอบของ SGA ดีขึ้น เช่น หากประยุกต์ไบนารีมิวเตชันที่กำหนดค่าให้เป็น 1 เสมอกับโครโมโซม 11110 ในตำแหน่งที่ 1 แล้ว โครโมโซมที่เกิดขึ้นจะเหมือนเดิม และยังเป็นการรักษาโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีไว้ด้วย

4. **อินเวอร์ชัน (Inversion)** เป็นตัวดำเนินการที่ประยุกต์เพิ่มเติมใน SGA โดยจำลองแบบลักษณะของการอินเวอร์ในทางพันธุศาสตร์ที่เป็นลักษณะของการกลับหัวกลับหางส่วนของยีนส์ภายในโครโมโซม ที่อาจช่วยให้เกิดโครโมโซมที่ดีขึ้นได้ โดยการกลับส่วนค่าบิทภายในช่วงตำแหน่งของโครโมโซมที่สุ่มได้ตามอัตราค่าความน่าจะเป็นของการอินเวอร์ชันแต่ละโครโมโซม (Probability of Inversion: P_i) ที่กำหนด ดังรูปที่ 2.19 มีขั้นตอนดังนี้



pos_1, pos_2 คือตำแหน่งที่สุ่มได้ซึ่ง pos_1, $pos_2 \in [1, lchrom]$ และ $pos_1 \neq pos_2$

รูปที่ 2.19 อินเวอร์ชัน

- สุ่มเลือกตำแหน่ง pos_1 และ pos_2 คือตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้ายที่จะอินเวอร์ชันตามลำดับ ซึ่ง pos_1 และ pos_2 มีค่าอยู่ในช่วง $[1, lchrom]$ โดยที่ pos_1 มีค่าน้อยกว่า pos_2
- กลับค่าบิทในช่วงของตำแหน่งที่ pos_1 ถึง pos_2 ของโครโมโซมโดยสลับค่าบิท pos_1 กับ pos_2, $pos_1 + 1$ กับ $pos_2 - 1$, $pos_1 + 2$ กับ $pos_2 - 2$, ...

เช่น สุ่มโครโมโซมที่จะอินเวอร์ชัน คือ 01010 มีค่าความเหมาะสมเป็น 100 โดยสุ่มตำแหน่ง pos_1=1 และ pos_2=4 แล้ว จะเห็นว่าที่อินเวอร์ชันทำให้เกิดโครโมโซม 10100 ซึ่งมีค่าความเหมาะสมที่ดีขึ้นเป็น 400 เป็นต้น สำหรับจำนวนการอินเวอร์ชันในแต่ละรุ่นขึ้นอยู่กับการกำหนดค่า P_i ซึ่งแตกต่างกันในแต่ละปัญหา เช่น ถ้าจำนวนประชากรแต่ละรุ่น popsize เท่ากับ 30 โครโมโซม

และกำหนดให้ P_i= 0.1 แล้ว จำนวนการอินเวอร์ชันในแต่ละรุ่นเท่ากับ P_i*popsize = 0.1*30 = 3 ครั้ง

ผลการทำงานโดยสรุปของการประยุกต์ SGA ในการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $y = x^n$ ที่ $n = 10$ ภายใน 30 รุ่น ซึ่งกำหนดค่า SGA พารามิเตอร์ต่างๆ เปรียบเทียบดังตารางที่ 2.3 แสดงดังรูปที่ 2.20 (ก) ถึง 2.20 (ช) โดยเปรียบเทียบการหาคำตอบที่กำหนดให้มีการมิวเตชันในรูป ในรูปที่ 2.20 (ข) นั้นดีกว่าการหาคำตอบเพียงครอสโอเวอร์เท่านั้นในรูปที่ 2.20 (ก) และจะเห็นได้ว่า SGA สามารถหาคำตอบได้ดีขึ้นเมื่อมีการปรับปรุงวิธีการต่างๆ คือ หากใช้รีโพรดักชันแบบรักษาค่าที่ดีจำนวน 4 โครโมโซม และครอสโอเวอร์แบบ 2 ตำแหน่งในรูปที่ 2.20 (จ) แล้ว ผลการทำงานของ SGA สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดเท่ากับ 1.0 ได้ ซึ่งดีกว่าในรูปที่ 2.20 (ง) เมื่อรีโพรดักชันแบบรักษาค่าที่ดีจำนวน 1 โครโมโซมที่สามารถหาคำตอบได้เป็น 0.9999 และดีกว่าการรีโพรดักชันแบบทั่วไปในรูปที่ 2.20 (ก), 2.20 (ข), 2.20 (ค)และ 2.20 (ง) ที่ยังไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ภายในการดำเนินการ 30 รุ่น สำหรับในรูปที่ 2.20 (ฉ) นั้น เมื่อเพิ่มตัวดำเนินการอินเวอร์ชันแล้ว ผลการดำเนินงานนั้นสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดเท่ากับ 1.0 ได้เร็วขึ้นในรุ่นที่ 20 และเมื่อเพิ่มเทคนิคการกำหนดค่าบิทของการมิวเตชันให้เป็น 1 เสมอแล้ว ก็ยิ่งทำให้ SGA ทำงานได้ดียิ่งขึ้น โดยสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เมื่อดำเนินงานผ่านไปเพียง 9 รุ่นเท่านั้น ดังในรูปที่ 2.20 (ช)

ตารางที่ 2.3 การกำหนด SGA พารามิเตอร์เปรียบเทียบผลการทำงาน ในการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $y = x^n$ ที่ $n = 10$

รูปที่	P_c	P_m	P_i	จำนวนการรักษาโครโมโซมรุ่นเก่า (# best)	จำนวนตำแหน่งในการครอสโอเวอร์ (pt. cross)	การกำหนดค่าบิทมิวเตชัน (fix value)
2.20a	0.800	0.0000	0.0000	0	1	0->1และ 1->0
2.20b	0.800	0.0333	0.0000	0	1	0->1และ 1->0
2.20c	0.800	0.0333	0.0000	0	2	0->1และ 1->0
2.20d	0.800	0.0333	0.0000	4	2	0->1และ 1->0
2.20e	0.800	0.0333	0.0000	1	2	0->1และ 1->0
2.20f	0.800	0.0333	0.3000	4	2	0->1และ 1->0
2.20g	0.800	0.0333	0.3000	4	2	0, 1 ->1

Pop.size	= 30	Pc	= 0.8000	# best	= 0
Chrom.length	= 30	Pm	= 0.0000	pt.crs	= 1
Max.gen	= 30	Pi	= 0.0000	fix val.	= 2

generation	max	avg	min
0	0.9481	0.1030	0.0000
1	0.9481	0.5498	0.1166
2	0.9481	0.7032	0.1766
3	0.9481	0.7352	0.3109
4	0.9481	0.8152	0.4474
5	0.9481	0.8819	0.4474
6	0.9481	0.9153	0.4474
7	0.9481	0.9320	0.7062
8	0.9481	0.9401	0.7062
9	0.9481	0.9401	0.7062
10	0.9481	0.9481	0.9481
11	0.9481	0.9481	0.9481
12	0.9481	0.9481	0.9481
13	0.9481	0.9481	0.9481
14	0.9481	0.9481	0.9481
15	0.9481	0.9481	0.9481
16	0.9481	0.9481	0.9481
17	0.9481	0.9481	0.9481
18	0.9481	0.9481	0.9481
19	0.9481	0.9481	0.9481
20	0.9481	0.9481	0.9481
21	0.9481	0.9481	0.9481
22	0.9481	0.9481	0.9481
23	0.9481	0.9481	0.9481
24	0.9481	0.9481	0.9481
25	0.9481	0.9481	0.9481
26	0.9481	0.9481	0.9481
27	0.9481	0.9481	0.9481
28	0.9481	0.9481	0.9481
29	0.9481	0.9481	0.9481
30	0.9481	0.9481	0.9481

(ก)

Pop.size	= 30	Pc	= 0.8000	# best	= 0
Chrom.length	= 30	Pm	= 0.0333	pt.crs	= 1
Max.gen	= 30	Pi	= 0.0000	fix val.	= 2

generation	max	avg	min
0	0.9481	0.1030	0.0000
1	0.9860	0.5199	0.0115
2	0.9860	0.5905	0.0150
3	0.9921	0.5721	0.1563
4	0.9860	0.6123	0.0009
5	0.9860	0.7462	0.0001
6	0.9957	0.6839	0.0007
7	0.9957	0.6596	0.0007
8	0.9860	0.5824	0.0000
9	0.9859	0.6774	0.0553
10	0.9859	0.6368	0.0000
11	0.9859	0.7170	0.0007
12	0.9859	0.8187	0.3933
13	0.9859	0.7007	0.0006
14	0.9859	0.6491	0.0007
15	0.9860	0.8273	0.0455
16	0.9860	0.8119	0.0009
17	0.9865	0.8549	0.0205
18	0.9957	0.8328	0.0005
19	0.9963	0.8734	0.2589
20	0.9963	0.8912	0.2354
21	0.9963	0.7875	0.0089
22	0.9957	0.7705	0.0002
23	0.9954	0.8397	0.0009
24	0.9954	0.7015	0.0002
25	0.9953	0.7313	0.0009
26	0.9883	0.7610	0.0000
27	0.9771	0.7299	0.0000
28	0.9860	0.7715	0.0001
29	0.9859	0.8475	0.0215
30	0.9859	0.7080	0.0005

(ข)

Pop.size	= 30	Pc	= 0.8000	# best	= 0
Chrom.length	= 30	Pm	= 0.0333	pt.crs	= 2
Max.gen	= 30	Pi	= 0.0000	fix val.	= 2

generation	max	avg	min
0	0.9481	0.1030	0.0000
1	0.9575	0.5559	0.0005
2	0.9957	0.5741	0.0009
3	0.9969	0.7093	0.0358
4	0.9960	0.7531	0.2475
5	0.9971	0.7064	0.0008
6	0.9971	0.8505	0.0330
7	0.9770	0.7278	0.0001
8	0.9911	0.7542	0.0002
9	0.9911	0.7146	0.0007
10	0.9952	0.7890	0.0009
11	0.9960	0.7329	0.0000
12	0.9956	0.8780	0.3621
13	0.9956	0.7700	0.0000
14	0.9956	0.7285	0.0501
15	0.9958	0.7667	0.0009
16	0.9958	0.7655	0.0003
17	0.9958	0.7429	0.0006
18	0.9957	0.7776	0.0007
19	0.9982	0.7790	0.0009
20	0.9982	0.7279	0.0009
21	0.9982	0.7525	0.0432
22	0.9982	0.7452	0.0009
23	0.9982	0.7096	0.0002
24	0.9976	0.8281	0.2434
25	0.9861	0.6068	0.0000
26	0.9923	0.8072	0.0009
27	0.9887	0.7854	0.0006
28	0.9958	0.7924	0.0005
29	0.9959	0.8595	0.4290
30	0.9959	0.7752	0.0008

(ค)

Pop.size	= 30	Pc	= 0.8000	# best	= 1
Chrom.length	= 30	Pm	= 0.0333	pt.crs	= 2
Max.gen	= 30	Pi	= 0.0000	fix val.	= 2

generation	max	avg	min
0	0.9481	0.1030	0.0000
1	0.9575	0.5875	0.0238
2	0.9957	0.6060	0.0194
3	0.9963	0.7498	0.0524
4	0.9969	0.7991	0.2620
5	0.9969	0.7512	0.0512
6	0.9969	0.8960	0.4962
7	0.9969	0.7753	0.0005
8	0.9980	0.8075	0.0450
9	0.9980	0.7623	0.0050
10	0.9981	0.8387	0.0308
11	0.9981	0.7796	0.0005
12	0.9981	0.9174	0.4760
13	0.9981	0.8194	0.2426
14	0.9987	0.7726	0.0554
15	0.9987	0.8230	0.0219
16	0.9987	0.8139	0.2426
17	0.9987	0.7908	0.0009
18	0.9987	0.8296	0.2605
19	0.9987	0.8628	0.2441
20	0.9987	0.7987	0.0367
21	0.9987	0.8101	0.0526
22	0.9987	0.8145	0.0425
23	0.9988	0.7884	0.0010
24	0.9988	0.9105	0.4667
25	0.9988	0.6898	0.0005
26	0.9988	0.8623	0.2399
27	0.9988	0.8495	0.0476
28	0.9988	0.8530	0.0007
29	0.9999	0.8977	0.6664
30	0.9999	0.8486	0.0009

(ง)

(ก)

Pop.size	= 30	Pc	= 0.8000	# best	= 4
Chrom.length	= 30	Pm	= 0.0333	pt.crs	= 2
Max.gen	= 30	Pi	= 0.0000	fix val	= 2

generation	max	avg	min
0	0.9481	0.1030	0.0000
1	0.9575	0.5857	0.0005
2	0.9857	0.6655	0.0009
3	0.9963	0.7556	0.0524
4	0.9963	0.7705	0.0524
5	0.9963	0.8069	0.0524
6	0.9975	0.7939	0.0009
7	0.9975	0.8738	0.0454
8	0.9975	0.8026	0.0001
9	0.9967	0.8697	0.2170
10	0.9967	0.7446	0.0002
11	0.9997	0.8911	0.0347
12	0.9997	0.8241	0.0005
13	0.9997	0.8020	0.0000
14	0.9998	0.9362	0.2589
15	0.9998	0.8406	0.0000
16	0.9998	0.7955	0.0546
17	0.9998	0.8405	0.0010
18	0.9998	0.9286	0.2590
19	0.9998	0.7849	0.0007
20	0.9998	0.8373	0.0007
21	0.9998	0.8608	0.0008
22	0.9998	0.8767	0.0010
23	0.9998	0.7984	0.0010
24	0.9998	0.8458	0.0456
25	0.9998	0.8151	0.0010
26	0.9998	0.8314	0.0002
27	0.9998	0.8100	0.0527
28	0.9998	0.9182	0.0475
29	1.0000	0.6918	0.0000
30	1.0000	0.8837	0.0010

(ข)

Pop.size	= 30	Pc	= 0.8000	# best	= 4
Chrom.length	= 30	Pm	= 0.0333	pt.crs	= 2
Max.gen	= 30	Pi	= 0.2000	fix val	= 2

generation	max	avg	min
0	0.9481	0.1030	0.0000
1	0.9648	0.5539	0.0001
2	0.9648	0.6905	0.0004
3	0.9803	0.7530	0.0009
4	0.9803	0.7691	0.0224
5	0.9900	0.7140	0.0004
6	0.9900	0.7182	0.0042
7	0.9900	0.7613	0.0350
8	0.9997	0.7830	0.0009
9	0.9997	0.7269	0.0009
10	0.9998	0.8061	0.0352
11	0.9998	0.7000	0.0181
12	0.9998	0.7294	0.0455
13	0.9998	0.8265	0.0563
14	0.9998	0.8679	0.0009
15	0.9998	0.8829	0.0236
16	0.9998	0.8733	0.0006
17	0.9998	0.7911	0.0010
18	0.9998	0.8801	0.0009
19	0.9998	0.8065	0.0009
20	1.0000	0.8335	0.0009
21	1.0000	0.8084	0.0006
22	1.0000	0.8212	0.0009
23	1.0000	0.8201	0.0008
24	1.0000	0.8541	0.1786
25	1.0000	0.8065	0.0202
26	1.0000	0.8479	0.0559
27	1.0000	0.8045	0.0008
28	1.0000	0.7436	0.0003
29	1.0000	0.7853	0.0028
30	1.0000	0.8771	0.0008

(ค)

Pop.size	= 30	Pc	= 0.8000	# best	= 4
Chrom.length	= 30	Pm	= 0.0333	pt.crs	= 2
Max.gen	= 30	Pi	= 0.2000	fix val	= 1

generation	max	avg	min
0	0.9481	0.1030	0.0000
1	0.9481	0.5959	0.0156
2	0.9860	0.8297	0.0862
3	0.9860	0.8738	0.1108
4	0.9860	0.9068	0.6612
5	0.9951	0.9356	0.7049
6	0.9951	0.9670	0.7062
7	0.9956	0.9723	0.7062
8	0.9997	0.9875	0.9481
9	1.0000	0.9818	0.8139
10	1.0000	0.9484	0.0427
11	1.0000	0.9837	0.9521
12	1.0000	0.9572	0.5236
13	1.0000	0.9582	0.5236
14	1.0000	0.9702	0.5496
15	1.0000	0.9574	0.5496
16	1.0000	0.9374	0.5496
17	1.0000	0.9078	0.5245
18	1.0000	0.9413	0.3657
19	1.0000	0.9774	0.4798
20	1.0000	0.9799	0.4798
21	1.0000	0.9884	0.6714
22	1.0000	0.9595	0.5245
23	1.0000	0.9621	0.5030
24	1.0000	0.9678	0.6714
25	1.0000	0.9794	0.8543
26	1.0000	0.9754	0.8543
27	1.0000	0.9801	0.8543
28	1.0000	0.9796	0.8543
29	1.0000	0.9817	0.8543
30	1.0000	0.9625	0.0456

(ง)

รูปที่ 2.20 ผลการทำงานโดยสรุปของ GA ในการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $y = x^n$ ที่ $n = 10$

สรุป

จีเนติกอัลกอริทึมเป็นทฤษฎีที่เลียนแบบกระบวนการวิวัฒนาการทางธรรมชาติ ที่นำมาประยุกต์ใช้กับคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยแก้ปัญหาในการหาคำตอบต่างๆ ซึ่งมีพื้นฐานการทำงานเบื้องต้นเป็นจีเนติกอัลกอริทึมแบบง่าย โดยมีรูปแบบโครโมโซมเป็นแบบไบนารี และตัวดำเนินการทางพันธุศาสตร์คือ การครอสโอเวอร์และมิวเตชันที่ไม่ซับซ้อน แต่สามารถปรับปรุงให้เข้ากับปัญหาเพื่อช่วยให้จีเนติกอัลกอริทึมมีแนวทางในการค้นหาคำตอบที่ดีขึ้น ทั้งนี้สามารถที่จะ

ประยุกต์ใช้จีเนติกอัลกอริทึมในการแก้ปัญหารูปแบบต่างๆ ได้ โดยจะต้องมีวิธีการปรับปรุงรูปแบบโครโมโซมหรือตัวดำเนินการทางพันธุศาสตร์เพื่อให้เหมาะสมกับแต่ละปัญหา

2.6.3 การค้นหาแบบตาบู (Tabu Search algorithm)

คำว่า ตาบู (Tabu หรือ Taboo) มีความหมายว่า "ต้องห้าม" ดังนั้น วิธีการตาบู จึงหมายถึงวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่มีเงื่อนไขการค้นหาต้องห้ามบางอย่าง วิธีการนี้มีคุณสมบัติเด่นที่สำคัญคือ มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบได้ถูกต้องและรวดเร็ว อีกทั้งมีความสามารถหลีกหนีคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะถิ่น (Local optimal solution) ได้โดยอาศัยหน่วยความจำระยะสั้นในรูปแบบของ*รายการตาบู (tabu list)* และ*เกณฑ์ปรารถนา (aspiration criterion)*

Fred Glover, J.A. Bland และ G.P. Dawson ได้นำเสนอแนวคิดและขั้นตอนของวิธีการค้นหาแบบตาบูเมื่อปี ค.ศ. 1991 นำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลังจากนั้นก็เป็นที่นิยมแพร่หลายมากขึ้นเรื่อยๆ

ปัจจุบันวิธีการค้นหาแบบตาบูได้เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปแล้วว่า มีความสามารถที่จะหลีกเลี่ยงการให้คำตอบสุดท้ายที่เป็นค่า*เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น* และยังสามารถดำเนินการค้นหาคำตอบต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับค่า*เหมาะสมที่สุดทั่วไป* (Global optimum) หลักการของวิธีการค้นหาแบบตาบูเป็นหลักการที่ยืดหยุ่น สามารถประยุกต์ใช้ได้กับปัญหาต่างๆ ได้เป็นอย่างมีประสิทธิภาพ และมีขั้นตอนการดำเนินการค่อนข้างง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ

2.6.3.1 หลักการพื้นฐานของวิธีการค้นหาแบบตาบู

วิธีการค้นหาแบบตาบูเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยปรับปรุงมาจากวิธีการค้นหาแบบโลคอล (Local search) หรือ วิธีการค้นหาบริเวณใกล้เคียง (Neighborhood search) ให้มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ถูกต้องและรวดเร็ว โดยอาศัยหน่วยความจำระยะสั้น ในรูปแบบของ รายการตาบู และเกณฑ์ปรารถนา

ระเบียบวิธีการดำเนินการของวิธรการค้นหาแบบตาบู แสดงไว้ในรูปที่ 2.21 ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 สุ่มคำตอบเริ่มต้น s_0 จากขอบเขตคำตอบที่เป็นไปได้ S กำหนดให้คำตอบเริ่มต้นเป็นคำตอบที่ดีที่สุด $s_{best} = s_0$ และกำหนดรอบในการค้นหา Iteration = 0

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่าความเหมาะสม ของ s_{best} นั่นคือ $C_{best} = f(s_{best})$ เมื่อ f คือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) โดยปกติแล้วจะใช้ในการตรวจสอบว่าคำตอบที่มีอยู่มีเหมาะสมหรือไม่ อย่างไร

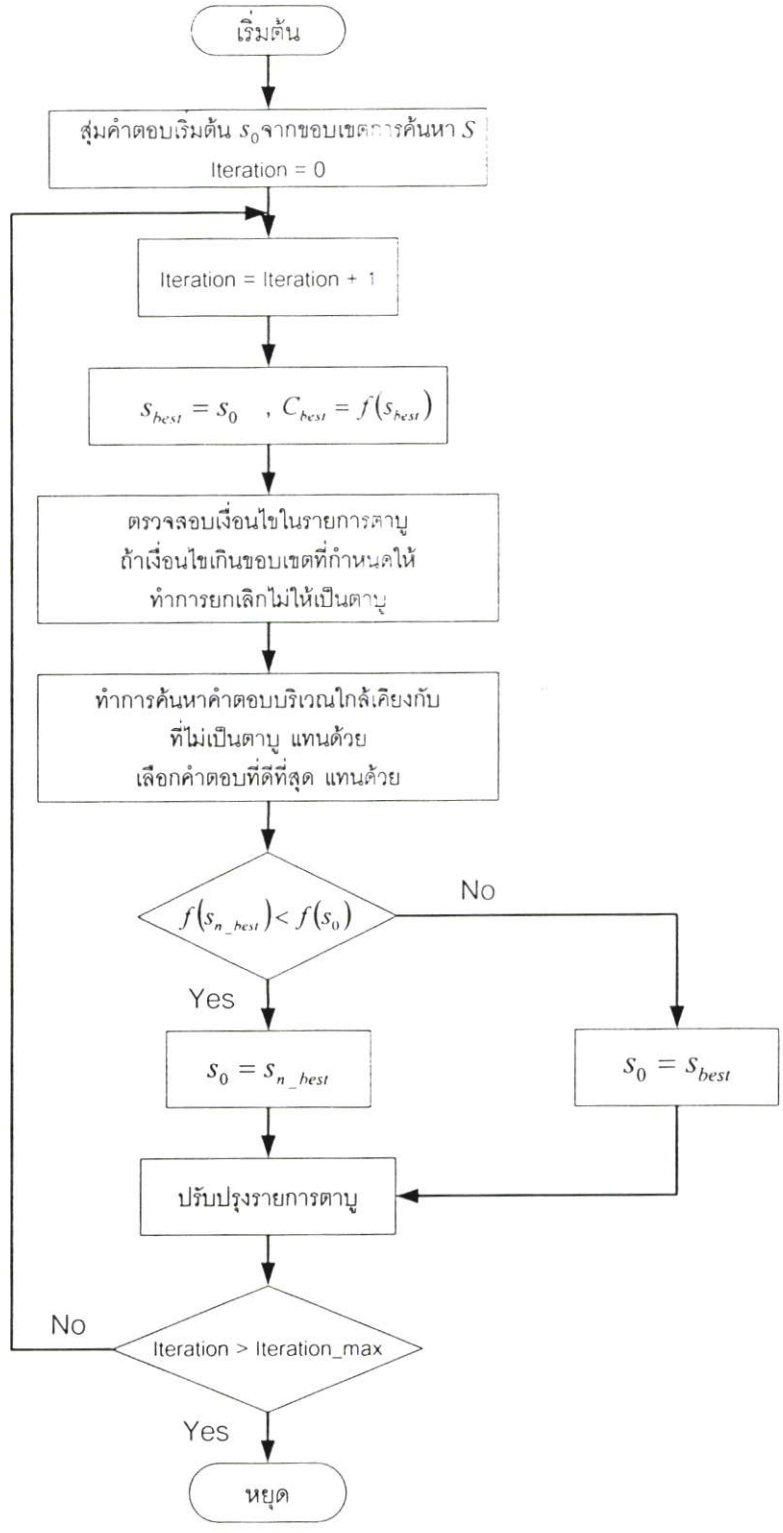
ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบรายการตาบู ซึ่งเป็นรายการที่เก็บคำตอบและข้อมูลกระบวนการค้นหาในอดีต หลักการทั่วไปในการออกแบบรายการตาบู จะขึ้นอยู่กับแต่ละปัญหาที่แตกต่างกันออกไป แต่หลักการที่ใช้ในรายการนี้เป็นการออกแบบให้รายการตาบู เก็บคำตอบที่เคยค้นหามาได้และข้อมูลการดำเนินการค้นหาในอดีต เก็บเงื่อนไขของ *ความถี่ (frequency)* ของการดำเนินการในทิศทางใดๆ และเก็บเงื่อนไขของ *ความคงอยู่ (recency)* เป็นสิ่งที่บอกว่าทิศทางนั้นๆ ต้องห้ามดำเนินการมานานเท่าใดแล้ว ซึ่งค่านี้จะนำไปรวมกับค่าฟังก์ชันคุณค่า เพื่อเป็นเงื่อนไขการหลุดออกจากคำตอบเหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น

ขั้นตอนที่ 4 ดำเนินการค้นหาคำตอบโดยเริ่มจาก s_0 และในบริเวณรอบๆ ของ s_0 โดยการกำหนดให้บริเวณรอบๆ s_0 แทนด้วย s_n ขอบเขตจะขึ้นอยู่กับการกำหนดของผู้ดำเนินการ และ s_n จะต้องไม่เป็นตาบู หมายถึง สามารถเป็นคำตอบได้

ขั้นตอนที่ 5 จาก s_n คำนวณหาฟังก์ชันคุณค่าของสมาชิกแต่ละตัวของ s_n แล้วเลือกสมาชิกที่มีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีที่สุด โดยกำหนดให้เป็น s_{n_best} และค่าฟังก์ชันความเหมาะสมของ s_n ต้องดีกว่าค่าฟังก์ชันความเหมาะสมของ s_0

ขั้นตอนที่ 6 ทำการย้ายตำแหน่ง โดยการกำหนดให้ $s_0 = s_{n_best}$ แล้วปรับปรุงรายการตาบูให้เป็นปัจจุบัน และเพิ่มจำนวนครั้งในการค้นหาที่ผ่านมาแล้ว ถ้ายังไม่ได้คำตอบ ก็ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 3 ใหม่

ขั้นตอนที่ 7 เมื่อทำการค้นหาเท่ากับจำนวนครั้งที่กำหนด หรือได้ค่าความผิดพลาดน้อยกว่าที่กำหนดเป็นเงื่อนไขในการหยุดดำเนินการ ถ้าไม่มีสมาชิกใดๆ ของ s_n ที่ให้ค่าฟังก์ชันคุณค่าที่ดีกว่าฟังก์ชันความเหาะสมของ s_0 ก็กำหนดให้ s_{best} เป็นคำตอบ



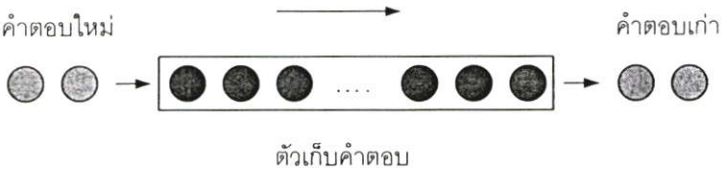
รูปที่ 2.21 ผังการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบู

2.6.3.2 องค์ประกอบของวิธีการค้นหาแบบตาบู

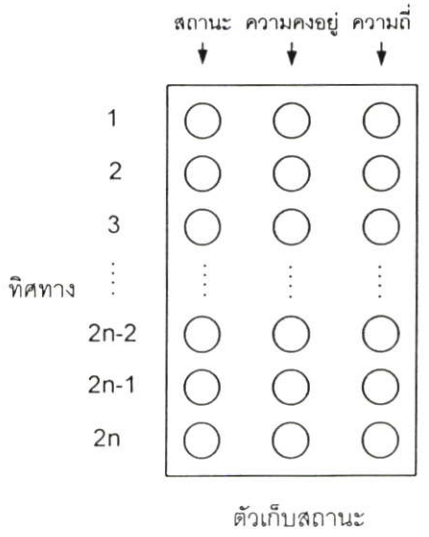
- รายการตาบู

ในวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอรายการตาบูที่มีส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ ตัวเก็บคำตอบ และตัวเก็บสถานะโดยที่ตัวเก็บคำตอบ เป็นการเก็บคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาผ่านมาแล้ว ส่วนตัวเก็บสถานะเป็นการบันทึกสถานการณ์ดำเนินการต่างๆ ของการค้นหาที่ผ่านมาแล้ว ประกอบด้วย ความคงอยู่, ความถี่ และสถานะต้องห้าม (tabu satatus) รูปแบบของการเก็บบันทึกข้อมูลของรายการตาบู แสดงไว้ในรูปที่ 2.22 และ 2.23 โดยรูปที่ 2.22 แสดงการเก็บคำตอบที่ค้นหาผ่านมา ส่วนรูปที่ 2.23 แสดงส่วนประกอบทั้งสามชนิดของตัวเก็บสถานะ

จากรูปที่ 2.23 **ความคงอยู่** หมายถึง การบันทึกค่าระยะเวลาของสถานะต้องห้ามว่าอยู่ในรายการตาบูมีระยะเวลานานเท่าใดแล้ว **ความถี่** หมายถึง การบันทึกจำนวนทิศทางของการย้ายตำแหน่งที่ถูกเรียกใช้เพื่อเป็นคำตอบที่ดีที่สุด หรือการบันทึกจำนวนครั้งที่ทิศทางใดนั้นๆ ถูกนำมาใช้เป็นคำตอบของกระบวนการ **สถานะต้องห้าม** หมายถึง ทิศทางต้องห้ามที่ห้ามไม่ให้ทำการย้ายตำแหน่งในทิศทางนี้



รูปที่ 2.22 ลักษณะการเก็บคำตอบของตัวเก็บคำตอบ



รูปที่ 2.23 ลักษณะของตัวเก็บสถานะของรายการตาบู

- เกณฑ์ปรารถนา (Aspiration criterion)

หลักสำคัญของวิธีการค้นหาแบบตาบูที่เพิ่มขึ้นมาก็คือ เมื่อการย้ายตำแหน่งในเส้นทางต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขที่พิจารณา ถูกตรวจพบว่าเป็นเส้นทางที่ถูกบันทึกไว้ในรายการตาบู ถ้าโดยปกติการย้ายตำแหน่งในเส้นทางนี้จะถูกห้ามดำเนินการค้นหา ตาบางครั้งเราสามารถบังคับให้มีการดำเนินการค้นหาคำตอบในเส้นทางนี้ได้ โดยการตรวจสอบคำตอบจากเส้นทางนี้กับเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งการทดสอบนี้เรียกว่า "*เกณฑ์ปรารถนา*" ถ้าเกณฑ์ปรารถนาตรวจสอบแล้วมีค่าที่น่าพอใจ การย้ายตำแหน่งในเส้นทางนั้นสามารถกระทำได้ วิธีที่เรานำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ จะบังคับให้เป็นสถานะตาบู ถ้าการย้ายตำแหน่งในทิศทางการย้ายตำแหน่งมีทิศทางคล้ายกัน ลำดับต่อมาเกณฑ์ปรารถนา จะต้องสอดคล้องกับการย้ายตำแหน่งในแต่ละครั้งที่มีอยู่ในรายการตาบู ซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่าฟังก์ชันเป้าหมายของคำตอบที่ได้รับ เมื่อมีการย้ายตำแหน่งเกิดขึ้น ประสิทธิภาพในหารใช้งานของเกณฑ์ปรารถนาจะถูกผนวกเข้ากับความยืดหยุ่นได้ของการค้นหาแบบตาบู

- เกณฑ์การหยุด

มีวิธีหลายวิธีที่จะถูกนำมาใช้กำหนดสภาวะในการหยุดดำเนินการค้นหา ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ จะกำหนดเกณฑ์การหยุดการค้นหาจากสภาวะใดสภาวะหนึ่ง ดังต่อไปนี้

- จำนวนรอบที่ผ่านมามีค่าคำตอบที่ดีที่สุด (tabu solution) ซึ่งค่าที่เปลี่ยนแปลงล่าสุดมีค่ามากกว่าค่าสูงสุดของจำนวนรอบที่กำหนดไว้
- ครบรอบสูงสุดที่กำหนดไว้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายแอดฮอกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของโครงข่าย โดยพิจารณาค่าประวิงเวลาที่ใช้ส่งแพ็กเกตข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือแต่ละเส้นทาง ภายใต้แบบจำลองที่คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากอัตราการเกิดความผิดพลาดแพ็กเกต (Packet Error Rate) บนช่ายเชื่อมโยงมาเป็นเงื่อนไขในการพิจารณาเส้นทาง ด้วยจีเนติกอัลกอริทึม ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย ***Proposed-GA*** โดยจะทำการเปรียบเทียบสมรรถนะกับการค้นหาเส้นทางที่เคยถูกนำเสนอไว้ในประเภทเดียวกัน นั่นคือ การค้นหาเส้นทางแบบเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest path) และ การค้นหาเส้นทางด้วยจีเนติกอัลกอริทึมแบบง่าย (Simple Genetic Algorithms) ซึ่งกระบวนการการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริทึมที่นำเสนอนั้น จะอธิบายในลำดับถัดไป

บทที่ 3

กระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ

ในบทที่ผ่านมานั้นได้กล่าวถึงผลกระทบเนื่องจากข้อจำกัดด้านการสื่อสารของโหนดต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายไร้สายแบบแอดฮอก ซึ่งนำไปสู่แนวทางในการแก้ไขปัญหาและในวิทยานิพนธ์นี้ได้ให้ความสนใจการแก้ปัญหาเฉพาะในชั้นเครือข่าย โดยจะเน้นด้านการออกแบบกระบวนการค้นหาเส้นทางเพื่อทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพด้านการส่งแพ็กเกตข้อมูล และค่าวิสัยสามารถของโครงข่ายสูงยิ่งขึ้น

3.1 กระบวนการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริทึม (Routing Optimization using Genetic Algorithms)

กระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอในหัวข้อนี้จัดได้ว่าอยู่ในกลุ่มของการค้นหาเส้นทางแบบการจัดเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูล (Reactive or On-demand) ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยเป้าหมายของกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอนี้คือ *"ลดค่าประวิงของโครงข่ายและเพิ่มค่าวิสัยสามารถมากที่สุด"* โดยนำเสนอวิธีการกำหนดค่าประวิงเวลาข่ายเชื่อมโยง หรือ Transmission Link Cost ขึ้นมาเพื่อนำไปใช้รวมกับกระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Process) ซึ่งเส้นทางที่ดีที่สุดจากกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอจะเป็นเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียการประวิงเวลาต่ำที่สุด

3.1.1 การคำนวณค่าประวิงเวลาของข่ายเชื่อมโยง (Transmission Link Cost Computation)

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงรายละเอียดของวิธีการคำนวณค่าประวิงเวลาในการสื่อสาร โดยขั้นตอนหลัก ๆ คือ คำนวณค่าประวิงเวลาข่ายเชื่อมโยง (Transmission Link Cost) โดยการคำนวณค่าประวิงเวลาข่ายเชื่อมโยงใด ๆ ($T_{i,j}$) จากโหนด i ไปยังโหนด j นิยามออกเป็น 2 ส่วนคือ เวลาที่ต้องใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตควบคุม ($T_{control}$) โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเฉพาะแพ็กเกตร้องขอเส้นทางหรือ Route Request packet (RREQ) เท่านั้น และเวลาที่ต้องใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตข้อมูล (T_{data}) โดยแบบจำลองที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้พิจารณาถึงลักษณะทราฟฟิกของแพ็กเกต RREQ เป็นแบบแพร่กระจาย (Broadcast) นั้นหมายถึง โหนดที่ทำการส่งแพ็กเกต RREQ จะต้องใช้เวลาเนื่องจากการส่งแพ็กเกต RREQ ซึ่งแสดงแทนด้วย t_{send}^{c} และโหนดข้างเคียงที่อยู่ในระยะการส่งของโหนดที่ส่งแพ็กเกตทุกโหนดจะต้องใช้เวลาเนื่องจากการรับแพ็กเกต RREQ แทน

ด้วย t^{c}_{recv} เพราะฉะนั้นเวลาทั้งหมดที่จะต้องใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตควบคุม RREQ สามารถแสดงได้ในสมการที่ (3.1)

$$T_{control} = t^{c}_{send} \times N_{area(s)} \tag{3.1}$$

โดยที่เวลาที่ต้องใช้ในการส่งและรับแพ็กเกตควบคุม RREQ สามารถแสดงได้ในอีกรูปแบบหนึ่งจากสมการที่ (3.2) โดยความหมายของตัวแปรต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.1

$$T_{control} = [\frac{N_{area(s)} \times L_{rreq}}{f}] \tag{3.2}$$

ในส่วนเวลาที่ต้องใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตข้อมูลนั้น เนื่องจากแพ็กเกตข้อมูลมีลักษณะทราฟฟิกแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point หรือ Unicast) คือ โหนดที่ส่งแพ็กเกตข้อมูลจะต้องใช้เวลาจากการส่ง และโหนดที่เป็นโหนดปลายทางของแพ็กเกตข้อมูลจะต้องใช้เวลาจากการรับ ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะการใช้เวลาในการส่งข้อมูลเท่านั้น เนื่องจากทั้งด้านรับและด้านส่งจะใช้เวลาเท่ากัน

จากข้างต้นทำให้เวลาที่ต้องใช้ไปเนื่องจากการส่งข้อมูลจากโหนดหนึ่งไปยังอีกโหนดหนึ่งโดยผ่านข่ายเชื่อมโยงแบบไร้สายประกอบไปด้วย 2 ส่วน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.3) และ (3.4) จากสมการเวลาการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโหนดที่ส่งแพ็กเกตแทนด้วย t^{d}_{send} เวลาที่ใช้ในการรับข้อมูลของโหนดปลายทางของแพ็กเกตแทนด้วย t^{d}_{recv} ซึ่งสมการทั้งหมดคำนวณอยู่ภายใต้ข้อสมมติที่ว่าโหนดต้นทางทราบจำนวนข้อมูลที่ต้องการจะสื่อสารกับโหนดปลายทางทั้งหมด และแจ้งข้อมูลดังกล่าวให้โหนดในโครงข่ายทราบโดยผ่านแพ็กเกตร้องขอเส้นทางที่แทนด้วย L_{data} (หน่วยเป็นบิต)

$$T_{data} = t^{d}_{send} \tag{3.3}$$

$$T_{data} = [\frac{N_{total} \times L_{data}}{f}] \tag{3.4}$$

ความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ในสมการแสดงในตารางที่ 3.1 จากการคำนวณทั้งเวลาที่ต้องใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตควบคุม และเวลาที่ต้องใช้ไปเนื่องจากการส่งแพ็กเกตข้อมูลที่แสดงข้างต้นเป็นการคำนวณโดยไม่พิจารณาผลกระทบจากคุณภาพของช่องสัญญาณที่ไม่มีความแน่นอนในการส่งข้อมูล (โดยคุณภาพของช่องสัญญาณแสดงแทนด้วยค่าอัตราความผิดพลาดแพ็กเกตหรือ Packet Error Rate โดยการคำนวณค่านี้ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4) อย่างไรก็ตามจากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่สองว่าคุณภาพของช่องสัญญาณหรือข่ายเชื่อมโยงในความเป็นจริงย่อมที่จะเกิดข้อผิดพลาดขึ้นได้

เสมอและและมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งก็จะมีผลกระทบต่อเวลาที่โหนดจะต้องใช้ในการสื่อสารด้วยเช่นกัน นอกจากนั้นจากการทดลองในบทความที่นำเสนอยังชี้ให้เห็นว่าจะต้องนำเวลาที่ใช้ไปเนื่องจากผลกระทบนี้มาใช้ในการคำนวณค่าประวิงเวลาที่โครงข่ายจะต้องสูญเสียจึงจะทำให้โปรโตคอลที่ออกแบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยให้โครงข่ายสามารถทำงานได้ยาวนานขึ้นด้วย [10] เพราะฉะนั้นเวลาที่ใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตจริง ๆ แล้วไม่เพียงแต่เป็นเวลาที่ใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตข้อมูลโดยปราศจากความผิดพลาดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น (สมการที่ (3.4)) แต่จะรวมถึงเวลาที่จะต้องใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตที่เกิดความผิดพลาดซ้ำบนช่องสัญญาณ ณ เวลาใด ๆ ซึ่งเราเรียกเวลาที่ใช้ทั้งสองส่วนรวมกันว่า เวลาที่ใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือ (Reliable Transmission Time, RTT) โดยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาแบบจำลองการส่งซ้ำแบบ การส่งซ้ำระหว่างช่วงเชื่อมต่อ (Hop-by-Hop Retransmission หรือ HHR) เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณเวลาที่จะต้องใช้ในแต่ละส่วน

ตารางที่ 3.1 ความหมายของตัวแปรในสมการที่ (3.1) ถึงสมการที่ (3.4)

t_{send}^{c}	เวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตควบคุม RREQ (Second)
t_{recv}^{c}	เวลาที่ใช้ในการรับแพ็กเกตควบคุม RREQ (Second)
t_{send}^{d}	เวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูล (Second)
t_{recv}^{d}	เวลาที่ใช้ในการรับแพ็กเกตข้อมูล (Second)
L_{data}	ขนาดของแพ็กเกตข้อมูลที่ต้องการส่ง (Bits)
L_{rreq}	ขนาดของแพ็กเกตควบคุม (Bits)
N_{total}	จำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่โหนดต้นทางต้องการจะส่ง (Packets)
f	อัตราในการส่งแพ็กเกต (Mbps)
$N_{area(s)}$	จำนวนโหนดที่อยู่ในระยะการส่งของโหนดตัวส่ง (s)

กรณีของการส่งซ้ำระหว่างช่วงเชื่อมต่อ แพ็กเกตที่ผิดพลาดจากการส่งบนข่ายเชื่อมโยงใด ๆ จำเป็นจะต้องส่งข้อมูลที่ผิดพลาดซ้ำบนข่ายเชื่อมโยงนั้นเท่านั้น วิธีการนี้เหมาะสำหรับสภาพแวดล้อมที่มีการทำงานโครงข่ายแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ ซึ่งทั่วไปจะใช้ใน Link-Layer Retransmission จากลักษณะการทำงานที่ว่านี้ทำให้เวลาที่ใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตผ่านข่ายเชื่อมโยงที่กำลังพิจารณาจะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราความผิดพลาดแพ็กเกตของข่ายเชื่อมโยงตัวอื่น ๆ ที่อยู่ในเส้นทาง สำหรับการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้เราจะไม่จำกัดจำนวนครั้งสูงสุดที่อนุญาตให้มีการส่งซ้ำได้ (ในทางปฏิบัติ ระบบอาจจะกำหนดค่าสูงสุดในการส่งซ้ำไว้ที่ค่าหนึ่งเพื่อจำกัดการล่าช้าในการส่งแพ็กเกต)

เนื่องจากจำนวนของแพ็กเกตข้อมูลที่ต้องการส่งบนข่ายเชื่อมโยงที่กำลังพิจารณาอยู่จะเป็นอิสระกับข่ายเชื่อมโยงอื่น ๆ และมีการกระจายแบบ Geometric เพราะฉะนั้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาที่ใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือบนข่ายเชื่อมโยงใด ๆ จากโหนด i ไปยังโหนด j แทนด้วย $RTT_{(i,j)}$ ได้จากการนำเวลาที่ใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตข้อมูลในสมการที่ (3.4) มาพิจารณาถึงผลกระทบจากคุณภาพของช่องสัญญาณบนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i ไปยังโหนด j ณ ขณะเวลาที่พิจารณา ซึ่งจะได้ผลออกมาดังสมการที่ (3.5)

$$RTT_{(i,j)} = T_{data} \times \left(\frac{1}{(1 - p^{ij})} \right) \tag{3.5}$$

เพราะฉะนั้นค่าประวิงเวลาของข่ายเชื่อมโยงใด ๆ จากโหนด i ไปยังโหนด j แทนด้วย $T_{i,j}$ สามารถแสดงได้ในสมการที่ (3.6) โดยนำสมการที่ (3.2) รวมกับสมการที่ (3.5) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} T_{i,j} &= T_{control} + RTT_{(i,j)} \\ &= [\left(\frac{N_{area(s)} \times L_{rreq}}{f} \right)] + [T_{data} \times \left(\frac{1}{(1 - p^{ij})} \right)] \end{aligned} \tag{3.6}$$

จากสมการที่ (3.6) จะเห็นได้ว่าในกรณีของการส่งแพ็กเกตควบคุมไม่ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากคุณภาพของช่องสัญญาณ เนื่องจากแพ็กเกตควบคุม RREQ เป็นแพ็กเกตแบบแพร่กระจายซึ่งโหนดไม่จำเป็นจะต้องส่งยืนยันการส่งแพ็กเกตไปยังโหนดข้างเคียงอย่างถูกต้อง (ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 กำหนดให้การส่งแพ็กเกตแบบ Unicast เท่านั้นที่โหนดส่งจะต้องส่งแพ็กเกตไปยังโหนดปลายทางของแพ็กเกตอย่างถูกต้อง โดยโหนดปลายทางจะส่งแพ็กเกต Acknowledgment กลับไปยังโหนดที่ส่งแพ็กเกตมาให้เพื่อบอกว่าได้รับแพ็กเกตนั้นอย่างถูกต้อง)

3.1.2 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Process)

กระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอส่วนใหญ่จะคล้ายกับกระบวนการค้นหาเส้นทางของโปรโตคอล AODV นั้นคือ เมื่อโหนดต้องการจะส่งข้อมูลไปยังปลายทาง โหนดจะต้องแพร่กระจายแพ็กเกตร้องขอเส้นทาง (Route Request Packet หรือ RREQ) ไปทั่วทั้งโครงข่าย แต่ก่อนที่โหนดต้นทางจะแพร่กระจายแพ็กเกตออกไป โหนดจะต้องบันทึกค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นลงในแพ็กเกต RREQ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยแพ็กเกตการร้องขอเส้นทางที่นำมาใช้กับการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอได้เพิ่มเติมข้อมูลต่างๆ จากเดิมขึ้น 3 ส่วนดังนี้

- จำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่โหนดต้นทางจะใช้สื่อสาร (Number of Data packet) แทนด้วย N_{total} ซึ่งค่าในส่วนนี้จะแสดงจำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่โหนดต้นทางต้องการจะ

ใช้สื่อสารกับโหนดปลายทาง สาเหตุที่จะต้องกำหนดไว้เพื่อให้โหนดที่ได้รับแพ็กเกตร้องขอเส้นทางใช้ประมาณค่าเวลาที่จะใช้เพื่อรองรับการสื่อสารนี้

- เวลาที่โหนดจะต้องใช้ (Transmission time of node) เป็นเวลาที่โหนดจะต้องสูญเสียโดยไม่พิจารณาค่าเวลาที่จะต้องใช้เนื่องจากผลกระทบจากคุณภาพของช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ค่าเวลาที่ใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตควบคุม (Period of time for transmission control packet) คำนวณได้จากสมการที่ (3.2) และค่าเวลาที่ต้องใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตข้อมูล (Period of time for transmission data packets) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.4)
- ค่าการประวิงเวลารวมที่จะต้องใช้ (Total Transmission time) ซึ่งแสดงแทนด้วย T_p^{total} หมายความว่า เป็นค่าประวิงเวลาทั้งหมดที่โครงข่ายจะต้องใช้สำหรับเส้นทาง p

Source Address	Source Sequence number	...	Hop count	Num. of Data Packet	$< T'_{control}, T'_{data} >$	Total Transmission Time $< T_p^{total} >$

รูปที่ 3.1 โครงสร้างของแพ็กเกตร้องขอเส้นทาง RREQ ในโปรโตคอลที่นำเสนอ

โดยโหนดต้นทางจะต้องทำการคำนวณค่า $T_{control}$ และ T_{data} จากสมการที่ (3.2) และ (3.4) ตามลำดับแล้วบรรจุค่าที่ได้ลงในฟิลด์ $\langle T_{control}, T_{data} \rangle$ ของแพ็กเกต RREQ และกำหนดค่าเริ่มต้นของ T_p^{total} ให้เท่ากับศูนย์ จากนั้นก็ทำการแพร่กระจายแพ็กเกตไปยังโหนดข้างเคียง ต่อมาเมื่อโหนดข้างเคียงได้รับแพ็กเกต RREQ จะต้องทำการคำนวณ 2 ค่าคือ ค่าเวลาที่ใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือของข่ายเชื่อมโยงระหว่างตัวเอง (สมมุติว่าเป็นโหนด j) กับโหนดที่ส่งแพ็กเกต RREQ มาให้ (สมมุติว่าเป็นโหนด i) และอีกค่าหนึ่งเป็น เวลาที่ใช้เนื่องจากตัวเองจะต้องส่งแพ็กเกตควบคุมและแพ็กเกตข้อมูลไปยังโหนดข้างเคียง (ตามสมการที่ (3.2) และ (3.4) ตามลำดับ) โดยการคำนวณค่าเวลาที่ใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือจะเริ่มจากโหนดนำค่า T_{data} ซึ่งอยู่ในแพ็กเกต RREQ ที่ได้รับมาทำการคำนวณค่า $RTT_{(i,j)}$ โดยใช้สมการที่ (3.5) จากนั้นโหนด j จะต้องคำนวณค่าประวิงเวลาของข่ายเชื่อมโยงใด ๆ จากโหนด i ไปยังโหนด j ($T_{i,j}$) ได้จากสมการที่ (3.6) ซึ่งเป็นค่าประวิงเวลาของข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนดที่พิจารณาอยู่ปัจจุบันกับโหนดที่ส่งแพ็กเกต RREQ มายังโหนดที่พิจารณา ส่วนอีกหนึ่งค่าที่โหนดจะต้องทำการคำนวณคือ ค่าเวลาที่ใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตควบคุมและแพ็กเกตข้อมูลไปยังโหนดข้างเคียงตามสมการที่ (3.2) และ (3.4) ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าเวลาที่ใช้บนข่ายเชื่อมโยงถัดไป โดยไม่คำนึงถึงความผิดพลาดในการส่งข้อมูลบนข่ายเชื่อมโยง เมื่อโหนดคำนวณค่าทั้งสอง

เรียบร้อยแล้วโหนดจะนำ $T_{i,j}$ ที่คำนวณได้ไปบวกกับค่าประวิงเวลารวมข่ายเชื่อมโยงที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้ (อยู่ในฟิลด์ Total Transmission time) แล้วบรรจุค่าใหม่ที่ได้ลงในฟิลด์ของค่าประวิงเวลารวมของเส้นทางที่คำนวณได้ดังนี้

$$T_p^{total} = T_p^{total} + T_{i,j} = \sum_{k=1}^{i-1} T_{k,k+1} + T_{i,j} \tag{3.7}$$

จากสมการที่ (3.7) ถ้าสมมุติให้โหนดในเส้นทาง p ประกอบไปด้วย ($S = 1,2,...,N = D$) สามารถคำนวณหาค่าประวิงเวลารวมของเส้นทาง p ได้เป็น $T_p^{total} = \sum_{i=1}^{N-1} T_{i,i+1}$ ภายหลังจากบรรจุค่าทั้งสองลงในฟิลด์ของแพ็กเกต RREQ เรียบร้อยแล้วโหนดก็จะแพร่กระจายแพ็กเกตไปยังโหนดข้างเคียงของตัวเองต่อไป ขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นจะดำเนินไปจนกระทั่งแพ็กเกต RREQ ไปถึงยังโหนดปลายทาง

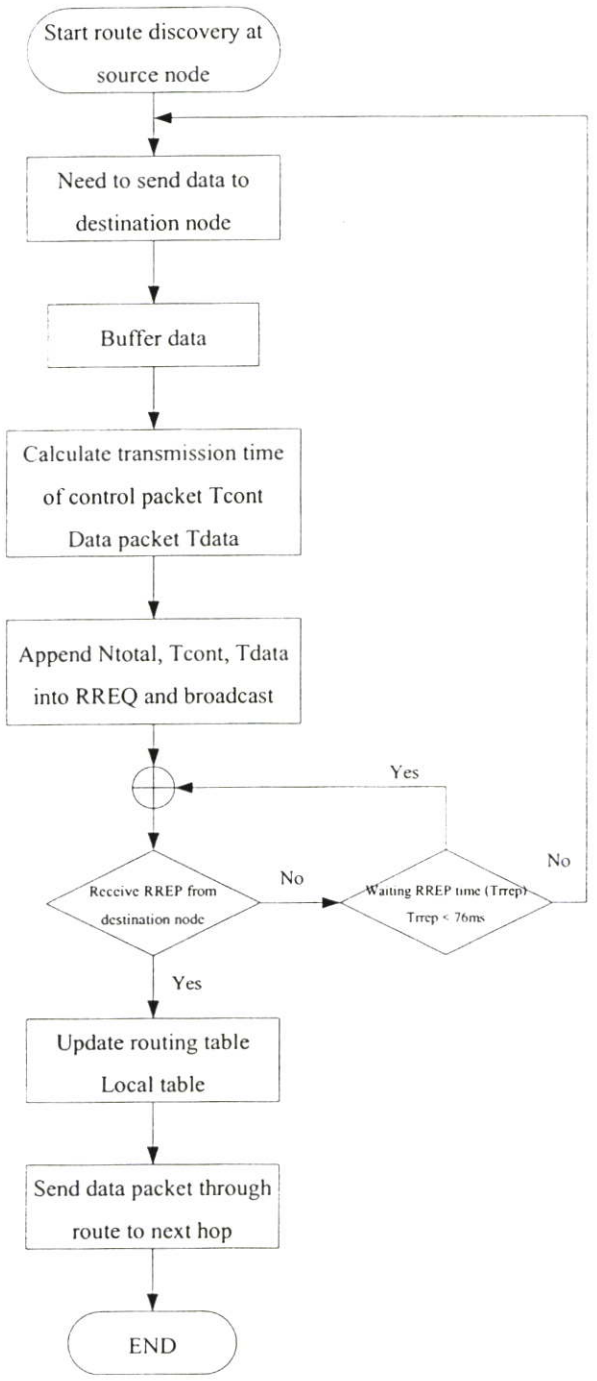
โดยขั้นตอนสุดท้ายหลังจากที่โหนดปลายทางได้รับแพ็กเกตร้องขอเส้นทางเป็นจำนวนหนึ่งแล้ว จะต้องพิจารณาว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่เหมาะสมจากจำนวนเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทางด้วยกระบวนการจีเนติกอัลกอริทึม โดยพิจารณาได้จากสมการที่ (3.8) ซึ่งเป็นสมการฟังก์ชันความเหมาะสม เส้นทางที่ถูกเลือกขึ้นมานั้นจะเป็นเส้นทางที่มีค่าประวิงเวลารวมตลอดทั้งเส้นทางต่ำที่สุดหรือกล่าวได้ว่าเป็นเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพในการสื่อสารแพ็กเกตข้อมูลสูงที่สุด ณ ช่วงเวลานั้น

$$T^* = \min_{\forall p \varepsilon A} \left(T_p^{total} \right) \tag{3.8}$$

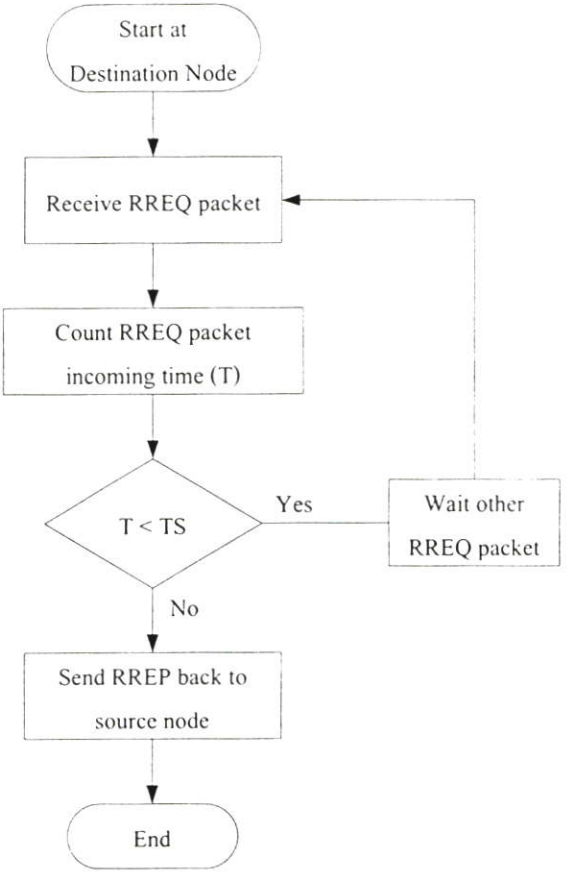
เมื่อ A เป็นเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่โหนดปลายทางได้รับ ภายหลังจากที่โหนดเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดจากสมการที่ (3.8) ได้แล้วโหนดปลายทางจะสร้างแพ็กเกตการตอบรับเส้นทาง (Route Reply Packet, RREP) เพื่อตอบกลับไปบอกโหนดต้นทางให้ทราบ โดยเส้นทางที่โหนดปลายทางใช้ส่งจะเป็นเส้นทางเดียวกันกับเส้นทางที่ดีที่สุด โดยที่ทุกโหนดที่อยู่ในเส้นทางเมื่อได้รับแพ็กเกตตอบรับเส้นทางแล้วจะต้องทำการปรับปรุงตารางการจัดเส้นทางและส่งแพ็กเกตดังกล่าวต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงโหนดต้นทาง ภายหลังจากโหนดต้นทางได้รับแพ็กเกตการตอบรับเส้นทางแล้วโหนดก็จะทำการปรับปรุงเส้นทางที่ได้ในตารางการจัดเส้นทางของตัวเองแล้วก็เริ่มทำการส่งแพ็กเกตข้อมูลไปตามเส้นทางที่ได้มาก็เป็นอันเสร็จกระบวนการค้นหาเส้นทาง

โดยขั้นตอนของกระบวนการค้นหาเส้นทางทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ในผังงานในรูปที่ 3.2 ถึงรูปที่ 3.5 โดยแยกตามกระบวนการที่โหนดแต่ละโหนดจะต้องกระทำซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในผังงานในรูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนที่เกิดขึ้นกับโหนดต้นทาง ส่วนผังงานในรูปที่ 3.3

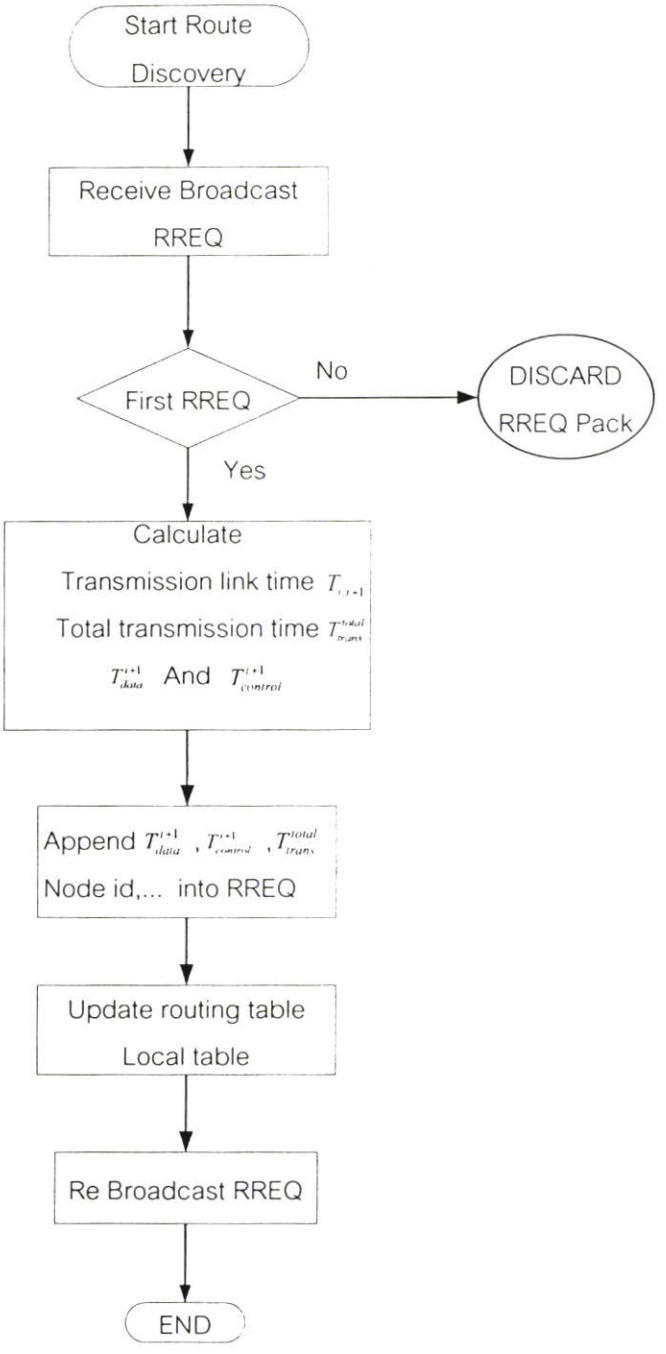
และ ผังงานในรูปที่ 3.4 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโหนดปลายทางและกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโหนดระหว่างทาง ตามลำดับ และสุดท้ายเป็นกระบวนการรวมทั้งหมดของการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงคุณภาพช่องสัญญาณด้วย GA (Proposed-GA) ดังแสดงในผังงานที่ 3.5



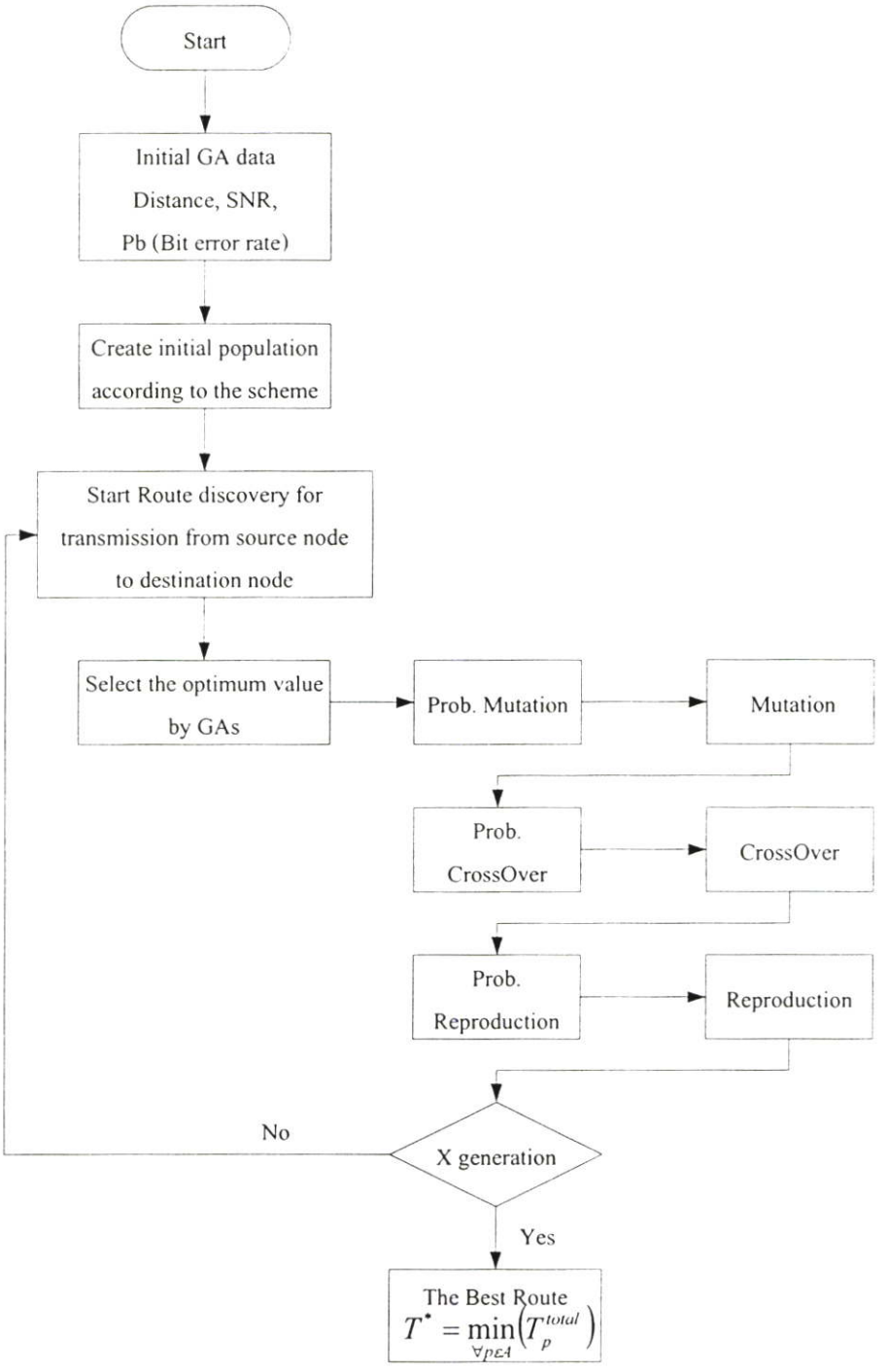
รูปที่ 3.2 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดต้นทางสำหรับการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงคุณภาพช่องสัญญาณด้วย GA (Proposed-GA)



รูปที่ 3.3 ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดปลายทางสำหรับการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงคุณภาพช่องสัญญาณด้วย GA (Proposed-GA)



รูปที่ 3.4 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดระหว่างทางสำหรับการค้นหาเส้นทางแบบคำนึงถึงคุณภาพช่องสัญญาณด้วย GA (Proposed-GA)



รูปที่ 3.5 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางรวมทั้งหมดสำหรับการค้นหาเส้นทางแบบคำนึงถึงคุณภาพช่องสัญญาณด้วย GA (Proposed-GA)

3.1.3 กลไกการทำงานของกระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism)

กระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดหนึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อใดก็ตามที่โหนดต้นทางต้องการจะติดต่อหรือส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางในโครงข่าย แต่ตรวจไม่พบเส้นทางที่จะส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางในตารางการจัดเส้นทาง ณ ชั้นเครือข่าย แต่กรณีที่โหนดตรวจพบเส้นทางที่สามารถใช้งานได้ก็สามารถที่จะส่งข้อมูลไปตามเส้นทางที่ทราบได้ทันทีโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการค้นหาเส้นทาง โดยตารางการจัดเส้นทางของแต่ละโหนดนั้นจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับโหนดปลายทาง โหนดถัดไปที่จะต้องส่งแพ็กเกตออกไปยังโหนดปลายทาง และยังบอกถึงระยะเวลาที่สามารถใช้เส้นทางได้

กระบวนการค้นหาเส้นทางจะเริ่มที่โหนดต้นทางสร้างแพ็กเกตการร้องขอเส้นทาง (Route Request, RREQ) ซึ่งภายในแพ็กเกตประกอบไปด้วยข้อมูลต่าง ๆ สำหรับค้นหาเส้นทางดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งข้อมูลในแต่ละส่วนจะมีความหมายและการกำหนดค่าที่แตกต่างกันดังนี้

- หมายเลขที่อยู่ของต้นทาง (Source address, SrcID) เป็นหมายเลขที่แสดงความเป็นเอกลักษณ์ของแต่ละโหนดและมีค่าที่แตกต่างกันโดยส่วนใหญ่จะใช่เป็นหมายเลข IP เพื่อสำหรับบอกว่าแพ็กเกตดังกล่าวใครเป็นต้นทางในการส่งแพ็กเกต

- หมายเลขแสดงลำดับของต้นทาง (Source Sequence Number, SrcSeqNum) เป็นหมายเลขของโหนดต้นทางที่ใช้เพื่อบอกว่าเส้นทางเป็นเส้นทางที่ใหม่หรือเก่า โดยจะมีการเพิ่มค่าขึ้นทุกครั้งเมื่อมีการส่ง RREQ หรือการตอบรับเส้นทาง

- หมายเลขระบุแพ็กเกตการแพร่กระจาย (Broadcast Identifier, BcastID) เป็นตัวเลขจำนวนนับของแต่ละโหนดที่จะเพิ่มค่าที่ละ "1" ทุกครั้งเมื่อทำการแพร่กระจายแพ็กเกต RREQ

- หมายเลขแสดงลำดับของปลายทาง (Destination Sequence Number, DestSeqNum) เป็นหมายเลขของโหนดปลายทางเพื่อบอกว่าเส้นทางเป็นเส้นทางที่ใหม่หรือเก่าเช่นเดียวกับ SrcSeqNum โดยจะมีการเพิ่มค่าขึ้นทุกครั้งเมื่อมีการส่ง RREQ หรือการตอบรับเส้นทาง แต่ในการกำหนดค่าลงในข้อมูลนี้ โหนดต้นทางจะใส่ค่า DestSeqNum ล่าสุดของโหนดปลายทางที่ตนเองทราบ แต่ถ้าไม่ทราบเลยจะกำหนดให้มีค่าเป็น "0"

- จำนวนช่วงการเชื่อมต่อ (Hop Count) ใช้เพื่อบอกจำนวนครั้งที่แพ็กเกต RREQ ถูกส่งต่อผ่านโหนดต่าง ๆ โดยจะเพิ่มค่าที่ละ "1" เมื่อผ่านโหนดหนึ่งโหนด ซึ่งค่าเริ่มต้นที่โหนดต้นทางเป็นผู้กำหนดคือ "0"

- จำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่โหนดต้นทางจะใช้สื่อสาร (Number of Data packet) แทนด้วย N_{total} ซึ่งค่าในส่วนนี้จะแสดงจำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่โหนดต้นทางต้องการจะใช้สื่อสารกับโหนดปลายทาง

- เวลาที่โหนดจะต้องใช้ (Transmission time of node) เป็นเวลาที่โหนดจะต้องสูญเสียโดยไม่พิจารณาค่าเวลาที่จะต้องใช้เนื่องจากผลกระทบจากคุณภาพของช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ค่าเวลาที่ใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตควบคุม (Period of time for transmission control packet) และค่าเวลาที่ต้องใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเกตข้อมูล (Period of time for transmission data packets)

- ค่าการประวิงเวลารวมที่จะต้องใช้ (Total Transmission time) ซึ่งแสดงแทนด้วย T_p^{total} หมายความว่า เป็นค่าประวิงเวลาทั้งหมดที่โครงข่ายจะต้องใช้สำหรับเส้นทาง p

Source Address	Source Sequence number	Broadcast ID	Destination Address	Destination Sequence number	Hop Count	Num. of Data Packet	$<T_{control}, T_{data}>$	Total Transmission Time $<T_p^{total}>$

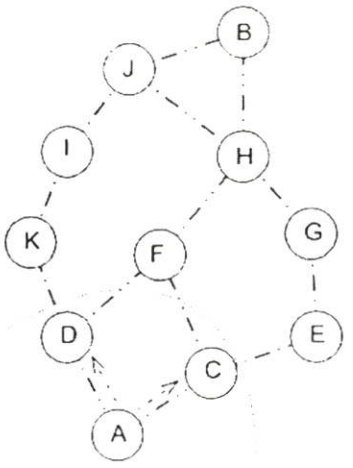
รูปที่ 3.6 โครงสร้างของแพ็กเกตการร้องขอเส้นทาง (Route Request)

ภายหลังจากที่โหนดต้นทางสร้างแพ็กเกตการร้องขอเส้นทางและบรรจุค่าต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้เสร็จเรียบร้อย โหนดต้นทางจะทำการแพร่กระจายแพ็กเกต RREQ ไปยังโหนดข้างเคียงที่อยู่ในระยะการส่ง (Transmission Range) จากตัวอย่างในรูปที่ 3.7 โหนดต้นทาง A ต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง B โดยโหนด A เริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางโดยการแพร่กระจายแพ็กเกต RREQ ไปยังโหนดรอบข้าง ณ ที่นี้คือโหนด C และ D และเมื่อโหนด C และ D ได้รับแพ็กเกต RREQ จากโหนดต้นทางแล้วก็จะดำเนินตามกระบวนการดังต่อไปนี้

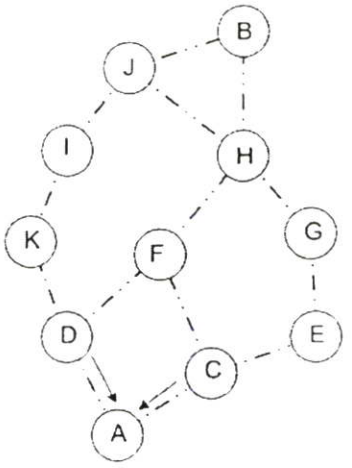
(1) โหนดจะทำการตรวจสอบข้อมูล <SrcID, BcastID> ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความเป็นเอกลักษณ์ของแต่ละแพ็กเกต RREQ ซึ่งถูกนำใช้เพื่อลดจำนวนแพ็กเกตที่มีการแพร่กระจายมากเกินความจำเป็น โดยโหนดจะทำการเปรียบเทียบค่าทั้งสองกับค่าในตารางข้อมูลส่วนตัวของแต่ละโหนด เพื่อตรวจดูว่าแพ็กเกตที่ได้รับเคยถูกประมวลผลไปก่อนหน้า (เคยได้รับแพ็กเกต RREQ นี้แล้ว) แล้วหรือไม่ ถ้าได้ประมวลผลไปก่อนหน้านี้ โหนดจะทำการลบแพ็กเกตนี้ทิ้งไปและจะไม่ดำเนินการใด ๆ ต่อไป แต่ถ้าเคยได้รับแพ็กเกต RREQ นี้เป็นครั้งแรกก็จะทำการบันทึกค่า <SrcID, BcastID> ที่อยู่ในส่วนหัวของแพ็กเกตไว้ในตารางข้อมูลส่วนตัวเพื่อใช้ในการตรวจสอบครั้งต่อไปเมื่อได้รับแพ็กเกต RREQ เข้ามา ต่อไปจะดำเนินกระบวนการตามข้อ (2)

(2) โหนดทำการตรวจสอบว่าตัวเองเป็นโหนดปลายทาง (DestID) หรือไม่ โดยการเปรียบเทียบหมายเลขที่อยู่ของตัวเองกับค่า DestID ในแพ็กเกต RREQ ที่ได้รับ ถ้าตรงกันแสดงว่าตัวเองเป็นโหนดปลายทางที่โหนดต้นทางต้องการจะติดต่อสื่อสาร โหนดก็จะเข้าสู่กระบวนการตอบรับเส้นทางซึ่งจะกล่าวในภายหลัง แต่ถ้าตัวเองไม่ใช้โหนดปลายทาง โหนดจะดำเนินกระบวนการที่ (3) ต่อไป

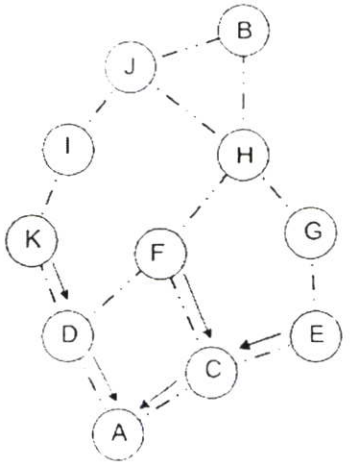
(3) เมื่อโหนดไม่ใช้โหนดปลายทาง โหนดจะต้องทำการตรวจสอบว่าตัวเองมีเส้นทางไปยังโหนดปลายทางที่ใหม่และสามารถใช้งานได้ในตารางเส้นทางเดินของข้อมูล (Route Table) หรือไม่ การจะดูว่าเป็นเส้นทางใหม่นั้น จะดูจากค่าหมายเลขแสดงลำดับของปลายทางที่เก็บอยู่ในตารางเส้นทางเดินของข้อมูลกับค่าหมายเลขแสดงลำดับของปลายทางที่เก็บอยู่ในแพ็กเกต RREQ ถ้าค่าที่อยู่ในตารางมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่อยู่ในแพ็กเกตก็แสดงว่าเส้นทางนั้นเป็นเส้นทางที่ใหม่ แต่ในทางตรงกันข้าม เส้นทางที่แสดงอยู่ในตารางถือว่าเป็นเส้นทางที่เก่าไม่สามารถนำมาใช้งานได้ เพราะฉะนั้นถ้าโหนดมีเส้นทางใหม่และสามารถใช้งานได้ โหนดจะดำเนินกระบวนการตอบรับเส้นทางโดยไม่ต้องทำการแพร่กระจายแพ็กเกต RREQ ต่อไป แต่ถ้าไม่มีเส้นทางก็จะไปทำขั้นตอนต่อไป (ขั้นตอนที่ 4)



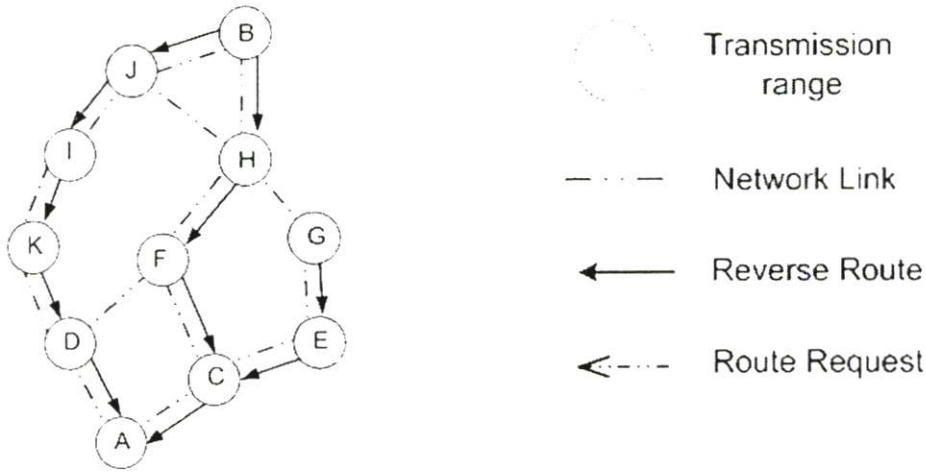
(ก) ระยะการส่งขอมูลและการแพร่กระจายแพ็กเกต RREQ ของโหนด A



(ข) การสร้างเส้นทางย้อยกลับหลังจากได้รับสัญญาณแพ็ก-เกต RREQ



(ค) ภายหลังจากที่โหนด K F และ E ได้รับสัญญาณแพ็กเกต RREQ



(ง) ภายหลังจากแพ็กเกต RREQ แรกไปถึงยังโหนดปลายทาง B

(จ) สัญลักษณ์และความหมายที่ใช้ในรูปที่ 3.7 (ก) - (ง)

รูปที่ 3.7 กระบวนการค้นหาเส้นทางแบบที่นำเสนอ

(4) ก่อนที่โหนดจะแพร่กระจายแพ็กเกต RREQ ไปยังโหนดรอบข้างของตัวเอง โหนดจะต้องทำการเพิ่มข้อมูล Hop Count ไปจากเดิมอีก "1" รวมทั้งดึงข้อมูลจากแพ็กเกต RREQ เข้าไปเก็บไว้ในตารางเส้นทางเดินข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการสร้างเส้นทางย้อนกลับ (Reverse Route) โดยเส้นทางย้อนกลับนี้จะนำมาใช้เพื่อให้แพ็กเกตตอบรับเส้นทาง (Route Reply, RREP) สามารถเดินทางกลับไปยังโหนดต้นทางของ RREQ ได้ โดยที่เส้นทางย้อนกลับนี้จะถูกกำหนดระยะเวลาในการใช้งานไว้ ถ้าในช่วงเวลาที่กำหนดไม่มีการส่งแพ็กเกตอบรับเส้นทางเดินทางมา โหนดก็จะทำการลบข้อมูลของเส้นทางย้อนกลับนี้ทิ้ง

จากตัวอย่างในรูปที่ 3.7(ข) สมมุติว่าโหนด C และ D ไม่ทราบเส้นทางไปยังโหนด B (ไม่มีข้อมูลเส้นทางหรือมีข้อมูลแต่เป็นเส้นทางที่เก่าไม่สามารถใช้งานได้) ฉะนั้นโหนดทั้งสองก็จะสร้างเส้นทางย้อนกลับที่ชี้กลับไปยังโหนดที่ส่งแพ็กเกต RREQ มาให้ ณ ที่นี้คือชี้กลับไปยังโหนด A ดังที่แสดงในรูปที่ 3.7(ข) และเพิ่มค่า Hop Count เป็น "1" พร้อมทั้งแพร่กระจายแพ็กเกต RREQ ที่ได้รับการปรับค่าแล้วไปยังโหนดรอบข้างของตัวเอง แพ็กเกต RREQ จากโหนด C จะถูกส่งไปยังโหนด E และ F ขณะที่โหนด F และ K จะได้รับแพ็กเกตที่ส่งมาจากโหนด D ดังนั้นโหนด E, F, และ K จะสร้างเส้นทางย้อนกลับและเพิ่มค่า Hop Count แล้วทำการแพร่กระจายแพ็กเกตไปยังโหนด รอบข้างต่อไปดังแสดงในรูปที่ 3.7(ค) จากรูปกำหนดให้โหนด F ได้รับแพ็กเกต RREQ จากโหนด C ก่อน (ใช้เวลาในการส่งแพ็กเกตควบคุมระหว่างโหนด C กับ F สั้นกว่าเวลาระหว่างโหนด D กับ F) กระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นจะดำเนินไปจนกระทั่งโหนดปลายทาง B ได้รับแพ็กเกตการร้องขอเส้นทางดังแสดงในรูปที่ 3.7(ง) โหนดปลายทาง B ก็จะตอบสนองโดยการส่งแพ็กเกตตอบ

รับ RREP เพื่อตอบรับเส้นทางที่ได้ร้องขอมา อีกกรณีหนึ่งจากรูปที่ 3.7(ง) ถ้าสมมุติให้โหนด J ทราบเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง B และเป็นเส้นทางที่สามารถใช้งานได้ ดังนั้นโหนด J ก็จะทำการตอบรับเส้นทางที่ได้ร้องขอมาโดยการส่งแพ็กเกต RREP กลับไปยังโหนดต้นทาง A เช่นกัน

Source address	Destination address	Destination Sequence number	Hop Count	Lifetime

รูปที่ 3.8 โครงสร้างของแพ็กเกตการตอบรับเส้นทาง (Route Reply หรือ RREP)

ขั้นตอนในการตอบรับเส้นทางจากที่ร้องขอมานั้น โหนดที่จะทำการตอบรับเส้นทางจะสร้างแพ็กเกตตอบรับเส้นทาง (RREP) ณ รูปที่ 3.7(ง) คือโหนด B โดยโครงสร้างของแพ็กเกตแสดงในรูปที่ 3.8 โดยที่ค่า SrcID, DestID ได้จากการสำเนาจาก RREQ ในส่วน DestSeqNum จะเป็นค่าจำนวนนับล่าสุดของโหนด B เอง ส่วน Hop Count จะถูกกำหนดค่าให้เป็น "0" ใหม่และสุดท้ายคือค่าอายุการใช้งานของเส้นทาง (Life Time) ซึ่งเป็นตัวกำหนดอายุการใช้งานของเส้นทางนี้ก่อนที่โหนดจะบันทึกว่าเส้นทางนี้ไม่สามารถใช้งานได้ เมื่อกำหนดค่าต่าง ๆ ลงในแพ็กเกต RREP แล้วโหนดจะทำการส่งแพ็กเกตนี้กลับไปยังโหนดต้นทางโดยผ่านทางเส้นทางย้อนกลับที่ได้สร้างขึ้นมาก่อนหน้านี้ ในกรณีตัวอย่างจะผ่านเส้นทางของโหนด B -> H -> F -> C -> A

ในระหว่างที่แพ็กเกต RREP ผ่านโหนดต่าง ๆ กลับไปยังโหนด A โหนดที่อยู่ระหว่างเส้นทางจะทำการตรวจสอบข้อมูลของแพ็กเกตและเก็บข้อมูลที่ได้ในตารางเส้นทางเดินของข้อมูลเพื่อใช้ในการเรียนรู้ข้อมูลใหม่ โดยโหนดจะทำการบันทึกข้อมูลใหม่หรือปรับปรุงข้อมูลเก่าที่มีอยู่ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขข้อใดข้อหนึ่งดังต่อไปนี้ (1) ไม่เคยมีข้อมูลของโหนดปลายทาง B ในตาราง ข้อที่ (2) คือค่า DestSeqNum สำหรับโหนดปลายทาง B ในแพ็กเกต RREP มีค่ามากกว่าค่าที่เก็บในตาราง (3) ค่า DestSeqNum มีค่าเท่ากันแต่เส้นทางใหม่มีระยะทางที่สั้นกว่า นอกจากนั้นโหนดที่ได้รับแพ็กเกต RREP ก็จะสร้างเส้นทางย้อนกลับไปยังโหนดที่ส่งแพ็กเกตมาเช่นกันซึ่งเราเรียกเส้นทางนี้ว่าเป็น เส้นทางไปข้างหน้า (Forward Route) เพื่อป้องกันความสับสนกับเส้นทาง reverse route ที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ จากนั้นเมื่อโหนดต้นทางได้รับแพ็กเกต RREP ก็เป็นอันว่าจบขั้นตอนกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดต้นทาง โหนดก็สามารถส่งแพ็กเกตข้อมูลไปยังโหนดถัดไปตามที่ระบุไว้ในเส้นทาง forward route เพื่อส่งข้อมูลไปโหนดปลายทาง B แต่กรณีที่โหนดได้รับแพ็กเกต RREP มากว่าหนึ่งแพ็กเกต (สาเหตุมาจากมีบางโหนดทราบข้อมูลเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง B จากตัวอย่างในรูปที่ 3.7 สมมุติให้โหนด J ทราบแส้นทางเพราะฉะนั้น โหนดต้นทาง A ก็จะได้รับ RREP ที่ผ่านมาตามเส้นทาง J -> I -> K -> D -> A) ในกรณีนี้โหนดจะทำการตรวจสอบว่าเส้นทางใดใช้เวลาในการส่งแพ็กเกตข้อมูลไปยังปลายทาง B ที่สั้นกว่าก็จะสลับไปใช้เส้นทางนั้นในการส่งข้อมูลแทนด้วยจีเนติกอัลกอริทึม

3.1.4 กระบวนการดูแลเส้นทาง (Route Maintenance)

การเคลื่อนที่อย่างอิสระของโหนดในโครงข่ายแอดฮอกทำให้รูปแบบของทอพอโลยีมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและไม่สามารถทำนายได้ล่วงหน้า ทำให้โอกาสที่เส้นทางที่อยู่ระหว่างการสื่อสารระหว่างโหนดใด ๆ สามารถจะขาดหรือเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ตลอดเวลา ดังนั้นโพรโทคอลที่ดีควรมีวิธีการดูแลหรือแจ้งขอผิดพลาดนี้ให้แก่โหนดในโครงข่ายทราบเพื่อทำการซ่อมแซ่มหรือหาเส้นทางใหม่ นอกจากการเคลื่อนที่แล้วโหนดก็อาจจะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่หมดก็เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ทำให้ข่ายเชื่อมโยงที่กำลังใช้งานอยู่เกิดขาดหรือความเสียหาย (Link Failure)

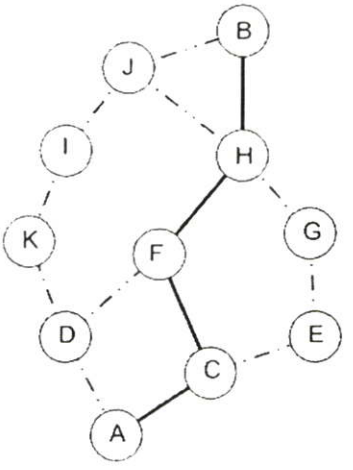
กระบวนการดูแลเส้นทางจะถูกดำเนินเมื่อใดก็ตามที่ โหนดต้นทางเคลื่อนที่ออกนอกระยะการส่งของโหนดถัดไปของเส้นทาง อีกกรณีหนึ่งคือ โหนดระว่างที่อยู่ในเส้นทางที่กำลังใช้งานอยู่เคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางหรือแบตเตอรี่ของโหนดถูกใช้งานจนหมด (ไม่สามารถจะทำการใด ๆ ได้อีกต่อไป) โดยในกรณีแรกนั้น โหนดต้นทางจะทำการเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.1.3 แต่กรณีที่ 2 โหนดที่ตรวจพบความผิดพลาด (โหนดไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดถัดไปได้สำเร็จ) จะแจ้งข้อมูลความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงด้วยแพ็กเกตแสดงความเสียหาย (Route Error, RERR) ดังกล่าวไปบอกทุกโหนดก่อนหน้านี้และโหนดรอบข้างที่ยังทำงานอยู่ (Active neighbor) โดยการใช้หมายเลขแสดงลำดับค่าใหม่คือ ค่าหมายเลขแสดงลำดับที่มากกว่าค่าเดิมอยู่ "1" และจำนวน Hop Count จะถูกตั้งค่าให้เป็นอนันต์ (Infinite) สำหรับโหนดที่ใช้งานอยู่ เมื่อโหนดต้นทางได้รับข้อมูลความเสียหาย จากโหนดที่ตรวจพบความเสียหายแล้ว โหนดต้นทางอาจจะทำการเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางอีกครั้งถ้ายังคงต้องการที่จะติดต่อสื่อสารกับโหนดปลายทางอีกหรือหยุดการทำงาน

การป้องกันไม่ให้โหนดใช้เส้นทางผ่านไปยังข่ายเชื่อมโยงที่เกิดข้อผิดพลาดดังกล่าวอีก ทุกโหนดที่ได้ข้อความจากแพ็กเกต RERR จะต้องทำการตรวจสอบในตารางเส้นทางเดินของข้อมูลของตนเองว่ามีเส้นทางใดบางที่ต้องใช้โหนดดังกล่าวเพื่อไปยังโหนดปลายทาง ถ้าตรวจพบว่ามีเส้นทางดังกล่าวโหนดจะทำการลบเส้นทางนั้นทิ้งไป ในส่วนขั้นตอนในการตรวจสอบสถานะของข่ายเชื่อมโยงว่าเกิดความเสียหายหรือไม่นั้นมีด้วยกัน 2 วิธีคือ การใช้ความสามารถของกระบวนการในชั้นข่ายเชื่อมโยงและชั้นเครือข่าย

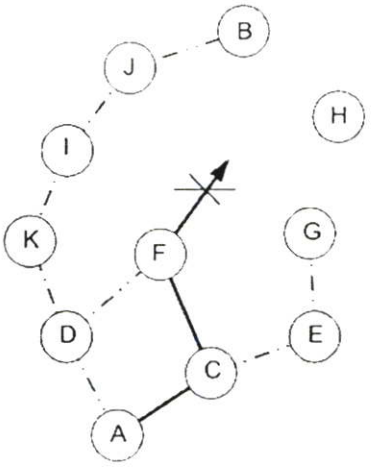
- วิธีแรกคือ ใช้การแพร่กระจายแพ็กเกตข่าวสารทักทาย (Hello message) โหนดจะทำการแพร่กระจาย hello message ไปยังโหนดรอบข้างซึ่งประกอบไปด้วย ข้อมูลเฉพาะตัวของโหนดนั้นและหมายเลขแสดงลำดับของโหนด โดยที่ค่าหมายเลขแสดงลำดับของโหนดจะไม่ถูกเปลี่ยนแปลง

สำหรับการส่ง hello message โดย hello message ได้ถูกป้องกันไม่ให้มีการทำการแพร่กระจายแพ็กเกตต่อไปอีกครั้งหลังจากได้รับมาในครั้งแรกด้วยการตั้งค่า Time To Life (TTL) เท่ากับ 1 ภายหลังจากที่โหนดรอบข้างได้รับแพ็กเกตดังกล่าวแล้วโหนดก็จะต้องทำการปรับปรุงข้อมูลการเชื่อมต่อท้องถิ่น (Local Connectivity) แต่ถ้าโหนดไม่ได้รับ hello message เป็นจำนวน allowed_hello_loss ติดต่อกันหรือช่วงเวลาที่กำหนดจากโหนดรอบข้าง นั้นแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมต่อท้องถิ่นจากเดิมออกไป (ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายหรือไม่มีการเชื่อมต่อกัน) ซึ่งถ้าเป็นกรณีที่ไม่ได้รับจากโหนดรอบข้างที่ใช้งานในการส่งข้อมูลอยู่ โหนดก็จะตัดสินว่าข่ายเชื่อมโยงถัดไปเกิดความเสียหายไม่สามารถส่งข้อมูลต่อไปได้

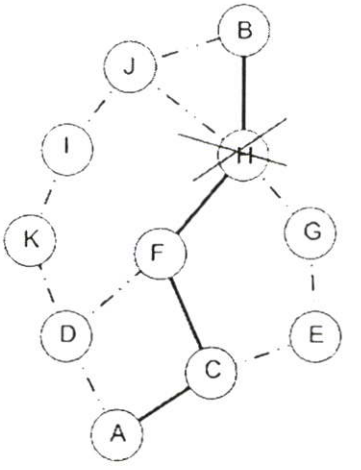
- วิธีที่สองคือ การใช้ link-layer notification ซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้จากมาตรฐาน IEEE 802.11 [6] โดยแต่ละครั้งที่มีการส่งแพ็กเกตไปยังโหนดถัดไปที่กำลังใช้งานอยู่ โหนดจะต้องมีการตรวจสอบการเชื่อมต่อเช่น ไม่ได้รับแพ็กเกตการตอบรับจากการส่ง (Acknowledge) หรือไม่ได้รับแพ็กเกต Clear to send (CTS) หลังจากที่ส่ง Ready To Send (RTS) ออกไป



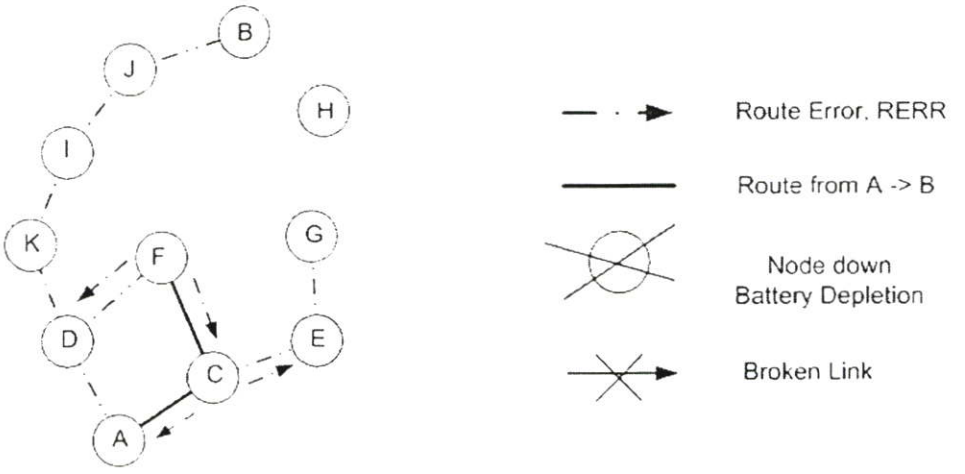
(ก) ทอพอโลยีของโครงข่ายหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการค้นหาเส้นทาง



(ข) โหนด H เคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางการสื่อสาร



(ค) โหนด H ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่หมดระหว่างการสื่อสาร



(ง) โหนด F แจ้งความเสียหายที่เกิดขึ้นของข่ายเชื่อมโยง F – H ให้กับโหนดที่เกี่ยวข้อง

(จ) สัญลักษณ์และความหมายที่ใช้ในรูปที่ 3.9 (ก) - (ง)

รูปที่ 3.9 กระบวนการดูแลเส้นทางของกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้วิธีแรกคือ การใช้แพ็กเกตข่าวสารทักทายในการตรวจจับความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยงและตรวจสอบสถานะของการเชื่อมต่อแบบท้องถิ่น เนื่องจากวิธีนี้ทำให้โหนดสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้อย่างรวดเร็วแตกต่างจากวิธีที่สองที่จะต้องรอจนกว่าจะมีการรับส่งแพ็กเกตระหว่างโหนดขึ้นจริง ๆ จึงจะสามารถตรวจจับข้อผิดพลาดได้ ซึ่งผลดังกล่าวอาจจะทำให้เกิดการสูญเสียของแพ็กเกตข้อมูลเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับวิธีการแบบแพ็กเกตข่าวสารทักทายที่จะต้องใช้จำนวนโอเวอร์เฮด (Overhead) แพ็กเกตมากขึ้นเพื่อตรวจจับการทำงานดังกล่าว นอกจากนั้นวิธีที่สองเป็นวิธีที่ไม่มีความสามารถในการพิจารณาว่าโหนดใดเป็นโหนดรอบข้าง (มีการเชื่อมต่อแบบท้องถิ่น) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการทำให้กระบวนการจัดสรรเส้นทางมีประสิทธิภาพในด้านการอนุรักษ์มากขึ้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดช่วงเวลารอเป็น 76 มิลลิวินาที

ตัวอย่างกระบวนการดูแลเส้นทางของกระบวนการจัดสรรเส้นทาง ขอให้พิจารณาตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 3.9(ก) เมื่อโหนด H เคลื่อนออกนอกเส้นทาง (รูปที่ 3.9(ข)) หรือโหนดใช้พลังงานจากแบตเตอรี่จนหมดขณะกำลังส่งข้อมูลอยู่ (รูปที่ 3.9(ค)) ทำให้ทอพอโลยีของโครงข่ายเกิดความเปลี่ยนแปลงและทำให้โหนด F ไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนด H เพื่อไปยังปลายทาง B เมื่อโหนด H ตรวจพบว่าข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด H และ F เกิดความเสียหายโหนด H จะตรวจสอบข้อมูลในตารางเส้นทางเดินข้อมูลของตนเองซึ่งแสดงในตารางที่ 3.2 และพบว่าโหนด H ถูกใช้เป็นเส้นทางไปยังโหนด B และโหนดรอบข้างที่ยังทำงานอยู่ของทุกเส้นทางรวมกันคือ โหนด C, D, และ E ซึ่งหมายความว่าโหนดเหล่านี้จะต้องใช้เส้นทางโหนด H ไปยังโหนดอื่น ๆ ดังนั้นโหนดดังกล่าวภายหลังจากได้รับแพ็กเกต RERR จากโหนด F จะต้องทำการปรับปรุงหรือลบข้อมูลที่

เกี่ยวข้องทิ้ง และจะส่งแพ็กเกต RERR ต่อไปจนกระทั่งโหนดต้นทาง A ได้รับแพ็กเกต RERR ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.9(ง) ต่อจากนั้นโหนด A จะเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางอีกครั้งหรือจบการทำงาน

ตารางที่ 3.2 ตารางเส้นทางเดินข้อมูลของโหนด F

Dest.	Next Hop	Distance	Active neighbor	Other fields
A	C	2	H	•••
B	H	2	D, C	•••
C	C	1	H	•••
D	D	1	C, H	•••
E	C	2	D, H	•••
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

3.2 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอกระบวนการค้นหาเส้นทางโดยคำนึงถึงคุณภาพช่องสัญญาณไร้สายด้วยจีเนติกอัลกอริทึม (***Proposed – GA***) และกล่าวถึงกระบวนการค้นหาเส้นทางของโปรโตคอลที่นำเสนอ

โดยเป้าหมายของโปรโตคอลการค้นหาเส้นทางแบบที่เสนอคือ *"ลดค่าประวิงของโครงข่ายและเพิ่มค่าวิสัยสามารถมากที่สุด"* ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่จะสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้และเพื่อให้สามารถใช้งานโครงข่ายได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตาม การพยายามลดค่าประวิงเวลาเพียงอย่างเดียวไม่ใช้เป็นแนวทางที่ดีที่สุด เนื่องจากว่ายังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการใช้งานโครงข่ายไร้สายโดยตรง เช่น พลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดของโหนด สภาพแวดล้อมต่างๆ เป็นต้น

บทที่ 4

สภาพแวดล้อมการจำลอง ผลการจำลอง และวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ

รายละเอียดของงานวิทยานิพนธ์ในบทที่ 4 แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นสภาพแวดล้อมของการจำลอง ในส่วนนี้กล่าวถึงรูปแบบที่ใช้ในการจำลองอย่างเช่น พารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการจำลอง และพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกถึงสมรรถนะของกระบวนการค้นหาเส้นทาง ในส่วนที่สองเป็นผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลสำหรับกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งจะเปรียบเทียบกับกระบวนการค้นหาเส้นทางที่อยู่ในประเภทเดียวกัน โดยเปรียบเทียบกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอภายใต้รูปแบบการจำลองที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง นอกจากนั้นยังพิจารณาถึงค่าการเปลี่ยนแปลงความน่าจะเป็นของตัวดำเนินการทางพันธุศาสตร์ของจีเนติกอัลกอริทึม เพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

4.1 สภาพแวดล้อมของการจำลอง (Simulation Environment)

ในการจำลองกระบวนการทำงานทั้งหมดในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม Visual Basic ในการจำลองแบบโดยสมรรถนะของกระบวนการค้นหาเส้นทางจะเปลี่ยนไปเมื่อจำลองภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกันและเพื่อทำให้เข้าใจกระบวนการที่นำเสนอในแง่มุมต่าง ๆ ได้มากขึ้น ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะทำการจำลองกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอภายใต้สถานการณ์ที่โครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโหนดต้นทาง ซึ่งพารามิเตอร์หลัก ๆ ที่ใช้ในการจำลองมีดังนี้

4.1.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโหนดต้นทาง

ปริมาณโหลดที่เพิ่มขึ้นในระบบ (Offered load) ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายโดยรวม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณโหลดที่ป้อนให้ระบบสามารถเปลี่ยนแปลงได้จาก 3 พารามิเตอร์คือ ขนาดของแพ็กเกต (Packet size) จำนวนการเชื่อมต่อ (Number of connections) และอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของแต่ละการเชื่อมต่อ (Packet rate) ในการทดสอบนี้ต้องการจะประเมินว่ากระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอจะส่งผลกระทบต่อ

โครงข่ายอย่างไร เมื่อปริมาณโหลดที่ป้อนให้โครงข่ายเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะเพิ่มได้จากขนาดของแพ็กเกต หรือจำนวนการเชื่อมต่อ แต่พารามิเตอร์ที่แสดงถึงปริมาณโหลดที่ป้อนให้โครงข่ายดีที่สุด คือ อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของแต่ละการเชื่อมต่อ โดยการเพิ่มอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลก็จะทำให้ปริมาณโหลดในแต่ละการเชื่อมต่อเพิ่มขึ้น ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโหนดต้นทางสามารถสรุปได้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกรณีเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโหนดต้นทาง

พารามิเตอร์	**ค่าที่ใช้**
จำนวนโนด	50 โหนด
ขนาดของพื้นที่ในการจำลอง	1,000 เมตร X 1,000 เมตร
เวลาที่ใช้ในการจำลอง	900 วินาที
จำนวนครั้งที่ใช้ในการทดสอบ	6 ครั้ง
ลักษณะของทราฟฟิก	
จำนวนการเชื่อมต่อ	4 การเชื่อมต่อ
ทราฟฟิกที่ใช้ในการสื่อสาร	Constant Bit Rate (CBR)
อัตราการส่งแพ็กเกต	**5, 10, 15, 20, 25 แพ็กเกต/วินาที**
ขนาดของแพ็กเกต	512 ไบต์
รูปแบบการเคลื่อนที่	
แบบจำลองการเคลื่อนที่	Random Waypoint [3]
ความเร็วสูงสุดของโนด	10.0 เมตร/วินาที
เวลาหยุด (Pause Time)	60 วินาที
GA พารามิเตอร์	
โอกาสเกิดการครอสโอเวอร์	0.75
โอกาสเกิดการมิวเตชัน	0.50
จำนวนรุ่นประชากร	50 รุ่น

4.1.2 พารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของกระบวนการค้นหาเส้นทาง

การประเมินผลว่ากระบวนการค้นหาเส้นทางที่ทำการออกแบบให้ผลในทางที่ดีหรือไม่นั้น จะต้องมีพารามิเตอร์หรือตัววัดเป็นตัวบ่งชี้ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการชี้วัดประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการค้นหาเส้นทางที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

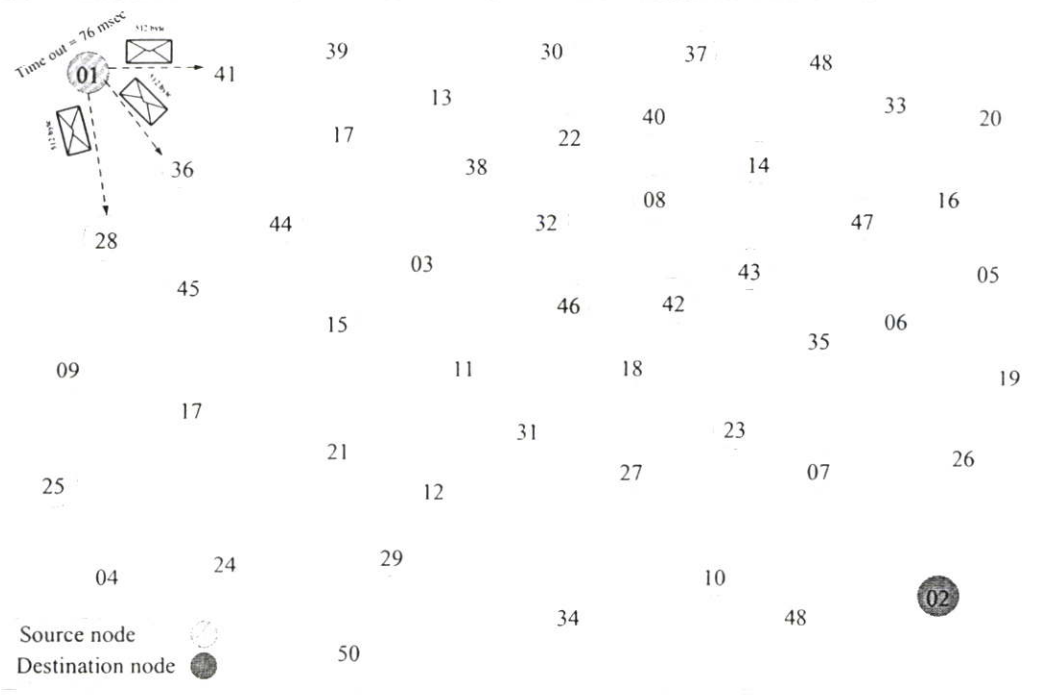
- ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) สามารถคำนวณได้จาก จำนวนแพ็กเกตที่โหนดปลายทางได้รับสำเร็จหารจำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่ส่งออกจากโหนดต้นทาง

- ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลาย (Average end-to-end delay) คือค่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตหนึ่งแพ็กเกตจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งมีหน่วยเป็น วินาที

- จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกต (Average hop count per packet) คือค่าที่แสดงจำนวนฮอปเฉลี่ยที่แต่ละแพ็กเกตใช้เดินทางจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง

4.1.3 ลักษณะของโครงข่ายที่ใช้ในการจำลอง (Architecture of simulation network)

ลักษณะของโหนดในโครงข่ายที่ใช้ในการจำลอง จะมีการสุ่มตำแหน่งของโหนดแบบยูนิฟอร์มภายในพื้นที่ 1,000 เมตร x 1,000 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยทุกโหนดในโครงข่ายสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระด้วยความเร็ว 10 เมตรต่อวินาที และโหนดในโครงข่ายทุกโหนดจะอยู่ในตำแหน่งคงที่ ณ เวลาที่ต้องการสื่อสารข้อมูล คุณสมบัติของโหนดที่ใช้ในโครงข่ายจะอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 802.11b ดังแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ลักษณะของโครงข่ายที่ใช้ในการจำลอง

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของโหนดที่ใช้ในโครงข่ายตามมาตรฐาน IEEE 802.11b

ช่วงความถี่ที่ใช้งาน (GHz)	2.4 – 2.497	ชนิดของการมอดดูเลต	CCK
อัตราการส่งข้อมูล (Mbps)	11	อัตราสัญลักษณ์	1.375
ความยาวของรหัส	8 CCK	จำนวนบิตข้อมูล/สัญลักษณ์	8

การค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมจะดำเนินการตามขั้นตอนต่างๆ ดังที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 3 หัวข้อ 3.1.2, 3.1.3 และ 3.1.4 ซึ่งในลำดับถัดไปเป็นผลการประเมินค่าประสิทธิภาพของกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอเทียบกับกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบอื่นๆ นั่นคือ การค้นหาเส้นทางซึ่งใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นเงื่อนไขการตัดสินใจเส้นทาง (SP) [9] และแบบที่สองคือการค้นหาเส้นทางแบบจีเนติกอัลกอริทึมแบบธรรมดา โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละกระบวนการค้นหาเส้นทางแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละกระบวนการค้นหาเส้นทาง

	SNR	PER	RREQ packet	RREP packet	Hop Count	Transmission Time (T_p^{total})	Time out
Shortest - Path	x	x	x	x	x		x
Simple Genetic Algorithms (GAs)	x	x				x	
Proposed – Genetic Algorithms (Proposed – GAs)	x	x	x	x		x	x

4.2 ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองสำหรับกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ

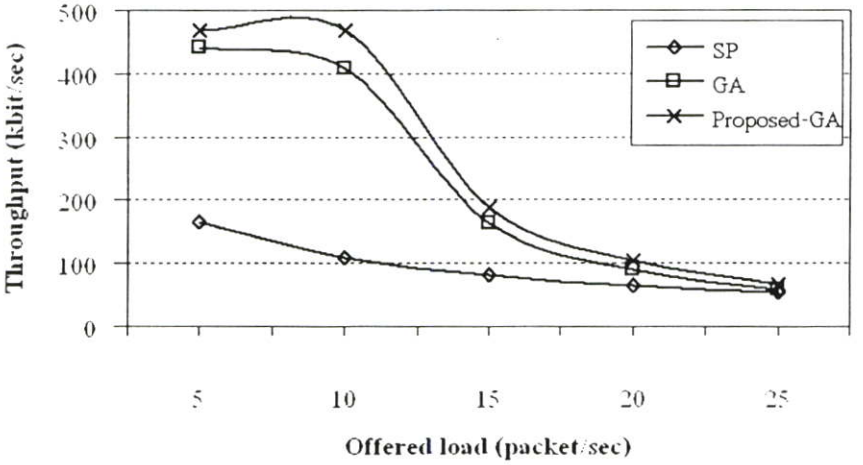
ในส่วนนี้แสดงผลและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบของกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอเปรียบเทียบกับกระบวนการค้นหาเส้นทางที่อยู่ในประเภทเดียวกัน ซึ่งกระบวนการค้นหาเส้นทางแต่ละประเภทจะทำการทดสอบภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโหนดต้นทางดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1.1

4.2.1 กระบวนการค้นหาเส้นทางที่คำนึงถึงคุณภาพช่องสัญญาณไร้สายด้วยจีเนติกอัลกอริทึม

กระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอจัดอยู่ในประเภทของการค้นหาเส้นทางแบบการจัดเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูล (Reactive or On-demand) โดยจะใช้สัญลักษณ์ *Proposed-GA* แทนกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ ซึ่งกระบวนการค้นหาเส้นทางที่จะนำมาใช้เปรียบเทียบกับการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอก็ควรจะอยู่ในประเภทเดียวกัน โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้การค้นหาเส้นทาง 3 แบบมาใช้เปรียบเทียบซึ่งมีดังนี้ แบบแรกคือ การค้นหาเส้นทางซึ่งใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นเงื่อนไขการตัดสินใจเส้นทาง (SP) และแบบที่สองคือ การค้นหาเส้นทางแบบจีเนติกอัลกอริทึมแบบธรรมดา

4.2.1.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโหนดต้นทาง

ผลการทดสอบในการค้นหาเส้นทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโหนดต้นทางแสดงดังรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.7 ซึ่งในรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.4 จะเป็นผลการทดสอบเมื่อทุกโหนดในโครงข่ายทำงานเป็นปกติ ส่วนในรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.7 เป็นผลการทดสอบเมื่อมีบางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ เช่น โหนดไม่มีพลังงานเหลือพอที่จะทำงานต่อไปได้ มาใช้วัดประสิทธิภาพ



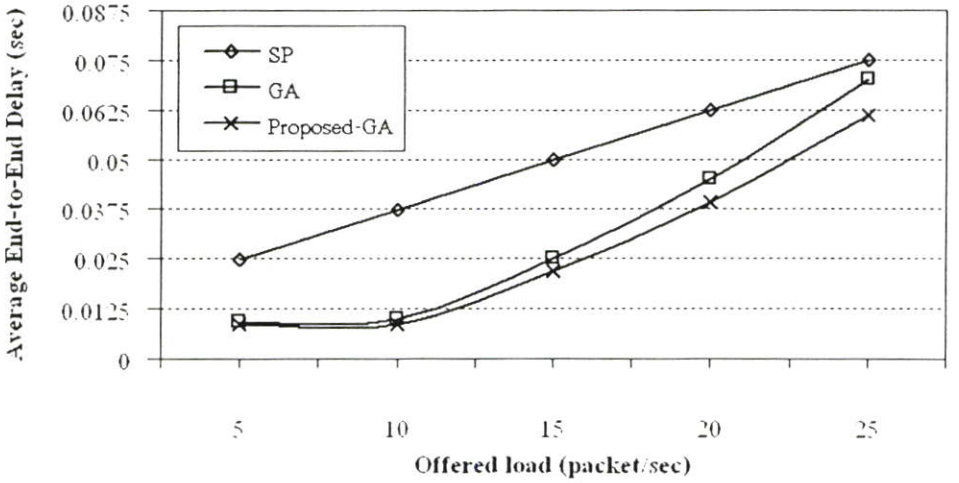
รูปที่ 4.2 ค่าวิสัยสามารถเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายสามารถทำงานได้เป็นปกติ)

จากรูปที่ 4.2 เมื่ออัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโหนดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าวิสัยสามารถของโครงข่ายสำหรับทุก ๆ กระบวนการค้นหาเส้นทางมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อโหนดเพิ่มอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลก็จะทำให้โครงข่ายมีความคับคั่ง (Congestion) เพิ่มขึ้น ซึ่งก็จะทำให้แพ็กเกตถูกละทิ้งมากขึ้นโดยเฉพาะการละทิ้งเพราะบัฟเฟอร์ของแต่ละโหนดไม่สามารถรองรับแพ็กเกตที่มาก

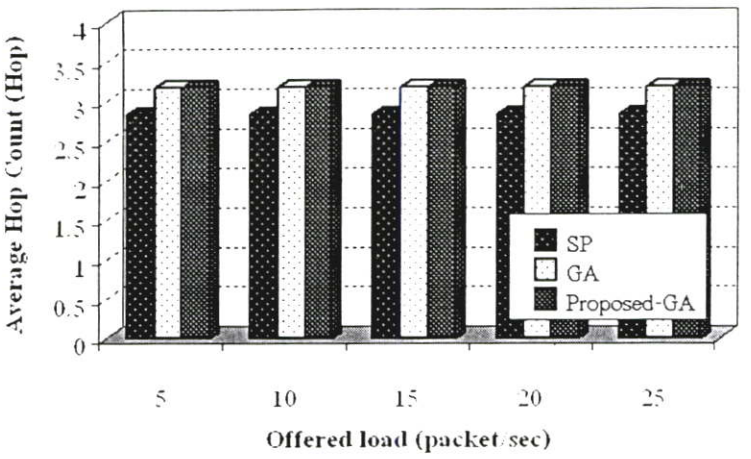
ขึ้นได้ นอกจากนั้นโอกาสของการเกิดการชนกันของข้อมูลก็เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม กระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอแบบ Proposed-GA ให้ค่าวิสัยสามารถมากกว่ากระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ SP และ GA ในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล โดยในกรณีที่อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลเท่ากับ 10 แพ็กเกตต่อวินาที ค่าที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอมากกว่ากระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ SP ร้อยละ 62.07 และมากกว่ากระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ GA ร้อยละ 6.91 ซึ่งส าเหตุหลัก ๆ ที่ทำให้กระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอให้ค่าดีที่สุดนั้นคือ

- เส้นทางที่ได้จากการตัดสินใจของโหนดปลายทางเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งต่ำ และเป็นเส้นทางที่มีคุณภาพของช่องสัญญาณสูง เนื่องจากค่าการประวิงเวลาของข่ายเชื่อมโยง โดยจะพิจารณาค่าประวิงเวลาของแต่ละข่ายเชื่อมโยงที่จะต้องใช้ตลอดทั้งเส้นทาง ดังนั้นถ้าข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวมีคุณภาพของช่องสัญญาณต่ำก็จะส่งผลให้ค่าการประวิงเวลาของข่ายเชื่อมโยงและค่าการประวิงเวลาของเส้นทางมีค่าสูงตามไปด้วย แต่ในขณะที่กระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ SP และ GA ไม่ได้พิจารณาตรงจุดนี้ เพราะฉะนั้นเส้นทางที่ได้อาจจะเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งที่สูง หรือมีคุณภาพของช่องสัญญาณต่ำ

- เส้นทางที่ได้ถือได้ว่าเป็นเส้นทางที่มีความน่าเชื่อถือ โดยกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอจะเลือกเส้นทางที่มีจำนวนช่วงเชื่อมต่อมาก ๆ ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งในแต่ละช่วงเชื่อมต่อมีระยะทางที่สั้น เนื่องจากการส่งที่ใช้ระยะทางยาว ๆ ทำให้คุณภาพของข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวไม่มีคุณภาพ (ค่าอัตราการการส่งแพ็กเกตผิดพลาดมีค่าสูง) ส่งผลให้โหนดจำเป็นต้องเสียเวลาในการส่งแพ็กเกตที่ผิดพลาดซ้ำมากยิ่งขึ้น เพราะฉะนั้นจึงทำให้เส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ SP มีความน่าเชื่อถือต่ำทำให้ปริมาณค่าวิสัยสามารถมีค่าต่ำที่สุด

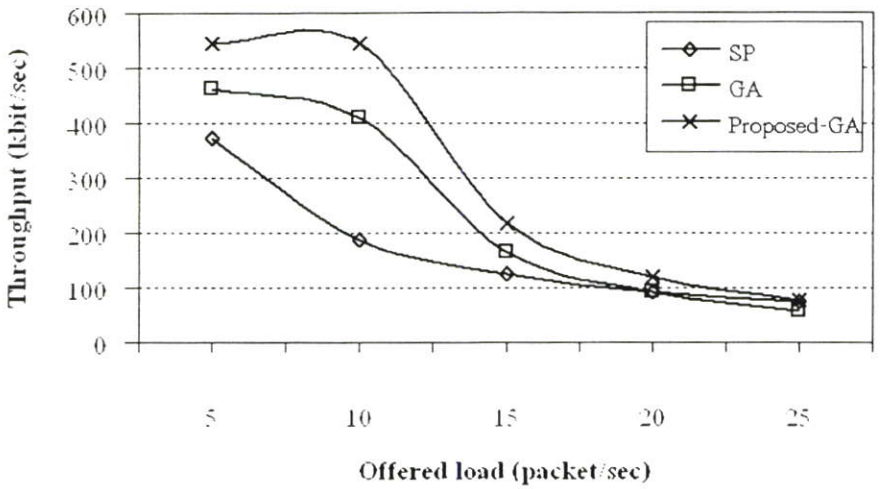


รูปที่ 4.3 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายสามารถทำงานได้เป็นปกติ)



รูปที่ 4.4 จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกตเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายสามารถทำงานได้เป็นปกติ)

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงการประวิงเวลาของแพ็กเกตและความยาวเฉลี่ยของเส้นทางตามลำดับ จากรูปกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ SP จะใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด แต่การใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดไม่ได้หมายความว่า แพ็กเกตจะใช้เวลาในการส่งที่ต่ำเสมอไป เพราะเมื่อดูจากผลการทดสอบในรูปที่ 4.3 ในกรณีที่อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลมีค่าเท่ากับ 25 แพ็กเกตต่อวินาที กระบวนการค้นหาเส้นทางที่ใช้เส้นทางต่ำที่สุดจะให้การประวิงเวลาตลอดทั้งเส้นทางของแพ็กเกตมีค่าสูงสุด เพราะฉะนั้นการประวิงเวลาของแพ็กเกตนอกจากจะขึ้นอยู่กับจำนวนฮอป (Hop count) แล้วยังขึ้นอยู่กับความคับคั่งที่เกิดขึ้นกับเส้นทาง และคุณภาพของช่องสัญญาณนั้นด้วย ซึ่งกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอแบบ Proposed-GA จะให้ค่าการประวิงเวลาที่ต่ำที่สุด เพราะกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอจะพยายามหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีความคับคั่งสูง และเส้นทางที่มีคุณภาพของช่องสัญญาณต่ำดังที่กล่าวไว้ข้างต้น นอกจากนั้นจากรูปยังแสดงให้เห็นว่ากระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ GA ยังให้ผลดีกว่าการค้นหาเส้นทางแบบ SP และมีค่าใกล้เคียงกับเส้นทางที่ใช้การค้นหาเส้นทางแบบ Proposed-GA ในกรณีที่ปริมาณโหลดในโครงข่ายมีค่าต่ำ ๆ (อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลมีค่าต่ำ) เนื่องจาก GA ได้พิจารณาค่าการประวิงเวลาตลอดทั้งเส้นทางตามค่าฟังก์ชันความเหมาะสมคล้ายกับกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ (Proposed-GA) โดยข้อแตกต่างระหว่างการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอกับการค้นหาเส้นทางแบบ GA ซึ่งส่งผลทำให้การค้นหาเส้นทางแบบ GA มีประสิทธิภาพในด้านต่าง ๆ ต่ำกว่าการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอคือ การพิจารณาคุณภาพของช่องสัญญาณร่วมด้วยนั่นเอง

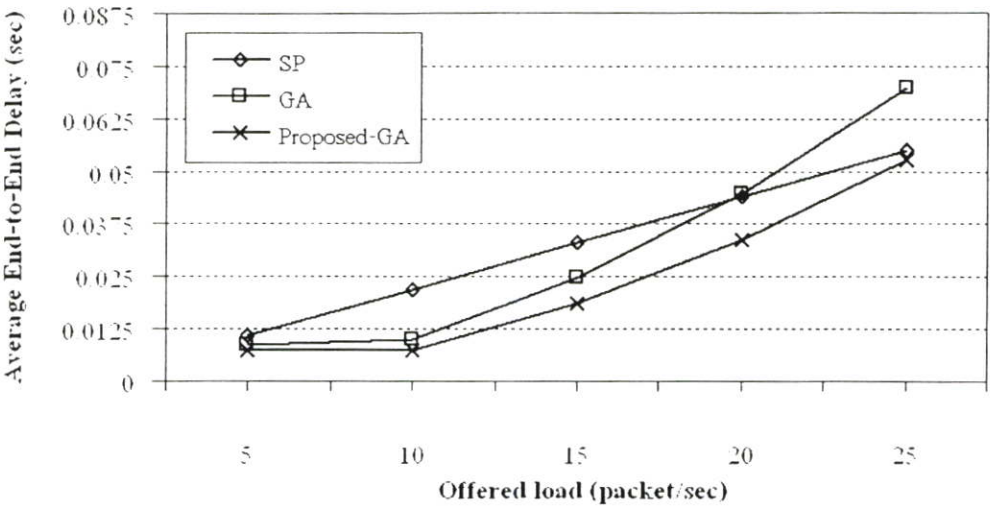


รูปที่ 4.5 ค่าวิสัยสามารถเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่บางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ)

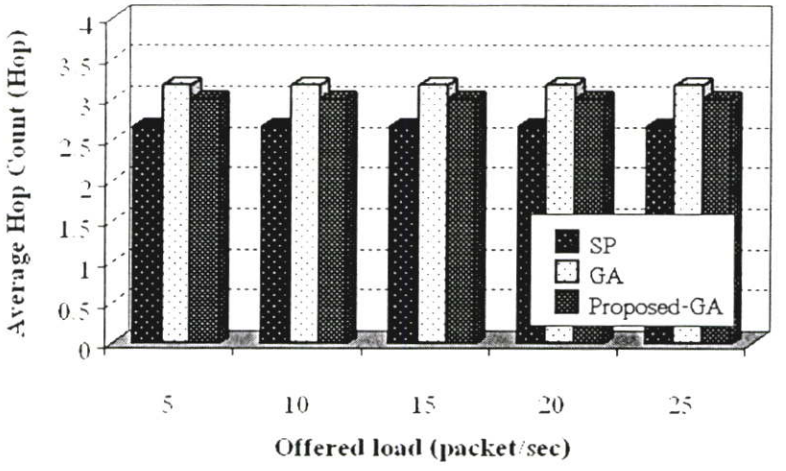
รูปที่ 4.5 ถึง 4.7 คือผลจากการทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการค้นหาเส้นทางทั้ง 3 แบบในกรณีที่มีบางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ จากรูปที่ 4.5 เมื่ออัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าประวิสัยสามารถของโครงข่ายมีค่าลดลงเช่นเดียวกันกับในกรณีที่ทุกโหนดสามารถทำงานได้เป็นปกติ เนื่องจากความคับคั่งของโครงข่ายทั้งการชนกันของข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้นและข้อจำกัดของปริมาณแพ็กเกตที่แต่ละโหนดสามารถรองรับได้เพิ่มขึ้นตามอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล นอกจากค่าวิสัยสามารถลดต่ำลงแล้ว ค่าการประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายยังเพิ่มมากขึ้นด้วย เมื่ออัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7

รูปที่ 4.5 แสดงค่าวิสัยสามารถ ซึ่งเป็นค่าที่จะใช้ประเมินกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำมาทดสอบนั้นมีประสิทธิภาพด้านการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมมากน้อยเพียงใด ในกรณีที่มีบางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ ถ้าค่าที่ได้มีค่าสูงแสดงว่าเส้นทางที่เลือกมานั้นมีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาจากรูปพบว่า กระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ Proposed-GA จะให้ปริมาณค่าวิสัยสามารถที่ดีกว่าการค้นหาเส้นทางแบบ SP ที่อัตราการส่งแพ็กเกตเท่ากับ 10 แพ็กเกตต่อวินาที การค้นหาเส้นทางที่นำเสนอมีปริมาณค่าวิสัยสามารถสูงกว่าการค้นหาเส้นทางแบบ SP และ GA ถึงร้อยละ 49.06 และ 14.01 ตามลำดับ เนื่องจากการค้นหาแบบ Proposed-GA ได้คำนึงถึงคุณภาพของช่องสัญญาณในการส่งแพ็กเกตข้อมูลระหว่างโหนดมาใช้พิจารณา อีกทั้งยังคำนึงถึงค่าการประวิงเวลาตลอดทั้งเส้นทางร่วมด้วยดังที่ได้กล่าวแล้วในข้างต้น นอกจากนี้การค้นหาเส้นทางที่นำเสนอยังมีการส่งแพ็กเกตร้องขอ RREQ ไปตรวจสอบสถานะของโหนดข้างเคียง เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถสร้างเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างกันได้ หากไม่มีการตอบกลับ จะถือว่าไม่สามารถทำงานต่อไปได้ และจะละทิ้งโหนดดังกล่าวทันที ซึ่งจะช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาการส่งข้อมูลไปไม่ถึงปลายทางได้ ในขณะที่การค้นหาเส้นทางแบบ SP และ GA ไม่ได้พิจารณาสถานะของโหนด

ข้างเคียง ซึ่งอาจเป็นผลให้เกิดโอกาสที่ส่งข้อมูลไปไม่ถึงปลายทางได้สูงกว่า



รูปที่ 4.6 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่บางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ)



รูปที่ 4.7 จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกตเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่บางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ)

ผลที่สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการเลือกใช้เส้นทางอีกประเภทหนึ่งคือ ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6 ด้วยกระบวนการค้นหาเส้นทางที่คำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่มากกว่า เป็นผลให้การค้นหาเส้นทางแบบ Proposed-GA ใช้เวลาในการส่งแพ็กเกตข้อมูลน้อยกว่ากระบวนการค้นหาเส้นทางแบบอื่นๆ เช่น เมื่อพิจารณาอัตราการส่งแพ็กเกตเท่ากับ 25 แพ็กเกตต่อวินาที การค้นหาเส้นทางแบบ SP และ GA จะให้ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยสูงกว่าถึง ร้อยละ 2.21 และ 14.01 ตามลำดับ

รูปที่ 4.7 แสดงจำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกต แม้ว่า การค้นหาเส้นทางแบบ SP จะมีการส่งต่อข้อมูลด้วยช่วงการเชื่อมต่อที่น้อยกว่าการค้นหาเส้นทางแบบอื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาจำนวนการส่งแพ็กเกตซ้ำ พบว่า การค้นหาเส้นทางแบบ SP จะมีการส่งแพ็กเกตข้อมูลซ้ำเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการส่งแพ็กเกตสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเส้นทางที่สั้นที่สุดที่การค้นหาเส้นทางแบบ SP เลือกมานั้น อาจเป็นเส้นทางที่มีคุณภาพของช่องสัญญาณต่ำ ทำให้โอกาสการเกิดข้อมูลผิดพลาดระหว่างการส่งมีสูง จึงต้องมีการส่งซ้ำเพิ่มขึ้น แต่การค้นหาเส้นทางที่นำเสนอนั้น เส้นทางที่ถูกเลือกเป็นเส้นทางที่มีคุณภาพของช่องสัญญาณที่ดีกว่า เป็นผลให้การส่งแพ็กเกตซ้ำจึงมีน้อยตามไปด้วย ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าประวิงเวลา และเส้นทางที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูลของทั้ง 3 กระบวนการที่ขนาดโครงข่าย 50 ณ อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลที่ 25 แพ็กเกตต่อวินาที

	เวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูลจากต้นทาง – ปลายทาง (มิลลิวินาที)	เส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูล
Shortest – path (SP)	75.10	01 → 11 → 02
Genetic Algorithms (GAs)	70.26	01 → 8 → 19 → 02
Proposed - GA	61.18	01 → 23 → 46 → 02

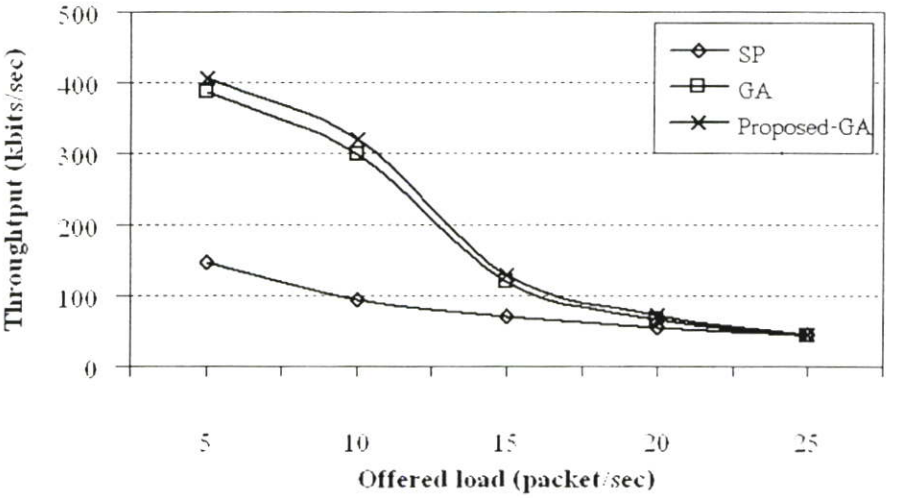
จากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า กระบวนการค้นหาเส้นทางแบบที่คำนึงถึงคุณภาพช่องสัญญาณที่นำเสนอ (Proposed-GA) สามารถทำให้โครงข่ายมีการเลือกใช้เส้นทางอย่างมีประสิทธิภาพทั้งในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายสามารถทำงานได้เป็นปกติ และในกรณีที่มีบางโหนดไม่สามารถทำงานได้ ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณค่าวิสัยสามารถ ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลาย และ จำนวนการส่งแพ็กเกตข้อมูลซ้ำ เมื่อเทียบกับกระบวนการค้นหาเส้นทางที่ไม่พิจารณาถึงคุณภาพช่องสัญญาณเช่น กระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ SP เนื่องจากกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอได้คำนวณค่าต้นทุนการประวิงเวลาของเส้นทางที่สะท้อนถึงเวลาที่โครงข่ายจะต้องใช้ และความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็กเกตข้อมูล

4.2.1.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ใช้ในการจำลอง

การทดสอบข้างต้นเป็นการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการค้นหาเส้นทางสำหรับโครงข่ายขนาด 50 โหนด ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ยังสนใจประสิทธิภาพของโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย โดยจำลองโครงข่ายขนาด 100 โหนด ทำการส่งแพ็กเกตข้อมูลตามอัตราเช่นเดียวกันกับการ

ทดสอบข้างต้น และทำการวัดประสิทธิภาพด้านต่างๆ เช่น ค่าวิสัยสามารถ ค่าประวิงเวลาเฉลี่ย และจำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกต เปรียบเทียบกันระหว่างกระบวนการค้นหาเส้นทาง 3 แบบ คือ กระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ SP กระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ GA และกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ Proposed-GA

ผลการทดสอบในการค้นหาเส้นทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโหนดต้นทางแสดงดังรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.13 ซึ่งในรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.10 จะเป็นผลการทดสอบเมื่อทุกโหนดในโครงข่ายทำงานเป็นปกติ ส่วนในรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.13 เป็นผลการทดสอบเมื่อมีบางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ เช่น โหนดไม่มีพลังงานเหลือพอที่จะทำงานต่อไปได้ มาใช้วัดประสิทธิภาพ

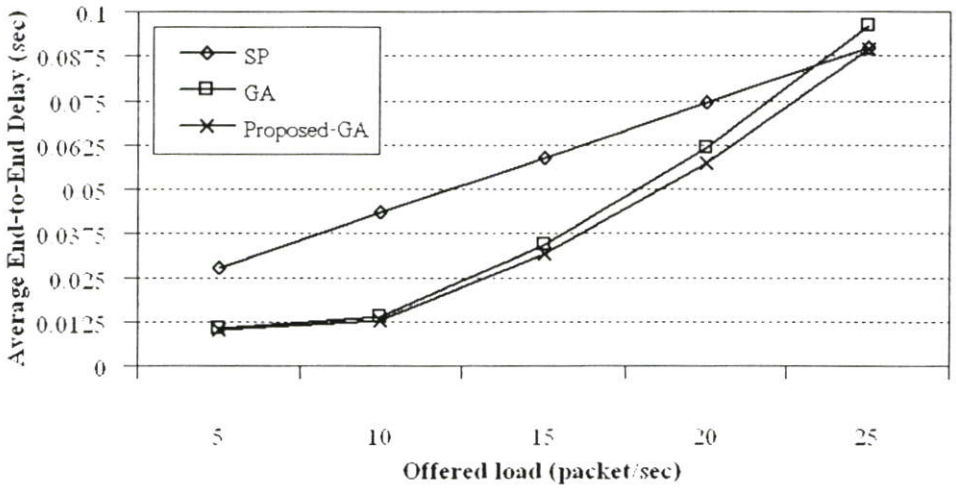


รูปที่ 4.8 ค่าวิสัยสามารถเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายสามารถทำงานได้เป็นปกติ)

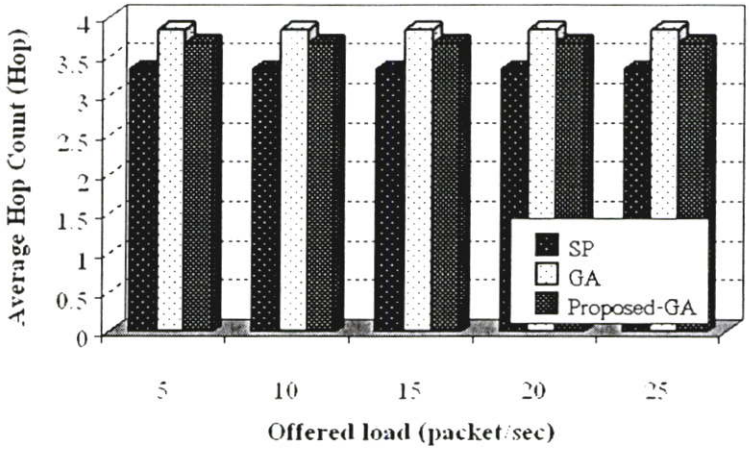
จากรูปที่ 4.8 ผลที่ได้จากการทดสอบจะเหมือนกับการทดสอบในหัวข้อที่ 4.2.1.1 นั้นคือ เมื่อเพิ่มอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลจาก 5 ไปถึง 25 แพ็กเกตต่อวินาที ก็จะทำให้ค่าวิสัยสามารถลดลงอย่างรวดเร็ว โดยจากรูปแสดงให้เห็นว่ากระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ (Proposed-GA) จะให้ค่าสูงสุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล เนื่องจากกระบวนการค้นหาเส้นทางที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ทำให้เส้นทางที่ได้นั้นเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยช่วงเชื่อมต่อที่มีคุณภาพของช่องสัญญาณสูง อีกทั้งสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าประวิงเวลารวมที่จะต้องใช้ตลอดทั้งเส้นทาง สมการที่ (3.7) ได้คำนึงถึงเวลาที่จะต้องใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูลจนถึงปลายทางสำเร็จและได้รับข้อมูลถูกต้อง เพราะฉะนั้นเส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางที่มีโอกาสการส่งแพ็กเกตข้อมูลไปยังปลายทางได้ถูกต้องและรวดเร็ว ซึ่งทั้งสองส่วนที่กล่าวมาทำให้เส้นทางที่ได้มีประสิทธิภาพจึงสามารถส่งแพ็กเกตได้มากกว่ากระบวนการค้นหาเส้นทางแบบอื่น ๆ นอกจากนี้การค้นหาเส้นทาง

แบบ GA ยังคงให้ผลดีกว่าการค้นหาเส้นทางแบบ SP และมีค่าใกล้เคียงกับการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ ดังเหตุผลที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.2.1.1

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่ากระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอให้ค่าวิสัยสามารถมากกว่าการค้นหาเส้นทางแบบ SP ร้อยละ 46.67 ส่วนการค้นหาเส้นทางแบบ GA เพิ่มได้ร้อยละ 44.81 ณ อัตราการส่งแพ็กเกตต่ำสุด



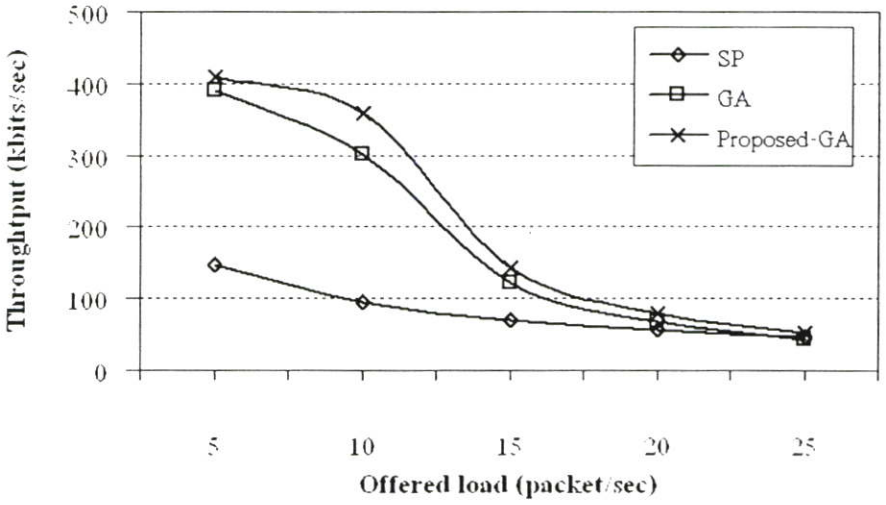
รูปที่ 4.9 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายสามารถทำงานได้เป็นปกติ)



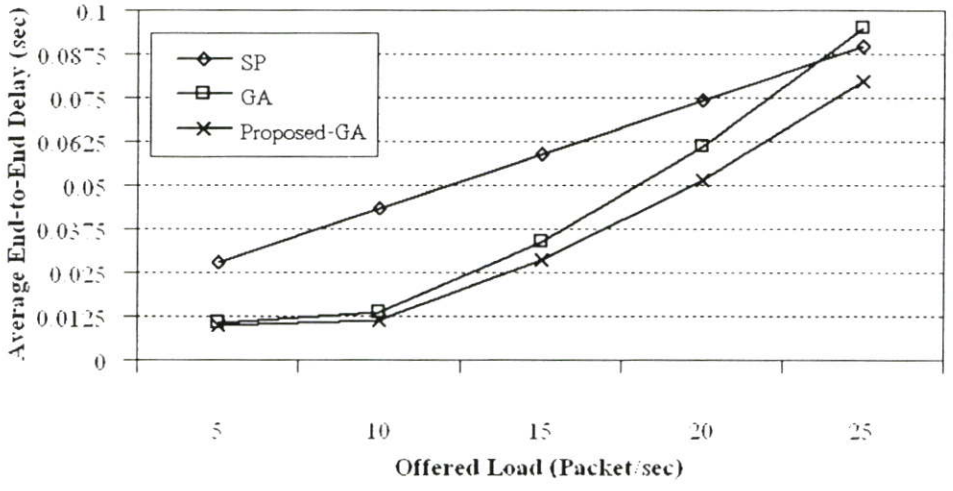
รูปที่ 4.10 จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกตเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายสามารถทำงานได้เป็นปกติ)

รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงว่าถึงแม้กระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอจะเพิ่มการประวิงเวลาให้กับแพ็กเกตร้องขอเส้นทางและเส้นทางที่ได้มีจำนวนช่วงเชื่อมต่อที่สูง แต่การประวิงเวลาจากปลายถึงปลายของข้อมูลที่ได้ยังคงใช้น้อยกว่ากระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ GA และ SP ดังตารางที่ 4.6 เนื่องจากเส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งของแพ็กเกตต่ำและเป็นเส้นทางที่มี

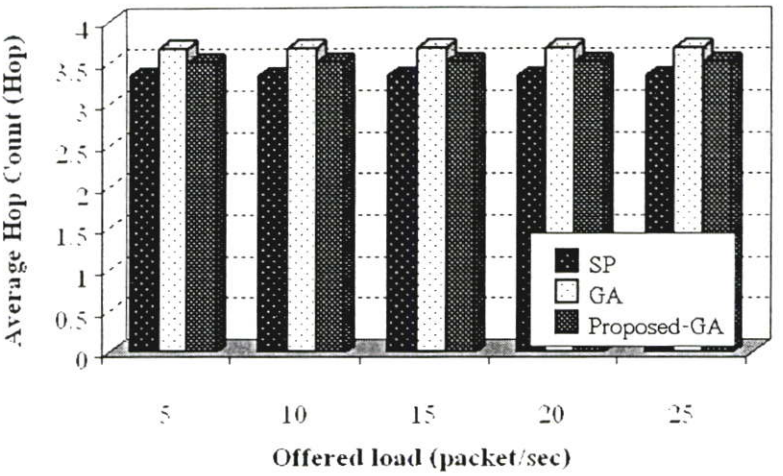
คุณภาพช่องสัญญาณดีกว่าการค้นหาเส้นทางแบบ GA และ SP แต่เมื่อพิจารณที่อัตราการส่งแพ็กเกต สูงสุดพบว่า การค้นหาเส้นทางแบบ GA นั้นจะมีค่าการประวิงเวลาจากปลายถึงปลายมากที่สุด ซึ่งมีผลมาจากช่วงการเชื่อมต่อของ GA สูงกว่าการค้นหาเส้นทางแบบอื่นๆ และการประวิงเวลานี้ก็จะส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของเส้นทางด้วยเช่นกัน เพราะโหนดมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาและการที่โหนดใช้เวลาการหาเส้นทางนานเกินความจำเป็นก็อาจจะทำให้เส้นทางมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นได้



รูปที่ 4.11 ค่าวิสัยสามารถเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่บางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ)



รูปที่ 4.12 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่บางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ)



รูปที่ 4.13 จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกตเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีที่บางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ)

รูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.13 แสดงถึงผลจากการทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการค้นหาเส้นทางทั้ง 3 แบบในกรณีที่มีบางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติสำหรับโครงข่ายที่มีขนาด 100 โหนด โดยแนวโน้มของค่าทั้ง 3 ค่าจากรูปก็ยังคงเป็นในแนวทางเดียวกับผลการทดสอบที่ได้จากกรณีที่มีบางโหนดในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติสำหรับโครงข่ายที่มีขนาด 50 โหนด ที่แสดงในรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.7 คือทั้งประสิทธิภาพด้านค่าวิสัยสามารถ และค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายของโครงข่ายมีค่าน้อยลงเมื่อปริมาณโหลดในโครงข่ายมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าประวิงเวลาและเส้นทางที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังปลายทางแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าประวิงเวลา และเส้นทางที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูลของทั้ง 3 กระบวนการที่ขนาดโครงข่าย 100 ณ อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลที่ 25 แพ็กเกตต่อวินาที

	เวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูลจากต้นทาง – ปลายทาง (มิลลิวินาที)	เส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูล
Shortest – path (SP)	89.86	01 → 45 → 88 → 02
Genetic Algorithms (GAs)	94.93	01 → 4 → 31 → 23 → 02
Proposed - GA	79.92	01 → 81 → 9 → 60 → 02

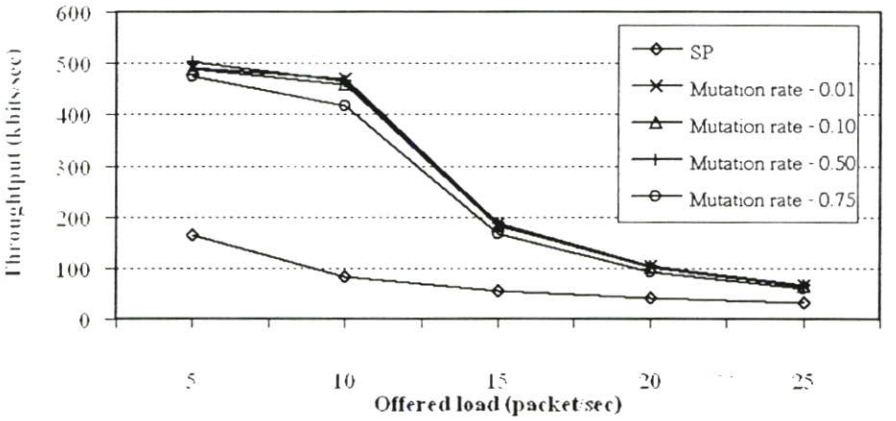
4.2.1.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความน่าจะเป็นของตัวดำเนินการทางพันธุศาสตร์ของจีเนติกอัลกอริทึม

จากที่ได้กล่าวในบทที่ 2 ตัวดำเนินการทางพันธุศาสตร์ของจีเนติกัลกอริทึมนับเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการสร้างคำตอบให้ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง**มิวเตชัน** เนื่องจากเป็นตัวดำเนินการผ่าเหล่าตัวหนึ่งที่อาจช่วยให้เกิดโครโมโซมมีค่าความเหมาะสมดีขึ้น ในการทดสอบนี้ต้องการจะประเมินว่าการเปลี่ยนแปลงโอกาสการเกิดมิวเตชันจะส่งผลกระทบต่อโครงข่ายอย่างไร ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสามารถสรุปได้ในตารางที่ 4.6

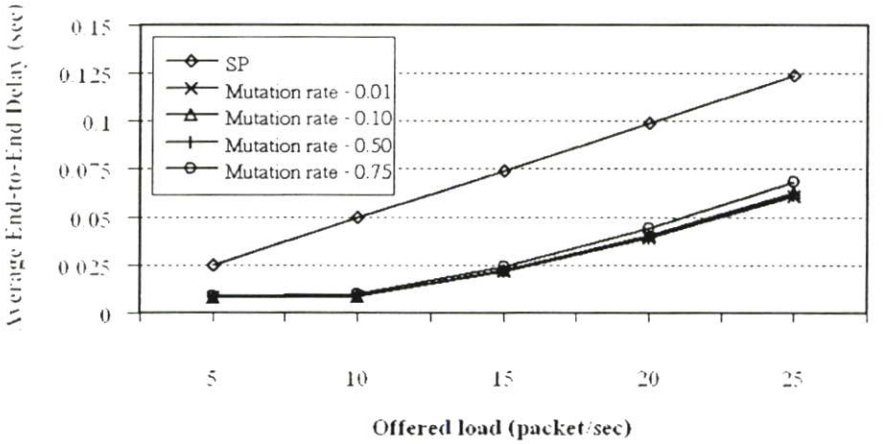
ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกรณีเปลี่ยนแปลงโอกาสการเกิดมิวเตชัน

พารามิเตอร์	**ค่าที่ใช้**
จำนวนโนด	50 โหนด
ขนาดของพื้นที่ในการจำลอง	1,000 เมตร X 1,000 เมตร
เวลาที่ใช้ในการจำลอง	900 วินาที
จำนวนครั้งที่ใช้ในการทดสอบ	6 ครั้ง
ลักษณะของทราฟฟิก	
จำนวนการเชื่อมต่อ	4 การเชื่อมต่อ
ทราฟฟิกที่ใช้ในการสื่อสาร	Constant Bit Rate (CBR)
อัตราการส่งแพ็กเกต	5, 10, 15, 20, 25 แพ็กเกต/วินาที
ขนาดของแพ็กเกต	512 ไบต์
รูปแบบการเคลื่อนที่	
แบบจำลองการเคลื่อนที่	Random Waypoint [3]
ความเร็วสูงสุดของโนด	10.0 เมตร/วินาที
เวลาหยุด (Pause Time)	60 วินาที
GA พารามิเตอร์	
โอกาสเกิดการครอสโอเวอร์	0.75
โอกาสเกิดการมิวเตชัน	**0.01, 0.1, 0.50, 0.75**
จำนวนรุ่นประชากร	50 รุ่น

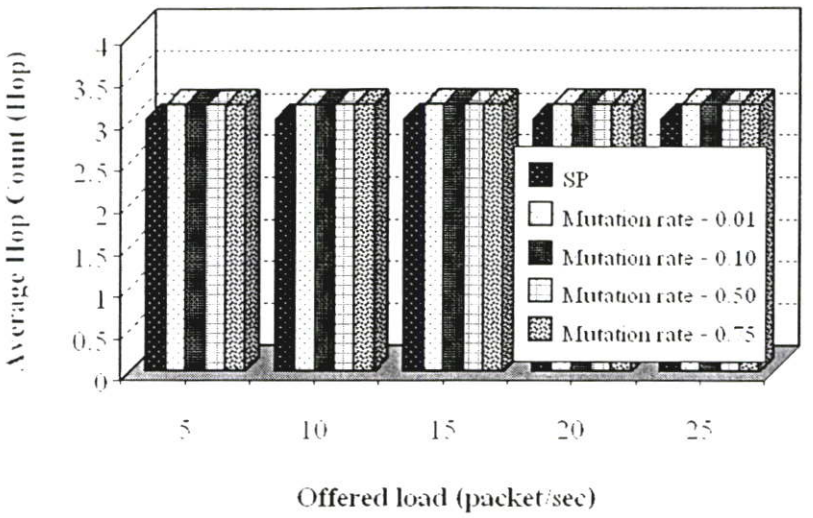
ผลการทดสอบในการค้นหาเส้นทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าโอกาสการเกิดมิวเตชัน แสดงดังรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.19 ซึ่งในรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.16 จะเป็นผลการทดสอบที่โครงข่ายขนาด 50 โหนด ส่วนในรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.19 เป็นผลการทดสอบที่โครงข่ายขนาด 100 โหนด โดยเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพต่างๆ ระหว่างการค้นหาเส้นทางแบบ SP กับการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ (Proposed-GA)



รูปที่ 4.14 ค่าวิสัยสามารถเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าโอกาสการเกิดมิวเตชัน (กรณีที่โครงข่ายมีขนาด 50 โหนด)



รูปที่ 4.15 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าโอกาสการเกิดมิวเตชัน (กรณีที่โครงข่ายมีขนาด 50 โหนด)



รูปที่ 4.16 จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกตเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าโอกาสการเกิดมิวเตชัน (กรณีที่โครงข่ายมีขนาด 50 โหนด)

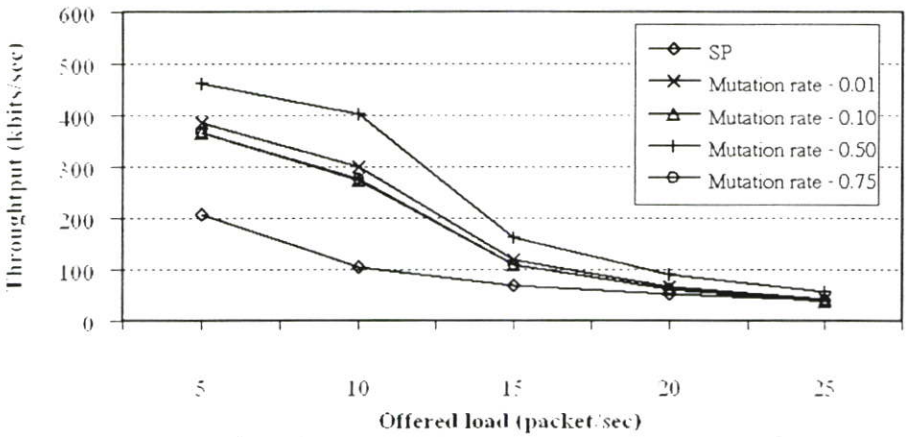
รูปที่ 4.14 แสดงค่าวิสัยสามารถเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราค่าโอกาสการเกิดมิวเตชันของการค้นหาเส้นทางทั้งสองแบบ จากรูปการค้นหาเส้นทางแบบที่นำเสนอ (Proposed-GA) ที่ค่าโอกาสการเกิดมิวเตชันต่างๆ จะให้ค่าสูงกว่าการค้นหาเส้นทางแบบ SP ในทุกๆ อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล เนื่องจากเส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอเป็นเส้นทางที่พิจารณาถึงคุณภาพของช่องสัญญาณ อีกทั้งยังคำนึงถึงความสามารถในการรับส่งแพ็กเกตข้อมูลตลอดทั้งเส้นทางด้วยค่าประวิงเวลา จากเหตุผลดังกล่าวทำให้เส้นทางที่ได้สามารถส่งแพ็กเกตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจากรูปที่แสดงค่าวิสัยสามารถที่ได้ตามโอกาสการเกิดมิวเตชันที่ 0.01, 0.10, 0.50 และ 0.75 จะมากกว่าการค้นหาเส้นทางแบบ SP ร้อยละ 33.99, 32.83, 33.68 และ 28.72 ตามลำดับ ณ อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลเท่ากับ 25 แพ็กเกตต่อวินาที

หากพิจารณา ณ ความแตกต่างของโอกาสการเกิดมิวเตชัน พบว่าโอกาสการเกิดมิวเตชันที่ 0.01, 0.10 และ 0.50 จะให้ค่าวิสัยสามารถที่ใกล้เคียงกันมาก สำหรับโอกาสการเกิดมิวเตชันที่ 0.75 จะให้ค่าวิสัยสามารถน้อยกว่าโอกาสการเกิดมิวเตชันข้างต้นเล็กน้อย ณ ปริมาณโหลดในโครงข่ายที่มีค่าต่ำ (อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลมีค่าต่ำ) แต่จะมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 4 รูปแบบของโอกาสการเกิดมิวเตชันที่อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลสูงสุด ทั้งนี้เพราะการสร้างโอกาสการเกิดมิวเตชันจะส่งผลต่อการสร้างตัวเลือกของ GA ให้ดีขึ้น แต่เมื่อเกินค่าค่าหนึ่งโอกาสเกิดมิวเตชันนั้นก็จะไม่ค่าที่ดีที่สุด เช่นเดียวกับผลการทดสอบ นั่นคือโอกาสการเกิดมิวเตชันที่ส่งผลให้การค้นหาเส้นทางที่นำเสนอได้เส้นทางที่เหมาะสม ณ ขณะเวลานั้นจะเป็นค่าที่อยู่ระหว่าง 0.01 – 0.50 เมื่อเปลี่ยนโอกาสการเกิดมิวเตชันเป็น 0.75 ค่าวิสัยสามารถที่ได้จะลดลง

รูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงค่าประวิงเวลาจากปลายถึงปลาย และจำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกต ตามลำดับ แม้ว่าการค้นหาเส้นทางแบบ SP จะใช้ช่วงเชื่อมต่อที่น้อยกว่าการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 แต่ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายยังให้ค่ามากกว่าการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ ณ โอกาสการเกิดมิวเตชันต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยการค้นหาเส้นทางแบบ SP จะใช้เวลาในการรับส่งแพ็กเกตข้อมูลสูงกว่าการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอที่โอกาสการเกิดมิวเตชัน 0.01, 0.10, 0.50 และ 0.75 มากถึงร้อยละ 33.99, 32.83, 33.68 และ 28.72 ตามลำดับ ณ อัตราการส่งแพ็ก เกตข้อมูลเท่ากับ 25 แพ็กเกตต่อวินาที ในกรณีที่โอกาสการเกิดมิวเตชันที่ต่างกัน จากรูปพบว่าค่ามิวเตชันเท่ากับ 0.75 จะมีค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายสูงกว่าโอกาสการเกิดมิวเตชันค่าอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

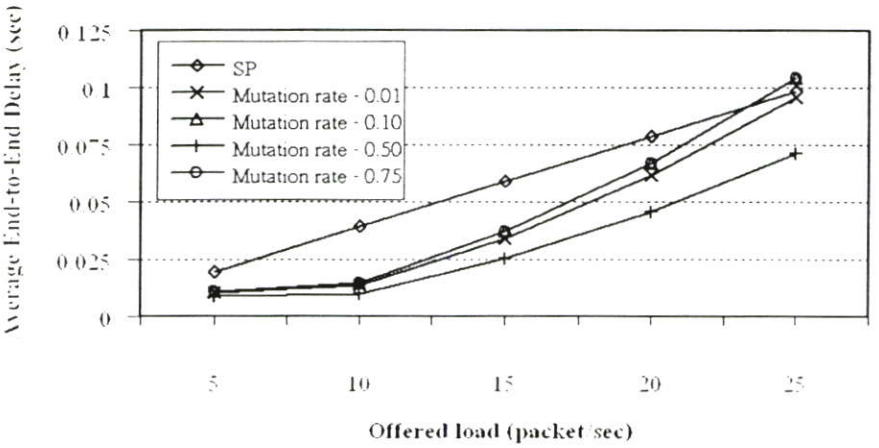
ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าประวิงเวลา และเส้นทางที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูลของทั้ง5 กระบวนการที่ขนาดโครงข่าย 50 ณ อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลที่ 25 แพ็กเกตต่อวินาที

	เวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูลจากต้นทาง – ปลายทาง (มิลลิวินาที)	เส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูล
Shortest – path (SP)	123.92	01 → 19 → 02
Proposed – GA: mutation = 0.01	61.04	01 → 11 → 44 → 02
Proposed – GA: mutation = 0.10	62.66	01 → 49 → 7 → 02
Proposed – GA: mutation = 0.50	61.48	01 → 11 → 3 → 02
Proposed – GA: mutation = 0.75	62.62	01 → 30 → 43 → 02

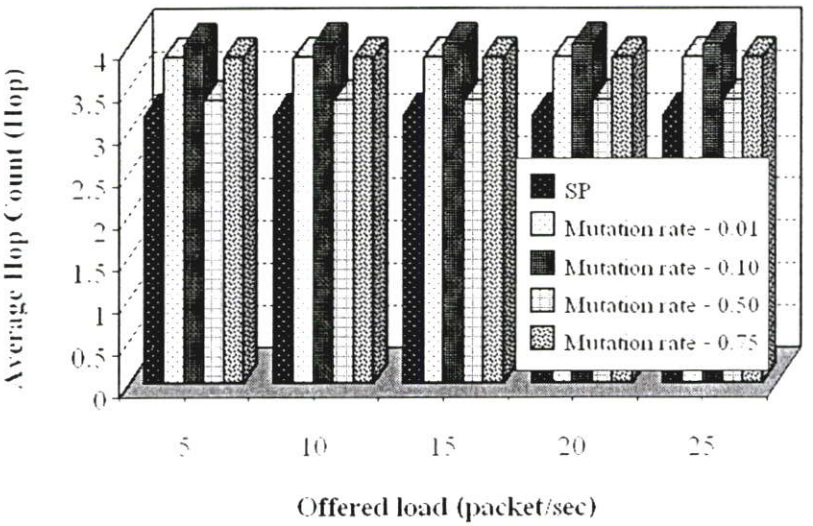


รูปที่ 4.17 ค่าวิสัยสามารถเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าโอกาสการเกิดมิวเตชัน (กรณีที่โครงข่ายมีขนาด 100 โหนด)

รูปที่ 4.17 แสดงค่าวิสัยสามารถสำหรับโครงข่ายขนาด 100 โหนด จากรูปพบว่า ที่ทุกๆ อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล การค้นหาเส้นทางแบบ SP จะให้ค่าวิสัยสามารถต่ำกว่ากระบวนการค้นหาเส้นทางแบบที่นำเสนอทุกโอกาสการเกิดมิวเตชัน ซึ่งยังคงให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลองข้างต้น ทั้งนี้เพราะ การค้นหาเส้นทางแบบ SP ไม่ได้คำนึงถึงคุณภาพของช่องสัญญาณในเส้นทางที่เลือกใช้นั่นเอง แต่เมื่อพิจารณาที่โอกาสการเกิดมิวเตชัน จะเห็นชัดเจนว่าโอกาสการเกิดมิวเตชันที่ 0.50 จะให้วิสัยสามารถดีกว่าโอกาสการเกิดมิวเตชันค่าอื่นๆ ถึงร้อยละ 14.64, 18.89 และ 18.77 เมื่อเทียบกับโอกาสการเกิดมิวเตชันที่ 0.01, 0.10 และ 0.75 ตามลำดับที่อัตราการส่งแพ็กเกตที่ 25 แพ็กเกตต่อวินาที รวมถึงค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งโอกาสการเกิดมิวเตชันที่ 0.50 จะใช้เวลาส่งแพ็กเกตข้อมูลจากต้นทางถึงปลายทางน้อยกว่าการเกิดมิวเตชันที่ 0.01, 0.10 และ 0.75 ร้อยละ 14.64, 18.89 และ 18.77 ตามลำดับ และน้อยกว่าเส้นทางที่ได้จากการค้นหาแบบ SP ถึงร้อยละ 16.13



รูปที่ 4.18 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าโอกาสการเกิดมิวเตชัน (กรณีที่โครงข่ายมีขนาด 100 โหนด)



รูปที่ 4.19 จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกตเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าโอกาสการเกิดมิวเตชัน (กรณีที่โครงข่ายมีขนาด 100 โหนด)

รูปที่ 4.17 ถึง 4.19 แสดงถึงผลจากการทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการค้นหาเส้นทางทั้ง 2 แบบในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าโอกาสการเกิดมิวเตชันสำหรับโครงข่ายที่มีขนาด 100 โหนด โดยแนวโน้มของค่าทั้ง 3 ค่าจากรูปก็ยังคงเป็นในแนวทางเดียวกับผลการทดสอบที่ได้จากกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าโอกาสการเกิดมิวเตชันสำหรับโครงข่ายที่มีขนาด 50 โหนด ที่แสดงในรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.16 คือทั้งประสิทธิภาพด้านค่าวิสัยสามารถ และค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายของโครงข่ายมีค่าแย่ลงเมื่อปริมาณโหลดในโครงข่ายมีค่าเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.8 อีกทั้งค่าโอกาสการเกิดมิวเตชันที่ต่ำยังให้ค่าประสิทธิภาพดีกว่าค่าโอกาสการเกิดมิวเตชันที่สูงทั้งในโครงข่ายที่มีขนาด 50 และ 100 โหนด

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าประวิงเวลา และเส้นทางที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูลของทั้ง5 กระบวนการที่ขนาดโครงข่าย 100 ณ อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลที่ 25 แพ็กเกตต่อวินาที

	เวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูลจากต้นทาง – ปลายทาง (มิลลิวินาที)	เส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูล
Shortest – path (SP)	98.63	01 → 89 → 5 → 02
Proposed – GA: mutation = 0.01	95.65	01 → 93 → 21 → 76 → 02
Proposed – GA: mutation = 0.10	104.41	01 → 5 → 43 → 66 → 18 → 02
Proposed – GA: mutation = 0.50	71.23	01 → 59 → 93 → 02
Proposed – GA: mutation = 0.75	104.15	01 → 13 → 9 → 11 → 02

ผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ทั้งค่าปริมาณโหลดที่ป้อนให้กับโครงข่ายและค่าโอกาสการเกิดมิวเตชันที่แตกต่างกันมีผลต่อประสิทธิภาพด้านคุณภาพการให้บริการของโครงข่าย ทั้งโครงข่ายที่มีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ นอกจากนี้แล้วการทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นยังขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัยซึ่งยากที่จะกำหนดได้ว่าค่าใดที่เหมาะสมที่สุดและสามารถนำไปใช้ได้กับทุก ๆ สถานการณ์ อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถที่จะกำหนดค่าเป็นช่วงได้ เพราะถ้ากำหนดให้ค่าดังกล่าวมีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไปก็จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย

จากผลการทดสอบนี้เอง สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ (Proposed-GA) มีประสิทธิภาพในด้านของเวลาการส่งแพ็กเกตข้อมูลที่โครงข่ายต้องใช้นั้นมีความคุ้มค่ามากกว่าการค้นหาเส้นทางแบบ SP และ GA ธรรมดา ซึ่งก็เป็นไปตามที่ได้คาดหวังไว้ โดยสาเหตุที่ทำให้การค้นหาเส้นทางที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีกว่าเนื่องจากเส้นทางที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางเป็นเส้นทางที่มีคุณภาพช่องสัญญาณสูงและปริมาณโหลดอยู่ในระดับไม่สูงมากนัก ส่งผลให้ค่าประวิงเวลาที่ใช้ในการรับส่งแพ็กเกตข้อมูลและจำนวนการส่งแพ็กเกตข้อมูลซ้ำลดลง รวมถึงโครงข่ายมีวิสัยสามารถเพิ่มขึ้น

บทที่ 5

บทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอกระบวนการค้นหาเส้นทางบนพื้นฐานของประสิทธิภาพด้านการประวิงเวลาสำหรับโครงข่ายแอดฮอก โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำให้โครงข่ายใช้เวลาในการรับส่งแพ็กเกตข้อมูลน้อยที่สุดอย่างมีประสิทธิภาพและมีความถูกต้องของข้อมูลสูงที่สุด และในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้นำเสนอกระบวนการค้นหาเส้นทางด้วย คือกระบวนการค้นหาเส้นทางที่คำนึงถึงคุณภาพช่องสัญญาณไร้สายด้วยจีเนติกอัลกอริทึม (**Proposed-GA**) โดยเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียค่าประวิงเวลาในการรับส่งแพ็กเกตข้อมูลต่ำที่สุด ซึ่งเป็นวิธีที่นำเอาค่าประวิงเวลาที่ต้องใช้เนื่องจากทั้งการส่งข้อมูลปกติ และยังรวมถึงผลกระทบเนื่องจากคุณภาพของช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลามาใช้ในการกำหนดค่าต้นทุนการประวิงเวลาของเส้นทาง ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ GA ธรรมดาตรงที่วิธีการกำหนดค่าต้นทุนค่าประวิงเวลา และการส่งแพ็กเกตร้องขอเส้นทาง RREQ จากทดการสอบสามารถสรุปได้ว่า

- โครงข่ายมีประสิทธิภาพในการใช้ค่าประวิงเวลาน้อยลง ซึ่งก็จะส่งผลทำให้ค่าวิสัยสามารถของโครงข่ายเพิ่มขึ้นและจำนวนการส่งแพ็กเกตข้อมูลซ้ำลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ SP แต่ไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ GA ธรรมดา เพราะการพิจารณาเส้นทางใช้ค่าความเหมาะสมในลักษณะเดียวกัน

จากกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปประสิทธิภาพในด้านคุณภาพการให้บริการระหว่างกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ SP, GA ธรรมดา และ Proposed-GA โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ที่ชี้วัดประสิทธิภาพที่แตกต่างกันดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปเปรียบเทียบผลจากการทดสอบของกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอกับกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ SP และ GA ธรรมดาโดยใช้พารามิเตอร์ที่ชี้วัดประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน

Throughput (kbits/sec)	SP < GA < Proposed-GA
Average End-to-End Delay (sec)	SP > GA > Proposed-GA
Average Hop count (Hop)	SP < GA < Proposed-GA

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ในระบบสื่อสารโครงข่ายแอดฮอก (Ad-hoc network) นอกเหนือจากการใช้ค้นหาเส้นทางที่ดีที่สุดด้วยวิธีการทางพันธุ์ศาสตร์แล้ว ยังสามารถนำไปประยุกต์หรือพัฒนาเพื่อใช้ในงานต่างๆ ได้มากมายโดยเฉพาะข้อได้เปรียบคือไม่ต้องมี access point จึงเป็นโครงข่ายแบบไม่มีโครงสร้าง (Infarstructureless) ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนนั้นไป มีความยืดหยุ่นสูง และยังสามารถรองรับการสื่อสารได้หลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็น การสื่อสารแบบ Real-Time หรือการสื่อสารข้อมูลแบบสื่อประสาร (Multimedia) ต่างๆ ได้อีกด้วย ซึ่งยังเป็นที่น่าสนใจของนักวิจัยแพร่หลาย โดยเฉพาะทางด้านการค้นหาเส้นทางที่สามารถรองรับคุณภาพการให้บริการได้ (QoS routing) สูงๆ

รายการอ้างอิง

[1]. S. Corson and J. Macker. Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations. **Network Working Group RFC 2501**, Naval Research Laboratory, (January 1999).

[2]. ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ. **หลักการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่**. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546

[3]. T. Camp, J. Boleng, and V. Davies. A Survey of Mobility Model for Ad Hoc Network Research. **Wireless Communication & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications**. (2002): 483-502.

[4]. W. Xiuchao and A.L. Ananda. Link Characteristics Estimation For IEEE 802.11 DCF based WLAN. **In the 29th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN)**. Florida USA. (November 2004): 302-309.

[5]. Datasheet for ORiNOCO 11 Mbit/s Network Interface Cards. 2001.

[6]. The Editors. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY): Higher Speed Physical Layer (PHY) Extension in the 2.4 GHz band. IEEE Standard 802.11b **Institute if Electrical and Electronics Engineers, Inc.** (September 1999).

[7]. S. Banerjee and A. Misra. Minimum energy paths for reliable communication in multi-hop wireless networks. **International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing** (June 2002): 146-156.

[8]. D.B. Johnson, D.A. Maltz. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks. **Mobile Computing, (ed. T. Imielinski and H. Korth), Kluwer Academic Publishers** (1996).

[9]. C. E. Perkins, E. M. Royer and S. R. Das. Ad Hoc On-demand Distance Vector (AODV) routing. **IETF internet Draft (work in progess)** (November 2002).

[10]. E. M. Royer and C. –K. Toh. A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks. **IEEE Personal Communication Magazine** (April 1999): 44-50.

[11]. Wu Ying, Li Bin. Jobshop Scheduling Using Genetic Algorithms. **The 3rd International Conference on Signal Processing. ICS '96**. Beijing.

[12]. J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y. C. Hu, and J. Jetcheva. A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols. **Proceedings of the 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking** (October 1998): 85-97.

[13]. D.De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R.Morris. A highthroughput path metric for multi-hop wireless routing. **Proceedings of ACM MobiCom Conference**, September 2003

[14]. B. Maxwell and S. Anderson. 1999. Training Hidden Markov Models using Population-Based Learning. **In Genetic and Evolutionary Computation Conference**. GECCO-99, 994

[15]. M. Laksinhmi, P.E. Sankaranarayanan. Performance analysis of Three Routing Protocols in Mobile Ad Hoc Networks. **Asian Journal of Information Technology (AJIT) 4** (November 2005): 1195-1200.

[16]. G. Apostolopoulos, R.Guérin, S. Kamat, A.Orda, S. Tripathi. Intradomain QoS Routing in IP Networks: A Feasibility and Cost/Benefit Analysis. **IEEE Network Magazine**, September/October 1999.

[17]. A. Kershenbaum. **Telecommunications Network Design Algorithm**. New York, McGraw – Hill. Inc., 1993

[18]. T. S. Rappaport. **Wireless Communications Principles and Practice**, Prentice-Hall, Inc., 2002

[19]. M. Pioro and D. Medhi. **Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and computer Networks**. Morgan Kaufmann Publishers. San Francisco. 2004

ภาคผนวก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

1. Jittanun Kulsiri, Suvepon Sittichivapak and Kriengkai Vonglodjanaporn. The optimum route by QoS Based on Genetic Algorithms (QGAs). ECTI-CON 2007 Vol.2 (May 9-12, 2007): 714-717.

The Optimum route by QoS Based on Genetic Algorithms (QGAs)

Jittanun Kulsiri, Suvepon Sittichivapak and Kriengkai Vonglodjanaporn
Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL),
Bangkok 10520, Thailand Tel +66-2737-2500 Ext.5028
Email: jittanuk@ais.co.th, jai_tel@hotmail.com

Abstract- **We present another scheme, QoS based on Genetic Algorithms (QGAs), for finding the optimum route for wireless mesh networks. Our scheme was evaluated, based upon a critical factor as wireless channel quality, to decide whether each packet is successfully received and to define quality of service for improving the link quality and quantity in determining path. Simulation results show that our scheme outperforms with the original. Moreover, the time period of transmission by QGAs is less than the original when the packet size is higher or the population size is enlarging.**

Keywords: **Quality of Service, Genetic Algorithms, Optimum Routing, Wireless Mesh Network**

I. INTRODUCTION

Wireless mesh network (WMN) has grown considerably in popularity based on its several advantages in both metropolitan and rural applications, as showed in Fig. 1. This kind of network seeks to build a resilient and high performance infrastructure to provide users permeable Internet access. In a mesh network, each client accesses a local high speed access point (HAP), and multiple stationary HAPs communicate with one another over the wireless channel and form a multihop, wireless backbone for data delivery. This backbone ultimately forwards user traffic to a few gateway APs (GAPs) that additionally connect to the Internet via a wired connection or perhaps a WiMax link. Wireless devices have maximum utility since they can be used "anywhere at anytime".

The goal of WMNs is to process and forward packet data to other nodes and/or gateway. Therefore, a routing service is essential to WMNs applications. Much of recent work on wireless routing has been focusing on understanding the characteristics of the path performance metrics for finding the shortest path such as Dynamic Source Routing (DSR) [1], and Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV) [2]. Less attention has been paid to finding high-quality path in the face of lossy wireless links [3].

Nowadays, path optimum problem can be solved by many Artificial Intelligent (AI) techniques such as GAs, Tabu Search (TS), Evaluation Programming (EP), and etc [4]. As a result, a study on these AI techniques with speech recognition [5] is very interesting. GAs is chosen in this paper because (1) GAs can find nearly the optimum solution even for a large scale problem, and (2) GAs is simple to implement and understand.

In this paper, we present another scheme of the radio wireless mesh network, which is QoS metrics like desired

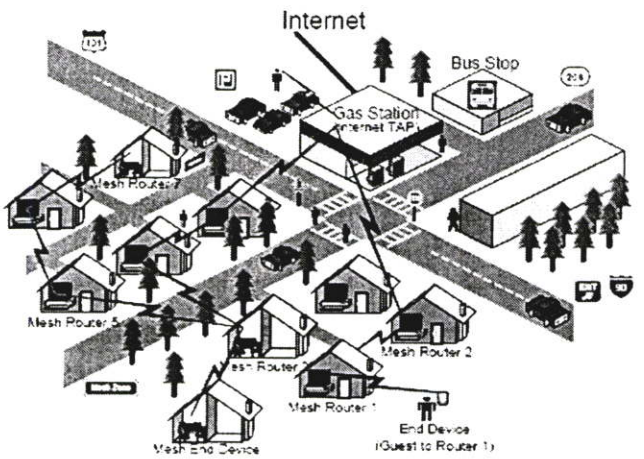


Fig.1: WMNs for metropolitan area networks

signal to noise ratio (S/N), packet loss, utilization and reliability of link in the path selection process to reduce a processing time and increase more accuracy before using GAs process to find an optimum route.

This paper is divided into 5 parts. The introduction is described in section I. The background and the system model are presented in section II and III respectively; whereas, the simulation results are presented in the section IV. Finally, our conclusion is given at the end of this paper.

II. Background

This section describes the wireless network architectures being focused on this paper, and provides a discussion of the Wireless link quality, Quality of Service, and Genetic Algorithms for wireless routing.

A. Wireless Mesh Network

Wireless mesh network is a mesh networking implemented over a Wireless LAN. This type of the Internet infrastructure is decentralized (with no central service provider), relatively inexpensive, and very reliable and resilient. Each node needs only transmission to the adjacent node. Nodes act as repeaters to transmit data from one node to another, allowing the extension of communications over distances, especially over rough or difficult terrain. Mesh networks are also extremely reliable as each node is connected to several other nodes. If one

node drops out of the network, due to hardware failure or any other reasons, its neighbors simply find another route. Extra capacity can be installed by simply adding more nodes. Mesh networks may involve either fixed or mobile devices. The solutions are as diverse as communications in difficult environments such as emergency situations, tunnels and oil rigs to battlefield surveillance and high speed mobile video applications on board public transport or real time racing car telemetry.

B. Wireless Link Quality

The signal strength received form transmitter is important for wireless systems. The loss in signal strength affected from several factor such as noise interference, fading, attenuation, and etc. Many wireless channel models have been proposed to predict the average received signal power. In this paper, we use the free space propagation model to predict received signal strength for the near sight and plane earth propagation model for the far sight. The received signal power (*Pr*) can be characterized as follow.

$$P_r = \begin{cases} \dfrac{P_t \times G_t \times G_r \times \lambda^2}{(4\times\pi)^2 \times d^2 \times L} & , \; d \le \dfrac{4\times\pi\times H_r \times H_t}{\lambda} \\ P_t \times G_t \times G_r \times \left(\dfrac{H_r \times H_t}{d^2}\right)^2 & , \; d > \dfrac{4\times\pi\times H_r \times H_t}{\lambda} \end{cases} \quad (1)$$

From the equation, *Pt* is the transmitted power, *Gt* and *Gr* are the antenna gains at the transmitter and receiver, respectively, *d* is the distance between transmitter and receiver in meter, *Ht* and *Hr* are the heights of the transmitter and receiver, respectively, *L* is the system loss factor not related to propagation (In this paper, $L=1$), and λ is the wavelength in the meter.

The bit error rate (BER) of wireless link is resolute by link quality, modulation and code scheme. The link quality can be represented by signal to noise ratio (S/N) of packet at the receiver. Thus, BER of wireless channel is determined by SNR and modulation scheme or transmission rate. The modulations perform the general relationship between *BER* and *SNR* by the following equation

$$BER \; \alpha \; erfc(\sqrt{C \times SNR}) \quad , \quad SNR = 10 \times \log\left(\frac{P_r}{N}\right) \quad (2)$$

where *BER* is bit error rate, *erfc (x)* is complementary function, *C* is constant, *Pr* is received signal power which derived from equation 1, and *N* is noise power.

The re-transmission is the factor for network performance with mention in IEEE802.11. When a transmitter send data packets to receiver and does not receive acknowledgments, the transmitter must perform re-transmission packet again. The classifications of the re-transmission have 2 modes, Hop-by-Hop Re-transmission (HHR) and End-to-End Re-transmission (EER). In this paper, we consider the HHR scheme because it is suitable for the characteristic of wireless mesh network such as having low number of packet re-transmission than the EER scheme, and implies a shortest time.

C. Quality of Service

Quality of Service (QoS) refers to the capability of a network to provide better service to selected network traffic over various technologies, including Frame Relay, Asynchronous Transfer Mode (ATM), Ethernet and 802.1 networks, SONET, and IP-routed networks that may use any or all of these underlying technologies [6]. The primary goal of QoS is to provide priority including dedicated bandwidth, controlled jitter and latency (required by some real-time and interactive traffic), and improved loss characteristics. The notion of QoS has been proposed to capture the qualitatively or quantitatively defined performance contract between the service provider and the user applications [7]. The basic function of QoS routing is to find a network path which satisfies the given constraints. In addition, our QoS routing algorithms consider the optimization of resource utilization and link reliability.

D. Genetic Algorithms

Genetic Algorithms (GAs) are adaptive heuristic random search algorithms premised on the evolutionary ideas of natural selection and genetics. The search is usually done with a group or population of binary strings, which are encoded forms of the decision variables. Each string is analogous to a chromosome and each binary bit is analogous to a gene on that chromosome. There are three operators used in the simple GA, selection, crossover, and mutation. Each having the following specific roles:

- Selection: exponentially spreads, over generations, above average fitted chromosomes by allowing them more offspring in next generations.
- Crossover: exploits genetic materials of the current population by breeding most interesting strings.
- Mutation: introduces diversity in population by flipping randomly chosen genes.

Using these operations, more fit members of the population are created over time and the population evolves to optimal or near optimal solutions.

III. System Model

In this paper, we simulate the connecting channel between source node and destination node of mesh topology over wireless communication system. The purpose is to achieve the most appropriate route for sending and receiving packet data. The proposed approach and process are as follows.

1. Individual routes of hop from QoS are determined to be utilized as candidate links prior to the process of GAs. In order to select a route for data transmission, the most important thing to be considered is the quality of the chosen route as it is able to be indicated by the following factors.

- BER: In case a route exhibits a large number of bit errors, it is considered poor quality. Additionally, more time is consumed for re-transmission.
- S/N: Signal strength received is compared to Noise power. A route exhibits low S/N value indicates the occurrence of noise interference of received data, resulted in eccentric signal.

Consequently, more time and energy are needed for re-transmission to obtain accurate data.

- Utilization: This factor considers the number of users of each route. A route with high volume of users is affected with the delay of data due mainly to the limitation of resource allocated to high utilization. Therefore, the route ought to be avoided.
- Link Reliability: This factor is considered to be significant for the selection of appropriate route owing to the fact that there are high tendencies of a route to confront with link down. As a consequence, although other factors prove effective, the opportunity of a successful transmission of data via the link is relatively low.

2. After obtaining the determined Link candidates in accordance with the defined criteria, the links, later, are evaluated to find the best route for transmission of data from source node to destination node by GAs, using Fitness Function under the condition of "minimum delay route" as shown in equation 3 as follow

$$Min\ T(L) = \sum_{i=1}^{M+N} \sum_{j=1}^{M+N} C_{ij} X_{ijk} + T_{re-tran} \qquad (3)$$

where *T(L)* is the period of time for a success of send-receive packet data from source node to destination node.

Cij is the period of time for a success of send-receive packet data between i node to j node.

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1 & ,if\ link\ i,j\ is\ concluded\ in\ tour\ k \\ 0 & ,otherwise \end{cases}$$

N is number of locations to be visited

M is number of tours

$T_{re\text{-}tran}$ = time period for re-transmission

Fig. 2 shows the flow chart of the proposed QGAs algorithm. The characteristics of the algorithm are summarized as follows:

1) Set model parameter for QoS and error probability obtained from connecting channel as the initial distance, utilization and link reliability, respectively.
2) Create an initial population by randomly generating a set of feasible solution according to our scheme.
3) Determine the fitness function of each number in the population.
4) Apply GA operators to generate new population as mutation, crossover and reproduction, respectively.
5) Compare the results of all generation and choose the best ones.

IV. Simulation Results

We consider a mesh network topology with 50 nodes randomly placed over a 1000 x 1000 m^2, each node randomly positioned with communication range less than 120 meters. We perform experiments transmission packet as 1,000 packets with the sizes of data packets varying from 1,000, 2,000, 3,000 and 4,000 bits/packet. The physical radio characteristic of the transmission bit rate is 54 Mbps referred to IEEE802.11.

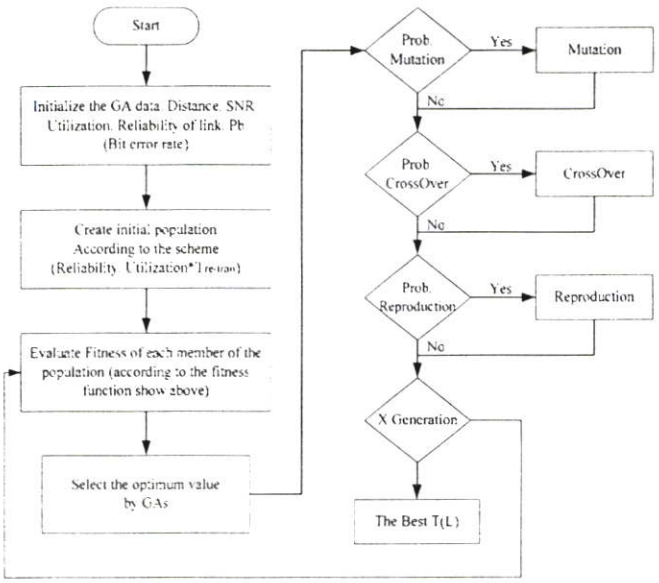


Fig. 2: Flow chart of the proposed QGAs Algorithm

In our simulated situation, we implement the link quality which uses the packet error probability to resolve whether or not each packet is received successfully based on the BER and packet length inferred by SNR at the receiver. Moreover, we consider about the QoS (Utilization and link reliability) for the path selection before using GAs process as well. The initial values of all factors are shown in Table 1.

For the GA parameters, the population size is 50, the value of parameter that optimizes the algorithm's performance as number of generation is 50, the probability of mutation and crossover are 0.5 and 0.75, respectively. The length of connections is 10 nodes.

The performance metrics that we have considered are the minimum delay routes from both of path finding time and transmission time.

Figure 3 illustrates the delay time (Fitness function) with the varied data packet sizes as 1,000, 2,000, 3,000 and 4,000 bits, respectively from both of our scheme and the original. It also shows a verifiable performance for our scenarios, especially for the 80% performance route; the link quality is affected the network connectivity. This implies that QGAs uses more number of hops to avoid the path consist of links having high

Table 1
Initial parameter in random scenario

Utilization (transaction/path)	1-54
Link Reliability (%)	0-100
SNR	0-20
Distance (m)	20-120
Simulation time (min)	2

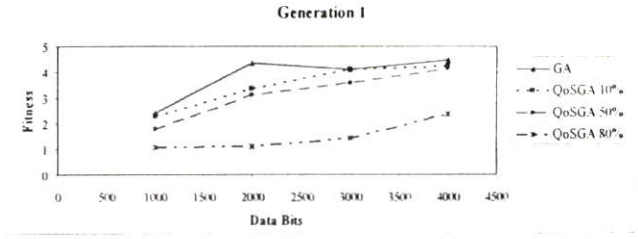


Fig.3: Comparison between original And QGAs at different packet sizes

Table 2
Simulation results in random scenario

Protocol / Metrics	GAs Original	QGAs at 10% performance link	QGAs at 50% performance link	QGAs at 80% performance link
Time period of finding route (sec)	1	1	1	1
Time period for complete transmission (sec)	1.854933	1.64921433	1.79043037	1.15131126

bit error rate and try to find the path having the least number of utilization or low possibility of link failure.

Figure 4 a) and b) reveal some of the chrematistic behaviors of both GAs and QGAs. As expected, the GAs and QGAs converge faster at lesser generation when the population is large. In fact, when the population size is 100, the GAs and QGAs reach a fitness level of 1st generation. For the population size of 50, the same GA also reaches a fitness level of 1st generation.

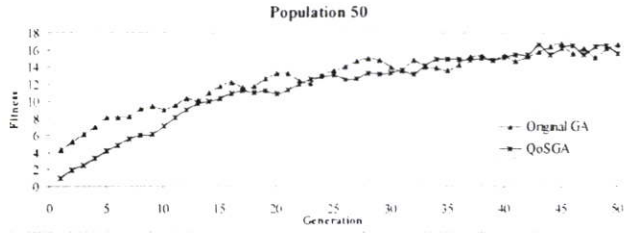
Figure 4 a) and b) show the results of our comparison when the population sizes are enlarged. The capability of QGAs in finding the optimum path for receiving – sending the data packet is better than the original algorithm.

Table 2 confirms that QGAs outperforms for finding the optimum route in wireless mesh network although the time of finding the QGAs route and the original are equal. This is due to the fact that QGAs need some time to search for the best quality route with Link reliability, utilization and chances of errors during transmission in order to reduce time period for re-transmission. From the reason, time period for complete transmission of QGAs is a lot less than that of the original.

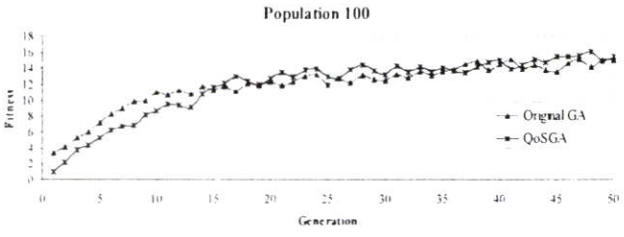
V. Conclusions

In this paper, a new QoS base-on GA scheme is presented to find the optimum route between source and destination node with the consideration of the link quality and quantity.

The simulation results illustrate that QGAs can find the best route with the accurate data transmission compared to the original, although send-receive and network sizes are enlarged. This is because QGAs have a better path finding process based on concerned factors affecting communication. Thus, the time



a)



b)

Fig.4: Comparison of between original And QGAs at different population sizes

period for sending-receiving data is less with high quality of transmission.

References

[1]. D. B. Johnson, D. A. Maltz, and Y-C Hu., "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)",IETF Mobile Ad Hoc Networks Working Group, Internet Draft, work in progress, 24 February 2003

[2]. C. E. Perkins, E. M. Royer and S.R. Das, "Ad Hoc Ondemand Distance Vector (AODV) routing," IETF internet Draft, work in progress, Nov 2002

[3]. D.De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R.Morris, "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing", Proceedings of ACM MobiCom Conference, September 2003

[4]. B. Maxwell and S. Anderson. 1999. *Training Hidden Markov Models using Population-Based Learning*. In Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO-99, 994

[5]. Wu Ying, Li Bin. "Jobshop Scheduling Using Genetic Algorithms" the 3rd International Conference on Signal Processing. ICS '96. Beijing

[6]. G.Apostolopoulos, R.Guérin, S. Kamat, A.Orda, S. Tripathi, "Intradomain QoS Routing in IP Networks: A Feasibility and Cost/Benefit Analysis", in IEEE Network Magazine, September/October 1999.

[7]. MONET research group," QoS Routing", University of Illinois at Urbana-Champaign http://cairo.cs.uiuc.edu/qosrouting/index.html

[8] A. Kershenbaum, Telecommunications Network Design Algorithm, New York, McGraw - Hill, Inc., 1993

[9] T. S. Rappaport, Wireless Communications Principles and Practice, Prentice-Hall, Inc., 2002

[10] M. Pioro and D. Medhi, Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and computer Networks, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2004

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว จิตตนันท์ กุลศิริ เกิดวันที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดอุตรดิตถ์ เข้ารับการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในปีการศึกษา 2542 และได้สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในปีการศึกษา 2545 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548