

## บทที่ 1 บทนำ (Introduction)

### 1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารได้มีบทบาทสำคัญยิ่งในหน่วยงานต่างๆทั้งในภาครัฐและเอกชน รวมทั้งเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของผู้คนอย่างมาก ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคมได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในเกือบทุกองค์กรเพื่อเชื่อมโยงระบบข้อมูลสารสนเทศและสนับสนุนการทำงานร่วมกัน เทคโนโลยีทางด้านเครือข่ายและโทรคมนาคมซึ่งทำหน้าที่เชื่อมโยงระบบสารสนเทศต่างๆเข้าด้วยกันจึงมีบทบาทสำคัญในการที่จะทำให้การใช้งานระบบสารสนเทศต่างๆเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การออกแบบระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคมขององค์กร ให้สามารถรองรับความต้องการใช้งานที่หลากหลายจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งต้องใช้เงินลงทุนสูง นอกจากนี้ระบบเครือข่ายของหลายหน่วยงานที่มีการใช้งานตลอดเวลาต้องการความเสถียรที่สูงแม้จะเกิดความขัดข้องหรือชำรุดในบางจุดของระบบแต่ระบบเครือข่ายจะต้องมีระบบสำรองทดแทนและยังคงทำงานอยู่ได้ ฉะนั้นการออกแบบระบบเครือข่ายที่ต้องการความเสถียรที่สูงและคงอยู่ได้จึงมีความซับซ้อนและต้องใช้เงินลงทุนมาก จึงจำเป็นที่จะต้องมีการใช้เครื่องมือเช่น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบระบบเครือข่ายเพื่อลดเวลาในการวิเคราะห์การออกแบบและค่าใช้จ่ายในการลงทุนสร้างระบบเครือข่าย การออกแบบเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ของหลายองค์กรจึงมักจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบที่มีราคาแพงจากต่างประเทศ หากจะต้องการพัฒนาโปรแกรมช่วยออกแบบระบบเครือข่ายสำหรับใช้งานภายในองค์กรต้องใช้เวลาและต้องมีบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน โดยเฉพาะบุคลากรทางด้านเทคโนโลยีเครือข่ายคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคมซึ่งยังเป็นสาขาที่ขาดแคลนอย่างมาก

ดังนั้นการสร้างและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่รวมเอาวิธีการใหม่ๆที่ได้จากการทำวิจัยมาช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบระบบเครือข่ายจึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับหน่วยงานที่ต้องการติดตั้งและพัฒนาระบบเครือข่าย นอกจากนี้ยังสามารถนำโปรแกรมช่วยวิเคราะห์และออกแบบระบบเครือข่ายมาช่วยในด้านการเรียนการสอน การฝึกอบรมให้กับนิสิต นักศึกษา และผู้ที่สนใจ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาวิจัยเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการออกแบบเครือข่ายให้มีความเสถียรและคงอยู่ได้โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization)
- 2) เพื่อวิจัยและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จะสามารถช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบระบบเครือข่าย
- 3) เพื่อสร้างเครื่องมือที่จะใช้ช่วยในการเรียนการสอนด้านการออกแบบระบบเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ

- 4) เพื่อตอบสนองความต้องการของหน่วยงานต่างๆที่ต้องการเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ และลดเวลาในการวิเคราะห์การออกแบบระบบเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่และมีการลงทุนสูง
- 5) เพื่อสร้างองค์ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีเครือข่ายที่จำเป็นสำหรับเพิ่มศักยภาพในการแข่งขัน
- 6) เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการซื้อซอฟต์แวร์ช่วยในการออกแบบเครือข่ายที่มีราคาแพงจากต่างประเทศ
- 7) เพื่อสร้างและพัฒนาบุคลากรให้มีความรู้ความเชี่ยวชาญในการวิจัยพัฒนาในสาขาที่ขาดแคลน

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะวิจัยวิธีการออกแบบโครงสร้างของระบบเครือข่ายให้มีความเสถียรสูงและคงอยู่ได้ โดยมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด รวมทั้งพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จะสามารถช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบระบบเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ

การออกแบบโครงสร้างของระบบเครือข่ายโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆคือ การออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึง (Access Network Design) และ การออกแบบเครือข่ายแกนหลัก (Core/Backbone Network) ซึ่งแต่ละส่วนจะมีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน นอกจากนี้การออกแบบระบบเครือข่ายยังขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานและใช้งานของเครือข่ายนั้นๆ

โครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาวิธีการออกแบบโครงสร้างของระบบเครือข่ายที่มีอยู่ทั้งในส่วนการออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึงและการออกแบบเครือข่ายแกนหลัก เพื่อที่จะวิจัยพัฒนาเทคนิควิธีการออกแบบที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ซึ่งวิธีการออกแบบเครือข่ายที่มีอยู่เดิมมีทั้งข้อดีและข้อจำกัดในหลายประเด็น โดยเฉพาะวิธีการออกแบบให้เครือข่ายมีความเสถียรสูงและคงอยู่ได้ในกรณีที่เกิดเหตุขัดข้องหรือชำรุด รวมทั้งการออกแบบเครือข่ายให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด โดยอาศัยวิธีการหาค่าที่ดีที่สุด ซึ่งต้องใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณและใช้ระยะเวลาค้นหาคำตอบที่เหมาะสม จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาวิจัยวิธีการออกแบบที่มีประสิทธิภาพ ในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการออกแบบระบบเครือข่ายจะนำเอาวิธีการต่างๆมาช่วยในการวิเคราะห์ สังเคราะห์ และออกแบบเครือข่ายให้มีความเสถียรสูงและสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ โดยเฉพาะการนำเสนอในรูปแบบ Graphic User Interface

### 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลองเก็บข้อมูล

- 1) ศึกษาวิธีการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายแบบเข้าถึงและเครือข่ายแกนหลักต่างๆรวมทั้งเทคโนโลยีที่มีการนำมาใช้บนเครือข่าย
- 2) วิเคราะห์วิธีการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงความเสถียร ความเชื่อถือได้ของเครือข่าย ความต้องการใช้งาน และค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้น
- 3) วิจัยพัฒนาวิธีการและอัลกอริทึมในการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึง

- 4) วิจัยพัฒนาวิธีการและอัลกอริทึมในการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบเครือข่ายแกนหลัก
- 5) พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบเครือข่ายเบื้องต้น
- 6) ทำการทดลองออกแบบโครงสร้างเครือข่ายในรูปแบบต่างๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบ
- 7) ทดสอบและปรับปรุง โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบเครือข่ายให้ง่ายต่อการใช้งาน ในรูปแบบ Graphic User Interface และสามารถรองรับการออกแบบเครือข่ายที่หลากหลายรูปแบบ
- 8) พัฒนาคู่มือการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบเครือข่าย

### 1.5 ทฤษฎี และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การออกแบบระบบเครือข่ายที่มีอยู่เดิมส่วนมากจะมุ่งเน้นในเรื่องของการสร้างระบบเครือข่ายที่สามารถเชื่อมโยงจุดต่างๆเข้าด้วยกันให้สามารถใช้งานได้โดยมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด แต่วิธีการออกแบบระบบเครือข่ายดังกล่าวไม่เพียงพอต่อความต้องการที่จะให้ระบบเครือข่ายมีความเสถียรสูง สามารถตอบสนองการใช้งานหลากหลายรูปแบบตลอดเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ใช้ที่ต้องการจะใช้ระบบเครือข่ายในการติดต่อสื่อสารได้จากทุกสถานที่และทุกเวลา การใช้งานผ่านระบบเครือข่ายบางประเภทเช่นระบบธนาคารหรือระบบซื้อขายหลักทรัพย์ หากระบบเครือข่ายเกิดขัดข้องหรือไม่สามารถให้บริการได้อาจก่อให้เกิดผลกระทบหรือความเสียหายอย่างมากในเชิงธุรกิจ ปัจจุบันระบบเครือข่ายของบางองค์กรมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน การพัฒนาและปรับปรุงเครือข่ายให้มีความเสถียรและประสิทธิภาพมากขึ้นจำเป็นต้องอาศัยผู้ที่มีความเชี่ยวชาญและต้องมีเครื่องมือช่วยในการพัฒนาออกแบบระบบเครือข่าย หลายหน่วยงานยอมลงทุนซื้อซอฟต์แวร์หรือระบบช่วยพัฒนาออกแบบเครือข่ายที่มีราคาแพงจากต่างประเทศ

การออกแบบระบบเครือข่ายขนาดใหญ่ให้มีความเสถียรและคงอยู่ได้ รวมทั้งสามารถตอบสนองความต้องการใช้งานโดยมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด ถือเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก ถึงแม้ว่าจะมีวิธีการและเทคนิคที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างระบบเครือข่ายได้หลายวิธี แต่ละวิธีการก็ต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณและค้นหาคำตอบจากทางเลือกที่มีอยู่มากมาย หากเป็นระบบเครือข่ายที่ไม่ใหญ่มาก อาจจะสามารถใช้วิธีการหาค่าที่ดีที่สุดได้ แต่ถ้าเป็นการออกแบบโครงสร้างระบบเครือข่ายขนาดใหญ่จำเป็นต้องพัฒนาเทคนิคต่างๆช่วยในการค้นหาคำตอบ เช่น การใช้จินตคณิตอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) เข้ามาช่วยในการค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุดโดยใช้ระยะเวลาที่ไม่นานเกินไป

จากการที่ได้มีศึกษาวิจัยการออกแบบระบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สามารถคงอยู่ได้โดยใช้จินตคณิตอัลกอริทึมเข้ามาช่วยในการค้นหาคำตอบก่อนหน้านี ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาวิธีการออกแบบระบบเครือข่ายให้มีการฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด (network link restoration) และการออกแบบให้มีการฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเส้นทาง (network path restoration) เมื่อเกิดวงจรสัญญาณวงจร

ใดใดในระบบชำรุด สามารถทำให้ระบบเครือข่ายมีความเสถียรและเชื่อถือได้มากขึ้นรวมทั้งสามารถตอบสนองปริมาณความต้องการใช้งานได้หากมีการชำรุดหรือขัดข้องของวงจรสัญญาณใดใดหนึ่งวงจรสัญญาณ แต่จะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในการที่จะต้องมีการติดตั้งวงจรสัญญาณสำรองเพื่อที่จะให้ระบบเครือข่ายสามารถทำงานได้โดยไม่ติดขัดในกรณีที่เกิดการชำรุดของวงจรสัญญาณบางจุด ซึ่งวิธีการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายดังกล่าวเบื้องต้นสามารถที่จะนำมาศึกษาต่อยอดเพื่อประยุกต์ใช้กับการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายทั้งแบบเข้าถึงและแบบแกนหลักของระบบเครือข่าย นอกจากนี้วิธีการค้นหาคำตอบโดยใช้จูนติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนอย่างมากยังสามารถที่จะนำมาต่อยอดเพื่อแก้ปัญหาการออกแบบเครือข่ายที่มีความซับซ้อนในรูปแบบอื่นๆ

อย่างไรก็ตาม โครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาวิจัยวิธีการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายและการแก้ปัญหาด้วยเทคนิคใหม่ๆเพิ่มเติมเพื่อที่จะเกิดการวิจัยพัฒนาการออกแบบระบบเครือข่ายที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยจะนำวิธีการออกแบบและเทคนิคการแก้ปัญหาต่างๆมาพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบแบบเครือข่าย

#### 1.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้นี้ทางด้านการออกแบบโครงสร้างระบบเครือข่ายพบว่างานวิจัยด้านการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายในระยะแรกส่วนใหญ่จะเป็นการพัฒนาวิธีการและเทคนิคในการออกแบบเครือข่ายให้สามารถรองรับความต้องการใช้งานโดยเกิดค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดในการสร้างและพัฒนาเครือข่ายรูปแบบเครือข่ายไม่ซับซ้อนมากนักโดยแบ่งออกเป็นโครงสร้างเครือข่ายแบบเข้าถึงและเครือข่ายแกนหลัก มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณหาคำตอบ

ตัวอย่างเช่นในปี พศ 2546 Yanick และคณะ [1] ได้เสนอการออกแบบเครือข่ายระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อให้เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามการออกแบบเหล่านี้ไม่เพียงพอต่อความต้องการที่จะให้ระบบเครือข่ายมีความเสถียรสูงและความต้องการในการตอบสนองการใช้งานหลากหลายรูปแบบตลอดเวลาแม้อุปกรณ์ในระบบเครือข่ายจะชำรุด จึงได้มีการศึกษาวิจัยการออกแบบระบบเครือข่ายให้สามารถคงอยู่ได้ ทั้งในระบบเครือข่ายแกนหลัก (Core/Backbone Network) [2, 3, 4, 5] และในระบบเครือข่ายแบบเข้าถึง (Access Network Design) [6, 7, 8] โดยการออกแบบระบบเครือข่ายให้สามารถคงอยู่ได้ดังกล่าวเบื้องต้น อาศัยทฤษฎีการฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด (network link restoration) และ/หรือการฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเส้นทาง (network path restoration) ในกรณีนี้วงจรสำรองที่ได้รับการคัดเลือกจะถูกใช้งานเป็นวงจรทดแทนทันทีเมื่อวงจรสัญญาณวงจรใด ๆ ในระบบเกิดขัดข้องไม่สามารถให้บริการได้ การมีวงจรสำรองนี้ทำให้ระบบเครือข่ายมีความเสถียรทนต่อความผิดพลาดและมีความเชื่อถือได้มากขึ้น กลุ่มนักวิจัย [9, 10] ได้ศึกษาเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการออกแบบระบบเครือข่ายให้สามารถคงอยู่ได้เพิ่มเติมจากการออกแบบระบบเครือข่ายเพื่อให้เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด การออกแบบทั้งในส่วนของระบบเครือข่ายแกนหลักและระบบเครือข่ายแบบเข้าถึงเพื่อให้เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดโดยคำนึงถึงความคงอยู่ได้ของระบบเมื่อ

มีความคิดพรั่งเกิดขึ้นในวงจรรถัญญาณจำเป็นต้องใช้วิธีหาคำตอบที่เหมาะสมหรือดีที่สุดจากกรณีที่เป็นไปได้มากมาย อาทิเช่น การค้นหาแบบละเอียด การค้นหาแบบสมการเชิงเส้น [20] รวมถึงวิธีการทางฮิวริสติก [1, 14, 15, 17, 18, 19] ซึ่งวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดเหล่านี้ได้มีการประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ เช่น ในปี พ.ศ. 2536 ได้มีกลุ่มนักวิจัย [11] เสนอตัวอย่างการใช้ อัลกอริทึม Branch&Bound ออกแบบเครือข่ายให้มีความเชื่อถือได้ โดยใช้โครงสร้างต้นไม้, โครงสร้างวงแหวน และ โครงสร้างแบบล้อเกวียน ต่อมาได้มีคณะวิจัย [12, 13] เสนอการใช้ จินิติกอัลกอริทึมในการออกแบบและแก้ปัญหาโครงสร้างเครือข่ายแบบระบบกระจายให้มีความเชื่อถือได้สำหรับการขยายเครือข่ายคอมพิวเตอร์ อย่างไรก็ตามการออกแบบโครงสร้างของเครือข่ายภายใต้ข้อจำกัดที่ต่างกันมีผลโดยตรงต่อความเชื่อถือได้ของเครือข่าย ดังที่คณะผู้วิจัยได้เสนอไว้ก่อนหน้านี้ [14, 17, 19] จินิติกอัลกอริทึมเป็นวิธีการทางฮิวริสติกที่มักจะถูกลือใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับปัญหาที่ต้องการหาคำตอบที่ดีที่สุดจากกรณีที่เป็นไปได้มากมายโดยที่คำตอบที่ได้ไม่จำเป็นต้องเป็นตัวเลือกที่กำหนดขึ้นมาก่อน

อย่างไรก็ดีวิธีการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายให้สามารถคงอยู่ได้ดังกล่าวเบื้องต้น ยังสามารถที่จะนำมาศึกษาต่อยอด เพื่อประยุกต์ใช้กับปัญหาบางอย่างที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้ เช่น ปัญหาจากปริมาณความต้องการใช้งานในจุดวงจรใดวงจรหนึ่งหนาแน่นมาก ดังที่ได้มีการนำเสนอไว้ก่อนหน้านี้ [16, 19] นอกจากนี้วิธีการค้นหาคำตอบโดยใช้จินิติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนอย่างมาก ยังสามารถที่จะนำมาต่อยอดพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ ซึ่งโดยส่วนมากแล้วนักวิจัยได้พยายามพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อแก้ปัญหาการออกแบบของตนเท่านั้น เช่น โปรแกรมคอมพิวเตอร์แก้ปัญหาการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายแบบ WAN [25] โดยใช้อัลกอริทึมที่เรียกว่า “Greedy Randomized Adaptive Search” มีจุดประสงค์เพื่อต้องการลดค่าใช้จ่ายจากการออกแบบ ซึ่งอัลกอริทึมแบบ Greedy มีข้อเสียคือไม่สามารถยืนยันได้ว่าคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่ดีที่สุด แต่ตั้งสมมติฐานว่าคำตอบที่ดีที่สุดเกิดจากการเลือกทางที่ดีที่สุดในขณะนั้นไปเรื่อย ๆ หรือโปรแกรมคอมพิวเตอร์แก้ปัญหาการออกแบบเครือข่ายใยแก้ว WDM เพื่อป้องกันวงจรรถัญญาณวงจรใดวงจรหนึ่งในระบบซาร์ดู [22] มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความเสถียรให้กับระบบและลดค่าใช้จ่ายจากจำนวนเส้นใย โดยใช้วิธีฮิวริสติกที่มีอัลกอริทึมเฉพาะขาดต่อการเข้าใจเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ อีกทั้งมีการแสดงผลที่ขาดต่อการเข้าใจ ส่วนโปรแกรมซอฟต์แวร์โอเพนซอร์ส (open source) เช่น Delite, NetMap, Network Simulator 2 ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้จำลองระบบเครือข่ายที่นิยมใช้ในหมู่นักวิจัย สามารถจำลองการทำงานของ TCP, UDP, การหาเส้นทาง (Routing) และโปรโตคอลแบบมัลติคาสต์ (Multicast Protocol) บนเครือข่ายแกนหลัก ก็มีข้อจำกัดในเรื่องความยืดหยุ่นของการทำงาน การปรับเปลี่ยนให้เป็นไปตามข้อจำกัดของการออกแบบเครือข่าย หรือการปรับให้มีการแสดงผลผ่าน GUI สามารถทำได้โดยการแก้ไขโปรแกรม (Source Code) ซึ่งขาดต่อผู้เริ่มศึกษา ความขาดต่อการใช้งานความสามารถในการแก้ปัญหาเครือข่ายที่ต่างกัน จึงมีนักวิจัยได้พยายามออกแบบภาษาในการติดต่อกันระหว่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ประยุกต์เหล่านั้น (Delite, NetMap, Network Simulator 2) [23] ผ่านทางไฟล์ xml ซึ่งเป็นภาษากลางทางข้อมูลคอมพิวเตอร์ที่เข้าใจได้ง่าย จะเห็นได้ว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อแก้ปัญหาการ

ออกแบบนี้ยังคงเป็นที่ต้องการอยู่มาก ได้มีกลุ่มนักวิจัยทำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ประยุกต์เพื่อการออกแบบ  
 เครื่องขายออกจำหน่าย [24] ในราคาสูง ดังนั้นจะเห็นว่าการสร้างและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่รวม  
 เอาวิธีการใหม่ๆที่ได้จากการทำวิจัยมาช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบระบบเครื่องขายจึงเป็นประโยชน์อย่าง  
 ยิ่งสำหรับหน่วยงานต่างๆที่ต้องการติดตั้งและพัฒนาระบบเครื่องขาย และทำให้ลดค่าใช้จ่ายจากการใช้  
 ซอฟต์แวร์หรือระบบช่วยพัฒนาออกแบบเครื่องขายที่มีราคาแพงจากต่างประเทศลงได้ นอกจากนี้ยังสามารถ  
 นำโปรแกรมช่วยวิเคราะห์และออกแบบระบบเครื่องขายมาช่วยในด้านการเรียนการสอน การฝึกอบรมให้กับ  
 นิสิต นักศึกษา และผู้ที่สนใจ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไป  
 ใช้ประโยชน์

- 1) หน่วยงานต่างๆที่มีระบบเครื่องขายสามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้จากการวิจัยพัฒนา  
 ช่วยออกแบบ วิเคราะห์และปรับปรุงเครื่องขาย
- 2) สถาบันการศึกษาสามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้จากการวิจัยพัฒนามาช่วยในการเรียน  
 การสอนในด้านออกแบบระบบเครื่องขาย
- 3) เพิ่มประสิทธิภาพและลดค่าใช้จ่ายในการออกแบบเครื่องขาย
- 4) สามารถลดค่าใช้จ่ายในการซื้อซอฟต์แวร์ราคาแพงจากต่างประเทศ
- 5) สามารถเป็นต้นแบบไปสู่เชิงพาณิชย์
- 6) เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน และวงการวิจัยในการที่จะพัฒนาต่อยอดโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วย  
 ในการออกแบบเครื่องขาย
- 7) สร้างองค์ความรู้ในการทำวิจัยทางการออกแบบเครื่องขาย

## บทที่ 2 การออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึง

### 2.1 คำอธิบายทั่วไปของการออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึง

ในปัจจุบันนี้ ระบบเครือข่ายแบบเข้าถึงมีความสำคัญต่อผู้ใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งต้องการใช้งานที่สะดวกทุกที่ทุกเวลา โทรศัพท์เคลื่อนที่มีวัตถุประสงค์ในการใช้งานที่หลากหลาย เช่น การจ่ายเงินผ่านโทรศัพท์ ข้อมูลการซื้อขายหุ้นในตลาดหลักทรัพย์ เรียลไทม์วิดีโอมีเดียตามต้องการ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าความต้องการใช้งานบริการผ่านระบบเครือข่ายแบบเข้าถึงมีความหลากหลายและเพิ่มขึ้น ฉะนั้นความเชื่อถือได้ของบริการบนระบบเครือข่ายแบบเข้าถึงจึงมีความสำคัญและจำเป็นต้องมีการศึกษาพัฒนา ผู้ใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีความคาดหวังว่าจะสามารถเข้าถึงและใช้งานบริการบนโทรศัพท์แบบสมาร์ตโฟนทุกที่ทุกเวลา โดยไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงอุปกรณ์บนระบบเครือข่ายว่าทำงานอย่างไร และไม่สนใจว่าอุปกรณ์ชิ้นหนึ่งบนระบบเครือข่ายชิ้นใดจะชำรุดหรือไม่ เช่น กรณีเมื่อวงจรสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานและชุมสายชำรุด

ในระบบเครือข่ายแบบเข้าถึง หากมีวงจรสัญญาณวงจรหนึ่งวงจรใดชำรุด จะทำให้ระบบเครือข่ายขาดการติดต่อกับสถานีฐานได้ในพื้นที่หนึ่ง ๆ สถานีฐานหนึ่งสถานี อาจรองรับผู้ใช้งานได้จำนวนมาก โอกาสที่วงจรสัญญาณชำรุดมีโอกาสเกิดขึ้นได้ทุกเมื่อ ฉะนั้นการชำรุดของวงจรสัญญาณในระบบเครือข่ายแบบเข้าถึงดังกล่าวควรมีการป้องกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานเพื่อทำธุรกรรมทางการเงิน และบริการที่ข้อมูลอาจสูญหายจากการขาดการติดต่อ เนื่องมาจากการชำรุดของวงจรสัญญาณได้ ข้อมูลดังกล่าวอาจตรวจสอบหรือกู้คืนได้ยาก ความจำเป็นของการฟื้นคืนวงจรในระบบเครือข่าย และผลกระทบต่อระบบเครือข่ายจากการที่อุปกรณ์ในเครือข่ายชำรุดเสียหายได้มีการศึกษาตามงานวิจัยก่อนหน้านี [2]-[4]. เทคนิคและอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาการออกแบบโครงสร้างระบบเครือข่ายที่เชื่อถือได้ได้มีการนำเสนอในงานวิจัย [5]-[8].

โครงสร้างพื้นฐานของระบบเครือข่ายแบบเข้าถึงแสดงดัง รูปที่ 2.1 โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ติดต่อกับอุปกรณ์ปลายทางที่เรียกว่า สถานีฐาน (Base Transceiver Station, BTS หรือ BS) ซึ่งถูกติดตั้งให้ครอบคลุมอยู่ในพื้นที่ต่าง ๆ กลุ่มของ สถานีฐาน ถูกควบคุม จัดสรรช่องสัญญาณ และทำกระบวนการเปลี่ยนสถานีฐาน (call-handoff) โดยศูนย์ควบคุมสถานีฐาน (Base Station Controller, BSC) ทั้ง สถานีฐาน และ ศูนย์ควบคุมสถานีฐาน เชื่อมต่อสู่ระบบเครือข่ายแกนหลักโดยผ่าน ชุมสาย (Mobile Switching Center) ชุมสายสามารถเชื่อมต่อกับระบบโทรศัพท์บ้าน (Public Switched Telephone Network, PSTN) หรือระบบเครือข่ายอื่น ๆ ได้ ในระบบเครือข่ายแบบเข้าถึง โครงสร้างของระบบเครือข่ายจะจัดเรียงคล้ายกับโครงสร้างต้นไม้ สถานีฐาน จะเชื่อมต่อกับ ศูนย์ควบคุมสถานีฐาน และ ศูนย์ควบคุมสถานีฐานจะเชื่อมต่อกับชุมสาย

ผู้ให้บริการ โทรศัพท์เคลื่อนที่จึงมีความจำเป็นต้องจัดสรรและจัดการทรัพยากรหรืออุปกรณ์เครือข่ายเพื่อวางระบบโครงสร้างเครือข่ายให้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ การวางระบบโครงสร้างเครือข่ายจึงมีความจำเป็นใน

แรงที่แปรผันโดยตรงกับค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายให้ประหยัดเวลา ประหยัดค่าใช้จ่ายจากการติดตั้งและการบำรุงรักษา โดยค่าใช้จ่ายจะถูกคำนวณมาจาก สถานีฐาน ศูนย์ควบคุมสถานีฐาน ชุมสาย วงจรสัญญาณ และอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณ คำตอบที่เหมาะสมจะถูกพิจารณาเลือกจากคำตอบที่ทำให้ค่าใช้จ่าย (จากโครงสร้างเครือข่าย) น้อยที่สุดภายใต้ข้อจำกัดที่ระบุ

ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอการออกแบบที่เชื่อถือได้สำหรับโครงสร้างเครือข่ายแบบเข้าถึงโดยใช้วิธีการทางฮิวริสติก ที่เรียกว่า จีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) คณะผู้ทำวิจัยได้ศึกษาวิธีการออกแบบสองระยะในงานวิจัย [8] เพื่อนำมาประยุกต์ปรับใช้ และได้นำเอาทฤษฎีการฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด (network link restoration) และ ทฤษฎีการฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเส้นทาง (network path restoration) มาประยุกต์ใช้ป้องกัน ความเสียหายจากการให้บริการผ่านเครือข่าย อันเนื่องมาจากการเกิดวงจรสัญญาณชำรุดเสียหาย

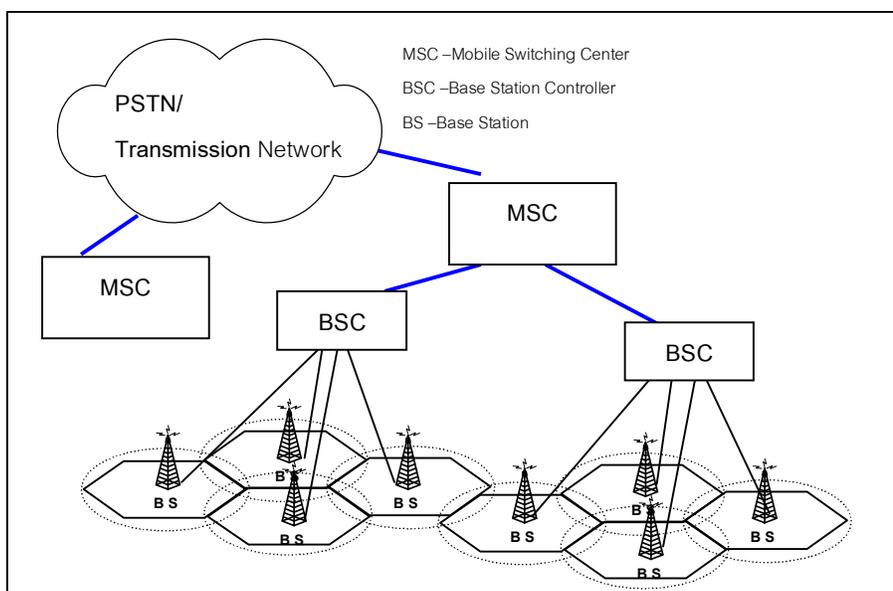
ระยะที่ 1 เป็นการออกแบบเพื่อหาโครงสร้างที่ประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุด โครงสร้างที่พิจารณาเป็น โครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้ ในระยะที่ 2 เป็นการคำนวณหาโครงสร้างเครือข่ายที่คงอยู่ได้โดยอาศัย ทฤษฎีการฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด (network link restoration) และ ทฤษฎีการฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเส้นทาง (network path restoration) โครงสร้างเครือข่ายที่คงอยู่ได้เป็นการคำนวณหาเพิ่มเติมจากการออกแบบโครงสร้างที่ประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุด ระยะที่ 1 มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้และคุณภาพในการให้บริการให้กับเครือข่าย

คณะผู้ทำวิจัยพิจารณาการออกแบบในระยะที่ 1 คือ การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายที่มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการนำเสนอก่อนหน้านี้ [1] โดยการออกแบบระยะที่ 1 นี้เป็นการหาโครงสร้างของเครือข่ายโดยพิจารณาถึงที่ตั้งของ ศูนย์ควบคุมสถานีฐาน และ ชุมสาย, ประเภทของ ศูนย์ควบคุมสถานีฐาน และ ชุมสาย, ประเภทของวงจรสัญญาณ และอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณ ในระยะที่ 1 นี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบ คือ หาโครงสร้างที่ทำให้เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด โดยค่าใช้จ่ายคำนวณมาจากค่าอุปกรณ์เครือข่ายและการติดตั้ง

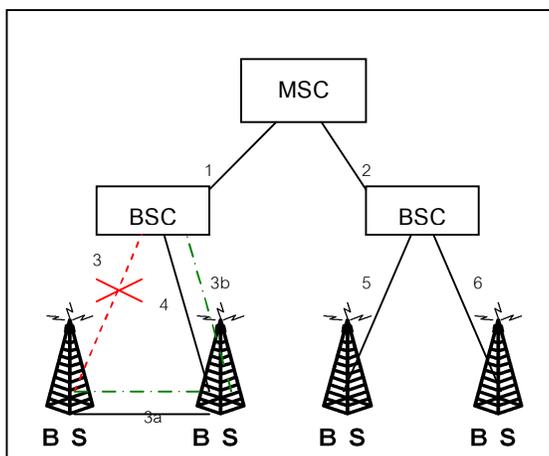
จากระยะที่ 1 งานวิจัยได้พิจารณาออกแบบให้ประหยัดค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด โดยค่าใช้จ่ายคำนวณมาจากการวางระบบเครือข่าย ค่าใช้จ่ายจากอุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายจากการติดตั้งและการดูแลรักษา ในระยะที่ 2 คณะผู้ทำวิจัยได้พิจารณาเปรียบเทียบทฤษฎีการฟื้นคืนวงจรสัญญาณ 2 วิธี คือ แบบเชื่อมต่อระหว่างจุด และแบบเส้นทาง เพื่อให้ระบบเครือข่ายมีความสามารถคงอยู่ได้เมื่อมีวงจรสัญญาณวงจรหนึ่งวงจรใดชำรุด การออกแบบในระยะที่ 2 นี้เป็นการออกแบบเพิ่มเติมจากระยะที่ 1 ซึ่งการออกแบบให้เครือข่ายคงอยู่ได้นี้ทำให้การติดต่อสื่อสารยัง

สามารถดำเนินต่อไปได้ แม้จะเกิดวงจรสัญญาณจุดหนึ่งจุดใด หรือเส้นทางหนึ่งเส้นทางใดในเครือข่ายชำรุดเสียหาย

ในการฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด เป็นการออกแบบเพื่อป้องกันให้ทุกวงจรสัญญาณสามารถชำรุดเสียหายได้ แต่ชำรุดได้เพียงหนึ่งวงจรในขณะเวลาหนึ่ง ๆ เท่านั้น วงจรสัญญาณสำรองในการฟื้นคืนแบบเชื่อมต่อระหว่างจุดนี้ จำเป็นต้องมีปลายทางทั้งสองข้างของวงจรเหมือนกับวงจรหลักที่ใช้งาน (เช่น มีศูนย์ควบคุมสถานีฐาน และ ชุมสายเดียวกัน) รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของเหตุการณ์เมื่อมีการชำรุดของวงจรสัญญาณหนึ่งวงจร จากรูปเมื่อวงจรสัญญาณที่ 3 ชำรุด วงจรสัญญาณที่ 3a และ 3b จะทำหน้าที่เป็นวงจรสัญญาณสำรองทันที ทำให้การให้บริการบนเครือข่ายยังสามารถดำเนินต่อไปได้

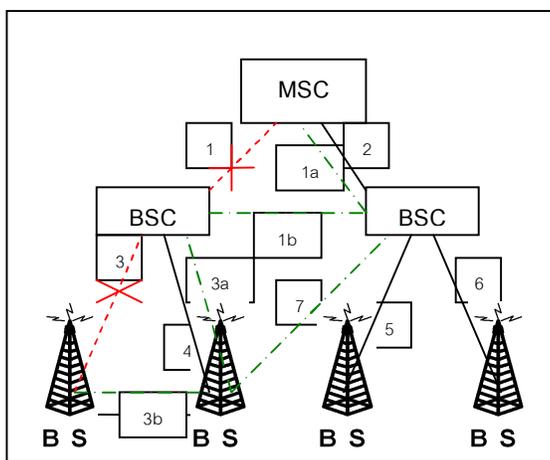


รูปที่ 2.1 เครือข่ายแบบเข้าถึงที่มีโครงสร้างแบบต้นไม้



รูปที่ 2.2 การฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด หลังจากวงจรสัญญาณที่ใช้งานหลักชำรุด

ในการฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเส้นทาง งานวิจัยนี้พิจารณาถึงเหตุการณ์ที่ชุดของวงจรสัญญาณบนเส้นทางหนึ่งชำรุด การฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเส้นทางถูกออกแบบให้มีวงจรสำรองป้องกันเครือข่ายจากเหตุการณ์ที่มีวงจรสัญญาณในเส้นทางใดเส้นทางหนึ่งชำรุด ในแต่ละเส้นทางจะเชื่อมต่ออย่างน้อยหนึ่งสถานีฐาน หนึ่งศูนย์ควบคุมสถานีฐาน และหนึ่งชุมสาย ในแต่ละเส้นทางสำรองจะมีสถานีฐานปลายทางและชุมสายเหมือนกัน รูปที่ 2.3 แสดงเหตุการณ์เส้นทางที่ใช้งานหลักชำรุด ซึ่งประกอบด้วยวงจรสัญญาณที่ 3 และ 1 ในกรณีนี้เส้นทางสำรองที่ประกอบด้วยวงจรสัญญาณ 3b, 3a, 1b และ 1a จะถูกใช้งานแทนที่เส้นทางหลัก (เส้นทางสำรองอาจเป็นไปได้หลายตัวเลือก เช่น เส้นทางที่ประกอบด้วยวงจรสัญญาณ 3b, 7 และ 2) คำตอบที่เหมาะสมจะถูกพิจารณาจากเส้นทางสำรองที่สามารถใช้งานร่วมกับเส้นทางสำรองของเส้นทางหลักอื่น ๆ แล้วทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายสูงสุด

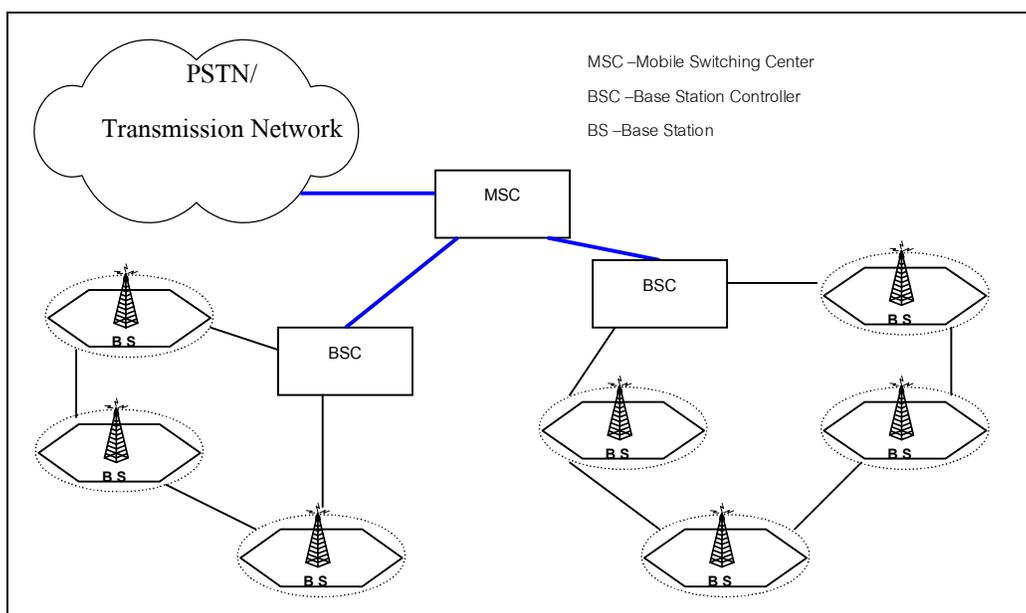


รูปที่ 2.3 การฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทางหลังจากเส้นทางหลักชำรุด

ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอการออกแบบที่เชื่อถือได้สำหรับโครงสร้างเครือข่ายแบบเข้าถึงโดยใช้วิธีการทางฮิวริสติก ที่เรียกว่า จีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) การออกแบบได้พิจารณาถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอมาก่อนหน้านี้ในงานวิจัย [1] โครงสร้างของเครือข่ายพิจารณาถึงที่ตั้งของศูนย์ควบคุมสถานีฐานและชุมสาย ชนิดของศูนย์ควบคุมสถานีฐานและชุมสาย และชนิดของวงจรสัญญาณ เริ่มแรกคณะผู้ทำวิจัยพิจารณาออกแบบโครงสร้างแบบต้นไม้ที่ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด โดยค่าใช้จ่ายมาจากอุปกรณ์เครือข่ายและค่าติดตั้ง หลังจากเราได้โครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้แล้ว โครงสร้างต้นไม้ดังกล่าวจะถูกนำมาคำนวณหาเส้นทางวงจรสำรองของทั้งเครือข่ายเพื่อป้องกันเหตุการณ์วงจรสัญญาณวงจรใดวงจรหนึ่ง หรือเส้นทางใดเส้นทางหนึ่งชำรุด การหาเส้นทางสำรองได้ประยุกต์ใช้ ทฤษฎีการฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด (network link restoration) และ ทฤษฎีการฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเส้นทาง (network path restoration)

## 2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้างเครือข่ายแบบเข้าถึง

โครงสร้างเครือข่าย คือ การจัดเรียงติดตั้งอุปกรณ์ทางกายภาพของเครือข่ายให้เชื่อมต่อกัน [12] หลายงานวิจัยได้พยายามค้นหาโครงสร้างที่ดีที่สุด ซึ่งโครงสร้างที่ดีที่สุดให้คำตอบที่เหมาะสมในแง่ของ ค่าใช้จ่ายในการวิจัย ขนาดความจุของเครือข่าย คุณภาพของการบริการต่าง ๆ (Quality of Services) ได้แก่ ค่าใช้จ่าย ความจุ และความเชื่อถือได้ของระบบ เป็นต้น ก่อนหน้านี้ได้มีงานวิจัยใช้ จินตคติอัลกอริทึมค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดอย่างมีประสิทธิภาพมาแล้ว [12, 22, 23] งานวิจัยนี้ศึกษาออกแบบโครงสร้างแบบต้นไม้ โดยประยุกต์ใช้ จินตคติอัลกอริทึมมาค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดซึ่งประหยัดค่าใช้จ่ายสูงสุด อย่างไรก็ตามก็มีการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายแบบเข้าถึงสามารถจัดเรียงในแบบอื่น ๆ นอกเหนือจากโครงสร้างแบบต้นไม้ได้ เช่น แบบร่างแห หรือ แบบวงแหวน จากรูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างเครือข่ายแบบเข้าถึงแบบต้นไม้ และ รูปที่ 2.4 แสดงถึงโครงสร้างเครือข่ายแบบวงแหวน



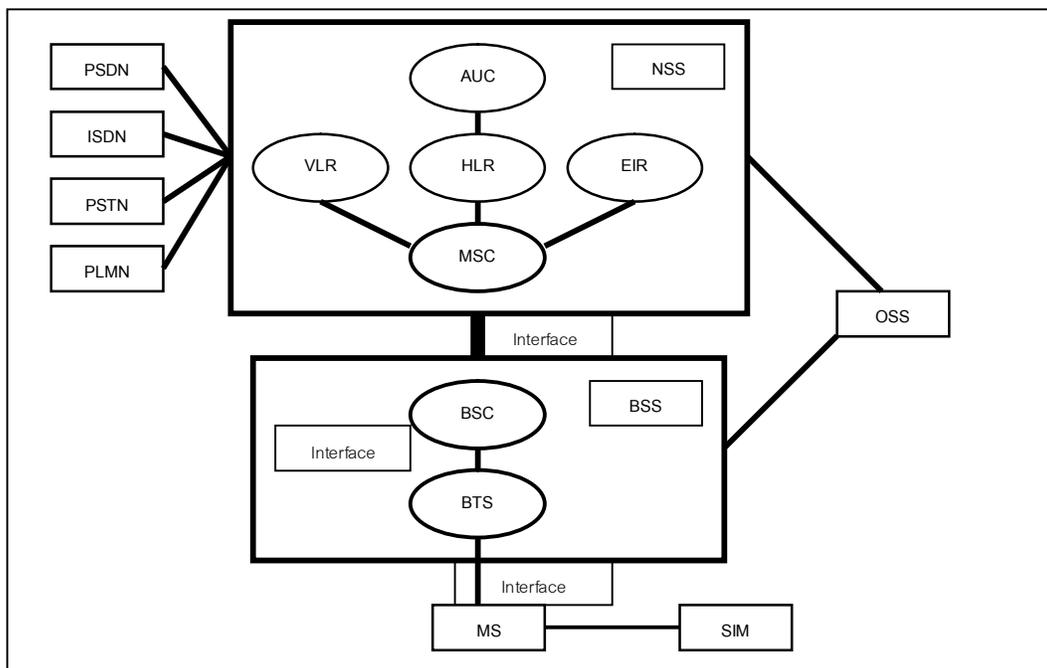
รูปที่ 2.4 โครงสร้างเครือข่ายแบบวงแหวน

เครือข่ายแบบเข้าถึงมีอุปกรณ์เฉพาะ ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ในหัวข้อถัดไป

## 2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบเครือข่ายแบบเข้าถึง

โดยทั่วไประบบเครือข่ายแบบเข้าถึงประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลายอย่าง ในเครือข่ายระบบ GSM อุปกรณ์สามารถแบ่งได้เป็นสี่ส่วนหลัก ๆ คือ โทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Station, MS) ส่วนของระบบสถานีฐาน (Base Station Subsystem, BSS) ส่วนของเครือข่ายและการเชื่อมต่อวงจรสัญญาณ (Networking and Switching Subsystem, NSS) ส่วนของการดำเนินการและการประมวลผล (Operation and Support Subsystem, OSS) [21]

ผู้ให้บริการระบบเครือข่ายจะใช้งานอุปกรณ์ทั้งสี่ส่วนนี้เพื่อประกอบเป็นเครือข่ายแบบเข้าถึง รายละเอียดของเครือข่ายสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระบบเครือข่ายแบบ จีเอสเอ็ม GSM

จากรูปที่ 2.5 งานวิจัยนี้ได้พิจารณาศึกษาในส่วนของระบบสถานีฐาน (BSS) และส่วนของเครือข่ายและการเชื่อมต่อสัญญาณ (NSS) เนื่องจากองค์ประกอบหลักของสองส่วนที่กล่าวมานี้มีเป็นองค์ประกอบทางฮาร์ดแวร์หรืออุปกรณ์ทางกายภาพเป็นหลัก ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นแตกต่างกันได้ โดยค่าใช้จ่ายขึ้นอยู่กับความจุของเครือข่าย และกระบวนการออกแบบ ส่วนของระบบสถานีฐานประกอบด้วยสองอุปกรณ์หลัก คือ สถานีฐาน (Base Transceiver Station, BTS) และ ศูนย์ควบคุมสถานีฐาน (Base Station Controller, BSC) สถานีฐานประกอบด้วยอุปกรณ์ในการรับและส่งสัญญาณโทรศัพท์ เสาอากาศ และอุปกรณ์ในการเข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณในการติดต่อกับศูนย์ควบคุมสถานีฐาน (Base Station Controller, BSC) [16] หนึ่งสถานีฐานมีอุปกรณ์สำหรับรับส่งสัญญาณประมาณ 1 ถึง 16 ชุดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของผู้ใช้บริการในพื้นที่ให้บริการ [21] คณะผู้ทำวิจัยได้กำหนดให้ชนิดของสถานีฐานมี 3 ชนิด คือ ชนิด A, B และ C ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ในแต่ละชนิดของสถานีฐานจะมีประสิทธิภาพในเรื่องความจุของช่องสัญญาณและอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณแตกต่างกัน

ส่วนของระบบสถานีฐาน ยังมีอุปกรณ์ที่สำคัญอีกหนึ่งอย่าง คือ ส่วนควบคุมสถานีฐาน ส่วนควบคุมสถานีฐานควบคุมกลุ่มของสถานีฐาน และบริหารจัดการช่องสัญญาณที่มีอยู่อย่างจำกัด ศูนย์ควบคุมสถานีฐานมี

หน้าที่รองรับการทำงานที่เกิดขึ้นระหว่างสถานีฐานหลายสถานี เช่น กระบวนการเปลี่ยนสถานีฐาน (call-handoff) การแบ่งช่องสัญญาณความถี่ออกเป็นช่วง ๆ เพื่อเตรียมไว้ใช้ให้บริการแก่ผู้ใช้งานในเครือข่าย และอื่น ๆ [21] โดยทั่วไปแล้ว ศูนย์ควบคุมสถานีฐาน 1 ศูนย์จะมีสถานีฐานภายใต้การควบคุม 10 หรือมากถึง 100 สถานีฐาน ผู้ให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่มักจะออกแบบให้มีศูนย์ควบคุมสถานีฐานหลาย ๆ ศูนย์ฯ กระจายอยู่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการใกล้ ๆ กับสถานีฐาน ศูนย์ควบคุมฯ จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับศูนย์กลางการให้บริการเครือข่ายขนาดใหญ่ คือ ชุมสาย [16] ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ศูนย์ควบคุมสถานีฐานแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ A, B และ C ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ในแต่ละชนิดจะรองรับปริมาณความต้องการใช้งาน ในแง่ของความจุและอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณแตกต่างกัน

ส่วนของเครือข่ายและการเชื่อมต่อสัญญาณ (NSS) ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลายชนิด อุปกรณ์ทางกายภาพส่วนที่สำคัญ เรียกว่า ชุมสาย ชุมสายเป็นศูนย์กลางของส่วนประกอบในส่วนของเครือข่ายและการเชื่อมต่อสัญญาณ (NSS) ทำหน้าที่เชื่อมต่อสับเปลี่ยนช่องสัญญาณของเครือข่าย [21] เป็นสะพานเชื่อมเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่เข้ากับเครือข่ายอื่น ๆ เช่น เครือข่ายโทรศัพท์พื้นฐาน (Public Switching Telephone Network, PSTN) [17] ในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีชนิดของชุมสาย 3 ชนิด คือ ชนิด A, B และ C ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ในแต่ละชนิดจะรองรับปริมาณความต้องการใช้งาน ในแง่ของความจุและอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณแตกต่างกัน

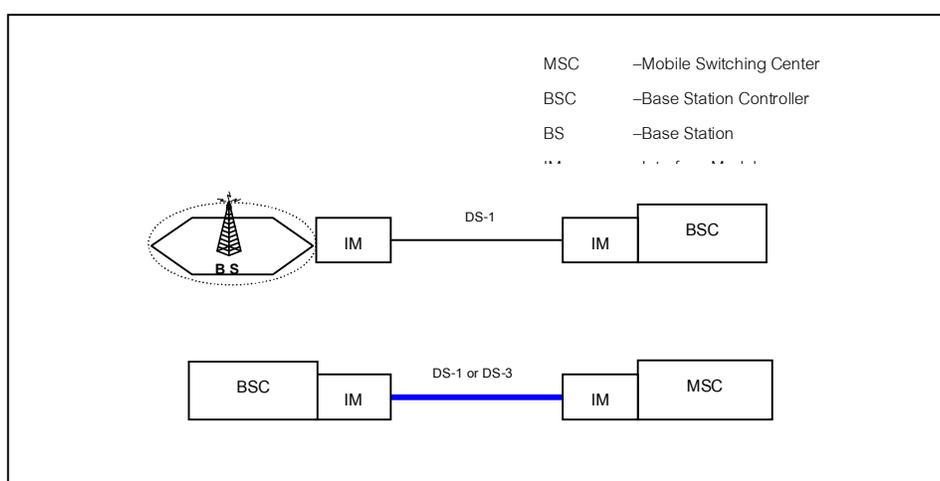
สถานีฐาน ศูนย์ควบคุมสถานีฐาน และ ชุมสาย เชื่อมต่อเข้าหากันโดยวงจรสัญญาณ เช่น วงจรสัญญาณที่เชื่อมระหว่างสถานีฐานเข้ากับศูนย์ควบคุมฯ และวงจรที่เชื่อมระหว่างศูนย์ควบคุมฯ เข้ากับชุมสาย ปลายทางสองข้างของวงจรสัญญาณจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณ ในแง่ของความจุอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งสัญญาณเสียงและข้อมูลจาก สถานีฐานปลายทางที่มีความหนาแน่นของข้อมูลน้อยผ่านวงจรสัญญาณสู่เครือข่ายแกนหลักที่มีความหนาแน่นของข้อมูลสูง โดยทั่วไปอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณใช้เทคโนโลยีอุปกรณ์รวมส่งสัญญาณ โดยมีหน่วยเป็น T-1 และ T-3 ทั้ง T-1 และ T-3 เป็นการรวมสัญญาณแบบช่วงเวลา โดยข้อมูลปลายทางจากหลายที่สามารถถูกรวมเข้าเป็นสัญญาณเดียวกันเพื่อส่งไปยังปลายทางที่ต้องการได้ การรวมสัญญาณแบบช่วงเวลาถูกพัฒนาขึ้นมาหลายปีมาแล้วโดย สถาบัน AT&T เพื่อเพิ่มปริมาณช่องสัญญาณเสียงของวงจรสัญญาณ ต่อมาเทคโนโลยีนี้ได้กลายเป็นส่วนหนึ่งของ มาตรฐานอุตสาหกรรม ANSI ในปัจจุบันนี้ ANSI กำหนดให้ DS-1 และ DS-3 เป็นมาตรฐานในการเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างเครือข่าย [20] อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ติดต่อกับวงจรสัญญาณแบบ DS-1 และ DS-3 มีความจุเป็นจำนวนเท่าของ DS-0 โดย DS-0 เป็นหน่วยพื้นฐานของความจุในการส่งข้อมูลแบบดิจิทัล หนึ่งช่องสัญญาณเท่ากับปริมาณที่จะส่งข้อมูลเสียงไปได้พร้อมกัน มีความจุเท่ากับ 64 Kbps [18] หน่วย DS-1 เท่ากับการรวม 24 DS-0 เข้าด้วยกันมีความเร็วประมาณ 1.54 Mbps และ DS-3 เท่ากับการรวม 672 ช่องสัญญาณแบบ DS-0 เข้าด้วยกันมีค่าประมาณ 44.74 Mbps [18]

ตารางที่ 2.1 ความจุของอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณแบบ DS-1 และ DS-3

ประเภท	จำนวนช่องสัญญาณ (DS0)	ความจุ (Mbps)
T-1 or DS-1	24	1.54
T - 3 or DS-3	672	44.74

ในงานวิจัยนี้ เราพิจารณาอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณสองชนิด คือ DS-1 และ DS-3 การเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานและศูนย์ควบคุมฯ ใช้อุปกรณ์ติดต่อชนิด DS-1 และการเชื่อมต่อระหว่าง ศูนย์ควบคุมฯและชุมสาย ใช้อุปกรณ์ติดต่อชนิด DS-1 หรือ DS-3 ขึ้นอยู่กับว่าชนิดใดทำให้ค่าใช้จ่ายของเครือข่ายต่ำสุด(แสดงในตารางที่ 2.5) ทั้ง DS-1 และ DS-3 มีปริมาณความจุช่องสัญญาณที่จำกัด ดังนั้นการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ใดใดสามารถใช้มากกว่า 1 อุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณ และ 1 วงจรสัญญาณ ตัวอย่างเช่น ศูนย์ควบคุมฯต้องการใช้งาน 120 ช่องสัญญาณ DS-1 จำนวน 2 ชุด จากตารางที่ 2.5 ให้ค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่า DS-3 จำนวน 1 ชุด ในทำนองเดียวกัน ศูนย์ควบคุมฯต้องการ 200 ช่องวงจรสัญญาณ DS-3 จำนวน 1 ชุดย่อมให้ค่าใช้จ่ายน้อยกว่า DS-1 จำนวน 4 ชุด

คณะผู้ทำวิจัยได้แบ่งส่วนประกอบของระบบเครือข่ายแบบเข้าถึงออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ สถานีฐาน ศูนย์ควบคุมสถานีฐาน ชุมสาย อุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณ และวงจรสัญญาณ งานวิจัยนี้ออกแบบเครือข่ายโดยใช้ อุปกรณ์ที่กล่าวมาข้างต้นเพื่อให้เกิดค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด โครงสร้างของวงจรสัญญาณแสดงในรูปที่ 2.6 ความจุของวงจรสัญญาณต้องสอดคล้องกับอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณด้วย ข้อจำกัดในด้านความจุของวงจรสัญญาณแสดงในตารางที่ 2.6-2.7



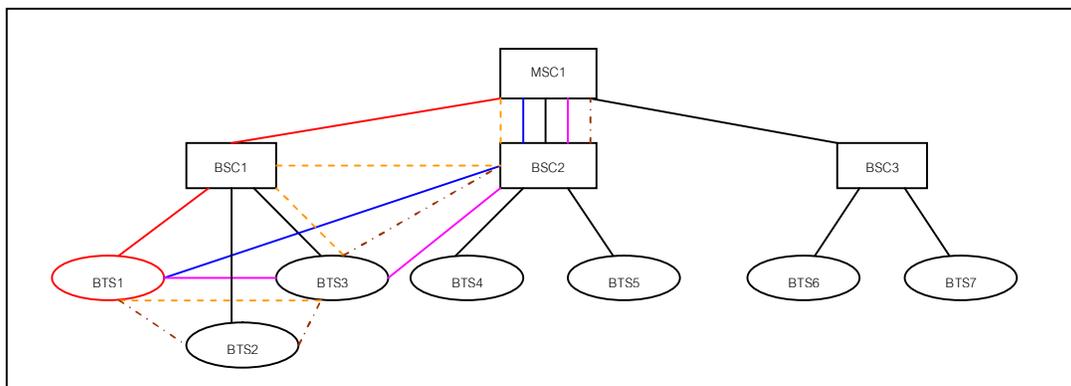
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของวงจรสัญญาณ และ อุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณระหว่าง สถานีฐานกับศูนย์ควบคุมฯ และระหว่าง ศูนย์ควบคุมฯกับชุมสาย

ความสำคัญของความเชื่อถือได้ และประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายโทรศัพท์ไร้สายที่มีการคำนึงถึงเหตุการณ์ที่อุปกรณ์ของเครือข่ายชำรุดเสียหายได้มีการศึกษามาก่อนหน้านี้ [2]-[4] หลาย ๆ เทคนิค และอัลกอริทึมสำหรับแก้ปัญหาการออกแบบระบบเครือข่ายที่คงอยู่ได้รวบรวมอยู่ในงานวิจัย [5]-[8] ในงานวิจัยนี้ เราได้พัฒนาการออกแบบสองระยะที่นำเสนอใน [8] เป็นการออกแบบสามระยะ ในส่วนแรกเป็นการหาโครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด ส่วนที่สองและสามเป็นการหาโครงสร้างเพิ่มเติมจากส่วนแรกเพื่อให้ระบบเครือข่ายมีการฟื้นคืนเมื่อเกิดวงจรชำรุดเสียหายได้ โดยส่วนที่สองเป็นการฟื้นคืนวงจรแบบเชื่อมต่อบริเวณจุด ส่วนที่สามเป็นการฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทาง จุดประสงค์ของการฟื้นคืนวงจรคือ เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ และคุณภาพในการให้บริการให้กับระบบเครือข่าย

#### 2.4 การออกแบบระบบเครือข่ายแบบเข้าถึงให้มีการฟื้นคืนวงจรสัญญาณเมื่อมีการชำรุดเสียหาย

โดยทั่วไปแล้ว การฟื้นคืนวงจรสัญญาณเป็นวิธีการหนึ่ง ที่ทำให้ระบบเครือข่ายมีความคงอยู่ได้เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่วงจรสัญญาณวงจรใดวงจรหนึ่งชำรุดเสียหาย การฟื้นคืนวงจรแบบระหว่างจุดและแบบเส้นทางมีความเชื่อถือได้และมีความเสถียรมากกว่าระบบเครือข่ายแบบดั้งเดิมซึ่งไม่มีการป้องกันการเกิดวงจรสัญญาณชำรุดเสียหาย การฟื้นคืนวงจรสัญญาณสามารถประยุกต์ใช้ในระบบเครือข่ายสื่อสาร เช่น ในระบบเครือข่ายแบบร่างแหของเครือข่าย Digital Cross-connect System (DCS) [24, 25] และ เครือข่ายแบบร่างแหของเครือข่าย Wavelength-division-multiplexed (WDM) [26, 27] การฟื้นคืนวงจรแบบระหว่างจุดและแบบเส้นทางจะถูกพิจารณา และกำหนดค่าเมื่อเส้นทางในวงจรสัญญาณตัวเลือกที่ผ่านมีช่องวงจรสัญญาณเหลือเพียงพอ

งานวิจัยนี้พิจารณาถึงเส้นทางสำรองหลายเส้นทาง เมื่อเส้นทางที่ใช้งานหลักมีปัญหา ระบบเครือข่ายจะสามารถคงอยู่ได้เมื่อวงจรสัญญาณหลักอันใดอันหนึ่งชำรุด ฉะนั้นวงจรสัญญาณในเส้นทางสำรองจึงสามารถใช้งานร่วมกันได้ โดยเส้นทางสำรองที่มีการใช้งานร่วมกันจากหลายเส้นทางหลักจะสามารถลดค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมลงได้ ตัวอย่างเช่น เส้นทางหลัก คือ  $BTS1 \rightarrow BSC1 \rightarrow MSC1$  เมื่อเส้นทางหลักมีปัญหา เส้นทางสำรองอาจจะเป็นเส้นทาง  $BTS1 \rightarrow BSC2 \rightarrow MSC1$ , เส้นทาง  $BTS1 \rightarrow BTS3 \rightarrow BSC2 \rightarrow MSC1$ , เส้นทาง  $BTS1 \rightarrow BTS2 \rightarrow BTS3 \rightarrow BSC2 \rightarrow MSC1$ , หรือ เส้นทาง  $BTS1 \rightarrow BTS3 \rightarrow BSC1 \rightarrow BSC2 \rightarrow MSC1$  จากการพิจารณาในทุกกรณีที่วงจรสัญญาณชำรุด ชุดของเส้นทางสำรอง (หนึ่งเส้นทางสำหรับกรณีหนึ่งวงจรชำรุด) ที่ให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมน้อยที่สุด ถือเป็นคำตอบที่มีประสิทธิภาพ คำตอบเหล่านี้ถูกค้นหาโดยใช้ อัลกอริทึม



รูปที่ 2.7 เส้นทางสำรองของ BTS1→BSC1→MSC1

แม้ว่าการออกแบบให้มีการฟื้นคืนวงจรสัญญาณจะทำให้ผู้ใช้บริการเครือข่ายจำเป็นต้องลงทุนเพิ่ม ซึ่งจำนวนเงินลงทุนที่เพิ่มขึ้น มาจากวงจรสัญญาณเพิ่มเติมซึ่งไม่ได้ถูกใช้งานในวงจรที่ใช้งานในเส้นทางหลัก หรือไม่ได้ถูกใช้งานในกรณีที่ระบบสื่อสารเป็นปกติ โดยวงจรเพิ่มเติมดังกล่าวจะถูกใช้งาน เมื่อมีวงจรชำรุดระหว่างสถานีฐานกับศูนย์ควบคุมฯ หรือ ระหว่างศูนย์ควบคุมฯกับชุมสาย เราได้จำลองการออกแบบโดยพิจารณาทั้งการฟื้นคืนวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุดและแบบเส้นทาง โดยผลการทดลอง และการเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย ได้แสดงใน [19, 34, 35]

#### 2.4.1 การฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด

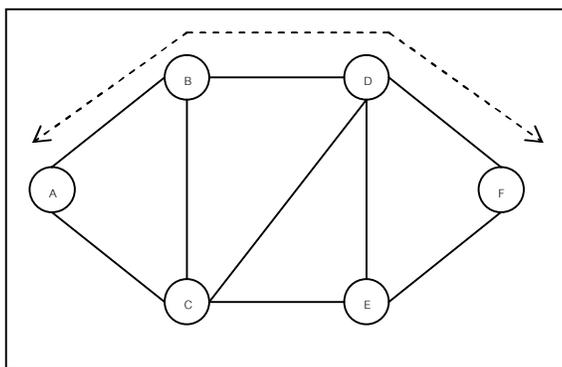
การฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด มีวิธีการ คือ เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่วงจรสัญญาณวงจรใดวงจรหนึ่งชำรุด ชุดของวงจรสัญญาณสำรองจะถูกใช้งาน เพื่อให้การเชื่อมต่อของบริการปลายทางยังดำเนินต่อไปได้ โดยที่ไม่กระทบต่อการทำงานของส่วนอื่น ๆ ในระบบ ตัวอย่าง เช่น จากรูปที่ 2.9 เมื่อวงจรสัญญาณระหว่าง B และ D ชำรุด ระบบเครือข่ายจำเป็นต้องหาวงจรสัญญาณสำรองเพื่อทำให้การเชื่อมต่อระหว่าง B กับ D ดำเนินต่อไปได้ เส้นทางสำรองที่เป็นไปได้ อาจเป็น B-C-D หรือ B-C-E-D โดยสมมติว่า ทั้งสองเส้นทางเป็นไปตามข้อจำกัดในการออกแบบ สมมติให้ เส้นทาง B-C-D ถูกเลือก เส้นทางเดิมที่ถูกใช้งานหลัก จะถูกเปลี่ยนจาก A-B-D-F ไปเป็น A-B-C-D-F เมื่อเกิดปัญหาเกี่ยวกับเส้นทางหลัก

#### 2.4.2 การฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเส้นทาง

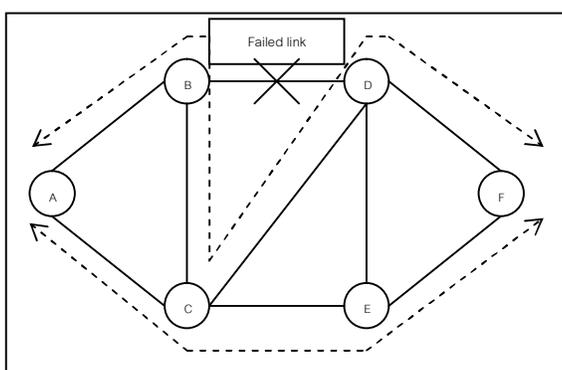
การฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเส้นทาง มีวิธีการ คือ เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่วงจรสัญญาณในเส้นทางใดเส้นทางหนึ่งชำรุด เส้นทางสำรองจะถูกใช้งาน เพื่อให้เครือข่ายสามารถใช้งานวงจรสัญญาณเพื่อเชื่อมต่อบริการปลายทางได้ ในงานวิจัยนี้ เส้นทางที่ไม่มีวงจรสัญญาณร่วมกันกับเส้นทางที่ถูกใช้งานหลักจะถูกพิจารณาเป็นเส้นทางสำรองโดยที่ส่วนอื่น ๆ ในเครือข่ายยังคงเหมือนเดิม ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 2.9 ถ้าเส้นทาง B-D-F ชำรุด ระบบเครือข่ายจำเป็นต้องหาเส้นทางสำรอง เพื่อฟื้นฟูการเชื่อมต่อระหว่าง A และ F โดยเส้นทางสำรองที่เป็นไปได้ อาจเป็นเส้นทาง A-C-E-F หรือ เส้นทาง A-C-D-F โดยสมมติว่า ทั้งสองเส้นทางเป็นไปตามข้อจำกัดในการ

ออกแบบ สมมติให้เส้นทาง A-C-E-F ถูกเลือก เส้นทางเดิมที่ถูกใช้งานหลักจะถูกเปลี่ยนจาก A-B-D-F ไปเป็น A-C-E-F จะเห็นได้ว่าเส้นทางหลักเดิม คือ A-B-D-F และเส้นทางสำรอง A-C-E-F มีจุดหมายปลายทางเดียวกัน โดยที่ทั้งสองเส้นทางไม่มีการใช้วงจรสัญญาณร่วมกัน

ในระบบเครือข่ายแบบร่างแห คณะผู้วิจัย [24-27] ได้แสดงให้เห็นว่า การฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทางให้ค่าใช้จ่าย (ที่เพิ่มขึ้นจากการออกแบบเครือข่ายปกติ) น้อยกว่าการฟื้นคืนวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด ในขณะที่การฟื้นคืนวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุดใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่า ในทางกลับกัน จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ เราได้พบว่าในระบบเครือข่ายแบบเข้าถึงซึ่งมีโครงสร้างแบบต้นไม้ การฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทางให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมที่มากกว่าการฟื้นคืนวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลที่ได้จากการฟื้นคืนวงจรทั้งสองแบบ แสดงอยู่ในงานวิจัย [19, 34, 35]



รูปที่ 2.8 เครือข่ายแบบร่างแหดั้งเดิมก่อนวงจรสัญญาณชำรุด



รูปที่ 2.9 แบบจำลองเหตุการณ์ที่วงจรสัญญาณชำรุดสำหรับการฟื้นคืนวงจรแบบระหว่างจุด และแบบเส้นทาง

เราพิจารณาการออกแบบโครงสร้างของเครือข่ายแบบเข้าถึงของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งการออกแบบพิจารณาถึง สถานที่ตั้งของศูนย์ควบคุมฯและชุมสาย ชนิดของศูนย์ควบคุมฯและชุมสาย สถานที่ตั้งและชนิด

ของวงจรสัญญาณ ปัญหาในการออกแบบเครือข่ายสามารถสร้างเป็นแบบจำลองเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ในงานวิจัยนี้เราได้ปรับปรุงพัฒนาแบบจำลองแบบข้อจำกัด จากงานวิจัย [1] เนื่องจากเราพิจารณาปัญหาในการออกแบบระบบเครือข่ายโทรศัพท์โดยคำนึงถึงความเชื่อถือได้ของเครือข่าย เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่วงจรสัญญาณชำรุดเสียหาย เราจึงปรับใช้วิธีการออกแบบสองระยะที่เสนอใน [8] มาใช้สำหรับการออกแบบให้เครือข่ายคงอยู่ได้ ด้วยการฟื้นคืนวงจรสัญญาณทั้งแบบเชื่อมต่อระหว่างจุดและแบบเส้นทาง ในการออกแบบส่วนแรกเป็นวิธีการพิจารณาหาโครงสร้างแบบต้นไม้ที่ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุด ในส่วนที่สอง เป็นการพิจารณาถึงการฟื้นคืนวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุดและแบบเส้นทาง เพื่อป้องกันการเกิดวงจรสัญญาณวงจรใดวงจรหนึ่ง หรือเส้นทางใดเส้นทางหนึ่งของโครงสร้างเครือข่ายที่ได้จากส่วนแรกชำรุดเสียหาย การออกแบบในส่วนที่สอง มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ให้กับเครือข่าย

ก่อนหน้านี้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึงได้ถูกนำเสนอ โดยใช้ชื่อว่าแบบจำลองโปรแกรมแบบข้อจำกัด (constraint programming model) ปัญหาที่เสนอโดยแบบจำลองดังกล่าวแก้ไขโดยใช้การค้นหาแบบฮิวริสติกที่เรียกว่า การค้นหาเฉพาะบริเวณโดยใช้การ โปรแกรมแบบข้อจำกัด (Constraint Programming Local Search, CPL) [1] หลายงานวิจัยได้นำเสนอแบบจำลองเครือข่ายและเทคนิคในการแก้ปัญหาการออกแบบเครือข่าย ในปี ค.ศ. 1993 ได้มีคณะวิจัย [9] เสนอการค้นหาแบบละเอียด (enumerative) และอัลกอริทึม branch&bound ในการออกแบบเครือข่ายที่เชื่อถือได้ โดยพิจารณาถึงโครงสร้างแบบต้นไม้ วงแหวน และ ล้อเกวียน ต่อมา Kumar และคณะ [10, 11] เสนอ จินติกอัลกอริทึมเพื่อแก้ปัญหาการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายแบบระบบกระจาย และหาค่าความเชื่อถือได้ที่เหมาะสม สำหรับการขยายตัวของเครือข่าย ในงานวิจัยนี้ เราพิจารณาเลือกใช้ จินติกอัลกอริทึมมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครือข่ายสื่อสาร โดยพิจารณาเลือกใช้งานส่วนประกอบของเครือข่ายบางส่วน สร้างเป็นโครงสร้างเครือข่ายโดยคำนึงถึงข้อจำกัดทางด้านค่าใช้จ่าย [12] จินติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) มักจะถูกใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่ซับซ้อน เหมาะกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจากปัญหาการจัดเรียงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะกับปัญหาที่มีขอบเขตของปัญหามหาศาลหรือมีกรณีที่เป็นไปได้มากมาย จินติกอัลกอริทึมมีความสามารถในการค้นหาคำตอบใหม่ ๆ ที่ไม่ได้มีอยู่ในตัวเลือกก่อนหน้านี้ ตัวอย่างการใช้จินติกอัลกอริทึมแก้ปัญหา คือ การเลือกใช้ส่วนประกอบเพื่อให้มีความเชื่อถือได้สูง ในระบบอนุกรมขนาน [13]

## 2.5 ปัญหาและแบบจำลองที่ใช้ในการออกแบบ

ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้น เป็นการออกแบบโดยคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการเชื่อมต่อวงจรสัญญาณจากอุปกรณ์รับสัญญาณปลายทางกับชุมสาย ในการออกแบบคำตอบที่เหมาะสมอาจจะไม่ใช่เส้นทางที่สั้นที่สุดจากอุปกรณ์รับสัญญาณปลายทางถึงชุมสาย แต่เป็นเส้นทางที่ทำให้อุปกรณ์รับสัญญาณปลายทางสามารถใช้งานวงจรสัญญาณที่มีอยู่ร่วมกันได้ การใช้งานวงจรสัญญาณที่มี

อยู่ร่วมกันดังกล่าว ทำให้ไม่ต้องสร้างเส้นทางใหม่ให้กับเครือข่าย เมื่อไม่ต้องสร้างเส้นทางใหม่ทำให้ค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นจากโครงสร้างเครือข่ายลดลง

ในงานวิจัยนี้ เราได้พัฒนาแบบจำลองโปรแกรมแบบข้อจำกัดตามงานวิจัย [1] วัตถุประสงค์ในการออกแบบคือ ประหยัดค่าใช้จ่ายให้น้อยที่สุด โดยค่าใช้จ่ายในการออกแบบคำนวณมาจาก ค่าใช้จ่ายที่แปรผันได้มาจากวงจรสัญญาณและอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณ และค่าใช้จ่ายที่แปรผันน้อยจากชนิดและที่ตั้งของศูนย์ควบคุมฯ และชุมสาย แบบจำลองมีข้อจำกัดของคำตอบในการออกแบบดังนี้

#### 2.5.1 ข้อจำกัดของคำตอบจากความจุของศูนย์ควบคุม

จำนวนอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณระหว่างสถานีฐานกับศูนย์ควบคุมฯ ที่ถูกติดตั้งที่ศูนย์ควบคุมฯ ต้องมีค่าไม่เกินค่ามากที่สุดที่ชนิดศูนย์ควบคุมฯ ที่ถูกเลือกรองรับได้ ในขณะเดียวกัน ผลรวมของค่าความจุ (วงจรสัญญาณ) ของสถานีฐานภายใต้การควบคุมต้องมีค่าไม่เกินความจุมากที่สุดที่ชนิดศูนย์ควบคุมฯ ที่ถูกเลือกรองรับได้

#### 2.5.2 ข้อจำกัดของคำตอบจากความจุของชุมสาย

จำนวนอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณระหว่างศูนย์ควบคุมฯ กับชุมสาย ที่ถูกติดตั้งที่ชุมสายต้องมีค่าไม่เกินค่ามากที่สุดที่ชนิดชุมสายที่ถูกเลือกรองรับได้ ในขณะเดียวกัน ผลรวมของค่าความจุ (วงจรสัญญาณ) ของศูนย์ควบคุมสถานีฐานภายใต้การควบคุมต้องมีค่าไม่เกินความจุมากที่สุดที่ชนิดชุมสายที่ถูกเลือกรองรับได้

#### 2.5.3 ข้อจำกัดของคำตอบจากความจุของวงจรสัญญาณ

ชนิดของอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณระหว่างสถานีฐานกับศูนย์ควบคุมฯ ต้องรองรับปริมาณความจุของวงจรสัญญาณภายใต้สถานีฐานที่เชื่อมต่อ และชนิดของอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณระหว่างศูนย์ควบคุมฯ กับชุมสายต้องรองรับปริมาณความจุของวงจรสัญญาณภายใต้ศูนย์ควบคุมฯ ที่เชื่อมต่อ

#### 2.5.4 ชนิดของสถานีฐาน

ชนิดของสถานีฐานที่เลือก จะพิจารณาจากปริมาณการติดต่อสื่อสาร (ในหน่วย Erlang<sup>1</sup>) จากสถานีฐานไปยังศูนย์ควบคุมฯ ที่เลือก

<sup>1</sup> Erlang คือ อัตราส่วนของอัตราการความต้องการเข้าใช้งานกับอัตราระยะเวลาการใช้บริการ ตัวอย่างเช่น สมมติมีความต้องการสื่อสารเท่ากับ 100 ครั้งต่อชั่วโมง อัตราความต้องการเข้าใช้งานจึงเท่ากับ 100 และสมมติในการใช้งาน 1 ครั้งมีระยะเวลาใช้บริการโดยเฉลี่ยเท่ากับ 15 นาที อัตราระยะเวลาการใช้บริการจึงเท่ากับ 4 ดังนั้นปริมาณการติดต่อสื่อสารในระบบในช่วงเวลาเร่งด่วนจึงมีค่าเท่ากับ  $100/4 = 25$  Erlang [14]

### 2.5.5 ชนิดของศูนย์ควบคุมสถานีฐาน

ชนิดของศูนย์ควบคุมฯ ที่เลือก จะพิจารณาจากปริมาณการติดต่อสื่อสาร (ในหน่วย Erlang) จากศูนย์ควบคุมฯ ไปยังชุมสายที่เลือก

### 2.5.6 ชนิดของชุมสาย

ชนิดของชุมสายที่เลือก จะพิจารณาจากความจุจรสัณณรวมจากทุกศูนย์ควบคุมฯ ที่เชื่อมต่อ ในทำนองเดียวกัน ชนิดของชุมสายที่เลือกต้องสามารถรองรับอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณจากศูนย์ควบคุมฯ ทั้งหมดที่เชื่อมต่อได้

ในการทดลอง เราพิจารณาออกแบบโครงสร้างของเครือข่าย โดยคำนึงถึงชนิดของสถานีฐาน 3 ชนิด, ชนิดของศูนย์ควบคุมฯ 3 ชนิด และชนิดของชุมสาย 3 ชนิด ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยก่อนหน้า [1] รายละเอียดและลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์แต่ละชนิดแสดงใน ตารางที่ 2.2-2.4 สำหรับวงจรสัญญาณ เราพิจารณาวงจรสัญญาณแบบ DS-1 ในการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานกับศูนย์ควบคุมฯ และวงจรสัญญาณแบบ DS-1 และ DS-3 สำหรับการเชื่อมต่อระหว่างศูนย์ควบคุมฯ กับชุมสาย ค่าใช้จ่ายจากวงจรสัญญาณและอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณแสดงใน ตารางที่ 2.5-2.7

**ตารางที่ 2.2** ลักษณะเฉพาะของ ชนิดของสถานีฐาน [1]

	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด C
ความจุ (ช่องวงจรสัญญาณ)	96	288	576
จำนวนของอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณ DS-1	1	3	6

**ตารางที่ 2.3** ค่าใช้จ่ายของ ชนิดของศูนย์ควบคุมสถานีฐาน (รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งแล้ว) [1]

	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด C
ความจุของโครงข่ายสวิตช์ (ช่องวงจรสัญญาณ)	5,000	10,000	15,000
จำนวนสถานีฐานที่รองรับ	15	30	60
จำนวนชุมสายที่รองรับ	15	30	60
ค่าใช้จ่าย (\$)	50,000	90,000	120,000

**ตารางที่ 2.4** ค่าใช้จ่ายของ ชนิดของชุมสาย (รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งแล้ว) [1]

	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด C
ความจุของโครงข่ายสวิตช์ (ช่องวงจรสัญญาณ)	100,000	200,000	300,000
จำนวนศูนย์ควบคุมสถานีฐานที่รองรับ	50	100	150
ค่าใช้จ่าย (\$)	200,000	350,000	500,000

**ตารางที่ 2.5** ค่าใช้จ่ายของ ชนิดของอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณ (รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งแล้ว) [1]

ชนิดของอุปกรณ์ติดต่อฯ	ความจุ (วงจรสัญญาณ)	ค่าใช้จ่าย (\$)
DS-1	96	500
DS-3	2,688	2,500

**ตารางที่ 2.6** ค่าใช้จ่ายของ ชนิดของวงจรสัญญาณระหว่าง สถานีฐานกับศูนย์ควบคุมฯ (รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งแล้ว) [1]

ชนิดของสถานีฐาน	จำนวน DS-1	ความจุ (วงจรสัญญาณ)	ค่าใช้จ่าย (\$/km)
A	1	96	2,000
B	3	288	3,000
C	6	576	4,000

**ตารางที่ 2.7** ค่าใช้จ่ายของ ชนิดของวงจรสัญญาณระหว่าง ศูนย์ควบคุมฯกับชุมสาย (รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งแล้ว) [1]

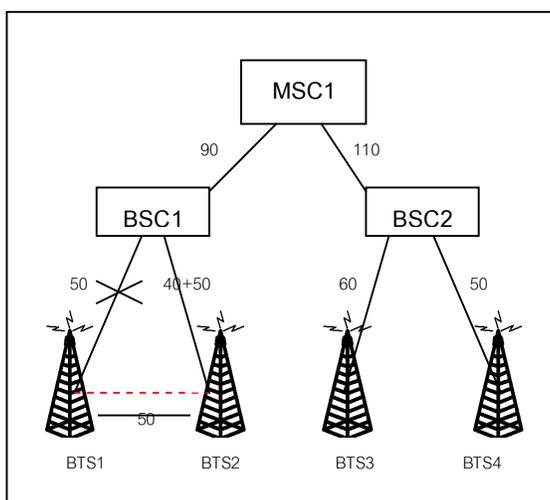
ประเภทวงจรสัญญาณ	ความจุ (วงจรสัญญาณ)	ค่าใช้จ่าย (\$/km)
DS-1	96	2,000
DS-3	2,688	4,000

จากการออกแบบเพื่อให้มีค่าใช้จ่ายจากโครงสร้างเครือข่ายน้อยที่สุด ในระยะที่ 1 เราได้ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการพื้นดินวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุดและแบบเส้นทางในการออกแบบระยะที่ 2 และ ระยะที่ 3 ตามลำดับ การออกแบบในระยะที่ 2 และ 3 นี้เป็นการออกแบบเพิ่มเติมเพื่อทำให้ระบบเครือข่ายแบบเข้าถึงมีความเชื่อถือได้

## 2.6 การออกแบบเพิ่มเติมให้เครือข่ายมีการฟื้นคืนวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด

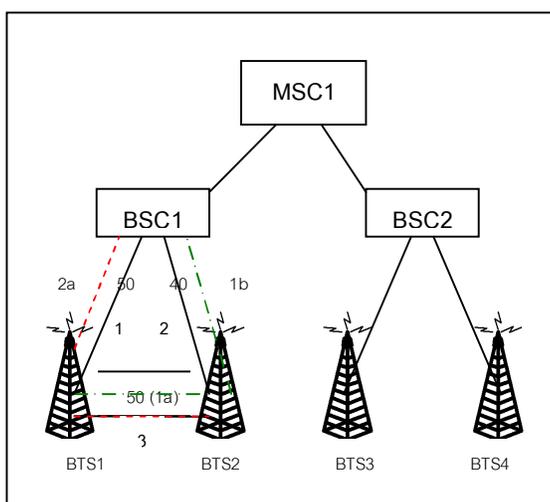
ในระยะที่ 2 นี้ เราพัฒนาให้เครือข่ายมีความเชื่อถือได้โดยออกแบบให้แต่ละวงจรสัญญาณมีวงจรสำรองเพื่อป้องกันเหตุการณ์ที่วงจรสัญญาณหลักชำรุดเสียหาย โดยในการออกแบบจะพิจารณาให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด สมมติฐานในการออกแบบคือจะมีเหตุการณ์ที่วงจรสัญญาณชำรุด ณ ระยะเวลาหนึ่งเพียงวงจรเดียว วงจรสัญญาณสำรองจะถูกกำหนดให้มีปลายทางทั้งสองด้านเหมือนกับวงจรสัญญาณหลัก เพื่อให้สามารถรองรับการสื่อสารของวงจรหลักหากวงจรหลักมีการชำรุดเสียหายได้ โดยค่าใช้จ่ายจากโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้เครือข่ายมีการฟื้นคืนวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุดสามารถทำให้น้อยที่สุดได้ ก็ต่อเมื่อเส้นทางสำรองถูกออกแบบให้มีการใช้งานช่องของวงจรสัญญาณที่เพิ่มขึ้นร่วมกัน จากสมมติฐานวงจรหลักจะชำรุดได้ ณ ระยะเวลาใดเวลาหนึ่งได้เพียง 1 วงจรเท่านั้น ทำให้วงจรสำรองของแต่ละวงจรหลักสามารถใช้ช่องสัญญาณร่วมกันได้

จากรูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของการฟื้นคืนวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด สมมติให้วงจรสัญญาณระหว่าง BTS1 และ BSC1 เกิดชำรุดเสียหาย การฟื้นคืนวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุดจะคืนทางวงจรสัญญาณใหม่ระหว่าง BTS1 และ BSC1 สมมติให้เส้นทางใหม่ที่ทำได้ คือ BTS1 ไป BTS2 ไป BSC1 ในกรณีนี้ ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากวงจรสำรองคือ ค่าใช้จ่ายจากการติดตั้งวงจรสัญญาณใหม่ระหว่าง BTS1 และ BTS2 และค่าใช้จ่ายจากช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นในวงจรสัญญาณบนเส้นทาง จาก BTS1 ไป BTS2 ไป BSC1 ดังแสดงในรูปที่ 2.10 วงจรสำรองถูกติดตั้งเพื่อเชื่อมต่อ BTS1 กับ BTS2 โดยมีปริมาณช่องสัญญาณที่ต้องการเท่ากับ 50 และต้องการช่องสัญญาณเพิ่ม 50 ในวงจรที่เชื่อมระหว่าง BTS2 กับ BSC1 ซึ่งเส้นทางสำรองนี้ BTS1 จะเชื่อมต่อกับ BSC1 ผ่านทาง BTS2



รูปที่ 2.10 การออกแบบเครือข่ายให้มีการฟื้นคืนวงจรแบบระหว่างจุด

สำหรับตัวอย่างอีกตัวอย่างของการฟื้นคืนวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด เมื่อพิจารณาให้มีการออกแบบป้องกันการชำรุดของวงจรสัญญาณสองวงจรหลัก สมมติให้ เรามีเครือข่ายที่มีการฟื้นคืนวงจรแสดงในรูปที่ 2.11 เมื่อพิจารณากรณีที่วงจรสัญญาณที่ 1 ชำรุด เครือข่ายจะใช้วงจรสำรอง 1a และ 1b เพื่อรองรับการสื่อสารของวงจรสัญญาณที่ 1 (มีความจุ = 50) ในทำนองเดียวกันกรณีที่วงจรสัญญาณที่ 2 ชำรุด เครือข่ายจะใช้วงจรสำรองที่ 1a และ 2a เพื่อรองรับการสื่อสารของวงจรสัญญาณที่ 2 (มีความจุ = 40) เนื่องจากวงจรสัญญาณที่ 1 และ 2 ไม่ได้ชำรุดพร้อมกัน ดังนั้นวงจรสัญญาณที่ 3 ซึ่งถูกใช้เพื่อเป็นวงจรสำรองของทั้งวงจรที่ 1 และ 2 จึงสามารถแบ่งช่องสัญญาณที่มีให้กับทั้งสองเส้นทางเพื่อใช้ร่วมกันได้ โดยความจุที่ต้องการเพิ่มขึ้นสำหรับทั้งสองวงจรในวงจรที่ 3 คือ 50

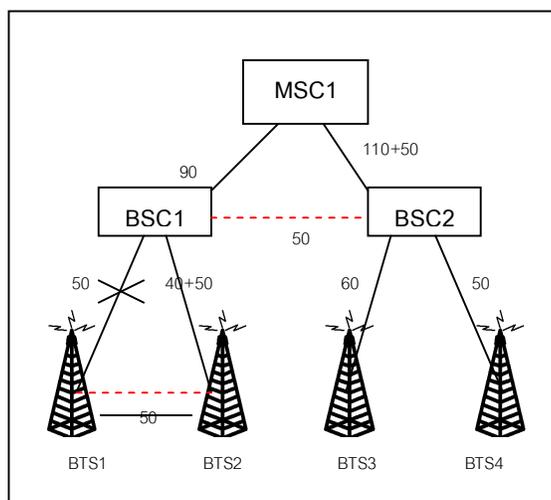


รูปที่ 2.11 การฟื้นคืนวงจรแบบระหว่างจุดหลังจากวงจรที่ทำงานหลักชำรุด

## 2.7 การออกแบบเพิ่มเติมให้เครือข่ายมีการฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทาง

ในระยะที่ 3 นี้ เราพัฒนาให้เครือข่ายมีความเชื่อถือได้โดยออกแบบให้แต่ละเส้นทางของวงจรสัญญาณหลักมีชุดของวงจรสำรองเพื่อป้องกันเหตุการณ์ที่วงจรสัญญาณหลักชำรุดเสียหาย โดยในการออกแบบจะพิจารณาให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด สมมติฐานในการออกแบบคือจะมีเหตุการณ์ที่วงจรสัญญาณชำรุด ณ ระยะเวลาหนึ่งเพียงวงจรเดียว เส้นทางสำรองจะถูกกำหนดให้มีปลายทางทั้งสองด้านเหมือนกับเส้นทางหลัก เพื่อให้สามารถรองรับการสื่อสารของเส้นทางหลักหากเส้นทางหลักมีการชำรุดเสียหายได้ โดยค่าใช้จ่ายจากโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้เครือข่ายมีการฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทางสามารถทำให้น้อยที่สุดได้ ก็ต่อเมื่อเส้นทางสำรองถูกออกแบบให้มีการใช้งานช่องของวงจรสัญญาณที่เพิ่มขึ้นร่วมกัน จากสมมติฐานเส้นทางหลักจะชำรุดได้ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งได้เพียง 1 เส้นทางเท่านั้น ทำให้วงจรสำรองของแต่ละเส้นทางหลักสามารถใช้ช่องสัญญาณร่วมกันได้

จากรูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างของการฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทาง สมมติให้ เส้นทางระหว่าง BTS1 กับ MSC1 ชำรุดเสียหาย ซึ่งอาจจะเป็นวงจรสัญญาณ BTS1-BSC1 หรือ BSC1-MSC1 ที่ชำรุดก็ได้ การฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทางจะค้นหาเส้นทางใหม่ระหว่าง BTS1 และ MSC1 ในตัวอย่างนี้ เรากำหนดให้วงจรสัญญาณ BTS1-BSC1 ชำรุด เส้นทางสำรองจะเชื่อมต่อจาก BTS1 ไป BTS2, BTS2 ไป BSC1, BSC1 ไป BSC2 และ BSC2 ไป MSC1 ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากเส้นทางสำรองคือ ค่าใช้จ่ายจากการติดตั้งวงจรสัญญาณใหม่ระหว่าง BTS1-BTS2 และระหว่าง BSC1-BSC2 และต้องการช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นในวงจรสัญญาณบนเส้นทาง BTS1-BTS2-BSC1-BSC2-MSC1 ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ชุดของวงจรสำรองถูกติดตั้งใหม่เพิ่ม 2 ชุด เพื่อเชื่อมต่อ BTS1 กับ BTS2 และเชื่อมต่อ BSC1 กับ BSC2 โดยมีปริมาณช่องสัญญาณที่ต้องการเท่ากับ 50 และต้องการช่องสัญญาณเพิ่ม 50 ในวงจรที่เชื่อมต่อระหว่าง BTS2 กับ BSC1 และระหว่าง BSC2 กับ MSC1 ซึ่งเส้นทางสำรองนี้ BTS1 จะเชื่อมต่อกับ MSC1 ผ่านทาง BTS2-BSC1-BSC2

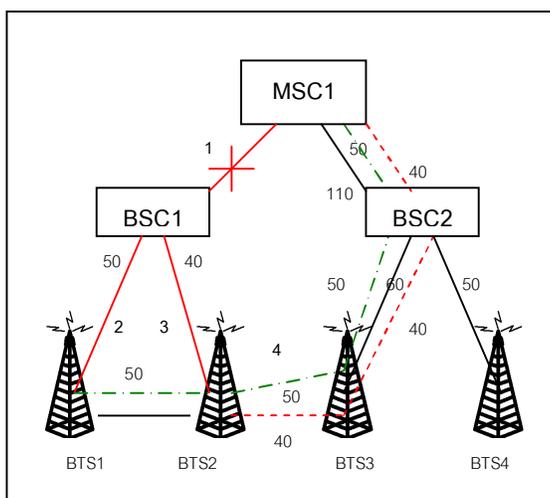


รูปที่ 2.12 การออกแบบเครือข่ายให้มีการฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทาง

จากตัวอย่างที่แล้ว แสดงการฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทางเพื่อป้องกันการเกิดวงจรสัญญาณวงจรใดวงจรหนึ่งชำรุด หลังจากที่วงจรสัญญาณระหว่าง BTS1-BSC1 ชำรุด เครือข่ายจะหาชุดของวงจรสำรองเพื่อทำให้เครือข่ายยังคงอยู่ได้ ในความเป็นจริง หากวงจรระหว่างศูนย์ควบคุมฯและชุมสายชำรุด ทุกเส้นทางการสื่อสารที่จำเป็นต้องผ่านวงจรสัญญาณช่วงดังกล่าวจะได้รับผลกระทบทันที ดังนั้นทุกเส้นทางหลักระหว่างสถานีฐานไปยังชุมสายที่ได้รับผลกระทบจำเป็นต้องคำนวณหาเส้นทางสำรองทั้งหมด สมมติให้เรามีเครือข่ายที่มีการฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทางแสดงในรูปที่ 2.13 เมื่อพิจารณากรณีที่วงจรสัญญาณ BSC1-MSC1 ชำรุด เครือข่ายจะใช้เส้นทางสำรอง BTS1-BTS2-BTS3-BSC2-MSC1 เพื่อรองรับการสื่อสารของ BTS1 (มีความจุ = 50) ในทำนองเดียวกัน เครือข่ายจะใช้เส้นทางสำรอง BTS2-BTS3-BSC2-MSC1 เพื่อรองรับการสื่อสารของ BTS2 (มีความจุ = 40) เนื่องจาก BTS1 และ BTS2 จำเป็นต้องใช้งานวงจรสัญญาณสำรองพร้อมกัน ดังนั้นวงจรสัญญาณที่ 4 ซึ่ง

ถูกใช้เป็นวงจรสำรองของเส้นทางของ BTS1 และเส้นทางของ BTS2 จึงจำเป็นต้องมีความจุเพื่อรองรับทั้งสองเส้นทางพร้อมกัน คือ ความจุของวงจรสัญญาณที่ 2 บวกกับความจุของวงจรสัญญาณที่ 3 (ดังนั้นความจุ = 90)

สำหรับการฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเส้นทาง ค่าใช้จ่ายจากชุดของวงจรสัญญาณสำรองและช่องสัญญาณเพิ่มเติมจะน้อยที่สุด ก็ต่อเมื่อ เส้นทางสำรองเพื่อป้องกันกรณีที่วงจรสัญญาณระหว่างสถานีฐานกับศูนย์ควบคุมชำรุด และเส้นทางสำรองเพื่อป้องกันกรณีที่วงจรสัญญาณระหว่างศูนย์ควบคุมกับชุมสายชำรุด ของเส้นทางหลักเดียวกัน มีการใช้งานร่วมกัน



รูปที่ 2.13 การฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทางหลังจากวงจรที่ทำงานหลักชำรุด

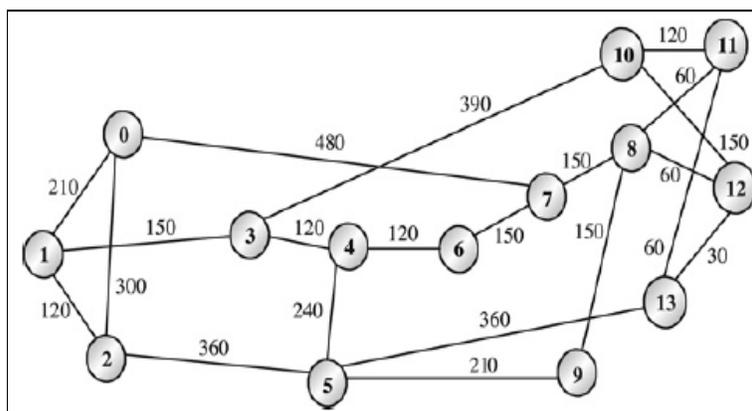
ทั้งการฟื้นคืนวงจรสัญญาณแบบเชื่อมต่อระหว่างจุดและแบบเส้นทาง พิจารณาถึงทุกกรณีที่วงจรสัญญาณในเครือข่ายชำรุด นั่นก็คือ ทุกวงจรสัญญาณสามารถชำรุดได้แค่ ณ เวลาหนึ่งจะชำรุดได้เพียงวงจรเดียวหรือเส้นทางเดียวเท่านั้น ดังนั้นระบบเครือข่ายที่คงอยู่ได้จะถูกออกแบบให้ครอบคลุมทุกกรณีที่วงจรสัญญาณหรือเส้นทางหลักในเครือข่ายชำรุดเสียหาย

ในการออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึงจะเน้นที่การออกแบบโครงสร้างของเครือข่ายเป็นหลัก การออกแบบโครงสร้างคือ การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์รับสัญญาณปลายทางกับชุมสาย ซึ่งในการเชื่อมต่อสัญญาณอาจจำเป็นต้องผ่านวงจรสัญญาณมากกว่าหนึ่งชุด งานวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึงแบ่งเป็นสามระยะ คือ ระยะที่ 1 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด และ ระยะที่ 2 และ 3 เป็น การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงความเชื่อถือได้ของเครือข่าย ซึ่งในการออกแบบระยะที่ 2 และ 3 เป็นการหาวงจรถ่ายสัญญาณสำรองที่ประหยัดที่สุดในกับเครือข่ายที่มีอยู่แล้ว การออกแบบระยะที่ 2 และ 3 นั้นจำเป็นต้องมีการออกแบบในระยะที่ 1 มาก่อน

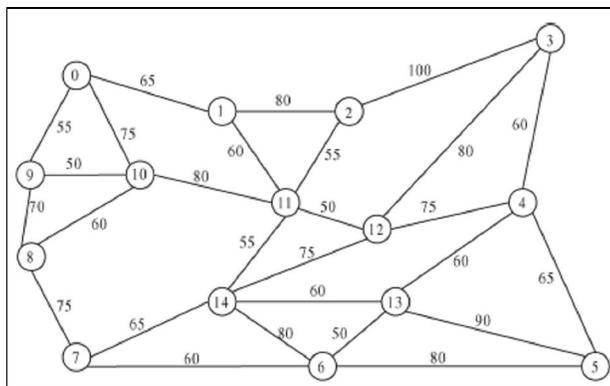
### บทที่ 3 การออกแบบเครือข่ายแบบแกนหลัก

ในการออกแบบเครือข่ายแบบแกนหลัก งานวิจัยได้พัฒนาวิธีการและอัลกอริทึมในการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในขอบเขตของการออกแบบเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ และในขอบเขตของการออกแบบการรวมเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ แยกเป็นสองกรณี ซึ่งในกรณีหลังการออกแบบการรวมเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณมีความสลับซับซ้อนมากกว่ากรณีแรก ในการออกแบบเรากำหนดปัญหาให้อยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้มีความชัดเจนและสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย ในแบบจำลอง เราพิจารณาวัตถุประสงค์ในการออกแบบเริ่มจากหนึ่งสมการวัตถุประสงค์ก่อน เพื่อให้ง่ายในการเปรียบเทียบผล จากนั้นจึงเพิ่มเป็นสอง และสามสมการวัตถุประสงค์ตามลำดับ

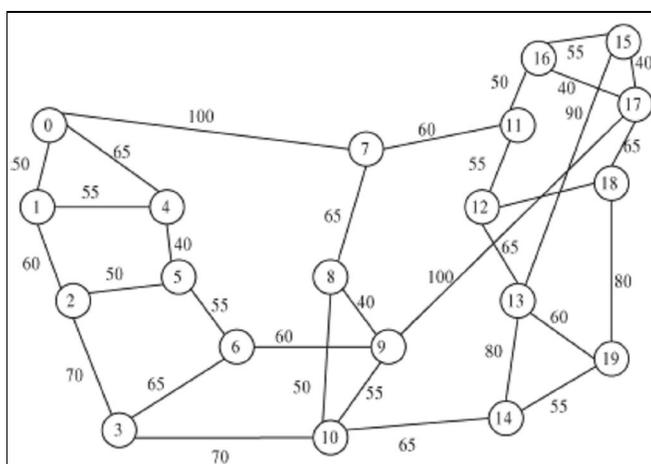
ในการออกแบบเราพิจารณา โครงสร้างเครือข่ายที่นิยมใช้ในงานวิจัยด้านการออกแบบเครือข่ายแกนหลัก คือ NFSNET, CHNNET และ ARPANET ดังแสดงในรูปที่ 3.1-3.3 ซึ่งลักษณะเฉพาะของโครงสร้างแต่ละแบบแสดงในตารางที่ 3.1 จากรูปที่ 3.1-3.3 วงกลมที่มีตัวเลขอยู่ภายในแสดงที่ตั้งของชุดอุปกรณ์เครือข่าย ส่วนเส้นระหว่างวงกลมแสดงวงจรสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่างสองที่ตั้งหลัก งานวิจัยจะพิจารณาหาเส้นทางให้การเชื่อมต่อที่ต้องการ เช่น จากที่ตั้งที่ 1 ให้เชื่อมต่อไปยังที่ตั้งที่ 8 โดยผ่านทางชุดวงจรสัญญาณ จากที่ตั้ง 1 ไปที่ตั้ง 3 ไปที่ตั้ง 4 ไปที่ตั้ง 6 ไปที่ตั้ง 7 ไปที่ตั้ง 8 ตามลำดับโดยกำหนดให้ใช้วงจรสัญญาณช่องที่ 1 เป็นต้น



รูปที่ 3.1 โครงสร้างเครือข่ายแบบ NFSNET [26]



รูปที่ 3.2 โครงสร้างเครือข่ายแบบ CHNNET [27]



รูปที่ 3.3 โครงสร้างเครือข่ายแบบ ARPANET [27]

ตารางที่ 3.1 ลักษณะจำเพาะของ โครงสร้างเครือข่ายแบบ NFSNET, CHNNET และ ARPANET

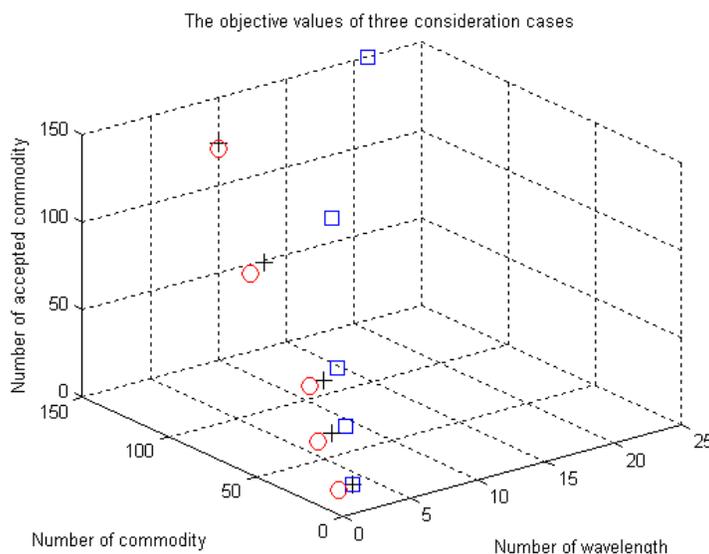
Network topologies	No. of (non-directional) Edges	No. of Nodes	No. of Edges/ No. of Nodes	Degree			
				Total Deg.	Average Deg. (Total Deg./ No. of Nodes)	Min Deg.	Max Deg.
NFSNET	21	14	1.5	42	3	2	4
CHNNET	27	15	1.8	54	3.6	3	5
ARPANET	32	20	1.6	64	3.2	3	4

### 3.1 การออกแบบเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ

ในส่วนของการออกแบบเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ เราพิจารณาวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการออกแบบ โดยคำนึงถึงสมการวัตถุประสงค์มากกว่าหนึ่ง คือ ออกแบบเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณให้กับ เซตของการเชื่อมต่อจากผู้ใช้งานหนึ่ง โดยคำนึงถึงปริมาณการเชื่อมต่อ ให้รองรับความต้องการใช้งานมากที่สุด

และใช้จำนวนช่องสัญญาณน้อยที่สุดได้ ซึ่งจะเห็นว่าสองวัตถุประสงค์นี้มีความขัดแย้งกัน หากต้องการรองรับปริมาณการเชื่อมต่อได้มาก ๆ จำเป็นต้องใช้จำนวนช่องสัญญาณมาก หากต้องการประหยัดช่องสัญญาณให้ใช้น้อย ๆ ก็จะมีผลต่อปริมาณการเชื่อมต่อใช้งานได้น้อยลงโดยงานวิจัยได้กำหนดให้ปริมาณการเชื่อมต่อต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของปริมาณการเชื่อมต่อทั้งหมด

คำตอบของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งพิจารณาหลายสมการวัตถุประสงค์พร้อม ๆ กัน จะมีช่วงอยู่ระหว่างคำตอบที่ได้จากการพิจารณาวัตถุประสงค์ใดวัตถุประสงค์หนึ่งเพียงอย่างเดียว ดังรูปแสดงผลการเปรียบเทียบ คำตอบที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาสองวัตถุประสงค์พร้อมกัน (แทนด้วย “+”), คำตอบที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงปริมาณการเชื่อมต่อให้มากที่สุด คือ ร้อยเปอร์เซ็นต์ (แทนด้วย “□”), และ คำตอบที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมโดยจำนวนช่องสัญญาณที่ใช้ต้องน้อยที่สุด จำนวนช่องสัญญาณต้องรองรับอย่างน้อยร้อยละ 80 ของปริมาณการเชื่อมต่อทั้งหมด (แทนด้วย “○”)

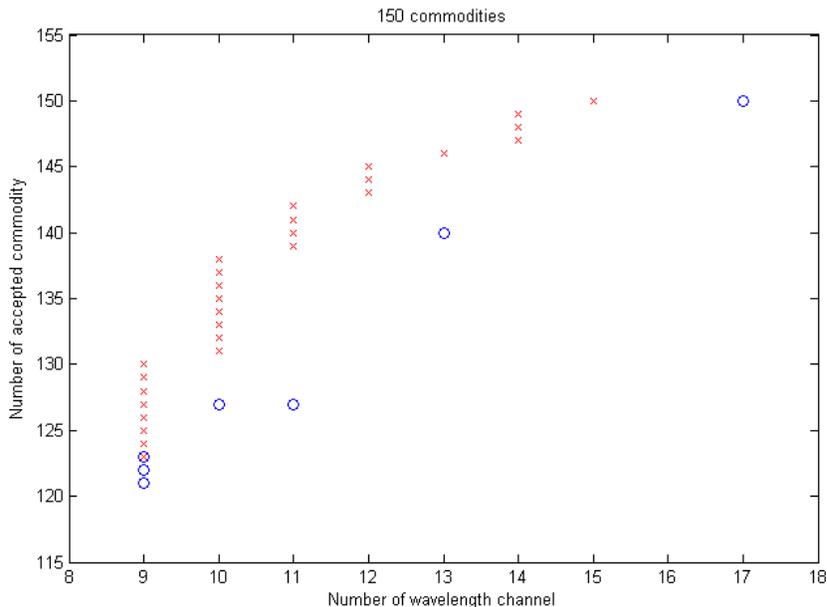


**รูปที่ 3.4** ผลที่ได้จากการพิจารณาสามกรณี คือ 1) คำนึงถึงสองสมการวัตถุประสงค์พร้อมกัน (แสดงด้วย “+”) 2) คำนึงถึงปริมาณการเชื่อมต่อมากที่สุด (ร้อยละของการเชื่อมต่อ แสดงด้วย “□”) และ 3) คำนึงถึงจำนวนช่องสัญญาณน้อยที่สุด (โดยที่รองรับอย่างน้อยร้อยละ 80 ของการเชื่อมต่อ แสดงด้วย “○”)

ผลที่ได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Multi-Objective Optimization) แบบหลายสมการวัตถุประสงค์จะเป็นไปได้หลายตัวเลือก ที่ไม่สามารถระบุได้ว่าคำตอบไหนดีที่สุดเพราะ คำตอบหนึ่งอาจดีกว่าอีกคำตอบหนึ่งที่วัตถุประสงค์แรก และแย่กว่าในอีกวัตถุประสงค์ที่เหลือ คำตอบที่ได้จะอยู่ในรูปเซตของคำตอบ งานวิจัยได้ทดลองใช้ อัลกอริทึมที่เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย คือ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)

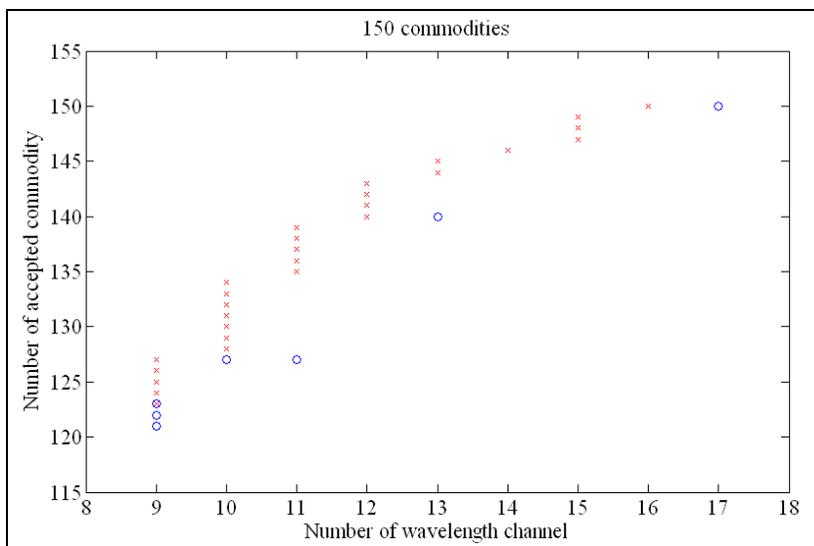
และ Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA2) มาคำนวณหาคำตอบจาก ปัญหาการออกแบบหลายสมการวัตถุประสงค์ที่ผู้ใช้ระบุ โดยประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่ใช้ได้มีการวัดประสิทธิภาพโดยคำนึงถึงหลายปัจจัย เช่น ระยะระหว่างคำตอบที่ดีที่สุดกับคำตอบที่คำนวณได้ ความไวในการลู่เข้าสู่คำตอบ เป็นต้น

คำตอบที่ได้จากการออกแบบเส้นทาง และกำหนดวงจรสัญญาณ จะถูกเปรียบเทียบกันเองระหว่าง หลาย ๆ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Multi-Objective Optimization) แบบหลายสมการวัตถุประสงค์ และเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิม ที่เรียกว่า “Weighted sum approach” คำตอบที่ได้จาก วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายสมการวัตถุประสงค์ (แสดงด้วยสัญลักษณ์ “X”) จะหลากหลายกว่าแบบเดิม (แสดงด้วยสัญลักษณ์ “O”) จากรูปที่ 3.5 แสดงผลที่ได้จากอัลกอริทึม SPEA2 เปรียบเทียบกับ วิธีการดั้งเดิม Weighted-sum จากรูปแสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จาก อัลกอริทึม SPEA2 ให้คำตอบที่มีความหลากหลายมากกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม



รูปที่ 3.5 ผลที่ได้จาก 1) วิธีการ Weighted-sum โดยพิจารณาให้น้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ออกเป็นหลายกรณี (แสดงด้วย “O”) และ 2) อัลกอริทึม SPEA2 (“X” symbol)

รูปที่ 3.6 แสดงผลที่ได้จากอัลกอริทึม NSGA-II เปรียบเทียบกับ วิธีการดั้งเดิม Weighted-sum ในทำนองเดียวกันกับอัลกอริทึม SPEA2 จากรูปแสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จาก อัลกอริทึม NSGA-II ให้คำตอบที่มีความหลากหลายมากกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม จากการทดลอง อัลกอริทึม NSGA-II ใช้เวลาในการประมวลผลที่ไวกว่า อัลกอริทึม SPEA2 ดังนั้นในงานวิจัยนี้เราจึงเลือกการออกแบบเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณแบบหลายสมการวัตถุประสงค์โดยประยุกต์ใช้ อัลกอริทึม NSGA-II เข้ามาช่วยในการค้นหาคำตอบ



รูปที่ 3.6 ผลที่ได้จาก 1) วิธีการ Weighted-sum โดยคำนึงถึงการให้น้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์หลายกรณี (แสดงด้วย “○”) และ 2) อัลกอริทึม NSGA-II (“×” symbol)

ในงานวิจัยนี้ เราพัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณอันใหม่ เรียกว่า “Genetic Algorithm for Routing and Minimum Degree First Wavelength Assignment หรือ GA-MDF” แทนอัลกอริทึมแบบเดิม “Fixed-Alternate Routing and First Fit Wavelength Assignment หรือ FAR-FF” โดยประสิทธิภาพของอัลกอริทึมใหม่นี้ดีกว่าแบบเดิมในแง่ของ สามารถรองรับปริมาณการเชื่อมต่อได้มากขึ้นในจำนวนวงจรสัญญาณที่เท่ากัน และใช้งานช่องสัญญาณได้มีประสิทธิภาพมากกว่า รายละเอียดของอัลกอริทึม GA-MDF อยู่ในงานวิจัย [28] ซึ่งได้รับการตีพิมพ์ก่อนหน้านี้ ตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าภายใต้ช่องสัญญาณที่จำกัด อัลกอริทึมในการกำหนดวงจรสัญญาณ Minimum Degree First ให้ปริมาณการเชื่อมต่อที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ อัลกอริทึมแบบ First Fit ภายใต้ชุดของเส้นทางและข้อจำกัดอื่น ๆ เหมือนกัน

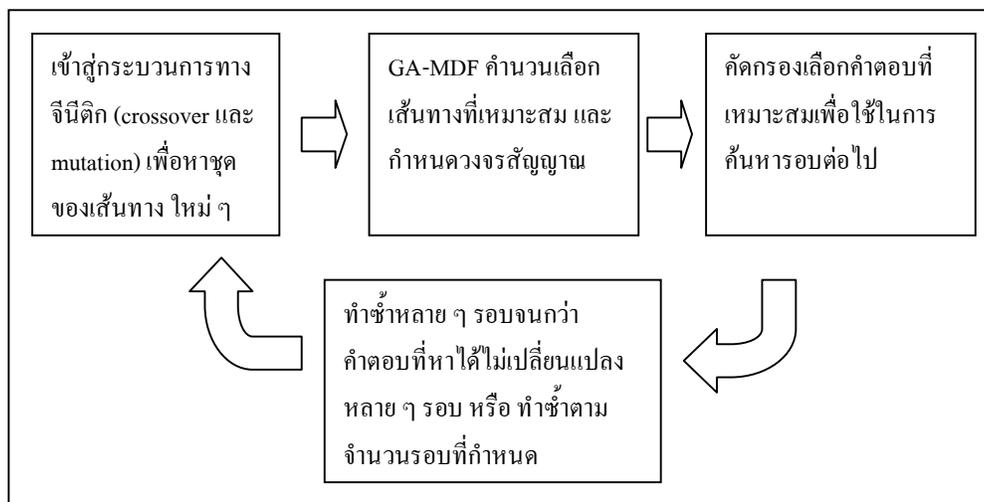
ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณการเชื่อมต่อที่สำเร็จ ภายใต้จำนวนช่องสัญญาณในแต่ละวงจรสัญญาณที่จำกัด

จำนวนช่องสัญญาณในแต่ละวงจรสัญญาณ	จำนวนการเชื่อมต่อทั้งหมด	First Fit (A)	Minimum Degree First (B)	(B)-(A)
3	10	9	9	0
3	30	26	26	0
3	50	29	30	1
3	100	48	56	8
3	150	47	58	11
3	200	49	68	19
3	300	51	78	27
3	500	59	93	34
4	10	10	10	0
4	30	27	27	0
4	50	34	34	0
4	100	60	64	4
4	150	59	68	9
4	200	60	81	21
4	300	69	95	26
4	500	80	114	34
5	10	10	10	0
5	30	28	28	0
5	50	38	38	0
5	100	69	70	1
5	150	72	78	6
5	200	74	93	19
5	300	77	110	33
5	500	99	130	31

สำหรับอัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ แบบหลายสมการวัตถุประสงค์นั้น งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ อัลกอริทึม NSGA-II เข้ากับ GA-MDF และ FAR-FF จีนติกอัลกอริทึม Non-dominated Sorting (NSGA-II) เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ อัลกอริทึม NSGA-II ใช้เวลาในการประมวลผลได้ไว เซตของคำตอบที่ได้ผู้เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ไว เมื่อเทียบกับ SPEA2 อัลกอริทึม NSGA-II นำเสนอโดย Deb และคณะ [29] โดย NSGA-II ช่วยในการค้นหาคำตอบใหม่ ๆ ที่หลากหลาย ส่วน GA-MDF และ FAR-FF ใช้เพื่อคำนวณเลือกหาชุดของเส้นทางและกำหนดช่องวงจรสัญญาณให้เหมาะสม โดยอัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณแสดงได้ดังนี้

เริ่มแรก โปรแกรมจะเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดหาเส้นทางของแต่ละการเชื่อมต่อ รวมเข้ากับเส้นทางที่สั้นขึ้นมาอีก 95 เส้นทาง จะได้ชุดของเส้นทางที่เชื่อมต่อที่หลากหลายแตกต่างกัน 100 เส้นทาง จากนั้นอัลกอริทึม GA-EMF จะคำนวณหาปริมาณการเชื่อมต่อที่สำเร็จและจำนวนช่องสัญญาณที่ต้องการ คำตอบที่ได้จะมี

ความลดหลั่นกันไปเป็นเซตของคำตอบ เช่น ปริมาณการเชื่อมต่อมากก็ต้องการจำนวนช่องสัญญาณมาก ปริมาณการเชื่อมต่อน้อยก็ต้องการจำนวนช่องสัญญาณน้อย เป็นต้น เซตของคำตอบหนึ่งจะมีค่า ปริมาณการเชื่อมต่อที่สำเร็จและจำนวนช่องสัญญาณที่ต้องการชุดหนึ่ง เซตคำตอบของเส้นทางและช่องวงจรสัญญาณจะถูกคัดกรองเลือกคำตอบที่มีความหลากหลายไปสู่รุ่นถัดไป หลังจากนั้นชุดของคำตอบที่ถูกเลือกจะเข้าสู่กระบวนการทางจينيติก เช่น การสับเปลี่ยนและกลายพันธุ์ เพื่อค้นหาคำตอบใหม่ ๆ และทำซ้ำตามจำนวนรอบที่กำหนด



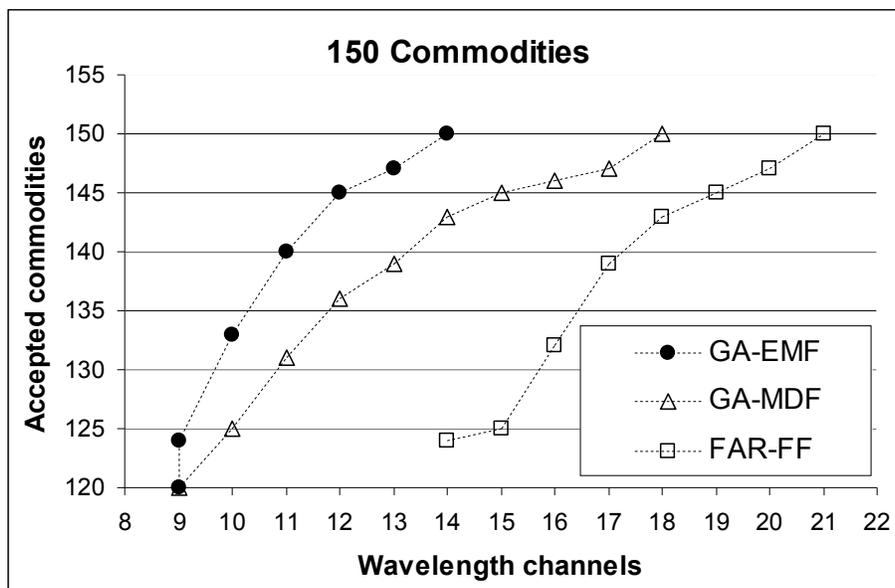
รูปที่ 3.7 อัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ

### 3.2 การออกแบบการรวมเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ

ในระบบเครือข่ายใยแก้วนำแสงแบบ Wavelength Division Multiplexing (WDM) ข้อมูลจะถูกส่งไปในช่องทางของแสง ในแต่ละการเชื่อมต่อในเครือข่ายจะส่งข้อมูลผ่านทางช่องทางของแสงจากอุปกรณ์ต้นทางไปยังอุปกรณ์ปลายทาง ในสายใยแก้วนำแสงหนึ่งเส้นสามารถแยกออกเป็นหลายช่องทางของแสง ในปัจจุบันระบบเครือข่ายใยแก้วนำแสงแบบ dense wavelength division multiplexing (DWDM) ถูกพัฒนาให้สามารถแบ่งช่องสัญญาณออกได้มากถึง 160 ช่องความถี่ต่อสายหนึ่งเส้น [30] ช่องความถี่ถูกจำแนกโดยความยาวคลื่น ในระบบเครือข่ายใยแก้วนำแสงในปัจจุบัน มีความเร็วในการส่งสัญญาณมากกว่า 2.5 ถึง 10 Gigabits ต่อวินาที และอาจมากถึง 40 Gigabits ต่อวินาที [31] หนึ่งช่องความถี่สามารถรองรับปริมาณข้อมูลได้มหาศาล ในทางปฏิบัติ ความต้องการติดต่อสื่อสารในเครือข่ายมักจะต้องการรับส่งข้อมูลไม่มากถึงปริมาณข้อมูลมากที่สุดที่หนึ่งช่องความถี่รองรับได้ ดังนั้นการออกแบบการรวมสัญญาณและกำหนดช่องวงจรสัญญาณความถี่จึงมีความสำคัญ

การออกแบบการรวมเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณในงานวิจัยนี้ ออกแบบโดยคำนึงถึงปริมาณการเชื่อมต่อสูงสุด จำนวนช่องวงจรสัญญาณ และจำนวนอุปกรณ์รับส่งข้อมูลน้อยที่สุด สามวัตถุประสงค์ โดยในกระบวนการพัฒนาอัลกอริทึม เราจะพิจารณาสองวัตถุประสงค์ก่อน เพื่อให้ง่ายในการแสดงผลเปรียบเทียบ

งานวิจัยได้พัฒนาวิธีการและอัลกอริทึมในการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการออกแบบเครือข่ายแกนหลัก ในขอบเขตของการออกแบบการรวมเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ เนื่องจากในสภาวะความเป็นจริงในปัจจุบัน มีการพัฒนาเครือข่ายใยแก้วนำแสงให้ มีการรองรับปริมาณข้อมูลต่อหนึ่งช่องสัญญาณอย่างมีประสิทธิภาพสามารถรองรับข้อมูลได้ในปริมาณมาก การออกแบบโดยพิจารณาให้หลาย ๆ การเชื่อมต่อสามารถร่วมกันใช้ช่องสัญญาณเดียวกันได้ จึงเป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบเครือข่าย จากรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าประสิทธิภาพของการออกแบบ โดยพิจารณาให้บางการเชื่อมต่อสามารถร่วมกันใช้ช่องสัญญาณเดียวกันได้ จะประหยัดทั้งจำนวนช่องสัญญาณที่ใช้ และรองรับการเชื่อมต่อได้มากขึ้น ตัวอย่างเช่น ที่ 15 ช่องสัญญาณเท่ากัน การออกแบบการรวมเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ (GA-EMF) สามารถรองรับการเชื่อมต่อทั้งหมดได้ คือ ร้อยเปอร์เซ็นต์ ส่วนการออกแบบเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ (GA-MDF) สามารถรองรับได้ 145 จาก 150 การเชื่อมต่อ ในขณะที่การออกแบบเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณแบบเดิมรองรับได้เพียง 125 จาก 150 การเชื่อมต่อ



รูปที่ 3.8 เขตของคำตอบแบบสองวัตถุประสงค์ ที่ได้จากอัลกอริทึมการออกแบบการรวมเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ (GA-EMF) และจากอัลกอริทึมการออกแบบเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ (GA-MDF และ FAR-FF)

ในขอบเขตของการออกแบบการรวมเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณนั้น มีรายละเอียดวิธีการรวมการเชื่อมต่อที่ความต้องการปริมาณรับ-ส่งข้อมูลน้อย ๆ เข้าด้วยกันอยู่ 4 แบบ คือ

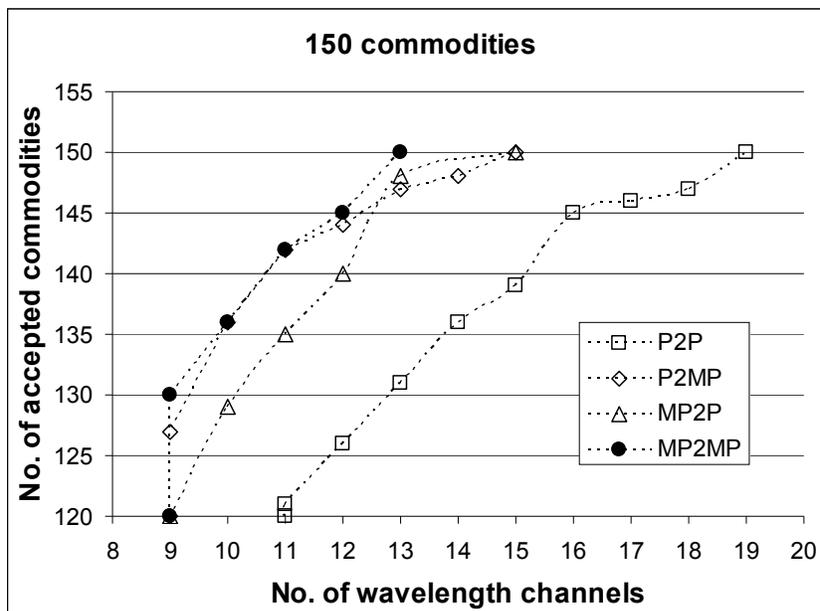
**แบบ Point to Point (P2P)** เป็นการรวมการเชื่อมต่อที่มีจุดเริ่มต้นและปลายทางเดียวกันเข้าด้วยกัน

**แบบ Point to Multi-Point (P2MP)** เป็นการรวมการเชื่อมต่อที่มีจุดเริ่มต้นเดียวกัน แต่ปลายทางอาจต่างกันได้เข้าด้วยกัน

**แบบ Multi-Point to Point (MP2P)** เป็นการรวมการเชื่อมต่อที่มีจุดเริ่มต้นอาจต่างกันได้ แต่มีปลายทางเดียวกันเข้าด้วยกัน

**แบบ Multi-Point to Multi-Point (MP2MP)** เป็นการรวมการเชื่อมต่อที่มีจุดเริ่มต้นและปลายทางอาจจะเหมือนหรือต่างกันได้เข้าด้วยกัน

โดยการเชื่อมต่อย่อย ๆ ที่จะรวมเข้าหากันได้ต้องมีเส้นทางของวงจรสัญญาณที่ทับซ้อนกัน และปริมาณข้อมูลที่รับ-ส่งรวมกันต้องไม่เกินปริมาณที่หนึ่งช่องวงจรสัญญาณรองรับได้ รูปที่ 3.9 แสดงผลที่ได้จากการรวมการเชื่อมต่อย่อย ๆ เข้าด้วยกันในแบบต่าง ๆ จากรูปที่ 3.9 เมื่อพิจารณาให้มีจำนวนช่องสัญญาณเพียง 15 ช่องสัญญาณ ปริมาณการเชื่อมต่อที่รองรับได้มากที่สุดของการรวมเส้นทาง แบบ P2P, P2MP, MP2P และ MP2MP คือ 139, 150, 150 and 150 ตามลำดับ ด้วยปริมาณช่องสัญญาณที่เท่ากัน การรวมเส้นทางแบบที่ให้หลายจุดเริ่มต้นและปลายทางสามารถใช้งานวงจรสัญญาณร่วมกันได้รองรับปริมาณการเชื่อมต่อที่มากกว่า ในอีกแง่มุมหนึ่ง เมื่อเราพิจารณาที่จะออกแบบให้เครือข่ายสามารถรองรับทุกการเชื่อมต่อได้ทั้งหมด จำนวนช่องสัญญาณที่ต้องการสำหรับการรวมเส้นทางแบบ P2P, P2MP, MP2P และ MP2MP คือ 19, 15, 15 and 13 ตามลำดับ เพื่อที่จะรองรับการเชื่อมต่อทั้งหมด การรวมเส้นทางแบบ MP2MP ใช้จำนวนช่องสัญญาณน้อยที่สุด



รูปที่ 3.9 ผลที่ได้จากการรวมเส้นทาง ทั้ง 4 แบบ คือ P2P, P2MP, MP2P และ MP2MP

ดังที่ได้ระบุไว้ก่อนหน้านี้ ผลที่ได้จากการออกแบบโดยคำนึงถึงหลายสมการวัตถุประสงค์นั้นไม่สามารถเปรียบเทียบผลกันได้โดยตรง ในการพิจารณาแบบสองสมการวัตถุประสงค์นั้น ผลที่ได้จะสามารถแสดงและเปรียบเทียบกันด้วยกราฟ แต่เมื่อเราพิจารณาสมการวัตถุประสงค์ครบทั้งสามวัตถุประสงค์ คือ ออกแบบโดยคำนึงถึงปริมาณการเชื่อมต่อสูงสุด จำนวนช่องวงจรสัญญาณ และจำนวนอุปกรณ์รับส่งข้อมูลน้อยที่สุด จำเป็นต้องมีเครื่องมือวัดประสิทธิภาพของเซตคำตอบที่ได้ เครื่องมือที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพของเซตคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ คือ Hypervolume (HV), Spread และ Inverted Generational Distance (IGD) รายละเอียดของเครื่องมือวัดประสิทธิภาพอยู่ใน [32, 33]

HV บ่งบอกถึงการครอบคลุมของเซตคำตอบ Spread บ่งบอกถึงการกระจายตัวของคำตอบอย่างสม่ำเสมอ IGD บ่งบอกถึงความใกล้เคียงเซตของคำตอบที่เหมาะสมที่สุด เซตของคำตอบที่ให้ค่า HV มากแสดงถึงการครอบคลุมของคำตอบในหลาย ๆ ค่าวัตถุประสงค์มีมาก หรือ กล่าวได้ว่า คำตอบที่ได้มีความหลากหลายมาก เซตของคำตอบที่ให้ค่า Spread น้อยแสดงถึง คำตอบที่ได้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอระหว่างคำตอบใกล้เคียงกัน เซตของคำตอบที่ให้ค่า IGD น้อยแสดงถึง คำตอบที่ได้มีความใกล้เคียงกับเซตคำตอบที่เหมาะสมที่สุดมาก โดยสรุป เซตของคำตอบที่ให้ ค่า HV มาก ค่า Spread น้อย และ ค่า IGD น้อย จะดีกว่า

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาเปรียบเทียบ อัลกอริทึมในการออกแบบการรวมเส้นทาง GA-EMF กับอัลกอริทึมก่อนหน้านี้ คือ อัลกอริทึม Maximizing Single-Hop Traffic (MST) และ อัลกอริทึม Maximizing Resource Utilization (MRU) ประสิทธิภาพของเซตคำตอบที่ได้จากทั้งสามอัลกอริทึม แสดงในตารางที่ 3.3 โดยงานวิจัย

ได้พิจารณาโครงสร้างเครือข่ายมากกว่าหนึ่งโครงสร้างเครือข่าย คือ NFSNET, CHNNET และ ARPANET [26, 27] จากตารางที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่า เซตคำตอบของ GA-EMF ให้ค่า HV ที่ดีกว่าอัลกอริทึมก่อนหน้าใน ทุกโครงสร้างเครือข่ายและทุกปริมาณการเชื่อมต่อ ค่า HV ที่มากกว่านี้แสดงถึงการครอบคลุมของคำตอบจาก GA-EMF มีมากกว่าอัลกอริทึมก่อนหน้า ค่า HV ที่มากกว่ายังอาจสรุปได้ว่าเซตคำตอบของ GA-EMF มีการกระจายตัวมากกว่าอัลกอริทึมก่อนหน้า นอกจากนี้ ค่า IGD ของเซตคำตอบของ GA-EMF ในโครงสร้างเครือข่ายแบบ NSFNET ที่ 150 การเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่า เซตคำตอบของ GA-EMF ทั้งหมดอยู่บนเซตคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Pareto optimal front) ค่า IGD คือ ระยะระหว่างเซตคำตอบที่ได้กับเซตคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

ในการออกแบบเครือข่ายโดยคำนึงถึงหลายสมการวัตถุประสงค์นั้น ประสิทธิภาพของคำตอบวัดได้โดย เครื่องมือวัดประสิทธิภาพ ดังเสนอในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [32, 33] จากตารางที่ 3.3 เซตของคำตอบที่ได้จาก GA-EMF ดีกว่า เซตของคำตอบที่ได้จาก MST และ MRU ตัวอย่างเช่น ที่ปริมาณการเชื่อมต่อ เท่ากับ 150 ใน โครงสร้างเครือข่าย NFSNET อัลกอริทึม GA-EMF มีค่า HV = 0.5064 ในขณะที่ ค่า HV ของ MST และ MRU คือ 0.1522 และ 0.2704 ตามลำดับ ด้วยค่า HV ที่มากกว่า อัลกอริทึม GA-EMF ให้ค่า IGD = 0 หมายความว่า ทุกคำตอบของเซตคำตอบของ GA-EMF อยู่ในเซตคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

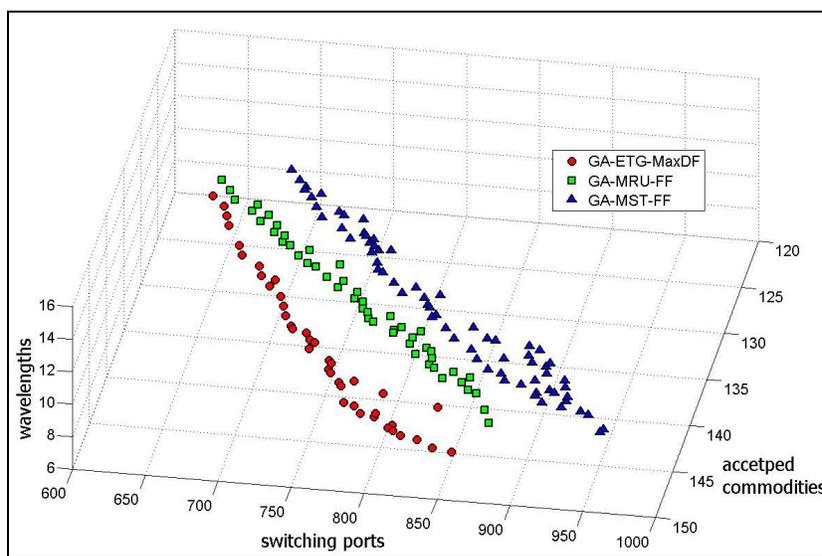
ตารางที่ 3.3 แสดงประสิทธิภาพของเซตคำตอบของอัลกอริทึม GA-EMF, MST และ MRU ในหลาย

โครงสร้างเครือข่าย

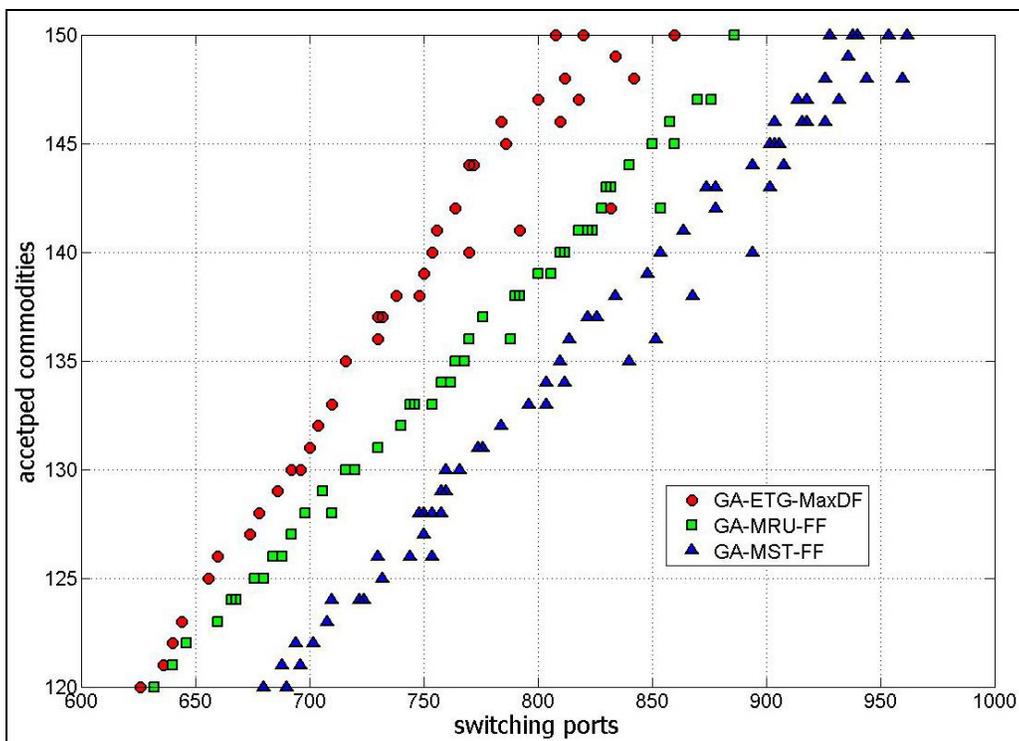
จำนวนการเชื่อมต่อ	โครงสร้างเครือข่าย	อัลกอริทึมการออกแบบการรวมเส้นทางฯ	HV.	Spread	IGD.	เวลาที่ใช้ (วินาที)	
						ค่าเฉลี่ย*	ค่ารวม
50	NFSNET	GA-EMF	<b>0.4701</b>	0.4262	<b>0.0000</b>	2,352.67	7,058.00
		MST	0.2684	0.4000	0.0556	2,320.00	6,960.00
		MRU	0.3333	0.3555	0.0317	2,300.33	6,901.00
	CHNNET	GA-EMF	<b>0.3677</b>	0.0692	<b>0.0000</b>	2,613.67	7,841.00
		MST	0.0129	0.8172	0.2411	2,561.00	7,683.00
		MRU	0.0839	0.6010	0.2308	2,548.00	7,644.00
	ARPANET	GA-EMF	<b>0.3825</b>	0.2685	<b>0.0000</b>	4,511.33	13,534.00
		MST	0.2235	0.4654	0.0494	4,433.00	13,299.00
		MRU	0.2497	0.4619	0.0487	4,428.33	13,285.00
100	NFSNET	GA-EMF	<b>0.5085</b>	0.4084	<b>0.0062</b>	8,606.33	25,819.00
		MST	0.1738	0.5213	0.0525	8,591.33	25,774.00
		MRU	0.3181	0.5411	0.0330	8,594.00	25,782.00
	CHNNET	GA-EMF	<b>0.5826</b>	0.4244	<b>0.0051</b>	9,713.67	29,141.00
		MST	0.4142	0.3532	0.0195	9,602.67	28,808.00
		MRU	0.5154	0.3482	0.0130	9,584.00	28,752.00
	ARPANET	GA-EMF	<b>0.4875</b>	0.4170	<b>0.0000</b>	16,860.33	50,581.00
		MST	0.2120	0.4557	0.0384	16,728.33	50,185.00
		MRU	0.3230	0.4238	0.0270	16,729.00	50,187.00
150	NFSNET	GA-EMF	<b>0.5064</b>	0.5124	<b>0.0000</b>	19,265.33	57,796.00
		MST	0.1522	0.5412	0.0502	19,249.67	57,749.00
		MRU	0.2704	0.4818	0.0369	19,269.00	57,807.00
	CHNNET	GA-EMF	<b>0.5884</b>	0.4832	<b>0.0051</b>	21,544.00	64,632.00
		MST	0.3420	0.4709	0.0245	21,400.00	64,200.00
		MRU	0.4955	0.4894	0.0127	21,254.33	63,763.00
	ARPANET	GA-EMF	<b>0.4859</b>	0.4830	<b>0.0098</b>	37,212.67	111,638.00
		MST	0.2106	0.4953	0.0346	37,218.67	111,656.00
		MRU	0.2558	0.4972	0.0288	37,187.67	111,563.00

\* ผลต่อ 1 รอบการรัน

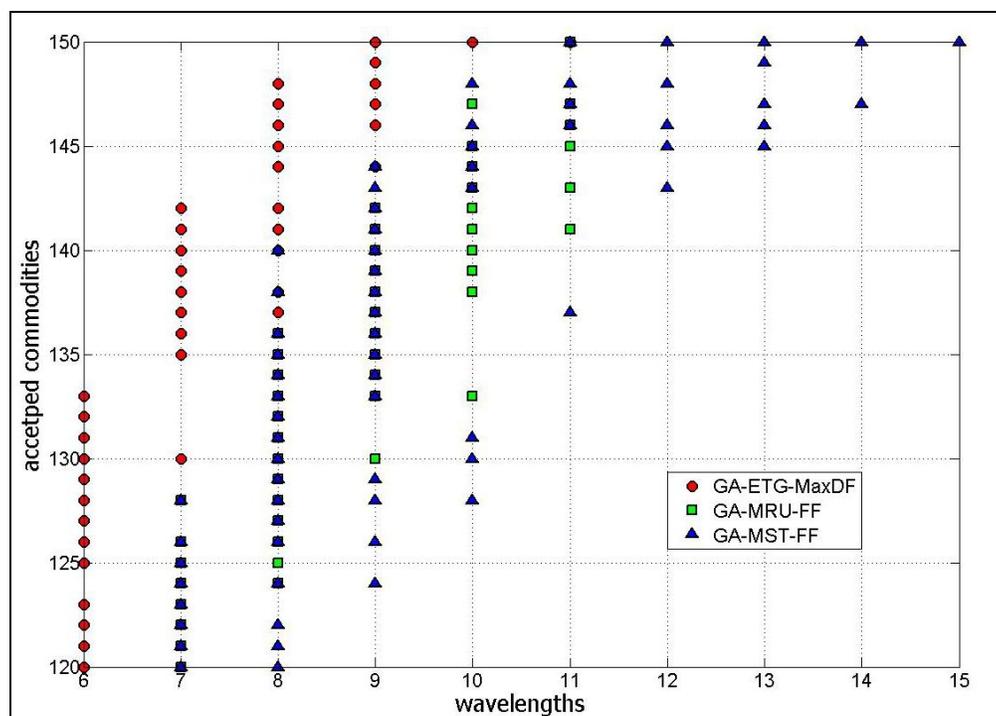
นอกจากนี้ เซตของคำตอบที่ได้จากทั้งสามอัลกอริทึม ยังแสดงในรูปที่ 3.10-3.19 จากรูปที่ 3.10, รูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.17 เซตของคำตอบของ GA-EMF อยู่ในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อมาก ใช้จำนวนอุปกรณ์รับส่งข้อมูลน้อย และใช้ช่องสัญญาณน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ จากรูปที่ 3.11, รูปที่ 3.14 และรูปที่ 3.18 เซตคำตอบของ GA-EMF ให้การเชื่อมต่อที่มากกว่าอัลกอริทึมอื่นในจำนวนอุปกรณ์รับส่งข้อมูลที่เท่ากัน ในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 3.12, รูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.19 เซตคำตอบของ GA-EMF ให้การเชื่อมต่อที่มากกว่าอัลกอริทึมอื่นในจำนวนช่องสัญญาณที่เท่ากัน นอกจากนี้รูปที่ 3.16 แสดงจำนวนพอร์ตรับส่งข้อมูลและจำนวนช่องสัญญาณที่ได้จากโครงสร้างเครือข่าย CHNNET ที่การเชื่อมต่อเท่ากับ 150 การเชื่อมต่อ จากรูปจะแสดงให้เห็นว่าคำตอบจาก GA-EMF จะดีกว่าคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมอื่น โดย GA-EMF ให้ค่าทั้งจำนวนพอร์ตรับส่งข้อมูลและจำนวนช่องสัญญาณที่น้อยกว่าคำตอบจากอัลกอริทึมอื่นในปริมาณการเชื่อมต่อที่เท่ากัน



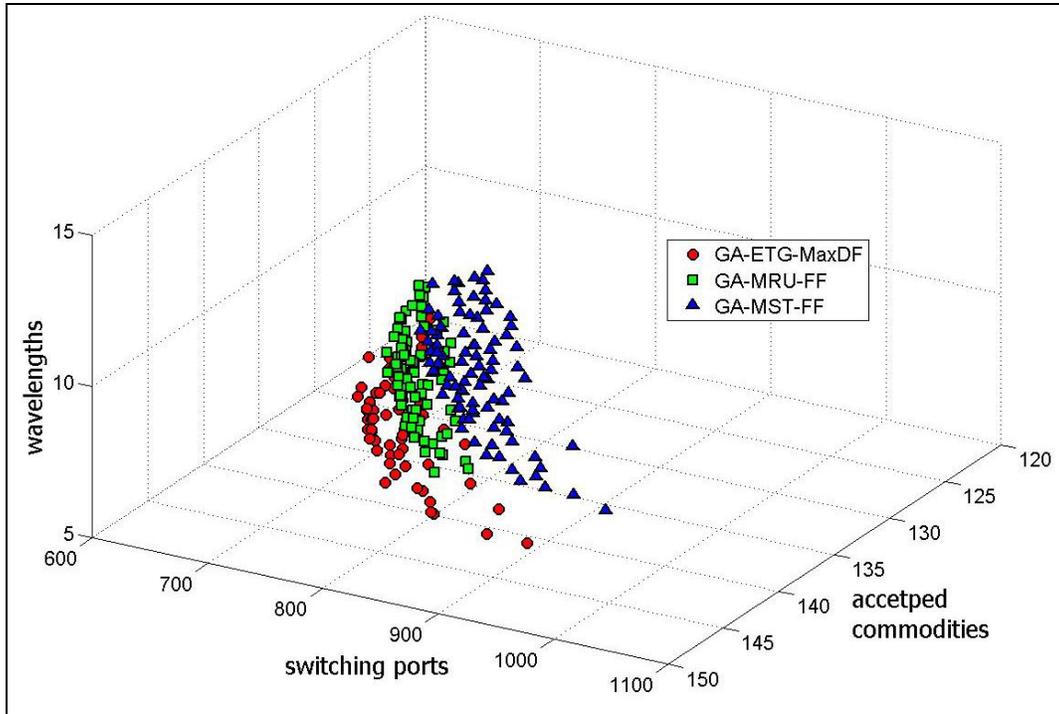
รูปที่ 3.10 เซตคำตอบของอัลกอริทึม GA-EMF, MST และ MRU ที่ได้จากโครงสร้างเครือข่าย NFSNET



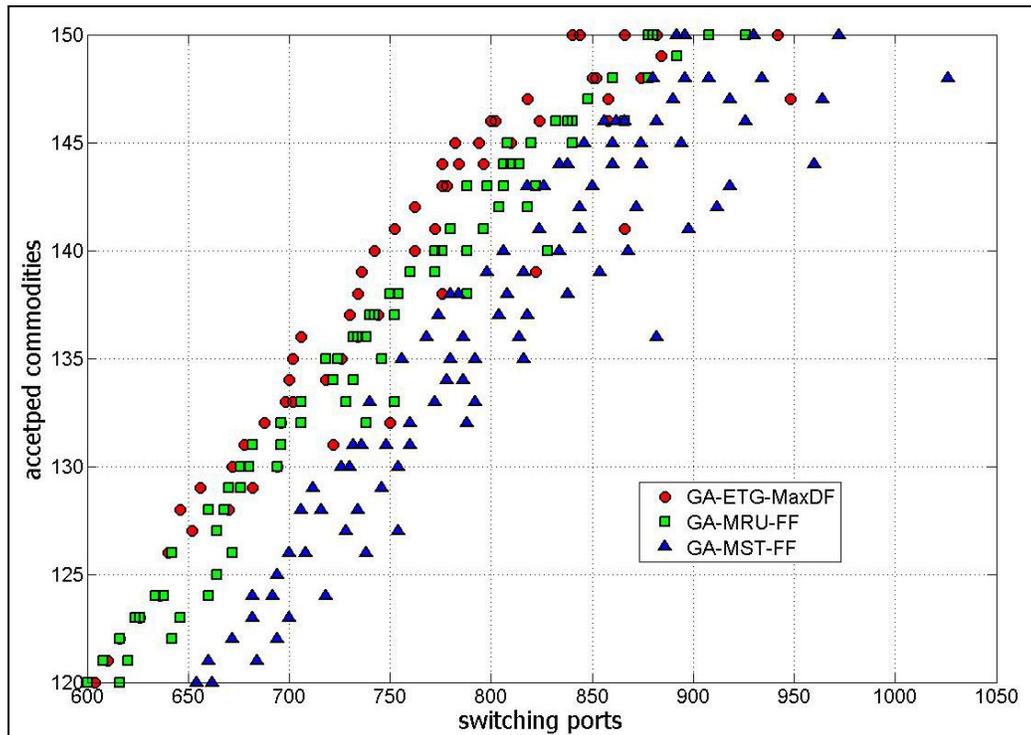
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมต่อที่สำเร็จและจำนวนพอร์ตรับส่งข้อมูลของอัลกอริทึม GA-EMF, MST และ MRU ที่ได้จาก โครงสร้างเครือข่าย NFSNET



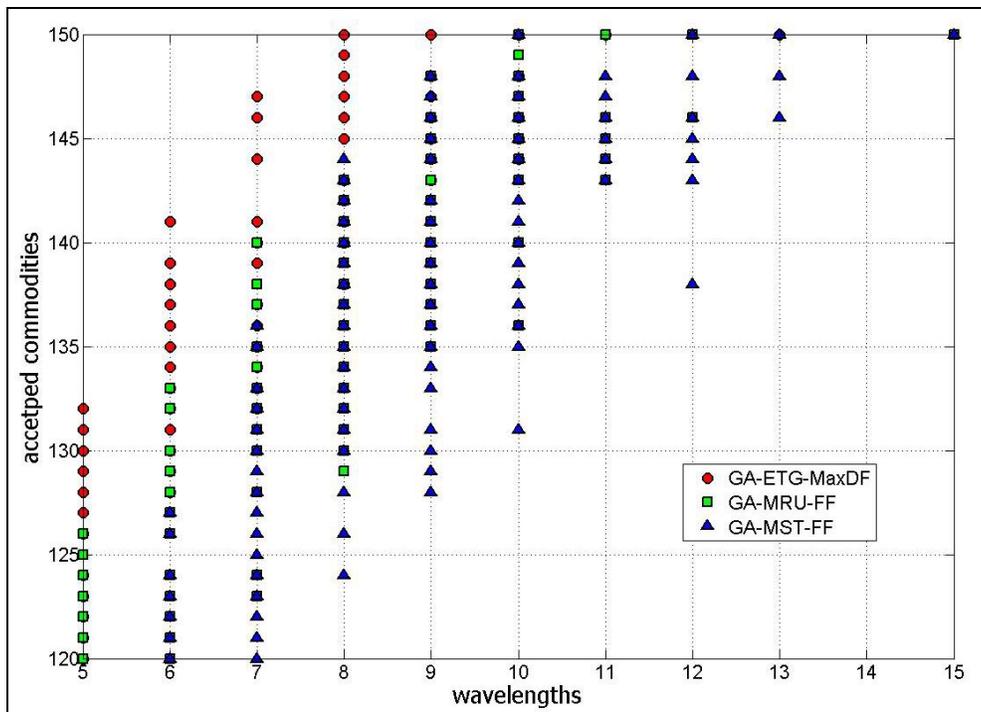
รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมต่อที่สำเร็จและจำนวนช่องสัญญาณของอัลกอริทึม GA-EMF, MST และ MRU ที่ได้จาก โครงสร้างเครือข่าย NFSNET



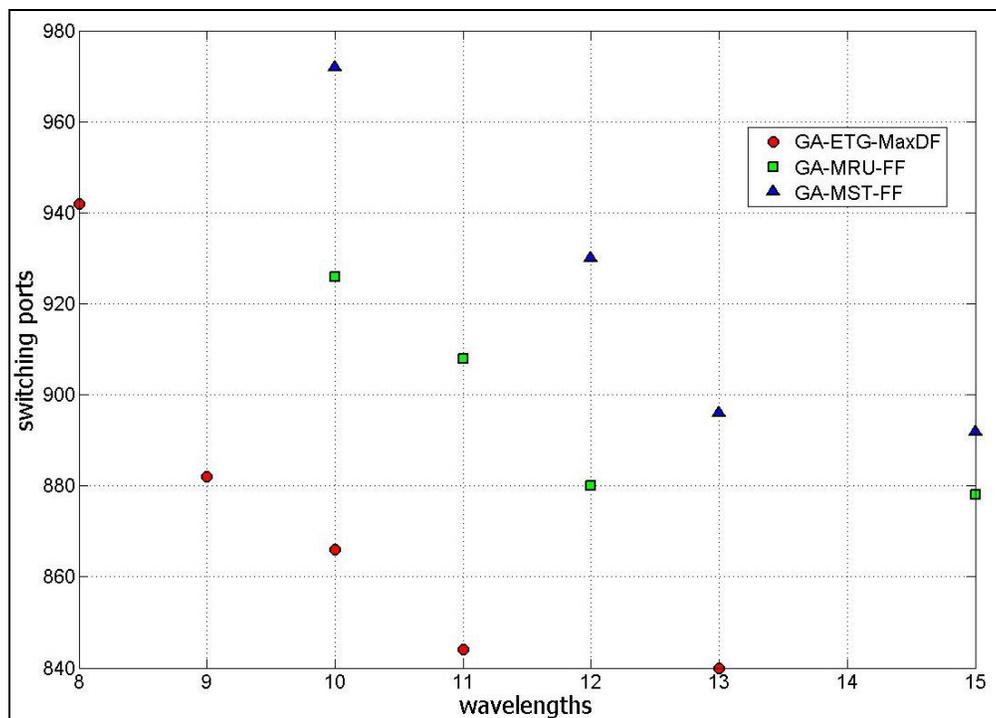
รูปที่ 3.13 เซตคำตอบของอัลกอริทึม GA-EMF, MST และ MRU ที่ได้จากโครงสร้างเครือข่าย CHNNET



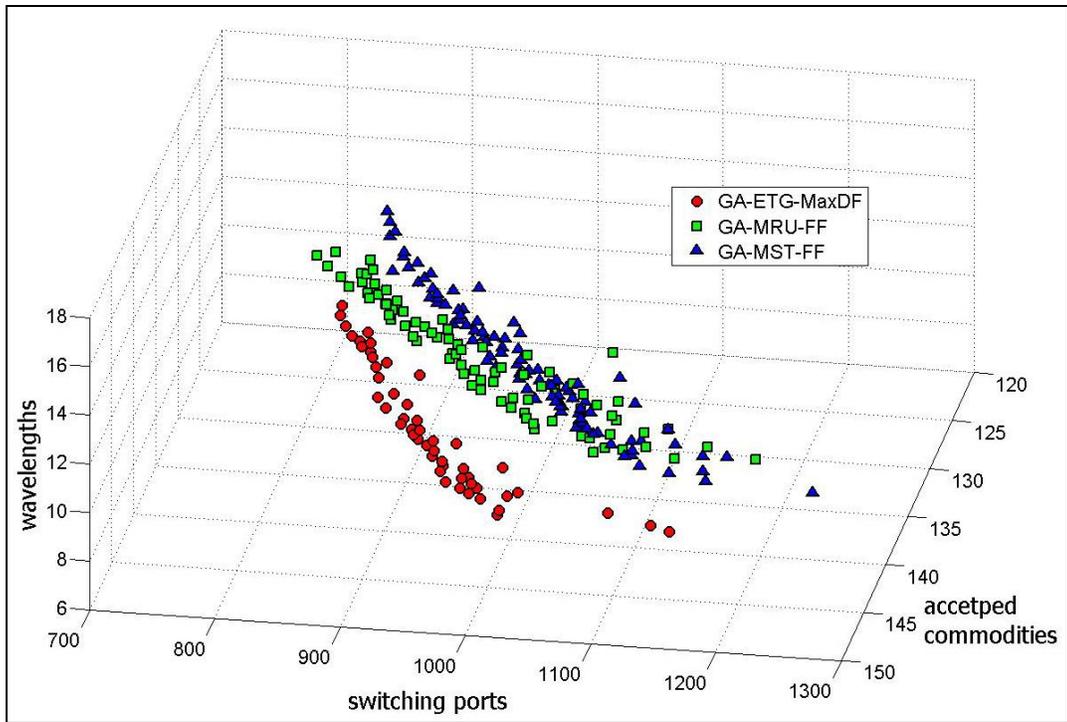
รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมต่อที่สำเร็จและจำนวนพอร์ตรับส่งข้อมูลของอัลกอริทึม GA-EMF, MST และ MRU ที่ได้จากโครงสร้างเครือข่าย CHNNET



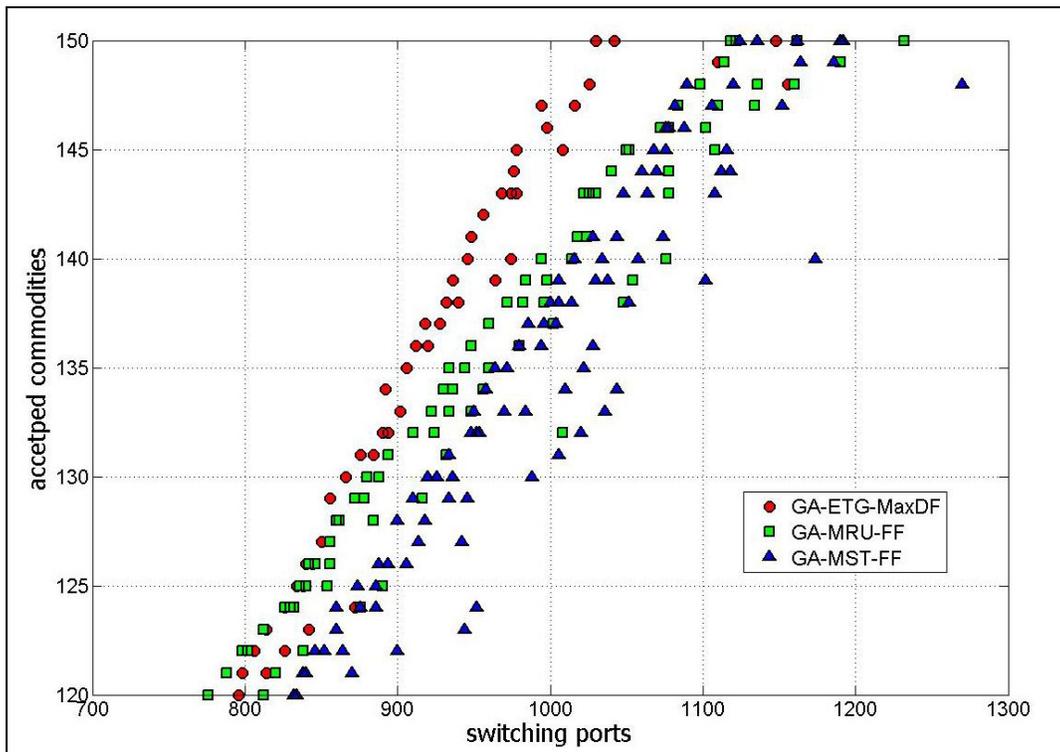
รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมต่อที่สำเร็จและจำนวนช่องสัญญาณของอัลกอริทึม GA-EMF, MST และ MRU ที่ได้จากโครงสร้างเครือข่าย CHNNET



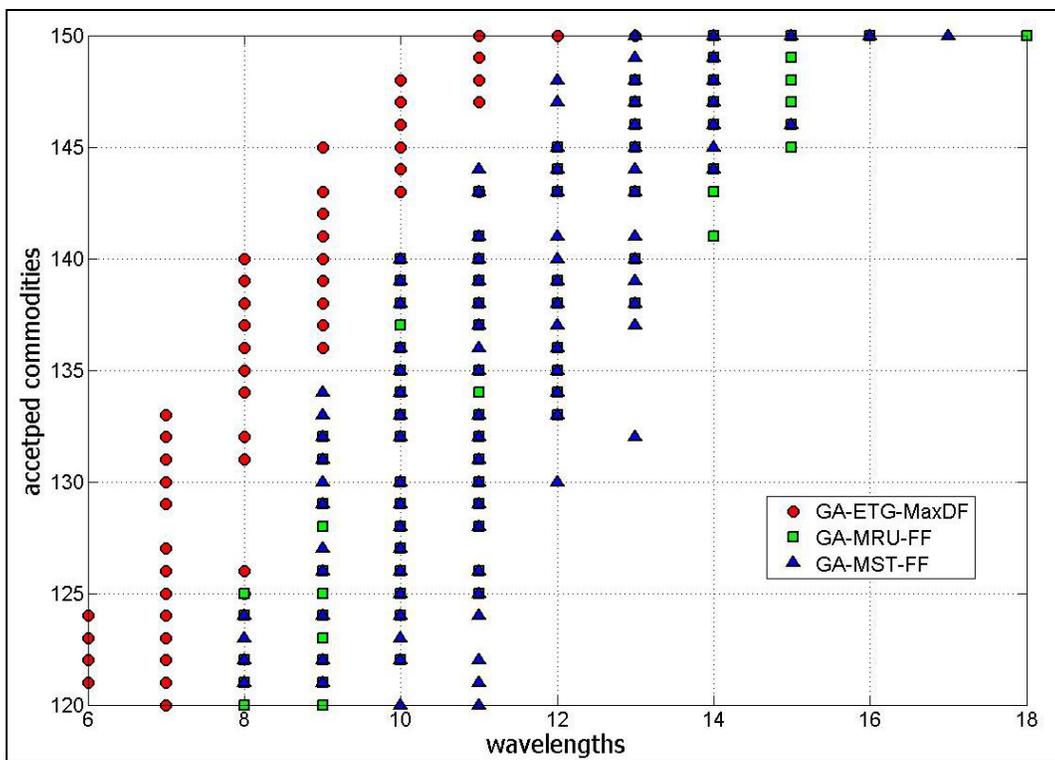
รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพอร์ตรับส่งข้อมูลและจำนวนช่องสัญญาณของอัลกอริทึม GA-EMF, MST และ MRU ที่ได้จากโครงสร้างเครือข่าย CHNNET



รูปที่ 3.17 เซตคำตอบของอัลกอริทึม GA-EMF, MST และ MRU ที่ได้จาก โครงสร้างเครือข่าย ARPANET



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมต่อที่สำเร็จและจำนวนพอร์ตรับส่งข้อมูลของอัลกอริทึม GA-EMF, MST และ MRU ที่ได้จาก โครงสร้างเครือข่าย ARPANET



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมต่อที่สำเร็จและจำนวนช่องสัญญาณของอัลกอริทึม GA-EMF, MST และ MRU ที่ได้จาก โครงสร้างเครือข่าย ARPANET

## บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับการทดลอง งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการออกแบบและสังเคราะห์เครือข่าย โดยพิจารณาปัญหาการออกแบบเครือข่ายทั้งแบบเข้าถึงและแบบแกนหลัก ดังนี้

1. การออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึง ระยะที่ 1 โดยใช้โครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้ที่ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุด
2. การออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึง ระยะที่ 2 โดยพิจารณาให้เครือข่ายมีการฟื้นคืนวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด (link restoration)
3. การออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึง ระยะที่ 3 โดยออกแบบให้เครือข่ายมีการฟื้นคืนวงจรแบบทั้งเส้นทาง (path restoration)
4. การออกแบบเครือข่ายแบบแกนหลัก โดยการออกแบบเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ
5. การออกแบบเครือข่ายแบบแกนหลัก โดยการออกแบบการรวมเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ

### 4.1 การออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึง ระยะที่ 1 หาโครงสร้างแบบต้นไม้ที่ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุด

การออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึง ระยะที่ 1 ออกแบบหาโครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้ที่ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุด สมมติให้ เรามีสถานีฐาน 9 สถานี ศูนย์ควบคุมสถานีฐาน 2 ศูนย์ และ ชุมสาย 1 ชุมสาย การออกแบบระยะที่ 1 จะคำนวณหาโครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้ที่ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายสูงสุด รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้ที่ได้จากระยะที่ 1 โดยกำหนดให้วงกลม คือ สถานีฐาน สี่เหลี่ยม คือ ส่วนควบคุมสถานีฐาน สี่เหลี่ยมทึบ คือ ชุมสาย จากรูปจะเห็นว่าหลาย ๆ สถานีฐานจะเชื่อมต่อกับศูนย์ควบคุมหนึ่งศูนย์ และหลาย ๆ ศูนย์ควบคุมจะเชื่อมต่อกับหนึ่งชุมสาย สำหรับการใช้งานสามารถดูได้ใน เอกสารแบบที่ 1 คู่มือการใช้งาน

ข้อมูลที่รับเข้า คือ ประเภทที่ตั้ง ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐาน ปริมาณความต้องการใช้งานในหน่วย Erlang จากสถานีฐานหนึ่งไปยังอีกสถานีฐานหนึ่ง

หลังจากโปรแกรมคำนวณผลแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้ คือ โครงสร้างการเชื่อมต่อของสถานีฐาน ศูนย์ควบคุมฯ และ ชุมสาย รวมถึงค่าใช้จ่ายทั้งหมดจากการเชื่อมต่อตามโครงสร้างที่ทำได้

ตัวอย่างเช่น

BTS ที่ 0	เชื่อมต่อกับ BSC ที่ 0
BTS ที่ 1	เชื่อมต่อกับ BSC ที่ 0
BTS ที่ 2	เชื่อมต่อกับ BSC ที่ 1
BTS ที่ 3	เชื่อมต่อกับ BSC ที่ 1
BTS ที่ 4	เชื่อมต่อกับ BSC ที่ 0
BTS ที่ 5	เชื่อมต่อกับ BSC ที่ 1

BTS ที่ 6 เชื่อมต่อกับ BSC ที่ 1

BTS ที่ 7 เชื่อมต่อกับ BSC ที่ 0

BTS ที่ 8 เชื่อมต่อกับ BSC ที่ 1

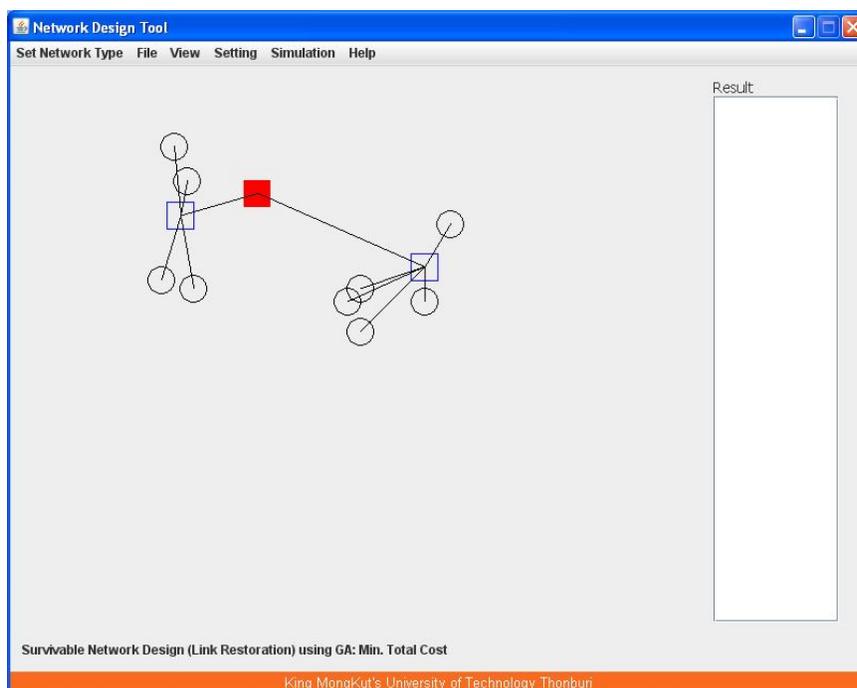
BSC ที่ 0 เชื่อมต่อกับ MSC ที่ 0

BSC ที่ 1 เชื่อมต่อกับ MSC ที่ 0

มีค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด 509,823.48

ใช้จำนวนรอบหรือ iteration ในการรัน = 101 iterations

ใช้เวลาในการรัน = 1 วินาที

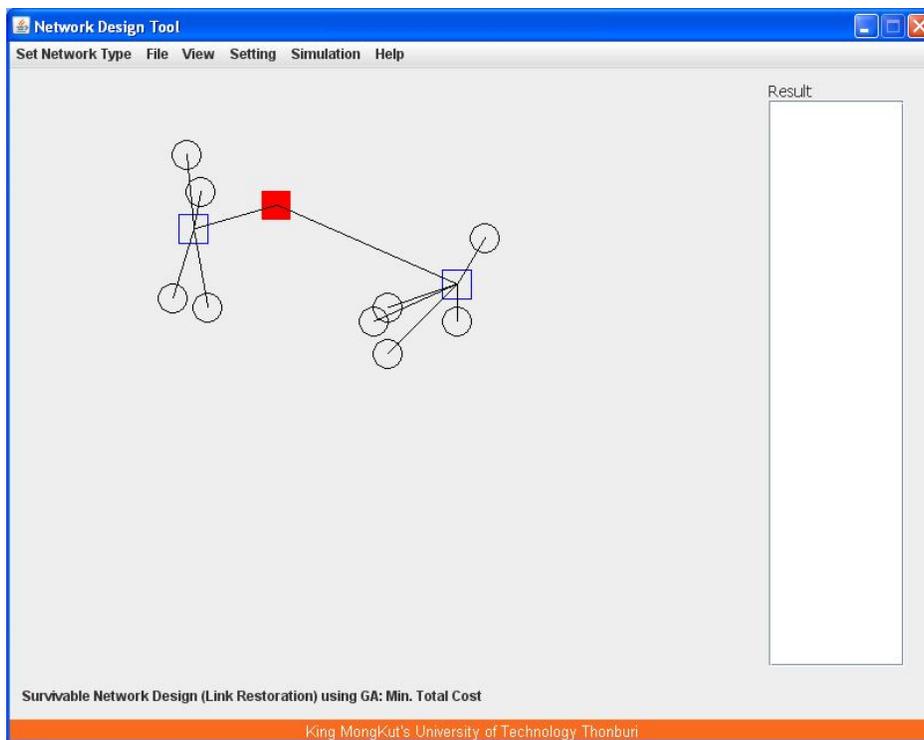


รูปที่ 4.1 แสดงผลที่ได้จากการหาโครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้

#### 4.2 การออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึง ระยะที่ 2 ออกแบบให้เครือข่ายมีการฟื้นคืนวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด

การออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึง ระยะที่ 2 ออกแบบให้เครือข่ายมีการฟื้นคืนวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด ได้ผลดังรูปที่ 4.2-4.4 จากรูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้ที่ได้จากระยะที่ 1 โดยกำหนดให้วงกลม คือ สถานีฐาน สี่เหลี่ยม คือ ส่วนควบคุมสถานีฐาน สี่เหลี่ยมทึบ คือ ชุมสาย จากรูปจะเห็นได้ว่าหลาย ๆ สถานีฐานจะเชื่อมต่อกับศูนย์ควบคุมหนึ่งศูนย์ และหลาย ๆ ศูนย์ควบคุมจะเชื่อมต่อกับหนึ่งชุมสาย ส่วนรูปที่ 4.3 เมื่อนำมาใส่ไปวางบนสถานีฐานจะปรากฏเส้นทึบแสดงเส้นทางหลัก และเส้นประแสดงเส้นทางสำรอง

รูปที่ 4.4 แสดงเส้นทางสำรองของวงจรสัญญาณทุกวงจรในเครือข่ายเพื่อรองรับการชำรุดของวงจรหนึ่งวงจรใดทั้งระบบ สำหรับการใช้งานสามารถดูได้ใน เอกสารแนบที่ 1 คู่มือการใช้งาน



รูปที่ 4.2 แสดง โครงสร้างเครือข่ายแบบต้น ไม้ ก่อนการพินคืน วงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด

ข้อมูลที่รับเข้า คือ

1. ประเภทที่ตั้ง
2. ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐาน
3. ชนิดของที่ตั้ง
4. จำนวนอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณ
5. จำนวนความจุในหน่วย Erlang
6. จำนวนสถานีฐาน BTS ภายใต้การควบคุม
7. ศูนย์ควบคุม/ชุมสาย ที่เชื่อมต่อ

หลังจากโปรแกรมคำนวณผลแล้ว ผลลัพธ์จากการคำนวณที่ได้ คือ การเชื่อมต่อของที่ตั้งสถานีฐาน ศูนย์ควบคุมสถานีฐาน และชุมสาย รวมถึงค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่รวมค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมจากชุดของวงจรสัญญาณสำรอง

ตัวอย่างเช่น

BTS ที่ 0 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 0 (BTS0) ไปยัง Node ที่ 7 (BTS7) ไปยัง Node ที่ 9 (คือ BSC ที่ 0)

BTS ที่ 1 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 1 (BTS1) ไปยัง Node ที่ 4 (BTS4) ไปยัง Node ที่ 9 (คือ BSC ที่ 0)

BTS ที่ 2 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 2 (BTS2) ไปยัง Node ที่ 8 (BTS8) ไปยัง Node ที่ 10 (คือ BSC ที่ 1)

BTS ที่ 3 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 3 (BTS3) ไปยัง Node ที่ 8 (BTS8) ไปยัง Node ที่ 10 (คือ BSC ที่ 1)

BTS ที่ 4 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 4 (BTS4) ไปยัง Node ที่ 1 (BTS1) ไปยัง Node ที่ 9 (คือ BSC ที่ 0)

BTS ที่ 5 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 5 (BTS5) ไปยัง Node ที่ 6 (BTS6) ไปยัง Node ที่ 10 (คือ BSC ที่ 1)

BTS ที่ 6 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 6 (BTS6) ไปยัง Node ที่ 5 (BTS5) ไปยัง Node ที่ 10 (คือ BSC ที่ 1)

BTS ที่ 7 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 7 (BTS7) ไปยัง Node ที่ 0 (BTS0) ไปยัง Node ที่ 9 (คือ BSC ที่ 0)

BTS ที่ 8 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 8 (BTS8) ไปยัง Node ที่ 3 (BTS3) ไปยัง Node ที่ 10 (คือ BSC ที่ 1)

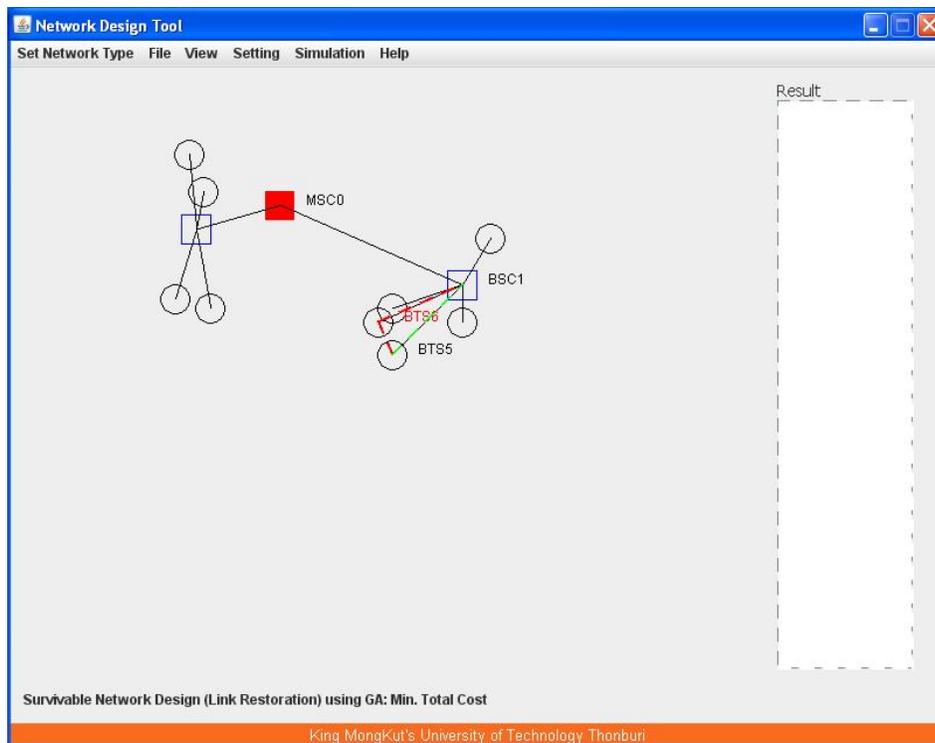
BSC ที่ 0 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 9 (BSC0) ไปยัง Node ที่ 7 (BTS7) ไปยัง Node ที่ 11 (คือ MSC ที่ 0)

BSC ที่ 1 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 10 (BSC1) ไปยัง Node ที่ 3 (BTS3) ไปยัง Node ที่ 11 (คือ MSC ที่ 0)

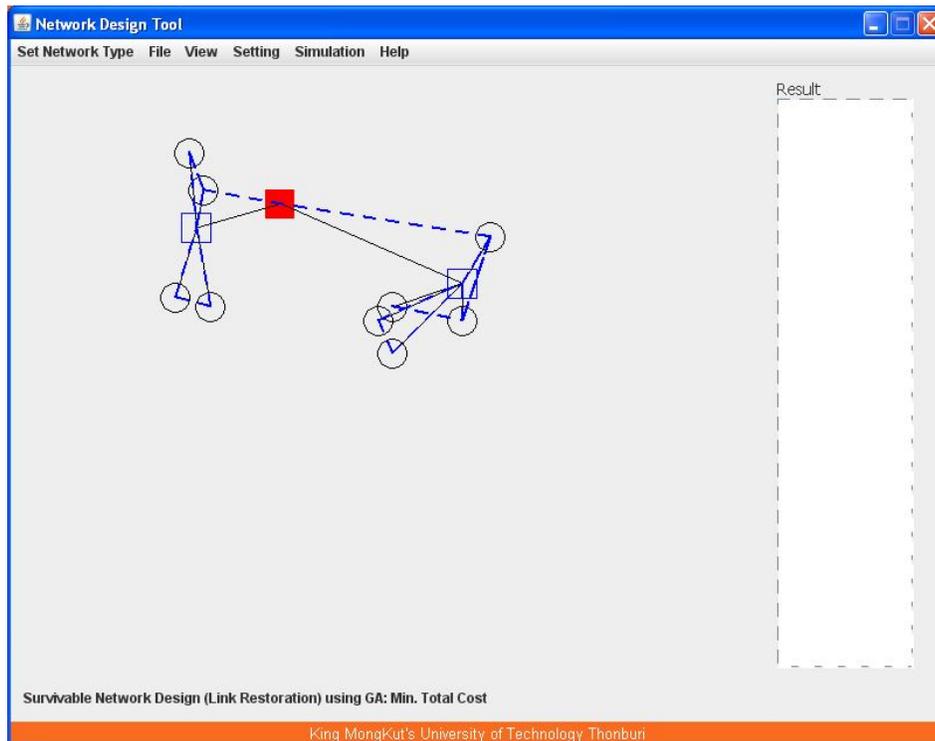
มีค่าใช้จ่าย 850,483.33

ใช้จำนวนรอบหรือ iteration ในการรัน = 399 iterations

ใช้เวลาในการรัน = 1 วินาที



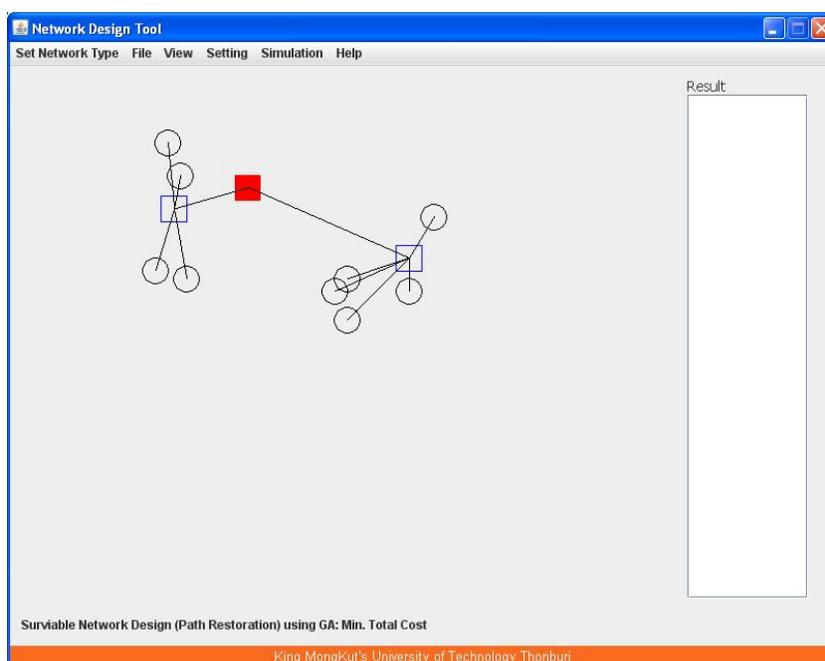
รูปที่ 4.3 แสดง โครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้ หลังการพินถิ่นวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุดของ สถานีฐานที่ 5



รูปที่ 4.4 แสดง โครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้ หลังการพินถิ่นวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุดของทุกสถานีฐาน

### 4.3 การออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึง ระยะที่ 3 ออกแบบให้เครือข่ายมีการฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทาง

การออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึง ระยะที่ 3 ออกแบบให้เครือข่ายมีการฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทาง ได้ผลดังรูปที่ 4.5-4.7 จากรูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้ที่ได้จากระยะที่ 1 โดยกำหนดให้วงกลม คือ สถานีฐาน สีเหลี่ยม คือ ส่วนควบคุมสถานีฐาน สีเหลี่ยมทึบ คือ ชุมสาย จากรูปจะเห็นได้ว่าหลาย ๆ สถานีฐานจะเชื่อมต่อกับศูนย์ควบคุมหนึ่งศูนย์ และหลาย ๆ ศูนย์ควบคุมจะเชื่อมต่อกับหนึ่งชุมสาย ส่วนรูปที่ 4.6 เมื่อนำเมาส์ไปวางบนสถานีฐานจะปรากฏเส้นทึบแสดงเส้นทางหลัก และเส้นประแสดงเส้นทางสำรอง รูปที่ 4.7 แสดงเส้นทางสำรองของวงจรสัญญาณทุกวงจรในเครือข่ายเพื่อรองรับการชำรุดของวงจรหนึ่งวงจรใดทั้งระบบ สำหรับการใช้งานสามารถดูได้ใน เอกสารแนบที่ 1 คู่มือการใช้งาน



รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้ ก่อนการฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทาง

ข้อมูลที่รับเข้า คือ

1. ประเภทที่ตั้ง
2. ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐาน
3. ชนิดของที่ตั้ง
4. จำนวนอุปกรณ์ติดต่อวงจรสัญญาณ
5. จำนวนความจุในหน่วย Erlang
6. จำนวนสถานีฐาน BTS ภายใต้การควบคุม
7. ศูนย์ควบคุม/ชุมสาย ที่เชื่อมต่อ
8. จำนวนสถานีฐาน BTS ที่อยู่ภายใต้ศูนย์ควบคุมเดียวกัน

หลังจากโปรแกรมคำนวณผลแล้ว ผลลัพธ์จากการคำนวณที่ได้ คือ การเชื่อมต่อของที่ตั้งสถานีฐาน ศูนย์ควบคุมสถานีฐาน และชุมสาย รวมถึงค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่รวมค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมจากชุดของวงจรสัญญาณสำรอง ตัวอย่างเช่น

BTS ที่ 0 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 0 (BTS0) ไปยัง Node ที่ 7 (BTS7) ไปยัง Node ที่ 10 (BSC1) ไปยัง Node ที่ 11 (คือ MSC ที่ 0)

BTS ที่ 1 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 1 (BTS1) ไปยัง Node ที่ 4 (BTS4) ไปยัง Node ที่ 10 (BSC1) ไปยัง Node ที่ 11 (คือ MSC ที่ 0)

BTS ที่ 2 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 2 (BTS2) ไปยัง Node ที่ 9 (BSC0) ไปยัง Node ที่ 11 (คือ MSC ที่ 0)

BTS ที่ 3 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 3 (BTS3) ไปยัง Node ที่ 2 (BTS2) ไปยัง Node ที่ 9 (BSC0) ไปยัง Node ที่ 11 (คือ MSC ที่ 0)

BTS ที่ 4 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 4 (BTS4) ไปยัง Node ที่ 10 (BSC1) ไปยัง Node ที่ 11 (คือ MSC ที่ 0)

BTS ที่ 5 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 5 (BTS5) ไปยัง Node ที่ 2 (BTS2) ไปยัง Node ที่ 9 (BSC0) ไปยัง Node ที่ 11 (คือ MSC ที่ 0)

BTS ที่ 6 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 6 (BTS6) ไปยัง Node ที่ 2 (BTS2) ไปยัง Node ที่ 9 (BSC0) ไปยัง Node ที่ 11 (คือ MSC ที่ 0)

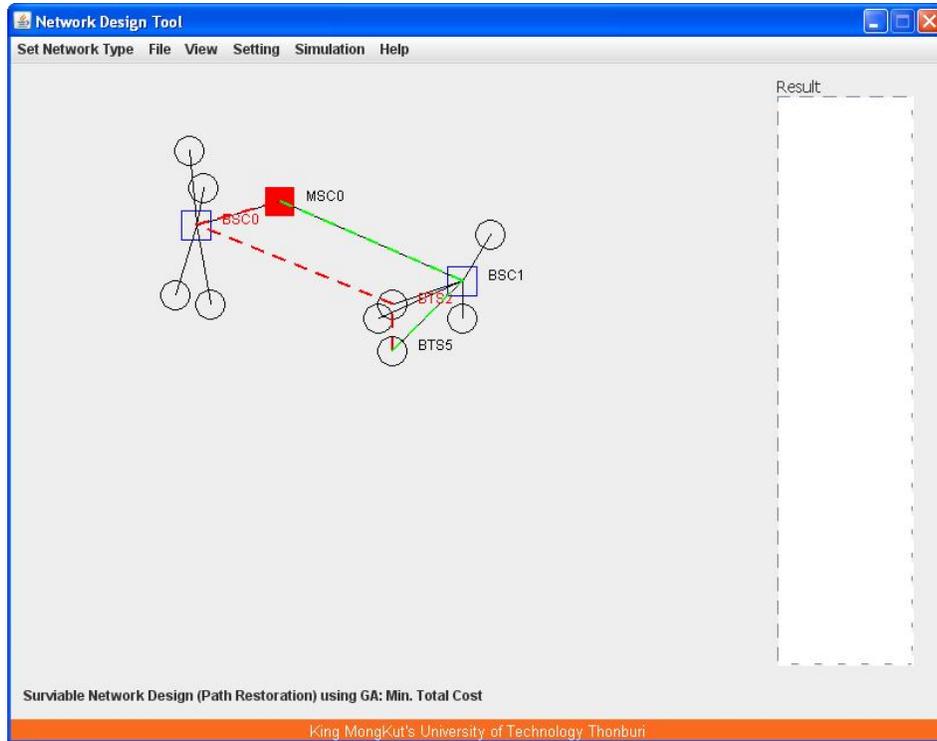
BTS ที่ 7 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 7 (BTS7) ไปยัง Node ที่ 10 (BSC1) ไปยัง Node ที่ 11 (คือ MSC ที่ 0)

BTS ที่ 8 มีเส้นทางสำรอง คือ จาก Node ที่ 8 (BTS8) ไปยัง Node ที่ 2 (BTS2) ไปยัง Node ที่ 9 (BSC0) ไปยัง Node ที่ 11 (คือ MSC ที่ 0)

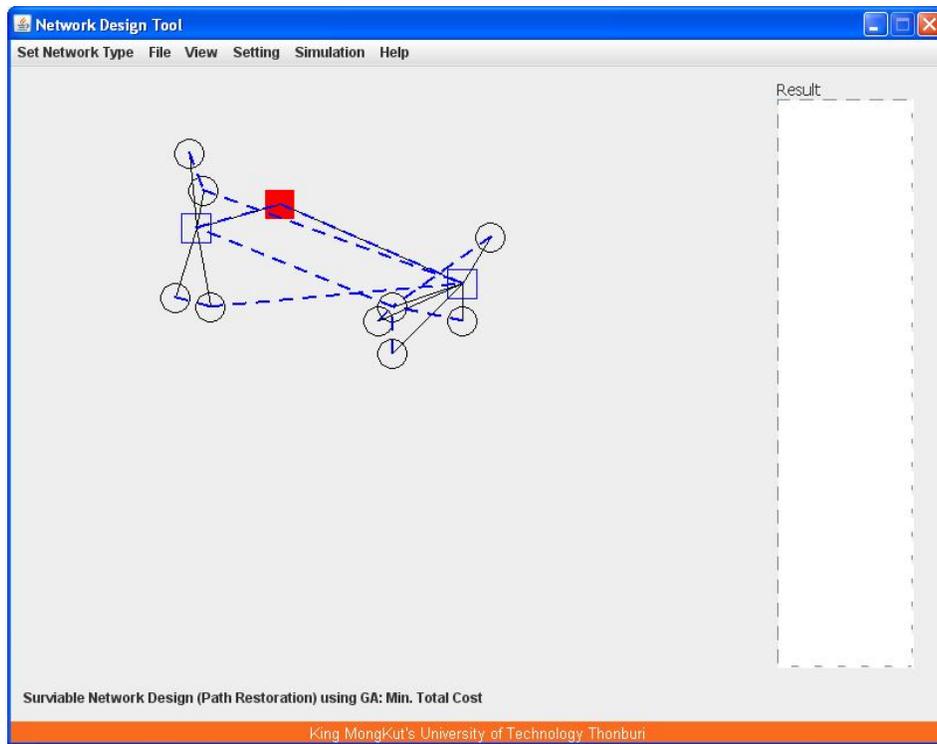
มีค่าใช้จ่าย 1,047,789.10

ใช้จำนวนรอบหรือ iteration ในการรัน = 133 iterations

ใช้เวลาในการรัน = 1 วินาที



รูปที่ 4.6 แสดง โครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้ หลังการฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทางของสถานีฐานที่ 5



รูปที่ 4.7 แสดง โครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้ หลังการฟื้นคืนวงจรแบบเส้นทางของทุกสถานีฐาน

#### 4.4 การออกแบบเครือข่ายแบบแกนหลัก การออกแบบเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ

สำหรับการออกแบบเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณในเครือข่ายแบบแกนหลัก จะเป็นการออกแบบโดยคำนึงถึงหลายสมการวัตถุประสงค์ คำตอบที่ได้จะมีมากกว่า 1 คำตอบ โดยแต่ละคำตอบจะมีค่าปริมาณการเชื่อมต่อ และจำนวนช่องสัญญาณที่ต้องการแตกต่างกัน สมมติให้เรา มี โครงสร้างเครือข่ายแสดงในรูปที่ 4.8 โดยวงกลมคือที่ตั้งของอุปกรณ์เครือข่าย เส้นประแสดงวงจรสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่างสองที่ตั้งใดใด กำหนดให้มีการเชื่อมต่อทั้งหมด 10 การเชื่อมต่อ หลังจากประมวลผลจะปรากฏตัวเลือกด้านขวา สามตัวเลือกคือ  $\{10, 3\}$ ,  $\{8, 1\}$  และ  $\{9, 2\}$  โดยที่  $\{10, 3\}$  หมายความว่า สามารถรองรับการเชื่อมต่อได้ 10 การเชื่อมต่อคือ ทั้งหมด และ ต้องการ 3 ช่องสัญญาณ ในรูปที่ 4.9 แสดงเส้นทางหลังการออกแบบจากที่ตั้ง 4 ไป 12 ในตัวเลือกที่ 2 คือ  $\{8, 1\}$  โดยเส้นทางดังกล่าวใช้ช่องสัญญาณที่ 0 ส่วนรูปที่ 4.10 แสดงเส้นทางของการเชื่อมต่อทั้ง 8 การเชื่อมต่อที่คำนวณได้ในตัวเลือกที่ 2

ข้อมูลที่ได้รับเข้า คือ

1. ข้อมูลการเชื่อมต่อ
2. ข้อมูลการเชื่อมต่อของวงจรสัญญาณระหว่างที่ตั้ง
3. ข้อมูลวงจรสัญญาณ
4. ข้อมูลที่ตั้ง

ตัวอย่างเช่น

ข้อมูลการเชื่อมต่อ มี 10 การเชื่อมต่อ คือ

การเชื่อมต่อที่ 0 จาก ที่ตั้ง Node ที่ 4 ไปที่ตั้ง Node ที่ 8

การเชื่อมต่อที่ 1 จาก ที่ตั้ง Node ที่ 12 ไปที่ตั้ง Node ที่ 7

การเชื่อมต่อที่ 2 จาก ที่ตั้ง Node ที่ 1 ไปที่ตั้ง Node ที่ 5

...

การเชื่อมต่อที่ 9 จาก ที่ตั้ง Node ที่ 9 ไปที่ตั้ง Node ที่ 6

ข้อมูลการเชื่อมต่อของวงจรสัญญาณระหว่างที่ตั้ง มี 20 ที่ตั้ง (Nodes) คือ

Node ที่ 0 มีวงจรสัญญาณเชื่อมต่อกับ Node ที่ 1, Node ที่ 4 และ Node ที่ 7

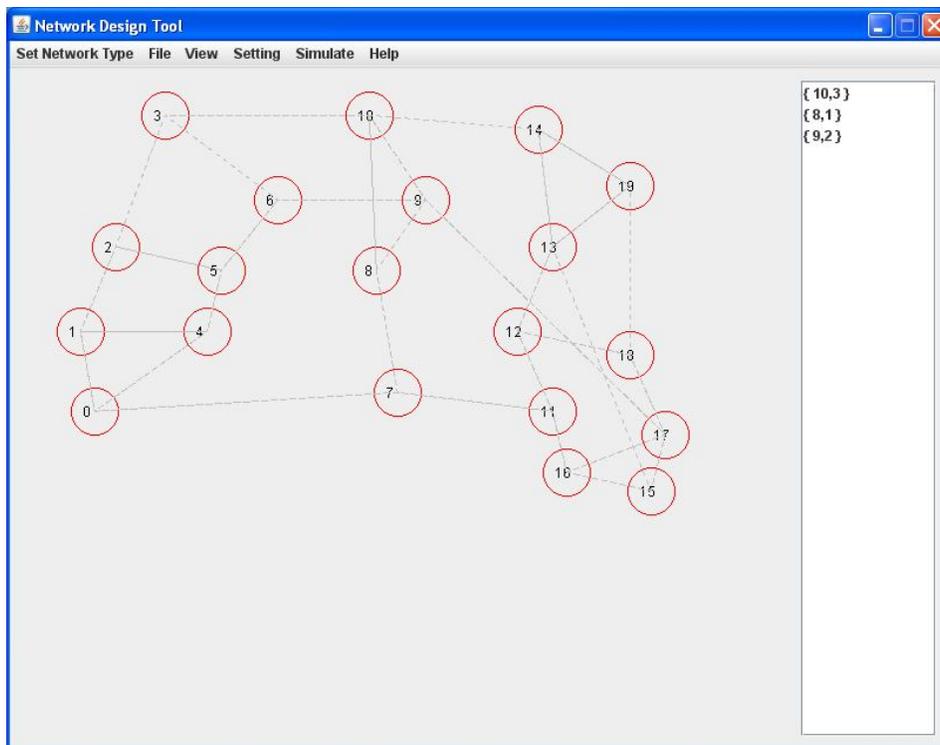
Node ที่ 1 มีวงจรสัญญาณเชื่อมต่อกับ Node ที่ 0, Node ที่ 2 และ Node ที่ 4

Node ที่ 2 มีวงจรสัญญาณเชื่อมต่อกับ Node ที่ 1, Node ที่ 3 และ Node ที่ 5

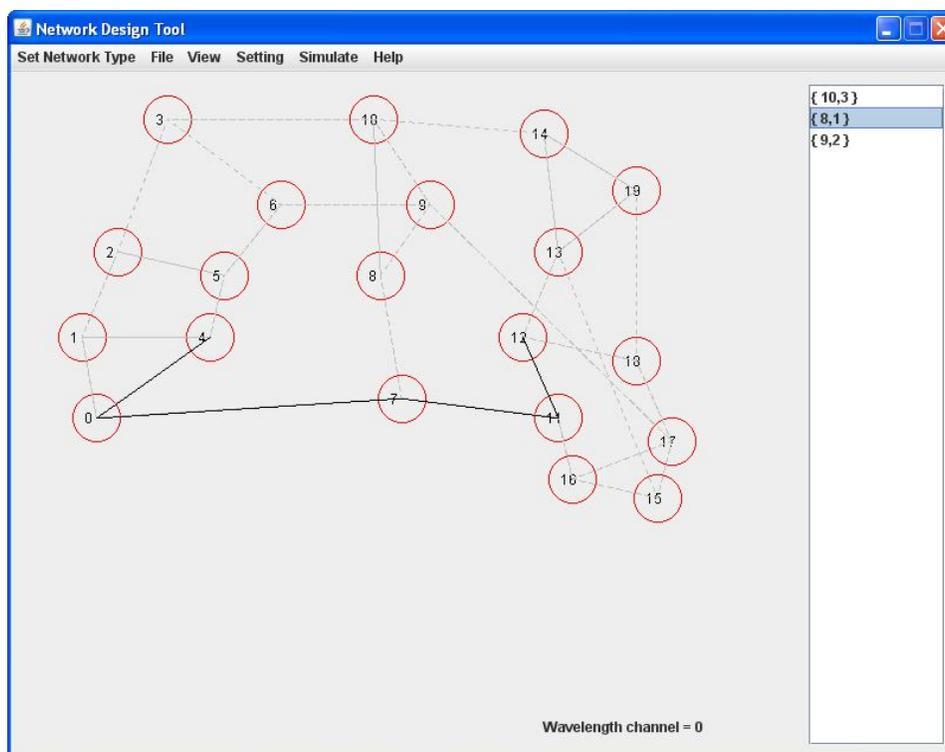
...

Node ที่ 19 มีวงจรสัญญาณเชื่อมต่อกับ Node ที่ 13, Node ที่ 14 และ Node ที่ 18



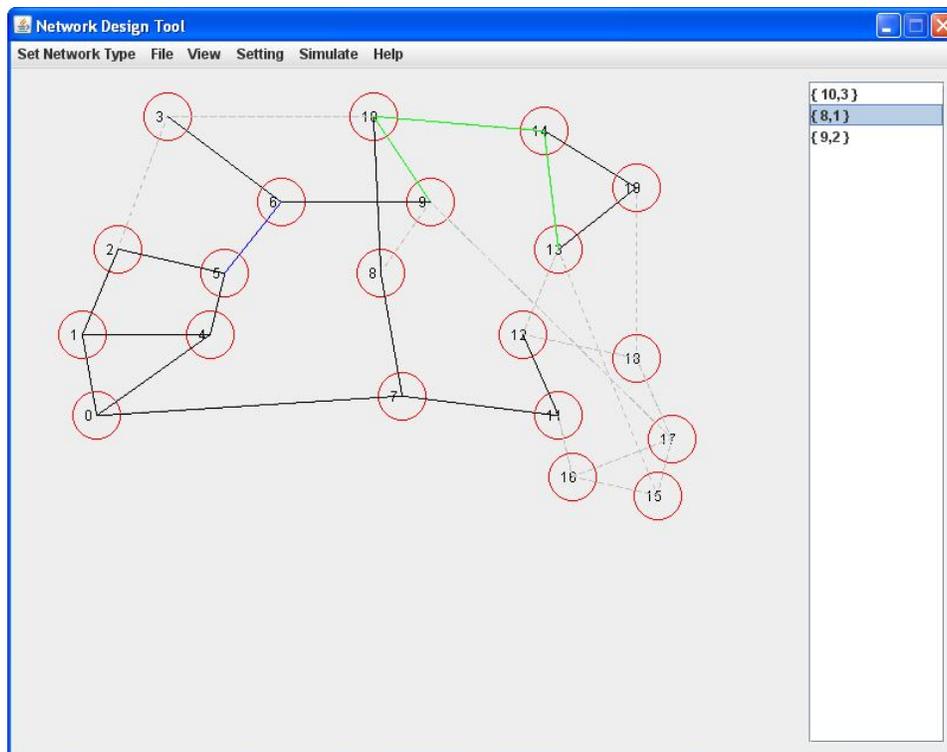


รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างเครือข่ายแบบแกนหลัก ก่อนการออกแบบเส้นทางและกำหนดช่องวงจรสัญญาณ



รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างเครือข่ายแบบแกนหลัก หลังการออกแบบเส้นทางและกำหนดช่องวงจรสัญญาณ

ให้กับ การเชื่อมต่อ จาก ที่ตั้งที่ 4 ไป ที่ตั้งที่ 12 ในตัวเลือกที่ 2



รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างเครือข่ายแบบแกนหลัก หลังการออกแบบเส้นทางและกำหนดช่องวงจรสัญญาณ กับการเชื่อมต่อทั้งหมดในตัวเลือกที่ 2

#### 4.5 การออกแบบเครือข่ายแบบแกนหลัก การออกแบบการรวมเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ

สำหรับการออกแบบการรวมเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณในเครือข่ายแบบแกนหลัก จะเป็นการออกแบบโดยคำนึงถึงหลายสมการวัตถุประสงค์ เช่นกัน คำตอบที่ได้จะมีมากกว่า 1 คำตอบ โดยแต่ละคำตอบจะมีค่าปริมาณการเชื่อมต่อ, จำนวนพอร์ตรับส่งข้อมูลหรืออุปกรณ์รับส่งข้อมูล และจำนวนช่องสัญญาณที่ต้องการแตกต่างกัน สมมติให้เรามี โครงสร้างเครือข่ายแสดงในรูปที่ 4.11 โดยวงกลมคือที่ตั้งของอุปกรณ์เครือข่าย เส้นประแสดงวงจรสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่างสองที่ตั้งใดใด กำหนดให้มีการเชื่อมต่อทั้งหมด 20 การเชื่อมต่อ หลังจากประมวลผลจะปรากฏตัวเลือกด้านขวา สามตัวเลือก คือ  $\{18, 150, 2\}$ ,  $\{20, 156, 3\}$  และ  $\{19, 154, 2\}$  โดยที่  $\{20, 156, 3\}$  หมายความว่า สามารถรองรับการเชื่อมต่อได้ 20 การเชื่อมต่อ คือ ทั้งหมด โดยที่ต้องการอุปกรณ์รับส่งสัญญาณจำนวน 156 ชุด และ ต้องการช่องสัญญาณ 3 ช่องสัญญาณ ในรูปที่ 4.12 แสดงเส้นทางหลังการออกแบบจากที่ตั้ง 4 ไป 19 ในตัวเลือกที่ 2 คือ  $\{20, 156, 3\}$  โดยเส้นทางดังกล่าวมีความต้องการใช้งานช่องสัญญาณแค่ 0.3 หน่วยของปริมาณข้อมูลที่รับส่งได้สูงสุด และใช้ช่องสัญญาณที่ 0 ส่วนรูปที่ 4.13 แสดงเส้นทางของการเชื่อมต่อทั้ง 20 การเชื่อมต่อที่คำนวณได้ในตัวเลือกที่ 2

ข้อมูลที่รับเข้า คือ

1. ข้อมูลการเชื่อมต่อ พร้อมทั้งปริมาณช่องสัญญาณที่ต้องการ
2. ข้อมูลการเชื่อมต่อของวงจรสัญญาณระหว่างที่ตั้ง
3. ข้อมูลวงจรสัญญาณ
4. ข้อมูลที่ตั้ง

ตัวอย่างเช่น

ข้อมูลการเชื่อมต่อ มี 20 การเชื่อมต่อ คือ

การเชื่อมต่อที่ 0 จาก ที่ตั้ง Node ที่ 18 ไปที่ตั้ง Node ที่ 2 ต้องการ 0.15 ช่องสัญญาณ

การเชื่อมต่อที่ 1 จาก ที่ตั้ง Node ที่ 4 ไปที่ตั้ง Node ที่ 19 ต้องการ 0.3 ช่องสัญญาณ

การเชื่อมต่อที่ 2 จาก ที่ตั้ง Node ที่ 19 ไปที่ตั้ง Node ที่ 8 ต้องการ 1 ช่องสัญญาณ

...

การเชื่อมต่อที่ 19 จาก ที่ตั้ง Node ที่ 1 ไปที่ตั้ง Node ที่ 12 ต้องการ 0.95 ช่องสัญญาณ

ข้อมูลการเชื่อมต่อของวงจรสัญญาณระหว่างที่ตั้ง มี 20 ที่ตั้ง (Nodes) คือ

Node ที่ 0 มีวงจรสัญญาณเชื่อมต่อกับ Node ที่ 1, Node ที่ 4 และ Node ที่ 7

Node ที่ 1 มีวงจรสัญญาณเชื่อมต่อกับ Node ที่ 0, Node ที่ 2 และ Node ที่ 4

Node ที่ 2 มีวงจรสัญญาณเชื่อมต่อกับ Node ที่ 1, Node ที่ 3 และ Node ที่ 5

...

Node ที่ 19 มีวงจรสัญญาณเชื่อมต่อกับ Node ที่ 13, Node ที่ 14 และ Node ที่ 18

ข้อมูลวงจรสัญญาณ มี 64 วงจรสัญญาณที่มีทิศทาง (Directional Edge) คือ

วงจรสัญญาณที่ 0 เชื่อมต่อจากหมายเลขที่ตั้ง Node ID 0 ไปยังหมายเลขที่ตั้ง Node ID 1 มีระยะทาง 50 กิโลเมตร

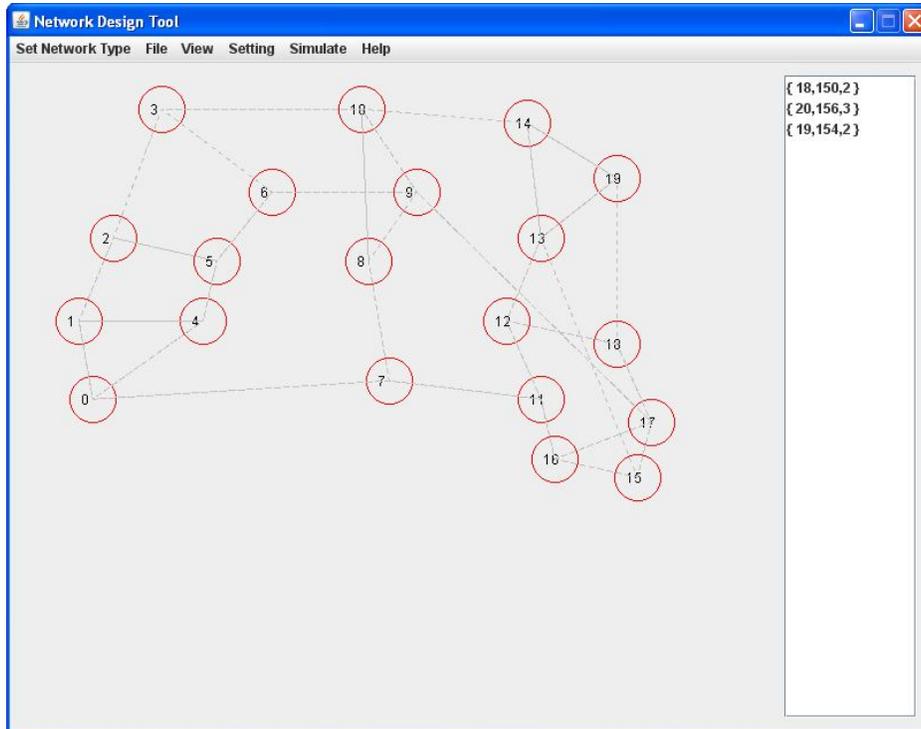
วงจรสัญญาณที่ 1 เชื่อมต่อจากหมายเลขที่ตั้ง Node ID 0 ไปยังหมายเลขที่ตั้ง Node ID 4 มีระยะทาง 65 กิโลเมตร

วงจรสัญญาณที่ 2 เชื่อมต่อจากหมายเลขที่ตั้ง Node ID 0 ไปยังหมายเลขที่ตั้ง Node ID 7 มีระยะทาง 100 กิโลเมตร

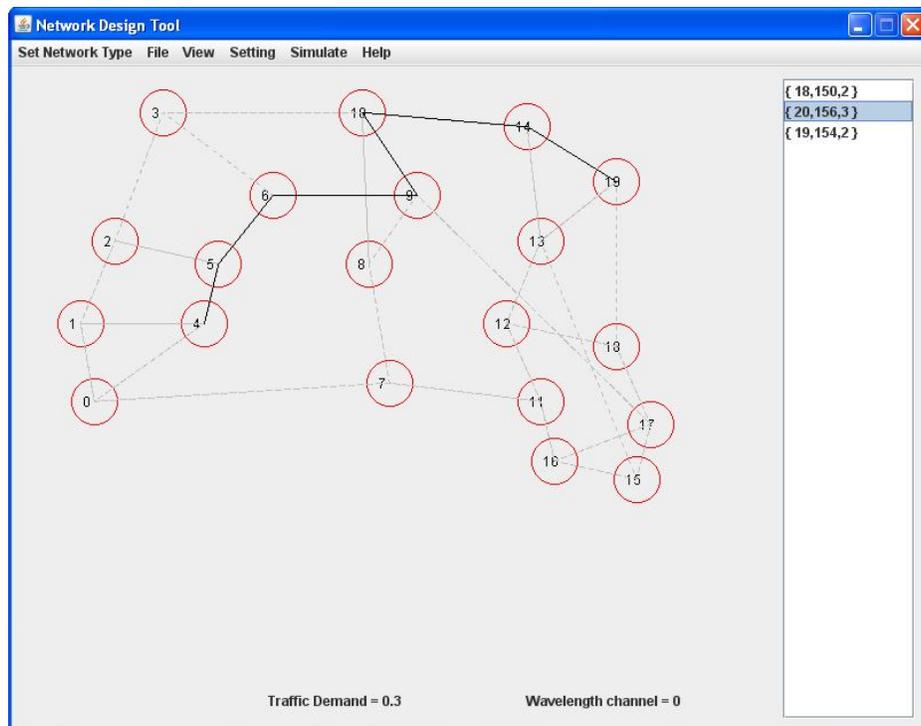
...

วงจรสัญญาณที่ 63 เชื่อมต่อจากหมายเลขที่ตั้ง Node ID 19 ไปยังหมายเลขที่ตั้ง Node ID 18 มีระยะทาง 80 กิโลเมตร

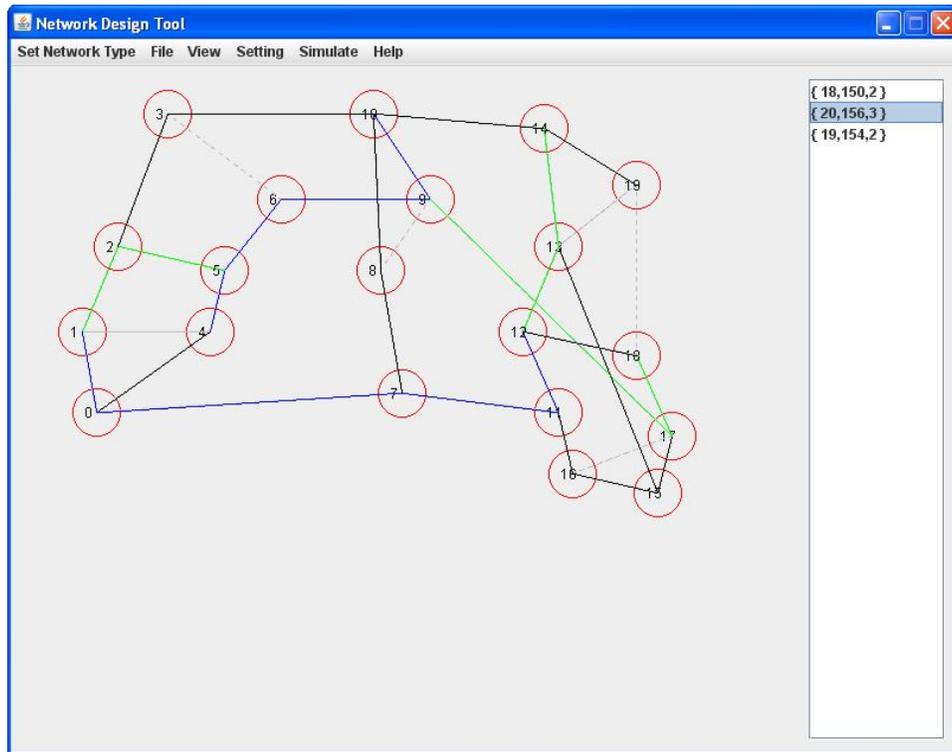




รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างเครือข่ายแบบแกนหลัก ก่อนการออกแบบการรวมเส้นทางและกำหนดช่องวงจรสัญญาณ



รูปที่ 4.12 แสดงโครงสร้างเครือข่ายแบบแกนหลัก หลังการออกแบบการรวมเส้นทางและกำหนดช่องวงจรสัญญาณ ให้กับ การเชื่อมต่อ จาก ที่ตั้งที่ 4 ไป ที่ตั้งที่ 19 ในตัวเลือกที่ 2



รูปที่ 4.13 แสดงโครงสร้างเครือข่ายแบบแกนหลัก หลังการออกแบบการรวมเส้นทางและกำหนดช่องวงจร  
สัญญาณ ให้กับการเชื่อมต่อทั้งหมดในตัวเลือกที่ 2

## บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการออกแบบและสังเคราะห์เครือข่าย โดยพิจารณาปัญหาการออกแบบเครือข่ายทั้งแบบเข้าถึงและแบบแกนหลัก ดังนี้

1. การออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึง ระยะที่ 1 โดยใช้โครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้ที่ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุด
2. การออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึง ระยะที่ 2 โดยพิจารณาให้เครือข่ายมีการฟื้นคืนวงจรแบบเชื่อมต่อระหว่างจุด (link restoration)
3. การออกแบบเครือข่ายแบบเข้าถึง ระยะที่ 3 โดยออกแบบให้เครือข่ายมีการฟื้นคืนวงจรแบบทั้งเส้นทาง (path restoration)
4. การออกแบบเครือข่ายแบบแกนหลัก โดยการออกแบบเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ
5. การออกแบบเครือข่ายแบบแกนหลัก โดยการออกแบบการรวมเส้นทางและกำหนดวงจรสัญญาณ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อแก้ปัญหาการออกแบบนี้ยังคงเป็นที่ต้องการอยู่มาก การสร้างและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่รวมเอาวิธีการใหม่ๆที่ได้จากการทำวิจัย (ดังแสดงในผลงานตีพิมพ์ หน้า 58) มาช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบระบบเครือข่ายเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับหน่วยงานต่างๆที่ต้องการติดตั้งและพัฒนา ระบบเครือข่าย และสามารถลดค่าใช้จ่ายจากการใช้ซอฟต์แวร์หรือระบบช่วยพัฒนาออกแบบเครือข่ายที่มีราคาแพงจากต่างประเทศลงได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำโปรแกรมช่วยวิเคราะห์และออกแบบระบบเครือข่าย มาช่วยในด้านการเรียนการสอน การฝึกอบรมให้กับนิสิต นักศึกษา และผู้ที่สนใจ

## เอกสารอ้างอิงของโครงการวิจัย

- [1] Y. Pomerleau, S. Chamberland and G. Pesant, 2546, “A Constraint Programming Approach for the Design Problem of Cellular Wireless Networks”, Canadian Conference on IEEE, Vol. 2, pp. 881-884.
- [2] J. Veerasamy and S. Venkatesant, 2537, “Effect of Traffic Splitting on Link and Path Restoration Planning”, Proceedings of IEEE International Conference, Computer Science Program, University of Texas at Dallas, pp.1867-1871.
- [3] J. Veerasamy, S. Venkatesant and J.C. Shah, 2537, “Effect of Traffic Splitting on Link and Path Restoration Planning”, Proceedings of Global Telecommunications Conference 1994 GLOBECOM '94 Communications The Global Bridge IEEE, 28 Nov.-2 Dec, Vol. 3, pp. 1867-1871.
- [4] S. Ramamurthy and B. Mukherjee, 2542, “Survivable WDM Mesh Networks II Restoration”, Proceedings of ICC '99 1999 IEEE International Conference, 6-10 June, Vol. 3, pp. 2023-2030.
- [5] J. Wang, L. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee, 2545, “Path vs. Subpath vs. Link Restoration for Fault Management in IP-over-WDM Networks: performance comparisons using GMPLS control signaling”, Communications Magazine, IEEE, Nov. 2002, Vol. 40, Issue 11, pp. 80-87.
- [6] A. Dutta and P. Kubat, 2542, “Design of Partially Survivable Networks for Cellular Telecommunication Systems”, European Journal of Operational Research, Vol. 118, pp. 52-64.
- [7] LA. Cox and JR. Sanchez, 2543, “Designing Least-cost Survivable Wireless Backhaul Networks”, Journal of Heuristics, Vol. 6, pp. 525-540.
- [8] C. Charnsripinyo and D. Tipper, 2546, “Topological Design of Survivable Wireless Access Networks”, The 4th International Workshop on Design of Reliable Communication Networks (DRCN2003), 19-22 October, 2003, Banff, Alberta, Canada, pp. 371-378.
- [9] D. Tipper, T. Dahlberg, H. Shin and C. Charnsripinyo, 2545, “Providing Fault Tolerance in Wireless Access Networks”, IEEE Communication Magazine, January 2002, Vol. 40, No. 1, pp. 58-64.
- [10] D. Tipper, C. Charnsripinyo, H. Shin and T. Dahlberg, 2545, ‘Survivability Analysis for Mobile Cellular Networks’, CNDS2002, 27-31 January, 2002, San Antonio, Texas.
- [11] RH. Jan, 2536, “Design of Reliable of Network”, Computer and Operation research, Vol. 20, pp. 25-43.

- [12] A. Kumar, R.M. Pathark, YP. Gupta, and HR. Parsaei, 2538, "A Genetic Algorithm for Distributed System Topology Design", *Computer and Industrial Engineering*, Vol. 28, pp. 659-670.
- [13] A. Kumar, R.M. Pathark and YP. Gupta, 2538, "Genetic-algorithm Base Reliability Optimization for Computer Network Expansion", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 44, pp. 63-72.
- [14] K. Suteeca and N. Wattanapongsakorn, 2549, "Reliability Optimization of Communication Network Design using Genetic Algorithm", *Proceedings of 21st International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC2006)*, July 10-13, Chiang Mai, Thailand, pp.213-216.
- [15] DW. Coit, and AE. Smith, 2539, "Reliability Optimization of Series-parallel System Using Genetic Algorithm", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol.5, pp. 4676-4681.
- [16] R. Teixeira, TG. Griffin, MGC. Resende and J. Rexford, 2550, "TIE Breaking: Tunable Interdomain Egress Selection", *Networking IEEE/ACM Transactions*, Vol. 15, Issue 4, pp.761-774.
- [17] P. Leesutthipornchai, N. Wattanapongsakorn and C. Charnsripinyo, "Cellular Wireless Network Design with Genetic Algorithm", *Proceedings of the 2007 ECTI Conference*, 9-11 May 2007, Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand, pp 1163-1166.
- [18] P. Leesutthipornchai, N. Wattanapongsakorn and C. Charnsripinyo, "Cellular Wireless Network Design and Processing with Grid Cluster", *Proceedings of the 2007 TGCC Conference*, 23-24 August 2007, Rama Garden Hotel, Bangkok, Thailand, pp 20-23.
- [19] P. Leesutthipornchai, N. Wattanapongsakorn and C. Charnsripinyo, "Cellular Wireless Network Design with Reliability Consideration", *Proceedings of the 2007 ICQR Conference*, 5-7 November 2007, Imperial Maeping, Chiang Mai, Thailand.
- [20] YJ. Han and WS. Seung, 2548, "A Binary (0-1) Linear Program Formulation for the Placement of Limited-range Wavelength Converters in Wavelength-routed WDM Networks", *Lightwave Technology, Journal of Publication*, Vol. 23, Issue 10, pp 3076-3091.
- [21] M. Pióro, A. Jüttner, J. Harmatos, Á. Szentesi, P. Gajowniczek and A. Mysłtek, 2544, "Topological Design of Telecommunication Networks", *17<sup>th</sup> International Teletraffic Congress*, Salvador da Bahia, Brazil.
- [22] M. Tornatore, G. Maier and A. Pattavina, 2548, "Availability Design of Optical Transport Networks", *IEEE Journal on selected areas in communications*, Vol. 23, No. 8, August 2005, pp. 1520-1532.

- [23] MA. Rahman, A. Pakstas and ZW. Fank, 2548, "An Approach to Integration of Network Design and Simulation Tools", 8th International Conference on Telecommunications - ConTEL 2005, June 15-17, 2005, Zagreb, Croatia, pp 173-180.
- [24] V. Pasiyas, DA. Karras and RC. Papademetriou, 2551, "On the Efficiency of Hierarchical Network Design", The IASTED Conference on Applied Simulation and Modelling Confu, Greece, June 23 – 25, 2008.
- [25] F. Robledo and G. Rubino, "Network Design", INRIA;  
Available : <http://ralyx.inria.fr/2004/Raweb/armor/uid35.html> [18 May 2551]
- [26] A. Adhya and D. Datta, 2552, "Design Methodology for WDM Backbone Networks using FWM-aware Heuristic Algorithm", Journal of Optical Switching and Networking: First International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems (ANTS 2007), Vol. 6, January 2009, pp. 10-19.
- [27] L. Guo, J. Cao, H. Yu and L. Li, 2549, "Path-based Routing Provisioning with Mixed Shared Protection in WDM Mesh Networks", Journal of Lightwave Technology, Vol.24, No.3, March 2006, pp.1129-1141.
- [28] P. Leesutthipornchai, C. Charnsripinyo and N. Wattanapongsakorn, 2553, "Solving Multi-Objective Routing and Wavelength Assignment in WDM Network using Hybrid Evolutionary Computation Approach", Journal on Computer Communications, Vol. 33, No.18, 15 December 2010, pp. 2246-2259.
- [29] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, 2545, "A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.6, No.2, April 2002, pp.182-197.
- [30] O. Awwad, AI. Al-Fuqaha and A. Rayes, 2550, "Traffic Grooming, Routing, and Wavelength Assignment in WDM Transport Networks with Sparse Grooming Resources", International Journal of Computer Communications, Vol.30, No.18, December 2007, pp.3508-3524.
- [31] R. Dutta and GN. Rouskas, 2545, "Traffic Grooming in WDM Networks: Past and Future", IEEE Network, Vol.16, No.6, November-December 2002, pp.46-56.
- [32] AJ. Nebro, JJ. Durillo, F. Luna, B. Dorronsoro and E. Alba, 2552, "MOCCell: A Cellular Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization", International Journal of Intelligent Systems, Vol.24, No.7, July 2009, pp. 726-746.

- [33] KC. Tan, TH. Lee and EF. Khor, 2544, "Evolutionary Algorithms for Multi-Objective Optimization: Performance Assessments and Comparisons", Proceedings of the 2001 IEEE Congress on Evolutionary Computation, 27-30 May 2001, Seoul, Korea, pp.979-986.
- [34] P. Leesutthipornchai, N. Wattanapongsakorn and C. Charnsripinyo, 2551, "Providing Network Restoration in Wireless Backhaul Network Design", Proceedings of the Asian International Workshop on Advanced Reliability Modeling (AIWARM 2008) Conference, 23-25 October 2008, Taichung, Taiwan.
- [35] C. Charnsripinyo, P. Leesutthipornchai and N. Wattanapongsakorn, 2551, "Providing Fault Tolerance in Wireless Backhaul Network Design with Path Restoration", Proceedings of the 2008 ARES - The International Dependability Conference, 4-7 March 2008, Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain, pp.604-609.

## ผลงานตีพิมพ์

1. P. Leesutthipornchai, C. Charnsripinyo and N. Wattanapongsakorn, 2553, "Path Level Traffic Grooming Strategies for Multi-Objective Design in WDM Networks", Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2010), 19-21 May 2010, Chiang Mai, Thailand, pp.661-665.
2. P. Leesutthipornchai, C. Charnsripinyo and N. Wattanapongsakorn, 2553, "Multi-Objective Traffic Grooming in WDM Network using NSGA-II Approach", Proceedings of the 6th International Conference on Networked Computing (INC 2010), May, Gyeongju, Korea, pp.1-6.
3. P. Leesutthipornchai, N. Wattanapongsakorn and C. Charnsripinyo, 2552, "Solving Multi-Objective Routing and Wavelength Assignment in WDM Network using NSGA-II Approach", The National Computer Science and Engineering Conference (NCSEC), Bangkok, Thailand, November 4-6, 2009.
4. P. Leesutthipornchai, N. Wattanapongsakorn and C. Charnsripinyo, 2552, "Multi-Objective Optimization Techniques Based on Genetic Algorithm", The National Computer Science and Engineering Conference (NCSEC), Bangkok, Thailand, November 4-6, 2009.

คู่มือการใช้งาน