บทที่ 5

วิธีการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายที่มีการส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนดมากกว่า 1 คู่โหนด

ในการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายในทางปฏิบัติจริงเพื่อหาข่ายเชื่อมโยงที่สำคัญเพื่อทำการป้องกันความเสียหาย รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อให้ได้ความจุที่สูงนั้น การวิเคราะห์รูปแบบของการส่งข้อมูลจากเพียงหนึ่งคู่โหนดเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติจริง เพราะโดยทั่วไปแล้วปริมาณความต้องการข้อมูลระหว่างคู่โหนดจะมีลักษณะที่มีได้หลายคู่โหนด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ขยายงานและนำเสนอการวิเคราะห์หาความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายที่มีคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลมากกว่า 1 คู่โหนด

5.1 แบบจำลองการวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีผลกระทบต่อความจุของระบบมากที่สุดเมื่อมีการส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนดมากกว่า 1 คู่โหนด

การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการส่งข้อมูลที่สูงที่สุดในขณะที่ระบบโครงข่ายเกิดความเสียหายอย่างร้ายแรงที่สุดโดยการแข่งขันกันระหว่างเราเตอร์กับผู้ทำลายนั้น ค่าเป้าหมายของเกมจะเป็นค่า EAC สำหรับกรณีที่มีคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลมากกว่า 1 คู่โหนด กลุ่มของเราเตอร์ในแต่ละคู่โหนดจะเลือกเส้นทางการส่งข้อมูลแบบสุ่ม (stochastic routing) โดยพยายามที่จะทำให้ค่า EAC โดยรวมของระบบมีค่าสูงที่สุด ในขณะเดียวกันผู้ทำลายจะทำลายโครงข่ายในรูปแบบต่างๆเพื่อทำให้ค่า EAC มีค่าต่ำที่สุด โดยในหัวข้อนี้เราจะนิยามว่าความเสียหายแบบที่ j หมายถึงข่ายเชื่อมโยงที่ i เกิดความเสียหายเช่นเดียวกับกรณีการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายที่มีการส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนดเดียว

ในการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายแบบที่มีหลายคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลนั้นมีจุดที่แตกต่างจากกรณีที่มีคู่โหนดเพียงคู่โหนดเดียวคือ เมื่อพิจารณาการใช้งานข่ายเชื่อมโยงใดข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง ค่าเฉลี่ยของปริมาณการใช้งานความจุของแต่ละคู่โหนดความต้องการข้อมูลบนข่ายเชื่อมโยงเดียวกัน จะต้องมีค่าที่น้อยกว่าค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงนั้น และเนื่องจากการที่คู่โหนดความต้องการข้อมูลแต่ละคู่มีโอกาสที่จะร่วมกันใช้งานข่ายเชื่อมโยงใดข่ายเชื่อมโยงหนึ่งพร้อม ๆ กันได้ ณ ขณะเวลาใดเวลาหนึ่ง ดังนั้นอุปกรณ์โครงข่ายจำเป็นที่จะต้องเป็นระบบที่มีหน่วยความจำ (buffer system) ซึ่งสามารถพักข้อมูลไว้ได้ช่วงเวลาหนึ่ง ทั้งนี้เพื่อป้องกันการสูญหายของข้อมูลเมื่อลักษณะของการส่งข้อมูลมีปริมาณเพิ่มสูงมาก ณ ขณะใดขณะหนึ่ง (traffic surge/burst traffic) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาระบบโดยเฉลี่ยแล้วการใช้งานข่ายเชื่อมโยงใด ๆ จะต้องไม่เกินความสามารถในการให้บริการของข่ายเชื่อมโยงนั้น ๆ ดังนั้นการวิเคราะห์ที่จะเสนอนี้จะสามารถนำไปวิเคราะห์ได้ก็ต่อเมื่ออุปกรณ์บนระบบโครงข่ายมีความสามารถที่จะเก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำได้ ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของอุปกรณ์โครงข่ายที่มีการใช้งานจริงอยู่ทั่วไป

เกมการส่งข้อมูลระหว่างกลุ่มคู่โหนดที่ถูกควบคุมโดยผู้เล่นเราเตอร์และผู้ทำลายสามารถ

นำมาพิจารณาได้ในลักษณะเดียวกับกรณีการวิเคราะห์เกมการส่งข้อมูลที่มีเพียงคู่โหนดเดียว โดยจำเป็นต้องกำหนดพารามิเตอร์เพิ่มเติมดังนี้ให้

$Z(k,m)$ แทนตัวแปรดัชนีที่ใช้ระบุว่าเส้นทาง k สามารถถูกเลือกใช้โดยคู่โหนด m ได้หรือไม่

$$Z(k,m) = \begin{cases} 1, k \in P(m) \\ 0, otherwise \end{cases} \tag{5.1}$$

และ $\delta(k,i)$ แทนตัวแปรดัชนีที่ใช้ระบุว่าข่ายเชื่อมโยง i อยู่บนเส้นทาง k หรือไม่

$$\delta(k,i) = \begin{cases} 1, i \in L(k) \\ 0, otherwise \end{cases} \tag{5.2}$$

เราสามารถที่จะวิเคราะห์เกมลักษณะนี้ในรูปแบบของ การแก้ปัญหาเกมขีดสูงสุดของขั้นต่ำได้ โดยเราเตอร์จะเลือกรูปแบบการใช้เส้นทาง $\mathbf{H}$ ที่ดีที่สุดในการส่งข้อมูลสำหรับแต่ละคู่โหนด เพื่อให้ได้ค่า EAC สูงที่สุดจากการแก้ปัญหา $\max_{\mathbf{H}} \min_{\mathbf{Q}} \mathbf{H}^T\mathbf{RQ}$ หรือผู้ทำลายสามารถหารูปแบบการทำลายที่ร้ายแรงที่สุด $\mathbf{Q}$ ได้โดยการแก้ปัญหา $\min_{\mathbf{Q}} \max_{\mathbf{H}} \mathbf{H}^T\mathbf{RQ}$ โดยปัญหาทั้งสองข้างต้นจะถูกจำกัดด้วยเงื่อนไข

$$\sum_{k=1}^{K} \delta(k,i) h_k R_k \leq C_i; \forall i \tag{5.3}$$

$$\sum_{k=1}^{K} Z(k,m) h_k \leq 1; \forall m \tag{5.4}$$

$$\mathbf{H} \geq \mathbf{0} \tag{5.5}$$

$$\sum_{j=1}^{J} q_j = 1, \mathbf{Q} \geq \mathbf{0} \tag{5.6}$$

เนื่องจากคู่โหนดต่างๆ มีโอกาสที่จะใช้งานข่ายเชื่อมโยงเดียวกันได้ ซึ่งอาจจะทำให้มีการใช้งานข่ายเชื่อมโยงใดข่ายเชื่อมโยงหนึ่งมากเกินความสามารถที่ข่ายเชื่อมโยงนั้นจะสามารถส่งได้ และทำให้ค่าความล่าช้าเพิ่มขึ้นสูงมาก ดังนั้นเงื่อนไข (5.3) จึงถูกกำหนดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหานี้ เงื่อนไข (5.4) หมายถึง ความน่าจะเป็นที่จะเลือกส่งข้อมูลของแต่ละคู่โหนด m ไปบนเส้นทางต่าง ๆ จะต้องมีค่ารวมกันน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 โดยส่วนค่าความน่าจะเป็นในกรณีที่มีค่าน้อยกว่า 1 นั้น เป็นกรณีที่เราเตอร์บางตัวเลือกตัดสินใจไม่ส่งข้อมูล เช่น เมื่อการส่งข้อมูลสำหรับคู่โหนดนั้นจะเป็นผลเสียมากกว่าผลดีสำหรับระบบโดยรวม เงื่อนไข (5.5) หมายถึง ความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลของผู้เล่นเราเตอร์นั้น จะต้องมีค่าที่ไม่น้อยกว่า 0 และเงื่อนไขสุดท้าย (5.6) หมายถึง ความน่าจะเป็นในการเลือกทำลายข่ายเชื่อมโยงของผู้ทำลาย จะต้องมีค่าที่ไม่น้อยกว่า 0 และจะต้องมีค่ารวมกันได้เป็น 1

การแก้ปัญหาขีดสูงสุดของขั้นต่ำ ดังแสดงไว้ข้างต้นนั้นไม่สามารถที่จะแปลงให้อยู่ในรูปของการแก้ปัญหาโดยการประยุกต์ใช้วิธีกำหนดการเชิงเส้น ดังที่เสนอใน [24] ได้ เนื่องจาก

การที่ต้องแก้ปัญหาเงื่อนไขความจุของข่ายเชื่อมโยงที่จำกัดด้วย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอวิธีการแก้ปัญหาขีดสูงสุดของขั้นต่ำข้างต้นด้วยแบบจำลองของการเล่นเกมของผู้เล่นทั้งสองคนแยกกัน และทำการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นของผู้เล่นเกมในแต่ละรอบของการเล่นเกมด้วยวิธีการ MSA โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดให้ $\phi(k)$ แทนจำนวนเส้นทางทั้งหมดที่คู่โหนดซึ่งใช้เส้นทาง k สามารถเลือกใช้งานได้ กำหนดค่าเริ่มต้นให้ เราเตอร์มีความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางส่งข้อมูล (h_k) เป็น $h_k = 1/\phi(k)$ และทางฝั่งผู้ทำลายจะมีความน่าจะเป็นที่จะเลือกรูปแบบการทำลายต่างๆ (q_j) เป็น $q_j = 1/J$

2. กำหนดรอบของการเล่นเกมเริ่มแรก $(n = 1)$

3. เมื่อกำหนดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกรูปแบบการทำลาย $\mathbf{Q}$ เราเตอร์คำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทาง $\mathbf{H}^* = [h_1^*, \ldots, h_K^*]^T$ จากการแก้ปัญหากำหนดการเชิงเส้น

$$\mathbf{H}^* = \arg\max_{\mathbf{H}} EAC = \arg\max_{\mathbf{H}} \mathbf{H^T RQ}$$

โดยสอดคล้องกับเงื่อนไข (5.3)-(5.5)

4. เราเตอร์ปรับค่าความน่าจะเป็นของแผนการเลือกเส้นทาง (h_k) โดยปรับปรุงด้วยค่าความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทาง $(\mathbf{H}^*)$ ที่ได้เลือกไว้ในขั้นตอนที่ 3 ตามระเบียบวิธี MSA ดังสมการ

$$h_k \leftarrow \left(\frac{1}{n}\right) h_k^* + \left(\frac{n-1}{n}\right) h_k$$

5. เมื่อทราบค่าความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางของเราเตอร์อันใหม่จากการคำนวณหา $\mathbf{H}$ ผู้ทำลายคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการเลือกรูปแบบที่ส่งผลกระทบมากที่สุดในการทำลาย $\mathbf{Q}^* = [q_1^*, \ldots, q_J^*]^T$ จากการแก้ปัญหากำหนดการเชิงเส้น

$$\mathbf{Q}^* = \arg\min_{\mathbf{Q}} EAC = \arg\min_{\mathbf{Q}} \mathbf{H^T RQ}$$

โดยสอดคล้องกับเงื่อนไข (5.6)

6. ผู้ทำลายปรับค่าความน่าจะเป็นในการเลือกแผนการทำลาย (q_j) โดยปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในการเลือกทำลายข่ายเชื่อมโยง $(\mathbf{Q}^*)$ ดังที่ได้คำนวณไว้ในขั้นตอนที่ 5 ตามระเบียบวิธี MSA ดังสมการ

$$q_j \leftarrow \left(\frac{1}{n}\right) q_j^* + \left(\frac{n-1}{n}\right) q_j$$

7. หาค่า EAC ของระบบ ณ รอบของการเล่นเกมที่ n จากสมการ

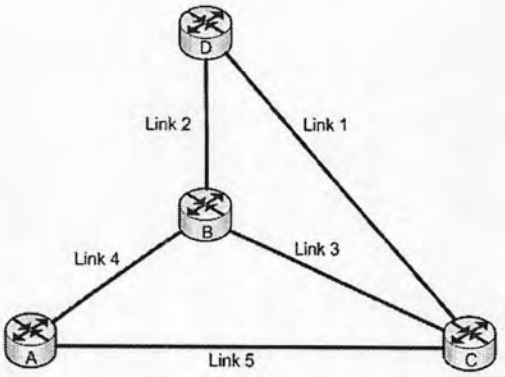
$$EAC = \sum_{k=1}^{K} \sum_{j=1}^{J} h_k q_j R_{k,j}$$

8. ปรับค่ารอบของการเล่น $n \leftarrow n + 1$ และกลับไปทำขั้นตอนที่ 3-7 ใหม่จนกระทั่งค่า EAC ที่ได้จาก (4.1) และ (4.2) มีค่าผลต่างที่น้อยกว่าค่าคงตัวค่าหนึ่ง ซึ่งจะถือว่าเกิดการลู่เข้าของค่า EAC

5.2 การวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีผลกระทบต่อความจุที่พึงได้ในการส่งข้อมูลบนโครงข่ายแบบต่าง ๆ

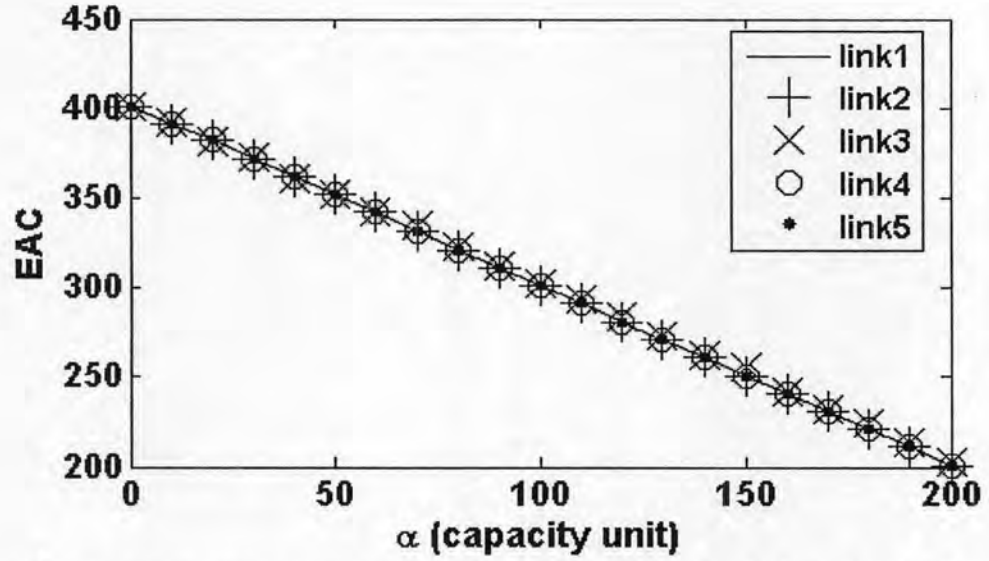
ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายในกรณีที่มีหลายคู่โหนด รวมถึงการหาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญต่อระบบโครงข่าย เพื่อทำการปรับปรุงค่าความจุซึ่งจะทำให้ระบบมีความคงทนต่อความเสียหายมากที่สุด โดยในการวิเคราะห์กรณีระบบโครงข่ายที่มีหลายคู่โหนดจะทำการทดสอบทั้งระบบโครงข่ายที่ใช้ข่ายเชื่อมโยงแบบมีทิศทางและไม่มีทิศทาง โดยกระบวนการหาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญกับระบบโครงข่าย จะยังใช้ค่า EAC เป็นตัวชี้วัดตามสมการ (4.4)

5.2.1 ระบบโครงข่ายทดสอบอย่างง่าย 4 โหนด



รูปที่ 5.1 ระบบโครงข่ายทดสอบอย่างง่าย 4 โหนด

เพื่อให้เห็นถึงผลของความเสียหายที่มีต่อค่า EAC ได้อย่างชัดเจนมากขึ้น การวิเคราะห์ในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายที่มีลักษณะการเชื่อมต่ออย่างง่าย 4 โหนดดังแสดงในรูปที่ 5.1 ที่มีขนาดความจุของข่ายเชื่อมโยงเท่ากัน โดยมีค่า 200 หน่วย เพื่อให้ระบบโครงข่ายมีคู่โหนดความต้องการส่งข้อมูลกระจายตัวกันและมีการแย่งใช้ข่ายเชื่อมโยงอย่างทั่วถึงทุกจุดบนระบบโครงข่าย กำหนดให้มีคู่โหนดความต้องการข้อมูลจาก 4 คู่โหนดได้แก่ A → D, D → A, B → C, และ C → B โดยใช้ระเบียบวิธีในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดให้กับคู่โหนดจาก



รูปที่ 5.2 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนด

เส้นทางทั้งหมด 4 เส้นทางที่สั้นที่สุด รูปที่ 5.2 แสดงผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนด จากผลการทดสอบจะพบว่า ข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงในระบบโครงข่ายนี้มีความสำคัญต่อค่า EAC เท่ากัน ได้แก่ ข่ายเชื่อมโยงที่ 1, 2, 3, 4, และ 5

การนำค่าความน่าจะเป็นที่ข่ายเชื่อมโยงจะถูกทำลายมาชี้วัดหาข่ายเชื่อมโยงที่อ่อนไหวที่สุดในระบบโครงข่ายเป็นสิ่งที่ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจากการเกิดขึ้นของคำตอบที่ได้จากความน่าจะเป็นในการจ้องทำลายข่ายเชื่อมโยง ซึ่งอาจจะมีได้หลายคำตอบที่เป็นไปได้และสามารถเกิดขึ้นได้บ่อยครั้ง ดังผลการทดสอบหาค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการเล่นเกมของระบบโครงข่ายทดสอบอย่างง่าย 4 โหนดในรูปที่ 5.1 ข้างต้น โดยค่าต่าง ๆ ณ จุดสมดุลของเกมถูกแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 จากการทดสอบเล่นเกมหลาย ๆ ครั้งจะพบว่า ค่าความน่าจะเป็นในการทำลายข่ายเชื่อมโยง ณ จุดสมดุลของเกม จะสามารถเปลี่ยนแปลงได้หลายรูปแบบของการจ้องทำลาย แต่อย่างไรก็ตามค่า EAC จะมีรูปแบบของคำตอบที่ชัดเจนกว่าการวิเคราะห์ด้วยค่าความน่าจะเป็นในการทำลายข่ายเชื่อมโยง เราสามารถนำค่า EAC มาใช้ในการวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่อ่อนไหวที่สุดในระบบโครงข่ายเพื่อชี้วัดหาจุดที่ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพก่อนได้

หากสังเกตค่าของ EAC ที่ได้รับจากเกมของโครงข่ายนี้ ณ ขณะเริ่มแรกก่อนที่จะเกิดการลดลงของค่าความจุข่ายเชื่อมโยง จะพบว่าค่า EAC ที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 400 หน่วย ทั้งนี้เนื่องจาก ระบบโครงข่ายที่มีคู่โหนดความต้องการข้อมูลดังกล่าว มีความสามารถในการส่งข้อมูลสูงสุดได้สามคู่โหนด โดยที่แต่ละคู่โหนดสามารถที่จะได้ค่าความจุสูงสุดเป็น 200 หน่วย รวมทั้งหมดเป็น 600 หน่วยความจุ อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดความเสียหายอย่างร้ายแรงที่สุดกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในระบบโครงข่ายนี้ ก็จะทำให้ค่าความจุลดลงได้สูงสุด 200 หน่วย ดังนั้นค่า EAC จึงมีค่าเท่ากับ 600 - 200 = 400 หน่วยความจุนั่นเอง จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์

ตารางที่ 5.1 ค่าความน่าจะเป็นในการทำลายข่ายเชื่อมโยงและค่า EAC ณ จุดสมดุลของเกมจากการทดสอบ 10 ครั้ง

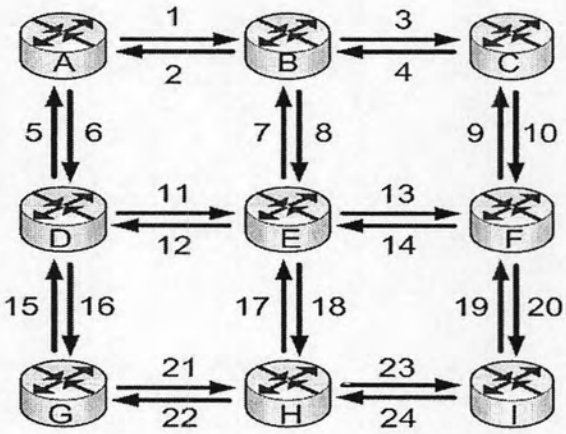
trial	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	EAC
1	0.0013	0.0003	0.0000	0.0003	0.9982	401
2	0.0010	0.9970	0.0000	0.0020	0.0000	402
3	0.0020	0.0000	0.0000	0.0010	0.9970	400
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	400
5	0.0000	0.0010	0.0000	0.9980	0.0010	400
6	0.0010	0.9980	0.0000	0.0010	0.0000	401
7	0.0000	0.0040	0.0000	0.9950	0.0010	402
8	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	400
9	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	400
10	0.0000	0.0010	0.0000	0.9980	0.0010	400

ด้วยเกม สามารถช่วยในการวิเคราะห์ระบบโครงข่าย และให้ผลลัพธ์ที่มีเหตุผลชัดเจน เราจึงสามารถนำการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเกมที่เสนอมาช่วยในการวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงในการปรับปรุงคุณภาพการให้บริการของระบบโครงข่าย ให้มีความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายต่อความเสียหายอย่างร้ายแรงที่สุดได้

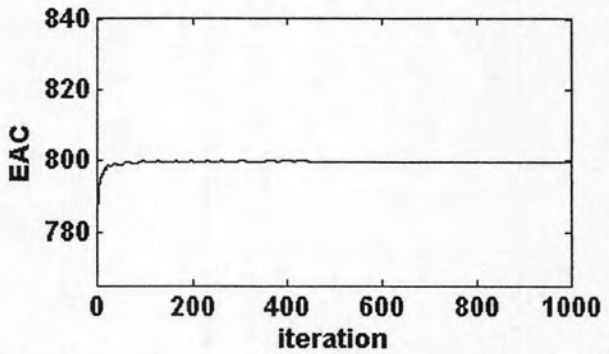
5.2.2 ระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด

จากแบบจำลองของเกมสำหรับกรณีหลายคู่โหนด เราสามารถหาค่า EAC จากเกมเพื่อนำมาชี้วัดถึงความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายได้ พิจารณาระบบโครงข่ายทดสอบกริด 9 โหนด ดังแสดงในรูปที่ 5.3 กำหนดให้ทุกข่ายเชื่อมโยงมีขนาดความจุเป็น 200 หน่วยความจุ เพื่อให้ระบบโครงข่ายมีคู่โหนดความต้องการส่งข้อมูลกระจายตัวกันและมีการแย่งใช้ข่ายเชื่อมโยงอย่างทั่วถึงทุกจุดบนระบบโครงข่าย กำหนดให้มีคู่โหนดความต้องการส่งข้อมูลจากคู่โหนด 5 คู่โหนดได้แก่ A $\rightarrow$ I, C $\rightarrow$ G, H $\rightarrow$ A, I $\rightarrow$ A, และ G $\rightarrow$ C โดยทุกคู่โหนดจะใช้เส้นทางที่เป็นไปได้ที่สั้นที่สุด 6 เส้นทางและใช้จำนวนช่วงเชื่อมต่อ เป็นค่าที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด สำหรับแต่ละสถานะของระบบโครงข่าย ค่า EAC สามารถที่จะหาได้จากผลของการลู่เข้าสู่ค่า ณ จุดสมดุลของเกมด้วยระเบียบวิธีการหาค่า EAC ที่เสนอ และเมื่อค่าเป้าหมายของผู้เล่นเราเตอร์ (4.1) กับค่าเป้าหมายของผู้ทำลาย (4.2) มีค่าแตกต่างกันต่ำกว่าค่าคงตัวค่าหนึ่ง เราก็สามารถที่จะถือได้ว่าค่า EAC ณ จุดนั้นเป็นค่า EAC ณ จุดสมดุลของเกม ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งจุดสมดุลนี้เป็นจุดสมดุลของแนชที่ผู้เล่นทั้งสองไม่สามารถที่จะเพิ่มค่าเป้าหมายให้ตัวเองได้ แม้ว่าผู้เล่นนั้นจะสามารถเปลี่ยนแปลงแผนการของตัวเองให้เหมาะสมที่สุดได้ก็ตาม

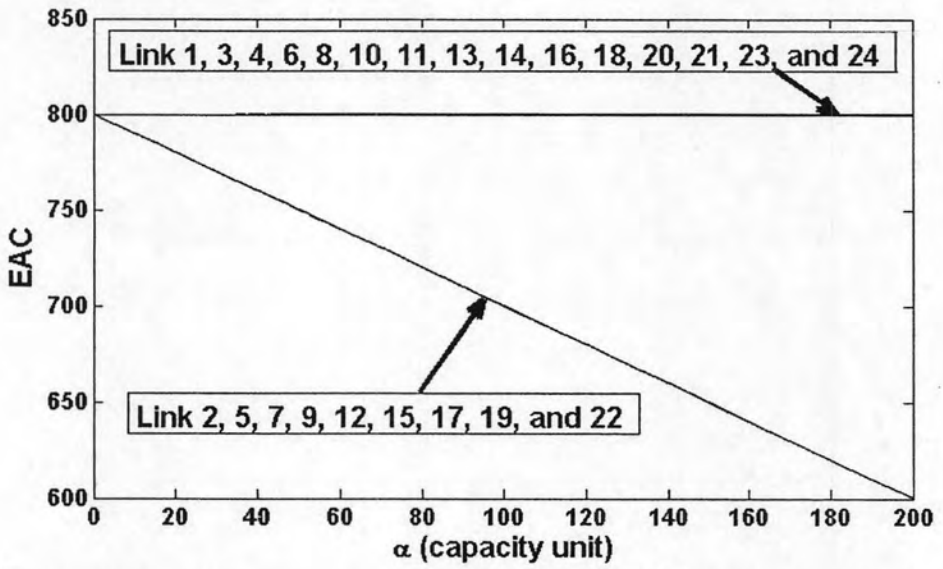
ผลการจากวิเคราะห์หาผลกระทบจากความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สามารถ



รูปที่ 5.3 ระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด



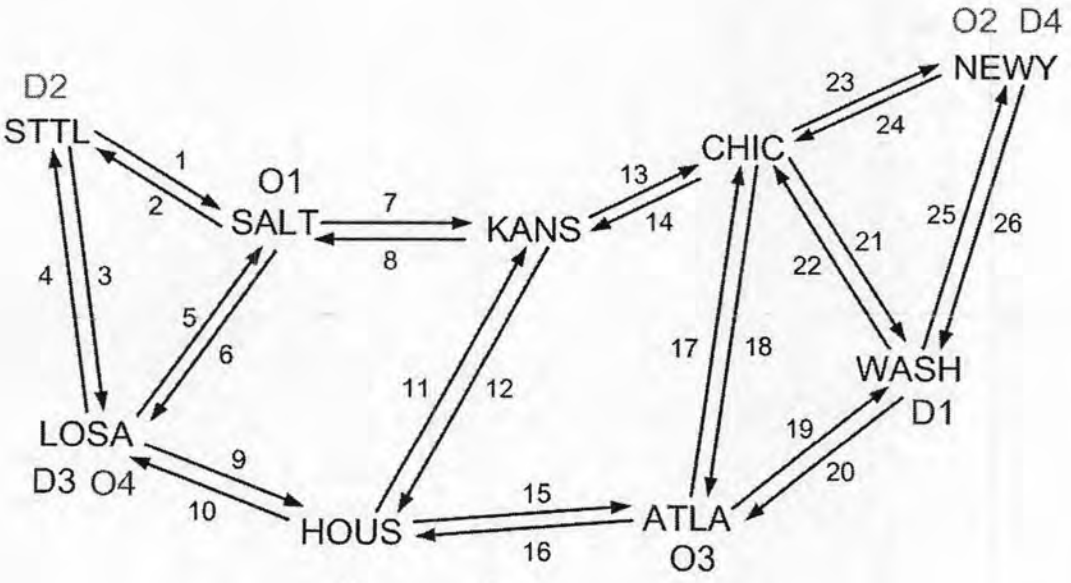
รูปที่ 5.4 การลู่เข้าของค่า EAC ในระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด



รูปที่ 5.5 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด

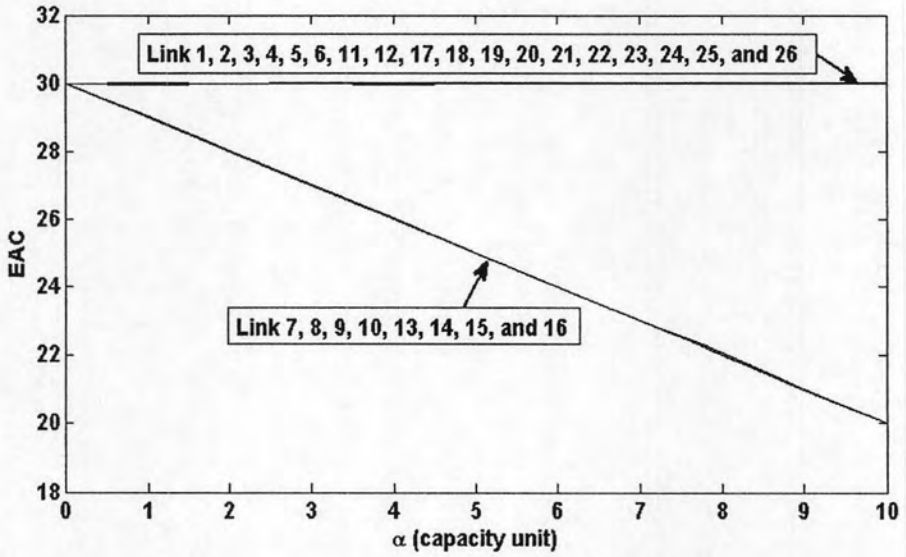
แสดงได้ในรูปที่ 5.5 เมื่อระบบโครงข่ายมีขนาดความจุของข่ายเชื่อมโยงลดลง ค่า EAC ที่ระบบจะได้รับจะมีค่าลดลงหรือมีค่าคงตัว ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับ เส้นทางที่ใช้ส่งข้อมูลของคู่โหนดความต้องการข้อมูลนั้นว่ามีการใช้งานข่ายเชื่อมโยงที่ถูกทำลายหรือไม่ ในกรณีของระบบโครงข่ายที่ใช้ในการทดสอบ เราสามารถที่จะวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่เป็นข่ายเชื่อมโยงที่มีผลต่อความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายได้ด้วยสมการ (4.4) โดยถ้าเราต้องการจะวิเคราะห์ถึงความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายเมื่อข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายแบบทั้งหมด ข่ายเชื่อมโยงที่ให้ค่า EAC น้อยที่สุดจะเป็นข่ายเชื่อมโยงที่ต้องทำการปรับปรุงก่อน ในที่นี้ได้แก่ ข่ายเชื่อมโยงที่ 2, 5, 7, 9, 12, 15, 17, 19, และ 22 ในทางตรงกันข้าม ถ้าหากเราต้องการที่จะป้องกันเหตุการณ์ความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงไม่ได้ถูกทำลายทั้งหมด ข่ายเชื่อมโยงที่ต้องทำการปรับปรุงก่อนจะสามารถหาได้จากสมการ (4.4) โดยขึ้นกับระดับปริมาณของความเสียหายที่เราต้องการจะวิเคราะห์ จะเห็นได้ว่า ข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ในระบบโครงข่ายเพื่อการทดสอบนี้สามารถที่จะเป็นได้ทั้งข่ายเชื่อมโยงที่มีทิศทางและข่ายเชื่อมโยงที่ไม่มีทิศทาง ดังที่แสดงในตัวอย่างของระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนดและระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด

5.2.3 ระบบโครงข่ายแกน Abilene

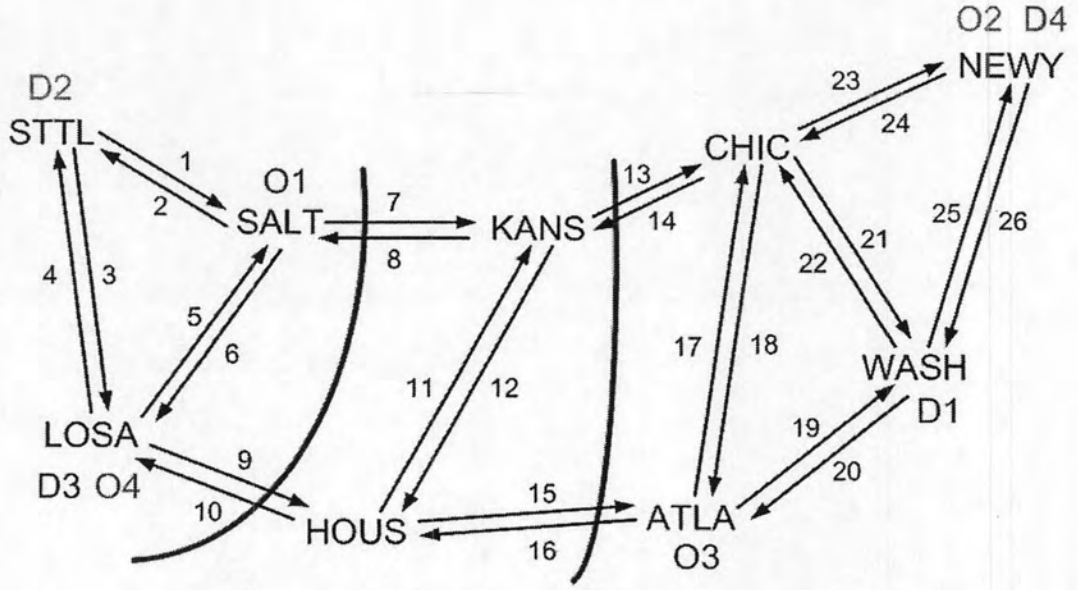


รูปที่ 5.6 ระบบโครงข่ายแกน Abilene

นอกจากการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายสมมติ ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาจุดที่ต้องทำการปรับปรุงค่าความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายแล้ว การทดสอบเพื่อทดสอบกับระบบโครงข่ายที่มีการใช้งานอยู่จริงในปัจจุบัน ก็เป็นสิ่งสำคัญเช่นเดียวกัน ดังนั้นการทดสอบนี้จะทำการทดสอบระเบียบวิธีการหาข่ายเชื่อมโยงที่สำคัญต่อค่าความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่าย กับระบบโครงข่ายแกน Abilene เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ในกรณีที่มีเพียงคู่โหนดความต้องการเพียงคู่โหนดเดียว รูปที่ 5.6 แสดงระบบโครงข่ายแกน Abilene ที่มีข่ายเชื่อมโยงเป็นแบบ



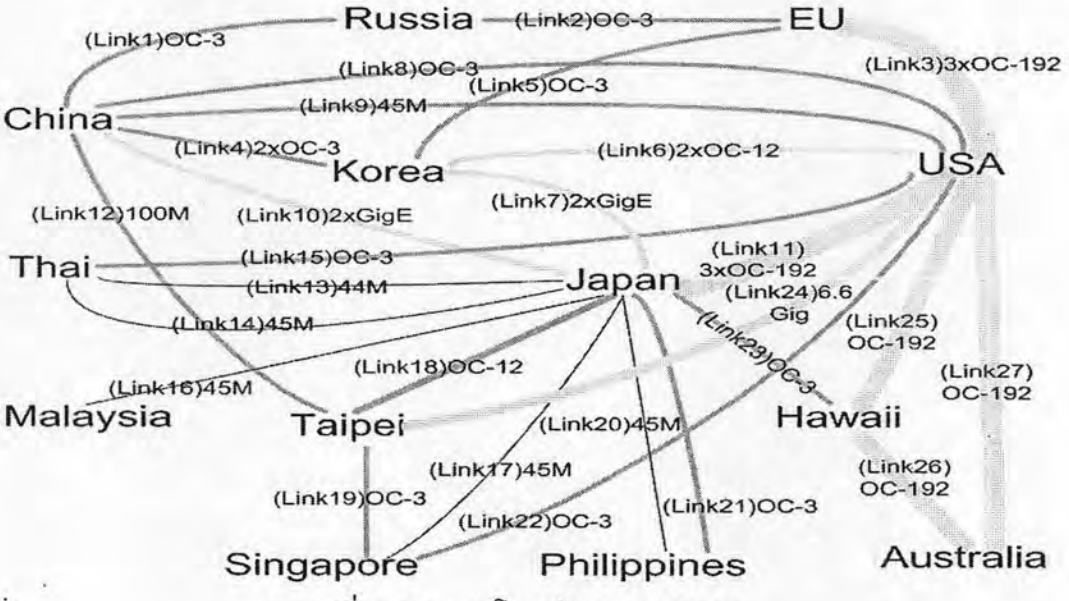
รูปที่ 5.7 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายแกน Abilene



รูปที่ 5.8 ระบบโครงข่ายแกน Abilene และชุดของเซตตัด

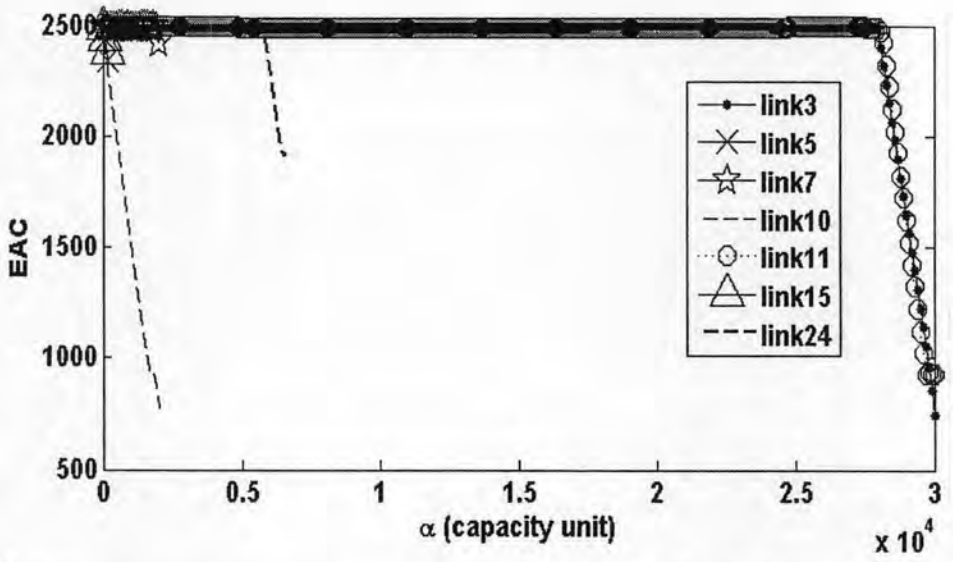
มีทิศทาง โดยทุกข่ายเชื่อมโยงมีขนาดความจุเป็น 10 หน่วย เพื่อให้ระบบโครงข่ายมีคู่โหนดความต้องการส่งข้อมูลกระจายตัวกันและมีการแย่งใช้ข่ายเชื่อมโยงอย่างทั่วถึงทุกจุดบนระบบโครงข่าย กำหนดให้มีคู่โหนดความต้องการข้อมูล 4 คู่โหนดด้วยกันได้แก่ คู่โหนดจาก SALT → WASH, NEWY → STTL, ATLA → LOSA, และ LOSA → NEWY โดยใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับแต่ละคู่โหนดเป็นจำนวน 5 เส้นทางที่เป็นไปได้ที่สั้นที่สุด และใช้ค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนช่วงเชื่อมต่อในการตัดสินใจเลือกเส้นทาง ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายแกน Abilene สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 5.7 จากผลการทดสอบ ข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญและควรทำการปรับปรุงก่อนจะได้แก่ข่ายเชื่อมโยงที่ทำให้ค่า EAC ลดลงมากที่สุด เมื่อเกิดความเสียหายขึ้น ซึ่งได้แก่ ข่ายเชื่อมโยงที่ 7, 8, 9, 10, 13, 14, 15 และ 16 สังเกตว่า ชุดของข่ายเชื่อมโยงเหล่านี้ จะเป็นสมาชิกของเซตตัด ซึ่งสามารถทำให้การเชื่อมต่อของทุกคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลแยกออกจากกันได้โดยสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าเราสามารถนำระเบียบวิธีการหาค่า EAC มาช่วยในการวัดประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของระบบโครงข่ายต่อความเสียหายอย่างร้ายแรงที่สุดกับระบบโครงข่ายที่มีการใช้งานจริงในทางปฏิบัติได้

5.2.4 ระบบโครงข่ายแกน APAN



รูปที่ 5.9 ระบบโครงข่ายแกน APAN

การวิเคราะห์หาความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายแกน Abilene ดังที่เสนอข้างต้น อาจจะสังเกตได้ง่ายเนื่องจากทุกข่ายเชื่อมโยงมีค่าความจุที่เท่ากันทุกข่ายเชื่อมโยง และกลุ่มของคู่โหนดมีการแบ่งแยกออกเป็นกลุ่มอย่างชัดเจน ทำให้ในบางครั้งเราอาจจะนำทฤษฎีการไหลสูงสุด มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายที่ไม่ซับซ้อนได้ อย่างไรก็ตามเมื่อระบบโครงข่ายมีการวางตัวของแต่ละคู่โหนดที่ซับซ้อนรวมทั้งมีค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงที่ไม่เท่า



รูปที่ 5.10 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายแกน APAN (การลดลงของข่ายเชื่อมโยงอื่นๆ ที่ไม่อยู่ในรูปไม่ส่งผลต่อการลดลงของค่า EAC)

กันแล้ว วิธีการวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่สำคัญจากทฤษฎีการไหลสูงสุด อาจจะไม่สามารถนำมาใช้ช่วยในการตัดสินใจในการระบุถึงข่ายเชื่อมโยงที่สำคัญกับประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบได้ ดังนั้นในการวิเคราะห์ส่วนนี้จึงจะทำการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายที่มีลักษณะซับซ้อน ซึ่งมีหลายคู่โหนดความต้องการข้อมูลและมีความจุที่แตกต่างกันของแต่ละข่ายเชื่อมโยง โดยจะใช้ระบบโครงข่ายแกน APAN ดังแสดงในรูปที่ 5.9 มาทำการทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่จำเป็นสำหรับทำการปรับปรุง เพื่อให้ได้ระดับคุณภาพของการให้บริการที่สูงสำหรับลักษณะความต้องการข้อมูลหลายคู่โหนด เพื่อให้ระบบโครงข่ายมีคู่โหนดความต้องการส่งข้อมูลกระจายตัวกันและมีการแย่งใช้ข่ายเชื่อมโยงอย่างทั่วถึงทุกจุดบนระบบโครงข่าย กำหนดให้มีคู่โหนดความต้องการข้อมูลจาก China → Australia, USA → Singapore, EU → Japan, Thai → USA, Taipei → EU, และ Russia → Singapore โดยใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับแต่ละคู่โหนดเป็นจำนวน 5 เส้นทางที่เป็นไปได้และใช้ค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนช่วงเชื่อมต่อในการตัดสินใจเลือกเส้นทาง กำหนดให้ข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายเชื่อมโยงมีความจุดังแสดงในตารางที่ 4.3 รูปที่ 5.10 แสดงผลจากการวิเคราะห์หาผลกระทบของการลดลงของค่าความจุข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายแกน APAN จากผลการทดสอบ จะพบว่าข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญที่สุดต่อค่า EAC ได้แก่ ข่ายเชื่อมโยงที่ 10, 24, 11 และ 3 ตามลำดับ โดยความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงอื่น ๆ นอกเหนือจากข่ายเชื่อมโยงทั้งสี่นี้ ไม่ส่งผลต่อค่า EAC ที่ระบบโครงข่ายจะได้รับแต่อย่างใด

เราจะเห็นได้ว่าเมื่อระบบโครงข่ายมีลักษณะที่ซับซ้อนและการใช้งานจากคู่โหนดความต้องการข้อมูลมากขึ้น การวิเคราะห์โดยการสังเกตอาจจะทำได้ยากหรือทำไม่ได้เลยในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม เราสามารถนำกรรมวิธีการวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญต่อ

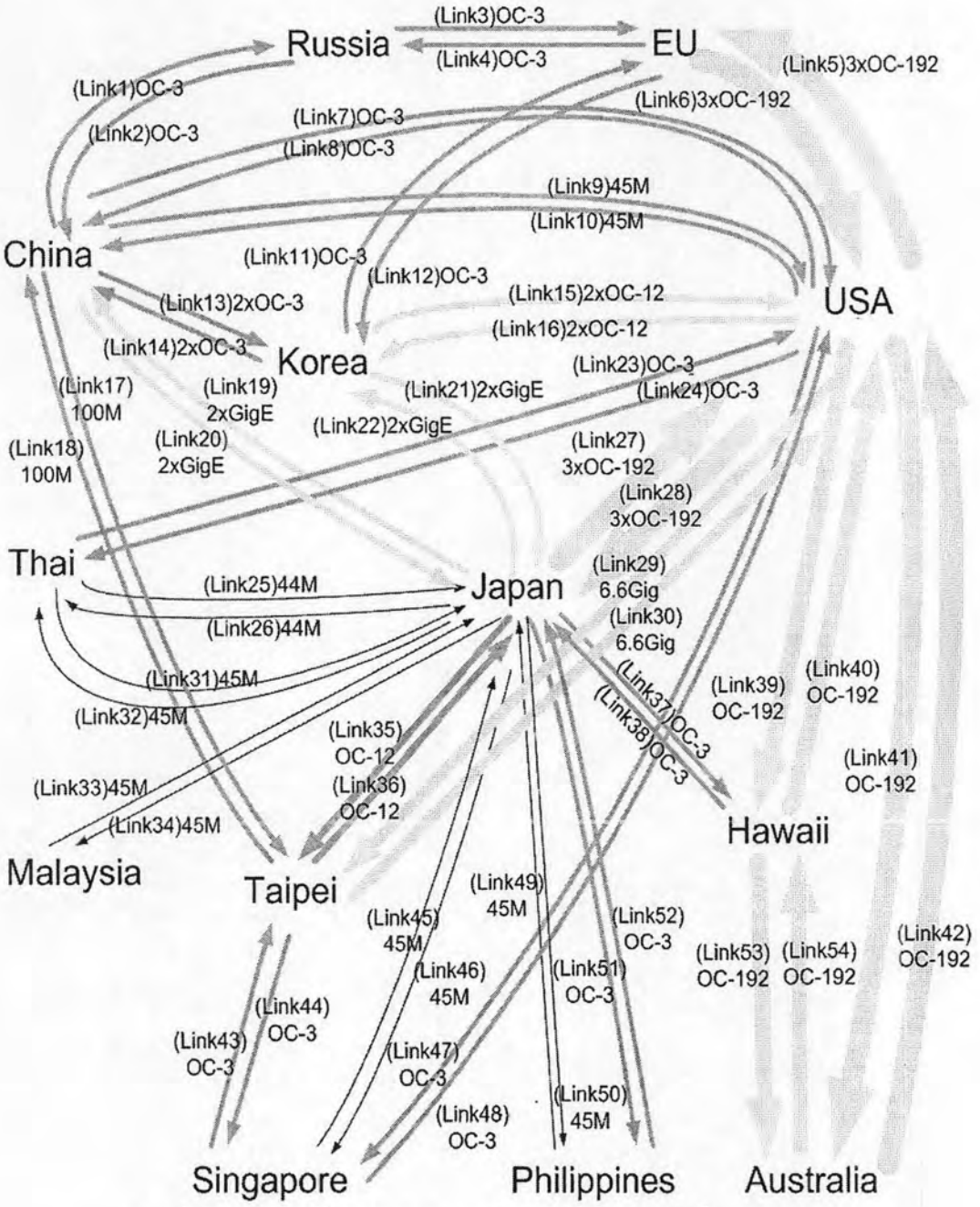
ระบบโครงข่ายที่เสนอ มาเพื่อช่วยในการวิเคราะห์เพื่อที่จะระบุถึงข่ายเชื่อมโยงที่ต้องทำการปรับปรุงก่อนได้ ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่สำคัญต่อระบบโครงข่ายที่เสนอ จะสามารถช่วยในการวิเคราะห์ได้ทั้งในกรณีที่ระบบโครงข่ายมีลักษณะที่ง่าย และกรณีที่ระบบโครงข่ายมีลักษณะการส่งข้อมูลและคู่โหนดความต้องการข้อมูลที่ซับซ้อน

5.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายหลายชั้น APAN

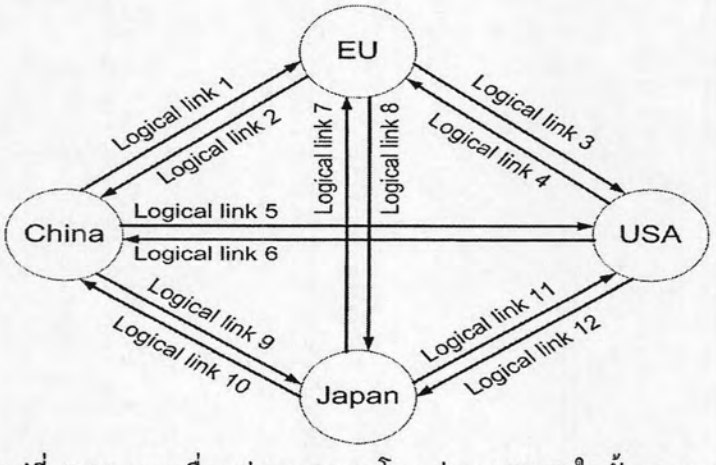
เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการนำวิธีการวิเคราะห์ที่เสนอไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายที่มีการใช้งานจริงและมีการจัดเส้นทางหลายชั้น ในส่วนนี้จะนำระบบโครงข่าย APAN ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ที่ใช้ข่ายเชื่อมโยงแบบมีทิศทางและมีการแยกชั้นการส่งข้อมูลมาทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการส่งข้อมูลสูงสุดภายใต้ความเสียหายโดยใช้ค่า EAC เป็นดัชนีชี้วัด พร้อมทั้งพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะการจัดหาเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งข้อมูลให้มีความเชื่อถือได้สูง โดยจะเปรียบเทียบกรณีการพิจารณาการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างการใช้จำนวนช่วงเชื่อมต่อ กับความจุของเส้นทาง โดยในกรณีการพิจารณาจำนวนช่วงเชื่อมต่อ เราเตอร์จะทำการเลือกเส้นทางที่มีจำนวนช่วงเชื่อมต่อที่น้อยที่สุดก่อนโดยไม่คำนึงถึงขนาดความจุข้อมูลของเส้นทางแต่ละเส้นทาง ซึ่งวิธีนี้เป็นที่ใช้กันในโพรโตคอลการจัดเส้นทางแบบรู้เวกเตอร์ระยะทาง (distance vector routing protocol) เช่น RIP (Routing Information Protocol) ในกรณีการพิจารณาการเลือกเส้นทางโดยใช้ขนาดความจุของเส้นทาง เราเตอร์จะเลือกเส้นทางที่มีขนาดความจุที่สูงที่สุดก่อนโดยไม่คำนึงถึงจำนวนของช่วงเชื่อมต่อที่ใช้ ซึ่งวิธีนี้เป็นที่ใช้กันในโพรโตคอลการจัดเส้นทางแบบรู้สถานะเชื่อมโยง (link state routing protocol) เช่น OSPF (Open Shortest Part First) กำหนดให้มีความต้องการข้อมูลของคู่โหนด 3 คู่โหนดด้วยกัน ได้แก่ EU → Japan, China → Japan, และ China → USA โดยทุกคู่โหนดมีเส้นทางในการส่งข้อมูลชั้นตรรกะที่เป็นไปได้ 3 เส้นทางด้วยกัน รูปที่ 5.12 แสดงลักษณะการเชื่อมต่อในชั้นตรรกะของระบบโครงข่าย APAN

5.3.1 การวิเคราะห์ระบบโครงข่ายหลายชั้น APAN ที่ใช้การเลือกเส้นทางโดยพิจารณาจำนวนช่วงการเชื่อมต่อ

ในกรณีการส่งข้อมูลโดยใช้จำนวนช่วงเชื่อมต่อในการเลือกเส้นทางการส่งข้อมูล การเชื่อมต่อทุกการเชื่อมต่อในชั้นตรรกะสามารถที่จะถูกแปลงให้เป็นเส้นทางในชั้นกายภาพได้ดังแสดงในตารางที่ 5.2 และเส้นทางที่เป็นการเชื่อมต่อหลายการเชื่อมต่อในชั้นตรรกะจะถูกแปลงต่อให้เป็นเส้นทางบนชั้นกายภาพดังแสดงในตารางที่ 5.3 จากเส้นทางการส่งข้อมูลดังแสดงข้างต้น เราสามารถนำระบบโครงข่าย APAN ที่มีเส้นทางดังกล่าวมาหาค่า EAC เพื่อใช้ชี้วัดถึงความสามารถในการส่งข้อมูลภายใต้ความเสียหายได้ดังแสดงในรูปที่ 5.13 โดย ณ จุดสมดุลของเกม ค่า EAC ที่ได้จะมีค่าเป็น 2155 หน่วยความจุ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายในกรณีอื่นๆ เราสามารถที่จะวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของระบบได้โดยใช้ค่า EAC เป็นตัวชี้วัดดังแสดงในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.11 การเชื่อมต่อของระบบโครงข่าย APAN ในชั้นกายภาพ



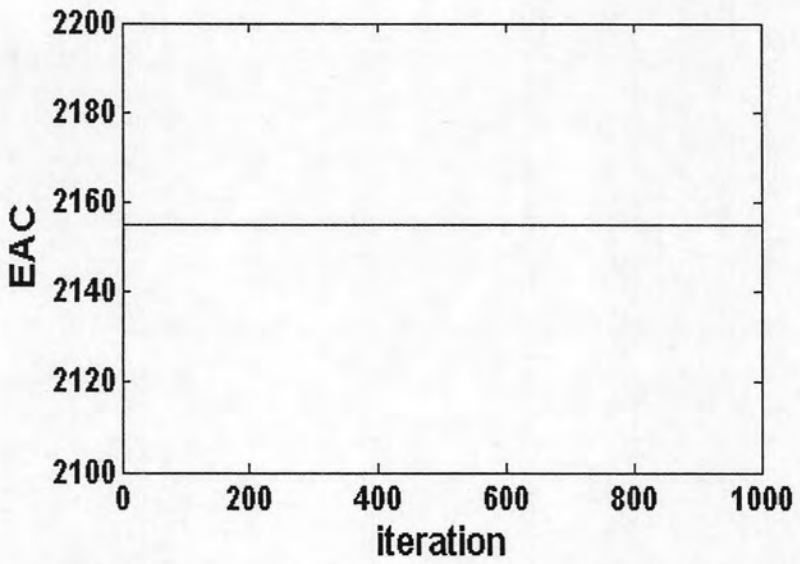
รูปที่ 5.12 การเชื่อมต่อของระบบโครงข่าย APAN ในชั้นตรรกะ

ตารางที่ 5.2 การแปลงการเชื่อมต่อในชั้นตรรกะให้เป็นการเชื่อมต่อในชั้นกายภาพสำหรับระบบโครงข่าย APAN เมื่อใช้จำนวนช่วงเชื่อมต่อเป็นค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูล

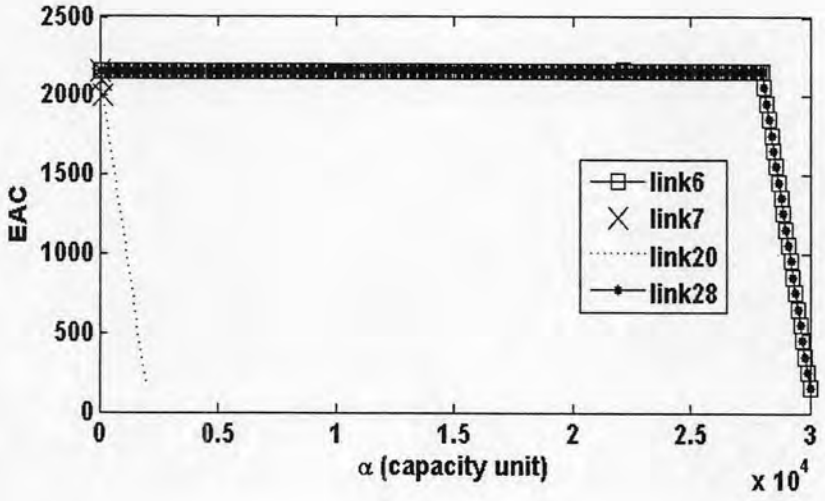
Logical link	Physical path	Distance (hops)
1	Physical links 7 → 5	2
2	Physical links 6 → 8	2
3	Physical link 6	1
4	Physical link 5	1
5	Physical link 7	1
6	Physical link 8	1
7	Physical links 27 → 5	2
8	Physical links 6 → 28	2
9	Physical link 20	1
10	Physical link 19	1
11	Physical link 27	1
12	Physical link 28	1

ตารางที่ 5.3 เส้นทางการเชื่อมต่อที่ใช้สำหรับแต่ละคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลของระบบโครงข่าย APAN เมื่อใช้จำนวนช่วงเชื่อมต่อเป็นค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูล

OD	Path (k)	Path (via logical links)	Path (via physical links)
EU → Japan	1	Link 8	Links 6 → 28
	2	Links 2 → 9	Links 6 → 8 → 20
	3	Links 3 → 12	Links 6 → 28
China → Japan	4	Link 9	Link 20
	5	Links 5 → 12	Links 7 → 28
	6	Links 1 → 8	Links 7 → 5 → 6 → 28
China → USA	7	Links 5	Link 7
	8	Links 1 → 3	Links 7 → 5 → 6
	9	Links 9 → 11	Links 20 → 27



รูปที่ 5.13 การลู่เข้าของค่า EAC ในกรณีการวิเคราะห์ระบบโครงข่าย APAN เมื่อพิจารณาใช้จำนวนช่วงเชื่อมต่อในการเลือกเส้นทาง



รูปที่ 5.14 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายแกน APAN กรณีการพิจารณาใช้ช่วงเชื่อมต่อในการเลือกเส้นทาง (การลดลงของข่ายเชื่อมโยงอื่นๆ ที่ไม่อยู่ในรูปไม่ส่งผลต่อการลดลงของค่า EAC)

5.3.2 การวิเคราะห์ระบบโครงข่ายหลายชั้น APAN ที่ใช้การเลือกเส้นทางโดยพิจารณาจากขนาดความจุ

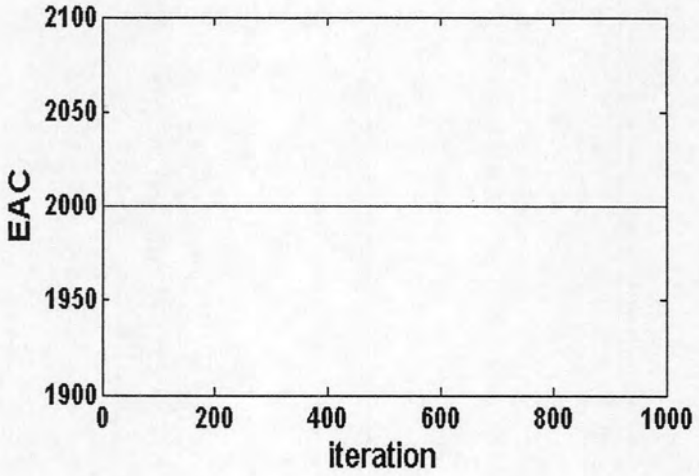
เช่นเดียวกับกรณีการส่งข้อมูลโดยใช้จำนวนช่วงเชื่อมต่อในการเลือกเส้นทางการส่งข้อมูลในการพิจารณาการส่งข้อมูลโดยใช้ขนาดความจุของข่ายเชื่อมโยงที่เป็นคอขวดเป็นค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูล การเชื่อมต่อในชั้นตรรกะแต่ละการเชื่อมต่อสามารถที่จะถูกแปลงให้เป็นเส้นทางในชั้นกายภาพได้ดังแสดงในตารางที่ 5.4 และเส้นทางที่เป็นชุดของการเชื่อมต่อหลายการเชื่อมต่อในชั้นตรรกะจะสามารถถูกแปลงให้เป็นเส้นทางบนชั้นกายภาพได้ดังแสดงในตารางที่ 5.5 จากเส้นทางการส่งข้อมูลดังแสดงข้างต้น เราสามารถนำระบบโครงข่าย APAN ที่มีเส้นทางดังกล่าวมาหาค่า EAC เพื่อใช้ชี้วัดถึงความส่งข้อมูลภายใต้ความเสียหายได้ดังแสดงในรูปที่ 5.15 ซึ่งในกรณีนี้ค่า EAC ที่ได้จะมีค่า 1995 หน่วยความจุ เมื่อเปรียบเทียบค่า EAC กับระบบโครงข่าย APAN ที่พิจารณาการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดจากจำนวนช่วงการเชื่อมต่อซึ่งมีค่า EAC เป็น 2155 หน่วยความจุจะเห็นได้ว่า ในบางครั้งการเลือกเส้นทางให้มีความสามารถในการส่งข้อมูลได้สูงและทนทานต่อความเสียหายจากการจ้องทำลาย ไม่จำเป็นที่จะต้องเลือกเส้นทางที่ให้ค่าความจุได้มากเสมอไป การเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดโดยการใช้จำนวนการเชื่อมต่อในการพิจารณาอาจจะให้ค่าความจุข้อมูลได้มากกว่ากรณีการเลือกเส้นทางจากความจุได้ ทั้งนี้เนื่องจากการที่เส้นทางที่มีความจุข้อมูลสูงอาจจะต้องส่งข้อมูลผ่านการเชื่อมต่อหลายการเชื่อมต่อ ที่มีความเสี่ยงที่จะถูกทำลายได้ง่ายกว่าการใช้เส้นทางที่สั้นในการส่งข้อมูลนั่นเอง นอกจากนั้นเราสามารถที่จะชี้วัดเพื่อหาข่ายเชื่อมโยงที่ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพก่อนได้ โดยดูจากลักษณะการลดลงของค่า EAC เมื่อข่ายเชื่อมโยงมีความจุลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.16

ตารางที่ 5.4 การแปลงการเชื่อมต่อในชั้นตรรกะให้เป็นการเชื่อมต่อในชั้นกายภาพสำหรับระบบโครงข่าย APAN เมื่อใช้ขนาดความจุของข่ายเชื่อมโยงที่เป็นคอขวดเป็นค่าใช้จ่ายในการเลือกเส้นทางการส่งข้อมูล

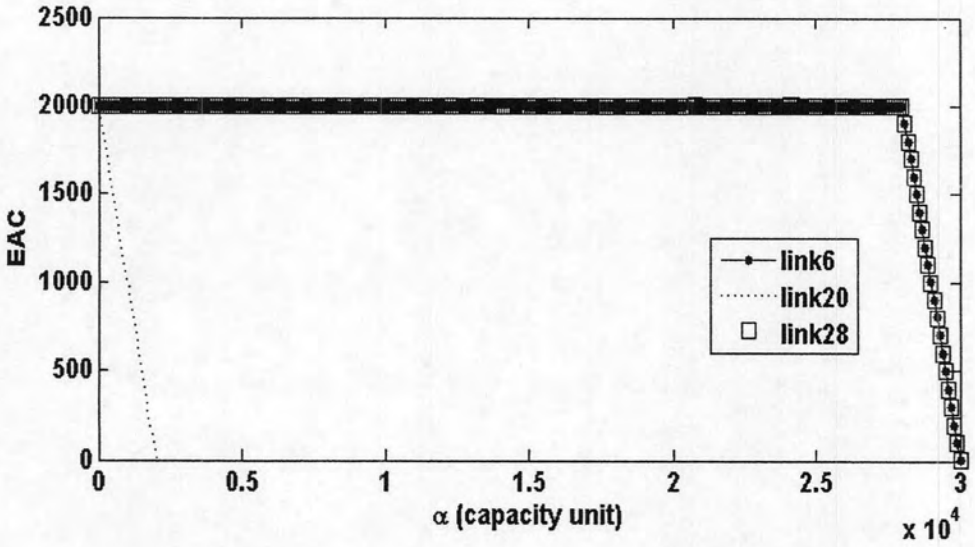
Logical link	Physical path	Bottleneck link capacity (Mbps)
1	Physical links 20 → 27 → 5	2000
2	Physical link 6 → 28 → 19	2000
3	Physical link 6	30000
4	Physical link 5	30000
5	Physical links 20 → 27	2000
6	Physical links 28 → 19	2000
7	Physical links 27 → 5	30000
8	Physical links 6 → 28	30000
9	Physical link 20	2000
10	Physical link 19	2000
11	Physical link 27	30000
12	Physical link 28	30000

ตารางที่ 5.5 เส้นทางการเชื่อมต่อที่ใช้สำหรับแต่ละคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลของระบบโครงข่าย APAN เมื่อใช้ขนาดความจุของข่ายเชื่อมโยงที่เป็นคอขวดเป็นค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูล (เลือกเส้นทางที่มีความจุมากที่สุดก่อน)

OD	Path (k)	Path (via logical links)	Path (via physical links)
EU → Japan	1	Link 8	Links 6 → 28
	2	Links 2 → 9	Links 6 → 28 → 19 → 20
	3	Links 3 → 12	Links 6 → 28
China → Japan	4	Link 9	Link 20
	5	Links 5 → 12	Links 20 → 27 → 28
	6	Links 1 → 8	Links 20 → 27 → 5 → 6 → 28
China → USA	7	Link 7	Links 20 → 27
	8	Links 1 → 3	Links 20 → 27 → 5 → 6
	9	Links 9 → 11	Links 20 → 27

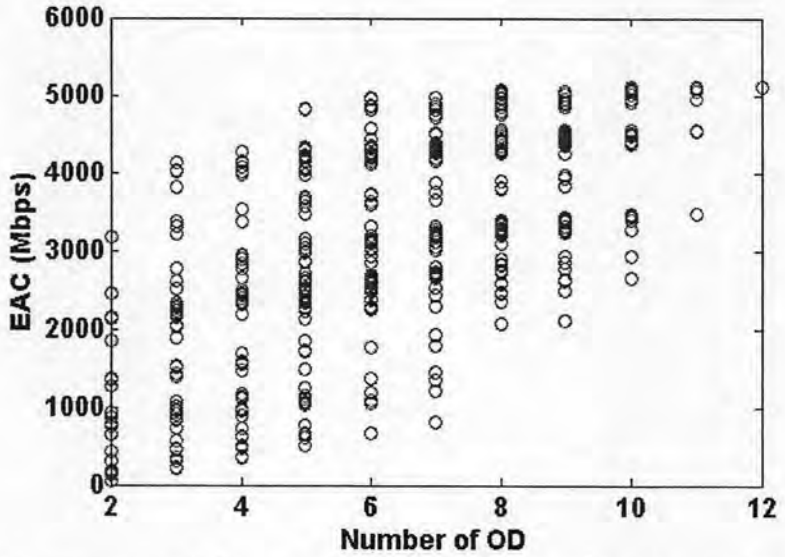


รูปที่ 5.15 การลู่เข้าของค่า EAC ในกรณีการวิเคราะห์ระบบโครงข่าย APAN เมื่อพิจารณาใช้ความจุของเส้นทางในการเลือกเส้นทาง



รูปที่ 5.16 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายแกน APAN กรณีการพิจารณาใช้ความจุของเส้นทางในการเลือกเส้นทาง (การลดลงของข่ายเชื่อมโยงอื่นๆ ที่ไม่อยู่ในรูปไม่ส่งผลต่อการลดลงของค่า EAC)

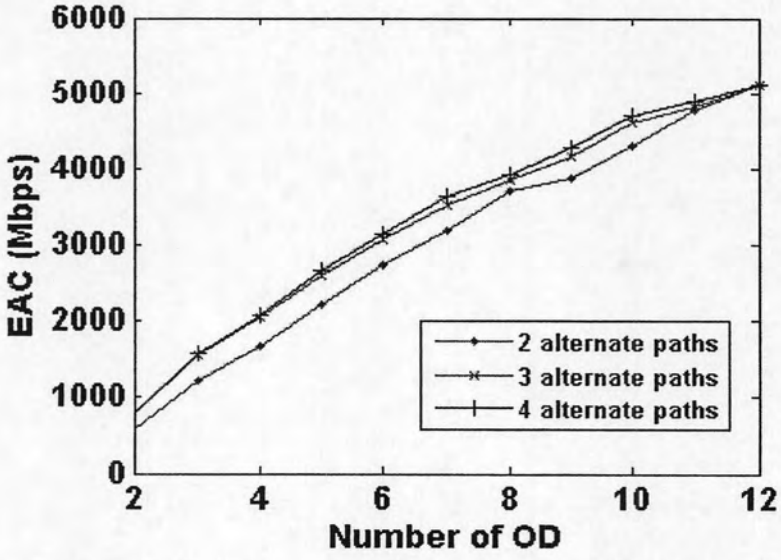
5.3.3 การเปรียบเทียบค่า EAC ที่ได้ระหว่างวิธีการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน ในระบบโครงข่าย APAN



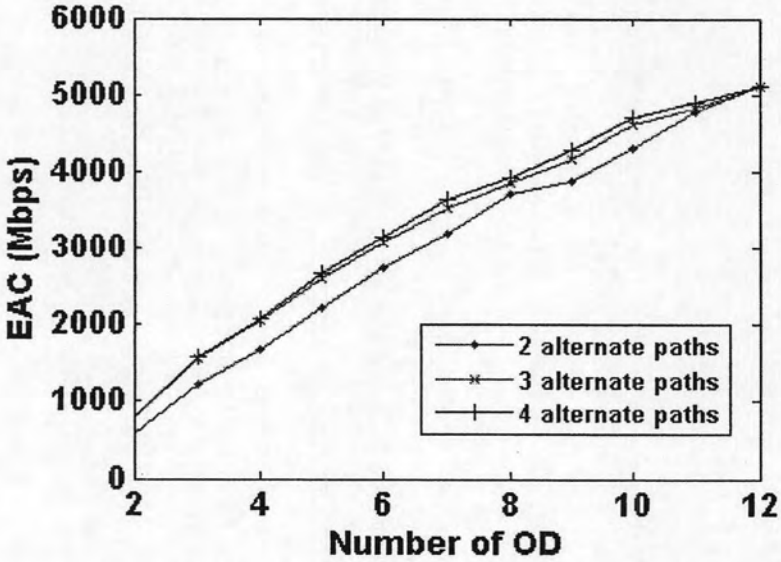
รูปที่ 5.17 ผลจากการเพิ่มขึ้นของค่า EAC เมื่อเพิ่มจำนวนคู่โหนดในระบบโครงข่าย APAN

เนื่องจากค่า EAC ที่จะได้รับในระบบโครงข่ายใด ๆ จะขึ้นอยู่กับจำนวนคู่โหนดที่ใช้ในการส่งข้อมูล ลักษณะการวางตัวของคู่โหนดแต่ละคู่ รวมทั้งจำนวนและลักษณะวิธีการเลือกเส้นทางที่สามารถใช้ได้ในการส่งข้อมูลสำหรับแต่ละคู่โหนด ดังนั้นเพื่อให้เห็นภาพรวมของค่า EAC ที่พึงจะได้รับจากวิธีการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลที่แตกต่างกันได้อย่างชัดเจนมากขึ้น จึงควรที่จะพิจารณาค่า EAC ในกรณีที่ระบบโครงข่ายสามารถมีชุดคู่โหนดที่ใช้ในการส่งข้อมูลรวมถึงวิธีการเลือกเส้นทางที่แตกต่างกันด้วย พิจารณาระบบโครงข่าย APAN ดังแสดงในรูปที่ 5.11 กำหนดให้ทุกคู่โหนดมีความต้องการที่จะส่งข้อมูลเข้าสู่โหนด Japan รูปที่ 5.17 แสดงค่า EAC ที่ระบบโครงข่ายจะได้รับในกรณีที่ระบบโครงข่ายมีจำนวนคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลแตกต่างกัน จากการทดสอบเปลี่ยนชุดคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลเป็นจำนวน 100 ครั้ง โดยที่ค่าที่ถูกนำมาแสดง ณ จุดที่ระบบโครงข่ายมีจำนวนคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลหนึ่ง จะสามารถให้ค่า EAC ที่ได้จากการเล่นเกมของระบบโครงข่ายได้หลายค่าขึ้นอยู่กับลักษณะและชุดของคู่โหนดที่ถูกเลือก รูปที่ 5.18 แสดงค่า EAC เฉลี่ยที่จะได้รับเมื่อเพิ่มจำนวนคู่โหนดการส่งข้อมูลในกรณีที่แต่ละคู่โหนดใช้วิธีการเลือกเส้นทางที่มีจำนวนฮอบสั้นที่สุด และ รูปที่ 5.19 แสดงค่า EAC เฉลี่ยที่จะได้รับเมื่อเพิ่มจำนวนคู่โหนดการส่งข้อมูลในกรณีที่แต่ละคู่โหนดใช้วิธีการเลือกเส้นทางที่มีค่าความจุสูงที่สุด

จากรูปที่ 5.18 จะเห็นได้ว่าค่า EAC จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนคู่โหนด และการเพิ่มขึ้นของเส้นทางที่เป็นไปได้ในการส่งข้อมูลก็จะช่วยให้ระบบโครงข่ายสามารถหาวิธีการในการเลือกเส้นทางในการส่งที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่า EAC มีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนเส้นทางที่เป็นไปได้ นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่า EAC เฉลี่ยที่จะได้รับในกรณี



รูปที่ 5.18 ผลจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนคู่โหนดต่อค่า EAC ที่ได้รับโดยเฉลี่ยในกรณีการใช้วิธีการเลือกเส้นทางที่มีค่าความจุสูงที่สุด



รูปที่ 5.19 ผลจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนคู่โหนดต่อค่า EAC ที่ได้รับโดยเฉลี่ยในกรณีการใช้วิธีการเลือกเส้นทางที่มีจำนวนฮอบมากที่สุด

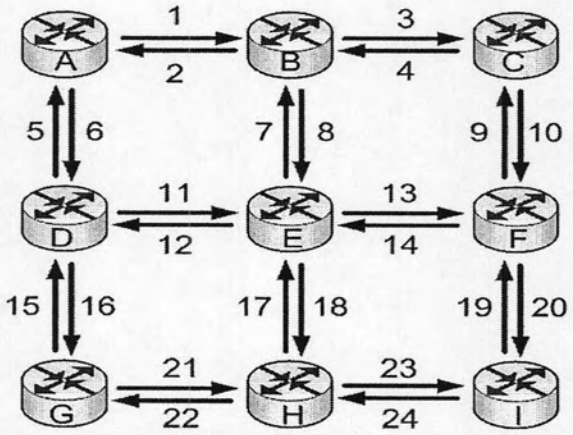
การเลือกเส้นทางที่แตกต่างกันในรูปที่ 5.18 และรูปที่ 5.19 จะพบว่าวิธีการเลือกเส้นทางจากการให้ความสำคัญกับเส้นทางที่ให้ความจุที่มากที่สุดไม่จำเป็นที่จะต้องให้ค่า EAC ที่สูงเสมอไป และการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นทางที่สามารถมีได้สำหรับแต่ละคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลจะให้ค่า EAC ที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวนเส้นทางที่แต่ละคู่โหนดสามารถเลือกได้มีจำนวนมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของเส้นทางจะทำให้ค่า EAC เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของระบบโครงข่ายที่มีขนาดจำกัด โดยค่า EAC ที่ได้จะสามารถนำมาใช้ชี้บอกถึงความสามารถในการรับข้อมูลสูงที่สุดของโหนด Japan ต่อความเสียหายอย่างร้ายแรงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าระบบจะมีขนาดใหญ่และเส้นทางที่เป็นไปได้สำหรับแต่ละคู่โหนดจะมีได้อย่างมาก แต่เมื่อเส้นทางการส่งข้อมูลที่เป็นไปได้ของแต่ละคู่โหนดมีจำนวนมาก จะไม่ทำให้ค่า EAC ที่ระบบโครงข่ายจะได้รับเพิ่มขึ้นสูงแต่อย่างใด

5.4 การวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อความซับซ้อนของวิธีที่เสนอ

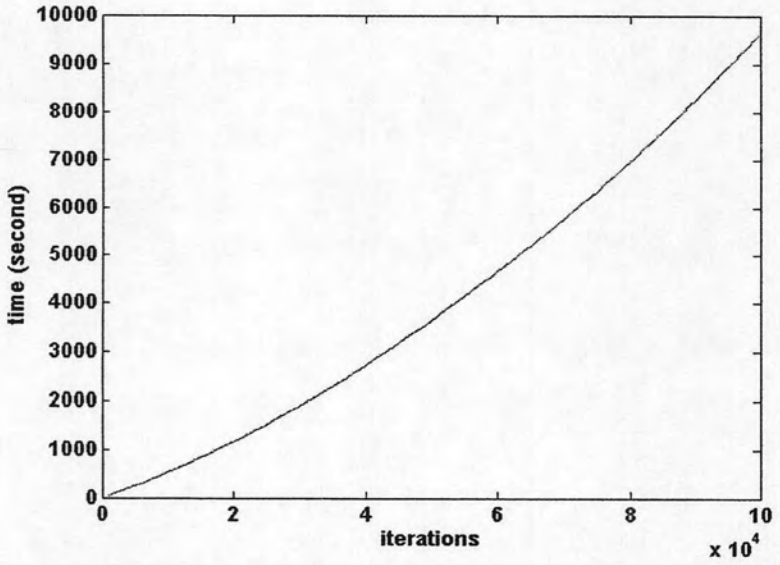
เนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อเวลาในการคำนวณหาค่า EAC มีหลายอย่างด้วยกัน ได้แก่ จำนวนรอบของการเล่นเกม, เงื่อนไขในการหยุดเล่นเกม, ขนาดของระบบโครงข่าย, และปริมาณของคู่โหนดความต้องการข้อมูล ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้แยกวิเคราะห์ถึงปัจจัยเหล่านี้ โดยจะแสดงให้เห็นถึงผลของการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ต่อเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบโครงข่าย สำหรับการทดลองการจับเวลานั้น จะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผล Intel(R) Pentium(R) 4 CPU 2.80GHz และมีหน่วยความจำขนาด 512 เมกะไบต์ ในการคำนวณโปรแกรมในทุกกรณีการทดลอง โดยในที่นี้จะพิจารณาเพียงกรณีการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายที่มีคู่โหนดความต้องการข้อมูลหลายคู่โหนดเท่านั้น เนื่องจากการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายทั่วไป เป็นระบบโครงข่ายที่มีหลายคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูล นอกจากนั้น เวลาที่ใช้ในการคำนวณระบบโครงข่ายที่มีหลายคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูล จะมีระยะเวลาที่นานกว่าการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายที่มีคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลเพียงคู่โหนดเดียวมาก ทั้งนี้เนื่องจากการวิเคราะห์หาค่า EAC จำเป็นที่จะต้องใช้ระเบียบวิธีกำหนดการเชิงเส้นเพื่อทำการวิเคราะห์ ดังนั้นการวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาค่า EAC ของระบบโครงข่ายที่มีหลายคู่โหนดความต้องการข้อมูล จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในทางปฏิบัติมากกว่ากรณีการวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาค่า EAC ของระบบโครงข่ายที่มีเพียงคู่โหนดเดียว

5.4.1 ผลของจำนวนรอบของการเล่นเกมต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

เนื่องจากเวลาที่ต้องใช้ในการหาค่า EAC จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของการเล่นเกม ในส่วนการทดลองนี้จึงทำการเปรียบเทียบผลของจำนวนรอบของการเล่นเกมกับเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณ พิจารณากรณีทดสอบในหัวข้อที่ 5.2.2 อีกครั้งโดยใช้ระบบโครงข่ายดังแสดงในรูปที่ 5.20 เพื่อทำการทดสอบ เมื่อมีคู่โหนดความต้องการข้อมูล 5 คู่โหนดได้แก่ $A \rightarrow I$, $C \rightarrow G$, $H \rightarrow A$, $I \rightarrow A$, และ $G \rightarrow C$ โดยทุกคู่โหนดจะใช้เส้นทางที่เป็นไปได้ที่สั้นที่สุด 6 เส้นทางด้วยกันและใช้จำนวนช่วงเชื่อมต่อ เป็นค่าที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด เมื่อข่าย



รูปที่ 5.20 ระบบโครงข่ายทดสอบกริด 9 โหนด



รูปที่ 5.21 เวลาที่ใช้ในการคำนวณต่อจำนวนรอบของการเล่นเกมในระบบโครงข่ายทดสอบกริด 9 โหนด

ตารางที่ 5.6 เวลาและจำนวนรอบของการเล่นเกมที่ต้องใช้ที่ค่า θ ต่าง ๆ

θ	time (second)	iteration
10	6.8	156
5	16.5	372
2	50.9	1119
1	200.2	4249
0.2	5994.6	73554

เชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงมีค่าความจุ 200 หน่วยความจุ ผลของเวลาที่ใช้ในการคำนวณเมื่อเพิ่มรอบของการเล่นเกมจะถูกแสดงในรูปที่ 5.21 จากรูปเราจะพบว่า เมื่อเพิ่มรอบของการเล่นเกมให้มีค่ามากขึ้น เวลาที่ใช้ก็จะเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จะเห็นได้ว่า จำนวนรอบของการเล่นเกมที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาค่า EAC

ในการหาจุดสมดุลของแนชจากการเล่นเกม เกมจะหยุดลงโดยจะวัดจากค่าผลต่างที่ผู้เล่นทั้งสองฝ่ายพึงจะได้รับ ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้การคำนวณหาค่า EAC มีความแม่นยำมากขึ้น เราอาจจำเป็นที่จะต้องทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของการหยุดเล่นเกมโดยการลดขนาดผลต่างของค่า EAC ที่จะได้รับของผู้เล่นทั้งสองที่ใช้ในการตัดสินใจหยุดเล่นเกมลง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการทำเช่นนี้ อาจจะทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มมากขึ้นด้วย ในทางปฏิบัติจึงอาจจะอนุโลมให้เกิดค่าผิดพลาดได้บ้างเพื่อความรวดเร็วในการคำนวณ

5.4.2 ผลของเงื่อนไขในการหยุดเล่นเกมต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

ในการคำนวณหาค่า EAC ด้วยกระบวนการที่เสนอด้วยระเบียบวิธี MSA การคำนวณจะสิ้นสุดลงก็ต่อเมื่อผู้เล่นทั้งสองฝ่ายต่างพอใจกับค่าของเกมที่ตนได้รับ สำหรับเกมของโครงข่ายที่เสนอ ผู้เล่นเราเตอร์และผู้ทำลายระบบโครงข่ายจะพิจารณาค่าของเกมที่ได้จากการคำนวณค่า EAC จากการแก้ปัญหา (4.1) และ (4.2) เพื่อจะตัดสินใจถึงการหยุดเล่นเกม โดยจะใช้การวัดขนาดของผลต่างระหว่างระดับค่าที่จ่ายจากเกมที่จะได้ของผู้เล่นทั้งสอง กำหนดให้ θ แทนขนาดของผลต่างระหว่างระดับค่าที่จ่ายจากเกมที่จะได้ของผู้เล่นทั้งสอง นิยามโดย

$$\theta = |\max_{\mathbf{H}} \min_{\mathbf{Q}} \mathbf{H}^T\mathbf{RQ} - \min_{\mathbf{Q}} \max_{\mathbf{H}} \mathbf{H}^T\mathbf{RQ}| \tag{5.7}$$

โดยในการทดสอบนี้จะใช้ระบบโครงข่ายทดสอบเดิมเช่นเดียวกับหัวข้อ 5.4.1 ซึ่งจะพิจารณาถึงผลกระทบจากการปรับค่า θ ที่มีค่าต่าง ๆ กัน ผลที่ได้และจำนวนรอบที่ใช้ในการเล่นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.6 จะเห็นได้ว่า เงื่อนไขที่ใช้ในการหยุดเล่นเกมนั้นจะมีผลต่อจำนวนรอบที่ใช้ในการเล่นเกม โดยถ้าค่า θ มีค่าที่น้อย จะทำให้ต้องใช้รอบในการเล่นเกมที่มากเพื่อที่จะให้เกมนั้นมีค่าของเกมที่แม่นยำและตรงกับคำตอบจริง อย่างไรก็ตามจำนวนรอบที่เล่นเกมที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วย ดังนั้นในการวิเคราะห์หาค่า EAC

ตารางที่ 5.7 เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายลักษณะต่าง ๆ เมื่อทำการเล่นเกมเป็นจำนวน 1000 รอบ

ระบบโครงข่ายทดสอบ	เวลาที่ใช้ (วินาที)
ระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนด	38.1
ระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด	46.7
ระบบโครงข่ายแกน Abilene	52.2
ระบบโครงข่ายแกน APAN	55.6

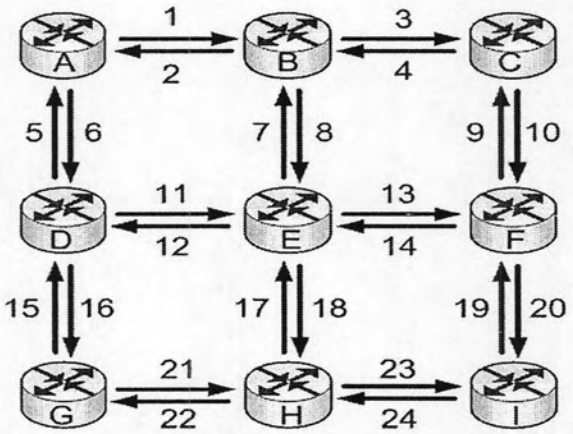
โดยทั่วไป ผู้วิเคราะห์ควรจะพิจารณาการกำหนดค่า θ ที่เหมาะสมกับเวลาที่ใช้ในการคำนวณ รวมทั้งคำนึงถึงความเหมาะสมของระดับความแม่นยำของคำตอบด้วย

5.4.3 ผลของขนาดของระบบโครงข่ายต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

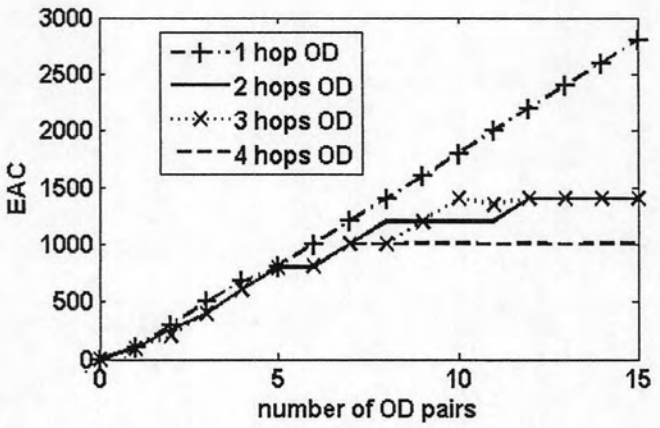
เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณสำหรับระบบโครงข่ายที่มีลักษณะดังการทดลองในหัวข้อที่ 5.2.2-5.2.4 สำหรับการคำนวณหาค่า EAC เมื่อจำนวนรอบของการเล่นเกมมีค่า 1000 รอบ ซึ่งเพียงพอที่ค่า EAC ของเกมจะลู่เข้าสู่ค่า EAC ที่ใกล้เคียงกับค่าที่เป็นคำตอบของเกมจริง ๆ จะเห็นได้ว่าระบบโครงข่ายที่ใช้ในการทดลองแต่ละรูปแบบ จะให้เวลาในการคำนวณที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 5.7 เมื่อระบบโครงข่ายมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น เวลาที่ใช้ในการคำนวณก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการคำนวณสำหรับกรณีระบบโครงข่ายขนาดใหญ่ จะอยู่ในช่วงที่รับได้ในทางปฏิบัติจริง และเหมาะสมที่จะนำวิธีการคำนวณหาค่า EAC ที่นำเสนอมาใช้ในทางปฏิบัติ นอกจากนั้นในการออกแบบจริง เราอาจจะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถสูงในการคำนวณมาใช้ช่วยในการคำนวณหาค่า EAC เพื่อวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่ต้องทำการปรับปรุง และสามารถใช้เวลาในการออกแบบระบบโครงข่ายเป็นเวลานานได้ ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบโดยทั่วไป ผู้วิเคราะห์ระบบโครงข่ายจะสามารถใช้เวลาในการเตรียมการที่จะสร้างระบบโครงข่ายหรือทำการปรับปรุงคุณภาพของระบบโครงข่าย โดยใช้เวลาในการวางแผนปรับปรุงระบบโครงข่ายเป็นเวลาที่อยู่ในระดับของครึ่งปีหรือหนึ่งปีขึ้นไป

5.5. ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความจุที่สูงที่สุดของระบบโครงข่าย

ค่า EAC ที่ระบบโครงข่ายจะได้รับขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างด้วยกัน เพื่อยกตัวอย่างทดสอบให้เห็นถึงความสำคัญของปัจจัยเหล่านี้ พิจารณาระบบโครงข่ายทดสอบกริด 9 โหนด ในหัวข้อ 5.2.2 อีกครั้ง โดยพิจารณาผลของลักษณะและจำนวนของคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลต่อค่า EAC โดยทดสอบเพิ่มจำนวนของคู่โหนดความต้องการข้อมูลอย่างสุ่มในกรณีทดสอบ 4 กรณี ที่ระบบโครงข่ายมีคู่โหนดที่มีเส้นทางที่สั้นที่สุดในแต่ละกรณีเป็น 1, 2, 3 และ 4 ช่วงเชื่อมต่อ ผลที่ได้จะถูกแสดงในรูปที่ 5.23 จากผลการทดสอบ จะพบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนคู่โหนด



รูปที่ 5.22 ระบบโครงข่ายทดสอบกริด 9 โหนด



รูปที่ 5.23 ค่า EAC ที่ได้รับเมื่อเพิ่มจำนวนคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลแต่ละประเภท ในระบบโครงข่ายทดสอบกริด 9 โหนด

ที่ต้องการส่งข้อมูลในระยะแรก ระบบโครงข่ายจะสามารถรองรับความต้องการข้อมูลได้เพิ่มขึ้นตามจำนวนคู่โหนดที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวนของคู่โหนดเพิ่มมากขึ้น ความจุของข่ายเชื่อมโยงในระบบโครงข่ายจะเริ่มถูกใช้งานทั้งหมดและจะทำให้ค่า EAC ของระบบโครงข่ายมีค่าจำกัดที่ค่าๆหนึ่ง จะพบว่าการเพิ่มขึ้นของคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลในกรณีที่แต่ละคู่โหนดห่างกัน 4 ช่วงเชื่อมต่อจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า EAC ที่ช้าที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากคู่โหนดที่ห่างกันมาก จะมีการใช้งานข่ายเชื่อมโยงหลายข่ายเชื่อมโยงในการส่งข้อมูล ซึ่งจะทำให้เกิดการใช้ค่าความจุของระบบโครงข่ายอย่างมากเมื่อเทียบกับการเพิ่มคู่โหนดที่มีระยะห่างกันน้อยนั่นเอง จะเห็นได้ว่าจำนวนของคู่โหนดและลักษณะของคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูล จะมีผลต่อปริมาณ EAC ที่ระบบจะได้รับ และนอกจากจำนวนของคู่โหนดและลักษณะของคู่โหนดที่มีผลต่อค่าความจุโดยรวมของระบบแล้ว ปัจจัยอย่างอื่นที่มีผลต่อค่า EAC จะประกอบไปด้วย ค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงในระบบโครงข่าย ลักษณะการวางตัวของโหนดและข่ายเชื่อมโยง รวมทั้งการที่เราเตอร์จะมีเส้นทางสำรองในการส่งข้อมูลหรือไม่ การที่จะออกแบบระบบโครงข่ายให้มีค่าความจุที่สูง จึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงปัจจัยเหล่านี้ เพื่อให้ระบบโครงข่ายมีความจุที่สูงและมีความทนทานต่อความเสียหายที่ดีที่สุด