กรรมวิธีดีเทกลูปและแก้ลูปสำหรับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตที่ใช้โพรโทคอล RIP

นาย สมหมาย สกุลกิจ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1428-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LOOP DETECTION AND LOOP SOLUTION TECHNIQUE FOR THE INTERNET USED RIP PROTOCOL

Mr. Sommai Sakulkij

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2001
ISBN 974-03-1428-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กรรมวิธีดีเทกลูปและแก้ลูปสำหรับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตที่ใช้โพรโทคอล RIP
โดย	นาย สมหมาย สกุลกิจ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม (ถ้ามี)	

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…… ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ)

……กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมหมาย สกุลกิจ : กรรมวิธีดีเทกลูปและแก้ลูปสำหรับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตที่ใช้โพรโทคอล RIP (Loop detection and loop solution technique for the Internet used RIP protocol.) อ. ที่ปรึกษา: ผศ. ดร. ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ, 118 หน้า. ISBN 974-03-1428-7.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอกรรมวิธีในการดีเทกลูป สำหรับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตที่อาศัยโพรโทคอล RIP ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลของเส้นทางระหว่างเราเตอร์ ลูปเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของทรัพยากรบนโครงข่าย เช่น มีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหรือเราเตอร์ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ที่ผ่านมาวิธีการดีเทกลูปยังไม่มีรูปแบบขั้นตอนหรือกรรมวิธีที่เป็นระบบชัดเจน ทำให้การศึกษาการทำงานและขีดความสามารถของโพรโทคอล RIP จำกัดอยู่เฉพาะกับตัวอย่างโครงข่ายเพียงไม่กี่รูปแบบที่เราทราบคุณสมบัติเป็นอย่างดี ดังนั้นเพื่อให้การศึกษาสมรรถนะของโพรโทคอล RIP มีความสมบูรณ์ และครอบคลุมปัญหาอื่น ๆ มากขึ้น จึงได้นำเสนอวิธีดีเทกลูปแบบใหม่ที่มีขั้นตอนการทำงานที่เป็นระบบ สามารถใช้ได้กับโครงข่ายที่มีโทโพโลยีหลากหลายรูปแบบได้ หลักการทำงานของวิธีที่เสนออาศัยการแปลงหรือแสดงโนดแต่ละแห่งในโครงข่ายที่พิจารณาให้อยู่ในรูปของโนดตัวแทน โดยชุดโนดตัวแทนเหล่านี้ได้มีการกำหนดคุณลักษณะเฉพาะไว้อย่างชัดเจน เพื่อให้การวิเคราะห์เหตุการณ์ที่ทำให้เกิดลูปขึ้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในโครงข่ายตัวแทนเป็นไปอย่างมีระบบ และผลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงข่ายตัวแทนดังกล่าวทำให้สามารถระบุได้ว่าในโครงข่ายหนึ่ง ๆ จะเกิดลูปขึ้นที่ตำแหน่งใดของโครงข่าย และที่เหตุการณ์ของลำดับการบรอดคาสท์ลำดับใด ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้นำไปสู่การบ่งบอกถึงโอกาสที่จะเกิดลูปขึ้นในโครงข่าย ตลอดจนเป็นข้อมูลในการทดสอบวิธีแก้ปัญหาลูปวิธีต่าง ๆ ว่าสามารถแก้ลูปที่เกิดขึ้นในตำแหน่งและลำดับการบรอดคาสท์ที่ก่อให้เกิดลูปนั้นได้ในระดับไหน

ในส่วนท้ายของวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอแนวทางการแก้ลูปที่มีประสิทธิภาพอีกวิธีหนึ่ง โดยวิธีที่เสนอกำหนดให้โนดต้องส่งเมสเสจพิเศษออกไปเพื่อทดสอบเส้นทางใหม่ก่อนการเปลี่ยนไปใช้เส้นทางดังกล่าว การกระทำดังกล่าวนี้ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการวนลูปของข้อมูล จากการศึกษาเปรียบเทียบผลกับวิธีแก้ลูปวิธีอื่น ๆ พบว่าวิธีส่งเมสเสจทดสอบ สามารถแก้ลูปประเภทลูปสั้นได้ดีเทียบเท่ากับวิธีอื่น ๆ และยังสามารถแก้ลูปประเภทลูปยาวที่วิธีอื่นที่เคยเสนอมาไม่สามารถทำได้ นอกจากนี้วิธีการที่เสนอสามารถนำมาประยุกต์ใช้จริงได้ เพราะไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงโพรโทคอลในการจัดเส้นทางที่ใช้อยู่เดิม

ภาควิชา ...วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา ...วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา...2544..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170564321: MAJOR Electrical Engineering

KEY WORD: RIP / Distance Vector / Routing Loop / Loop Detector

Sommai Sakulkij: LOOP DETECTION AND LOOP SOLUTION TECHNIQUE FOR THE INTERNET USED RIP PROTOCOL. THESIS ADVISOR: Assist. Prof. Lunchakorn Wuttisittikulkij, Ph.D., 118 pp. ISBN 974-03-1428-7.

This thesis proposes a technique for loop detection in the Internet, which uses RIP protocol for exchanging routing information between routers. Loop is a problem caused by the changing of network resource states, for example link or router failures. This problem affects the performance of transmitting and receiving data over the Internet. Previously, loop detection techniques have not been effectively addressed; no known technique with systematic procedure exists. As a result, the performance study of RIP protocol has been limited to a few sample networks of known property. In order to extend the study of RIP protocol to cover a larger set of problems, a new loop detection technique is proposed to enable extensive investigations. This new technique is systematic and can be applied to various network topologies. The proposed technique maps each node in the given network structure to a set of represented node. These sets of represented node are assigned special property so that the analysis of possible loop events in each area can be carried out in a systematic manner. As a result of this analysis, we can identify the locations of loops and events of broadcasting sequences that lead to loops. This information can use to offer the probability of loop event of a network and to test performance of many the solving loop methods.

The end of this thesis introduces a new alternative technique for solving loops. The proposed technique requires a node to send a special message to test the new route before the router decides to adopt this new route. By doing this, it is possible to prevent any possibility of loop occurrence. Based on our comparative performance study with other solving loop methods, it is found that the proposed technique is capable of solving short-live loop as the other methods. In addition, this new technique can solve long-live loop, which other methods cannot solve it. Moreover, this technique is applicable to practical environment, as it requires no major modifications to the existing routing protocols.

Department .....Electrical Engineering..... Student's signature.....

Field of study .....Electrical Engineering..... Advisor's signature.....

Academic year ....2001..... Co-advisor's signature.....

สารบัญ

บทที่ หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ จ

กิตติกรรมประกาศ ฉ

สารบัญ ช

สารบัญตาราง ญ

สารบัญภาพ ฏ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 5

1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 5

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน 5

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 6

2 โพรโทคอลในการจัดเส้นทางบนอินเทอร์เน็ต 7

2.1 พื้นฐานการจัดเส้นทางของคอมพิวเตอร์บนโครงข่าย 7

2.1.1 ตารางการจัดเส้นทาง 7

2.1.2 ข้อมูลที่เก็บในตารางการจัดเส้นทาง 8

2.1.3 หลักการตัดสินใจเลือกเส้นทาง 9

2.2 ประเภทของโพรโทคอลในการจัดเส้นทางบนอินเทอร์เน็ต 9

2.2.1 การจัดเส้นทางแบบสถิต 10

2.2.2 การจัดเส้นทางแบบพลวัต 11

2.3 โพรโทคอล RIP 12

2.4 อัลกอริธึมที่ใช้ในการจัดเส้นทางบนอินเทอร์เน็ต 13

2.4.1 อัลกอริธึมดีสแทนซ์เวกเตอร์ 13

2.4.2 อัลกอริธึมลิงค์สเทต 15

3 วิธีการดีเทกลูปที่เกิดขึ้นบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ต 18

3.1 หลักการดีเทกลูป 18

3.1.1 ข้อกำหนดและเงื่อนไขในการดีเทกลูป 19

หน้า

3.1.2 หลักการดีเทกลูป 20
3.1.3 การหาผลการเปรียบเทียบชุดตัวแปร 2 ชุด ด้วยการใช้อสมการ 21
3.2 รายละเอียดการดีเทกลูป 21
3.2.1 สร้างชุดโนดตัวแทนของโครงข่าย 21
3.2.2 สร้างแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์จากชุดโนดตัวแทน 24
3.2.2.1 ส่วนที่โนดที่รู้ว่าข่ายเชื่อมโยงขาดยังไม่ทันบรอดคาสท์ออกไปก็ถูกโนดข้างเคียงบรอดคาสท์ก่อน 25
รายละเอียดผลการสร้างแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์ 30
1. เหตุการณ์ที่โนด B เลือกผ่านโนด A 31
2. เหตุการณ์ที่โนด B เลือกผ่านโนด C 45
3. เหตุการณ์ที่โนด B เลือกผ่านโนด D 50
4. เหตุการณ์ที่โนด B เลือกผ่านโนด E, F 53
3.2.2.2 ส่วนที่โนดที่รู้ว่าข่ายเชื่อมโยงขาดบรอดคาสท์ออกไปทันที 53
3.2.3 เลือกลำดับที่เกิดได้ระหว่างคู่โนดตัวแทนหนึ่ง ๆ 55
3.2.4 วิเคราะห์ลูปที่เป็นไปได้ตามจำนวนโนดและรูปแบบที่จะเกิดได้ด้วยลำดับระหว่างคู่โนดตัวแทน 56
3.3 ตัวอย่างการดีเทกลูปจากโครงข่ายที่ปัจจุบันนิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาลูป 56
3.4 วิธีการคำนวณความน่าจะเป็นในการเกิดลูปและตัวอย่างการคำนวณความน่าจะเป็น 65
3.4.1 วิธีการคำนวณความน่าจะเป็นในการเกิดลูป 65
3.4.2 ตัวอย่างการคำนวณความน่าจะเป็น 66
4 วิธีแก้ปัญหาการเกิดลูป 87
4.1 วิธีสปริตฮอไรซอน 87
4.2 วิธีสปริตฮอไรซอนแบบพอยซันรีเวอร์ส 89
4.3 วิธีทริกเกอร์อัพเดตและโฮลด์ดาวน์ 90
4.4 วิธี HIPR 93
4.5 วิธีเก็บตารางระยะทางแทนตารางการจัดเส้นทาง 95

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

4.6 วิธีส่งเมสเสจทดสอบ 97
4.7 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธีแก้ปัญหาลูปแต่ละวิธี 99
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 103
5.1 บทสรุป 103
5.2 ข้อเสนอแนะ 104
รายการอ้างอิง 106
ภาคผนวก 108
ภาคผนวก ก. 108
ภาคผนวก ข. 111
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 118

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

ตารางที่ 1.1 แสดงตารางการจัดเส้นทางของทุกโนดในการไปยังโนด L 3
ตารางที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการทำงานในวิธีของ Dijkstra 17
ตารางที่ 3.1 : แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 3F ของโนดตั้งต้น A 75
ตารางที่ 3.2 : แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 2B ของโนดตั้งต้น C 77
ตารางที่ 3.3 : แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 3E ของโนดตั้งต้น C 78
ตารางที่ 3.4 : แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 3F ของโนดตั้งต้น C 80
ตารางที่ 3.5 : แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 2B ของโนดตั้งต้น D 82
ตารางที่ 3.6 : แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 3E ของโนดตั้งต้น D 83
ตารางที่ 3.7 : แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 3F ของโนดตั้งต้น D 85
ตารางที่ 4.1 : แสดงการเปรียบเทียบลักษณะโครงข่ายที่สามารถแก้ปัญหาลูปได้ของแต่ละวิธี 102
ตารางที่ ข. : แสดงการเปรียบเทียบลักษณะโครงข่ายที่สามารถแก้ปัญหาลูปได้ของแต่ละวิธี 115

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

รูปที่ 1.1 : แสดงประเภทของลูป a) ลูปประเภทลูปสั้น b) ลูปประเภทลูปยาว 2
รูปที่ 1.2 : แสดงโทโพโลยีของโครงข่าย 2
รูปที่ 2.1 : แสดงประเภทของโพรโทคอลในการจัดเส้นทางบนอินเทอร์เน็ต 10
รูปที่ 2.2 : แสดงสัญลักษณ์ที่ใช้แทนโทโพโลยีในโครงข่าย 14
รูปที่ 2.3: แสดงกระบวนการจัดเส้นทางของ Dijkstra a) ก่อนเปลี่ยนค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยง b) หลังเปลี่ยนค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยง 16
รูปที่ 3.1 : แสดงชุดโนดตัวแทนของโครงข่าย 22
รูปที่ 3.2 : แสดงแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์ในกรณีเหตุการณ์ที่โนด B เลือกผ่านโนด A 69
รูปที่ 3.3 : แสดงแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์ในกรณีเหตุการณ์ที่โนด B เลือกผ่านโนด C 71
รูปที่ 3.4 : แสดงแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์ในกรณีเหตุการณ์ที่โนด B เลือกผ่านโนด D 73
รูปที่ 3.5 : แสดงตัวอย่างชุดโนดที่มีค่าต้นทุนลดลงหลังข่ายเชื่อมโยงขาด 54
รูปที่ 3.6 : แสดงโครงข่ายตัวอย่างในการดีเทกลูปด้วยวิธีการใช้ชุดโนดตัวแทน 56
รูปที่ 3.7 : แสดงแผนภาพในกรณีโนด I บรอดคาสท์ก่อนที่โนด H จะบรอดคาสท์ (----I----H----)58
รูปที่ 3.8: แสดงแผนภาพในกรณีโนด I บรอดคาสท์หลังจากโนด H บรอดคาสท์และหลังจากโนด H บรอดคาสท์ แล้วทำให้โนด I มีค่าต้นทุนที่เปลี่ยนไป (----I----H----) 59
รูปที่ 3.9: แสดงแผนภาพในกรณีโนด H บรอดคาสท์เป็นโนดแรก ที่แทนด้วยลำดับการบรอดคาสท์ (HKI) 60
รูปที่ 3.10 : แสดงการคำนวณจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นโดยที่มีลำดับสอดคล้องกับที่พิจารณาของข่ายเชื่อมโยงทั้งสอง 66
รูปที่ 4.1 : แสดงการบรอดคาสท์เส้นทางด้วยวิธีสปริตฮอไรซอน 87
รูปที่ 4.2 : แสดงตัวอย่างโครงข่ายที่วิธีสปริตฮอไรซอนสามารถแก้ลูปได้ 88
รูปที่ 4.3 : แสดงตัวอย่างโครงข่ายที่วิธีสปริตฮอไรซอนไม่สามารถแก้ลูปได้ 89
รูปที่ 4.4 : แสดงการบรอดคาสท์เส้นทางด้วยวิธีสปริตฮอไรซอนแบบพอยซันรีเวอร์ส 89
รูปที่ 4.5 : โครงข่ายตัวอย่างสำหรับการทำงานของวิธีทริกเกอร์อัพเดตและวิธีโฮลด์ดาวน์ 91
รูปที่ 4.6 : แสดงตัวอย่างโครงข่ายที่ใช้วิเคราะห์ a) โครงข่ายตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์หาโอกาสในการเกิดลูป b) โครงข่ายตัวอย่างที่สามารถแก้ลูปได้ด้วยวิธีทริกเกอร์อัพเดตร่วมกับวิธีโฮลด์ดาวน์ 92
รูปที่ 4.7 : แสดงตัวอย่างโครงข่ายที่สามารถแก้ปัญหาลูปด้วยวิธี HIPR 94

หน้า

รูปที่ 4.8 : แสดงตัวอย่างโครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ปัญหาลูปได้ด้วยวิธี HIPR 94

รูปที่ 4.9 : แสดงตัวอย่างตารางการจัดเส้นทางตามปกติและตารางระยะทางของวิธีเก็บตารางระยะทางที่โนด B a)ตารางการจัดเส้นทางตามปกติ b)ตารางระยะทางของวิธีเก็บตารางระยะทาง 96

รูปที่ 4.10 : แสดงตัวอย่างโครงข่ายที่สามารถแก้ปัญหาลูปได้ด้วยวิธีส่งเมสเสจทดสอบ 98

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการใช้อินเทอร์เน็ตกันอย่างแพร่หลายมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้โครงข่ายมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วอันเป็นเหตุให้เสถียรภาพบนโครงข่ายลดลงไปด้วย กล่าวคือ ทำให้ข้อมูลที่วิ่งในโครงไปไม่ถึงปลายทาง หรือใช้เวลานานเกินไปในการไปถึงปลายทาง จนทำให้ข้อมูลที่ได้รับซ้ำซ้อนกัน ทำให้เข้าใจว่าข้อมูลที่มาทีหลังเป็นข้อมูลใหม่ซึ่งไม่ถูกต้อง หรือโครงข่ายใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากเกิดการอัพเดตการเลือกเส้นทางนานกว่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากเกิดการวนลูปของข้อมูลขึ้น อันเป็นเหตุให้ข้อมูลซึ่งถูกส่งไปตลอดเวลารวมทั้งตอนที่อัพเดตเส้นทางด้วย เกิดการสูญหายหรือไปไม่ถึงปลายทาง ดังนั้นเพื่อให้สามารถใช้โครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหากลไกที่จะสามารถลดความไม่มีเสถียรภาพที่เกิดขึ้นนี้

เสถียรภาพของระบบ [1][2][3] หมายถึง สถานะที่ทั้งระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวไม่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลในการจัดเส้นทางของแต่ละโนดอีก แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติเกิดปัญหาที่ทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ช้า ดังนั้นในการลดความไม่มีเสถียรภาพของระบบลง ในวิทยานิพนธ์นี้จึงพยายามในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นเหล่านั้น เพื่อทำให้ระบบเข้าสู่เสถียรภาพได้เร็วขึ้น

ปัญหาที่ทำให้โครงข่ายขาดเสถียรภาพ

ปัญหาที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพเกิดขึ้นเมื่อข่ายเชื่อมโยงในระบบขาด อันเป็นเหตุให้ข้อมูลไม่สามารถถูกส่งไปยังปลายทางได้จริงอีกต่อไป อันก่อให้เกิดปัญหาขึ้น ซึ่งปัญหาที่ทำให้โครงข่ายเกิดความไม่มีเสถียรภาพขึ้นนั้น สามารถจำแนกได้ตามรูปแบบการขาดของข่ายเชื่อมโยงดังต่อไปนี้

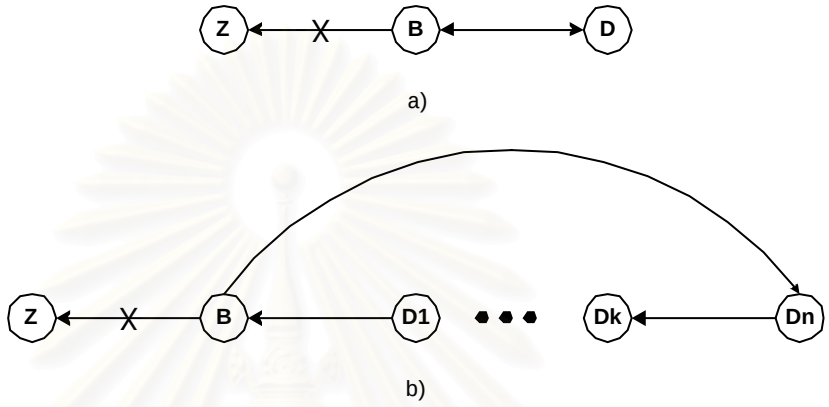
1. ปัญหาการเกิดลูปของเส้นทาง (routing loop)

เป็นปัญหาที่มีผลกระทบที่รุนแรงกับโครงข่าย โดยทำให้เกิดความคับคั่งขึ้นในบริเวณที่เกิดลูป เกิดการสูญหายของข้อมูล และทำให้ระบบขาดเสถียรภาพในที่สุด ซึ่งในความเป็นจริงสามารถเกิดได้ในทุก ๆ บริเวณ ดังนั้นเมื่อเกิดขึ้นทีละหลาย ๆ จุดพร้อม ๆ กัน ก็จะส่งผลให้บางโครงข่ายไม่

สามารถส่งข้อมูลไปยังปลายทางได้ หรือเกิดความเข้าใจผิดของข้อมูลที่ได้รับว่าเป็นข้อมูลเก่าเสมอ ทำให้ไม่เกิดการอัพเดตข้อมูล ในที่นี้ขอจำแนกลูปออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1.1 ลูปประเภทลูปสั้น (shorted-live loop) [4][5] เป็นลูปที่เกิดการวนลูประหว่างโนดที่อยู่ใกล้ ๆ กันเช่น เกิดลูประหว่างโนด 2 โนดที่ติดกัน

1.2 ลูปประเภทลูปยาว (long-live loop) [5] เป็นลูปที่เกิดการวนลูปที่มีผลต่อโนดที่อยู่ห่างออกไป ดังแสดงในรูปที่ 1.1

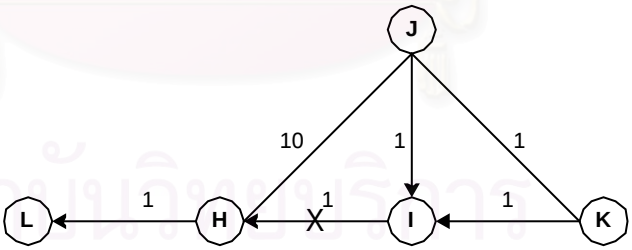


รูปที่ 1.1 : แสดงประเภทของลูป a) ลูปประเภทลูปสั้น b) ลูปประเภทลูปยาว

ตัวอย่างเช่น

ปัญหาการนับสู่อนันต์ (counting to infinity)

สมมุติให้โครงข่ายมีลักษณะตามรูปที่ 1.2 (ในการบรรยายด้านล่างจะยังไม่นำเอาวิธีแก้ลูปอย่างวิธีสปริตฮอไรซอนมาใช้) โดยมีค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยงเป็น 1 ทุกข่ายเชื่อมโยงยกเว้นที่ข่ายเชื่อมโยง JH มีค่าเป็น 10



รูปที่ 1.2 : แสดงโทโพโลยีของโครงข่าย

ในกรณีของอัลกอริธึมดีสแทนซ์เวกเตอร์ (distance vector algorithm) ซึ่งมีข้อมูลในการจัดเส้นทางที่เก็บเป็นเฉพาะแห่ง (local routing information) คือแต่ละโนดจะรู้เพียงค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงที่เกาะอยู่และตารางการจัดเส้นทาง ซึ่งระบุว่าค่าต้นทุนที่จะไปยังโนดปลายทางใด ๆ ของโนดข้างเคียงนั้น ๆ มีค่าที่น้อยที่สุดเท่าใด แล้วโนดต้นทางจะเลือกส่งไปให้เอง

ตารางที่ 1.1 แสดงตารางการจัดเส้นทางของทุกโนดในการไปยังโนด L

router	Next hop	distance	NH	dist.	NH	dist.	….	NH	dist.	NH	dist.
H	L	1	L	1	L	1	….	L	1	L	1
I	*	*	J	4	J	6	….	J	12	J	12
J	I	3	I	5	I	7	….	H	11	H	11
K	I	3	I	5	I	7	….	I	13	J	12
รอบที่	#1		#2		#3		….	#6		#7	

เวลา →

* : infinity

จากรูปที่ 1.2 สมมุติว่าข่ายเชื่อมโยงระหว่าง I กับ H ขาด โนด I จะรู้ก่อนและจะอัพเดตค่าต้นทุนใหม่คือให้มีค่าเป็นอนันต์ที่ข่ายเชื่อมโยงที่ขาด เพื่อห้ามไม่ให้มีการเลือกใช้เส้นทางนี้ ส่วนโนด K, J และ L จะไม่รู้ในขณะนั้น ดังตารางที่ 1.1 ในรอบการทำงานที่ 2 โนด I เลือกเส้นทางอื่นที่จะไปยัง H ที่มีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดใหม่ (จากการข้อมูลการจัดเส้นทางที่ถูกบรอดคาสท์มาของโนดที่ติดกับโนด H) อาจจะเป็นโนด K หรือโนด J ซึ่งมีค่าเป็น 3 เท่ากัน (สมมุติเลือกโนด J หรือก็คือโนด J บรอดคาสท์เส้นทางอื่นมาให้ก่อน) ดังนั้นค่าต้นทุนรวมกลายเป็น 4 (1+3) พร้อมกับส่งข่าวสารไปอัพเดตตารางการจัดเส้นทางของโนด K และ J ทำให้โนด K และโนด J รู้ว่าต้องเลือกเส้นทางใหม่ คือ โนด I ด้วยค่าต้นทุนเป็น 5 (1+4) ดังแสดงในรอบที่ 2 ในตารางที่ 1.1 หลังจากนั้นเมื่อโนด J บรอดคาสท์ก็จะเกิดการอัพเดตค่าเส้นทางให้โนด I ทำให้ค่าต้นทุนที่โนด I สูงขึ้นอีกหนึ่งเป็น 6 ดังแสดงในรอบที่ 3 และในรอบถัดมาก็เป็นเช่นนี้จนกระทั่งที่โนด J มีค่าต้นทุนที่สูงกว่าเส้นทางที่ผ่านไปทางโนด H โดยตรงคือ 11โนด J ก็จะเปลี่ยนไปเลือกผ่านโนด H แทนเมื่อโนด H ถึงลำดับที่ต้องบรอดคาสท์ ดังแสดงในตารางรอบที่ 7 [6][7][8][9]

สังเกตว่าในกรณีที่ไม่มีข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด I และโนด J ก็จะเกิดลูปที่ไม่สิ้นสุดได้ ซึ่งจะทำให้เกิดลูปซ้อนขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยงที่เกิดลูป นอกจากนี้ตำแหน่งของลูปที่เกิดขึ้นก็จะทำให้เกิดลูปใหม่ในรูปแบบต่าง ๆ ขึ้นเป็นลูปผสมได้อีก

2. ปัญหาการต่อกลับของพื้นที่ที่ถูกตัดขาดจากโครงข่าย (Area partition)

ปัญหานี้เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่ส่งผลกระทบรุนแรงกับพื้นที่ที่เกิด ซึ่งมีสาเหตุมาจากตำแหน่งที่เกิดข่ายเชื่อมโยงขาดทำให้บางพื้นที่ในโครงข่ายถูกตัดขาดออกไปจากโครงข่าย ส่งผลให้การอัพเดตของระหว่างพื้นที่ที่ถูกตัดขาดไปกับพื้นที่เก่าเกิดขึ้นไม่ได้ แม้ว่าหลังจากนั้นข่ายเชื่อมโยงที่

ขาดไปดังกล่าวจะสามารถกลับมาใช้ได้ดังเดิม แต่การอัพเดตที่เกิดขึ้นในระหว่างที่เกิดปัญหานี้แต่ละพื้นที่ไม่ได้รับจึงเข้าใจผิดว่าข้อมูลของแต่ละพื้นที่เป็นข้อมูลใหม่ การจัดเส้นทางจึงไม่มีเสถียรภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดเส้นทางที่ใช้ข้อมูลทั้งโครงข่าย (global routing information)

3. ปัญหาออสซิเลตของแพ็กเกต

เกิดจากโทโพโลยีที่ได้รับไม่ตรงกับความเป็นจริงขณะนั้น เนื่องจาก propagation delay ค่าต้นทุน (cost หรือ weight)

ค่าต้นทุนของแต่ละข่ายเชื่อมโยงจะถูกคำนวณโดยวัดจากทราฟฟิกหรือ Round trip time ที่ใช้ในการส่งข้อความทดสอบออกไป แล้วพิจารณาเทียบเป็นค่าต้นทุน [6][7][8][9][10]

แนวทางแก้ปัญหา

สำหรับปัญหาเรื่องลูปได้มีผู้วิจัยในปัญหาเหล่านี้หลายคน ได้แก่ วิธี Jaffe Moss [11], วิธี MS (Merin Segall) [12] , วิธีสปริตฮอไรซอน (split-horizon) และวิธีสปริตฮอไรซอนแบบพอยซันรีเวอร์ส (split-horizon with poison reverse) [7][8], วิธีทริกเกอร์อัพเดตและวิธีโฮลด์ดาวน์, วิธีเก็บตารางระยะทาง [5], loop-free path-finding algorithm (LPA) [13], link-vector algorithm (LVA) และ diffusing update algorithm (DUAL) นอกจากนี้ยังมีวิธีที่พัฒนามาจากวิธีการเหล่านี้อีกได้แก่ adaptive link-state algorithm (ALP) [14], hierarchical information path-based routing (HIPR) [15] และ diffusing algorithm for shortest multipath (DASM) [16] เป็นต้น

จากแนวทางแก้ที่กล่าวข้างต้นหลังจากได้ศึกษามาพบว่า วิธีสปริตฮอไรซอน เป็นวิธีที่มีใช้ใน RIP อยู่แล้วเป็นเพียงวิธีในการป้องกันการเกิดลูปเฉพาะแบบนับเข้าสู่อนันต์ด้วยการรอให้เส้นทางนั้นหมดอายุไปและมีการตั้งค่าสูงสุดของฮอปเพื่อไม่ให้มีค่าถึงค่าอนันต์ทำให้เวลาที่เกิดลูปน้อยลง (RIP กำหนดไว้ที่ 16) แต่จะส่งผลให้สามารถใช้ได้กับโครงข่ายที่มีจำนวนโนดที่จำกัด ส่วนวิธี MS จะมีสมรรถนะดีที่โหลดสูงและต่ำมากๆ แต่ยังใช้เวลาในการอัพเดตเสร็จช้ากว่าวิธี Jaffe Moss และ SPF (Dijkstra) แต่ถึงอย่างไรวิธีการเหล่านี้ยังมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าเทียมกับวิธอื่น ๆ ที่กล่าวข้างต้น ซึ่งบางวิธีสามารถแก้ปัญหาการต่อกลับของพื้นที่ที่ถูกตัดขาดของบางพื้นที่ของโครงข่าย และได้เส้นทางที่ค่าต้นทุนน้อยที่สุดด้วยเวลาที่จำกัด เป็นต้น จากบทความทางวิชาการ [13] ได้เปรียบวิธีการเหล่านี้แล้วพบว่าวิธีที่มีประสิทธิภาพ ได้แก่ วิธี HIPR, วิธี LVA, วิธี ALP และวิธี DUAL แต่เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้เลือกพิจารณาโพรโทคอล RIP เพราะเป็นโพรโทคอลพื้นฐานดังเดิมตัวแรกที่ใช้และยังมีใช้อยู่จนถึงปัจจุบัน ซึ่งโพรโทคอลนี้ใช้อัลกอริธึมดีสแทนซ์เวกเตอร์ ดังนั้นวิธีที่กล่าวในข้างต้นจะเลือกพิจารณาเฉพาะบางวิธีที่ใช้อัลกอริธึมดีสแทนซ์เวกเตอร์ ได้แก่ วิธีสปริตฮอไรซอน วิธีสปริตฮอไรซอนแบบพอยซันรีเวอร์ส วิธีทริกเกอร์อัพเดตและวิธีโฮลด์ดาวน์ วิธีเก็บตารางระยะทาง และวิธี HIPR

วิธีเหล่านี้ซึ่งเป็นวิธีที่แก้ปัญหาเรื่องเสถียรภาพโดยเฉพาะปัญหาเรื่องลูป ด้วยการแก้ไขที่อัลกอริธึมในการจัดเส้นทางไม่สามารถแก้ปัญหาการวนลูปของข้อมูล ได้หลากหลายรูปแบบของโทโพโลยีของโครงข่ายและรูปแบบที่เกิดลูปขึ้น ดังนั้นแนวทางในการแก้ปัญหาลูปที่จะเสนอนี้เป็นแนวทางที่ยังไม่ได้มีการศึกษามาก่อน คือ วิธีการดีเทกลูปที่เกิดขึ้นบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ด้วยการหารูปแบบในการเกิดลูปที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมดในโครงข่าย โดยไม่เจาะจงโทโพโลยีและตำแหน่งที่เกิดลูปขึ้นในโครงข่าย เมื่อเรารู้ว่าโครงข่ายลักษณะนี้จะทำให้เกิดลูปรูปแบบใดขึ้นอย่างไร จึงค่อยนำวิธีแก้ลูปที่กล่าวด้านบนมาแก้ลูปรูปแบบนั้นอีกที หรืออาจจะเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดลูปให้เปลี่ยนไปเพื่อลดโอกาสในการเกิดลูปหรือขจัดลูปที่เกิดขึ้นออกไปเอง ซึ่งจะทำให้สามารถแก้ปัญหาลูปได้หลายรูปแบบและอย่างมีประสิทธิภาพอย่างแท้จริง นอกจากนี้ได้เสนอวิธีส่งเมสเสจทดสอบ ในการป้องกันการวนลูปของข้อมูลพร้อมกับเปรียบเทียบรูปแบบลูปที่สามารถแก้ได้กับวิธีอื่น ๆ ที่ผู้วิจัยท่านอื่นได้ศึกษามาอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

พัฒนาและปรับปรุงการจัดเส้นทางบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ให้มีเสถียรภาพที่ดีขึ้นและทนทานต่อความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงในประเภทต่างได้ เช่น การเกิดลูปของเส้นทาง (routing loop) การต่อกลับของพื้นที่ที่ถูกตัดขาดออกจากโครงข่าย (area partition) เป็นต้น

1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์

เสนอกรรมวิธีดีเทกลูปสำหรับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตที่ใช้โพรโทคอล RIP ในการจัดเส้นทาง

ขอบเขตของวิธีดีเทกลูป จะใช้กับโพรโทคอล RIP เป็นพื้นฐานการจัดเส้นทางหลักในการวิเคราะห์หาวิธีการดีเทกลูปที่จะเกิดขึ้นในโครงข่ายต่างๆ ซึ่งวิธีการดีเทกลูปสามารถระบุถึงตำแหน่งที่เกิดลูป ประเภทของลูป และลำดับการบรอดคาสท์ของโนดที่ทำให้เกิดลูป ตลอดจนวัดความน่าจะเป็นในการเกิดลูปของโครงข่ายได้ พร้อมทั้งเสนอวิธีการแก้ปัญหาลูป และวัดประสิทธิภาพในการแก้ลูปเทียบกับวิธีการอื่น ๆ ที่มีอยู่

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

1. ศึกษากระบวนการในการจัดเส้นทางพื้นฐานที่มีอยู่ในปัจจุบัน
2. ศึกษาสาเหตุของความไม่มีเสถียรภาพในโครงข่ายอินเทอร์เน็ต
3. วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ต
4. ศึกษากระบวนการที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง

5. หาแนวทางในการแก้ไขที่เหมาะสม
6. พัฒนาและปรับปรุงวิธีการจัดเส้นทางเพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้ดีขึ้น
7. สร้างวิธีการดีเทกลูปที่สามารถใช้ได้กับโครงข่ายในหลาย ๆ รูปแบบ
    7.1 หาและศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการเกิดลูปในโครงข่าย
    7.2 แยกแยะปัญหาและหาแนวทางแก้ไขด้วยตัวแปรที่ได้จากข้างบน
    7.3 หาข้อกำหนดและสร้างชุดโนดตัวแทนที่ใช้แทนโครงข่ายหนึ่ง ๆ
    7.4 สร้างแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์จากชุดโนดตัวแทน
    7.5 เลือกลำดับที่โนดตัวแทนโนดหนึ่งเลือกโนดตัวแทนอีกโนดจนครบทุกโนดในโครงข่าย
    7.6 วิเคราะห์หาลูปที่เกิดได้ทั้งหมด
8. ทดสอบและวัดโอกาสในการเกิดลูปของโครงข่ายตัวอย่างของวิธีในการจัดเส้นทางต่าง ๆ
9. เปรียบเทียบวิธีแก้ลูปที่มีอยู่กับวิธีที่เสนอ
10. วิเคราะห์ ประเมินผล และสรุปผลการวิจัย
11. เขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจหลักการทำงานของอัลกอริธึมในการจัดเส้นทางบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ตทั้งอัลอกริธึมดีสแทนซ์เวกเตอร์และอัลกอริธึมลิงค์สเทต
2. ทำให้ทราบถึงเหตุการณ์ของการวนลูปที่เกิดขึ้นต่อโครงข่ายอินเทอร์เน็ตหลังข่ายเชื่อมโยงขาด
3. สามารถพัฒนาและปรับปรุงการจัดเส้นทางเพื่อลดความไม่มีเสถียรภาพบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ตได้
4. ทำให้ทราบถึงข้อดีข้อเสียของวิธีแก้ลูปในปัจจุบัน ได้แก่ วิธีสปริตฮอไรซอน วิธีสปริตฮอไรซอนแบบพอยซันรีเวอร์ส วิธีทริกเกอร์อัพเดตร่วมกับโฮลด์ดาวน์ วิธี HIPR และวิธีเก็บตารางระยะทาง เพื่อให้สามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจเลือกใช้วิธีแก้ลูปที่เหมาะสมให้กับโครงข่ายได้
5. สามารถนำเอาวิธีแก้ลูปที่เสนอมาประยุกต์ใช้กับโพรโทในการจัดเส้นทาง เพื่อลดการเกิดลูปประเภทลูปสั้นและลูปประเภทลูปยาวลง

บทที่ 2

โพรโทคอลในการจัดเส้นทางบนอินเทอร์เน็ต

บทนี้จะกล่าวถึงประเภทและหลักการของโพรโทคอลในการจัดเส้นทางบนอินเทอร์เน็ตที่มีอยู่ในปัจจุบัน และชี้ให้เห็นถึงข้อบกพร่องบางประการของโพรโทคอลเหล่านั้นโดยคร่าวๆ รวมไปถึงโพรโทคอลที่ใช้ในการวิเคราะห์และปรับปรุงในวิทยานิพนธ์นี้โดยละเอียด เพื่อความเข้าใจในการอ้างอิงถึงในบทต่อไป

2.1 พื้นฐานการจัดเส้นทางของคอมพิวเตอร์บนโครงข่าย

โพรโทคอลในการจัดเส้นทางบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ตได้มีใช้ค่อนข้างนานแล้ว โดยเริ่มใช้ครั้งแรกในโครงข่าย ARPANET (advance research projects agency network) ประมาณปี ค.ศ. 1980 เพื่อจัดการเกี่ยวกับการกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมอย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่เกิดการสูญหายของข้อมูลและได้พัฒนามาเรื่อย ๆ เพื่อรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้นในปัจจุบันได้

ในการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์หลายเครื่องเข้าด้วยกันเป็นโครงข่ายคอมพิวเตอร์นั้น คอมพิวเตอร์แต่ละตัวมีความจำเป็นที่จะต้องสามารถติดต่อส่งข้อมูลถึงกันได้ ไม่ว่าคอมพิวเตอร์อีกเครื่องจะอยู่ที่ไหนบนโครงข่าย ซึ่งอุปกรณ์หรือคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่ตัดสินใจในการจัดเส้นทางเรียกว่า เราเตอร์ (router) เราเตอร์จะอาศัยข้อมูลที่เรียกว่า ตารางการจัดเส้นทาง ที่ได้จากเราเตอร์อื่น ๆ บนโครงข่ายในการเลือกเส้นทางว่าจะต้องผ่านเราเตอร์ใดบ้าง ในการไปยังคอมพิวเตอร์ปลายทาง ซึ่งแน่นอนที่มีเส้นทางที่สามารถไปยังปลายทางได้หลายเส้นทาง แต่มีเพียงบางเส้นทางเท่านั้นที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่าต้นทุนของแต่ละเส้นทางที่ไปยังปลายทาง แล้วเลือกเส้นทางที่มีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุด (ซึ่งอาจจะมีมากกว่า 1 เส้นทางได้ แต่เส้นที่ถูกเลือกจะมีเพียงเส้นทางเดียวขึ้นอยู่กับว่าเส้นทางไหนจะถูกพบก่อนกัน)

2.1.1 ตารางการจัดเส้นทาง

ตารางการจัดเส้นทาง (routing table) คือ ตารางที่เก็บข้อมูลที่ใช้ในการจัดเส้นทางในการติดต่อถึงกันของคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องบนโครงข่าย ซึ่งเราเตอร์แต่ละตัวจะมีตารางการจัดเส้นทางของตัวเองทุกเราเตอร์ และทุกเราเตอร์จะต้องมีการส่งข้อมูลภายในตารางถึงกันอยู่ตลอดเวลา เพื่อปรับข้อมูลในตารางให้ตรงกับความเป็นจริงที่เกิดขึ้นบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ตที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

2.1.2 ข้อมูลที่เก็บในตารางการจัดเส้นทาง

1. หมายเลขเครื่องคอมพิวเตอร์ (IP address) ปลายทาง
2. หมายเลขเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องถัดไป (กรณีใช้อัลกอริธึมดีสแทนซ์เวกเตอร์) หรือหมายเลขข่ายเชื่อมโยงถัดไป (กรณีใช้อัลกอริธึมลิงค์สเทต)
3. ค่าต้นทุน

ค่าต้นทุน (cost หรือ weight) เป็นค่าที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่จะใช้ว่าควรใช้เส้นทางไหน โดยค่าต้นทุนยิ่งน้อยยิ่งเป็นเส้นทางที่เหมาะสม ปัจจุบันคำนวณได้จากเวลาหน่วง round trip time ทราฟฟิก แบนด์วิดธ์ หรือความน่าเชื่อถือ

ตัวอย่างเช่น โพรโทคอล RIP ค่าต้นทุนหาจากจำนวนโนด ดังต่อไปนี้

¤èÒµé¹·Ø⊨ ¨Ó¹Ç¹ÎÍ¾ (àÃÒàµÍÃì·Õè¼èÒ¹ÃÐÂÐ·Ò§(distance) (1)

เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้คอมพิวเตอร์กันอย่างแพร่หลาย การให้ค่าของค่าต้นทุนเป็นจำนวนฮอพจึงไม่เหมาะสมแล้ว ปัจจุบันจึงหันไปใช้ตัวแปรอื่นแทน (มีกล่าวไว้ในบทความ [6] คือใช้เวลาหน่วงหรือทราฟฟิก แต่ไม่ได้ให้รายละเอียดการคำนวณไว้) โดยจะมีค่าไม่เกิน 16

โพรโทคอล OSPF ค่าต้นทุนหาจากทราฟฟิกในสายสื่อสาร [7][8] ดังต่อไปนี้

$$¤èÒµé¹·Ø⊨ \frac{10^8}{á°¹´ìÇÔ´·ì ÊÒÂÊ×èÍÊ(} \quad (2)$$

ค่าต้นทุนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 65535

ในบางครั้งค่าต้นทุนถูกเรียกว่า เมตริก (metric) ตามโพรโทคอล RIP ซึ่งมีใช้มาแต่ดั้งเดิม

4. ตัวจับเวลา [7]

ตัวจับเวลาในการจัดเส้นทางสำหรับโพรโทคอล RIP สามารถแบ่งได้ 3 ชนิด ดังต่อไปนี้

4.1 ตัวจับเวลาปรับค่า

ใช้จับเวลาในการบรอดคาสท์ตารางการจัดเส้นทางของแต่ละโนด ซึ่งจะบรอดคาสท์ทุก ๆ 30 วินาที เพื่อไม่ให้เกิดการบรอดคาสท์พร้อมกัน ซึ่งทำให้เกิดทราฟฟิกที่สูงในระบบ จึงป้องกันโดยการสุ่มตัวเลขขึ้นมาค่าหนึ่งให้เป็น a (ซึ่งไม่เกินตัวเลขอีกตัวหนึ่งให้เป็น b) แล้วนำมาลบออกจาก 30 วินาที ดังนั้นตัวจับเวลาของเราเตอร์นั้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 30-b ถึง 30 วินาที

4.2 ตัวจับเวลาหมดอายุ

ในการตรวจสอบข่ายเชื่อมโยงว่ายังใช้ได้อยู่หรือเปล่า ตัวจับเวลานี้จะทำหน้าที่นับเวลาของแต่ละเส้นทางว่ายังถูกอัพเดตอยู่ไหม ถ้าเส้นทางไหนไม่ถูกอัพเดตมาจากโนดอื่นเข้ามาเกิน 6 รอบของการบรอดคาสท์ หรือ 180 วินาที (6*30) จะถือว่าเส้นทางนั้นใช้ไม่ได้ หรือข่ายเชื่อมโยงนั้นได้ขาดไปแล้ว (เนื่องจากเส้นทางที่เก็บจะบอกเพียงว่าต้องผ่านโนด

ถัดไปโนดใดด้วยค่าต้นทุนรวมเท่าไร ดังนั้นเมื่อเส้นทางหนึ่ง ๆ ใช้ไม่ได้จึงหมายถึงข่ายเชื่อมโยงที่จะไปโนดถัดไปนั้นขาดนั่นเอง)

4.3 ตัวจับเวลากำจัดเส้นทาง

ตัวจับเวลากำจัดเส้นทางนี้ ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนด TTL (time to live) ของเส้นทาง กล่าวคือ สำหรับเส้นทางที่หมดอายุแล้ว ซึ่งก็คือเส้นทางนั้นได้ขาดการติดต่อเป็นเวลา 6 รอบ โนดที่ตรวจเจอก็จะใช้ตัวจับเวลากำจัดเส้นทางนับถอยหลังอีก 4 รอบ หรือ 120 วินาที ถ้าหากเส้นทางดังกล่าวยังขาดการติดต่ออีกเส้นทางนั้นก็จะถูกกำจัดออกไปจากตาราง ในระหว่างที่นับถอยหลังอยู่นั้นโนดยังคงทำงานเช่นเดิมเพียงแต่ค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงที่ขาดมีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้นจะเกิดการบรอดคาสท์ค่าต้นทุนอนันต์นี้ออกไปอยู่

2.1.3 หลักการตัดสินใจเลือกเส้นทาง

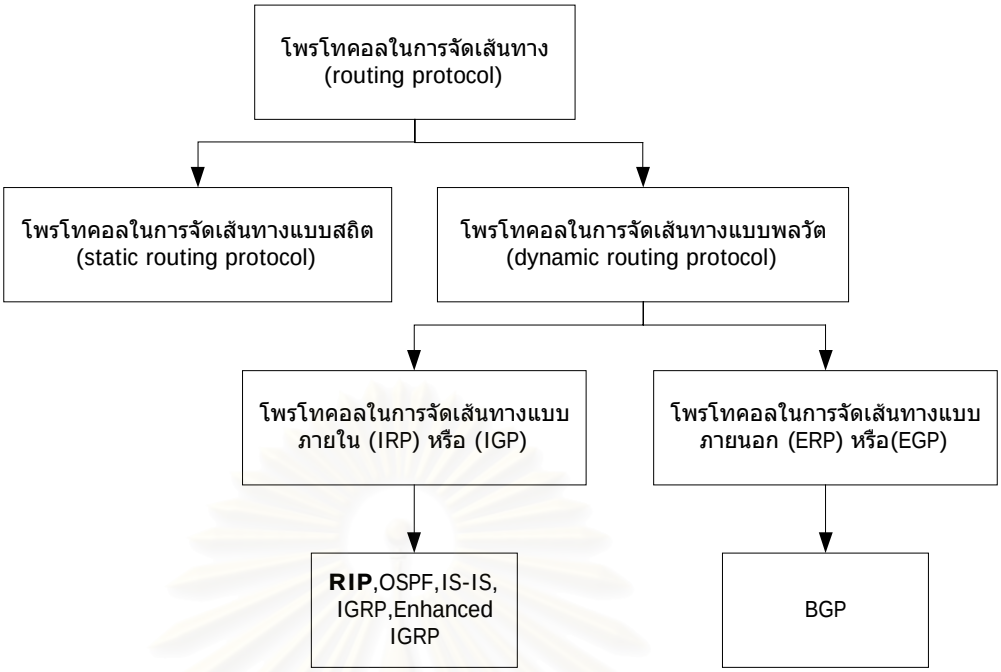
หลังจากโนดได้รับเส้นทางจากการบรอดคาสท์ของโนดที่ติดกัน จะมีหลักเกณฑ์ในการตัดสินใจว่าจะเลือกเส้นทางเดิมหรือจะเปลี่ยนไปเลือกเส้นทางใหม่แทน ให้พิจารณาเส้นทางใหม่ ดังต่อไปนี้ [7][8][9]

- ถ้าหากในตารางการจัดเส้นทางไม่มีเส้นทางนี้และเส้นทางนี้มีค่าต้นทุนรวมไม่เท่ากับอนันต์ ให้ใส่เส้นทางใหม่นี้เพิ่มเข้าไปในตาราง
- ถ้าหากมีเส้นทางนี้อยู่ในตารางการจัดเส้นทางอยู่แล้ว และเส้นทางใหม่นี้มีค่าต้นทุนรวมที่น้อยกว่าที่ไม่เท่ากับค่าอนันต์ ให้ใส่เส้นทางใหม่นี้แทนเส้นทางเก่า
- ถ้าหากมีเส้นทางนี้อยู่ในตารางการจัดเส้นทางอยู่แล้ว แต่เป็นการปรับค่าต้นทุนของเส้นทางเก่า กล่าวคือ โนดที่บรอดคาสท์เส้นทางมาให้เป็นโนดถัดไปของเส้นทางเก่าในตาราง ให้ปรับค่าต้นทุนของเส้นทางเก่าเป็นค่าต้นทุนใหม่ที่ได้รับ

สำหรับขั้นตอนการสร้างตารางการจัดเส้นทางตั้งแต่เริ่มจนถึงขั้นตอนการปรับค่าของตารางการจัดเส้นทางจะกล่าวในหัวข้ออัลกอริธึมที่ใช้ในการจัดเส้นทางบนอินเทอร์เน็ต

2.2 ประเภทของโพรโทคอลในการจัดเส้นทางบนอินเทอร์เน็ต

จากหัวข้อการจัดเส้นทาง จะสังเกตเห็นว่าปัญหาหนึ่งในการจัดเส้นทาง คือ ข้อมูลภายในตารางการจัดเส้นทาง ตลอดจนการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่จะผ่านไปยังปลายทางนั้น แต่ละเราเตอร์จะรู้ได้อย่างไร



รูปที่ 2.1 : แสดงประเภทของโพรโทคอลในการจัดเส้นทางบนอินเทอร์เน็ต

เมื่อพิจารณาจากลักษณะการจัดและกำหนดเส้นทางของเราเตอร์ สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) ดังนี้

1. การจัดเส้นทางแบบสถิต
2. การจัดเส้นทางแบบพลวัต

การจัดเส้นทางทั้งสองแบบมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.2.1 การจัดเส้นทางแบบสถิต

การจัดเส้นทางแบบสถิต (static routing) คือ การจัดเส้นทางที่ผู้ดูแลระบบเป็นผู้ให้ข้อมูลของตารางการจัดเส้นทางและเลือกเส้นทางเอง กล่าวคือ ผู้ดูแลระบบเจาะจงเส้นทางที่ไปยังปลายทางหนึ่ง ๆ ไว้ตายตัว และเมื่อต้องการจะเปลี่ยนแปลงเส้นทาง ผู้ดูแลระบบจะเป็นผู้เปลี่ยนแปลงเส้นทางเอง ดังนั้น เราเตอร์เป็นเพียงตัวกลางไม่ได้ตัดสินใจเลือกเส้นทาง ข้อดีของการเลือกเส้นทางแบบนี้ คือ

1. ง่ายและสะดวกในการทำความเข้าใจ
2. เหมาะกับโครงข่ายขนาดเล็กที่ไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงโครงข่ายบ่อย ๆ
3. ไม่ต้องใช้ซอฟต์แวร์เลือกเส้นทาง เราเตอร์ไม่จำเป็นต้องมีซีพียูสมรรถนะสูง
4. ประหยัดแบนด์วิดธ์โครงข่ายเนื่องจากไม่ต้องแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างเราเตอร์

การเลือกเส้นทางแบบสถิตนิยมใช้กับการเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุดระหว่างเราเตอร์สองตัว ตัวอย่างเช่นโครงข่ายที่มีทางออกไปสู่ภายนอกหรืออินเทอร์เน็ตเพียงช่องทางเดียวการกำหนดเส้นทางจะเป็นแบบสถิต ถึงแม้ว่าการเลือกเส้นทางแบบสถิตจะมีข้อดีหลายประการ แต่ก็มีข้อเสีย คือ

1. ไม่เหมาะใช้กับโครงข่ายขนาดใหญ่ เพราะเป็นการลำบากที่ผู้ดูแลระบบจะคำนวณหาเส้นทางและป้อนค่าให้เราเตอร์จำนวนมากทั้งหมด
2. ไม่สะดวกต่อการเปลี่ยนแปลงค่าในตารางการจัดเส้นทาง ซึ่งต้องคำนวณและป้อนค่าใหม่โดยผู้ดูแลระบบ
3. เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด ผู้ดูแลระบบต้องคอยตรวจสอบและแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นเอง เราเตอร์ไม่สามารถคำนวณหาเส้นทางอื่นด้วยตัวเองได้

2.2.2 การจัดเส้นทางแบบพลวัต

จากการจัดเส้นทางแบบสถิตจะเห็นว่า ถ้าโครงข่ายมีขนาดใหญ่ และมีการเปลี่ยนแปลงโครงข่ายบ่อย ๆ จะทำให้เกิดความยากลำบากในการจัดเส้นทางของผู้ดูแลระบบ ซึ่งโครงข่ายในปัจจุบันก็มีลักษณะเช่นนี้ ทำให้เกิดการจัดเส้นทางแบบพลวัต (dynamic routing) เกิดขึ้น กล่าวคือ เราเตอร์จะเป็นผู้เรียนรู้และตัดสินใจเลือกเส้นทางเอง ข้อดีของการเลือกเส้นทางในแบบนี้ คือ

1. ผู้ดูแลไม่ต้องคอยตรวจสอบโครงข่ายอยู่ตลอดเวลา เพราะเราเตอร์สามารถตัดสินใจเลือกเส้นทางได้เองโดยอัตโนมัติ
2. สามารถใช้ได้กับโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากซอฟต์แวร์จะเป็นผู้คำนวณและป้อนค่าเส้นทางให้เราเตอร์ ดังนั้นโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ ๆ ก็ยังสามารถใช้ได้อยู่

เนื่องจากการจัดเส้นทางในแบบนี้ผู้ดูแลระบบแทบไม่ต้องทำอะไรเลย ซอฟต์แวร์จะเป็นผู้จัดการเองก็จริง แต่ก็ทำให้เกิดข้อเสียในด้านอื่นตามมาแทน ดังต่อไปนี้

1. มีความซับซ้อนขึ้นมาก เพื่อให้รองรับปัญหาต่าง ๆ ที่ตามมา อาทิเช่น เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงข่ายขึ้นจะทำอย่างไร เพื่อแจ้งคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องให้ทราบได้ในทันทีหรือทันเวลาที่จะไม่ทำให้เกิดการสูญหายของข้อมูลหรือสูญหายน้อยที่สุด และสามารถส่งไปจนถึงปลายทางได้
2. เราเตอร์ที่ใช้มีราคาสูง เนื่องจากซอฟต์แวร์ที่ใช้มีความซับซ้อนมากขึ้นประกอบกับซีพียูที่ใช้ต้องมีสมรรถนะสูงในการคำนวณหาเส้นทางต่าง ๆ ที่เหมาะสม ตลอดจนแก้ปัญหาข่ายเชื่อมโยงขาด

สำหรับการจัดเส้นทางแบบพลวัตในปัจจุบัน สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ ตามขอบเขตในการจัดเส้นทาง คือ IRP (interior routing protocol) และ ERP (exterior routing protocol)

2.1 โพรโทคอลในการจัดเส้นทางแบบภายใน (IRP) หรือบางครั้งเรียกว่า IGP (interior gateway protocol)

เป็นโพรโทคอลที่ใช้ในการจัดเส้นทางภายใน AS ตัวอย่างเช่น RIP, OSPF [17], IS-IS, IGRP และ Enhanced IGRP

2.2 โพรโทคอลในการจัดเส้นทางภายแบบนอก (ERP) หรือบางครั้งเรียกว่า EGP (exterior gateway protocol)

ในลักษณะเดียวกันโพรโทคอลในการจัดเส้นทางแบบภายนอกก็หมายถึงโพรโทคอลที่ใช้ในการจัดเส้นทางภายนอก AS โดยผ่านเราเตอร์เกตเวย์ (gateway) ที่ทำหน้าที่เป็นเราเตอร์ที่เป็นทางผ่านเข้าออกของ AS แต่ละตัว ตัวอย่าง IEP เช่น EGP และ BGP

2.3โพรโทคอล RIP

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เราเลือกที่จะปรับปรุงโพรโทคอลของ RIP [6][7][8][9][10] ซึ่งมีความซับซ้อนที่น้อยกว่าและมีใช้มานานตั้งแต่แรกเริ่มจนถึงทุกวันนี้ จึงเป็นการง่ายที่จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ได้กับโครงข่ายต่าง ๆ บนอินเทอร์เน็ต โพรโทคอล RIP เป็นโพรโทคอลที่ใช้อัลกอริธึมดีสแทนซ์เวกเตอร์ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยค่าต้นทุนที่ใช้ในระยะแรกใช้เป็นจำนวนโนดที่เส้นทางเลือกผ่านและถือเอาเส้นทางที่ให้จำนวนที่น้อยที่สุดเป็นเส้นทางที่ดีที่สุด แต่ต่อมาในภายหลังเปลี่ยนไปใช้เวลาหน่วง หรือทราฟฟิกแทน (ดังได้กล่าวในหัวข้อตารางการจัดเส้นทาง) และถือเอาเส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนจากการคำนวณดังกล่าวที่น้อยที่สุดเป็นเส้นทางที่ดีที่สุด

ข้อจำกัดของโพรโทคอล RIP

1. เวลาในการลู่เข้า เนื่องจากกว่าจะมีการบรอดคาสท์แต่ละครั้งจะต้องรอให้ถึงรอบในการบรอดคาสท์คือทุก 30 วินาที ทำให้การสร้างตารางจนกระทั่งปรับค่าในตารางจนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวใช้เวลาระยะหนึ่งซึ่งถือว่าช้า
2. ขนาดโครงข่าย ใช้ได้กับโครงข่ายที่มีขนาดไม่ใหญ่นัก คือไม่เกิน 15 โนด เนื่องจากว่าโพรโทคอล RIP ใช้วิธีสปริตฮอไรซอนแบบพอยซันรีเวอร์สในการแก้ปัญหาลูป ซึ่งกำหนดให้ค่าต้นทุนสูงสุดอยู่ที่ 16 เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการนับเข้าสู่อนันต์ ดังนั้นในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงมีค่าต้นทุนต่ำที่สุดคือ 1 จะต้องมีโนดในโครงข่ายไม่เกิน 15 โนด เพราะโนดที่ได้รับเส้นทางที่มีค่าต้นทุนที่สูงกว่านี้จะเข้าใจว่าเส้นทางนั้นใช้ไม่ได้ซึ่งความจริงอาจจะใช้ได้ก็ได้
3. อายุของเส้นทาง ในช่วงที่ข่ายเชื่อมโยงถูกตัดขาด เส้นทางดังกล่าวจะยังคงถูกใช้อยู่ในช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อรอการหาเส้นทางใหม่ที่ไปได้ โดยการบรอดคาสท์เส้นทางออกไปด้วยค่าต้นทุนอนันต์ ซึ่งหมายความว่าข้อมูลก็จะต้องถูกส่งไปใหม่ซ้ำ ๆ กัน
4. ไม่สนับสนุนการใช้ซับเน็ตแบบแปรเปลี่ยนค่า RIP ถือว่าซับเน็ตมีค่าเดียวกันตลอดทั้งโครงข่าย ยกเว้น RIP v.2

5. เกิดปัญหาลูป เนื่องจากข้อมูลในการเลือกเส้นทางที่แต่ละโนดรู้เป็นเพียงข้อมูลข่ายเชื่อมโยงที่ติดกับโนดนั้น ๆ ถ้าไกลจากนั้นต้องให้โนดอื่นบรอดคาสท์มาบอก ทำให้ในการเลือกเส้นทางไม่สามารถรู้ได้ว่าเส้นทางใดจะเกิดลูปขึ้นเมื่อเกิดลูปที่ห่างออกไป ส่งผลให้เวลาลู่เข้าช้าและข้อมูลที่ส่งไปไม่ถึงปลายทางโดยที่โนดต้นทางไม่รู้

RIP v.2

มีส่วนขยายที่เพิ่มขึ้นจาก RIP เดิม [7] ได้แก่ ระบบความปลอดภัยในการยืนยันตัวจริง, สนับสนุนการใช้ซับเน็ตแบบแปรค่า, สามารถแจ้งหมายเลขระบบออโตโนมัสเพื่อเชื่อมต่อกับโพรโทคอลเกตเวย์ภายนอก และมีออพชันให้ส่งตารางด้วยวิธีมัลติคาสต์แทนการบรอดคาสท์ เพื่อลดภาระงานให้โฮสต์ในโครงข่ายที่ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นราเตอร์ แอดเดรสที่ใช้ในมัลติคาสท์ คือ 204.0.0.9 และไม่ต้องใช้ไอจีเอ็มพี เนื่องจากเป็นการทำงานภายในโครงข่ายเดียวกัน นอกจากนี้ RIP v.2 ยังแก้ปัญหาเราเตอร์ที่กำหนดให้เราเตอร์ไม่ต้องสนใจค่าฟิลด์ที่แปลความหมายไม่ได้ ให้เป็นค่าที่ใช้ระบุเวอร์ชันของ RIP เพื่อรองรับ RIP ได้ทั้งสองรุ่น

2.4 อัลกอริธึมที่ใช้ในการจัดเส้นทางบนอินเทอร์เน็ต

ในที่นี้เราจะพิจารณาที่จะปรับปรุงโพรโทคอลในการจัดเส้นทางในแบบภายใน ซึ่งมีโครงข่ายที่ยังมีรูปแบบไม่ซับซ้อนมาก เหมาะในการทดสอบและวัดผล ในที่นี้เราจะมุ่งพิจารณาถึงโพรโทคอลที่ใช้ในปัจจุบันเป็นหลัก ซึ่งมีรายละเอียดของอัลกอริธึมที่ใช้จัดเส้นทางบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ดังต่อไปนี้

2.4.1 อัลกอริธึมดีสแทนซ์เวกเตอร์

อัลกอริธึมดีสแทนซ์เวกเตอร์เป็นอัลริทึมที่ใช้ ดีสแทนซ์หรือระยะทางเป็นค่าต้นทุน หมายเลขเครื่องของโนดปลายทางเป็นจุดปลายของเวกเตอร์ โดยมีการทำงานพื้นฐาน คือ จะส่งตารางการจัดเส้นทางของตนไปให้โนดที่อยู่ติดกันทุกโนดอย่างสม่ำเสมอเป็นช่วงเวลา เราเตอร์แต่ละตัวก็จะใช้ตารางการจัดเส้นทางของตนเปรียบเทียบกับตารางการจัดเส้นทางที่ได้รับ เพื่อคำนวณหาเส้นทางที่ให้ระยะทางที่สั้นที่สุด ขั้นตอนการทำงานมีดังต่อไปนี้

1. เมื่อเริ่มเปิดเครื่อง (cold start) ทุกโนดจะรู้เพียงหมายเลขข่ายเชื่อมโยง (link number) และค่าต้นทุน (โดยทั่วไปสำหรับอัลกอริธึมนี้คิดเป็น 1) ซึ่งใช้เป็นค่าต้นทุนของตัวเอง
2. แต่ละโนดจะบรอดคาสท์ค่าต้นทุนของตัวเองพร้อมกับขอข้อมูลในการอัพเดตตารางในการจัดเส้นทางไปบนข่ายเชื่อมโยงที่ตัวเองต่ออยู่ (local link) ให้แก่โนดข้างเคียง
3. เมื่อโนดข้างเคียงได้รับแล้วก็จะอัพเดตตารางระยะทางของตน เพียงบอกให้รู้ว่าในการไปยังโครงข่ายปลายทางหนึ่ง ๆ ต้องผ่านเราเตอร์ข้างเคียง (neighbor router) ใด

ด้วยค่าต้นทุนเท่าไร เป็นข้อมูลพื้นฐานในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด (Bellman-Ford algorithm [18]) ในการคำนวณตารางในการจัดเส้นทางเพื่อไปยังโนดปลายทาง แล้วบรอดคาสท์ทั้งตารางระยะทางที่ได้ใหม่นี้กลับไปอีกครั้ง

4. กระบวนการเช่นนี้จะเกิดซ้ำ ๆ กันเป็นช่วงเวลาหนึ่ง ๆ (ปกติทุก ๆ 30 วินาที) เพื่ออัพเดตข้อมูลของโทโพโลยีของโครงข่ายที่อาจจะเปลี่ยนแปลงไป หรือกรณีเกิดปัญหาข่ายเชื่อมโยงขาด โดยมีกลไกลักษณะเดิม แล้วเลือกเส้นทางอื่นที่มีค่าต้นทุนน้อยที่สุดขณะนั้น

สำหรับอัลกอริธึมดีสแทนซ์เวกเตอร์มีพื้นฐานมาจากวิธีการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดที่เรียกว่า Bellman-Ford algorithm ซึ่งมีหลักการทำงาน ดังต่อไปนี้

Bellman-Ford algorithm

กำหนดให้

$D_i^k(j,d)$: ค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดจากโนด j ไปยังโนด d

$S_i^k(d)$: เส้นทางระหว่างโนดที่ถูกเลือกให้เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดในการไปยังโนด d

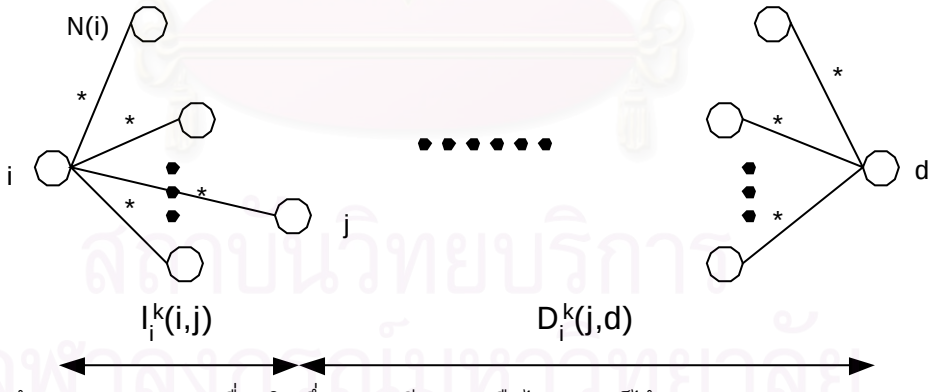
N(i) : เซตของโนดข้างเคียงของโนด I

$l_i^k(i,j)$: ค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดจากโนดต้นทาง i ไปยังโนด j

k : เป็นค่าวนซ้ำรอบการทำงานที่ k

i : เป็นหมายเลขโนดที่กำลังคำนวณอยู่

พิจารณาที่โครงข่ายต่อไปนี้



* : เป็นค่าต้นทุนของแต่ละข่ายเชื่อมโยงซึ่งอาจจะมีค่าเท่าหรือไม่เท่ากันก็ได้

รูปที่ 2.2 : แสดงสัญลักษณ์ที่ใช้แทนโทโพโลยีในโครงข่าย

ค่าเริ่มต้น โนด i กำหนดให้มีค่าต้นทุนเป็นศูนย์ ส่วนโนดอื่น ๆ กำหนดให้มีค่าต้นทุนเป็นอนันต์

ขั้นตอนการทำงาน

1. พิจารณาโนด i อยู่ที่โนดแรก และกำหนดค่าต้นทุนโนดข้างเคียงของโนด i ซึ่งหาได้จากการรวมค่าต้นทุนที่โนด i กับค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงที่จะต่อไปยังโนดข้างเคียงโนดนั้น (ในที่นี้แต่ละโนดจะมีค่าต้นทุนเมื่อระบุโนดต้นทางและโนดปลายทาง

แต่กรณีพิจารณาจากโนดต้นทางใด ๆ ไปยังโนดปลายทางใด ๆ เราพิจารณาเพียงว่าจะมีค่าต้นทุนเพิ่มขึ้นอีกเท่ากับค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยง) ในกรณีที่ได้ค่าต้นทุนหลายค่าให้เลือกเก็บค่าที่น้อยที่สุด (ใน $D_i^k(i,N(i))$) พร้อมกับเก็บเส้นทางนั้นไว้ที่ $S_i^k(d)$

2. พิจารณาโนด i อยู่ที่โนดอื่น ๆ เรียงออกไปจากโนดแรกไปเรื่อย ๆ จนกระทั่ง ค่าต้นทุนของแต่ละโนดมีค่าเท่ากับรอบการทำงานก่อนหน้านั้น (จะสังเกตเห็นว่าเสมือนค่าต้นทุนของแต่ละโนดเป็นค่าต้นทุนรวมกับค่าต้นทุนในทิศพุ่งเข้าหาโนดนั้น ๆ)

2.4.2 **อัลกอริธึมลิงค์สเทต**

อัลกอริธึมลิงค์สเทตไม่ได้แลกเปลี่ยนตารางการจัดเส้นทางโดยตรง เหมือนกับอัลกอริธึมดีสแทนเวกเตอร์ แต่จะให้เราเตอร์แต่ละตัวตรวจสอบสถานะของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้อยู่ว่าใช้ได้หรือไม่ และกำหนดค่าต้นทุนให้ข่ายเชื่อมโยงนั้นด้วย ตามที่ได้อธิบายไว้ในส่วนของตารางการจัดเส้นทาง

ในตอนเริ่มต้นการสร้างตารางในการจัดเส้นทางจะใกล้เคียงกับวิธีแรกแต่แตกต่างกันที่ ใช้วิธี Dijkstra algorithm เป็นพื้นฐานในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด (ข้อมูลที่เก็บจะเป็นข้อมูลของทั้งโครงข่าย) ค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงจะเป็นค่าที่วัดมาแล้วกำหนดเป็นตัวเลข และวิธีการอัพเดตตารางจะใช้วิธีโพรโทคอลฟลัดดิง (flooding protocol) ฟลัดค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยงนี้ที่ไปยังโนดอื่น ๆ ด้วยข่าวสารที่มีหมายเลขกำกับต่อไปเป็นทอด ๆ โดยจะหยุดเมื่อหมายเลขข่าวสารนั้นมีค่าเท่ากับที่เคยรับ

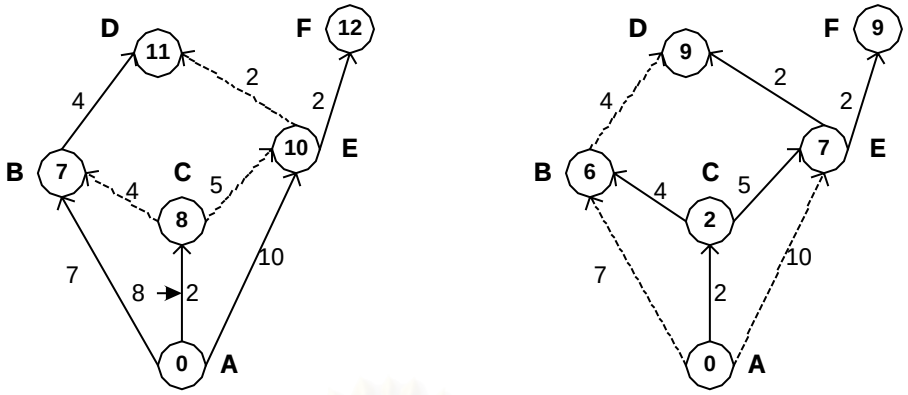
สำหรับอัลกอริธึมลิงค์สเทตมีพื้นฐานมาจากวิธีการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดที่เรียกว่า Dijkstra algorithm ซึ่งมีหลักการทำงาน ดังต่อไปนี้

Dijkstra algorithm

เพื่อความเข้าใจยิ่งขึ้นขอยกตัวอย่างในการอธิบายเป็นการจัดเส้นทางในลักษณะของโครงสร้างต้นไม้ [19][18] ในการอธิบายขั้นตอนการทำงาน

ขั้นตอนการทำงาน

จากรูปที่ 2.3 a) สมมุติโนดในโครงข่ายมีอยู่ 6 โนดแทนด้วยอักษร A-F แต่ละการเชื่อมโยง (link) จะมีค่าต้นทุนกำกับอยู่ และหมายเลขที่อยู่บนโนดแทนเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path) ในการไปยังโนดนั้น ๆ จากโนดราก (A) ซึ่งหาได้จากการรวมค่าต้นทุนของโนดที่ผ่านทั้งหมด



รูปที่ 2.3 : แสดงกระบวนการจัดเส้นทางของ Dijkstra a) ก่อนเปลี่ยนค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยง b) หลังเปลี่ยนค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยง

ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงโทโพโลยีเกิดขึ้น (เช่น เกิดความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยง หรือค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยงเปลี่ยนแปลง) เราเตอร์ที่อยู่ระหว่างข่ายเชื่อมโยงที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งสอง จะอัพเดตฐานข้อมูลเดิมที่มีอยู่แล้วกระจาย การเปลี่ยนแปลงนี้ให้เราเตอร์อื่น ๆ ด้วยโพรโทคอลฟลัดดิง และนอกเหนือจากการนี้จะมีการอัพเดตข้อมูลเกี่ยวกับข่ายเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นทุก ๆ ช่วงเวลาหนึ่ง (ในที่นี้ไม่ขอกล่าวถึงข่าวสารที่เกิดขึ้นในระบบ [17]) ไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงโทโพโลยีหรือไม่ก็ตาม หลังจากนั้นทุกเราเตอร์ที่อยู่ในพื้นที่ดังกล่าวจะทำกระบวนการ OSPF ใหม่อีกครั้ง โดยในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโทโพโลยีขึ้น เนื่องจากความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยง ค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงจะถูกเพิ่มขึ้นก่อน เพื่อไม่ให้เส้นทางที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงนั้นถูกเลือกหลังจากเริ่มการทำงานอีกครั้ง ดังนั้นสมมุติว่าที่ข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด A และโนด C มีการเปลี่ยนค่าต้นทุนเกิดขึ้น (จาก 8 เป็น 2) โนด A จะเลือกเส้นทางที่เป็นเส้นทึบเป็นทางที่สั้นที่สุด (2 มีค่าน้อยกว่า 7 และ 10) ที่ลูกโนดของ A ถัดมาคือโนด B เนื่องจากมีผลรวมค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดคือ 6 น้อยกว่า โนด E คือ 7 เส้นทางจากโนด C ไปโนด B จะถูกเลือก (แสดงด้วยเส้นทึบ) ที่ลูกโนดของโนด B จะยังไม่ถูกพิจารณาต่อ เนื่องจากผลรวมค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดยังมากกว่าเส้นทางจากโนด C ไปโนด E คือ 10 มากกว่า 7 ดังที่แสดงในตารางที่ 2.1 ดังนั้นเส้นทางจากโนด C ไปโนด E จะถูกเลือก และพิจารณาลูกโนดของโนด E ต่อไปว่ามีค่าผลรวมค่าต้นทุนมากกว่าหรือน้อยกว่าของผลรวมค่าต้นทุนของโนดอื่น ๆ ในขณะนั้น แล้วพิจารณาเช่นเดียวกับที่พิจารณามาก่อนหน้านี้ ดังนั้นโนด D มีผลรวมค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดเปลี่ยนจาก 11 เป็น 9 กลับมาพิจารณาที่โนด E ต่อ (ลูกโนดของโนด A) ผลรวมค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดของ โนด F เปลี่ยนจาก 12 เป็น 9 และที่โนด D ก็เปลี่ยนอีกครั้งจาก 10 เป็น 9 ผลลัพธ์ของเส้นทางที่เลือกหลังเกิดการเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยง เส้นทางที่เลือกถูกแสดงด้วยเส้นทึบในรูปที่ 2.3 b)

ตารางที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการทำงานในวิธีของ Dijkstra

Selected node	v[A]	V[B]	V[C]	v[D]	v[E]	v[F]
2.a) old	0	7	8	11	10	12
2.b) init	0	*	*	*	*	*
A	(self)	7	2		10	
C		6	(self)		7	
B		(self)		10		
E				9	(self)	9

* : infinity

v[i] : ผลรวมค่าต้นทุนจากโนดต้นทางไปยังโนด i

จากตารางนี้ จะได้เส้นทางที่มีผลรวมค่าต้นทุนที่น้อยที่สุด โดยพิจารณาโนดย้อนขึ้นไปจากโนดปลายทางที่แสดงในตาราง เช่น จาก A -> F, E->F, C->E, A->C ด้วยค่าต้นทุนรวมเป็น 9 เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการดีเทกลูปที่เกิดขึ้นบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ต

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดีเทกลูปในทุกลำดับการบรอดคาสท์ของแต่ละโนดที่เกิดลูปบนโครงข่ายใด ๆ ซึ่งแนวทางการวิเคราะห์ทางรูปแบบการเกิดลูปต่าง ๆ นี้ยังไม่มีผู้ใดได้ทำการวิเคราะห์มาก่อน ในปัจจุบันเป็นเพียงการทดสอบโครงข่ายและหาทางแก้ไขลูปจากโครงข่ายตัวอย่างเพียงโครงข่ายเดียว หรือใช้วิธีส่งเมสเสจเข้าไปในระบบแล้วดูเวลาที่ระบบใช้ในการกลับเข้าสู่เสถียรภาพอีกครั้งในการวัดเสถียรภาพของระบบ ซึ่งเป็นการมองภาพรวมของทั้งปัญหาการเกิดลูปและปัญหาอื่นแทนการแก้ปัญหาลูปอย่างแท้จริงเพื่อลดความไม่มีเสถียรภาพของระบบลง

3.1 หลักการดีเทกลูป

มีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้กรรมวิธีในการดีเทกลูปทำได้ยากลำบาก และทำได้อย่างไม่ชัดเจน ปัจจัยเหล่านั้น ได้แก่

- ลักษณะโทโพโลยีในโครงข่ายที่ไม่ตายตัว เมื่อวิเคราะห์เหตุการณ์ที่เกิดลูปกับโครงข่ายหนึ่งเสร็จแล้วไม่สามารถถูกนำไปใช้วิเคราะห์กับโครงข่ายอื่นได้
- ค่าต้นทุนของแต่ละข่ายเชื่อมโยงมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา กล่าวคือ แม้ว่าโครงข่ายมีโทโพโลยีเดียวกัน แต่ค่าต้นทุนในโครงข่ายที่ต่างกันก็ให้ผลในการเกิดลูปที่ต่างกัน ค่าต้นทุนมีค่าที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลานั้น เกิดได้จากการเซตค่าต้นทุนใหม่ตามทราฟฟิกของข่ายเชื่อมโยงที่มีการเปลี่ยนแปลง และผลจากกระบวนการเลือกเส้นทาง
- ลำดับในการบรอดคาสท์ของแต่ละโนด แม้ว่าปัจจัยทั้งสองข้อด้านบนไม่เปลี่ยนแปลง แต่ถ้าลำดับในการบรอดคาสท์ต่างกัน ก็มีผลในการเกิดลูปที่ต่างกัน กล่าวคือ ลำดับการบรอดคาสท์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าต้นทุนของโนดและนำไปสู่การตัดสินใจเลือกเส้นทางที่จะผ่าน ดังนั้นจะมีผลกระทบต่อการเกิดลูปและหลุดจากการเกิดลูปได้เช่นกัน

แนวทางแก้ปัญหาที่เกิดในการดีเทกลูปทั้ง 3 ประการ สามารถทำได้โดย

1. ปัญหาลักษณะโทโพโลยีในโครงข่าย

ลักษณะการเชื่อมต่อของโนดในโครงข่ายใด ๆ จะมีลักษณะที่มีรูปแบบ ดังนั้นเพื่อให้สามารถรองรับกับการเชื่อมต่อของโนดในโครงข่ายใด ๆ ได้ จึงต้องมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างรูปแบบการเชื่อมต่อนี้ขึ้นซึ่งเรียกว่า ชุดโนดตัวแทน เพื่อใช้แทนรูปแบบของโนดต่าง ๆ ที่เชื่อมต่อกันในโครงข่าย

2. ปัญหาค่าต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงได้ไม่คงที่

ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้ค่าต้นทุนที่เป็นตัวแปรแทนตัวเลข และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนเกิดขึ้นตัวแปรตัวนี้ก็สามารถระบุได้ถึงเส้นทางที่เปลี่ยนแปลงได้ด้วย ดังนั้นค่าต้นทุนนี้จึงใช้เป็นเส้นทางที่ผ่านโนดแต่ละโนดมาระบุ และเมื่อมีการเพิ่มค่าต้นทุนก็ใช้วิธีการเขียนโนดต่อท้ายเป็นทอด ๆ

3. ปัญหาลำดับการบรอดคาสท์

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าลำดับการบรอดคาสท์ของโนดในโครงข่ายมีผลกระทบต่อการเกิดลูปและหลุดจากการเกิดลูป ดังนั้นเพื่อที่จะตรวจจับการเกิดลูปในโครงข่าย และตรวจว่าลูปที่เกิดนั้นจะเกิดได้นานแค่ไหน ลำดับการบรอดคาสท์นี้จึงใช้เป็นข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์หาวิธีการแก้ลูปที่เกิดขึ้นต่อไป เช่น ใช้อัลกอริธึมในการบังคับลำดับการบรอดคาสท์ที่ไม่ให้เกิดลูปหรือเกิดลูปน้อยที่สุด

3.1.1 **ข้อกำหนดและเงื่อนไขในการดีเทกลูป**

1. ไม่มีข่ายเชื่อมโยงสำรอง (redundant link) สำหรับคู่โนดหนึ่ง ๆ หรือถ้ามี ความหมายของข่ายเชื่อมโยงขาดจะถือว่าข่ายเชื่อมโยงสำรองก็จะต้องขาดด้วย

2. ในการวิเคราะห์จะพิจารณาได้หลังระบบเข้าสู่สภาวะเสถียรภาพก่อน และระหว่างนี้ถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของทราฟฟิก

3. พิจารณาค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงทั้งสองทิศทางในกรณีที่มีค่าเท่ากัน

3.1.2 หลักการดีเทกลูป

1. สร้างชุดโนดตัวแทนของโครงข่าย เพื่อการวิเคราะห์ลูปได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ครอบคลุมโทโพโลยีทุกรูปแบบ

2. สร้างแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์ของโนดจากชุดโนดตัวแทน หลังจากได้ชุดโนดตัวแทนแล้วเราจะได้อสมการเงื่อนไข ซึ่งเป็นอสมการที่ได้จากการพิจารณาเส้นทางที่โนดหนึ่งเลือกที่จะผ่านอีกเส้นทางหนึ่ง นั่นแสดงว่าเส้นทางที่เลือกนี้จะต้องเป็นเส้นทางที่มีค่าต้นทุนรวมที่น้อยกว่าเส้นทางอื่นที่จะไปยังโนดเดียวกันนั้นได้ (แสดงในภาคผนวก ข.) แล้ววิเคราะห์หาแผนภาพลำดับที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยเริ่มที่แยกวิเคราะห์ให้โนดหนึ่ง ๆ บรอดคาสท์ก่อนแล้วพิจารณาเหตุการณ์ของโนดที่จะบรอดคาสท์ในลำดับถัดมาทุกโนดว่ามีการเปลี่ยนแปลงการเลือกเส้นทางเป็นอย่างไร ด้วยการใช้อสมการเงื่อนไขนี้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่จะผ่าน โดยยึดหลักการตัดสินใจเลือกเส้นทางดังที่กล่าวในบทที่ 2 เป็นหลัก ซึ่งจะทำให้ชั้นของแผนภาพลำดับลดลงและตัดเหตุการณ์ที่ไม่เกิดขึ้นจริงออกไปได้ จากนั้นก็วิเคราะห์ให้โนดอื่น ๆ ที่เหลือบรอดคาสท์ก่อนจนครบทุกโนด

3. หาลำดับการบรอดคาสท์ของเหตุการณ์ที่โนดหนึ่ง ๆ ในชุดโนดตัวแทนจะเลือกผ่านอีกโนดหนึ่งในชุดโนดตัวแทนในการไปยังโนดปลายทางอีกด้านที่ข่ายเชื่อมโยงขาด

4. หาลำดับการบรอดคาสท์ของเหตุการณ์ที่จะทำให้เกิดลูปแบบ 2 โนด ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงข่าย โดยใช้ลำดับการบรอดคาสท์ที่ได้จากข้อ 3 มาหาลำดับการบรอดคาสท์ที่เกิดร่วมกัน (intersection) ในกรณีลูปแบบมากกว่า 2 โนด ก็ทำเช่นเดียวกัน ก็จะได้ลำดับในการเกิดลูปในแต่ละขนาดจนครบทุกกรณี

คำนวณความน่าจะเป็นของการเกิดลูป

$$\text{ความน่าจะเป็นของการเกิดลูป} = \frac{\text{จำนวนลำดับที่เกิดลูป}}{\text{จำนวนลำดับที่พิจารณาทั้งหมด}}$$

จากขั้นตอนที่ 1 – 4 จะเห็นว่าการที่เราพิจารณาโนดตัวแทนแยกเป็นส่วน ๆ แล้วจึงนำมาประกอบกันเพื่อตรวจจับลูปรูปแบบต่าง ๆ นั้นเป็นแนวคิดที่น่าสนใจ เพราะช่วยลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ลูปได้ อย่างไรก็ตาม การนำผลมาประกอบการพิจารณาอาจให้ผลที่ไม่สอดคล้องกับ

ความเป็นจริงก็ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการพิสูจน์ถึงความเป็นไปได้ของวิธีการนี้ ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ก. แล้ว

ก่อนที่จะเข้าในรายละเอียดการดีเทกลูปขออธิบายถึงวิธีพิสูจน์ผลการเปรียบเทียบชุดตัวแปร 2 ว่าชุดไหนมากกว่ากันด้วยการใช้อสมการอื่นช่วย เพื่อนำไปใช้ในการพิสูจน์ในภายหลัง

3.1.3 การหาผลการเปรียบเทียบชุดตัวแปร 2 ชุด โดยการใช้อสมการอื่นช่วย

1. ใช้วิธีจัดรูปชุดตัวแปรทั้งสองแล้วจึงเปรียบเทียบดูจากอสมการที่รู้อยู่แล้ว

   1.1 ถ้าอสมการที่รู้อยู่ก่อน คือ $a<b$ ดังนั้น $a<b+c$ โดยที่ $a,b,c > 0$

   1.2 ในกรณีที่ชุดตัวแปรที่จะเปรียบเทียบอยู่ในรูปที่ไม่สามารถระบุได้ว่าชุดไหนมากกว่ากันให้แยกออกเป็นตัวแปรย่อย ๆ แล้วหาอสมการที่สามารถใช้หลักการในข้อ 1.1 ได้ หรือจัดรูปใหม่โดยการบวกตัวแปรที่มีในอีกอสมการเพิ่มเข้าไป แล้วใช้อสมการนั้นช่วยในการเปรียบเทียบ ดังเช่นที่พิสูจน์ในรายละเอียดในกรณี โนดตั้งต้น C ในชั้น 3E-F-A

ในการเปรียบเทียบชุดตัวแปรในการเลือกเส้นทางนี้ โดยมากจะพบว่าชุดตัวแปรที่อยู่ทางซ้ายจะมีค่ามาก ดังนั้นเป็นไปได้มากที่ทางซ้ายจะมีค่าที่มากกว่าทางขวา ดังนั้นในการเปรียบเทียบจะทำได้ง่ายขึ้น ถ้ามุ่งเน้นเปรียบเทียบชุดตัวแปรทางซ้ายมีค่ามากกว่าชุดตัวแปรทางขวา

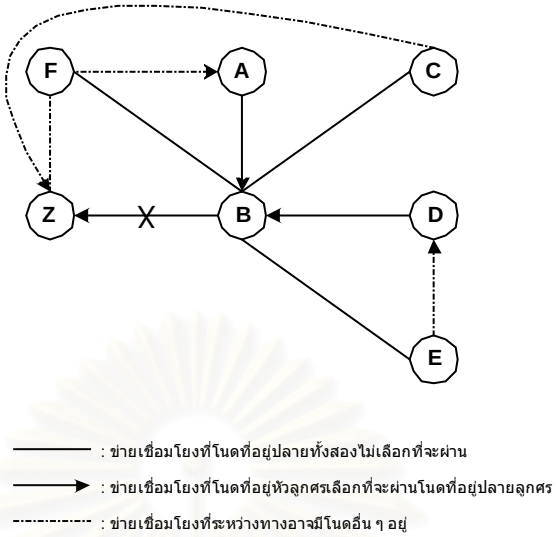
2. ใช้วิธียกอสมการที่รู้อยู่แล้วขึ้นแล้วจัดรูปชุดตัวแปรให้ตรงกับชุดตัวแปรที่ต้องการเปรียบเทียบอีกที

3.2 รายละเอียดการดีเทกลูป

จากหลักการดีเทกลูปที่ได้กล่าวไปแล้วมีรายละเอียดและที่มาที่ไปของขั้นตอนการดีเทกลูปดังต่อไปนี้

3.2.1 สร้างชุดโนดตัวแทนของโครงข่าย

เมื่อพิจารณารูปแบบโนดข้างเคียงที่อยู่ติดกับโนดที่พบข่ายเชื่อมโยงขาด จะพบว่ามีรูปแบบลักษณะการเชื่อมต่อที่เป็นไปได้อยู่จำกัด ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 : แสดงชุดโนดตัวแทนของโครงข่าย

นิยามรูปแบบของชุดโนดตัวแทนก่อนข่ายเชื่อมโยงขาด

1. B แทนโนดที่ตรวจพบข่ายเชื่อมโยงขาด
2. Z แทนโนดอีกด้านหนึ่งของข่ายเชื่อมโยงขาด ซึ่งพิจารณาเป็นโนดปลายทางของโนดอื่น ๆ
3. A แทนโนดที่เลือกผ่าน B โดยตรงและตัวเองมีทางอื่นที่จะไปยัง Z ได้
4. C แทนโนดที่เลือกไม่ผ่าน B แต่เลือกไปทางอื่นในการไปยัง Z (ดังนั้นข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด C กับโนด Z สามารถมีโนดอื่นอยู่ได้)
5. D แทนโนดที่เลือกผ่าน B โดยตรงและตัวเองไม่มีทางอื่นที่จะไปยัง Z อีก
6. E แทนโนดที่เลือกไม่ผ่านโนด B โดยตรงแต่ผ่านทางโนดอื่นคือโนด D และตัวเองไม่มีทางอื่นที่จะไปยัง Z อีก (ดังนั้นข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด E กับโนด D สามารถมีโนดอื่นอยู่ได้)
7. F แทนโนดที่เลือกไม่ผ่านโนด B โดยตรงแต่ผ่านทางโนดอื่นคือโนด A และตัวเองมีทางอื่นที่จะไปยัง Z ได้ (ดังนั้นข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด A กับโนด F และโนด F กับโนด Z สามารถมีโนดอื่นอยู่ได้)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากชุดโนดตัวแทนที่ได้นี้ทำให้เราได้อสมการที่แสดงการเปรียบเทียบค่าต้นทุนภายในโครงข่ายของชุดโนดตัวแทนขึ้น ด้วยการพิจารณาข่ายเชื่อมโยงที่โนดหนึ่ง ๆ เลือกที่จะผ่าน นั่นแสดงว่าผลรวมค่าต้นทุนของเส้นทางนี้ต้องน้อยกว่าเส้นทางอื่น ๆ ที่ไปยังปลายทางเดียวกัน อสมการนี้เรียกว่าอสมการเงื่อนไข ซึ่งแสดงในภาคผนวก ข. เนื่องจากอสมการเงื่อนไขที่ได้มีบางอสมการถูกนำมาใช้อ้างอิงในการเปรียบเทียบค่าต้นทุนเพื่อหาเส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดอยู่บ่อย ๆ จึงขอยกขึ้นมากล่าวถึงไว้ล่วงหน้า จากอสมการ (ข.1) และ (ข.2) พิจารณาเป็น

$$BE \geq BD + DE \tag{a}$$

อสมการ (ข.3) และ (ข.4) พิจารณาเป็น

$$BF \geq BA + AF \tag{b}$$

และอสมการ (ข.8) และ (ข.9)

$$BZ \leq BCZ \tag{c}$$

$$CZ \leq CB + BZ \tag{d}$$

หมายเหตุ

1. สำหรับโนดที่ต่อกับโนด B แต่ไม่เลือกที่จะผ่านทั้งโนด B และโนด NeB (Ne หมายถึง neighbor ดังนั้นโนด NeB จะหมายถึง โนดข้างเคียงที่ติดกับโนด B) จะไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ เนื่องจากโนดเหล่านั้นมีเส้นทางอื่นที่ค่าต้นทุนต่ำกว่าที่จะไปได้อยู่แล้ว และหลังจากเกิดข่ายเชื่อมโยงขาดผลที่เกิดขึ้นคือ ค่าต้นทุนของโนดที่พิจารณามีแต่จะสูงขึ้นหรือเท่าเดิมจากก่อนหน้านี้ (ขณะอยู่ในสภาวะเสถียรหรือก่อนข่ายเชื่อมโยงขาด)

2. จากชุดโนดตัวแทนอาจมีโนดรูปแบบเดียวกันนี้มากกว่าหนึ่งโนดได้ ดังนั้นโนดในชุดโนดตัวแทนนี้จะถือว่าเป็นโนดที่มีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดในแต่ละรูปแบบโนดนั้น ๆ เนื่องจากโนดที่มีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดจึงจะมีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกเส้นทางของโนด

3. ในกรณีที่ใช้อสมการ (a), (b), (c) และ (d) แล้วไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าอสมการนั้นมากกว่าหรือน้อยกว่า เราจะพิจารณาอสมการตัวแทนอื่น ๆ ทั้งหมดในภาคผนวก ข. ด้วย (โดยการแทนอสมการตัวแทนที่เกี่ยวข้องเข้าไปแล้วดูว่าสามารถสรุปผลได้หรือไม่ ทีละอสมการจนครบ) ก่อนที่จะสรุปว่า ไม่สามารถสรุปได้ว่าอสมการนี้มากกว่าหรือน้อยกว่าเสมอ เพียงแต่จะไม่ขอกล่าวถึงในการบรรยาย ยกเว้นกรณีที่ใช้อสมการตัวแทนอื่นนั้นแล้วให้ผลที่สรุปได้จึงจะแสดงในรายละเอียด

4. อสมการเงื่อนไขที่ได้นี้ได้มาจากการสร้างชุดโนดตัวแทนที่พิจารณากรณีก่อนข่ายเชื่อมโยงขาด แต่หลังข่ายเชื่อมโยงขาดยังใช้ได้อยู่ในกรณีที่โนด B บรอดคาสท์ทีหลัง นั่นแสดงว่าค่าต้นทุนของโนด B ถูกโนดอื่นทับค่าอนันต์ เท่ากับว่าขณะนี้หลังข่ายเชื่อมโยงขาดทุกโนดยังคงใช้ค่าต้นทุนเดิมก่อนข่ายเชื่อมโยงขาด และระหว่างเกิดการบรอดคาสท์ค่าต้นทุนมีการเปลี่ยนแปลงจริงแต่เป็นการเปลี่ยนแปลงที่นำค่าต้นทุนเดิมมาคิด ซึ่งผลการใช้ตัวแปรแทนค่าต้นทุนทำให้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนเกิดขึ้นผลจะรวมอยู่ในค่าตัวแปรใหม่นั้นแล้ว เนื่องจากใช้การเขียนโนดที่เปลี่ยนแปลงเส้นทางต่อท้ายไว้

3.2.2 **สร้างแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์จากชุดโนดตัวแทน**

ในกรณีที่โนดที่ติดกับโนด B บรอดคาสท์ก่อนที่โนด B จะบรอดคาสท์หลังจากข่ายเชื่อมโยงขาด ผลจะทำให้ให้โนด B ที่มีค่าต้นทุนขณะนั้นเป็นอนันต์ รับค่าต้นทุนของเส้นทางใหม่ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเสมอ ดังนั้นในการพิจารณาจึงแยกพิจารณา ออกเป็น 2 ส่วน คือ

- ส่วนที่โนดที่รู้ว่าข่ายเชื่อมโยงขาดยังไม่ทันบรอดคาสท์ออกไปก็ถูกโนดข้างเคียงบรอดคาสท์ก่อน
- ส่วนที่โนดที่รู้ว่าข่ายเชื่อมโยงขาดบรอดคาสท์ออกไปทันที

ในการสร้างแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์จะแยกพิจารณาย่อยออกเป็นส่วน ๆ โดยพิจารณาโนดที่ติดกับโนด B เป็นโนดต่าง ๆ ที่เริ่มส่งก่อนที่โนด B จะบรอดคาสท์โดยตรงได้เลย แต่เนื่องจากการพิจารณาเช่นนี้ทำให้ได้แผนภาพลำดับที่เกิดได้เยอะมาก เพราะมีเงื่อนไขที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดยังมีอยู่น้อย ประกอบกับหลังจากโนดเปลี่ยนเส้นทางแล้วอาจจะเปลี่ยนกลับมาเลือกอีกเส้นทางซึ่งให้ค่าต้นทุนที่น้อยกว่าได้ ดังนั้นจึงเปลี่ยนมาใช้

อีกแนวคิดหนึ่ง คือ พิจารณาที่โนด B ว่าจะเลือกผ่านโนดไหนในการไปยังโนด Z ซึ่งให้ค่าต้นทุนที่น้อยที่สุด แล้วก็เขียนแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์นั้นแทนกรณีที่โนด B เลือกเส้นทางอื่นก่อนแล้วเปลี่ยนมาเลือกเส้นทางที่น้อยที่สุดเส้นทางนี้ได้ด้วย

พิจารณาค่าต้นทุนเริ่มต้นในการบรอดคาสท์ของโนดต่าง ๆ ซึ่งเริ่มพิจารณาที่โครงข่ายอยู่ในสภาวะเสถียร นั่นหมายความว่าเส้นทางที่ทุกโนดในโครงข่ายเลือกเป็นเส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนต่ำที่สุดแล้ว เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดโนด B เป็นเพียงโนดเดียวที่มีค่าต้นทุนที่เปลี่ยนไป ดังนั้นขณะนี้ไม่ว่าโนดใดบรอดคาสท์ย่อมไม่ส่งผลในการเปลี่ยนเส้นทางที่เลือก ยกเว้นส่งผลต่อโนด B ที่มีค่าต้นทุนเป็นอนันต์และจะเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนเมื่อโนดอื่นบรอดคาสท์มาให้เพราะค่าต้นทุนต้องน้อยกว่าอนันต์อยู่แล้ว แล้วโนด B จึงกระจายการเปลี่ยนแปลงนี้ออกไป (ส่วนกรณีโนด B บรอดคาสท์ก่อนก็เป็นอีกเหตุการณ์ที่ให้ผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนเช่นกันซึ่งจะแยกออกพิจารณาในตอนท้าย) ดังนั้นก่อนที่โนด B จะบรอดคาสท์ระหว่างนี้โนดอื่นจะบรอดคาสท์มาหาโนด B ซึ่งทำให้ค่าต้นทุนของโนด B เปลี่ยนไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งโนดที่ให้ค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดบรอดคาสท์มาให้ จากประเด็นตรงนี้แสดงให้เห็นว่า เราไม่จำเป็นต้องเขียนแผนภาพให้ครบทุกกรณี เพียงหาเหตุการณ์ที่จะให้เขียนแผนภาพที่ซ้ำกันออกมาพิจารณาเท่านั้น โดยมีหลักการอยู่ว่าถ้าเราหาค่าเริ่มต้นค่าต้นทุนของทุกโนดในแผนภาพ และเงื่อนไขที่ระบุว่าค่าต้นทุนใดมีค่ามากหรือน้อยกว่าค่าต้นทุดในตอนเริ่มต้นของแผนภาพ (ถ้ามี) ได้เหมือน ผลก็จะได้แผนภาพที่เหมือนกัน เพราะแผนภาพที่เขียนหลังจากค่าเริ่มต้นเหล่านั้นเขียนทุกกรณีที่เกิดและใช้หลักการในการตัดสินใจเลือกเส้นทางเหมือนกัน

แยกพิจารณาหาแผนภาพลำดับที่ครอบคลุม เพื่อลดเหตุการณ์ที่จะต้องพิจารณาลงเป็น 2 ส่วนตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนี้

3.2.2.1 ส่วนที่โนดที่รู้ว่าข่ายเชื่อมโยงขาดยังไม่ทันบรอดคาสท์ออกไปก็ถูกโนดข้างเคียงบรอดคาสท์ก่อน

กำหนดให้

XminAll : แทนโนดที่ติดกับโนด B ที่มีค่าต้นทุนรวมจากโนด B ไปยังโนด Z โดยผ่านโนดนี้มีค่าต้นทุนรวมที่น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับการผ่านโนดอื่นที่ติดกับโนด B ทั้งหมด

Xmin : แทนโนดที่ติดกับโนด B ที่มีค่าต้นทุนรวมจากโนด B ไปยังโนด Z โดยผ่านโนดนี้มีค่าต้นทุนรวมที่น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับผ่านโนดอื่นที่ติดกับโนด B ที่บรอดคาสท์ก่อนโนด B

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเมื่อโนด B บรอดคาสท์ ดังนั้นแยกเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นออกเป็น 2 เหตุการณ์ ดังต่อไปนี้

1. กรณีโนด XminAll บรอดคาสท์ก่อนที่โนด B จะบรอดคาสท์ ไม่ว่าโนดอื่นจะบรอดคาสท์ในลำดับก่อนหรือหลังของโนด XminAll และโนด B ผลที่ได้ก็ให้แผนภาพที่เหมือนกันกับแผนภาพของโนด XminAll ที่บรอดคาสท์เป็นโนดแรก เพราะโนด B ก็ยังคงเลือกผ่านโนด XminAll อยู่ดี ถ้าเขียนลำดับการบรอดคาสท์ที่เกิดขึ้นได้ของเหตุการณ์นี้จะสามารถเขียนได้เป็น (----XminAll----B----) โดยขีดละที่เขียนหมายถึงลำดับการบรอดคาสท์ของโนดอื่น ๆ ที่สามารถมีลำดับการบรอดคาสท์ที่แทรกอยู่ตรงตำแหน่งที่ขีดละได้ ซึ่งก็จะให้แผนภาพที่เหมือนกัน ดังนั้นแผนภาพในเหตุการณ์นี้ที่ต้องเขียนคือ “แผนภาพโนด XminAll” บรอดคาสท์ก่อน

2. กรณีโนด XminAll บรอดคาสท์หลังจากโนด B บรอดคาสท์หรือ (----Xmin----B----XminAll----) สำหรับเหตุการณ์นี้สังเกตว่าถ้าโนดที่บรอดคาสท์ก่อนโนด B ไม่ใช่โนด XminAll ซึ่งก็ทำให้โนด B ถูกเปลี่ยนค่าต้นทุนเช่นกัน เพราะโนด B มีค่าต้นทุนเป็นอนันต์ เมื่อโนด B บรอดคาสท์ผลอาจจะทำให้ค่าต้นทุนของโนด XminAll เปลี่ยนแปลงหรืออาจจะไม่เปลี่ยนไปก็ได้ นั่นแสดงว่าถ้าเราต้องการจะเขียนแผนภาพกรณีโนด XminAll บรอดคาสท์ก่อน จะเห็นว่าแผนภาพที่เกิดไม่ได้มีแผนภาพเดียว แผนภาพที่เกิดขึ้นได้สามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี

   2.1 เมื่อถึงลำดับโนด B บรอดคาสท์ ไม่ทำให้โนด XminAll มีค่าต้นทุนที่เปลี่ยนไป

   สังเกตว่าโนด XminAll จะต้องไม่ใช่โนด A และโนด D ไม่เช่นนั้นพอโนด B บรอดคาสท์จะทำให้โนด XminAll มีค่าต้นทุนที่เปลี่ยนไป ซึ่งไม่ใช่กรณีที่วิเคราะห์ในหัวข้อ 2.1 นี้ และโนด XminAll เป็นโนด E และโนด F ไม่ได้เนื่องจากมีเส้นทางที่โนด B เลือกที่จะผ่านไปยังโนด Z ที่ให้ค่าต้นทุนที่น้อยกว่าได้ คือโนด D และโนด A ตามลำดับ ดังนั้นโนด XminAll ในกรณีนี้เป็นได้เพียงโนด C

   เมื่อถึงลำดับที่โนด XminAll บรอดคาสท์โนด B ก็เลือกผ่านโนด XminAll ซึ่งมีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุด แต่ก่อนหน้าที่โนด XminAll จะบรอดคาสท์โนด B จะเลือกผ่านโนด Xmin ซึ่งมีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดก่อนที่โนด B จะบรอดคาสท์ พอโนด B บรอดคาสท์จะทำให้

โนดที่เลือกที่จะผ่านโนด B (โนด A และโนด D) มีค่าต้นทุนที่เปลี่ยนไป ดังนั้นแผนภาพที่เกิดขึ้นในกรณีนี้คือ “แผนภาพโนด XminAll บรอดคาสท์ก่อน (ถ้าไม่นับเหตุการณ์ที่โนดอื่นที่บรอดคาสท์ก่อนโนด XminAll ซึ่งมีลำดับที่ตายตัว) แต่มีค่าต้นทุนตอนเริ่มต้นจะเปลี่ยนไปจากตอนก่อนข่ายเชื่อมโยงขาดเป็นค่าต่อไปนี้ คือ

1. โนด A และโนด D ตอนเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับค่าต้นทุนรวมที่โนด B เลือกผ่านโนด Xmin ไปยังโนด Z บวกกับ ค่าต้นทุนระหว่างโนด A กับโนด B และโนด D กับโนด B ตามลำดับ (หรือ ค่าต้นทุนโนด A : (BXmin+Xmin->Z+AB), D: (BXmin+Xmin->Z+DB))

2. ถ้าหลังจากโนด B บรอดคาสท์แล้วโนด D บรอดคาสท์ต่อมาก่อนที่โนด XminAll จะบรอดคาสท์ก็จะทำให้โนด E มีค่าต้นทุนเปลี่ยนไปด้วย (--B--D--C--,--B--A--C--) เป็น E: (BXmin+Xmin->Z+DB)+ED ในกรณีโนด F ก็เช่นกันจะได้ F: (BXmin+Xmin->Z+AB)+FA

3. โนด C ยังคงมีค่าเช่นเดียวกับก่อนข่ายเชื่อมโยงขาดเช่นเดิม”

2.2 เมื่อถึงลำดับโนด B บรอดคาสท์ ทำให้โนด XminAll มีค่าต้นทุนที่เปลี่ยนไป

โนด XminAll ที่เป็นไปได้ในชุดโนดตัวแทนที่จะถูกโนด B ทับค่าต้นทุน ได้แก่ โนด A หรือโนด D

ในช่วงที่โนด B บรอดคาสท์จะเห็นว่าโนด B บรอดคาสท์เส้นทางที่โนด B เลือกผ่านโนด Xmin (ทำให้ค่าเริ่มต้นเปลี่ยน) ส่วนโนด XminAll จะไม่ใช่โนดเดิมแล้ว แต่จะเป็นโนดอื่นแทน ดังนั้นพิจารณาหาโนด XminAll ตัวใหม่ จากค่าต้นทุนของโนด B ที่จะไปโนด Z โดยผ่านโนด C, E, F, A (ค่าใหม่) และโนด D (ค่าใหม่) หลังจากโนด B บรอดคาสท์ไปแล้ว

พิจารณาโนด XminAll เดิมเป็นโนด A ก่อน

2.2.1 ถ้าโนด Xmin เป็นโนดที่ให้ค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดในขณะนั้น (หลังโนด B บรอดคาสท์) ดังนั้นโนด XminAll ใหม่คือโนด Xmin แผนภาพที่ใช้ คือ “แผนภาพของโนด Xmin “

2.2.2 ถ้าหลังโนด B บรอดคาสท์มีโนดที่มีค่าต้นทุนรวมน้อยกว่าโนด Xmin แล้ว ผลก็จะคล้าย ๆ ข้อ 2.1 คือโนด B เลือกโนด Xmin ในช่วงก่อนโนด B บรอดคาสท์ ส่วนหลังจากนั้นก็เลือกโนดอื่นซึ่งน้อยกว่าการผ่านโนด Xmin ที่บรอดคาสท์หลังโนด B

ส่วนกรณีโนด XminAll เป็นโนด D ก็ผลลักษณะเดียวกัน เพียงแต่เปลี่ยนโนด A เป็นโนด D และโนด D เป็นโนด A

สรุปแล้วในกรณีที่โนด B ยังไม่บรอดคาสท์ออกไป เราต้องเขียนแผนภาพกรณีที่สมมุติให้แต่ละโนดมีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดบรอดคาสท์ก่อนโนด B (ซึ่งให้ผลเดียวกับการให้โนดที่มีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดบรอดคาสท์เป็นโนดแรก) และกรณีบรอดคาสท์หลังโนด B ด้วยโนดเริ่มต้นเป็นโนด C,E,F

จากผลการวิเคราะห์ที่กล่าวไปในข้างต้น จะเห็นว่าแผนภาพที่เราต้องเขียนเป็นแผนภาพของแต่ละโนดที่ให้ค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดที่โนด B เลือกผ่านไปยังโนด Z และเป็นโนดที่บรอดคาสท์ก่อนเป็นโนดแรก ด้วยค่าต้นทุนเริ่มต้นของชุดโนดตัวแทนเป็นค่าต้นทุนก่อนข่ายเชื่อมโยงขาด และในกรณีที่ค่าต้นทุนเริ่มต้นเป็นค่าอื่นก็วิเคราะห์เช่นเดียวกันเพียงแต่เปลี่ยนค่าต้นทุนเริ่มต้น แต่อสมการเงื่อนไขยังคงเหมือนเดิม

1. ส่วนที่โนดที่รู้ว่าข่ายเชื่อมโยงขาดบรอดคาสท์ออกไปทันที

ผลการบรอดคาสท์ของโนด B ทำให้โนด A และโนด D มีค่าต้นทุนเป็นค่าอนันต์เนื่องจากโนดทั้งสองเลือกผ่านโนด B อยู่แล้ว ดังนั้นโนดทั้งสองจึงรับการอัพเดตค่าต้นทุนจากโนด B โดยไม่เปรียบเทียบกับค่าต้นทุนเก่าที่ตนเลือก ทำให้เกิดโนดที่มีค่าต้นทุนเป็นอนันต์หรือเสมือนเป็นโนด B มากขึ้น ดังนั้นจะยิ่งทำให้โอกาสเกิดเหตุการณ์ที่จะเกิดลูปนั้นมีได้มากขึ้น ถ้าโนด B กระจายค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงที่ขาด (ค่าอนันต์) ออกไปจนทุกโนดรู้ผลก็จะทำให้โนดเหล่านั้นเลิกส่งข้อมูลไปยังข่ายเชื่อมโยงนั้น แต่ปัญหาจะเกิดขึ้นเมื่อมีโนดที่ได้รับค่าต้นทุนเป็นอนันต์แล้วยังไม่ทันได้ส่ง

ค่าต้นทุนนี้ออกไปให้โนดอื่นได้รู้ก็ถูกโนดอื่นที่มีค่าต้นทุนน้อยกว่าอนันต์บรอดคาสท์มาทับค่าต้นทุนอนันต์ก่อน ซึ่งทำให้เกิดลูปขึ้นถ้าเส้นทางนั้นเลือกผ่านเส้นทาง BZ ซึ่งไม่สามารถไปได้แล้ว ดังนั้นตำแหน่งที่เราต้องพิจารณาจึงเป็นตำแหน่งที่โนดที่ได้รับค่าต้นทุนที่เป็นอนันต์แล้วถูกโนดอื่นบรอดคาสท์มาทับ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ กรณีโนดที่ส่งค่าต้นทุนที่มีค่าที่เป็นอนันต์ออกไปและกรณีโนดนี้จะถูกโนดอื่นส่งค่าต้นทุนมาทับ ในกรณีที่โนดส่งค่าต้นทุนที่เป็นอนันต์ออกไปก็วิเคราะห์เช่นเดียวกับกรณีของโนด B บรอดคาสท์เป็นโนดแรกเช่นเดิม ส่วนกรณีที่โนดนี้ถูกโนดอื่นส่งค่าต้นทุนมาทับก็จะถูกพิจารณาในขั้นตอนที่ให้โนดนั้นเป็นเสมือนโนด B แล้วถูกโนดรอบข้างส่งค่าต้นทุนมาทับ

ในการวิเคราะห์กรณีโนด B บรอดคาสท์เป็นโนดแรกนี้ สมมุติว่า “มีการกระจายค่าต้นทุนที่เป็นอนันต์ไปถึงเพียงโนด A และโนด D โดยถือว่ายังไม่มีการกระจายต่อไปอีก” สังเกตว่าขณะนี้ขอบเขตของโนดที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงไม่ได้มีอยู่เพียงโนด B และโนด NeB แล้ว แต่โนด NeA และโนด NeD ยังมีผลต่อโนด A และโนด D ซึ่งมีผลต่อโนด B อีกที (ถ้าเราใช้การวิเคราะห์แบบเดิมในขั้นนี้เลยสังเกตว่าโนด B จะไม่มีทางเลือกโนด A หรือโนด D เลย แต่จริง ๆ แล้วเกิดเหตุการณ์นี้ได้ ถ้าโนด A หรือโนด D ถูกทับค่าต้นทุนก่อนแล้วจึงบรอดคาสท์ไปทับค่าต้นทุนของโนด B จึงต้องพิจารณาโนด NeA และโนด NeD ด้วยเสียก่อน) ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงต้องวิเคราะห์ขยายออกไปถึงชั้นที่สอง คือชั้นของโนด NeA และโนด NeD ด้วย ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนเส้นทางของโนด A และโนด D ที่มีค่าต้นทุนจากค่าอนันต์เป็นค่าอื่นได้เมื่อมีโนดอื่นบรอดคาสท์มา ดังนั้นโนด B จะถูกเปลี่ยนค่าต้นทุนจากค่าอนันต์ได้เมื่อ

1. โนด NeB (ที่ไม่ใช่โนด A และ D) บรอดคาสท์ทับค่าต้นทุนของโนด B (--NeB--B--)

2. โนด A หรือโนด D ที่ถูกทับค่าต้นทุนอนันต์ไปแล้ว บรอดคาสท์ทับค่าต้นทุนอนันต์ของโนด B ซึ่งเกิดเมื่อ

   - โนด A จะถูกเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนอนันต์เป็นค่าอื่นได้ เมื่อโนด NeA บรอดคาสท์ทับโนด A และเนื่องจากเราพิจารณาว่ายังไม่มีการกระจายค่าต้นทุนอนันต์ออกไป ดังนั้นเหตุการณ์นี้เกิดเมื่อ โนด NeA บรอดคาสท์ก่อนโนด A บรอดคาสท์ (--NeA--A--)

   - โนด D จะถูกเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนอนันต์เป็นค่าอื่นได้ เช่นเดียวกับกรณีโนด A คือ เมื่อโนด NeD บรอดคาสท์ก่อนโนด D (--NeD--D--)

เพื่อที่จะโยงเข้ากับการวิเคราะห์ในแบบเดิม ซึ่งโนด B จะต้องถูกทับค่าต้นทุนอนันต์ด้วยค่าต้นทุนอื่นซึ่งเกิดได้ที่ลำดับ (B--NeA--A--B) หรือ (B--NeD--D--B) หรือ (B--NeB--B) และการวิเคราะห์ที่โนด B ก็จะถูกวิเคราะห์ที่ลำดับถัดจากโนด B บรอดคาสท์ออกไปเป็นครั้งแรก แล้ววิเคราะห์เหมือนกรณีโนด B ไม่ได้บรอดคาสท์เป็นโนดแรก ในส่วนของโนด A และโนด D ที่มีค่าต้นทุนเป็นอนันต์ก็จะถูกวิเคราะห์เสมือนเป็นโนด B ด้วยชุดโนดตัวแทนของโนด A และโนด D อีกที

ในกรณีที่เกิดการกระจายค่าต้นทุนที่เป็นอนันต์ห่างออกไปกว่าโนด A และโนด D ในการวิเคราะห์จะแยกออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกพิจารณาโมดุลของโนด B ซึ่งวิเคราะห์ดังที่ได้กล่าวไปเมื่อสักครู่ ส่วนที่สองจะเป็นส่วนที่กระจายเลยออกไป ซึ่งส่วนนี้ปกติจะถูกวิเคราะห์เสมือนเป็นโนด B อยู่แล้วโดยเริ่มแทนเมื่อเกิดการเปลี่ยนค่าต้นทุนเกิดขึ้นเป็นครั้งแรกซึ่งในที่นี้คือ หลังจากโนด A หรือโนด D บรอดคาสท์ออกไป ดังนั้นจึงครอบคลุมในการวิเคราะห์อยู่แล้ว

รายละเอียดการสร้างแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์

จากเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมด แยกเหตุการณ์ออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่โนดที่รู้ว่าข่ายเชื่อมโยงขาดถึงลำดับบรอดคาสท์ออกไปทันทีกับยังไม่ทันบรอดคาสท์ออกไปก็ถูกโนดข้างเคียงบรอดคาสท์ก่อน

1. ส่วนที่โนดที่รู้ว่าข่ายเชื่อมโยงขาดแต่ยังไม่ทันบรอดคาสท์ออกไปก็ถูกโนดข้างเคียงบรอดคาสท์ก่อน

แยกเหตุการณ์ออกเป็น 3 เหตุการณ์ตามเหตุการณ์ที่ค่าต้นทุนของโนดที่โนด B เลือกที่จะผ่านไปโนด Z มีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุด และบรอดคาสท์เป็นโนดแรกตามที่ได้วิเคราะห์มาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ได้แก่ โนด A บรอดคาสท์ก่อน, โนด C บรอดคาสท์ก่อน และโนด D บรอดคาสท์ก่อน ส่วนโนด E และโนด F ไม่มีทางให้ค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดได้ในตอนเริ่มได้ เนื่องจากอย่างน้อยโนด E ก็มีค่าต้นทุนที่มากกว่าโนด D และโนด F ก็มีค่าต้นทุนที่มากกว่าโนด A แล้วพิจารณาการสร้างดังต่อไปนี้

1.1 ใช้หลักการตัดสินใจในการเลือกเส้นทาง เพื่อเลือกเส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนต่ำที่สุดในแต่ละลำดับ ซึ่งแทนเป็นชั้น ๆ โดยแต่ละชั้นจะมีโนดที่บรอดคาสท์ต่อซึ่งครบทุกโนด และเมื่อโนดไหนบรอดคาสท์แล้วมีผลต่อค่าต้นทุนของโนดอื่นจะถูกแสดงไว้ด้านข้าง (ในที่นี้พิจารณา

กรณีที่เป็นการอัพเดตค่าต้นทุน ส่วนกรณีเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดจะพิจารณาในข้อ 2)

1.2 ในขั้นตอนการเปรียบเทียบค่าต้นทุนจะมีวิธีลดชั้นของแผนภาพ โดยตัดเหตุการณ์ที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ด้วยวิธีการต่อไปนี้

ให้ x แทน โนดต้นทาง โนด y แทนโนดที่โนด x ผ่านในการไปยัง z

1. พิจารณาเหตุการณ์ที่โนด x จะเลือกผ่านโนด y ในรอบที่ 1 (คือพิจารณาให้ผ่านโนด y เป็นโนดแรกในชั้นนี้ก่อนไปวนผ่านที่โนดอื่น)

2. พิจารณาในรอบถัด ๆ มาของชั้นนี้ว่า มีโอกาสที่โนด x จะเลือกผ่านโนด y แล้วมีค่าต้นทุนที่น้อยกว่ารอบที่ 1 นั้นหรือเปล่า รวมไปถึงเหตุการณ์ที่โนดที่ บรอดคาสท์สามารถกลับมาบรอดคาสท์ซ้ำได้อีกในชั้นเดียวกันนี้เมื่อโนดอื่นบรอดคาสท์วนกลับมาหมดแล้วด้วย (ทำให้ดูเหมือนว่าโนดก่อนชั้นนี้บรอดคาสท์แล้วบรอดคาสท์อีก)

1. **เหตุการณ์ที่โนด** B **เลือกผ่านโนด** A

กำหนดให้เส้นทาง BA->Z เป็นเส้นทางที่มีค่าต้นทุนรวมน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นทางอื่น ๆ ดังนั้นได้อสมการ

$$BABZ \leq BCZ, BEDBZ, BFABZ \qquad \text{(A1)}$$

$$BABZ \geq BDBZ \quad \text{ËÃ×Í} \quad AB \leq BD \qquad \text{(A2)}$$

สำหรับเหตุการณ์อื่น ๆ ที่ BA->Z ไม่ได้มีค่าน้อยที่สุดจะรวมอยู่ในกรณีอื่น ๆ อย่างครบถ้วนแล้ว และเมื่อพิจารณาอสมการที่กำหนดนี้กับอสมการตัวแทนทั้งหมดแล้วไม่ขัดแย้งกัน ดังนั้นอสมการข้างบนนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ได้

<u>ชั้นที่ 1</u> โนด A บรอดคาสท์ก่อน

จากรูปที่ 3.2 ที่แสดงในตอนท้ายของบท เป็นแผนภาพในกรณีที่โนด A บรอดคาสท์ก่อนนั้น แผนภาพนี้ได้รวมไปถึงเหตุการณ์ที่โนดอื่นที่บรอดคาสท์ก่อนโนด A เอาไว้ด้วยแล้ว กล่าวคือ เมื่อโนดอื่นบรอดคาสท์ก่อนโนดที่มีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดในที่นี้คือโนด A โนดที่มีการเปลี่ยนแปลงจะมีเพียงโนด B (เพราะก่อนหน้านี้เส้นทางที่แต่ละโนดเลือกผ่านเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดแล้วและเมื่อเกิดการเปลี่ยนค่าต้นทุนที่โนด B ผลการเปลี่ยนแปลงจึงเริ่มที่โนด B) แต่เมื่อถึงลำดับที่โนด A บรอดคาสท์โนด B ก็จะเปลี่ยนมาเลือกผ่านโนด A ที่มีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดอยู่ดี ดังนั้นแผนภาพที่ได้จึงเหมือนกับแผนภาพในกรณีที่โนด A บรอดคาสท์เป็นโนดแรก

เมื่อโนด A บรอดคาสท์ออกไปก็จะทำให้โนด B เปลี่ยนมาเลือกผ่านโนด A ทำให้โนด B มีค่าต้นทุนเปลี่ยนไปเป็น BABZ (ในบางครั้งต้องการแสดงค่าต้นทุนพร้อมกับระบุว่าเป็นค่าต้นทุนของโนดใดจะแสดงดังเช่นตัวอย่างนี้ B:BABZ หมายถึงค่าต้นทุนของโนด B มีค่าเท่ากับ BABZ)

<u>ชั้นที่ 2</u>

มีเพียงโนด B โนดเดียวที่บรอดคาสท์แล้วทำให้มีโนดเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุน ส่วนโนดอื่นไม่มีผลต่อโนดอื่น ๆ อย่างแท้จริง เพราะไม่มีการอัพเดตค่าต้นทุน ดังนั้นก็จะกระโดดกลับไปที่ชั้น 2 เช่นเดิม ผลการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนเมื่อโนด B บรอดคาสท์ A: A BABZ, D: D BABZ

สังเกตว่าผลการเปลี่ยนแปลงอาจจะเกิดอยู่ในชั้นถัดลงมาของโนด C, D, E, F ได้ ดังนั้นในการพิจารณาถึงลำดับที่เกิดของชั้นที่ 2 นี้จะคิดว่าอาจจะเป็นโนดใดก็ได้ในสี่โนดที่จะอยู่ที่ลำดับนี้ และอาจจะมีมากกว่า 1 โนดก็ได้จากสี่โนดนี้ (โดยจะต้องไม่ขัดกับความเป็นจริง เช่น บรอดคาสท์แล้วครั้งต่อไปก็ต้องเป็นลำดับของโนดอื่น)

<u>ชั้นที่3</u>

(3E) ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำเกิดขึ้นค่าต้นทุนโนด E เป็น E:EDBZ (โนด E บรอดคาสท์ก่อนโนด D)

ตำแหน่งโนด E บรอดคาสท์ จะมีผลกับโนด B และโนด D ที่จะถูกเปรียบเทียบค่าต้นทุน

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด B ก่อน CMP(BE->Z,BNeB->Z)

หาเหตุการณ์ BE->Z (โนด B เลือกผ่านโนด E ในการไปยังโนด Z)

จาก E:E DBZ ดังนั้น BE->Z = BEDBZ

หาเหตุการณ์ BNeB->Z (โนด B เลือกผ่านโนด NeB ในการไปยังโนด Z) ขณะนี้โนด B เลือกที่จะผ่านโนด A ดังนั้น BNeB->Z เท่ากับ BA->Z = BABZ

พิสูจน์ว่า BEDBZ กับ BABZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

BE+ED+DB+BZ BA+AB+BZ

จัดรูป (BZ)+(DB)+(BE)+ED (BZ)+(AB)+(AB)

จากอสมการ (A2) $AB \leq BD$ (1)

จากอสมการ (a) $DB \leq BE$ และอสมการที่ (1) จะได้ว่า

$$AB \leq BE \quad (2)$$

จากอสมการที่ (1) และ (2) สรุปได้ว่า BEDBZ มากกว่า BABZ เสมอ

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด D CMP(DE->Z,DNeD->Z)

หาเหตุการณ์ DE->Z

1. หา DE->Z ที่รอบที่ 1 โนดขณะนี้ D:D BABZ และ E:E DBZ ดังนั้นเหตุการณ์ DE เกิดได้เมื่อ DEDBZ < DBABZ (หรือ DE < AB) ซึ่งไม่ขัดแย้งกับเงื่อนไขก่อนหน้านี้ดังนั้นใช้ได้ ดังนั้นจะได้ DE->Z : DEDBZ

2. หา DE->Z ที่รอบถัดมา เนื่องจากในชั้นนี้โนดที่บรอดคาสท์แล้วกลับมายังชั้นนี้อีก ไม่มีผลต่อค่าต้นทุนของทุกโนด ดังนั้น DE->Z : DEDBZ มีค่าต้นทุนที่ต่ำที่สุดแล้วในชั้นนี้

หาเหตุการณ์ DNeD->Z ให้ NeD เป็นโนดต่อไปนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ให้ NeD เป็นโนด B

1. หา DB->Z ที่รอบที่1 ซึ่งขณะนี้ D:D BABZ

2. หา DB->Z ที่รอบถัดมา ไม่มีผลต่อค่าต้นทุนของ DB->Z

พิสูจน์ว่า DEDBZ กับ DBABZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

DE+ED+DB+BZ DB+BA+AB+BZ

(DB+BZ)+2DE (DB+BZ)+2AB

เนื่องจาก DE กับ AB ไม่มีความสัมพันธ์กัน เพราะฉะนั้นผลการเปรียบเทียบขึ้นกับค่าของ DE กับ AB ว่าค่าใดมากหรือน้อยกัน หรือก็คือผลการเปรียบเทียบ DEDBZ กับ DBABZ สามารถอนุมานได้กับการเปรียบเทียบ DE กับ AB ดังระบุไว้ในแผนภาพ ในกรณีที่มากกว่าไม่ทำให้โนดอื่นมีการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนดังนั้นก็จะกระโดดกลับไปที่ชั้นที่ 3 ชั้นเดิม ส่วนกรณีที่น้อยกว่าก็พิจารณาต่อ โดยมีเงื่อนไขเพิ่มขึ้น คือ

$$DE \leq AB \qquad \text{(A3)}$$

(3E-A) ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำเกิดขึ้นค่าต้นทุนโนด A เป็น A:A BABZ

ตำแหน่งโนด A บรอดคาสท์ จะมีผลกับโนด B และโนด F ที่จะถูกเปรียบเทียบค่าต้นทุน

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด B ก่อน CMP(BA->Z,BNeB->Z)

เนื่องจากโนด B เลือกโนด A อยู่แล้วดังนั้นจึงเป็นการอัพเดตค่าต้นทุนให้โนด B ซึ่งโนด B ต้องรับค่านี้ไปโดยไม่มีการเปรียบเทียบค่าต้นทุนเป็น B:B ABABZ

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด F CMP(FA->Z,FNeF->Z)

เนื่องจากโนด F เลือกโนด A อยู่แล้วดังนั้นจึงเป็นการอัพเดตค่าต้นทุนให้โนด F เป็น F:F ABABZ

(3E-B) ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำเกิดขึ้นค่าต้นทุนโนด B เป็น B:B ABZ

ตำแหน่งโนด B บรอดคาสท์ จะมีผลกับโนด A,C,D,E และโนด F แต่โนดที่เลือกที่จะผ่านโนด B ได้แก่โนด A,D ซึ่งจะเป็นการอัพเดตค่าต้นทุน ดังนั้นมีเพียงโนด C,E และโนด F ที่จะถูกเปรียบเทียบค่าต้นทุน

ค่าต้นทุนโนด A คือ A:A BABZ ตามลำดับ

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด C CMP(CB->Z,CNeC->Z)

หาเหตุการณ์ CB->Z

จาก B:B ABZ ดังนั้น CB->Z = CBABZ

หาเหตุการณ์ CNeC->Z เท่ากับ CZ

พิสูจน์ว่า CBABZ กับ CZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

CB+2BA+BZ CZ

(CBZ)+2AB (CZ)

จากอสมการ (d) ดังนั้น CBABZ มากกว่า CZ

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด D CMP(DB->Z,DNeD->Z)

หาเหตุการณ์ DB->Z

จาก B:B ABZ ดังนั้น DB->Z = DBABZ

หาเหตุการณ์ DNeD->Z เท่ากับ DEDBZ

พิสูจน์ว่า DBABZ กับ DEDBZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DB+2AB+BZ 2DE+DB+BZ

จัดรูป (DB+BZ)+2(AB) (DB+BZ)+2(DE)

จากอสมการ (A3) ดังนั้น DBABZ มากกว่า DEDBZ

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด E CMP(EB->Z,ENeE->Z)

หาเหตุการณ์ EB->Z

จาก B:B ABZ ดังนั้น EB->Z = EBABZ

หาเหตุการณ์ ENeE->Z ขณะนี้ เท่ากับ E:E DBZ

พิสูจน์ว่า EBABZ กับ EDBZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

EB+BA+AB+BZ ED+DB+BZ

จัดรูป (BZ)+(EB)+2AB (BZ)+(DB+DE)

จากอสมการ (a) ดังนั้น EBABZ มากกว่า EDBZ

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด F CMP(FB->Z,FNeF->Z)

หาเหตุการณ์ FB->Z

จาก B:B ABZ ดังนั้น FB->Z = FBABZ

หาเหตุการณ์ FNeF->Z ขณะนี้ เท่ากับ F:F ABZ

พิสูจน์ว่า FBABZ กับ FABZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

FB+BA+ABZ FA+ABZ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จัดรูป (ABZ)+(FB)+BA (ABZ)+FA

จากอสมการ (b) FB>FA ดังนั้น FBABZ มากกว่า FABZ

(3E-C) ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำเกิดขึ้นค่าต้นทุนโนด C เป็น C:CZ

ตำแหน่งโนด C บรอดคาสท์ จะมีผลกับโนด B ที่จะถูกเปรียบเทียบค่าต้นทุน

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด B CMP(BC->Z,BNeB->Z)

หาเหตุการณ์ BC->Z

จาก C:CZ ดังนั้น BC->Z =BCZ

หาเหตุการณ์ BNeB->Z ขณะนี้ เท่ากับ B:B ABZ

พิสูจน์ว่า BCZ กับ BABZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

จากอสมการ (A1) ดังนั้น BCZ มากกว่า BABZ

(3E-D) ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำเกิดขึ้นค่าต้นทุนโนด D เป็น D:D EDBZ

ตำแหน่งโนด D บรอดคาสท์ จะมีผลกับโนด B และโนด E ที่จะถูกเปรียบเทียบค่าต้นทุน

กรณีโนด E เป็นการอัพเดตค่าต้นทุนดังนั้นได้ค่าต้นทุนเป็น E:E DEDBZ

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด B CMP(BD->Z,BNeB->Z)

หาเหตุการณ์ BD->Z

จาก D:DEDBZ ดังนั้น BD->Z =BDEDBZ

หาเหตุการณ์ BNeB->Z ขณะนี้ เท่ากับ B:B ABZ

พิสูจน์ว่า BDEDBZ กับ BABZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

BD+2DE+DB+BZ 2AB+BZ

จัดรูป (BZ)+2(BD+DE) (BZ)+2(AB)

จากอสมการ (A2) ดังนั้น BDEDBZ มากกว่า BABZ

(3E-F) ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำเกิดขึ้นค่าต้นทุนโนด F เป็น F:F ABZ

ตำแหน่งโนด F บรอดคาสท์ จะมีผลกับโนด A และโนด B ที่จะถูกเปรียบเทียบค่าต้นทุน

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด A CMP(AF->Z,ANeA->Z)

หาเหตุการณ์ AF->Z

จาก F:F ABZ ดังนั้น AF->Z =AFABZ

หาเหตุการณ์ ANeA->Z ขณะนี้ เท่ากับ A:A BABZ

พิสูจน์ว่า AFABZ กับ ABABZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

2AF+AB+BZ 3AB+BZ

จัดรูป (AB+BZ)+2(AF) (AB+BZ)+2(AB)

จะเห็นว่าผลการเปรียบเทียบขึ้นกับค่า AF กับ AB ดังนั้นอนุมานผลการเปรียบเทียบตามค่าการเปรียบเทียบของค่า AF กับ AB กรณีที่น้อยกว่าจะได้อสมการเพิ่ม คือ

$$AF \leq AB \qquad \text{(A5)}$$

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด B CMP(BF->Z,BNeB->Z)

หาเหตุการณ์ BF->Z

จาก F:F ABZ ดังนั้น BF->Z =BFABZ

หาเหตุการณ์ BNeB->Z ขณะนี้ เท่ากับ B:B ABZ

พิสูจน์ว่า BFABZ กับ BABZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

BF+FA+ABZ BA+ABZ

จัดรูป (ABZ)+(BF)+FA (ABZ)+(AB)

จากอสมการ (b) ดังนั้น BFABZ มากกว่า BABZ

(3E-F-A)ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำเกิดขึ้นค่าต้นทุนโนด A เป็น A:A FABZ

ตำแหน่งโนด A บรอดคาสท์ จะมีผลกับโนด B และโนด F ที่จะถูกเปรียบเทียบค่าต้นทุน

กรณีโนด B เป็นการอัพเดตค่าต้นทุนดังนั้นได้ค่าต้นทุนเป็น B:B AFABZ

กรณีโนด F เป็นการอัพเดตค่าต้นทุนดังนั้นได้ค่าต้นทุนเป็น F:F AFABZ

(3E-F-B)ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำเกิดขึ้นค่าต้นทุนโนด B เป็น B:B ABZ

ตำแหน่งโนด B บรอดคาสท์ จะมีผลกับโนด A,C,D,E,F ที่จะถูกเปรียบเทียบค่าต้นทุน

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด A CMP(AB->Z,ANeA->Z)

หาเหตุการณ์ AB->Z = ABABZ

หาเหตุการณ์ ANeA->Z ขณะนี้ เท่ากับ A:A FABZ

พิสูจน์ว่า ABABZ กับ AFABZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

2AB+ABZ 2AF+ABZ

จากอสมการ (A5) ดังนั้น ABABZ มากกว่า AFABZ

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด C CMP(CB->Z,CNeC->Z)

หาเหตุการณ์ CB->Z เท่ากับ CBABZ

หาเหตุการณ์ CNeC->Z ขณะนี้ เท่ากับ C:CZ

พิสูจน์ว่า CBABZ กับ CZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

CB+2BA+BZ CZ

บวก BC ทั้งสองข้าง (CBZ)+2BA (CZ)

จากอสมการ (d) ดังนั้น CBABZ มากกว่า CZ

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด D CMP(DB->Z,DNeD->Z)

หาเหตุการณ์ DB->Z เท่ากับ DBABZ

หาเหตุการณ์ DNeD->Z ขณะนี้ เท่ากับ D:D EDBZ

พิสูจน์ว่า DBABZ กับ DEDBZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

DB+2AB+BZ 2DE+DB+BZ

จัดรูป (DB+BZ)+2AB (DB+BZ)+2DE

จากอสมการ (A3) ดังนั้น DBABZ มากกว่า DEDBZ

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด E CMP(EB->Z,ENeE->Z)

หาเหตุการณ์ EB->Z = EBABZ

หาเหตุการณ์ ENeE->Z ขณะนี้ เท่ากับ E:E DBZ

พิสูจน์ว่า EBABZ กับ EDBZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

EB+2AB+BZ ED+DB+BZ

จัดรูป (BZ)+(EB)+2AB (BZ)+(ED+DB)

จากอสมการ (a) ดังนั้น EBABZ มากกว่า EDBZ

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด F CMP(FB->Z,FNeF->Z)

หาเหตุการณ์ FB->Z เท่ากับ FBABZ

หาเหตุการณ์ FNeF->Z ขณะนี้ เท่ากับ F:F ABZ

พิสูจน์ว่า FBABZ กับ FABZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

FB+2AB+BZ AF+AB+BZ

จัดรูป (BZ) +(FB)+2AB (BZ)+(AF+AB)

จากอสมการ (b) ดังนั้น FBABZ มากกว่า FABZ

(3E-F-C)ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำเกิดขึ้นค่าต้นทุนโนด C เป็น C:CZ

ตำแหน่งโนด C บรอดคาสท์ จะมีผลกับโนด B ที่จะถูกเปรียบเทียบค่าต้นทุน

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด B CMP(BC->Z,BNeB->Z)

หาเหตุการณ์ BC->Z เท่ากับ BCZ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หาเหตุการณ์ BNeB->Z ขณะนี้ เท่ากับ B:B ABZ

จากอสมการ (A1) BCZ มากกว่า BABZ

(3E-F-D)ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำเกิดขึ้นค่าต้นทุนโนด D เป็น D:D EDBZ

ตำแหน่งโนด D บรอดคาสท์ จะมีผลกับโนด B และโนด E ที่จะถูกเปรียบเทียบค่าต้นทุน

กรณีโนด E เป็นการอัพเดตค่าต้นทุนดังนั้นได้ค่าต้นทุนเป็น E:E DEDBZ

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด B CMP(BD->Z,BNeB->Z)

หาเหตุการณ์ BD->Z เท่ากับ BDEDBZ

หาเหตุการณ์ BNeB->Z ขณะนี้ เท่ากับ B:B ABZ

พิสูจน์ว่า BDEDBZ กับ BABZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

BD+2DE+DB+BZ 2AB+BZ

จัดรูป (BZ)+2(BD+DE) (BZ)+2(AB)

จากอสมการ (A3) BDEDBZ มากกว่า BABZ

(3E-F-E)ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำเกิดขึ้นค่าต้นทุนโนด E เป็น E:E DBZ

ตำแหน่งโนด E บรอดคาสท์ จะมีผลกับโนด B และโนด D ที่จะถูกเปรียบเทียบค่าต้นทุน

กรณีโนด D เป็นการอัพเดตค่าต้นทุนดังนั้นได้ค่าต้นทุนเป็น D:D EDBZ

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด B CMP(BE->Z,BNeB->Z)

หาเหตุการณ์ BE->Z เท่ากับ BEDBZ

หาเหตุการณ์ BNeB->Z ขณะนี้ เท่ากับ B:B ABZ

พิสูจน์ว่า BEDBZ กับ BABZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

จากอสมการ (A1) ดังนั้น BEDBZ มากกว่า BABZ

(3D) ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำเกิดขึ้นค่าต้นทุนโนด เป็น D:D BABZ

ตำแหน่งโนด D บรอดคาสท์ จะมีผลกับโนด B และโนด E ที่จะถูกเปรียบเทียบค่าต้นทุน

กรณีโนด E เป็นการอัพเดตค่าต้นทุนดังนั้นได้ค่าต้นทุนเป็น E:E DBABZ

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด B CMP(BD->Z,BNeB->Z)

หาเหตุการณ์ BD->Z เท่ากับ BDBABZ

หาเหตุการณ์ BNeB->Z ขณะนี้ เท่ากับ BABZ

จะเห็นว่า BDBABZ มากกว่า BABZ

(3C) ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำเกิดขึ้นค่าต้นทุนโนด เป็น C:CZ

ตำแหน่งโนด C บรอดคาสท์ จะมีผลกับโนด B ที่จะถูกเปรียบเทียบค่าต้นทุน

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด B CMP(BC->Z,BNeB->Z)

หาเหตุการณ์ BC->Z เท่ากับ BCZ

หาเหตุการณ์ BNeB->Z ขณะนี้ เท่ากับ BABZ

จากอสมการ (A1) ดังนั้น BCZ มากกว่า BABZ

(3A) ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำเกิดขึ้นค่าต้นทุนโนด เป็น A:A BABZ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตำแหน่งโนด A บรอดคาสท์ จะมีผลกับโนด B และโนด F ที่จะถูกเปรียบเทียบค่าต้นทุน

กรณีโนด B เป็นการอัพเดตค่าต้นทุนดังนั้นได้ค่าต้นทุนเป็น B:B ABABZ

กรณีโนด F เป็นการอัพเดตค่าต้นทุนดังนั้นได้ค่าต้นทุนเป็น F:F ABABZ

(3F) ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำเกิดขึ้นค่าต้นทุนโนด เป็น F:F ABZ

ตำแหน่งโนด F บรอดคาสท์ จะมีผลกับโนด A,B ที่จะถูกเปรียบเทียบค่าต้นทุน

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด A CMP(AF->Z,ANeA->Z)

หาเหตุการณ์ AF->Z เท่ากับ AFABZ

หาเหตุการณ์ ANeA->Z ขณะนี้ เท่ากับ ABABZ

พิสูจน์ว่า AFABZ กับ ABABZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

2AF+ABZ 2AB+ABZ

จะเห็นว่าผลการเปรียบเทียบขึ้นกับค่า AF กับ AB ดังนั้นอนุมานผลการเปรียบเทียบตามค่าการเปรียบเทียบของค่า AF กับ AB กรณีที่น้อยกว่าจะได้อสมการเพิ่ม คือ

$$AF \leq AB \qquad \text{(A5)}$$

พิจารณาการเปรียบเทียบค่าต้นทุนที่โนด B ก่อน CMP(BF->Z,BNeB->Z)

หาเหตุการณ์ BF->Z เท่ากับ BFABZ

หาเหตุการณ์ BNeB->Z ขณะนี้ เท่ากับ BABZ

จากอสมการ (A1) ดังนั้น BFABZ มากกว่า BABZ

สำหรับในขั้นต่อไปนี้ก็ทำเช่นเดียวกัน ดังนั้นจะพิสูจน์เฉพาะกรณีที่น่าสนใจ เช่น เปรียบเทียบกันแล้วได้ผลอาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่า หรือมีการเปรียบเทียบที่ยังไม่เคยเปรียบเทียบมาก่อน ผลการบรอดคาสท์แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และมีการพิสูจน์ที่น่าสนใจดังต่อไปนี้

กรณี 3F-B โนด C บรอดคาสท์

พิสูจน์ CBABZ กับ CZ

CB+2BA+BZ CZ

(CBZ)+2AB (CZ)

จากอสมการ (d) ดังนั้น CBABZ มากกว่า CZ

กรณี 3F-E โนด D บรอดคาสท์

พิสูจน์ว่า DEDBZ กับ DBABZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

DE+ED+DB+BZ DB+BA+AB+BZ

(DB+BZ)+2DE (DB+BZ)+2AB

เนื่องจาก DE กับ AB ไม่มีความสัมพันธ์กัน เพราะฉะนั้นผลการเปรียบเทียบขึ้นกับค่าของ DE กับ AB ว่าค่าใดมากหรือน้อยกัน หรือก็คือผลการเปรียบเทียบ DEDBZ กับ DBABZ สามารถอนุมานได้กับการเปรียบเทียบ DE กับ AB ดังระบุไว้ในแผนภาพ ในกรณีที่มากกว่าไม่ทำให้โนดอื่นมีการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนดังนั้นก็จะกระโดดกลับไปที่ชั้นที่ 3 ชั้นเดิม ส่วนกรณีที่น้อยกว่าก็พิจารณาต่อ โดยมีเงื่อนไขเพิ่มขึ้น คือ อสมการ (A3)

2. เหตุการณ์ที่โนด B เลือกผ่านโนด C

กำหนดให้เส้นทาง BC->Z เป็นเส้นทางที่มีค่าต้นทุนรวมน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นทางอื่น ๆ ดังนั้นได้อสมการ

$$BCZ \quad \leq \quad BABZ, BDBZ, BEDBZ, BFABZ \qquad \text{(C1)}$$

สำหรับเหตุการณ์อื่น ๆ ที่ BC->Z ไม่ได้มีค่าน้อยที่สุดจะรวมอยู่ในกรณีอื่น ๆ อย่างครบถ้วนแล้ว และเมื่อพิจารณาอสมการที่กำหนดนี้กับอสมการตัวแทนทั้งหมดแล้วไม่ขัดแย้งกัน ดังนั้นอสมการข้างบนนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ได้

<u>ชั้นที่ 1</u> โนด C บรอดคาสท์ก่อน

จากรูปที่ 3.2 เพื่อให้โนด B เลือกโนด C ซึ่งแผนภาพนี้รวมไปถึงกรณีที่โนดอื่นที่บรอดคาสท์ก่อนโนด C ด้วย แต่เนื่องจากโนด C เป็นเส้นทางที่มีค่าต้นทุนรวมน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นทางอื่น ๆ เมื่อโนด C บรอดคาสท์ออกไปก็จะทำให้โนด B เลือกอยู่แล้วผลจึงไม่ต่างกัน ทำให้โนด B เปลี่ยนแปลงเป็น B:B CZ

<u>ชั้นที่ 2</u>

มีเพียงโนด B โนดเดียวที่บรอดคาสท์แล้วทำให้มีโนดเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุน ส่วนโนดอื่นไม่มีผลต่อโนดอื่น ๆ อย่างแท้จริง เพราะไม่มีการอัพเดตค่าต้นทุน ดังนั้นก็จะกระโดดกลับไปที่ชั้น 2 เช่นเดิม ผลการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุน เมื่อโนด B บรอดคาสท์ A:A BCZ, D:D BCZ

สังเกตว่าผลการเปลี่ยนแปลงอาจจะเกิดอยู่ในชั้นถัดลงมาของโนด A, D, E, F ได้ ดังนั้นในการพิจารณาถึงลำดับที่เกิดของชั้นที่ 2 นี้จะคิดว่าอาจจะเป็นโนดใดก็ได้ในสี่โนดที่จะอยู่ที่ลำดับนี้ และอาจจะมีมากกว่า 1 โนดก็ได้จากสี่โนดนี้ (โดยจะต้องไม่ขัดกับความเป็นจริง เช่น บรอดคาสท์แล้วครั้งต่อไปก็ต้องเป็นลำดับของโนดอื่น

<u>ชั้นที่3</u>

ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำ พิจารณาค่าต้นทุนของแต่ละค่าในแต่ละชั้น ซึ่งแสดงไว้ด้านข้างของแผนภาพลำดับ และพิจารณาดังเช่นที่เคยกล่าวไปแล้วจะได้ผลการบรอดคาสท์ ดังที่แสดงไว้ใน ตารางที่ 3.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการพิสูจน์ที่น่าสนใจจากตารางที่ 3.2

กรณี C-B โนด E บรอดคาสท์

พิสูจน์ว่า EBCZ กับ EDBZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

EB+BCZ ED+DB+BZ

จัดรูป (BE)+(BCZ) (BD+DE)+(BZ)

จากอสมการ (b) และ (c) ดังนั้น EBCZ มากกว่า EDBZ

กรณี C-E โนด D บรอดคาสท์

พิสูจน์ว่า DEDBZ กับ DBCZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

2DE+DB+BZ DB+BCZ

จัดรูป (DB)+(BZ)+2DE (DB)+(BCZ)

เงื่อนไขของโนด C มีเพียงอสมการ (C1) และ (c) เมื่อพิจารณาแล้วไม่สามารถบอกได้ว่าค่าใดน้อยกว่ากัน ต้องเปรียบโดยตรง ดังนั้นกรณีที่ได้น้อยกว่าจะได้อสมการเพิ่มขึ้นคือ

$$DEDBZ \leq DBCZ \qquad \text{(C2)}$$

แต่เนื่องจากอสมการยาว ๆ อย่างนี้ยากในการนำไปพิสูจน์ ดังนั้นจึงต้องนำไปแปลงด้วยการนำสมการอื่นที่มีอยู่มาหาอสมการใหม่ เมื่อบวกด้วยอสมการ (C1) BCZ<BDBZ จะได้เป็น DE<DB หรือบวกด้วยอสมการ (C1) BCZ<BABZ จะได้ DE<BA หรือบวกด้วยอสมการ (d) CZ<CBZ จะได้ DE<CB

$$DE \leq AB \qquad \text{(C2.1)}$$

$$DE \leq CB \quad \text{(C2.2)}$$

$$DE \leq DB \quad \text{(C2.3)}$$

กรณี C-F โนด A บรอดคาสท์

พิสูจน์ว่า AFABZ กับ ABCZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

2AF+AB+BZ AB+BCZ

จัดรูป (AB)+(BZ)+2AF (AB)+(BCZ)

เงื่อนไขของโนด C มีเพียงอสมการ (C1) และ (c) เมื่อพิจารณาแล้วไม่สามารถบอกได้ว่าค่าใดน้อยกว่ากัน ต้องเปรียบโดยตรง ดังนั้นกรณีที่ได้น้อยกว่าจะได้อสมการเพิ่มขึ้น คือ

$$AFABZ \leq ABCZ \quad \text{(C3)}$$

แต่เนื่องจากอสมการยาว ๆ อย่างนี้ยากในการนำไปพิสูจน์ ดังนั้นจึงต้องนำไปแปลงด้วยการนำสมการอื่นที่มีอยู่มาหาอสมการใหม่ เมื่อบวกด้วยอสมการ (C1) BCZ<BABZ จะได้เป็น FA<AB หรือบวกด้วยอสมการ (C1) BCZ<BDBZ จะได้ FA<DB หรือบวกด้วยอสมการ (d) CZ<CBZ จะได้ FA<CB

$$AF \leq AB \quad \text{(C3.1)}$$

$$AF \leq CB \quad \text{(C3.1)}$$

$$AF \leq DB \quad \text{(C3.1)}$$

(3E) วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำ พิจารณาค่าต้นทุนของแต่ละค่าในแต่ละชั้น ซึ่งแสดงไว้ด้านข้างของแผนภาพลำดับ และพิจารณาดังเช่นที่เคยกล่าวไปแล้วจะได้ผลการบรอดคาสท์ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการพิสูจน์ที่น่าสนใจจากตารางที่ 3.3

กรณี 3E-F โนด A บรอดคาสท์

จากการพิสูจน์ AFABZ กับ ABCZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากันจะเหมือนในกรณี C-F โนด A บรอดคาสท์ ดังนั้นได้อสมการ (C3) ในกรณีผลการเปรียบเทียบน้อยกว่า

กรณี 3E-F-A โนด B บรอดคาสท์

พิสูจน์ว่า BAFABZ กับ BCZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

BA+AFABZ BCZ

จัดรูป (2AB+BZ)+ 2AF (BCZ)

จากอสมการ (C1) BABZ>BCZ ดังนั้น BAFABZ>BCZ

กรณี 3E-F-D โนด B บรอดคาสท์

พิสูจน์ว่า BDEDBZ กับ BCZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

2BD+2DE+BZ BCZ

จัดรูป (2DB+BZ)+ 2DE (BCZ)

จากอสมการ (C1) BDBZ>BCZ ดังนั้น BDEDBZ>BCZ

(3F) วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำ พิจารณาค่าต้นทุนของแต่ละค่าในแต่ละชั้น ซึ่งแสดงไว้ด้านข้างของแผนภาพลำดับ และพิจารณาดังเช่นที่เคยกล่าวไปแล้วจะได้ผลการบรอดคาสท์ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตัวอย่างการพิสูจน์ที่น่าสนใจจากตารางที่ 3.4

กรณี C-3F-E โนด D บรอดคาสท์

พิสูจน์ว่า DEDBZ กับ DBCZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

เนื่องจากเคยพิสูจน์แล้วในกรณี C-E โนด D บรอดคาสท์ ดังนั้นผลจะเหมือนกัน

3. เหตุการณ์ที่โนด B เลือกผ่านโนด D

กำหนดให้เส้นทาง BD->Z เป็นเส้นทางที่มีค่าต้นทุนรวมน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นทางอื่น ๆ ดังนั้นได้อสมการ

$$BDBZ \leq BCZ, BEDBZ, BFABZ \quad \text{(D1)}$$

$$BD \leq AB \quad \text{(D2)}$$

สำหรับเหตุการณ์อื่น ๆ ที่ BD->Z ไม่ได้มีค่าน้อยที่สุดจะรวมอยู่ในกรณีอื่น ๆ อย่างครบถ้วนแล้ว และเมื่อพิจารณาอสมการที่กำหนดนี้กับอสมการตัวแทนทั้งหมดแล้วไม่ขัดแย้งกัน ดังนั้นอสมการข้างบนนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ได้

<u>ชั้นที่ 1</u> โนด D บรอดคาสท์ก่อน

จากรูปที่ 3.4 เพื่อให้โนด B เลือกโนด D ซึ่งแผนภาพนี้รวมไปถึงกรณีที่โนดอื่นที่บรอดคาสท์ก่อนโนด D ด้วย แต่เนื่องจากโนด D เป็นเส้นทางที่มีค่าต้นทุนรวมน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นทางอื่น ๆ เมื่อโนด D บรอดคาสท์ออกไปก็จะทำให้โนด B เลือกอยู่แล้วผลจึงไม่ต่างกัน ทำให้โนด B เปลี่ยนแปลงเป็น B:B DBZ

<u>ชั้นที่ 2</u>

มีเพียงโนด B โนดเดียวที่บรอดคาสท์แล้วทำให้มีโนดเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุน ส่วนโนดอื่นไม่มีผลต่อโนดอื่น ๆ อย่างแท้จริง เพราะไม่มีการอัพเดตค่าต้นทุน ดังนั้นก็จะกระโดดกลับไปที่ชั้น 2 เช่นเดิม ผลการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนเมื่อโนด B บรอดคาสท์ A:A BDBZ , D:D BDBZ

สังเกตว่าผลการเปลี่ยนแปลงอาจจะเกิดอยู่ในชั้นถัดลงมาของโนด A, C, E, F ได้ ดังนั้นในการพิจารณาถึงลำดับที่เกิดของชั้นที่ 2 นี้จะคิดว่าอาจจะเป็นโนดใดก็ได้ในสี่โนดที่จะอยู่ที่ลำดับนี้ และอาจจะมีมากกว่า 1 โนดก็ได้จากสี่โนดนี้ (โดยจะต้องไม่ขัดกับความเป็นจริง เช่น บรอดคาสท์แล้วครั้งต่อไปก็ต้องเป็นลำดับของโนดอื่น

<u>ชั้นที่3</u>

ที่วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำ พิจารณาค่าต้นทุนของแต่ละค่าในแต่ละชั้น ซึ่งแสดงไว้ด้านข้างของแผนภาพลำดับ และพิจารณาดังเช่นที่เคยกล่าวไปแล้วจะได้ผลการบรอดคาสท์ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.5

ตัวอย่างการพิสูจน์ที่น่าสนใจจากตารางที่ 3.5

กรณี D-E โนด D บรอดคาสท์

พิสูจน์ว่า DEDBZ กับ DBDBZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

	2DE+DB+BZ	2BD+DB+BZ
จัดรูป	(DB+BZ)+2DE	(DB+BZ)+2DB

เนื่องจาก DE กับ BD ไม่มีความสัมพันธ์กัน เพราะฉะนั้นผลการเปรียบเทียบขึ้นกับค่าของ DE กับ BD ว่าค่าใดมากหรือน้อยกัน หรือก็คือผลการเปรียบเทียบ DEDBZ กับ DBDBZ สามารถอนุมานได้กับการเปรียบเทียบ DE กับ BD ดังระบุไว้ในแผนภาพ ในกรณีที่มากกว่าไม่ทำให้โนดอื่นมีการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนดังนั้นก็จะกระโดดกลับไปที่ชั้นที่ 3 ชั้นเดิม ส่วนกรณีที่น้อยกว่าก็พิจารณาต่อ โดยมีเงื่อนไขเพิ่มขึ้น คือ

$$DE \leq BD \qquad \text{(D3)}$$

กรณี D-F โนด A บรอดคาสท์

พิสูจน์ว่า AFABZ กับ ABDBZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

2AF+AB+BZ AB+2BD+ BZ

จัดรูป (AB+BZ)+2AF (AB+BZ)+2BD

เนื่องจาก AF กับ BD ไม่มีความสัมพันธ์กัน เพราะฉะนั้นผลการเปรียบเทียบขึ้นกับค่าของ AF กับ BD ว่าค่าใดมากหรือน้อยกัน หรือก็คือผลการเปรียบเทียบ AFABZ กับ ABDBZ สามารถอนุมานได้กับการเปรียบเทียบ AF กับ BD ดังระบุไว้ในแผนภาพ ในกรณีที่มากกว่าไม่ทำให้โนดอื่นมีการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนดังนั้นก็จะกระโดดกลับไปที่ชั้นที่ 3 ชั้นเดิม ส่วนกรณีที่น้อยกว่าก็พิจารณาต่อ โดยมีเงื่อนไขเพิ่มขึ้น คือ

$$AF \leq BD \qquad \text{(D4)}$$

(3E) วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำ พิจารณาค่าต้นทุนของแต่ละค่าในแต่ละชั้น ซึ่งแสดงไว้ด้านข้างของแผนภาพลำดับ และพิจารณาดังเช่นที่เคยกล่าวไปแล้วจะได้ผลการบรอดคาสท์ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.6

ตัวอย่างการพิสูจน์ที่น่าสนใจจากตารางที่ 3.6

กรณี D-3E-F โนด A บรอดคาสท์

พิสูจน์ว่า AFABZ กับ ABDBZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

เนื่องจากเคยพิสูจน์แล้วในกรณี C-F โนด A บรอดคาสท์ ดังนั้นผลจะเหมือนกัน

(3F) วงรอบที่ 1 ยังไม่มีการวนซ้ำ พิจารณาค่าต้นทุนของแต่ละค่าในแต่ละชั้น ซึ่งแสดงไว้ด้านข้างของแผนภาพลำดับ และพิจารณาดังเช่นที่เคยกล่าวไปแล้วจะได้ผลการบรอดคาสท์ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.7

ตัวอย่างการพิสูจน์ที่น่าสนใจจากตารางที่ 3.7

กรณี D-3F-E โนด D บรอดคาสท์

พิสูจน์ว่า DEDBZ กับ DBDBZ อะไรมีค่าน้อยกว่ากัน

เนื่องจากเคยพิสูจน์แล้วในกรณี D-E โนด D บรอดคาสท์ ดังนั้นผลจะเหมือนกัน

4. เหตุการณ์ที่โนด B เลือกผ่านโนด E,F

จากอสมการ (a) และ (b) แสดงให้เห็นว่าโนด B เลือกผ่านโนด E ไปยังโนด Z ไม่มีทางเป็นเส้นทางที่มีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับโนด NeB อื่น ๆ ได้ เนื่องจากอย่างน้อยที่สุดก็มีเส้นทางที่โนด B เลือกผ่านโนด D ในการไปโนด Z ที่ให้ค่าต้นทุนที่น้อยกว่า ในทำนองเดียวกัน โนด F ก็ไม่มีทางเป็นเส้นทางที่น้อยที่สุดที่โนด B เลือกผ่านไปยังโนด Z เพราะผ่านโนด A จะน้อยกว่า ดังนั้นกรณีทั้งสองนี้ จึงไม่เกิดขึ้นแน่นอนในโครงข่าย จึงไม่จำเป็นต้องสร้างแผนภาพ หรือพิจารณาได้จากอสมการเงื่อนไขตั้งต้นจะขัดแย้งกันกับอสมการ (a) และ (b)

สำหรับกรณีวงรอบอื่น ๆ ที่เกิดจากการอัพเดตแล้วกลับไปยังชั้นเดิมจะถูกพิจารณารวมไปกับการนับลำดับที่เป็นไปได้ที่โนด B จะเลือกผ่านโนด NeB แต่ละตัวในหัวข้อ "เลือกลำดับที่เกิดได้ระหว่างคู่โนดตัวแทนหนึ่ง ๆ" เนื่องจากว่าถ้าพิจารณาโดยตรงโดยไม่รู้ว่าค่าต้นทุนใดมากหรือน้อยกว่าค่าต้นทุนอีกตัวจะทำให้เกิดความยุ่งยาก

3.2.2.2 ส่วนที่โนดที่รู้ว่าข่ายเชื่อมโยงขาดบรอดคาสท์ออกไปทันที

สิ่งที่เกิดขึ้นคือโนด A และ D รับค่าอัพเดตที่เป็นอนันต์ของโนด B ไป ซึ่งควรจะเป็นเช่นนั้นเพื่อกระจายข้อมูลที่ข่ายเชื่อมโยงขาดแก่โนดที่เลือกที่จะผ่านให้หยุดส่งข้อมูลมา แต่ในความเป็นจริงทำให้ยิ่งเกิดความผิดพลาดเพิ่มขึ้นเพราะค่าต้นทุนที่เป็นอนันต์นี้ทำให้โนดที่ติดกันสามารถอัพเดตค่าต้นทุนใดก็ได้ไปให้ซึ่งแน่นอนข้อมูลที่ได้นี้เป็นข้อมูลที่ผิด และอาจทำให้เส้นทางใหม่ที่เลือกเป็นเส้นทางที่เกิดลูปได้ แสดงให้เห็นว่าโนดที่มีข้อมูลอนันต์มากขึ้นเท่าไหร่ข้อมูลผิด ๆ ที่โนดได้รับก็จะยิ่งมากขึ้น ยกเว้นการส่งค่าอนันต์ถูกส่งไปเรื่อย ๆ จนทุกโนดได้รับหมดในทันทีโดยไม่ถูกอัพเดตค่าต้นทุนทับค่าอนันต์เสียก่อน

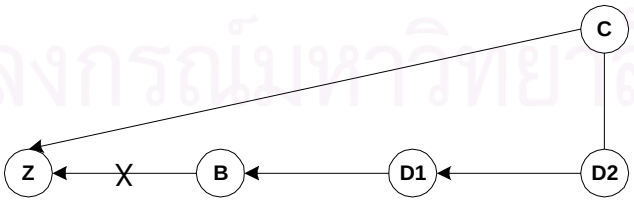
สำหรับการสร้างแผนภาพก็ใช้หลักการเดิมในการสร้าง แต่เนื่องจากว่าแผนภาพที่สร้างไม่มีเงื่อนไขเริ่มต้นใดนอกจากค่าต้นทุนของโนด B,A และ D เท่ากับอนันต์ ซึ่งทำให้เกิดเหตุการณ์ได้เยอะมากในแผนภาพลำดับ จึงพิจารณาเพียงวงรอบที่ 1 วงรอบเดียวส่วนลำดับที่ได้จะพิจารณารวมไปในหัวข้อ "เลือกลำดับที่เกิดได้ระหว่างคู่โนดตัวแทนหนึ่ง ๆ"

หมายเหตุ

1. แผนภาพที่สร้างพิจารณารวมไปถึงกรณีไม่ถือลำดับด้วยเพื่อความสมบรูณ์แบบที่สุด นั่นคือ เกิด ลำดับซ้ำได้ เช่น B แล้วเกิด B ต่อได้ เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์วิธีการแก้ลูปที่ทำให้ลำดับเกิดได้หลายๆ รูปแบบเช่น วิธีทริกเกอร์อัพเดตเป็นต้น

2. (เหตุการณ์ในข้อนี้ไม่มีผลกระทบเนื่องจากผลปป.มากกว่ามันไม่ได้ไปแก้อะไรในโครงข่าย ดังนั้นการเปรียบครั้งอื่นต่อไปจึงไม่เกี่ยวกันอยู่แล้ว) กรณีเปรียบเทียบค่าต้นทุนแล้วผลปรากฏว่ามากกว่านั้น จะมีผลกระทบต่อการพิจารณาด้วยคือ ทำให้ได้เงื่อนไขเพิ่มขึ้นมา แต่ที่ไม่มีพิจารณารวมไปด้วยเนื่องจากจะทำให้ขั้นตอนการวิเคราะห์ทำได้ยากขึ้น เนื่องจากทำให้การเปรียบเทียบค่าต้นทุนในแต่ละชั้นไม่ตายตัว ปัญหานี้ถูกแก้ไขในภายหลังแล้ว โดยผลการวิเคราะห์ลำดับที่ได้มา จะถูกทดสอบลำดับดูก่อนว่าเป็นไปได้จริงหรือไม่ก่อนนำไปวิเคราะห์ต่อเสมอ

3. หลังข่ายเชื่อมโยงขาดการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนจะมีทิศทางในทิศเพิ่มขึ้นจากตอนอยู่ในสภาวะก่อนข่ายเชื่อมโยงขาด แต่มีโอกาสลดลงได้ (แต่ก็ไม่น้อยไปกว่าตอนอยู่ในสภาวะก่อนข่ายเชื่อมโยงขาด) คือ เมื่อโนดที่มีค่าต้นทุนรวมน้อยที่สุดยังไม่บรอดคาสท์ก็ถูกโนดอื่นบรอดคาสท์ก่อน แต่เมื่อโนดที่มีค่าต้นทุนรวมน้อยที่สุดนี้บรอดคาสท์ผลก็จะกลับสู่ปกติ คือ ค่าต้นทุนมีทิศทางเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น รูปข้างล่าง เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดส่งผลต่อค่าต้นทุนของโนด D1 และทำให้ค่าต้นทุนของโนด D2 เพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าการเพิ่มนี้มากกว่าค่าต้นทุนรวมของ D2C->Z แล้วดังนั้นเมื่อโนด C บรอดคาสท์ก็ทำให้โนด D2 มีค่าต้นทุนที่ลดลงได้ แต่ก็ไม่เกินจากตอนอยู่ในสภาวะก่อนข่ายเชื่อมโยงขาด



รูปที่ 3.5 : แสดงตัวอย่างชุดโนดที่มีค่าต้นทุนลดลงหลังข่ายเชื่อมโยงขาด

3.2.3 เลือกลำดับที่เกิดได้ระหว่างคู่โนดตัวแทนหนึ่ง ๆ

จากที่กล่าวไปในหัวข้อที่แล้วว่า ในการพิจารณาการอัพเดตที่เกิดการย้อนกลับไปยังชั้นของแผนภาพลำดับชั้นเดิม, การพิจารณาเหตุการณ์ที่โนด XminAll บรอดคาสท์หลังโนด B บรอดคาสท์ และกรณีโนด B ถึงลำดับบรอดคาสท์ออกไปทันที ให้แผนภาพลำดับที่เยอะมากเมื่อไม่มีอสมการเงื่อนไขเริ่มต้น เพื่อบอกว่าค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงใดมากหรือน้อยกว่าข่ายเชื่อมโยงอีกข่ายเชื่อมโยง เพื่อลดความซับซ้อนในการสร้างแผนภาพลำดับแบบไม่เจาะจงโครงข่ายของเหตุการณ์เหล่านี้ลง จึงข้ามขั้นตอนไปที่การพิจารณาที่โครงข่ายใด ๆ เลย และในการพิจารณาลำดับที่เกิดได้ก็ให้พิจารณาเพียงวงรอบลำดับวงรอบแรกวงรอบเดียวคือ 7 ลำดับ ได้แก่ A,B,C,D,E,F แล้วมีลำดับอย่างไรที่โนด B จะเลือกโนด NeB นั้น (ซึ่งตามปกติถ้าสร้างแผนภาพจนครบจะนับเหตุการณ์ที่โนด B เลือกโนด NeB ได้ครบจริง ๆ เช่น กรณีโนด B เลือกโนด A อาจจะเกิดที่วงรอบลึก ๆ กว่าวงรอบแรกได้เช่น ADBFECADB)

การหาลำดับที่เกิดได้ระหว่างคู่โนดตัวแทนหนึ่ง ๆ ทั้งหมด

1. ส่วนที่โนดที่รู้ว่าข่ายเชื่อมโยงขาดแต่ยังไม่ทันบรอดคาสท์ออกไปก็ถูกโนดข้างเคียงบรอดคาสท์ก่อน

   1.1 กรณีโนด XminAll บรอดคาสท์ก่อนที่โนด B จะบรอดคาสท์ (----XminAll----B----) จะได้เหตุการณ์ที่โนด B เลือกโนด XminAll

   1.2 กรณีโนด XminAll บรอดคาสท์หลังโนด B บรอดคาสท์ (----Xmin----B---- XminAll----) แต่ไม่รวมกรณีโนด B บรอดคาสท์เป็นโนดแรก

      1.2.1 เมื่อถึงลำดับโนด B บรอดคาสท์ ก่อนที่โนด XminAll จะบรอดคาสท์ไม่ทำให้โนด XminAll มีค่าต้นทุนที่เปลี่ยนไป นั่นคือเมื่อโนด XminAll บรอดคาสท์โนด B ก็จะเลือกโนด XminAll ซึ่งมีค่าต้นทุนที่น้อยกว่าโนดอื่น หรือก็คือจะได้เหตุการณ์ที่โนด B เลือกโนด XminAll

      1.2.2 เมื่อถึงลำดับโนด B บรอดคาสท์ ก่อนที่โนด XminAll จะบรอดคาสท์แล้ว ทำให้โนด XminAll มีค่าต้นทุนที่เปลี่ยนไป จะได้เหตุการณ์ที่โนด B เลือกเป็น

โนดที่ให้เส้นทางที่น้อยที่สุดขณะนั้นอาจจะเป็นโนด Xmin หรือโนดอื่นก็ได้ ในที่นี้ต้องไปดูที่แต่ละลำดับที่เกิดขึ้นเอา

2. ส่วนที่โนดที่รู้ว่าข่ายเชื่อมโยงขาดถึงลำดับบรอดคาสท์ออกไปทันที

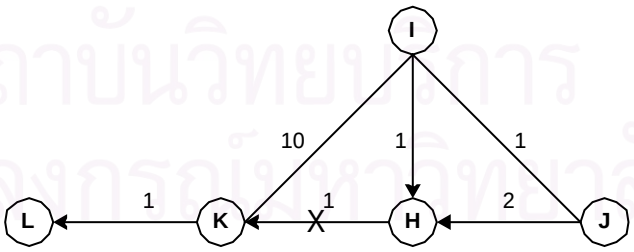
เราต้องเขียนแผนภาพกรณีที่สมมุติให้แต่ละโนดมีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดบรอดคาสท์ก่อนโนด B (ซึ่งให้ผลเดียวกับการให้โนดที่มีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดบรอดคาสท์เป็นโนดแรก)

3.2.4 วิเคราะห์ลูปที่เป็นไปได้ตามจำนวนโนดและรูปแบบที่จะเกิดได้ด้วยลำดับระหว่างคู่โนดตัวแทน

ให้แยกพิจารณาลูปขนาดต่าง ๆ กันเป็นกรณี ๆ ไปเช่น ลูปแบบ 2 โนด, ลูปแบบ 3 โนด และลูปแบบ 4 โนด เป็นต้น โดยการหาลำดับการบรอดคาสท์ที่ทำให้เกิดลูปเหล่านั้นหาได้จากการหาลำดับการบรอดคาสท์ที่ทำให้เกิดการเลือกเส้นทางที่ทำให้เกิดลูปเหล่านั้น ด้วยการใช้ลำดับการบรอดคาสท์ที่แต่ละโนดจะเลือกผ่านโนดอีกโนดหนึ่งที่ติดกันที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 มาอินเทอร์เซกต์กัน

3.3 ตัวอย่างการดีเทกลูปจากโครงข่ายที่ปัจจุบันนิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาลูป

สำหรับตัวอย่างในการดีเทกลูปขอยกเอาตัวอย่างของโครงข่ายที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เรื่องลูป [6][7][8][9] ซึ่งแสดงในรูปข้างล่าง



รูปที่ 3.6 : แสดงโครงข่ายตัวอย่างในการดีเทกลูปด้วยวิธีการใช้ชุดโนดตัวแทน

หมายเหตุ : สำหรับตัวอย่างที่จะใช้ในการวิเคราะห์ต้องระวังในการกำหนดค่าต้นทุนให้โครงข่ายซึ่งจะต้องสอดคล้องกับทิศทางของลูกศรในทุก ๆ เหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยสามารถตรวจสอบได้จากอสมการเงื่อนไขในตาราง ข. ในภาคผนวก ข.

รายละเอียดการดีเทกลูป

1. สร้างชุดโนดตัวแทนของโครงข่าย

กำหนดชุดโนดตัวแทนเป็น

โนด I : เป็นชุดโนดตัวแทนโนด A โนดที่ 1

โนด J : เป็นชุดโนดตัวแทนโนด A โนดที่ 2

โนด K : เป็นโนด Z (เนื่องจากโนด L ต่อกับโนด K เพียงโนดเดียว ดังนั้นพิจารณาโนด K เป็นโนด Z แทนโนด L ไปแลยแล้วไม่ต้องพิจารณาโนด L อีกต่อไป)

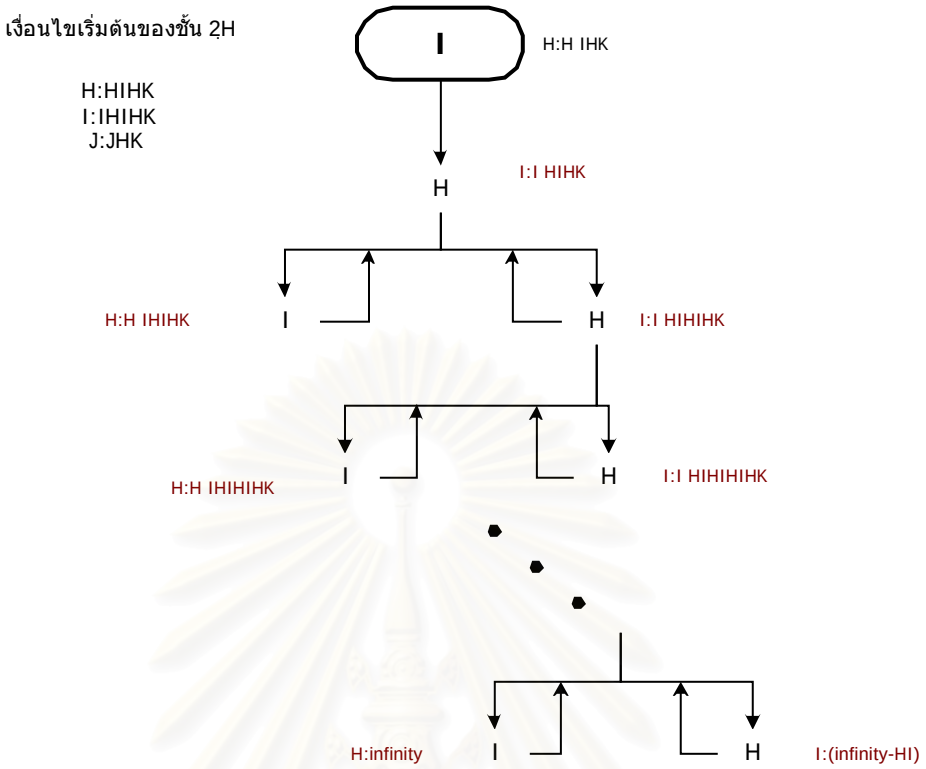
2. สร้างแผนภาพลำดับจากชุดโนดตัวแทน

จะเห็นว่าชุดโนดตัวแทนมีเพียงชุดโนดตัวแทนโนด A และ B โดยมีโนด I เป็นโนด XminAll ที่มีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดที่โนด H เลือกผ่านในการไปยังโนด K ได้ในตอนเริ่มต้น

3.4 กรณีโนด I บรอดคาสท์ก่อนที่โนด H จะบรอดคาสท์ (----I----H----)

ในกรณีนี้โนด H จะเลือกผ่านโนด I เสมอ เนื่องจากโนด I มีค่าต้นทุนรวมที่น้อยที่สุดแล้ว ส่วนโนดอื่นจะมีลำดับการบรอดคาสท์แทรกอยู่ในตำแหน่งใดในช่องว่างของลำดับนี้ (----I----H----) ก็ได้ เช่น JKIH, KJIH ดังนั้นจะได้แผนภาพลำดับการบรอดคาสท์เป็นแบบ “แผนภาพโนด A” ดังรูปที่ 3.7 ด้านล่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 : แสดงแผนภาพในกรณีโนด I บรอดคาสท์ก่อนที่โนด H จะบรอดคาสท์ (----I----H----)

3.5 กรณีโนด I บรอดคาสท์หลังจากโนด H บรอดคาสท์ (----Xmin----H----I----)

แยกพิจารณาเป็น 2 กรณี

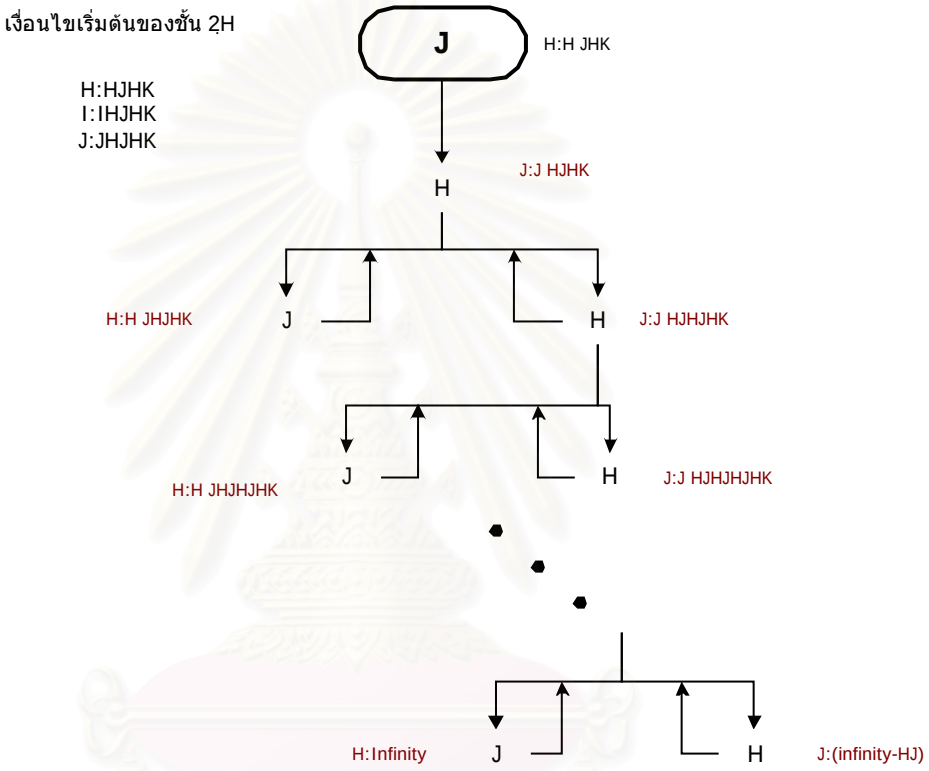
2.1 หลังจากโนด H บรอดคาสท์ไม่ทำให้โนด I มีค่าต้นทุนที่เปลี่ยนไป

จะเห็นว่าพอโนด H บรอดคาสท์ โนด I จะมีค่าต้นทุนที่เปลี่ยนไปแน่นอน ดังนั้นเหตุการณ์ในกรณีนี้ไม่เกิดขึ้นอย่างแน่นอน

2.2 หลังจากโนด H บรอดคาสท์ แล้วทำให้โนด I มีค่าต้นทุนที่เปลี่ยนไป

กรณีนี้หลังจากโนด H บรอดคาสท์แล้ว โนดที่มีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดที่โนด H จะเลือกผ่านไปโนด K ไม่ใช่โนด I แล้ว ดังนั้นต้องหาโนดดังกล่าวนั้นใหม่ โนด Xmin ที่ไม่ใช่โนด XminAll ที่เป็นได้ คือ โนด J ซึ่งเป็นโนด NeH ที่เหลืออยู่ตัวเดียว

หลังจากโนด H บรอดคาสท์เส้นทางของโนด J จะได้ค่าต้นทุนรวมแต่ละค่า ดังนี้ J:JHJHK, I:IHJK และ H:HJHK ดังนั้นโนด XminAll ใหม่หลังโนด H บรอดคาสท์ คือ โนด I ซึ่งมีค่าต้นทุนน้อยที่สุดขณะนี้ เพราะฉะนั้นแผนภาพที่ต้องเขียนในกรณีนี้ คือ แผนภาพโนด A โดยค่าต้นทุนเริ่มต้นเป็นค่าต้นทุนรวมที่เพิ่งกล่าวไป ดังแสดงในรูปด้านล่าง



รูปที่ 3.8 : แสดงแผนภาพในกรณีโนด I บรอดคาสท์หลังจากโนด H บรอดคาสท์และหลังจากโนด H บรอดคาสท์ แล้วทำให้โนด I มีค่าต้นทุนที่เปลี่ยนไป (----I----H----)

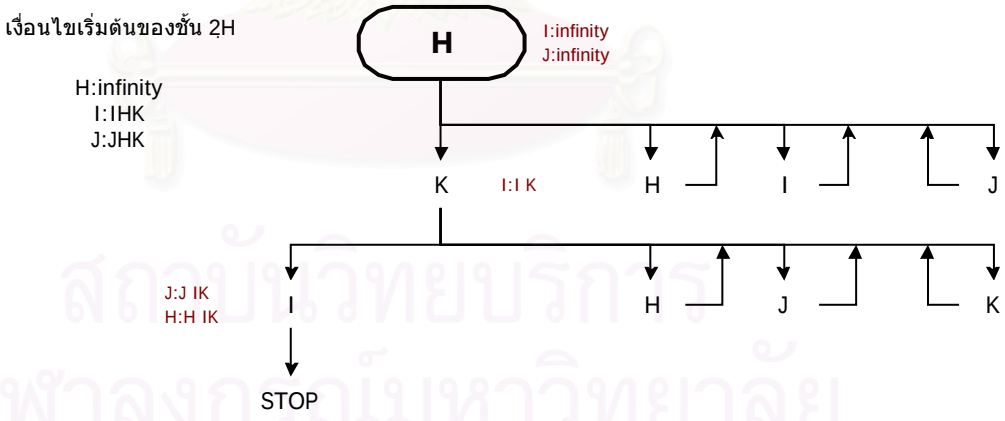
3.6 กรณีโนด H บรอดคาสท์เป็นโนดแรก (H--------)

เนื่องจากกรณีโนด H บรอดคาสท์ออกไปทำให้เกิดโนดที่มีค่าต้นทุนอนันต์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจะต้องแยกพิจารณาทีละโนด ดังต่อไปนี้

3.1 พิจารณาโนด H เป็นเสมือนโนดที่เห็นข่ายเชื่อมโยงขาดหรือโนด B

หลังจากโนด H บรอดคาสท์ทำให้โนด I และโนด J โนดมีค่าต้นทุนเป็นค่าอนันต์ และเนื่องจากโนด K ไม่ได้เลือกผ่านโนด I ดังนั้นค่าต้นทุนอนันต์จะหยุดการกระจายอยู่ที่โนด I, J และโนด H จนกระทั่งถึงลำดับของโนด K บรอดคาสท์ โนด I ก็จะเปลี่ยนเส้นทางที่เลือกผ่านโนด H เป็นเลือกผ่านโนด K แทนซึ่งเป็นเส้นทางใหม่ที่สามารถไปยังโนด K ได้จริง และเมื่อโนด I บรอดคาสท์ก็จะทำให้โนด J และโนด H ได้เส้นทางดังกล่าวไปด้วย เนื่องจากเป็นเส้นทางนี้มีค่าต้นทุนที่น้อยกว่าค่าอนันต์อยู่แล้ว ดังนั้นลำดับการบรอดคาสท์ที่ใช้แทนเหตุการณ์โนด H บรอดคาสท์เป็นโนดแรก คือ H--K-- โดยมีโนด J และโนด I แทรกอยู่ตำแหน่งไหนก็ได้ในช่องว่าง และในการบรอดคาสท์ที่เหตุการณ์นี้จะสิ้นสุดที่ลำดับการบรอดคาสท์ H--K--I นั่นเอง

สำหรับการเปลี่ยนค่าต้นทุนของโนด I จะไม่ถูกทับด้วยค่าต้นทุนอนันต์ซ้ำอีก เนื่องจากเหตุการณ์ที่ค่าต้นทุนที่สูงกว่าจะถูกเลือกมีเพียงเหตุการณ์ที่โนดนั้นถูกปรับค่าต้นทุนจากโนดที่ตนเลือกผ่าน ซึ่งเหตุการณ์นี้จะไม่เกิดเพราะโนด I เปลี่ยนไปเลือกผ่านโนด K แล้วดังนั้นการปรับค่าต้นทุนจึงต้องมาจากโนด K เท่านั้น ดังนั้นแผนภาพสมมูลที่ใช้แทนแผนภาพของลำดับอื่น ๆ คือ แผนภาพลำดับการบรอดคาสท์ของ HKI ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 3.9 : แสดงแผนภาพในกรณีโนด H บรอดคาสท์เป็นโนดแรก ที่แทนด้วยลำดับการบรอดคาสท์ (HKI)

3.2 พิจารณาโนด I เป็นเสมือนโนดที่เห็นข่ายเชื่อมโยงขาดหรือโนด B

โนด XminAll คือ โนด K

กรณีโนด K บรอดคาสท์ก่อนโนด I

โนด K บรอดคาสท์เป็นโนดแรก ซึ่งทำให้โนด I เปลี่ยนไปเลือกผ่านโนด K แล้วก็หลุดลูป แผนภาพลำดับการบรอดคาสท์จะเหมือนกับในรูปที่ 3.9 ดังนั้นในการหาเหตุการณ์ที่โนดหนึ่ง ๆ จะเลือกผ่านอีกโนดหนึ่งในขั้นถัดไปก็จะเหมือมกับในข้อ 3.1 ดังนั้นไม่ขอพูดถึง

กรณีโนด I บรอดคาสท์ก่อนโนด K

เนื่องจากโนดที่ติดกับโนด I เป็นโนดที่มีค่าต้นทุนเป็นอนันต์ทั้งหมด ดังนั้นในกรณีโนด I บรอดคาสท์ก่อนจึงไม่ให้ผลอะไรที่เปลี่ยนแปลงแล้ว คือทุกโนดก็ยังคงมีค่าต้นทุนเป็นอนันต์ไม่เปลี่ยนแปลง

3.3 พิจารณาโนด J เป็นเสมือนโนดที่เห็นข่ายเชื่อมโยงขาดหรือโนด B

เนื่องจากโนดที่ติดกับโนด J เป็นโนดที่มีค่าต้นทุนเป็นอนันต์ทั้งหมด ดังนั้นในการบรอดคาสท์จึงไม่ให้ผลอะไรที่เปลี่ยนแปลงแล้ว คือทุกโนดก็ยังคงมีค่าต้นทุนเป็นอนันต์ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์จึงไม่จำเป็นต้องเขียนในการหาลำดับที่ทำให้เกิดลูปสำหรับกรณีนี้

3. เลือกลำดับที่เกิดได้ระหว่างคู่โนดตัวแทนหนึ่ง ๆ

จากแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์ของทั้ง 3 เหตุการณ์ แยกลำดับการบรอดคาสท์ออกได้ดังต่อไปนี้

กรณีโนด I บรอดคาสท์ก่อนโนด H

1. โนด H เลือกโนด I ที่ลำดับ ต่อไปนี้ I, I--H--I--, I--H--I--H--I, …

2. โนด H เลือกโนด J ที่ลำดับ ต่อไปนี้ --J--, --J--H--J--, --J--H--J--H--J--, …

3. โนด I เลือกโนด H ที่ลำดับ ต่อไปนี้ ค่าเริ่มแรก, I--H--, I--H--I--H--, …

4. โนด J เลือกโนด H ที่ลำดับ ต่อไปนี้ ค่าเริ่มแรก, J--H--, --J--H--J--H--, …

5. โนด K จะไม่เลือกโนด I เนื่องจากโนด K เป็นโนดปลายทางเอง

ส่วนกรณีอื่น ๆ จะเกิดขึ้นได้กรณีที่การวนลูปหลุดหรือใช้กลไกของการกำหนดค่าต้นทุนอนันต์เป็น 16 ในที่นี้ถือว่ายังไม่ได้มีการใช้วิธีแก้ลูปเข้าช่วยลูปที่เกิดจึงไม่หลุด

กรณีโนด H บรอดคาสท์ก่อนโนด I

1. โนด H เลือกโนด I ที่ลำดับ ต่อไปนี้ H--K--I

2. โนด H จะไม่เลือกโนด J

3. โนด I เลือกโนด H ที่ลำดับ ต่อไปนี้ ค่าเริ่มแรก

4. โนด J เลือกโนด H ที่ลำดับ ต่อไปนี้ ค่าเริ่มแรก

5. โนด I จะไม่เลือกโนด J

6. โนด J เลือกโนด I ที่ลำดับ ต่อไปนี้ H--K--I

7. โนด I เลือกโนด K ที่ลำดับ ต่อไปนี้ H--K--

8. โนด K จะไม่เลือกโนด I เนื่องจากโนด K เป็นโนดปลายทางเอง

4. วิเคราะห์ลูปที่เป็นไปได้ตามจำนวนโนดและรูปแบบที่จะเกิดได้

4.1 ลูปแบบ 2 โนด เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ ได้แก่

- ลูประหว่างโนด H กับโนด I

พิจารณาจากขั้นตอนที่ 3 ลำดับที่เกิดลูปประเภทนี้ได้ คือ ลำดับที่ทำให้โนด I เลือกโนด H อินเทอร์เซกต์กับลับที่โนด H เลือกโนด I ได้แก่

กรณีโนด I บรอดคาสท์ก่อนโนด H

(I, I--H--I--, I--H--I--H--I, … อินเทอร์เซกต์กับ ค่าเริ่มแรก, I--H--, I--H--I--H--, …) จะได้ I, I--H--, …

กรณีโนด H บรอดคาสท์ก่อนโนด I

(H--K--I อินเทอร์เซกต์กับ ค่าเริ่มแรก) จะไม่ได้ลำดับที่เป็นจริงเพราะค่าค่าเริ่มแรกถือว่าไม่มีลำดับการบรอดคาสท์

- ลูประหว่างโนด I กับโนด J

กรณีโนด I บรอดคาสท์ก่อนโนด H

ไม่เกิดเหตุการณ์ที่โนดทั้งสองจะเลือกผ่านกันขึ้น เนื่องจากเส้นทางที่โนด I และโนด J เลือกผ่านโนด H ให้ค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดแล้ว

กรณีโนด H บรอดคาสท์ก่อนโนด I

(เซตว่าง อินเทอร์เซกต์กับ H--K--I) จะได้ เซตว่าง คือ ไม่เกิดเหตุการณ์นี้ขึ้น

- ลูประหว่างโนด J กับโนด H

กรณีโนด I บรอดคาสท์ก่อนโนด H

(ค่าเริ่มแรก, J--H--, --J--H--J--H--, … อินเทอร์เซกต์กับ --J--, --J--H--J--, --J--H--J--H--J--, …) จะได้ --J--, --J--H--, …

กรณีโนด H บรอดคาสท์ก่อนโนด I

(ค่าเริ่มแรก อินเทอร์เซกต์กับ เซตว่าง) จะได้ เซตว่าง

- ลูประหว่างโนด I กับโนด K

กรณีโนด I บรอดคาสท์ก่อนโนด H

(เซตว่าง อินเทอร์เซกต์กับ เซตว่าง) จะได้ เซตว่าง

กรณีโนด H บรอดคาสท์ก่อนโนด I

(เซตว่าง อินเทอร์เซกต์กับ H--K--I) จะได้ เซตว่าง

สรุป ลูปแบบ 2 โนด เกิดขึ้นที่ตำแหน่งและลำดับการบรอดคาสท์ต่อไปนี้

ระหว่างโนด J กับโนด H

กรณีโนด I บรอดคาสท์ก่อนโนด H ที่ลำดับการบรอดคาสท์ ต่อไปนี้ --J--, --J--H--, …

ระหว่างโนด H กับโนด I

กรณีโนด I บรอดคาสท์ก่อนโนด H ที่ลำดับการบรอดคาสท์ ต่อไปนี้ --I--, --I--H--, …

4.2 ลูปแบบ 3 โนด เหตุการณ์ที่เกิดได้มีเพียง ลูป IHJ เหตุการณ์ที่ทำให้เกิดลูปนี้คือ

- กรณีโนด I เลือกผ่านโนด H และโนด H เลือกผ่านโนด J และโนด J เลือกผ่านโนด I

กรณีโนด I บรอดคาสท์ก่อนโนด H

ลำดับการบรอดคาสท์ที่ทำให้เกิดเหตุการณ์นี้ คือ (ค่าเริ่มแรก อินเทอร์เซกต์กับ เซตว่าง อินเทอร์เซกต์กับ เซตว่าง) จะได้ เซตว่าง

กรณีโนด H บรอดคาสท์ก่อนโนด I

ลำดับการบรอดคาสท์ที่ทำให้เกิดเหตุการณ์นี้ คือ (ค่าเริ่มแรก อินเทอร์เซกต์กับ เซตว่าง อินเทอร์เซกต์กับ H--K--I) จะได้ เซตว่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- กรณีโนด J เลือกผ่านโนด H และโนด H เลือกผ่านโนด I และโนด I เลือกผ่านโนด J

กรณีโนด I บรอดคาสท์ก่อนโนด H

ลำดับการบรอดคาสท์ที่ทำให้เกิดเหตุการณ์นี้ คือ (ค่าเริ่มแรก, J--H--, --J--H--J--H--, … อินเทอร์เซกต์กับ I, I--H--I--, I--H--I--H--I, … อินเทอร์เซกต์กับ เซตว่าง) จะได้เซตว่าง

กรณีโนด H บรอดคาสท์ก่อนโนด I

ลำดับการบรอดคาสท์ที่ทำให้เกิดเหตุการณ์นี้ คือ (ค่าเริ่มแรก อินเทอร์เซกต์กับ H--K--I อินเทอร์เซกต์กับ เซตว่าง) จะได้ เซตว่าง

สรุป ลูปแบบ 3 โนดไม่เกิดขึ้นอย่างแน่นอนสำหรับโครงข่ายนี้

3.4 วิธีการคำนวณความน่าจะเป็นในการเกิดลูปและตัวอย่างการคำนวณความน่าจะเป็น

3.4.1 วิธีการคำนวณความน่าจะเป็นในการเกิดลูป

1. กำหนดชนิดโนดให้แก่โนดต่าง ๆ ในโครงข่าย
2. สร้างรูปแบบลูปต่าง ๆ ขึ้นบนโครงข่ายโดยแบ่งรูปแบบลูปตามจำนวนโนดภายในลูปและตำแหน่งที่เกิด
3. พิจารณาแยกทีละรูปแบบลูป แล้วหาลำดับที่เป็นไปได้ในการเกิดของแต่ละข่ายเชื่อมโยงที่อยู่ในลูปนั้น
4. หักลำดับที่เป็นไปไม่ได้ในการเกิดร่วมกันของทุกข่ายเชื่อมโยงในข้อสอง คือ ลำดับที่มีโนดเหมือนกันจะต้องเรียงต่อกันเหมือนกันด้วย ถ้าไม่ก็หักออกเพราะเกิดไม่ได้ เช่น ข่ายเชื่อมโยงที่ 1 มีลำดับเป็น ABC, ACF ข่ายเชื่อมโยงที่ 2 มีลำดับเป็น CADE, ABCE

ดังนั้นลำดับที่ใช้ได้มีเพียงเป็นคู่กันดังนี้ (ABC,ABCE),(ACF,ABCE) ส่วนคู่ที่เหลือใช้ไม่ได้

5. พิจารณาลำดับโนดในข่ายเชื่อมโยงทีละคู่ เพื่อรวมเป็นลำดับชุดเดียวที่เป็นไปได้ และคำนวณจำนวนลำดับที่เกิดได้ เพื่อหาความน่าจะเป็นเมื่อพิจารณาครบจนหมด โดย
    1. หักโนดของข่ายเชื่อมโยงที่ 2 ที่อยู่ในลำดับของทั้งคู่ข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาออกไป แล้วหาเหตุการณ์ในการเกิดของการนำจำนวนโนดที่เหลือนี้แทรกเข้าไปในลำดับโนดของข่ายเชื่อมโยงที่ 1 เพื่อหาเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ในการเกิดลำดับโนดที่เป็นจริงกับลำดับโนดของทั้งสองข่ายเชื่อมโยง
    2. หาความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์ร่วมกันของทั้งสองข่ายเชื่อมโยง
    3. พิจารณาลำดับโนดของข่ายเชื่อมโยงต่อไป โดยกลับไปทำข้อที่ 4 จนครบลูป
6. พิจารณาลูปรูปแบบอื่นต่อไปโดยกลับไปทำข้อที่ 2-4 ใหม่

3.4.2 **ตัวอย่างการคำนวณความน่าจะเป็น**

ต้องการหาความน่าจะเป็นของลำดับที่โนด B_1 เลือกผ่านสองข่ายเชื่อมโยงต่อไปนี้

สมมุติว่า ข่ายเชื่อมโยงที่ 1 มีลำดับเป็น $A_1B_1C_1D_1E_1F_1$

ข่ายเชื่อมโยงที่ 2 มีลำดับเป็น $A_2B_2C_2D_2E_2F_2$

โนด A_1 เป็นโนดเดียวกับโนด A_2

โนด B_1 เป็นโนดเดียวกับโนด B_2

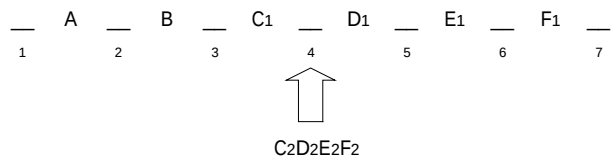
ขั้นที่ 1 $A_1=A_2=A$,$B_1=B_2=B$

ขั้นที่ 2-3 ขอละไว้

ขั้นที่ 4 เนื่องจากโนดที่ซ้ำกันเรียงลำดับเหมือนกันอยู่แล้วจึงเป็นคู่กันได้ไม่ต้องหักออก

ขั้นที่ 5 พิจารณาคู่ข่ายเชื่อมโยงที่ 1 กับ 2

1. หาจำนวนเหตุการณ์ที่ $C_2D_2E_2F_2$ จะไปแทรกอยู่ระหว่าง $ABC_1D_1E_1F_1$ ซึ่งอาจจะไปแทรกอยู่ระหว่างกลางทีละ 1 หรือ มากกว่า 1 โนดก็ได้ แต่ลำดับจะต้องเหมือนเดิม



รูปที่ 3.10 : แสดงการคำนวณจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นโดยที่มีลำดับสอดคล้องกับที่พิจารณาของข่ายเชื่อมโยงทั้งสอง

แบบที่ 1 แทรก 1 ชุด แทรกทีละ 4 โนด

1 เลือกช่องว่างที่จะลง = 7C1

2 จำนวนรูปแบบโนดที่จะใส่ ($C_2D_2E_2F_2$) = 1

3 จำนวนเหตุการณ์ = 7C1*1 = 7 วิธี

แบบที่ 2 แทรก 2 ชุด

1 เลือกช่องว่างที่จะลง = 7C2 = 21

2 จำนวนรูปแบบโนดที่จะใส่ = (4-1)C(2-1) = 3

คิดจากการเลือกช่องว่างของ $C_2D_2E_2F_2$ ซึ่งมี (4-1) ช่อง แล้วเลือกมา (2-1) ช่องที่จะกั่นเป็น 2 กลุ่มจะได้ ($C_2D_2E_2$,F_2) (C_2,$D_2E_2F_2$) (C_2D_2,E_2F_2)

3 จำนวนเหตุการณ์ = 21*3 = 63 วิธี

แบบที่ 3 แทรก 3 ชุด

1 เลือกช่องว่างที่จะลง = 7C3 = 35

2 จำนวนรูปแบบโนดที่จะใส่ = (4-1)C(3-1) = 3

3 จำนวนเหตุการณ์ = 35*3 = 105 วิธี

แบบที่ 4 แทรก 4 ชุด แทรกทีละ 1 โนด

1 เลือกช่องว่างที่จะลง = 7C4 = 35

2 จำนวนรูปแบบโนดที่จะใส่ = (4-1)C(4-1) = 1

3 จำนวนเหตุการณ์ = 35*1 = 35

รวมจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดได้ = 7+63+105+35 = 210 วิธี

ดังนั้นจะได้รูปแบบการคำนวณเป็น

แบบที่ k แทรก i ชุด

1 เลือกช่องว่างที่จะลง = mCi

2 จำนวนรูปแบบโนดที่จะใส่ = (n-1)C(i-1)

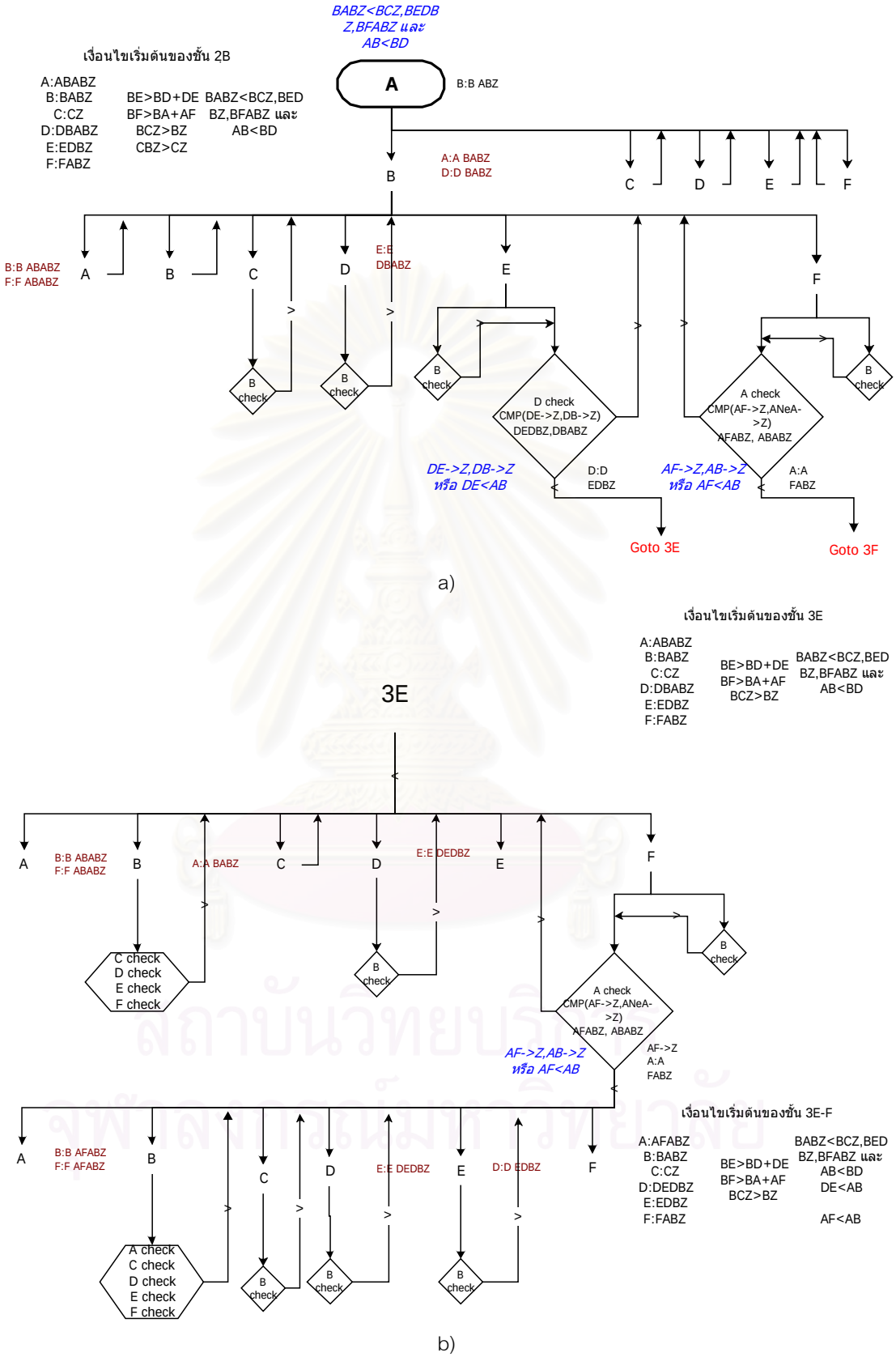
$$\text{จำนวนเหตุการณ์แต่ละแบบ} = mCi \times (n-1)C(i-1)$$

$$\text{จำนวนเหตุการณ์รวมทุกแบบ} = \sum_{k} [mCi \times (n-1)C(i-1)]$$

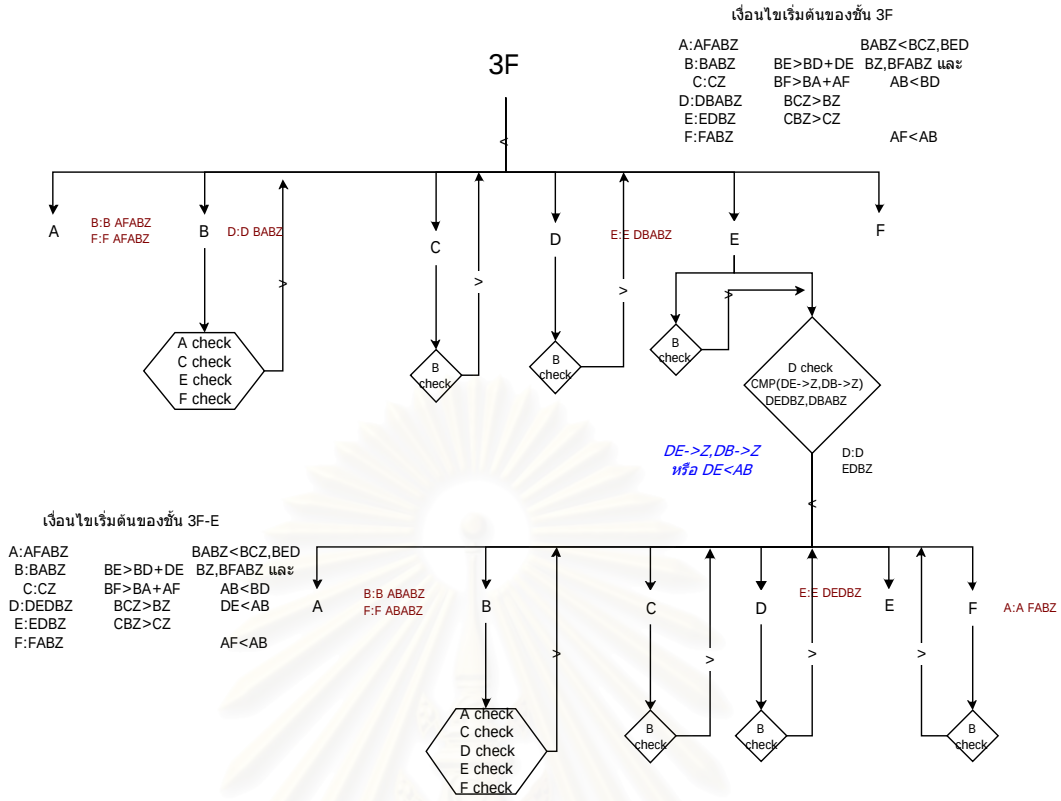
โดย m คือ จำนวนโนดของข่ายเชื่อมโยงที่ถูกแทรก

n คือ จำนวนโนดของข่ายเชื่อมโยงที่แทรก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 : แสดงแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์ในกรณีเหตุการณ์ที่โนด B เลือกผ่านโนด A

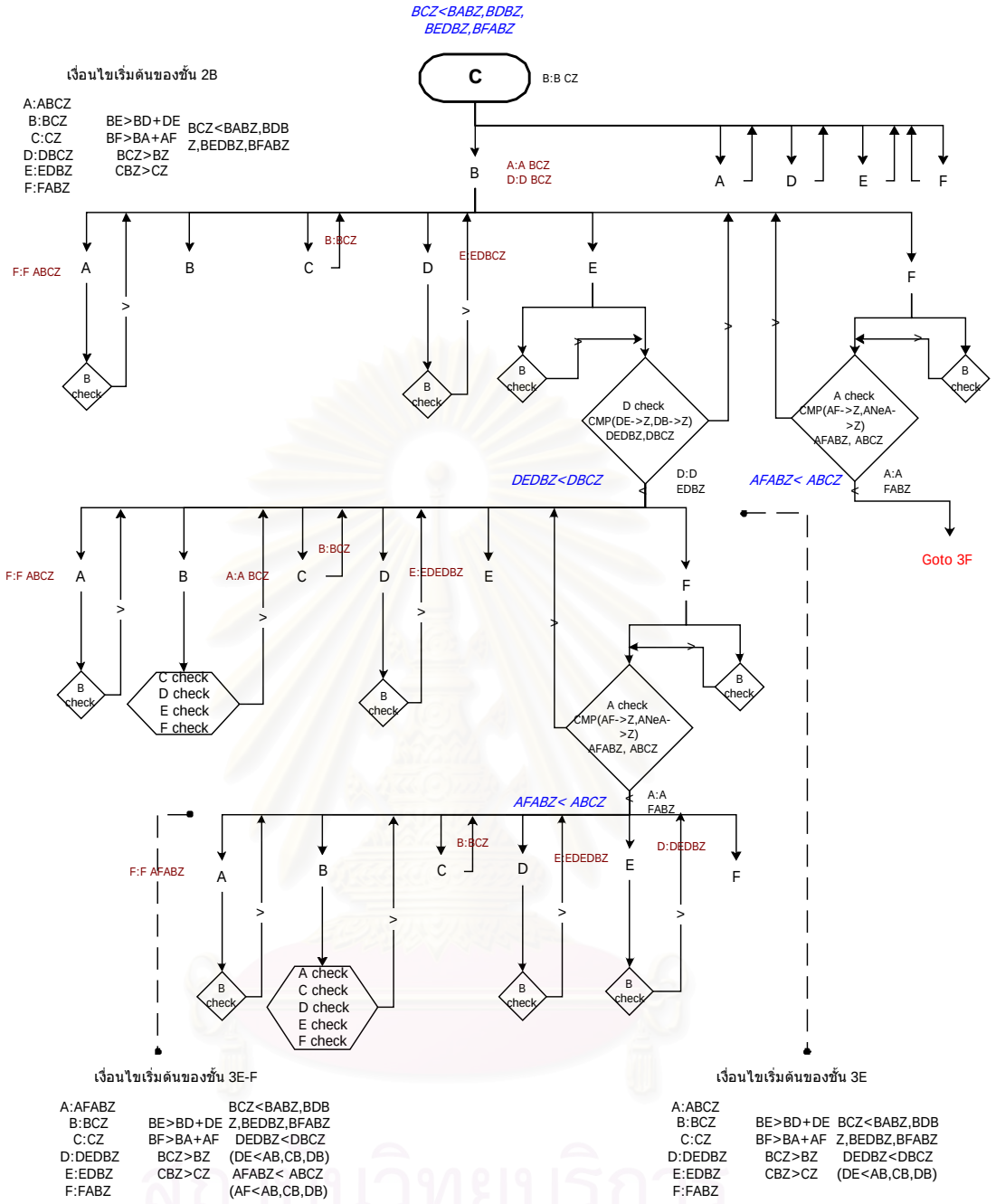


c)

XX : แทนการเปลี่ยนค่าต้นทุนปกติที่ไม่ใช่จากการอัพเดต
XX : แทนการอัพเดตค่าต้นทุนใหม่
XX : แทนเงื่อนไขที่เพิ่มขึ้นหลังจากการเปรียบเทียบ

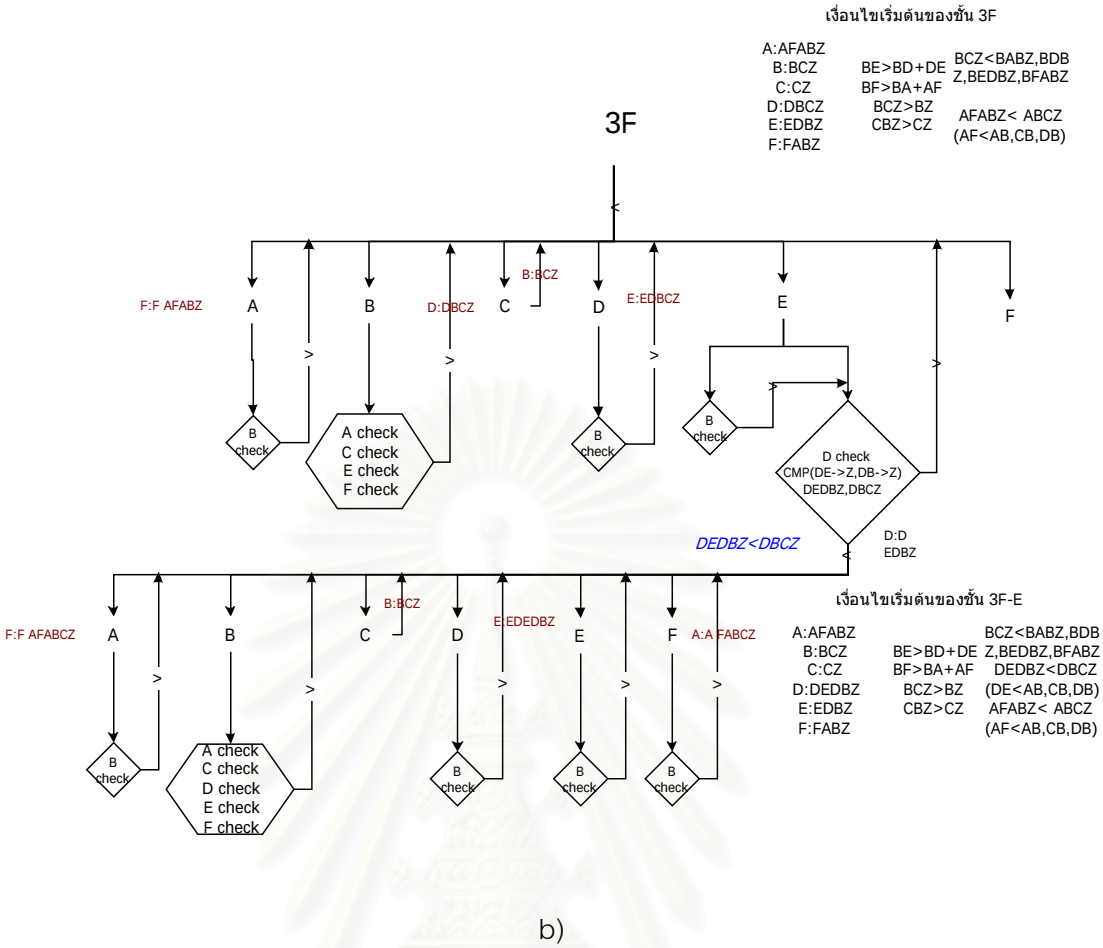
รูปที่ 3.2 : (ต่อ) แสดงแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์ในกรณีเหตุการณ์ที่โนด B เลือกผ่านโนด A

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



a)

รูปที่ 3.3 : แสดงแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์ในกรณีเหตุการณ์ที่โนด B เลือกผ่านโนด C

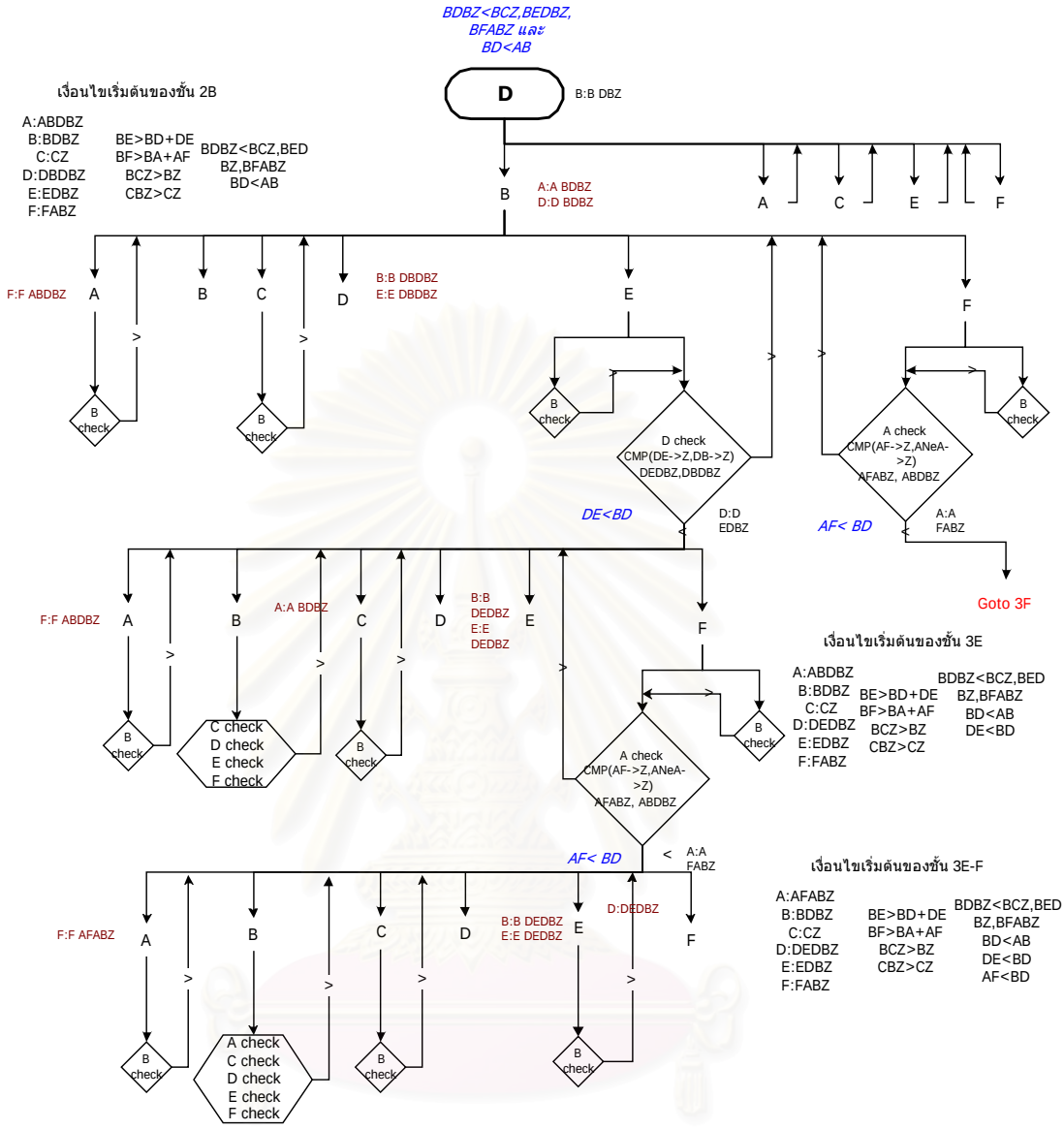


b)

XX : แทนการเปลี่ยนค่าต้นทุนปกติที่ไม่ใช่จากการอัพเดต
XX : แทนการอัพเดตค่าต้นทุนใหม่
XX : แทนเงื่อนไขที่เพิ่มขึ้นหลังจากการเปรียบเทียบ

รูปที่ 3.3 : (ต่อ) แสดงแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์ในกรณีเหตุการณ์ที่โนด B เลือกผ่านโนด C

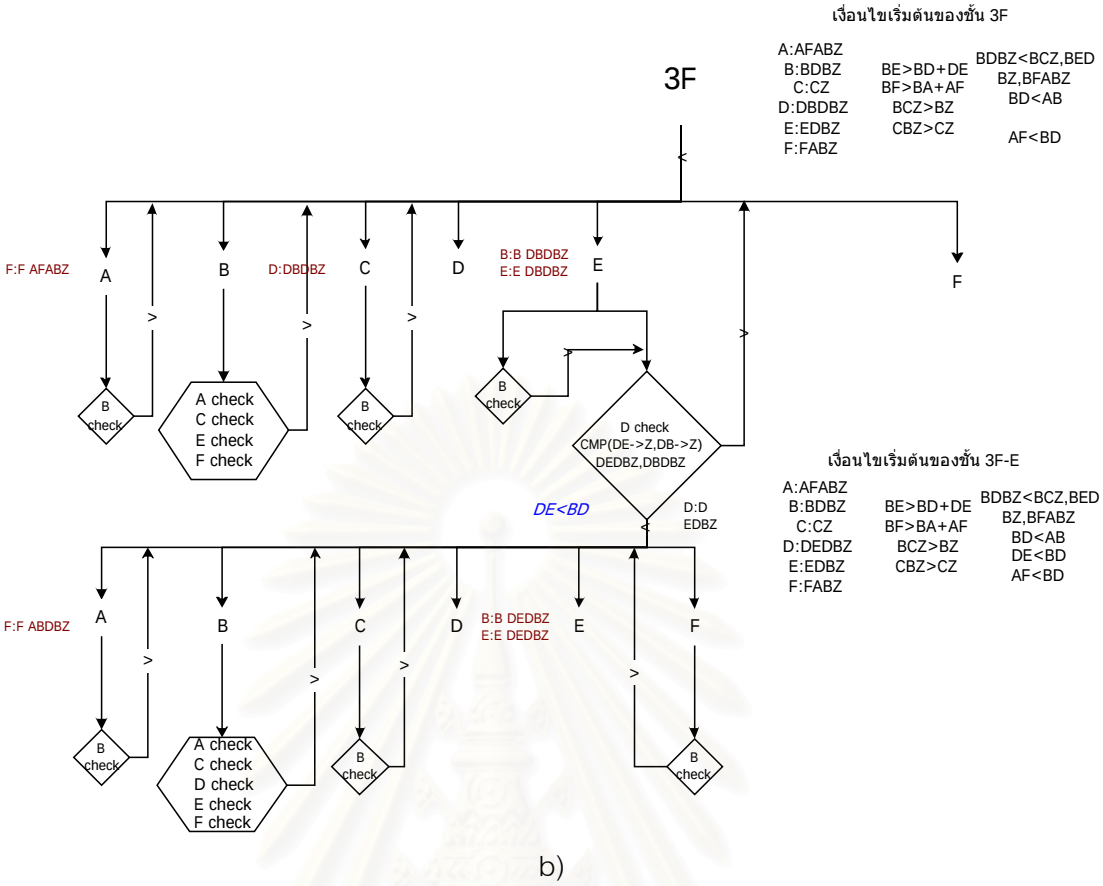
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



a)

รูปที่ 3.4 : แสดงแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์ในกรณีเหตุการณ์ที่โนด B เลือกผ่านโนด D

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



b)

XX : แทนการเปลี่ยนค่าต้นทุนปกติที่ไม่ใช่จากการอัพเดต
XX : แทนการอัพเดตค่าต้นทุนใหม่
XX : แทนเงื่อนไขที่เพิ่มขึ้นหลังจากการเปรียบเทียบ

รูปที่ 3.4 : (ต่อ) แสดงแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์ในกรณีเหตุการณ์ที่โนด B เลือกผ่านโนด D

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 : แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 3F ของโนดตั้งต้น A

โนดที่บรอดคาสท์ (X)	โนดที่ถูกบรอดคาสท์ (Y)	ค่าต้นทุนใหม่ที่ถูกอัพเดต	เส้นทางที่จะเปรียบเทียบ		ผลการเปรียบเทียบ	
			YX->Z	YNeY->Z (Y ขณะนั้น)	มากกว่าเสมอ (อสมการที่ใช้พิสูจน์)	มากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้ (ค่าต้นทุนใหม่และเงื่อนไขเมื่อน้อยกว่า)
A	B	B:B AFABZ				
	F	F:F AFABZ				
B	A		ABABZ	AFABZ	X(A5)	
	C		CBABZ	CZ	X(d)	
	D	D:DBABZ				
	E		EBABZ	EDBZ	X(a)	
	F		FBABZ	FABZ	X(b)	
C	B		BCZ	BABZ	X(a)	
D	B		BDBABZ	BABZ	X(-)	
	E	E:EDBABZ				
E	B		BEDBZ	BABZ	X(A1)	
	D		DEDBZ	DBABZ		D:DEDBZ,DE <= AB (A3)
F	A					
	B					

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 : (ต่อ) แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 3F ของโนดตั้งต้น A

โนดที่บรอดคาสท์ (X)	โนดที่ถูกบรอดคาสท์ (Y)	ค่าต้นทุนใหม่ที่ถูกอัพเดต	เส้นทางที่จะเปรียบเทียบ		ผลการเปรียบเทียบ	
			YX->Z	YNeY->Z (Y ขณะนั้น)	มากกว่าเสมอ (อสมการที่ใช้พิสูจน์)	มากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้ (ค่าต้นทุนใหม่และเงื่อนไขเมื่อน้อยกว่า)
E-A	B	B:B AFABZ				
	F	F:F AFABZ				
E-B	A		ABABZ	AFABZ	X(A5)	
	C		CBABZ	CZ	X(d)	
	D		DBABZ	DEDBZ	X(A3)	
	E		EBABZ	EDBZ	X(a)	
	F		FBABZ	FABZ	X(b)	
E-C	B		BCZ	BABZ	X(A1)	
E-D	B		BDEDBZ	BABZ	X(A2)	
	E	E:EDEDBZ				
E-E	B					
	D					
E-F	A	A:AFABZ				
	B		BFABZ	BABZ	X(A1)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 : แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 2B ของโนดตั้งต้น C

โนดที่บรอดคาสท์ (X)	โนดที่ถูกบรอดคาสท์ (Y)	ค่าต้นทุนใหม่ที่ถูกอัพเดต	เส้นทางที่จะเปรียบเทียบ		ผลการเปรียบเทียบ	
			YX->Z	YNeY->Z (Y ขณะนั้น)	มากกว่าเสมอ (อสมการที่ใช้พิสูจน์)	มากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้ (ค่าต้นทุนใหม่และเงื่อนไขเมื่อน้อยกว่า)
A	B		BABCZ	BCZ	X(-)	
	F	F:FABCZ				
B	A					
	C					
	D					
	E					
	F					
C	B	B:BCZ				
D	B		BDBCZ	BCZ	X(-)	
	E	E:EDBCZ				
E	B		BEDBZ	BCZ	X(C1)	
	D		DEDBZ	DBCZ		D:DEDBZ,DEDBZ<=DBCZ (C2)
F	A		AFABZ	ABCZ		A:AFABZ,AFABZ<=ABCZ (C3)
	B		BFABZ	BCZ	X(C1)	

ตารางที่ 3.3 : แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 3E ของโนดตั้งต้น C

โนดที่บรอดคาสท์	โนดที่ถูกบรอดคาสท์	ค่าต้นทุนใหม่ที่ถูกอัพเดต	เส้นทางที่จะเปรียบเทียบ		ผลการเปรียบเทียบ	
			YX->Z	YNeY->Z	มากกว่าเสมอ	มากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้
(X)	(Y)			(Y ขณะนั้น)	(อสมการที่ใช้พิสูจน์)	(ค่าต้นทุนใหม่และเงื่อนไขเมื่อน้อยกว่า)
A	B		BABCZ	BCZ	X(-)	
	F	F:FABCZ				
B	A	A:ABCZ				
	C		CBCZ	CZ	X(-)	
	D		DBCZ	DEDBZ	X(C2)	
	E		EBCZ	EDBZ	X(a,c)	
	F		FBCZ	FABZ	X(b,c)	
C	B	B:BCZ				
D	B		BDBCZ	BCZ	X(-)	
	E	E:EDEDBZ				
E	B					
	D					
F	A		AFABZ	ABCZ		A:AFABZ,AFABZ<=ABCZ (C3)
	B		BFABZ	BCZ	X(C1)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 : (ต่อ) แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 3E ของโนดตั้งต้น C

โนดที่บรอดคาสท์ (X)	โนดที่ถูกบรอดคาสท์ (Y)	ค่าต้นทุนใหม่ที่ถูกอัพเดต	เส้นทางที่จะเปรียบเทียบ		ผลการเปรียบเทียบ	
			YX->Z	YNeY->Z (Y ขณะนั้น)	มากกว่าเสมอ (อสมการที่ใช้พิสูจน์)	มากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้ (ค่าต้นทุนใหม่และเงื่อนไขเมื่อน้อยกว่า)
F-A	B		BAFABZ	BCZ	X(C1)	
	F	F:FAFABZ				
F-B	A		ABCZ	AFABZ	X(C3)	
	C		CBCZ	CZ	X(-)	
	D		DBCZ	DEDBZ	X(C2)	
	E		EBCZ	EDBZ	X(a,c)	
	F		FBCZ	FABZ	X(b,c)	
F-C	B	B:BCZ				
F-D	B		BDEDBZ	BCZ	X(C1)	
	E	E:EDEDBZ				
F-E	B		BEDBZ	BCZ	X(C1)	
	D	D:DEDBZ				
F-F	A					
	B					

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 : แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 3F ของโนดตั้งต้น C

โนดที่บรอดคาสท์	โนดที่ถูกบรอดคาสท์	ค่าต้นทุนใหม่ที่ถูกอัพเดต	เส้นทางที่จะเปรียบเทียบ		ผลการเปรียบเทียบ	
			YX->Z	YNeY->Z	มากกว่าเสมอ	มากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้
(X)	(Y)			(Y ขณะนั้น)	(อสมการที่ใช้พิสูจน์)	(ค่าต้นทุนใหม่และเงื่อนไขเมื่อน้อยกว่า)
A	B		BAFABZ	BCZ	X(C1)	
	F	F:FAFABZ				
B	A		ABCZ	AFABZ	X(C3)	
	C		CBCZ	CZ	X(-)	
	D	D:DBCZ				
	E		EBCZ	EDBZ	X(a,c)	
	F		FBCZ	FABZ	X(b,c)	
C	B	B:BCZ				
D	B		BDBCZ	BCZ	X(-)	
	E	E:EDBCZ				
E	B		BEDBZ	BCZ	X(C1)	
	D		DEDBZ	DBCZ		D:DEDBZ,DEDBZ<=DBCZ (C2)
F	A					
	B					

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 : (ต่อ) แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 3F ของโนดตั้งต้น C

โนดที่บรอดคาสท์ (X)	โนดที่ถูกบรอดคาสท์ (Y)	ค่าต้นทุนใหม่ที่ถูกอัพเดต	เส้นทางที่จะเปรียบเทียบ		ผลการเปรียบเทียบ	
			YX->Z	YNeY->Z (Y ขณะนั้น)	มากกว่าเสมอ (อสมการที่ใช้พิสูจน์)	มากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้ (ค่าต้นทุนใหม่และเงื่อนไขเมื่อน้อยกว่า)
E-A	B		BAFABZ	BCZ	X(C1)	
	F	F:FAFABZ				
E-B	A		ABCZ	AFABZ	X(C3)	
	C		CBCZ	CZ	X(-)	
	D		DBCZ	DEDBZ	X(C2)	
	E		EBCZ	EDBZ	X(a,c)	
	F		FBCZ	FABZ	X(b,c)	
E-C	B	B:BCZ				
E-D	B		BDEDBZ	BCZ	X(C1)	
	E	E:EDEDBZ				
E-E	B					
	D					
E-F	A	A:AFABZ				
	B		BFABZ	BCZ	X(C1)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5 : แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 2B ของโนดตั้งต้น D

โนดที่บรอดคาสท์	โนดที่ถูกบรอดคาสท์	ค่าต้นทุนใหม่ที่ถูกอัพเดต	เส้นทางที่จะเปรียบเทียบ		ผลการเปรียบเทียบ	
			YX->Z	YNeY->Z	มากกว่าเสมอ	มากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้
(X)	(Y)			(Y ขณะนั้น)	(อสมการที่ใช้พิสูจน์)	(ค่าต้นทุนใหม่และเงื่อนไขเมื่อน้อยกว่า)
A	B		BABDBZ	BDBZ	X(-)	
	F	F:F ABDBZ				
B	A					
	C					
	D					
	E					
	F					
C	B		BCZ	BDBZ	X(D1)	
D	B	B:B DBDBZ				
	E	E:E DBDBZ				
E	B		BEDBZ	BDBZ	X(D1)	
	D		DEDBZ	DBDBZ		D:DEDBZ,DE<=BD (D3)
F	A		AFABZ	ABDBZ		A:AFABZ,AF<=BD (D4)
	B		BFABZ	BDBZ	X(D1)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.6 : แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 3E ของโนดตั้งต้น D

โนดที่บรอดคาสท์	โนดที่ถูกบรอดคาสท์	ค่าต้นทุนใหม่ที่ถูกอัพเดต	เส้นทางที่จะเปรียบเทียบ		ผลการเปรียบเทียบ	
			YX->Z	YNeY->Z	มากกว่าเสมอ	มากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้
(X)	(Y)			(Y ขณะนั้น)	(อสมการที่ใช้พิสูจน์)	(ค่าต้นทุนใหม่และเงื่อนไขเมื่อน้อยกว่า)
A	B		BABDBZ	BDBZ	X(-)	
	F	F:F ABDBZ				
B	A	A:A BDBZ				
	C		CBDBZ	CZ	X(d)	
	D		DBDBZ	DEDBZ	X(D3)	
	E		EBDBZ	EDBZ	X(a)	
	F		FBDBZ	FABZ	X(b)	
C	B		BCZ	BDBZ	X(D1)	
D	B	B:B DEDBZ				
	E	E:E DEDBZ				
E	B					
	D					
F	A		AFABZ	ABDBZ		A:AFABZ,AF<=BD (D4)
	B		BFABZ	BDBZ	X(D1)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.6 : (ต่อ) แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 3E ของโนดตั้งต้น D

โนดที่บรอดคาสท์ (X)	โนดที่ถูกบรอดคาสท์ (Y)	ค่าต้นทุนใหม่ที่ถูกอัพเดต	เส้นทางที่จะเปรียบเทียบ		ผลการเปรียบเทียบ	
			YX->Z	YNeY->Z (Y ขณะนั้น)	มากกว่าเสมอ (อสมการที่ใช้พิสูจน์)	มากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้ (ค่าต้นทุนใหม่และเงื่อนไขเมื่อน้อยกว่า)
F-A	B		BAFABZ	BDBZ	X(-)	
	F	F:F AFABZ				
F-B	A		ABDBZ	AFABZ	X(D4)	
	C		CBDBZ	CZ	X(d)	
	D		DBDBZ	DEDBZ	X(D3)	
	E		EBDBZ	EDBZ	X(a)	
	F		FBDBZ	FABZ	X(b)	
F-C	B		BCZ	BDBZ	X(D1)	
F-D	B	B:B DEDBZ				
	E	E:E DEDBZ				
F-E	B		BEDBZ	BDBZ	X(D1)	
	D	D:D EDBZ				
F-F	A					
	B					

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.7 : แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 3F ของโนดตั้งต้น D

โนดที่บรอดคาสท์	โนดที่ถูกบรอดคาสท์	ค่าต้นทุนใหม่ที่ถูกอัพเดต	เส้นทางที่จะเปรียบเทียบ		ผลการเปรียบเทียบ	
			YX->Z	YNeY->Z	มากกว่าเสมอ	มากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้
(X)	(Y)			(Y ขณะนั้น)	(อสมการที่ใช้พิสูจน์)	(ค่าต้นทุนใหม่และเงื่อนไขเมื่อน้อยกว่า)
A	B		BAFABZ	BDBZ	X(-)	
	F	F:F AFABZ				
B	A		ABDBZ	AFABZ	X(D4)	
	C		CBDBZ	CZ	X(d)	
	D	D:D BDBZ				
	E		EBDBZ	EDBZ	X(a)	
	F		FBDBZ	FABZ	X(b)	
C	B		BCZ	BDBZ	X(D1)	
D	B	B:B DBDBZ				
	E	E:E DBDBZ				
E	B		BEDBZ	BDBZ	X(D1)	
	D		DEDBZ	DBDBZ		D:DEDBZ,DE<=BD (D3)
F	A					
	B					

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.7 : (ต่อ) แสดงผลการบรอดคาสท์ในชั้น 3F ของโนดตั้งต้น D

โนดที่บรอดคาสท์	โนดที่ถูกบรอดคาสท์	ค่าต้นทุนใหม่ที่ถูกอัพเดต	เส้นทางที่จะเปรียบเทียบ		ผลการเปรียบเทียบ	
			YX->Z	YNeY->Z	มากกว่าเสมอ	มากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้
(X)	(Y)			(Y ขณะนั้น)	(อสมการที่ใช้พิสูจน์)	(ค่าต้นทุนใหม่และเงื่อนไขเมื่อน้อยกว่า)
E-A	B		BAFABZ	BDBZ	X(-)	
	F	F:F AFABZ				
E-B	A		ABDBZ	AFABZ	X(D4)	
	C		CBDBZ	CZ	X(d)	
	D		DBDBZ	DEDBZ	X(D3)	
	E		EBDBZ	EDBZ	X(a)	
	F		FBDBZ	FABZ	X(b)	
E-C	B		BCZ	BDBZ	X(D1)	
E-D	B	B:B DEDBZ				
	E	E:E DEDBZ				
E-E	B					
	D					
E-F	A	A:A FABZ				
	B		BFABZ	BCZ	X(C1)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

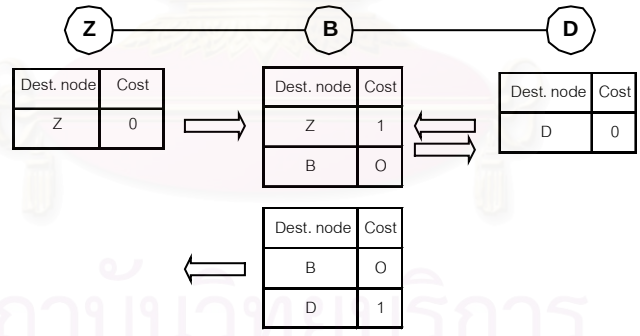
วิธีแก้ปัญหาการเกิดลูป

บทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของวิธีการแก้ปัญหาการเกิดลูป ทั้งที่เป็นพื้นฐานในการพัฒนาไปใช้กับอัลกอริธึมลิงค์สเทตและวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบันกับอัลกอริธึมดีสแทนซ์เวกเตอร์ ได้แก่ วิธีสปริตฮอไรซอน, วิธีสปริตฮอไรซอนแบบพอยซันรีเวอร์ส, วิธีทริกเกอร์อัพเดตและโฮลด์ดาวน์, วิธี HIPR, วิธีเก็บตารางระยะทาง และวิธีที่เสนอคือ วิธีส่งเมสเสจทดสอบ ตลอดจนเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแก้ลูป พร้อมทั้งยกตัวอย่างโครงข่ายที่ให้ผลที่แตกต่างกันทั้งที่สามารถแก้ปัญหาการเกิดลูปได้และไม่สามารถแก้ลูปได้

4.1 วิธีสปริตฮอไรซอน

หลักการทำงาน

ในการเกิดลูปขึ้นจากการส่งข้อมูลกลับไปกลับมานั้น ถ้าเรากำหนดให้เราเตอร์ที่เรียนรู้เส้นทางจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งแล้ว ต้องไม่บรอดคาสท์เส้นทางที่เรียนรู้แล้วนี้กลับไปยังข่ายเชื่อมโยงเดิม [6][7][8][9][10] ดังแสดงในรูปด้านล่าง



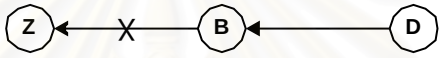
รูปที่ 4.1 : แสดงการบรอดคาสท์เส้นทางด้วยวิธีสปริตฮอไรซอน

จากรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาปลายทางของโนด D เป็นโนด Z จะเห็นว่าโนด D เลือกผ่านโนด B และโนด B เลือกผ่านโนด Z ซึ่งจะเห็นว่าโนด D เรียนรู้เส้นทางไปโนด Z จากโนด B ดังนั้นตามหลักแล้วโนด D จะต้องไม่บรอดคาสท์เส้นทางในการไปโนด Z ไปให้โนด B หรือถ้าหากโนด D บรอดคาสท์เส้นทางนี้ให้โนด B ก็ย่อมไม่มีผลเพราะโนด B มีเส้นทางอื่นที่ไปยังโนด Z อยู่แล้วซึ่งต้องไม่ใช่ผ่านทางโนด D เนื่องจากโนด D เลือกผ่านโนด B อยู่ก่อนแล้ว ดังนั้นสรุปได้ว่าการไม่บรอดคาสท์เส้นทางที่เรียนรู้แล้วนี้กลับไปยังข่ายเชื่อมโยงเดิมนั้นไม่มีผลกระทบใด ๆ เกิดขึ้นใน

สภาวะปกติ แต่ถ้าหากบรอดคาสท์กลับไปแล้วโนดที่ให้ข้อมูลเส้นทาง (โนด B) เกิดเลือกเส้นทางที่โนดที่ได้รับการเรียนรู้เส้นทาง (โนด D) จากโนดนั้น แสดงว่าเกิดลูปขึ้นระหว่างโนดทั้งสองแน่นอน

ตัวอย่างโครงข่ายที่สามารถแก้ลูปได้

จากรูปด้านล่าง [5][7] เมื่อข่ายเชื่อมโยง ZB ขาด ตัวจับเวลาภายโนด B ก็จะเริ่มลดเวลาลงเมื่อโนด Z ขาดการติดต่อ 6 รอบ หรือ 180 วินาที (6*30) โนด B ก็จะเปลี่ยนค่าต้นทุนในการไปโนด Z ผ่านทางข่ายเชื่อมโยง ZB ให้เป็นค่าอนันต์ (ทางด้านตรงข้ามข่ายเชื่อมโยงคือโนด Z ก็เกิดเช่นเดียวกันพร้อม ๆ กัน) ถ้าโนด B ยังไม่ได้บรอดคาสท์ค่าต้นทุนนี้ออกไปก็ถึงลำดับการบรอดคาสท์ของโนด D ซึ่งแน่นอนโนด B ต้องเปลี่ยนเส้นทางมาเลือกโนด D แน่นอนเพราะมีค่าต้นทุนที่น้อยกว่าค่าอนันต์ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วเส้นทางนี้ไม่สามารถไปยังปลายทางได้ เพราะโนด D เลือกผ่านโนด B และโนด B ก็เลือกผ่านโนด D จึงทำให้เกิดลูปขึ้น

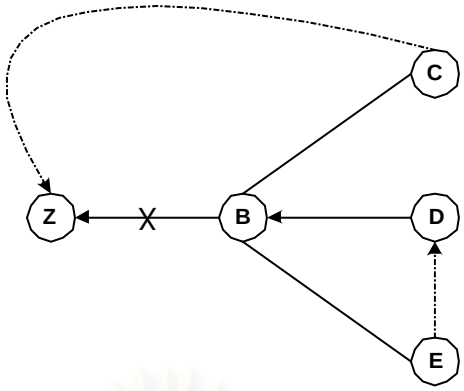


รูปที่ 4.2 : แสดงตัวอย่างโครงข่ายที่วิธีสปริตฮอไรซอนสามารถแก้ลูปได้

เมื่อใช้วิธีสปริตฮอไรซอน จากสภาวะปกติก่อนข่ายเชื่อมโยงขาดจะเห็นว่าโนด D เลือกผ่านโนด B ในการไปโนด Z แสดงว่าโนด D ได้รับการเรียนรู้เส้นทางในการไปโนด Z จากโนด B ดังนั้นโนด D จะต้องไม่บรอดคาสท์เส้นทางนี้ไปให้โนด B ทำให้ไม่เกิดเหตุการณ์ที่โนด B ถูกทับค่าต้นทุนที่เป็นค่าอนันต์ (ซึ่งเป็นค่าที่ถูกต้อง) จากโนด D จึงไม่เกิดลูปขึ้นในโครงข่ายประเภทนี้

ตัวอย่างโครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ลูปได้

จากรูปที่ 4.2 เพิ่มโนดเข้าไปได้ตามรูปที่ 4.3 โนด D ยังคงเป็นโนดที่ได้รับการเรียนรู้เส้นทางไปโนด Z จากโนด B อยู่ นั่นแสดงว่า โนด D ก็ยังคงไม่บรอดคาสท์เส้นทางไปโนด A ให้กับโนด B ดังนั้นก็ไม่เกิดลูประหว่างโนด B กับโนด D แต่มีโนด C และโนด E ที่ได้รับการเรียนรู้เส้นทางจากโนดอื่นที่ไม่ใช่โนด B ดังนั้นโนดทั้งสองสามารถบรอดคาสท์เส้นทางไปโนด A ไปให้โนด B ได้ทำให้เกิดการทับค่าต้นทุนอนันต์ของโนด B ขึ้น ถ้าโนด B เลือกผ่านทางโนด C ก็จะทำให้ได้เส้นทางอื่นที่มีอยู่จริงที่ไปยังโนด Z ได้ แต่ถ้าโนด B เลือกผ่านทางโนด E ก็จะทำให้เกิดลูปแบบ 3 โนดขึ้น คือ เกิดวนลูปในโนด BED และไม่สามารถหลุดลูปนี้ได้จนกว่าข่ายเชื่อมโยงทั้งสามจะมีค่าต้นทุนเพิ่มสูงขึ้นเป็นค่าอนันต์ (เมื่อโนดที่ติดข่ายเชื่อมโยงนั้นขาดการติดต่อกันนานครบ 180 วินาที) เส้นทางเหล่านั้นก็จะถูกตัดออกจากตารางการจัดเส้นทางของโนดทั้ง 3



รูปที่ 4.3 : แสดงตัวอย่างโครงข่ายที่วิธีสปริตฮอไรซอนไม่สามารถแก้ลูปได้

สรุปโครงข่ายที่สามารถแก้ลูปได้

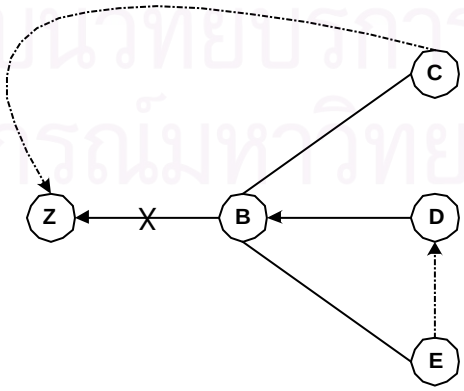
จากตัวอย่างทั้งสองจะเห็นว่าวิธีสปริตฮอไรซอนนี้ สามารถแก้ลูปได้เพียงลูปแบบ 2 โนด เท่านั้น กล่าวคือ สามารถป้องกันการเลือกเส้นทางที่ย้อนทิศของลูกศร

4.2วิธีสปริตฮอไรซอนแบบพอยซันรีเวอร์ส

หลักการทำงาน

วิธีสปริดตฮอไรซอนแบบพอยซันรีเวอร์สเป็นวิธีสปริตฮอไรซอนอีกแบบหนึ่งที่มีการแจ้งเส้นทางที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้นและตัดตอนการเกิดปัญหาการนับเข้าสู่อนันต์

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ของวิธีสปริตฮอไรซอนแบบพอยซันรีเวอร์สนี้ จะพบว่าเหมือนกับวิธีสปริตฮอไรซอนแทบทุกอย่างจะแตกต่างตรงที่ยอมให้บรอดคาสท์เส้นทางที่เรียนรู้จากข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง ๆ กลับไปได้ แต่กำหนดให้ค่าต้นทุนของเส้นทางนั้นเป็นค่าอนันต์ ซึ่งถึงแม้จะบรอดคาสท์กลับไปได้แต่เส้นทางที่ผ่านโนดนี้ก็ไม่ถูกเลือกเพราะค่าต้นทุนมากกว่าค่าเดิมอยู่แล้ว จึงให้ผลเหมือนกับวิธีสปริตฮอไรซอน ส่วนที่เพิ่มขึ้นมาอีกอย่างก็คือ ค่าต้นทุนที่เป็นอนันต์ถูกกำหนดให้เป็น 16 แทน [6][7][8][9][10] ดังแสดงในรูปด้านล่าง



รูปที่ 4.4 : แสดงการบรอดคาสท์เส้นทางด้วยวิธีสปริตฮอไรซอนแบบพอยซันรีเวอร์ส

สรุปโครงข่ายที่สามารถแก้ลูปได้

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้นว่า วิธีสปริตฮอไรซอนแบบพอยซันรีเวอร์สให้ผลลัพธ์ที่เหมือนกันกับวิธีสปริตฮอไรซอน ดังนั้นโครงข่ายที่สามารถแก้ลูปได้จึงเหมือนกันคือ สามารถแก้ลูปได้เพียงลูปแบบ 2 โนดเท่านั้น ซึ่งสามารถป้องกันการเลือกเส้นทางที่ย้อนทิศของลูกศร แต่จะตัดตอนในการเกิดปัญหาการนับเข้าสู่อนันต์ลงได้ ดังเช่นตัวอย่างที่สองของวิธีสปริตฮอไรซอน ที่ทำให้เกิดลูปแบบ 3 โนด คือ BED ในขั้นตอนนี้จะเกิดลูปวนไปเรื่อย ๆ จนกว่าค่าต้นทุนจะสูงมากจนทำให้ข่ายเชื่อมโยงขาดไปเองซึ่งใช้เวลานาน แต่สำหรับวิธีนี้เมื่อค่าต้นทุนมีค่าถึง 16 ก็ให้ถือว่าข่ายเชื่อมโยงนั้นขาดไปแล้วให้โนดที่ตรวจเจอกำจัดเส้นทางนี้ออกไปจากตารางการจัดเส้นทางของตน

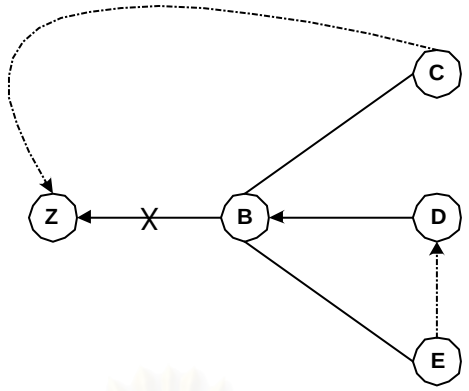
4.3 วิธีทริกเกอร์อัพเดตและโฮลด์ดาวน์

หลักการทำงาน

วิธีทริกเกอร์อัพเดต ใช้วิธีกำหนดให้เราเตอร์บรอดคาสท์เส้นทางออกไปทันที [6][7][8][9][10] (ในทางปฏิบัติจะรอ 1-5 วินาทีก่อน [9] จึงบรอดคาสท์ออกไป เพื่อลดความไวในการตรวจข่ายเชื่อมโยงขาดไม่ให้ไวจนเกินไป) ที่พบว่าตารางการจัดเส้นทางของตัวเองมีการเปลี่ยนแปลงรวมทั้งกรณีข่ายเชื่อมโยงขาด โดยไม่ต้องรอให้ครบรอบในการบรอดคาสท์ คือทุก ๆ 30 วินาที เพื่อทำให้ใช้เวลาในการลู่เข้าหรือกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วขึ้น หลังจากโนดทริกแล้วตัวจับเวลาปรับค่าจะให้นับเวลาต่อไปตามปกติและบรอดคาสท์ออกไปเมื่อถึงเวลา โดยจะไม่ถูกปรับค่าเป็นศูนย์ [7]

วิธีโฮลด์ดาวน์ ใช้การกำหนดช่วงเวลาที่ให้เราเตอร์ไม่รับการเปลี่ยนค่าต้นทุนในตารางการจัดเส้นทางของตัวเอง [6][7]

จากรูปด้านล่างเมื่อข่ายเชื่อมโยง BZ ขาด และโนด B ตรวจพบก็จะส่งค่าต้นทุนใหม่ในการไปยังโนด Z คือ ค่าอนันต์ให้กับโนดข้างเคียง แต่มีเพียงโนด D เท่านั้นที่รับการปรับค่าเพราะเป็นการอัพเดตค่าต้นทุนจากโนดที่เลือกผ่าน (ไม่ต้องเปรียบเทียบค่าต้นทุน) ส่วนโนด C และโนด E ไม่เลือกผ่านเส้นทางนี้เพราะมีค่าต้นทุนสูงกว่าค่าเดิมที่เลือกอยู่ เมื่อโนด D มีการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนในตารางการจัดเส้นทางก็จะต้องบรอดคาสท์เส้นทางในการไปโนด Z ต่อไปในทันทีเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนทุกโนดที่เลือกผ่านทางข่ายเชื่อมโยง BZ ปรับค่าต้นทุนเป็นค่าอนันต์จนหมดแล้วโนดเหล่านั้นก็จะหยุดส่งข้อมูลผ่านมาทางนี้



รูปที่ 4.5 : โครงข่ายตัวอย่างสำหรับการทำงานของวิธีทริกเกอร์อัพเดตและวิธีโฮลด์ดาวน์

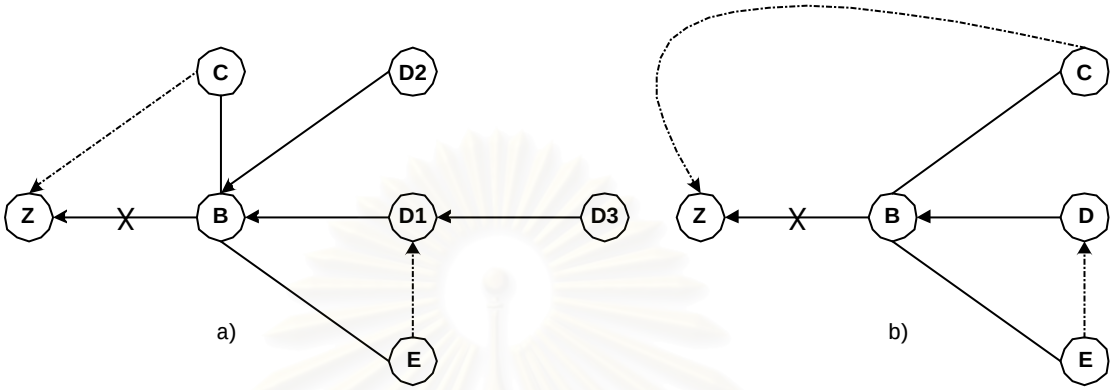
ถ้าระหว่างการบรอดคาสท์ค่าต้นทุนที่เป็นอนันต์มีโนดอื่นซึ่งเลือกผ่านข่ายเชื่อมโยง BZ แต่ยังไม่ได้รับการปรับค่าบรอดคาสท์มาทีหลัง เช่น โนด B บรอดคาสท์ค่าต้นทุนอนันต์ให้โนด D แต่โนด D ยังไม่ทันบรอดคาสท์โนด E ก็ถึงลำดับต้องบรอดคาสท์ก่อน ทำให้โนด B เปลี่ยนเส้นทางมาเลือกโนด E และมีค่าต้นทุนเปลี่ยนจากค่าอนันต์เป็นค่าอื่นที่น้อยกว่า แต่ก็เป็นเส้นทางที่ไม่สามารถไปยังโนด Z ได้จริงและทำให้เกิดลูปแบบ 3 โนด คือ BED ดังนั้นวิธีนี้จึงนำเอาวิธีโฮลด์ดาวน์มาเพื่อบังคับไม่ให้โนดที่ได้รับค่าต้นทุนอนันต์รับการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนในช่วงเวลาที่โฮลด์ เมื่อเลยช่วงเวลานี้จึงยอมให้รับการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนได้อย่างเดิม

ตัวอย่างโครงข่ายที่สามารถแก้ลูปได้และแก้ไม่ได้

สำหรับการใช้วิธีทริกเกอร์อัพเดตเพียงอย่างเดียวโครงข่ายที่สามารถแก้ลูปได้จะเป็นโครงข่ายมีขนาดเล็ก ดังตัวอย่างในรูปด้านล่าง ส่วนจะเป็นโครงข่ายใดได้บ้างนั้นต้องพิจารณาเป็นราย ๆ ไป เพราะมีปัจจัยในเรื่องของลำดับการบรอดคาสท์ของโนดอื่น ๆ , ลักษณะโทโพโลยีของโครงข่าย และตำแหน่งที่ข่ายเชื่อมโยงขาดมาเกี่ยวข้องด้วย กล่าวคือ ปัจจัยดังกล่าวจะมีผลให้เกิดการทับค่าต้นทุนอนันต์ที่อาจจะเป็นเส้นทางที่ทำให้เกิดลูปหรือไม่เกิดลูปหรือหลุดลูปขึ้นก็ได้ แต่เมื่อไหร่ที่เกิดการทับของเส้นทางที่ไม่สามารถไปได้จริงแล้วไม่ถูกทำให้ถูกต้องนั่นก็หมายความว่า จะต้องเกิดลูปอย่างแน่นอน

ถึงแม้จะไม่สามารถบอกลักษณะโครงข่ายที่สามารถแก้ปัญหาลูปได้โดยตรง แต่ก็สามารถคาดคะเนได้ว่าโครงข่ายลักษณะหนึ่ง ๆ มีโอกาสเกิดลูปได้มากที่โนดไหน โดยพิจารณาจากจำนวนโนดที่ติดกับโนด B (โนดที่ข่ายเชื่อมโยงขาด) และเลือกผ่านโนด B ด้วย มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าจำนวนโนดที่ติดกับโนด B แต่ไม่เลือกผ่านโนด B จากรูปที่ 4.6 a) จะเห็นว่า จำนวนโนดที่ติดกับโนด B และเลือกผ่านโนด B โดยตรง เท่ากับ 3 โนด และจำนวนโนดที่ติดกับโนด B และไม่เลือกผ่านโนด B โดยตรง เท่ากับ 2 โนด ผลการเปรียบเทียบออกมามากกว่า (3 มากกว่า 2) แสดงว่าโอกาสที่โนด B จะถูกโนดที่มีเส้นทางที่ไม่สามารถไปยังโนด Z ได้จริงทับได้มากกว่าหรือก็คือเกิดลูป แต่ถ้าผลออกมาน้อยกว่ายังสรุปไม่ได้ กล่าวคือ ถ้าโนด C บรอดคาสท์ไปทับค่าต้นทุนอนันต์

ของโนด B แล้วไม่ถูกโนดอื่นทับกลับ ก็จะทำให้ไม่เกิดลูป แต่ถ้าโนด E ไปทับค่าต้นทุนอนันต์ของโนด B แล้วไม่ถูกโนดอื่นทับกลับจะเกิดลูปได้ เพราะเส้นทางที่ไปทับไม่มีอยู่จริง ดังนั้นจะสังเกตเห็นว่า โนดที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดลูป คือ โนดที่ถูกโนดอื่นเลือกผ่านมากที่สุด ดังนั้นโครงข่ายที่มีโอกาสแก้ลูปได้จึงเป็นโครงข่ายที่มีโนดทีมีความเสี่ยงที่จะเกิดลูปได้น้อยที่สุด



รูปที่ 4.6 : แสดงตัวอย่างโครงข่ายที่ใช้วิเคราะห์ a) โครงข่ายตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์หาโอกาสในการเกิดลูป b) โครงข่ายตัวอย่างที่สามารถแก้ลูปได้ด้วยวิธีทริกเกอร์อัพเดตร่วมกับวิธีโฮลด์ดาวน์

ในกรณีที่ใช้วิธีโฮลด์ดาวน์ร่วมด้วย จากตัวอย่างในรูปที่ 6 b) จะเห็นว่าเมื่อโนด B บรอดคาสท์ออกไปโนด D ก็รับการอัพเดตค่าอนันต์ไปแต่โนด E ไม่รับ ถ้าโนด D ยังไม่ทันบรอดคาสท์แต่ก็ถูกโนด E บรอดคาสท์ทับค่าต้นทุนโนด D เสียก่อน ซึ่งเกิดขึ้นได้แม้ว่าทริกเกอร์อัพเดตจะบังคับให้โนดถัดไปที่ถูกเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนให้บรอดคาสท์ต่อในทันที แต่ก็ไม่ได้บังคับให้โนดอื่นไม่ให้บรอดคาสท์ทับได้อย่างแท้จริง เมื่อถึงลำดับที่โนดอื่นต้องบรอดคาสท์ (ทุก 30 วินาที) ก็ต้องบรอดคาสท์ออกไป ทำให้เกิดลูปขึ้นอย่างที่แสดงในตัวอย่าง

สรุปโครงข่ายที่สามารถแก้ลูปได้

ถ้าเป็นการใช้วิธีทริกเกอร์อัพเดตเพียงอย่างเดียวจะเห็นว่าการกระจายค่าต้นทุนอนันต์ออกไปยิ่งทำให้โอกาสเกิดลูปได้มากขึ้น เนื่องจากเกิดการทับค่าต้นทุนอนันต์มากขึ้น ไม่ว่าเส้นทางที่ไปทับนั้นจะทำให้หลุดลูปหรือเกิดลูปหรือไม่ ก็จะทำให้ค่าต้นทุนของทั้งระบบผิดไปหมด ดังนั้นกรณีนี้จึงสามารถใช้แก้ลูปได้เฉพาะกับโครงข่ายที่มีขนาดเล็ก ๆ และไม่เกิดการทับค่าต้นทุนอนันต์ ส่วนกรณีใช้ร่วมกับวิธีโฮลด์ดาวน์จะไม่สามารถแก้ลูปได้ ถ้าเวลาที่ใช้ในการโฮลด์ไม่มากพอที่โนดที่เลือกผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ขาดจะได้รับค่าต้นทุนอนันต์นี้จนครบ

4.4วิธี HIPR

หลักการทำงาน

วิธี HIPR (Hierachical Information Path-based Routing) [15] มีจุดประสงค์เพื่อหาเส้นทางอื่นที่โนดที่อยู่ปลายทางด้านหนึ่งของข่ายเชื่อมโยงที่ขาดที่จะไปยังโนดปลายทางอีกด้าน ไม่ใช่เป็นวิธีหาเส้นทางอื่นที่ของโนดต้นทางที่เลือกผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ขาดเพื่อไปยังโนดปลายทางทุก ๆ โนด ดังนั้นวิธีนี้จึงมุ่งเน้นพิจารณาที่โนดที่อยู่ปลายข่ายเชื่อมโยงทั้งสองด้านในการวิเคราะห์เป็นหลัก

เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดโนดปลายข่ายเชื่อมโยงจะแจ้งไปยังโนดที่ติดอยู่กับตัวเองว่าเส้นทางที่ไปโนดปลายทางผ่านโนดตัวเองตอนนี้ไปไม่ได้แล้ว (แต่โนดที่รับค่าต้นทุนอนันต์นี้จะยังไม่ถูกเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนเป็นค่าอนันต์) เพื่อให้โนดนั้นหาเส้นทางอื่นที่จะไปยังโนดปลายทาง โดยมีหลักการเลือกเส้นทาง คือ โนดที่มีหมายเลขลำดับชั้นที่น้อยกว่าไม่สามารถเลือกผ่านโนดที่มีหมายเลขลำดับชั้นที่มากกว่าได้ ถ้าได้เส้นทางหลายเส้นทางที่เป็นไปตามหลักการดังกล่าวให้เลือกค่าที่ให้ค่าต้นทุนที่น้อยที่สุด หลังจากนั้นก็ให้แจ้งเส้นทางที่ได้กลับมายังโนดปลายทางข่ายเชื่อมโยงที่ขาดนั้น พร้อมกับเปลี่ยนค่าต้นทุนของตัวเองเป็นค่าใหม่ของเส้นทางที่เลือกใหม่ (ในขั้นนี้โนดที่ติดกับข่ายเชื่อมโยงที่ขาดนี้อาจมีมากกว่า 1 โนด ดังนั้นต้องเลือกเอาเส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนที่น้อยที่สุด) ถ้าหากว่าไม่มีเส้นทางที่เป็นไปตามหลักการดังกล่าว โนดนั้นก็จะต้องรับค่าต้นทุนอนันต์แล้วบรอดคาสท์แจ้งโนดถัดไปต่อไปจนได้เส้นทางอื่นที่สามารถไปยังโนดปลายข่ายเชื่อมโยงที่ขาดอีกด้าน ถ้าไม่มีสุดท้ายผลก็จะทำให้โนดที่เลือกผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ขาดก็จะกลายเป็นค่าอนันต์จนหมดแล้วก็จะหยุดส่งข้อมูลมาทางเส้นทางนี้ จนกว่าข่ายเชื่อมโยงจะกลับมาใช้ได้อีกครั้ง

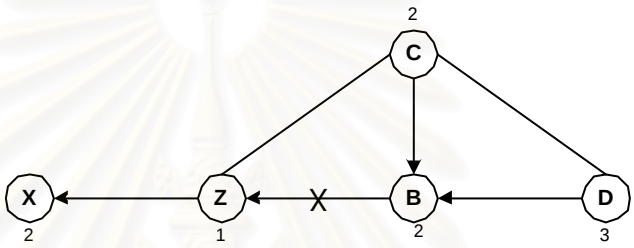
หมายเหตุ

1. หมายเลขลำดับชั้นจะถูกเก็บเพิ่มขึ้นในตารางการจัดเส้นทางในแต่ละโนดปลายทาง
2. หลักการเลือกเส้นทางที่ว่า โนดที่มีหมายเลขลำดับชั้นที่น้อยกว่าไม่สามารถเลือกผ่านโนดที่มีหมายเลขลำดับชั้นที่มากกว่าได้ จะถูกยกเว้นไม่ถูกนำมาพิจารณาในกรณีที่โนดที่ตัดสินใจเลือกเส้นทางมีค่าต้นทุนอนันต์ เพราะว่าโนดที่มีหมายเลขลำดับที่สูงหรือต่ำกว่าก็สามารถให้เส้นทางที่สามารถไปยังปลายทางได้ และจะไม่เกิดลูปเพราะเส้นทางที่นำมาให้โนดนี้เลือกถูกป้องกันการเกิดลูปด้วยหลักการนี้มาแล้ว

ตัวอย่างโครงข่ายที่สามารถแก้ลูปได้

จากรูปที่ 4.7 [6][7][8][9] พิจารณาโนดปลายทางเป็นโนด Z เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดโนดปลายด้านหนึ่งของข่ายเชื่อมโยงที่ขาด สมมุติพิจารณาที่โนด Z จะบรอดคาสท์ค่าต้นทุนอนันต์ออกไป แต่โนด D และโนด A จะยังไม่เปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนของตัวเองเพียงแต่รู้ว่าตัวเองจะต้องหาเส้นทางอื่นที่จะไปยังโนด Z เพราะตัวเองเลือกผ่านโนด B ในการหาเส้นทางอื่นที่จะไปจะทำได้โดย

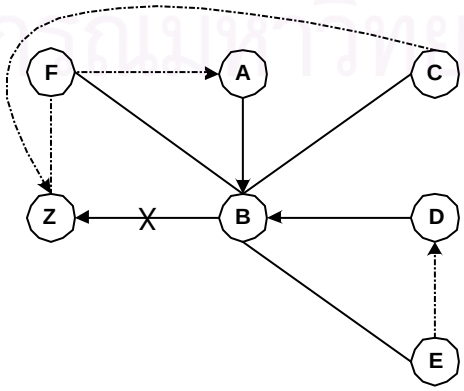
เลือกจากโนดที่ติดกันโนดอื่น โดยมีข้อแม้ว่าโนดที่เลือกจะต้องมีหมายเลขลำดับชั้นที่น้อยกว่า และถ้ามีหลายโนดก็ให้ดูต่อว่าโนดไหนให้ค่าต้นทุนที่น้อยกว่าก็เลือกเอาโนดนั้น ในที่นี้โนด C เลือกผ่านได้เพียงโนด Z เพราะโนด D มีหมายเลขลำดับชั้นที่สูงกว่าจึงไม่เลือก ส่วนโนด D เลือกผ่านได้เพียงโนด C หลังจากนั้นโนดทั้งสองจะเปลี่ยนค่าต้นทุนของเส้นทางที่จะไปโนด Z เป็นค่าตามเส้นทางที่ตนเลือกพร้อมกับแจ้งเส้นทางที่ตนเลือกกลับมาให้โนด B เลือก ซึ่งจะเห็นว่าเส้นทางที่มีค่าต้นทุนที่น้อยกว่าคือ เส้นทางจากโนด C เพราะเส้นทางของโนด D วิ่งผ่านโนด C อีกที โนด B จึงเลือกผ่านโนด C พร้อมกับเปลี่ยนค่าต้นทุนตัวเอง ส่วนที่โนด D ซึ่งวิ่งผ่านโนด C จะให้เส้นทางที่มีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดหรือไม่นั้น จะถูกเปรียบเทียบเอง เมื่อถึงรอบของโนดข้างเคียงรวมทั้งโนด B ด้วยบรอดคาสท์มาเปรียบเทียบตามปกติ



รูปที่ 4.7 : แสดงตัวอย่างโครงข่ายที่สามารถแก้ปัญหาลูปด้วยวิธี HIPR

ตัวอย่างโครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ลูปได้

ขอนำชุดโนดตัวแทนในบทที่ 3 มาใช้อธิบาย จากรูปที่ 4.8 พิจารณาโนด Z เป็นโนดปลายทาง สังเกตว่าเมื่อโนด B แจ้งให้โนด A และโนด D หาเส้นทางอื่นในการไปโนด Z พิจารณาที่โนด A ก่อนจะเกิดลูปได้เมื่อโนด A เลือกโนดที่จะทำให้เกิดการวนลูปกลับมาคือโนด F ซึ่งจะเกิดเมื่อโนด F มีหมายเลขลำดับชั้นที่น้อยกว่าโนด A ซึ่งมีหมายเลขลำดับชั้นเป็น 3 ดังนั้นโนด F จะต้องมีหมายเลขลำดับชั้นเป็น 2 ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ถ้าระหว่างโนด F กับโนด Z ไม่มีโนดอยู่ระหว่างกลาง ดังนั้นจะเกิดลูปขึ้นบนข่ายเชื่อมโยง FA ส่วนที่โนด D ไม่สามารถทำให้เกิดลูปได้เนื่องจากโนด E (ซึ่งเทียบได้กับโนด F) ไม่มีทางมีหมายเลขลำดับชั้นที่น้อยกว่า 3 ได้ เพราะไม่ได้ต่อกับโนด Z โดยตรง



รูปที่ 4.8 : แสดงตัวอย่างโครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ปัญหาลูปได้ด้วยวิธี HIPR

สรุปโครงข่ายที่สามารถแก้ลูปได้

พิจารณาชุดโนดตัวแทนในรูปที่ 8 จากที่กล่าวไปแล้วว่าลูปสามารถเกิดขึ้นได้ ถ้าโนดประเภทโนด A ไปเลือกโนดที่อยู่ติดกับโนด Z ที่ทำให้เกิดลูปอย่างโนด F ซึ่งในตัวอย่างในรูปที่ 4.8 เกิดลูปประเภทลูปสั้นแต่ถ้าหากเรายกลูปประเภทลูปยาวมาวางที่โนด F ก็จะทำให้ไม่สามารถแก้ลูปประเภทลูปยาวได้เช่นกัน ดังนั้นโครงที่สามารถแก้ลูปได้จะต้องเป็นโครงข่ายที่ไม่อยู่ในลักษณะดังกล่าว คือ โนดที่ติดกับโนดที่ตรวจเจอข่ายเชื่อมโยงขาด (โนด B) ที่เป็นโนดประเภทโนด A จะต้องไม่มีโนดที่อยู่ถัดไปอยู่ติดกับโนด Z หรือถ้ามีโนดนั้นจะต้องไม่ก่อให้เกิดลูปขึ้น ดังนั้นต้องพิจารณาโครงข่ายเป็นราย ๆ ไป

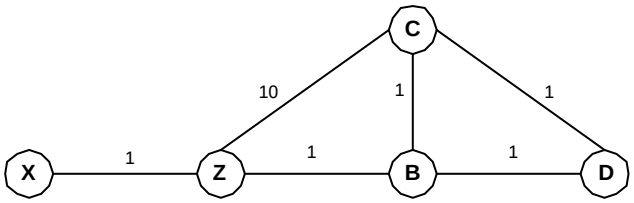
4.5วิธีเก็บตารางระยะทางแทนตารางการจัดเส้นทาง

หลักการทำงาน

ตารางการจัดเส้นทางในการไปยังโนดปลายทางจะเก็บเป็นตารางระยะทาง คือ ที่โนดปลายทางหนึ่ง ๆ จะเก็บเส้นทางที่สั้นที่สุดของทุกโนดที่ติดกับโนดต้นทาง เมื่อต้องเลือกเส้นทางที่จะไปยังโนดปลายทางดังกล่าวจึงเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดจากเส้นทางที่เก็บไว้เหล่านั้นมา [5] นอกนั้นจะเหมือนกับกระบวนการเลือกเส้นทางตามปกติ

ในรูปที่ 4.9 แสดงความแตกต่างของเส้นทางที่เก็บในตารางระยะทางและที่เก็บในตารางการจัดเส้นทาง ตัวอย่างเช่นที่โนดปลายทางคือโนด C ตารางระยะทางจะเก็บเส้นทางที่สั้นที่สุดที่โนด B สามารถไปได้โดยผ่านโนดข้างเคียงแต่ละโนด คือ โนด C, โนด D และโนด Z ส่วนตารางการจัดเส้นทางจะเก็บเส้นทางที่สั้นที่สุดที่โนด B สามารถไปได้เพียงเส้นทางเดียวซึ่งเส้นทางที่น้อยที่สุดนั้นก็คือ เส้นทางที่เลือกผ่านโนด C เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Dest. node	Next hop	Cost
C	C	1
D	D	1
X	Z	2
Z	Z	1

a)

Dest. node	Next hop	Cost
C	C	1
C	D	2
C	Z	3
D	C	2
D	D	1
D	Z	3
X	C	4
X	D	4
X	Z	2
Z	C	3
Z	D	3
Z	Z	1

b)

รูปที่ 4.9 : แสดงตัวอย่างตารางการจัดเส้นทางตามปกติและตารางระยะทางของวิธีเก็บตารางระยะทางที่โนด B a)ตารางการจัดเส้นทางตามปกติ b)ตารางระยะทางของวิธีเก็บตารางระยะทาง

สรุปโครงข่ายที่สามารถแก้ลูปได้

วิธีนี้สามารถแก้ลูปกรณีทั่วไปได้ แต่ก็เพิ่มโอกาสในการเกิดลูปประเภทลูปสั้นขึ้น กล่าวคือ จากรูปที่ 4.9 พิจารณาโนดปลายทางโนด C เมื่อโนดหนึ่ง เช่น โนด B ถูกเลือกผ่านโดยอีกโนดหนึ่ง เช่นโนด Z ในการไปยังโนดปลายทางโนดหนึ่ง เช่นโนด C แล้วโนด B บรอดคาสท์เส้นทางไปที่โนด Z เพื่อถามหาเส้นทางที่โนด Z จะไปยังโนด C แต่ไม่รู้ว่าเส้นทางดังกล่าวเป็นเส้นทางที่ผ่านโนดตัวเองอยู่ ทำให้เกิดลูปขึ้น (แสดงด้วยตัวเลขค่าต้นทุนที่มีสีเข้มและมีเส้นใต้) ซึ่งถ้าเป็นวิธีปกติก็เกิดเหตุการณ์นี้ได้ ถ้าโนดข้างเคียงนั้นของโนดหนึ่งเลือกผ่านโนดนั้นก็จะเกิดลูปได้ แต่วิธีนี้โนดข้างเคียงที่พิจารณาไม่ใช่โนดเดียวตามปกติ แต่เป็นทุกโนดจึงทำให้โอกาสเกิดลูปประเภทลูปสั้นเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นในการนำไปใช้จริงจึงต้องนำไปใช้กับวิธีแก้ลูปแบบวิธีอื่นร่วมด้วยเพื่อให้เส้นทางที่เก็บในตารางระยะทางเป็นเส้นทางที่ไม่เกิดลูปขึ้นตั้งแต่ต้น แล้วเมื่อเกิดข่ายเชื่อมโยงขาดวิธีนี้จะป้องกันไม่ให้เกิดลูปซ้ำขึ้นอีกและช่วยให้เวลาในการลู่เข้าเร็วขึ้นมาก

4.6 วิธีส่งเมสเสจทดสอบ

หลักการทำงาน

เมื่อเกิดการเปรียบเทียบค่าต้นทุนกันเพื่อเลือกเส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนที่น้อยที่สุด ทุกครั้งก่อนที่จะมีการทับค่าต้นทุนเพื่อเปลี่ยนเส้นทาง คือ ได้เปรียบเทียบค่าต้นทุนแล้วว่าน้อยกว่าเส้นทางเดิมที่เลือกอยู่ (ไม่นับกรณีเป็นการอัพเดตค่าต้นทุนจากโนดอื่น) ให้มีการส่งเมสเสจพิเศษออกไปทันที โดยภายในเก็บหมายเลขตำแหน่งของโนดต้นทางและโนดปลายทาง,หมายเลขที่ใช้ระบุว่าเส้นทางที่ส่งเมสเสจนี้ไปถึงปลายทางหรือไม่ และตัวนับจำนวนโนดที่เมสเสจผ่าน แล้วพิจารณาเมสเสจที่ส่งออกไป ดังต่อไปนี้

1. ถ้าเมสเสจถูกส่งกลับมาโนดเริ่มต้นโดยที่ยังไปไม่ถึงโนดปลายทางแสดงว่าเส้นทางนี้เกิดลูปขึ้น ดังนั้นเส้นทางใหม่ที่เปรียบเทียบนี้ไม่ควรเลือกผ่าน
2. ถ้าเมสเสจส่งไปถึงโนดปลายทางก็ให้ส่งเมสเสจนี้กลับมาบอกโนดต้นทางว่า เส้นทางนี้ไม่เกิดลูป ดังนั้นให้เลือกเส้นทางที่นำมาเปรียบเทียบนี้ได้
3. ถ้าเมสเสจถูกส่งไปแล้วไม่กลับมายังโนดต้นทางแสดงว่าเกิดลูปขึ้น และเพื่อระบุให้โนดต้นทางรู้ว่าเมสเสจที่ส่งไปไม่กลับมายังโนดต้นทางแน่ เมสเสจจึงต้องมีตัวนับจำนวนโนดที่เมสเสจผ่าน ถ้าเมสเสจวิ่งผ่านโนดมากกว่าค่าสูงสุดที่ตั้งไว้ก็ให้ถือว่าเกิดลูปขึ้นในเส้นทางนี้ แล้วให้ส่งเมสเสจนี้ย้อนกลับไปแจ้งโนดต้นทาง เพื่อตัดสินใจไม่เลือกผ่านเส้นทางนี้

ในการกำหนดค่าจำนวนโนดสูงสุดที่เมสเสจจะวิ่งผ่านให้กับโพรโทคอล RIP ค่าที่เหมาะสมควรไม่เกิน 16 เนื่องจากโดยปกติโพรโทคอล RIP กำหนดให้ค่าต้นทุนอนันต์มีค่าเป็น “16” ดังนั้นจำนวนโนดในโครงข่ายที่วิเคราะห์จึงต้องมีอย่างมากไม่เกิน 16 โนด คือ ทุกข่ายเชื่อมโยงมีค่าต้นทุนเท่ากับ 1 ไม่เช่นนั้นจะทำให้โนดหรือเราเตอร์เข้าใจผิดว่าข่ายเชื่อมโยงบนเส้นทางในการไปยังโนดที่อยู่ห่างออกไปมากกว่า 15 โนดขาดไม่สามารถไปได้ ดังนั้นค่าจำนวนโนดสูงสุดที่ใช้สำหรับโพรโทคอล RIP คือ 16 แต่เนื่องจากถ้าเราให้เป็น 16 อาจจะทำให้เมื่อเกิดลูปขนาดเล็ก ๆ ขึ้นจะต้องวนลูปจนถึง 16 โนดก่อนจึงแจ้งกับไปว่าเส้นทางนี้ไปไม่ได้ แต่ก็ไม่เสียเวลามากเนื่องจากเมสเสจถูกส่งออกไปในทันทีทุกครั้งที่ผ่านโนดหนึ่ง ๆ ไม่ต้องรอให้ถึง 30 วินาทีค่อยส่งอย่างการอัพเดตตารางการจัดเส้นทาง ทำให้ไม่เกิดความเสียหายใด ๆ ที่ต้องรอ

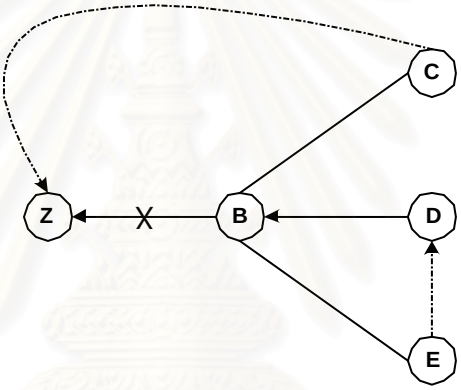
สำหรับเมสเสจทดสอบที่ส่งออกไปเราสามารถแน่ใจได้ว่าจะไม่ไปวนอยู่ในลูปที่เกิดขึ้นในโครงข่าย เพราะเมื่อเมสเสจรู้ว่าเส้นทางนี้เกิดลูปขึ้นแน่ ก็จะถูกส่งกลับไปยังโนดต้นทางซึ่งเป็นโนดปลายทางคนละตัวกับตัวเก่าจึงเป็นเส้นทางคนละเส้นทางกับที่ตรวจเจอลูป และแน่ใจได้ว่าเส้นทางขากลับนี้ก็ไม่เกิดลูปเช่นกัน เพราะเส้นทางนี้ก็ใช้วิธีส่งเมสเสจทดสอบออกไปตรวจสอบเส้น

ทางว่าเกิดลูปหรือไม่ก่อนที่จะมีการเปลี่ยนไปเลือกเส้นทางอื่นเช่นกัน และในระหว่างที่ส่งเมสเสจทดสอบออกไปนี้ก็ยังคงสามารถส่งข้อมูลได้โดยใช้เส้นทางเดิมที่ใช้อยู่ก่อนได้

วิธีเสริมของวิธีการส่งเมสเสจทดสอบ

เนื่องจากที่กล่าวไปแล้วว่าเมื่อเกิดลูปขึ้นเรายอมให้เมสเสจไปวนอยู่ในลูปได้นานถึง 16 โนดก่อนค่อยแจ้งว่าเส้นทางนี้เกิดลูปกลับมาบอกโนดต้นทาง ถ้าหากว่าเวลาที่ใช้ในการส่งเมสเสจระหว่างโนดที่เกิดในลูปใช้เวลานาน ดังนั้นเวลารวมที่เมสเสจจะต้องวนลูปก็จะต้องใช้เวลานานด้วย ดังนั้นปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ให้เมสเสจเก็บโนดที่เมสเสจผ่านมาทั้งหมด ถ้าหากเมสเสจวิ่งผ่านโนดเดิมที่เคยเก็บอยู่ก็ให้แจ้งว่าเกิดลูปกลับไปได้เลย แต่จะทำให้เมสเสจมีขนาดใหญ่ขึ้นตามขนาดลูปที่เกิดขึ้น (เนื่องจากเราได้กำหนดค่าจำนวนโนดสูงสุดดังที่กล่าวไปแล้ว ดังนั้นขนาดเมสเสจจะมีค่าไม่เกิน 16)

ตัวอย่างโครงข่ายที่สามารถแก้ลูปได้และแก้ไม่ได้



รูปที่ 4.10 : แสดงตัวอย่างโครงข่ายที่สามารถแก้ปัญหาลูปได้ด้วยวิธีส่งเมสเสจทดสอบ

จากรูปที่ 4.10 หลังข่ายเชื่อมโยงขาด พิจารณาที่โนดที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น คือ โนด B ซึ่งถ้าโนด B บรอดคาสท์ออกไปจะมีโนด D เท่านั้นที่รับค่าต้นทุนอนันต์ ซึ่งเป็นการอัพเดตปรับค่าต้นทุนของเส้นทางเดิมที่เลือก ดังนั้นเมสเสจททดสอบจึงไม่ถูกส่งออกไป แต่ถ้าโนด B ซึ่งมีค่าต้นทุนเป็นอนันต์นี้ ถูกโนดอื่นบรอดคาสท์มาทับค่าต้นทุนอนันต์ของมันเอง เมสเสจทดสอบที่โนด B ก็จะถูกส่งออกไปทดสอบเส้นทางก่อนที่จะยอมให้ถูกทับค่าต้นทุนเพื่อเปลี่ยนเส้นทาง

ในกรณีโนดที่บรอดคาสท์มาทับเป็นโนด C เมสเสจทดสอบจากโนด B จะถูกส่งไปให้โนด C แล้วโนด C ก็ส่งต่อไปยังโนดถัดไป คือโนด Z ซึ่งเป็นโนดปลายทาง เมสเสจทดสอบก็จะถูกโนด Z บันทึกระบุว่าเส้นทางที่เมสเสจวิ่งมานี้ใช้ได้ไม่เกิดลูป แล้วส่งเมสเสจแจ้งกลับไป

ในกรณีโนดที่บรอดคาสท์มาทับเป็นโนด D เมสเสจทดสอบถูกส่งไปให้โนด D เมื่อโนด D ได้รับก็จะส่งต่อให้โนดถัดไป คือ โนด B ตามตารางการจัดเส้นทางของตน เมื่อเมสเสจทดสอบถูกส่งกลับมาโนดต้นทางคือ โนด B เมสเสจทดสอบจะรู้ได้ทันทีว่าเกิดลูป เพราะหมายเลขโนดต้นทาง

ที่เก็บในเมสเสจทดสอบตรงกับหมายเลขโนด ซึ่งเมสเสจทดสอบวิ่งผ่าน ดังนั้นเมสเสจก็จะแจ้งให้โนด B รู้ว่าเส้นทางนี้ใช้ไม่ได้

ในกรณีโนดที่บรอดคาสท์มาทับเป็นโนด E เมสเสจทดสอบถูกส่งต่อเป็นทอด ๆ เช่นเดียวกันกับกรณีโนด D บรอดคาสท์มาทับโนด B เมื่อเมสเสจทดสอบส่งมาถึงโนด B ก็รู้ทันทีเกิดลูปเมสเสจก็จะแจ้งให้โนด B รู้ และไม่ให้เลือกผ่านเส้นทางนี้

สำหรับโครงข่ายตัวอย่างที่ไม่สามารถแก้ลูปได้ เท่าที่ได้ลองทดสอบกับลูปประเภทลูปสั้น ลูปประเภทลูปยาว และลูปตัวอย่างอื่น ๆ ที่ใช้ทดสอบกับวิธีอื่น ๆ พบว่ายังไม่มีลูปใดในโครงข่ายที่สนใจดังกล่าวที่ไม่สามารถแก้ได้

สรุปโครงข่ายที่สามารถแก้ลูปได้

วิธีส่งเมสเสจทดสอบนี้สามารถแก้ปัญหาลูปทั่วไปและลูปที่ผู้วิจัยในด้านนี้สนใจได้ ไม่ว่าจะเป็นลูปประเภทลูปสั้น และลูปประเภทลูปยาว เพราะได้ทดสอบเส้นทางก่อนที่จะเลือกเส้นทางนั้นก่อน และสามารถยืนยันได้ว่าเมสเสจที่ส่งออกไปสามารถกลับมาแจ้งผลการทดสอบได้ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในตอนต้น ขณะที่ไม่ทำให้ลูปอื่นเกิดเพิ่มขึ้นในระบบอีกด้วย

4.7 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธีแก้ปัญหาลูปแต่ละวิธี

วิธีสปริตฮอไรซอน

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากไม่ซับซ้อนง่ายแก่การแก้ไขกระบวนการเลือกเส้นทางของโพรโทคอล RIP ในเราเตอร์

1. เป็นวิธีที่สามารถแก้ลูปประเภทลูปสั้นได้ (shorted-live loop) แต่ไม่สามารถแก้ลูปประเภทลูปยาว (long-live loop) เนื่องจากวิธีนี้ป้องกันการบรอดคาสท์ย้อนกลับไปทับค่าต้นทุนอนันต์เฉพาะ “โนดที่อยู่ติดกับโนด B (โนดที่ตรวจพบข่ายเชื่อมโยงขาด) และเลือกผ่านโนด B”
2. เส้นทางอื่นที่เลือกเมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดเป็นเส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนที่ต่ำที่สุด

วิธีสปริตฮอไรซอนแบบพอยซันรีเวอร์ส

วิธีนี้จะเหมือนกับวิธีสปริตฮอไรซอนเลยเพียงแต่มีข้อดีที่เพิ่มขึ้นมาคือช่วยลดเวลาการวนลูปลง ด้วยการกำหนดให้ค่าต้นทุนอนันต์เท่ากับ 16

วิธีทริกเกอร์อัพเดตและโฮลด์ดาวน์

1. เวลาในการโฮลด์ต้องเหมาะสม ถ้าเวลาที่โฮลด์นานไปก็จะทำให้เวลาในการลู่เข้าเพิ่มขึ้นด้วยและเมื่อข่ายเชื่อมโยงกลับมาใช้ได้อีกครั้งจะทำให้ไม่สามารถแจ้งค่าต้นทุนใหม่ซึ่งถูกต้องนี้ได้ อันเป็นผลให้ต้องใช้เวลาลู่เข้านานกว่าที่ควรจะเป็น และถ้าเวลาโฮลด์น้อยไปก็จะทำให้เกิดลูปขึ้นได้เพราะไม่สามารถบร็อกการบรอดคาสท์ค่าต้นทุนมาทับได้

2. ไม่เหมาะกับโครงข่ายที่เกิดความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงและเราเตอร์บ่อยครั้งและแต่ละครั้งใช้เวลาแก้ให้กลับมาใช้งานได้อีกครั้งไม่นานนัก เช่น เราเตอร์เก่าและเสื่อมสภาพแล้ว
3. ไม่เหมาะกับโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ เพราะมีโอกาสแก้ลูปไม่ได้อย่างมากถ้ามีโนดในบริเวณที่ข่ายเชื่อมโยงขาดอยู่จำนวนมาก ทำให้มีโนดที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดลูป (ดังที่อธิบายในรายละเอียดของวิธีนี้ด้านบน) มากขึ้นตามไปด้วย

วิธีเก็บตารางระยะทาง

1. เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดสามารถเลือกเส้นทางอื่นที่จะไปได้ในทันที โดยไม่ต้องรอการบรอดคาสท์เส้นทางอื่นจากโนดข้างเคียง ทำให้แก้ปัญหาลูปจากการทับค่าต้นทุนอนันต์ และการกระจายค่าต้นทุนอนันต์ออกไป ซึ่งทำให้เพิ่มโอกาสในการเกิดลูปขึ้น
2. ในการอัพเดตเส้นทางเพื่อปรับค่าในตารางการจัดเส้นทางจะเกิดขึ้นบ่อยมาก กล่าวคือ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งทุกโนดจะต้องได้รับการเปลี่ยนแปลงนี้ด้วยไม่เฉพาะโนดที่เลือกผ่านข่ายเชื่อมโยงนั้น เพื่อการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่ถูกต้อง แต่เป็นการลำบากที่จะทำให้ทุกโนดรู้ในทันทีเมื่อโครงข่ายมีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดค่าต้นทุนเก่ากับค่าต้นทุนใหม่ขึ้น อันเป็นเหตุการณ์ค่าต้นทุนรวมของเส้นทางผิดไป ยิ่งค่าต้นทุนที่ผิดถูกกระจายออกไปด้วยการบรอดคาสท์ก็ส่งผลทำให้ระบบเกิดการเลือกเส้นทางที่ผิดทั้งระบบ
3. เหมาะใช้กับโครงข่ายที่มีขนาดเล็ก เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนถูกส่งถึงทุกโนดในทันทีก่อนมีการบรอดคาสท์ค่าต้นทุนเก่าออกไป
4. ตารางการจัดเส้นทางมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากต้องเก็บเส้นทางที่ไปได้โดยโนดข้างเคียงทุกโนด
5. เส้นทางอื่นที่เลือกเมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดไม่ใช่เส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนที่ต่ำที่สุด ซึ่งผิดจุดประสงค์หลักในการหาเส้นทางที่ทราฟฟิกน้อยที่สุดในการจัดเส้นทาง
6. เกิดลูปประเภทลูปสั้นเพิ่มขึ้นได้มาก จึงต้องใช้ร่วมกับวิธีแก้ลูปประเภทลูปสั้นด้วยจึงไม่เกิดปัญหานี้ขึ้น อย่างเช่น วิธีสปริตฮอไรซอน

วิธี HIPR

1. ตารางการจัดเส้นทางมีขนาดใหญ่ขึ้น เพราะต้องเก็บหมายเลขลำดับชั้นของแต่ละโนดปลายทาง
2. สามารถแก้ปัญหาลูปประเภทลูปสั้นได้
3. ในบางโครงข่ายก่อให้เกิดลูปเพิ่มขึ้นได้ ทั้งลูปประเภทลูปสั้นและลูปประเภทลูปยาว
4. เส้นทางอื่นที่เลือกเมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดบางโครงข่ายไม่ได้เส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนที่ต่ำที่สุด

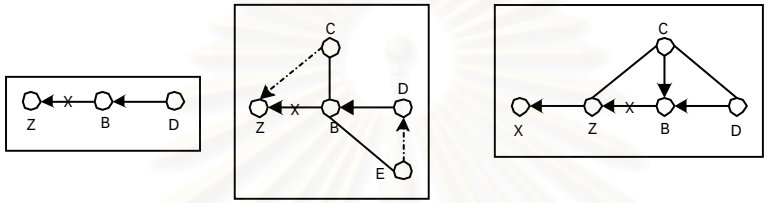
วิธีส่งเมสเสจทดสอบ

1. สามารถแก้ปัญหาลูปได้ทั้งลูปประเภทลูปสั้นและลูปประเภทลูปยาว โดยไม่ขึ้นกับตัวแปรอื่น
2. เส้นทางอื่นที่เลือกเมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดเป็นเส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนที่ต่ำที่สุด
3. ไม่ก่อให้เกิดลูปอื่นเพิ่มขึ้น

จากข้อดีข้อเสีย และการเปรียบเทียบลูปตัวอย่างของวิธีแก้ปัญหาลูปวิธีต่าง ๆ จะพบว่าวิธีส่งเมสเสจทดสอบเป็นวิธีแก้ปัญหาลูปที่มีประสิทธิภาพที่สุด เพราะสามารถแก้ลูปในรูปแบบต่าง ๆ ที่นักวิจัยให้ความสนใจได้ ทั้งลูปประเภทสั้นและลูปประเภทยาว โดยไม่ก่อให้เกิดลูปอื่นเพิ่มขึ้นหรือก่อให้เกิดปัญหาอื่นตามมา ถึงแม้จะมีการส่งเมาสเสจทดสอบออกไปทดสอบเส้นทางก่อนที่จะเลือก แต่ก็ไม่ได้ทำให้ข้อมูลต้องเสียเวลาในการรอผลการทดสอบเส้นทาง ข้อมูลยังคงสามารถถูกส่งออกไปได้ตลอดเวลาโดยใช้เส้นทางเก่าจนกระทั่งการทดสอบเส้นทางเสร็จสิ้นจึงเปลี่ยนเส้นทางการส่งข้อมูล ส่วนวิธีสปริตฮอไรซอนทั้งสองแบบ และวิธีทริกเกอร์อัพเดตร่วมกับวิธีโฮลด์ดาวน์ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้แก้ปัญหาลูปในปัจจุบัน สามารถแก้ปัญหาลูปได้เพียงบางรูปแบบเท่านั้นและยังก่อให้เกิดปัญหาอื่นตามมาได้อีก ส่วนวิธี HIPR และวิธีเก็บตารางระยะทางก็เช่นกันยังคงไม่สามารถแก้ปัญหาลูปได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน ดังเห็นได้จากตารางที่ 4.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 : แสดงการเปรียบเทียบลักษณะโครงข่ายที่สามารถแก้ปัญหาลูปได้ของแต่ละวิธี



โครงข่ายที่ใช้ทดสอบลูปต่าง ๆ วิธีแก้ปัญหาลูป	ลูปประเภทลูปสั้น	ลูปประเภทลูปยาว	ลูปที่นิยมใช้วิเคราะห์ในปัจจุบัน
วิธีสปริตฮอไรซอน	/		/
วิธีสปริตฮอไรซอนแบบพอยซันรีเวอร์ส	/		/
วิธีทริกเกอร์อัพเดตและโฮลด์ดาวน์ (ถือว่าโนด B ทริกเร็วมาก)	/		/
วิธี HIPR	/		/
วิธีเก็บตารางระยะทาง			
วิธีส่งเมสเสจทดสอบ	/	/	/
วิธีเก็บตารางระยะทางและสปริดฮอไรซอน	/		/

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พัฒนากรรมวิธีในการดีเทกลูปสำหรับโครงข่ายที่ใช้โพรโทคอล RIP ในการจัดเส้นทาง และแนวทางในการแก้ลูปที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียกับวิธีแก้ปัญหาลูปวิธีต่าง ๆ ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ด้วยการใช้โครงข่ายในรูปแบบต่าง ๆ ในการเปรียบเทียบ

วิธีการดีเทกลูปที่พัฒนาเป็นวิธีที่ใช้ตรวจสอบโครงข่ายว่ามีลูปเกิดขึ้นหรือไม่ ลูปที่เกิดขึ้นเกิดที่ตำแหน่งไหนบ้าง เป็นลูปประเภทใด และที่ลำดับการบรอดคาสท์ของโนดลำดับใดบ้าง จากข้อมูลที่ได้เหล่านี้ถูกนำไปใช้วัดความน่าจะเป็นในการเกิดลูปภายในโครงข่าย เพื่อใช้เปรียบเทียบโอกาสในการเกิดลูปของโครงข่ายที่ใช้โพรโทคอล RIP หรือใช้เปรียบเทียบโอกาสในการเกิดลูปของวิธีแก้ลูปวิธีต่าง ๆ ตลอดจนการนำไปใช้เพื่อตัดสินใจเลือกวิธีแก้ลูปที่เหมาะสมกับโครงข่ายนั้น ๆ วิธีดีเทกลูปที่เสนอนี้ มีขั้นตอนการดีเทกลูปโดยสังเขป ดังต่อไปนี้

1. สร้างชุดโนดตัวแทนของโครงข่าย โดยการกำหนดประเภทของชุดโนดตัวแทนให้กับโนดที่อยู่ในโครงข่าย เพื่อใช้ ในการวิเคราะห์ลูปในภายหลัง

2. สร้างแผนภาพลำดับการบรอดคาสท์ของโนดจากชุดโนดตัวแทน โดยวิเคราะห์หาลำดับการบรอดคาสท์ที่ให้แผนภาพออกมาต่างกัน แล้วจึงสร้างแผนภาพลำดับเฉพาะแผนภาพที่แตกต่างกันดังกล่าว โดยปกติมักเป็นแผนภาพลำดับของโนดที่มีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดบรอดคาสท์เป็นโนดแรก

3. เลือกลำดับการบรอดคาสท์จากข้อ 2. ที่ทำให้โนดหนึ่ง ๆ ในชุดโนดตัวแทนจะเลือกผ่านอีกโนดหนึ่งในชุดโนดตัวแทน เพื่อไปยังโนดปลายทางอีกด้านที่ข่ายเชื่อมโยงขาด

4. พิจารณาลำดับการบรอดคาสท์ที่ได้จากข้อ 3. เพื่อหาลำดับการบรอดคาสท์ที่ทำให้เกิดลูปแบบ 2 โนด และลูปแบบมากกว่า 2 โนด ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงข่าย

ในส่วนที่สองเป็นส่วนที่เสนอวิธีแก้ปัญหาการเกิดลูป คือ วิธีส่งเมสเสจทดสอบ ซึ่งใช้หลักการส่งเมสเสจพิเศษออกไปเพื่อทดสอบเส้นทางใหม่ว่าเกิดลูปขึ้นหรือไม่ก่อนเปลี่ยนไปใช้เส้นทางดังกล่าว วิธีการนี้ช่วยป้องกันการวนลูปของข้อมูล จากการศึกษาวิธีแก้ลูปที่ผ่านมา ได้แก่ วิธีสปริตฮอไรซอน วิธีสปริตฮอไรซอนแบบพอยซันรีเวอร์ส วิธีทริกเกอร์อัพเดตร่วมกับโฮลด์ดาวน์ วิธี HIPR และวิธีเก็บตารางระยะทางร่วมกับวิธีสปริตฮอไรซอน ไม่สามารถแก้ลูปที่เป็นลูปประเภทลูปยาวได้ ส่วนลูปประเภทลูปสั้นก็ไม่สามารถแก้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือ วิธีทริกเกอร์อัพเดตร่วมกับวิธีโฮลด์ดาวน์ ถ้ากำหนดระยะเวลาในการโฮลด์ไม่มากพอก็จะทำให้ไม่สามารถแก้ลูปได้ หรือถ้ากำหนดให้นานไปก็จะทำให้เวลาในการลู่เข้ามากขึ้นได้ ในกรณีโนดที่ได้รับการทริก ทำงานไม่เร็วพอก็จะไม่สามารถแก้ปัญหาลูปได้เช่นกัน และวิธีเก็บตารางระยะทางก่อให้เกิดลูปอื่น ๆ เพิ่มขึ้นมาแทนในการนำวิธีดังกล่าวไปใช้ร่วมกับวิธีอื่นเพื่อแก้ลูปที่เพิ่มขึ้นนั้น ก็จะทำให้รับเอาข้อบกพร่องของวิธีนั้นมาด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเลือกวิธีที่มีข้อบกพร่องในการเพิ่มลูปขึ้น วิธีนี้จะยิ่งเป็นการเพิ่มโอกาสในการกระจายการเกิดลูปออกไปได้มากยิ่งขึ้นอีก แต่ถ้าสามารถเลือกใช้ร่วมกับวิธีแก้ลูปที่เพิ่มขึ้นนั้นได้ โดยมีลูปอื่นเกิดขึ้นน้อยมาก วิธีนี้ถือได้ว่าเป็นวิธีที่ช่วยทำให้เวลาลู่เข้าเร็วขึ้นได้มาก ส่วนวิธี HIPR แม้ไม่ทำให้เกิดลูปอื่นเพิ่มขึ้นแต่ก็สามารถแก้ปัญหาลูปได้เพียงบางโครงข่ายที่อยู่ในรูปแบบ ๆ หนึ่งเท่านั้น ซึ่งถือว่ายังแก้ปัญหาลูปได้น้อยอยู่

เนื่องจากวิธีส่งเมสเสจทดสอบ เป็นแนวคิดที่ยอมให้เมสเสจเกิดการวนลูปแทนข้อมูล แต่การวนลูปนี้จะใช้เวลาที่น้อยกว่ามาก เพราะเมสเสจพิเศษที่ส่งออกไปจะถูกส่งออกไปทันทีไม่ต้องรอให้ครบรอบการบรอดคาสท์ของแต่ละโนดอย่างที่ข้อมูลถูกส่งออกไปตามปกติ และลูปที่เกิดขึ้นของเมสเสจพิเศษดังกล่าวถูกจำกัดจำนวนรอบที่วนลูป ด้วยการกำหนดจำนวนโนดสูงสุดที่เมสเสจผ่านไว้ที่ 16 ตามที่โพรโทคอล RIP กำหนดไว้ เมสเสจนี้จึงสามารถแจ้งการทดสอบเส้นทางกลับไปได้โดยไม่สูญหาย ดังนั้นสำหรับโครงข่ายที่เกิดลูปประเภทลูปสั้นหรือลูปประเภทลูปยาว วิธีการนี้สามารถแก้ลูปดังกล่าวได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการพัฒนาวิธีแก้ลูป

1. ในการเก็บข้อมูลลำดับการบรอดคาสท์ของโครงข่ายที่ก่อให้เกิดลูปที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงข่ายมีความยากลำบากในการเก็บข้อมูล โดยเฉพาะกรณีที่พิจารณาลูปที่มีจำนวนโนดมาก ๆ ดังนั้นในการนำไปใช้จริงควรทำให้อยู่ในรูปของโปรแกรม เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการเก็บข้อมูล

2. พัฒนาวิธีเก็บตารางระยะทาง โดยศึกษาว่าวิธีการใดบ้างที่เหมาะในการนำมาใช้ร่วมกับวิธีการนี้ซึ่งสามารถแก้ปัญหาลูปหลายรูปแบบทีเดียว ถ้าสามารถเลือกใช้ร่วมกับวิธีที่ทำให้เส้นทางที่เก็บเป็นเส้นทางที่ไม่เกิดลูปแล้ววิธีนี้ถือได้ว่าเป็นวิธีที่ช่วยทำให้เวลาลู่เข้าเร็วขึ้นได้มาก
3. พัฒนาการนำวิธีแก้ปัญหาลูปมาใช้ร่วมกับวิธีดีเทกลูป

วิธีการดีเทกลูปที่เกิดขึ้นบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ด้วยการหารูปแบบในการเกิดลูปที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมดในโครงข่าย โดยไม่เจาะจงโทโพโลยีและตำแหน่งที่เกิดลูปขึ้นในโครงข่าย เมื่อเรารู้ว่าโครงข่ายลักษณะนี้จะทำให้เกิดลูปรูปแบบใดขึ้นแล้ว ก็นำวิธีแก้ลูปวิธีต่าง ๆ มาแก้ หรือเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดลูปให้เปลี่ยนไป เช่น การเติมโนดเสมือนเข้าไปในโครงข่ายในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อเปลี่ยนแปลงโทโพโลยีแต่ไม่มีโนดนี้อยู่จริง เพื่อลดโอกาสในการเกิดลูปหรือขจัดลูปที่เกิดขึ้นออกไปเอง ซึ่งทำให้สามารถแก้ปัญหาลูปได้ตรงจุด

ในการนำเอาวิธีแก้ลูปวิธีต่าง ๆ มาแก้จะต้องพิจารณาถึงข้อบกพร่องที่รับมากับวิธีนั้น ๆ ด้วยและเลือกใช้ให้เหมาะสม เช่น ในการแก้ลูปประเภทลูปสั้นและโครงข่ายเกิดข่ายเชื่อมโยงขาดบ่อยครั้งแต่ก็เป็นปกติแทบจะทันที เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้เก่าไป ดังนั้นวิธีที่เลือกใช้ในการแก้ปัญหาไม่ควรเลือกวิธีทริกเกอร์อัพเดตและโฮลด์ดาวน์ เพราะแต่ละโนดจะหยุดการอัพเดตเส้นทางจนกว่าโนดที่เลือกผ่านเส้นทางนั้นจะได้รับค่าต้นทุนอนันต์ ทำให้ไม่ได้รับค่าต้นทุนที่ถูกต้องที่เส้นทางดังกล่าวกลับมาใช้ได้แล้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Govindan, R.; and Reddy, A. An Analysis of Internet Inter-Domain Topology and Route Stability. Proc. INFOCOM'97 (April 1997): 850-857.
2. Labovitz, C., Malan, G.R.; and Jahanian, F. Origins of Internet Routing Instability. IEEE Proc. of INFOCOM '99 (March 1999): 218-226.
3. Paxson, V. End-to-End Routing Behavior in the Internet. IEEE/ACM Transactions on Networking 5 (October 1997): 601-615.
4. Labovitz, C., Malan, G.R.; and Jahanian, F. Internet Routing Instability. IEEE/ACM Transactions on Networking 6 (October 1998): 601-615.
5. Labovitz, C., Ahuja, A.; and Jahanian, F. Experimental Study of Internet Stability and Backbone Failures. IEEE International Symposium on Fault-Tolerant Computing (1999): 278-285.
6. Avramovic, Z. Policy Based Routing in the Defense Information System Network. Proc. of the IEEE MILCOM '92 3 (1992): 1210-1214.
7. Matta, I.; and Shankar, A.U. Type-of-Service Routing in Dynamic Datagram Networks. Proc. of the IEEE INFOCOM '94 (June 1994): 993-994.
8. Wollman, W. V.; and Barsoum, Y. Overview of Open Shortest Path First, Version 2 (OSPF v2) Routing in the Tactical Environment. IEEE International Conferences 3 (1995): 925-930.
9. Narvaez, P., Siu, K. Y.; and Tzeng, H. Y. New Dynamic SPT Algorithm based on a Ball-String Model. IEEE Proc. of INFOCOM '99 (1999): 973-981.
10. Shankar, A. U., Alaettingoglu, C., Matta, I.;and Zieger, K. D. Performance Comparison of Routing Protocol using MaRS: Distance-Vector versus Link-State. Performance Evaluation Review 20 (1992) 181-192.
11. Park, S.-W.; and Tsai, W. K. Distributed Routing Algorithm for Loop Detection and Resolution. IEEE Proc of MILCOM '91 3 (1991): 6-10.
12. Murthy, S.; and Garcia-Luna-Aceves, J. J. Loop-Free Internet Routing Using Hierarchical Routing Trees. IEEE Proc. of INFOCOM '97 (1997): 101-108.
13. Garcia-Luna-Aceves, J. J.; and Spohn, M. Scalable Link-State Internet Routing. IEEE International Conferences (1998): 52-61.

14. Zaumen, W. T.; and Garcia-Luna-Aceves, J. J. Loop-Free Mutipath Routing Using Generalized Diffusing Computations. IEEE Proc. of INFOCOM '98 (1998): 1408-1417.

15. Alari, G. Fault-Tolerant Hierarchical Routing. IEEE International Conferences (1997): 159-165.

16. Jaffe, J. M.; and Moss, F. H. A Responsive Distributed Routing Algorithm for Computer Networks. IEEE Transactions on Communications, COM-30 7 (1982): 1758-1756.

17. Merin, P. M.; and Segall, A. A Failsafe Distributed Routing Protocol. IEEE Transaction on Communications, COM-27 9 (1979,): 1280-1287.

18. Garcia-Luna-Aceves J. J.; and Murthy, S. A Path-Finding Algorithm for Loop-Free Routing. IEEE-ACM Transaction on Networking, COM-27 9 (1997): 149-159.

19. Murhammer, M. W., Atakan, O., Bretz, S., Pugh, L. R., Suzuki, K., and Wood, D. H. TCP/IP Tutorial and Technical Overview Sixth Edition. (n.p.) Prentice Hall PTR, 1998. 129-134.

20. สุรศักดิ์ สงวนพงษ์. สถาปัตยกรรมและโปรโตคอลทีซีพี/ไอพี. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2543. 139-157.

21. ผศ. เขมะทัต วิภาตะวนิช. และสาทิพย์ กองจันทรา. การสื่อสารข้อมูลและข่ายงานคอมพิวเตอร์เบื้องต้น. (ม.ป.ท.), 2538. 155-208.

22. Christian Huitema. Routing in The Internet. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1995. 65-98, 99-121.

23. Stevens, W. R. TCP/IP Illustrated Vol.1 U.S.A.: Addison Wesley, 1994. 127-141.

24. Rardin, R. L. Optimization in Operations Research U.S.A.: Prentice Hall, 1998. 409-446.

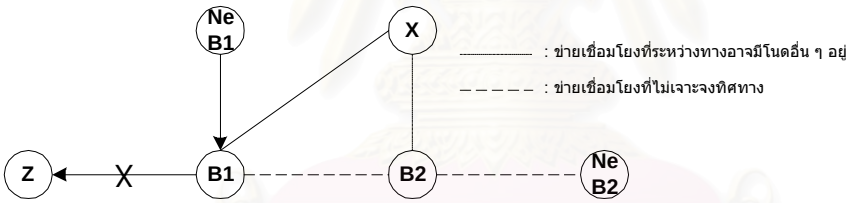
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ทดสอบหาเหตุการณ์ที่โนดที่พบข่ายเชื่อมโยงขาดกับโนดที่จะถูกแทนเสมือนเป็นโนดที่พบข่ายเชื่อมโยงขาดเป็นอิสระต่อกันหรือไม่

พิสูจน์สมมุติฐาน "*เมื่อโนด B เปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนแล้วทำให้โนด X มีค่าต้นทุนที่เปลี่ยนไปแล้ว ผลการเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลย้อนกลับมาทำให้ค่าต้นทุนของโนด B หรือโนด NeB เปลี่ยนไปหรือไม่ ถ้าเปลี่ยนไปแล้วการวิเคราะห์ในแบบแทนด้วยชุดโนดตัวแทนเป็นทอด ๆ ยังสามารถทำได้อยู่หรือไม่*"

จากโครงข่ายตัวอย่างที่ใช้ทดสอบขณะนี้กำลังพิจารณาถึงเหตุการณ์ที่โนด B เปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนแล้วส่งผลกระทบต่อไปเรื่อย ๆ โดยผลกระทบนั้นอาจย้อนกลับมาเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนของโนด B หรือโนด NeB ได้โดยที่การวิเคราะห์แยกเป็นชุดโนดตัวแทนแต่ละชุดอาจไม่รวมเหตุการณ์เช่นนี้ไป ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิสูจน์เหตุการณ์เหล่านี้



รูปที่ 1 : แสดงชุดโนดตัวแทนที่ใช้พิสูจน์การเชื่อมต่อของโนดที่อยู่ไกลออกไปมีผลต่อโนดตัวแทนที่เราพิจารณาหรือไม่

กำหนดให้

B1 : แทนโนด B ตัวที่หนึ่ง

B2 : แทนโนด B ตัวที่สอง

NeB1 : โนดตัวแทนของ NeB1 (neighbor nodes of B)

NeB1 : โนดตัวแทนของ NeB2

X : โนดที่มีความสัมพันธ์กับทั้งโนด B1 และโนด B2

เหตุการณ์ที่วิเคราะห์ คือ เมื่อโนด X มีค่าต้นทุนที่เปลี่ยนไปจะส่งผลกระทบต่อโนด B1 หรือไม่ แสดงว่าโนด X จะต้องมีเส้นทางที่ติดต่อกับโนด NeB เพื่อรับผลการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุน และจะต้องมีทิศทางที่เลือกโนด B2 ขณะที่เข้าสู่เสถียรภาพแล้ว เนื่องจากหลักการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่เป็นไปได้มีเพียงเหตุการณ์นี้เท่านั้น จากเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ขณะอยู่ในสภาวะเสถียร ดังนี้

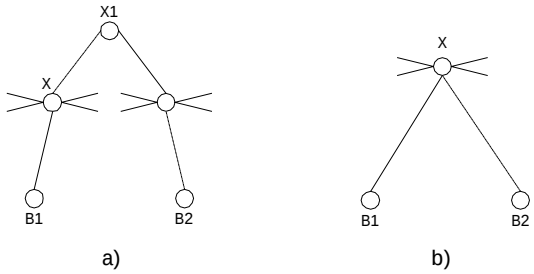
: เหตุการณ์นี้โนด B2 จะเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนของโนด X ได้เมื่อโนด B2 มีค่าต้นทุนรวมกับค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยง B2X ที่น้อยกว่าที่โนด X เลือกอยู่ แต่ขณะอยู่ในสภาวะที่เสถียรโนด B2 มีไม่น้อยกว่า เพราะโนด X ไม่ได้เลือกโนด B2 ในขณะนั้น และเมื่อเกิดข่ายเชื่อมโยงขาดค่าต้นทุนที่จะไปยังปลายทางได้มีแต่จะสูงขึ้นกว่าตอนอยู่ในสภาวะเสถียร ดังนั้นเหตุการณ์นี้จึงไม่เกิดขึ้น

: เหตุการณ์นี้ก็เช่นกันโนด X ไม่เลือกผ่านโนด B2 ในสภาวะเสถียร โนด X จึงไม่เปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนตามโนด B2

: เหตุการณ์นี้โนด B2 สามารถเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนของโนด X ได้เสมอไม่ว่าโนด B2 จะมีค่าต้นทุนเปลี่ยนแปลงไปเท่าไหร่ (แต่โนด X ไม่จำเป็นจะต้องเลือกโนด B2 เสมอไป) เพราะเป็นการอัพเดตเส้นทางของโนด B2

เนื่องจากโนด X เลือกผ่านทางโนด B2 แล้วเพราะฉะนั้นข่ายเชื่อมโยง XB1 จึงไม่มีทิศทาง หรือถ้าค่าต้นทุนเท่ากันก็จะมีทิศทาง แต่อย่างไรก็ต้องเลือกเอาเส้นทางหนึ่งส่วนอีกเส้นทางก็จะไม่มีทิศทาง แต่เนื่องจากข่ายเชื่อมโยง XB2 ต้องมีทิศทางตามที่ได้กล่าวไปแล้ว ดังนั้นข่ายเชื่อมโยง XB1 จึงต้องไม่มีทิศทาง

สำหรับการพิจารณานี้โนด X เป็นโนดที่อยู่ไกลออกไป ซึ่งหมายถึงว่าระหว่างโนด X กับโนด B1 และโนด X กับโนด B2 อาจมีโนดอื่นอยู่ระหว่างกลางได้ แต่เนื่องจากโนดที่มีผลในการวิเคราะห์ผลกระทบต่อโนด B1 คือโนดที่มีข่ายเชื่อมโยงต่อกับโนด B1 ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงต้องพิจารณาโนดที่ต่อกับโนด B1 โดยตรง จากรูปข้างล่างแสดงให้เห็นว่าเราวิเคราะห์ตามรูป b) ได้ ดังนั้นระหว่างโนด X กับโนด B1 จึงถือว่าไม่มีโนดอื่นอยู่ระหว่างกลางได้



รูปที่ 2 : แสดงการแทนการเชื่อมต่อของโนดที่อยู่ไกล (โนด X) ในรูปแบบอย่างง่าย

แม้การเปลี่ยนแปลงกระจายไปถึงโนดที่ไกลออกไปแต่การเปลี่ยนแปลงที่กระจายไปถูกคิดรวมไปกับการแทนโนด B เป็นทอด ๆ แล้ว และผลการวิเคราะห์รูปแบบชุดโนดที่มีผลกระทบน้อยกลับมายังโนด B ปรากฏว่าได้รูปแบบที่ยังอยู่ในการวิเคราะห์เดิมอยู่ คือ จะเห็นว่าโนด X มีลักษณะการเลือกเส้นทางเช่นเดียวกับโนด E (เมื่อโนด B2 เป็นโนด D) หรือโนด C (เมื่อโนด B2 ไม่ได้เลือกผ่านโนด B1) และค่าต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นก็ยังอยู่ในการวิเคราะห์เดิมอยู่ด้วย เนื่องจากเราวิเคราะห์ทุกกรณีที่คาต้นทุนของแต่ละโนดเปลี่ยนอยู่แล้ว กล่าวคือ เหตุการณ์ที่โนด B มีการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนแล้วส่งผลให้โนดที่ห่างไกลออกไป (โนด X) มีค่าต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงแล้วการวิเคราะห์ของเราจะไปคิดค่าต้นทุนของโนด X เป็นค่าเก่าหรือค่าตอนอยู่ในสภาวะเสถียร เนื่องจากโนดต่าง ๆ ในชุดโนดตัวแทนที่วิเคราะห์ถูกวิเคราะห์ทุกขั้นตอนที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเหตุการณ์ที่โนด X จะย้อนกลับมามีผลต่อโนด B1 ก็ถูกครอบคลุมแล้ว

ในทำนองเดียวกันผลเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนส่งผลย้อนกลับมาที่โนด NeB ด้วย แต่ผลนี้ยังคงอยู่ภายใต้การวิเคราะห์อยู่

สรุป *"ผลเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนต่อโนดที่อยู่ไกลออกไปส่งผลย้อนกลับมาที่โนด B และโนด NeB แต่ผลนี้ไม่ส่งผลให้การวิเคราะห์แบบแทนด้วยชุดโนดตัวแทนเป็นทอด ๆ ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ "*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

พิสูจน์หาชุดอสมการตัวแทนสำหรับอสมการทั้งหมดที่เกิดขึ้นหลังจากการกำหนดชุดโนดตัวแทนในโครงข่าย

ในการนำอสมการที่เป็นเงื่อนไขที่เกิดขึ้นหลังจากกำหนดชุดโนดตัวแทนในโครงข่าย ไปพิสูจน์อสมการของการเลือกเส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนที่ต่ำที่สุด จะต้องนำทุกอสมการเพื่อพิสูจน์ เพราะว่าอาจเป็นไปได้ว่า เมื่อเราใช้เงื่อนไขหนึ่งพิสูจน์อสมการของการเลือกเส้นทางแล้วปรากฏว่ามากกว่า แต่พอใช้อีกเงื่อนไขอาจให้ผลออกมาขัดแย้งกันได้ คือ น้อยกว่า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิสูจน์ว่าอสมการที่เป็นเงื่อนไขทั้งหมดนี้ไม่ขัดแย้งกันเอง เพื่อที่จะสามารถใช้อสมการเพียงบางอสมการในการพิสูจน์ได้ แต่ก่อนที่จะไปถึงขั้นตอนนั้นเนื่องจากว่าอสมการเงื่อนไขยังมีอยู่มาก จำเป็นที่จะต้องหาอสมการตัวแทนก่อน โดยการนำอสมการเงื่อนไขหลาย ๆ อสมการมาจัดรูปให้เป็นอีกอสมการเดียวที่มีด้านใดด้านหนึ่งขออสมการมีเพียงข่ายเชื่อมโยงเดียว

เหตุผลที่อสมการตัวแทนสามารถแทนอสมการเงื่อนไขได้ เนื่องจากในการพิสูจน์อสมการในการเลือกเส้นทางต้องเอาอสมการเงื่อนไขจริงไปพิสูจน์ นั้นหมายถึงว่า สมมุติว่าอสมการเงื่อนไขเป็นจริงแล้วผลอสมการการเลือกเส้นทางจะเป็นจริงด้วยหรือไม่ (หมายถึงว่าตั้งสมมุติฐานอสมการเลือกเส้นทางว่ามากกว่าหรือน้อยกว่าไปก่อน) ดังนั้นการนำอสมการเงื่อนไขมาจัดรูปใหม่เป็นอสมการตัวแทนอสมการเดียวก็จะต้องเป็นจริงด้วย แสดงว่าในการพิสูจน์อสมการเลือกเส้นทางจะหมายถึง อสมการเงื่อนไขเป็นจริง -> อสมการตัวแทนเป็นจริง แล้วอสมการการเลือกเส้นทางจะเป็นจริงหรือไม่ นั่นย่อมหมายถึงว่าเราเอาอสมการตัวแทนไปใช้พิสูจน์เสมือนเอาอสมการเงื่อนไขไปพิสูจน์ได้เลย ในส่วนที่เหลือก็จะเป็นการพิสูจน์ว่าอสมการตัวแทนไม่ขัดแย้งกันเองก็เป็นอันเสร็จ

อสมการที่ได้หลังจากสร้างชุดโนดตัวแทน ณ. สภาวะเสถียร ทั้งหมดสามารถหาได้จากนิยามที่เราตั้งขึ้น เช่น โนด E “แทนโนดที่เลือกไม่ผ่านโนด B โดยตรงและตัวเองไม่มีทางอื่นที่จะไปยัง Z อีก และมีค่าต้นทุนที่น้อยที่สุดในโนดประเภทนี้ (ดังนั้นข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด E กับโนด D สามารถมีโนดอื่นอยู่ได้)” อสมการที่ได้จะเป็นเส้นทาง EDBZ มีค่าที่น้อยกว่าเส้นทางอื่นที่โนด E จะไปยังโนด Z คือ EDBZ<EDBCZ,EDBAFZ และอสมการเส้นทาง ED น้อยกว่าเส้นทางอื่นที่โนด E จะไปยังโนด D คือ ED <EBD เนื่องจากเส้นทางที่แต่ละโนดเลือกผ่านมันก็เป็นเส้นทางที่น้อยที่สุดด้วยอยู่ในตัว แต่ในกรณีที่คิดเส้นทางรวมกันไปเลยที่มากกว่า 1 ข่ายเชื่อมโยงเราจะบอกไม่ได้ว่าเส้นทางนั้นจะสั้นที่สุด เช่น EDB < EB เพราะที่เรารู้เพียงโนด E ไปโนด D สั้นที่สุดคือ ED และ

โนด D ไปโนด B สั้นที่สุดคือ DB ไม่ได้หมายความว่าโนด E ไปโนด B จะสั้นที่สุดที่ EDB ด้วย แต่เพื่อแสดงให้เห็นว่าเป็นจริงอย่างที่ได้กล่าวไว้จึงขอแสดงอสมการทั้งหมด โดยการกำหนดโนดต้นทางและโนดปลายทางที่เป็นไปได้ พร้อมกับหาเส้นทางที่สั้นที่สุดกับเส้นทางอื่นที่สามารถไปได้ อสมการที่ได้จะเป็นอสมการของค่าต้นทุนของเส้นทางที่สั้นที่สุดน้อยกว่าค่าต้นทุนของเส้นทางอื่น ดังแสดงในช่องที่ 3 และ 4 ของตาราง ข. ในตอนท้ายภาคผนวก ข.

จากตาราง ข. จะเห็นว่าอสมการที่สามารถระบุเป็นอสมการได้จริง ๆ โดยยังไม่นำเงื่อนไขอื่นในตารางมาช่วยจะเป็นอสมการจากโนดใด ๆ ไปยังโนด Z และโนดใด ๆ บนเส้นทางนี้ไปยังโนดถัดไปยกเว้น อสมการ ABD<AFBD,AFZBD ซึ่งเพิ่มเข้ามา ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเส้นทางที่สั้นที่สุดของโนด A ไปโนด D เผอิญเป็นเส้นทางที่ผ่านโนด B ซึ่งเป็นเส้นทางเดียว อสมการตัวแทนที่ได้ (ใช้การจับคู่ของอสมการเงื่อน แล้วมาบวกกันเพื่อเลือกเอาอสมการที่มีความสัมพันธ์ของข่ายเชื่อมโยงเดียวเพื่อง่ายในการนำไปพิสูจน์) แสดงการหา ดังต่อไปนี้

1. พิจารณาอสมการต่อไปนี้

จากอสมการ EDBZ<EBZ จะได้ EDB<EB และอสมการ FABZ<FBZ จะได้ FAB<FB

$$BD + DE < BE \quad (1)$$

$$BA + AF < BF \quad (2)$$

อสมการในตารางที่สามารถใช้หาอสมการตัวแทน ได้แก่

$$BD < BE + ED \quad (3)$$

$$DE < DB + BE \quad (4)$$

$$AF < AB + BF \quad (5)$$

$$BA < BF + FA \quad (6)$$

$$FA + AB + BZ < FZ \quad (7)$$

$$BA < BZ + ZF + FA \quad (8)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$AF < AB + BZ + ZF \quad (9)$$

$$BZ < BA + AF + FZ \quad (10)$$

(1)+(3) $BD < BE$ (ข.1)

(1)+(4) $DE < BE$ (ข.2)

(2)+(5) $AF < BF$ (ข.3)

(2)+(6) $AB < BF$ (ข.4)

(7)+(8) $BD < FZ$ (ข.5)

(7)+(9) $AF < FZ$ (ข.6)

(7)+(10) $BZ < FZ$ (ข.7)

2. พิจารณาอสมการต่อไปนี้

ABD<AFBD,AFZBD กับ BA<BFA,BZFA

ABDE<AFBDE, AFZBDE กับ BA<BFA,BZFA

DBA<DBFA,DBZFA กับ BA<BFA,BZFA

DBAF<DBF,DBZF,DBCZF กับ BAF<BF,BZF,BCZF

DBZ<DBCZ,DBAFZ กับ BZ<BCZ,BAFZ

EDBFA< EDBF,EDBZF กับ BAF<BF,BZF,BCZF

EDBZ<EDBCZ,EDBAFZ กับ BZ<BCZ,BAFZ

FABZ<FABCZ กับ BZ<BCZ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะเห็นว่าแต่ละคู่ที่เปรียบเทียบเป็นอสมการเดียวกัน ซึ่งแสดงในช่อง "อสมการสมมูล" และได้ถูกพิจารณาอสมการตัวแทนไปแล้ว

จากอสมการ (1) และ (2) ในข้อที่ 1 ทำให้บางอสมการในตารางสามารถระบุค่าต้นทุนของเส้นทางที่น้อยที่สุดได้ ซึ่งแสดงใน "[ ]" ในช่อง "เส้นทางที่สั้นที่สุด" ซึ่งอสมการตัวแทนที่ได้ก็ยังรองรับอสมการเหล่านี้อยู่ทั้งที่เป็นอสมการสมมูลกับอสมการอื่นและอสมการตัวแทนสามารถแทนเข้าแล้วยังเป็นจริงอยู่ พิจารณาได้จากข้อที่ 1 และ 2

เนื่องจากว่าเราพิจารณาที่ขนาดไม่คิดทิศทางของเส้นทางขาไปกับขากลับต่างกัน ดังนั้นอสมการที่พิจารณาเหล่านี้จะรวมไปถึงอสมการในทิศสวนทางกันด้วยและอสมการที่เหลือ ได้แก่

$$BZ \quad < \quad BC + CZ \tag{ข.8}$$

$$CZ \quad < \quad CB + BZ \tag{ข.9}$$

เพื่อจะนำอสมการตัวแทนเหล่านี้ไปไปใช้แทนอสมการเงื่อนไขจริงได้จึงต้องนำอสมการเหล่านี้ทดสอบกับอสมการเงื่อนไขจริงทุกอสมการว่าไม่ขัดแย้งกับอสมการตัวแทน ผลการแทนให้ผลที่สอดคล้องเป็นจริงกับอสมการตัวแทนทั้งหมด เนื่องจากว่าอสมการตัวแทนที่ได้ไม่ขัดแย้งกันเองเพราะอสมการที่ได้ไม่เกี่ยวข้องกัน นั่นแสดงว่าเมื่อแทนกลับ อสมการตัวแทนที่แทนแล้วทำให้อสมการเงื่อนไขเป็นจริงจะมีแน่นอนอย่างน้อยที่สุดก็เป็นอสมการตัวแทนที่พิสูจน์มาจากอสมการตัวนั้น ดังนั้นสามารถดึงอสมการตัวแทนเหล่านี้ไปพิสูจน์ได้โดยไม่ต้องพิสูจน์กับอสมการตัวแทนทั้งหมดนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข. : แสดงอสมการที่ได้ทั้งหมดหลังการสร้างชุดโนดตัวแทน

โนดต้นทาง	โนดปลายทาง	เส้นทางที่สั้นที่สุด	เส้นทางอื่น ๆ	อสมการสมมูล
B	A	BA	BFA,BZFA(*BCZFA)*	
	C			C->B
	D	BD	BED	
	E	ระบุไม่ได้[BDE]	BDE,BE	
	F	ระบุไม่ได้[BAF]	BAF,BF,BZF,BCZF,BCZBF	
	Z	BZ	**BCZ**,BAFZ*(BFZ)*	
A	B	AB	AFB,AFZB,AFZCB	B->A
	C			C->A
	D	ABD	AFBD,AFZBD*(AFZCBD) ((AFBED),(AFZBED)(AFZCBED))*	B->A
	E	ระบุไม่ได้[ABDE]	ABDE,AFBDE,AFZBDE*(AFZCBDE) (D20(ABE),(AFBE),(AFZBE)(AFZCBE))*	[B->A]
	F	AF	ABF,ABZF,ABCZF	
	Z	ABZ	AFZ,AFBZ	
C	A	ระบุไม่ได้	CBA*(CBFA,CBZFA)*,CZBA*(CZFA,CZFBA.CZBFA)*	[C->B]
	B	ระบุไม่ได้	CB,CZB*(CZFB,CZFAB)*	
	D	ระบุไม่ได้	CBD,CZ->B+BD	[C->B]

ตาราง ข. : (ต่อ) แสดงอสมการที่ได้ทั้งหมดหลังการสร้างชุดโนดตัวแทน

โนดต้นทาง	โนดปลายทาง	เส้นทางที่สั้นที่สุด	เส้นทางอื่น ๆ	อสมการสมมูล
	E	ระบุไม่ได้	CBDE*(CBE)*,CZ->B+BDE*(CZ->B+BE)*	[C->B]
	F	ระบุไม่ได้	CB->F,CZ->F	[C->B]
	Z	CZ	**CBZ***((CBAFZ),(CBFZ))*	
D	A	DBA	DBFA,DBZFA*(DBCZFA) ((DEBZFA),(DEBFA)(DEBCZFA))*	B->A
	B	DB	DEB	
	C			C->D
	E	DE	DBE	
	F	ระบุไม่ได้	DBAF,DBF,DBZF,DBCZF ((DEBAF),(DEBF),(DEBZF),(DEBCZF))	B->Z
	Z	DBZ	DBCZ,DBAFZ*(DBFZ)((DEBCZ),(DEBAFZ)(DEBFZ))*	B->Z
E	A	ระบุไม่ได้	EDBA,EDBFA,EDBZFA*(EDBCZFA) ((EBFA),(EBZFA)(EBCZFA))*	B->A
	B	ระบุไม่ได้[EDB]	EDB,EB	
	C			C->E
	D			D->E
	F	ระบุไม่ได้	EDBAF,EDBF,EDBZF*(EDBCZF) ((EBAF)(EBF),(EBZF)(EBCZF))*	B->F
	Z	EDBZ	EDBCZ,EDBAFZ*(EDBFZ)((EBCZ),(EBAFZ)(EBFZ))*	B->Z

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข. : (ต่อ) แสดงอสมการที่ได้ทั้งหมดหลังการสร้างชุดโนดตัวแทน

โนดต้นทาง	โนดปลายทาง	เส้นทางที่สั้นที่สุด	เส้นทางอื่น ๆ	อสมการสมมูล
F	A			A->F
	B			B->F
	C			C->F
	D			D->F
	E			E->F
	Z	FABZ	FZ,FBZ,FABCZ,FBCZ	

หมายเหตุ

1. เส้นทางที่เป็นตัวเอียงหมายถึงเส้นทางที่ไม่ต้องนำมาวิเคราะห์ เพราะอสมการของเส้นทางที่อยู่ข้างหน้าครอบคลุมเส้นทางนี้อยู่แล้ว
2. เส้นทางที่เป็นตัวเข้มเป็นเส้นทางที่ไม่สามารถอสมการตัวแทนได้จึงถือเป็นอสมการตัวแทนเอง
3. สำหรับค่าใน "[ ]" หมายถึงค่าที่นำเอาอสมการตัวแทนช่วยในการวิเคราะห์ผล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย สมหมาย สกุลกิจ เกิดวันที่ 6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2520 ที่ อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาสื่อสาร และสาขาไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาโทรคมนาคม ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2541

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย