สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แบบจำลองที่ใช้ทำมัลติคาสต์

ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองสำคัญที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองเชิงกายภาพ แบบจำลองเชิงมโนภาพ แบบจำลองมัลติคาสต์ระดับชั้นแอพพลิเคชัน การคำนึงถึงโครงสร้างการเชื่อมต่อ การวัดประสิทธิภาพมัลติคาสต์ระดับชั้นแอพพลิเคชัน และการนำไปใช้จริง

3.1 แบบจำลองเชิงกายภาพ (Physical Model)

โครงสร้างเชิงกายภาพของเครือข่ายสามารถเขียนอยู่ในรูปของกราฟ G = (V, E) โดย V แทนเซตของโหนด ซึ่งมีสมาชิก v_i ที่เป็นได้ทั้งโฮสต์และเราเตอร์ E แทนเซตของลิงค์โดยมีสมาชิก $e(v_i, v_j)$ เป็นลิงค์ที่เชื่อมระหว่างโหนด v_i และ v_j โดยที่ $v_i, v_j \in V$

กำหนดให้ดีเลย์ $d(e(v_i, v_j))$ เป็นช่วงเวลาที่ใช้ส่งข้อมูลจากโหนด v_i ถึงโหนด v_j และแบนด์วิดท์ $bw(e(v_i, v_j))$ เป็นแบนด์วิดท์ของลิงค์ที่เชื่อมระหว่างโหนดทั้งสอง โดยค่าดีเลย์และแบนด์วิดท์สามารถหาโดยประมาณจากการใช้การวัดแบบปิง-ปอง (Ping-Pong) ซึ่งเป็นการวัดเวลาที่ใช้ตั้งแต่ข้อมูลถูกส่งออกไปจนกระทั่งข้อมูลนั้นถูกผู้รับส่งกลับมายังโหนดผู้ส่ง (Round trip time: RTT)

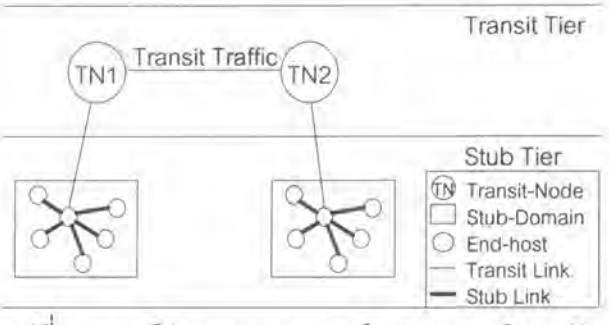
สำหรับแอพพลิเคชันสตรีมมิง กำหนดให้ $abw(e(v_i, v_j))$ แทนแบนด์วิดท์ที่แอพพลิเคชันใช้ส่งข้อมูลผ่านลิงค์ $e(v_i, v_j)$ โดยค่าแบนด์วิดท์ค่านี้เป็นผลรวมของแบนด์วิดท์ทั้งหมดที่ใช้ส่งแพ็กเก็ตของแอพพลิเคชันสตรีมมิงในช่วงเวลาเดียวกันบนลิงค์ที่เชื่อมระหว่างโหนด v_i และ v_j และกำหนดให้ $u(e(v_i, v_j))$ เป็นสัดส่วนการใช้แบนด์วิดท์ (Utilization) ซึ่งหมายถึงสัดส่วนระหว่างแบนด์วิดท์ที่ได้ใช้ไปส่วนแบนด์วิดท์ที่ลิงค์นั้นมีให้ใช้ ค่านี้ยิ่งน้อยยิ่งดี เพราะหมายถึงแบนด์วิดท์ของเครือข่ายยิ่งถูกใช้น้อยลงไปเท่านั้น โดยสัดส่วนการใช้แบนด์วิดท์ของลิงค์ e เป็นอัตราส่วนระหว่างแบนด์วิดท์ที่แอพพลิเคชันใช้และแบนด์วิดท์ที่ลิงค์มีให้ ดังสมการข้างล่าง

$$u(e(v_i, v_j)) = \frac{abw(e(v_i, v_j))}{bw(e(v_i, v_j))} \qquad (3.1)$$

การวัดประสิทธิภาพของแอพพลิเคชันสตรีมมิงจะพิจารณาที่ลิงค์คอขวด (Bottleneck Link) ซึ่งเป็นลิงค์ที่มีค่าสัดส่วนการใช้แบนด์วิดท์สูงสุด กำหนดให้ลิงค์คอขวดแทนด้วย BL ดังนั้นสัดส่วนการใช้แบนด์วิดท์ที่ลิงค์คอขวดจึงหาได้ดังสมการข้างล่าง

$$u(BL) = \max_{e(v_i, v_j) \in E} \{u(e(v_i, v_j))\} \quad (3.2)$$

เนื่องจากเครือข่ายอินเตอร์เน็ตเป็นเครือข่ายของเครือข่าย (Network of Networks) ดังนั้นโครงสร้างของเครือข่ายอินเตอร์เน็ตจึงสามารถจัดแบ่งโหนดและลิงค์ออกเป็นเทียร์ (Tier Based) [19] ตัวอย่างของโครงสร้างลักษณะเทียร์ ได้แก่ เครือข่ายภายในประเทศ และเครือข่ายระหว่างประเทศ โดยในประเทศไทยได้มีการศึกษารวมทั้งแบ่งแบนด์วิดท์เครือข่ายของประเทศออกเป็นสองระดับ [20] คือ แบนด์วิดท์ภายในประเทศ (Domestic Bandwidth) และแบนด์วิดท์ระหว่างประเทศ (International Bandwidth) จากการสำรวจข้อมูลแบนด์วิดท์ของประเทศไทย [21] เมื่อเดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2552 พบว่าผลรวมแบนด์วิดท์ภายในประเทศมีค่าเท่ากับ 251.091 กิกะบิตต่อวินาที (Gbps) และผลรวมแบนด์วิดท์ระหว่างประเทศมีค่าเท่ากับ 56.385 กิกะบิตต่อวินาที

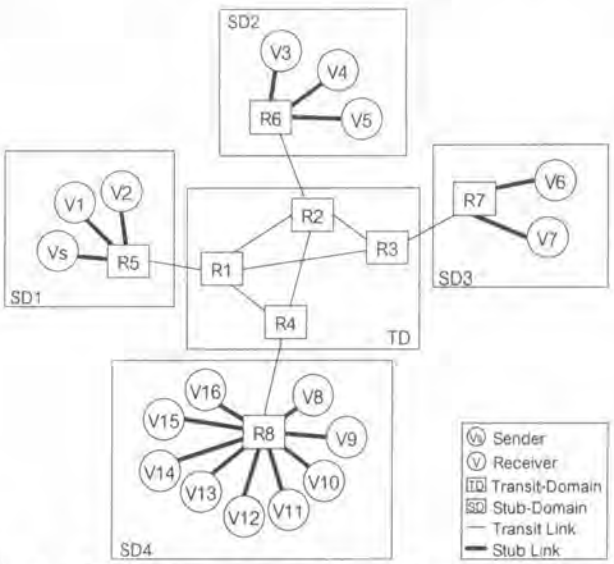


รูปที่ 3.1 องค์ประกอบของแบบจำลองทรานสิต-สตับ

ในงานวิจัยนี้ใช้โครงสร้างแบบเทียร์เป็นพื้นฐาน โดยนำแบบจำลองทรานสิต-สตับ [22] ซึ่งเป็นแบบจำลองแบบสองเทียร์ ได้แก่ เทียร์ทรานสิต (Transit Tier) และเทียร์สตับ (Stub Tier) มาประยุกต์ใช้กับเครือข่ายอินเตอร์เน็ตซึ่งเป็นเครือข่ายเชิงกายภาพขนาดใหญ่ โดยแบบจำลองนี้ประกอบด้วย 2 โดเมนหลัก คือ โดเมนทรานสิต และโดเมนสตับ

ก) โดเมนทรานสิต (Transit Domain: TD) ประกอบด้วยโหนดทรานสิต (Transit Node: TN) และลิงค์ทรานสิต (Transit Link) โดยโหนดทรานสิตเป็นโหนดที่สามารถส่งข้อมูลให้กับโหนดทรานสิตด้วยกันหรือส่งให้กับโหนดในโดเมนสตับก็ได้ ดังนั้นลิงค์ทรานสิตจึงเป็นได้ทั้งลิงค์ที่เชื่อมระหว่างโหนดทรานสิตสองโหนด และลิงค์ที่เชื่อมระหว่างโหนดทรานสิตกับโหนดในโดเมนสตับ โดยลิงค์ทั้งสองชนิดนี้สามารถเทียบได้กับลิงค์ระหว่างประเทศ (Inter-Area Link) ซึ่งเป็นลิงค์หลักของเครือข่ายอินเตอร์เน็ต (Internet Backbone) และทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากลิงค์ทั้งสองชนิดถือเป็นทราฟฟิกภายในโดเมนทรานสิต จึงเรียกว่า ทราฟฟิกทรานสิต (Transit Traffic)

ข) โดเมนสตับ (Stub Domain: SD) ประกอบด้วยโหนดสตับ (Stub Node: SN) และลิงค์สตับ (Stub Link) โหนดสตับหมายถึงโฮสต์หรือเราเตอร์ที่ไม่ใช่โหนดทรานสิต และทุกโหนดที่อยู่ในโดเมนสตับเดียวกันจะถือว่าอยู่ใกล้กันทางกายภาพ (Near-by in Physical Area) เช่น โหนดในประเทศเดียวกันจะอยู่ใกล้กันมากกว่าโหนดที่อยู่คนละประเทศ ดังนั้นลิงค์ที่เชื่อมระหว่างโหนดที่อยู่ภายในโดเมนสตับเดียวกัน เช่น ลิงค์ภายในประเทศ (Intra-Area Link) จะถือเป็นลิงค์โลคอล (Local Link) และทราฟฟิกภายในโดเมน จะเรียกว่า ทราฟฟิกสตับ (Stub Traffic)



รูปที่ 3.2 เครือข่ายเชิงกายภาพตามแบบจำลองทรานสิต-สตับ

ในงานวิจัยนี้เครือข่ายเชิงกายภาพมีลักษณะเป็นกราฟ G = (V, E) โดยมีโดเมนสตับได้ n โดเมน กำหนดให้ SD1-SD4 เป็นโดเมนสตับ และ V_i เป็นเซตของโหนดในโดเมนสตับ SDi โดยที่ $1 \le i \le n$ ดังนั้นเซตของโหนด V ซึ่งเป็นโหนดทั้งหมดในเครือข่ายเชิงกายภาพ สามารถเขียนแทนด้วย $V = \cup_{i=1}^{n} V_i$ จากเครือข่ายตัวอย่างในรูปที่ 3.2 พบว่าเครือข่ายประกอบด้วยโดเมนจำนวน 5 โดเมน คือ โดเมนทรานสิตจำนวน 1 โดเมนและโดเมนสตับจำนวน 4 โดเมน โดยโดเมนทรานสิตประกอบด้วยโหนดทรานสิตจำนวน 4 โหนด โหนดทรานสิตแต่ละโหนดจะเชื่อมต่ออยู่กับโดเมนสตับแต่ละโดเมน ดังนั้นเซตของโหนดทั้งหมดในเครือข่ายจึงประกอบด้วยเซตจำนวน 5 เซต ดังความสัมพันธ์ $V = V_0 \cup V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup V_4$ โดยที่ V_0 แทนเซตของโหนดในโดเมนทรานสิต ส่วน V_1-V_4 แทนเซตของโหนดในแต่ละโดเมนสตับ (SD1–SD4)

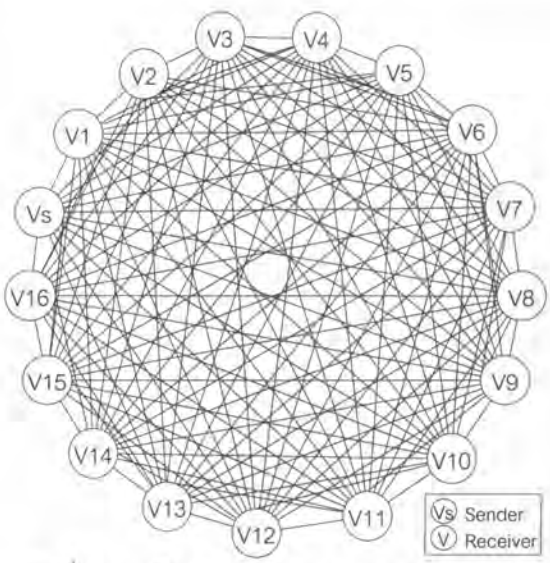
เมื่อพิจารณาการแบ่งโหนดของเครือข่ายเป็นทรานสิตและสตับ ลิงค์ทั้งหมดในระบบเครือข่าย (E) สามารถจัดเป็น 2 เซต คือ เซตของลิงค์ทรานสิตและเซตของลิงค์สตับ ซึ่งแทนด้วย E_t และ E_s ตามลำดับ เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้ $E = E_t \cup E_s$ จากการสังเกตในด้านแบนด์

วิดท์ของเครือข่ายอินเตอร์เน็ต พบว่าแบนด์วิดท์ของลิงค์ทรานสิตโดยทั่วไปน้อยกว่าแบนด์วิดท์ของลิงค์สตับ ถ้ากำหนดให้ $e(v_i, v_j)$ เป็นลิงค์ทรานสิตที่เชื่อมระหว่างโหนด v_i และโหนด v_j และ $e(v_x, v_y)$ เป็นลิงค์สตับที่เชื่อมระหว่างโหนด v_x และ v_y ความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์วิดท์ของลิงค์ทั้งสองชนิด สามารถเขียนได้ดังนี้ $bw(e(v_i, v_j)) << bw(e(v_x, v_y))$

3.2 **แบบจำลองเชิงมโนภาพ** (Logical Model)

การติดต่อสื่อสารระหว่างโหนดจะมีการสร้างการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด ซึ่งเป็นเส้นทางเชิงมโนภาพระหว่างโฮสต์ซึ่งเป็นโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง (End to End Path) โดยไม่รวมโหนดระหว่างทางเช่นเราเตอร์

แบบจำลองเครือข่ายเชิงกายภาพ $G = (V, E)$ สามารถถ่ายทอดเป็นแบบจำลองเครือข่ายเชิงมโนภาพด้วยกราฟแบบสมบูรณ์ (Complete Graph) $G_o = (V_o, E_o)$ โดยที่โหนดในเครือข่ายเชิงมโนภาพแทนด้วยเซต V_o ซึ่งประกอบด้วยโฮสต์ (โหนดผู้ส่ง-ผู้รับ) ทั้งหมดที่อยู่ในเซต G (ไม่รวมเราเตอร์) ดังนั้น $V_o \subseteq V$ และเมื่อ v_i และ $v_j \in V_o$ แต่ละลิงค์มโนภาพ (Logical Link) หรือพาธซึ่งแทนด้วย $p(v_i, v_j) \in E_o$ จะประกอบด้วยลิงค์กายภาพ (Physical Link) ต่อกันเป็นเส้นทางที่มีดีเลย์สั้นที่สุดจากโหนด v_i ถึง v_j ดังนั้นเซต E_o จึงเป็นเซตที่ประกอบด้วยเส้นทางที่สั้นที่สุดจากโฮสต์ถึงโฮสต์



รูปที่ 3.3 เครือข่ายเชิงมโนภาพแบบสมบูรณ์

รูปที่ 3.3 เป็นเครือข่ายเชิงมโนภาพที่ได้มาจากเครือข่ายเชิงกายภาพในรูปที่ 3.2 ตัวอย่างเช่น ลิงค์มโนภาพจากโหนด v_2 ถึงโหนด v_9 เป็นลิงค์ที่ประกอบด้วยเซตของลิงค์กายภาพ

ดังนี้ { (e(v_s, R_5), e(R_5, R_1), e(R_1, R_4) e(R_4, R_8), e(R_8, v_8)) } นอกจากเส้นทางระหว่างสองโหนดที่สามารถแสดงด้วยลำดับโหนดแล้ว ในเครือข่ายเชิงมโนภาพยังมีค่าดีเลย์ในพาธ (Path Delay) และแบนด์วิดท์ในพาธ (Path Bandwidth) ดังสมการ

$$pd(p(v_i, v_j)) = \sum_{e(v_i, v_j) \in p(v_i, v_j)} \{d(e(v_i, v_j))\} \qquad (3.3)$$

$$pbw(p(v_i, v_j)) = \min_{e(v_i, v_j) \in p(v_i, v_j)} \{bw(e(v_i, v_j))\} \qquad (3.4)$$

ค่าดีเลย์ในพาธหรือ pd(p(v_i, v_j)) เป็นผลรวมของดีเลย์บนลิงค์กายภาพตลอดทั้งเส้นทางตั้งแต่โหนด v_i ไปจนถึงโหนด v_j ส่วนแบนด์วิดท์ในพาธหรือ pbw(p(v_i, v_j)) เป็นค่าแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดในเส้นทางระหว่างโหนดทั้งสอง

3.3 แบบจำลองมัลติคาสต์ระดับชั้นแอพพลิเคชัน (ALM Model)

การให้บริการสตรีมมิงนิยมใช้การสื่อสารแบบมัลติคาสต์ในการส่งข้อมูล ซึ่งทำได้ทั้งไอพีมัลติคาสต์และมัลติคาสต์ระดับชั้นแอพพลิเคชัน แนวคิดหลักของมัลติคาสต์ระดับชั้นแอพพลิเคชัน คือ การส่งข้อมูลโดยจะใช้การสื่อสารแบบจุดต่อจุด เพื่อสร้างเครือข่ายจากแบบจำลองเครือข่ายเชิงมโนภาพ

กำหนดให้มัลติคาสต์ทรีระดับชั้นแอพพลิเคชัน หรือเครือข่ายซ้อนทับแทนด้วย T = (G_o, v_s, D, SP) โดยที่

G_o เป็นแบบจำลองเครือข่ายเชิงมโนภาพ

v_sเป็นโหนดต้นทาง ซึ่งทำหน้าที่เป็นโหนดรูตของทรี

D เป็นเซตของโหนดผู้รับ ซึ่งต้องเป็นสมาชิกในเซต G_o ดังนั้น $D \subseteq V_o$

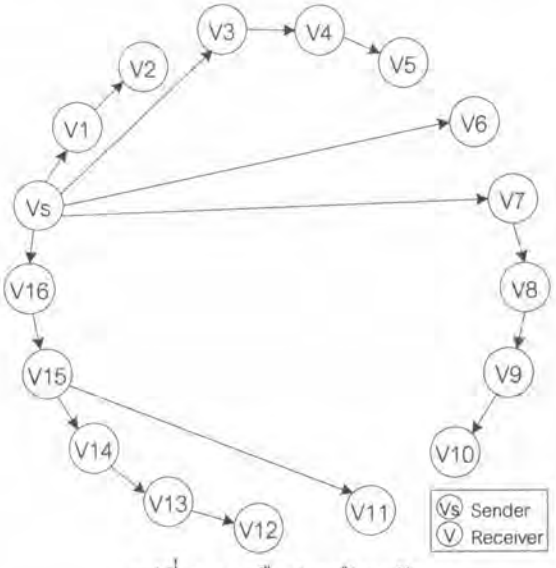
SP เป็นเซตของสตรีมมิงพาธ (Streaming Path)

ถ้า $v_i \in D$ ดังนั้นเส้นทางการส่งสตรีมมิงจากโหนด v_s ไปยังโหนดผู้รับ v_i จะเป็นสตรีมมิงพาธระหว่างโหนด v_s ถึงโหนด v_i ซึ่งเขียนแทนด้วย s(v_s, v_i) โดยที่ s(v_s, v_i) $\in$ SP แต่ละสตรีมมิงพาธจึงประกอบด้วยเซตของลิงค์มโนภาพที่เริ่มจากโหนด v_s จนถึงโหนด v_i นอกจากนี้ยังกำหนดค่าดีเลย์ในสตรีมมิงพาธ (Streaming Path Delay) และค่าแบนด์วิดท์ในสตรีมมิงพาธ (Streaming Path Bandwidth) โดยค่าดีเลย์ในสตรีมมิงพาธซึ่งเขียนแทนด้วย sd(s(v_s, v_i)) จะเป็นค่าผลรวมของดีเลย์ในพาธจากโหนด v_s ถึงโหนด v_i ส่วนค่าแบนด์วิดท์ในสตรีมมิงพาธซึ่งเขียนแทน

ด้วย sbw(s(v_s, v_i)) เป็นค่าแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดในพาธจาก v_s จนถึงโหนด v_i ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$sd(s(v_s, v_i)) = \sum_{p(v_s, v_i) \in s(v_s, v_i)} \{pd(p(v_s, v_i))\} \quad (3.5)$$

$$sbw(s(v_s, v_i)) = \min_{p(v_s, v_i) \in s(v_s, v_i)} \{pbw(p(v_s, v_i))\} \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.4 เครือข่ายซ้อนทับ

จากเส้นทางการไหลของแพ็กเก็ตในมัลติคาสต์ระดับชั้นแอพพลิเคชันในรูปที่ 2.3 เมื่อนำมาเขียนเป็นเครือข่ายซ้อนทับจะได้ดังรูปที่ 3.4 เมื่อพิจารณาถึงลำดับในการส่งข้อมูลที่มีโหนด v_s เป็นโหนดต้นทาง พบว่าโหนด v_s ส่งแพ็กเก็ตไปยังโหนด v_1, v_3, v_6, v_7 และ v_{16} หลังจากที่โหนดเหล่านั้นได้รับข้อมูลแล้วจะส่งข้อมูลนั่นต่อให้กับโหนดอื่นๆ เช่น โหนด v_1 ส่งข้อมูลให้โหนด V_2, โหนด v_3 ส่งข้อมูลให้โหนด v_4, โหนด v_7 ส่งข้อมูลให้โหนด v_8 และโหนด v_{16} ส่งข้อมูลให้โหนด v_{15} เป็นต้น

ซึ่งเมื่อพิจารณาการส่งข้อมูลตามสตรีมมิงพาธ จะทำให้เกิดสตรีมมิงพาธเป็นจำนวน 16 เส้นทาง เช่น s(v_s, v_1), s(v_s, v_2) เป็นต้น โดยแต่ละเส้นทางจะประกอบด้วยเซตของลิงค์มโนภาพ ตัวอย่างเช่น

$s(v_s, v_1) = \{ p(v_s, v_1) \}$

$s(v_s, v_2) = \{ p(v_s, v_1), p(v_1, v_2) \}$

$s(v_s, v_3) = \{ p(v_s, v_3) \}$

$s(v_s, v_4) = \{ p(v_s, v_3), p(v_3, v_4) \}$

$$s(v_s, v_5) = \{ p(v_s, v_3), p(v_3, v_4), p(v_4, v_5) \}$$

เมื่อพิจารณาสตรีมมิงพาธ $s(v_s, v_5)$ ซึ่งเป็นสตรีมมิงพาธจากโหนด v_s จนถึงโหนด v_5 จะได้ค่าดีเลย์ในสตรีมมิงพาธตามสมการ 3.5 ดังนี้

$$sd(s(v_s, v_5)) = pd(p(v_s, v_3)) + pd(p(v_3, v_4)) + pd(p(v_4, v_5))$$

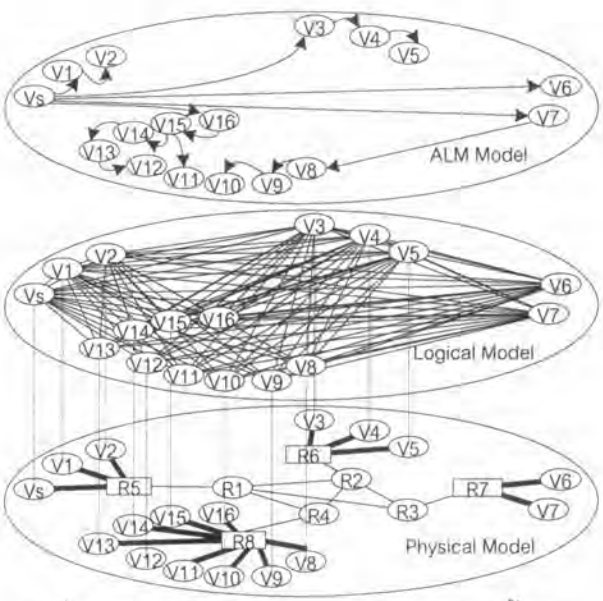
และแบนด์วิดท์ในสตรีมมิงพาธซึ่งจะเป็นค่าแบนด์วิดท์ต่ำสุดของลิงค์มโนภาพทั้งสามตามสมการ 3.6 ดังนี้

$$sbw(s(v_s, v_5)) = \min \{ pbw(p(v_s, v_3)), pbw(p(v_3, v_4)), pbw(p(v_4, v_5)) \}$$

เมื่อนำค่าดีเลย์ในสตรีมมิงพาธทั้งหมดในเครือข่ายซ้อนทับ (16 เส้นทาง) มาเปรียบเทียบหาค่ามากที่สุด จะได้ค่าดีเลย์ในเครือข่ายซ้อนทับ (Overlay Delay) ซึ่งแทนด้วย od(T)และเมื่อนำค่าแบนด์วิดท์ในสตรีมมิงพาธทั้งหมดในเครือข่ายซ้อนทับมาเปรียบเทียบหาค่าที่น้อยที่สุด จะได้ค่าแบนด์วิดท์ในเครือข่ายซ้อนทับ (Overlay Bandwidth) แทนด้วย obw(T) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$od(T) = \max_{s(v_s, v_i) \in SP} \{sd(s(v_s, v_i))\} \quad (3.7)$$

$$obw(T) = \max_{s(v_s, v_i) \in SP} \{sbw(s(v_s, v_i))\} \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทั้งสาม

รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองเชิงกายภาพ แบบจำลองเชิงมโนภาพและแบบจำลองมัลติคาสต์ระดับแอพพลิเคชัน จากความสัมพันธ์ของแบบจำลองดังกล่าว พบว่าหากกำหนดให้มีผู้ส่งหนึ่งโหนดและมีผู้รับหลายโหนด สามารถสร้างเครือข่ายเชิงกายภาพได้รูปแบบเดียว และเมื่อนำเครือข่ายเชิงกายภาพนั้นมาสร้างเป็นเครือข่ายเชิงมโนภาพ จะได้เครือข่ายเชิงมโนภาพรูปแบบเดียวเช่นกัน แต่เมื่อนำเครือข่ายเชิงมโนภาพนั้นมาสร้างเครือข่ายมัลติคาสต์ระดับแอพพลิเคชันที่เรียกว่ามัลติคาสต์ทรีได้หลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละแบบจะให้ประสิทธิภาพในการกระจายข้อมูลที่แตกต่างกัน เมื่อนำมัลติคาสต์ทรีเหล่านั้นมาวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างสตรีมมิงพาธ พาธและลิงค์ พบว่าสตรีมมิงพาธที่ประกอบด้วยเซตของพาธซึ่งเป็นเส้นทางมโนภาพที่ไม่ซ้ำกัน แต่เมื่อนำพาธเหล่านั้นมาพิจารณาในเชิงกายภาพซึ่งประกอบด้วยเซตของลิงค์กายภาพ พบว่าในสตรีมมิงพาธที่ประกอบด้วยพาธที่ไม่ซ้ำกันนั้น อาจจะมีการใช้ลิงค์กายภาพร่วมกัน ซึ่งทำให้เกิดการส่งข้อมูลเดียวกันผ่านลิงค์กายภาพเดียวกันที่เรียกว่าแพ็กเก็ตซ้ำขึ้น โดยจำนวนแพ็กเก็ตซ้ำที่เกิดขึ้นในเครือข่ายจะมีผลกระทบกับการใช้แบนด์วิดท์ในเครือข่ายซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกระจายข้อมูลโดยตรง

3.4 **การคำนึงถึงโครงสร้างการเชื่อมต่อ** (Topology-Aware)

โดยทั่วไปการสร้างมัลติคาสต์ทรีมีอยู่ 2 แบบ คือ การสร้างจากเครือข่ายเชิงมโนภาพ และการสร้างโดยการคำนึงถึงโครงสร้างการเชื่อมต่อ ในงานวิจัยนี้กล่าวถึงมัลติคาสต์ทรีที่สร้างโดยคำนึงถึงโครงสร้างการเชื่อมต่อ

อัลกอริทึมที่นำเสนอการสร้างมัลติคาสต์ทรีที่คำนึงถึงโครงสร้างการเชื่อมต่อ ส่วนใหญ่นิยมใช้ดีเลย์เป็นเกณฑ์หลักในการบ่งบอกความใกล้ไกลของโหนด เพราะเป็นค่าที่สามารถวัดได้จริงในเครือข่ายโดยใช้โปรแกรมหรือเครื่องมือ (Tool) ต่างๆ เช่น เทรซรูท (Traceroute) [23] พาทชา (Pathchar) [24] แม็กซ์เดลต้า (Max-Delta) [25] เป็นต้น แต่วิธีการหาข้อมูลของเครื่องมือเหล่านี้มักใช้เวลานานและต้องใช้ทรัพยากรมาก จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้จำแนกว่าโหนดและลิงค์ใดอยู่ในโดเมนทรานสิตหรือโดเมนสตับ

เพื่อให้กระบวนการจำแนกทำได้ง่ายขึ้นและใช้เวลาน้อยลง งานวิจัยนี้จึงใช้ประโยชน์จากแบบจำลองทรานสิต-สตับที่ว่า โหนดที่อยู่ในเครือข่ายโลคอล (Local Network) มีแบนด์วิดท์ที่เชื่อมต่อระหว่างกันสูงกว่าโหนดที่อยู่ต่างวงกัน โดยทั่วไปเครือข่ายโลคอลมีอยู่หลายระดับ เช่น ภายในองค์กรเดียวกัน ภายในเมืองเดียวกัน แม้กระทั่งภายในประเทศเดียวกัน อย่างไรก็ตามการแยกแยะกลุ่มของเครือข่ายโลคอลมีอยู่ 3 แนวทาง คือ การแยกแยะโดยใช้ดีเลย์ซึ่งจะ

ประสบปัญหาการใช้ทรัพยากรมากดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การแยกแยะโดยให้ผู้ใช้ระบุซึ่งมีความเสี่ยงต่อความผิดพลาด และการแยกแยะโดยหาความสัมพันธ์ย้อนกลับ (Reverse Lookup) ซึ่งพิจารณาได้จากค่าไอพีแอดเดรส (IP Address) และสามารถทำได้หลายแบบ เช่น การหาค่าจากระบบเครือข่ายอัตโนมัติ (Autonomous System: AS) [26] และการหาค่าที่อยู่ของไอเอสพี (ISP) จากคำสั่งฮูอีส (Whois) [27] การใช้ระบบเครือข่ายอัตโนมัติอาจจะเป็นการแบ่งย่อยจนเกินไปจนไม่สามารถใช้ประโยชน์จากการที่โหนดอยู่ต่างระบบเครือข่ายแต่อยู่ในบริเวณใกล้กันได้ ขณะเดียวกันจากการสังเกตพบว่าคอขวดของเครือข่ายมักจะอยู่ที่ลิงค์ระหว่างประเทศ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้รหัสประเทศเป็นตัวช่วยในการจัดกลุ่มโหนด โดยเรียกว่าเขตที่ตั้ง (Landmark) ในความเป็นจริงไอพีแอดเดรสอาจไม่สามารถให้ค่ารหัสประเทศที่ถูกต้องและตรงกับเขตที่ตั้งจริงของโหนดได้ ซึ่งการนำเขตที่ตั้งมาใช้จำแนกโหนดและชนิดของลิงค์ ทำได้ดังนี้

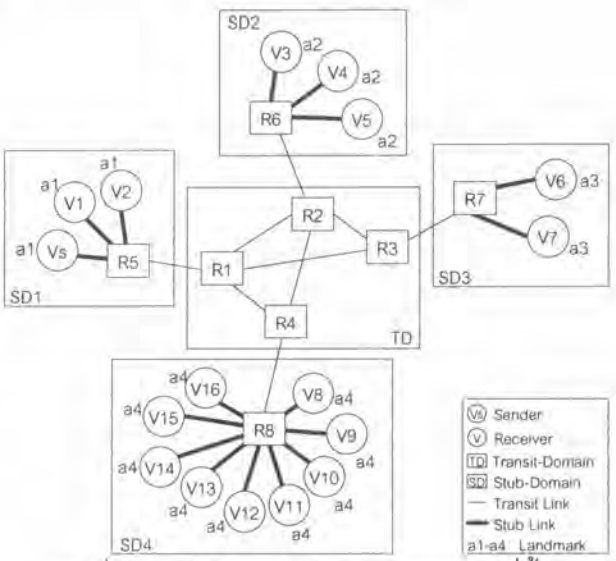
กำหนดให้ v_i และ v_j เป็นโหนดใดๆ และให้ $l(v_i)$ กับ $l(v_j)$ เป็นเขตที่ตั้งของโหนด v_i และ v_j ตามลำดับ โดยมีลิงค์ $e(v_i, v_j)$ เป็นลิงค์ที่เชื่อมระหว่างโหนด v_i และ v_j นั้น

ก) การจำแนกโดเมนสตับ

1. ถ้า $l(v_i) = l(v_j)$ โหนด v_i และ v_j เป็นสมาชิกในโดเมนสตับเดียวกัน
2. ถ้า $l(v_i) \neq l(v_j)$ โหนด v_i และ v_j ไม่ได้อยู่ในโดเมนสตับเดียวกัน

ข) การจำแนกชนิดของลิงค์

ถ้า v_i และ $v_j \notin$ TD และ $l(v_i) = l(v_j)$ ลิงค์ e ที่เชื่อมระหว่างสองโหนดจะเป็นลิงค์สตับ กล่าวคือ $e \in E_s$ ส่วนลิงค์อื่นๆ จะถือว่าเป็นลิงค์ทรานสิต



รูปที่ 3.6 เครือข่ายเชิงกายภาพตามเขตที่ตั้ง

จากรูปที่ 3.6 แสดงเครือข่ายเชิงกายภาพตามเขตที่ตั้งที่มี a_1-a_4 เป็นเขตที่ตั้ง ซึ่งเป็นรหัสประเทศที่ได้จากการสอบถามไปยังไอพีฮูอีส สมมติให้ในเครือข่ายมีโหนดผู้ส่งและผู้รับรวมจำนวน 17 โหนด คือ v_s และ v_1-v_{16} และมีเราเตอร์จำนวน 8 ตัว คือ R_1-R_8 เราเตอร์ที่ใช้สัญลักษณ์สี่เหลี่ยม (R_5-R_8) แทนโหนดภายในโดเมนสตับ ส่วนเราเตอร์ที่ใช้สัญลักษณ์วงกลม (R_1-R_4) แทนโหนดทรานสิตที่เชื่อมระหว่างโดเมน ทรานสิตและโดเมนสตับ จากรูปพบว่า โหนดใดมีเขตที่ตั้งเดียวกัน (อยู่ใน a_i เดียวกัน) จะเป็นโหนดที่อยู่ในโดเมนสตับเดียวกัน ตัวอย่างเช่น โหนด v_6 และ v_7 ที่อยู่ในโดเมน สตับเดียวกันจะมีค่าเขตที่ตั้งเดียวกัน คือ a_3 โดยลิงค์ของโหนดที่อยู่ในโดเมนสตับเดียวกัน เช่น $e(v_s, R_5)$ และ $e(v_1, R_5)$ จะเป็นลิงค์สตับด้วย ส่วนลิงค์ของโหนดที่อยู่ต่างโดเมน เช่น $e(R_5, R_1)$ รวมไปถึงลิงค์ในโดเมนทรานสิต เช่น $e(R_1, R_2)$ จะเป็นลิงค์ทรานสิต

3.5 การวัดประสิทธิภาพมัลติคาสต์ระดับชั้นแอพพลิเคชัน (ALM Performance Metrics)

มัลติคาสต์ทรีระดับชั้นแอพพลิเคชันที่สามารถกระจายข้อมูลโดยใช้แบนด์วิดท์ของเครือข่ายอินเตอร์เน็ตที่มีอยู่จำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการให้บริการถ่ายทอดสด การใช้แบนด์วิดท์อย่างมีประสิทธิภาพเป็นการใช้แบนด์วิดท์โดยคำนึงถึงแบนด์วิดท์ที่ลิงค์มีให้ เนื่องจากลิงค์ทรานสิตมักจะถูกใช้ร่วมกันระหว่างหลายโหนดและโดยปกติแล้วลิงค์ทรานสิตมีแบนด์วิดท์น้อยกว่าแบนด์วิดท์ของลิงค์สตับ ดังนั้นการสร้างมัลติคาสต์ทรีควรเน้นการใช้ลิงค์สตับ ซึ่งจะทำให้สัดส่วนการใช้แบนด์วิดท์บนลิงค์สตับมากกว่าการใช้แบนด์วิดท์ของลิงค์ทรานสิต โดยแนวความคิดการสร้างมัลติคาสต์ทรีที่พยายามเลือกใช้ลิงค์ที่มีแบนด์วิดท์สูงมากกว่าลิงค์ที่มีแบนด์วิดท์ต่ำ เรียกว่า การทำแบนด์วิดท์โลคอล (Bandwidth Localization) ดังนั้นมาตรวัดใช้ประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึม จึงได้แก่ จำนวนแพ็กเก็ตซ้ำ สัดส่วนการใช้แบนด์วิดท์ในเครือข่ายซ้อนทับ สัดส่วนข้อมูลทรานสิต และเวลาสูงสุดที่ใช้ส่งข้อมูลในเครือข่ายซ้อนทับ จากมาตรวัดดังกล่าว ซึ่งมีเฉพาะจำนวนแพ็กเก็ตซ้ำเพียงตัวเดียวที่เป็นมาตรวัดที่ประเมินบนลิงค์กายภาพ ส่วนมาตรวัดอื่นเป็นการประเมินในสตรีมมิงพาธ โดยนิยามของมาตรวัดที่ใช้ มีดังต่อไปนี้

n) จำนวนแพ็กเก็ตซ้ำที่มากที่สุดบนลิงค์ทรานสิต (Transit Link Stress) เป็นมาตรวัดที่ใช้บอกปริมาณแพ็กเก็ตที่ส่งออกไปเกินจำเป็น โดยจำนวนแพ็กเก็จซ้ำบนลิงค์กายภาพ $e(v_i, v_j)$ แทนด้วย $st(e(v_i, v_j))$ การลดจำนวนแพ็กเก็ตซ้ำบนลิงค์ที่มีแบนด์วิดท์น้อย เช่น ลิงค์ทรานสิตให้มีค่าน้อยที่สุด ทำให้เกิดการใช้แบนด์วิดท์ในเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด เพราะทำให้ลิงค์นั้นมีแบนด์วิดท์คงเหลือมากขึ้น โดยจำนวนแพ็กเก็ตซ้ำบนลิงค์ทรานสิต หรือ $st(T)$ เป็นค่าจำนวนแพ็กเก็ตซ้ำที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับลิงค์ทรานสิตทั้งหมดที่ใช้ในเครือข่ายซ้อนทับ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$st(T) = \max_{e(v_i,v_j)\in E_t} \{st(e(v_i,v_j))\} \quad (3.9)$$

ข) สัดส่วนการใช้แบนด์วิดท์ในเครือข่ายซ้อนทับ (Overlay Utilization) จากที่ได้กล่าวถึงลิงค์คอขวดในแบบจำลองเชิงกายภาพว่าเป็นลิงค์ที่มีสัดส่วนการใช้แบนด์วิดท์สูงสุด ดังนั้นสัดส่วนการใช้แบนด์วิดท์ในเครือข่ายซ้อนทับซึ่งหมายถึงลิงค์ที่มีค่าสัดส่วนการใช้แบนด์วิดท์สูงสุดเมื่อเทียบกับทุกลิงค์ในเครือข่ายซ้อนทับ จึงมีค่าเท่ากับสัดส่วนการใช้แบนด์วิดท์บนลิงค์คอขวด เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$u(T) = u(BL) \quad (3.10)$$

ค) สัดส่วนข้อมูลทรานสิต (Transit Byte Ratio) มาตรวัดตัวนี้ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนไบต์ข้อมูลทั้งหมดที่ผ่านลิงค์ทรานสิตกับจำนวนไบต์ข้อมูลทั้งหมดบนเครือข่ายซ้อนทับ โดยค่าความสัมพันธ์นี้เป็นค่าที่แสดงถึงคุณภาพของอัลกอริทึมในการใช้แบนด์วิดท์โลคอล จำนวนไบต์ข้อมูลที่ถูกส่งผ่านลิงค์ทรานสิตยิ่งมีค่ามากเท่าไรยิ่งส่งผลให้ค่าสัดส่วนข้อมูลทรานสิตยิ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้นเท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามัลติคาสต์ทรีนั้นใช้แบนด์วิดท์โลคอลได้น้อย ดังนั้นอัลกอริทึมที่ใช้แบนด์วิดท์โลคอลได้ดี จึงควรมีค่าสัดส่วนการใช้แบนด์วิดท์เข้าใกล้ 0 การหาค่าสัดส่วนข้อมูลทรานสิตหรือ tbr(T) ดังสมการ

$$tbr(T) = \frac{\sum_{e(v_i,v_j)\in E_t} \{tb(e(v_i,v_j))\}}{\sum_{e(v_i,v_j)\in E} \{tb(e(v_i,v_j))\}} \quad (3.11)$$

เมื่อกำหนดให้จำนวนไบต์ข้อมูลทั้งหมดเขียนแทนด้วย tb ผลรวมของจำนวนไบต์ข้อมูลที่ผ่านลิงค์ทรานสิตและจำนวนไบต์ข้อมูลที่ผ่านลิงค์สตับซึ่งมีค่าเท่ากับจำนวนไบต์ข้อมูลทั้งหมดในเครือข่ายซ้อนทับ ดังนั้นค่าสัดส่วนข้อมูลทรานสิตจึงเป็นส่วนเติมเต็มให้กับค่าสัดส่วนข้อมูลสตับ หรือ sbr(T) ดังสมการ

$$sbr(T) = 1 - tbr(T) \quad (3.12)$$

ง) เวลาสูงสุดที่ใช้ส่งข้อมูลในเครือข่ายซ้อนทับ (Overlay Delay) เป็นเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากโหนดผู้ส่งจนไปถึงผู้รับโหนดสุดท้าย ซึ่งเป็นค่าดีเลย์ในสตรีมมิงพาธที่สูงที่สุดในมัลติคาสต์ทรี ดังที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ (3.5) และจากสมมติฐานของงานวิจัยเรื่องการให้บริการถ่ายทอดสด ซึ่งไม่ได้มุ่งเน้นเรื่องเวลาที่ใช้ส่งข้อมูล ดังนั้นค่าดีเลย์ชนิดนี้จึงไม่ได้มี

ความสำคัญสูงสุดในการให้บริการถ่ายทอดสด แต่ค่านี้ก็ไม่ควรมากเกินกว่าค่าเวลาสูงสุดที่ยอมรับได้ (Pre-Defined Bounded)

3.6 การนำไปใช้จริง (Implementation Issue)

การนำมัลติคาสต์ทรีที่สร้างโดยใช้เขตที่ตั้งไปประยุกต์ใช้จริงต้องอาศัยกระบวนการจัดการข้อมูลเกี่ยวข้องกับโหนดและการเชื่อมต่อทั้งหมด ซึ่งสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบรวมศูนย์และแบบกระจายศูนย์

1) แบบรวมศูนย์ (Centralize) ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโหนดและการเชื่อมต่อทั้งหมดในมัลติคาสต์ทรีถูกเก็บอยู่ที่โหนดรูต เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในมัลติคาสต์ทรี เช่น การเพิ่มโหนดใหม่หรือการลบโหนดออกจากมัลติคาสต์ทรี โหนดที่เกี่ยวข้องต้องส่งการอัพเดทนั้นไปที่โหนดรูตทุกครั้ง เพื่อให้โหนดรูตดำเนินการเพิ่มหรือลบโหนด

2) แบบกระจายศูนย์ (Distributed) ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโหนดและการเชื่อมต่อบางส่วน เช่น ข้อมูลพื้นที่ตั้งของโหนดถูกเก็บอยู่ที่โหนดแต่ละโหนดนั้นเอง เมื่อเกิดการเพิ่มโหนดใหม่หรือการลบโหนดออกจากมัลติคาสต์ทรี การดำเนินการนั้นจะเกี่ยวข้องกับโหนดต่างๆ ในมัลติคาสต์ทรีตามความสัมพันธ์จากบนลงล่าง