

วิธีการปรับตัวส่ง-ปรับตัวรับสำหรับเข้าถึงโครงข่ายวงแหวนสลอต  
มัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบหลายช่องสัญญาณ  
บนโครงข่ายเมืองภายใต้ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง

A TUNABLE TRANSMITTER-TUNABLE RECEIVER ALGORITHM FOR  
ACCESSING THE MULTICHANNEL SLOTTED-RING WDM METROPOLITAN  
NETWORK UNDER SELF-SIMILAR TRAFFIC

เอกอนันต์ สมบัติสกุลกิจ  
EKANUN SOMBATSAKULKIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1160-4

วิธีการปรับตัวส่ง-ปรับตัวรับสำหรับเข้าถึงโครงข่ายวงแหวนสล็อต  
มัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบหลายช่องสัญญาณ  
บนโครงข่ายเมืองภายใต้ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง

A TUNABLE TRANSMITTER-TUNABLE RECEIVER ALGORITHM FOR  
ACCESSING THE MULTICHANNEL SLOTTED-RING WDM METROPOLITAN  
NETWORK UNDER SELF-SIMILAR TRAFFIC

เอกอนันต์ สมบัติสกุลกิจ  
EKANUN SOMBATSAKULKIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2547

ISBN 974-15-1160-4

TUNABLE TRANSMITTER-TUNABLE RECEIVER ALGORITHM FOR  
ACCESSING THE MULTICHANNEL SLOTTED-RING WDM METROPOLITAN  
NETWORK UNDER SELF-SIMILAR TRAFFIC

EKANUN SOMBATSAKULKIT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATION ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2004

ISBN 974-15-1160-4

COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วิธีการปรับตัวส่ง - ปรับตัวรับสำหรับเข้าถึงโครงข่ายวงแหวนสล็อตมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบหลายช่องสัญญาณบนโครงข่ายเมืองภายใต้ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง
นักศึกษา	นายเอกอนันต์ สมบัติสกุลกิจ
รหัสนักศึกษา	45061061
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. สุวิพล สิทธีวีภาค

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการศึกษาและวิเคราะห์สมรรถนะของวิธีการในการเข้าถึงวงแหวนสล็อตเต็มแมคโปรโตคอล ในโครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น วิธีการที่นำเสนอนี้ใช้วิธีการแบบตัวส่งปรับความยาวคลื่นและตัวรับปรับความยาวคลื่นได้ ซึ่งตัวส่งสามารถส่งข้อมูลไปบนความยาวคลื่นหรือช่องสัญญาณใดๆ ที่มีสล็อตว่าง และสามารถรับข้อมูลจากความยาวคลื่นใดๆ ที่มีปลายทางมายังตัวรับ วิธีการที่นำเสนอได้นำเอาข้อดีของการใช้อินพุตทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง ซึ่งเป็นทราฟฟิกที่ขึ้นกับช่วงเวลาที่ยาว เมื่อเปรียบเทียบกับทราฟฟิกแบบบิวของที่ขึ้นกับช่วงเวลาสั้นๆ นอกจากนี้ยังใช้การกำหนดสล็อตว่างที่ตัวรับ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานแบนด์วิธของความยาวคลื่นทำให้สล็อตไม่จำเป็นต้องเดินทางย้อนกลับไปยังตัวส่งเพื่อกำหนดให้เป็นสล็อตว่าง จากผลการจำลองพบว่าวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานเครือข่าย เพิ่มค่าวิสัยสามารถของการส่งข้อมูล และลดค่าหน่วงเวลาของการรอคอยการส่งในคิวลง

Thesis Title	A Tunable Transmitter - Tunable Receiver Algorithm for accessing the Multichannel Slotted-Ring WDM Metropolitan Network under Self-Similar Traffic
Student	Mr.Ekanun Sombatsakulkit
Student ID.	45061061
Degree	Master of Engineering
Programme	Telecommunication Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Suvepon Sittichivapak

## ABSTRACT

This thesis presents an algorithm for Slotted-Ring Medium Access Protocol using in Wavelength Division Multiplexing Networks. The algorithm is based on the Tunable Transmitter – Tunable Receiver (TT-TR) approach, in which the transmitting node can send a packet over any wavelength and the receiving node can receive a packet from any wavelength. Moreover, the self-similar traffic distribution is used in the algorithm, for the purpose of better performance over long duration than short duration of the Poisson distribution. In order to increase the bandwidth efficiency, the destination stripping approach is used to mark the slot which has already reached the desired destination as an empty slot immediately at the destination node, so the slot does not need to go back to the source node to be marked as an empty slot as in the source stripping approach. From the simulation result, it is clear that the proposed algorithm overcomes the higher network utilization and average throughput per node, and reduces the average queuing delay.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วย ความกรุณาจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ คือ รศ.ดร. สุวิพล สิริชีวภาค ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ และ ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพานิชย์ กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ ดร.ประภา ภักดิ์โพธิ์ และ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาในการศึกษาต่อนี้

ขอขอบคุณ พี่วิเศษศักดิ์ เสงี่ยมศักดิ์ ที่ช่วยให้คำปรึกษาและแก้ปัญหาต่าง ๆ ในงานวิจัย รวมทั้งทุกๆ คนที่มีได้เอื้อนามในที่นี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และ ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

เอกอนันต์ สมบัติสกุลกิจ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีและหลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.6 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์.....	4
1.7 โครงร่างวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น.....	6
2.1 พื้นฐานของระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น.....	6
2.2 สถาปัตยกรรมระบบโครงข่ายวงแหวนการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น.....	8
2.2.1 โครงข่ายวงแหวนมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบสลิต.....	8
2.2.2 โครงข่ายวงแหวนมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบมัลติโทเจน.....	11
2.2.3 โครงข่ายวงแหวนมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบตาข่าย.....	13
2.3 โปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อ.....	14
2.4 วิธีการถอดสลิตให้อากาศ.....	17
2.5 ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและทราฟฟิกแบบปัวซอง.....	18
2.5.1 แหล่งกำเนิดทราฟฟิก.....	18
2.5.2 ทราฟฟิกแบบปัวซอง.....	20
2.5.3 ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง.....	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 FT – TR และ TT – FR .....	28
3.1 Fixed Transmitter – Tuned Receiver (FT-TR).....	28
3.2 Tuned Transmitter – Fixed Receiver (TT-FR).....	31
บทที่ 4 โปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อที่นำเสนอ.....	34
4.1 สรุปปัญหาของระบบและแนวความคิดของการพัฒนา.....	34
4.2 วิธีการที่นำเสนอ Tuned Transmitter – Tuned Receiver (TT-TR).....	35
บทที่ 5 แบบจำลองของระบบและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการจำลองแบบ.....	38
5.1 ข้อกำหนดและพารามิเตอร์ของการจำลองแบบ.....	38
5.2 ผลการเปรียบเทียบกราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองกับกราฟฟิกแบบบัวของ.....	41
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	54
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	54
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
เอกสารอ้างอิง.....	56
ผลงานวิจัยและบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	61

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงรายละเอียดพารามิเตอร์โครงข่าย.....	29
5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ.....	40

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดที่ใช้ทราฟฟิกแบบบิวของและใช้การทำให้สล็อตว่าง ที่โหนดส่ง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4.....	42
5.4 ค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้ทราฟฟิกแบบบิวของและใช้การทำให้สล็อตว่าง ที่โหนดส่ง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4.....	43
5.5 ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดที่ใช้ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้ สล็อตว่างที่โหนดส่ง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4.....	44
5.6 ค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้ สล็อตว่างที่โหนดส่ง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4.....	45
5.7 ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดที่ใช้ทราฟฟิกแบบบิวของและใช้การทำให้สล็อต ว่างที่โหนดปลายทาง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4.....	46
5.8 ค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้ทราฟฟิกแบบบิวของและใช้การทำให้สล็อตว่างที่ โหนดปลายทาง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4.....	47
5.9 ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดที่ใช้ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้ สล็อตว่างที่โหนดปลายทาง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4.....	48
5.10 ค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้ สล็อตว่างที่โหนดปลายทาง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4.....	49
5.11 ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดที่ใช้ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การ ทำให้สล็อตว่างที่โหนดส่ง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณ เท่ากับ 4 และจำกัดบัฟเฟอร์คิวที่ 100.....	50
5.12 ค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การ ทำให้สล็อตว่างที่โหนดส่ง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณ เท่ากับ 4 และจำกัดบัฟเฟอร์คิวที่ 100.....	51

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดที่ใช้กราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้ สลัดว่างที่โหนดปลายทาง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณ เท่ากับ 4 และจำกัดบัพเฟอร์คิวที่ 100.....	52
5.14 ค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้กราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้ สลัดว่างที่โหนดส่ง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 และจำกัดบัพเฟอร์คิวที่ 100.....	53

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 กล่าวนำ

เนื่องจากความนิยมของอินเทอร์เน็ตที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังมีปริมาณการใช้งานด้านมัลติมีเดียและการบริการต่างๆ มากยิ่งขึ้น ซึ่งนำไปสู่ความต้องการแบนด์วิดท์ในโครงข่ายที่เพิ่มขึ้น การนำโครงข่ายความเร็วสูงเข้ามาใช้งานจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing (WDM)) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ ทำให้ได้แบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลเมื่อใช้ 16 ความยาวคลื่นที่ OC-48 เป็น 40 Gb/s และหากใช้ 32 ความยาวคลื่นที่ OC-192 จะได้แบนด์วิดท์เพิ่มเป็น 320 Gb/s และเมื่อไม่นานมานี้ยังได้มีการนำเสนอเทคโนโลยี Dense Wavelength Division Multiplex (DWDM) ซึ่งช่วยเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ส่งข้อมูลให้สูงถึง 100 ความยาวคลื่นต่อใยแก้ว 1 เส้น ทำให้ใยแก้วเพียงเส้นเดียวสามารถส่งข้อมูลได้หลายร้อยจีกะบิต (Gigabits) ต่อวินาที ดังนั้นจึงเป็นที่คาดการณ์ว่าระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น (WDM) จะถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานของโครงข่ายเมือง (Metropolitan Area Network (MAN)) ในยุคถัดไป [1] - [4]

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอการพัฒนาวิธีการควบคุมการเข้าถึงสื่อวิธีการใหม่ (Medium Access Protocol) โดยใช้เทคนิคของการใช้ตัวส่งและตัวรับข้อมูลที่สามารถปรับค่าได้ (Tunable Transmitter – Tunable Receiver (TT-TR)) หรือสามารถเลือกช่องสัญญาณในโครงข่ายเพื่อทำการรับส่งข้อมูลได้โดยไม่ต้องกำหนดช่องสัญญาณตายตัว วิธีการที่นำเสนอนี้เป็นส่วนหนึ่งของโปรโตคอล MAC (Medium Access Control Protocol) บนโครงข่ายวงแหวนสล็อตมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบหลายช่องสัญญาณ (Multichannel Slotted Ring WDM Network) โดยได้มีการพัฒนาโปรแกรมจำลองแบบขึ้นเพื่อใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานของวิธีการที่ได้นำเสนอ นอกจากนี้ในการจำลองแบบยังได้มีการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างอินพุตทราฟฟิกแบบบิวซอง (Poisson Traffic) และอินพุตทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง (Self-Similar Traffic) ซึ่งทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองจะมีลักษณะใกล้เคียงกับทราฟฟิกที่เกิดขึ้นจริงในโครงข่ายมากกว่าทราฟฟิกแบบบิวซอง โดยเฉพาะในกรณีที่มีการส่งข้อมูลในช่วงเวลายาวนาน จากผลการจำลองพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานเครือข่าย เพิ่มค่าวิสัยความสามารถของการส่งข้อมูล และลดค่าหน่วงเวลาของการรอคอยการส่งในคิวลง

## 1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาที่กำลังศึกษาและวิจัยเป็นปัญหาเกี่ยวกับระบบโครงข่ายวงแหวนการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplex Ring Network) ที่มีการส่งแบบสล็อตและมีหลายช่องสัญญาณไปบนสายใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียว สำหรับการส่งแบบสล็อตนั้นวงแหวนจะถูกแบ่งเป็นช่องๆ ละเท่าๆ กัน เพื่อให้บรรจุข้อมูลและแต่ละสล็อตจะเคลื่อนที่ไปทิศทางเดียวกัน สำหรับการส่งข้อมูลแต่ละโหนดจะส่งข้อมูลเข้าไปในสล็อตที่ว่าง ซึ่งสล็อตที่ได้รับข้อมูลจะเคลื่อนที่ไปตามวงแหวนผ่านโหนดต่างๆ โหนดแต่ละโหนดจะตรวจสอบข้อมูลว่าเป็นของตนหรือไม่ ถ้าใช่ก็จะเก็บข้อมูลนี้ไว้ ถ้าไม่ใช่ก็ปล่อยข้อมูลนี้ไป จนถึงโหนดปลายทางที่ต้องการส่งซึ่งจะมีการรับข้อมูลไป เมื่อข้อมูลถูกส่งอย่างสมบูรณ์สล็อตจะถูกทำให้ว่าง เพื่อให้สามารถรับส่งข้อมูลใหม่ได้

ปัญหาที่สนใจคือ การพัฒนาโปรโตคอลเข้าถึงสื่อ (MAC Protocol) ซึ่งใช้ในการรับ/ส่งข้อมูลเข้าออกจากช่องสัญญาณ และจัดการกับสล็อตที่ว่างหลังจากการส่งข้อมูลเสร็จแล้ว เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด เช่น ค่าวิสัยสามารรถ (Throughput) เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันได้มีผู้เสนอวิธีการมากมายในการแก้ปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตามวิธีการต่างๆ ที่ได้มีการนำเสนอ นั้นสามารถสรุปได้ว่ามีพื้นฐานอยู่บนระบบการควบคุมการเข้าถึงสื่อ 2 วิธี ได้แก่

1. การเลือกใช้งานช่องสัญญาณโดยช่องสัญญาณตัวส่ง (หรือโหนดส่ง) แบบปรับได้และช่องสัญญาณตัวรับ (หรือโหนดรับ) แบบคงที่ (Tunable Transmitter – Fixed Receiver (TT-FR)), และ
2. การเลือกใช้งานช่องสัญญาณโดยช่องสัญญาณตัวส่งคงที่และช่องสัญญาณตัวรับปรับได้ (Fixed Transmitter – Tunable Receiver (FT-TR))

สำหรับวิธีการแรกมีข้อดีคือไม่มีการชนกันของข้อมูลที่ตัวรับเนื่องจากมีการกำหนดช่องสัญญาณในการรับไว้ก่อนแล้ว แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือจำนวนช่องสัญญาณจะต้องมีจำนวนเท่ากับจำนวนของโหนดซึ่งจะทำให้ความสามารถในการขยายขนาดของโครงข่ายมีจำกัด ตัวอย่างเช่น สำหรับ OC-48 ซึ่งใช้งานได้สูงสุด 16 ความยาวคลื่นจะสามารถขยายขนาดได้สูงสุดเพียง 16 โหนดเท่านั้น เป็นต้น

อย่างไรก็ตามวิธีการที่สองแก้ไขข้อด้อยของวิธีการแรกโดยการกำหนดช่องสัญญาณส่งที่คงที่และอนุญาตให้โหนดหลายๆ โหนดใช้ช่องสัญญาณร่วมกันได้ จึงทำให้ลดข้อจำกัดในการขยายขนาดของโครงข่ายลง อย่างไรก็ตามปัญหาที่ตามมาคือเกิดปัญหาการชนกันของข้อมูลที่โหนดรับเนื่องจากตัวรับจะต้องรอรับข้อมูลจากทุกๆ ช่องสัญญาณ

### 1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษาพื้นฐานของระบบโครงข่ายวงแหวนสล็อตมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบหลายช่องสัญญาณ วิธีการถอดสล็อตให้ว่าง พื้นฐานของทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง และทราฟฟิกแบบบิวซอง
- 2) เพื่อพัฒนาโปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Medium Access Control Protocol (MAC)) ในการเข้าถึงช่องสัญญาณบนโครงข่ายวงแหวนสล็อตมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบหลายช่องสัญญาณ
- 3) เพื่อพัฒนาวิธีการควบคุมการเข้าถึงสื่อที่มีความสามารถในการเพิ่มค่าวิสัยสามารถของระบบให้สูงขึ้น ลดค่าเวลาประวิงของการรอคอยการส่งในคิวให้ต่ำลง ลดปัญหาการชนกันของข้อมูลที่ตัวรับ และสามารถลดข้อจำกัดในด้านการขยายโครงข่าย

### 1.4 ทฤษฎีและหลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์

เพื่อแก้ไขปัญหาดังที่กล่าวมาแล้ววิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอวิธีการควบคุมการเข้าถึงสื่อ โดยใช้กระบวนการที่ทั้งตัวส่งและตัวรับสามารถปรับช่องสัญญาณในการรับส่งข้อมูลได้ (Tunable Transmitter – Tunable Receiver (TT-TR)) ซึ่งช่วยลดค่าหน่วยเวลาของการรอคอยการส่งในคิวลง จึงเป็นการเพิ่มค่าวิสัยสามารถให้สูงขึ้น การปรับช่องสัญญาณได้นี้ทำให้โครงข่ายสามารถมีจำนวนโหนดมากกว่าจำนวนช่องสัญญาณได้จึงไม่เกิดปัญหาทางด้านขยายขนาดของโครงข่ายในอนาคต

นอกจากนี้เพื่อเพิ่มค่าวิสัยสามารถในการส่งข้อมูล ได้มีการนำเทคนิคการสำหรับการทำเครื่องหมายกับสล็อตที่ว่างด้วยวิธีการถอดที่ปลายทาง (Destination Stripping Operation) เข้ามาใช้ เนื่องจากวิธีการถอดที่แหล่งกำเนิด (Source Stripping Operation) จะใช้การทำเครื่องหมายให้สล็อตว่างหลังจากที่วนจนครบรอบแล้วโดยโหนดส่งทำให้สล็อตต้องเคลื่อนที่จบครบรอบ แล้วจึงจะถูกใช้งานได้ในรอบถัดไปทำให้ขาดประสิทธิภาพ แต่วิธีการถอดที่ปลายทางจะมีข้อดีที่การทำเครื่องหมายที่สล็อตนั้นว่าเป็นสล็อตว่างสามารถทำได้ที่โหนดรับ ทำให้สล็อตสามารถใช้งานได้ในโหนดถัดไป โดยไม่ต้องรอจนครบรอบ ทำให้ได้ค่าวิสัยสามารถที่สูงกว่าและค่าเวลาประวิงที่ต่ำกว่าวิธีการถอดที่ต้นทาง Source Stripping วิธีการที่นำเสนอจึงเลือกวิธีการถอดที่ปลายทาง มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล

เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาด้านการชนกันของข้อมูลที่ตัวรับ วิธีการที่นำเสนอจึงได้ออกแบบให้เพิ่มบัฟเฟอร์ที่ตัวรับให้มีจำนวนเท่ากับจำนวนช่องสัญญาณ จึงทำให้สามารถรับข้อมูลจากหลายๆ ช่องสัญญาณได้ในเวลาเดียวกัน จึงเป็นการลดปัญหาการชนกันของข้อมูลลง

ในการจำลองแบบเพื่อทดสอบสมรรถนะของวิธีการที่นำเสนอ ได้นำเอาข้อดีของการใช้อินพุตกราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง ซึ่งเป็นกราฟฟิกที่มีค่าวาเรียน (Variance) สูงหรือมีการเปลี่ยนแปลงสูงแม้ในช่วงเวลาที่นานๆ ซึ่งคล้ายกับกราฟฟิกจริง ต่างจากกราฟฟิกบิวของที่จะมีการเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อมีการกำเนิดกราฟฟิกในช่วงเวลานานๆ โดยจะมีการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอินพุตกราฟฟิกทั้งสองแบบ

## 1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์มีดังต่อไปนี้

1. วิทยานิพนธ์นี้มุ่งศึกษาการพัฒนาโปรโตคอล MAC ในการเข้าถึงโครงข่ายวงแหวน สล็อตมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบหลายช่องสัญญาณ
2. ใช้อินพุตกราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง เพื่อให้คล้ายคลึงกับกราฟฟิกในโครงข่ายจริงมากที่สุด และได้ผลการทดลองใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบผลการทดลองกับกราฟฟิกแบบบิวของ
3. การวิจัยนี้ได้ทำการจำลองแบบบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล AMD Athlon XP Processor 1800 เมกกะเฮิร์ตซ์ RAM 128 เมกกะไบต์ ซึ่งทำการคำนวณการจำลองแบบด้วยโปรแกรมแมทแล็บ เวอร์ชัน 6.1 (MATLAB Version 6.1) ของบริษัท แมทซอฟท์ จำกัด (Mathsoft Co., Ltd.)
4. พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดสมรรถนะของวิธีการที่นำเสนอ ได้แก่ ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดและค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิว

## 1.6 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์มีดังต่อไปนี้

1. กำหนดหัวข้อ เป้าหมาย จุดประสงค์ และขอบเขตการทำวิทยานิพนธ์
2. ศึกษาทฤษฎี และหลักการพื้นฐานที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์
3. ศึกษาและทำการสร้างแบบจำลองเครือข่ายที่ใช้ในการทดลอง
4. ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโปรโตคอล MAC
5. ศึกษาขั้นตอนการทำงานและปัญหาของวิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณที่มีผู้เสนอมาแล้ว
6. ออกแบบวิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณวิธีการใหม่เพื่อแก้ไขปัญหา
7. ทำการจำลองแบบ สรุปผลการทดลอง และเสนอแนวทางในการทำวิจัยต่อไป
8. จัดทำเอกสารประกอบวิทยานิพนธ์

## 1.7 โครงร่างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอวิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบตัวส่งและตัวรับปรับค่าได้ (Tunable Transmitter – Tunable Receiver (TT-TR)) สำหรับโปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Medium Access Control Protocol (MAC)) บนโครงข่ายวงแหวนสล롯มัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบหลายช่องสัญญาณ (Multichannel Slotted Ring WDM Network) โดยรายละเอียดต่างๆ ภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดแบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 6 บท ซึ่งแต่ละบทจะมีหัวข้อและเนื้อหาดังต่อไปนี้

### บทที่ 1 บทนำ

จะกล่าวถึงลักษณะทั่วไปของวิทยานิพนธ์ ตั้งแต่ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ทฤษฎีและหลักการต่างๆ ที่นำมาใช้ในงานวิจัย ขอบเขต วิธีการทำ และโครงร่างของวิทยานิพนธ์

### บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

อธิบายถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในวิทยานิพนธ์ ได้แก่พื้นฐานของระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น สถาปัตยกรรมระบบโครงข่ายวงแหวนการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น โปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อ วิธีการถอดสลอตให้ว่าง ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง และทราฟฟิกแบบบิวของ

### บทที่ 3 FT-TR และ TT-FR

อธิบายถึงรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ คือโปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อ ประเภท Fixed Transmitter – Tunable Receiver (FT-TR) และ Tunable Transmitter – Fixed Receiver (TT-FR)

### บทที่ 4 โปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อที่นำเสนอ

อธิบายถึงรายละเอียดของโปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อที่นำเสนอ คือ Tunable Transmitter -Tunable Receiver (TT-TR)

### บทที่ 5 แบบจำลองของระบบและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการจำลองแบบ

### บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

อธิบายถึงผลการวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางในการพัฒนาในอนาคต

## บทที่ 2

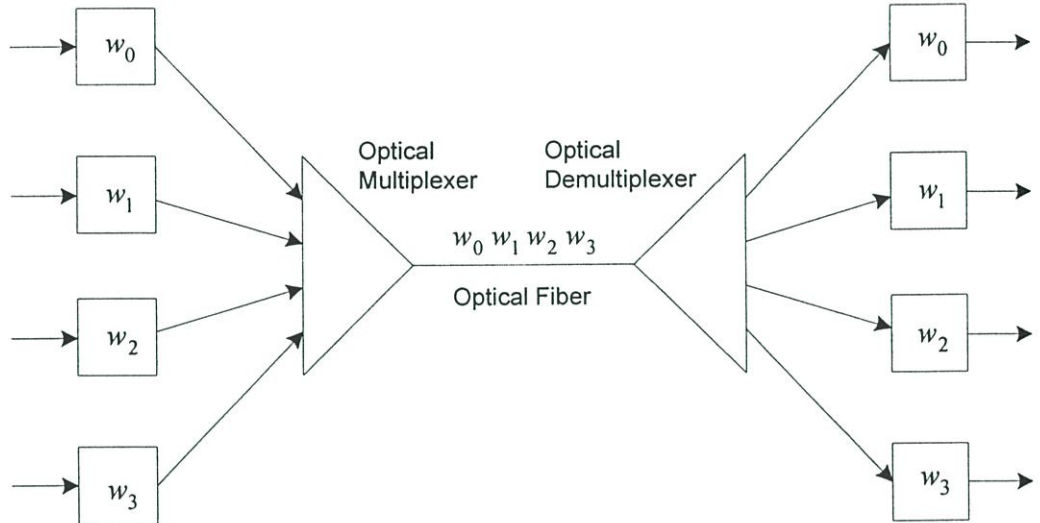
# การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

### 2.1 พื้นฐานของระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing หรือ WDM) คือ การมัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณจำนวนหนึ่งรวมกันเพื่อส่งผ่านสื่อนำสัญญาณเส้นใยแก้วนำแสงหนึ่งเส้น โดยช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณอาศัยคลื่นพาห้ที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างมากสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้สร้างโครงข่ายความเร็วสูง (High-Speed Network) ที่สามารถส่งผ่านข้อมูลได้หลายประเภทพร้อมๆ กัน เช่น ข้อมูล ภาพ หรือเสียง ภายในโครงข่ายเดียว จุดเด่นของ WDM คือเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงสามารถเข้าไปใช้ประโยชน์แบนด์วิดท์ของเส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการทำงานในลักษณะเช่นนี้มิใช่ข้อได้เปรียบกว่าเทคโนโลยี TDM (Time Division Multiplexing) ที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ตรงที่ช่องสัญญาณแต่ละช่องไม่จำเป็นต้องเป็นต้องมีอัตราการส่งที่สูงมาก แต่อาศัยช่องสัญญาณหลายช่องบนคลื่นพาห้หลายความยาวคลื่นแทนเพื่อให้ได้ความจุสูงตามต้องการ เมื่ออัตราการส่งของช่องสัญญาณแต่ละช่องไม่สูงมาก การออกแบบอุปกรณ์แต่ละส่วนจึงทำได้ง่ายไม่ซับซ้อน ในขณะที่หากใช้เทคโนโลยี TDM เพื่อให้ได้ช่องสัญญาณที่มีอัตราการส่งสูงมากเทียบเท่ากัน การออกแบบอุปกรณ์แต่ละส่วนจะซับซ้อนมาก ต้องอาศัยเทคนิคการจัดการรูปสัญญาณที่ยุ่งยาก ด้วยเหตุนี้ในปัจจุบันจึงไม่นิยมใช้เทคโนโลยี TDM สำหรับระบบที่มีอัตราการส่งสูงเกินกว่าหลายสิบลบ Gbit/s

ในทางทฤษฎีสายใยแก้วมีแบนด์วิดท์ประมาณ 25 THz มีแถบการลดทอนที่ต่ำประมาณ 1.55 และเป็น 1000 เท่าของผลรวมคลื่นวิทยุทั้งหมดบนโลก อย่างไรก็ตามอัตราการส่งข้อมูล (Data Rate) จะได้ประมาณ 2-3 Gb/s เท่านั้น เนื่องจากแบนด์วิดท์ทางแสงและทางอิเล็กทรอนิกส์ไม่เข้ากันหรือเรียกว่าคอขวดทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Bottleneck) เพราะอัตราที่ผู้ใช้ปลายทางสามารถเข้าถึงโครงข่ายถูกจำกัดโดยความเร็วของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีประมาณ 2-3 Gb/s ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการยากที่จะใช้ประโยชน์ทั้งหมดของแบนด์วิดท์ที่มากมายนี้อยู่บนสายใยแก้ว 1 เส้นด้วยช่องสัญญาณที่มีความจุสูงเพียงหนึ่งช่อง เมื่อเร็ว ๆ นี้เทคโนโลยีการส่งข้อมูลได้รับการพัฒนาให้ใช้ได้ถึงระดับ Tb/s โดยใช้การพัฒนา 2 วิธีใหญ่ๆ คือ วิธีการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น ซึ่งเป็นวิธีการส่งแสงหลายๆ สีไปบนความยาวคลื่นที่แตกต่างกันบนใยแก้วเส้นเดียวกันและวิธี Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) ซึ่งขยายสัญญาณที่ความยาวคลื่นที่แตกต่างกันโดยไม่คำนึงถึงวิธีการมอดูเลชันหรือความเร็ว

WDM มีนิยามที่คล้ายกับ Frequency Division Multiplexing (FDM) ซึ่งรวมสัญญาณข้อมูลมอดูเลตกับสัญญาณทางแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน และสัญญาณก็จะถูกรวมเข้าด้วยกันและส่งไปบนใยแก้วเส้นเดียวกันในเวลาเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.1 ปริซึมและเกรตติงใช้ในการรวม (Multiplex) หรือ แยก (Demultiplex)



รูปที่ 2.1 การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

ในกรณี FDM จะใช้เทคนิคการรวมช่องสัญญาณวิทยุหลายๆ ช่องสัญญาณเพื่อส่งไปบนอากาศหรือการรวมช่องสัญญาณโทรศัพท์หลายๆ ช่องสัญญาณเพื่อส่งไปบนสายเคเบิล แต่ในระบบทางแสงของ WDM จะใช้แผ่นเกรตติงเพื่อแยกสีหรือความยาวคลื่นออกจากกัน ข้อมูลแต่ละช่องสัญญาณจะถูกส่งมาบนสีหรือความยาวคลื่นที่ต่างกัน การใช้แสงเป็นคลื่นพาห่นี้ทำให้ WDM ดังนั้นจึงมีความน่าเชื่อถือสูง คลื่นพาหของแต่ละช่องสัญญาณของ WDM สูงกว่า TDM เป็นล้านเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับในทางความถี่ (THz กับ MHz) ในช่องสัญญาณของ WDM หนึ่งช่องสัญญาณอาจถูกแบ่งย่อยเป็นส่วนๆ เพื่อใช้ส่งสัญญาณ FDM ได้ซึ่งจะทำให้แบนด์วิดของช่องสัญญาณ WDM ถูกแบ่งย่อยเป็นช่องสัญญาณความถี่วิทยุหลายๆ ช่องที่ความถี่ที่แตกต่างกัน ซึ่งถูกเรียกว่า การมัลติเพล็กซ์คลื่นพาหย่อย (Subcarrier Multiplexing) นอกจากนี้ความยาวคลื่นสามารถถูกใช้งานร่วมกันโดยโหมดหลายๆ โหมดในโครงข่าย โดยใช้การมัลติเพล็กซ์ทางเวลา (TDM)

WDM สามารถกำจัดปัญหาคอขวดทางอิเล็กทรอนิกส์โดยแบ่งสเปกตรัมของการส่งทางแสง (1.55 micron band) ด้วยช่องสัญญาณของความยาวคลื่นที่ไม่ซ้อนทับกันที่อยู่ในเวลาเดียวกันบนใยแก้วนำแสง โดยแต่ละความยาวคลื่นที่ได้รับการแบ่งจะมีขนาดแบนด์วิดเท่ากับความเร็วสูงสุดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จึงเป็นการใช้แบนด์วิดอย่างคุ้มค่า ความน่าสนใจของ

WDM อีกประการหนึ่งคือการขยายแบนด์วิดท์ใช้การลงทุนต่ำมาก ตัวอย่างเช่น ต้องการส่งข้อมูลที่ 40 Gb/s บนระยะทาง 600 กิโลเมตร หากในระบบดั้งเดิมแบบ 16 ช่องสัญญาณต้องใช้สายใยแก้วจำนวน 16 คู่ และต้องใช้รีเจเนอเรเตอร์ 224 ตัว  $((600/40-1)*16)$  โดยรีเจเนอเรเตอร์หรือเครื่องขยายสัญญาณจะติดตั้งไว้ที่ทุกๆ 40 กิโลเมตร แต่ในระบบ WDM แบบ 16 ช่องสัญญาณ ใช้สายใยแก้วนำแสงเพียง 1 คู่ และเครื่องขยายสัญญาณแสง (Optical Amplifier) เพียง 4 เครื่อง  $(600/120-1)$  โดยเครื่องขยายสัญญาณจะวางไว้ทุกๆ 120 กิโลเมตร ดังนั้นระบบ WDM จึงสามารถนำมาใช้พัฒนาความจุของระบบการส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุดระบบเดิมได้ โดยเพิ่มความยาวคลื่นของระบบ WDM เช่น 16 ความยาวคลื่นที่ OC-48 และ 32 ความยาวคลื่นที่ OC-192 สามารถเพิ่มแบนด์วิดท์เป็น 40 และ 320 Gb/s ตามลำดับ และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยี DWDM (Dense WDM) เพื่อใช้เพิ่มประสิทธิภาพของจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดในใยแก้ว โดยใช้ช่องสัญญาณที่มีพื้นที่ว่างระหว่างช่องสัญญาณแคบมากๆ โดยที่ว่างระหว่างช่องสัญญาณ มีขนาดเพียง 0.4 ถึง 4 นาโนเมตร (50 GHz ถึง 500 GHz) เท่านั้น

## 2.2 สถาปัตยกรรมระบบโครงข่ายวงแหวนการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

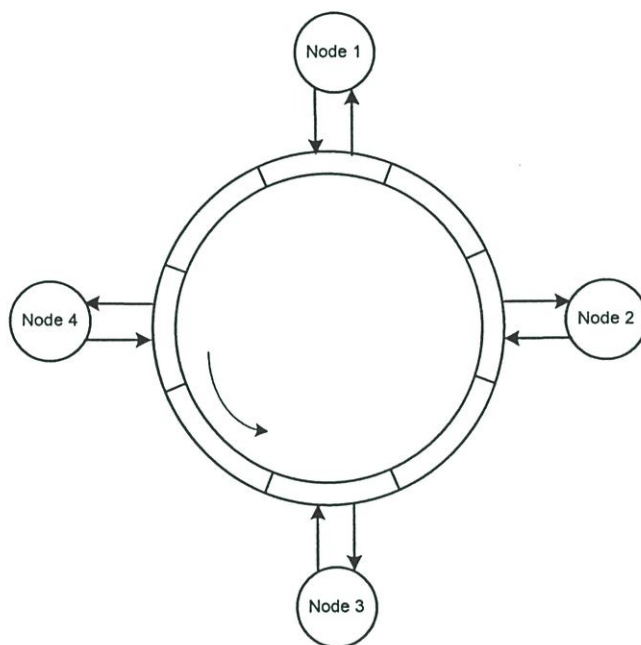
สถาปัตยกรรมของโครงข่ายวงแหวนการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบหลายช่องสัญญาณ สามารถแบ่งได้ 3 ชนิด [5] คือ โครงข่ายวงแหวนมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบสล롯 (Slotted WDM Ring Networks), โครงข่ายวงแหวนมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบมัลติโทเคน (Multi-token WDM Ring Networks) และโครงข่ายวงแหวนมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบตาข่าย (Meshed WDM Ring Networks)

### 2.2.1 โครงข่ายวงแหวนมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบสลอต (Slotted WDM Ring Networks)

โครงข่ายประเภทนี้จะใช้การแบ่งแบนด์วิดท์ของโครงข่ายวงแหวนออกเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่า สลอต (Slot) ดังรูปที่ 2.2 ข้อมูลที่ถูกส่งจะถูกแบ่งย่อยออกเป็นส่วนๆ มีขนาดเท่ากับส่วนบรรทุก (Payload) ของสลอต และจะถูกส่งไปบนสลอตว่าง (Empty Slot) สลอตทุกตัวในโครงข่ายจะเดินทางในทิศทางเดียวกัน (Unidirectional Transmission) เมื่อสลอตที่บรรจุข้อมูลเดินทางมาถึงโหนดปลายทางที่ต้องการ ข้อมูลจะถูกถอดออกจากสลอต ทำให้สลอตว่างลงและสามารถบรรจุข้อมูลใหม่เข้าไปได้ และจากที่กล่าวมาแล้วว่า WDM ประกอบด้วยช่องสัญญาณหลายๆ ช่องสัญญาณ ดังนั้นแต่ละช่องสัญญาณจะถูกแบ่งย่อยออกเป็นสลอต และแต่ละช่องสัญญาณจะทำงานอย่างเป็นอิสระต่อกัน

โหนดแต่ละโหนดในโครงข่ายประเภทนี้จะมี Optical Add-Drop-Multiplexer (OADM) ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มขึ้น (Add) และลดลง (Drop) ของข้อมูลเข้าและออกจากความยาวคลื่นหรือสลอต

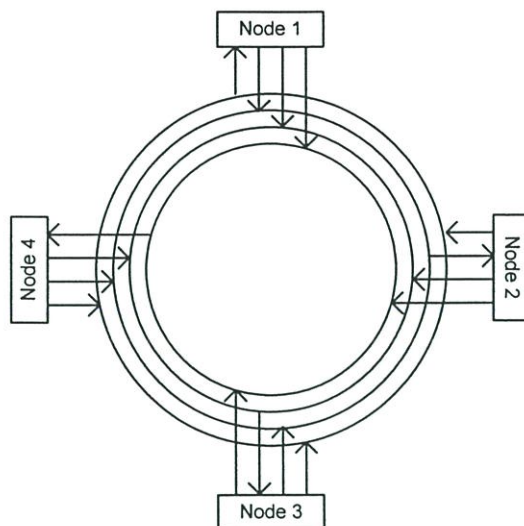
ในโครงข่ายวงแหวนบนช่องสัญญาณที่ต้องการ โดยความยาวคลื่นที่มีแพ็กเก็ตข้อมูลบรรจุอยู่และถูกถอดหรือรับแพ็กเก็ตเกิดโดยโหนดปลายทาง จะเรียกว่าความยาวคลื่นที่ลบ (Dropped Wavelength) และความยาวคลื่นที่ว่างและมีโหนดต้องการส่งแพ็กเก็ตเกิดไปบนความยาวคลื่นนั้น จะถูกเรียกว่าความยาวคลื่นที่เพิ่ม (Added Wavelength) การเพิ่มและลบข้อมูลเข้าและออกจากความยาวคลื่นนี้จะถูกควบคุมด้วยโปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Medium Access Control Protocol) ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.3 ต่อไป



รูปที่ 2.2 โครงข่ายวงแหวนการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบสล็อต

โครงข่ายวงแหวนการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบสล็อตมีทิศทางการส่งของข้อมูลสองแบบ คือการส่งข้อมูลแบบทิศทางเดียวและการส่งข้อมูลแบบสองทิศทาง ตัวอย่างสำหรับการส่งข้อมูลแบบทิศทางเดียวเช่น กำหนดให้จำนวนของโหนด ( $N$ ) เท่ากับจำนวนของความยาวคลื่น ( $W$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ที่มี  $N = W = 4$  แต่ละโหนดจะให้ Home Channel สำหรับการรับ แต่ทว่าไป  $N \geq W$  เพราะจำนวนของความยาวคลื่นถูกจำกัด เช่น เหตุผลด้านราคาหรือช่วงการปรับของตัวส่ง-ตัวรับมีจำกัด โดย  $N \geq W$  ซึ่งสามารถบอกได้ว่าจำนวนของโหนดและจำนวนของความยาวคลื่นเป็นอิสระจากกัน

แต่ละโหนดจะมี ตัวส่งและตัวรับที่กำหนดช่องสัญญาณไว้แล้ว และ/หรือ ตัวส่งและตัวรับที่ปรับค่าได้ เราใช้เครื่องหมาย  $FT^i$ - $TT^j$ - $FR^m$ - $TR^n$  แสดงสถาปัตยกรรมของโหนด



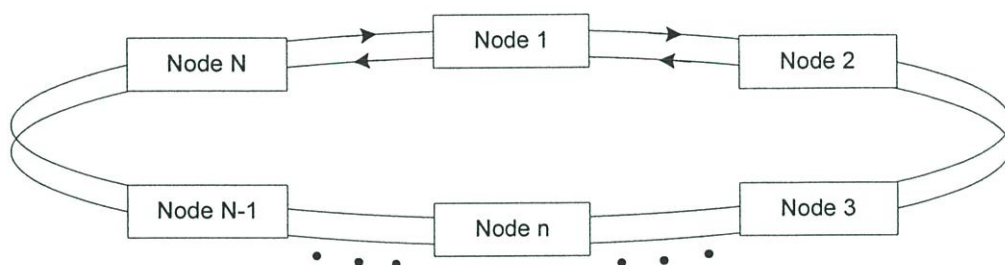
รูปที่ 2.3 โครงข่ายวงแหวนมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบสล็อต ที่มีการส่งของแพ็กเก็ตไปทิศทางเดียวด้วยจำนวนโหนด  $N=4$  และความยาวคลื่น  $W=4$

โดย  $i, j, m, n \geq 0$  โดย  $i$  แทน ตัวส่งที่กำหนดช่องสัญญาณไว้แล้ว (Fixed-Tuned Transmitters)  $j$  แทน ตัวส่งที่ปรับค่าได้ (Tunable Transmitter)  $m$  แทน ตัวรับที่กำหนดช่องสัญญาณไว้แล้ว (Fixed-Tuned Receivers) และ  $n$  แทน ตัวรับที่ปรับค่าได้ (Tunable Receivers) เช่น โครงสร้างโหนดแบบ TT-FR ที่แต่ละโหนดจะมีตัวส่งปรับค่าได้และตัวรับกำหนดช่องสัญญาณไว้แล้ว

เมื่อโหนดหนึ่งส่งแพ็กเก็ตไปบนช่องสัญญาณที่ให้ไว้ขณะที่แพ็กเก็ตอื่นที่กำลังส่งอยู่ในวงแหวนบนช่องสัญญาณเดียวกัน จึงเกิดการชนกันในช่องสัญญาณ (Channel Collision) ขึ้น และแพ็กเก็ตทั้งสองนี้ก็เลยไป ส่วนตัวรับแบบปรับค่าได้ ก็อาจมีการชนกันที่ตัวรับ (Receiver Collision) ซึ่งจะมีการชนกันที่โหนดปลายทาง โดยตัวรับที่โหนดไม่ได้ปรับไปที่ความยาวคลื่นที่มีแพ็กเก็ตเข้ามา เหตุการณ์นี้สามารถเกิดขึ้นได้ถ้าโหนดปลายทางไม่รู้เกี่ยวกับการส่งหรือมีการรับแพ็กเก็ตอยู่ในขณะนั้นบนความยาวคลื่นที่ต่างกัน ทั้งการชนกันในช่องสัญญาณ (Channel Collision) และการชนกันที่ตัวรับ (Receiver Collision) มีผลกระทบกับค่าวิสัยสามารถและค่าความหน่วงของโครงข่าย การลดลงของสมรรถนะของโครงข่ายเนื่องจาก การชนกันในช่องสัญญาณ (Channel Collision) และการชนกันที่ตัวรับ (Receiver Collision) สามารถแก้ไขได้ในอีกระดับชั้นของระบบ ตัวอย่าง การติดตั้งที่แต่ละโหนดด้วย ตัวรับที่กำหนดช่องสัญญาณไว้แล้ว (Fixed-Tuned Receivers) ที่ Home Channel เพื่อป้องกันการชนกันที่ตัวรับ ในทำนองเดียวกัน ให้แต่ละโหนดแยก Home Channel จากการส่งเพื่อหลีกเลี่ยง Channel Collision ในระบบ อย่างไรก็ตาม แต่ละช่องสัญญาณความยาวคลื่นถูกแชร์โดยโหนดหลายๆ โหนด ทำให้การชนกัน

ของช่องสัญญาณมีเพิ่มขึ้น โปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อ (MAC Protocols) จึงใช้ในการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณและทำให้การชนกันที่ช่องสัญญาณลดลง

ตัวอย่างการส่งข้อมูลในโครงข่ายวงแหวนที่มีทิศทางการส่งสองทิศทาง จะมีจำนวนโหนด  $N$  โหนดถูกเชื่อมต่อกันระหว่างวงแหวนใยแก้วสองวงที่มีทิศทางการส่งแพ็กเก็ตสวนทางกัน ตามรูปที่ 2.4 เพื่อที่จะหาผลกระทบของการเดินทางสวนกันในใยแก้ว กำหนดให้มีช่องสัญญาณ  $W/2$  ที่แต่ละใยแก้ว จากช่องสัญญาณทั้งหมด  $W$  ช่องสัญญาณ เหมือนกับโครงข่ายวงแหวนที่มีทิศทางการส่งของแพ็กเก็ตทิศทางเดียว ในโครงข่ายที่มีใยแก้วสองวงโครงสร้างโหนดคล้ายๆ กับโครงข่ายที่มีใยแก้ววงเดียว โดยมีตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณอย่างละตัวที่แต่ละใยแก้ว โครงสร้างโหนดแบบนี้ทำให้โหนดสามารถรับและส่งแพ็กเก็ตสองแพ็กเก็ตได้ที่เวลาเดียวกัน แต่ละโหนดจะมี Home Channel ที่แต่ละใยแก้ว



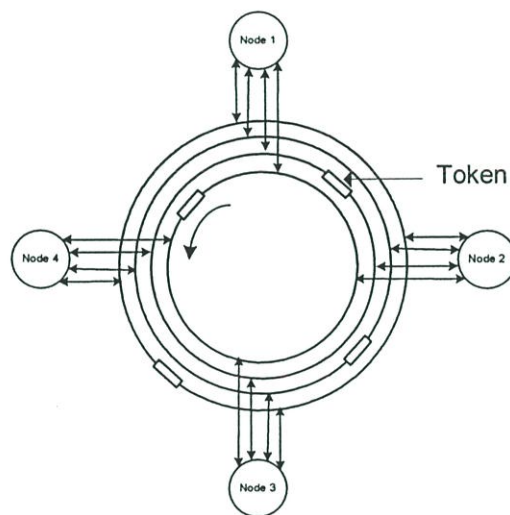
รูปที่ 2.4 สถาปัตยกรรมโครงข่ายแบบวงแหวนคู่ (Dual-Fiber Ring network architecture)

โครงข่ายวงแหวนการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบสลิตมีข้อดีคือ ง่ายในการชิงโครโนซ์ของโหนดที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูง (High Data Rate) มีการใช้ประโยชน์ของช่องสัญญาณสูง (High Channel Utilization) ความหน่วงจากการเข้าถึงอยู่ในระดับต่ำ (Low Access Delay) และมีวิธีในการเข้าถึงที่ง่าย อย่างไรก็ตามโครงข่ายประเภทนี้เหมาะสมกับทราฟฟิกที่มีขนาดแพ็กเก็ตคงที่ ไม่เหมาะสมกับการส่งข้อมูลที่มีขนาดแพ็กเก็ตที่มีความยาวไม่คงที่ เนื่องจากจะทำให้บางครั้งสลิตบรรจุข้อมูลไม่เต็มขนาดความจุสูงสุดของสลิตทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลลดลง นอกจากนี้แพ็กเก็ตข้อมูลที่มีขนาดความยาวไม่แน่นอน จะมีความยากในการควบคุมการส่งและการควบคุมความยุติธรรม

## 2.2.2 โครงข่ายวงแหวนมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบมัลติโทเคน (Multitoken WDM Ring Networks)

ปัญหาของขนาดแพ็กเก็ตที่เปลี่ยนแปลงได้ในโครงข่ายแบบสลิตนั้นสามารถได้รับการแก้ไขด้านความยุติธรรมได้โดยใช้โครงข่ายวงแหวนแบบโทเคน ดังรูปที่ 2.5 โทเคน (Token) เป็นแพ็กเก็ตควบคุมพิเศษซึ่งเคลื่อนที่รอบวงแหวนไปในทิศทางเดียว โทเคนจะเดินทางผ่านจากโหนด

หนึ่งไปยังโหนดหนึ่ง แต่ละโหนดสามารถจับโทเคนที่บรรจุเวลาในการจับโทเคนไว้ และส่งแพ็กเก็ต (ที่มีขนาดคงที่หรือเปลี่ยนแปลงได้) ไปจนกระทั่งเวลาในการจับแพ็กเก็ตหมดลง (Token Holding Time หรือ THT) ก็จะปล่อยโทเคนไปยังโหนดถัดไป ซึ่งทำให้เกิดความยุติธรรมโดยโหนดทั้งหมดมีโอกาสในการส่งข้อมูลที่เท่าเทียมกัน สำหรับในโครงข่าย WDM ซึ่งประกอบด้วยหลายๆ ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณจะมีโทเคนหนึ่งตัววิ่งไปบนช่องสัญญาณของตน เมื่อโหนดจับโทเคนในช่องสัญญาณหนึ่งๆ ได้ โหนดจะสามารถส่งข้อมูลไปบนช่องสัญญาณนั้นได้ จนกว่าเวลาในการจับโทเคนที่กำหนดไว้จะสิ้นสุดลง ตัวอย่างของโครงข่ายประเภทนี้ คือ โปรโตคอล MTIT (Multitoken Interarrival Time Protocol) เสนอโดย [6] จะช่วยลดการชนกันและแบ่งการใช้แบนด์วิดอย่างเท่าเทียมกัน

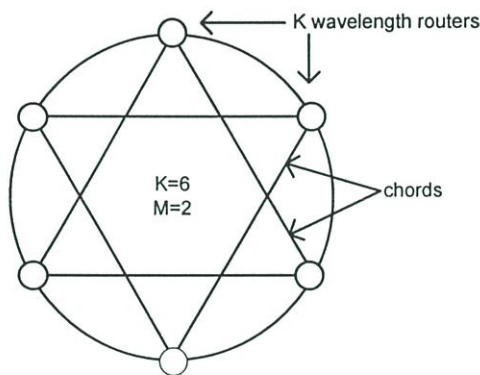


รูปที่ 2.5 โครงข่ายวงแหวนมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบมัลติโทเคน

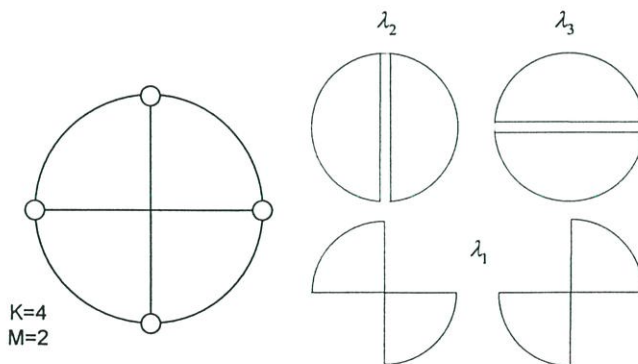
ข้อดีของโครงข่ายวงแหวนมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบมัลติโทเคน คือ มีระดับความยุติธรรมสูง เนื่องจากโทเคนเดินทางไปยังโหนดทุกๆ โหนดอย่างเรียงลำดับ และมีช่วงเวลาในการจับโทเคนเท่าๆ กัน ดังนั้นทุกๆ โหนดจึงมีโอกาสในการส่งข้อมูลเท่าๆ กัน นอกจากนี้ยังมีข้อดีอีกประการหนึ่ง คือ ไม่จำกัดความยาวของแพ็กเก็ตที่ส่ง จึงสามารถส่งข้อมูลที่มีความยาวที่ไม่แน่นอนได้ภายในระยะเวลาการจับโทเคนที่กำหนดให้ อย่างไรก็ตามโครงข่ายวงแหวนแบบมัลติโทเคนมีข้อเสีย คือ มีค่าการรอคอยการส่งในคิวสูง (Queuing Delay) เนื่องจากต้องมีการรอคอยโทเคนจากโหนดอื่นเท่ากับ  $THT * (N-1)$  เมื่อให้ THT เท่ากับช่วงเวลาในการจับโทเคน และ N คือจำนวนโหนดทั้งหมดบนโครงข่าย ซึ่งเวลาในการรอคอยโทเคนนี้มีค่าสูงกว่าโครงข่ายแบบสล็อตซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้ทันทีที่พบสล็อตว่าง

2.2.3 โครงข่ายวงแหวนมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบตาข่าย (Meshed WDM Ring Networks)

เป็นโครงข่ายที่นำเอาเทคนิคของการส่งข้อมูลสองทิศทาง การเพิ่ม Router การเพิ่มเส้นทางเชื่อม (Chord) และการส่งข้อมูลในเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest Path) มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งข้อมูล ซึ่งจาก [7] ได้แสดงว่าประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลของโครงข่ายวงแหวนมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบตาข่ายนี้มีค่าสูงกว่าโครงข่ายวงแหวนแบบทิศทางเดียวที่มีการถอดสล็อตให้ว่างที่ต้นทาง ถึง 720 เปอร์เซ็นต์ (การถอดสล็อตให้ว่างจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.4) และมีประสิทธิภาพสูงกว่าโครงข่ายวงแหวนที่มีการส่งแบบสองทิศทางที่มีการถอดสล็อตให้ว่างที่ปลายทาง ถึง 80 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.6 สถาปัตยกรรมวงแหวนแบบตาข่าย (Meshed Ring) ที่มีความยาวคลื่น (K=6) เท่ากับ 6 และมีเส้นทางเชื่อมไปยัง Router ข้างเคียงลำดับที่สอง (M = 2)



รูปที่ 2.7 เส้นทางของความยาวคลื่นในสถาปัตยกรรมวงแหวนแบบตาข่าย ที่มี K = 4 , M = 2 และความยาวคลื่น W = 3

จากรูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างของโครงข่ายวงแหวนแบบตาข่ายที่ใช้ความยาวคลื่น (K=6) เท่ากับ 6 และมีเส้นทางเชื่อมไปยัง Router ข้างเคียงลำดับที่สอง (M = 2) จะเห็นได้ว่าหากโหนดใดๆ ต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดที่ไม่ใช่โหนดใกล้เคียง การส่งข้อมูลสามารถส่งข้ามไปยังโหนด

ใกล้เคียงลำดับที่  $M$  ที่มีเส้นทางเชื่อมไว้โดยไม่ต้องผ่านโหนดข้างเคียงเลย จึงทำให้ระยะทางในการส่งข้อมูลสั้นลง ทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลสูงขึ้น จากรูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างเส้นทางของในสถาปัตยกรรมวงแหวนแบบตาข่าย ที่มี  $K = 4$ ,  $M = 2$  และความยาวคลื่น  $W = 3$

### 2.3 โพรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อ

โพรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Medium Access Control Protocol) คือโพรโตคอลที่ใช้ในการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ ซึ่งมีตัวแปรที่เป็นกุญแจในการควบคุมการเข้าถึงสื่อ 2 ประการ คือ "ที่ไหน" (Where) และ "อย่างไร" (How) [8]

ตัวแปร "ที่ไหน" อ้างถึงตัวควบคุมที่ถูกใช้ว่าเป็นแบบมีศูนย์กลาง (Centralized Control) หรือการควบคุมแบบกระจาย (Distributed Control) ในวิธีการควบคุมแบบมีศูนย์กลางตัวควบคุมจะมีอำนาจในการอนุญาตการเข้าถึงโครงข่าย โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลต้องคอยจนกระทั่งได้รับอนุญาตจากตัวควบคุม ส่วนในวิธีการควบคุมแบบกระจายนั้นจะมีโหนดหลายๆ โหนดที่ทำหน้าที่ร่วมกันเพื่อควบคุมและจัดลำดับการเข้าถึงสื่อในโครงข่าย

ตัวแปรตัวที่สอง "อย่างไร" หมายถึงวิธีการที่ใช้ในการเข้าถึงสื่อ ซึ่งถูกจำกัดโดยรูปแบบหรือประเภทของโครงข่าย ปัจจัยการแข่งขัน ด้านราคา ด้านสมรรถนะและความซับซ้อนของวิธีการแต่โดยทั่วไปสามารถแบ่งเทคนิคการควบคุมเข้าถึงออกเป็น 2 วิธีได้แก่

1. การเข้าถึงแบบซิงโครนัส (Synchronous Access)
2. การเข้าถึงแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous Access)

การควบคุมการเข้าถึงแบบซิงโครนัสนั้นจะใช้การกำหนดช่องสัญญาณหรือขนาดแบนด์วิดท์ของสื่อที่คงที่ให้แก่โหนดต่างๆ ซึ่งคล้ายกับการทำงานของโครงข่ายสวิตช์ทางวงจร (Circuit Switching), การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ (FDM) หรือการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา (TDM) เป็นต้น แต่วิธีซิงโครนัสนั้นไม่เหมาะกับการใช้งานในโครงข่าย LANs และ MANs เพราะไม่สามารถทำนายปริมาณทราฟฟิกที่แต่ละโหนดต้องการส่งได้ ดังนั้นการควบคุมการเข้าถึงแบบอะซิงโครนัสจึงมีประสิทธิภาพมากกว่าในกรณีดังกล่าว

การเข้าถึงแบบอะซิงโครนัสสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธีดังนี้

1. การส่งแบบต่อเนื่องตามลำดับ (Round Robin) แต่ละโหนดจะมีโอกาสเมื่อรอบในการส่งข้อมูลมาถึง เมื่อโอกาสในการส่งข้อมูลมาถึงแต่ละโหนดจะมีเวลาส่งข้อมูลตามขอบเขตที่กำหนด เช่น อัตราการข้อมูลสูงสุด หรือระยะเวลาในการส่งข้อมูล เป็นต้น เมื่อโหนดส่งข้อมูลเสร็จก็จะต้องปล่อยโอกาสนี้ไปให้กับโหนดถัดไป การควบคุมการเข้าถึงวิธีนี้อาจใช้การควบคุมเป็นแบบศูนย์กลางหรือแบบกระจายก็ได้ และวิธีนี้เหมาะกับทราฟฟิกที่มาอย่างต่อเนื่อง (Stream Traffic) เช่น การสื่อสารทางเสียง การส่งไฟล์ขนาดใหญ่ และไม่เหมาะสมกับทราฟฟิก

ที่มาไม่สม่ำเสมอ (Bursty Traffic) เช่น การส่งข้อมูลช่วงสั้นๆ หรือการส่งข้อมูลภาพหรือเสียงแบบเรียลไทม์ที่มีการบีบอัด เป็นต้น เนื่องจากทราฟฟิกที่มาอย่างไม่สม่ำเสมออาจทำให้โหนดมีข้อมูลที่จะส่งต่ำกว่าอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดที่ส่งได้ในแต่ละรอบ ซึ่งทำให้เสียโอกาสในการส่งและขาดประสิทธิภาพ

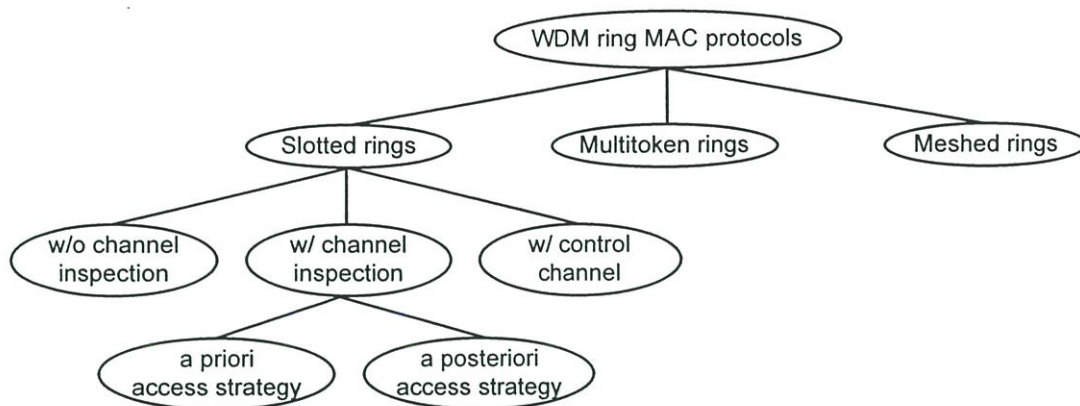
2. การส่งแบบมีการจองล่วงหน้า (Reservation) วิธีนี้เหมาะสำหรับทราฟฟิกแบบสม่ำเสมอ ซึ่งวิธีนี้จะแบ่งแบนด์วิดท์ของสล็อตออกเป็นสล็อต โหนดที่ต้องการส่งจะต้องทำการจองสล็อตไว้ล่วงหน้า และการควบคุมการเข้าถึงวิธีนี้อาจใช้การควบคุมเป็นแบบศูนย์กลางหรือแบบกระจายก็ได้

3. การส่งแบบมีการแย่งกันใช้ (Contention) เหมาะสำหรับทราฟฟิกแบบไม่สม่ำเสมอ ซึ่งวิธีนี้ไม่มีลำดับการส่งที่แน่นอน โหนดใดมีข้อมูลสามารถส่งได้โดยไม่ต้องรอ แต่ในกรณีที่ทราฟฟิกมีโหลดสูงอาจจะมีการแย่งชิงการส่งขึ้น หรือเกิดการส่งพร้อมๆ กัน ซึ่งทำให้เกิดการชนกันของข้อมูล และทำให้ข้อมูลเสียหายได้

นอกจากนี้ในโครงข่ายวงแหวนการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplex Ring Networks) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะตามทิศทางการส่ง คือมีการส่งแพ็กเก็ตไปในทิศทางเดียว (Unidirectional Transmission) และส่งแพ็กเก็ตไปในสองทิศทาง (Bidirectional Transmission) แต่โครงข่ายส่วนใหญ่จะนิยมส่งแพ็กเก็ตไปในทิศทางเดียว เนื่องจากการส่งแบบสองทิศทางมีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าการส่งแบบทิศทางเดียว

จากที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นว่าโปรโตคอลสำหรับการเข้าถึงโครงข่ายวงแหวนการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplex Ring Networks) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ โครงข่ายวงแหวนแบบสล็อต โครงข่ายวงแหวนแบบหลายโทเกน และโครงข่ายวงแหวนแบบตาข่าย สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาเกี่ยวกับการทำงานของโปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อในโครงข่ายวงแหวนแบบสล็อตจึงขอเน้นเพียงรายละเอียดของโปรโตคอลการเข้าถึงสื่อแบบสล็อต ซึ่งการควบคุมสามารถแบ่งย่อยลงไปได้อีก 3 วิธี [5] ดังรูปที่ 2.8 คือ

1. โครงข่ายวงแหวนแบบสล็อต ที่ไม่มีการสำรวจช่องสัญญาณ (Slotted Rings without Channel Inspection)
2. โครงข่ายวงแหวนแบบสล็อต ที่มีการสำรวจช่องสัญญาณ (Slotted Rings with Channel Inspection)
3. โครงข่ายวงแหวนแบบสล็อต ที่มีช่องสัญญาณควบคุม (Slotted Rings with Control Channel)



รูปที่ 2.8 การจัดจำพวกของโปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสล็อตบนโครงข่ายวงแหวนการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

โครงข่ายวงแหวนแบบสล็อตที่ไม่มีการสำรวจช่องสัญญาณ เป็นโครงข่ายที่ใช้วิธีการง่ายๆ ในการป้องกันการชนกันของข้อมูลที่ช่องสัญญาณ (Channel Collision) และการชนกันที่ตัวรับ (Receiver Collision) โดยการกำหนดช่องสัญญาณที่แน่นอนสำหรับใช้รับส่งข้อมูลของตัวส่งและตัวรับ เมื่อช่องสัญญาณที่ส่งและรับมีการกำหนดไว้ล่วงหน้าจึงไม่มีการแย่งช่องสัญญาณและทำให้ลดการชนกันของข้อมูลลง นอกจากนี้ยังนำการจัดลำดับการเข้าถึงแบบแบ่งตามเวลา (Time Division Multiple Access (TDMA)) มาใช้เพื่อจัดสรรแบนด์วิดท์ให้กับแต่ละโหนด วิธีการนี้เหมาะสมกับการกระจายของทราฟฟิกอย่างสม่ำเสมอที่โหลดสูงๆ แต่ในกรณีที่มีทราฟฟิกแบบไม่คงที่จะไม่เหมาะสมเนื่องจากอาจทำให้สูญเสียแบนด์วิดท์โดยเปล่าประโยชน์และมีการใช้ประโยชน์ของช่องสัญญาณที่ต่ำ ตัวอย่างของโครงข่ายประเภทนี้ได้แก่ MAWSON (Metropolitan Area Wavelength Switched Optical Network) [9]

โครงข่ายวงแหวนแบบสล็อตที่มีการสำรวจช่องสัญญาณ จะหลีกเลี่ยงการชนกันโดยแต่ละโหนดจะได้รับการเพิ่มความสามารถในการตรวจสอบสถานะของแต่ละสล็อต ว่ามีการใช้งานอยู่ (ไม่ว่าง) หรือไม่มีการใช้งาน (ว่าง) โดยใช้เทคนิคการวัด (Tapping Off) พลังงานจากสายใยแก้ว และวัดดีเลย์ของสล็อต แพ็กเก็ตที่รอเพื่อส่งจะถูกเก็บไว้ใน Virtual Output Queues (VOQs) ซึ่งโหนดหนึ่งโหนดจะมี VOQ หนึ่งตัวต่อหนึ่งความยาวคลื่นหรือต่อหนึ่งปลายทาง โปรโตคอล MAC จะเลือก VOQ ที่เหมาะสมในการส่งแพ็กเก็ตไปในสล็อตตามวิธีการเข้าถึงที่กำหนดไว้ การส่งข้อมูลเข้าสู่สล็อตสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบมีความสำคัญก่อน (Priori) และแบบมีความสำคัญหลัง (Posteriori) ในวิธีแรกหรือแบบมีความสำคัญก่อนนั้นโหนดจะส่งข้อมูลจาก VOQ ที่มีลำดับความสำคัญสูงเข้าไปยังสล็อตโดยไม่ต้องมีการตรวจสอบสถานะของสล็อตก่อน และสำหรับวิธีที่สองหรือแบบมีความสำคัญหลัง โหนดจะตรวจสอบสถานะของสล็อตก่อนว่าว่างหรือไม่ หาก

สลิตว่างไหนจะเลือก VOQ ที่เหมาะสมเพื่อส่งข้อมูล ตัวอย่างของโครงข่ายที่ต้องมีการตรวจสอบช่องสัญญาณก่อนส่ง คือ The RINGO (RING Optical network) [10], Synchronous Round Robin (SRR) [11], HORNET (Hybrid Optoelectronic Ring NETWORK) [12], A posteriori buffer selection schemes [13] และ FT-TR Rings [14]

สำหรับโครงข่ายวงแหวนแบบสลิตที่มีช่องสัญญาณควบคุม สถานะของสลิตจะถูกส่งไปบนช่องสัญญาณควบคุม (Control Channel (CC)) ที่แยกออกมาจากช่องสัญญาณรับส่งข้อมูล สำหรับวิธีนี้แต่ละโหนดจะต้องเพิ่มตัวส่งและตัวรับอีกอย่างละ 1 ชุด เพื่อใช้รับส่งข้อมูลในช่องสัญญาณควบคุม โหนดสามารถใช้ช่องสัญญาณควบคุมแลกเปลี่ยนข้อมูลในการส่งด้วยอัตราเร็วสูง และง่ายต่อการควบคุมความยุติธรรม (Fairness Control) และควบคุมคุณภาพของการให้บริการ (Quality of Service) ของโครงข่าย ตัวอย่างของโครงข่ายประเภทนี้ได้แก่ Bidirectional HORNET – SAR-OD [15], Variable Size Packets without Segmentation/Reassembly [16], Wavelength Stacking [17] และ Virtual Circle DWADMs [18]

สำหรับโครงข่ายที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดเป็นโครงข่ายวงแหวนมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบสลิตที่ใช้การสำรวจช่องสัญญาณ แบบมีความสำคัญหลัง หรือ Posteriori คือ จะมีการสำรวจช่องสัญญาณว่าว่างหรือไม่ ก่อนที่จะส่งข้อมูล

## 2.4 วิธีการถอดสลิตให้ว่าง (Empty Slot Operation)

ระบบที่มีสลิตว่างหรือวงแหวนแบบสลิตได้ถูกแนะนำครั้งแรกโดย Pierce [19] ในปี 1972 ตัวอย่างโปรโตคอล MAC ที่ใช้ระบบดังกล่าว คือ Slotted-ALOHA [20]

การทำให้สลิตว่างเป็นเสมือนการถอดข้อมูลออกจากสลิตที่ส่งข้อมูลถึงปลายทางเสร็จเรียบร้อยแล้ว และทำให้ว่างเพื่อสามารถรับข้อมูลใหม่ได้ ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 วิธี ได้แก่

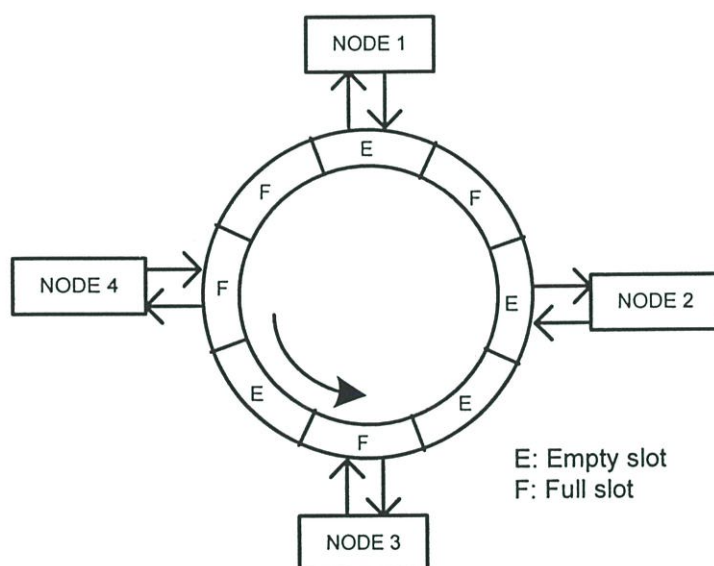
1. การถอดที่แหล่งกำเนิด (Source Stripping Operation)
2. การถอดที่ปลายทาง (Destination Stripping Operation)

วิธีการถอดที่แหล่งกำเนิด คือ วิธีการทำสลิตในโครงข่ายให้ว่างโดยโหนดส่ง (Source Node) ทำให้สลิตสามารถใช้งานได้อีกโดยสามารถส่งแพ็กเก็ตใหม่เข้าไปในสลิตได้อีกครั้ง โดยจะทำการทำเครื่องหมายกับสลิตที่ว่าง หลังจากที่ยืนยันครบรอบแล้ว โหนดที่ส่ง (Source Node) จะถอดแพ็กเก็ตออกจากสลิต โดยทำเครื่องหมายที่สลิตนั้นว่าเป็นสลิตว่าง และทำให้สลิตใช้งานได้ในรอบถัดไป

สำหรับวิธี Destination Stripping operation เมื่อได้ส่งแพ็กเก็ตออกไปยังปลายทางแล้ว ปลายทางที่รับแพ็กเก็ตจะถอดแพ็กเก็ตออกจากสลิตและทำเครื่องหมายที่สลิตนั้นว่าเป็นสลิต

ว่างทำให้สล็อตใช้งานได้ในโหนดถัดไป โดยไม่ต้องรอรอบจนครบรอบ แล้วจึงถอดแพ็กเก็ตออกจากสล็อตเหมือนแบบ Source Stripping Operation ดังนั้นการถอดสล็อตที่ปลายทางจึงมีประสิทธิภาพกว่าการถอดสล็อตที่แหล่งกำเนิด และยังทำให้สล็อตสามารถรับข้อมูลใหม่ได้เร็วกว่า

ในวงแหวนของ Pierce (Pierce ring) [19] ได้ใช้การทำให้สล็อตว่างที่โหนดปลายทาง (Destination Stripping) และโหนดปลายทางก็จะทำการกำหนดสล็อตนั้นให้ว่างหลังจากรับข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ใน Cambridge Experimental Ring [21] ใช้การทำให้สล็อตว่างที่โหนดส่ง (Source Stripping) โดยโหนดที่ส่งจะกำหนดสล็อตให้ว่างหลังจากวนจนครบรอบแล้ว ทั้งสองโครงข่ายนี้สล็อตจะไม่ถูกลบออกจากวงแหวนหลังจากที่ไม่มีการหมุนของวงแหวน (คือในกรณีที่โหนดเสีย) รูปที่ 2.9 แสดงไดอะแกรมของวงแหวนแบบสล็อตที่มี 8 สล็อต และ 4 โหนด ซึ่งแสดงตัวอย่างการทำงานของสล็อตว่างและสล็อตไม่ว่าง



รูปที่ 2.9 สถาปัตยกรรมของวงแหวนแบบสล็อต

## 2.5 ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและทราฟฟิกแบบปัวซอง [22]

### 2.5.1 แหล่งกำเนิดทราฟฟิก (Traffic Sources)

การออกแบบและการสร้างตัวจำลองของโครงข่าย (Network Simulator) เป็นสิ่งที่ท้าทายอย่างมาก ยิ่งกว่านั้น เป็นไปได้ที่จำนวนที่เท่ากันของเวลาถูกใช้ในการตรวจสอบและการมีเหตุผลในการปฏิบัติการ ตัวจำลองแบบเป็นเครื่องมือที่สามารถเชื่อถือได้ สามารถเสนอแบบจำลองสถาปัตยกรรมของวงแหวนและโปรโตคอล MAC ได้อย่างถูกต้อง ความจริงแบบจำลองนี้สามารถสร้างได้เพราะว่าตัวจำลองแบบได้รับการออกแบบให้สามารถจำลองแบบการทำงานตามที่กำหนดได้ เพื่อให้แน่ใจมากยิ่งขึ้นกับการทำงานของตัวจำลองแบบ ควรจะมีการนำเอาการวิเคราะห์ทาง

คณิตศาสตร์ผนวกเข้าไปด้วย ซึ่งทำให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างตัวจำลองแบบและการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ได้

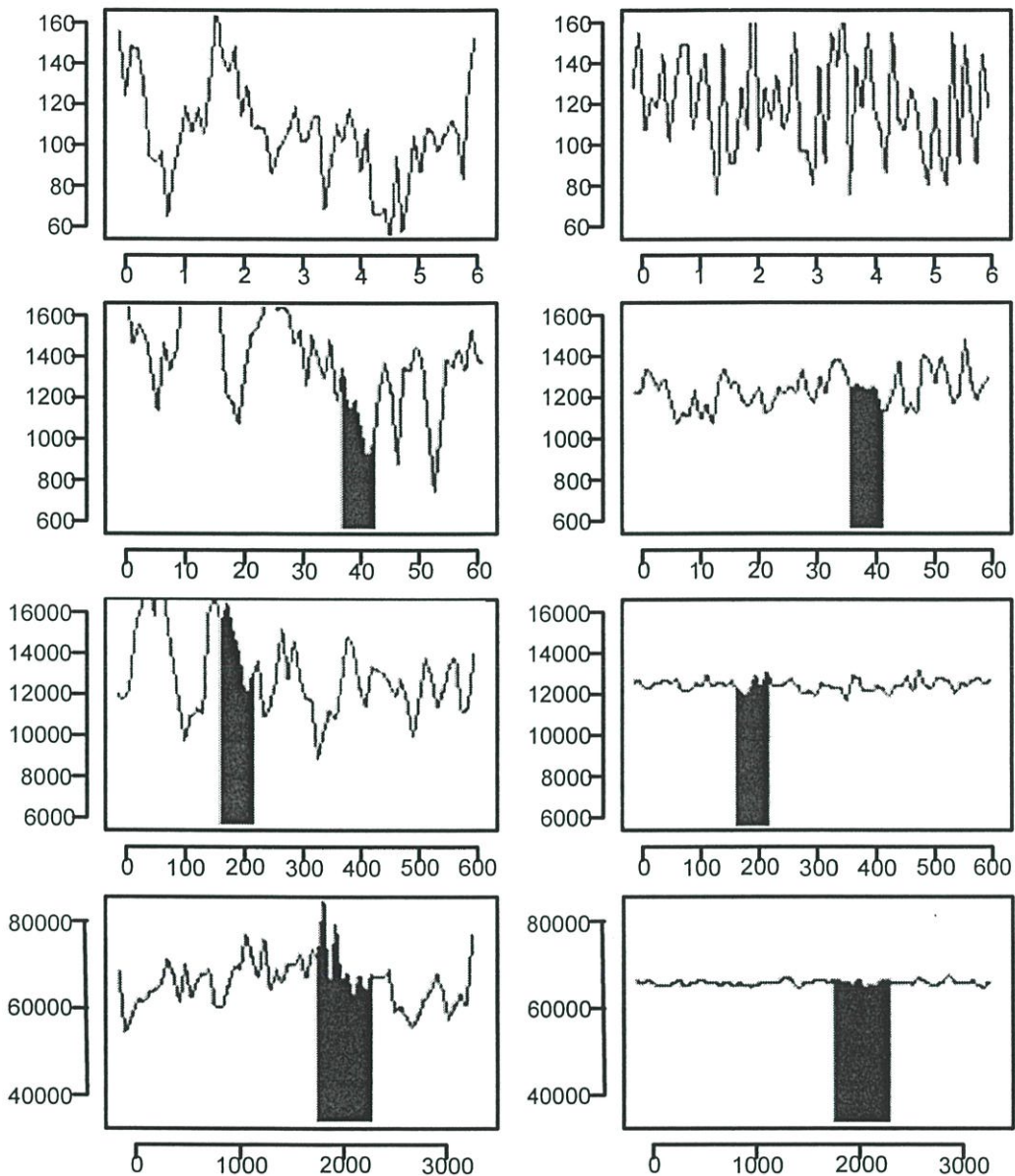
ประสิทธิภาพของตัวจำลองแบบทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับอินพุตพารามิเตอร์เพียงตัวเดียว เช่นกราฟฟิคที่ป้อนเข้าสู่โหนด จริงๆ แล้วในสถาปัตยกรรมโครงข่ายหนึ่งๆ ที่กำหนดให้จะพบว่าพารามิเตอร์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงคือตัวแบบจำลองที่ใช้สำหรับจำลองแบบกราฟฟิคที่ป้อนเข้าสู่โครงข่าย สามารถใช้กราฟฟิคหลายๆ ชนิดเพื่อจำลองแบบได้ แต่กราฟฟิคหนึ่งแบบจะสามารถให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องได้หลายค่าถ้าแบบจำลองของกราฟฟิคมีค่าใกล้เคียงกับกราฟฟิคจริง

กราฟฟิคส่วนใหญ่ที่ถูกป้อนเข้าสู่โครงข่ายมีพื้นฐานมาจากกราฟฟิคเสียงและกราฟฟิคข้อมูลซึ่งสามารถจำลองโดยใช้แบบจำลองของมาร์คอฟ (เช่น บัวซอง) การสร้างกราฟฟิคแบบบัวซองมีทฤษฎีที่น่าสนใจ ซึ่งสามารถใช้ทำนายสมรรถนะของระบบได้ จึงถูกเรียกว่าทฤษฎีเทเลกราฟฟิค (Teletraffic Theory) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการบรรยายพฤติกรรมของโครงข่ายโทรศัพท์สาธารณะ (Public Switched Telephone Network หรือ PSTN) ซึ่งต่อมากราฟฟิคแบบบัวซองได้รับการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในโปรแกรมจำลองแบบโครงข่ายต่างๆ

อย่างไรก็ตาม Leland และผู้ร่วมวิจัย ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้แบบจำลองเทเลกราฟฟิคนั้นมีความไม่เหมาะสมกับโครงข่ายการสื่อสารสมัยใหม่ เนื่องจากกราฟฟิคมีการเปลี่ยนแปลงสูง (High Variability) และไม่ต่อเนื่อง (Bursty) ในทางตรงกันข้ามกราฟฟิคแบบบัวซองจะมีความคงที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลายาวนานขึ้น ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เปรียบเทียบกับกราฟฟิคในปัจจุบัน ดังนั้น จึงได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้บรรยายการส่งข้อมูลในโครงข่ายในปัจจุบันซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงสูง (High Variability) และคล้ายคลึงตัวเอง (Self-Similarity)

รูปที่ 2.10 ภาพแสดงความล้มเหลวของกราฟฟิคแบบบัวซองที่ไม่สามารถสร้างกราฟฟิคที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงในช่วงเวลาที่ยาว ภาพซ้ายมือแสดงแบบจำลองกราฟฟิคแบบคล้ายคลึงตัวเอง และภาพขวามือแสดงแบบจำลองของกราฟฟิคแบบบัวซอง สเกลเวลาของภาพแถบบนสุดมีค่า 100 ms. จากภาพจะเห็นว่ากราฟฟิคทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาซึ่งคล้ายคลึงกับกราฟฟิคที่เกิดขึ้นจริง ภาพแถวที่สองแสดงสเกลเวลาที่เพิ่มขึ้นสิบเท่า แกน Y ก็เพิ่มขึ้นสิบเท่าด้วย โดยภาพแถวที่สามและสี่ก็เพิ่มขึ้นสิบเท่าตามสเกลของแถวก่อนหน้า

แบบจำลองกราฟฟิคแบบคล้ายคลึงตัวเอง มีลักษณะที่เหมือนกับกราฟฟิคที่วัดได้ในโครงข่ายข้อมูลปัจจุบัน กราฟฟิคที่ได้จากแบบจำลองแบบคล้ายคลึงตัวเองจะมีความไม่แน่นอนสูง ถึงแม้จะสังเกตในช่วงเวลาที่ยาวนานมากๆ ซึ่งแตกต่างจากกราฟฟิคแบบบัวซองซึ่งจะสูญเสียความไม่แน่นอนเมื่อช่วงเวลายาวขึ้น รายละเอียดของการสร้างกราฟฟิคแบบบัวซองและกราฟฟิคแบบคล้ายคลึงตัวเองจะแสดงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.10 การสร้างกราฟฟิกจากแบบจำลองกราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและจากแบบจำลองกราฟฟิกแบบปัวซอง

### 2.5.2 กราฟฟิกแบบปัวซอง (Poisson traffic)

การสร้างกราฟฟิกแบบปัวซองสามารถทำได้ง่าย ๆ เวลาการมาถึงของแพ็กเก็ตเกิด (Packet Inter-Arrivals Time) คือเวลาระหว่างการส่งสองแพ็กเก็ต ซึ่งสร้างโดยใช้การแปลงย้อนกลับ (Inverse transformation) การกระจายแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution)  $U(0,1)$  สร้างโดยใช้ Pseudo-Random Number Generator และ Exponential Inter-Arrivals (IAT) ได้คำนวณเป็น  $-\Lambda \times \ln(u)$  โดย  $\Lambda$  คือค่าเฉลี่ยเวลาระหว่างการมาถึงของสองแพ็กเก็ต Seed ที่

แตกต่างกันใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการเข้าถึงแต่ละลิงค์ของ Pseudo-Random Number Generator และโหลดของโครงข่ายที่ต่างกันสามารถจำลองได้จากค่า  $\Lambda$  ที่ต่างกัน ระยะห่างของแพ็กเก็ต (เป็นวินาที) คือ  $\tau = 12\mu s$  (คือ 12,000 บิต ที่ 1Gb/s)

โหลดที่สร้างขึ้นของ Gigabit Ethernet link อย่างง่าย ๆ คือ

$$L = \frac{\tau}{\tau + \Lambda} \quad (2.1)$$

ดังนั้น

$$\Lambda = \frac{\tau(1-L)}{L} \quad (2.2)$$

ตัวอย่าง โหลด  $L = 0.5$  และ  $\tau = 12\mu s$  จะได้  $\Lambda = 12\mu s$  และถ้า  $L = 0.25$  จะได้เวลา ระหว่างการมาถึงคือ  $\Lambda = 36\mu s$

### 2.5.3 ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง (Self-Similar Traffic)

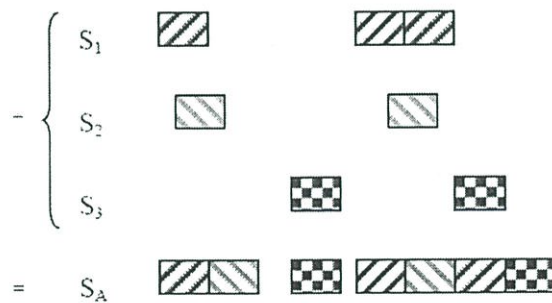
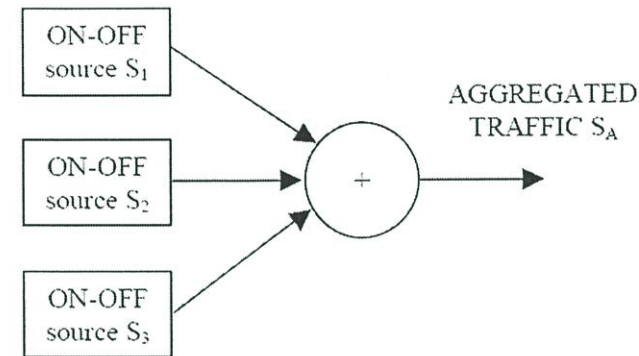
ในทางตรงกันข้าม เป็นการยากที่จะสร้างทราฟฟิกของโครงข่าย ที่แสดงความคล้ายคลึงตัวเอง แม้ว่าทราฟฟิกในโครงข่ายจริงจะมีความซับซ้อนมาก Willinger และผู้ร่วมวิจัย เสนอให้เห็นว่าทราฟฟิกสามารถจำลองด้วยแบบจำลองง่าย ๆ ที่ไม่ต้องการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน ที่จริงแล้วทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองสามารถสร้างโดยการมัลติเพิล็กซ์หลายๆ แหล่งกำเนิดของการกระจายแบบพาเรโตที่มีระยะเวลา เปิดและปิด (ON Periods และ OFF Periods) ON Periods มีลักษณะตรงกันกับ packet-trains (i.e. packets transmitted back to back) และ OFF Periods คือช่วงเวลาที่ไม่ทำอะไรกับ Packet-Trains รูปที่ 2.11 แสดงกระบวนการรวมกันของ ON-OFF Sources ทั้งสาม

Willinger แสดงว่าการกระจายแบบพาเรโตสามารถใช้สร้างการกระจายของ ON and OFF periods ของแต่ละ Source ต่างๆ กัน นอกจากนี้ ยังสร้างทราฟฟิกที่มีโหลด  $L$  ซึ่งได้ทำมาก่อนแล้วใน Poisson model เห็นได้ชัดว่า ผลของโหลด  $L$  ของเส้นทางที่ถูกรวมกันคือผลรวมของโหลด  $L$ , ถูกสร้างโดยแต่ละ source  $i$  ที่แตกต่างกัน กำหนดให้มี  $M$  Sources

$$L = \sum_{i=1}^M L_i = M \times L_i \quad (2.3)$$

ซึ่งพิจารณาว่า  $L_i$  เหมือนกันที่แต่ละ Source และเท่ากับค่าเฉลี่ยระยะ (Mean Duration) ของ ON Period ถูกแบ่งจากผลรวมของ (Mean Duration) ของ ON และ OFF periods และ

$$L_i = \frac{\mu_i^{ON}}{\mu_i^{ON} + \mu_i^{OFF}} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.11 กระบวนการรวมกันของ ON-OFF sources ทั้งสาม

การกระจายแบบพาราโตนีมีค่า Probability Density Function (PDF) ตามสมการ

$$P(x) = \frac{\alpha\beta^\alpha}{x^{\alpha+1}}, x \geq \beta \quad (2.5)$$

$\alpha$  เรียกว่า Shape Parameter หรือ Tail Index และ  $\beta$  คือ Scaling Parameter (ค่าน้อยที่สุดของ  $x$ ) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของการกระจายแบบพาราโตนี คือ

$$\mu = \frac{\alpha\beta}{\alpha-1}, \alpha \geq 1 \quad (2.6)$$

และ

$$\alpha = \frac{\mu}{\mu - \beta} \quad (2.7)$$

สมการที่ใช้สำหรับสร้างการกระจายแบบพาราเรโต คือ

$$X_{PARETO} = \frac{\beta}{U^{1/\alpha}} \quad (2.8)$$

โดย  $U$  คือค่าการกระจายแบบสม่ำเสมอ ในช่วง  $(0, 1]$

พารามิเตอร์สำหรับช่วงเปิดและปิด (ON และ OFF Periods) แสดง  $\alpha_{ON}$ ,  $\beta_{ON}$ ,  $\alpha_{OFF}$ , และ  $\beta_{OFF}$  ตามลำดับดังนี้ สมการ (2.4) สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปได้ตามสมการ

$$\mu_i^{OFF} = \frac{\mu_i^{ON} (1 - L_i)}{L_i} \quad (2.9)$$

และจาก (2.3)

$$\mu_i^{OFF} = \frac{\mu_i^{ON} (M - L)}{L} \quad (2.10)$$

สุดท้าย จากสมการที่ (2.10) และ (2.6) ค่า Scaling Parameter ของช่วงปิด (OFF Periods) สามารถแสดงได้ตาม

$$\beta_{OFF} = \frac{\alpha_{ON} \beta_{ON} (M - L) (\alpha_{OFF} - 1)}{L \alpha_{OFF} (\alpha_{ON} - 1)} \quad (2.11)$$

นอกจากนี้ Willinger ยังได้นิยาม Hurst Parameter ของทราฟฟิกที่รวมกันของ ON-OFF Sources ตามสมการ

$$H = \frac{3 - \alpha_{ON}}{2}, 1 < \alpha_{ON} \leq 2 \quad (2.12)$$

เมื่อ  $\alpha_{ON} > \alpha_{OFF}$  โดย  $\alpha_{OFF}$  สามารถกำหนดค่าไว้ได้

ดังนั้น กำหนดค่าเฉพาะของ Hurst Parameter และโหลด  $L$  พารามิเตอร์ทั้งหมดสามารถได้มาตามสมการ

$$\alpha_{ON} = 3 - 2H \quad (2.13)$$

$$\beta_{ON} = 12, \text{ ความห่างของแพ็กเก็ตเช่น } 12 \mu s \quad (2.14)$$

$$\alpha_{OFF} = 1.2 \quad (2.15)$$

$$\beta_{OFF} = \frac{2 \times \alpha_{ON} (M - L)}{L(\alpha_{ON} - 1)} \quad (2.16)$$

พารามิเตอร์เดียวที่ไม่สามารถหาที่มาได้คือ  $M$  หมายถึงจำนวนของ ON-OFF Sources นอกจากนั้น ตัวที่สร้างทราฟฟิกจะต้องหาค่าในบางทิศทางเพื่อที่จะใช้วิธีนี้ได้ พารามิเตอร์หลักๆ ที่น่าสนใจคือ Hurst Parameter และความจริงที่ว่าจากรู้ค่าได้ก็เมื่อมีการสร้างแพ็กเก็ต เราไม่สามารถสมมติทราฟฟิกที่จะออกมาเพราะว่าทราฟฟิกนั้นขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการสร้าง การสร้างทราฟฟิกแบบความคล้ายคลึงตัวเองต้องทำอย่างมีเหตุผลและวิธีที่มีเหตุผลได้เสนอโดย Willinger ซึ่งตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของทราฟฟิกที่สร้างขึ้นมา

นิยามต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

$Y(t)$  คือจำนวนของแพ็กเก็ตที่มาถึงที่เวลา  $t$  และ  $t$  จะมีค่ามากขึ้นตามการมาถึงของแพ็กเก็ต (Packet Arrival Cumulative Process)

$X_t$  คือจำนวนแพ็กเก็ตที่เพิ่มขึ้น (Increment Process) ของ  $Y(t)$ , คือ  $X_t = Y(t+1) - Y(t)$

$X_s^{(m)}$  คือกระบวนการรวมกัน (Aggregated Process) ของค่า  $X_t$  ที่มีระดับเท่ากับ  $m$  คือ

$$X_s^{(m)} = \frac{1}{m} [X_{sm-m+1} + X_{sm-m+2} + \dots + X_{sm}]$$

ทราฟฟิกที่สร้างขึ้นมาจะเป็นทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองถ้า

$$X^{(m)} = m^{H-1} X \quad (2.17)$$

ดังนั้น

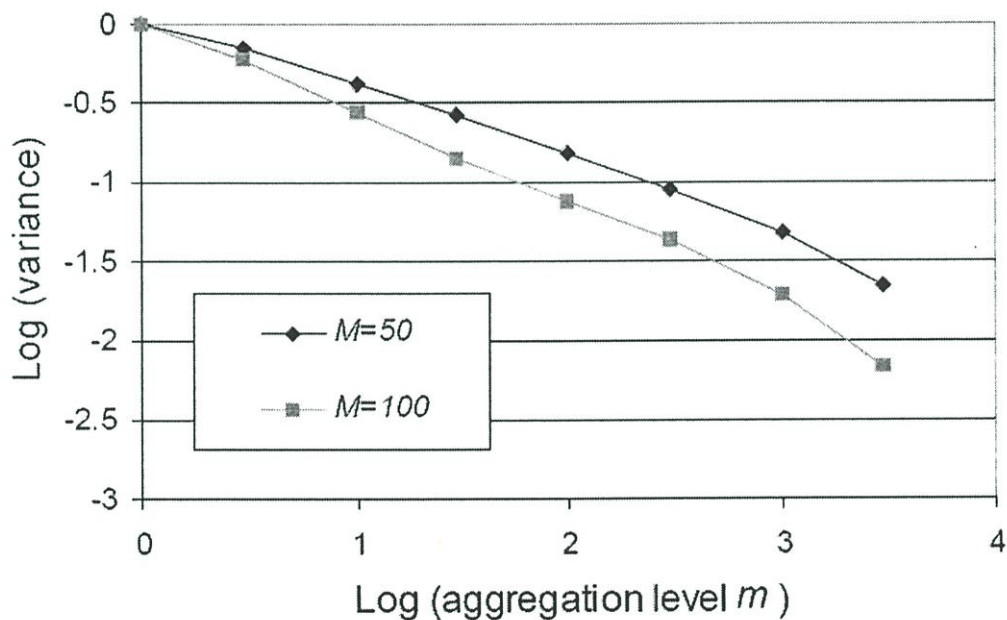
$$\text{Var}(X^{(m)}) = m^{2(H-1)}\text{Var}X \quad (2.18)$$

และ

$$\log \left[ \frac{\text{Var}(X^{(m)})}{\text{Var}(X)} \right] = (2H - 2) \times \log(m) \quad (2.19)$$

ดังนั้น กราฟ Log-Variance ต้องมีความชัน  $2H-2$  เทียบกับ  $\log(m)$  เปรียบเทียบกับ กราฟ Log-Variance ของกระบวนการปัวซอง (Poisson Incremental Process) ที่มีความชัน  $-1$

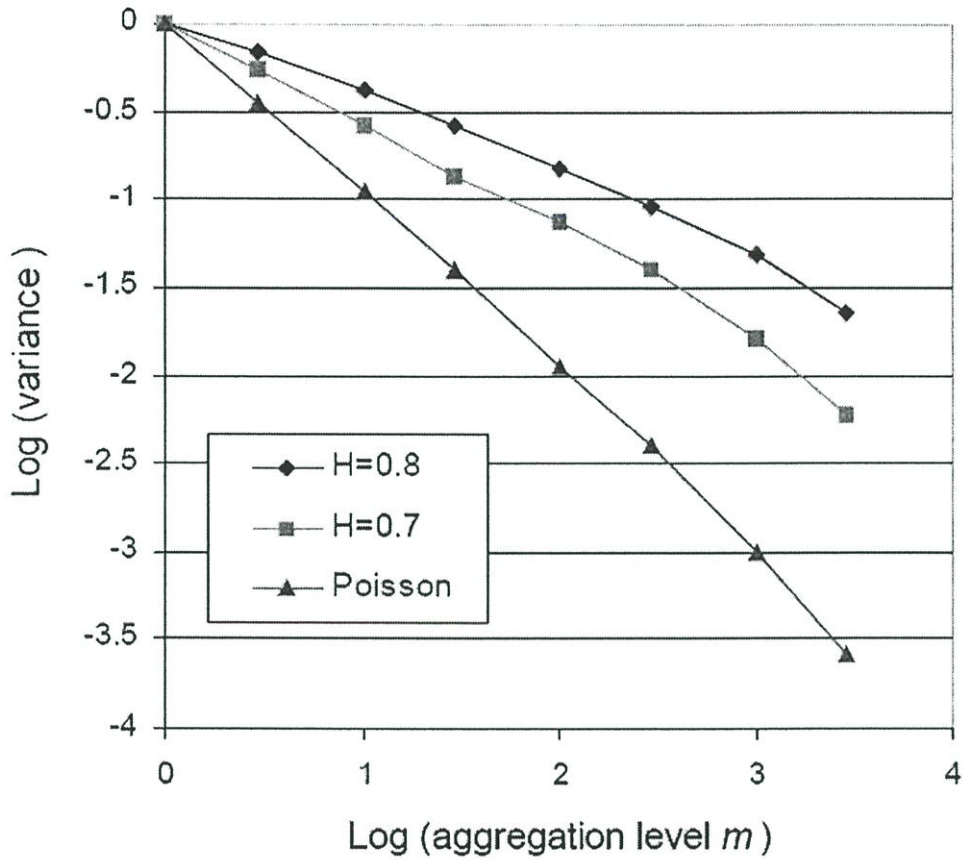
กราฟระหว่าง Log-Variance-Log  $(m)$  ของกราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองแสดงในรูปที่ 2.12 สำหรับค่า  $M$  ที่ต่างกันสองค่า (จำนวนรวมของ ON-OFF Sources) และค่า Hurst Parameter = 0.8 ดังนั้นความชันที่ได้ของกราฟคือ  $-0.4$



รูปที่ 2.12 กราฟ Log-Variance-Log(m) เมื่อ Source ( $M$ ) เท่ากับ 50 และ 100

จากรูปพบว่าเมื่อ  $M = 50$  จะได้ความชันเท่ากับ  $-0.4$  โดยที่มีค่า  $H = 0.8$  แต่เมื่อค่า  $M = 100$  จะได้ความชันเท่ากับ  $-0.55$  และค่า  $H = 0.725$  ซึ่งน้อยกว่าที่กำหนดไว้ดังนั้นค่าที่พอดีของ ON-OFF Sources คือที่  $M = 50$

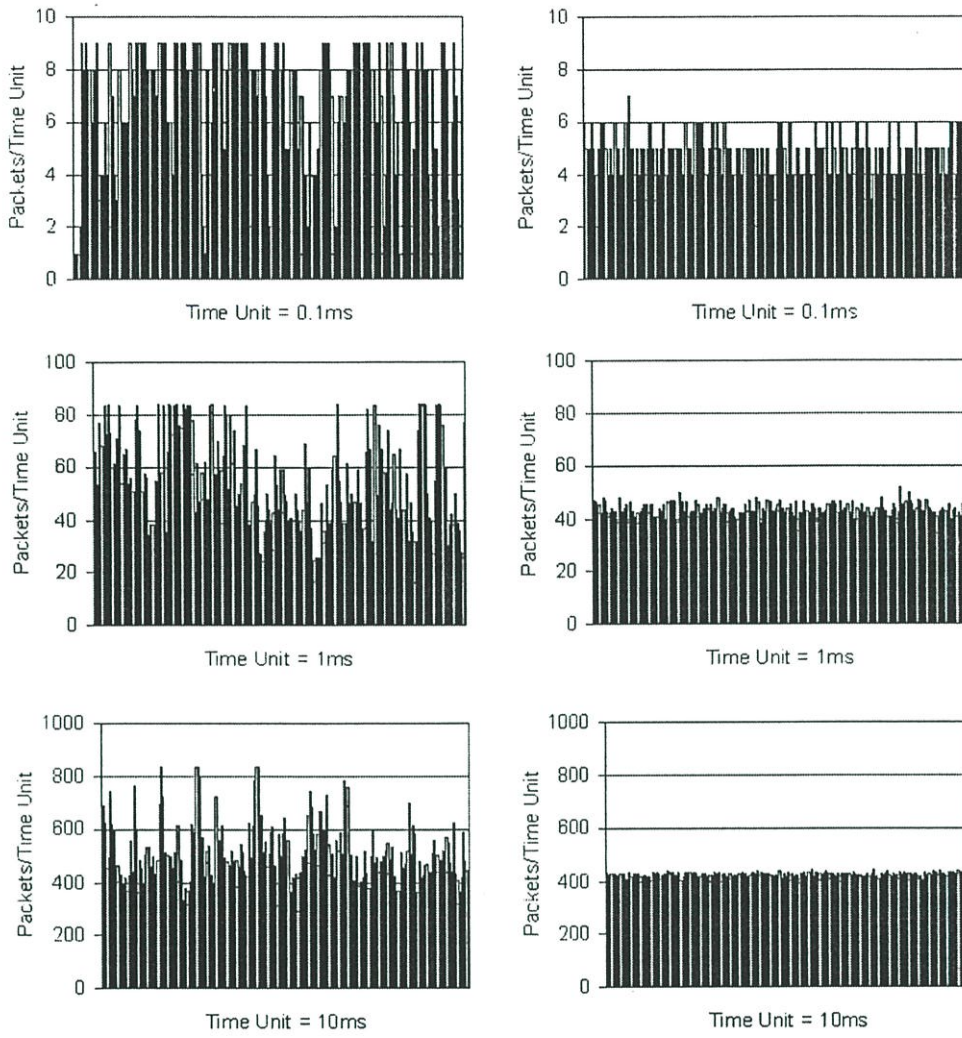
มากไปกว่านั้น รูปที่ 2.13 แสดงกราฟของ Log-Variance-Log  $(m)$  สำหรับค่า  $M = 50$  และค่า  $H$  ที่แตกต่างกันสองค่า กราฟกราฟฟิกแบบปัวซองก็วาดอยู่ในรูปเดียวกัน และพบว่าค่าความชันมีค่าใกล้เคียงกับ  $-1$



รูปที่ 2.13 กราฟ Log-Variance-Log( $m$ ) ของทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและแบบปัวซอง

เทคนิคที่วาดกราฟในรูปที่ 2.10 ได้นำมาใช้ในรูปที่ 2.14 ภาพด้านซ้ายเป็นทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง และภาพด้านขวาเป็นทราฟฟิกแบบปัวซอง จากการจำลองแบบของทราฟฟิกทั้งสองในกรณีที่  $L = 0.5$  และค่า Hurst Parameter ของทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง  $H = 0.8$  โดยในรูปที่ 2.10 พบว่าทราฟฟิกแบบปัวซองมีค่าความไม่แน่นอนลดลงเมื่อช่วงเวลาเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามกับทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองที่มีค่าความไม่แน่นอนเพิ่มขึ้นทั้งสามช่วงเวลาที่มีช่วงเวลาเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้การคำนวณเกี่ยวกับทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองได้มีการศึกษาในเอกสารอ้างอิง [23], [24], [25]



รูปที่ 2.14 กราฟฟีกที่สร้างจากกราฟฟีกแบบคล้ายคลึงตนเองและกราฟฟีกแบบบิวซอง

## บทที่ 3

### FT-TR และ TT-FR

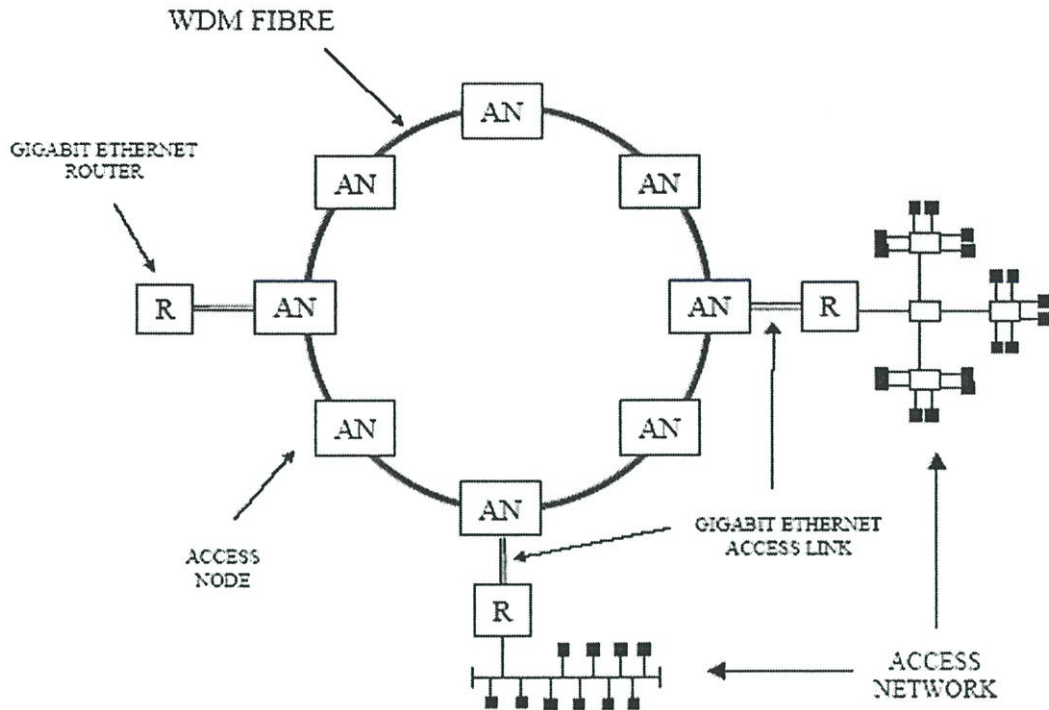
ในบทนี้จะได้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์คืองานวิจัยเกี่ยวกับตัวส่งกำหนดช่องสัญญาณที่จะส่งและตัวรับปรับค่าได้และงานวิจัยเกี่ยวกับตัวส่งปรับค่าได้และตัวรับกำหนดช่องสัญญาณที่จะรับไว้

#### 3.1 Fixed Transmitter – Tunable Receiver (FT-TR) [26]

ในงานวิจัยชื่อ Performance of a slotted MAC Protocol for WDM Metropolitan Access Ring Networks under Self-Similar traffic ได้เสนอสถาปัตยกรรมโครงข่ายวงแหวนการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบสล็อต (WDM Slotted Ring Network Architecture) ซึ่งใช้กับโครงข่ายเมือง ได้มีการจำลองแบบโปรโตคอล MAC ในการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ ในการหาค่าความยุติธรรมระหว่างโหนดและค่าประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ของช่องสัญญาณ ใช้สมการคณิตศาสตร์ง่าย ๆ ในการหาขนาดของโครงข่าย การจำลองแบบเหตุการณ์ที่ไม่ต่อเนื่อง ใช้วิธีการในการทำสล็อตให้ว่างที่โหนดส่ง และวิธีการทำสล็อตให้ว่างที่โหนดปลายทาง และศึกษาเกี่ยวกับการชนกันของข้อมูลที่ตัวรับ

งานวิจัยดังกล่าวได้เสนอสถาปัตยกรรมโครงข่ายวงแหวนการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบสล็อต (WDM Slotted Ring Network Architecture) ที่ใช้ใยแก้วเส้นเดียว มีจำนวนความยาวคลื่นต่ำ และสล็อตมีขนาดคงที่

โดยองค์ประกอบพื้นฐานประกอบด้วยโหนดเข้าถึง (Access Node หรือ AN) ซึ่งแต่ละโหนดมีความสามารถในการ Add และ Drop การเข้าถึงสล็อตในวงแหวน แต่ละโหนดมี 3 Network Ports จิกะบิต อีเทอร์เน็ต พอร์ต (Gigabit Ethernet (GbE) Ports) ใช้สำหรับการส่งระหว่าง Access Nodes และ Access Network แต่ละโหนดที่เข้าถึงใช้เชื่อมต่อระหว่าง Gigabit Ethernet (GbE) กับวงแหวน โดยข้อมูลถูกส่งจาก Access Network ไปยังที่อื่นๆ ซึ่งจะมีการรับโดยโหนดเข้าถึงผ่านมาทางเส้นทางจิกะบิตอีเทอร์เน็ต แล้วส่งผ่านวงแหวนการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นไปยังโหนดเข้าถึงปลายทาง และส่งข้อมูลต่อไปยัง Access Network ที่ต้องการสถาปัตยกรรมโครงข่ายแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สถาปัตยกรรมโครงข่ายวงแหวนสล็อตมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นบนโครงข่ายเมือง

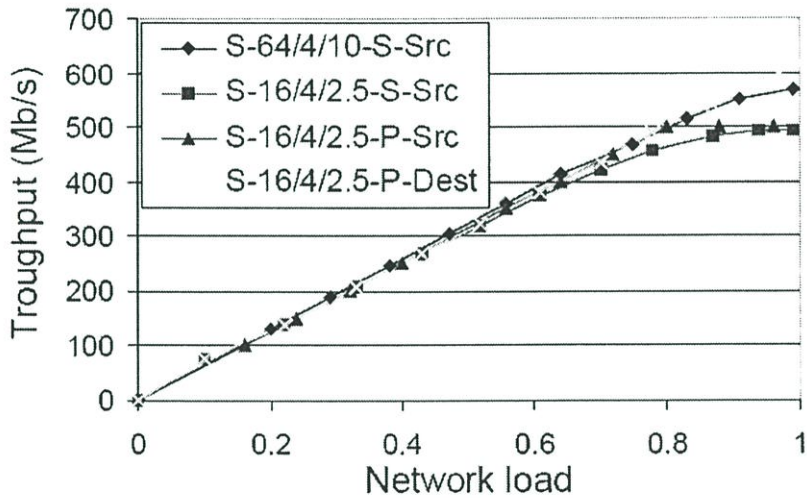
ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดพารามิเตอร์โครงข่าย

Fiber Length (FBL)	138,240 meters
Wavelength Rate (WVR)	OC-48 2.5 Gb/s
Light Velocity in Fiber (LV)	$2 \times 10^8$ m/s
Fiber Delay = FBL/LV	691.2 $\mu$ s
Number of Wavelengths per Fiber	4
Slot Size (S) $\approx$ Ethernet MTU	12,000 bits
Number of Slots per Wavelength = (FBL*WVR)/(LV*S)	144

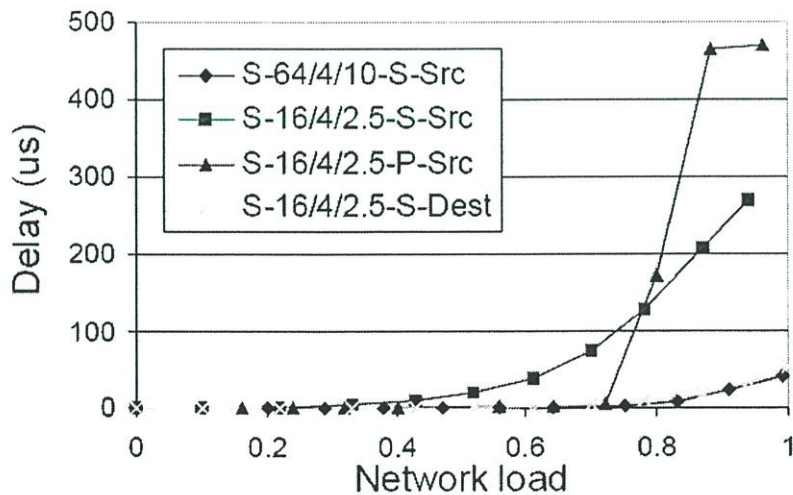
สถาปัตยกรรมโหนดเป็นแบบตัวส่งสามารถปรับความยาวคลื่นได้ (Tunable Transmitter (TT)) และตัวรับมีการกำหนดช่องสัญญาณที่จะรับไว้ (Fixed Receiver (FR)) และแบบตัวส่งกำหนดช่องสัญญาณที่จะส่ง (Fixed Transmitter (FT)) และตัวรับมีการกำหนดช่องสัญญาณที่จะรับไว้ (Fixed Receiver (FR)) ได้เสนอไว้แล้ว ซึ่งทั้งสองกรณีแต่ละช่องสัญญาณสามารถเห็นการเชื่อมต่อกับตัวรับ และต้องมีจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับจำนวนโหนดในโครงข่าย ซึ่งข้อดีคือจะไม่มีการชนกันของแพ็กเก็ตที่ตัวรับ แต่ความสามารถในการขยายเครือข่ายถูกจำกัด

สถาปัตยกรรมโหนดที่เสนอในงานวิจัยดังกล่าวเป็นแบบตัวส่งกำหนดช่องสัญญาณที่จะส่ง และช่องสัญญาณที่จะรับปรับค่าได้ (FT-TR) สถาปัตยกรรมนี้ถ้าจำนวนช่องสัญญาณน้อยกว่าจำนวนโหนดที่มีในโครงข่าย โหนดจะมีการแบ่งช่องสัญญาณทั้งหมดที่มีอยู่สำหรับการส่ง ข้อได้เปรียบหลักของสถาปัตยกรรมนี้คือ จำนวนของโหนดสามารถมากกว่าจำนวนของช่องสัญญาณ ทำให้ความสามารถในการขยายเครือข่ายไม่ถูกจำกัด

ผลการทดลองของงานวิจัยดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.2 และ รูปที่ 3.3 ซึ่งแสดงค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงแบนด์วิดสูงสุดของโครงข่าย และค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวตามลำดับ



รูปที่ 3.2 ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดของวิธี (FT-TR)



รูปที่ 3.3 ค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวของวิธี (FT-TR)

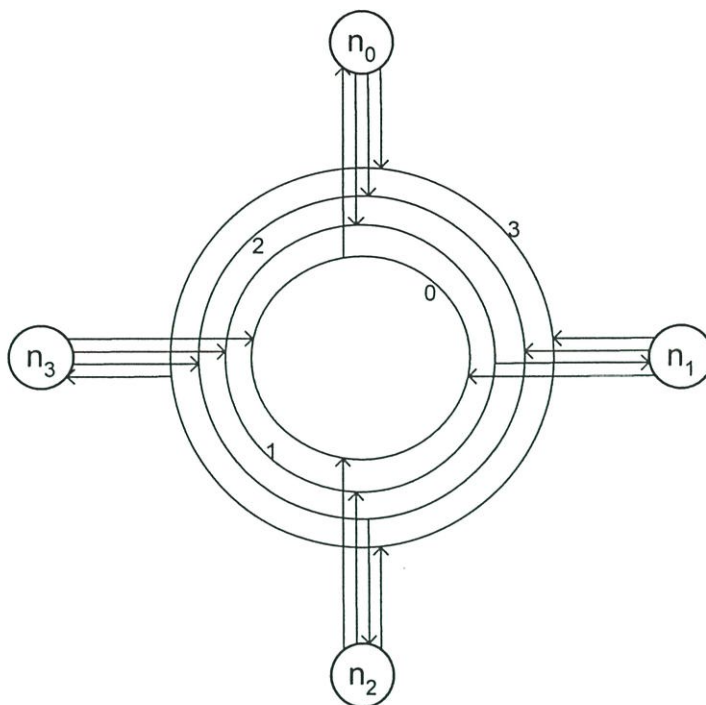
### 3.2 Tunable Transmitter – Fixed Receiver (TT-FR) [27]

ในงานวิจัยชื่อ All-Optical WDM Multi-ring with Differentiated QoS ได้เสนอโครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นที่ใช้แสงเป็นสื่อสัญญาณทั้งหมด ที่ใช้โทโปโลยี Slotted Multichannel Ring Topology โดยสถาปัตยกรรมโหนดประกอบด้วยตัวรับที่กำหนดช่องสัญญาณไว้แล้ว (Fixed Receiver) และตัวส่งปรับค่าได้ (Tunable Transmitter)

สถาปัตยกรรมโครงข่ายของงานวิจัยนี้ กำหนดให้  $M$  คือจำนวนของโหนดในโครงข่าย ซึ่งเท่ากับจำนวนช่องสัญญาณในโครงข่าย โดยช่องสัญญาณแบ่งเป็นสล็อต และสล็อตจะผ่านมาที่โหนดทุกๆ โทรม์สล็อต แพ็กเก็ตข้อมูลต้องกำหนดให้ขนาดพอดีกับสล็อต แต่ละช่องสัญญาณจะส่งข้อมูลไปยังปลายทาง และสมมติให้แพ็กเก็ตถูกถอดออกที่ปลายทางด้วย โดยวิธีนี้จะเกิดการขัดจังหวะที่แต่ละโหนด ซึ่งวิธีนี้จะไปจำกัดหรือลดผลกระทบของแพ็กเก็ตที่วนซ้ำอีกรอบ

เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของแพ็กเก็ตที่ส่งมายังปลายทางเดียวกัน โหนดจะทำการตรวจตราแต่ละช่องสัญญาณในวงแหวนก่อน จากนั้นโหนดจึงส่งแพ็กเก็ตที่มีความสำคัญมากกว่าไปยังปลายทางที่กำหนดไว้ ถ้าพบว่ามีสล็อตว่างแพ็กเก็ตก็จะถูกส่งไปยังปลายทางโดยไม่มีการชนกันของแพ็กเก็ต เมื่อมีการแย่งชิงเกิดขึ้นและแพ็กเก็ตที่มีความสำคัญสูงกว่าถูกส่งไปทำให้การส่งแพ็กเก็ตอื่นๆ ที่มีลำดับความสำคัญต่ำกว่าล่าช้าออกไป

เนื่องจากความสมมาตรของวงแหวนแต่ละโหนดจะมีค่าเฉลี่ยการเข้าถึงช่องสัญญาณเพื่อไปยังบางปลายทางดีกว่า และมีค่าเฉลี่ยการเข้าถึงช่องสัญญาณเพื่อไปยังปลายทางอื่นที่แยกว่า สมมติว่าตัวเลขของโหนดเพิ่มขึ้นตามทิศทางการส่งและช่องสัญญาณที่มีโหนด  $n_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, M-1$  ที่มีโอกาสการเข้าถึงโหนดที่ดีที่สุด ในการไปยังโหนดที่  $n_{|i-1|/M}$  (สัญลักษณ์  $|\cdot|_M$  แสดงมอดูโล  $M$ ) เนื่องจากการเข้าถึงช่องสัญญาณนี้โหนด  $n_i$  ต้องการไม่เลื่อนการส่งของโหนดอื่น ช่องสัญญาณที่โหนด  $n_i$  มีโอกาสการเข้าถึงช่องสัญญาณที่ไม่ดีในการไปยังโหนดปลายทางที่  $n_{|i+1|/M}$  ดังนั้นการเข้าถึงช่องสัญญาณนี้ของโหนด  $n_i$  จึงต้องเลื่อนการส่งออกไป  $M-2$  โหนด ในรูปที่ 3.4 โหนด  $n_0$  มีโอกาสในการเข้าถึงช่องสัญญาณที่ 3 ดีที่สุด (ไปยังโหนดที่ 3) โอกาสในการเข้าถึงช่องสัญญาณที่ 1 น้อยที่สุด ในการไปโหนด  $n_3$  จากโหนด  $n_0$  จึงต้องเลื่อนการส่งของโหนด  $n_2$  และโหนด  $n_3$  ไปก่อน ทิศทางของทราฟฟิกจากโหนด  $n_i$  ไปยังโหนด  $n_j$  มีลำดับความสำคัญในการเข้าถึงต่ำกว่าทราฟฟิกจากโหนด  $n_{|j+1|/M}; n_{|j+2|/M}; \dots; n_{|i-2|/M}; n_{|i-1|/M}$  ไปยังโหนด  $n_j$  สามารถพูดได้ว่าโหนด  $n_i$  มีความสำคัญในการเข้าถึง  $|i-j|/M$  เมื่อส่งไปยังโหนด  $n_j$  โหนดแรกมีลำดับความสำคัญสูงสุด และโหนดที่  $M-1$  มีลำดับความสำคัญต่ำที่สุด เมื่อแพ็กเก็ตพร้อมที่จะส่งจากโหนด  $n_i$  ไปยังโหนด  $n_j$  การส่งจะล่าช้าออกไปถ้าช่องสัญญาณที่ไปยังโหนด  $n_j$  มีการส่งข้อมูลอยู่โดยโหนดที่มีลำดับความสำคัญสูงกว่าในการส่งไปโหนด  $n_j$



รูปที่ 3.4 โทโปโลยีของโครงข่ายที่มี  $M = 4$

แต่ละโหนดเก็บแพ็กเก็ตที่สร้างขึ้นมาไว้ในคิวที่เป็นแบบมาก่อนส่งไปก่อน (First In First Out (FIFO)) ระบบคิวแบบนี้ป้องกันปัญหาการบล็อกที่หัวคิว (Head of Line Blocking)

โปรโตคอลที่ใช้ในการเข้าถึงต้องรับประกันการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรการส่งข้อมูลและลดปัญหาเรื่องความยุติธรรม โดยโปรโตคอลที่พิจารณานำมาใช้คือ Synchronous Round Robin with Reservations ( $SR^3$ ) ซึ่งสามารถแบ่งระดับได้ 3 ระดับคือ Access strategy, The Fairness Control Scheme และ The Reservation Scheme จุดประสงค์ของ Access strategy คือลดจำนวนของการแย่งชิงระหว่างแพ็กเก็ตที่พยายามส่งเข้ามาในสล็อตเดียวกันที่ตัวรับเดียวกัน โดยจะพิจารณาวิธีการเข้าถึงด้วยการเลือกแพ็กเก็ตที่มีลำดับความสำคัญสูงกว่า ตัวส่งแต่ละตัวจะเลือกแพ็กเก็ตเพื่อทำการส่งโดยที่ไม่รู้สถานะของช่องสัญญาณ คือไม่มีการรับประกันว่าแพ็กเก็ตที่ถูกเลือกนี้จะถูกส่งไปยังปลายทาง เนื่องจากช่องสัญญาณที่จะส่งแพ็กเก็ตไปยังปลายทางอาจจะไม่ว่าง ซึ่งในกรณีนี้โหนดต้องรอการส่งออกไปเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการชนกัน แม้ว่าแพ็กเก็ตสามารถส่งโดยไม่มีการแย่งชิงเป็นไปได้ที่การใช้ประโยชน์แบนด์วิดธ์ของโครงข่ายจะไม่สามารถใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุดได้ วิธีการที่นำมาใช้คือ Synchronous Round Robin (SRR) ซึ่งวิธีนี้ทำให้แบนด์วิดธ์สามารถใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถไปบังคับให้เกิดความยุติธรรมด้วยตัวเองได้ วิธีการควบคุมความยุติธรรมซึ่งได้มาจาก Meta-Ring High-Speed Network ซึ่งรับประกันความยุติธรรมในการเข้าถึงทุกๆ โหนด ทำให้การใช้ประโยชน์จากแบนด์วิดท์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

แม้ว่า MMR จะทำให้เกิดความยุติธรรมในการใช้แบนด์วิดท์ แต่ความหน่วงจากแพ็กเก็ต (เวลาที่แพ็กเก็ตมาที่คิวไปจนถึงเวลาที่เริ่มส่งแพ็กเก็ต) ภายใต้โหลดที่เกินและไม่สม่ำเสมออาจจะมีมากเกิน และการส่งอาจจะสม่ำเสมอได้ วิธีการจอง (Reservation Scheme) โหนดส่งจะทำการจองสล็อตไว้ ซึ่งผลที่ได้คือโหนดจะมีการรับประกันการเข้าถึงสล็อตที่ได้จองไว้

เวลาจะถูกแบ่งย่อยๆ เป็นระยะเวลาที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งเรียกว่า Reservation Frame แต่ละ Reservation Frame ประกอบด้วย F SRR Frames แต่ละโหนดสามารถจองได้ F สล็อตต่อ Reservation Frame สำหรับการส่งแพ็กเก็ตไปยังปลายทางโดยจองแบนด์วิดท์ได้มากที่สุดของความจุ  $1/(M-1)$  ของความจุของสัญญาณ สล็อตที่ถูกจองสามารถให้มีการส่งแพ็กเก็ตตามทราฟฟิกแต่ละจำพวก โดยโหนดต้องระบุตามจำนวนของสล็อตที่จองไว้ ซึ่งวิธีการจองสล็อตจะได้ผลดีถ้าโหนดของโครงข่ายทั้งหมดทราบการจองของโหนดอื่นๆ

## บทที่ 4

# โปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อที่นำเสนอ

### 4.1 สรุปปัญหาของระบบและแนวความคิดของการพัฒนา

ปัญหาที่สนใจคือ การพัฒนาโปรโตคอลเข้าถึงสื่อ (MAC Protocol) ซึ่งใช้ในการรับ/ส่ง ข้อมูลเข้าออกจากช่องสัญญาณ และจัดการกับสลิตที่ว่างหลังจากการส่งข้อมูลเสร็จแล้ว เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด เช่น ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันได้มีผู้เสนอวิธีการมากมายในการแก้ปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตามวิธีการต่างๆ ที่ได้มีการนำเสนอ นั้นสามารถสรุปได้ว่ามีพื้นฐานอยู่บนระบบการควบคุมการเข้าถึงสื่อ 2 วิธี ได้แก่

1. การเลือกใช้งานช่องสัญญาณโดยช่องสัญญาณตัวส่ง (หรือโหนดส่ง) แบบปรับได้และช่องสัญญาณตัวรับ (หรือโหนดรับ) แบบคงที่ (Tunable Transmitter – Fixed Receiver (TT-FR)), และ
2. การเลือกใช้งานช่องสัญญาณโดยช่องสัญญาณตัวส่งคงที่และช่องสัญญาณตัวรับปรับได้ (Fixed Transmitter – Tunable Receiver (FT-TR))

สำหรับวิธีการแรกมีข้อดีคือไม่มีการชนกันของข้อมูลที่ตัวรับเนื่องจากมีการกำหนดช่องสัญญาณในการรับไว้ก่อนแล้ว แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือจำนวนช่องสัญญาณจะต้องมีจำนวนเท่ากับจำนวนของโหนดซึ่งจะทำให้ความสามารถในการขยายขนาดของโครงข่ายมีจำกัด ตัวอย่างเช่น สำหรับ OC-48 ซึ่งใช้งานได้สูงสุด 16 ความยาวคลื่นจะสามารถขยายขนาดได้สูงสุดเพียง 16 โหนดเท่านั้น เป็นต้น

วิธีการที่สองได้แก้ไขข้อด้อยของวิธีการแรกโดยการกำหนดช่องสัญญาณส่งที่คงที่และอนุญาตให้โหนดหลายๆ โหนดใช้ช่องสัญญาณร่วมกันได้ จึงทำให้ลดข้อจำกัดในการขยายขนาดของโครงข่ายลง อย่างไรก็ตามที่ตามมาคือเกิดปัญหาการชนกันของข้อมูลที่โหนดรับเนื่องจากตัวรับจะต้องรอรับข้อมูลจากทุกๆ ช่องสัญญาณ

โดยสรุปแล้วโปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อที่ดีต้องมีคุณสมบัติดังนี้

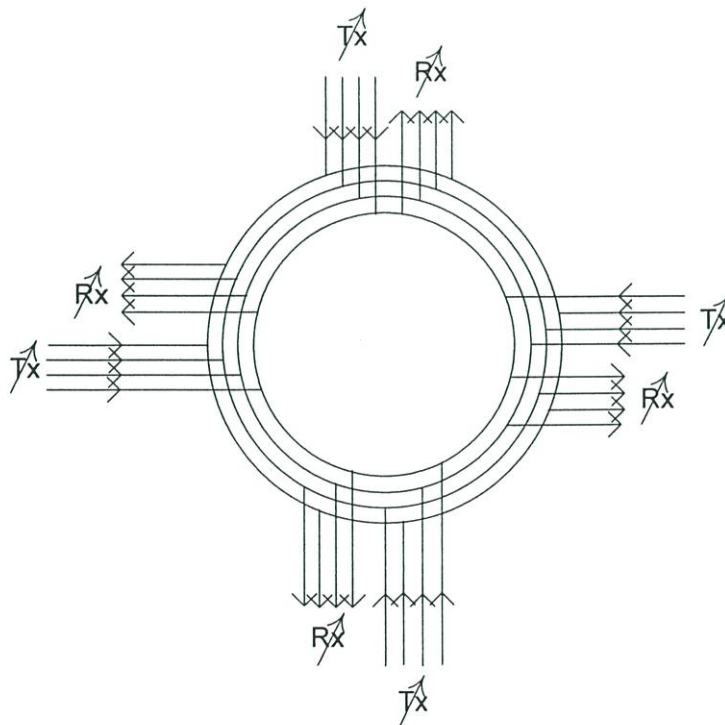
1. ต้องสามารถจัดการช่องสัญญาณ หรือสลิต ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถใช้แบนด์วิดท์ของโครงข่ายได้สูงสุด
2. ต้องมีค่าวิสัยสามารถในการส่งข้อมูลสูง
3. ค่าเวลารอคอยของแพ็กเก็ตในคิวมีค่าต่ำ
4. สามารถป้องกันการชนกันของแพ็กเก็ตที่ตัวรับได้

## 4.2 วิธีการที่นำเสนอ Tunable Transmitter – Tunable Receiver (TT-TR)

เพื่อให้สามารถบรรลุเป้าหมายของโปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อตั้งที่กล่าวไว้ข้างต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำแนวคิด 3 ประการเพื่อใช้พัฒนาโปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงสื่อให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น แนวคิดทั้ง 3 ประการได้แก่

1. การใช้การปรับเลือกช่องสัญญาณส่งและรับทั้งด้านส่งและด้านรับ เพื่อใช้ช่องสัญญาณให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ทำให้ส่งข้อมูลที่ช่องสัญญาณใดๆ ที่ว่างได้ทันที
2. การใช้การทำสล็อตให้ว่างโดยโหนดปลายทาง เพื่อให้สามารถนำสล็อตกลับมาใช้ได้ใหม่ได้อย่างรวดเร็วขึ้น
3. การใช้บัฟเฟอร์หนึ่งตัวต่อหนึ่งความยาวคลื่นที่โหนดปลายทาง เพื่อป้องกันการชนกันของช่องสัญญาณที่ปลายทาง

แนวความคิดแรกที่นำเสนอนี้เป็นแบบตัวส่งปรับความยาวคลื่นและตัวรับปรับความยาวคลื่น Tunable Transmitter – Tunable Receiver (TT-TR) ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองตัวส่งปรับความยาวคลื่นและตัวรับปรับความยาวคลื่น

แบบจำลองที่นำเสนอนี้ ใช้กระบวนการที่ทั้งตัวส่งและตัวรับสามารถปรับช่องสัญญาณในการรับส่งข้อมูลได้ (Tunable Transmitter – Tunable Receiver (TT-TR)) ซึ่งช่วยลดค่าหน่วยเวลาของการรอคอยการส่งในคิวลง จึงเป็นการเพิ่มค่าวิสัยสมารถให้สูงขึ้น การปรับช่องสัญญาณได้นี้ทำให้โครงข่ายสามารถมีจำนวนโหนดมากกว่าจำนวนช่องสัญญาณได้จึงไม่เกิดปัญหาทางด้านขยายขนาดของโครงข่ายในอนาคต

สำหรับแนวความคิดที่สองนั้นเพื่อเพิ่มค่าวิสัยสมารถในการส่งข้อมูล ได้มีการนำเทคนิคสำหรับการทำเครื่องหมายกับสล็อตที่ว่างด้วยวิธีการถอดที่ปลายทาง (Destination Stripping Operation) เข้ามาใช้ เนื่องจากวิธีการถอดที่แหล่งกำเนิด (Source Stripping Operation) จะใช้การทำเครื่องหมายให้สล็อตว่างหลังจากที่วนจนครบรอบแล้วโดยโหนดส่งทำให้สล็อตต้องเคลื่อนที่จนครบรอบ แล้วจึงจะถูกใช้งานได้ในรอบถัดไปทำให้ขาดประสิทธิภาพ แต่วิธีการถอดที่ปลายทางจะมีข้อดีที่การทำเครื่องหมายที่สล็อตนั้นว่าเป็นสล็อตว่างสามารถทำได้ที่โหนดรับ ทำให้สล็อตสามารถใช้งานได้ในโหนดถัดไป โดยไม่ต้องรอจนครบรอบ ทำให้ได้ค่าวิสัยสมารถที่สูงกว่าและค่าเวลาประวิงที่ต่ำกว่าวิธีการถอดที่ต้นทาง วิธีการที่นำเสนอจึงเลือกวิธีการถอดที่ปลายทางมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล

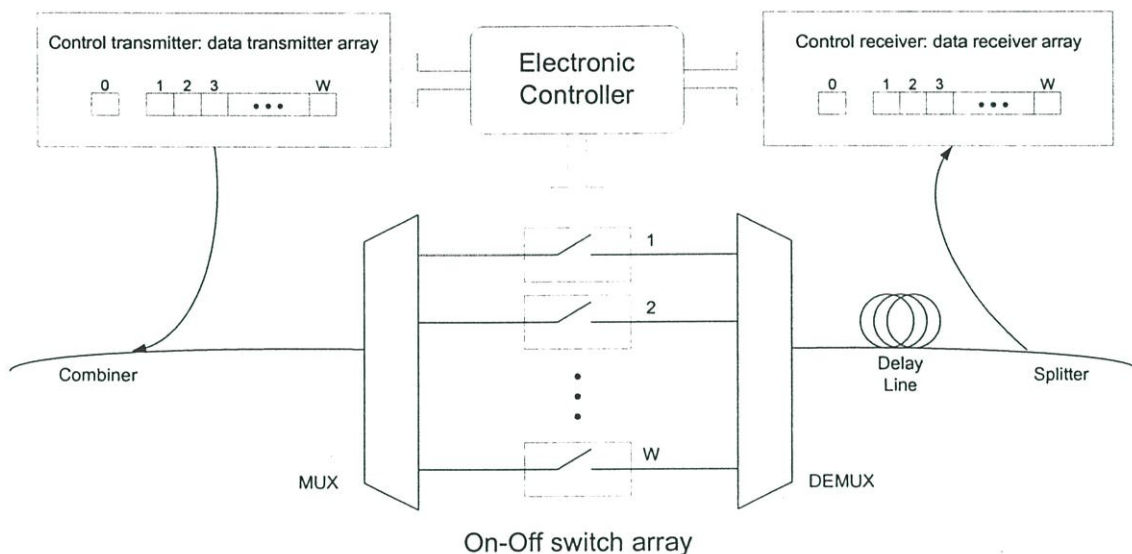
แนวความคิดสุดท้ายเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาด้านการชนกันของข้อมูลที่ตัวรับ วิธีการที่นำเสนอจึงได้ออกแบบให้เพิ่มบัฟเฟอร์ที่ตัวรับให้มีจำนวนเท่ากับจำนวนช่องสัญญาณ จึงทำให้สามารถรับข้อมูลจากหลายๆ ช่องสัญญาณได้ในเวลาเดียวกัน จึงเป็นการลดปัญหาการชนกันของข้อมูลลง

ในการจำลองแบบเพื่อทดสอบสมรรถนะของวิธีการที่นำเสนอ ได้นำเอาข้อดีของการใช้อินพุตทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง ซึ่งเป็นทราฟฟิกที่มีค่าวาเรียน (Variance) สูงหรือมีการเปลี่ยนแปลงสูงแม้ในช่วงเวลาที่นานๆ ซึ่งคล้ายกับทราฟฟิกจริง ต่างจากทราฟฟิกบิวของที่จะมีการเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อมีการกำเนิดทราฟฟิกในช่วงเวลานานๆ โดยจะมีการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอินพุตทราฟฟิกทั้งสองแบบ

สำหรับในการจำลองแบบได้เสนอรูปแบบที่ง่าย ๆ ของ ระบบโครงข่ายวงแหวนสล็อตมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบหลายช่องสัญญาณ (Multichannel WDM slotted ring) ด้วยใยแก้วเส้นเดียว และจำนวนความยาวคลื่นที่น้อย กรณีง่ายๆ จะกำหนดให้ขนาดของสล็อตคงที่ ซึ่งจะไม่พิจารณาความจุของแอดเดรสทั้งทางแสงและทางอิเล็กทรอนิกส์ (การตรงกันของตัวรับ การลดทอนของสัญญาณ การกระจายของแสงและอื่นๆ)

## โครงสร้างของโหนดที่ใช้อุปกรณ์แสงทั้งหมด

เราพิจารณาโครงข่ายวงแหวนที่มีโหนดเชื่อมต่อกัน ซึ่งมีจำนวนชั้นแนลข้อมูลเท่ากับ  $W$  และมี 1 ชั้นแนลควบคุม ชั้นแนลทั้งหมดคือ  $W+1$  ชั้นแนล ชั้นแนลควบคุมนี้ใช้เพื่อควบคุมการเข้าถึงและการจัดการวงแหวน สัญญาณแสงในชั้นแนลควบคุมจะไม่เดินทางผ่านโหนด แต่ใช้ในการควบคุมการรับและส่งข้อมูล แต่ละชั้นแนลข้อมูลโหนดจะมีตัวส่ง ตัวรับ และสวิตช์ปิด-เปิดแสง (On-Off Optical Switch) ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โครงสร้างโหนดของ All-optical WDM Ring

จากรูปให้โหนดมีการส่งและรับแพ็กเก็ตอย่างเป็นอิสระ (และพร้อมกัน) ในช่องสัญญาณข้อมูล สวิตช์ปิด-เปิดแสงใช้ควบคุมสัญญาณแสงผ่านโหนด และป้องกันสัญญาณผ่านอีกครั้งในวงแหวน การส่งแต่ละครั้งจะส่งโดยโหนดเริ่มต้น แพ็กเก็ตจะถูกส่งไปรอบวงแหวน และจะถูกถอดออกจากโหนดเมื่อวนกลับมาถึงโหนดเริ่มต้น หรือถอดที่โหนดปลายทาง ทุกโหนดที่สล็อตผ่านจะทำการคัดลอกแพ็กเก็ตโดย ออปติคอลล สปริตเตอร์ (Optical Splitter) โหนดใดที่ต้องการแพ็กเก็ตก็จะเก็บแพ็กเก็ตนี้ไว้ โหนดใดไม่ต้องการก็จะทิ้งแพ็กเก็ตไป บัพเฟอร์ของการส่งที่แต่ละคิวโหนด ก็จะสร้างแพ็กเก็ตก่อนที่จะส่งออกไป การทำงานของโหนดถูกควบคุมโดยตัวควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Controller) ซึ่งจะกำหนดสถานะของสวิตช์ปิด-เปิดแสง เวลาในการส่งแพ็กเก็ต ช่องสัญญาณที่ใช้ และการรับแพ็กเก็ตที่เข้ามา ตัวควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์จะทำงานแบบขนาน ขณะที่สัญญาณแสงจะผ่านสายประวิง (Delay Line) ที่เชื่อมต่อระหว่างสปริตเตอร์และดีมัลติเพล็กซ์เซอร์

## บทที่ 5

# แบบจำลองของระบบและผลการวิเคราะห์ ด้วยวิธีการจำลองแบบ

### 5.1 ข้อกำหนดและพารามิเตอร์ของการจำลองแบบ

พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับวัดประสิทธิภาพของโครงข่าย

- Average Queuing Delay คือ ค่าเฉลี่ยของเวลาการรอคอยในคิวของแพ็กเก็ตที่  
โหนดส่งเพื่อรอการส่งเข้าสู่โครงข่าย มีหน่วยเป็นวินาที

$$\text{Average Queuing Delay} = \frac{\sum_{i=1}^p (t_{out_i} - t_{in_i})}{p}$$

- เมื่อให้  $p$  = จำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ถูกส่ง  
 $T_{in}$  = เวลาที่แพ็กเก็ตเข้าสู่คิว เพื่อรอคอยการส่ง  
 $T_{out}$  = เวลาที่แพ็กเก็ตถูกส่งออกจากคิว

- Average Throughput per Node คือ ค่าเฉลี่ยของค่าวิสัยสามารถของแต่ละ  
โหนด มีหน่วยเป็น Mbps

$$\text{Average Throughput per Node} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{R_n}{T_n} \right)}{n}$$

- เมื่อให้  $n$  = จำนวนโหนดทั้งหมดในโครงข่าย  
 $R_n$  = แพ็กเก็ตที่ได้รับการส่งถึงปลายทางอย่างสมบูรณ์ของโหนด  $n$   
 $T_{out}$  = เวลาทั้งหมดที่ใช้ส่งถึงปลายทางอย่างสมบูรณ์ของโหนด  $n$

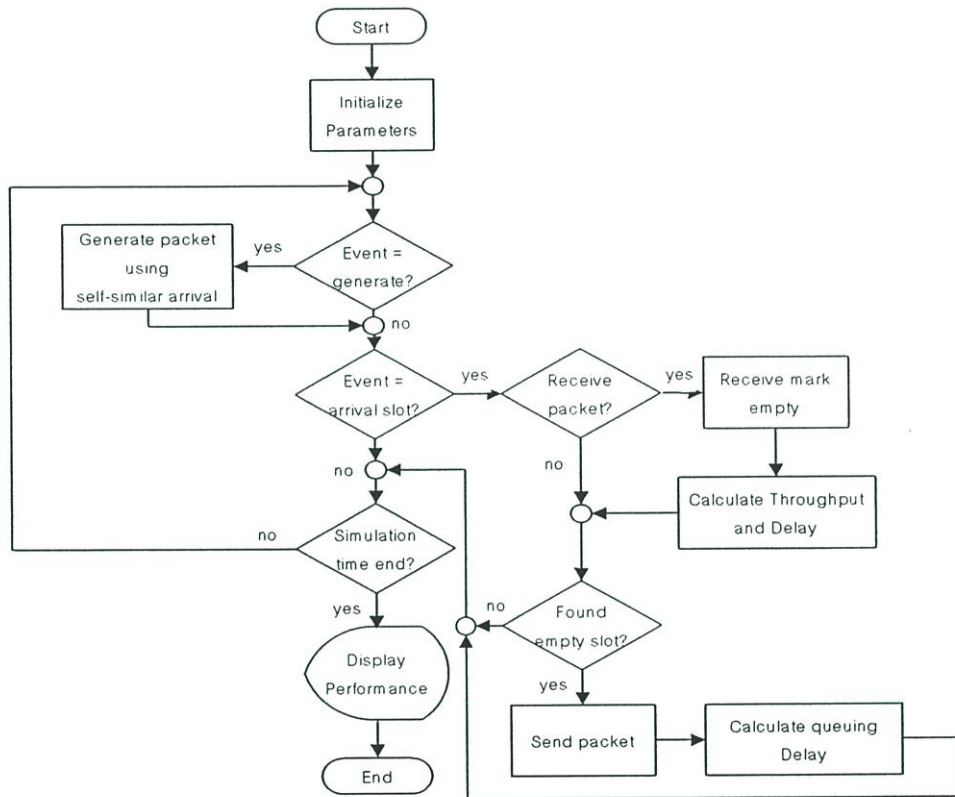
- Network Load คือ อัตราการมาถึงของอินพุตกราฟฟิกหารด้วยแบนด์วิดของ  
ช่องสัญญาณทั้งหมด

$$\text{Network Load} = \frac{\text{อัตราการมาของอินพุตกราฟฟิก (Mb/s)}}{\text{แบนด์วิดของช่องสัญญาณ (Mb/s)} \times \text{จำนวนของช่องสัญญาณ}}$$

### สมมติฐานของการจำลองแบบ

1. การมาถึงของแพ็กเก็ตข้อมูล (Input Traffic) เป็นทราฟฟิกแบบปัวซองและแบบคล้ายคลึงตัวเอง
2. ความยาวของแพ็กเก็ตและความยาวของสล็อตคงที่
3. ไม่พิจารณาความจุของแอดเดรสทั้งทางแสงและทางอิเล็กทรอนิกส์
4. ระยะห่างของแต่ละโหนดเท่ากัน
5. กำหนดพารามิเตอร์ของโครงข่าย ดังตารางที่ 5.1

แบบจำลองแสดงได้เป็นแผนภูมิรูปภาพตามรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนภูมิรูปภาพของแบบจำลอง

แผนภูมิรูปภาพของแบบจำลองสามารถอธิบายได้ดังนี้

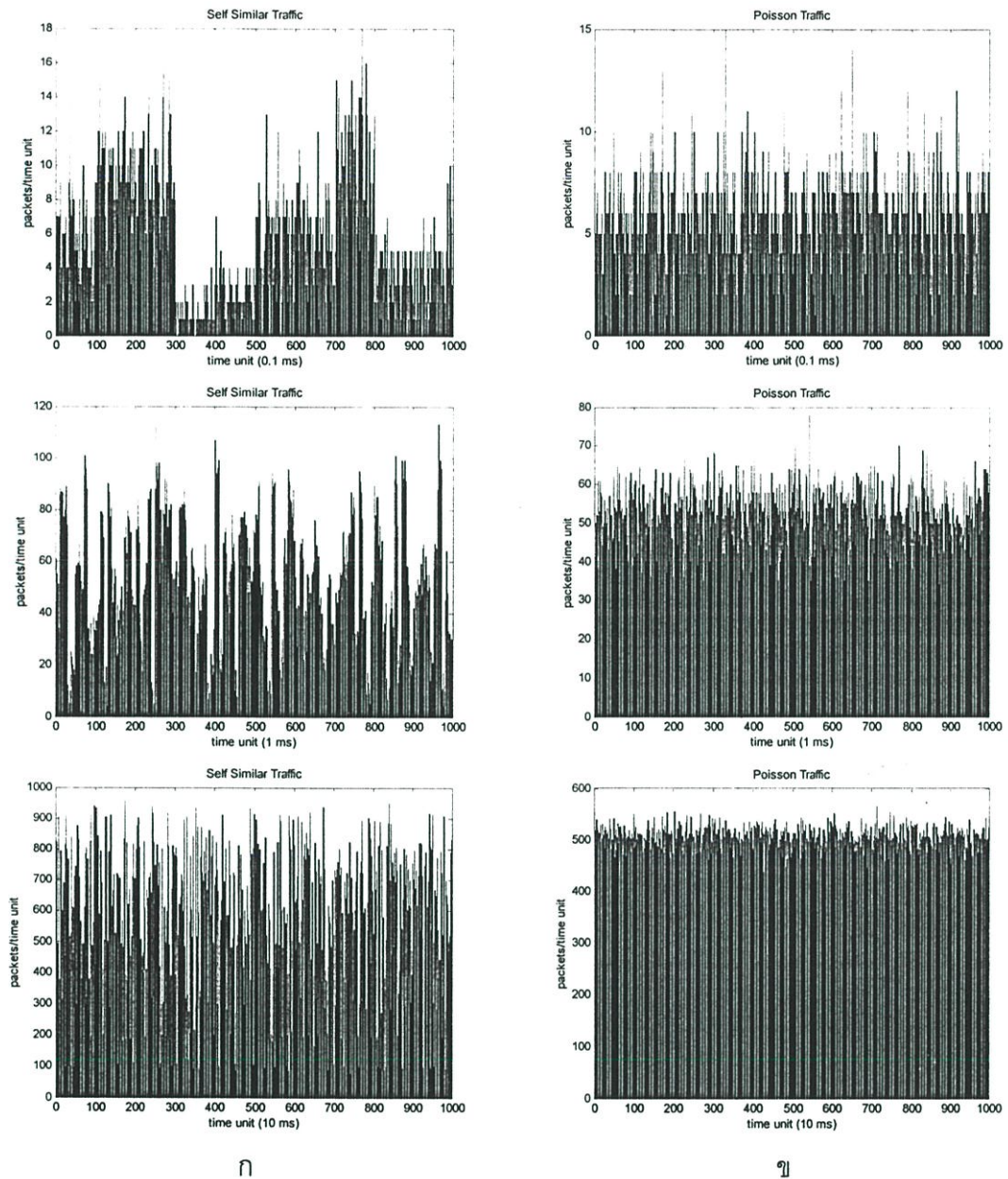
1. เริ่มต้นโปรแกรม
2. กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับการจำลองแบบ
3. ตรวจสอบว่าใช้เหตุการณ์สร้างแพ็กเก็ตหรือไม่ ถ้าใช่ก็จะไปสร้างแพ็กเก็ตด้วยทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง ถ้าไม่ใช่ก็จะไปตรวจสอบเหตุการณ์ข้อ 4

4. ตรวจสอบเหตุการณ์ว่ามีสล็อตมาที่ไหนหรือไม่ ถ้ามีสล็อตมาที่ไหนก็จะไปข้อที่ 5 ถ้าไม่มีสล็อตมาที่ไหนก็จะไปข้อที่ 6
5. ตรวจสอบเหตุการณ์ที่มีสล็อตมาที่ไหน ว่าจะรับแพ็กเก็ตนั้นหรือไม่ถ้ารับแพ็กเก็ต ก็จะไปข้อที่ 7 ถ้าไม่รับแพ็กเก็ตก็จะไปข้อที่ 8
6. ตรวจสอบเวลาการจำลองแบบว่าหมดหรือยัง ถ้าหมดเวลาการจำลองแบบแล้วก็จะไปข้อที่ 9 ถ้ายังไม่หมดเวลาการจำลองแบบก็จะไปข้อที่ 3
7. รับแพ็กเก็ตและทำให้สล็อตนั้นว่าง จากนั้นทำการคำนวณหาค่าวิสัยสามารถและค่าหน่วงเวลา จากนั้นไปเหตุการณ์ข้อที่ 8
8. ตรวจสอบสล็อตที่พบว่าว่างหรือไม่ ถ้าสล็อตนั้นว่างก็จะส่งแพ็กเก็ตและคำนวณค่าหน่วงเวลาในคิว จากนั้นไปข้อที่ 6 แต่ถ้าสล็อตนั้นไม่ว่างก็ให้ไปข้อที่ 6
9. แสดงผลการจำลองแบบ
10. จบการจำลองแบบ

#### ตารางที่ 5.1 NETWORK PARAMETERS

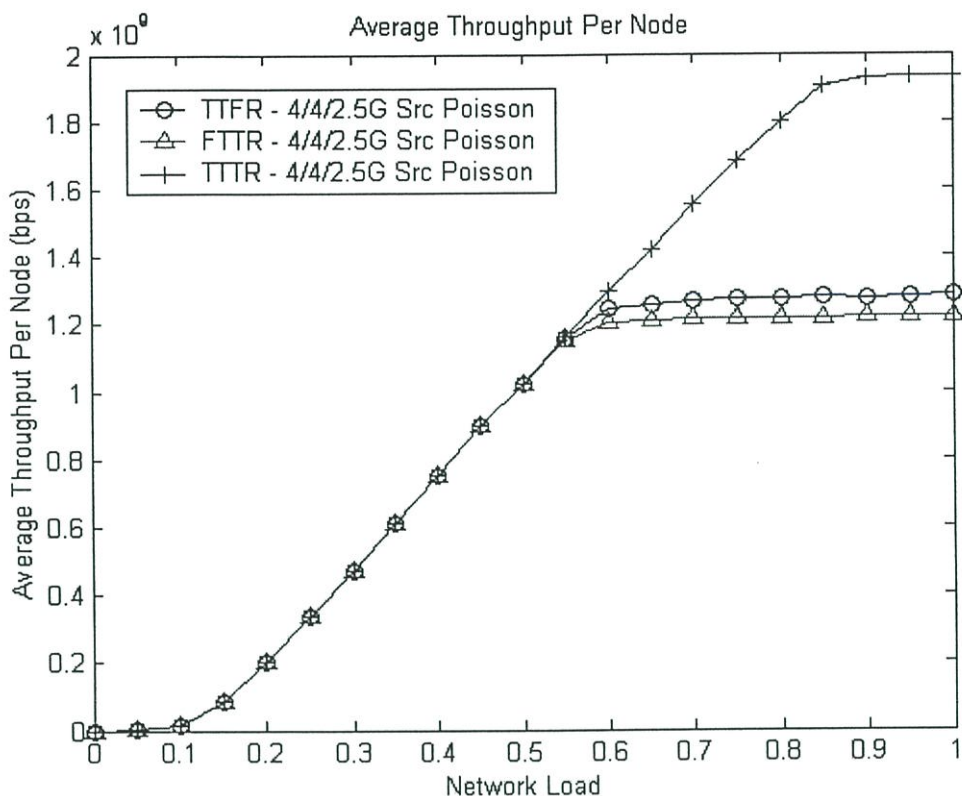
Fiber Length (FBL)	138,240 meters
Wavelength Rate (WVR)	OC-48 2.5 Gb/s
Light Velocity in Fiber (LV)	$2 \times 10^8$ m/s
Fiber Delay = FBL/LV	691.2 $\mu$ s
Number of Wavelengths per Fiber	4
Slot Size (S) $\approx$ Ether MTU	12,000 bits
Nb of Slots per Wavelength = (FBL*WVR)/(LV*S)	144
Queues number in buffer	100

## 5.2 ผลการเปรียบเทียบกราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองกับกราฟฟิกแบบบิวซอง



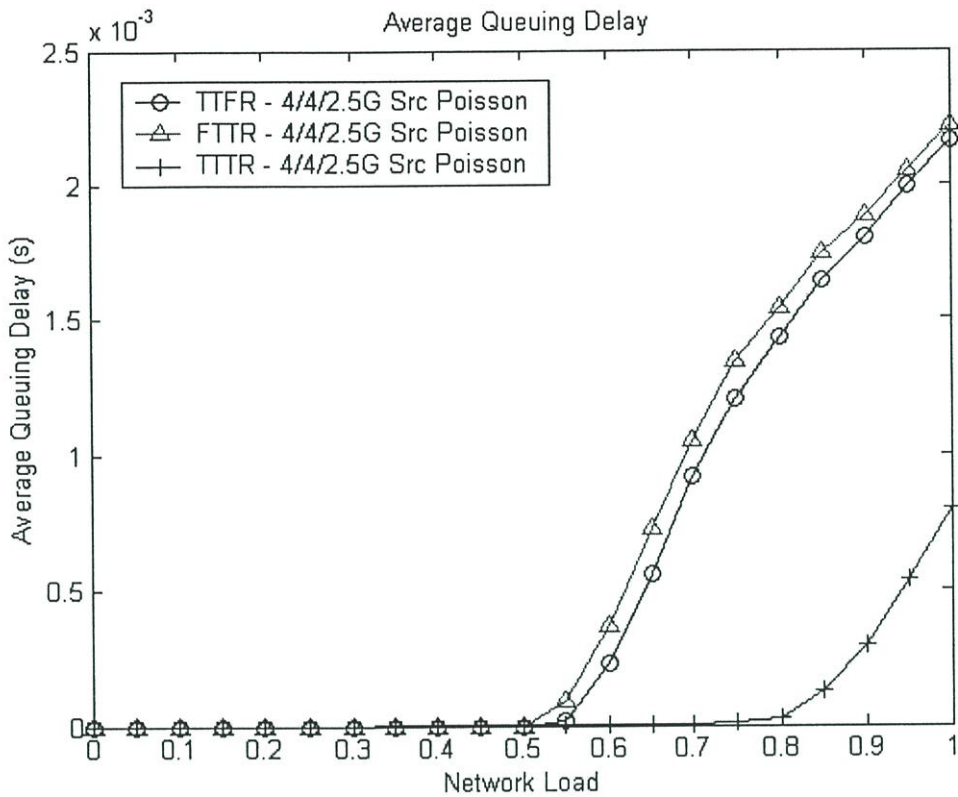
รูปที่ 5.2 กราฟฟิกที่สร้างจากแบบจำลองแบบคล้ายคลึงตัวเองและแบบจำลองแบบบิวซอง

จากรูปที่ 5.2 แสดงจำนวนแพ็กเก็ตต่อหนึ่งหน่วยเวลาเมื่อหน่วยเวลามีค่าต่างกัน รูปที่ 5.2ก หรือรูปทางซ้ายเป็นกราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและรูปที่ 5.2ข หรือรูปทางขวาเป็นกราฟฟิกแบบบิวซอง เมื่อเพิ่มหน่วยของเวลา กราฟฟิกแบบบิวซองจะมีลักษณะราบเรียบขึ้น เนื่องจากอัตราการมาถึงของแพ็กเก็ตสม่ำเสมอ แต่กราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองจะมีลักษณะไม่ราบเรียบเนื่องจากการมาถึงของแพ็กเก็ตไม่แน่นอน (Bursty) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับกราฟฟิกที่เกิดขึ้นจริงมากกว่ากราฟฟิกแบบบิวซอง



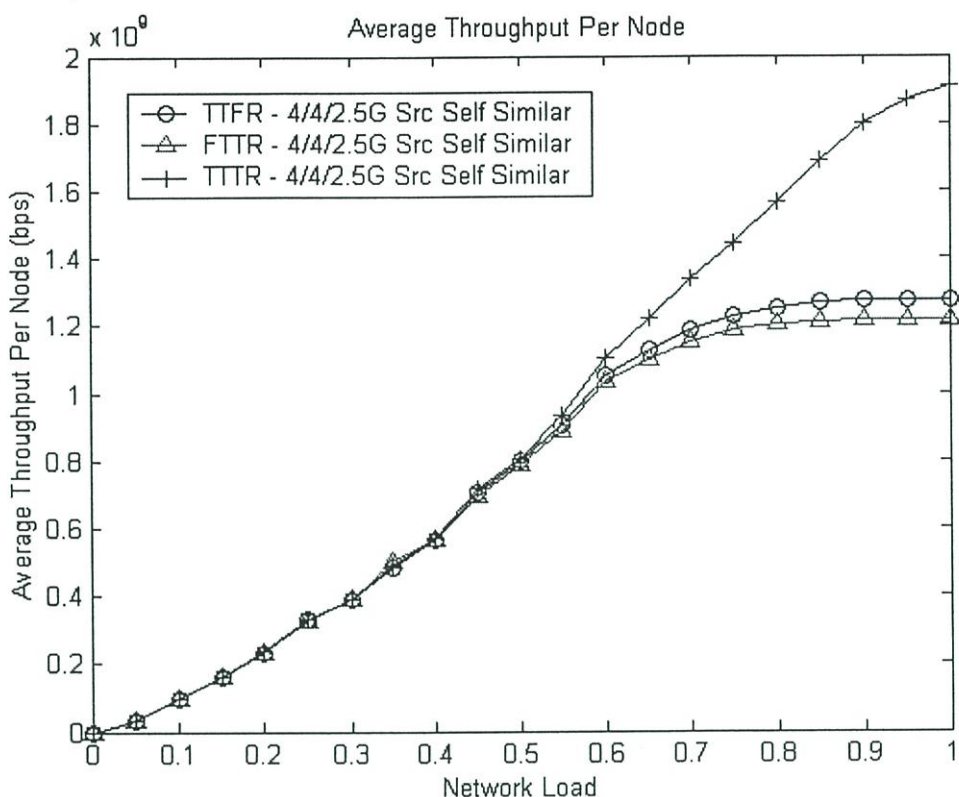
รูปที่ 5.3 ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดที่ใช้กราฟฟิกแบบบิวของและใช้การทำให้สลิตว่างที่โหนดส่ง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4

จากรูปที่ 5.3 แสดงค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนด (Average Throughput per Node) ที่ใช้อินพุตกราฟฟิกแบบบิวของและใช้การทำให้สลิตว่างที่โหนดส่ง มีจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 สำหรับวิธีการ TTTR ที่นำเสนอจะมี ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดสูงที่สุดเนื่องจากวิธีการที่นำเสนอนี้ทำให้ใช้แบนด์วิดอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดจากการสามารถเข้าถึงทุกๆ ช่องสัญญาณ ส่วนวิธีการ TTFR ใช้แบนด์วิดไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากตัวรับกำหนดช่องสัญญาณที่จะรับไว้ ถ้าช่องสัญญาณนี้มีการใช้งานก็จำเป็นต้องรอจนกว่าช่องสัญญาณนี้ว่างจึงจะสามารถรับข้อมูลได้ และวิธี FTTR การใช้แบนด์วิดไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากมีการกำหนดช่องสัญญาณที่จะส่งไว้ ถ้าช่องสัญญาณมีการใช้งานอยู่จะทำให้การส่งล่าช้าออกไปแม้ว่าช่องสัญญาณอื่นว่างก็ไม่สามารถใช้งานได้ วิธี TTFR มีค่าวิสัยสามารถสูงกว่าวิธี FTTR เนื่องจากการกำหนดช่องสัญญาณที่จะรับไว้ทำให้ไม่เกิดการชนกันของแพ็กเก็ตที่ตัวรับสามารถรับข้อมูลได้ทันทีจึงได้ค่าวิสัยสามารถที่สูงกว่า



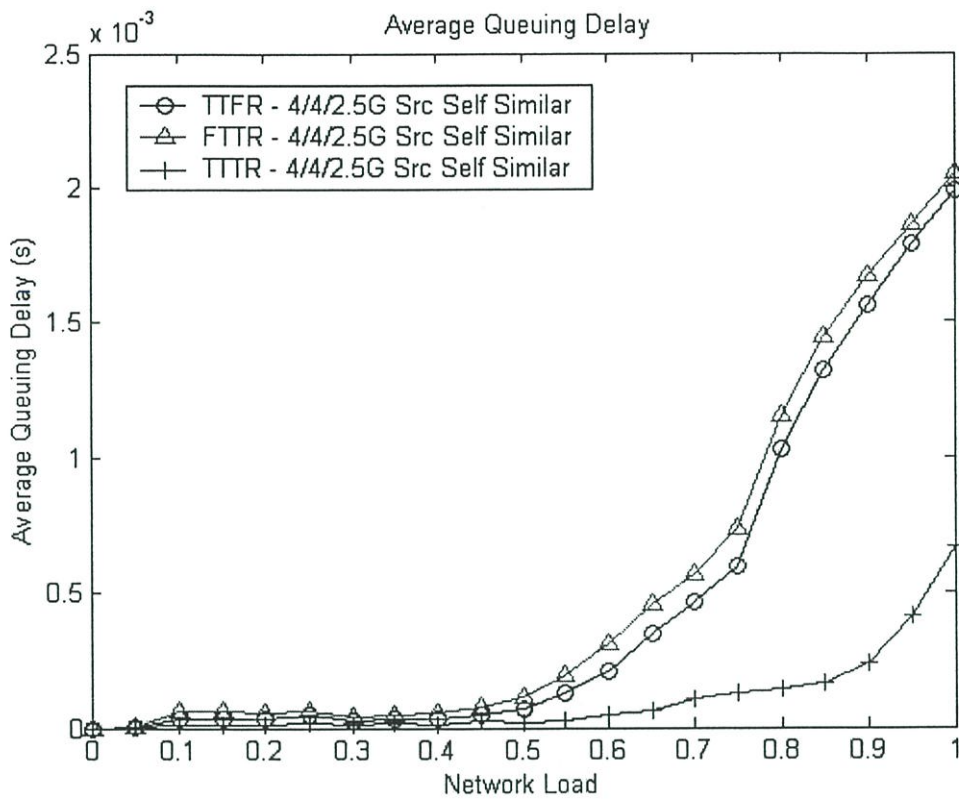
รูปที่ 5.4 ค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้กราฟฟิกแบบบิวของและใช้การทำให้สลิตว่างที่โหนดส่ง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4

จากรูปที่ 5.4 แสดงค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้อินพุตกราฟฟิกแบบบิวของ มีจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 และใช้วิธีการทำให้สลิตว่างโดยโหนดส่ง สำหรับวิธีการ TTTR ที่นำเสนอจะมีค่าความหน่วงน้อยที่สุดเนื่องจากการเข้าถึงได้ทุกๆ ช่องสัญญาณทำให้สามารถส่งแพ็กเก็ตได้ทันทีที่มีสลิตว่าง ส่วนวิธีการ FTTR มีค่าความหน่วงเฉลี่ยมากกว่าวิธีการ TTFR เนื่องจากการกำหนดช่องสัญญาณที่จะส่งไว้เมื่อช่องสัญญาณที่จะส่งแพ็กเก็ตไม่ว่างทำให้ไม่สามารถส่งข้อมูลเข้าไปในช่องสัญญาณที่กำหนดไว้แล้วนี้ไปยังปลายทางได้ทำให้การส่งล่าช้าออกไป



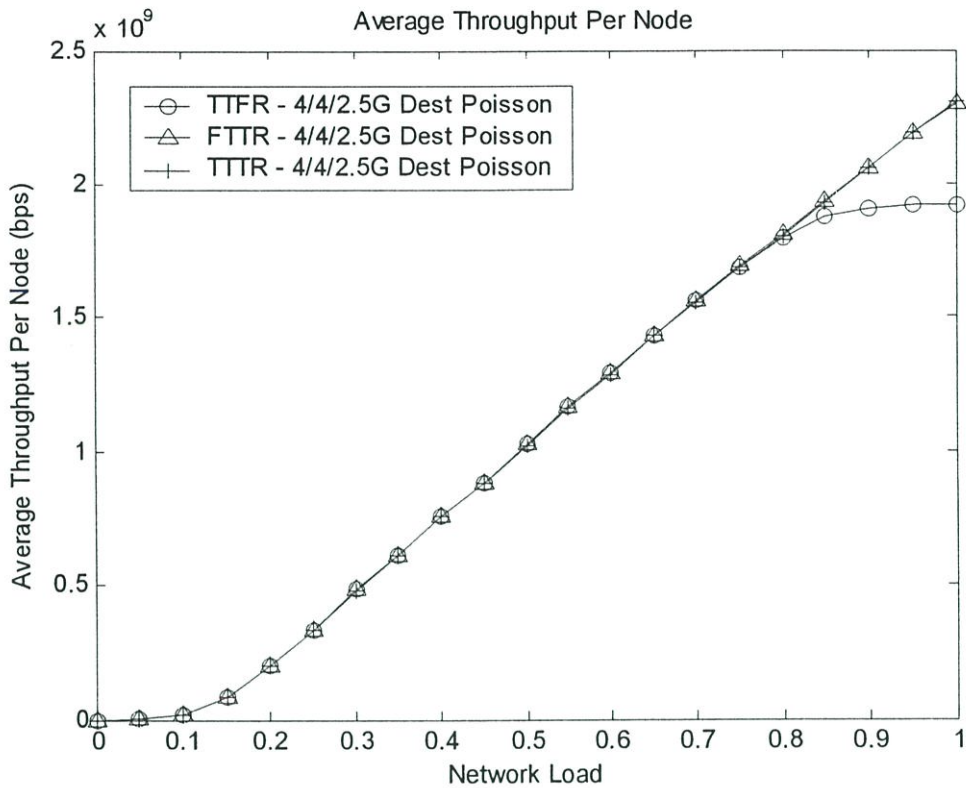
รูปที่ 5.5 ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดที่ใช้กราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้สลัดว่างที่โหนดส่ง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4

จากรูปที่ 5.5 แสดงค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดที่ใช้กราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้สลัดว่างที่โหนดส่ง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 เมื่อมีการป้อนกราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองเข้าสู่โครงข่าย จะพบว่าวิธีการ TTTR จะให้ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยของโหนดมีค่าสูงที่สุด รองลงมาด้วยวิธีการ TTFR และ FTTR ด้วยเหตุผลเช่นกับผลการทดลองรูปที่ 5.3



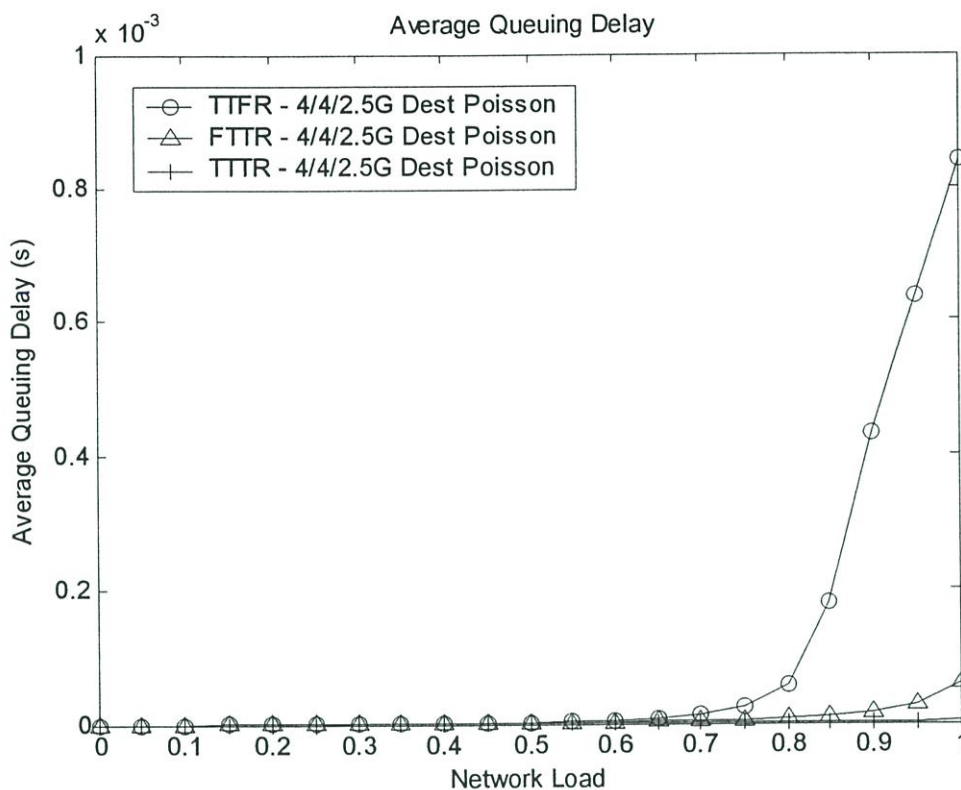
รูปที่ 5.6 ค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้สล็อตว่างที่ โหนดส่ง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4

จากรูปที่ 5.6 แสดงค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การ ทำให้สล็อตว่างที่โหนดส่ง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 พบว่าวิธีที่ นำเสนอ TTTR มีค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คือน้อยที่สุด รองลงมาคือวิธี TTFR และ วิธี FTTR ด้วย เหตุผลเช่นเดียวกับรูปที่ 5.4



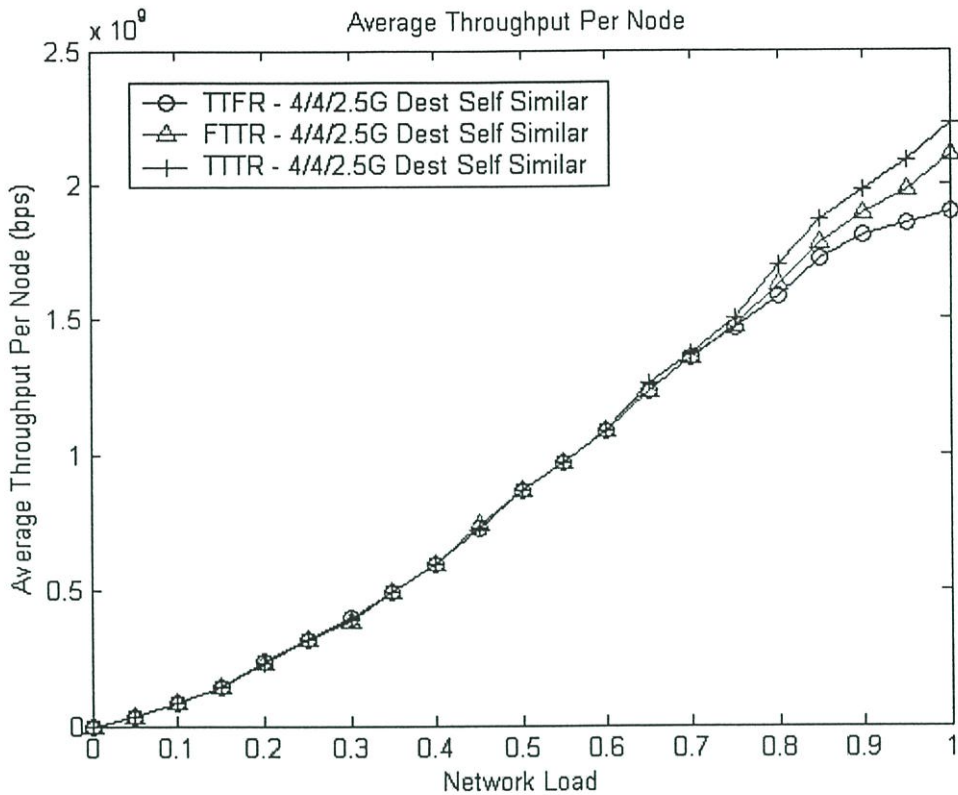
รูปที่ 5.7 ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดที่ใช้ทราฟฟิกแบบปัวซองและใช้การทำให้สล็อตว่างที่โหนดปลายทาง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4

จากรูปที่ 5.7 แสดงค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดที่ใช้ทราฟฟิกแบบปัวซองและใช้การทำให้สล็อตว่างที่โหนดปลายทาง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 พบว่าทั้งสามวิธีมีค่าวิสัยสามารถใกล้เคียงกันจนกระทั่งโหลดประมาณ 0.8 วิธีการ TTTR ที่นำเสนอเริ่มมีค่าวิสัยสามารถสูงกว่าวิธี TFR เนื่องจากวิธีที่นำเสนอสามารถรับแพ็กเก็ตเกิดจากช่องสัญญาณใดๆ ที่มีปลายทางมายังตัวรับและส่งแพ็กเก็ตไปในช่องสัญญาณใดๆ ที่ว่าง ส่วนวิธี TFR มีค่าวิสัยสามารถที่แยกลงเนื่องจากการกำหนดช่องสัญญาณที่จะรับไว้เมื่อมีโหลดมากๆ ทำให้ส่งแพ็กเก็ตได้น้อยลงเนื่องจากต้องส่งไปบนช่องสัญญาณที่สามารถรับได้เท่านั้น



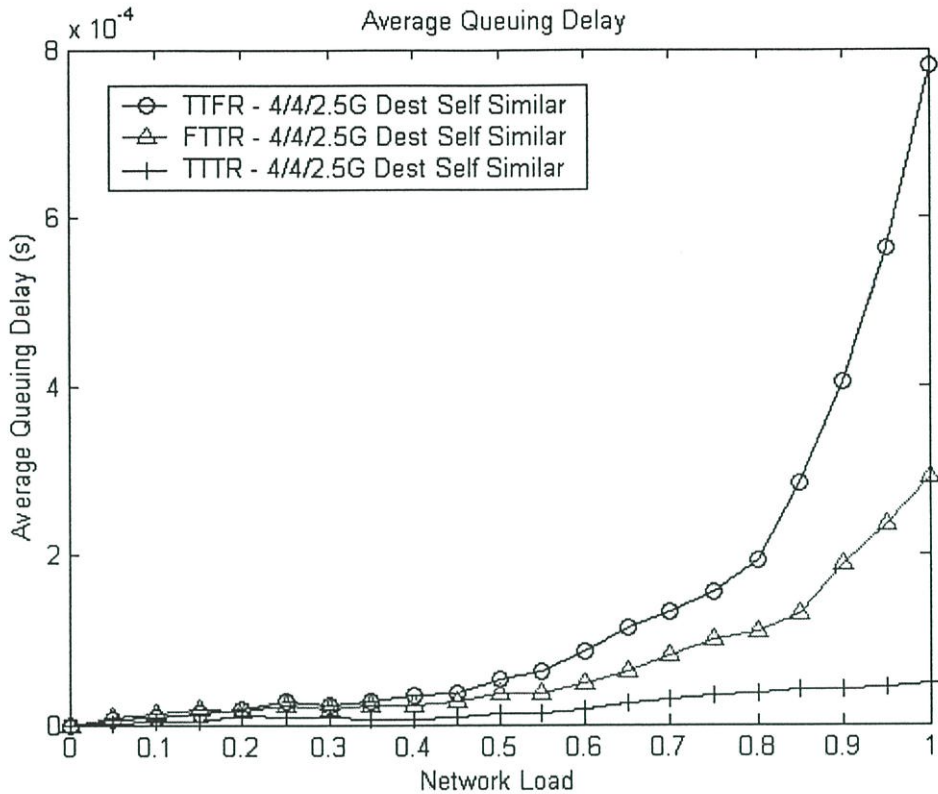
รูปที่ 5.8 ค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้ทราฟฟิกแบบบิวของและใช้การทำให้สล็ตว่างที่โหนดปลายทาง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4

จากรูปที่ 5.8 แสดงค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้ทราฟฟิกแบบบิวของและใช้การทำให้สล็ตว่างที่โหนดปลายทาง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 พบว่าค่าความหน่วงที่คิวของวิธี TTTR ที่นำเสนอมีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากสามารถส่งแพ็กเก็ตเข้าไปได้ในช่องสัญญาณใดๆ ที่มีสล็ตว่าง และสามารถรับแพ็กเก็ตเกิดจากช่องสัญญาณใดๆ ที่มีปลายทางมายังตัวรับ และใช้วิธีการทำให้สล็ตว่างที่โหนดปลายทางทำให้สล็ตสามารถใช้งานได้ในโหนดถัดไป ส่วนวิธี TTFR มีค่าความหน่วงที่มากที่สุดเนื่องจากตัวรับที่กำหนดช่องสัญญาณที่จะรับไว้ถ้าช่องสัญญาณในการรับไม่ว่างทำให้ไม่สามารถรับแพ็กเก็ตได้ ทำให้การส่งแพ็กเก็ตไปยังโหนดปลายทางล่าช้าออกไป ส่วนวิธี FTTR มีค่าความหน่วงที่คิวกว่าวิธีการที่นำเสนอเนื่องจากการกำหนดช่องสัญญาณที่จะส่งไว้ ถ้าช่องสัญญาณที่จะส่งไม่ว่างทำให้ส่งแพ็กเก็ตล่าช้าออกไปทำให้เกิดค่าความหน่วงที่คิวขึ้น และวิธีการ FTTR มีความหน่วงน้อยกว่าวิธี TTFR ถึงแม้ว่าจะสามารถส่งแพ็กเก็ตเข้าไปในช่องสัญญาณใดๆ ที่ว่าง แต่ที่ตัวรับกำหนดช่องสัญญาณที่จะรับไว้ทำให้ส่งแพ็กเก็ตไปในช่องสัญญาณที่สามารถรับข้อมูลได้เท่านั้นทำให้มีค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวกว่า



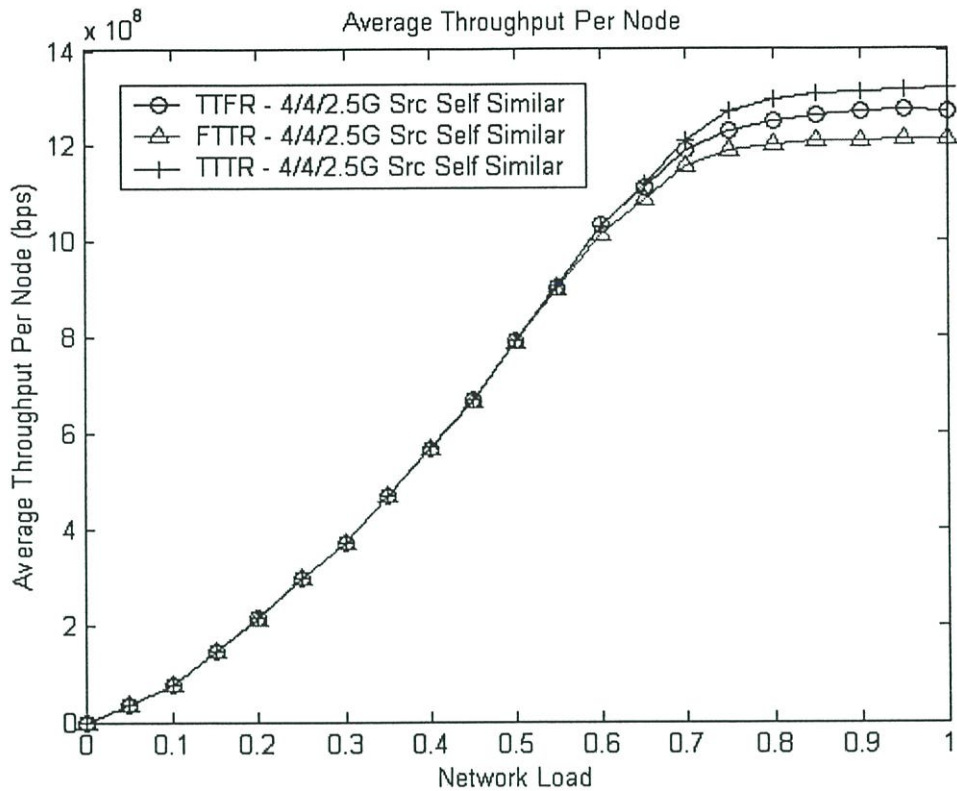
รูปที่ 5.9 ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดที่ใช้กราฟฟิกแบบคล้ายคลื่นตัวเองและใช้การทำให้สลิตว่างที่โหนดปลายทาง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4

จากรูปที่ 5.9 แสดงค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดที่ใช้กราฟฟิกแบบคล้ายคลื่นตัวเองและใช้การทำให้สลิตว่างที่โหนดปลายทาง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 พบว่าทั้งสามวิธีมีค่าวิสัยสามารถใกล้เคียงกันจนกระทั่งโหลดประมาณ 0.7 วิธีการ TTTR ที่นำเสนอเริ่มมีค่าวิสัยสามารถสูงกว่าวิธี FTTR และวิธี TTFR เนื่องจากวิธีที่นำเสนอสามารถรับแพ็กเก็ตจากช่องสัญญาณใดๆ ที่มีปลายทางมายังตัวรับและส่งแพ็กเก็ตไปในช่องสัญญาณใดๆ ที่ว่าง ส่วนวิธี FTTR มีค่าวิสัยสามารถแยกกว่าวิธีที่นำเสนอเนื่องจากการกำหนดช่องสัญญาณที่จะส่งไว้เมื่อมีโหลดมากๆ ทำให้ค่าวิสัยสามารถไม่ดีจากการที่ช่องสัญญาณที่ใช้ส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางนั้นไม่ว่างทำให้การส่งต้องล่าช้าไป และวิธี TTFR มีค่าวิสัยสามารถที่แย่ที่สุดเนื่องจากการกำหนดช่องสัญญาณที่จะรับไว้เมื่อมีโหลดมากๆ ทำให้ส่งแพ็กเก็ตได้น้อยลงเนื่องจากต้องส่งไปบนช่องสัญญาณที่สามารถรับได้เท่านั้น



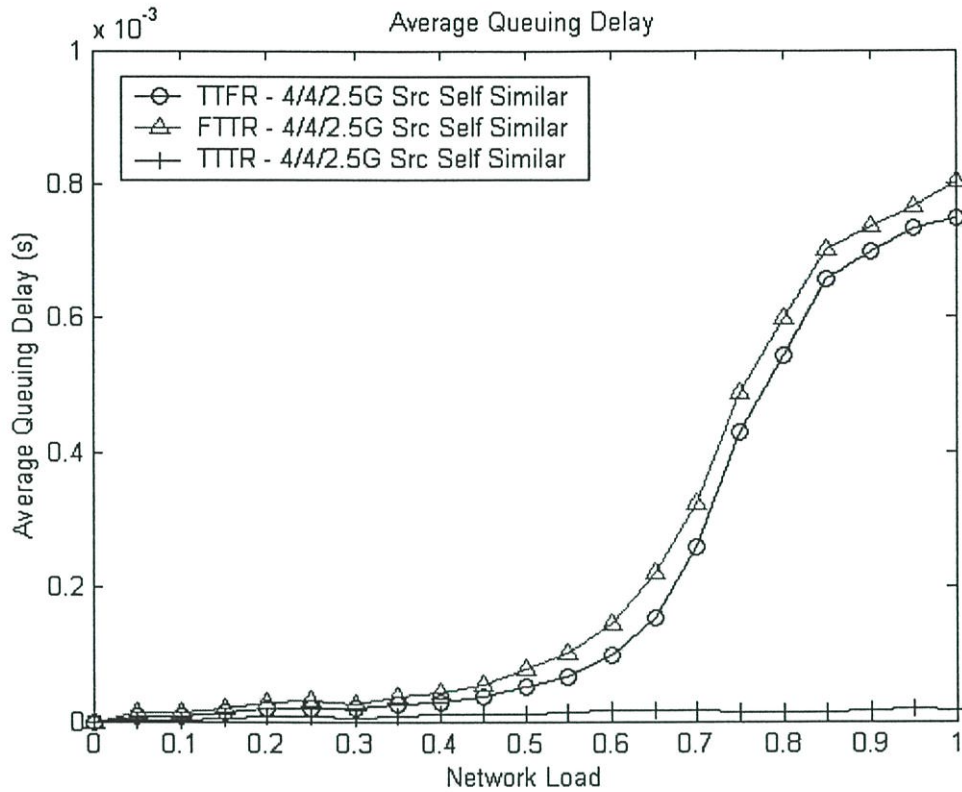
รูปที่ 5.10 ค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้กราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้สลัดว่างที่โหนดปลายทาง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4

รูปที่ 5.10 แสดงค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้กราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้สลัดว่างที่โหนดปลายทาง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 พบว่าค่าความหน่วงที่คิวของวิธี TTTR ที่นำเสนอมีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากสามารถส่งแพ็กเก็ตเกิดไปได้ในช่องสัญญาณใดๆ ที่มีสลัดว่าง และสามารถรับแพ็กเก็ตเกิดจากช่องสัญญาณใดๆ ที่มีปลายทางมายังตัวรับ และใช้วิธีการทำให้สลัดว่างที่โหนดปลายทางทำให้สลัดสามารถใช้งานได้ในโหนดถัดไป ส่วนวิธี TTFR มีค่าความหน่วงที่มากที่สุดเนื่องจากตัวรับที่กำหนดช่องสัญญาณที่จะรับไว้ซึ่งต้องรับแพ็กเก็ตเกิดจากช่องสัญญาณที่กำหนดไว้เท่านั้น ทำให้การส่งแพ็กเก็ตเกิดไปยังโหนดปลายทางล่าช้าออกไป ส่วนวิธี FTTR มีค่าความหน่วงที่คิวมากกว่าวิธีการที่นำเสนอเนื่องจากการกำหนดช่องสัญญาณที่จะส่งไว้ ถ้าช่องสัญญาณที่จะส่งไม่ว่างทำให้ส่งแพ็กเก็ตเกิดล่าช้าออกไปทำให้เกิดค่าความหน่วงที่คิวขึ้น และวิธีการ FTTR มีความหน่วงน้อยกว่าวิธี TTFR เนื่องจากการทำให้สลัดว่างที่โหนดปลายทางทำให้สลัดสามารถใช้งานได้ในโหนดถัดไปทำให้วิธีการ FTTR ซึ่งสามารถรับข้อมูลได้จากหลายช่องสัญญาณรับข้อมูลได้เร็วจึงได้ค่าวิสัยสมารถที่สูงกว่า



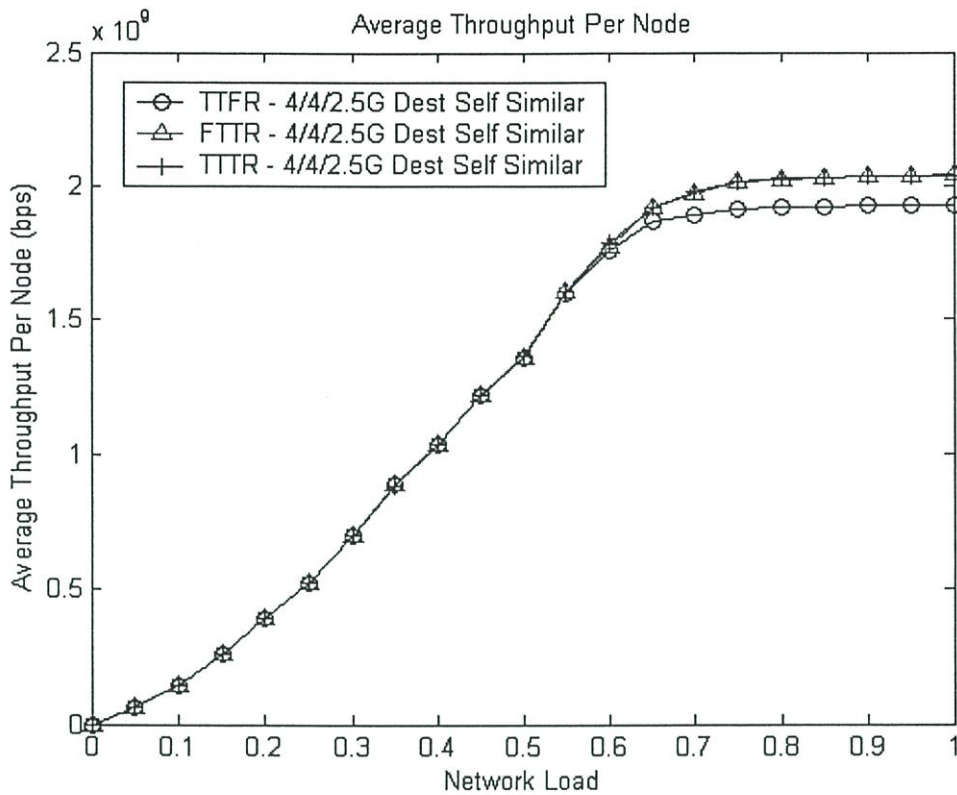
รูปที่ 5.11 ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดที่ใช้กราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้สลัดว่างที่โหนดส่ง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 และจำกัดบัพเฟอร์คิวที่ 100

รูปที่ 5.11 แสดงค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนด (Average Throughput per Node) ที่ใช้อินพุตกราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง มีจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 สำหรับวิธีการ TTR ที่นำเสนอจะมี ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดสูงที่สุดเนื่องจากวิธีการที่นำเสนอนี้ทำให้ใช้แบนด์วิดอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดจากการสามารถเข้าถึงทุกๆ ช่องสัญญาณ ส่วนวิธีการ TTFR ใช้แบนด์วิดไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากตัวรับกำหนดช่องสัญญาณที่จะรับไว้ ถ้าช่องสัญญาณนี้มีการใช้งานก็จำเป็นต้องรอจนกว่าช่องสัญญาณนี้ว่างจึงจะสามารถรับข้อมูลได้ และวิธี FTTR การใช้แบนด์วิดไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากมีการกำหนดช่องสัญญาณที่จะส่งไว้ ถ้าช่องสัญญาณมีการใช้งานอยู่จะทำให้การส่งล่าช้าออกไปแม้ว่าช่องสัญญาณอื่นว่างก็ไม่สามารถใช้งานได้ วิธี TTFR มีค่าวิสัยสามารถสูงกว่าวิธี FTTR เนื่องจากวิธีการ FTTR กำหนดช่องสัญญาณที่จะรับไว้ทำให้ไม่เกิดการชนกันของแพ็กเก็ตที่ตัวรับสามารถรับข้อมูลได้ทันทีจึงได้ค่าวิสัยสามารถที่สูงกว่า



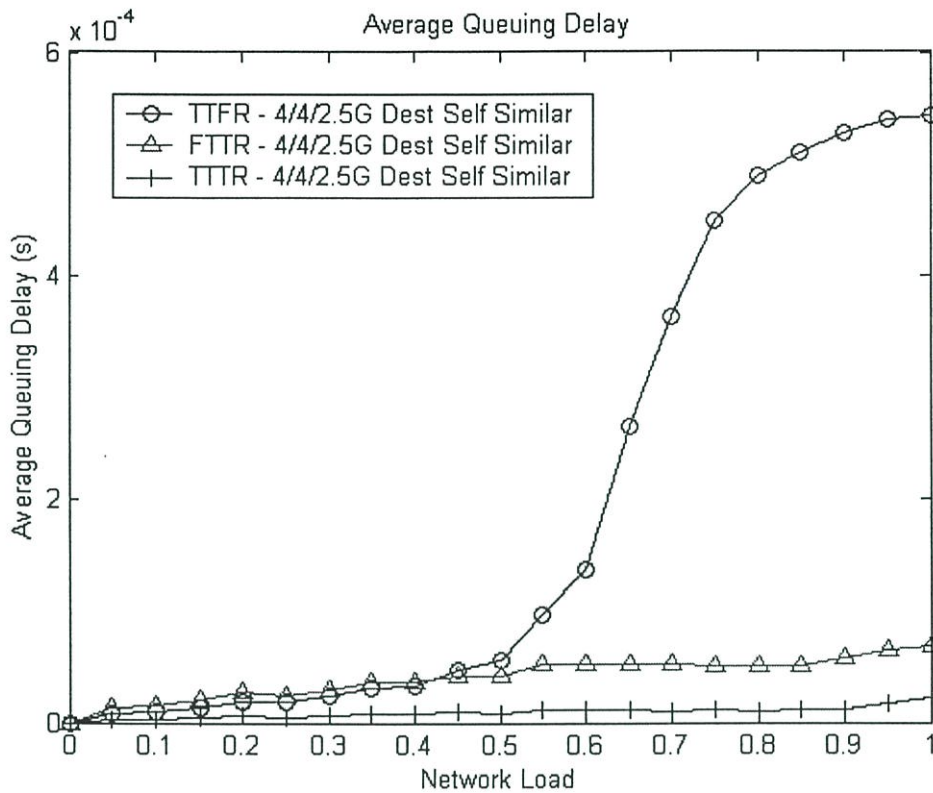
รูปที่ 5.12 ค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้กราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้สล็อตว่างที่โหนดส่ง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 และจำกัดบัฟเฟอร์คิวที่ 100

รูปที่ 5.12 แสดงค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้อินพุตกราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง มีจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 และใช้วิธีการทำให้สล็อตว่างโดยโหนดส่ง สำหรับวิธีการ TTFR ที่นำเสนอจะมีค่าความหน่วงน้อยที่สุดเนื่องจากการเข้าถึงได้ทุกๆ ช่องสัญญาณทำให้สามารถส่งแพ็กเก็ตได้ทันที ส่วนวิธีการ FTTR มีค่าความหน่วงเฉลี่ยมากกว่าวิธีการ TTFR เนื่องจากกำหนดช่องสัญญาณที่จะส่งไว้เมื่อช่องสัญญาณที่จะส่งแพ็กเก็ตไม่ว่างทำให้ไม่สามารถส่งข้อมูลเข้าไปในช่องสัญญาณที่กำหนดไว้แล้วนี้ไปยังปลายทางได้ทำให้การส่งล่าช้าออกไป



รูปที่ 5.13 ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดที่ใช้กราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้สล็อตว่างที่โหนดปลายทาง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 และจำกัดบัพเฟอร์คิวที่ 100

รูปที่ 5.13 แสดงค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อโหนดที่ใช้กราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้สล็อตว่างที่โหนดปลายทาง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 พบว่าทั้งสามวิธีมีค่าวิสัยสามารถใกล้เคียงกันจนกระทั่งโหลดประมาณ 0.6 วิธีกร TTTR ที่นำเสนอเริ่มมีค่าวิสัยสามารถสูงกว่าวิธี TTFR เนื่องจากวิธีที่นำเสนอสามารถรับแพ็กเก็ตเกิดจากช่องสัญญาณใดๆ ที่มีปลายทางมายังตัวรับและส่งแพ็กเก็ตเกิดไปในช่องสัญญาณใดๆ ที่ว่าง ส่วนวิธี TTFR มีค่าวิสัยสามารถที่แยกลงเนื่องจากการกำหนดช่องสัญญาณที่จะรับไว้เมื่อมีโหลดมากๆ ทำให้ส่งแพ็กเก็ตได้น้อยลงเนื่องจากต้องส่งไปบนช่องสัญญาณที่สามารถรับได้เท่านั้น



รูปที่ 5.14 ค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้สลอตว่างที่โหนดส่ง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 และจำกัดบัพเฟอร์คิวที่ 100

รูปที่ 5.14 แสดงค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวที่ใช้ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองและใช้การทำให้สลอตว่างที่โหนดปลายทาง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 พบว่าค่าความหน่วงที่คิวของวิธี TTR ที่นำเสนอมีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากสามารถส่งแพ็กเก็ตเข้าไปได้ในช่องสัญญาณใดๆ ที่มีสลอตว่าง และสามารถรับแพ็กเก็ตเกิดจากช่องสัญญาณใดๆ ที่มีปลายทางมายังตัวรับ และใช้วิธีการทำให้สลอตว่างที่โหนดปลายทางทำให้สลอตสามารถใช้งานได้ในรอบถัดไป ส่วนวิธี TTFR มีค่าความหน่วงที่มากที่สุดเมื่อโหลดมากๆ เนื่องจากตัวรับที่กำหนดช่องสัญญาณที่จะรับไว้ถ้าช่องสัญญาณในการรับไม่ว่างทำให้ไม่สามารถรับแพ็กเก็ตได้ ทำให้การส่งแพ็กเก็ตไปยังโหนดปลายทางล่าช้าออกไป ส่วนวิธี FTTR มีค่าความหน่วงที่คิวมากกว่าวิธีการที่นำเสนอเนื่องจากการกำหนดช่องสัญญาณที่จะส่งไว้ ถ้าช่องสัญญาณที่จะส่งไม่ว่างทำให้ส่งแพ็กเก็ตล่าช้าออกไปทำให้เกิดค่าความหน่วงที่คิวขึ้น และวิธีการ FTTR มีความหน่วงน้อยกว่าวิธี TTFR เนื่องจากวิธีการ TTFR ถึงแม้ว่าจะสามารถส่งแพ็กเก็ตเข้าไปในช่องสัญญาณใดๆ ที่ว่าง แต่ที่ตัวรับกำหนดช่องสัญญาณที่จะรับไว้ทำให้ส่งแพ็กเก็ตเข้าไปได้ในช่องสัญญาณที่สามารถรับข้อมูลได้เท่านั้นทำให้มีค่าความหน่วงเฉลี่ยที่คิวมากกว่า

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการวิจัย

สำหรับวิธีการ TFR มีข้อดีคือไม่มีการชนกันของข้อมูลที่ตัวรับเนื่องจากมีการกำหนดช่องสัญญาณในการรับไว้ก่อนแล้ว แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือจำนวนช่องสัญญาณจะต้องมีจำนวนเท่ากับจำนวนของโหนดซึ่งจะทำให้ความสามารถในการขยายขนาดของโครงข่ายมีจำกัด ตัวอย่างเช่น สำหรับ OC-48 ซึ่งใช้งานได้สูงสุด 16 ความยาวคลื่นจะสามารถขยายขนาดได้สูงสุดเพียง 16 โหนดเท่านั้น เป็นต้น

อย่างไรตามวิธีการ FTTR แก้ไขข้อด้อยของวิธีการแรกโดยการกำหนดช่องสัญญาณส่งที่คงที่และอนุญาตให้โหนดหลายๆ โหนดใช้ช่องสัญญาณร่วมกันได้ จึงทำให้ลดข้อจำกัดในการขยายขนาดของโครงข่ายลง อย่างไรก็ตามปัญหาที่ตามมาคือเกิดปัญหาการชนกันของข้อมูลที่โหนดรับเนื่องจากตัวรับจะต้องรองรับข้อมูลจากทุกๆ ช่องสัญญาณ

วิธีการที่น่าเสนอเป็นวิธีการควบคุมการเข้าถึงสื่อ โดยใช้กระบวนการที่ทั้งตัวส่งและตัวรับสามารถปรับช่องสัญญาณในการรับส่งข้อมูลได้ (Tunable Transmitter – Tunable Receiver (TT-TR)) คือซึ่งช่วยลดค่าหน่วงเวลาของการรอคอยการส่งในคิวลง จึงเป็นการเพิ่มค่าวิสัยสมารถให้สูงขึ้น การปรับช่องสัญญาณได้นี้ทำให้โครงข่ายสามารถมีจำนวนโหนดมากกว่าจำนวนช่องสัญญาณได้จึงไม่เกิดปัญหาทางด้านขยายขนาดของโครงข่ายในอนาคต

นอกจากนี้เพื่อเพิ่มค่าวิสัยสมารถในการส่งข้อมูล ได้มีการนำเทคนิคการสำหรับการทำเครื่องหมายกับสลิตที่วางด้วยวิธีการถอดที่ปลายทาง (Destination Stripping Operation) เข้ามาใช้ เนื่องจากวิธีการถอดที่แหล่งกำเนิด (Source Stripping Operation) จะใช้การทำเครื่องหมายให้สลิตว่างหลังจากที่วนจนครบรอบแล้วโดยโหนดส่งทำให้สลิตต้องเคลื่อนที่จบครบรอบ แล้วจึงจะถูกใช้งานได้ในรอบถัดไปทำให้ขาดประสิทธิภาพ แต่วิธีการถอดที่ปลายทางจะมีข้อดีที่การทำเครื่องหมายที่สลิตนั้นว่าเป็นสลิตว่างสามารถทำได้ที่โหนดรับ ทำให้สลิตสามารถใช้งานได้ในโหนดถัดไป โดยไม่ต้องรอจนครบรอบ ทำให้ได้ค่าวิสัยสมารถที่สูงกว่าและค่าเวลาประวิงที่ต่ำกว่าวิธีการถอดที่ต้นทาง Source Stripping วิธีการที่น่าเสนอจึงเลือกวิธีการถอดที่ปลายทาง มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล

เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาด้านการชนกันของข้อมูลที่ตัวรับ วิธีการที่น่าเสนอจึงได้ออกแบบให้เพิ่มบัพเฟอร์ที่ตัวรับให้มีจำนวนเท่ากับจำนวนช่องสัญญาณ จึงทำให้สามารถรับข้อมูลจากหลายๆ ช่องสัญญาณได้ในเวลาเดียวกัน จึงเป็นการลดปัญหาการชนกันของข้อมูลลง

ในการจำลองแบบเพื่อทดสอบสมรรถนะของวิธีการที่นำเสนอ ได้นำเอาข้อดีของการใช้อินพุตกราฟฟิคแบบคล้ายคลึงตัวเอง ซึ่งเป็นกราฟฟิคที่มีค่าความแปรผัน (Variance) สูงหรือมีการเปลี่ยนแปลงสูงแม้ในช่วงเวลาที่นานๆ ซึ่งคล้ายกับกราฟฟิคจริง ต่างจากกราฟฟิคบิวของที่จะมีการเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อมีการกำเนิดกราฟฟิคในช่วงเวลานานๆ โดยจะมีการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอินพุตกราฟฟิคทั้งสองแบบ

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

การพัฒนาต่อไปในอนาคต

1. อาจมีการทดสอบวิธีการที่นำเสนอด้วยพารามิเตอร์อื่นๆ เช่น ความน่าจะเป็นของการชนกันของแพ็กเก็ตที่ตัวรับ
2. อาจมีการเพิ่มความสามารถในการควบคุมกราฟฟิคที่มีลำดับความสำคัญแตกต่างกัน หรือมีอินพุตกราฟฟิคหลายชนิดถูกส่งเข้ามาในโครงข่าย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Ghani, S. Dixit, and T. Wang, "On IP-over-WDM Integration," *IEEE Commun. Mag.*, vol.38, no.3, pp. 72-84, March 2000.
- [2] M. Kuznetsov, N. Froberg, S. Henion, H. Rao, J. Korn, K. Rauschenbach, E. Modiano, and V. Chan, "A Next-Generation Optical Regional Access Network," *IEEE Commun. Mag.*, vol.38, no.1, pp. 66-72, January 2000.
- [3] D. Stoll, P. Leishing, H. Bock, and A. Richter, "Metropolitan DWDM: A Dynamically Configurable Ring for the KomNet Field Trial in Berlin," *IEEE Commun. Mag.*, vol.39, no.2, pp. 106-113, Feb. 2001.
- [4] A. Hill, and F. Neri, "Optical Switching Networks: From Circuits to Packets," *IEEE Commun. Mag.* vol.39, no.3, pp. 107-108, March 2001.
- [5] M. Herzog, M. Maier, M. Reisslein, A. Wolisz, "Metropolitan Area WDM Networks: A Survey on Ring Systems," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 6, No. 2, Second Quarter 2004.
- [6] J. Cai, A. Fumagalli, and I. Chlamtac, "The Multitoken Interarrival Time (MTIT) Access Protocol for Supporting Variable Size Packets Over WDM Ring Network," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 18, no.10, pp. 2094-2104, Oct. 2000.
- [7] I Rubin and H.-K. Hua, "Synthesis and Throughput Behavior of WDM Meshed-Ring Networks Under Nonuniform Traffic Loading," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 15(8):1513-1512, August 1997.
- [8] W. Stalling, "Data and Computer Communications," Macmillan Publishing Company, 1994.
- [9] M. A. Summerfield, "MAWSON: A Metropolitan Area Wavelength Switched Optical Network," In Proc., APCC '97, pp. 327-331, Sydney, Australia, November 1997.
- [10] A. Carena, V. Ferrero, R. Gaudino, V. De Feo, F. Neri, and P. Poggiolini, "RINGO: A Demonstrator of WDM Optical Packet Network on a Ring Topology," Proc. Optical Network Design and Modeling 2002, February 2002.

- [11] M. Ajmone Marsan, E. Leonardi, M. Meo, and F. Neri, "Modeling slotted WDM rings with discrete-time Markovian models," *Computer Networks*, 32(5):599–615, May 2000.
- [12] K. Shrikande, A. Srivatsa, I. M. White, M. S. Rogge, D. Wonglumson, S. M. Gemelos, and L. G. Kazovsky, "CSMA/CA MAC Protocols for IP-HORNET: An IP over WDM Metropolitan Area Ring Network," *Proc. IEEE GLOBECOM*, volume 2, pp. 1303–1307, 2000.
- [13] K. Bengi, "An Analytical Model for a Slotted WDM Metro Ring with A-Posteriori Access," *Proc. Optical Network Design and Modelling (ONDM)*, Feb. 2002.
- [14] C. S. Jelger and J. M. H. Elmirghani, "A Simple MAC Protocol for WDM Metropolitan Access Ring Networks," *Proc. IEEE GLOBECOM*, volume 3, pp. 1500–1504, 2001.
- [15] I. M. White, M. S. Rogge, Y.-L. Hsueh, K. Shrikhande, and L. G. Kazovsky, "Experimental Demonstration of the HORNET Survivable Bi-directional Ring Architecture," *Proc. OFC*, paper WW1, 2002.
- [16] K. Bengi, "Access Protocols for an Efficient Optical Packet-Switched Metropolitan Area Ring Network Supporting IP Datagrams," *Proc. Eleventh International Conference on Computer Communications and Networks*, pp. 284–289, 2002.
- [17] A. Smiljanic, M. Boroditsky, and N. J. Frigo, "Optical Packet-Switched Ring Network with Flexible Bandwidth Allocation," *Proc. IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing*, pp. 83–87, 2001.
- [18] W. Cho and B. Mukherjee, "Design of MAC Protocols for DWADM-Based Metropolitan-Area Optical Ring Networks," *Proc. IEEE GLOBECOM*, volume 3, pp. 1575–1579, 2001.
- [19] J. Pierce, "Network for block switches of data," *Bell System Technical Journal*, vol. 51, pp. 1133-1175, July/Aug.1972.
- [20] L. Roberts, "Extensions of packet communication technology to a hand-held personal terminal," *Proc. Conference Spring Joint Computer Conference, AFIPS*, pp. 295-298, 1972.

- [21] R. Needham, and A. Herbert, "The Cambridge distributed computing Systems," Addison-Wesley, Reading, 1982.
- [22] C. Jelger, "Characterisation of a Wavelength Division Multiplexing Multi-Ring Network," Master Thesis, Department of Electrical & Electronic Engineering, University of Wales Swansea, U.K., September 2001.
- [23] K. Park and W. Willinger, Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation, John Wiley & Sons, 2000.
- [24] M. H. MacDougall. Simulating Computer Systems Techniques and Tools. Massachusetts : MIT Press, 1987.
- [25] P. R. Morin and J. Neilson, "The Impact of Self-Similarity on Network Performance Analysis," Internal Report of Computer Science, Carleton University, December 4, 1995.
- [26] C. S. Jelger and J. M. H. Elmirghani, "Performance of a slotted MAC Protocol for WDM Metropolitan Access Ring Networks under Self-Similar traffic," Proc. IEEE International Conference on Communications, volume 5, pp. 2806–2811, April 2002.
- [27] M. Marsan, A. Bianco, E. Leonardi, A. Morabito, and F. Neri, "All- Optical WDM Multi-Rings with Differentiated QoS," IEEE Commun. Mag., vol. 37, no. 2, pp. 58-66, Feb.1999.

## ผลงานวิจัยและบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] E. Sombatsakulkit, W. Sa-Ngiamsak, and S. Sittichevapak, "A Tunable Transmitter-Tunable Receiver Algorithm for accessing the Multichannel Slotted-Ring WDM Metropolitan Network under Self-Similar Traffic," In Proc. International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2004), Thailand, August 25-27, 2004.
- [2] เอกอนันต์ สมบัติสกุลกิจ, กฤษณะพงศ์ พันธุ์ศรี และ สุวิพล ลิทธิชีวะภาค "วิธีการปรับตัวส่ง-ปรับตัวรับสำหรับเข้าถึงโครงข่ายวงแหวนสลิตต์มัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบหลายช่องสัญญาณบนโครงข่ายเมืองภายใต้กราฟฟิกแบบคล้ายคิ่งตัวเอง," การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ครั้งที่ 42, 3-6 กุมภาพันธ์ 2547.
- [3] เอกอนันต์ สมบัติสกุลกิจ, วิศิษศักดิ์ เสี่ยมศักดิ์ และ สุวิพล ลิทธิชีวะภาค "การปรับปรุงโปรโตคอลเข้าถึงสำหรับสนับสนุนแพ็กเก็ตหลายขนาดบนโครงข่ายวงแหวนการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น," การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ครั้งที่ 42, 3-6 กุมภาพันธ์ 2547.

## ประวัติผู้เขียน

นายเอกอนันต์ สมบัติสกุลกิจ เกิดเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม พ.ศ.2521 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาถึงมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอัสสัมชัญนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมโทรคมนาคม จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2542 เข้าทำงานที่มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือในตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อปี พ.ศ. 2544 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2545