

การวิเคราะห์สมรรถนะของโครงข่ายคอมพิวเตอร์ใยแก้วนำแสงรูปแบบดาวโดย  
การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบหลายช่องสัญญาณ

PERFORMANCE ANALYSIS OF MULTI-CHANNEL OPTICAL STAR LAN  
BY WDM PASSIVE STAR

เคน มุละสีวะ  
KEN MULASIWA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

การวิเคราะห์สมรรถนะของโครงข่ายคอมพิวเตอร์ใยแก้วนำแสงรูปแบบดาวโดย  
การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบหลายช่องสัญญาณ

PERFORMANCE ANALYSIS OF MULTI-CHANNEL OPTICAL STAR LAN  
BY WDM PASSIVE STAR

เคน มุละสิวะ  
KEN MULASIWA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

**PERFORMANCE ANALYSIS OF MULTI-CHANNEL OPTICAL STAR LAN  
BY WDM PASSIVE STAR**

**KEN MULASIWA**

**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**

**2007**

**COPYRIGHT 2007**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สมรรถนะของโครงข่ายคอมพิวเตอร์ใยแก้วนำแสง รูป แบบดาวโดยการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบหลาย ช่องสัญญาณ
นักศึกษา	นายเคน มุละสิวะ
รหัสนักศึกษา	45061085
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวิพล สิทธีชีวะภาค

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์ใยแก้วนำแสงแบบหลายช่องสัญญาณโดยใช้ WDM PASSIVE STAR เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์ใยแก้วนำแสงความเร็วสูง โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะวิเคราะห์โครงข่ายคอมพิวเตอร์รูปแบบดาวที่ใช้อุปกรณ์ WDM เป็นตัวกลางในการกระจายสัญญาณแสงไปยังผู้ใช้ต่างๆที่เชื่อมต่ออยู่ในโครงข่ายคอมพิวเตอร์ และวิธีการที่ได้แนะนำเสนอนี้ทั้งเครื่องรับและเครื่องส่งสามารถปรับความยาวคลื่นในการรับและส่งแพ็กเก็ตข้อมูลได้ ในการวิเคราะห์นี้ได้นำเอาโพรโตคอลสล็อตอะโลฮามาใช้ในการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพของการทำงานของช่องสัญญาณที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยทั่วไปค่าวิสัยสามารถ(Throughput) ของโพรโตคอลสล็อตอะโลฮาจะมีค่าสูงสุดที่ 36.8% เมื่อ  $G$  เท่ากับ  $G_{max}$  และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อ  $G > G_{max}$  ซึ่งเป็นข้อเสียของสล็อตอะโลฮา แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เรานำเสนอการปรับปรุงทราฟฟิกเพื่อให้มีค่าวิสัยสามารถมีเสถียรภาพอยู่ที่ค่าสูงสุดตลอดเวลาถึงแม้ว่า  $G > G_{max}$  ค่าวิสัยสามารถก็จะยังคงมีค่าอยู่ที่ 36.8%

**Thesis Title** Performance Analysis Of Multi-Channel Optical Star LAN By WDM Passive Star  
**Student** Mr.Ken Mulasiwa  
**Student ID.** 45061085  
**Degree** Master of Engineering  
**Program** Telecommunication Engineering  
**Year** 2007  
**Thesis Advisor** Assoc.Prof.Dr.Suvepon Sittichivapak

## ABSTRACT

This thesis presents the performance analysis of multi-channel optical LAN by WDM passive star for the application with very high speed optical LAN. The subject of analysis is star LAN using WDM as a medium for distributing signal to any user connected to the system and every station(user) is using tunable wave length transmitters and tunable wave length receivers to any of data channel. The slotted ALOHA protocol also used in the analysis to increase the efficiency of the systems. Generally, slotted ALOHA have the maximum throughput of 36.8% when  $G=G_{max}$  and will decrease drastically when  $G>G_{max}$  which is a bad point of the slotted ALOHA. In this thesis, we present adaptive traffic load slotted ALOHA to maintain stable throughput at 36.8% eventhough  $G>G_{max}$ .

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและการให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทำงานวิจัยเป็นอย่างดีมาโดยตลอดจาก รศ.ดร.สุวิพล สิริทธิชีวภาพ โดยเฉพาะความเอาใจใส่ ความช่วยเหลือ การแนะนำแนวทางในการแก้ไขปัญหา รวมทั้งยังเป็นแรงกระตุ้นในการทำงานวิจัยด้วย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง มา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ บิดา-มารดา และครอบครัว ที่ให้กำลังใจให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือในระหว่างการศึกษาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และรุ่นน้องที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือในการทำเอกสารวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คุณเกตุแก้ว และคุณกาญจนา

เคน มุละสิวะ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีและหลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 โครงร่างของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น.....	5
2.1 เส้นใยแก้วนำแสง.....	5
2.1.1 ส่วนประกอบของเส้นใยแก้วนำแสง.....	5
2.1.2 สรุปคุณสมบัติเส้นใยแก้วนำแสงประเภทต่างๆ.....	6
2.1.2.1 เส้นใยแก้วนำแสงมัลติโหมดแบบสเตปอินเด็กซ์.....	6
2.1.2.2 เส้นใยแก้วนำแสงมัลติโหมดแบบเกรดอินเด็กซ์.....	7
2.1.2.3 เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียวแบบสเตปอินเด็กซ์.....	7
2.1.2.4 เส้นใยแก้วนำแสงแบบเล็อนดิสเพอร์ชัน.....	7
2.1.2.5 เส้นใยแก้วนำแสงแบบดิสเพอร์ชันเรียบ.....	8
2.1.3 การสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสง.....	8
2.2 การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น.....	11
2.2.1 หลักการของเทคโนโลยี WDM.....	11
2.2.2 ส่วนประกอบโครงข่ายใยแก้วนำแสงระบบ WDM.....	13
2.3 ประเภทของ WDM.....	14

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.1 Wavelength – Selective WDM.....	14
2.3.2 Broadcast – and – Select WDM.....	16
2.4 ตัวมัลติเพล็กซ์เซอร์.....	17
2.4.1 อุปกรณ์กระจายเชิงมุม.....	17
2.4.2 อุปกรณ์ฟิลเตอร์.....	19
2.4.2.1 Interference ฟิลเตอร์.....	19
2.4.2.2 ฟิลเตอร์เรโซแนนซ์แบบ Fabry – Perot.....	19
2.4.2.3 ฟิลเตอร์แบบอุปกรณ์ขยายกิ่งตัวนำ.....	19
2.4.2.4 ฟิลเตอร์ไฟฟ้าแบบ Coherent Detection.....	20
2.5 แหล่งกำเนิดแสง.....	20
2.5.1 LED.....	20
2.5.2 เลเซอร์ไดโอดแบบ Fabry – Perot.....	20
2.5.3 เลเซอร์ไดโอด DFB.....	21
2.5.4 เลเซอร์ที่กำหนดค่าความถี่.....	21
2.6 ระบบเครือข่ายแบบหลายความยาวคลื่น.....	21
2.6.1 ตัวส่งที่สามารถปรับความยาวคลื่นได้.....	21
2.6.1.1 การปรับเปลี่ยนโดยใช้อุณหภูมิหรือกระแส.....	22
2.6.1.2 การปรับเปลี่ยนด้วย DFB และ DFR.....	22
2.6.1.3 การปรับเปลี่ยนโดยใช้อุปกรณ์ภายนอก.....	22
2.6.2 ตัวรับที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้.....	22
2.6.2.1 ฟิลเตอร์แบบหลายชั้น.....	22
2.6.2.2 ฟิลเตอร์แบบ Fabry – Perot Interferometer.....	22
2.6.2.3 เลเซอร์แบบ DFB ที่ทำงานที่ต่ำกว่าค่าเทรชโฮลด์.....	23
2.7 การป้องกันโครงข่ายลุ่ม.....	23
2.8 โครงสร้างของเครือข่าย WDM STAR.....	24
บทที่ 3 ทฤษฎีโพรโตคอลแบบอะโลฮา.....	27
3.1 โพรโตคอลอะโลฮาแบบดั้งเดิม.....	27
3.2 โพรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮา.....	30

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 โพรโตคอล แบบสล็อตอะโหลซาแบบมีผู้ใช้ที่แน่นอน.....	34
3.4 ความ(ไม่) มีเสถียรภาพของโพรโตคอลอะโหลซา.....	45
3.4.1 การวิเคราะห์.....	47
3.4.2 การทำระบบอะโหลซาให้มีเสถียรภาพ.....	51
3.5 การวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกัน.....	55
บทที่ 4 การวิเคราะห์โพรโตคอลสล็อตอะโหลซาแบบหลายช่องสัญญาณ	
ในการส่งข้อมูลความเร็วสูงสำหรับระบบสตาร์ LAN ไยแก้วนำแสง.....	58
4.1 บทนำ.....	58
4.2 โครงสร้างของโครงข่ายคอมพิวเตอร์ใยแก้วนำแสงแบบหลายช่องสัญญาณ.....	59
4.3 โพรโตคอลสล็อตอะโหลซาแบบหลายช่องสัญญาณ.....	61
4.4 โพรโตคอลสล็อตอะโหลซาที่ถูกปรับปรุง.....	66
4.5 ผลลัพธ์เชิงตัวเลขของระบบ.....	67
4.6 การวิเคราะห์สมรรถนะของการปรับปรุงกราฟฟิกของ โพรโตคอลแบบสล็อตอะโหลซา.....	69
4.7 สล็อตอะโหลซาแบบหลายช่องสัญญาณ.....	71
4.8 การปรับปรุงกราฟฟิกให้บริการของสล็อตอะโหลซา.....	72
4.9 ผลกระทบของการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลซ้ำและความเสถียรภาพ.....	75
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์เชิงเลข.....	79
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	90
เอกสารอ้างอิง.....	92
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	93
ประวัติผู้เขียน.....	94

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของ LED และเลเซอร์ไดโอด.....	9
2.2 แสดงค่าแบนด์วิดท์ที่ใช้ในเทคนิคการกรองต่างๆ.....	19
2.3 ความกว้างสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่างๆ.....	20
4.1 ค่าค่าวิสัยสามารถสูงสุด/ช่อง สำหรับกรณีต่างๆของโพโรโตคอล.....	69

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงส่วนประกอบของเส้นใยแก้วนำแสง.....	6
2.2 แสดงภาพของเคเบิลใยแก้วนำแสง Kevlar fiber.....	7
2.3 แสดงระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสง.....	8
2.4 แสดงโครงสร้างของระบบมัลติเพลกซ์.....	10
2.5 แสดงการทำงานของสวิตช์ซึ่งระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งเวลา.....	10
2.6 แสดงช่วงคลื่นพาหีย่อยของแต่ละช่องสัญญาณที่รวมกันในระบบ SCM.....	11
2.7 แสดงการส่งข้อมูลแบบหลายความยาวคลื่น โดยเปรียบกับการวิ่งของรถยนต์บนถนน.....	12
2.8 การทำงานของเทคโนโลยี WDM.....	12
2.9 ก. แสดง Space Switch แบบธรรมดา.....	14
2.9 ข. แสดง Space Switch แบบแยกแต่ละความยาวคลื่น.....	14
2.9 ค. แสดงสวิตช์ที่เปลี่ยนเส้นทางและความยาวคลื่นของสัญญาณในคราวเดียว.....	14
2.10 แสดงเทคนิค Wavelength-Selective WDM.....	16
2.11 แสดงเทคนิค Broadcast-and-Select WDM.....	16
2.12 ระบบการแยกความยาวคลื่น โดยอุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุมและเลนส์.....	18
2.13 การทำงานของเกรตติงในระบบ WDM.....	18
2.14 แสดงฟิลเตอร์แบบ Fabry-Perot Interferometer.....	23
2.15 แสดงการป้องกันโครงข่ายของ dual-fiber ring.....	24
2.16 โครงสร้างของเครือข่าย WDM STAR.....	25
3.1 แสดงระยะเวลาของการส่งผ่านข้อมูลของโพรโตคอลอะโลฮาแบบดั้งเดิม.....	28
3.2 แสดงค่าวิสัยสามารถของโพรโตคอลแบบ Pure ALOHA และ Slotted ALOHA.....	31
3.3 แสดงระยะเวลาของการส่งผ่านข้อมูลของโพรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮา.....	31
3.4 แสดงการเปลี่ยนสถานะของอะโลฮาแบบมีจำนวนผู้ใช้ที่แน่นอน.....	35
3.5 แสดงความสัมพันธ์ของค่าวิสัยสามารถกับค่าการหน่วงเวลาของระบบสล็อตอะโลฮา แบบมีจำนวนผู้ใช้ที่แน่นอน เมื่อ $M=10$ และ $M=25$ .....	42
3.6 แสดงความสัมพันธ์ของค่าวิสัยสามารถกับค่าการหน่วงเวลาของระบบอะโลฮา ภายใต้ภาวะการ Capture.....	44
3.7 แสดงถึงความไม่เป็นเสถียรภาพของสล็อตอะโลฮา.....	46
4.1 แสดงโครงสร้างทั่วไปของ Optical Star Network.....	59
4.2 แสดงโครงสร้างรูปแบบของแพ็กเก็ตข้อมูลและแพ็กเก็ตควบคุม.....	60

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แสดงโครงสร้างของสล็อตอะโลฮาสำหรับกรณีที่ 1.....	62
4.4 แสดงโครงสร้างของสล็อตอะโลฮาสำหรับกรณีที่ 2.....	64
4.5 แสดงโครงสร้างของสล็อตอะโลฮาสำหรับกรณีที่ 3.....	65
4.6 แสดงค่าวิสัยสามารถเทียบกับ $G(L=100, N=10)$ .....	68
4.7 แสดงค่าการหน่วงเวลาเทียบกับ $G(L=100, N=10)$ .....	68
4.8 แสดงค่าการหน่วงเวลาเทียบกับ $G(L=100, N=10)$ .....	68
4.9 แสดงโครงสร้าง Markov chain สำหรับ S-ALOHA และ Adaptive Traffic Load S-ALOHA.....	70
4.10 แสดงโครงสร้างของโพรโทคอลสล็อตอะโลฮาแบบหลายช่องสัญญาณ.....	72
5.1 แสดงค่าวิสัยสามารถของโพรโทคอลแบบสล็อตอะโลฮา ทั้ง 3 กรณี.....	79
5.2 แสดงค่าการหน่วงเวลาของโพรโทคอลแบบสล็อตอะโลฮา ทั้ง 3 กรณี.....	79
5.3 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณว่าง.....	80
5.4 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่เพิกเกิดข้อมูลจะเกิดการชนกัน.....	80
5.5 แสดงค่าวิสัยสามารถของสล็อตอะโลฮา และ Adaptive Traffic Load.....	81
5.6 แสดงค่าวิสัยสามารถของสล็อตอะโลฮา และ Adaptive $L=100, N=10$ .....	82
5.7 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load ทั้ง 3 กรณี เมื่อ $L=10000, N=5$ .....	83
5.8 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load ทั้ง 3 กรณี เมื่อ $L=100, N=10$ .....	83
5.9 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load ทั้ง 3 กรณี เมื่อ $L=100, N=20$ .....	84
5.10 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load ทั้ง 3 กรณี เมื่อ $L=100, N=40$ .....	84
5.11 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load กรณีที่ 1 โดยการเพิ่มจำนวน N และ Adaptive $L=100, N=5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45$ และ 50.....	85
5.12 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load กรณีที่ 1 โดยการเพิ่มจำนวน $L=10, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000$ และ 2000, $N=10$ .....	85
5.13 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load กรณีที่ 3 โดยการเพิ่มจำนวน $L=1, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000$ และ 2000, $N=10$ .....	86
5.14 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load กรณีที่ 3 โดยการเพิ่ม จำนวน $L=100, N=1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$ และ 100.....	86
5.15 แสดงค่าการหน่วงเวลาของโพรโทคอลแบบสล็อตอะโลฮา ทั้ง 3 กรณี เมื่อ $L=100, N=10$ .....	87

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.16 แสดงค่าการหน่วงเวลาของโปรโทคอลแบบสล็อตอะโลฮา ทั้ง 3 กรณี เมื่อ $L=1000, N=10$ .....	88
5.17 แสดงค่าการหน่วงเวลาของโปรโทคอลแบบสล็อตอะโลฮา ทั้ง 3 กรณี เมื่อ $L=100$ $N=5$ .....	88
5.18 แสดงค่าการหน่วงเวลาของโปรโทคอลแบบสล็อตอะโลฮา ทั้ง 3 กรณี เมื่อ $L=100, N=20$ .....	89

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 กล่าวนำ

ในอดีตนั้น ระบบการสื่อสารใยแก้วนำแสง ความเร็วสูงถูกนำมาใช้ในการเชื่อมโยงระหว่างการสื่อสารแบบจุดต่อจุดในระยะทางที่ไกลๆของระบบ โครงข่ายคอมพิวเตอร์ เพราะว่าสัญญาณแสงเดินทางได้เร็วกว่าสัญญาณที่ส่งไปตามตัวนำที่เป็นทองแดงหรือวัสดุอื่นๆ แต่เนื่องจากการพัฒนาในอดีตนั้นอุปกรณ์ต่างๆ ที่อยู่ในแต่ละโหนดของการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงยังเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบเก่า จึงทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้งานของสัญญาณแสง แต่ในปัจจุบันการพัฒนานำสัญญาณแสงมาใช้งานได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เพราะว่าการสื่อสารในยุคปัจจุบันนี้ถือได้ว่าเป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญมาก เนื่องจากความนิยมของการใช้งานทางด้านอินเทอร์เน็ตที่เพิ่มปริมาณขึ้นอย่างไม่หยุดยั้ง ไม่ว่าจะเป็นความต้องการในการสื่อสารข้อมูลต่างๆทั้งทางด้านมัลติมีเดีย และการบริการต่างๆ ก็ล้วนแล้วแต่มีการหันมาใช้งานการสื่อสารข้อมูล และเพิ่มปริมาณมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเมื่อมีผู้ใช้เข้ามาใช้งานกันมากขึ้นก็จะมีผลกระทบต่อระบบกราฟฟิกของการส่งข้อมูลไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้ ซึ่งจะนำไปสู่ความต้องการแบนด์วิดท์ในโครงข่ายที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการนำโครงข่ายใยแก้วนำแสงความเร็วสูงเข้ามาใช้งานจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing(WDM) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ เพราะว่าแบนด์วิดท์ของการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงมีแบนด์วิดท์ที่กว้างและเมื่อไม่นานมานี้ยังได้มีการเสนอเทคโนโลยี Dense Wavelength Division Multiplex(DWDM) ซึ่งจะช่วยเพิ่มจำนวนความยาวคลื่น ที่ใช้ส่งข้อมูลให้สูงถึง หนึ่งร้อยความยาวคลื่นต่อใยแก้วหนึ่งเส้นซึ่งจะทำให้การส่งข้อมูลสามารถที่จะส่งข้อมูลได้ หลายร้อยจิกะบิต (Gigabits) ต่อวินาที

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เราจะทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับการส่งข้อมูลในระบบ LAN ซึ่งสำหรับระบบLAN โดยส่วนมากแล้วที่นิยมใช้กันจะมีอยู่ สองระบบ คือ โครงข่ายคอมพิวเตอร์แบบบัส และ แบบสตาร์ แต่อย่างไรก็ตาม ระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์แบบสตาร์จะรองรับกับจำนวนผู้ใช้ได้มากกว่า โครงข่ายคอมพิวเตอร์แบบบัส [6] ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เลือกใช้แบบสตาร์มาใช้ในการวิเคราะห์ระบบ โดยในระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์ใยแก้วนำแสงแบบสตาร์นี้จะมีอุปกรณ์ที่สำคัญของระบบก็คือMXM Optical Star Coupler ซึ่งเป็นอุปกรณ์คัปเปลอร์แบบพาสซีฟ ถึงแม้ว่าเราจะเลือกใช้ระบบที่มีประสิทธิภาพแล้ว แต่ปัญหายังคงไม่หมดไป เพราะว่าในแต่ละระบบเราไม่สามารถที่จะไปควบคุมปริมาณการเข้ามาใช้งานของผู้ใช้ได้ ดังนั้นปัญหาที่ยังคงมีอยู่ก็คือการจัดการกับผู้ใช้ที่เข้ามาใช้ระบบพร้อมกันที่หลายๆผู้ใช้ทำให้แพ็กเก็ต

ข้อมูลในระบบเกิดการชนกันเกิดขึ้น เพราะฉะนั้นเราต้องพิจารณาเลือกใช้โพรโทคอลที่ดีและเหมาะสมกับระบบ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราจึงได้เลือกโพรโทคอลแบบสล็อตอะโลฮาเข้าใช้ในการจัดการข้อมูลเนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เรายังได้นำเสนอวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณโดยอาศัยการปรับปรุงกราฟฟิกเข้ามาช่วยเพื่อให้ค่าวิสัยสามารถของระบบสล็อตอะโลฮาให้มีค่าสูงสุดและมีเสถียรภาพถึงแม้ว่าค่า  $G \geq G_{\max}$  ค่าวิสัยสามารถของระบบก็ยังคงมีค่า 36.8 % เสมอ

## 1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากที่ได้กล่าวไว้ในบทนำนั้นจะเห็นได้ว่าถึงแม้เราจะมีการพัฒนาสัญญาณแสงมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้วนั้น แต่ปัญหาของระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์ใยแก้วนำแสงก็ยังไม่จบเท่านั้น เพราะการจัดการเกี่ยวกับการเข้าใช้ช่องสัญญาณของแต่ละผู้ใช้ก็เป็นปัญหาที่สำคัญ ดังนั้นเราจึงได้นำโพรโทคอลแบบสล็อตอะโลฮาเข้ามามีใช้ในการแก้ปัญหา สำหรับการส่งแบบสล็อตนั้นในแต่ละช่องสัญญาณ(แต่ละความยาวคลื่น)จะถูกแบ่งเป็นช่องๆ ช่องละเท่ากันเพื่อใช้ในการบรรจุข้อมูลที่จะส่ง โดยการส่งนั้นก็จะเป็นการส่งแบบสุ่ม โดยผู้ใช้ที่มีแพ็กเก็ตข้อมูลที่จะส่งก็จะทำการเลือกช่องสัญญาณในการส่งและก็จะรอนกว่าช่วงเวลาเริ่มต้นของช่องสัญญาณนั้นจะมาถึงแล้วจึงเริ่มทำการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลออกไปในช่วงเวลาเริ่มต้นของช่องสัญญาณที่ได้ทำการสุ่มเลือกไว้ แต่ถ้าช่องสัญญาณที่เลือกไว้ไม่ว่างผู้ใช้ก็จะต้องสุ่มเลือกช่องสัญญาณอื่นต่อไป ในส่วนของผู้รับ(เครื่องรับ) ในแต่ละโหนด จะมีเครื่องรับที่สามารถปรับความยาวคลื่นในการรับได้ด้วยเพื่อรับแพ็กเก็ตข้อมูลที่ผู้ส่งได้ทำการส่งมาในหลายช่องสัญญาณ โดยเครื่องรับแต่ละโหนดจะตรวจสอบข้อมูลแพ็กเก็ตควบคุมและปรับความยาวคลื่นตามที่แพ็กเก็ตควบคุมกำหนดมาเพื่อจะได้รับข้อมูลที่ส่งมาได้ถูกต้องปัญหาที่น่าสนใจคือ การพัฒนาโพรโทคอลการเข้าถึงสื่อ(MAC Protocol) ซึ่งจะใช้ในการรับ/ส่งข้อมูลเข้าออกจากช่องสัญญาณ และจัดการกับสล็อตที่ว่างจากการส่งข้อมูลเสร็จสิ้นแล้ว เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการใช้งานสูงสุด แต่จากบทความและงานวิจัยหลายๆงานจะพบว่าเมื่อผู้ใช้เข้ามาใช้ระบบพร้อมๆกันจะทำให้เกิดปัญหาการชนกันของแพ็กเก็ตข้อมูลเสมอ ซึ่งกลายเป็นปัญหาหลักของระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราจะนำเสนอเกี่ยวกับการรักษาประสิทธิภาพของค่าวิสัยสามารถของโพรโทคอลแบบสล็อตอะโลฮาให้มีค่าอยู่ที่ค่าสูงสุดของระบบคือ 36.8% ตลอด ถึงแม้จะมีค่า  $G \geq G_{\max}$  ก็ตาม

## 1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาพื้นฐานของระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์ใยแก้วนำแสงแบบหลายช่องสัญญาณ
2. เพื่อศึกษาหลักการและการนำไปประยุกต์ใช้งานของ WDM Passive Star

3. เพื่อพัฒนาหาโพรโตคอลที่ใช้งานง่ายและมีประสิทธิภาพมาพัฒนาใช้ในระบบ WDM Star LAN
4. เพื่อศึกษาพัฒนาวิธีการที่จะทำให้ค่าวิสัยสามารถของ โพรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮามีความเสถียรภาพที่ค่าสูงสุดตลอดเวลาดังแม้  $G \geq G_{\max}$

## 1.4 ทฤษฎีและหลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการเข้าถึงสื่อ โดยกระบวนการที่ ทั้งตัวส่งและตัวรับสามารถปรับช่องสัญญาณ(ความยาวคลื่น)ในการรับและส่งแพ็กเก็ตข้อมูลได้ ซึ่งจะช่วยลดค่าหน่วยเวลาของการรอคอยการส่ง, การชนกันของแพ็กเก็ตข้อมูล ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าวิสัยสามารถของระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น

นอกจากนั้นเพื่อเพิ่มค่าวิสัยสามารถในการส่งข้อมูลเราได้นำเสนอเทคนิคการปรับปรุงกราฟฟิกของสล็อตอะโลฮามาใช้เพื่อรักษาเสถียรภาพของค่าวิสัยสามารถของสล็อตอะโลฮาดังที่ได้กล่าวไว้ในบทนำ โดยถ้าเป็นระบบเดิมของสล็อตอะโลฮานั้นเมื่อค่า  $G \geq G_{\max}$  ค่าวิสัยสามารถจะลดลงอย่างรวดเร็ว[]ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของระบบแยกลง

## 1.5 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

ขั้นตอนในการทำวิทยานิพนธ์มีดังต่อไปนี้

1. กำหนดหัวข้อ, เป้าหมาย, จุดประสงค์ และขอบเขตของวิทยานิพนธ์
2. ศึกษาทฤษฎีและหลักการพื้นฐานต่างๆที่จะใช้เป็นข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์
3. ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบ
4. ศึกษาและทำการสร้างแบบจำลองเครือข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์
5. ศึกษาขั้นตอนการทำงานและปัญหาของวิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบต่างๆที่มีผู้แนะนำมาแล้ว
6. ออกแบบวิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณวิธีการใหม่เพื่อแก้ปัญหา
7. ทำการจำลองแบบ, สรุปผลการทดลอง และเสนอแนวทางในการทำวิจัยต่อไป

## 1.6 โครงร่างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประกอบไปด้วย

บทคัดย่อ

บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงระเบียบการเข้าถึงแบบสต็อกอะโลฮา

บทที่ 4 เป็นการวิเคราะห์สมรรถนะของโพรโทคอลแบบสต็อกอะโลฮาในโครงข่าย  
คอมพิวเตอร์ใยแก้วนำแสงแบบ WDM STAR LAN

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการวิเคราะห์เชิงเลขของระเบียบการเข้าถึงแบบสต็อกอะโลฮา

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไป

## บทที่ 2

# เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

### 2.1 เส้นใยแก้วนำแสง

เนื่องจากในปัจจุบันนี้มีเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่มีสมรรถนะสูงมาก ส่งผลให้เกิดการ

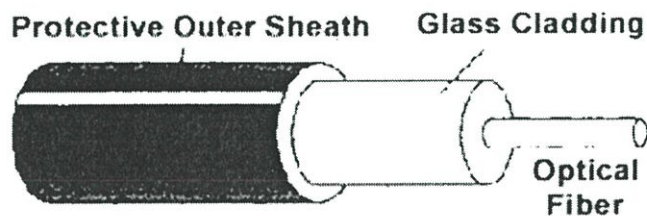
พัฒนาทางด้านการประยุกต์ใช้งานแอปพลิเคชันต่างๆ ขึ้นมากมาย จึงมีจำนวนผู้ใช้คอมพิวเตอร์ที่มากขึ้น ทำให้ปริมาณข้อมูลในการติดต่อสื่อสารเพิ่มตามไปด้วย เพื่อที่จะรองรับต่อการใช้งานข้อมูลที่มีปริมาณมากนี้เองจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้งานเครือข่ายความเร็วสูง ซึ่งเครือข่ายที่สามารถรองรับกับความต้องการนี้ได้ก็คือ เครือข่ายที่ใช้ใยแก้วนำแสงเป็นสื่อส่งสัญญาณ ซึ่งเส้นใยแก้วนำแสงนั้นได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาประยุกต์สร้างเครือข่ายความเร็วสูงที่สามารถส่งผ่านข้อมูลหลายประเภทพร้อมๆ กันดังเช่น ภาพและเสียงภายในเครือข่ายเดียว การใช้งานเส้นใยแก้วนำแสงเป็นสื่อส่งสัญญาณนั้นมีข้อดีดังนี้คือ[8-12,14]

- เนื่องจากความถี่ของแสงสูงมาก( $10^{14}$  Hz) ทำให้ใช้ขนาดของแบนด์วิดท์ได้กว้างและสามารถส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง เหมาะสำหรับแอปพลิเคชันใหม่ๆ ที่หลากหลายมากขึ้น เช่น การดูไฟล์วีดีโอผ่านทางอินเทอร์เน็ต
- การลดทอนสัญญาณมีค่าต่ำมาก จึงเป็นการช่วยลดจำนวนการใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณ เช่น ในการส่งข้อมูลระยะทางไกลๆ จะสามารถวางอุปกรณ์ทวนสัญญาณ 2 ชุด ห่างกันได้มากขึ้น
- เส้นใยแก้วนำแสงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ดังนั้นสายเคเบิลที่ใช้จึงมีขนาดเล็กกว่าการใช้สื่อส่งสัญญาณประเภทอื่น ทำให้ขนาดของท่อที่ใช้ใส่เส้นใยแก้วนำแสงเล็กตามไปด้วย ดังนั้นในการติดตั้งเส้นใยแก้วนำแสงจะทำให้ต้นทุนในการวางท่อมีราคาต่ำลง
- เนื่องจากเส้นใยแก้วนำแสงเป็นสารอโลหะ จึงไม่มีปัญหาของสัญญาณรบกวนจากภายนอก ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณไฟฟ้า, คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือสัญญาณวิทยุและสัญญาณรบกวนจากภายนอก อื่นๆ เช่น ฟ้าผ่า
- ปลอดภัยจากการดักฟังสัญญาณ เนื่องจากเคเบิลใยแก้วนำแสงไม่ได้ใช้ขนส่งสัญญาณทางไฟฟ้าจึงไม่สามารถที่จะลักลอบต่อสายเคเบิลใยแก้วนำแสงได้ข้อมูลจึงไม่ถูกขโมย

#### 2.1.1 ส่วนประกอบของเส้นใยแก้วนำแสง

เส้นใยแก้วนำแสงผลิตขึ้นจากใยแก้วบริสุทธิ์หล่อหลอมเป็นแกน(Core) ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่ารอบแกนถูกหุ้มไว้ด้วยใยแก้วอีกชนิดหนึ่งทำเป็นเปลือก (Cladding) ส่วนที่เป็นใยแก้วนั้นในบางครั้งทำมาจากพลาสติกทำได้ง่ายต่อการติดตั้ง แต่ไม่สามารถที่จะขนส่งข้อมูลในระยะทางไกลเท่ากับสายที่ทำมาจากแก้ว โดยใยแก้วชั้นนอกนี้จะมีดัชนีการหักเหของแสงต่ำกว่าใยแก้วที่ใช้ทำเป็นแกนเพื่อให้แสงที่ถูกส่งมาจากปลายด้านหนึ่งสามารถส่งผ่านไปยังอีกด้านหนึ่ง โดยที่ไม่ผ่านออกไปยังพื้นผิวด้านนอกของเส้นใยได้

## FIBER-OPTIC CABLE



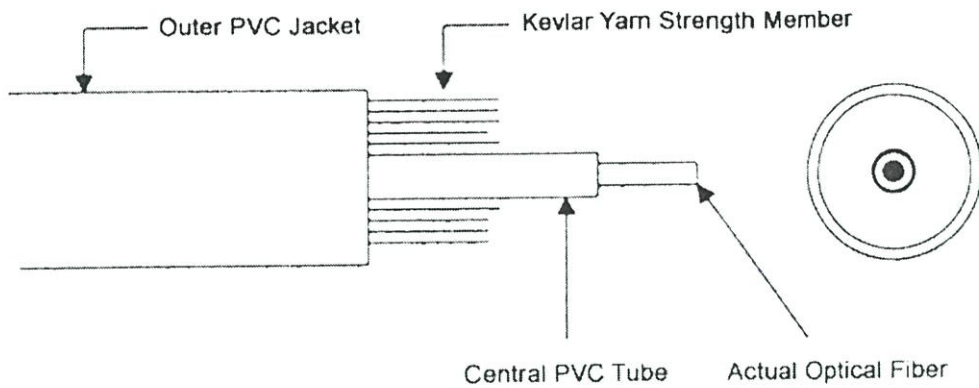
รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของเส้นใยแก้วนำแสง

เนื่องจากใยแก้วนำแสงจะส่งผ่านสัญญาณได้เพียงทิศทางเดียว ในสายเคเบิลจึงมีเส้นใยแก้ว 2 เส้นแยกจากกัน โดยเส้นหนึ่งจะทำหน้าที่ในการส่ง ส่วนอีกเส้นหนึ่งทำหน้าที่ในการรับ จะมีชั้นพลาสติกที่มี Kevlar fiber ห่อหุ้มในการทำให้เส้นใยแก้วมีความแข็งแรง โดยรูปที่ 2.2 แสดงภาพของเคเบิลใยแก้วนำแสง Kevlar fiber ในหัวต่อเชื่อมของเคเบิลใยแก้วนำแสง จะอยู่ระหว่างสายเคเบิลทั้งสองเพื่อเป็นป้องกันเช่นเดียวกับสายคู่พันเกลียวและสาย โคอแอ็กเซียล เคเบิลใยแก้วนำแสงจะถูกห่อหุ้มด้วยการเคลือบพลาสติกเพื่อเป็นการป้องกันเส้นใยแก้ว

### 2.1.2 สรุปคุณสมบัติเส้นใยแก้วนำแสงประเภทต่างๆ

#### 2.1.2.1 เส้นใยแก้วนำแสงมัลติโหมดแบบสเตปอินเด็กซ์

เส้นใยแก้วนำแสงมัลติโหมดแบบสเตปอินเด็กซ์ (step index multimode fibers) มีข้อดีคือราคาถูก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของออปติคัลโหมดมีขนาดใหญ่ (50-80  $\mu\text{m}$ ) ทำให้การคับเปลอร์แสงเข้าไปในออปติคัลคอร์ทำได้ง่าย ข้อจำกัดที่สำคัญคือมีขนาดของแบนด์วิดท์ที่ต่ำเนื่องจากผลกระทบของดิสเพอร์ชันแบบระหว่างโหมด ดังนั้นจึงเหมาะสมกับการนำมาใช้งานที่มีอัตราการส่งบิตข้อมูลต่ำ และในระยะทางใกล้ๆ



รูปที่ 2.2 แสดงภาพของเคเบิลใยแก้วนำแสง Kevlar fiber

### 2.1.2.2 เส้นใยแก้วนำแสงมัลติโหมดแบบเกรดอินเด็กซ์

เส้นใยแก้วนำแสงมัลติโหมดแบบเกรดอินเด็กซ์ (graded index multimode fibers) มีข้อดีคือ มีขนาดของแบนด์วิธที่ใหญ่กว่าเส้นใยแก้วนำแสงมัลติโหมดแบบสเตปอินเด็กซ์ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของออปติคัลคอร์มีขนาดเท่าๆ กัน การคัปเปิลอร์แสงเข้าไปในใยแก้วนำแสงชนิดนี้ทำได้ง่าย จึงมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ในระบบที่มีอัตราความเร็วในการส่งข้อมูลขนาดปานกลางในระยะใกล้หรืออาจใช้ส่งข้อมูลที่มีอัตราบิตต่ำๆ แต่ส่งได้ในระยะทางที่ไกลขึ้น

### 2.1.2.3 เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยวแบบสเตปอินเด็กซ์

เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยวแบบสเตปอินเด็กซ์ (step index single-mode fibers) เป็นเส้นใยแก้วนำแสงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของออปติคัลคอร์ค่อนข้างเล็ก ( $5-10 \mu\text{m}$ ) ทำให้การคัปเปิลอร์แสงเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงมีความยุ่งยากขึ้น แต่กระนั้นเทคโนโลยีที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันก็สามารถแก้ปัญหานี้ได้เป็นอย่างดี เส้นใยแก้วนำแสงประเภทนี้มีขนาดของแบนด์วิธที่กว้าง ค่าการลดทอนของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงจะต่ำสุดที่ความยาวคลื่นในย่าน  $1.5 \mu\text{m}$  แต่ปัญหาของดิสเพอร์ชันแบบโครเมติกจะมีน้อยกว่าในย่าน  $1.3 \mu\text{m}$  ดังนั้นจึงต้องเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับความต้องการ ในปัจจุบันได้มีการนำเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้มาใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบสื่อสารระยะไกล

### 2.1.2.4 เส้นใยแก้วนำแสงแบบเลื่อนดิสเพอร์ชัน

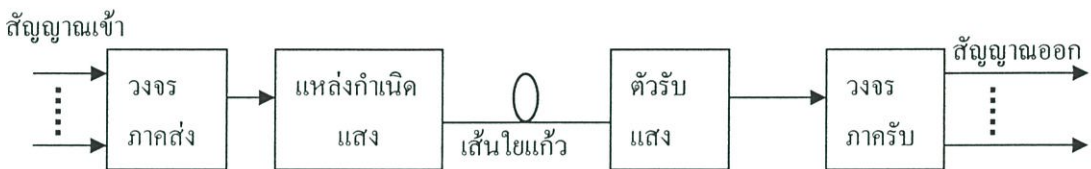
เส้นใยแก้วนำแสงประเภทเลื่อนดิสเพอร์ชัน (dispersion shifted fibers) มีความคล้ายคลึงกับเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยวแบบสเตปอินเด็กซ์ ตรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของออปติคัลคอร์ค่อนข้างเล็ก และมีขนาดของแบนด์วิธที่กว้าง ส่วนที่แตกต่างกันก็คือเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้สามารถกำจัดปัญหาของดิสเพอร์ชันแบบโครเมติกได้อย่างมาก ณ ความยาวคลื่นบางค่า

ในย่าน 1.3-1.6  $\mu\text{m}$  ข้อเสียของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้ได้แก่การที่ยังมีค่าก่อนข้างสูงและอาจมีค่าการลดทอนของสัญญาณสูงกว่าเล็กน้อย

### 2.1.2.5 เส้นใยแก้วนำแสงแบบดิสเพอร์ชันเรียบ

เส้นใยแก้วนำแสงแบบดิสเพอร์ชันเรียบ (dispersion flattened fibers) เป็นเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวที่มีค่าของดิสเพอร์ชันแบบโครเมติกต่ำ และใกล้เคียงกันตลอดช่วงความยาวคลื่น 1.3-1.6  $\mu\text{m}$  ดังนั้นเราสามารถนำเส้นใยแก้วนำแสงประเภทนี้มาใช้ได้ตลอดย่านความถี่นี้ ซึ่งจะมีประโยชน์กับระบบที่มีการมัลติเพล็กซ์สัญญาณคลื่นหลายๆ ความยาวคลื่นเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงเส้นเดียวกัน เส้นใยแก้วนำแสงแบบนี้มีขนาดแบนด์วิดท์ที่กว้างและสามารถนำมาใช้งานการสื่อสารระยะไกลได้ หากแต่อาจยังมีราคาสูงกว่าเส้นใยแก้วนำแสงแบบอื่นๆ

### 2.1.3 การสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสง



รูปที่ 2.3 แสดงระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสง

หลักการการทำงานของระบบสื่อสารโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงแสดงดังรูปที่ 2.3 ระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงนี้มีโครงสร้างคล้ายกับระบบสื่อสารด้วยสายเคเบิลทั่วไป เพียงแต่ใช้ตัวกลางนำข้อมูลที่ต่างกัน กล่าวคือ เมื่อต้องการส่งข้อมูลที่อาจอยู่ในรูปของ สัญญาณเสียง สัญญาณภาพ หรือข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ วงจรรภาคส่งจะทำหน้าที่จัดรูปสัญญาณให้เหมาะสมด้วยวิธีการเข้ารหัสและมอดูเลต โดยลักษณะของข้อมูลที่ใช้ในขั้นตอนนี้ ส่วนใหญ่มักจัดให้อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัลเพราะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า จากนั้นวงจรในส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงหรือไดรเวอร์ขับสัญญาณ (driver) จะแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้ให้เป็นสัญญาณแสงส่งไปยังสถานีที่รับ (สัญญาณข้อมูลดิจิทัล (1 และ 0) จะถูกแปลงเป็นสัญญาณแสงที่มีความเข้มของแสงต่างระดับกัน หรือเป็นแสงสว่าง/มืด) ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณแสงนี้เรียกว่า Electrical to Optical Converter หรือ E/O-Converter โดยเส้นใยแก้วนำแสงทำหน้าที่เป็นท่อนำหรือสายส่งสัญญาณ เส้นใยแก้วนำแสงซึ่งเป็นท่อแก้วหรือท่อสารซิลิกาหลอมละลาย (fused silica) ที่ถูกหุ้ม (Cladding) ด้วยแก้วที่มีคุณสมบัติการหักเหต่ำ ทำให้แสงไม่ออกไปจากท่อแก้ว อุปกรณ์กำเนิด

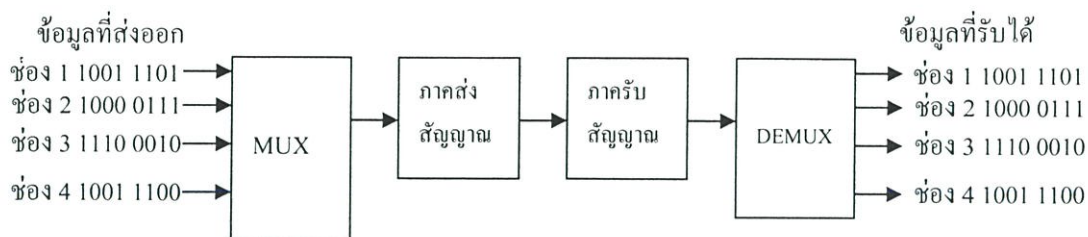
แสงได้แก่ LED (Light Emitting Diode) หรือเลเซอร์ไดโอด (Laser Diode) ซึ่งจะให้มีแสงเมื่อมีกระแสไฟฟ้าวิ่งผ่าน (สำหรับคุณสมบัติที่แตกต่างของอุปกรณ์กำเนิดแสงทั้งสองได้แสดงในตารางที่ 2.1) ที่สถานีรับจะมีอุปกรณ์ตรวจจับแสง เช่น โฟโตไดโอด (Photodiode) และ โฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงที่รับได้ให้อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้า อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้านี้เรียกว่า Optical to Electrical Converter หรือ O/E Converter แล้วส่งไปยังวงจรรักษาเพื่อถอดรหัสและดีมอดูเลตสัญญาณ ทำให้ได้สัญญาณที่มีลักษณะเดียวกับสัญญาณเดิม และใช้เป็นข้อมูลขาออกเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของ LED และเลเซอร์ไดโอด

คุณสมบัติ	LED	เลเซอร์ไดโอด
อัตราส่งข้อมูล	ต่ำ	สูง
ระยะทาง	สั้น	ยาว
อายุการใช้งาน	นาน	สั้น
ความไวต่ออุณหภูมิ	น้อย	มากพอสมควร
อันตรายต่อคน	น้อย	อันตรายต่อสายตา
ราคา	ไม่แพง	แพง
โหมด	มัลติโหมด	มัลติโหมด หรือซิงเกิลโหมด

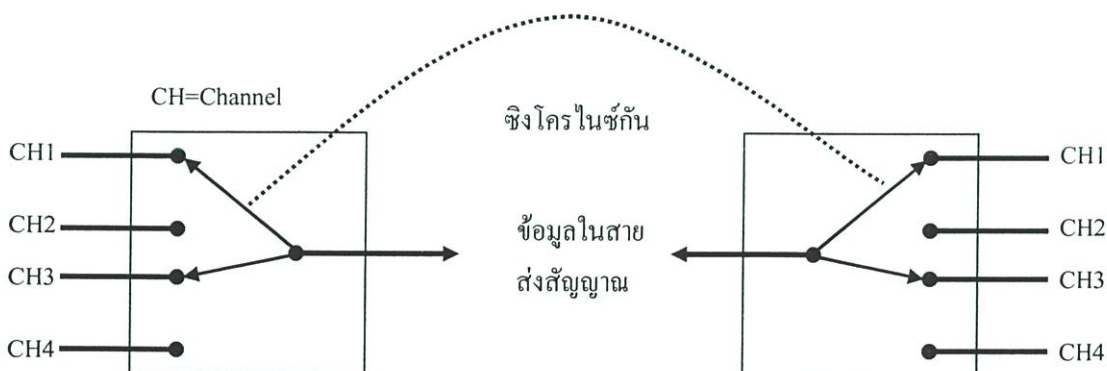
เส้นใยแก้วนำแสงมักถูกนำมาใช้กับแอปพลิเคชันที่ต้องการคุณสมบัติเฉพาะของเส้นใยแก้วนำแสงที่ซึ่งตัวกลางอื่นๆ ไม่มี แต่ถ้ากับแอปพลิเคชันที่ไม่ได้มีความต้องการคุณภาพของตัวกลางสูงมากนัก การนำเส้นใยแก้วนำแสงมาใช้อาจเป็นวิธีที่ทำให้เสียค่าใช้จ่ายมากเกินความจำเป็น ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นวิธีการต่างๆ เพื่อที่จะทำให้การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงคุ้มค่าต่อเงินที่ได้ลงทุนไปมากที่สุด โดยจะต้องส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงให้ได้มากที่สุด ซึ่งเทคโนโลยีที่รองรับความต้องการนั้นได้ดี ก็คือ เทคนิคของการมัลติเพลกซ์ (Multiplexing: MUX) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำให้สามารถส่งและรับข้อมูลจากแหล่งต่างๆ จำนวนมากได้ในช่วงเวลาเดียวกัน โดยใช้ตัวกลางนำข้อมูลเดียวกัน ในระบบเส้นใยแก้วนำแสงถือว่ามีประโยชน์มาก เพราะเป็นระบบที่มีช่วงของแบนด์วิดท์กว้างมากอยู่แล้ว ดังนั้นหากมีการนำเอาระบบมัลติเพลกซ์ซึ่งมีความสามารถสูงมาใช้ร่วมกัน ย่อมทำให้สื่อสารข้อมูลจำนวนมากได้ภายในช่วงเวลาเดียวกัน โดยรูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของระบบมัลติเพลกซ์

เทคนิคในการมัลติเพลกซ์นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่น ระบบการแบ่งเวลา (Time Division Multiplexing: TDM) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในการแบ่งเวลาเป็นช่วงๆ โดยในแต่ละช่วงจะใช้



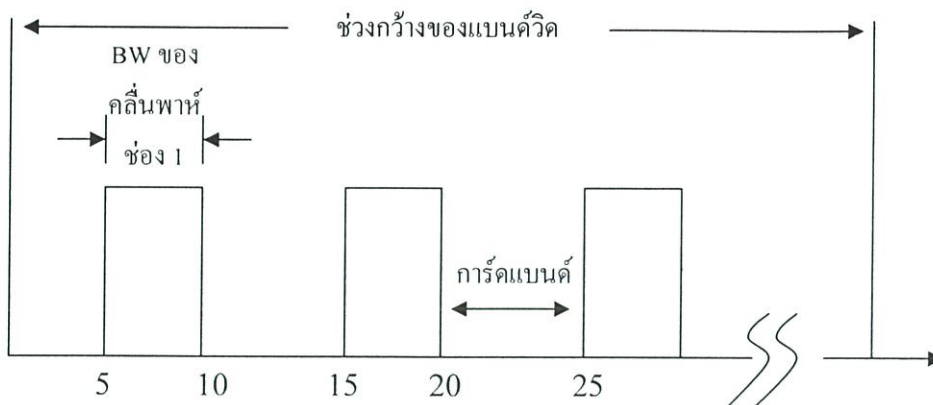
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของระบบมัลติเพล็กซ์

สำหรับการบรรจุข้อมูลดิจิทัลที่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ต่างๆ เรียงกันไป ดังรูปที่ 2.5 และระบบแบ่งความถี่ย่อย (Sub-Carrier Multiplexing: SCM) ซึ่งเป็นระบบมัลติเพล็กซ์ที่แบ่งช่วงความถี่ของสัญญาณที่ส่งออกเป็นช่วงความถี่ย่อย เพื่อทำหน้าที่เป็นคลื่นพาห่อย่อยของข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณ โดยแต่ละช่องจะถูกส่งออกไปในเวลาเดียวกัน โดยรูปที่ 2.6 แสดงช่วงคลื่นพาห่อย่อยของแต่ละช่องสัญญาณที่รวมกันในระบบ SCM ซึ่งปัญหาการใช้งานระบบ SCM จะเกิดขึ้นในขณะที่มีการผสมคลื่นพาห่อย่อยทั้งหมดเข้าด้วยกันโดยอาศัยอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เพราะจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เรียกว่า ครอสทอล์ค (Crosstalk) ขึ้นได้ง่าย ระบบมัลติเพล็กซ์แบบ SCM นี้ นิยมนำไปใช้กับการส่งข้อมูลที่ต้องการแปลงกลับไปกลับมาระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับสัญญาณแสงในเส้นใยแก้วนำแสง สำหรับเทคนิคการมัลติเพล็กซ์อีกประเภทหนึ่งที่ใช้งานได้ดีกับเส้นใย



รูปที่ 2.5 แสดงการทำงานของสวิตซ์ชิงระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา

แก้วนำแสงและใช้ในเฉพาะระบบสื่อสารข้อมูลทางแสงเท่านั้น คือ เทคโนโลยีมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing: WDM) ซึ่งจุดเด่นของเทคโนโลยีนี้คือมีศักยภาพสูงสามารถเข้าใช้ประโยชน์แบนด์วิธของช่องสัญญาณเส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีนี้จะช่วยลดปริมาณการใช้งานของเส้นใยแก้วนำแสงลงได้



รูปที่ 2.6 แสดงช่วงคลื่นพาห้ย่อยของแต่ละช่องสัญญาณที่รวมกันในระบบ SCM

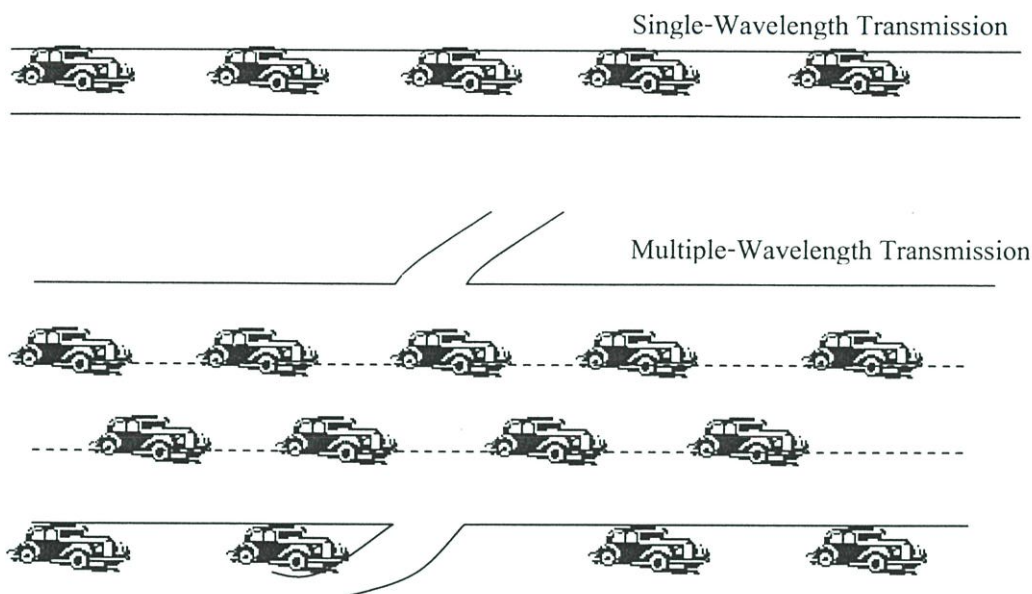
## 2.2 การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

ระบบ WDM เริ่มนำออกใช้งานสู่ตลาดระยะแรกเมื่อปี พ.ศ. 2538 ถูกพัฒนาโดยห้องวิจัยของเบล (Bell Labs) เพื่อติดตั้งใช้งานในเครือข่ายสื่อสารทางไกลของบริษัทเอทีแอนด์ที (AT&T) โดยส่งแสงที่มีค่าความยาวคลื่นแตกต่างกัน 8 ความยาวคลื่นในเส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียว และต่อบริษัทอื่นๆ WDM รูปแบบต่างๆ ออกมา เช่น ระบบ ERION (Ericsson Optical Networks) ของบริษัทอีริคสัน ที่เปิดตัวไปเมื่อต้นปี พ.ศ. 2542 และระบบ WaveStar OLS400G ของบริษัทลูเซนต์เทคโนโลยี (Lucent Technology) ที่สามารถส่งแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันถึง 80 ความยาวคลื่น โดยระบบมีอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดถึง 400 Gb/s ซึ่งในอัตราการส่งข้อมูลขนาดนี้สามารถใช้ส่งข้อความทั้งหมดในหนังสือสารานุกรมชนิด Encyclopedia ได้มากกว่า 1,000 เล่ม ภายในเวลาเพียงแควินาทีเดียวเท่านั้น ซึ่งการปรากฏโฉมของ WDM นี้ ถือว่าเป็นการพลิกโฉมหน้าของระบบสื่อสารโทรคมนาคมเลยทีเดียว

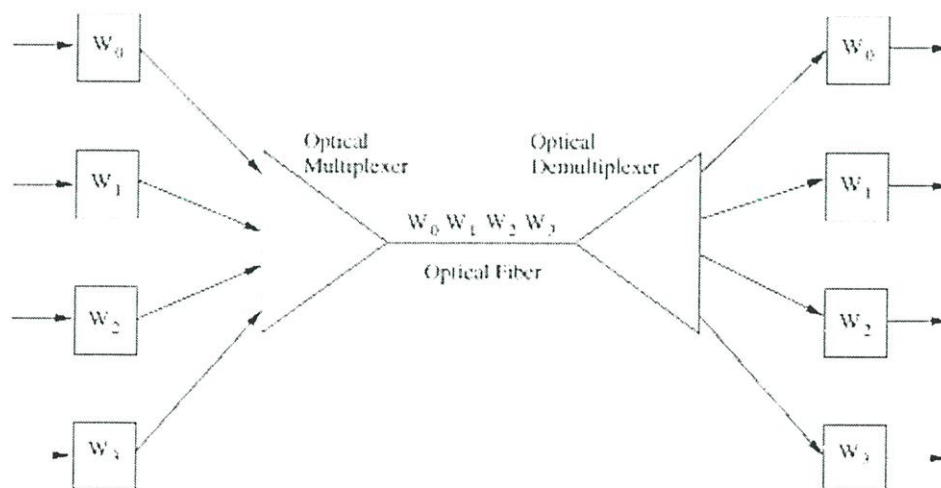
รูปที่ 2.7 แสดงการส่งข้อมูลแบบหลายความยาวคลื่นโดยเปรียบเทียบกับการวิ่งของรถยนต์บนถนน รถยนต์ที่วิ่งบนถนนเปรียบเสมือนข้อมูลที่ต้องการส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสงจำนวนเลนที่รถยนต์สามารถวิ่งได้เปรียบเสมือนจำนวนความยาวคลื่นที่เราใช้ส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสง จะเห็นได้ว่าในกรณีวิ่งบนถนนหลายเลนจะสามารถรองรับจำนวนรถยนต์ได้มากกว่าถนนแบบเลนเดียว ซึ่งนั่นก็คือ การใช้งานเทคโนโลยี WDM เป็นการเพิ่มความจุทำให้ระบบสามารถส่งข้อมูลได้มากขึ้นนั่นเอง

### 2.2.1 หลักการของเทคโนโลยี WDM

หลักการของเทคโนโลยี WDM คือการมัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณหลายช่องสัญญาณรวมกันเพื่อส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียว โดยที่ช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณนั้นจะถูกแยกจากกันด้วยความยาวคลื่น ดังรูปที่ 2.8 แสดงลักษณะการทำงานของมัลติเพล็กซ์ด้วยความยาวคลื่น



รูปที่ 2.7 แสดงการส่งข้อมูลแบบหลายความยาวคลื่น โดยเปรียบกับการวิ่งของรถยนต์บนถนน



รูปที่ 2.8 การทำงานของเทคโนโลยี WDM

[8] คือแต่ละช่องสัญญาณจะมีแหล่งกำเนิดแสง เช่น เลเซอร์ หรือ LED โดยแหล่งกำเนิดแสงแต่ละตัวจะมีความยาวคลื่นต่างกัน โดยคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่งจะสามารถบรรจุข้อมูลได้ชุด

หนึ่ง และข้อมูลแต่ละชุดนี้อาจเป็นข้อมูลชุดเดียวของหนึ่งช่องสัญญาณหรืออาจเป็นข้อมูลจำนวนมากกว่ามาจากหลายช่องสัญญาณที่ได้จากการจัดระบบข้อมูลด้วยเทคนิคของ TDM หรือ SCMA แล้วก็ได้ จากนั้นความยาวคลื่นหลายๆ ความยาวคลื่นจะถูกมัลติเพล็กซ์รวมกันก่อนส่งออกไปบนเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกันด้วยออปติคอลคัปเปิลเลอร์ และที่ปลายทางก็จะมีตัวคอบเปิลเลอร์ที่ทำหน้าที่ในการแยกแสงหรือสัญญาณออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ ด้วยการส่งออกด้วยมุมที่ต่างกัน ไปยังเส้นใยแก้วนำแสงที่ด้านรับ ในกรณีที่ตัวคัปเปิลเลอร์ไม่สามารถแยกแยะสัญญาณรบกวนออกได้หมด อาจมีการนำตัวกรองความถี่มาช่วยอีกชั้นตอนหนึ่งเพื่อคุณภาพที่ดีของสัญญาณ สัญญาณแสงที่ถูกแยกออกจากกันแล้ว จะถูกตีมอดูเลตและถอดรหัสด้วยวิธีที่เหมาะสมกับกระบวนการทางอินพุต และเนื่องจากสัญญาณคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันยอมให้สีที่ต่างกัน บางครั้งระบบ WDM จะถูกเรียกว่าระบบผสมสีของแสง และเนื่องจากค่าความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กับค่าความถี่ การใช้ความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกันในการส่งข้อมูลจึงหมายถึงการใช้ค่าความถี่แสงที่ต่างกันด้วย คล้ายกับระบบแบ่งความถี่ทางไฟฟ้า (Frequency Division Multiplexing: FDM) ดังนั้นหากกล่าวถึงคำว่า FDM ในระบบของเส้นใยแก้วนำแสงโดยมิได้อธิบายให้ชัดเจนอาจก่อให้เกิดความสับสนระหว่าง WDM กับระบบ SCMA ได้

## 2.2.2 ส่วนประกอบโครงข่ายใยแก้วนำแสงระบบ WDM

2.2.2.1 Optical Fiber เป็นเส้นใยแก้วที่ใช้สำหรับนำสัญญาณที่ทนต่อสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี

2.2.2.2 Optical Source เนื่องจากเป็น โครงข่ายที่มีตัวนำแสง ดังนั้นจึงต้องมีการแปลงสัญญาณข้อมูลเดิมที่เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสงสำหรับส่งผ่านเข้าไปในโครงข่าย อุปกรณ์เหล่านี้ได้แก่ LEDs (Light Emitting Diodes) หรือ LASER เป็นต้น

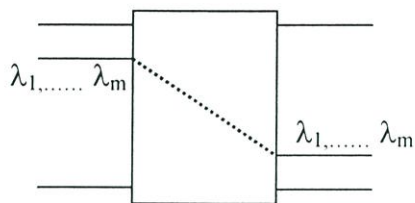
2.2.2.3 Optical Detector เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณแสงแล้วแปลงกลับเป็นข้อมูลทางไฟฟ้าดั้งเดิม เช่น Photodiodes

2.2.2.4 MUX/DEMUX เป็นอุปกรณ์ที่รวม/แยกกระหว่สัญญาณแสงสีหลายช่องสัญญาณกับสัญญาณแสงขาวที่ส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

2.2.2.5 Optical Transmitter เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ (coupling) สัญญาณแสงที่ได้จาก Optical Source ส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง

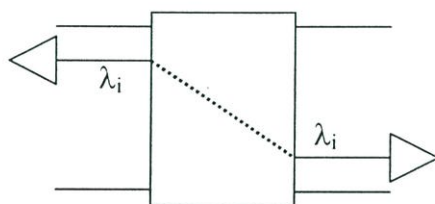
2.2.2.6 Amplifier เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณและสร้างสัญญาณแสงเดิมที่ถูกลดทอนขึ้นมาใหม่ เพื่อให้สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากยิ่งขึ้น โดยที่เกิดการผิดพลาดของข้อมูลน้อยที่สุด หรือ มี BER (Bit Error rate) ต่ำที่สุด

เมื่อข้อมูลที่ถูกส่งจากต้นทางไปยังปลายทางไม่ได้มีเพียงผู้ส่งและผู้รับเดียว จึงต้องมีอุปกรณ์ชนิดหนึ่งคือสวิตช์ในแต่ละโหนดจะแบ่งได้ 3 รูปแบบ ดังรูป 2.9 ก, 2.9 ข และ 2.9 ค



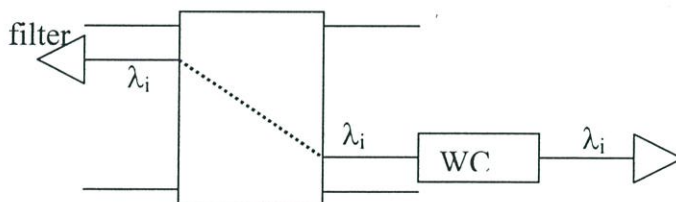
รูปที่ 2.9 ก. แสดง Space Switch แบบธรรมดา

รูปที่ 2.9 ก เป็น space switch ธรรมดา มีเพียงการเปลี่ยนเส้นทางแต่ไม่มีการเปลี่ยนความยาวคลื่น



รูปที่ 2.9 ข. แสดง Space Switch แบบแยกแต่ละความยาวคลื่น

รูปที่ 2.9 ข เป็น space switch ของแต่ละความยาวคลื่น คล้ายกับแบบที่ 1 แต่สัญญาณด้านเข้าและด้านออกมีเพียงความยาวคลื่นเดียว



รูปที่ 2.9 ค. แสดงสวิตช์ที่เปลี่ยนเส้นทางและความยาวคลื่นของสัญญาณในคราวเดียว

รูปที่ 2.9 ค เป็นสวิตช์ที่เปลี่ยนเส้นทางและความยาวคลื่นของสัญญาณในคราวเดียวกัน เป็นแบบที่สามารถเปลี่ยนได้ทั้งเส้นทางและความยาวคลื่น แต่จะมีความซับซ้อนมากกว่า

## 2.3 ประเภทของ WDM

WDM เทคโนโลยีนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 เทคนิค คือ

### 2.3.1 Wavelength-Selective WDM

เทคนิค Wavelength-Routed หรือ Wavelength-Selective ของ WDM สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 แหล่งกำเนิดแสงทางด้านส่งจะทำงานกันที่ความถี่ต่างกัน กำลังในการส่งสัญญาณ โดยทางอุดม

คติแล้วจะเป็นผลรวมกำลังส่งของทุกๆ ตัวส่งรวมกัน โดยไม่มีการสูญเสียของสัญญาณ และทางด้านรับซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดีมัลติเพล็กซ์นั้นจะทำการแยกแต่ละความยาวคลื่น ไปยังตัวรับแต่ละตัว และโดยทางอุดมคติแล้วการแยกแต่ละความยาวคลื่น ไปยังตัวรับแต่ละตัวนั้นถือว่าไม่มีการสูญเสียของสัญญาณเช่นเดียวกัน ในทางทฤษฎีเราอาจถือได้ว่าการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์นั้นมีความสูญเสียของสัญญาณต่ำ เนื่องจากกำลังส่งที่เกิดขึ้นในแต่ละความยาวคลื่นนั้นจะส่งไปยังเส้นทางที่ต้องการเพียงเส้นทางเดียว คือแต่ละความยาวคลื่นก็จะถูกส่งไปยังเส้นทางที่ต่างกัน และถ้าไม่คำนึงถึงการสูญเสียของสัญญาณที่เกิดจากการรบกวนกันของสัญญาณ เราจะได้

$$P_{out}(\lambda_j) = P_{in}(\lambda_j) \quad (2.1)$$

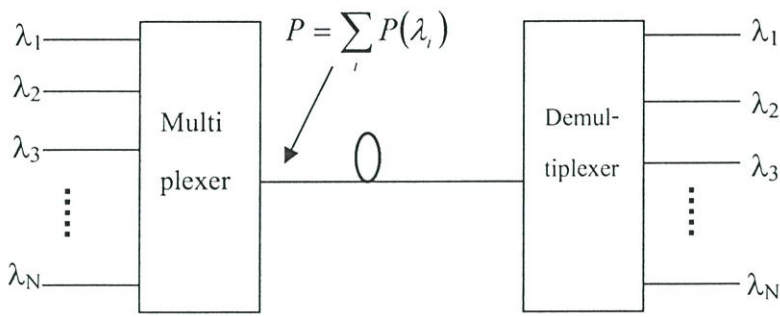
แสงที่หลุดออกจากช่องสัญญาณอื่นๆ นั้น ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เรียกว่า Crosstalk โดยเฉพาะในระบบที่เป็นการสื่อสารแบบหลายช่องทาง โดย Crosstalk-CT ที่เกิดจากช่องสัญญาณ  $j$  ไปรบกวนช่องสัญญาณ  $i$  ในหน่วยเดซิเบล สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$CT_{ij} = 10 \log \left( \frac{P_{ij}}{P_{ii}} \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $P_{ij}$  คือกำลังส่งที่วัดได้ในช่องสัญญาณ  $i$  เมื่อมีเพียงช่องสัญญาณ  $j$  เท่านั้นที่ทำการส่งสัญญาณในขณะนั้น และ  $P_{ii}$  เป็นกำลังในการส่งสัญญาณในช่องสัญญาณ  $i$  เมื่อช่องสัญญาณ  $i$  เป็นเพียงช่องสัญญาณเดียวที่ทำการส่ง ค่าของ Crosstalk จะสามารถแสดงได้ในรูปแบบของการเปรียบเทียบเป็นคู่ หรือค่าโดยรวม คือ

$$CT_{total} = 10 \log \left( \frac{\sum_j P_{ij}}{P_{ii}} \right) \quad (2.3)$$

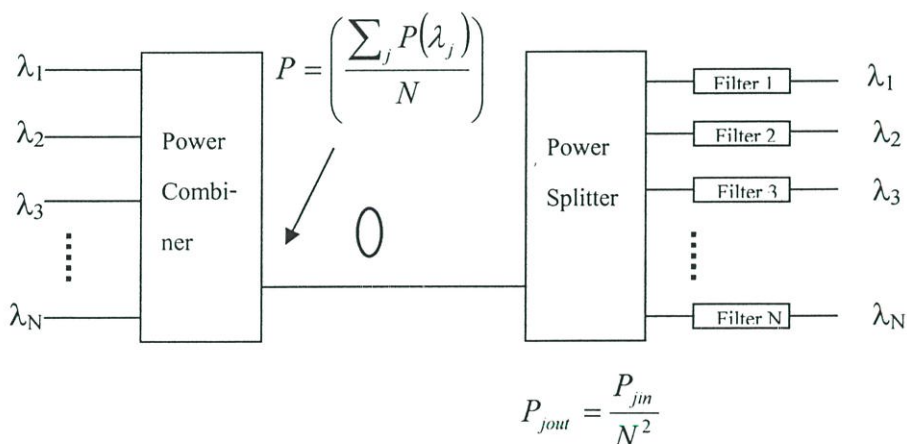
โดยค่าในส่วนที่เป็นเศษของสมการที่ 2.3 คือ ผลรวมของกำลังส่งที่เกิดจากช่องสัญญาณอื่นๆ ที่วัดได้ในช่องสัญญาณ  $i$



รูปที่ 2.10 แสดงเทคนิค Wavelength-Selective WDM

### 2.3.2 Broadcast-and-Select WDM

เทคนิค Broadcast-and-Select หรือ Broadband สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ด้วยกรรมวิธีนี้กำลังในการส่งสัญญาณจะเกิดผลรวมกำลังส่งทั้งหมดของแหล่งกำเนิดแสงที่ด้านส่งและเมื่อถึงปลายทางผลรวมของกำลังส่งทั้งหมดนี้ก็จะถูกแบ่งไปยังตัวรับแต่ละตัว



รูปที่ 2.11 แสดงเทคนิค Broadcast-and-Select WDM

จากรูปที่ 2.11 ตัวส่งแต่ละตัวจะถูกกำหนดให้ทำงานที่ความยาวคลื่นที่กำหนดไว้ จากนั้นทุกๆ ความยาวคลื่นก็จะถูกส่งกระจายไปยังตัวรับทุกตัว ซึ่งตัวรับจะต้องมีส่วนที่ทำหน้าที่ในการแยกแยะช่องสัญญาณ สัญญาณที่ส่งมายังตัวรับก็จะถูกกรองเอาเฉพาะความยาวคลื่นที่ต้องการ แล้วจึงส่งผ่านสัญญาณนั้นไปยังตัวดีเทคเตอร์ (การทำงานจะคล้ายคลึงกับการส่งสัญญาณของระบบ TV Broadcast) นอกจากนั้นเทคนิคนี้ยังสามารถเลือกรูปแบบของตัวส่งให้เป็นแบบที่สามารถทำงานที่ความยาวคลื่นใดๆ ก็ได้ (Tunable Transmitter) ในขณะที่ทางตัวรับจะทำงานที่ความยาวคลื่นที่กำหนด (Fixed Receiver) หรืออาจเป็นลักษณะที่ตัวส่งและตัวรับสามารถที่จะทำงานที่ความยาวคลื่นใดๆ ได้ทั้งคู่ (Tunable Transceiver) ก็เป็นไปได้

ในระบบเหล่านี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ทำหน้าที่ในการแยกแยะและรวมสัญญาณ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณในขั้นตอนนี้เป็นปริมาณ  $1/N$  ในอุปกรณ์แต่ละตัว [9] และความสูญเสียของสัญญาณจะเป็น  $1/N^2$  (เมื่อ  $N$  คือจำนวนของตัวรับ-ส่ง) ดังนั้นความสูญเสียของสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณโดยไม่คำนึงถึงความสูญเสียของสัญญาณที่เกิดจากการกวนกันของสัญญาณแล้ว จะแสดงได้สมการ

$$P_{out}(\lambda_j) = \frac{P_m(\lambda_j)}{N^2} \quad (2.4)$$

ความสูญเสียของช่องสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกแยะสัญญาณมีค่า  $1/N$  หรือ  $10\log N$  เดซิเบล ซึ่งอาจมีผลเสียต่อระบบอย่างมากถ้าไม่มีอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงมาช่วยซึ่งถือเป็นข้อดีอย่างหนึ่งของเทคนิคนี้ นอกจากนั้นเทคนิคนี้ยังเป็นที่ยอมรับในทางทหาร เนื่องจากความคล่องตัวของระบบ สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นที่ใช้ในการรับ-ส่งได้อย่างสะดวกและไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบการส่งสัญญาณ

## 2.4 ตัวมัลติเพล็กซ์เซอร์

ระบบ WDM นั้นจะมีเทคนิคในการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ที่หลากหลาย ซึ่งรวมถึงเกรตติงและตัวกรองสเปคตรัม โดยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการแยกความยาวคลื่นมี 2 ประเภท คือ อุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุมและอุปกรณ์ฟิลเตอร์

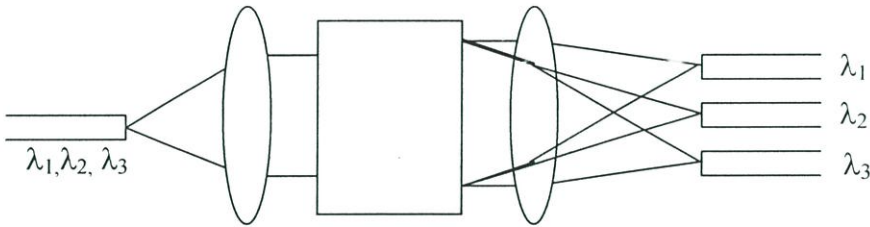
### 2.4.1 อุปกรณ์กระจายเชิงมุม

อุปกรณ์กระจายเชิงมุม เช่น ปริซึม และ เกรตติง เป็นอุปกรณ์ซึ่งส่งผ่านหรือสะท้อนแสงที่มุม ซึ่งขึ้นกับค่าความยาวคลื่นของแสงตกกระทบ ค่าพารามิเตอร์หลักที่อธิบายถึงคุณลักษณะที่สำคัญของอุปกรณ์ชนิดนี้คือ ความสูญเสียส่วนเกินและการกระจายมุมของอุปกรณ์ ความสูญเสียส่วนเกินเป็นความสูญเสียที่เกิดจากการผ่านเข้าสู่อุปกรณ์แล้วมีความสูญเสียมากกว่า  $1/N$  ซึ่งเป็นค่าที่ควรเป็น เนื่องจากว่าอุปกรณ์เหล่านี้เป็นอุปกรณ์ที่มีความถี่กว้าง ความสูญเสียส่วนเกินนี้จึงควรจะถูกกระทำไว้ที่ค่าความยาวคลื่นนั้นๆ

การกระจายเชิงมุมของอุปกรณ์ เป็นค่าประเมินการกระจายของมุม  $d\theta$  ระหว่างสองลำแสง ซึ่งตกกระทบในเวลาเดียวกันที่อินพุต โดยมีความแตกต่างของความยาวคลื่น  $d\lambda$  การกระจายเชิงมุมจะเป็น  $d\theta/d\lambda$  และการกระจายเชิงมุมนี้สามารถเปลี่ยนกลับได้จากการใช้เลนส์ช่วยในการรวมกันของแสงดังรูปที่ 2.12

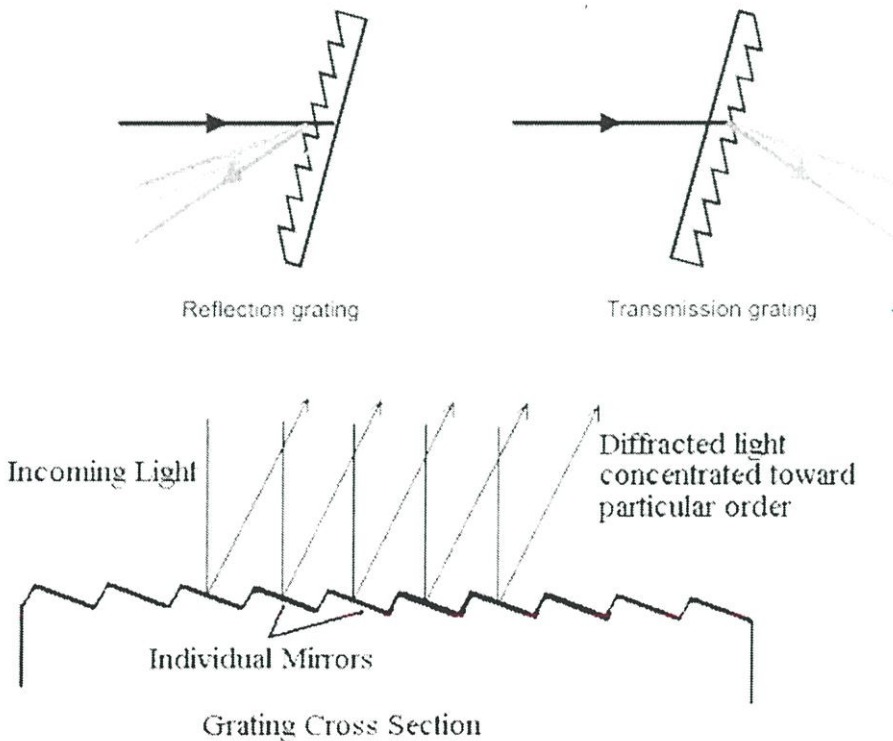
อุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุมต้องการการตกกระทบของแสง ในรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นเลนส์ตัดขวางแสงจากอินพุตเส้นใยแก้วนำแสง ที่ปลายของเส้นใยแก้วนำแสงจะอยู่ในแนวระนาบส่วนหน้าของเลนส์ ส่วนอุปกรณ์แบบกระจายอยู่ในแนวระนาบส่วนหลังของเลนส์

ในระบบการกระจายเชิงมุมส่วนใหญ่ เกรตติงเป็นอุปกรณ์ซึ่งถูกใช้ร่วมกับเลนส์ดังรูปที่ 2.13 เกรตติงจะเป็นส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ในการสะท้อนและส่งผ่าน โดยที่พื้นผิวจะมีลักษณะเป็นลายเส้น



รูปที่ 2.12 ระบบการแยกความยาวคลื่น โดยอุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุมและเลนส์

ฝังอยู่ และโดยทั่วไปอุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์นี้จะมีค่าความสูญเสียส่วนเกินอยู่ที่ 1-3 เดซิเบล มีขนาดความห่างของแต่ละช่องสัญญาณเป็นค่า 1-10 นาโนเมตร



รูปที่ 2.13 การทำงานของเกรตติงในระบบ WDM

## 2.4.2 อุปกรณ์ฟิลเตอร์

อุปกรณ์ฟิลเตอร์จะทำการสะท้อนหรือส่งผ่านแสงตามค่าความยาวคลื่น อุปกรณ์ฟิลเตอร์ที่นำมาใช้เพื่อแยกความยาวคลื่นนั้นมีหลากหลายประเภท โดยในตารางที่ 2.2 จะแสดงค่าแบนด์วิดท์ที่สามารถใช้กับประเภทของตัวกรองต่างๆ

### 2.4.2.1 Interference ฟิลเตอร์

ฟิลเตอร์ทางแสงส่วนใหญ่ที่ใช้วิธีมักจะเป็นลักษณะของการใช้งานทางไฟฟ้ามากกว่า เพื่อคุณภาพในการสะท้อนที่ค่าความยาวคลื่นที่ต้องการและลดปริมาณการสูญเสียของสัญญาณ ในการทำงานของฟิลเตอร์ ฟิลเตอร์จะยอมให้ค่าความยาวคลื่นค่าหนึ่งส่งผ่านไป (ที่มีการตอบสนองแบบเรโซแนนซ์) และจะสะท้อนค่าความยาวคลื่นตัวอื่นๆ เป็นค่ามากกว่า 10% เทียบจากค่าความยาวคลื่นศูนย์กลางของฟิลเตอร์ สำหรับในการใช้งานเมื่อมีมากกว่า 2 ช่องสัญญาณ การจัดการฟิลเตอร์ให้เหมาะสมก็เป็นเรื่องที่ต้องพิจารณาเพื่อหลีกเลี่ยงความสูญเสียของสัญญาณ ในทางปฏิบัติจำนวนของฟิลเตอร์ที่นำมาใช้งานก็มีข้อจำกัด อย่างเช่น ในระบบ บรอดแบนด์จะจำกัดอยู่ที่ 5-6 ช่องสัญญาณ เพราะจำนวนฟิลเตอร์ที่มากขึ้นนำไปสู่ความสูญเสียของสัญญาณเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าแบนด์วิดท์ที่ใช้ในเทคนิคการกรองต่างๆ

Method	Typical Channel Bandwidth
Interference Filters	5 nm
Fabry-Perot Filter	0.1-10 nm
Tuned Semiconductor Amplifier	1-10 GHz
Heterodyne Receiver	1-10 GHz

### 2.4.2.2 ฟิลเตอร์เรโซแนนซ์แบบ Fabry-Perot

ตัวเรโซแนนซ์แบบ Fabry-Perot เป็นฟิลเตอร์ทางแสงแบบแบนด์พาสที่ยอมให้ส่งผ่านความยาวคลื่นที่ความถี่ค่าหนึ่งและสะท้อนส่วนอื่นๆ ความถี่ในการส่งผ่านของฟิลเตอร์เกิดขึ้นทุก  $c/2L$  เมื่อ  $L$  คือ ช่องว่างระหว่างกระจกสะท้อนของตัวเรโซแนนซ์

### 2.4.2.3 ฟิลเตอร์แบบอุปกรณ์ขยายถึงตัวนำ

เลเซอร์ไดโอดที่ถูกปั๊มต่ำกว่าค่าเทรชโวลด์จะเป็นตัวขยายที่สามารถปรับค่าความถี่ที่จะให้ส่งผ่านได้โดยความถี่ที่จะให้ส่งผ่านนั้นจะเป็นเพียงช่วงแบนด์แคบๆ ความถี่ศูนย์กลางจะถูกกำหนดได้จากส่วนประกอบของวัสดุ ซึ่งอาจใช้เลเซอร์แบบกระจาย (DFB: Distributed-Feedback Laser) หรือเลเซอร์สะท้อนกลับแบบกระจาย (DFR: Distributed-Feedback Reflector Laser) ที่มีค่าอิเล็กทรอนิกส์แบบหลากหลายเพื่อปรับค่าความยาวคลื่นที่ถูกขยายเพิ่มขึ้น

#### 2.4.2.4 ฟิลเตอร์ไฟฟ้าแบบ Coherent Detection

เทคนิคนี้จะถูกนำมาใช้เมื่อแหล่งกำเนิดแสงมีเส้นที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่เป็นไปได้ ในเทคนิคนี้สัญญาณจะถูกผสมเข้ากับสัญญาณอ้างอิงที่เป็นค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าความถี่ที่ถูกกำหนดไว้ในเลเซอร์ภายใน สัญญาณที่ผสมนี้จะสร้างเป็นความถี่ใหม่ขึ้นมา ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณของสัญญาณที่ดีจะถูกกำหนดได้จากค่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ถูกโมดูเลต และวิธีการจัดเรียงทางด้านตัวรับ

### 2.5 แหล่งกำเนิดแสง

ในระบบ WDM แหล่งกำเนิดแสงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญของระบบ แหล่งกำเนิดแสงจะต้องมีความคงที่และมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนเพื่อใช้ในการเลือกค่าความยาวคลื่นที่ต้องการได้ในตารางที่ 2.3 จะแสดงถึงความกว้างสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงที่จะกล่าวถึงในที่นี้

ตารางที่ 2.3 ความกว้างสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่างๆ

Type	Typical Spectral Width	Typical Spectral Width
LED	50-100 nm (or more)	5000-10000 GHz
Fabry-Perot Laser	3-6 nm	300-600 GHz
DFB Laser	<0.01 nm	10-100 MHz
External Cavity Laser		<1 MHz

#### 2.5.1 LED

LED (Light Emitting Diode) เป็นไดโอดที่ถูกออกแบบโครงสร้างให้สามารถทำงานเปล่งแสงออกมาได้ เมื่อมีการไบอัสที่ถูกต้อง ค่าแบนด์วิดท์ที่กว้างของ LED นั้นมักจะถูกพิจารณาเป็นข้อด้อย เนื่องจากทำให้เกิดการกระจายของเส้นใยแก้ว แต่เราก็สามารถนำไปผ่านสเปกตรัมฟิลเตอร์เพื่อทำให้ความกว้างของสเปกตรัมของ LED แคบลงได้ด้วยเทคนิคที่เรียกว่า Spectral Slicing หลักการนี้มีข้อดีคือเราสามารถนำ LED ซึ่งราคาไม่แพงนี้เป็นแหล่งกำเนิดแสงได้ในตัวส่งหลายๆ ตัวทางด้านส่ง จากนั้นจึงใช้ฟิลเตอร์มาช่วยในการเลือกค่าความยาวคลื่นที่จะใช้งาน แต่ฟิลเตอร์นี้ก็จะไปลดระดับกำลังส่งที่ได้จากแหล่งกำเนิด LED ซึ่งทำให้ค่าแบนด์วิดท์ลดลงไปด้วย วิธีการนี้ในทางปฏิบัติแล้วจึงเหมาะสำหรับการสื่อสารที่มีอัตราการส่งข้อมูลต่ำและระยะทางสั้น

#### 2.5.2 เลเซอร์ไดโอดแบบ Fabry-Perot

เลเซอร์ไดโอดแบบนี้โดยทั่วไปจะมีรูปแบบการสันสะท้อน 6-8 แบบ และมีช่องว่างเป็นค่า  $c/2L$  เฮิร์ตซ์ สำหรับเลเซอร์ชนิดนี้ค่าความยาวคลื่นศูนย์กลางมีค่าความเปลี่ยนแปลงที่สามารถยอมรับได้อยู่ที่  $\pm 3$  นาโนเมตร และมีความกว้างของเส้นที่ 6 นาโนเมตร ค่าความเปลี่ยนแปลงที่สามารถยอมรับได้ของตัวมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์จะเป็น  $\pm 1$  นาโนเมตร ดังนั้นช่องว่างระหว่างช่องสัญญาณที่ดีที่สุดจะเป็น 14 นาโนเมตร และถ้ากำหนดให้ช่องว่างระหว่างช่องสัญญาณมีค่าเท่ากับความกว้างของช่องสัญญาณเราจะต้องใช้ขนาดถึง 28 นาโนเมตร

### 2.5.3 เลเซอร์ไดโอด DFB

เลเซอร์ไดโอดชนิดนี้จะมีค่าความกว้างของสเปกตรัมของสัญญาณอยู่ที่ 10-100 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดสเปกตรัมของสัญญาณเองที่อัตราการส่งข้อมูลสูงๆ หรือความยาวคลื่นที่สูงโด่งขึ้นมา (Chirp) ที่เกิดที่เอาท์พุทของเลเซอร์เมื่อเกิดการสัน ความกว้างของช่องสัญญาณจะประมาณได้จากค่าความเปลี่ยนแปลงที่สามารถยอมรับได้ของความยาวคลื่นศูนย์กลางของแหล่งกำเนิดที่มีค่า  $\pm 0.5$  นาโนเมตร ค่าความเปลี่ยนแปลงที่สามารถยอมรับได้ของ Chirp ซึ่งมีค่า  $\pm 0.2$  นาโนเมตร และค่าความเปลี่ยนแปลงที่สามารถยอมรับได้ของฟิลเตอร์ซึ่งมีค่า  $\pm 1$  นาโนเมตร ดังนั้นความกว้างของช่องสัญญาณจะอยู่ที่ประมาณ 3.5 นาโนเมตร และถ้ากำหนดให้ช่องว่างระหว่างช่องสัญญาณมีค่าเท่ากับความกว้างของช่องสัญญาณ จะได้หนึ่งช่องสัญญาณมีความกว้าง 7 นาโนเมตร

### 2.5.4 เลเซอร์ที่กำหนดค่าความถี่

เลเซอร์ชนิดนี้สามารถมีขนาดเส้นที่เล็กถึง 5 เมกะเฮิร์ตซ์ได้ ซึ่งขนาดความกว้างของเส้นที่มีค่าน้อยๆ นี้ทำให้แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณนั้นขึ้นอยู่กับค่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณโดยตรง โดยที่ค่าขนาดความกว้างของเส้นของแหล่งกำเนิดแสงไม่มีผลเลย ในกรณีนี้ การดีมัลติเพล็กซ์ไม่สามารถใช้ฟิลเตอร์แบบที่กำหนดตายตัวได้ ต้องใช้ฟิลเตอร์แบบที่สามารถปรับเปลี่ยนได้แบบแบนด์วิดแคบ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าค่าความยาวคลื่นที่ส่งผ่านมาจากฟิลเตอร์นั้นตรงกับความยาวคลื่นที่มาจากแหล่งกำเนิดแสง

## 2.6 ระบบเครือข่ายแบบหลายความยาวคลื่น

ระบบ WDM เป็นระบบเครือข่ายที่ทำงานที่หลากหลาย ความยาวคลื่น ดังนั้นอุปกรณ์ตัวรับ-ส่ง จึงอาจจะต้องสามารถปรับเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น ไปตามที่ต้องการได้

### 2.6.1 ตัวส่งที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้

กรรมวิธีในการปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นในตัวส่งที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้จากลำพอสังเขปได้ดังนี้

### 2.6.1.1 การปรับเปลี่ยนโดยใช้อุณหภูมิหรือกระแส

ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงในตัวส่งจะสามารถถูกปรับเปลี่ยนได้โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวส่ง ซึ่งจะสามารถปรับความยาวคลื่นได้ถึงประมาณ 0.08 นาโนเมตรต่อหนึ่งองศาเซลเซียส และในกรณีที่เป็แหล่งกำเนิดแสงแบบเลเซอร์ DFB อาจทำได้ถึง 1 นาโนเมตร หรือการเปลี่ยนแปลงกระแสของเลเซอร์ก็สามารถปรับความยาวคลื่นได้เช่นกัน โดยจะสามารถปรับได้ประมาณ 200 เมกะเฮิรตซ์ต่อมิลลิแอมแปร์

### 2.6.1.2 การปรับเปลี่ยนด้วย DFB และ DFR

ในการปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นแบบครั้งละมากๆ อาจทำได้โดยการรวมเลเซอร์ DFB กับส่วนที่ควบคุมเฟสและส่วนที่แอกทีฟ หรือกระทำโดยการปรับเปลี่ยนในระดับของโครงสร้างของตัวชิพที่ทำหน้าที่ในการควบคุมตัวเลเซอร์เพื่อที่จะให้เลเซอร์นั้นสามารถทำการจ่ายได้หลายๆ ความยาวคลื่น

### 2.6.1.3 การปรับเปลี่ยนโดยใช้อุปกรณ์ภายนอก

นอกจากนั้นเรายังสามารถใช้อุปกรณ์แบบ Fabry-Perot กับอุปกรณ์ภายนอกแบบที่เป็นโพรงหรือรูที่มีเกรตติงเคลื่อนที่ติดอยู่ การปรับเปลี่ยนโดยเทคนิคนี้สามารถปรับได้ครั้งละมากกว่า 55 นาโนเมตร และด้วยความเร็วในการปรับเปลี่ยนนี้จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องด้วย

## 2.6.2 ตัวรับที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้

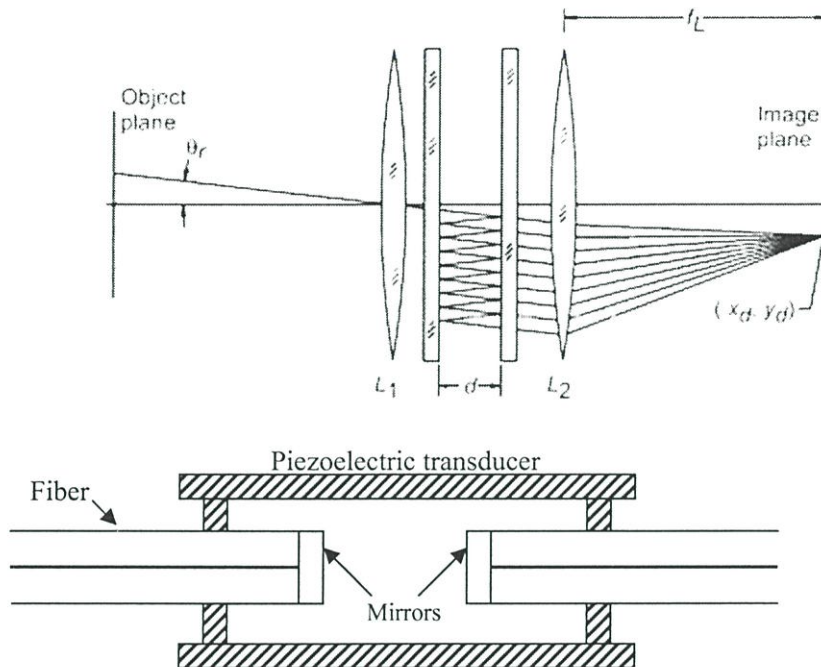
ในการปรับแต่งที่ตัวรับ ฟิลเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้นั้นสามารถเป็นฟิลเตอร์แบบต่างๆ เหล่านี้

### 2.6.2.1 ฟิลเตอร์แบบหลายชั้น

ฟิลเตอร์ชนิดนี้จะประกอบไปด้วยหลายๆ ชั้น แต่ละชั้นก็จะมีขนาดแตกต่างกัน ในการปรับเปลี่ยนจะทำโดยการปรับฟิลเตอร์ ด้วยวิธีการนี้จะสามารถครอบคลุมได้ถึง 270 นาโนเมตร โดยมีพาสแบนด์อยู่ที่ 7 นาโนเมตร

### 2.6.2.2 ฟิลเตอร์แบบ Fabry-Perot Interferometer

การปรับเปลี่ยนในวิธีนี้จะกระทำโดยการเปลี่ยนความยาวของโพรงหรือรูของฟิลเตอร์ ซึ่งจากการทดลองสามารถรองรับได้ถึง 30 ช่องสัญญาณ โดยในการปรับเปลี่ยนจะใช้เวลาเพียงไม่กี่ไมโครวินาที ฟิลเตอร์แบบ Fabry-Perot Interferometer แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงฟิลเตอร์แบบ Fabry-Perot Interferometer

### 2.6.2.3 เลเซอร์แบบ DFB ที่ทำงานที่ต่ำกว่าค่าเทรโซลด์

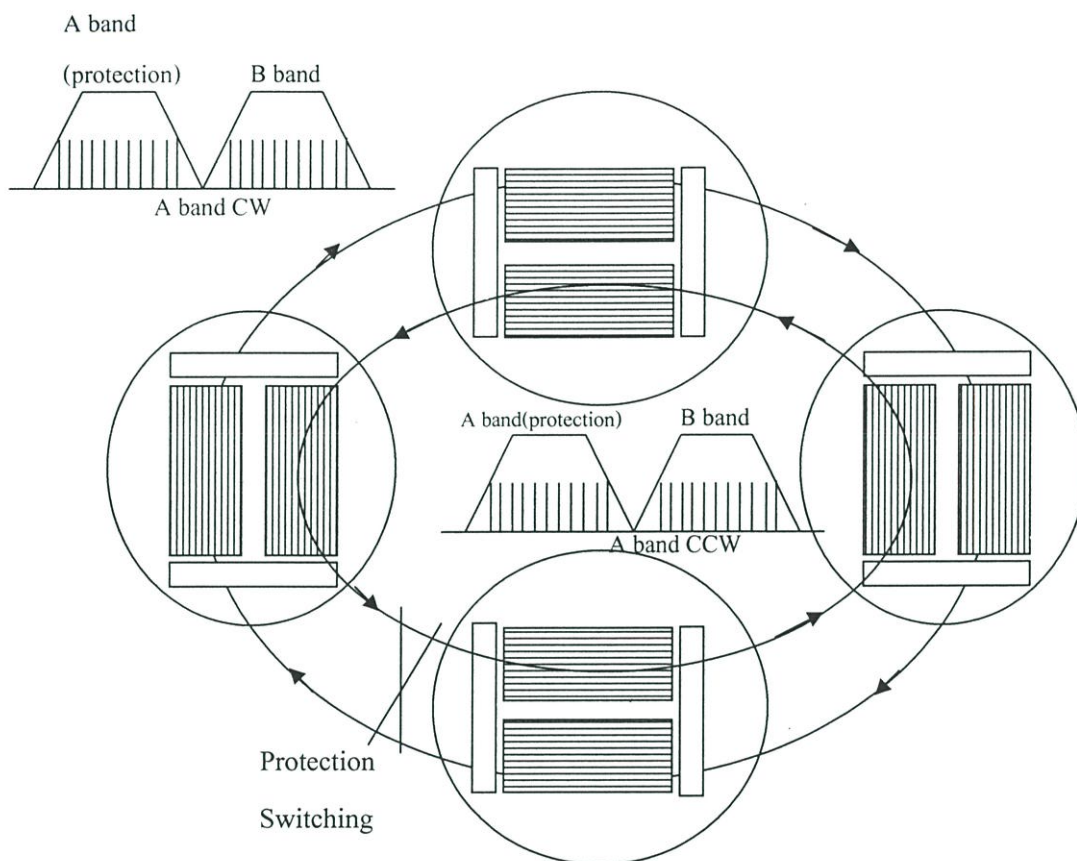
เลเซอร์แบบ DFB ที่ทำงานที่ต่ำกว่าค่าเทรโซลด์นี้จะทำหน้าที่คล้ายเป็นตัวขยายสัญญาณและในที่นี้ทำหน้าที่เป็นฟิลเตอร์ที่ยอมให้แบนด์แคบๆ ผ่านได้ โดยในการปรับเปลี่ยนจะกระทำได้โดยการทำงานร่วมกับส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมทางเฟส ซึ่งช่วงเวลาในการตอบสนองทำได้เร็วและมีช่วงในการปรับเปลี่ยนอยู่ที่ 71 กิกะเฮิรซ์ สำหรับในการทำงานของ 10 ช่องสัญญาณ

## 2.7 การป้องกันโครงข่ายล่ม

โครงข่ายแบบ All-optical เป็นโครงข่ายที่มีความจุสูง ในกรณีที่อุปกรณ์เพียงบางส่วนไม่ทำงานก่อให้เกิดผลกระทบค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกันโครงข่ายให้พ้นจากสภาพที่ไม่สามารถใช้งานได้ โดยทั่วไปมักใช้การเตรียมแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเพื่อให้สามารถสลับการทำงานระหว่างส่วนที่ทำงานจริงในเวลาปกติและส่วนที่สำรองไว้ในยามฉุกเฉิน

จากรูปที่ 2.15 วงแหวนประกอบด้วยเส้นใยแก้วนำแสง 2 เส้น แต่ละเส้นเป็นการส่งในทิศทางเดียวคือเส้นหนึ่งส่งในทิศตามเข็มนาฬิกาใช้ความถี่ย่าน A band และอีกเส้นหนึ่งส่งในทิศ

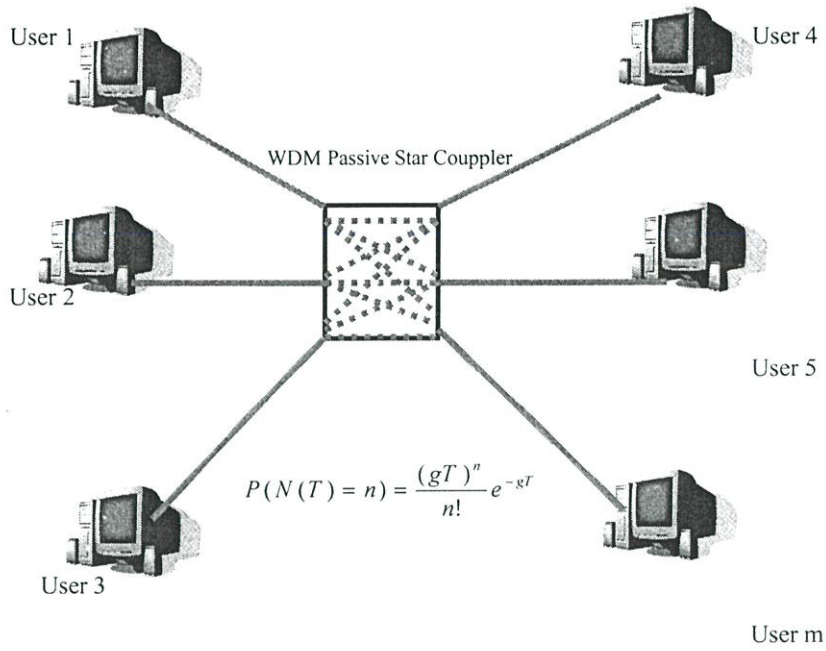
ทวนเข็มนาฬิกาใช้ความถี่ย่าน B band ดังนั้นโครงข่ายนี้จึงสามารถส่งแบบสองทาง (Duplex) ได้ เมื่อเส้นใยแก้วนำแสงถูกตัดหรือขาดแสดงดังรูปที่ 2.15 สวิตช์สำหรับป้องกันการล่มของโครงข่าย จะต่อถึงกันระหว่างวงแหวนทั้งสองวง ทั้งด้านหัวและท้าย (แสดงเป็นเส้นประ) ทำให้โครงข่าย ยังคงสามารถใช้งานได้แม้ว่ามีกิ่งเชื่อมหนึ่งถูกตัดขาด



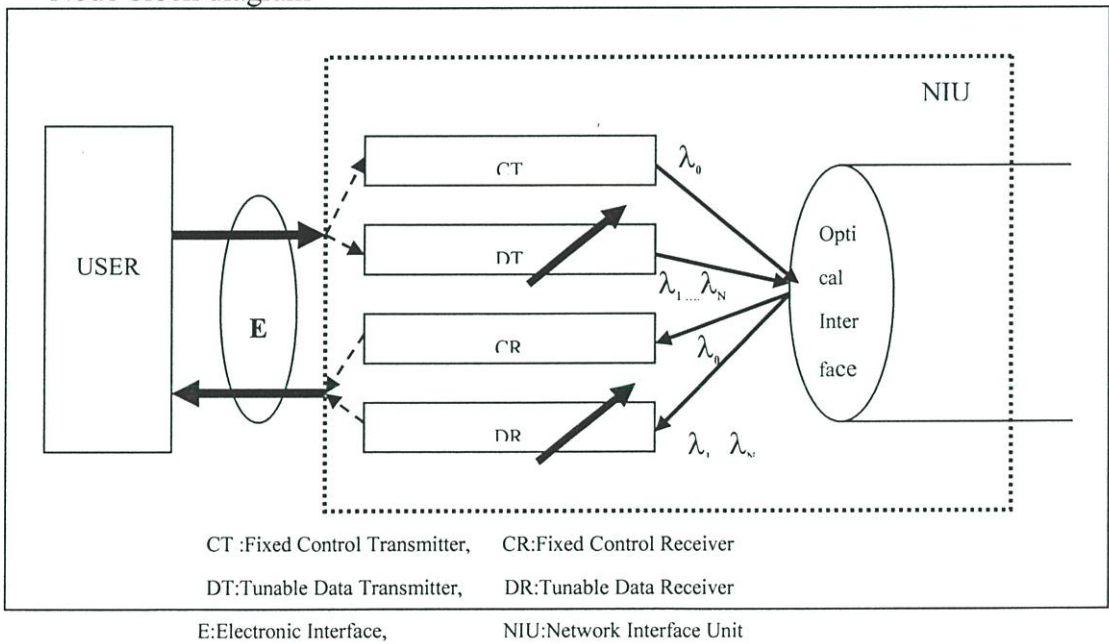
รูปที่ 2.15 แสดงการป้องกันโครงข่ายของ dual-fiber ring

## 2.8 โครงสร้างของเครือข่าย WDM STAR

สำหรับโครงสร้างของเครือข่าย WDM STAR ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 โดยมีสมมติฐานในการวิจัยดังนี้ คือ ในการเลือกช่องสัญญาณเพื่อใช้ในการรับ-ส่งนั้น ทั้งภาครับและภาคส่งของสถานีจะเป็นลักษณะที่สามารถปรับเลือกช่องสัญญาณที่จะทำการรับ-ส่งได้ (Tunable Transceiver) คือ สถานีจะใช้ช่องสัญญาณหรือ ความยาวคลื่นใดๆ ก็ได้ที่ว่างอยู่ในการรับ-ส่งข้อมูล โดยการปรับภาคส่งและภาครับของสถานีไปยังช่องสัญญาณนั้นๆ โดยการเข้าใช้ช่องสัญญาณจะเป็นแบบสุ่ม และการส่งข้อมูลจะส่งทีละแพ็กเก็ต (Packet-by-Packet) ด้วยกรรมวิธีเข้าถึงแบบอะโลฮา ซึ่งรูปแบบของคิวหรือบัฟเฟอร์ของภาคส่งจะเป็นลักษณะแบบเข้าก่อน-ออกก่อน (First-in-First-out)



Node block diagram



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของเครือข่าย WDM STAR

## บทที่ 3

# ทฤษฎีโพรโทคอลแบบอะโลฮา

โพรโทคอลแบบอะโลฮา นั้นดูเหมือนจะเป็นโพรโทคอลกลุ่มที่มีทางเข้าถึงได้มากที่สุด ความนิยมที่โพรโทคอลนี้ได้รับความนิยมนั้น ประการแรกอาจเป็นเพราะความเก่าแก่ที่มีมาก่อนในฐานะที่เป็นเทคนิคการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบสุ่ม ประการที่สองคือความง่ายของการใช้งาน ซึ่งในปัจจุบันนี้ระบบโครงข่ายหลายๆระบบก็ได้นำโพรโทคอลตระกูลนี้มาใช้เพียงแต่อาจมีการปรับรูปแบบให้ซับซ้อนขึ้น

ด้วยการที่เป็นโพรโทคอลที่ไม่มีความซับซ้อนอย่างที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ของ[3] จึงรับรองได้ว่าการส่งผ่านที่มีการกำหนดไว้ก่อนทุกครั้งจะประสบความสำเร็จแน่นอน โพรโทคอลแบบอะโลฮานั้นนับว่าเป็นโพรโทคอลที่จัดอยู่ในประเภทการช่วงชิง(contention type)หรือแบบสุ่ม(random) ซึ่งจะไม่มีการรับรองได้ว่าล่วงหน้าว่าการส่งผ่านจะสำเร็จ เหตุผลก็คือ เมื่อใดก็ตามที่มีผู้ใช้งานมากกว่าสองผู้ใช้ขึ้นไปต้องการส่งผ่านข้อมูลในช่องทางเดียวกันนั้น ย่อมจะเกิดการปะทะกันและทำให้การส่งหรือรับข้อมูลได้ไม่ครบถ้วน เมื่อเป็นเช่นนี้ ทำให้จำเป็นต้องมีการส่งข้อมูลครั้งแล้วครั้งเล่า จนกว่าจะส่งผ่านได้สมบูรณ์ ดังนั้นการที่มีการกำหนดไว้ก่อนว่าจะมีการส่งข้อมูลนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับโพรโทคอลแบบช่วงชิง

เนื่องจากการที่โพรโทคอลอะโลฮาได้รับความนิยมมากนั่นเอง จึงได้มีการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงต่างๆ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นถึงโพรโทคอลรูปแบบต่างๆสำหรับการส่งผ่านข้อมูล รวมทั้งการปรับเปลี่ยนให้เข้ากับสถานการณ์ต่างๆและคุณลักษณะของช่องทางการส่งผ่านข้อมูล ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงบางประการเท่านั้น

### 3.1 โพรโทคอลอะโลฮาแบบดั้งเดิม(Pure ALOHA)

โพรโทคอลอะโลฮาแบบดั้งเดิมนั้นเป็นโพรโทคอลพื้นฐานของโพรโทคอลตระกูลอะโลฮา รูปแบบของโพรโทคอลนี้จะเป็นแบบ Single hop โดยมีประชากรจำนวนไม่สิ้นสุดในการทำหน้าที่สร้างข้อมูลที่มีความยาวของแพ็กเกตเท่ากับ  $T$  ตามขั้นตอนของปัวซองส์(Poisson) โดยมีอัตราข้อมูลจำนวน  $\lambda$  แพ็กเกตต่อวินาที ส่วนช่องทางการส่งข้อมูลนั้นจะไม่มีควมผิดพลาดเลย ซึ่งหมายความว่า เมื่อไรก็ตามที่การส่งผ่านข้อมูลไม่ได้เข้าไปรบกวนการส่งผ่านข้อมูลอื่นที่ทำอยู่ ข้อมูลที่ส่งไปนั้นจะได้รับความถูกต้องทั้งหมด แต่หากมีการส่งข้อมูลในขณะที่ทำการส่งข้อมูลอื่นอยู่ นั้น จะไม่มีข้อมูลใดเลยที่ส่งได้ และต้องทำการส่งใหม่ทั้งหมดอีกครั้ง ผู้ใช้ที่พบว่ามีการส่งข้อมูลชนกันเช่นนั้นจะเรียกว่า Colliding users เมื่อทำการส่งข้อมูลเสร็จลงในแต่ละครั้ง ผู้ใช้จะทราบว่าข้อมูลส่งได้สำเร็จหรือเกิดการปะทะกันระหว่างทาง



สามารถเห็นได้ว่าหากมีการเลือกที่จะส่งข้อมูลอีกครั้งในช่วงต่อ ก็จะทำให้จุดการจัดเวลานั้นใกล้เคียงกับวิธีแบบปัวส์ซองมากขึ้น เราใช้สมมติฐานของปัวส์ซอง เพราะว่ามันช่วยทำให้การวิเคราะห์ระบบแบบอะโลฮา นั้นเป็นไปได้และยังช่วยคาดเดาปริมาณงานได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดอีกด้วย โพรโทคอลอะโลฮาแบบดั้งเดิมนั้นเป็นระบบ Single hop ดังนั้น ปริมาณงานจึงเป็นเศษส่วนของเวลาที่ช่องทางหนึ่งสามารถส่งผ่านข้อมูลที่เป็นประโยชน์ได้ เช่นกลุ่มข้อมูลที่ไม่เกิดการปะทะกัน ความจุสูงสุดของแต่ละช่องสัญญาณรับได้นั้นก็คือจำนวนของอัตราความมาถึงของแพ็กเก็ตข้อมูล  $\lambda$  มาถึง และอัตราของการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลออกก็เท่ากับอัตราของแพ็กเก็ตข้อมูลที่มาถึง (ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อเรื่องเสถียรภาพของระบบ หัวข้อที่ 3.4)

เมื่อพิจารณาจากกลุ่มข้อมูล (ทั้งเก่าและใหม่) ที่กำหนดให้มีการส่งในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งของ  $t$  แล้ว (แสดงในรูปที่ 3.1) กลุ่มข้อมูลกลุ่มนี้จะส่งผ่านได้สำเร็จหากไม่มีกลุ่มอื่นที่ส่งในช่วงรอยต่อของการส่งแต่ละกลุ่ม  $(t-T, t+T)$  (ช่วงเวลาของ  $2T$  นี้เรียกว่า Vulnerable period) ซึ่งหมายความว่าความน่าจะเป็นที่มันเกิดขึ้นได้ทั้งการส่งสำเร็จ คือไม่มีกลุ่มข้อมูลใดเลยที่ส่งในช่วงรอยต่อของ  $2T$  และเนื่องจากการจัดเวลานั้นเป็นแบบปัวส์ซอง เราจึงได้

$$P_{suc} = e^{-2gT}$$

ตอนนี้กลุ่มข้อมูลได้ถูกจัดให้อยู่ในอัตราของ  $g$  ต่อวินาที ซึ่งจะมีแต่ส่วนของ  $P_{suc}$  เท่านั้นที่ส่งสำเร็จ ดังนั้น อัตราของกลุ่มข้อมูลที่ส่งผ่านสำเร็จก็จะเป็น  $g \cdot P_{suc}$  เมื่อมีการส่งข้อมูลสำเร็จก็คือช่องทางสามารถส่งผ่านข้อมูลที่เป็นประโยชน์ได้ในช่วง  $T$  วินาที แต่ถ้าไม่ได้ตามนี้ ก็เท่ากับว่าช่องทางไม่ได้ส่งข้อมูลที่เป็นประโยชน์เลย หากเราใช้ความหมายที่ว่าค่าวิสัยสามารถคือส่วนของเวลาที่ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ถูกส่งผ่านไปตามช่องทาง เราจะได้

$$S = gT e^{-2gT}$$

ซึ่งทำให้ค่าวิสัยสามารถของช่องทางนั้นเป็นหน้าที่หนึ่งของข้อมูลที่ต้องการให้มีการส่ง เมื่อกำหนดให้  $G \cong gT$  เป็นค่าออร์มอลโลยีของการรองรับโหลดที่ต้องการให้มีการส่งในช่องสัญญาณใดๆ ซึ่งหมายถึง อัตรา (ต่อเวลาของการส่งกลุ่มข้อมูล) ที่กลุ่มข้อมูลได้รับการส่งในหนึ่งช่องสัญญาณ เราจะได้

$$S = Ge^{-2G}$$

ความสัมพันธ์ของ  $S$  และ  $G$  นั้นได้แสดงให้เห็นแล้วในรูปที่ 3.2 ซึ่งถือเป็นโพรโตคอลอะโหลาแบบดั้งเดิม ที่ค่า  $G=1/2$  นั้น  $S$  จะมีค่ามากที่สุดที่  $1/(2e) \approx 0.18$  คำนี้นับเป็นค่าความสามารถที่โพรโตคอลแบบอะโหลาแบบดั้งเดิมทำได้

เรายังจำได้ว่าถ้าต้องการให้ระบบมีเสถียรภาพนั้น จำนวนข้อมูลป้อนเข้าต้องมีอัตราเท่ากับข้อมูลที่ได้ออกมา หมายความว่า เสถียรภาพจำเป็นต้องมี  $S = \lambda T$  ถ้า  $\lambda$  มีจำนวนมากมาก ก็จะทำให้เกิดความไม่มีเสถียรภาพได้ อย่างไรก็ตาม แม้ว่า  $\lambda$  จะมีค่าน้อย แต่ยังมีค่าของ  $G$  อีก 2 ค่าที่สัมพันธ์กัน คือค่าที่มากกว่าหรือน้อยกว่า  $1/2$  ซึ่งค่าที่น้อยกว่าจะมีเสถียรภาพ ในขณะที่ค่าที่มากกว่าหนึ่งจะไม่มีเสถียรภาพ หมายความว่าหากปริมาณกลุ่มข้อมูลมากกว่าที่กำหนด ระบบจะทำงานหนักกว่าเดิมแต่ได้งานน้อยกว่าเดิม ดังนั้นหากไม่มีมาตรการในการควบคุมแล้ว ผลที่ได้จากโพรโตคอลอะโหลาแบบดั้งเดิมจะเป็นศูนย์

### 3.2 โพรโตคอลแบบสล้อตอะโหลา

โพรโตคอลแบบสล้อตอะโหลาแบบนี้ก็คือโพรโตคอลอะโหลาแบบดั้งเดิมนั่นเองเพียงแต่มีการแบ่งช่วงเวลาออกเป็นช่องๆ ขนาดของช่วงเวลาที่จะเท่ากับ  $T$  ซึ่งก็คือช่วงเวลาของการส่งข้อมูล ผู้ใช้จำเป็นต้องเริ่มการส่งกลุ่มข้อมูลที่ช่วงเวลานี้เท่านั้น ดังนั้น ช่วงที่เรียกว่า Vulnerable Period ก็จะลดเหลือเพียงหนึ่งช่วงเวลาเท่านั้น หรืออีกนัยหนึ่งก็คือการส่งผ่านช่วงเวลาจะสำเร็จได้ก็ต่อเมื่อมีการกำหนดส่งข้อมูลในช่วงของช่วงเวลาอันก่อนหน้า ค่าวิสัยสามารถของระบบที่ได้ก็จะเป็นส่วนของช่วงเวลา(หรือความน่าจะเป็น) ที่มีข้อมูลกลุ่มเดียวที่กำหนดให้มีการส่ง และเนื่องจากขั้นตอนที่ประกอบด้วยกลุ่มข้อมูลที่ส่งรวมทั้งกลุ่มที่ส่งใหม่นั้นเป็นแบบปิวส์ของ เราจึงสรุปได้ว่า

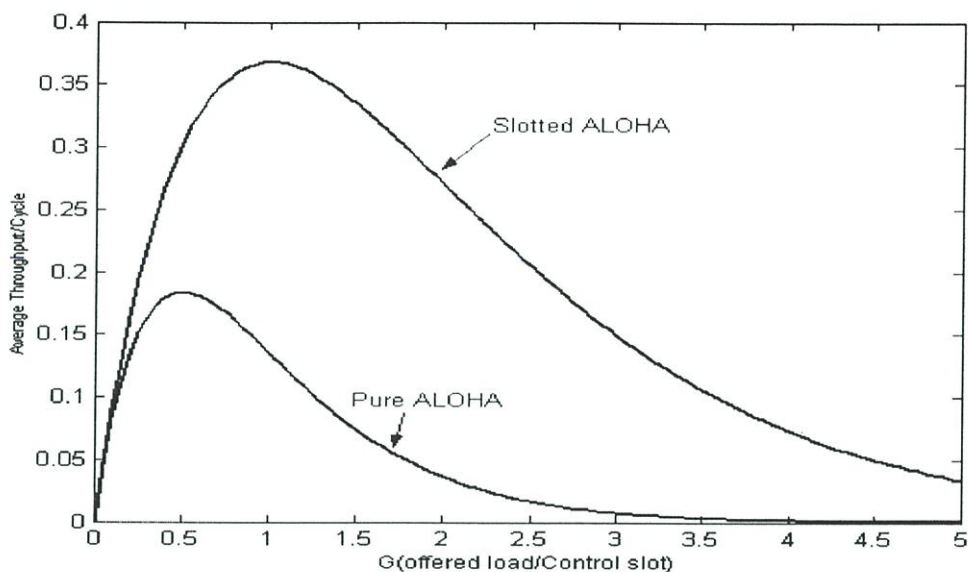
$$S = gTe^{-gT}$$

หรือใช้คำนิยามของการนอร์มอลไลต์ของปริมาณการรองรับโหลดได้ โดยกำหนดให้  $G=gT$

$$S = Ge^{-G}$$

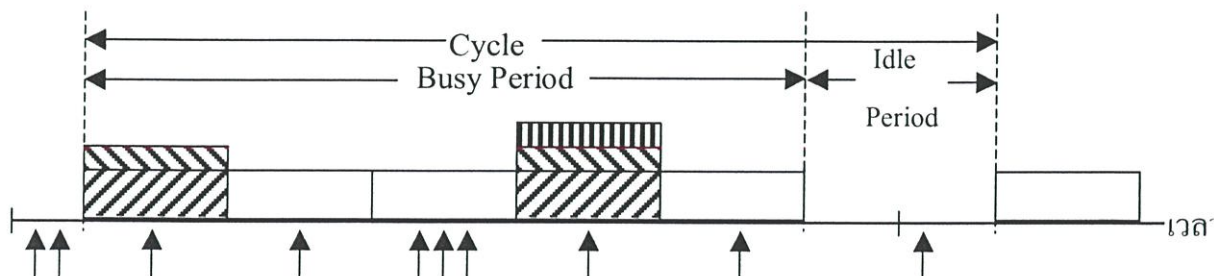
ความสัมพันธ์นี้ใกล้เคียงกับอะโหลาแบบดั้งเดิมมาก ยกเว้นค่าวิสัยสามารถของระบบจะเพิ่มมากขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 3.2) ความสามารถในการรองรับของช่องสัญญาณ คือ  $1/e \approx 0.36$  และทำได้ที่  $G=1$

เราใคร่ขอนำเสนอวิธีการคำนวณค่าวิสัยสามารถแบบใหม่นี้ซึ่งเป็นประโยชน์มากในภายหลัง และวิธีนี้ยังสามารถนำมาแสดงการใช้กับกรณีสล้อตอะโหลาได้ง่ายอีกด้วย เมื่อสังเกตช่วงเวลาใน



รูปที่ 3.2 แสดงค่าวิสัยสามารถของโพรโตคอลแบบ Pure ALOHA และ Slotted ALOHA

ระยะเวลาหนึ่ง เราสังเกตเห็นว่า รูปแบบวงจรการทำงานมีทั้งช่วงเวลาที่ว่างและที่มีแพ็กเก็ตข้อมูลเข้ามาเต็ม (ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จุดลูกศรชี้ขึ้นแทนแพ็กเก็ตข้อมูลที่เข้ามาถึง, สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ว่างอยู่นั้นหมายถึงช่องเวลาที่ส่งแพ็กเก็ตข้อมูลสำเร็จ ส่วนสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่แรเงานั้นหมายถึงกลุ่มข้อมูลที่เกิดการปะทะกัน ซึ่งก็คือช่องเวลาที่ส่งแพ็กเก็ตข้อมูลไม่สำเร็จนั่นเอง) ช่วงเวลา busy period คือช่วงเวลาที่ตัดสินใจของช่องสัญญาณว่าจะให้ใครส่งข้อมูลในช่วงเวลานั้นๆ (ไม่ว่าจะสำเร็จหรือไม่ก็ตาม) ส่วนช่วงเวลา Idle period ก็คือช่วงต่อระหว่างที่การส่งแพ็กเก็ตข้อมูลแรกเสร็จลงและการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลใหม่กำลังจะเข้ามา โดยเวลาที่เริ่มต้นใหม่ของทุกๆ ไซเคิล (ก่อนจะเริ่มต้นช่วงเวลาที่มีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล) นั้นหมายถึงจุดเริ่มต้นใหม่ (renewal point) อันที่จริงแล้ว จุดนี้เป็นจุดของการเริ่มกระบวนการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลใหม่ เพราะระบบจะไม่จำว่าก่อนหน้านี้เคยทำอะไรไว้บ้างเมื่อเป็นเช่นนี้แล้ว ส่วนของเวลาที่ระบบใช้ก็จะมีค่าเท่ากับส่วนของเวลาที่ระบบเคยทำไว้แล้ว



รูปที่ 3.3 แสดงระยะเวลาของการส่งผ่านข้อมูลของโพรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮา

กำหนดให้  $\tilde{T}$  เป็นตัวแปรแบบสุ่ม ซึ่งหมายถึงจำนวนของช่องเวลาที่อยู่ในช่วงเวลาที่ว่าง ตัวแปร  $\tilde{T}$  ต้องมีค่าเป็นบวกเท่านั้นเนื่องจากอย่างน้อยเราจะต้องมีหนึ่งช่องเวลาที่จะต้องว่าง ความน่าจะเป็นที่จะมีช่องเวลาที่ว่างจะประกอบไปด้วย ช่องเวลาเพียงช่องเดียวที่จะมีความน่าจะเป็นที่ว่าจะจะมีกลุ่มข้อมูลบางกลุ่มที่กำหนดให้อยู่ในช่วงของช่องเวลานั้นและจะต้องถูกส่งในช่องเวลาถัดไป ดังนั้น

$$\begin{aligned} P[\tilde{T} = 1] &= P[\text{กลุ่มข้อมูลบางกลุ่มที่กำหนดให้ส่งใน slot แรก}] \\ &= 1 - P[\text{ไม่มีกลุ่มข้อมูลถูกกำหนดให้ส่งในช่องเวลาแรก}] = 1 - e^{-gT} \end{aligned}$$

ความน่าจะเป็นที่ช่องเวลาที่ว่าง จะมี 2 ช่องเวลา ก็คือความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่ไม่มีกลุ่มข้อมูลที่ต้องส่งใน ช่องเวลาแรก แต่มีคนกำหนดจะส่งในช่องเวลา ที่สอง (โดยใช้ช่องเวลาอันที่สาม) ดังนั้น

$$P[\tilde{T} = 2] = e^{-gT} \cdot (1 - e^{-gT})$$

โดยทั่วไปแล้ว ความยาวของช่องเวลาที่ว่างนั้นจะสามารถกระจายตามหลักเรขาคณิตได้ อย่างเช่น

$$P[\tilde{T} = k] = (e^{-gT})^{k-1} \cdot (1 - e^{-gT}) \quad k = 1, 2 \dots$$

ทำให้เกิดผลความยาวเฉลี่ย (วัดในช่องเวลา) ได้

$$I = \frac{1}{1 - e^{-gT}}$$

ในลักษณะเช่นเดียวกัน ถ้าเรากำหนดให้  $\tilde{B}$  เป็นจำนวนของช่องเวลาที่กำลังส่งข้อมูล เราจะเห็นได้ชัดว่า  $\tilde{B}$  มากกว่าศูนย์ เหตุผลในลักษณะที่คล้ายๆกันจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณการกระจายของช่องเวลาที่ว่างนำไปสู่การแบ่งของ  $\tilde{B}$  สำหรับช่วงที่มีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลนั้นจะมีความยาวของช่องเวลาที่  $k > 0$  กลุ่มข้อมูลควรจะต้องถูกกำหนดเวลาในการส่งอยู่ที่ทุกๆช่องเวลาแรกของ  $K-1$  และไม่ควรจะมีกลุ่มใดที่ต้องส่งช่วง  $k^{\text{th}}$  เลย ซึ่งจะนำไปสู่

$$P[\tilde{B} = k] = (1 - e^{-gT})^{k-1} \cdot (e^{-gT}) \quad k = 1, 2 \dots$$

ทำให้ได้ผลที่มีค่าดังนี้

$$B = \frac{1}{e^{-gT}}$$

เนื่องจากช่วงเวลาทุกๆ ช่วงในช่วงที่กำลังส่งแพ็กเก็ตข้อมูลนั้นไม่มีการส่งได้สำเร็จเลย กำหนดให้  $\tilde{U}$  หมายถึงจำนวนของช่วงเวลาที่เกิดประโยชน์หรือช่วงเวลาที่จะส่งแพ็กเก็ตข้อมูลได้สำเร็จในไซเคิล และ  $U$  เป็นค่าที่คาดหวัง ความน่าจะเป็นที่ช่วงเวลาที่กำลังมีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลส่งได้สำเร็จนั้น ก็คือ

$$\frac{gTe^{-gT}}{1 - e^{-gT}}$$

ซึ่งก็คือความน่าจะเป็นของการมาถึงเพียงครั้งเดียวของช่วงเวลาที่กำลังส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (หมายความว่า อาจมีการมาถึงหลายอันก็ได้) ดังนั้น ถ้ากำหนดให้ช่วงเวลาที่กำลังมีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเป็น  $\tilde{B}$  เราจะได้

$$P[\tilde{U} = k | \tilde{B}] = \binom{\tilde{B}}{k} \left( \frac{gTe^{-gT}}{1 - e^{-gT}} \right)^k \left( 1 - \frac{gTe^{-gT}}{1 - e^{-gT}} \right)^{\tilde{B}-k} \quad 0 \leq k \leq \tilde{B}$$

และดังนั้น

$$E[\tilde{U} | \tilde{B}] = \tilde{B} \left( \frac{gTe^{-gT}}{1 - e^{-gT}} \right)$$

ซึ่งจากนั้นเราจะได้

$$U = E[\tilde{U}] = E[E[\tilde{U} | \tilde{B}]] = B \left( \frac{gTe^{-gT}}{1 - e^{-gT}} \right)$$

ในที่นี้ค่าวิสัยสามารถของระบบที่ได้ก็คือส่วนของช่วงเวลาที่เราคาดไว้ในไซเคิลที่มีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลผ่านสำเร็จ ได้ ถ้า  $\tilde{C}$  หมายถึงจำนวนของช่วงเวลาในไซเคิล ก็จะได้

$$S = \frac{E[\tilde{U}]}{E[\tilde{U}]} = \frac{U}{B+1} = \frac{B gTe^{-gT}}{1-e^{-gT}} = \frac{1}{e^{-gT}} * \frac{gTe^{-gT}}{1-e^{-gT}} = gTe^{-gT}$$

ซึ่งเป็นผลที่ได้รับมาก่อนหน้านี้ เทคนิคเช่นข้างต้นนี้เป็นวิธีการที่ใช้ในกระบวนการสร้างแพ็กเกตข้อมูลซึ่งเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการวิเคราะห์ค่าวิสัยสามารถของโพรโตคอลที่ซับซ้อนกว่าเดิม

### 3.3 โพรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮา แบบมี จำนวนผู้ใช้ที่แน่นอน

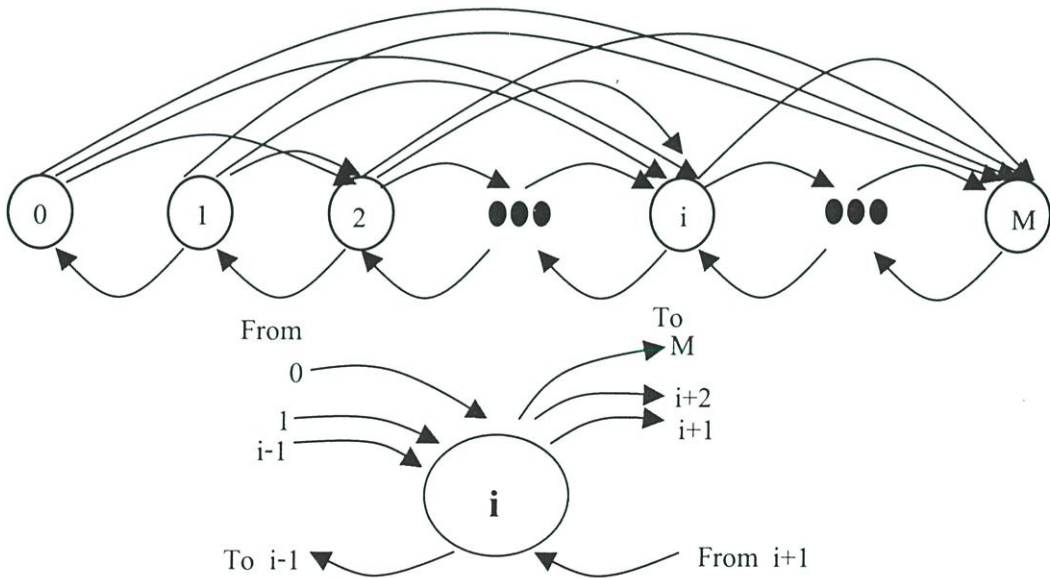
เพื่อเป็นการทำให้รูปแบบดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นเป็นจริงได้นั้น เราจึงทำการวิเคราะห์กรณีของระบบอะโลฮา โดยจำกัดจำนวนผู้ใช้ที่แน่นอน การวิเคราะห์รูปแบบนี้ทำให้เราสามารถทราบถึงความล่าช้าของการส่งกลุ่มข้อมูล ซึ่งถ้าใช้วิธีการดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นเราจะทำไม่ได้ การวิเคราะห์ต่อไปนี้อยู่บนพื้นฐานของหลักการของ Kleinrock และ Lam [KIL75] เราพิจารณากรณีที่สล็อตอะโลฮาถูกนำมาใช้โดยกลุ่มผู้ใช้  $M$  โดยทำการรองรับ ข้อมูลที่ละกลุ่ม (กรณีนี้ทำให้การเปรียบเทียบกับจำนวนประชากรที่ไม่จำกัดมีความหมายมากขึ้นเนื่องจากผู้ใช้ทุกคนมีการรองรับแพ็กเกตข้อมูลเพียงอันเดียวเท่านั้น) กลุ่มข้อมูลทุกกลุ่มนั้นมีขนาดเท่ากันหมด ซึ่งจะใช้เวลาในการส่ง  $T$  วินาที ในการส่ง ซึ่งเป็นจำนวนเวลาเดียวกับช่องเวลา

เพื่อให้ได้เห็นภาพความสัมพันธ์ระหว่างการส่งข้อมูลของกลุ่มข้อมูลใหม่และการส่งซ้ำอีกครั้งนั้น เราได้สร้างรูปแบบการกำหนดเวลาส่งข้อมูลเอาไว้ (จะเรียกว่า Linear feedback Model) สมมติว่าผู้ใช้ทุกคนเป็นหนึ่งในสองขั้น คือขั้นของการคิด และขั้นของงานค้าง ในขั้นของการคิดนั้น ผู้ใช้ไม่มีแพ็กเกตข้อมูลในบัฟเฟอร์และไม่ได้มีส่วนร่วมในการกำหนดเวลาการส่งเลย เมื่ออยู่ในขั้นนี้นั้น ผู้ใช้จะสร้างกลุ่มข้อมูลได้ในช่องเวลาทุกๆช่อง โดยมีความเป็นไปได้อยู่ที่  $\sigma$  และไม่ได้สร้างกลุ่มข้อมูลในช่องเวลา โดยมีความเป็นไปได้อยู่ที่  $1-\sigma$  การสร้างกลุ่มข้อมูลนั้นขึ้นอยู่กับกิจกรรมอื่นๆ ที่กล่าวไปข้างต้นนั้นหมายความว่า การสร้างกลุ่มข้อมูลเป็นขั้นตอนที่ต้องขึ้นอยู่กับสิ่งอื่นและแบ่งได้เท่าๆกัน คือ  $1/\sigma$  เมื่อทำการสร้างข้อมูลเสร็จแล้วก็ต้องทำการพยายามส่งทันที ซึ่งหมายความว่า ต้องส่งในช่องเวลาอันถัดไป ถ้าส่งผ่าน ถือว่าผู้ใช้ยังอยู่ในขั้นของการคิด และเริ่มสร้างข้อมูลกลุ่มใหม่ ถ้าส่งไม่ผ่าน ถือว่าผู้ใช้ยังอยู่ในขั้นของงานค้างและต้องจัดเวลาส่งใหม่ตามแต่เวลา  $v$  จะอำนวย อีกนัยหนึ่งก็คือ ในทุกๆช่องเวลานั้น ผู้ใช้จะส่งข้อมูลอีกครั้งโดยขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็น  $v$  และจะทำได้ถ้าความน่าจะเป็นอยู่ที่  $1-v$  เมื่ออยู่ในขั้นของงานค้างนั้น ผู้ใช้ไม่ต้องสร้างข้อมูลกลุ่มใหม่ แล้วถ้าส่งผ่านได้ในที่สุด ผู้ใช้ก็จะได้เลื่อนมาอยู่ในขั้นของการคิด

กำหนดให้ช่องเวลาของระบบมีการเรียงตัวเลขตามลำดับ  $k=0, 1, \dots$  และกำหนดให้  $\tilde{N}(k)$  หมายถึงจำนวนผู้ใช้ที่มีงานค้างตั้งแต่เริ่มต้นช่องเวลาที่  $k^{\text{th}}$  ตัวแปรแบบสุ่มเลือก  $\tilde{N}(k)$  จะได้รับการอ้างถึงว่าเป็น ชั้น ของระบบ จำนวนผู้ใช้ที่อยู่ในชั้นงานค้างตั้งแต่ต้นของช่องเวลาที่  $k+1^{\text{st}}$  นั้นจะขึ้น

อยู่กับจำนวนผู้ใช้ที่มีงานค้างตั้งแต่เริ่มต้นของช่วงเวลา  $k^{\text{th}}$  และจำนวนของผู้ใช้ที่ย้ายจากชั้นหนึ่งไปยังอีกชั้นหนึ่งในช่วงเวลานี้ เนื่องจากชั้นของการส่งข้อมูลของผู้ใช้นั้นขึ้นอยู่กับกิจกรรมของช่วงเวลาอันก่อนหน้า  $\{\tilde{N}(k), (k = 1, 2, \dots)\}$  ซึ่งจะเป็นลักษณะลูกโซ่ของ Markov เนื่องจากจำนวนผู้ใช้ที่มีงานค้างจะไม่สามารถมีมากกว่า  $M$  ดังนั้นลูกโซ่นี้จึงมีจำนวนแน่นอน ดังนั้น ถ้าทุกๆชั้นตอนทำการสื่อสาร (อย่างที่แสดงให้เห็น) ลูกโซ่ของ Markov นี้ก็จะไม่ขึ้นอยู่กับเวลา หมายความว่า การกระจายข้อมูลที่คงที่นั้นจะยังมีอยู่ต่อไป

แผนภูมิการส่งข้อมูลของระบบนี้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 การเปลี่ยนตำแหน่ง “Upward” นั้นสามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างทุกๆชั้น และชั้นทุกชั้นที่มีจำนวนผู้ใช้เป็นจำนวนมาก เนื่องจากการชนกันของกลุ่มข้อมูลนั้นมีความเป็นไปได้สูง ส่วนการส่งข้อมูลแบบ “Downward” นั้นจะเป็นไปได้ในชั้นที่ต่อเนื่องกันเท่านั้น เนื่องจากจะมีการส่งข้อมูลได้สำเร็จครั้งละกลุ่มเท่านั้นในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งในช่วงนั้นการที่จะมีงานค้างก็มีความเป็นไปได้น้อยลง อีกอย่างคือการส่งที่หายไปจากชั้น 0 ไปชั้น 1 นั้นจะไม่มีทางเกิดขึ้นได้เนื่องจากผู้ใช้ทุกคนจะอยู่ในชั้นของการคิด และจะมีผู้ใช้เพียงคนเดียวที่สร้างข้อมูลและส่ง ซึ่งก็จะมีทางเกิดการปะทะกันและกลายมาเป็นชั้นของงานค้างได้เลย ข้อเท็จจริงที่ว่าชั้นต่างๆย่อมมีการสื่อสารกันนั้น เราเห็นได้ชัดเจนจากแผนภูมินี้



รูปที่ 3.4 แสดงการเปลี่ยนสถานะของอะโลฮาแบบมัลติผู้ใช้ที่แน่นอน

ความน่าจะเป็นของชั้นที่คงที่ (Steady-State Probabilities)

สำหรับวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ เราขอแนะนำสัญลักษณ์ดังต่อไปนี้ กำหนดให้  $\pi_i$  เป็นค่าความน่าจะเป็นของชั้นที่คงที่ในระบบในช่วงของ  $i$  ซึ่งหมายความว่า

$\pi_i = \lim_{k \rightarrow \infty} \text{Prob}[\tilde{N}(k) = i]$  นอกจากนี้ กำหนดให้  $p_{ij}$  เป็นค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลที่อยู่ในขั้นคงที่ หมายความว่า  $p_{ij} = \lim_{k \rightarrow \infty} \text{Prob}[\tilde{N}(k) = j | \tilde{N}(k-1) = i]$  สุดท้ายแทนค่าโดยเมทริกซ์  $P$  ซึ่งมีองค์ประกอบเป็น  $p_{ij}$  และโดย  $\bar{\pi}$  เป็นเวกเตอร์แถวซึ่งจะมีอีลิเมนต์เป็น  $\pi_i$  จากหลักการและเหตุผลข้างต้นนั้นมันก็จะนำไปยังการหาค่าเวกเตอร์ความน่าจะเป็นของขั้นคงที่นั้นสามารถหาได้โดยการใช้สมการลิเนียร์ ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{\pi} &= \bar{\pi}P \\ \sum_i \bar{\pi}_i &= 1 \end{aligned}$$

โดยข้อสรุปที่มีอยู่นั้นค่อนข้างรับประกันได้ ดังนั้นเราจึงต้องสร้างเมทริกซ์  $P$  และหาข้อสรุปที่ต้องการ

จากขั้นตอนการส่งแพ็คเกจข้อมูลใหม่ของผู้ใช้ทุกๆ ผู้ใช้นั้นเป็นขั้นตอนทางเรขาคณิตที่ไม่ขึ้นต่อกัน ค่าความน่าจะเป็นที่จำนวนผู้ใช้  $i$  จากจำนวนผู้ใช้ที่มีงานค้าง  $j$  นั้นจึงกำหนดให้มีการส่งในช่องเวลา ซึ่งสามารถกระจายเป็นแบบสมการไบโนเมียลได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Prob}[i \text{ backlogged users in a slot} \mid j \text{ in backlog}] = \binom{j}{i} v^i (1-v)^{j-i} \quad (3.1)$$

ในวิธีการเช่นเดียวกัน เราสามารถคำนวณผู้ใช้ที่อยู่ในขั้นของการคิดได้ดังนี้

$$\text{Prob}[i \text{ thinking users transmit in a slot} \mid j \text{ in backlog}] = \binom{M-j}{i} \sigma^i (1-\sigma)^{M-j-i} \quad (3.2)$$

เนื่องจากเมื่อผู้ใช้จำนวน  $j$  มีแพ็คเกจข้อมูลค้างส่งนั้น ผู้ใช้จำนวน  $M-j$  จะอยู่ในขั้นของการคิด เราสามารถสร้างเมทริกซ์  $P$  โดยการประยุกต์ใช้สมการ (3.1) และ (3.2) ดังต่อไปนี้ เห็นได้ชัดว่าการส่งผ่านจากขั้น  $i$  ไปขั้น  $j < i-1$  นั้นเป็นไปได้ แสดงให้เห็นว่า  $p_{ij} = 0$  ในกรณีนี้ ถ้าพิจารณาการส่งผ่านจากขั้น  $i$  ไปขั้น  $i-1$  นั้น แสดงให้เห็นว่าการลดจำนวนของแพ็คเกจข้อมูลค้างส่งจะเป็นไปได้ถ้ามีการส่งแพ็คเกจข้อมูลค้างส่งครั้งละแพ็คเกจเท่านั้น (และต้องไม่มีการสร้างข้อมูลกลุ่มใหม่ด้วย)

การเปลี่ยนขั้นจากขั้น  $i$  ไปยังขั้นเดียวกันนั้นอาจเกิดขึ้นจากสองสาเหตุด้วยกัน สาเหตุแรกนั้นเป็นผลมาจากสถานการณ์ที่ไม่มีการสร้างข้อมูลกลุ่มใหม่เลย (และถูกส่งด้วย) ในขณะที่ผู้ใช้ที่มีแพ็คเกจข้อมูลค้างอยู่ก็จะพยายามส่งแพ็คเกจข้อมูล ผู้ใช้ที่ส่งแพ็คเกจข้อมูลอยู่ก็อาจจะเกิดการชนกันกับแพ็คเกจที่ค้างอยู่ที่เหลือเพราะว่าไม่มีการสร้างข้อมูลกลุ่มใหม่ แพ็คเกจข้อมูลที่ค้างก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลง กรณีพิเศษอย่างหลังนี้จะเกิดขึ้นเมื่อช่องเวลาไม่มีแพ็คเกจเข้ามา ไม่ว่าจะเป็นการส่งข้อ

มูลใหม่หรือพยายามส่งซ้ำก็ตาม ส่วนสาเหตุที่สองนั้นเป็นผลจากเหตุการณ์ที่ไม่มีผู้ใช้ที่มีแพ็กเกต ข้อมูลค้างอยู่พยายามที่จะส่งใหม่เลย และมีผู้ใช้ชั้นของการคิด ส่งแพ็กเกตข้อมูลเพียงผู้ใช้เดียวเท่านั้น ในกรณีนี้ ผู้ใช้ในชั้นความคิดนั้นจะประสบความสำเร็จ และก็จะยังคงอยู่ในชั้นของความคิดต่อไปและระบบก็จะยังอยู่ในสถานะเดิม จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้เราสามารถสรุปได้ด้วยเหตุการณ์ที่ไม่เกี่ยวข้องกันสองเรื่อง ก็คือ “ไม่มีผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างคนใดส่งแพ็กเกตได้สำเร็จ และไม่มีผู้ใช้ในชั้นของการคิดคนใดส่งแพ็กเกตได้สำเร็จ” และ “ไม่มีผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งพยายามส่งแพ็กเกตข้อมูลและมีผู้ใช้ในชั้นของการคิดส่งแพ็กเกตข้อมูลเพียงคนเดียวที่พยายามส่งแพ็กเกตข้อมูล”

การเปลี่ยนชั้นในสถานะต่อไปที่ต้องพิจารณาก็คือ จากชั้น  $i$  ไปยังชั้น  $i+1$  เนื่องจากแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งมีการสะสมมากขึ้น การชนกันของแพ็กเกตข้อมูลย่อมเกิดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ เนื่องจากแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งมีการเพิ่มขึ้นนั้นต้องมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน ดังนั้นจะต้องมีผู้ใช้ในชั้นของการคิดเพียงคนเดียวที่พยายามพร้อมกันกับผู้ใช้ในชั้นของแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งอีกอย่างน้อยหนึ่งคนที่พยายามอยู่เหมือนกัน

กรณีสุดท้ายของการเปลี่ยนชั้นคือการส่งจากชั้น  $i$  ไปชั้น  $j > i+1$  การส่งเช่นนี้จะมีแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งเพิ่มขึ้นอีกสองแพ็กเกตหรือมากกว่า หมายความว่า ผู้ใช้ในชั้นของการคิดนั้นสร้างกลุ่มข้อมูล และแน่นอนว่าเกิดการชนกันของแพ็กเกตข้อมูลเกิดขึ้น กิจกรรมที่ผู้ใช้ในชั้นของแพ็กเกตข้อมูลค้างส่ง ทำการส่งในช่วงนี้จะไม่มีความสำคัญมากในกรณีนี้เนื่องจากการชนของแพ็กเกตข้อมูลกันเกิดขึ้นโดยผู้ใช้ในชั้นของการคิดเท่านั้น

ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถสรุปได้ด้วยสูตรดังต่อไปนี้ (สูตรที่อยู่ในวงเล็บนั้นได้อธิบายไปแล้วข้างต้นทั้งหมด):

$$P_{ij} = \begin{cases} 0 & j < i-1 \\ [iv(1-v)^{i-1}](1-\sigma)^{M-i} & j = i-1 \\ [1-iv(1-v)^{i-1}](1-\sigma)^{M-i} + [(M-i)\sigma(1-\sigma)^{M-i-1}](1-v)^i & j = i \\ [(M-i)\sigma(1-\sigma)^{M-i-1}][1-(1-v)^i] & j = i+1 \\ \binom{M-i}{j-i} \sigma^{j-i} (1-\sigma)^{M-j} & j > i+1 \end{cases} \quad (3.3)$$

เราสามารถตรวจสอบได้ง่ายๆว่า  $\sum_j p_{ij} = 1$  ตามที่ต้องการ นอกจากนั้น สังเกตว่า  $p_{0i}$  นั้นกลายเป็นค่า 0 เหมือนกันหมด ผลที่ได้นี้ถูกต้องและเป็นไปตามที่คาดไว้เนื่องจากจำเป็นต้องมีข้อมูลที่ชนกันอย่างน้อยสองแพ็กเกตข้อมูลขึ้นไปจึงจะเพิ่มจำนวนแพ็กเกตข้อมูลค้าง และเนื่องจากไม่มีผู้ใช้คนใดเคยอยู่ในชั้นส่งแพ็กเกตค้างมาก่อน จึงเป็นไปได้ที่จะมีผู้ใช้เพียงคนเดียวที่จะอยู่ในชั้นแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งในช่วงเวลาสุดท้าย

การแก้สมการ  $\bar{\pi} = \bar{\pi}P$  สำหรับเมตริกซ์ข้างต้นนั้นทำไม่ได้ในรูปแบบปิด(Closed form) อย่างไรก็ตาม โครงสร้างแบบพิเศษของเมตริกซ์  $P$  นั้นจะไม่มีอีลิเมนต์มีค่าเป็นศูนย์ทางด้านบนขวามือของสามเหลี่ยมและที่เส้นทแยงมุมเส้นแรกนั้น จะทำให้การคำนวณง่ายขึ้น

เมื่อพิจารณากลุ่มที่เหมือนกันของสมการ  $x(I - P) = 0$  ซึ่ง  $I$  เป็น Identity matrix แล้ว ก็ จะเหมือนกับกลุ่มสมการที่เขียนใหม่โดยใช้  $x$  มาแทนค่า  $\bar{\pi}$  นั้นเอง สามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ตำแหน่งของ  $I-P$  ก็คือ  $M^{-1}$  ซึ่งหมายความว่า เมื่ออยู่ท่ามกลางค่าอื่นๆแล้ว ก็จะมีการแก้สมการให้เห็นและสอดคล้องกัน ในการหาวิธีแก้สมการนั้น สมมติว่า  $x_0 = 1$  สมการตัวแรก เช่น  $x_0(1 - p_{00}) - x_1 p_{10} = 0$  จะได้  $x_1 = (1 - p_{00}) / p_{10}$  จากสมการที่สองเราจะจะได้  $x_0 p_{01} + x_1(1 - p_{11}) - x_2 p_{21} = 0$  ซึ่ง  $x_2$  ที่สามารถนำมาคำนวณได้ ถ้าทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ทุกๆ ขั้นตอนจะมีการคำนวณที่ไม่ได้ซับซ้อนอะไรและจะใช้ผลที่ได้จากการคำนวณมาใช้ในการตรวจสอบค่าของ  $x_i$  ที่เพิ่มเข้ามา เมื่อทำการคูณค่า  $M$  และคำนวณค่าของ  $x_i$  ทั้งหมดแล้ว ก็จะสามารถคำนวณ

$$\pi_i = \frac{x_i}{\sum_j x_j}$$

ดังนั้นค่าของ  $\bar{\pi}$  ที่คำนวณออกมาได้ก็จะสอดคล้องกับ  $x$  และดังนั้นก็จะแก้สมการอันแรกได้ ค่าของ  $\bar{\pi}$  นั้นคิดผลรวมได้เป็น 1 และนับว่าเป็นการแก้สมการที่เราต้องการ

### การวิเคราะห์ค่าวิสัยสามารถ(Throughput Analysis)

ในการประเมินค่าวิสัยสามารถของระบบนั้น จะต้องพิจารณาช่วงเวลาของการเริ่มต้นของช่วงเวลา แต่ละช่อง เนื่องจากกิจกรรมในแต่ละช่องเวลานั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับกิจกรรมของช่องเวลาก่อนหน้านี้ ช่วงเวลานี้จึงเป็นจุดของการเริ่มใหม่ ดังนั้น ช่วงเวลาที่แต่ละช่องเวลามีแพ็กเกตข้อมูลอยู่นั้นก็จะเท่ากับช่วงที่ช่องเวลาทำการส่งแพ็กเกตข้อมูลนั่นเอง ถ้าเรากำหนดให้  $P_{suc}$  คือค่าความน่าจะเป็นที่ช่องเวลาจะส่งแพ็กเกตข้อมูลได้สำเร็จก็จะเป็น

$$S = P_{suc}$$

ถ้าต้องการให้ช่องเวลาประสบความสำเร็จในการส่งแพ็กเกตข้อมูลนั้นก็ต้องส่งข้อมูลกลุ่มเดียวในคราวเดียว หมายความว่าต้องมีผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างอยู่พยายามทำการส่งแพ็กเกตข้อมูลและให้ผู้ใช้คนใหม่ส่งข้อมูล หรือไม่ก็ผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างอยู่ส่งข้อมูลเพียงคนเดียว

และอย่าสร้างข้อมูลกลุ่มใหม่ขึ้นมา สมมติว่ามีจำนวนผู้ใช้ที่มีแฟ้มเกดข้อมูลค้างอยู่  $i$  คน ก็จะกล่าวได้ว่า

$$P_{\text{suc}}(i) = \text{Prob}[\text{successful slot} \mid i \text{ users in backlog}] \\ = (1-v)^i (M-i)\sigma(1-\sigma)^{M-i-1} + iv(1-v)^{i-1}(1-\sigma)^{M-i} \quad (3.4)$$

ดังนั้น ค่าวิสัยสามารถที่ได้ทั้งหมดก็จะเป็น

$$S = P_{\text{suc}} = E[P_{\text{suc}}(i)] = \sum_{i=0}^M P_{\text{suc}}(i)\pi_i \quad (3.5)$$

สังเกตว่าเนื่องจากผู้ใช้ทุกคนนั้นจะเหมือนกันหมดโดยสถิติ ค่าวิสัยสามารถที่ได้ก็จะมีค่าเท่ากับ  $S$  จากสมการที่แล้วถ้าหารด้วย  $M$

แต่ถ้าเป็นกรณีพิเศษจะพิจารณาสถานการณ์ที่เราไม่ได้แยกแยะระหว่างกลุ่มข้อมูลที่ค้างอยู่กับกลุ่มข้อมูลที่สร้างขึ้นมาใหม่ หมายความว่า เรากำหนดให้  $v = \sigma$  แทนค่านี้ในสมการ (3.4) จะได้

$$P_{\text{suc}}(i) = M\sigma(1-\sigma)^{M-1}$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า  $P_{\text{suc}}(i)$  ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ  $i$  แน่นนอน ผลที่ได้ก็ไม่ได้แปลกอะไรเนื่องจากถ้าเราหยุดทำการแยกแยะระหว่างผู้ใช้ที่มีแฟ้มเกดข้อมูลค้างส่งกับผู้ใช้ที่อยู่ในขั้นของการคิด เราก็จะไม่สามารถจะหวังได้ว่าความน่าจะเป็นของความสำเร็จจะขึ้นอยู่กับผู้ใช้ที่มีแฟ้มเกดข้อมูลค้างส่งอยู่ ยิ่งไปกว่านั้น เนื่องจาก  $P_{\text{suc}}(i)$  นั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ  $i$  เราจึงได้สมการ (3.5) เป็นรูปแบบปิด ของค่าวิสัยสามารถเป็น

$$E[P_{\text{suc}}(i)] = M\sigma(1-\sigma)^{M-1} \quad (3.6)$$

อธิบายเพิ่มเติมอีกเล็กน้อยในเรื่องที่ว่าถ้าเราไม่แยกแยะระหว่างผู้ใช้ที่มีแฟ้มเกดข้อมูลค้างส่งกับผู้ใช้ที่อยู่ในขั้นของการคิด ในหัวข้อที่แล้วเรากำหนดให้ค่า  $G$  เป็นค่ารวม ความกว้างแบนด์วิธของระบบ จำนวนการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยต่อช่วงเวลา ในกรณีนี้จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $M\sigma$  แทนค่านี้ในสมการค่าวิสัยสามารถข้างต้น จะได้ผลดังนี้

$$S = G \left( 1 - \frac{G}{M} \right)^{M-1}$$

ในสถานการณ์นี้ ถ้าปล่อยให้ค่าของ  $M$  มีค่าเพิ่มขึ้นโดยไม่มีที่สิ้นสุดนั้นเราจะได้พบข้อจำกัด  $S = Ge^{-G}$  ซึ่งเป็นผลที่เหมือนกับค่าที่ได้จากหัวข้อที่ 3.1.3 สำหรับเรื่องของประชากรที่มีจำนวนไม่จำกัดของระบบสต็อคอะโลฮา ดังนั้นเราอาจสรุปได้ว่า รูปแบบประชากรที่ไม่จำกัดนั้นเป็นข้อจำกัดของรูปแบบประชากรถ้าผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งไม่ได้รับการแยกแยะจากผู้ใช้ที่อยู่ในขั้นของการคิด และถ้าจำนวนผู้ใช้เพิ่มขึ้นทั้งที่มีข้อจำกัดนั้น อัตราเฉลี่ยของการมาถึงของแพ็กเกตข้อมูลก็ยังคงมีจำนวนจำกัดเช่นกัน

### ค่าการหน่วงเวลาของระบบ

แหล่งที่มาข้างต้นนั้นพิจารณาได้จากคำวิสัยสามารรถที่ได้ ตั้งแต่จุดที่เริ่มต้น เนื่องจาก  $P_{\text{succ}}$  เป็นอัตราโดยเฉลี่ยของแพ็กเกตข้อมูลที่ออกมาจากระบบ ถ้าระบบมีความเสถียรภาพ อัตรานี้ก็จะต้องเท่ากับอัตราของการสร้างกลุ่มข้อมูลใหม่ ตอนนี้ เมื่อระบบอยู่ในขั้นของ  $i$  ก็จะมีผู้ใช้ที่อยู่ในขั้นของการคิดจำนวน  $M-i$  ที่ทำการสร้างกลุ่มข้อมูลในทุกๆช่วงเวลา โดยมีค่าความน่าจะเป็นอยู่ที่  $\sigma$  ดังนั้น อัตราเฉลี่ยของการสร้างข้อมูลกลุ่มใหม่เมื่ออยู่ในขั้น  $i$  ก็คือ  $(M-i)\sigma$  ทำให้ได้ผลดังนี้

$$S = E[(M-i)\sigma] = \sum (M-i)\sigma\pi_i = (M - \bar{N})\sigma \quad (3.7)$$

เมื่อ  $\bar{N}$  คือจำนวนเฉลี่ยของผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างส่ง

กำหนดให้  $b$  เป็นอัตราเฉลี่ยที่กลุ่มข้อมูล (จริงๆแล้วคือผู้ใช้ที่มีกลุ่มข้อมูลอยู่) ที่กลายมาเป็นแพ็กเกตข้อมูลค้างส่ง ซึ่งจะเป็นไปตามสูตรของ ลิทเติล แล้วนั้น จำนวนเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในแพ็กเกตข้อมูลค้างก็คืออัตราส่วนของจำนวนเฉลี่ยผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งกับอัตราเฉลี่ยของข้อมูลที่กลายมาเป็นแพ็กเกตข้อมูลค้างส่ง หรือ  $N/b$  แต่ไม่ใช่ว่ากลุ่มข้อมูลทุกกลุ่มที่ผ่านระบบจะกลายเป็นแพ็กเกตข้อมูลค้างส่ง เนื่องจาก  $b$  เป็นอัตราของข้อมูลกลุ่มที่กลายมาเป็นแพ็กเกตข้อมูลค้างส่ง และ  $S$  (คำวิสัยสามารรถที่ได้) เป็นอัตราของข้อมูลกลุ่มที่ออกมาจากระบบ ดังนั้นส่วนของข้อมูล  $(S-b)/S$  จึงไม่มีทางเป็นแพ็กเกตข้อมูลค้างส่ง กลุ่มข้อมูลนี้จะล่าช้าเพียง  $1$  ช่วงเวลาเท่านั้น นอกนั้น  $(b/S)$  จะต้องล่าช้าอย่างที่กล่าวข้างต้น แต่จะมีหนึ่งช่วงเวลาที่จะประสบความสำเร็จ เมื่อวัดจากช่วงเวลาแล้ว การล่าช้าโดยเฉลี่ยคือ

$$\hat{D} = \frac{S-b}{S} * 1 + \frac{b}{S} * \left( \frac{\bar{N}}{b} + 1 \right)$$

ถ้าใช้ค่าของ  $\bar{N}$  จากสมการ (3.7) ในที่สุดจะได้

$$\hat{D} = 1 - \frac{1}{\sigma} + \frac{M}{S} \quad (3.8)$$

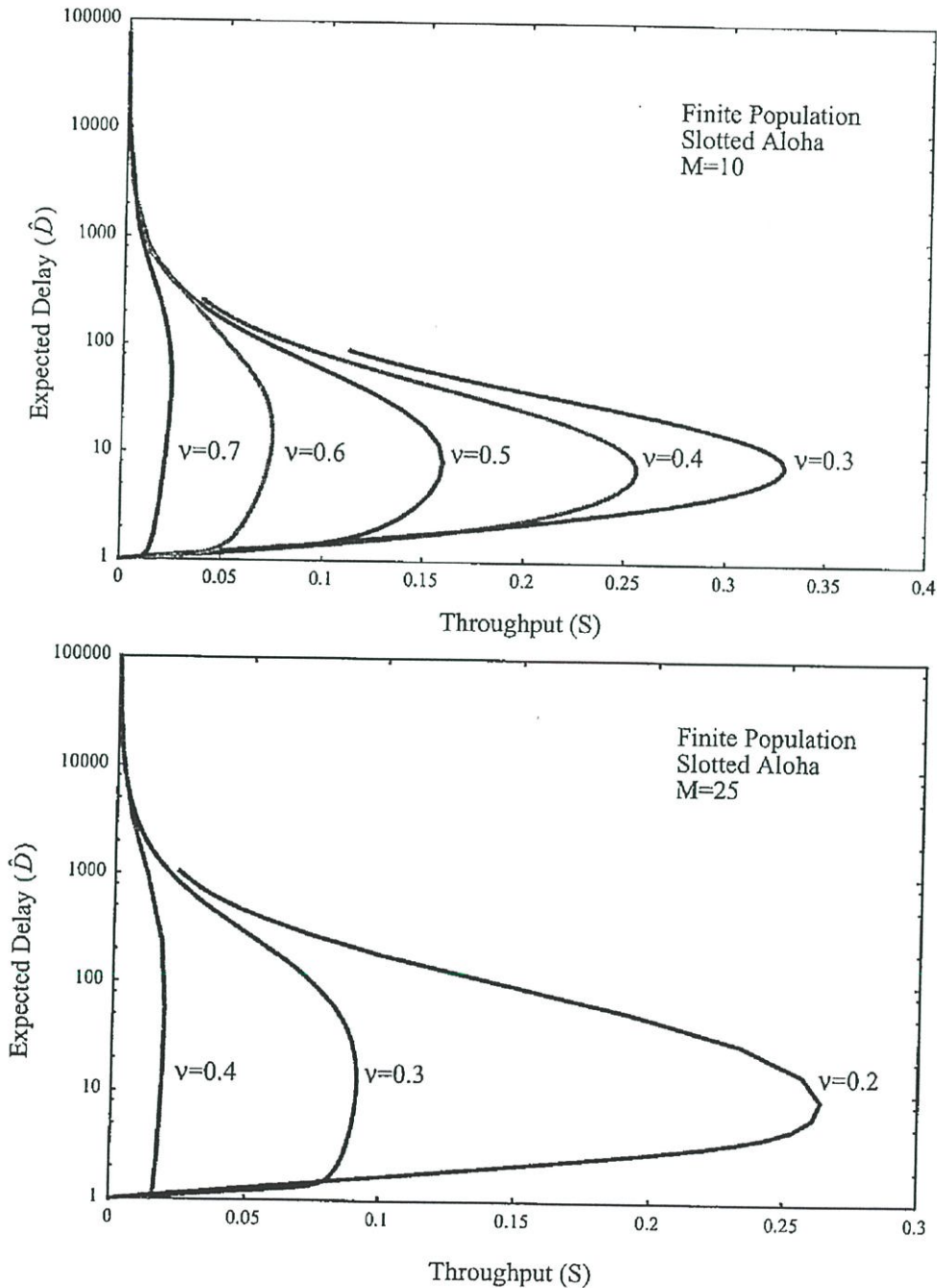
โดยมีค่าของ  $S$  ที่ได้จากสมการ (3.5) สมการอันสุดท้ายนี้เป็นความสัมพันธ์ของการหน่วงเวลากับค่าวิสัยสามารถของระบบที่ต้องการ ในการนำเสนอนี้ควรจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ เนื่องจาก  $\sigma$  มีอิทธิพลต่อค่าของ  $S$  คุณลักษณะของค่าวิสัยสามารถของการหน่วงเวลานั้นจะใช้ในการเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ หลายอัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.5 โดยเส้นโค้งแต่ละเส้นในรูปหมายถึงค่าๆหนึ่งของ  $v$  โดยมี  $\sigma$  แตกต่างกันไปจาก 0 ถึง 1 ตลอดเส้นโค้ง ดังนั้น เริ่มแรกของค่าวิสัยสามารถที่ได้จะเพิ่มขึ้นไปพร้อมกับ  $\sigma$  จนกว่าจะถึงค่าความจุสูงสุดที่ระบบรองรับได้ (ของค่า  $v$  นั้น) หลังจากนั้นค่าวิสัยสามารถก็จะลดลงเรื่อยๆพร้อมกับการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆของโหลด และอย่างที่คาดไว้ว่าการล่าช้านั้นก็เพิ่มขึ้นไปพร้อมกับ  $\sigma$

พิจารณาอีกครั้งถึงในกรณีพิเศษ ซึ่ง  $\sigma = v$  ซึ่งได้ระบุค่าวิสัยสามารถที่ได้ไว้แล้วในสมการที่ (3.6) ถ้าแทนค่าด้วยสมการที่ (3.8) จะได้

$$\hat{D} = 1 - \frac{1 - (1 - \sigma)^{M-1}}{\sigma(1 - \sigma)^{M-1}}$$

มีข้อสังเกตสองเรื่องเกี่ยวกับผลที่ได้อันสุดท้ายนี้ ประการแรก ถ้ารักษาค่า  $M\sigma$  ไว้ให้คงที่และเพิ่ม  $M$  จะแสดงให้เห็นถึงการหน่วงเวลาที่เพิ่มขึ้น หมายความว่า รูปแบบที่เราสร้างขึ้นนั้นไม่สามารถใช้ได้ในการประเมินการหน่วงเวลาในกรณีที่ประชากรมีจำนวนไม่จำกัด เรื่องนี้ไม่น่าประหลาดใจแต่อย่างใด และมีสาเหตุมาจากความไม่มีเสถียรภาพของระบบอะโลฮา แบบประชากรไม่จำกัด ซึ่งเราจะอธิบายเรื่องนี้ต่อไปในหัวข้อที่ 3.4 ประการที่สองนั้นเกี่ยวข้องกับค่าการหน่วงเวลาเมื่อ  $\sigma$  มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อคิดถึงเรื่องข้อจำกัดนี้แล้ว เราพบว่า  $\hat{D}(\sigma \rightarrow 0) \rightarrow M$  ซึ่งเป็นผลที่อาจดูน่าประหลาดใจในตอนแรก เมื่อ  $\sigma$  มีขนาดเล็กมาก แทบจะไม่เกิดการชนกันของแพ็กเก็ตข้อมูลเลย ดังนั้นในหลายๆกรณีนั้นการหน่วงเวลาจะเป็นเพียงช่วงเวลาเดียว ที่ใช้ในการส่งข้อมูลด้วยตนเอง อย่างไรก็ตาม อาจมีบางกรณีของการชนกันของแพ็กเก็ตข้อมูลที่ผู้ใช้ที่เกิดการชนกันนั้นกลายเป็นผู้ใช้ที่มีแพ็กเก็ตข้อมูลค้างส่งไปเลย และต้องค้างอยู่ในช่วงนี้เป็นเวลานานเนื่องจากระยะ

เวลาในการรอนั้นจะแปรผกผันไปกับจำนวนประชากรของ  $\sigma$  เมื่อนำมารวมกันแล้ว เราพบว่ากลุ่มข้อมูลส่วนใหญ่มีความล่าช้า



รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ของค่าวิสัยสามารถกับค่าการหน่วงเวลาของระบบสล็อตอะโลฮา แบบมีจำนวนผู้ใช้ที่แน่นอน เมื่อ  $M=10$  และ  $M=25$

ด้วยกันทั้งนั้นและอยู่ในอัตราที่เหมือนกัน มีกลุ่มข้อมูลเพียงไม่กี่กลุ่มเท่านั้นที่มีการล่าช้าอย่างใหญ่หลวง ผลที่ได้ก็คือค่าเฉลี่ยการล่าช้าของช่องเวลาจำนวน  $M$

### ปรากฏการณ์การเข้าครอบครอง(The Capture Phenomenon)

มีปรากฏการณ์อย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นในระบบอะโลฮาแบบประชากรมีจำนวนจำกัด เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลอีกครั้งในจำนวนน้อย เราจะนำเสนอปรากฏการณ์นี้ด้วยสูตร เมื่อพิจารณาสถานการณ์ที่  $\sigma$  ยอมรับค่าที่สำคัญ (แม้ว่าไม่จำเป็นจะต้องใกล้เคียงกับ 1 ก็ตาม) และ  $v$  ยอมรับค่าที่น้อยมากๆ ได้ เช่น  $Mv \ll 1$  สมมติฐานของข้อเท็จจริงนี้หมายความว่า ในที่สุดแล้ว ผู้ใช้ส่วนใหญ่จะกลายเป็นผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งเนื่องจากอัตราการก้าวออกมาจากกลุ่มแพ็กเกตค้างส่งนั้นมีน้อยมาก ดังนั้น อาจมีคนสมมติเอาว่า ส่วนใหญ่แล้ว ผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งจำนวน  $M$  หรือ  $M-1$  นั้นจะได้รับการสังเกต เมื่อใช้สมมติฐานนี้ และเมื่อประเมิน  $(1-v)^i$  ว่าเป็น  $1-iv$  สมการที่ (3.3) ก็จะกลายเป็น

$$\begin{aligned} p_{M-1, M-1} &= 1 - (M-1)v\sigma & p_{M-1, M} &= 1 - (M-1)v\sigma \\ p_{M, M-1} &= Mv & p_{M, M} &= 1 - Mv \end{aligned}$$

และค่าอื่นๆของ  $P_{ij}$  ก็จะหายไป การแก้โจทย์สมการนี้จะทำให้ได้ผลดังนี้

$$\pi_{M-1} = \frac{M}{M + (M-1)\sigma} \quad , \quad \pi_M = \frac{(M-1)\sigma}{M + (M-1)\sigma}$$

ค่าที่สอดคล้องกันของความน่าจะเป็นในความสำเร็จคือ

$$P_{suc}(M-1) = \sigma + (M-1)v + (M-2)v\sigma \quad P_{suc}(M) = Mv$$

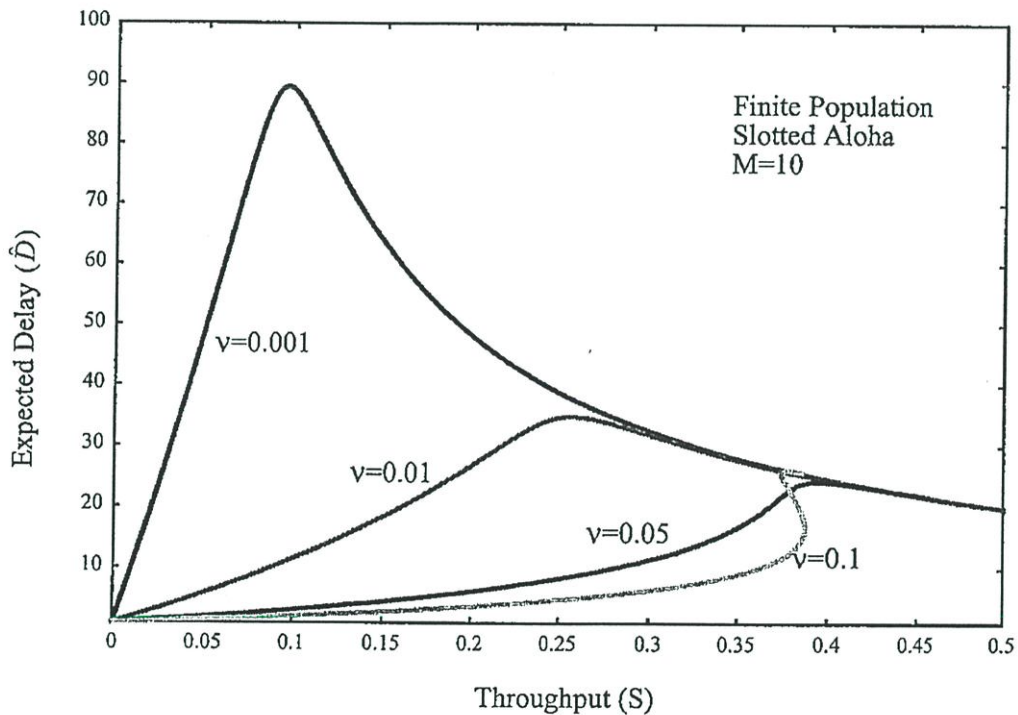
เมื่อแทนค่าต่างๆทั้งหมดแล้ว เราจะได้ค่าวิสัยสามารถดังต่อไปนี้

$$S = M \frac{\sigma + (M-1)v + (M-3)v\sigma}{M + (M-1)\sigma} \approx \frac{M\sigma}{M + (M-1)\sigma}$$

การแสดงค่านี้เป็นเรื่องน่าสนใจ เนื่องจากมันแสดงให้เห็นว่าค่าวิสัยสามารถที่ได้จะเพิ่มขึ้นไปพร้อมกับจำนวน  $\sigma$  นอกจากนี้ ถ้าแทนค่านี้ในสมการที่ (3.8) จะทำให้ได้ผลดังนี้

$$\hat{D} = 1 + (M-1) \frac{1+\sigma}{\sigma} = M + \frac{M-1}{\sigma}$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การหน่วงเวลาโดยเฉลี่ยนั้นอันที่จริงมีจำนวนลดลงถ้ามีโหนดมากขึ้น นอกจากนี้ ทั้งค่าวิสัยสมารถที่ได้และการหน่วงเวลาโดยเฉลี่ยนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับ  $v$  ดังนั้นระบบเหล่านี้จึงแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะการทำงาน ณ ที่ค่าต่างๆของ  $v$  เราได้แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์นี้ในรูปที่ 3.6 ซึ่งจะเห็นเส้นโค้งของค่าวิสัยสมารถของการหน่วงเวลา ของระบบโดย  $M = 10$  (รูปนี้จะใช้ในการอธิบายถึงผลของสมการที่ 3.8) คุณคงสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่า トラบไคที่  $\sigma$  มีจำนวนน้อย ค่าการหน่วงเวลาจะเพิ่มขึ้นอย่างที่เราคาดไว้ เมื่อ  $\sigma$  มีค่ามากขึ้นจะทำให้การหน่วงเวลาลดลงแต่ค่าวิสัยสมารถที่ได้จะมีมากขึ้น ซึ่งเป็นเรื่องค่อนข้างแปลก อีกอย่างหนึ่งก็คือ เส้นกราฟของค่า  $v$  ต่างๆนั้นจะมาเหมือนกันเมื่อค่าของ  $\sigma$  มีมากขึ้น แสดงให้เห็นถึงการสังเกตก่อนหน้าที่ว่า การทำงานของระบบภายใต้สภาวะการณเช่นนั้น แทบจะไม่ต้องพึ่งค่า  $v$  เลย



รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ของค่าวิสัยสมารถกับค่าการหน่วงเวลาของระบบอะโลฮาภายใต้ภาวะการ Capture

เพื่อทำความเข้าใจธรรมชาติของปรากฏการณ์นี้นั้น จงนึกถึงอัตราการส่งข้อมูลที่น้อย และผู้ใช้ที่มีแพ็กเก็ตข้อมูลค้างส่งต้องอยู่ในขั้นแพ็กเก็ตข้อมูลค้างส่งค้างเป็นเวลานาน เนื่องจากอัตราของการสร้างข้อมูลกลุ่มใหม่นั้นมีความสำคัญ ในที่สุดแล้วผู้ใช้ก็จะกลายมาอยู่ในขั้นแพ็กเก็ตข้อมูลค้างส่ง เมื่อสถานการณ์เป็นเช่นนี้ จงพิจารณาผู้ใช้ที่ส่งข้อมูลอีกครั้งและมักทำได้สำเร็จ ผู้ใช้คนนี้จะสร้างกลุ่มข้อมูลใหม่ในระยะเวลาอันสั้น และเมื่อป้อนข้อมูลใหม่เข้าไปแล้ว ก็มีแนวโน้มจะสำเร็จอีกครั้งเนื่องจากความน่าจะเป็นที่การส่งข้อมูลจะได้รับการรบกวนจากผู้ใช้ที่มีแพ็กเก็ตข้อมูลค้างส่ง

นั้นมีน้อย เหตุการณ์ถูกใช้เช่นนี้จะดำเนินต่อไปอีกสักระยะจนกว่าจะเกิด “โชคร้าย” ที่ผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งมีกำหนดจะส่งแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งอีกครั้ง ซึ่งถึงตอนนั้นก็จะเกิดการชนกันทันที หรือผู้ใช้ในชั้นความคิดสองคนเกิดส่งแพ็กเกตข้อมูลชนกันเอง ถ้าเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ ผู้ใช้ทุกคนจะกลายเป็นผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งหมด และต้องค้างอยู่อย่างนั้นสักพัก เนื่องจากอัตราการส่งซ้ำนั้นมีน้อย อย่างไรก็ตาม ท้ายที่สุดแล้ว ผู้ใช้อีกคนจะส่งข้อมูลอีกครั้งและสำเร็จ และก็จะย้อนเหตุการณ์เดิมตั้งแต่ต้น สิ่งที่เกิดขึ้นจริงๆ นั้นก็คือ ผู้ใช้จะครอบครองช่วงเวลาในช่วงระยะหนึ่ง หมายความว่า ส่งข้อมูลได้สำเร็จต่อเนื่องกันหลายกลุ่มข้อมูล ผลการทำงานจะดีขึ้นถ้า  $\sigma$  มีมากขึ้นเนื่องจากยังมีกลุ่มข้อมูลสร้างใหม่ในช่วงระหว่างการส่งซ้ำเท่าไร ก็จะมีค่าวิสัยสามารถมากขึ้นเท่านั้น เมื่อ  $\sigma$  มีปริมาณสูงพอควรแล้ว ค่าวิสัยสามารถที่ได้จะมีค่าเข้าใกล้ 0.5 เนื่องจากผู้ใช้ที่ครอบครองนั้นจะส่งข้อมูลในระยะเวลาเดียว และสร้างกลุ่มข้อมูลในเวลาที่ถัดไป เป็นอย่างนี้เรื่อยๆ

การครอบครองเช่นนี้จะปรากฏในโพรโตคอลอื่นๆ ที่เหมือนโพรโตคอลอะโโลฮาแบบประชากรจำนวนจำกัด อย่างเช่น โพรโตคอลแบบ Carrier – sensing แบบต่างๆ โดยจะเกิดการชนกันของแพ็กเกตข้อมูลได้บ้าง และไม่เกิดก็ได้

### 3.4 ความ (ไม่) มีเสถียรภาพของโพรโตคอลอะโโลฮา

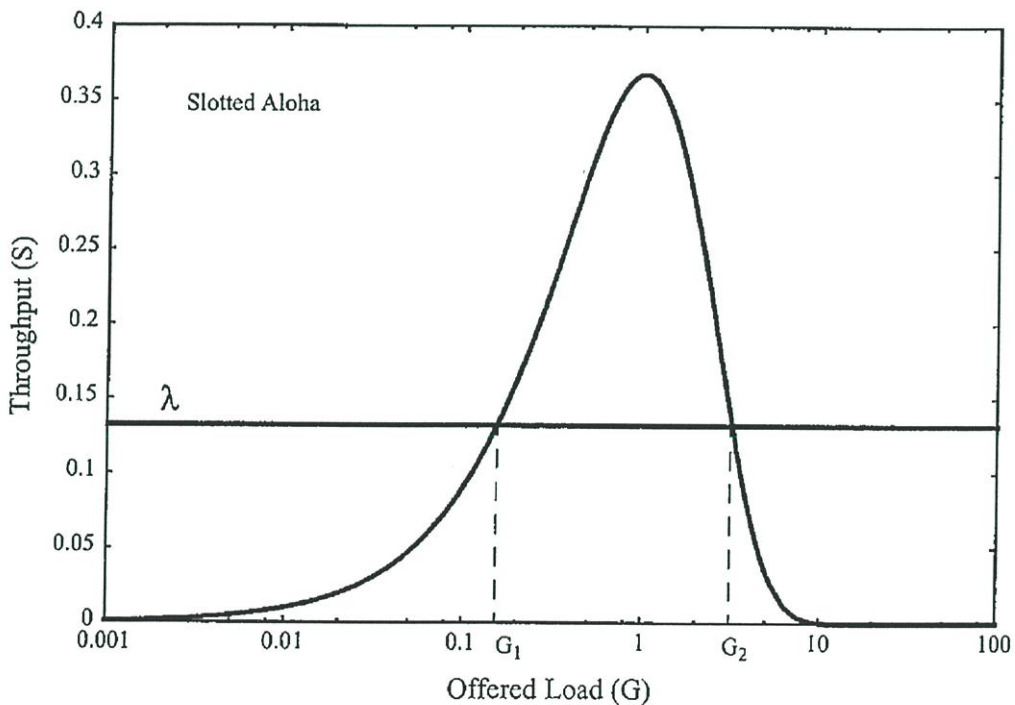
สมมติฐานของการวิเคราะห์โพรโตคอล อะโโลฮา ก็คือ กระบวนการของการมาถึงและการส่งซ้ำของกลุ่มข้อมูลนั้นเป็นกระบวนการแบบปัวส์ซอง ยังไม่มีการพิสูจน์ว่าจริงหรือไม่ยกเว้นเรื่องที่ว่า สมมติฐานนี้ทำให้การวิเคราะห์โพรโตคอลเป็นไปได้ง่ายขึ้น เรายังคงจำได้ว่าจากสมมติฐานนี้เองที่ทำให้มีการคาดการณ์เรื่องค่าวิสัยสามารถที่จะได้รับจากโพรโตคอลแบบสล็อตอะโโลฮาดังต่อไปนี้

$$S = gTe^{-gT} = Ge^{-G} \quad (3.9)$$

เมื่อ  $T$  เป็นเวลา(กำหนดคงที่)ที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตข้อมูล  $g$  ก็จะเป็นจำนวนของกลุ่มข้อมูลใหม่ และกลุ่มข้อมูลที่ส่งซ้ำต่อหนึ่งวินาที และ  $G=gT$

สมมติฐานอีกอันหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์โพรโตคอลแบบอะโโลฮาก็คือ สมมติฐานเรื่องความเป็นเสถียรภาพของระบบ หมายความว่า จำนวนของผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งและรอส่งใหม่นั้นเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ อีกนัยหนึ่งก็คือ กลุ่มข้อมูลที่วิ่งเข้าและออกจากระบบนั้นมีอัตราเท่าเดิม ตอนแรกเราบอกว่าสมมติฐานนี้ผิด แต่ก็ได้พิสูจน์อย่างจริงจังอีกครั้ง

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.2 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสมการที่ (3.9) แล้ว สมมติว่าอัตราการมาถึงของกลุ่มข้อมูลใหม่คือ  $\lambda$  แพ้กเกิดต่อช่วงเวลา และสมมติว่า  $\lambda < c^{-1}$  ( $c^{-1}$  เป็นค่าวิสัยสามารถสูงสุดที่คาดว่าโพรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮาจะทำได้) ถ้ากลุ่มข้อมูลที่เข้าและออกจากระบบยังคงเท่ากันอยู่ โดยอัตรารวมของกราฟฟิกบนช่วงเวลานั้นๆ (ข้อมูลใหม่และข้อมูลส่งซ้ำ)  $G=gT$  ก็จะเป็น  $G1=g1T$  ดังเช่นที่แสดงในรูปที่ 3.7 นี้คืออัตราโดยเฉลี่ยเท่านั้น และเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง อัตราที่แท้จริงก็จะผันผวนไป ถ้าอัตราของกราฟฟิกข้อมูลจริงมากกว่า  $G_1$  เล็กน้อย ค่าวิสัยสามารถจริงก็จะมากกว่า  $\lambda$  เล็กน้อยเช่นกัน ดังนั้น กลุ่มข้อมูลก็จะออกจากระบบได้เร็วกว่าที่เข้ามา ซึ่งทำให้อัตราของกราฟฟิกข้อมูลจริงลดลงไปที่  $G_1$  ถ้าอัตราของกราฟฟิกข้อมูลจริงน้อยกว่า  $G_1$  ค่าวิสัยสามารถจริงก็จะน้อยกว่า  $\lambda$  ดังนั้นกลุ่มข้อมูลก็จะออกจากระบบได้ช้ากว่าที่เข้ามา ซึ่งทำให้อัตราของกราฟฟิกข้อมูลเพิ่มกลับไปยังที่  $G_1$  ผลที่ตามมาคือ จุดของ  $(S,G) = (\lambda, G_1)$  ก็เป็นจุดที่มีความเสถียรภาพ หมายความว่า ระบบจะมีความเสถียรภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงของ  $G_1$  อย่างไรก็ตาม ถ้าการเปลี่ยนแปลงมีมาก (และจะเกิดขึ้นได้หนึ่งครั้ง) จะก่อให้เกิดกราฟฟิกข้อมูลจริงมากกว่า  $G_2$



รูปที่ 3.7 แสดงถึงความไม่เป็นเสถียรภาพของสล็อตอะโลฮา

ในรูปที่ 3.7 ก็จะทำให้ค่าวิสัยสามารถจริงนั้นลดลงไปต่ำกว่า  $\lambda$  ดังนั้น กลุ่มข้อมูลจะออกจากระบบช้ากว่าตอนที่เข้ามา ซึ่งทำให้อัตราของกราฟฟิกข้อมูลจริงเพิ่มมากขึ้น และทำให้ค่าวิสัยสามารถจริงมีค่าลดลง ระบบไม่มีทางกลับไปสู่จุด  $(\lambda, G_1)$  แต่จะไม่คงที่ไปเรื่อยๆ  $(S,G) = (0, \infty)$  เราจึงสรุปได้ว่าค่าวิสัยสามารถสูงสุดที่จะมีเสถียรภาพของโพรโตคอลอะโลฮานี้คือ ศูนย์

ในเรื่องต่อไปนี้จะมัลพัทธ์ที่ชัดเจนและเป็นทางการมากขึ้น ผลพัทธ์ต่อไปนี้จะอยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์ของ Fayolle และคณะ[FLB74] อันดับแรกที่จะอธิบายรูปแบบที่เห็นชัดเจนของการวิเคราะห์นี้

### 3.4.1 การวิเคราะห์(Analysis)

พิจารณาระบบสล็อตอะโลฮาโดยมีจำนวนผู้ใช้ไม่จำกัด เพื่อที่ว่ากลุ่มข้อมูลใหม่ที่มาถึงระบบนั้นจะมีความเกี่ยวข้องกับผู้ใช้คนใหม่ กำหนดให้  $\tilde{A}(k)$  เป็นจำนวนกลุ่มข้อมูลใหม่ที่สร้างขึ้น (กลุ่มข้อมูลที่เข้ามาถึง) ระหว่างช่องเวลาที่  $k^{\text{th}}$  กลุ่มข้อมูลนี้จะถูกส่งในช่องเวลาที่  $k+1$  เราอธิบายได้ว่า  $\{\tilde{A}(k), (k = 0, 1, 2, \dots)\}$  เป็นผลที่เกิดจากตัวแปรแบบสุ่มที่เหมือนกันแต่ไม่ต้องพึ่งพากัน โดยมีการกระจายตัวที่เหมือนกัน

$$\text{Prob}[A(k) = i] = \text{Prob}[i \text{ new packets arrive at slot } k] = a_i, \quad i \geq 0 \quad (3.10)$$

และหมายความว่าจำนวนข้อมูล  $\lambda$  แพ็กเกตต่อช่องเวลา  $\lambda = \sum_i i a_i$  สังเกตว่าถ้ากระบวนการมาถึงของกลุ่มข้อมูลใหม่เป็นแบบปัวส์ซอง แล้ว  $a_i = (\lambda^i e^{-\lambda}) / i!$

กำหนดให้  $\tilde{N}(k)$  เป็นจำนวนผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งตั้งแต่เริ่มต้นช่องเวลา  $k (k=0, 1, 2, \dots)$  ผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งจะมีการชนกันของข้อมูล และต้องรอส่งใหม่ เราสรุปว่า  $\tilde{N}(0) = 0$  การหน่วงเวลาของการส่งแพ็กเกตข้อมูลใหม่นั้นจะเป็นไปตามกฎของเรชาคณิต หมายความว่า ผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งตั้งแต่เริ่มต้นของช่องเวลา  $k$  ส่งข้อมูลใหม่ในช่องเวลา  $k$  โดยมีความน่าจะเป็นอยู่ที่  $v$  และไม่ขึ้นอยู่กับเหตุการณ์ใดๆในระบบเลย จากคำอธิบายนี้ เราจะได้

$$\begin{aligned} b_i(n) &\cong \text{Prob}[i \text{ backlogged users transmit in slot } k \mid n \text{ in backlog}] \\ &= \text{Prob}[i \text{ backlogged users transmit in slot } k \mid \tilde{N}(k) = n] = \binom{n}{i} v^i (1-v)^{n-i} \end{aligned} \quad (3.11)$$

เช่นเดียวกับกรณีของผู้ใช้ที่มีจำนวนจำกัด (ดูหัวข้อที่ 3.3) จำนวนของผู้ใช้ที่มีข้อมูลค้างส่งจำนวน  $\tilde{N}(k)$  นั้นได้รับการกล่าวถึงว่าเป็น สถานะ ของระบบ จำนวนของผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งตั้งแต่เริ่มต้นของช่องเวลาที่  $k+1^{\text{st}}$  นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนของผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างส่งตั้งแต่เริ่มต้นของช่องเวลาที่  $k^{\text{th}}$  (บางคนอาจส่งใหม่อีกครั้งสำเร็จ) และจำนวนของกลุ่มข้อมูลใหม่ที่มาถึงช่องเวลา เนื่องจากกระบวนการของข้อมูลใหม่ที่มาถึงนั้นไม่ต้องพึ่งพากิจกรรมใดๆของช่องเวลาก่อนหน้านี้ ดังนั้นกระบวนการ  $\{\tilde{N}(k), (k = 0, 1, 2, \dots)\}$  จึงเป็นไปตามกฎลูกโซ่ของ Markov

ส่วนที่แตกต่างจากจำนวนผู้ใช้ที่มีจำนวนจำกัดก็คือ ห่วงโซ่ของ  $\{ \tilde{N}(k), (k = 0, 1, 2, \dots) \}$  นี้ ไม่ใช่ที่จะมีจำนวนจำกัด ดังนั้นจึงเห็นได้ไม่ชัดเจนว่าห่วงโซ่นี้เป็นเออร์โกดิกส์หรือไม่

กำหนดให้  $\pi_n(k)$  หมายถึงความน่าจะเป็นที่  $\tilde{N}(k) = n$  เราลองมาดูการส่งข้อมูลที่เป็นไปได้ที่จะนำไปสู่ขั้นที่ว่าจำนวนผู้ใช้ที่มีแพ็คเกจข้อมูลค้างส่งอยู่เป็นจำนวน  $n$  ที่จุดเริ่มต้นของช่วงเวลา  $k+1$  หมายความว่า  $\tilde{N}(k+1) = n$  ในเครื่องหมายวงเล็บนั้น เราแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของเหตุการณ์ที่จะมีเหตุการณ์สัมพันธ์กัน ดังต่อไปนี้

1. มีจำนวนผู้ใช้ที่มีแพ็คเกจข้อมูลค้างจำนวน  $n$  ตั้งแต่เริ่มต้นของช่วงเวลา  $k$  ( $\pi_n(k)$ ). ไม่มีคนไหนเลยที่ทำการส่งข้อมูล ( $b_0(n)$ ) และมีข้อมูลเพียงกลุ่มเดียวที่ส่งผ่าน ( $a_1$ ) และข้อมูลกลุ่มเดียวที่ส่งผ่านได้สำเร็จ ดังนั้นจำนวนผู้ใช้ที่มีงานค้างก็ไม่เปลี่ยนแปลง
2. มีจำนวนผู้ใช้ที่มีแพ็คเกจข้อมูลค้างจำนวน  $n$  ตั้งแต่เริ่มต้นของช่วงเวลา  $k$  ( $\pi_n(k)$ ). อย่างน้อยสองคนทำการส่งข้อมูล ( $1 - b_0(n) - b_1(n)$ ) และเกิดการชนกัน และไม่มีการส่งข้อมูลใหม่ ( $a_0$ ) ดังนั้นจำนวนผู้ใช้ที่มีงานค้างก็ไม่เปลี่ยน
3. มีจำนวนผู้ใช้ที่มีแพ็คเกจข้อมูลค้างจำนวน  $n$  ตั้งแต่เริ่มต้นของช่วงเวลา  $k$  ( $\pi_n(k)$ ). ไม่มีคนไหนเลยที่ทำการส่งข้อมูล ( $b_0(n)$ ) และไม่มีการส่งข้อมูลใหม่ ( $a_0$ ) นับว่าสอดคล้องกับช่วงเวลาว่าง ที่ไม่มีแพ็คเกจข้อมูลเข้ามาและจำนวนผู้ใช้ที่มีแพ็คเกจข้อมูลค้างก็ไม่เปลี่ยน
4. มีจำนวนผู้ใช้ที่มีแพ็คเกจข้อมูลค้างจำนวน  $n+1$  ตั้งแต่เริ่มต้นของช่วงเวลา  $k$  ( $\pi_{n+1}(k)$ ). แน่แน่นอนว่าจะต้องมีผู้ใช้หนึ่งคนที่ส่งข้อมูล ( $b_1(n+1)$ ) และไม่มีการส่งข้อมูลใหม่ ( $a_0$ ) ในกรณีนี้ การส่งข้อมูลของผู้ใช้ที่มีแพ็คเกจข้อมูลค้างส่งนั้นสำเร็จ และดังนั้นจำนวนผู้ใช้ที่มีแพ็คเกจข้อมูลค้างก็จะลดลงทีละหนึ่งแพ็คเกจ
5. มีจำนวนผู้ใช้ที่มีแพ็คเกจข้อมูลค้างจำนวน  $n-1$  ตั้งแต่เริ่มต้นของช่วงเวลา  $k$  ( $\pi_{n-1}(k)$ ) และอย่างน้อยมีหนึ่งคนที่ทำการส่ง ( $1 - b_0(n-1)$ ) และมีข้อมูลใหม่กลุ่มเดียวที่ส่ง ( $a_1$ ) ในกรณีนี้ การชนกันของแพ็คเกจข้อมูลก็จะเกิดขึ้นและผู้ใช้ที่มีข้อมูลใหม่จะกลายเป็นผู้ใช้ที่มีแพ็คเกจข้อมูลค้าง
6. มีจำนวนผู้ใช้ที่มีแพ็คเกจข้อมูลค้างจำนวน  $n-j$   $2 \leq j \leq n$  ตั้งแต่เริ่มต้นของช่วงเวลา  $k$  ( $\pi_{n-j}(k)$ ) และอย่างน้อยมีข้อมูลสองกลุ่มที่ถูกส่ง  $a_j$   $2 \leq j \leq n$  ในกรณีนี้การชนกันของแพ็คเกจข้อมูลก็จะเกิดขึ้น และผู้ใช้ที่มีข้อมูลใหม่ทุกคนจะกลายเป็นผู้ใช้ที่มีแพ็คเกจข้อมูลค้าง

เมื่อสรุปจากข้างต้นแล้ว เราจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \pi_n(k+1) = & \pi_n(k)b_0(n)a_1 + \pi_n(k)[1 - b_0(n) - b_1(n)]a_0 + \pi_n(k)b_0(n)a_0 \\ & + \pi_{n+1}(k)b_1(n+1)a_0 + \pi_{n-1}(k)[1 - b_0(n-1)]a_1 + \sum_{j=2}^n \pi_{n-j}(k)a_j \end{aligned}$$

สังเกตว่าสมการ (3.12) นั้นจะใช้ได้สำหรับ  $n \geq 0$  ถ้ามีใครยอมรับว่า  $\pi_i(k) = 0$  สำหรับ  $i < 0$

ลูกโซ่ของ Markov  $\{ \tilde{N}(k), (k = 0, 1, 2, \dots) \}$  นั้นเกิดขึ้นเป็นช่วงๆเท่านั้นและไม่สามารถลดลงได้ และจะเป็นเออร์โกดิกส์ ถ้าการกระจายตัวของความน่าจะเป็น  $\{ \pi_n, k = 0, 1, 2, \dots \}$  นั้นยังมีอยู่ทำให้สมการ (3.12) เป็นจริง เมื่อเป็นเช่นนั้น  $\pi_n > 0$  สำหรับทุกๆค่าของ  $n$ .  $\sum_n^\infty \pi_n = 1$  และ  $\pi_n = \lim_{k \rightarrow \infty} \pi_n(k)$  สมมติว่าข้อกำหนดอย่างหลังนี้มีอยู่จริง เราจะได้ผลจากสมการ (3.12) ดังนี้

$$\pi_n = \pi_n [b_0(n)a_1 - b_1(n)a_0] + \pi_{n+1}b_1(n+1)a_0 - \pi_{n-1}b_0(n-1)a_1 + \sum_j^n \pi_{n-j}a_j \quad (3.13)$$

ซึ่งอธิบาย

$$P_N = \sum_{n=0}^N \pi_n \quad (3.14)$$

และได้ผลรวมสมการที่ (3.13) สำหรับ  $n=0, 1, 2, \dots, N$

$$\begin{aligned} P_N &= \sum_{n=0}^N \pi_n = \sum_{n=0}^N \pi_n [b_0(n)a_1 - b_1(n)a_0] + \sum_{n=0}^N \pi_{n+1}b_1(n+1)a_0 \\ &\quad - \sum_{n=0}^N \pi_{n-1}b_0(n-1)a_1 + \sum_{n=0}^N \sum_{j=0}^n \pi_{n-j}a_j \\ &= \sum_{n=0}^N \pi_n [b_0(n)a_1 - b_1(n)a_0] + \sum_{n=0}^N \pi_{n+1}b_1(n+1)a_0 \\ &\quad - \sum_{n=0}^N \pi_{n-1}b_0(n-1)a_1 + \sum_{j=0}^N \sum_{n=0}^N \pi_{n-j}a_j \\ &= \pi_N b_0(N)a_1 - \pi_0 b_1(0)a_0 + \pi_{N+1}b_1(N+1)a_0 + \sum_{j=0}^N \pi_{n+1}a_j P_{N-j} \end{aligned} \quad (3.15)$$

โดยใช้ข้อเท็จจริงที่ว่า  $b_1(0) = 0$  เราจะได้

$$P_N = \pi_N b_0(N)a_1 + \pi_{N+1}b_1(N+1)a_0 + \sum_{j=0}^N \pi_{n+1}a_j P_{N-j} \quad (3.16)$$

หรือ

$$\begin{aligned} P_N(1-a_0) &= \pi_N b_0(N)a_1 + \pi_{N+1}b_1(N+1)a_0 + \sum_{j=0}^N a_j P_{N-j} \\ &\leq \pi_N b_0(N)a_1 + \pi_{N+1}b_1(N+1)a_0 + P_{N-1} \sum_{j=0}^N a_j \\ &\leq \pi_N b_0(N)a_1 + \pi_{N+1}b_1(N+1)a_0 + P_{N-1}(1-a_0) \end{aligned} \quad (3.17)$$

ความไม่เสมอภาคข้างต้นนั้นเนื่องมาจากข้อเท็จจริงที่ว่า  $P_N$  ไม่ได้ลดเมื่อ  $N$  เพิ่มขึ้น และความไม่เสมอภาคอันที่สองนั้นเนื่องมาจาก  $\sum_{j=1}^N a_j \leq \sum_{j=1}^{\infty} a_j = 1 - a_0$  จากสมการ (3.17) เราจะได้

$$\pi_N(1 - a_0) = (P_N - P_{N-1})(1 - a_0) \leq \pi_N b_0(N) a_1 + \pi_{N+1} b_1(N+1) a_0 \quad (3.18)$$

หรือ (เราใช้ สมการที่ (3.11))

$$\frac{\pi_{N+1}}{\pi_N} \geq \frac{1 - a_0 - b_0(N) a_1}{b_1(N+1) a_0} = \frac{1 - a_0 - (1 - v)^N a_1}{(N+1)v(1-v)^N a_0} \quad (3.19)$$

สำหรับ  $N \geq 0$  ความไม่เสมอภาคกันของสมการที่ (3.19) นั้นแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน  $\pi_{N+1}/\pi_N$  เพิ่มขึ้นโดยไม่จำกัด เมื่อ  $N \rightarrow \infty$  ดังนั้น ผลของ  $P_{\infty} \cong \lim_{N \rightarrow \infty} P_N$  จะมีอยู่ที่ต่อเมื่อ  $\pi_n = 0$  สำหรับค่าที่จำกัดทุกค่าของ  $N$  มิฉะนั้น  $P_{\infty}$  ก็จะเป็นโดเวอร์เจนต์ ซึ่งจะนำมาใช้ไม่ได้เมื่อ  $\pi_n, n \geq 0$  หมายถึงการกระจายตัวของความน่าจะเป็น ดังนั้น ห่วงโซ่ของ Markov  $\{ \tilde{N}(k), (k = 0, 1, 2, \dots) \}$  ก็แทนค่าจำนวนผู้ใช้ที่มีข้อมูลค้างที่ไม่เป็นเออร์โกดิกส์ และโพโรโตคอลแบบอะโลฮา ก็ไม่มีเสถียรภาพ นอกจากนี้ เรายังได้เห็นว่าค่าวิสัยสามารถของระบบเป็นศูนย์

กำหนดให้  $S_n(k)$  เป็นความน่าจะเป็นที่มีเงื่อนไขที่ข้อมูลกลุ่มเดียวที่ประสบความสำเร็จในการส่งระหว่างช่องเวลาที่  $k^{\text{th}}$  ถ้า  $\{ \tilde{N}(k) = n$  ซึ่งค่าวิสัยสามารถของระบบจะได้

$$S = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_n^{\infty} S_n(k) \pi_n(k) \quad (3.20)$$

ข้อมูลจะส่งผ่านได้สำเร็จก็ต่อเมื่อผู้ใช้ที่มีแพ็คเกจข้อมูลค้างส่งหนึ่งคนและไม่มี การส่งข้อมูลกลุ่มใหม่ในตอนนั้นหรือไม่มีผู้ใช้ที่มีงานค้างคนใดส่งซ้ำในเวลาเดียวกัน ดังนั้น

$$S_n(k) = b_1(n) a_0 + b_0(n) a_1 \quad (3.21)$$

( $S_n(k)$  ไม่ขึ้นอยู่กับ  $k$ ) ดังนั้น

$$\begin{aligned} S &= \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_n^{\infty} [b_1(n) a_0 + b_0(n) a_1] \pi_n(k) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} [b_1(n) a_0 + b_0(n) a_1] \pi_n \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$S = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_n^N [b_1(n)a_0 + b_0(n)a_1] \pi_n$$

ซึ่งเราใช้ข้อสรุปจากสมการที่ (3.19) ว่า  $\pi_n = 0$  สำหรับ  $n$  จำนวนใดๆ ข้อเท็จจริงที่ว่าห่วงโซ่ Markov  $\{ \tilde{N}(k), (k = 0, 1, 2, \dots) \}$  นั้นไม่เป็นเออร์โกดิกส์ และค่าวิสัยสามารถที่ได้จากระบบเป็นศูนย์นั้นแสดงให้เห็นว่าในที่สุดแล้วจำนวนผู้ใช้ที่มีข้อมูลค้างนั้นจะเพิ่มขึ้นไม่สิ้นสุด ไม่มีข้อมูลใดเลยที่ส่งผ่านสำเร็จ และความล่าช้าที่อาจเกิดขึ้นนั้นก็ไม่มีสิ้นสุดเช่นกัน

### 3.4.2 การทำระบบอะโลฮาให้มีเสถียรภาพ

จากหลักการและเหตุผลที่กล่าวไปในช่วงต้นของบทนี้และจากการวิเคราะห์ที่แสดงไปเมื่อบทก่อนหน้านี้ เราเห็นได้ชัดว่าระบบอะโลฮา (โดยมีจำนวนผู้ใช้ไม่จำกัด) นั้นไม่สามารถจะคงที่ได้จากนโยบายของการส่งซ้ำของข้อมูลที่ปะทะกันไปและไม่ได้นับรวมอยู่ในระบบ ดังนั้นสิ่งที่นำเสนอไปนั้นก็แสดงให้เห็นถึงความน่าจะเป็นในการส่งซ้ำที่แน่นอน หมายความว่า นโยบายการส่งซ้ำนั้นไม่ขึ้นอยู่กับระบบ ทำให้ไม่เสถียร เพื่อที่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพนั้น ความน่าจะเป็นในการส่งซ้ำจำเป็นจะต้องปรับให้เข้ากับระบบ

สมมติว่าเราสามารถทำให้เกิดการประสานงานที่ดีระหว่างผู้ใช้ที่มีข้อมูลค้างได้ก่อนช่วงเวลาแต่ละช่อง ก็จะไม่ยากนักในการสร้างนโยบายการส่งซ้ำเพื่อทำให้ระบบอะโลฮาเสถียรภาพ ตัวอย่างเช่น พิจารณานโยบายเริ่มต้นอันนี้ ที่  $\theta$  (จุดอ้างอิง) ของผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างที่จุดเริ่มของช่องเวลา  $k$  ส่งข้อมูลซ้ำในช่วงช่องเวลา  $k$  แต่ละคนจะมีความน่าจะเป็นอยู่ที่  $v$  และไม่ต้องขึ้นอยู่กับผู้ใช้คนอื่นๆ อีกนัยหนึ่งก็คือ เมื่อจำนวนผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างไม่มากกว่า  $\theta$  แล้ว การส่งซ้ำก็จะมีมีความน่าจะเป็นเท่ากับ  $v$  ถ้ามีเกินกว่า  $\theta$  จะมีการเลือกเซตย่อย จากผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตค้าง และคนที่ได้รับเลือกก็จะส่งข้อมูลซ้ำด้วยความน่าจะเป็นที่  $v$  ส่วนคนอื่นๆที่เหลือก็อยู่เงียบๆไปก่อนในช่วงเวลานั้น

แม้จะไม่มีกรอบอธิบายนโยบายนี้อย่างชัดเจนแต่ก็เข้าใจได้ว่า เราจะทราบได้เลยว่าผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตข้อมูลค้างจะเป็นที่ทราบได้โดยวิธีใด และแม้ว่าจะทราบแล้ว ก็ยังไม่ชัดเจนอยู่ดีว่าผู้ใช้ที่มีแพ็กเกตค้างนี้จะประสานงานเพื่อทำการเลือกเซตย่อยของ  $\theta$  หรือเปล่า แม้กระนั้น ก็เป็นการดีที่จะคิดว่าทำไมนโยบายนี้จึงทำให้ระบบอะโลฮาเสถียรภาพได้ในช่วงหนึ่ง

เพื่อเป็นการพิสูจน์ความสามารถในการทำให้คงที่ของนโยบายนี้ เราจึงใช้ Pake's Lemma ซึ่งใช้กันบ่อยมากในการพิสูจน์ห่วงโซ่ของ Markov

#### Pake's lemma:

กำหนดให้  $\{\tilde{Z}_k, k = 0, 1, 2, \dots\}$  เป็นส่วนที่เหมือนกันของห่วงโซ่ Markov ที่ลดลงไม่ได้และเกิดขึ้นเพียงครั้งคราว และเป็นเซตของจำนวนเต็มลบ เงื่อนไขสองข้อต่อไปนี้จะเพียงพอแล้วที่จะอธิบายว่าห่วงโซ่ของ Markov นั้นเป็นเออร์โกดิกส์

1.  $E[\tilde{Z}_{k+1} - \tilde{Z}_k | (\tilde{Z}_k = i)] < \infty \quad \forall i,$
2.  $\limsup_{i \rightarrow \infty} E[\tilde{Z}_{k+1} - \tilde{Z}_k | (\tilde{Z}_k = i)] < 0$

เห็นได้ชัดว่าห่วงโซ่ของ Markov นั้นเป็นส่วนหนึ่งของนโยบายที่ลดลงไม่ได้และเกิดขึ้นเพียงครั้งคราว สมมติว่า  $\tilde{N}(k) = i$  และ  $i < \theta$  ในกรณีนี้เราต้องให้เห็นว่า เงื่อนไข (a) ของ Pake's Lemma เนื่องจาก  $N(k)$  ไม่สามารถเพิ่มขึ้นจนไม่สิ้นสุดได้ในกรณีนี้ กำหนดให้  $\tilde{N}(k) = i$  เราจะได้

$$\tilde{N}(k+1) = \left( \begin{array}{ll} i-1 & \text{With probability } b_1(i)a_0 \\ i & \text{With probability } [1-b_1(i)]a_0 + b_0(i)a_1 \\ i+1 & \text{With probability } [1-b_0(i)]a_1 \\ i+j, j \geq 2 & \text{With probability } a_j \end{array} \right) \quad (3.23)$$

คำอธิบายของสมการที่ (3.23) ก็คล้ายๆกับของสมการที่(3.12) จากสมการที่ (3.23) เราจะได้

$$\begin{aligned} E[\tilde{N}(k+1) - \tilde{N}(k) | (\tilde{N}(k) = i)] &= E[\tilde{N}(k+1) | (\tilde{N}(k) = i)] - E[\tilde{N}(k) | (\tilde{N}(k) = i)] \\ &= (i-1)b_1(i)a_0 + i\{[1-b_1(i)]a_0 + b_0(i)a_1\} \\ &\quad + (i+1)[1-b_0(i)]a_1 + \sum_{j=2}^{\infty} (i+j)a_j - i \\ &= \sum_{j=2}^{\infty} (i+j)a_j - i - b_1(i)a_0 - b_0(i)a_1 = \lambda - b_1(i)a_0 - b_0(i)a_1 \end{aligned} \quad (3.24)$$

ดังนั้น เงื่อนไข (a) ก็เป็นจริงได้ ถ้า  $\lambda < \infty$

ตอนนี้พิจารณากรณีที่  $\tilde{N}(k) = i$  และ  $i \geq \theta$  ดังเช่นในสมการที่ (3.23) เราจะได้:

$$\tilde{N}(k+1) = \left( \begin{array}{ll} i-1 & \text{With probability } b_1(\theta)a_0 \\ i & \text{With probability } [1-b_1(\theta)]a_0 + b_0(\theta)a_1 \\ i+1 & \text{With probability } [1-b_0(\theta)]a_1 \\ i+j, j \geq 2 & \text{With probability } a_j \end{array} \right) \quad (3.25)$$

ข้างต้นนี้ได้มาจากข้อเท็จจริงที่ว่าผู้ใช้  $\theta$  ส่วนใหญ่จะส่งข้อมูลเมื่อมีการนำนโยบายจูงจูงมาใช้ จากสมการที่ (3.25) เราจึงได้

$$\begin{aligned} E[\tilde{N}(k+1) - \tilde{N}(k) | \tilde{N}(k) = i] & \\ &= (i-1)b_0(\theta)a_0 + i\{[1-b_1(\theta)]a_0 + b_0(\theta)a_1\} \\ &+ (i+1)[1-b_0(\theta)]a_1 + \sum_{j=2}^{\infty} (i+j)a_j - i \\ &= \lambda - b_1(\theta)a_0 - b_0(\theta)a_1 \end{aligned} \quad (3.26)$$

ดังนั้น ทั้งเงื่อนไข (a) และ (b) จะเป็นจริงเมื่อ

$$\lambda < b_1(\theta)a_0 + b_0(\theta)a_1 \quad (3.27)$$

ดังนั้น ถ้า  $\lambda$  พิสูจน์สมการที่ (3.27) ได้เป็นที่พอใจ ระบบก็มีความเสถียรภาพ

สรุปแล้ว เราเห็นว่าจากการจำกัดจำนวนผู้ใช้ที่มีข้อมูลค้างที่พยายามช่วงชิงช่องทางการส่งข้อมูลนั้น ก็เป็นไปได้ที่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ยิ่งไปกว่านั้น เงื่อนไขของอัตราการมาถึงของข้อมูลนั้นสมการที่ (3.27) ทำให้เรารับประกันได้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพได้

เรามาพิจารณานโยบายอีกอันหนึ่งของระบบอะโลฮา ที่ต้องการเพียงการทราบถึงจำนวนผู้ใช้ที่มีแฟ้มเกิดข้อมูลค้างตั้งแต่เริ่มต้นของช่วงเวลาต่างๆ นโยบายนี้อยู่บนพื้นฐานของการประยุกต์ใช้โดยการควบคุมความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลซ้ำ กล่าวให้ชัดเจนขึ้น โดยการสมมติว่าเราทราบจำนวนผู้ใช้ที่มีแฟ้มเกิดข้อมูลค้างแล้ว เราอนุญาตให้ความน่าจะเป็นในการส่งซ้ำ  $v$  นั้นเป็นหน้าที่ของจำนวนนี้ แทนค่าฟังก์ชันนี้โดย  $v(n)$  โดย  $n$  เป็นจำนวนของผู้ใช้ที่มีแฟ้มเกิดข้อมูลค้าง เราจะได้ (ดูสมการที่ (3.11))

$$b_i(n) = \binom{n}{i} [v(n)]^i [1-v(n)]^{n-i} \quad (3.28)$$

สำหรับนโยบายการส่งซ้ำนี้ สมการที่ (3.23) จะพิสูจน์  $i$  และดังนั้น (ดูสมการที่ 3.24)

$$E[\tilde{N}(k+1) - \tilde{N}(k) | (N(k) = i)] = \lambda - b_1(i)a_0 - b_0(i)a_1 \quad \forall i$$

หลังจากนั้น เงื่อนไข (a) และ (b) ของ Pakes' Lemma จะพิสูจน์ได้ ถ้า

$$\lambda < \limsup_{n \rightarrow \infty} [b_1(n)a_0 + b_0(n)a_1] \quad (3.29)$$

ตอนนี้เรามากำหนดจำนวนของ  $\lambda$  กำหนดให้

$$S_n(v) \cong b_1(n)a_0 + b_0(n)a_1 = [1 - v(n)]^n a_1 + nv(n)[1 - v(n)]^{n-1} a_0 \quad (3.30)$$

การแยกความแตกต่างระหว่าง  $S_n(v)$  ตามลำดับของ  $v$  และตั้งค่าของผลให้เป็นศูนย์ เราจะสังเกตเห็นว่า  $S_n(v)$  ได้รับการเพิ่มถึงมากที่สุดเพื่อ

$$v^*(n) = \frac{a_0 - a_1}{na_0 - a_1}$$

ค่าที่มากที่สุดของ  $S_n(v)$  คือ

$$S^*(v^*) = a_0 \left[ \frac{n-1}{n - a_1/a_0} \right]^{n-1}$$

ถ้าจำกัดให้  $n \rightarrow \infty$  (ดูสมการที่ 3.29) เราจะเห็นว่าระบบจะมีเสถียรภาพเมื่อ

$$\lambda < e^{\log a_0 + \frac{a_1}{a_0} - 1}$$

เป็นที่น่าสนใจว่า ถ้ากระบวนการการมาถึงเป็นแบบปัวส์ซองของ  $a_1/a_0 = -\log a_0 = \lambda$  และดังนั้นระบบก็จะมีเสถียรภาพ ถ้า  $\lambda < e^{-1}$  ซึ่งเป็นไปตามที่เราคาดการณ์ไว้ในเรื่องความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูล อย่างไรก็ตาม อย่าลืมว่าระบบอะโลฮา ที่มีค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลค้างคองที่นั่นจะไม่มีเสถียรภาพในเรื่องของอัตราการมาถึงของข้อมูล นโยบายการทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่กล่าวข้างต้นนั้นจำเป็นต้องทราบจำนวนของผู้ใช้ที่มีแพ็กเก็ตข้อมูลค้างและยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่าผู้ใช้จะทราบจำนวนนี้ได้อย่างไร

แต่ก็ยังมียุทธศาสตร์การส่งข้อมูลซ้ำตัวอื่นที่ไม่จำเป็นต้องทราบจำนวนผู้ใช้ที่มีแพ็กเก็ตข้อมูลค้างที่แน่ชัด นโยบายเหล่านี้อยู่บนพื้นฐานของความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลที่ถูกต้องปรับข้อมูลประจำ และเกิดขึ้นซ้ำๆ ในช่วงเวลา ตามที่เกิดขึ้นจริงในช่องเวลานั้นๆ โครงสร้างทั่วไปของนโยบายเหล่านี้ก็คือ

$$v_k = f\left(v_k, \text{feedback of slot } k\right) \quad (3.31)$$

หมายความว่า ความน่าจะเป็นของการส่งซ้ำ (ของผู้ใช้ที่มีข้อมูลค้าง) ในช่วงเวลา  $k + 1$  นั้นบางฟังก์ชันของ  $f$  ในความน่าจะเป็นของการส่งซ้ำของช่วงเวลาก่อนหน้านี้และของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา  $k$  กล่าวโดยสาระสำคัญคือ นโยบายเหล่านี้จะเพิ่มความน่าจะเป็นของการส่งซ้ำเมื่อช่วงเวลาเกิดการว่าง และจะลดลงเมื่อเกิดการชนกัน ตัวอย่างของนโยบายเช่นนี้และการวิเคราะห์นั้นสามารถหาอ่านได้จากงานของ Hajek และ Van Loon [HaL82] นโยบายของสมการที่ 3.31 นั้นพิสูจน์แล้วว่าค่าวิสัยสามารถจะมีเสถียรภาพสูงสุดที่ค่า  $e^{-1}$

กล่าวโดยสรุปแล้ว ข้อดีของโพรโตคอลอะโลฮา ก็คือความเรียบง่ายของมันนั่นเอง อย่างไรก็ตาม โพรโตคอลที่เรียบง่ายจะทำให้ได้ผลที่ไม่มีเสถียรภาพ โพรโตคอลที่จะช่วยทำให้ระบบอะโลฮา มีเสถียรภาพนั้นก็ไม่ใช่เรื่องเรียบง่ายเหมือนโพรโตคอลดั้งเดิม และยังรับประกันค่าวิสัยสามารถของของระบบที่  $e^{-1}$  ส่วนใหญ่ได้เพียงอย่างเดียวอีกด้วย เหตุผลของค่าวิสัยสามารถที่ได้ดำนี้อีกคือ ในนโยบายของการสร้างความมีเสถียรภาพทั้งหมดที่ได้กล่าวไปในบทก่อนนั้น (ยกเว้นนโยบายเรื่องจุดเริ่มต้น) ผู้ใช้ที่มีข้อมูลค้างทุกคนใช้ความน่าจะเป็นในการส่งซ้ำเหมือนกันหมด ในบทต่อไปเราจะได้เห็นว่ามีถ้าผู้ใช้ตัดสินใจทำอะไรลงไปไม่ว่าจะส่งข้อมูลหรือไม่ก็ตาม จะอยู่บนพื้นฐานของเรื่องการส่งซ้ำของตนเองและเรื่องการย้อนกลับ และเป็นไปได้ว่าค่าวิสัยสามารถที่ได้จะมีเสถียรภาพกว่า

### 3.5 การวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกัน(Related Analysis)

ความแตกต่างของสภาพแวดล้อมในการปฏิบัติการของโพรโตคอลแบบอะโลฮา นั้นได้ถูกกล่าวไว้หลายต่อหลายครั้งในงานวิจัยต่างๆ เราพิจารณาเพียงบางส่วนของความแตกต่างนี้ ซึ่งก็คือระบบแบบแบ่งช่วงเวลา และแบบไม่แบ่งช่วงเวลาประชากรที่จำกัดจำนวนและไม่จำกัดจำนวน กลุ่มข้อมูลที่มีความยาวจำกัดและการมาถึงเป็นแบบปัวส์ซอง มีหนังสือบางเล่ม [K175, Tann81, Hay84, Tas86, HaO86, BeG87] ที่ได้กล่าวถึงบางส่วนของเรื่องนี้และเรื่องความแตกต่างในด้านอื่นๆ เรื่องที่เราจะกล่าวต่อไปนี้เป็นเพียงความแตกต่างบางประการที่เราไม่ได้กล่าวถึง นอกจากนี้ เรายังได้กล่าวถึงบทความบางเรื่องที่มีการวัดสมรรถนะอื่นๆมากกว่าค่าวิสัยสามารถของโพรโตคอลอะโลฮาด้วย

#### ความยาวของกลุ่มข้อมูลที่แตกต่างกัน(Variable-Length Packets)

Abramson [Abr77] ได้ทำการศึกษาผลการทำงานของระบบอะโลฮาแบบดั้งเดิม แบบประชากรจำนวนไม่จำกัดโดยใช้ข้อมูลสองกลุ่มที่มีความยาวแตกต่างกัน Furguson [Fer77b] และ Bellini และ Borgonovo [BeB80] ทำการพิจารณาระบบโดยมีการกระจายข้อมูลที่มีความยาวแบบคง

ที่เป็นที่น่าสนใจว่า ระบบได้แสดงให้เห็นว่ามีเพียงกลุ่มข้อมูลที่มีความยาวคงที่เท่านั้นที่จะทำให้เกิดการกระจายข้อมูลได้มากที่สุด

### การกระจายข้อมูลระหว่างการมาถึง(Arbitrary interarrival distribution)

Sant[San80] ทำการศึกษาผลการทำงานของระบบโพรโตคอลอะโลฮาแบบดั้งเดิม ซึ่งการใช้เวลาของข้อมูลระหว่างที่จะมาถึงนั้นโดยสถิติแล้วจะไม่ต้องพึ่งพาอะไรและกระจายตัวได้เหมือนกันทุกกลุ่ม แต่ไม่จำเป็นต้องเป็นแบบเอ็กโพเนนเชียลก็ได้

### การเฝ้าติดตาม(Capture)

สมมติฐานที่ว่าเมื่อไรก็ตามที่มีกลุ่มข้อมูลมากกว่าสองกลุ่มขึ้นไปมาทับซ้อนกันที่ตัวรับข้อมูล แล้วข้อมูลทุกกลุ่มจะสูญหายไปนั้นเป็นความคิดที่มองโลกในแง่ร้ายไปหน่อย สำหรับระบบสัญญาณวิทยุแล้ว ตัวรับอาจจะรับข้อมูลอย่างถูกต้องไม่ได้ แม้ว่าจะมีการทับซ้อนกันหรือไม่ก็ตาม ปรัชญาการณณ์เช่นนี้เรียกว่า การเฝ้าติดตาม และจะเกิดขึ้นอันเป็นผลมาจากลักษณะของระบบสัญญาณวิทยุที่แตกต่างกันออกไป การศึกษาส่วนใหญ่[Abr77, Met76, Sha84, Lee87]จะทำการพิจารณาการเฝ้าติดตามพลังงาน หมายความว่าป็นปรากฏการณ์ที่สัญญาณที่มีความแข็งแกร่งทนทานที่สุดเท่านั้นที่จะทำให้ตัวรับรับได้ถูกต้อง ดังนั้น ถ้ามีข้อมูลกลุ่มเดียวที่มีพลังงานมาก ก็จะได้รับได้ถูกต้องแม้ว่าจะมีการส่งข้อมูลหลายตัวก็ตาม และจะเป็นการเพิ่มการใช้งานของช่องทางได้อีกด้วย งานวิจัยอื่นๆเป็นการศึกษาถึงการเฝ้าติดตามผลกระทบของการหน่วงเวลา(ตัวรับรับกลุ่มข้อมูลได้เนื่องจากมันมาถึงก่อนที่จะทำการส่งข้อมูลอื่นเพียงเล็กน้อยในช่องเวลาเดียวกัน)ของโพรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮา

### ระบบรองรับผู้ใช้ (Buffered Users)

สำหรับระบบบางตัวที่ใช้งานได้จริงนั้น ผู้ใช้อาจสร้างพื้นที่รองรับ สำหรับการรอคิวของข้อมูลที่จะมาถึงที่ผู้ใช้ก็ได้ กรณีของการรองรับเดี่ยวต่อผู้ใช้หนึ่งคนนั้นได้รับการพิจารณาไปแล้วในหัวข้อที่ 3.1.3 เมื่อมีบัฟเฟอร์ที่ จำนวนไม่จำกัดสำหรับผู้ใช้แต่ละคนนั้น การวิเคราะห์ก็จะต้องเป็นไปตามเดิม แม้ว่าจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นก็ตาม เมื่อการรองรับ ของผู้ใช้แต่ละคนมีจำนวนไม่จำกัดนั้น ผู้ใช้ก็ต้องเจอความสับสนเรื่องการต่อคิวเนื่องจากมีอยู่หลายคิวในระบบ กล่าวโดยเฉพาะเจาะจงแล้วก็คือ ความสำเร็จในการส่งข้อมูลของผู้ใช้คนหนึ่งนั้นจะขึ้นอยู่กับกิจกรรมที่ผู้ใช้คนอื่นๆกำลังทำอยู่ Sidi และ Segall[SiS83] ทำการวิเคราะห์เรื่องระบบที่มีผู้ใช้สองคน ส่วน Saadawi และ Ephremides[SaE81] ศึกษาเรื่องผู้ใช้จำนวน  $M$  ส่วนเรื่องระบบเมตริกซ์ นั้นศึกษาโดย Sidi และ Segall[SiS83] ส่วนระบบแบบ non-symmetric นั้นศึกษาโดย Ephremides และ Zhu[EpZ87]

### การจองและการปรับปรุงโพรโตคอล(Reservation and adaptive protocols)

ได้มีการออกแบบเรื่องการจองเพื่อสร้างข้อได้เปรียบของระบบอะโลฮา และ TDMA การดำเนินการของวิธีนี้ได้อธิบายไปในหัวข้อที่ 2.5 ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับเรื่องการจองที่ไม่เกิดปัญหาเท่านั้น ส่วนที่จะกล่าวเพิ่มเติมก็คือการจองโดยต้องมีการแข่งขันกัน หมายความว่า ผู้ใช้ต้องแข่งขันกันทำการจองและคนที่ชนะก็จะส่งข้อมูลได้โดยไม่มีใครรบกวน วิธีนี้มีประสิทธิภาพเนื่องจากเวลาที่ต้องใช้ในการจองนั้นสั้นกว่าที่ต้องใช้ในการส่ง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการจองนั้นเป็นงานวิจัยของ Binder[Bin75] ซึ่งจำเป็นต้องทราบจำนวนผู้ใช้ และปริมาณงานส่วนงานวิจัยของ Crowther และคณะ และ Roberts ที่บอกว่าไม่จำเป็นต้องทราบก็ได้

ได้มีการออกแบบโพรโตคอลอีกแบบหนึ่ง ซึ่งเหมือนกับอะโลฮา แต่ว่าโหนดงานเบากว่า และตามวิธีของ TDMA แล้วนั้น งานหนักจะต้องทำการประยุกต์โพรโตคอลที่จะใช้ให้เหมาะสมกับงานได้

### การหน่วงเวลาและช่วงเวลาระหว่างส่งแพ็กเก็ตข้อมูลออก(Delay and interdeparture times)

Ferguson นำเสนอการวิเคราะห์เรื่องการหน่วงเวลาของโพรโตคอลอะโลฮา และเปรียบเทียบกับ TDMA การล่าช้าของข้อมูลแต่ละกลุ่มและการกระจายตัวของช่วงเวลาระหว่างงานออกสำหรับระบบอะโลฮาที่ต้องใช้ประชากรจำนวนจำกัดโดยมีบัฟเฟอร์เดี่ยวสำหรับผู้ใช้แต่ละคนนั้น ได้มาจาก[Tob82b]ส่วนการศึกษาเรื่องช่วงเวลาระหว่างงานออกของโพรโตคอลอะโลฮานี้อยู่ใน [TaK85b]

### ความมีเสถียรภาพ(Stability)

ประเด็นเรื่องความไม่มีเสถียรภาพของโพรโตคอลอะโลฮานั้นได้รับการกล่าวถึงครั้งแรกใน [CaH75] และ [LaK75] จากนั้นได้มีการพูดถึงเรื่องประมาณเดี่ยวนั้นแต่เป็นโพรโตคอลตระกูล CSMA ใน [ToK77] รายงานฉบับอื่นที่พูดถึงเรื่องนี้ก็จะมี[Jen80, MeL83, OnN85]

เสถียรภาพของโพรโตคอลสำหรับระบบอะโลฮา จากสมการที่ 3.31 นั้นได้รับการเสนอแนะไว้ในการศึกษาหลายเรื่องด้วยกัน ตัวอย่างเช่น Kelly[Kel85] นำเสนอกฎเกณฑ์เพิ่มเติมในการอธิบายเรื่อง  $V_{k+1}$  (ตรงข้ามกับกฎอีกหลายกฎที่นำเสนออยู่ใน [HaL82]) กฎอีกข้อหนึ่งที่รู้จักกันดีในนามของ Pseudo - Bayesian ได้รับการเสนอแนะไว้ใน [Riv87] และวิเคราะห์ใน [Tsi87]

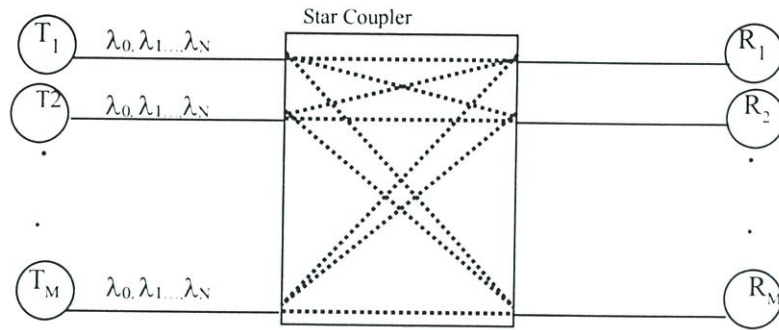
การดำเนินการของอัลกอริทึมที่มีเสถียรภาพนั้นขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ได้รับจากช่วงเวลาต่างๆ (ดูจากสมการที่ 3.31) ดังนั้น ถ้าข้อมูลที่ได้รับเชื่อถือไม่ได้แล้วละก็ อัลกอริทึมนี้ก็จำเป็นต้องได้รับการปรับเปลี่ยนตามที่อธิบายไว้ใน [meK85]

## บทที่ 4

# การวิเคราะห์ โพรโตคอลสื่อตอละโหลสลแบบหลยช่องสัญญาณใน การส่งข้อมูลความเร็วสูงสำหรับระบบสตาร์ LAN โยแ้วนำแสง

### 4.1 บทนำ

ในปัจจุบันนี้การสื่อสารข้อมูลต่างก็มุ่งเน้นไปในการพัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในด้านต่างๆให้ดีขึ้น และหนึ่งในวิธีการที่พัฒนามาใช้งานก็คือโยแ้วนำแสงซึ่งโยแ้วนำแสงได้นำเข้ามาพัฒนาใช้กับระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์แบบจุดต่อจุดในระยะทางไกลในระบบต่างๆได้เป็นอย่างดี ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายคอมพิวเตอร์ที่ใช้ตัวนำที่เป็นทองแดงแล้วจะเห็นได้ว่าโครงข่ายที่ใช้โยแ้วนำแสงจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการพัฒนา ก็จะมุ่งไปที่การพัฒนายโยแ้วนำแสงเข้ามาใช้แทนสายนำสัญญาณที่เป็นทองแดง แต่อย่างไรก็ตาม ความจุของระบบยังถูกจำกัดด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นตัวประมวลผลในแต่ละสถานีอยู่ดี และยังมีการใช้ช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวต่อผู้ใช้ที่เข้ามาร่วมใช้หลายคนทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง ดังนั้นการเพิ่มความจุของระบบจึงเป็นเรื่องที่สำคัญและการเพิ่มความจุของระบบนั้นก็ สามารถที่จะทำได้โดยอาศัยการมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (WDM) [5] , [7] เนื่องจากแบนด์วิธของโยแ้วนำแสงนั้นมีขนาดใหญ่มากมันจึงถูกแบ่งออกเป็นเซตของช่องสัญญาณ ความเร็วสูงได้หลยช่องสัญญาณ(ประมาณ 1Gb/s) และเมื่อสัญญาณแสงผ่านเข้าไปใน WDM อุปกรณ์WDMก็จะทำหน้าที่ในการกระจายสัญญาณแสงให้เป็นช่องสัญญาณความเร็วสูงที่ขนานกัน อยู่โดยแต่ละช่องที่ถูกแบ่งออกมานั้นก็จะแบ่งโดยอาศัยความยาวของคลื่นแสง เนื่องจากช่อง สัญญาณที่ขนานกันอยู่นั้นเองที่ทำให้การส่งสัญญาณข้อมูลในแต่ละครั้งส่งได้ทีละหลยช่อง สัญญาณและหลยคู่สายในเวลาเดียวกันจึงเป็นผลให้ความจุของระบบเพิ่มขึ้นนั่นเองสำหรับใน ระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์แบบ LAN ที่ถูกนำมาพิจารณานั้นโดยส่วนมากแล้วก็จะมีสองระบบที่ นิยมใช้กันก็คือ โครงข่ายคอมพิวเตอร์แบบบัส และแบบสตาร์ แต่อย่างไรก็ตามในการส่งสัญญาณ นั้นระบบสตาร์ จะรองรับกับจำนวนผู้ใช้ได้มากกว่าแบบบัสและในบทความนี้จะนำโครงข่าย คอมพิวเตอร์แบบสตาร์ มาใช้ในการวิเคราะห์ระบบด้วยและประเด็นหลักของระบบสตาร์ ก็คือ M x M Optical Star Coupler ซึ่งจะเป็นอุปกรณ์คัปเปลอร์แบบพาสซีฟ ในอุดมคตินั้นอุปกรณ์คัปเปลอร์แบบพาสซีฟนี้เมื่อพลังงานแสงผ่านเข้ามาที่พอร์ตอินพุต M ใดๆ พอร์ตใดพอร์ตหนึ่งหรือ หลยๆพอร์ตมันจะทำการแบ่งพลังงานแสงนั้นออกไปยังพอร์ตต่างๆในปริมาณพลังงานแสงที่เท่า กันทุกพอร์ต สำหรับในระบบ LAN นั้น MxM Optical Star Coupler จะเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อ ระหว่างผู้ส่งหลยคนกับผู้รับหลยๆคน โดยผู้ส่งนั้นจะมีโยแ้วนำแสงต่อจาก



รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างทั่วไปของ Optical Star Network

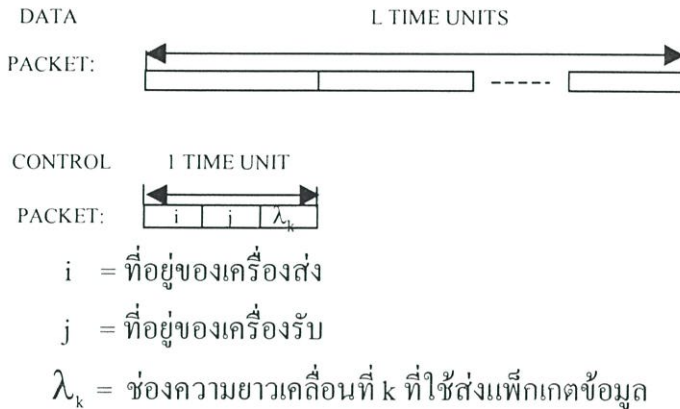
ผู้ส่งมายังพอร์ตอินพุทของ  $M \times M$  Optical Coupler และทางพอร์ตเอาต์พุทของมันก็จะต่อกับใยแก้วนำแสงต่อไปยังเครื่องรับของผู้รับโดยตรงดังรูปที่ 4.1 โดยที่โหนดของผู้ใช้งานในแต่ละโหนดนั้นจะมีเครื่องรับและเครื่องส่งที่สามารถปรับความยาวคลื่นได้ดังที่แสดงในรูปที่ 1  $T_M$  คือเครื่องส่งที่ปรับค่าได้,  $R_M$  คือเครื่องรับที่สามารถปรับความยาวคลื่นได้ เมื่อผู้ส่งต้องการส่ง แพ็กเก็ตข้อมูลก็จะส่งผ่าน WDM เพื่อทำการกระจายพลังงานแสงในปริมาณที่เท่าๆกันไปยังผู้ใช้คนอื่นๆทั้งหมด และในเครื่องรับของผู้ใช้คนอื่นๆนั้นจะมีตัวกรองแสงอยู่ภายในตัวมันด้วยเพื่อทำหน้าที่ในการกรองเอาความยาวคลื่นที่มันต้องการออกจากสัญญาณที่ส่งมาทั้งหมดนั้น

ในระบบ LAN นั้นเมื่อมีผู้ใช้งานขึ้นของสัญญาณก็เพิ่มขึ้น โพรโตคอลที่ใช้ในการประสานงานจึงกลายเป็นสิ่งที่จำเป็น ในบทความฉบับนี้ได้นำโพรโตคอล แบบสล็อตอะโลฮา มาใช้ในการวิเคราะห์ระบบ ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

#### 4.2 โครงสร้างของโครงข่ายคอมพิวเตอร์ใยแก้วนำแสง แบบหลายช่องสัญญาณ

จากโครงสร้างของระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์ที่ถูกนำเสนอใน [4] และในรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของระบบ LAN ใยแก้วนำแสง และแบนด์วิดท์ของใยแก้วนำแสงจะถูกแบ่งเป็น  $N + 1$  ช่อง โดยการใช้ WDM และในแต่ละช่องก็จะมี ความยาวคลื่นเฉพาะของมัน แต่ละช่องก็จะมี ความยาวที่แตกต่างกันด้วยในระบบ LAN แบบหลายช่องสัญญาณนี้ก็จะ มีช่องสัญญาณ  $\lambda_0$  ถูกกำหนดให้เป็นช่องที่ใช้ส่งสัญญาณควบคุมกราฟฟิกทั้งหมดและช่องสัญญาณ  $N$  ใดๆ ก็จะมี ความยาวคลื่นคือ  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$  ประจำช่องสัญญาณนั้นๆ ซึ่งจะใช้เป็นช่องในการส่งกราฟฟิกข้อมูลจริง สมมติว่ามีผู้ที่ต้องการส่งหรือรับแพ็กเก็ตข้อมูลบนช่องสัญญาณใดๆ ช่องหนึ่ง ผู้ส่งจะต้องส่งแพ็กเก็ตควบคุม แจ้งไปยังผู้รับก่อนว่าจะส่งข้อมูลไปหาผู้ส่งคนไหน, ส่งในช่องสัญญาณใด เพื่อที่ผู้รับจะได้ทำการปรับเครื่องรับให้รับเฉพาะความยาวคลื่นนั้นๆ ไปทำการถอดรหัสเอาสัญญาณที่ต้องการออกมา เนื่องจากว่าในระบบ LAN นั้นมีผู้ใช้หลายคนแต่จำนวนช่องสัญญาณมีจำกัด ดังนั้นการใช้ช่องสัญญาณจึงต้องอยู่บนพื้นฐานการแข่งขันกันในการครอบครอง

ช่องสัญญาณควบคุม( $\lambda_0$ ) และช่องสัญญาณส่งข้อมูล ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ ) โดยใน แพ็กเก็ตควบคุมนั้น จะประกอบไปด้วยที่อยู่ของผู้ส่ง , ที่อยู่ของผู้รับและช่องความยาวคลื่นที่ถูกนำมาใช้ สำหรับส่งข้อมูล และสำหรับความยาวของแพ็กเก็ตควบคุมนั้นจะมีความยาวที่น้อยกว่าความยาวของแพ็กเก็ตข้อมูลมาก ( ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ) ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อสล็อตอะโลฮา



รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างรูปแบบของแพ็กเก็ตข้อมูลและแพ็กเก็ตควบคุม

ในโหมดการรับถ้าเครื่องรับของผู้ใช้วางเครื่องรับนั้นจะถูกปรับไปที่ช่องสัญญาณควบคุม ( $\lambda_0$ ) เพื่อคอยติดตามตำแหน่งที่อยู่ของมันที่จะถูกส่งมาจากผู้ใช้คนอื่นๆ โดยมันจะรู้โดยอัตโนมัติว่าอันไหนเป็นตำแหน่งแอดเดรสของมัน ถ้าเราสมมติค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดของทราฟฟิกที่ขอใช้บริการของผู้ใช้จำนวน  $M$  คน ต่อช่องสัญญาณควบคุม คือ  $G$  โดยมีการกระจายทราฟฟิกที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ซึ่งจะหมายความว่าทราฟฟิกขอบริการในแต่ละช่องสัญญาณข้อมูล ก็คือค่าเฉลี่ยของ  $G_T = (L / N)$

ในทางปฏิบัตินั้นผู้ใช้ที่อยู่ในระบบ LAN จะใช้วิธีการแข่งขันกันในการส่งแพ็กเก็ตควบคุมและแพ็กเก็ตข้อมูลของพวกเขา แต่ถึงอย่างไรก็ดี แต่ละสถานีนั้นจะไม่สนใจแพ็กเก็ตควบคุมของผู้ใช้คนใดเลย ถ้าขณะเวลานั้นสถานีกำลังทำการรับหรือส่งแพ็กเก็ตอยู่ เนื่องจากว่าในแต่ละผู้ใช้ไม่มีการประสานงานซึ่งกันและกันระหว่างผู้ใช้เอง จึงทำให้ผู้ใช้แต่ละคนนั้น ไม่ทราบสถานะของผู้ใช้คนอื่นๆเลยจึงทำให้ผู้ใช้ส่งแพ็กเก็ตตามความต้องการของเขาเอง คือต้องการส่งก็ส่งซึ่งเขาไม่รับรู้เลยว่าที่เครื่องรับของผู้รับนั้นกำลังยุ่งกับการรับแพ็กเก็ตจากผู้ใช้คนอื่นๆอยู่ ดังนั้นจึงเกิดการชนกันของแพ็กเก็ตขึ้น เมื่อเกิดการสูญเสียไปก็จะต้องทำการส่งแพ็กเก็ตเก่าซ้ำใหม่จนกว่ามันจะส่งสำเร็จ ซึ่งอาจจะชนกันหลายๆครั้ง ในบทความฉบับนี้เราจะไม่สนใจในเรื่องของการชนกันของแพ็กเก็ตโดยเราจะสมมติว่าแพ็กเก็ตเก่าที่ถูกส่งซ้ำใหม่ก็คือแพ็กเก็ตใหม่ไปเลย ในบทความนี้ก็จะกำหนดสัญลักษณ์ ตัวอักษรขึ้นมาเพื่อแทนความหมายต่างๆดังนี้

- $N$  = จำนวนของช่องส่งสัญญาณข้อมูลในระบบ
- $L$  = ความยาวของแพ็กเก็ตข้อมูล
- $G_T$  = ค่าเฉลี่ย จำนวนของแพ็กเก็ตควบคุมที่ถูกส่งต่อ สล็อตบนช่องสัญญาณควบคุม
- $G_d$  = ค่าเฉลี่ย จำนวนของแพ็กเก็ตข้อมูลที่ถูกส่งต่อ สล็อตบนช่องสัญญาณข้อมูล
- $P_c$  = ความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จของการส่งแพ็กเก็ตควบคุมบนช่องสัญญาณควบคุมในสล็อตควบคุม
- $P_d$  = ความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จของการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลบนช่องสัญญาณข้อมูลในสล็อตข้อมูล ซึ่งจะต้องสอดคล้องกับความสำเร็จของการส่งแพ็กเก็ตควบคุมบนมินิสล็อตด้วย
- $P_s$  = ความน่าจะเป็นทั้งหมดที่จะประสบความสำเร็จของแพ็กเก็ตข้อมูลในไซเคิล(อาจจะขึ้นอยู่กับ  $P_c$  และ/หรือ  $P_d$ )
- $P_r$  = ความน่าจะเป็นที่แพ็กเก็ตเก่าจะถูกส่งซ้ำใหม่ในไซเคิล
- $S_d$  = ค่าวิสัยสามารถ ต่อ ช่องสัญญาณข้อมูล
- $R$  = จำนวนค่าเฉลี่ยของการส่งแพ็กเก็ตเก่าซ้ำใหม่ =  $1/(1-Pr)$  (ใน  $R-1$  คือความพยายามส่งแต่ไม่สำเร็จ และลบการส่งครั้งสุดท้ายออกเพราะประสบความสำเร็จในการส่ง)
- $T$  = ความยาวของไซเคิล
- $t_r$  = ความยาวเฉลี่ยของคาบเวลาในการส่งใหม่
- $d_w$  = ค่าเฉลี่ยเวลาของแพ็กเก็ตที่มันรอตั้งแต่แพ็กเก็ตถูกสร้างขึ้นจนถึงเวลาเริ่มของไซเคิล ถัดไป
- $d_r$  = ค่าเฉลี่ยรวมที่ถูกหน่วงเวลาในการส่งแพ็กเก็ตเก่าซ้ำใหม่  
=  $(R-1)$ คูณด้วยค่าเฉลี่ยของเวลาที่ถูกหน่วงในการส่งใหม่ ต่อความพยายามแต่ไม่สำเร็จ
- $d_t$  = ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ส่งข้อความ

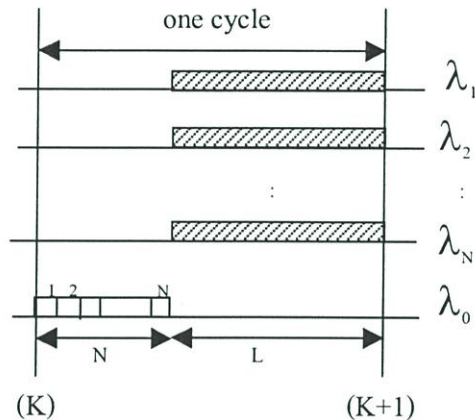
### 4.3 โพรโทคอลสล็อตอะโลฮาแบบหลายช่องสัญญาณ

โพรโทคอลสล็อตอะโลฮาเป็นโพรโทคอลอีกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในระบบ LAN เนื่องจากว่าโพรโทคอลแบบสล็อตอะโลฮาจะให้ค่าวิสัยสามารถที่ดีกว่าโพรโทคอลอะโลฮาที่ไม่มีสล็อตเมื่อเปรียบเทียบในสภาพแวดล้อมที่เหมือนกัน และในระบบ LAN แบบหลายช่องสัญญาณนั้นทั้งช่องสัญญาณควบคุมและช่องสัญญาณข้อมูลสามารถที่จะถูกแบ่งเป็นสล็อตได้ จาก [1] เราจะนำกรณีที่ 1 ,กรณีที่ 2 และกรณีที่ 6 ของ [1] มาทำการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

#### ก. กรณีที่ 1

โครงสร้างของสล็อตอะโลฮาดังในรูปที่ 4.3 นั้นจะเห็นว่าทั้งช่องสัญญาณควบคุม ( $\lambda_0$ ) และช่องสัญญาณข้อมูล ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ ) จะถูกแบ่งเป็นช่วงเวลาโดยการใช้เวลาอ้างอิงเดียวกันและ

ในช่อง  $i$  ช่วงเวลานี้เราเรียกว่า “ไซเคิล” ในแต่ละไซเคิลนั้นช่องสัญญาณควบคุมจะถูกแบ่งออกเป็นสล็อตเล็กๆอีก จำนวน  $N$  สล็อต ซึ่ง  $N$  ในที่นี้ก็คือจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลนั่นเอง จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าในช่วงเวลาของช่องสัญญาณควบคุมนั้น ในช่องสัญญาณข้อมูลจะไม่มีสล็อตของข้อมูลเลยเพราะว่าสล็อตของข้อมูลจะเริ่มหลังจากสล็อตที่  $N$  ของช่องสัญญาณควบคุมได้เสร็จสิ้นลงแล้วเท่านั้นสล็อตของข้อมูลจึงจะเริ่มขึ้นทันที หลักการทำงานของโพรโตคอลในกรณีนี้คือ เมื่อผู้ใช้ต้องการที่จะส่งแพ็คเกจข้อมูล ผู้ใช้จะต้องเลือกช่องสัญญาณข้อมูลที่จะใช้ในการส่งก่อนที่จะทำการส่ง



รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของสล็อตอะโลฮาสำหรับกรณีนี้

และเมื่อเลือกช่องสัญญาณเสร็จเราก็จะกำหนดบิตมินิสล็อตของช่องสัญญาณ นั่นคือเมื่อ ผู้ใช้ต้องการที่จะส่งในไซเคิล  $[K, K+1]$  บนช่องสัญญาณข้อมูล 'i' ผู้ใช้ก็จะส่งแพ็คเกจควบคุมบนช่องมินิสล็อตที่ 'i' ของช่องสัญญาณควบคุมและจะส่งแพ็คเกจข้อมูลหลังจาก มินิสล็อต  $N$  ของช่องสัญญาณข้อมูลได้เสร็จสิ้นลงเนื่องจากว่าได้มีการกำหนดจำนวนมินิสล็อตของสล็อตควบคุมในแต่ละไซเคิลไว้แน่นอนตายตัวดังนั้นเมื่อทำการส่งแพ็คเกจควบคุมไปในช่องสัญญาณควบคุมและประสบความสำเร็จในการส่งแพ็คเกจควบคุมและแพ็คเกจข้อมูลที่ส่งตามไปก็จะประสบความสำเร็จในการส่งด้วยแต่ก็ไม่ใช่ว่าการส่งแพ็คเกจควบคุมจะประสบความสำเร็จในการส่งตลอดเวลาเพราะในระบบก็มีผู้ใช้คนอื่นๆที่ส่งแพ็คเกจควบคุมออกมาเหมือนกันดังนั้นผู้ใช้จะต้องแข่งขันกันเพื่อที่จะส่งแพ็คเกจควบคุมให้ได้แต่ถ้าผู้ใช้คนใดไม่ประสบความสำเร็จในการส่งแพ็คเกจควบคุมผู้ใช้คนนั้นก็ทำการส่งใหม่ไปเรื่อยๆจนกว่าจะประสบความสำเร็จ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการที่จะส่งแพ็คเกจข้อมูลให้ประสบความสำเร็จได้ก็ขึ้นอยู่กับความสำเร็จในการส่งแพ็คเกจควบคุมเป็นหลัก ซึ่งก็หมายความว่า  $P_r$  จะขึ้นอยู่กับ  $P_c$  เพียงเท่านั้นซึ่งในกรณีนี้และโพรโตคอลทั้งหมดที่กล่าวถึงใน [1] นั้นเมื่อทำการพิจารณาที่เวลาที่ถูกรวมทั้งหมดในการส่งแพ็คเกจตั้งแต่แหล่งกำเนิดไปจนถึงปลายทางนั้นจะประกอบด้วยเวลา 3 ส่วนด้วยกัน ช่วงเวลาที่ 1 คือช่วงเวลาเฉลี่ย ( $d_w$ ) ของ

แพ็กเก็ตซึ่งจะเริ่มตั้งแต่เวลาที่แพ็กเก็ตถูกสร้างขึ้นที่สถานีจนกระทั่งถึงเวลาที่เริ่มต้นของไซเคิลถัดไป องค์ประกอบตัวที่สอง คือ ช่วงเวลาที่ถูกหน่วงทั้งหมดในการส่งแพ็กเก็ตซ้ำอีกครั้ง ( $d_r$ ) นั่นคือเวลาหน่วงทั้งหมดรวมไปถึงเวลาที่พยายามส่งแต่ไม่ประสบความสำเร็จ ( $R-1$ ) สำหรับเวลาหน่วงในแต่ละความพยายามส่งแต่ไม่ประสบความสำเร็จจะรวมเวลาในการส่งแพ็กเก็ตและเวลาหน่วงในช่วงการส่งซ้ำด้วย (back-off delay) องค์ประกอบของเวลาส่วนที่ 3 คือ ส่วนของช่วงเวลาที่กำลังทำการส่งของแพ็กเก็ตที่ประสบความสำเร็จ ( $d_s$ ) ดังนั้นเวลาหน่วงรวมทั้งหมดก็คือ ผลรวมของช่วงเวลาทั้งสามที่กล่าวมานั่นเอง ในบทความนี้เราจะไม่นำช่วงเวลา back off มาคิดเนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่น้อยมากจึงสามารถที่จะตัดทิ้งได้

ในที่นี้  $G_T$  คือค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดของจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกขอใช้บริการต่อ ช่องสัญญาณควบคุม (มินิสล็อต) และในกรณีนี้สำหรับแต่ละแพ็กเก็ตควบคุมที่ถูกขอใช้บริการนั้นจะมีแพ็กเก็ตข้อมูลเพียง 1 แพ็กเก็ตดังนั้น

$$G_d = G_T \quad (4.1)$$

$$P_c = e^{-G} = (1 - P_r)$$

$$P_c = 1 \text{ (เมื่อแพ็กเก็ตควบคุมประสบความสำเร็จและแพ็กเก็ตข้อมูลก็ประสบความสำเร็จในการส่งด้วย)}$$

$$P_s = P_c \cdot P_d = e^{-G} \quad (4.2)$$

$$S_d = G_d \cdot P_s = Ge^{-G} \quad (4.3)$$

$$S_1 = \text{ค่าเฉลี่ยจำนวนของแพ็กเก็ตที่ส่งสำเร็จต่อไซเคิล}$$

$$S_1 = \frac{L}{L+N} S_d = \frac{L}{L+N} Ge^{-G} \quad (4.4)$$

$$R = \text{ค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกส่งซ้ำใหม่}$$

$$R = \frac{1}{1 - P_r} = e^G \quad (4.5)$$

$$T = \text{ช่วงเวลาของไซเคิล}$$

$$T = L + N$$

$$d_w = T / 2 \quad ; \quad d_r = (R - 1) \cdot (T + t_r) \quad ; \quad d_t = T$$

$$D_1 = \text{ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ถูหน่วง}$$

$$D_1 = d_w + d_r + d_t$$

$$D_1 = \frac{T}{2} + (R - 1) \cdot (T + t_r) + T$$

$$D_1 = (L + N) \cdot e^G + \left( \frac{L + N}{2} \right) + (R - 1)t_r \quad (4.6)$$

### ข. กรณีที่ 2

สำหรับในกรณีนี้เป็นการขยายวิธีการในกรณีที่ 1 คือทั้งช่องสัญญาณควบคุมและช่องสัญญาณข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็นช่วงเวลา ( สล็อต ) ซึ่งมีความยาวของแต่ละช่องเวลาคือ  $L$  ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และในส่วนของช่องสัญญาณควบคุม ( $\lambda_0$ ) จะถูกแบ่งออกเป็นช่องเล็กๆ เรียกว่า มินิสล็อต โดยจะถูกแบ่งออกเป็น  $N$  มินิสล็อตและถูกกำหนดหน้าที่ของแต่ละมินิสล็อตทั้งหมด เช่นเดียวกับกับกรณีที่ 1 นั่นคือถ้าผู้ใช้พร้อมที่จะส่งแพ็กเก็ตเกิดในไซเคิล  $[K-2, K-1]$  และต้องการที่จะส่งแพ็กเก็ตเกิดในช่องสัญญาณข้อมูล 'i' ผู้ใช้จะต้องส่งแพ็กเก็ตควบคุมบนมินิสล็อต 'i' ของช่องสัญญาณควบคุมในไซเคิล  $[K-1, K]$  และหลังจากนั้นแพ็กเก็ตข้อมูลของผู้ใช้ก็จะถูกส่งไปบนช่องสัญญาณข้อมูล 'i' ในไซเคิล  $[K, K+1]$  และในการวิเคราะห์นั้นก็เหมือนกรณีที่ 1 นั่นคือค่าวิสัยสามารถ และค่าหน่วงเวลาจะหาได้จาก

$$S_2 = S_d = Ge^{-G} \quad (4.7)$$

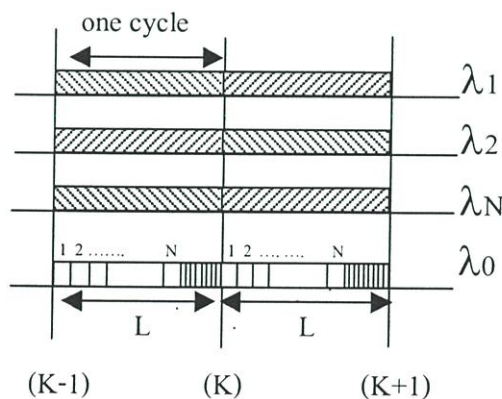
$$R = e^G \quad ; T = L$$

$$D_w = T / 2 \quad ; d_r = (R - 1) \cdot (2T + t_r) \quad ; d_t = 2T$$

$$D_2 = \text{ค่าเฉลี่ยของการหน่วงเวลา}$$

$$= d_w + d_r + d_t$$

$$= 2L \cdot e^G + \frac{L}{2} + (R - 1) \cdot t_r \quad (4.8)$$



รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างของสล็อตอะโลสสำหรับกรณีที่ 2

### ค. กรณีที่ 3

ในกรณีนี้ในแต่ละช่องมันจะมีไซเคิลเป็นของมันเองอยู่แล้ว และในแต่ละไซเคิลก็จะมีช่วงเวลา  $L+1$  ซึ่ง  $L$  คือความยาวของแพ็กเก็ตข้อมูล 1 คือ ความยาวของมินิสล็อตของช่องสัญญาณควบคุม ( $\lambda_0$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยไซเคิล 'i' ก็จะแทนไซเคิล 'i' ของช่องสัญญาณ 'i' ด้วย

ซึ่งถ้าผู้ใช้มีแพ็กเก็ตข้อมูลที่จะส่งอันดับแรกเลยคือผู้ใช้จะต้องเลือกช่องสัญญาณข้อมูลที่จะส่งก่อน และก็จะคอยจังหวะเริ่มต้นของไซเคิลของช่องที่ทำการเลือกและมันก็จะส่งแพ็กเก็ตควบคุมออกไป ในจังหวะนั้นและมันก็จะส่งแพ็กเก็ตข้อมูลตาม ไปในทันทีเลยบนช่องสัญญาณข้อมูลของมันเลือกแล้ว ก่อนหน้านั้นนั่นเอง และมันก็จะมียางแพ็กเก็ตที่ส่งไปแล้วไปชนกับแพ็กเก็ตอื่นทำให้การส่งไม่ สำเร็จมันก็จะทำการส่งแพ็กเก็ตนั้นซ้ำใหม่ ซึ่งในที่นี้เราจะไม่กำหนดการส่งซ้ำใหม่ นั่นคือถ้าผู้ใช้ทำ การส่งแพ็กเก็ตแต่ไม่สำเร็จในไซเคิลปัจจุบันที่ส่งอยู่ผู้ใช้คนนั้นก็ควรจะทำ การเลือกช่องสัญญาณ ข้อมูลอื่นๆ อันใดก็ได้และก็พยายามทำการส่งแพ็กเก็ตนั้นใหม่อีกครั้งในไซเคิลถัดไป แต่ในวิธีการ แบ่งสล็อตที่ถูกนำมาใช้ในโพรโตคอลนี้ เราจะสมมติว่าการส่งใหม่อีกครั้งนั้นจะทำบนช่องสัญญาณ เดิมที่ได้ทำการเลือกแล้วก่อนที่มันจะส่งไม่สำเร็จก่อนหน้าด้วยโดยมันจะส่งไปเรื่อยๆจนกว่าจะ ประสบความสำเร็จในการส่งในช่องสัญญาณนั้นซึ่งในกรณีนี้สำหรับแต่ละช่องนั้นเราจะวิเคราะห์ ดังนี้

$$G_d = G_T \quad (4.9)$$

$$P_c = e^{-G} \quad \text{และ} \quad P_d = 1$$

$$P_s = e^{-G} = (1 - P_r) \quad (4.10)$$

$$S_d = Ge^{-G}$$

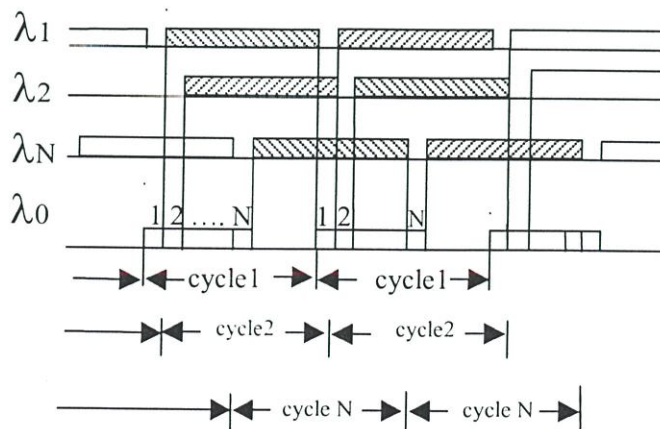
$$S_3 = \frac{L}{L+1} S_d = \frac{L}{L+1} Ge^{-G} \quad (4.11)$$

$$R = e^G \quad ; \quad T = L + 1$$

$$d_w = T / 2 \quad ; \quad d_r = (R - 1) \cdot (T + t_r) \quad ; \quad d_t = (L + 1)$$

$D_3$  = ค่าเฉลี่ยของการหน่วงเวลา

$$D_3 = e^G \cdot (L + 1) + \left( \frac{L + 1}{2} \right) + (R - 1) \cdot t_r \quad (4.12)$$



รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างของสล็อตอะโลฮาสำหรับกรณี 3

#### 4.4 โพรโตคอลสล็อตอะโลฮาที่ถูกปรับปรุง

เนื่องจากว่าโพรโตคอลมีหลายชนิดดังแสดงใน [ 6 ] ในที่นี้แพ็กเก็ตข้อมูลจะถูกส่งก็ต่อเมื่อแพ็กเก็ตควบคุมที่อยู่บนช่องสัญญาณควบคุมถูกส่งไปและประสบความสำเร็จในการส่งแล้วเท่านั้น ซึ่งถ้าแพ็กเก็ตควบคุมไม่ประสบความสำเร็จมันก็จะไม่ส่งแพ็กเก็ตข้อมูลออกไป ซึ่งก็เป็นการช่วยในการลดค่าหน่วงเวลาลงได้ด้วย ในเมื่อ  $G_r$  เป็นค่าเฉลี่ยของจำนวนแพ็กเก็ตควบคุมที่ถูกส่งต่อช่องสัญญาณควบคุม สมมติให้  $Ge^{-G}$  แพ็กเก็ตเป็นแพ็กเก็ตที่จะขอใช้บริการช่องสัญญาณข้อมูลต่อช่องสัญญาณควบคุมทุกๆช่อง

##### ก. กรณีที่ 1

ในกรณีนี้ถ้าแพ็กเก็ตควบคุมถูกส่งสำเร็จก็หมายความว่าแพ็กเก็ตข้อมูลก็จะถูกส่งสำเร็จด้วยเช่นกัน ไม่ว่าจะส่งในช่องใดๆ ก็ตามระหว่างช่องที่ 1 ถึง N และจะมีค่าเฉลี่ยเวลาในการส่งแพ็กเก็ตควบคุมเท่ากับ  $(N + 1) / 2$  ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} G_d &= Ge^{-G} \\ P_s &= P_d = 1 \\ P_c &= e^{-G} = (1 - P_r) \\ S_d &= G_d \cdot P_s = Ge^{-G} \\ S_1 &= \frac{L}{L+N} Ge^{-G} \text{ ซึ่งจะเหมือนกับสมการ (4.4)} \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} R &= \text{ค่าเฉลี่ยในการส่ง} = \frac{1}{1 - P_r} = e^G \\ T &= (L + N) \quad ; d_w = T / 2 \\ d_r &= (R - 1) \cdot \left( \frac{N + 1}{2} + t_r \right) \quad ; d_t = T \\ D_1 &= (L + N) + \frac{L + N}{2} + (R - 1) \cdot \left( \frac{N + 1}{2} + t_r \right) \end{aligned} \quad (4.14)$$

##### ข. กรณีที่ 2

สำหรับในกรณีนี้จะได้

$$\begin{aligned} P_s &= P_d = 1 \\ P_c &= e^{-G} = (1 - P_r) \\ S_2 &= Ge^{-G} \\ R &= e^G \quad ; T = L \quad ; dw = T / 2 \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned}
 d_r &= (R - 1) \cdot \left( \frac{N + 1}{2} + t_r \right) \\
 d_l &= 2T \\
 D_2 &= 2L + \frac{L}{2} + (R - 1) \cdot \left( \frac{N + 1}{2} + t_r \right) \quad (4.16)
 \end{aligned}$$

ค. กรณีที่ 3

เนื่องจากว่าในกรณีที่ 3 ของหัวข้อที่ผ่านมาเราจะทำการสมมติว่าถ้าผู้ใช้มีแพ็คเกจข้อมูลที่จะส่ง ผู้ใช้คนนั้นจะต้องเลือกช่องสัญญาณที่จะใช้ในการส่งมาหนึ่งช่องของจำนวน  $N$  ช่องทั้งหมดช่องใดก็ได้เลือกมาหนึ่งช่องและผู้ใช้ก็จะใช้ช่องสัญญาณที่เลือกมานี้ ในการส่งข้อมูลจนกว่าจะส่งสำเร็จโดยจะไม่มี การเปลี่ยนช่องไปช่องอื่น ส่วนในกรณีหัวข้อนี้มันจะส่งแพ็คเกจข้อมูลก็ต่อเมื่อแพ็คเกจควบคุมที่มันส่งไปประสบความสำเร็จแล้วเท่านั้น ซึ่งจะได้  $G_d = Ge^{-G}$  และ  $P_s = P_d = 1$ ,

$P_c = e^{-G} = (1 - P_r)$  ดังนั้นสำหรับแต่ละช่องก็จะได้

$$S_d = Ge^{-G}$$

$$T = L + 1 \quad ; \quad R = e^G$$

$$S_3 = \frac{L}{L + 1} \cdot S_d = \frac{L}{L + 1} \cdot Ge^{-G}$$

(4.17)

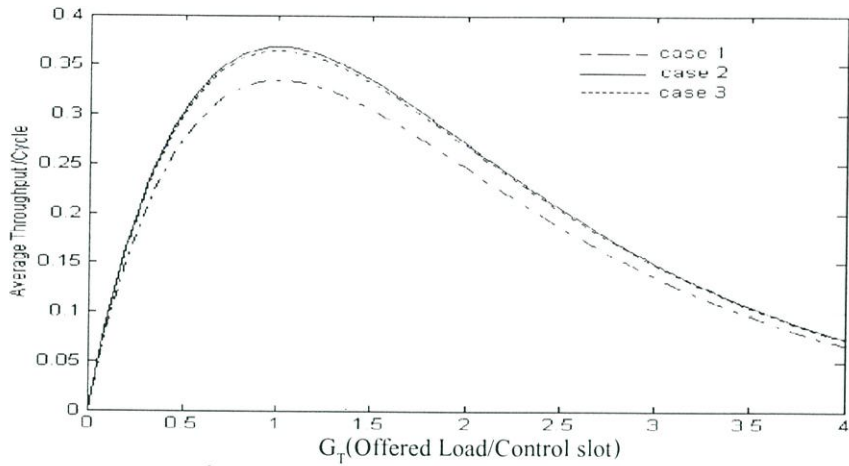
$$d_w = T / 2 \quad ; \quad d_r = (R - 1) \cdot (1 + t_r) \quad ; \quad dt = (L + 1)$$

$$D_3 = (L + 1) + \frac{L + 1}{2} + (R - 1) \cdot (1 + t_r) \quad (4.18)$$

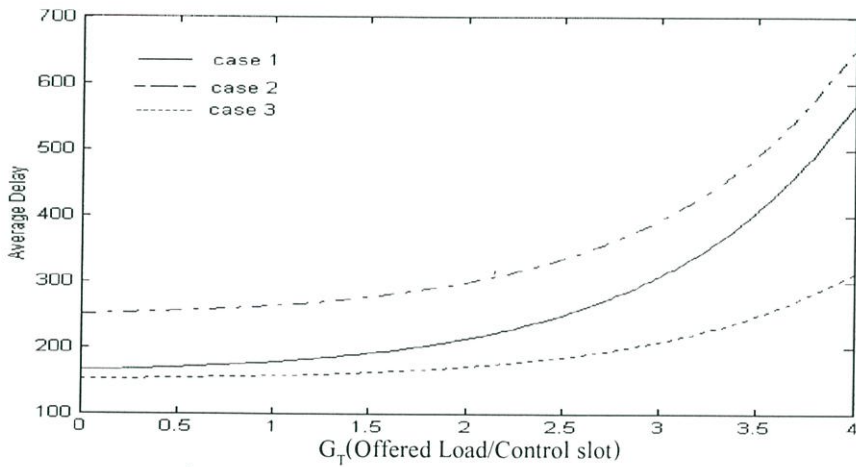
#### 4.5 ผลลัพธ์เชิงตัวเลขของระบบ

จากสมการที่ใช้ในกรณีต่างๆที่กล่าวมาในแต่ละหัวข้อสามารถที่จะนำมาพล็อตกราฟได้ดังในรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.8 ซึ่งในผลการวิเคราะห์นี้เราได้กำหนดช่องสัญญาณข้อมูล ( $N=10$ ) และความยาวของช่องข้อมูล ( $L=100$ ) โดยผลที่ได้แสดงในบทความนี้เราจะนำไปเทียบกับผลใน [1] ซึ่งจากผลใน[1]จะเห็นได้ว่ากรณีที่ เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับระบบที่มีหลายช่องสัญญาณนั้นก็คือกรณีที่ 1 ,กรณีที่ 2 และกรณีที่ 6 ดังนั้นเราจึงนำเพียง 3 กรณีนี้มาทำการวิเคราะห์เพื่อหากรณีที่ เหมาะสมที่สุด และจากกราฟที่แสดงในรูปต่าง ๆ นั้นก็จะแสดงค่าวิสัยสามารถของสล็อตอะโหลทาสองกรณีจะเห็นได้ว่าค่าค่าวิสัยสามารถสูงสุดของทั้งสามกรณีจะเกิดขึ้นเมื่อ  $G=1$  และจะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของกรณีที่ 2 จะให้ค่าค่าวิสัยสามารถที่ดีกว่ากรณีอื่นๆ ซึ่งเมื่อค่า  $G=1$  ค่าวิสัยสามารถสูงสุดของสล็อตอะโหลทาสจะมีค่าประมาณ 0.368 แต่เมื่อทำการสังเกตที่ กราฟการหน่วงเวลาในที่ 9 จะเห็นว่าในกรณีที่ 3 จะมีค่าหน่วงเวลาน้อยที่สุดและเมื่อสล็อตอะโหลทาสถูกปรับปรุงแล้วจะเห็นได้จากสมการค่า

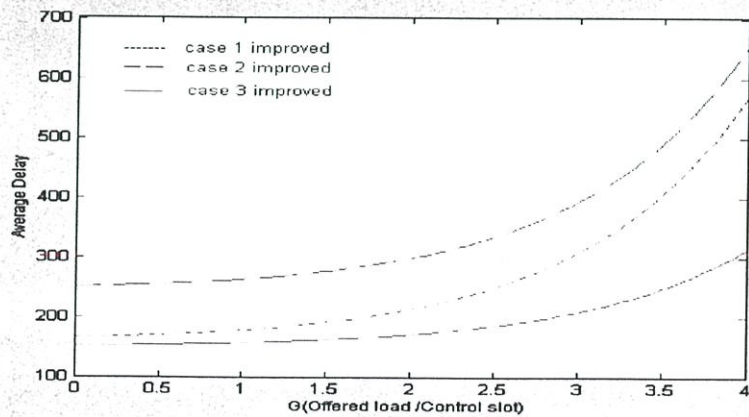
วิสัยสามารถของทั้ง 3 กรณีไม่เปลี่ยนแปลงเลยแต่ค่าเวลาในการหน่วงจะมีค่าน้อยลงดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.6 แสดงค่าวิสัยสามารถเทียบกับ  $G(L=100, N=10)$



รูปที่ 4.7 แสดงค่าการหน่วงเวลาเทียบกับ  $G(L=100, N=10)$



รูปที่ 4.8 แสดงค่าการหน่วงเวลาเทียบกับ  $G(L=100, N=10)$

ตารางที่ 4.1 ค่าค่าวิสัยสามารถสูงสุด/ช่อง สำหรับกรณีต่างๆของโพรโตคอล

		Case1		Case2		Case3		R-ALOHA (V=10)	
								Case1	Case2
L	N	S1	D1	S2	D2	S3	D3	S1	S2
10	1	0.1839	8.155	0.3679	7.65	0.1839	8.15	0.427	0.427
	5	0.0613	21.03	0.3679	7.65	0.1839	8.15	1.142	0.427
	10	0.0334	37.12	0.3679	7.65	0.1839	8.15	0.077	0.426
10	1	0.3344	37.12	0.3679	61.08	0.3344	37.12	0.776	0.776
	5	0.2453	49.99	0.3679	61.08	0.3344	37.12	0.569	0.776
	10	0.1839	66.08	0.3679	61.08	0.3344	37.12	0.427	0.776
100	1	0.3642	326.76	0.3679	595.37	0.3642	326.76	0.845	0.845
	5	0.3504	339.64	0.3679	595.37	0.3642	326.76	0.813	0.845
	10	0.3344	355.73	0.3679	595.37	0.3642	326.76	0.776	0.845

#### 4.6 การวิเคราะห์สมรรถนะของการปรับปรุงกราฟฟิกของโพรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮา

สำหรับแบบจำลองของสล็อตอะโลฮาเราจะสมมติให้การเข้าถึงช่องสัญญาณเป็นแบบปัวส์ซอง ดังนั้นความน่าจะเป็นที่จะมีผู้ใช้ N ผู้ใช้เข้ามาในระหว่างช่วง [0, T] ซึ่งจะได้ดังสมการที่ (4.19)

$$P(N(T) = n) = \frac{(gT)^n e^{-gT}}{n!} \quad (4.19)$$

กำหนดให้ g เป็นกราฟฟิกให้บริการของระบบคือผู้ใช้ที่เข้ามาใช้บริการต่อวินาที, T เป็นช่วงเวลา และ G เป็นค่าการนอร์มอลไลต์กราฟฟิกให้บริการของจำนวนแพ็กเก็ตต่อช่วงเวลา นั่นคือ  $G = gT$

ในที่นี้เราจะนำลูกโซ่ของ Markov มาใช้ในการพิจารณาซึ่งจะมีขั้นตอนดังในรูปที่ 2 เพื่ออธิบายขั้นตอนของสล็อตอะโลฮา และวิธีการปรับเปลี่ยนกราฟฟิกโหนดของสล็อตอะโลฮา โดยจะพิจารณาแยก ออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

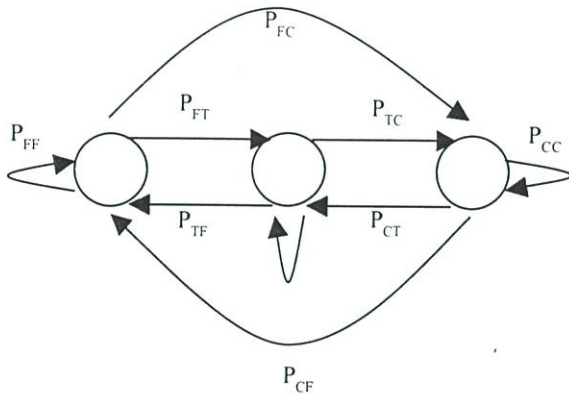
- สภาวะว่าง คือช่วงที่ช่องสัญญาณว่างไม่มีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล และไม่มีการชนกันของแพ็กเก็ต
- สภาวะกำลังส่งข้อมูล คือ เมื่อมีแพ็กเก็ตข้อมูลส่งเข้ามาและประสบความสำเร็จในการส่ง

- สถานะชนกัน คือ เมื่อมีแพ็กเก็ตตั้งแต่ 2 แพ็กเก็ตขึ้นไปส่งมาพร้อมกันจึงเกิดการชนกันเกิดขึ้น

ในที่นี้  $P_{ij}$  คือความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ  $i$  ไปสู่สถานะ  $j$  สำหรับ  $ij = F,T,C$   
 ในระบบสล็อตโตะโลฮานี้เราจะพบว่าความน่าจะเป็นในสถานะคงที่สำหรับลูกโซ่ของ Markov ดังแสดงในรูปที่ 2 เราจะกำหนดให้การมาถึงของแพ็กเก็ตข้อมูลเป็นแบบปัวส์ซองซึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนชองเวลานั้นคือ

**4.6.1 ความน่าจะเป็นที่จะไม่มีแพ็กเก็ตข้อมูลถูกสร้างขึ้นในหนึ่งชองเวลาใดๆ** ซึ่งก็คือความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงจากสถานะว่าง, สถานะที่กำลังส่งแพ็กเก็ตข้อมูล หรือสถานะที่เกิดการชนกันไปสู่สถานะว่างและสามารถที่จะทำการคำนวณได้ดังสมการที่ 4.20

$$P(N(T) = 0) = e^{-G} = P_{FE} = P_{TF} = P_{CF} \tag{4.20}$$



F = สถานะว่าง, T = สถานะกำลังส่งแพ็กเก็ต, C = สถานะแพ็กเก็ตชนกัน

รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้าง Markov chain สำหรับ S-ALOHA และ Adaptive Traffic Load S-ALOHA

**4.6.2 ความน่าจะเป็นที่จะมีหนึ่งแพ็กเก็ตข้อมูลถูกสร้างขึ้นในหนึ่งชองเวลาใดๆ** ซึ่งก็คือความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงจากสถานะว่าง, สถานะที่กำลังส่งแพ็กเก็ตข้อมูล หรือสถานะที่เกิดการชนกันไปสู่สถานะที่กำลังส่งข้อมูล และสามารถที่จะทำการคำนวณได้ดังสมการที่ (4.21)

$$P(N(T) = 1) = Ge^{-G} = P_{FT} = P_{TT} = P_{CT} \tag{4.21}$$

**4.6.3 ความน่าจะเป็นที่จะมีมากกว่าหนึ่งแพ็กเก็ตข้อมูลถูกสร้างขึ้นในหนึ่งชองเวลาใดๆ** ซึ่งก็คือความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงจากสถานะว่าง, สถานะที่กำลังส่งแพ็กเก็ตข้อมูล หรือสถานะที่เกิดการชนกันไปสู่สถานะที่เกิดการชนกันและสามารถที่จะทำการคำนวณได้ดังสมการที่ (4.22)

$$P(N(T) \geq 2) = \sum_{i=2}^{\infty} \frac{G^i e^{-G}}{i!} \tag{4.22}$$

$$= 1 - e^{-G}(G+1) = P_{FC} = P_{TC} = P_{CC}$$

ดังนั้นสมการที่ (4.20), (4.21) และ (4.22) เราสามารถที่จะหาค่าความน่าจะเป็น ( $\pi$ ) ในสถานะคงที่ของช่องสัญญาณแบบสล็อตอะโลฮาได้ดังนี้

$$[\pi \text{ IP}] = [\pi]$$

$$\sum_{i=1}^3 \pi_i = 1 \quad (4.23)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{ในที่นี้ } P(N(T)=0) = \pi_1 \\ P(N(T)=1) = \pi_2 \\ P(N(T) \geq 2) = \pi_3 \end{array} \right\} \quad (4.24)$$

ในเมื่อ [P] เป็นเมทริกซ์การเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการแก้ปัญหของระบบในสมการที่ (4.23) เราจะใช้สมการที่ (4.24) เข้าไปแทนและจะได้ดังนี้

$$\left. \begin{array}{l} \pi_1 = e^{-G} \\ \pi_2 = Ge^{-G} \\ \pi_3 = 1 - e^{-G}(G+1) \end{array} \right\} \quad (4.25)$$

กำหนดให้  $\pi_1$  เป็นความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะว่าง

$\pi_2$  เป็นความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะมีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลและประสบความสำเร็จในการส่ง

$\pi_3$  เป็นความน่าจะเป็นที่แพ็กเก็ตจะเกิดการชนกันเกิดขึ้นในช่องสัญญาณ

ดังนั้นค่าวิสัยสามารถจึงถูกนิยามเป็นจำนวนค่าเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลต่อหน่วยเวลาของการรับที่ถูกต้อง ณ ที่สถานีฐาน ซึ่งเราจะสามารถคำนวณหาค่าวิสัยสามารถได้ดังนี้

$$S = G * P(\text{ช่องสัญญาณที่จะว่างสำหรับการส่ง}) \quad (4.26)$$

ดังนั้น เมื่อเราสามารถนำสมการที่ (4.25) แทนในสมการที่ (4.26) จะได้

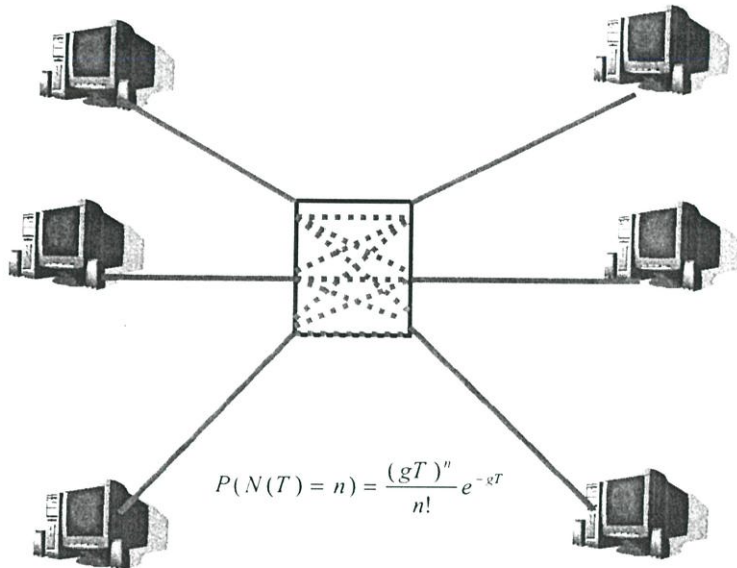
$$S = Ge^{-G} \quad (4.27)$$

ดังที่แสดงใน [3] นั้นค่าวิสัยสามารถสูงสุดของสล็อตอะโลฮา คือ  $S_{\max} = e^{-1}$  สำหรับการทำนอร์มอลไลซ์ ทราฟฟิกให้บริการที่ 1 แพ็กเก็ต ต่อช่องสัญญาณ ซึ่งเราจะเห็นได้ว่า  $G_{\max} = 1$  และเมื่อทราฟฟิกให้บริการเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า  $G_{\max}$  ค่าวิสัยของสล็อตอะโลฮาจะลดลงอย่างรวดเร็ว

#### 4.7 สล็อตอะโลฮาแบบหลายช่องสัญญาณ

สล็อตอะโลฮาในกรณีนี้นั้นในแต่ละช่องสัญญาณจะมีไซเคิลเป็นของตัวเองและในแต่ละไซเคิลจะมีช่วงเวลาเท่ากับ  $L+1$  ดังแสดงในรูปที่ 4.10 นั้นไซเคิล  $i$  ถ้าผู้ใช้มีแพ็กเก็ตข้อมูลที่จะทำการส่งอันดับแรกที่ต้องทำ คือการเลือกช่องสัญญาณข้อมูลและคอยจุดเริ่มต้นของไซเคิลของช่องสัญญาณที่เลือกไว้เพื่อทำการส่งแพ็กเก็ตควบคุมไปก่อนและก็จะส่งแพ็กเก็ตข้อมูลตามไปโดยทันทีในช่องสัญญาณที่ได้ทำการเลือกและถ้าการส่งข้อมูลของผู้ใช้ไม่ประสบความสำเร็จในช่องสัญญาณ

ปัจจุบันที่เลือกไว้ ผู้ใช้สามารถที่จะทำการเลือกช่องสัญญาณอื่นๆของใครก็ได้(ไม่จำเป็นต้องเป็นช่องสัญญาณเดิมที่ได้ทำการเลือกไว้ก่อนหน้านี้) แต่ในบทความนี้จะทำการส่งในช่องสัญญาณเดิมจนกว่าจะส่งข้อมูลประสบความสำเร็จ



รูปที่ 4.10 แสดง โครงสร้างของโพรโทคอลสล็อตอะโลฮาแบบหลายช่องสัญญาณ

การวิเคราะห์ในกรณีนี้สำหรับแต่ละช่องสัญญาณข้อมูลจะมีสมการดังนี้

$$\begin{aligned} G_d &= G \\ P_d &= 1 \\ P_c &= e^{-G} \\ P_s &= e^{-G} = (1 - P_r) \\ S_d &= Ge^{-G} \\ S &= \frac{L}{L+1} S_d = \frac{L}{L+1} Ge^{-G} \end{aligned} \quad (4.28)$$

#### 4.8 การปรับปรุงกราฟฟิกรให้บริการของสล็อตอะโลฮา

สำหรับค่านอร์มอลไลซ์กราฟฟิกรให้บริการที่มีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ  $G_{\max}$  นั้นในวิธีการปรับปรุง

กราฟฟิกรให้บริการนี้จะมีพฤติกรรมเหมือนกับระบบสล็อตอะโลฮา เริ่มตั้งแต่การมาถึงของแพ็กเก็ต ข้อมูลทั้งหมดในระบบจะมีค่าความน่าจะเป็นที่จะยอมให้ทำการส่งมีค่าเท่ากับ 1 และสำหรับกราฟฟิกรให้บริการที่มีค่าสูงกว่าค่า  $G_{\max}$  การส่งแพ็กเก็ตข้อมูลทั้งหมดในระบบจะถูกกำหนดให้มีค่าความน่าจะเป็นในการส่งเท่ากับ  $G_{\max}/G$  โดยจะไม่ขึ้นอยู่กับผู้ใช้ที่เหลืออยู่ และความน่าจะเป็นที่จะไม่

ยอมให้มีการส่งข้อมูลเท่ากับ  $1 - G_{\max}/G$  โดยจะไม่ขึ้นอยู่กับผู้ใช้ที่เหลืออยู่เช่นกัน โดยวิธีการดังกล่าวนี้ที่กราฟฟิคให้บริการจะยังคงรักษาเสถียรภาพให้คงที่อยู่ตลอดเวลาถึงแม้ว่าจะมีอัตราการเข้ามาของแพ็กเก็ตข้อมูลเพิ่มมากขึ้นก็ตามแต่อย่างไรก็ตามอัตราการมาถึงของแพ็กเก็ตข้อมูลก็จะไม่มากไปกว่าค่า  $G_{\max}$  ซึ่งก็จะมีผลทำให้ค่าวิสัยสามารถมีเสถียรตามไปด้วย ในที่นี้เราจะใช้ลูกโซ่ของ Markov อธิบายเช่นเดียวกับวิธีการของสล็อตอะโลฮาเพื่อทำการหาค่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงและความน่าจะเป็นในสถานะคงที่

**4.8.1 ความน่าจะเป็นที่จะไม่มีแพ็กเก็ตถูกสร้างขึ้นในหนึ่งช่องเวลานั้นๆ** ซึ่งก็คือความน่าจะเป็นที่จะไม่มีแพ็กเก็ตเข้ามาถึงบวกกับค่าความน่าจะเป็นที่จะมีแพ็กเก็ตหนึ่งแพ็กเก็ตเข้ามาถึงและระบบจะไม่ยอมให้มีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลบวกกับค่าความน่าจะเป็นที่จะมีสองแพ็กเก็ตข้อมูลเข้ามาถึงและระบบก็ไม่ยอมให้มีการส่งข้อมูลซึ่งจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ นั่นก็คือค่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะว่าง, สภาวะกำลังส่งหรือสภาวะการชนกัน ไปสู่สภาวะว่างนั่นเองซึ่งจะมีสมการดังนี้

$$\begin{aligned} P(N(T)=0) &= e^{-G} + \left(1 - \frac{G_{\max}}{G}\right) G e^{-G} + \\ &= \left(1 - \frac{G_{\max}}{G}\right)^2 \frac{G^2 e^{-G}}{2!} + \dots \\ &= e^{-G_{\max}} \end{aligned} \quad (4.29)$$

**4.8.2 ความน่าจะเป็นที่จะมีหนึ่งแพ็กเก็ตถูกสร้างขึ้นในหนึ่งช่องเวลานั้นๆ** ซึ่งก็คือความน่าจะเป็นที่จะมีหนึ่งแพ็กเก็ตเข้ามาถึงและระบบก็ยอมให้มีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลบวกกับค่าความน่าจะเป็นที่จะมีสองแพ็กเก็ตข้อมูลเข้ามาถึงและระบบจะยอมให้มีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลได้เพียงหนึ่งแพ็กเก็ตบวกกับค่าความน่าจะเป็นที่จะมีสามแพ็กเก็ตเข้ามาถึงและระบบก็ยอมให้ส่งได้เพียงหนึ่งแพ็กเก็ตเท่านั้นซึ่งจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ นั่นก็คือค่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะว่าง, สภาวะกำลังส่งหรือสภาวะการชนกัน ไปสู่สภาวะกำลังส่งข้อมูล ซึ่งจะมีสมการดังนี้

$$\begin{aligned} P(N(T)=1) &= \left(\frac{G_{\max}}{G}\right) G e^{-G} + \\ &\quad \left(\frac{G_{\max}}{G}\right) \left(1 - \frac{G_{\max}}{G}\right) \frac{G^2 e^{-G}}{2!} + \\ &\quad \left(\frac{G_{\max}}{G}\right) \left(1 - \frac{G_{\max}}{G}\right)^2 \frac{G^3 e^{-G}}{3!} + \dots \\ &= \left(\frac{G_{\max}}{G - G_{\max}}\right) (e^{-G_{\max}} - e^{-G}) \end{aligned} \quad (4.30)$$

4.8.2 ความน่าจะเป็นที่จะมีมากกว่าหนึ่งแพ็กเกตถูกสร้างขึ้นในหนึ่งช่วงเวลานั้นๆ ซึ่งก็คือความน่าจะเป็นที่จะไม่เกิดช่องสัญญาณว่างหรือมีเพียงหนึ่งแพ็กเกตเข้ามาถึง นั่นก็คือค่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงจากสถานะว่าง,สถานะกำลังส่งหรือสถานะการชนกันไปสู่สถานะที่เกิดการชนกันของแพ็กเกตข้อมูล ซึ่งจะมีสมการดังนี้

$$\begin{aligned} P(N(T) \geq 2) &= 1 - P(N(T) = 0) - P(N(T) = 1) \\ &= 1 - e^{-G_{\max}} - \left( \frac{G_{\max}}{G - G_{\max}} \right) e^{-G} (e^{-G_{\max}} - e^{-G}) \end{aligned} \quad (4.31)$$

จากการแก้สมการที่(4.23) เราสามารถนำมาพิสูจน์สมการที่(4.29),(4.30) และ(4.31) ซึ่งเราสามารถที่จะหาค่าความน่าจะเป็น( $\pi$ )ในสถานะคงที่ของวิธีการปรับปรุงทราฟฟิกให้บริการของสล็อตอะโลฮาดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= e^{-G_{\max}} \\ \pi_2 &= \frac{G_{\max}}{G - G_{\max}} e^{-G} (e^{-G_{\max}} - e^{-G}) \\ \pi_3 &= 1 - e^{-G_{\max}} - \frac{G_{\max}}{G - G_{\max}} e^{-G} (e^{-G_{\max}} - e^{-G}) \end{aligned} \right\} \quad (4.32)$$

ในที่นี้  $\pi_1$  คือค่าความน่าจะเป็นที่ช่องเวลาจะว่าง,  $\pi_2$  คือค่าความน่าจะเป็นที่ช่องเวลากำลังทำการส่งข้อมูล และ  $\pi_3$  คือค่าความน่าจะเป็นที่ช่องเวลาเกิดการชนกัน จากสมการที่(4.26) เราสามารถที่จะหาค่าวิสัยสมารถได้ดังนี้

$$S = G \frac{G_{\max}}{G} e^{-G_{\max}} = e^{-G_{\max}} \quad (4.33)$$

จากผลที่ได้ในสมการที่ (4.33) เราจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในค่าพารามิเตอร์ต่างๆของโปรโตคอลสล็อตอะโลฮาบแบบหลายช่องสัญญาณดังที่ได้อธิบายไว้แล้ว ซึ่งในการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราจะเลือกเอาวิธีการแบ่งสล็อตจากทั้งหมด 6 วิธีดังที่ได้กล่าวไว้ใน [1] เราจะเลือกเอามาใช้ในการวิเคราะห์เพียง 3 วิธี คือ กรณีที่ 1, กรณีที่ 2 และกรณีที่ 6 ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราจะกำหนดให้กรณีที่ 6 ที่อยู่ใน[1] เป็นกรณีที่ 3 ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เนื่องจากทั้ง 3 กรณีที่เราได้เลือกมาใช้ในการวิเคราะห์เราได้พิจารณาจากค่าวิสัยสมารถของทั้ง 3 กรณี มีค่าวิสัยสมารถที่ดีกว่าอีก 3 กรณีที่เราไม่ได้เลือกมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งทั้งสามกรณีที่เราได้เลือกมาใช้จะมีสมการค่าวิสัยสมารถและสมการการหน่วงเวลาดังนี้ คือ

$$S_1 = \frac{L}{L+N} Ge^{-G}$$

$$D_1 = (L+N) + \frac{L+N}{2} + (R-1) \cdot \left( \frac{N+1}{2} + t_r \right)$$

สมการของกรณีที่ 1

$$S_2 = Ge^{-G}$$

$$D_2 = 2L + \frac{L}{2} + (R-1) \cdot \left( \frac{N+1}{2} + t_r \right)$$

สมการของกรณีที่ 2

$$S_3 = \frac{L}{L+1} \cdot S_d = \frac{L}{L+1} \cdot Ge^{-G}$$

$$D_3 = (L+1) + \frac{L+1}{2} + (R-1) \cdot (1 + t_r)$$

สมการของกรณีที่ 3

จากทั้ง 6 สมการนี้เราจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบของโพรโตคอลสล็อตอะโลฮาแบบหลายช่องสัญญาณ โดยสมการ  $S_1, S_2$  และ  $S_3$  เป็นสมการของค่าวิสัยสามารถของแต่ละกรณี ส่วนสมการ  $D_1, D_2$  และ  $D_3$  เป็นสมการค่าการหน่วงเวลาของการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของระบบของแต่ละกรณีเช่นกัน

#### 4.9 ผลกระทบของการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลซ้ำและความเป็นเสถียรภาพ

เมื่อทำการวิเคราะห์กรณีที่มีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลซ้ำจะมีผลทำให้กราฟฟิคใช้บริการเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าค่า  $G_{max}$  ซึ่งจากหัวข้อของสล็อตอะโลฮาเราจะเห็นได้ว่าค่าวิสัยสามารถของสล็อตอะโลฮาจะไม่มีเสถียรภาพเมื่อค่ากราฟฟิคบริการมากกว่าค่า  $G_{max}$  ในขณะที่วิธีการปรับปรุงกราฟฟิคใช้บริการของสล็อตอะโลฮาจะสามารถจับปัญหานี้ได้ ถึงแม้ว่าจะมีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลซ้ำก็ตาม ในบทความนี้เราจะใช้การวิเคราะห์ดังที่ได้นำเสนอใน[3] โดยเราจะตั้งสมมติฐานดังนี้ 1.กระบวนการของการของแพ็กเก็ตใหม่บวกกับแพ็กเก็ตที่ส่งซ้ำเป็นแบบปัวส์ซอง 2. แพ็กเก็ตที่เกิดการชนกันจะถูกทำการส่งแพ็กเก็ตซ้ำใหม่จนกว่าจะส่งแพ็กเก็ตข้อมูลสำเร็จและ 3. แพ็กเก็ตที่เข้ามาใหม่จะสร้างแพ็กเก็ตในช่องเวลาที่  $k$  และจะส่งข้อมูลในช่องเวลาที่  $k+1$  เราจะกำหนดให้  $\lambda$  เป็นอัตราเฉลี่ยของแพ็กเก็ตที่เข้ามาถึงใหม่และ  $N$  เป็นค่าเฉลี่ยของจำนวนแพ็กเก็ตที่เกิดการชนกัน ณ ที่เวลาเริ่มต้นของช่องเวลาเริ่มต้นของช่องเวลา  $k$  เราจะใช้ลูกโซ่ของ Markov เพื่อสร้างโมเดลของระบบ ในที่นี้ ชั้นของลูกโซ่จะแทนจำนวนของแพ็กเก็ตที่เกิดการชนกัน( $N$ )ในระบบซึ่งการสมมติฐานเกี่ยวกับการส่ง

ซ้ำของแพ็กเก็ตที่เกิดการชนกันในช่องเวลากับความน่าจะเป็น  $v$  ที่ไม่ขึ้นอยู่กับผู้ใช้คนอื่นๆที่เหลืออยู่และสามารถที่จะแจกแจงเป็นแบบเรขาคณิตได้ดังนี้จาก[3]

$$\frac{\pi_{N+1}}{\pi_N} \geq \frac{1 - a_0 - (1 - v)^N a_1}{(N + 1)v(1 - v)^N a_0} \quad (4.34)$$

ความสัมพันธ์ในสมการที่(4.34) จะเพิ่มขึ้นโดยไม่มีขีดจำกัดเมื่อ  $N \rightarrow \infty$

ดังนั้น  $\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^N \pi_n$  จะไม่เบนเข้าหากันเว้นเสียแต่ว่า  $\pi_n = 0$  และความน่าจะเป็นของสถานะหนึ่งจะไม่คงอยู่ต่อไปได้ ดังนั้นลูกโซ่สำหรับสล็อตอะโลฮาจึงไม่เป็นเออร์โกดิกส์ (Ergodic) ซึ่งจะทำให้ระบบไม่สามารถที่จะลดลงได้จึงทำให้ระบบเกิดความไม่มีเสถียรภาพเกิดขึ้น ในที่นี่เราทำการวิเคราะห์คำวิสัยสามารถของระบบ แต่อย่างไรก็ตามเราจะยังคงรักษาเสถียรภาพของสล็อตอะโลฮาให้คงอยู่ได้โดยอาศัยการปรับเปลี่ยนทราฟฟิกให้บริการของสล็อตอะโลฮา ซึ่งเราจะกำหนดให้  $S_n(k)$  เป็นความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขของการส่งแพ็กเก็ตหนึ่งแพ็กเก็ตในช่องเวลา  $k$  และส่งแพ็กเก็ตสำเร็จด้วย ให้  $N(k) = n$  ฉะนั้น  $S_n(k)$  จึงเป็นความน่าจะเป็นที่จะมีแพ็กเก็ตใหม่หนึ่งแพ็กเก็ตถูกส่งซ้ำและไม่มีแพ็กเก็ตใหม่เข้ามาบวกกับความน่าจะเป็นที่จะมีแพ็กเก็ตใหม่เข้ามาและไม่มีการส่งแพ็กเก็ตซ้ำ จะมีสมการดังนี้

$$S_n(k) = b_1(n)a_0 + b_0(n)a_1 \quad (4.35)$$

ดังนั้นคำวิสัยสามารถของระบบจะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} S &= \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^{\infty} S_n(k) \pi_n(k) \\ &= \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^N [b_1(n)a_0 + b_0(n)a_1] \pi_n = 0 \end{aligned} \quad (4.36)$$

$S$  จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อจำนวนแพ็กเก็ตที่เกิดการชนกันเพิ่มจำนวนมากขึ้นไปจนไม่มีที่สิ้นสุดการใช้วิธีการปรับเปลี่ยน

ทราฟฟิกให้บริการของสล็อตอะโลฮาจะเกิดขึ้นเมื่อค่า  $G > G_{\max}$  ดังนั้นค่าความน่าจะเป็นของแพ็กเก็ตใหม่และแพ็กเก็ตที่จะทำการส่งซ้ำที่จะถูกส่งออกไปจะมีค่าความน่าจะเป็น  $v = G_{\max} / G$  ในที่นี้  $G_{\max}$  เป็นทราฟฟิกให้บริการของทั้งแพ็กเก็ตใหม่และแพ็กเก็ตที่ทำการส่งซ้ำ ดังนั้นเราจะกำหนดให้

$v = v(n)$  และสำหรับลูกโซ่ของ Markov จะมีค่าความน่าจะเป็นของสถานะคงที่เป็นแบบเออร์โกดิกส์ ซึ่งมันจะไม่มีค่าที่ลดลง เราจะทำการพิสูจน์วิธีการปรับเปลี่ยนทราฟฟิกให้บริการของสล็อตอะโลฮาว่าเป็นแบบเออร์โกดิกส์ได้อย่างไรดังสมการต่อไปนี้

กำหนดให้  $N(k) = 1$

ดังนั้น

$$E[N(k+1)] = \begin{cases} i = 1 \text{ ,พร้อมค่าความน่าจะเป็น } b_1(i)a_0 \\ i \text{ ,พร้อมค่าความน่าจะเป็น } [1 - b_1(i)]a_0 + b_0(i)a_1 \\ \\ i + 1 \text{ ,พร้อมค่าความน่าจะเป็น } 1 - b_0(i)a_1 \\ i + j, j \geq 2 \text{ พร้อมค่าความน่าจะเป็น } a_1 \end{cases}$$

การใช้ Pakes Lemma[3]. กำหนดให้  $\{Z_k, k=0,1,2,\dots\}$  ซึ่งเป็นค่าที่เพิ่มขึ้นและจะไม่ลดลง, เป็นค่าที่ไม่มีคาบเวลาและมีคุณลักษณะที่เหมือนกันกับลูกโซ่ของ Markov โดยในสถานะว่างจะไม่เป็นเซตของจำนวนเต็มลบและเงื่อนไขสองข้อข้างต่อไปนี้เป็นเงื่อนไขที่ลูกโซ่ของ Markov เป็นเออร์โกดิกส์

1.  $\left| E \left[ \tilde{Z}_{k+1} - \tilde{Z}_k \left( \tilde{Z}_k = i \right) \right] \right| < \infty \quad \forall i,$
2.  $\limsup_{i \rightarrow \infty} E \left[ \tilde{Z}_{k+1} - \tilde{Z}_k \left( \tilde{Z}_k = i \right) \right] < 0$

จากการใช้สมการที่ (19) ใน[3] จะเห็นได้ว่า

$$E[N_{k+1} - Z_k | Z_k = i] = \lambda - b_1(i)a_0 - b_0(i)a_1 \quad (4.37)$$

เมื่อ  $\lambda < \infty$  ดังนั้นเงื่อนไขข้อที่ 1. จะเป็นจริงส่วนเงื่อนไขข้อที่ 2. จะถูกทำให้เป็นจริงได้ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขสมการ(4.38)

$$\lambda < \limsup_{n \rightarrow \infty} (b_1(i)a_0 + b_0(i)a_1) \quad (4.38)$$

สำหรับการหาค่าสูงสุดของ  $v(n)$  นั่นก็คือค่าสูงสุดของ  $S_n(v)$  ด้วยเช่นกันซึ่งเราจะหาค่าอนุพันธ์ของ  $S_n(v)$  พิจารณาเทียบกับ  $v$  และทำสมการให้เท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\Rightarrow v^*(n) = \frac{a_0 - a_1}{na_0 - a_1} \quad (4.39)$$

เพื่อทำการหาค่าสูงสุดของสมการเราจะคำนวณโดยการหาค่าอนุพันธ์อันดับสองของ  $S_n(v)$  พิจารณาเทียบกับ  $v$  ดังนั้นจะได้

$$\frac{d^2 S_n(v^*)}{dv^2} = -\left(\frac{n-1}{n-\lambda}\right)^{n-2} n(n-\lambda)e^{-\lambda} < 0 \quad (4.40)$$

จากสมการค่าที่ได้ออกมาจะเป็นค่าสูงสุดดังนั้นค่าสูงสุดของค่าวิสัยสามารถจะเป็น

$$S_n^*(v^*(n)) = a_0 \left( \frac{n-1}{n - a_1/a_0} \right)^{n-1} \quad (4.41)$$

แทนค่าสมการที่ (4.41) ในสมการที่ (4.38) จะได้

$$\lambda < a_0 \limsup_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{n-1}{n - a_1/a_0} \right)^{n-1} \quad (4.42)$$

$$\text{ในที่นี้ } \limsup_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{n-1}{n - a_1/a_0} \right)^{n-1} = e^{\frac{a_1}{a_0} - 1} \quad (4.43)$$

แทนค่าโดยประมาณจากสมการที่ (4.43) ในสมการที่ (4.42) จะได้

$$\lambda \leq a_0 e^{\frac{a_1}{a_0} - 1} \quad (4.44)$$

เมื่อ  $a_0 = e^{-\lambda}$  และ  $a_1 = \lambda e^{-\lambda}$  ดังนั้นเราจะเขียนสมการที่(4.44) ใหม่ได้เป็น

$$\lambda \leq e^{-1} \quad (4.45)$$

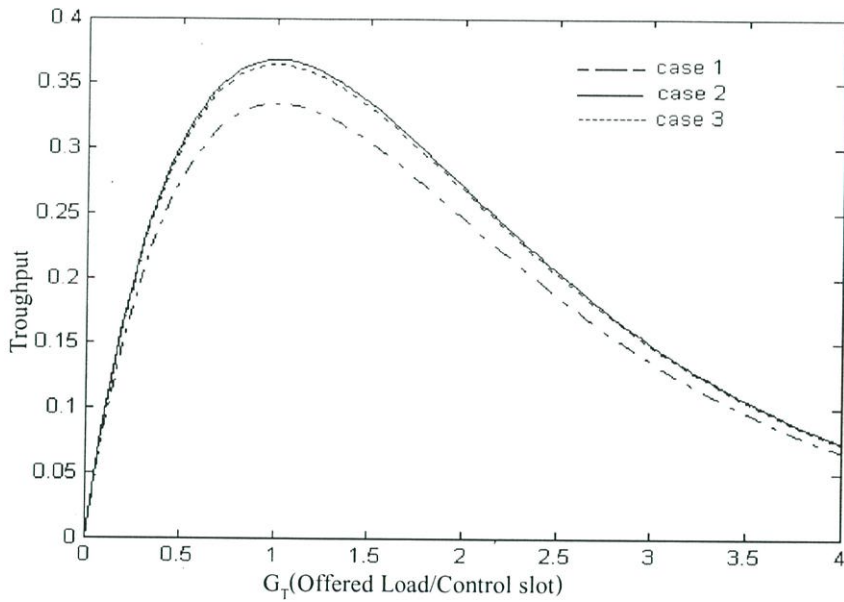
ดังนั้น โพรทอคอลสต็อคโอสจะมีเสถียรภาพถ้า  $G \leq G_{\max}$  และเป็นที่น่าพอใจว่าการปรับปรุงกราฟฟิกให้บริการดังที่ได้พิสูจน์ให้เห็นแล้วว่าลูกโซ่ของ Markov เป็นเออร์โกดิกส์ดังนั้นระบบจึงมีเสถียรภาพ[2]

## บทที่ 5

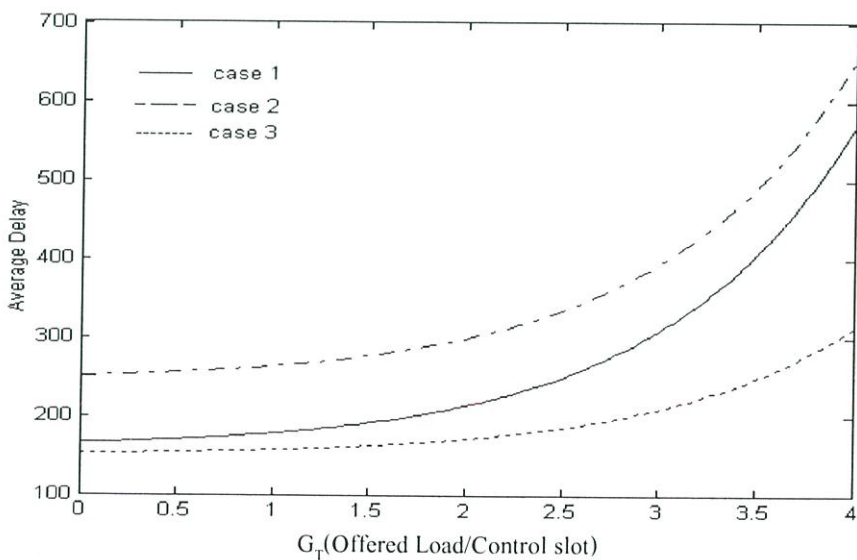
### ผลการวิเคราะห์เชิงเลข

#### 5.1 ผลการวิเคราะห์เชิงเลขของระบบ

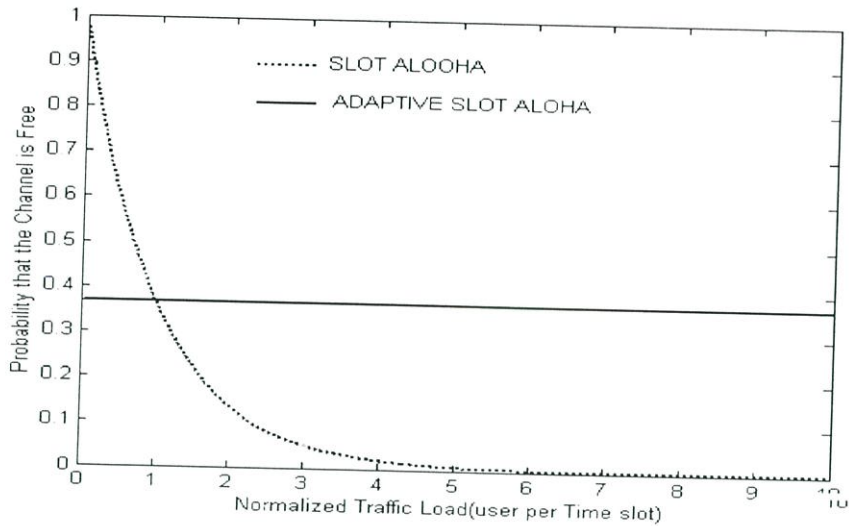
ในการวิเคราะห์เรากำหนดพารามิเตอร์ ดังนี้ ช่องสัญญาณข้อมูล ( $N=10$ ) , ความยาวของช่องเวลาข้อมูล ( $L=100t$  ,  $t=เวลา$ )



รูปที่ 5.1 แสดงค่าวิสัยสามารถของโปรโตคอลแบบสล็อตอะโลชา ทั้ง 3 กรณี

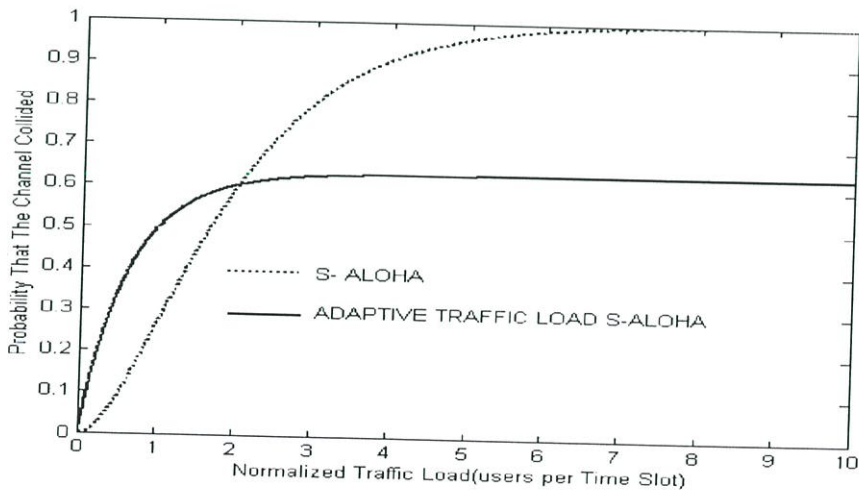


รูปที่ 5.2 แสดงค่าการหน่วงเวลาของโปรโตคอลแบบสล็อตอะโลชา ทั้ง 3 กรณี



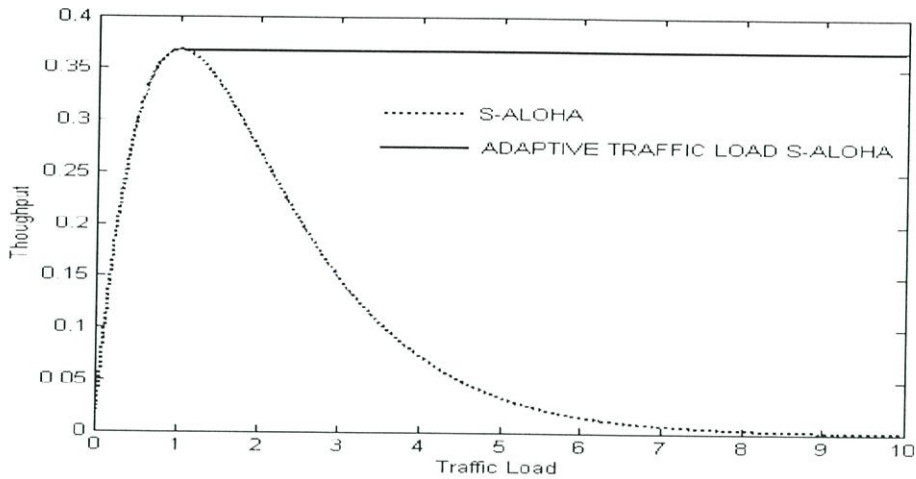
รูปที่ 5.3 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณว่าง

จากรูปที่ 5.1 แสดงสมรรถนะ สำหรับสล็อตอะโลฮาและการปรับเปลี่ยนทราฟฟิกให้บริการของสล็อตอะโลฮาในเทอมของความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะมีโอกาสว่าง ส่วนในรูปที่ 5.2 แสดงความน่าจะเป็นที่จะเกิดการชนกันของแพ็กเก็ตข้อมูลในช่องเวลาของทั้งสองวิธี โดยจะเห็นว่าโอกาสชนกันของสล็อตอะโลฮาจะมีค่าสูงกว่าวิธีการของการปรับเปลี่ยนทราฟฟิกให้บริการของสล็อตอะโลฮาและในรูปที่ 5.3 แสดงวิสัยสามารถ



รูปที่ 5.4 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่แพ็กเก็ตข้อมูลจะเกิดการชนกัน

ของทั้งสล็อตอะโลฮาและวิธีการปรับเปลี่ยนทราฟฟิกให้บริการซึ่งจะเห็นว่าค่าวิสัยสามารถของทั้งสองวิธีที่ค่าทราฟฟิกให้บริการ ( $G$ ) ที่มีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ  $G_{max}$  จะเห็นว่าค่าวิสัยสามารถทั้งสองวิธีจะเหมือนกัน

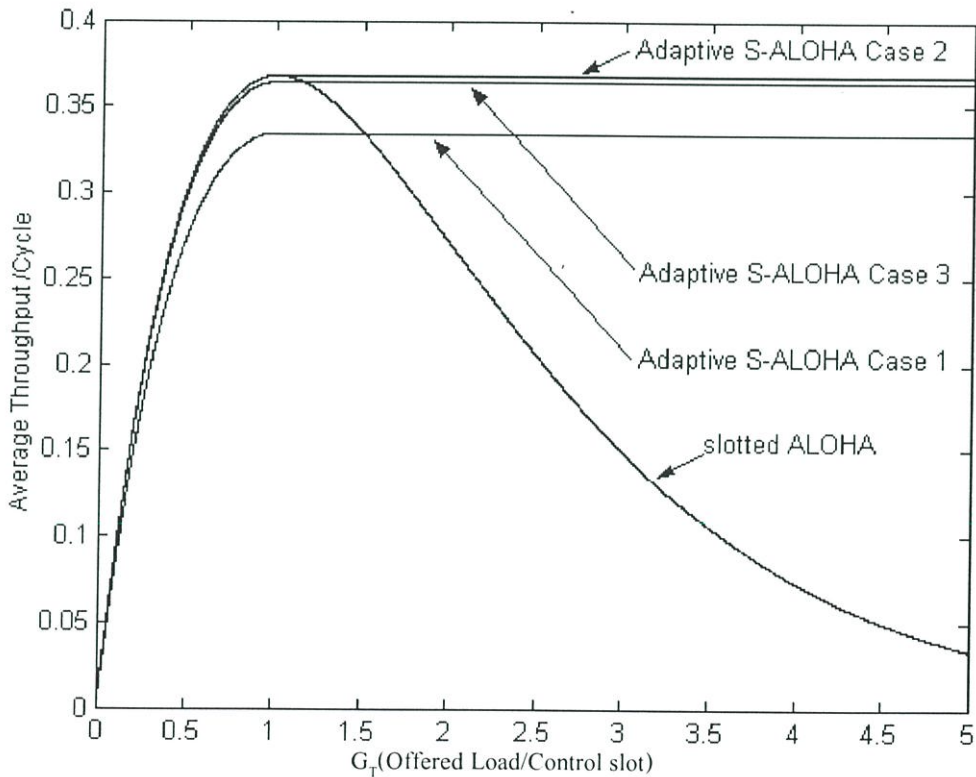


รูปที่ 5.5 แสดงค่าวิสัยสามารถของสล็อตอะโลฮา และ Adaptive Traffic Load

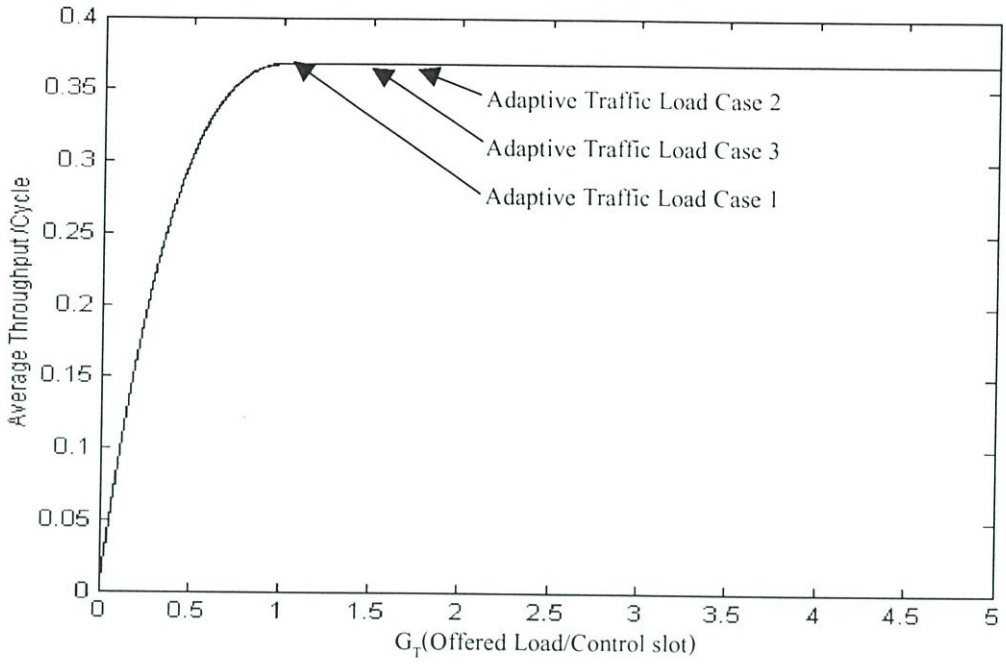
แต่เมื่อค่า  $G$  เพิ่มขึ้นสูงกว่าค่า  $G_{max}$  สมรรถนะของสล็อตอะโลฮาจะมีค่าที่ลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่มีเสถียรภาพของระบบส่วนวิธีการปรับปรุงกราฟฟิเคชันบริการของสล็อตอะโลฮาจะมีค่าวิสัยสามารถคงที่ที่ระดับสูงสุดคือ 36.8% ตลอดเวลาถึงแม้จำนวนผู้ใช้จะเพิ่มสูงขึ้นก็ตามค่าวิสัยสามารถก็จะอยู่ระดับสูงสุดตลอด

จากรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.5 แสดงถึงประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ ซึ่งจะเปรียบเทียบให้เห็นว่าระหว่างโปรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮา และวิธีการที่นำเสนอคือการปรับปรุงกราฟฟิเคชันบริการของโปรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮา ส่วนในรูปที่ 5.6 เป็นต้นไปจะเป็นผลของการปรับปรุงกราฟฟิเคชันบริการของโปรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮา ซึ่งจะนำสล็อตอะโลฮาทั้ง 3 กรณี มาทำการวิเคราะห์ โดยทดลองเปลี่ยนความยาวของแพ็กเก็ตข้อมูล ( $L$ ) , แพ็กเก็ตควบคุม และจำนวนช่องความยาวคลื่น ( $N$ ) โดยในรูปที่ 5.6 นั้นจะแสดงค่าวิสัยสามารถของระบบ ทั้งสามกรณีเปรียบเทียบกัน กำหนดให้  $L=100$  และ  $N=10$  จะเห็นได้ว่าค่าวิสัยสามารถของกรณีที่ 1 นั้นจะมีค่าสูงกว่ากรณีที่ 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 5.6 ส่วนในรูปที่ 5.7 นั้นเราได้ทดลองเพิ่มความยาวของแพ็กเก็ตข้อมูล  $L=10000$  และช่องสัญญาณเท่าเดิมคือ  $N=10$  จะเห็นได้ว่าค่าวิสัยสามารถของทั้ง 3 กรณีมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าความยาวของแพ็กเก็ตข้อมูลมีผลต่อค่าวิสัยสามารถของระบบแต่ค่าวิสัยสามารถของระบบก็ยังคงมีเสถียรภาพไม่ลดลงอย่างรวดเร็วเหมือนค่าวิสัยสามารถของสล็อตอะโลฮาดังที่แสดงในรูปที่ 5.5 ส่วนในรูปที่ 5.8 ถึงรูปที่ 5.10 เราได้ทดลองกำหนดให้  $L=100$  และกำหนดให้  $N=5, 20$  และ  $40$  ช่องสัญญาณ เราจะเห็นได้ว่าค่าวิสัยสามารถของกรณีที่สองจะยังคงมีค่าเท่าเดิมตลอด ส่วนค่าวิสัยสามารถของกรณีที่ 2 และ 3 นั้นจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณดังที่ได้แสดงในรูปที่ 5.8 ถึงรูปที่ 5.10 ส่วนรูปที่ 5.11 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load กรณีที่ 1 โดยการเปรียบเทียบให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าวิสัยสามารถเมื่อจำนวนช่องสัญญาณเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ช่องสัญญาณเท่ากับ 5 นั้นจะมีค่า

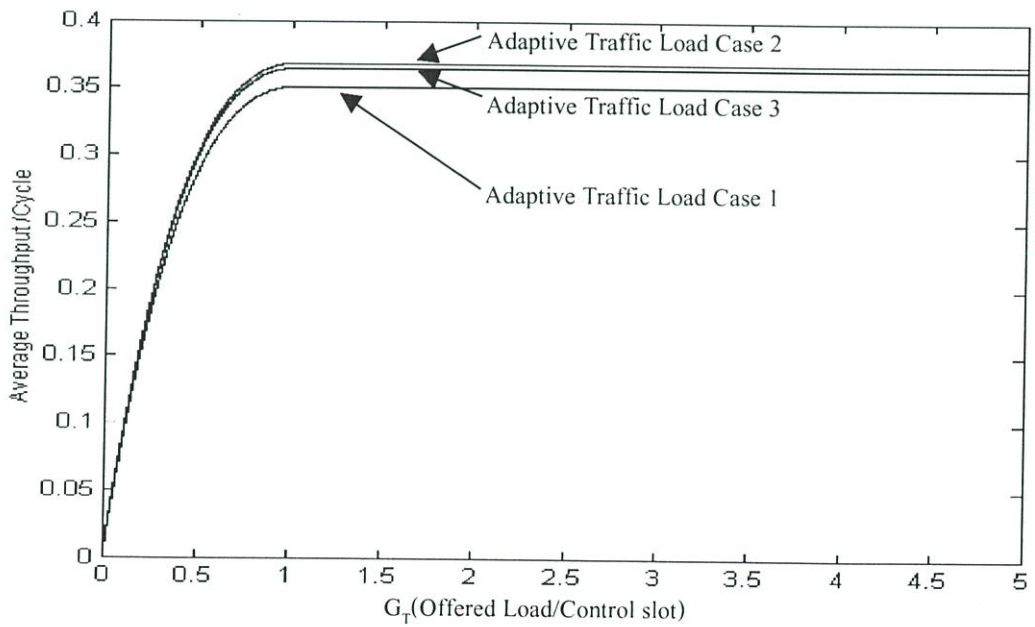
วิสัยสามารถที่ดีกว่าเมื่อมีช่องสัญญาณเท่ากับ 10 ช่อง ซึ่งจะสรุปได้ว่าในกรณีที่ 1 ไม่เหมาะกับระบบที่ต้องมีช่องสัญญาณมากๆ เพราะจะทำให้ค่าวิสัยสามารถของระบบลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นการที่จะนำวิธีการปรับปรุงกราฟฟิกให้บริการของโปรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮากรณีที่ 1 ไปใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้สูงสุดควรจะต้องกำหนดความยาวของแพ็กเก็ตข้อมูลและช่องสัญญาณให้เหมาะสมกันด้วยดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.11 ส่วนรูปที่ 5.12 ก็เช่นเดียวกันแสดงค่าวิสัยสามารถของวิธีการปรับปรุงกราฟฟิกให้บริการของโปรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮากรณีที่ 1 เมื่อเปลี่ยนค่าความยาวของแพ็กเก็ตข้อมูลหลายๆค่าคือ 10,100,200,300,400,500,600,700,800,900,1000 และ 2000 จะเห็นได้ว่าที่  $L=10$  ค่าวิสัยสามารถของระบบจะแยกแยะกว่าที่ค่า  $L=100$  โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อ  $L$  มีค่ามากขึ้นเรื่อยๆค่าวิสัยสามารถก็จะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆเช่นกัน



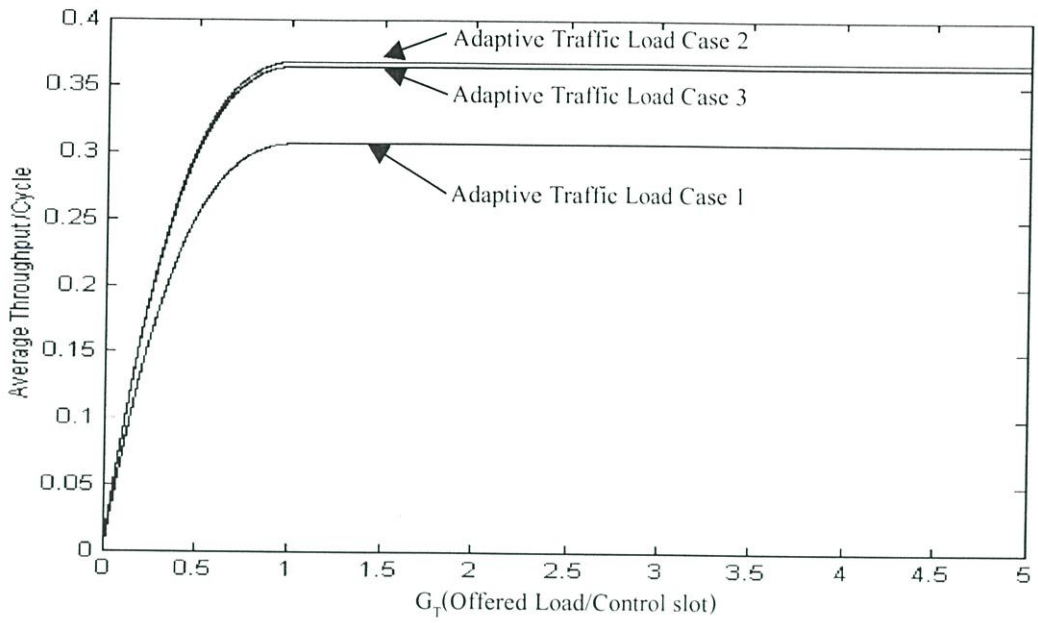
รูปที่ 5.6 แสดงค่าวิสัยสามารถของสล็อตอะโลฮา และ Adaptive  $L=100$  , $N=10$



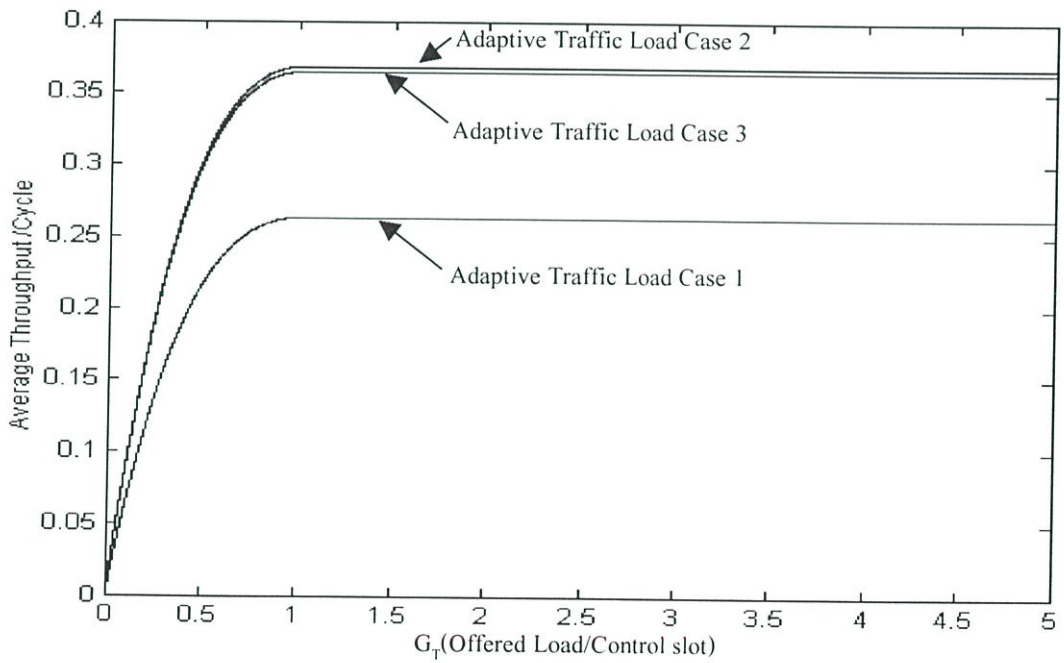
รูปที่ 5.7 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load ทั้ง 3 กรณี เมื่อ  $L=10000$ ,  $N=5$



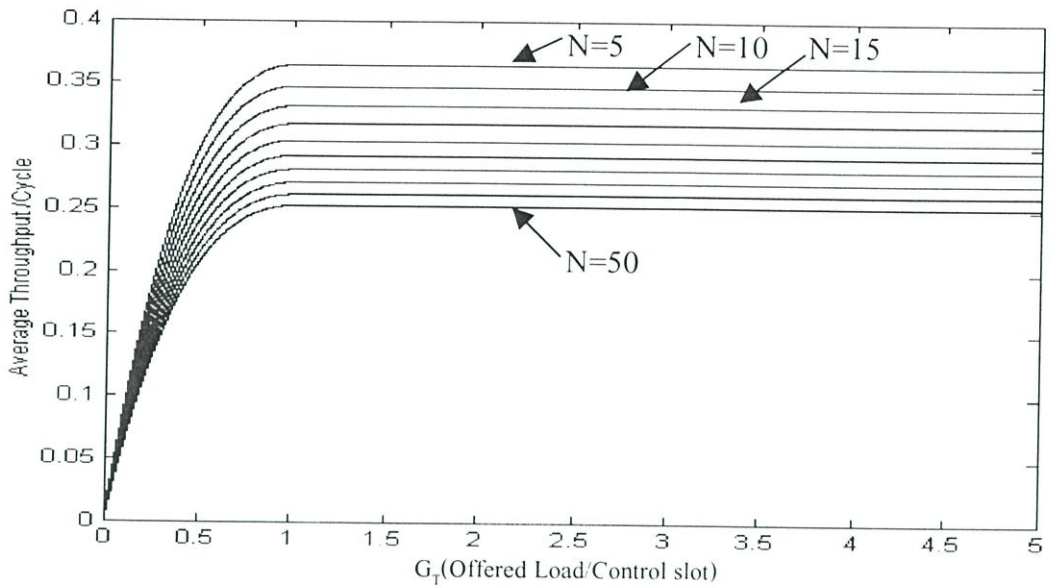
รูปที่ 5.8 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load ทั้ง 3 กรณี เมื่อ  $L=100$ ,  $N=10$



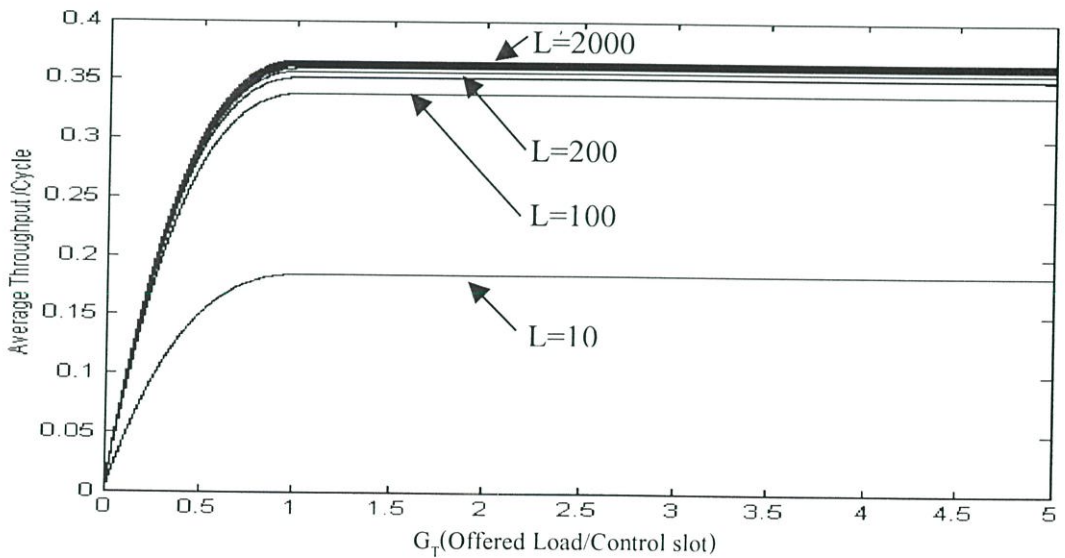
รูปที่ 5.9 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load ทั้ง 3 กรณี เมื่อ  $L=100$   $N=20$



รูปที่ 5.10 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load ทั้ง 3 กรณี เมื่อ  $L=100$ ,  $N=40$



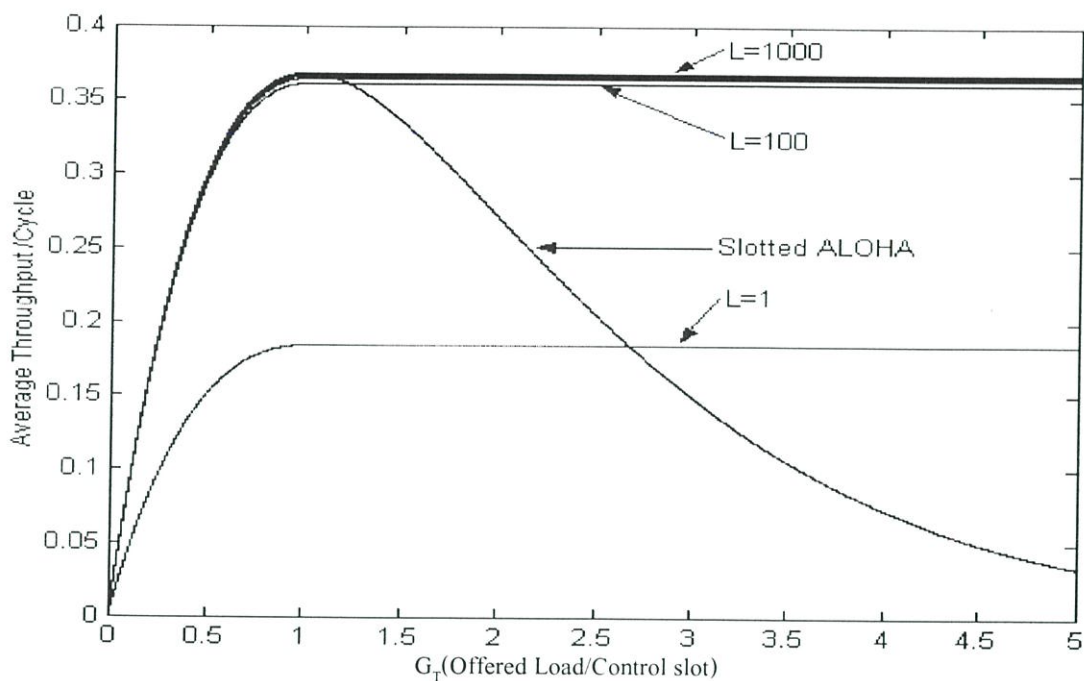
รูปที่ 5.11 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load กรณีที่ 1 โดยการเพิ่มจำนวน  $N$  และ Adaptive  $L=100$   $N=5,10,15,20,25,30,35,40,45$  และ 50



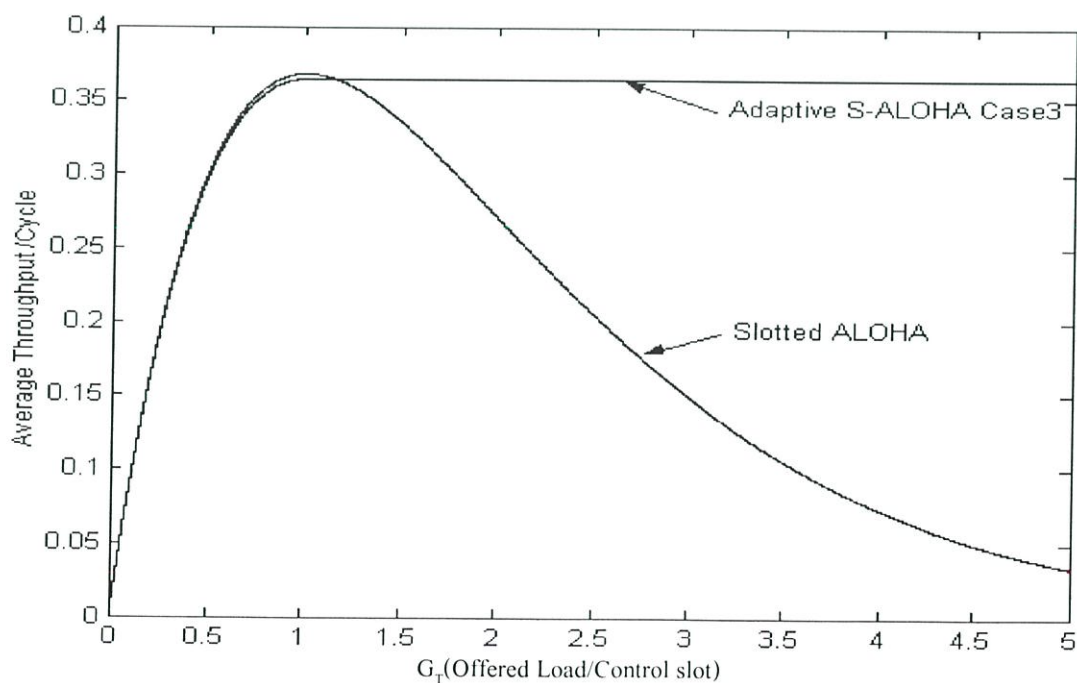
รูปที่ 5.12 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load กรณีที่ 1 โดยการเพิ่มจำนวน  $L=10,100,200,300,400,500,600,700,800,900,1000$  และ 2000,  $N=10$

ส่วนค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load กรณีที่ 2 นั้นเมื่อพิจารณาจากสมการค่าวิสัยสามารถของกรณีที่ 2 ดังสมการ  $S_2 = Ge^{-G}$  จะเห็นได้ว่าความยาวของแพ็กเก็ตข้อมูลและจำนวนช่องสัญญาณไม่มีผลกระทบต่อค่าวิสัยสามารถของระบบ ซึ่งจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.6,

5.7, 5.8, 5.9 และรูปที่ 5.10 จะเห็นว่าค่าวิสัยสามารถของกรณีที่สองไม่มีการเปลี่ยนแปลงถึงแม้ค่าความยาวของแพ็กเก็ตข้อมูลและจำนวนช่องสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไป

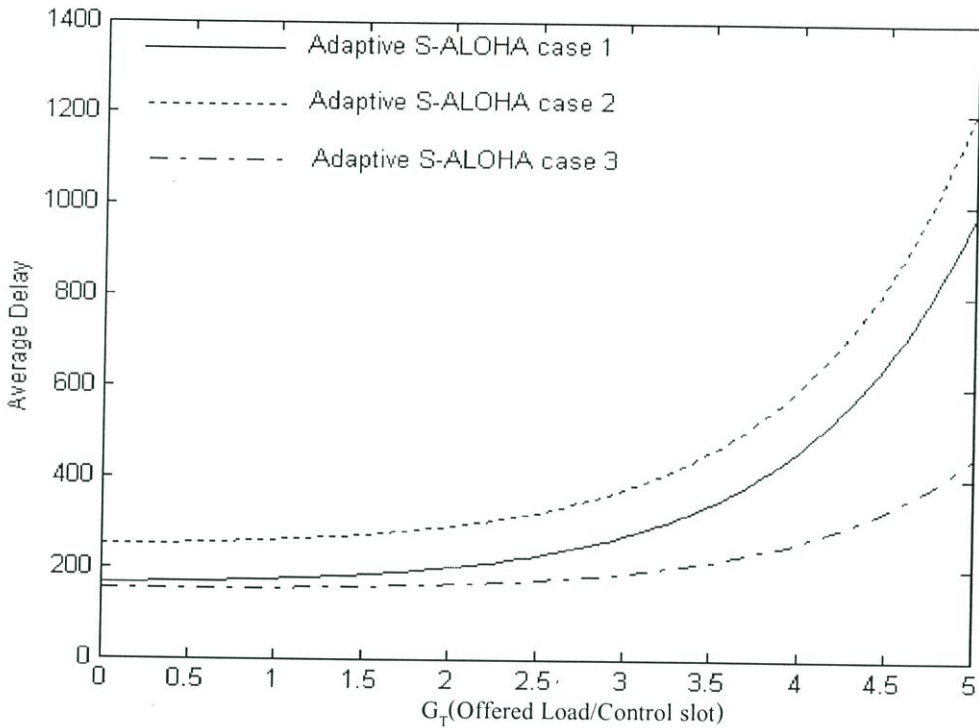


รูปที่ 5.13 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load กรณีที่ 3 โดยการเพิ่มจำนวน  $L=1, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000$  และ  $2000$ ,  $N=10$



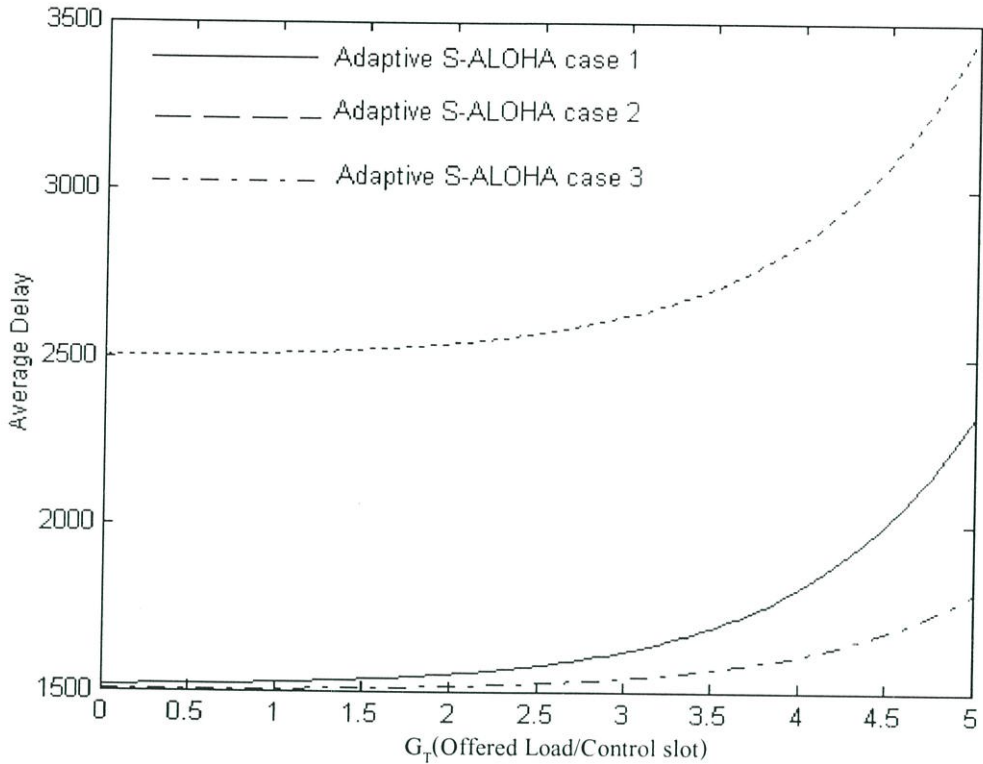
รูปที่ 5.14 แสดงค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load กรณีที่ 3 โดยการเพิ่มจำนวน  $L=100$ ,  $N=1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  และ  $100$

ส่วนค่าวิสัยสามารถของ Adaptive Traffic Load กรณีที่ 3 นั้นเมื่อพิจารณาจากสมการค่าวิสัยสามารถของกรณี 3 แล้วจะเห็นได้ว่าความยาวของแพ็กเก็ตข้อมูลจะมีผลกระทบต่อค่าวิสัยสามารถของระบบแต่จำนวนช่องสัญญาณจะไม่มีผลกระทบต่อค่าวิสัยสามารถของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 5.13 และ 5.14

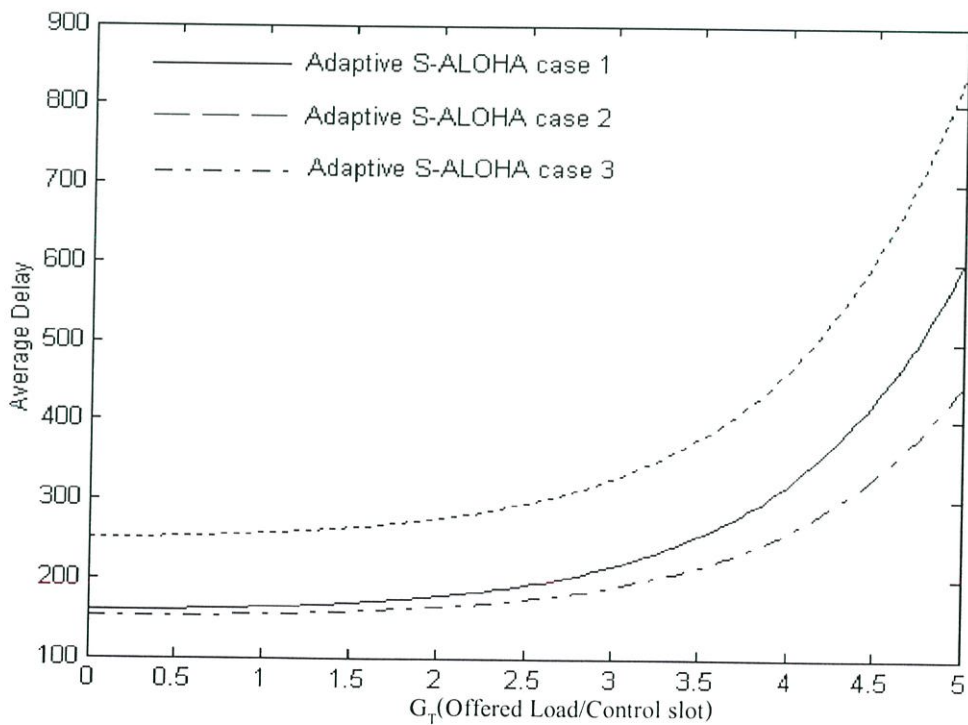


รูปที่ 5.15 แสดงค่าการหน่วงเวลาของโปรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮา ทั้ง 3 กรณี เมื่อ  $L=100, N=10$

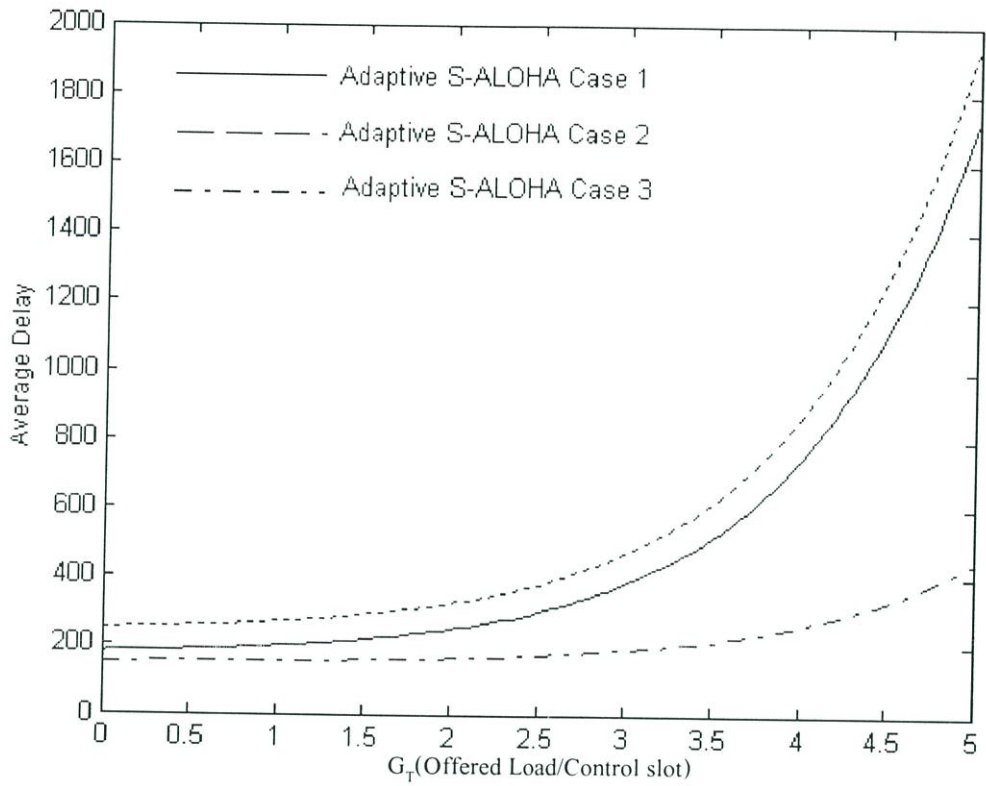
ส่วนรูปที่ 5.15 ถึงรูปที่ 5.18 จะแสดงค่าการหน่วงเวลาของระบบของ Adaptive Traffic Load Slotted ALOHA ทั้ง 3 กรณี โดยได้ทดลองเปลี่ยน ขนาดของความยาวของแพ็กเก็ตข้อมูล และจำนวนช่องสัญญาณดังแสดงตามเงื่อนไขที่ได้อธิบายไว้ในแต่ละรูป ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดของความยาวของแพ็กเก็ตข้อมูลและจำนวนช่องสัญญาณนั้นจะมีผลกระทบต่อค่าการหน่วงเวลาของระบบ โดยในการนำไปประยุกต์ใช้งานนั้นก็จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาความยาวของแพ็กเก็ตข้อมูลและจำนวนช่องสัญญาณให้มีความเหมาะสมกันเพื่อที่จะได้ระบบ LAN ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด



รูปที่ 5.16 แสดงค่าการหน่วงเวลาของโปรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮาทั้ง 3 กรณี เมื่อ  $L=1000$ ,  $N=10$



รูปที่ 5.17 แสดงค่าการหน่วงเวลาของโปรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮา ทั้ง 3 กรณี เมื่อ  $L=100$   $N=5$



รูปที่ 5.18 แสดงค่าการหน่วงเวลาของโปรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮา ทั้ง 3 กรณี เมื่อ  $L=100$ ,  $N=20$

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะของโครงข่ายคอมพิวเตอร์ใยแก้วนำแสงความเร็วสูงโดยการอุปกรณ์ WDM PASSIVE STAR เป็นอุปกรณ์หลักของระบบโครงข่ายซึ่งจะมีผู้ใช้แต่ละผู้ใช้เชื่อมต่อเข้ามายังพอร์ตอินพุทและเอาต์พุทของ อุปกรณ์ WDM PASSIVE STAR ซึ่งจะทำหน้าที่ในการกระจายสัญญาณแสงไปยังผู้ใช้ที่เชื่อมต่ออยู่ และผู้ใช้แต่ละผู้ใช้จะมีอุปกรณ์ทั้งตัวรับและตัวส่งที่สามารถปรับช่องสัญญาณในการรับและส่งข้อมูลได้(Tunable Transmitter-Tunable Receiver)ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้จะช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการรับและส่งสัญญาณให้ประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยจะเห็นได้จากผลการวิเคราะห์เชิงเลขของระบบและยังจะช่วยลดค่าหน่วยเวลาในการรอคอยการส่งในคิวลงได้ การปรับช่องสัญญาณในการรับและส่งได้นี้ยังช่วยทำให้ระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์สามารถที่จะมีจำนวนโหนดมากกว่าจำนวนช่องสัญญาณได้ด้วยเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์กรณีที่ระบบไม่ต้องการส่งข้อมูลมากนักแต่มีผู้ใช้ต้องการเชื่อมต่ออยู่ในระบบหลายผู้ใช้ หรือจะเลือกให้มีช่องสัญญาณมากกว่าโหนดก็ได้ ในกรณีนี้จะเหมาะกับระบบที่ผู้ใช้ต้องการส่งข้อมูลในปริมาณมากๆ และในงานวิจัยนี้ยังได้นำโปรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮาเข้ามาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อที่จะทำให้การจัดการระบบข้อมูลของระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น สาเหตุที่ได้นำโปรโตคอลแบบสล็อตอะโลฮามาใช้ก็เพราะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนใช้งานง่าย ซึ่งถ้าเรานำสิ่งที่ง่ายๆ ไม่ซับซ้อนมาพัฒนาให้มีการใช้งานที่ดีกว่าเดิม ก็น่าจะเป็นทางเลือกที่ดีที่จะมีการพัฒนาต่อไปในอนาคต จากผลการวิเคราะห์เชิงเลขของระบบจะเห็นได้ว่าวิธีที่ผู้ทำวิจัยได้นำเสนอนั้นจะทำให้ค่าวิสัยสามารถของระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์ใยแก้วนำแสงความเร็วสูงนั้นมีค่าวิสัยสามารถที่คงที่และเสถียรที่ค่าสูงสุดของระบบ และจากสมการของค่าวิสัยสามารถของสล็อตอะโลฮาทั้ง 3 กรณี จะเห็นได้ว่ากรณีที่ 1 นั้นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อระบบก็คืออัตราส่วนของความยาวของแพ็กเกตข้อมูล(L) ต่อความยาวของแพ็กเกตควบคุม(N)ซึ่งถ้าความยาวของแพ็กเกตข้อมูลมีความยาวมากกว่าความยาวของแพ็กเกตข้อมูลมากๆ จะเห็นได้ว่าระบบก็จะมีค่าวิสัยสามารถที่ดี ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเราก็จะพยายามทำให้แพ็กเกตควบคุมมีขนาดเล็กอยู่แล้วเพื่อให้เกิดความรวดเร็วในการส่งและรับแพ็กเกต ส่วนในกรณีที่ 2 จะเห็นได้จากสมการว่าความยาวของแพ็กเกตควบคุมและความยาวของแพ็กเกตข้อมูลไม่มีผลกระทบต่อค่าวิสัยสามารถของระบบเลย และในกรณีที่ 3 นั้นจะคล้ายกับกรณีที่ 1 แต่ในกรณีนี้จะมีก็เพียงแต่ความยาวของแพ็กเกตข้อมูลเท่านั้นที่จะมีผลกระทบต่อค่าวิสัยสามารถของระบบ ซึ่งถ้าความยาวของแพ็กเกตข้อมูลมีค่าเข้าใกล้หนึ่งจะทำให้ค่าวิสัยสามารถของระบบลดลง แต่ถ้ากำหนดให้ความยาวของแพ็กเกต

ข้อมูลมีค่ามากกว่าหนึ่งมากก็จะทำให้ค่าวิสัยสามารถของระบบเพิ่มขึ้น ถึงอย่างไรก็ตามในงานวิจัยที่ได้นำเสนอนี้จะมีความเสถียรภาพที่ค่าสูงสุดของระบบเสมอดังที่แสดงให้เห็นในผลการวิเคราะห์เชิงเลขแล้วนั้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์เพื่อหาโพรโทคอลที่เหมาะสมในการใช้งานในระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์ไร้แก่นำแสงความเร็วสูงรูปแบบดาว ในกรณีที่มีผู้ใช้หลายคน โดยในที่นี้เราได้้นำเสนอวิธีการปรับปรุงกราฟฟิกให้บริการของสล็อตอะโลฮามาใช้เพื่อแก้ปัญหาความไม่มีเสถียรภาพของค่าวิสัยสามารถของโพรโทคอลสล็อตอะโลฮาซึ่งเมื่อมีผู้ใช้หลายๆคนค่าวิสัยสามารถของระบบจะลดลงดังที่ได้แสดงให้เห็นในผลการวิเคราะห์แต่สำหรับวิธีการที่เราได้นำเสนอนี้ระบบจะยังคงรักษาค่าวิสัยสามารถของระบบให้มีค่าอยู่ที่ค่าสูงสุด(36.8%)ตลอดเวลา ถึงแม้ว่าจะมีอัตราการมาถึงของผู้ใช้เพิ่มจำนวนมากขึ้นก็ตามซึ่งก็แสดงให้เห็นแล้วในผลการวิเคราะห์

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

1. ควรลองแยกสัญญาณควบคุมออกจากระบบเดิม โดยให้ส่งสัญญาณควบคุมในช่องที่มีความเร็วสูงมากกว่าช่องสัญญาณข้อมูลอย่างน้อย มากกว่า 2 เท่าเพื่อที่จะส่งแพ็กเก็ตควบคุมไปตรวจสอบคิวในปลายทางว่ามีคิวเยอะหรือไม่เพื่อที่ระบบจะได้ไม่ส่งแพ็กเก็ตข้อมูลไปค้างอยู่ในบัฟเฟอร์ปลายทางซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ค่าวิสัยสามารถของระบบลดลง
2. เราสามารถที่จะพัฒนาระบบไปใช้กับการส่งข้อมูลแบบไร้สายได้ เช่น ในระบบ GPRS หรือ EDGE เป็นต้น เพราะมีลักษณะการส่งข้อมูลเป็นแพ็กเก็ต เช่นเดียวกัน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Ganti N.M. Sudhakar, Nicolas D. Georganas and Mohsen Kavehrad, "Slotted ALOHA and Reservation ALOHA Protocol for Very High Speed Optical fiber Local Area Network Using Passive Star Topology", Journal of Lightwave Technology, VOL.9, NO.10, October 1991, pp.1411-1422
- [2] Mario E. Rivero-Angeles, Domingo Lara-Rodriguez and Felipe A. Cruz-Perez. "A New EDGE Medium Access Control Mechanism Using Adaptive Traffic Load Slotted ALOHA", IEEE 2001, pp.1358-1362
- [3] R.Rom, M.Sidi. "Multiple Access Protocol Performance and Analysis" Springer-Verlag, 1990, pp47-77
- [4] Nader Mehravari, "Performance and Protocol Improvements for Very High Speed Optical fiber LAN Using a Passive Star Topology", Journal of Lightwave Technology, VOL.8, NO.4, April 1990, pp. 520-530
- [5] Simon S. LAM, "Packet Broadcast Networks - A Performance Analysis of the R-ALOHA Protocol", IEEE Transaction on Computers, VOL. C-29, NO.7, July 1980, pp.596-602
- [6] Aura Ganz, Zahava Koren, "WDM Passive Star Protocols and Performance Analysis", IEEE 1991
- [7] G.N.M Sudhakar, M. Kavehrad, N.D.Georganas, "Access Protocol for Passive optical Star Networks", Computer Networks and ISDN System .26, 1994, pp. 913-930
- [8] M.A.Marsan, A.Bianco, E.Leonardi, A.Morabito and F.Neri. "All-optical WDM Multi-rings with Differentiated QOS" IEEE Commun.Mag., Vol.37, pp.58-66
- [9] G.Albertengo and R.Sisto. "On the implementation of an interface for a multichannel local area network" Electrotechnical Conference, 1989. Proceedings, Integrating Research, Industry and Education in Energy and Communication Engineering, MELECON'89, Mediterranean, 11-13 April 1989, pp. 649-653.

## ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] เคน มุละสิวะ, สุวิพล สิริชิวภาค และเกรียงไกร วงศ์โรจนภรณ์. "การวิเคราะห์สมรรถนะของโครงข่ายคอมพิวเตอร์ใยแก้วนำแสงรูปแบบดาวโดยการมัลติเพ็คส์ทางความยาวคลื่นแบบหลายช่องสัญญาณ" การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 44, วศ.12/O45, ระหว่างวันที่ 30 มกราคม-2 กุมภาพันธ์ 2549, เล่มที่ 5, หน้า 35-43.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายเคน มุละสิวะ
วัน เดือน ปีเกิด	8 พฤศจิกายน 2520
สถานที่เกิด	จังหวัดหนองคาย
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	ปริญญาตรี อดสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีโทรคมนาคม
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2544
ศึกษาระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาโทรคมนาคม คณะวิศวกรรม ศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เข้าศึกษาต่อในปีการศึกษา 2545