

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอลแบบ CSMA/CA
ในเครือข่าย WDM RING

PERFORMANCE ANALYSIS OF CSMA/CA PROTOCOL OF
WDM RING NETWORK



จย.

8/123 ก

2548

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 60521
วัน,เดือน,ปี..... - 3 ก.ค. 2549

b..... 11587052
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2548
ISBN 974-15-1665-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PERFORMANCE ANALYSIS OF CSMA/CA PROTOCOL OF
WDM RING NETWORK**



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

2005

ISBN 974-15-1665-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอลแบบ CSMA/CA ใน เครือข่าย WDM Ring |
| นักศึกษา | นางสาวมณวิภา ศรีสุริยะ |
| รหัสนักศึกษา | 45060501 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโทรคมนาคม |
| พ.ศ. | 2548 |
| อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร.สุวิพล สิทธีชีวะภาค |

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอถึงการวิเคราะห์สมรรถนะของเครือข่าย WDM (Wavelength Division Multiplexing) Ring ที่ใช้โปรโตคอลการเข้าถึงแบบ CSMA/CA (Carrier sense multiple access with collision avoidance) โดยการใช้วิธีมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น หรือ WDM ในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นจะเป็นการเพิ่มความจุของเครือข่าย ทำให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้งานเครือข่ายที่มีความรวดเร็วและความจุสูงได้ และการใช้โปรโตคอลการเข้าถึงแบบ CSMA/CA นั้นจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเข้าถึงช่องสัญญาณและลดการชนกันของข้อมูล ในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบนั้นจะทำการวิเคราะห์ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) และค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย (Average Delay) โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ในการคำนวณ และได้นำผลการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับผลของโปรโตคอลที่มีใช้อยู่แล้วในเครือข่าย WDM Ring ซึ่งได้แก่ โปรโตคอลแบบสล็อตติงริง (Slotted Ring)

| | |
|-----------------------|---|
| Thesis Title | Performances Analysis of CSMA/CA Protocol of WDM Ring Network |
| Student | Miss Monwipa Srisuriya |
| Student ID. | 45060501 |
| Degree | Master of Engineering |
| Programme | Telecommunication Engineering |
| Year | 2005 |
| Thesis Advisor | Assoc.Prof.Dr.Suvepol Sittichevapak |

ABSTRACT

This thesis concerns about the analysis of WDM (Wavelength Division Multiplexing) Ring Network based on CSMA/CA (Carrier sense multiple access with collision avoidance) protocol. The rapid growth in demand for high-capacity telecommunication links and the speed limitation of single-wavelength links has resulted in an extraordinary increase in the use of WDM in optical fiber communication link. In CSMA/CA, carrier-sensing circuits detect the presence or absence of signal in optical channels, and control packet transmission from a node, avoiding collision with in-transit packets. The results are analyzed by evaluating their throughput and delay characteristics. The analysis results are considered in term of mathematic equations. The thesis provides a comparative evaluation of the performance of Slotted Ring protocol, which has been used in the WDM Ring Network.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าต้องขอกราบขอบพระคุณสำหรับ คำปรึกษาและแนะนำที่มีคุณค่าต่อการทำงานวิจัยอย่างยิ่ง ทำให้วิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าบรรลุผล โดยเฉพาะความเอาใจใส่ ความช่วยเหลือ แนะนำแนวทางแก้ไขปัญหา พร้อมทั้งเป็นแรงกระตุ้นในการ วิจัยครั้งนี้ จาก รศ.ดร.สุวิพล สิริชิวภาค ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมงานวิจัย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ มา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ บิดา-มารดา และครอบครัว ที่ให้กำลังใจให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือใน ระหว่างการศึกษามาโดยตลอด

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และรุ่นน้อง ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจข้าพเจ้าในระหว่างการ ทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดับ ที่น่า หลิน สำหรับ ความ ตั้งใจในงานพิมพ์ , ปิงและบิค สำหรับ รูปสวยๆ ที่มาประกอบรายงาน พีโลลาห์ สำหรับความเอาใจ ใส่เรื่องการใส่ภาษาของบทความ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นความรู้และความสามารถนำไปใช้ ประโยชน์ต่อผู้ทำงานวิจัยด้านนี้ต่อไป

มณวิภา

ศรีสุริยะ

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 2.2 ระเบียบการจัดการในเครือข่ายท้องถิ่น..... | 5 |
| 2.2.1 การแบ่งชั้นโพรโทคอลตามมาตรฐาน OSI..... | 5 |
| 2.2.1.1 ชั้นกายภาพ (physical layer)..... | 5 |
| 2.2.1.2 ชั้นเชื่อมโยงข้อมูล (data link layer)..... | 6 |
| 2.2.1.3 ชั้นเครือข่าย (network layer)..... | 6 |
| 2.2.1.4 ชั้นการขนส่ง (transport layer)..... | 6 |
| 2.2.1.5 ชั้นการโต้ตอบ (session layer)..... | 6 |
| 2.2.1.6 ชั้นการนำเสนอ (presentation layer)..... | 7 |
| 2.2.1.7 ชั้นการประยุกต์การใช้งาน (application layer)..... | 5 |
| 2.2.2 การแบ่งระดับการสื่อสารของเครือข่ายท้องถิ่น ตามข้อกำหนดของ IEEE 802.11..... | 7 |
| 2.2.2.1 Physical Layer..... | 7 |
| 2.2.2.2 Medium Access Control (MAC)..... | 8 |
| 2.2.2.3 Logical Link Control (LLC)..... | 9 |
| 2.3 โพรโทคอลแบบ CSMA/CA..... | 10 |
| 2.3.1 เปรียบเทียบวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA กับ วิธีการเข้าถึงแบบ CSMA และวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CD..... | 10 |
| 2.3.2 กลไกการเข้าถึงของโพรโทคอลแบบ CSMA/CA..... | 11 |
| 2.4 ช่วงเวลาการ Backoff แบบสุ่ม..... | 13 |
| 2.5 หลักการทำงานของโพรโทคอลแบบสล็อตจริง..... | 14 |
| | |
| บทที่ 3 เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น..... | 16 |
| 3.1 เส้นใยแก้วนำแสง..... | 16 |
| 3.1.1 ส่วนประกอบของเส้นใยแก้วนำแสง..... | 16 |
| 3.1.2 สรุปคุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทต่างๆ..... | 18 |
| 3.1.2.1 เส้นใยแก้วนำแสงมัลติโหมดแบบสเตปอินเด็กซ์..... | 18 |
| 3.1.2.2 เส้นใยแก้วนำแสงมัลติโหมดแบบเกรดอินเด็กซ์..... | 18 |
| 3.1.2.3 เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียวแบบสเตปอินเด็กซ์..... | 18 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 3.1.2.4 เส้นใยแก้วนำแสงแบบเลื่อนดิสเพอร์ชัน | 18 |
| 3.1.2.5 เส้นใยแก้วนำแสงแบบดิสเพอร์ชันเรียบ | 19 |
| 3.1.3 การสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสง | 19 |
| 3.2 การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น | 22 |
| 3.2.1 หลักการของเทคโนโลยี WDM | 23 |
| 3.2.2 ส่วนประกอบ โครงข่ายใยแก้วนำแสงระบบ WDM | 24 |
| 3.2.2.1 Optical Fiber | 24 |
| 3.2.2.2 Optical Source | 24 |
| 3.2.2.3 Optical Detector | 24 |
| 3.2.2.4 MUX/DEMUX | 24 |
| 3.2.2.5 Optical Transmitter | 24 |
| 3.2.2.6 Amplifier | 24 |
| 3.3 ประเภทของ WDM | 26 |
| 3.3.1 Wavelength-Selective WDM | 26 |
| 3.3.2 Broadcast-and-Select WDM | 27 |
| 3.4 ตัวมัลติเพล็กซ์เซอร์ | 28 |
| 3.4.1 อุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุม | 28 |
| 3.4.2 อุปกรณ์ฟิลเตอร์ | 29 |
| 3.4.2.1 Interference Filter | 29 |
| 3.4.2.2 ฟิลเตอร์เรโซแนนซ์แบบ Fabry-Perot | 30 |
| 3.4.2.3 ฟิลเตอร์แบบอุปกรณ์ขยายกิ่งตัวนำ | 30 |
| 3.4.2.4 ฟิลเตอร์ไฟฟ้าแบบ Coherent Detection | 30 |
| 3.5 แหล่งกำเนิดแสง | 31 |
| 3.5.1 LED | 31 |
| 3.5.2 เลเซอร์ไดโอดแบบ Fabry-Perot | 31 |
| 3.5.3 เลเซอร์ไดโอด DFB | 32 |
| 3.5.4 เลเซอร์ที่กำหนดค่าความถี่ | 32 |
| 3.6 ระบบเครือข่ายแบบหลายความยาวคลื่น | 32 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|-----------|
| 3.6.1 ตัวส่งที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้..... | 32 |
| 3.6.1.1 การปรับเปลี่ยนโดยใช้อุณหภูมิหรือกระแส..... | 32 |
| 3.6.1.2 การปรับเปลี่ยนด้วย DFB และ DFR..... | 33 |
| 3.6.1.3 การปรับเปลี่ยนโดยใช้อุปกรณ์ภายนอก..... | 33 |
| 3.6.2 ตัวรับที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้..... | 33 |
| 3.6.2.1 ฟิลเตอร์แบบหลายชั้น..... | 33 |
| 3.6.2.2 ฟิลเตอร์แบบ Fabry-Perot Interferometer..... | 33 |
| 3.6.2.3 เลเซอร์แบบ DFB ที่ทำงานที่ต่ำกว่าค่าเทร โชลด์..... | 33 |
| 3.7 การป้องกันโครงข่ายล่อม..... | 34 |
| 3.8 โครงสร้างของเครือข่าย WDM Ring..... | 35 |
| บทที่ 4 การวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอลแบบ CSMA/CA ในเครือข่าย WDM Ring..... | 36 |
| 4.1 การหาค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ของระบบ..... | 36 |
| 4.2 การหาค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย (Delay) ของระบบ..... | 42 |
| 4.3 การวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอลแบบสล็อตตริง..... | 43 |
| บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข..... | 46 |
| 5.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อใช้โปรโตคอลแบบ CSMA/CA..... | 46 |
| 5.1.1 ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ของระบบ..... | 47 |
| 5.1.2 ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย (Delay) ของระบบ..... | 50 |
| 5.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอลแบบสล็อตตริง..... | 52 |
| 5.3 การเปรียบเทียบสมรรถนะของโปรโตคอลแบบ CSMA/CA กับโปรโตคอลแบบ สล็อตตริงเมื่อนำมาใช้ในเครือข่าย WDM Ring..... | 54 |
| บทที่ 6 สรุปผลการวิเคราะห์..... | 56 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|-------------------------------|------|
| เอกสารอ้างอิง..... | 58 |
| ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์..... | 60 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 61 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิสัยสามารถของเครือข่าย WDM Ring กับค่าโหนดที่ต้องการ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าจำนวนช่องสัญญาณ (λ) กำหนดให้ $M=100$, $a=0.01$, $p=0.03$, และ $f=0.06$ | 47 |
| 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิสัยสามารถของเครือข่าย WDM Ring กับค่าโหนดที่ต้องการ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าผู้ใช้ (M) กำหนดให้ $\lambda=30$, $a=0.01$, $p=0.03$ และ $f=0.06$ | 48 |
| 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลกับค่าโหนดที่ต้องการ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าผู้ใช้ (M) กำหนดให้ $\lambda=30$, $a=0.01$, $p=0.03$, $f=0.06$ และ $\bar{Y} = 0.06$ | 49 |
| 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลกับค่าวิสัยสามารถของ เครือข่าย WDM Ring โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าผู้ใช้ (M) กำหนดให้ $\lambda=30$, $a=0.01$, $p=0.03$, $f=0.06$, และ $\bar{Y} = 0.06$ | 50 |
| 5.5 ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ในเครือข่าย WDM Ring | 51 |
| 5.6 ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ในเครือข่าย WDM Ring | 53 |
| 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลกับค่าวิสัยสามารถของเครือข่าย WDM Ring เมื่อเปรียบเทียบระหว่างโปรโตคอลแบบ CSMA/CA และแบบสล็อตตริง กำหนดให้ จำนวนสถานี (M) เท่ากับ 100 | 55 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.1 คุณสมบัติของ LED และเลเซอร์ไดโอด..... | 20 |
| 3.2 ค่าแบนวิดท์ที่ใช้ในเทคนิคการกรองต่างๆ..... | 30 |
| 3.3 ความกว้างสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่างๆ..... | 31 |



สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ระดับการสื่อสารของเครือข่ายท้องถิ่นเทียบกับ OSI..... | 7 |
| 2.2 การใช้เฟรม RTS และ CTS..... | 9 |
| 2.3 หลักการทำงานของวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA..... | 11 |
| 2.4 วิธีการตรวจจับคลื่นพาห์..... | 12 |
| 2.5 การตรวจจับการชนกันของข้อมูล..... | 13 |
| 2.6 ลักษณะของ Contention Window..... | 14 |
| 2.7 สล็อตว่างและไม่ว่าง..... | 15 |
| 2.8 เครือข่ายวงแหวนการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบสล็อต..... | 15 |
| 3.1 ส่วนประกอบของเส้นใยแก้วนำแสง..... | 17 |
| 3.2 ภาพของเคเบิลใยแก้วนำแสง Kevlar fiber..... | 17 |
| 3.3 ระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสง..... | 19 |
| 3.4 โครงสร้างของระบบการมัลติเพล็กซ์..... | 20 |
| 3.5 การทำงานของสวิตช์ซึ่งระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา..... | 21 |
| 3.6 ช่วงคลื่นพาห์ย่อยของแต่ละช่องสัญญาณที่รวมกันในระบบ SCM..... | 22 |
| 3.7 การส่งข้อมูลแบบหลายความยาวคลื่นโดยเปรียบกับการวิ่งของรถยนต์บนถนน..... | 23 |
| 3.8 การทำงานของเทคโนโลยี WDM..... | 23 |
| 3.9 (ก) Space Switch แบบธรรมดา..... | 25 |
| (ข) Space Switch แบบแยกแต่ละความยาวคลื่น..... | 25 |
| (ค) สวิตช์ที่เปลี่ยนเส้นทางและความยาวคลื่นของสัญญาณในคราวเดียวกัน..... | 25 |
| 3.10 เทคนิค Wavelength-Selective WDM..... | 27 |
| 3.11 เทคนิค Broadcast-and-Select WDM..... | 27 |
| 3.12 ระบบการแยกความยาวคลื่นโดยอุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุมและเลนส์..... | 29 |
| 3.13 การทำงานของเกรตติงในตัวรับ WDM..... | 29 |
| 3.14 ฟิลเตอร์แบบ Fabry-Perot Interferometer..... | 33 |
| 3.15 การป้องกันโครงข่ายของ dual-fiber ring ด้วยการสวิตช์..... | 34 |
| 3.16 โครงสร้างของโครงข่าย WDM Ring..... | 35 |
| 4.1 แบบจำลองช่องสัญญาณของโปรโตคอลแบบ CSMA/CA..... | 36 |
| 4.2 รูปแบบของมินิแพ็กเก็ต..... | 44 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการติดต่อสื่อสารผ่านทางโครงข่ายอินเทอร์เน็ต (Internet Networks) นับวันจะมีความสำคัญมากยิ่งขึ้นเป็นผลให้เกิดความต้องการในการใช้แบนด์วิดท์เพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาโครงข่ายอินเทอร์เน็ตที่สามารถรองรับกับความต้องการในการใช้แบนด์วิดท์ที่เพิ่มขึ้นนี้ โครงข่ายทางแสง (Optical Network) นับเป็นโครงข่ายที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก เพราะสามารถรองรับกับความต้องการดังกล่าวได้ แต่เนื่องจากโครงข่ายทางแสงนี้มีแบนด์วิดท์ที่สูงมากถ้านำมาใช้โดยตรงก็จะไม่สามารถใช้ประสิทธิภาพได้อย่างเต็มที่เพราะความเร็วในการทำงานทางอิเล็กทรอนิกส์มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับความเร็วของโครงข่ายแสงจึงได้มีการแบ่งแบนด์วิดท์ของโครงข่ายแสงออกเป็นหลายส่วน โดยแต่ละส่วนจะมีความเร็วที่มีค่าต่ำลงใกล้เคียงกับความเร็วในการทำงานทางอิเล็กทรอนิกส์ การแบ่งแบนด์วิดท์ขนาดใหญ่ให้มีขนาดต่ำลงทำให้สามารถใช้แบนด์วิดท์ของโครงข่ายทางแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งวิธีการแบ่งแบนด์วิดท์ดังกล่าว เรียกว่า การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing, WDM) ซึ่งเทคโนโลยี WDM นั้นเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจอย่างมากในการนำมาประยุกต์สร้างเครือข่ายความเร็วสูงที่สามารถส่งผ่านข้อมูลหลายประเภทพร้อม ๆ กันดังเช่น ภาพและเสียงภายในเครือข่ายเดียว โดยปัจจุบันมีการวิจัย เทคโนโลยี WDM ให้สามารถรองรับการส่งที่ 1,000 ความยาวคลื่นต่อเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้น และสามารถรองรับการส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงถึง 3.2 Tbps [1-2] สำหรับโทโพโลยีทางกายภาพ (physical topology) ของโครงข่าย WDM ที่พบมีด้วยกันหลายแบบ คือโทโพโลยีแบบวงแหวน (ring topology) [3-5] โทโพโลยีแบบดาว (star topology) [6] โทโพโลยีแบบบัส (bus topology) และโทโพโลยีแบบต้นไม้ (tree topology) [7] โทโพโลยีแบบวงแหวนนับเป็นโทโพโลยีหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากเพราะมีโครงสร้างที่เป็นระเบียบชัดเจน ไม่ซับซ้อนและยังสามารถจัดการกับความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง (link) ได้ง่ายด้วย

วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอการวิเคราะห์สมรรถนะของเครือข่าย WDM Ring โดยใช้โปรโตคอลแบบ CSMA/CA ซึ่งจากเดิมนั้นใช้ในมาตรฐาน IEEE 802.11 ในระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย แต่เนื่องจากวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA เป็นวิธีการเข้าถึงที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถที่จะลดการชนกันของข้อมูลได้จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในระบบท้องถิ่นแบบมีสาย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อทำการศึกษาวเคราะห์สมรรถนะของเครือข่ายท้องถิ่นที่มีลักษณะสถาปัตยกรรมแบบ WDM Ring และมีวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ซึ่งในการวิเคราะห์กระทำโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ในการคำนวณ โดยจะทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของเครือข่ายในรูปของค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย (Average Delay) และค่าวิสัยสามารถของระบบ (Throughput) โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ เช่น จำนวนสถานี จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในการมัลติเพล็กซ์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ถือเป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพหลักของระบบการสื่อสาร และได้นำผลการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับโปรโตคอลเดิมที่มีใช้อยู่แล้วในเครือข่าย WDM Ring ซึ่งได้แก่โปรโตคอลแบบสล็อตตริง

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ระบบมัลติเพล็กซ์แบบหลายความยาวคลื่นช่วยเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณในการส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงทำให้สามารถส่งพร้อมกันหลายช่องสัญญาณด้วยความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากจำนวนช่องสัญญาณที่มีใช้อยู่จำกัด จึงทำให้ต้องใช้วิธีการจัดการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ ซึ่งโปรโตคอลแบบ CSMA/CA นั้นเป็นโปรโตคอลที่มีประสิทธิภาพดีช่วยทำให้การเข้าถึงช่องสัญญาณเป็นไปอย่างยุติธรรมและรวดเร็ว

1.4 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในปัจจุบัน ความต้องการในการส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายในบริเวณกว้างทั่วโลกมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ระบบที่มีความจุสูงและสามารถรองรับการส่งและรับข้อมูลปริมาณมากในเวลาอันรวดเร็วถูกพัฒนาขึ้นไปตามลำดับ ระบบโครงข่ายที่มีอุปกรณ์ทำงานอยู่ในรูปของแสงทั้งหมดช่วยลดปัญหาจากการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและช่วยให้สามารถส่งข้อมูลผ่านเส้นใยนำแสงไปในระยะทางไกลโดยมีการลดทอนของสัญญาณน้อยมากและมีความไวใจได้ของข้อมูลสูงหรือมีอัตราบิดผิดพลาดต่ำ ความเร็วในการส่งข้อมูลมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นในระดับที่มีหน่วยเป็น Tb/s [1-2] ระบบมัลติเพล็กซ์แบบหลายความยาวคลื่นช่วยเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณในการส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงทำให้สามารถส่งพร้อมกันหลายช่องสัญญาณด้วยความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากจำนวนช่องสัญญาณที่มีใช้อยู่จำกัด จึงทำให้ต้องใช้วิธีการจัดการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ ซึ่งโปรโตคอลแบบ CSMA/CA นั้นเป็นโปรโตคอลที่มีประสิทธิภาพดีช่วยทำให้การเข้าถึงช่องสัญญาณเป็นไปอย่างยุติธรรมและรวดเร็ว

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นแรกผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเครือข่าย WDM Ring ว่ามีหลักการทำงานอย่างไรเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกับวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ขั้นต่อมาเราจะทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์สมรรถนะของวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA เมื่อนำมาใช้ในเครือข่าย WDM Ring โดยอาศัยหลักการของความน่าจะเป็น ต่อมาจึงทำการศึกษาและวิเคราะห์สมรรถนะของวิธีการเข้าถึงแบบสล็อตตรง แล้วนำผลการคำนวณที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณของวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA โดยผลการวิเคราะห์เชิงเลขที่ได้มานั้นจะถูกนำมาพล็อตเป็นกราฟโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อตรวจสอบสมมติฐาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรโตคอลแบบ CSMA/CA

2.1 สถาปัตยกรรมโครงข่ายท้องถิ่น

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างมาก และจำนวนผู้ใช้คอมพิวเตอร์ที่มากขึ้น ทำให้ปริมาณข้อมูลในการติดต่อสื่อสารเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งข้อมูลบางอย่างอาจเป็นที่ต้องการของผู้ใช้หลาย ๆ คน จึงทำให้เกิดการสร้างเครือข่ายเพื่อการสื่อสารขึ้นมา

2.1.1 จุดประสงค์ของเครือข่ายคอมพิวเตอร์

การประมวลผลด้านคอมพิวเตอร์มีแนวโน้มที่จะเป็นแบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์มากขึ้น ซึ่งจุดประสงค์หลักของเครือข่ายคอมพิวเตอร์สรุปได้ดังต่อไปนี้ [8-12]

2.1.1.1 เพื่อใช้ทรัพยากรร่วมกัน เช่น ใช้ฐานข้อมูล ตัวประมวลผล (processors) ตลอดจนฮาร์ดดิสก์ของเครื่องพิมพ์ร่วมกัน

2.1.1.2 เพื่อให้มีการติดต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลกัน ได้ระหว่างผู้ใช้ หรือระหว่างตัวประมวลผล เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ (reliability) ของระบบประมวลผล โดยมีการสำรอง (backup) ระบบ ตลอดจนความซ้ำซ้อนของระบบ เช่น การมีคอมพิวเตอร์หรือฐานข้อมูลอยู่ในที่ต่าง ๆ และมีการเชื่อมโยงระบบคอมพิวเตอร์เหล่านั้นเข้าด้วยกัน เมื่อระบบคอมพิวเตอร์ที่ใดที่หนึ่งไม่สามารถใช้งานได้ ผู้ใช้ก็จะเปลี่ยนไปใช้งานระบบคอมพิวเตอร์ที่อื่นได้

2.1.1.3 เพื่อช่วยให้สามารถประมวลผลแบบกระจายได้ ซึ่งการประมวลผลแบบนี้จะช่วยให้มีการกระจายการทำงานจากคอมพิวเตอร์เครื่องใหญ่ไปสู่คอมพิวเตอร์เครื่องเล็ก ๆ ซึ่งราคาไม่แพงมาก และช่วยลดจำนวนข้อมูลที่ส่งเข้าไปในสาย โดยที่จะทำการประมวลผลที่แหล่งกำเนิดข้อมูล หรือแหล่งที่ต้องการผลข้อมูล หรืออาจจะส่งข้อมูลไปประมวลผลที่คอมพิวเตอร์ที่เหมาะสมกับงานนั้น ๆ ก็ได้

2.1.1.4 เพื่อให้สามารถควบคุมและจัดสรรทรัพยากรจากส่วนกลาง (สำหรับในระบบการทำงานแบบกระจาย) ไปสู่แต่ละระบบย่อยที่อยู่ห่างไกลกัน

2.1.1.5 เพื่อช่วยให้อุปกรณ์ (equipment) ที่มีความแตกต่างกัน สามารถใช้งานร่วมกันได้

2.1.2 รูปแบบของเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบ่งตามขนาด

2.1.2.1 เครือข่ายขนาดใหญ่หรือระหว่างประเทศ (WAN: Wide Area Networks) เป็นเครือข่ายซึ่งมีขอบเขตกว้าง ครอบคลุมทั่วประเทศและระหว่างประเทศมีอัตราการส่งข้อมูลไม่สูงมากนัก (มักจะต่ำกว่า 1 Mbps) โดยปกติแล้วการส่งข้อมูล WAN นั้นจะอาศัย Switched Network

ในการส่งข้อมูลระหว่างโหนด ยกเว้นเครือข่ายดาวเทียมซึ่งจะทำงานในลักษณะของการแพร่กระจายข้อมูล กล่าวคือข้อมูลที่ถูส่งขึ้นไปยังดาวเทียมแล้วดาวเทียมจะแพร่สัญญาณข้อมูลลงไปยังทุกสถานีที่อยู่ในเงาของดาวเทียม ดังนั้นทุกสถานีจะเห็นข้อมูลเหมือนกันหมด เนื่องจากแวนมีขอบเขตกว้าง จึงมักจะต้องอาศัยเครือข่ายโทรศัพท์ (Public Telephone Network) ในการส่งข้อมูล ซึ่งทำให้ถูกจำกัดความสามารถในการส่งข้อมูล (bandwidth) รวมทั้งมีอัตราความผิดพลาดของข้อมูล (error rate) สูง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อัตราการส่งข้อมูลต่ำ

2.1.2.2 เครือข่ายขนาดกลางหรือเครือข่ายเมือง (MAN: Metropolitan Area Networks) เป็นเครือข่ายที่ครอบคลุมทั้งตัวเมือง เช่น การแพร่ข้อมูลภาพด้วยระบบเคเบิลทีวี หรือการส่งข้อมูลด้วยคลื่นวิทยุ ซึ่งการส่งข้อมูลจะเป็นซึ่งการส่งข้อมูลจะเป็นลักษณะของเครือข่ายแบบแพร่กระจายข้อมูลคล้ายกับดาวเทียม

2.1.2.3 เครือข่ายขนาดเล็กหรือเครือข่ายท้องถิ่น (LAN: Local Area Networks) เป็นเครือข่ายเฉพาะที่ ครอบคลุมเขตไม่กว้างนัก (ไม่กี่กิโลเมตร) เช่น เครือข่ายภายในอาคารหนึ่ง ๆ หรือภายในวิทยาลัยหนึ่ง ๆ เป็นต้น LAN นั้นจะส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูง (หลาย ๆ Mbps) นอกจากนั้นอัตราความผิดพลาดของการส่งข้อมูลต่ำประมาณ 10^{-8} ถึง 10^{-11} (กล่าวคือส่งข้อมูล 10^{11} บิต จะมีการความผิดพลาด 1 บิต) ปกติแล้ว LAN จะใช้การส่งข้อมูลแบบแพร่กระจาย

2.2 ระเบียบการจัดการในเครือข่ายท้องถิ่น

เนื่องจากตามที่ได้กล่าวไว้แล้วว่า เครือข่ายท้องถิ่น (LAN : Local Area Network) เป็นเครือข่ายเฉพาะที่ ครอบคลุมเขตไม่กว้างนัก โดยจะมีการเชื่อมต่อระบบสื่อสารระหว่างองค์กรที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน แต่การเชื่อมต่อนั้นกระทำไต่ยากมาก ทำให้เกิดความพยายามในการกำหนดมาตรฐานกลางภายใต้การดูแลขององค์กร ISO (International Organization for Standardization) เพื่อให้ระบบโครงข่ายต่าง ๆ สามารถเชื่อมต่อกันได้ง่ายขึ้น โดย ISO ได้พัฒนาและจัดตั้งมาตรฐานการเชื่อมต่อถึงกันของระบบเปิด หรือเรียกว่า Open System Interconnection (OSI) ขึ้น เพื่อที่ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบต่าง ๆ จะได้เข้าใจหรือรับรู้รูปแบบของข้อมูลข่าวสารนั้น ๆ ว่าถูกจัดวางไว้อย่างไร

2.2.1 การแบ่งชั้นโพรโทคอลตามมาตรฐาน OSI ซึ่งแบ่งการทำงานออกเป็นระดับต่าง ๆ ได้ 7 ชั้น ดังนี้

2.2.1.1 ชั้นกายภาพ (physical layer) จะเกี่ยวข้องกับข้อกำหนดเกี่ยวกับฮาร์ดแวร์ที่จะใช้ในการสื่อสารข้อมูลอันครอบคลุมถึงเรื่องระดับแรงดันไฟฟ้าที่จะใช้ ช่วงเวลาในการส่งข้อมูล และกฎในการตรวจสอบความสัมพันธ์ในการเริ่มเชื่อมต่อการสื่อสาร โดยเป็นการกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของอุปกรณ์อินเทอร์เฟซกับสื่อสัญญาณ กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งเป็นเรื่องที่เกี่ยวข้อง

กับรูปสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งข้อมูลแต่ละบิต ระดับแรงดัน รวมถึงอัตราบิตที่จะส่ง กำหนดหน้าที่ของอินเทอร์เฟซแต่ละส่วน กำหนดขั้นตอนและระดับการรับส่งสตรีมของบิตที่จะส่งผ่านสื่อสัญญาณ

2.2.1.2 ชั้นเชื่อมโยงข้อมูล (data link layer) สิ่งในระดับกายภาพจะส่งต่อไปให้ระดับเชื่อมโยงข้อมูลคือบิต โดยบิตนั้นจะถูกแทนด้วยการเป็นกรอบของข้อมูล ซึ่งก็คือการที่บิตหลาย ๆ บิตรวมกันกับรายละเอียดการควบคุมอื่น ๆ โดยรวบรวมข้อมูลให้อยู่ในรูปของกรอบของข้อมูลเพื่อทำการสื่อสารต่อไป บทบาทของชั้นนี้คือการตรวจจับความผิดพลาดและการควบคุมความผิดพลาดของอุปกรณ์การสื่อสาร

2.2.1.3 ชั้นเครือข่าย (network layer) โพรโทคอลในชั้นนี้ทำหน้าที่ส่งผ่านข้อมูลจากเทอร์มินอลต้นทางให้ไปถึงเทอร์มินอลปลายทาง ทำให้เกิดสวิตช์ซึ่งด้วยการสร้างวงจรเสมือนเชื่อมระหว่างคอมพิวเตอร์หรือเทอร์มินัลทั้งสองเพื่อเป็นเส้นทางในการสื่อสารข้อมูลต่อไป อีกทั้งยังมีหน้าที่ควบคุมโฟลว์ (flow control) คือการควบคุมมิให้ภาคส่งแพ็กเก็ตด้วยอัตราการส่งที่สูงกว่าที่ทางภาคจะรับได้ และควบคุมความแออัดคับคั่ง (congestion control) คือการควบคุมการส่งของผู้ใช้บริการไม่ให้ส่งแพ็กเก็ตในอัตราที่สูงเกินกว่าที่ทางโครงข่ายจะรองรับได้

2.2.1.4 ชั้นการขนส่ง (transport layer) มีหน้าที่หลักคือ ตรวจสอบและแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในข้อมูล คอยแยกแยะและจัดระบบของแพ็กเก็ตข้อมูลให้ถูกส่งเรียงตามลำดับที่ถูกต้อง นอกจากนี้ยังทำหน้าที่แบ่งข้อความของผู้ใช้หรือเทอร์มินอลที่ภาคส่งออกเป็นแพ็กเก็ตจำนวนหนึ่ง อีกทั้งยังทำหน้าที่มีลคิเพด็กการสื่อสารความเร็วต่ำของผู้ใช้หลายคนที่ส่งจากต้นทางเดียวกัน และมีจุดหมายปลายทางเดียวกันเพื่อให้ข้อความหรือแพ็กเก็ตของผู้ใช้เหล่านี้สามารถส่งผ่านลงบนช่องสื่อสารที่เตรียมไว้โดยชั้นเน็ตเวิร์กช่องเดียวกัน ทั้งนี้เพื่อลดปริมาณของโอเวอร์เฮดลง

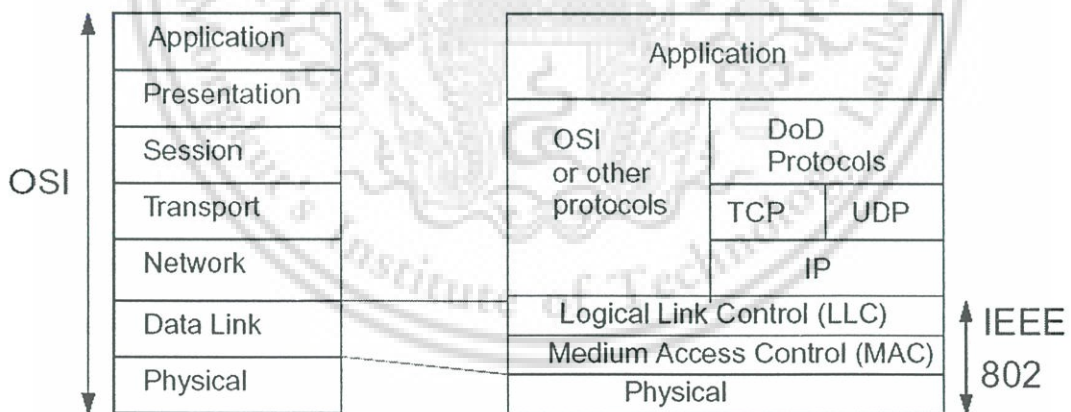
2.2.1.5 ชั้นการโต้ตอบ (session layer) มีหน้าที่ในการสร้างเซสชันหรือจัดการเชื่อมต่อแอปพลิเคชัน 2 ตัวที่ทำงานอยู่บนเครื่องคอมพิวเตอร์คนละเครื่อง ชั้นเซสชันจะคอยดูแลการรับส่งข้อมูลในเซสชันให้มีจังหวะการรับและการส่งให้สอดคล้องกัน โดยขณะที่ฝ่ายหนึ่งกำลังส่งอีกฝ่ายก็จะคอยรับเพียงอย่างเดียว โดยระบบนี้จะเกี่ยวข้องกับการจัดการระบบเครือข่ายคอยรองรับการตรวจสอบรหัสผ่าน การอนุญาตให้ผู้ใช้เข้าหรือออกจากระบบเครือข่าย ระดับการโต้ตอบยังสามารถกำหนดระบุเลือกผู้ส่งสาร ความถี่ที่จะสามารถติดต่อได้ และสามารถจำกัดช่วงระยะเวลาในการติดต่อ ควบคุมการถ่ายเทข้อมูล รวมถึงการคอยกู้ข้อมูลที่เสียหายอันเกิดจากระบบเครือข่ายล่มหรือทำงานผิดปกติได้ด้วย นอกจากนี้ยังมีหน้าที่แก้ปัญหาในกรณีที่เกิดความผิดพลาดของโครงข่ายสื่อสารในระหว่างการส่งข้อมูล โดยเฉพาะในกรณีที่ส่งข้อมูลเป็นไฟล์ขนาดใหญ่หรือสตรีมข้อมูลยาว ๆ โครงข่ายที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นจะทำให้การส่งข้อมูลของผู้ใช้ต้องชะงักลง ในกรณีเช่นนี้ผู้ใช้ไม่ต้องเริ่มการส่งไฟล์ใหม่หมดตั้งแต่ต้น เพราะในชั้นนี้จะมีการแทรกจุดตรวจเป็นระยะ เพื่อที่

เมื่อมีปัญหาเกิดขึ้นกับโครงข่ายระหว่างส่ง ผู้ใช้บริการสามารถส่งข้อมูลจากจุดตรวจจุดสุดท้ายก่อนการเกิดปัญหาได้โดยไม่ต้องเริ่มส่งข้อมูลใหม่ทั้งหมด

2.2.1.6 ชั้นการนำเสนอ (presentation layer) มีหน้าที่เกี่ยวกับการรักษาความปลอดภัยของระบบเครือข่าย การอ่าน โอนข้อมูล และการกำหนดดูแลและจัดการกับรูปแบบการแสดงผลข่าวสารของผู้ใช้บริการ แปลงรูปแบบรหัสที่แตกต่างกันให้ทำงานร่วมกันได้ โดยมีมักจะเป็นปัญหาเกี่ยวกับการเก็บตัวเลขในอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่มีความแตกต่างกัน โดยการนำเสนอจะต้องทราบรายละเอียดรูปแบบการจัดเก็บหรือการแสดงผลของอุปกรณ์สื่อสารทั้งที่ภาคส่งและภาครับ เพื่อให้การแปลงรูปแบบข่าวสารระหว่างกันสามารถทำได้ถูกต้อง อีกทั้งต้องดูแลจัดการการเข้ารหัสรับข้อมูล (data encryption) และการบีบอัดข้อมูล (data compression)

2.2.1.7 ชั้นการประยุกต์การใช้งาน (application layer) เป็นโพรโทคอลชั้นบนสุด เกี่ยวข้องโดยตรงกับซอฟต์แวร์ประยุกต์การใช้งานตามแต่ที่ผู้ใช้ต้องการซึ่งมีความแตกต่างหลากหลายมาก เป็นชั้นที่ติดต่อกับผู้ใช้โดยตรง และ โปรแกรมประยุกต์ต่าง ๆ จะอาศัยโพรโทคอลในชั้นที่ต่ำกว่าเพื่อตอบสนองความต้องการติดต่อสื่อสารของผู้ใช้บริการผ่าน โครงข่าย กล่าวคือเป็น โปรแกรมใช้งานบนระบบเครือข่ายทำงานอยู่บนระดับการประยุกต์การใช้งานต่าง ๆ ซึ่งรวมถึง โปรแกรมจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ (email) ฐานข้อมูล การจัดการไฟล์ เซิร์ฟเวอร์ และเซิร์ฟเวอร์งานพิมพ์

โดยการสื่อสารข้อมูลแบบแพ็กเกตจะเกี่ยวข้องกับ 3 ระดับล่างเท่านั้น ซึ่งได้แก่ ชั้นกายภาพ (physical layer), ชั้นเชื่อมโยงข้อมูล (data link layer) และชั้นเครือข่าย (network layer)



รูปที่ 2.1 ระดับการสื่อสารของเครือข่ายท้องถิ่นเทียบกับ OSI

2.2.2 การแบ่งระดับการสื่อสารของเครือข่ายท้องถิ่นตามข้อกำหนดของ IEEE 802

ตามข้อกำหนดของ IEEE 802 ได้จัดแบ่งระดับการสื่อสารของเครือข่ายท้องถิ่นขึ้นใหม่เป็นการแยกระดับออกเป็น 3 ระดับ ซึ่งเทียบได้กับ OSI สองระดับ ดังรูปที่ 2.1 โดยแต่ละระดับมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.1 Physical Layer มีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- เข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณ
- ทำหน้าที่ซิงโครไนซ์ สร้างสัญญาณ
- ทำการรับและส่งบิตข้อมูล

2.2.2.2 Medium Access Control (MAC) ซึ่งอยู่ในระดับล่างถัดลงมา แต่เมื่อเทียบกับ OSI โมเดล ก็ยังอยู่ในระดับดาต้าลิงก์ จะทำงานในหน้าที่ต่อไปนี้

- เป็นการจัดการสำหรับการเข้าถึงข้อมูลที่มาจากต้นทางหลายแห่ง และไปยังปลายทางได้หลายที่

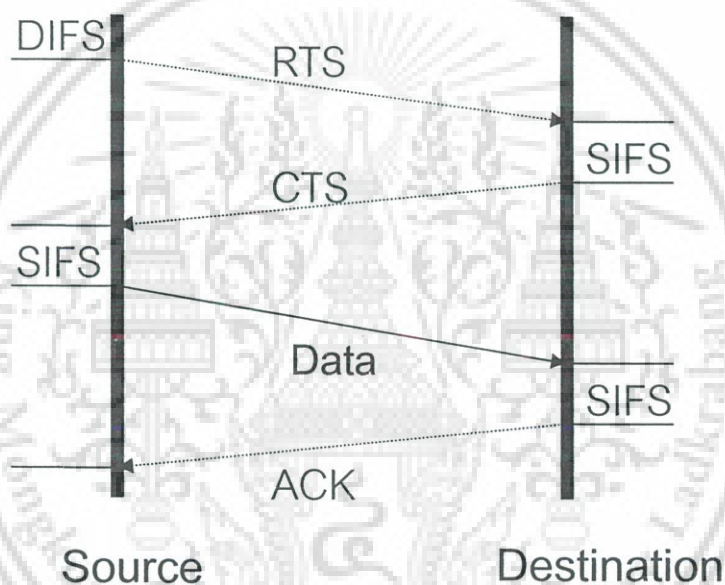
ระดับชั้น MAC ในมาตรฐาน IEEE 802.11 นั้นจะครอบคลุมถึงเรื่อง การส่งข้อมูลที่นำเชื่อถือได้, การควบคุมวิธีการเข้าถึง และความปลอดภัยของข้อมูล

โปรโตคอล MAC ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 นั้นสามารถทำงานร่วมกับบริการอื่นที่เป็นแบบ Asynchronous และบริการจำกัดเวลาได้ (time-bounded service) โดยใช้การควบคุมทางด้านให้ความสำคัญก่อนและหลังในการส่งเฟรมข้อมูลและใช้ค่านช่วงเวลา Interframe Space (IFS) ที่แตกต่างกัน ซึ่งชนิดของ IFS ที่ใช้สำหรับควบคุมให้ความสำคัญก่อนและหลังในการส่งเฟรมข้อมูลเพื่อป้องกันการชนกันนั้น มี 3 ประเภท ได้แก่

- ค่าช่วงเวลา SIFS (Short IFS) ที่เป็นค่าช่วงเวลาช่วงสั้น ๆ ใช้สำหรับเพื่อใช้สำหรับการตอบสนองแบบรวดเร็ว เช่น ใช้ในการส่งสัญญาณ Acknowledge (ACK Frame)
- ค่าช่วงเวลา PIFS (Priority Coordination Function IFS) ที่เป็นค่าช่วงเวลาขนาดกลาง ที่ใช้วิธีการสื่อสารของ PCF เพื่อให้ให้ความสำคัญก่อนและหลังในการส่งเฟรมข้อมูล
- ค่าช่วงเวลา DIFS (Distribution Coordination Function IFS) ที่เป็นค่าช่วงเวลาขนาดที่ยาวที่สุด ใช้ในการหน่วงเวลาสำหรับส่งข้อมูล

ในด้านของการส่งข้อมูลที่นำเชื่อถือได้นั้น เราจะพิจารณาจากปริมาณการสูญเสียเฟรมข้อมูลในการสื่อสารที่เกิดจากการสอดแทรกหรือการรบกวน ทำให้ต้องสูญเสียเวลากับการที่ต้องส่งเฟรมข้อมูลใหม่ ในระดับชั้น MAC จึงมีการจัดการกับความผิดพลาดนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสาร โดยได้มีการกำหนดเฟรมที่ใช้สำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลขึ้นมา [13] เป็นการเปลี่ยนเฟรมข้อมูล 4 แบบ ดังนี้ เมื่อสถานีที่ต้องการจะส่งแพ็กเก็ตข้อมูลได้รับสิทธิในการเข้าใช้ช่องสัญญาณแล้วจะทำการส่งแพ็กเก็ตขึ้น ๆ ที่เรียกว่า RTS (Request To Send) เพื่อเป็นการจองช่องสัญญาณก่อนที่จะส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจริง ซึ่งแพ็กเก็ต RTS ประกอบไปด้วยระยะเวลาที่คาดว่าจะใช้ช่องสัญญาณจนแล้วเสร็จ (Duration ID) รวมถึง Address ของสถานีผู้ส่งและผู้รับ เมื่อสถานีผู้รับได้ยินสัญญาณ RTS ก็จะตอบรับกลับมาด้วยการส่งสัญญาณ CTS (Clear To Send) ซึ่งจะบ่งบอกข้อมูลระยะเวลาที่คาดว่าจะสถานีที่กำลังจะทำการส่งข้อมูลนั้นจะใช้ช่องสัญญาณจนแล้วเสร็จ หลักการก็คือทุก ๆ สถานีในเครือข่าย ควรจะได้ยินสัญญาณ RTS หรือไม่ก็ CTS อย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่าง เมื่อ

ได้รับ RTS หรือ CTS ทุก ๆ สถานีจะทราบถึงว่าช่วงเวลาที่จะระบุไว้ใน Duration ID ซึ่งช่องสัญญาณ จะถูกใช้และทุกสถานีที่ยังไม่ได้รับสิทธิในการเข้าใช้ช่องสัญญาณจะตั้งค่า NAV (Network Allocation Vector) ให้เท่ากับ Duration ID ซึ่งแสดงถึงช่วงเวลาที่ยังไม่สามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณ ได้ ทุก ๆ สถานีจะใช้กลไก Virtual Carrier Sense ดังกล่าวผนวกกับการฟังสัญญาณในช่องสัญญาณ จริง ๆ ในการตรวจสอบว่าช่องสัญญาณว่างอยู่หรือไม่ แต่ในกรณีที่สถานีรับไม่ว่าง สถานีรับจะส่ง เฟรม RxBUSY กลับไปแทน และเมื่อสถานีที่ต้องการส่งข้อมูลได้รับเฟรม CTS แล้วจึงจะทำการส่ง เฟรมข้อมูลที่ต้องการ เมื่อสถานีผู้รับปลายทางได้รับเฟรมข้อมูลเรียบร้อยแล้วก็จะส่งเฟรม ACK (Acknowledgement Frame) กลับไปยังสถานีส่งอีกครั้งหนึ่งเพื่อเป็นการยืนยันการได้รับข้อมูล และ โดยปกติแล้ว เมื่อมีการส่งเฟรม RTS ทุกสถานีในเครือข่ายจะหยุดการส่งเฟรมข้อมูลใด ๆ เพื่อเป็น การหลีกเลี่ยงการชนกันของเฟรมข้อมูล โดยรูปที่ 2.2 แสดงการใช้เฟรม RTS และ CTS



รูปที่ 2.2 แสดงการใช้เฟรม RTS และ CTS

2.2.2.3 Logical Link Control (LLC) ซึ่งอยู่ในชั้นดาต้าลิงค์ จะมีหน้าที่สำคัญดังนี้

- มีจุดเชื่อมต่อที่เรียกว่า SAP (Service Access Point) เพื่อให้เชื่อมต่อกับระดับที่อยู่ข้างเคียงได้
- ในการส่งข้อมูล จะจัดข้อมูลเป็นเฟรม มีการกำหนดแอดเดรสต้นทางและปลายทาง และฟิลด์ที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง (CRC)
- ในการรับข้อมูล จะตรวจสอบแอดเดรส ถ้าเป็นแอดเดรสของผู้รับจะแยกข้อมูลออกจากเฟรมและตรวจสอบความถูกต้องของเฟรมที่ส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครือข่ายใช้งานในปัจจุบันนั้น มีผู้ใช้บริการเป็นจำนวนมาก ช่องสัญญาณที่มีอยู่ในระบบอาจมีไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ส่งผลให้ต้องมีการใช้งานช่องสัญญาณของระบบร่วมกัน แบ่งและผลัดกันใช้ระหว่างผู้ใช้บริการหรือสถานีรับส่งข้อมูลจำนวนหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องมีระเบียบวิธีในการเข้าใช้ช่องสัญญาณเพื่อที่จะประกันได้ว่า ผู้ใช้บริการแต่ละคนจะสามารถใช้ช่องสัญญาณได้อย่างยุติธรรมและมีประสิทธิภาพในการเข้าถึงช่องสัญญาณได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเทคนิควิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณกลางพื้นฐานที่มีใช้กันทั่วไปนั้นมีอยู่หลายวิธี ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)

2.3 โพรโทคอลแบบ CSMA/CA

2.3.1 เปรียบเทียบวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA กับ วิธีการเข้าถึงแบบ CSMA และวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CD

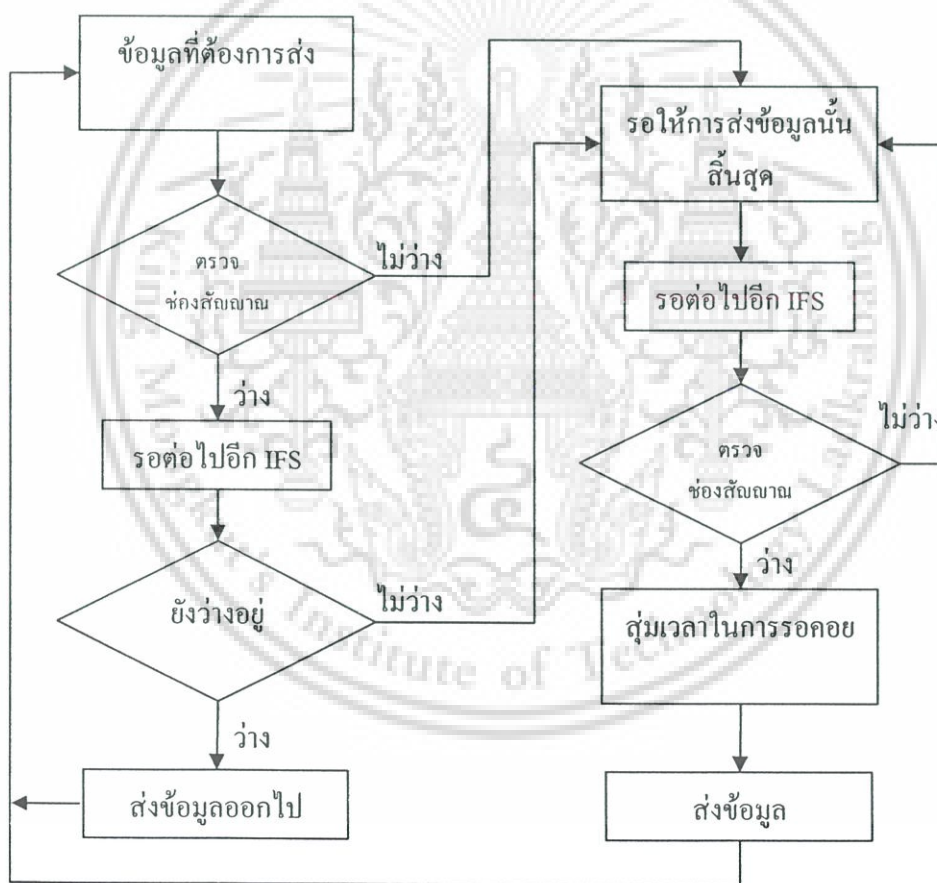
วิธีการเข้าถึงแบบ CSMA (Carrier Sense Multiple Access) with Random Back-Off เป็นเทคนิคอย่างง่ายสำหรับจัดการการเข้าใช้ช่องสัญญาณของผู้ใช้แต่ละคน (ซึ่งต้องแบ่งกันใช้ช่องสัญญาณร่วมนี้) อย่างยุติธรรม กลไกนี้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ในมาตรฐาน IEEE 802.3 Ethernet LAN หลักการทำงานของวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA คือ เมื่อสถานีหนึ่งต้องการเข้าใช้ช่องสัญญาณ สถานีดังกล่าวจะต้องตรวจสอบช่องสัญญาณก่อนว่ามีสถานีอื่นทำการรับส่งสัญญาณข้อมูลอยู่หรือไม่และรอจนกว่าช่องสัญญาณจะว่าง เมื่อช่องสัญญาณว่างแล้วสถานีที่ต้องการเข้าใช้ช่องสัญญาณจะต้องรอต่อไปอีกระยะเวลาหนึ่ง (Random Back-Off) ซึ่งแต่ละสถานีได้กำหนดระยะเวลาในการรอดังกล่าวไว้แล้วด้วยการสุ่มค่าหลังจากเสร็จการใช้ช่องสัญญาณครั้งก่อน สถานีที่สุ่มได้ค่าระยะเวลาในการรอน้อยกว่าก็จะมีสิทธิในการเข้าใช้ช่องสัญญาณก่อน แต่อย่างไรก็ตามในบางกรณีกลไกดังกล่าวอาจจะกำหนดให้สถานีมากกว่าหนึ่งสถานีส่งข้อมูลในเวลาพร้อม ๆ กันซึ่งจะทำให้เกิดการชนกันของสัญญาณได้ ซึ่งหากเกิดการชนกันของสัญญาณขึ้นจะต้องมีการส่งสัญญาณข้อมูลเดิมซ้ำอีกครั้งด้วยกลไกที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

วิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CD (Collision Detection) เป็นเทคนิคที่รู้จักกันดีซึ่งถูกนำมาใช้ในมาตรฐาน IEEE 802.3 Ethernet LAN ซึ่งการทำงานของวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CD โดยหลักแล้วเป็นเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในส่วนของ CSMA with Random Back-Off แต่จะมีรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับการตรวจสอบว่าเกิดการชนกันของสัญญาณหรือไม่ ในกรณีนี้สถานีที่กำลังทำการส่งสัญญาณข้อมูลอยู่จะต้องคอยตรวจสอบด้วยว่ามีการชนกันของสัญญาณเกิดขึ้นหรือไม่ (ในขณะที่เดียวกันกับที่ทำการส่งสัญญาณข้อมูล) โดยการตรวจวัดระดับ voltage ของสัญญาณในสายสัญญาณว่ามีค่าสูงกว่าปกติหรือไม่ ซึ่งหากระดับ voltage ของสัญญาณในสายสัญญาณในสายสัญญาณมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดแสดงว่าเกิดการชนกันของสัญญาณขึ้น ในกรณีดังกล่าวสถานีที่

กำลังส่งสัญญาณข้อมูลอยู่จะต้องยกเลิกการส่งสัญญาณทันทีและปฏิบัติตามกลไกที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเพื่อทำการส่งข้อมูลเดิมซ้ำอีกต่อไป

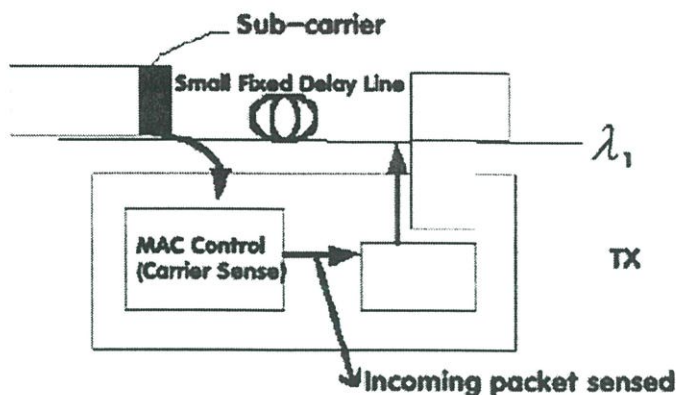
จะเห็นได้ว่าการเข้าถึงแบบ CSMA/CD นั้นเพียงแค่ตรวจจับการชนกันของสัญญาณเท่านั้น จึงได้มีการพัฒนาใช้วิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ขึ้นมา ซึ่งวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA นั้นโดยหลักแล้วเป็นเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในส่วนของ CSMA แต่จะมีรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการชนกันของสัญญาณและเทคนิคสำหรับการตรวจสอบว่าเกิดการชนของสัญญาณหรือไม่แบบเป็นนัย โดยสถานีผู้ส่งสัญญาณข้อมูลจะต้องรอรับ Acknowledgement จากสถานีที่ส่งข้อมูลไปให้ หากไม่ได้รับ Acknowledgement กลับมาภายในเวลาที่กำหนดจะถือว่าเกิดการชนของสัญญาณขึ้นและต้องทำการส่งข้อมูลเดิมซ้ำอีกต่อไป

2.3.2 กลไกการเข้าถึงของโปรโตคอลแบบ CSMA/CA

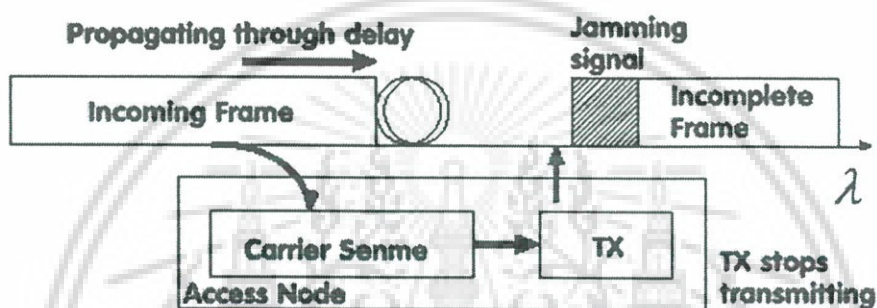


รูปที่ 2.3 แสดงหลักการทำงานของวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA

หลักการทํางานของวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 โดยเริ่มแรกจะสมมติให้ช่องสัญญาณว่าง (Idle) อยู่ เมื่อสถานีต้องการส่งข้อมูล (Access Node) สถานีนั้นต้องทำการตรวจสอบช่องสัญญาณว่ามีการใช้งานหรือไม่ ถ้าช่องสัญญาณว่างก็จะรอคอยต่อไปอีกเป็นเวลาเท่ากับ DIFS แล้วจึงตรวจสอบช่องสัญญาณใหม่อีกครั้งถ้ายังว่างอยู่ก็จะส่งข้อมูลออกไปทันที แต่ถ้าตรวจสอบแล้วช่องสัญญาณไม่ว่าง สถานีจะต้องสุ่มเวลาในการหน่วงเวลาเท่ากับค่า backoff timer แล้วจึงทำการตรวจสอบช่องสัญญาณอีกครั้ง ในระหว่างที่สถานีนี้กำลังส่งข้อมูลอยู่นั้น ถ้ามีสถานีอื่นต้องการส่งข้อมูล และสถานีอื่นตรวจสอบช่องสัญญาณปรากฏว่ามีสถานีใช้ช่องสัญญาณอยู่แล้ว สถานีอื่นนั้นจะต้องรอคอยให้สถานีที่ใช้ช่องสัญญาณอยู่ส่งข้อมูลให้เสร็จก่อน และต้องรอต่อไปอีกเป็นเวลาเท่ากับค่าหน่วงเวลาในการส่งข้อมูล (Propagation delay) เพื่อให้แน่ใจว่าสถานีปลายทางในการส่งข้อมูลครั้งนั้นได้รับข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ในบางครั้งอาจเกิดกรณีที่มีหลายสถานีต้องการใช้ช่องสัญญาณพร้อมกัน ดังนั้นถ้าสถานีอื่นส่งข้อมูลออกไปทันทีหลังจากรอคอยให้ข้อมูลที่ส่งอยู่ก่อนนั้นถึงปลายทางเรียบร้อยแล้ว (เวลาในการรอคอยเท่ากับ เวลาที่สถานีที่ใช้ช่องสัญญาณอยู่ส่งข้อมูลเสร็จ + ค่าหน่วงเวลาในการส่งข้อมูล (Propagation delay) นั้นจะทำให้เกิดการชนกันขึ้นได้ ดังนั้นในโปรโตคอล CSMA/CA จึงได้กำหนดให้มีการสุ่มเวลารอคอย backoff timer ต่อไปอีกค่า backoff timer ของแต่ละสถานีจะไม่เท่ากันและเมื่อสถานีใดต้องการส่งข้อมูลก็จะมาตรวจสอบสถานะช่องสัญญาณถ้าว่างอยู่ก็จะทำการส่งข้อมูลออกไปทันที แต่อาจมีกรณีที่ค่า backoff timer ของสถานีเท่ากันจึงส่งข้อมูลออกไปพร้อมกันก็จะทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลได้ เมื่อมีสถานีใดตรวจพบการชนกันของข้อมูลก็จะทำการส่ง Jamming Signal เพื่อให้ทุกสถานีที่กำลังส่งข้อมูลอยู่นั้นหยุดการส่งข้อมูลทันที (เพราะเมื่อมีการชนกันเกิดขึ้นแล้วยังทำการส่งข้อมูลนั้นต่อไปอีก ข้อมูลที่ชนกันนั้นก็ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ต้องส่งใหม่อีกครั้ง) หลังจากนั้นสถานีที่กำลังส่งข้อมูลก็จะรู้ได้ว่าการส่งข้อมูลครั้งนี้ไม่สำเร็จต้องทำการส่งข้อมูลใหม่ตามกระบวนการของ CSMA/CA รูปที่ 2.4 และ 2.5 แสดงวิธีการตรวจจับคลื่นพาห้และการตรวจจับการชนกันของข้อมูลตามลำดับ



รูปที่ 2.4 แสดงวิธีการตรวจจับคลื่นพาห้



รูปที่ 2.5 แสดงการตรวจจับการชนกันของข้อมูล

2.4 ช่วงเวลาการ Backoff แบบสุ่ม

โดยปกติแล้วเมื่อสถานีทำการเช็ชช่องสัญญาณแล้วพบว่าช่องสัญญาณไม่ว่าง สถานีจะทำการ Backoff แบบสุ่มเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการส่งเฟรมข้อมูลพร้อม ๆ กันของหลาย ๆ สถานี กระบวนการ Backoff จะทำการเลือกสล็อตแบบสุ่มจากจำนวนสล็อตที่มีในช่วงเวลาที่เรียกว่า Contention Window (ดูรูปที่ 2.6) ดังสมการ

$$\text{Backoff_Time} = \text{INT}(CW * \text{Random}()) * \text{Slot_Time} \quad (2.1)$$

เมื่อ CW คือค่าจำนวนเต็มที่มีค่าระหว่าง CW_{\min} และ CW_{\max}

$\text{Random}()$ คือตัวเลขที่ได้จากการสุ่มระหว่าง 0-1

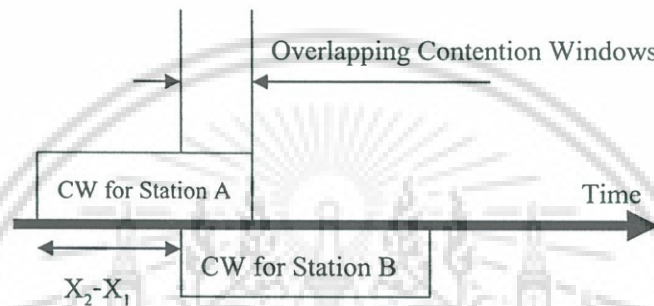
Slot_Time คือ ค่าคงที่ของเวลาสำหรับแต่ละสล็อต

ค่าเวลาของการ Backoff จะลดลงเป็นจำนวนตามเวลาของสล็อตเมื่อช่องสัญญาณนั้นว่าง แต่ค่าเวลานี้จะถูกทำให้คงที่เมื่อช่องสัญญาณไม่ว่าง และตัวเคาน์เตอร์จะเริ่มทำการนับเมื่อช่องสัญญาณว่าง การส่งจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อตัวเคาน์เตอร์ทำการนับถึงศูนย์ ส่วนสถานีที่ทำการส่งเสร็จสิ้นแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีเฟรมข้อมูลที่จะทำการส่งอีกก็จะกลับไปเริ่มต้นที่กระบวนการเดิม [2] คือการตรวจสอบช่องสัญญาณและการ Backoff ดังแสดงในรูปที่ 2.4

ด้วยกรรมวิธีเช่นนี้สถานีที่ทำการสุ่มเลือกสล็อตที่มีช่วงเวลาสั้นที่สุดก็จะได้ทำการส่งเฟรมข้อมูลก่อน ถือว่าเป็นวิธีที่ยุติธรรมในระบบเครือข่าย คือสถานีที่มาก่อนก็จะได้ใช้บริการก่อน โดยค่า CW ในสมการที่ (2.1) จะเป็นตัวกำหนดการเข้าใช้ช่องสัญญาณของสถานี เช่น ถ้าสถานี A พร้อมทั้งจะทำการส่งเฟรมข้อมูลที่เวลา X_1 ขณะที่สถานี B พร้อมทั้งจะทำการส่งข้อมูลที่เวลา X_2 และเมื่อกำหนดให้ $X_2 > X_1$ โอกาสความเป็นไปได้ที่สถานี A จะได้ทำการส่งจึงมีมากกว่าสถานี B ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของ Contention Window

2.5 หลักการทำงานของโปรโตคอลแบบสล็อตจริง

หลักการพื้นฐานของโปรโตคอลแบบสล็อตจริงนี้ [12] คือ เวลาที่สัญญาณเดินทางรอบเครือข่ายจะถูกแบ่งออกเป็นช่วงเวลาเท่ากัน ซึ่งช่วงเวลาเหล่านี้จะเป็นเวลาที่ใช้ในการส่งมินิแพ็กเก็ต (mini packet) ซึ่งเราเรียกว่า สล็อต (Slot) ดังนั้นด้วยวิธีนี้จะมีสล็อตเรียงรายรอบเน็ตเวิร์ก และสล็อตเหล่านี้จะถูกรักษาโดยสถานีพิเศษซึ่งเราเรียกว่า มอนิเตอร์ โหนด (Monitor Node) สล็อตเหล่านี้จะแบ่งออกเป็นสล็อตที่กำลังถูกใช้และสล็อตว่าง สถานีที่กำลังรอส่งข้อมูลนั้นสามารถตรวจสอบว่าสล็อตนั้นเป็นชนิดไหนโดยการตรวจสอบบิต (Bit) ว่าง/ไม่ว่าง ที่ส่วนหัวของแต่ละสล็อต โดยรูปที่ 2.7 แสดงสล็อตว่าง/ไม่ว่าง แต่ละสถานีที่ต้องการส่งจะต้องเตรียมขนาดข้อมูลสูงสุดให้เท่ากับขนาดของบิตข้อมูลที่สามารถบรรจุในแต่ละสล็อต และเครือข่าย WDM สล็อตจริงแสดงดังรูปที่ 2.8

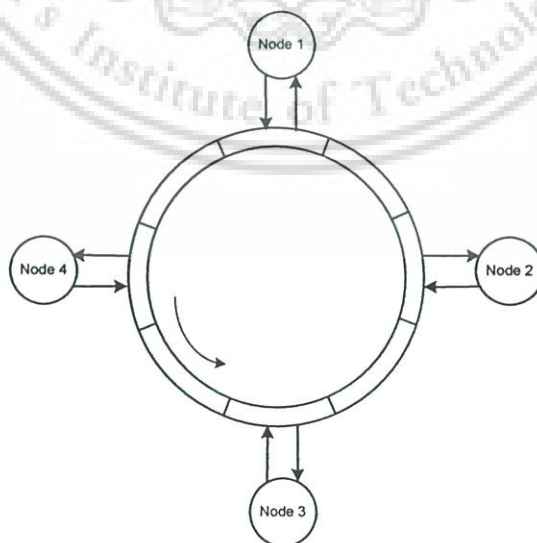
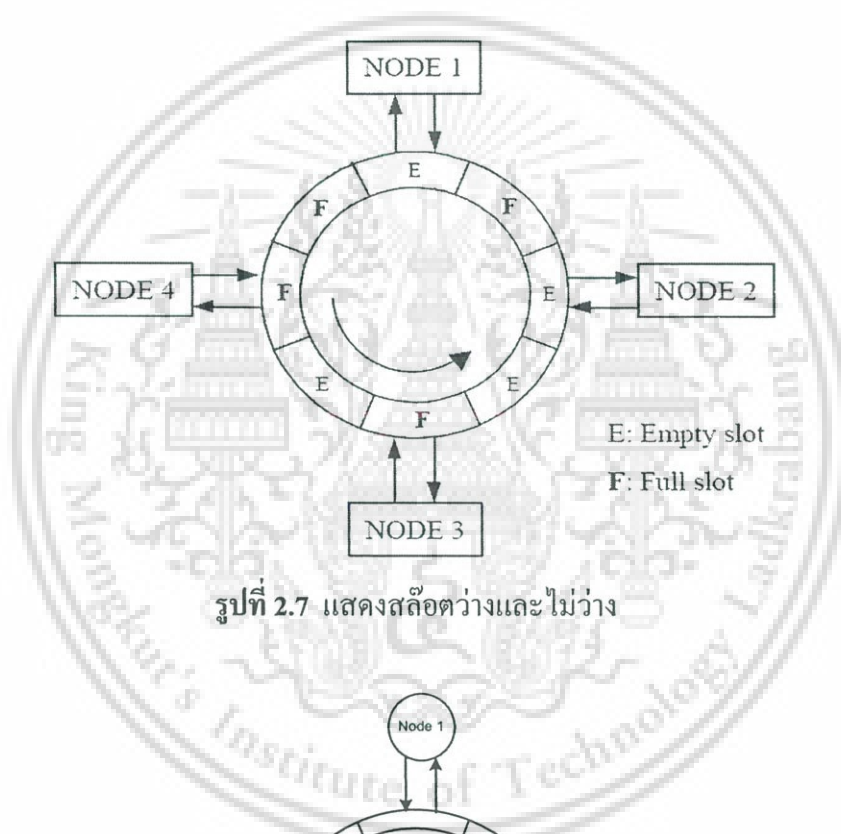
ขั้นตอนการทำงานของสล็อตจริง คือ

1. ตรวจสอบสล็อต สถานีที่ต้องการส่งข้อมูลตรวจสอบดูสล็อตที่กำลังผ่านเข้ามา
 - ถ้าเป็นสล็อตว่าง สถานีนั้นจะดำเนินการตามขั้นที่ 2
 - ถ้าเป็นสล็อตที่ถูกใช้งาน สถานีจะรอการส่งและดำเนินการตามขั้นที่ 1 อีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การส่งข้อมูล สถานีส่งจะเปลี่ยนบิตว่าง/ไม่ว่างที่อยู่ตรงส่วนหัวของสล็อตเป็นไม่ว่าง ใส่แอดเดรส (address) ส่งและรับแล้วใส่ข้อมูลในส่วนข้อมูลและส่งสล็อตไปยังสถานีที่ติดกัน สล็อตนี้ก็จะถูกส่งไปรอบเน็ตเวิร์ค และถูกคัดลอก (copy) โดยสถานีรับ

3. การถอดข้อมูลออก มี 2 แบบ คือ 1. สถานีส่งเป็นผู้เปลี่ยนบิตสถานะ เมื่อสล็อตถูกส่งโดยรอบและผ่านกลับมายังสถานีส่งแล้ว สถานีส่งจะเป็นผู้เปลี่ยนบิตว่าง/ไม่ว่าง ให้เป็นว่าง เพื่อให้สล็อตนั้นสามารถใช้งานได้ต่อไป 2. สถานีรับเป็นผู้เปลี่ยนบิตสถานะ เมื่อสล็อตถูกส่งมายังสถานีรับและสถานีรับได้รับข้อมูลถูกต้องแล้ว สถานีรับจะเป็นผู้เปลี่ยนบิตว่าง/ไม่ว่าง ให้เป็นว่าง เพื่อให้สล็อตนั้นสามารถใช้งานได้ต่อไปซึ่งการถอดข้อมูลโดยสถานีรับนี้ทำให้สล็อตถูกนำกลับไปใช้ใหม่ได้เร็วกว่าการถอดข้อมูลโดยสถานีส่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

3.1 เส้นใยแก้วนำแสง

เนื่องจากในปัจจุบันมีเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่มีสมรรถนะสูงมาก ส่งผลให้เกิดการพัฒนาทางด้านการประยุกต์ใช้งานแอปพลิเคชันต่าง ๆ ขึ้นมากมาย จึงมีจำนวนผู้ใช้คอมพิวเตอร์ที่มากขึ้น ทำให้ปริมาณข้อมูลในการติดต่อสื่อสารเพิ่มตามไปด้วย เพื่อที่จะรองรับต่อการใช้งานข้อมูลที่มีปริมาณมากนี้เองจึงจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้งานเครือข่ายความเร็วสูง ซึ่งเครือข่ายที่สามารถรองรับกับความต้องการนี้ได้ก็คือ เครือข่ายที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นสื่อส่งสัญญาณ เส้นใยแก้วนำแสงนั้นได้รับความสนใจอย่างมากในการนำมาประยุกต์สร้างเครือข่ายความเร็วสูงที่สามารถส่งผ่านข้อมูลหลายประเภทพร้อม ๆ กันดังเช่น ภาพและเสียงภายในเครือข่ายเดียว การใช้งานเส้นใยแก้วนำแสงเป็นสื่อส่งสัญญาณนั้นมีข้อดีดังนี้ คือ [8-12, 14]

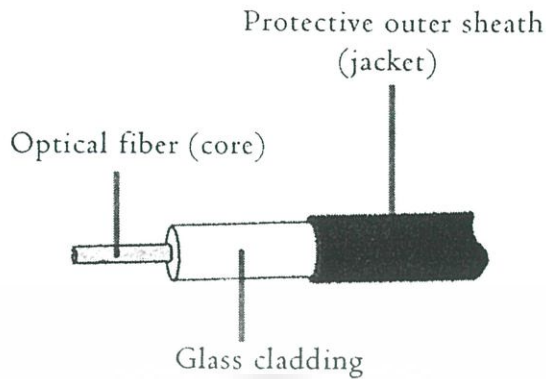
- เนื่องจากความถี่ของแสงสูงมาก (10^{14} Hz) ทำให้ใช้ขนาดแบนด์วิดท์ได้กว้างและสามารถส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราเร็วสูง เหมาะสำหรับแอปพลิเคชันใหม่ ๆ ที่หลากหลายมากขึ้น เช่น การดูไฟล์วีดิโอผ่านทางอินเทอร์เน็ต
- การลดทอนสัญญาณมีค่าต่ำมาก จึงเป็นการช่วยลดจำนวนการใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณ เช่น ในการส่งข้อมูลระยะทางไกล ๆ จะสามารถวางอุปกรณ์ทวนสัญญาณ 2 ชุดห่างกันได้มากขึ้น
- เส้นใยแก้วนำแสงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ดังนั้นสายเคเบิลที่ใช้จึงมีขนาดเล็กกว่าการใช้สื่อส่งสัญญาณประเภทอื่น ทำให้ขนาดของท่อที่ใช้ใส่เส้นใยแก้วนำแสงเล็กตามไปด้วย ดังนั้นในติดตั้งเส้นใยแก้วนำแสง จะทำให้ต้นทุนในการขุดท่อมีราคาต่ำลง
- เนื่องจากเส้นใยแก้วนำแสงเป็นสารอโลหะ จึงไม่มีปัญหาของสัญญาณรบกวนจากภายนอกที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณไฟฟ้า, คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือสัญญาณวิทยุ และสัญญาณรบกวนจากภายนอกอื่น ๆ เช่น ฟ้าผ่า
- ปลอดภัยต่อการดักฟังสัญญาณ เนื่องจากเคเบิลใยแก้วนำแสงไม่ได้ใช้ขนส่งสัญญาณทางไฟฟ้า จึงไม่สามารถที่จะลอบต่อสายจากเคเบิลใยแก้วนำแสงได้ข้อมูลจึงไม่ถูกขโมย

3.1.1 ส่วนประกอบของเส้นใยแก้วนำแสง

เส้นใยแก้วนำแสงผลิตขึ้นจากใยแก้วบริสุทธิ์หล่อหลอมเป็นแกน (Core) ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่ารอบ ๆ แกนถูกห่อหุ้มไว้ด้วยใยแก้วอีกชนิดหนึ่งทำเป็นเปลือก (Cladding) ส่วนที่เป็นใยแก้วนั้นในบางครั้งทำมาจากพลาสติกทำให้ง่ายต่อการติดตั้ง แต่ไม่สามารถที่จะขนส่งข้อมูลในระยะทางไกลเท่ากับสายที่ทำจากแก้ว โดยใยแก้วชั้นนอกนี้จะมีดัชนีการหักเหของแสงต่ำกว่าใยแก้วที่ใช้

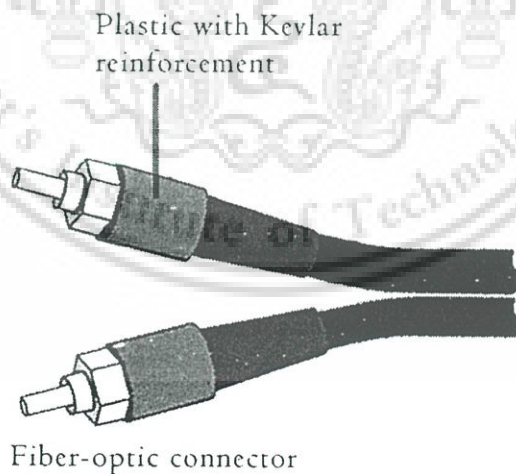
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำเป็นแกนเพื่อให้แสงซึ่งถูกส่งมาจากปลายด้านหนึ่งสามารถส่งผ่านไปยังอีกด้านหนึ่งโดยที่ไม่ผ่านออกไปยังพื้นผิวด้านนอกของเส้นใยได้



รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของเส้นใยแก้วนำแสง

เนื่องจากใยแก้วแต่ละเส้นจะส่งผ่านสัญญาณได้เพียงทิศทางเดียว ในสายเคเบิลจึงมีเส้นใยแก้ว 2 เส้นแยกจากกัน โดยเส้นหนึ่งจะทำหน้าที่ในการส่ง ส่วนอีกเส้นหนึ่งทำหน้าที่ในการรับ จะมีชั้นพลาสติกที่มี Kevlar fiber ห่อหุ้มในการทำให้เส้นใยแก้วมีความแข็งแรง โดยรูปที่ 3.2 แสดงภาพของเคเบิลใยแก้วนำแสง Kevlar fiber ในหัวต่อเชื่อมของเคเบิลใยแก้วนำแสงจะอยู่ระหว่างสายเคเบิลทั้งสองเพื่อเป็นส่วนป้องกันเช่นเดียวกับสายคู่พันเกลียวและสายโคแอกเชียล เคเบิลใยแก้วนำแสงจะถูกห่อหุ้มด้วยการเคลือบพลาสติกเพื่อเป็นการป้องกันเส้นใยแก้ว



รูปที่ 3.2 แสดงภาพของเคเบิลใยแก้วนำแสง Kevlar fiber

3.1.2 สรุปคุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทต่าง ๆ

3.1.2.1 เส้นใยแก้วนำแสงมัลติโหมดแบบสเตปอินเด็กซ์

เส้นใยแก้วนำแสงมัลติโหมดแบบสเตปอินเด็กซ์ (step index multimode fibers) มีข้อดีคือ ราคาถูก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของออปติคัลคอร์มีขนาดใหญ่ (50-80 μm) ทำให้การคับเปิดแสงเข้าไปในออปติคัลคอร์ทำได้ง่าย ข้อจำกัดที่สำคัญคือมีขนาดของแบนด์วิดท์ที่ต่ำเนื่องจากผลกระทบของดิสเพอร์ชันแบบระหว่างโหมด ดังนั้นจึงเหมาะสมกับการนำมาใช้งานที่มีอัตราการส่งบิตข้อมูลต่ำ และในระยะทางใกล้ ๆ

3.1.2.2 เส้นใยแก้วนำแสงมัลติโหมดแบบเกรดอินเด็กซ์

เส้นใยแก้วนำแสงมัลติโหมดแบบเกรดอินเด็กซ์ (graded index multimode fibers) มีข้อดีคือ มีขนาดของแบนด์วิดท์ที่ใหญ่กว่าเส้นใยแก้วนำแสงมัลติโหมดแบบสเตปอินเด็กซ์ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของออปติคัลคอร์มีขนาดเท่า ๆ กัน การคับเปิดแสงเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้ทำได้ง่าย จึงมีความเหมาะสมกับการนำมาใช้ในระบบที่มีอัตราความเร็วในการส่งข้อมูลขนาดปานกลางในระยะใกล้ หรืออาจใช้ส่งข้อมูลที่มีอัตราบิตต่ำ ๆ แต่ส่งได้ในระยะทางที่ไกลขึ้น

3.1.2.3 เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยวแบบสเตปอินเด็กซ์

เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยวแบบสเตปอินเด็กซ์ (step index single-mode fibers) เป็นเส้นใยแก้วนำแสงที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของออปติคัลคอร์ค่อนข้างเล็ก (8-10 μm) ทำให้การคับเปิดแสงเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงมีความยุ่งยากขึ้น แต่กระนั้นเทคโนโลยีที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันก็สามารถแก้ปัญหาได้อย่างมาก เส้นใยแก้วนำแสงประเภทนี้มีขนาดของแบนด์วิดท์ที่กว้าง ค่าการลดทอนของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงจะต่ำสุดที่ความยาวคลื่นในย่าน 1.5 μm แต่ปัญหาของดิสเพอร์ชันแบบโครเมติกจะมีน้อยกว่าในย่าน 1.3 μm ดังนั้นจึงต้องเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับความต้องการ ในปัจจุบันได้มีการนำเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้มาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในระบบสื่อสารระยะไกล

3.1.2.4 เส้นใยแก้วนำแสงแบบเลื่อนดิสเพอร์ชัน

เส้นใยแก้วนำแสงประเภทเลื่อนดิสเพอร์ชัน (dispersion shifted fibers) มีความคล้ายคลึงกับเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยวแบบสเตปอินเด็กซ์ ตรงที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของออปติคัลคอร์ค่อนข้างเล็ก และมีขนาดแบนด์วิดท์ที่กว้าง ส่วนที่ต่างกันก็คือเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้สามารถกำจัดปัญหาของดิสเพอร์ชันแบบโครเมติกได้อย่างมาก ณ ที่ค่าความยาวคลื่นบางค่าในย่าน 1.3-1.6 μm ข้อเสียของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้ได้แก่การที่ยังมีราคาค่อนข้างสูงและอาจมีค่าการลดทอนของสัญญาณสูงกว่าเล็กน้อย

3.1.2.5 เส้นใยแก้วนำแสงแบบดิสเพอร์ชันเรียบ

เส้นใยแก้วนำแสงแบบดิสเพอร์ชันเรียบ (dispersion flattened fibers) เป็นเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดียวที่มีค่าของดิสเพอร์ชันแบบโครเมติกต่ำ และใกล้เคียงกันตลอดช่วงความยาวคลื่น 1.3-1.6 μm ดังนั้นเราสามารถนำเส้นใยแก้วนำแสงประเภทนี้มาใช้ได้ตลอดย่านความถี่นี้ ซึ่งจะมีประโยชน์กับระบบที่มีการมัลติเพลกซ์สัญญาณคลื่นหลาย ๆ ความยาวคลื่นเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงเส้นเดียวกัน เส้นใยแก้วนำแสงแบบนี้มีขนาดแบนด์วิดท์ที่กว้างและสามารถนำมาใช้งานการสื่อสารระยะไกลได้ หากแต่อาจยังมีราคาสูงกว่าเส้นใยแก้วนำแสงแบบอื่น ๆ มาก

3.1.3 การสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสง



รูปที่ 3.3 แสดงระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสง

หลักการการทำงานของระบบสื่อสารโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงแสดงดังรูปที่ 3.3 ระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงนี้มีโครงสร้างคล้ายกับระบบการสื่อสารด้วยสายเคเบิลทั่วไป เพียงแต่ใช้ตัวกลางนำข้อมูลที่ต่างกัน กล่าวคือ เมื่อต้องการส่งข้อมูลที่อาจอยู่ในรูปของ สัญญาณเสียง สัญญาณภาพ หรือข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ วงจรภาคส่งจะทำหน้าที่จัดรูปสัญญาณให้เหมาะสม ด้วยวิธีการเข้ารหัสและมอดูเลต โดยลักษณะของข้อมูลที่ใช้ในขั้นต้นนี้ ส่วนใหญ่มักจัดให้อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัลเพราะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า จากนั้นวงจรในส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงหรือไดรเวอร์ขับสัญญาณ (driver) จะแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้ให้เป็นสัญญาณแสงส่งไปยังสถานีรับ (สัญญาณข้อมูลดิจิทัล (1 และ 0) จะถูกแปลงเป็นสัญญาณแสงที่มีความเข้มของแสงต่างระดับกัน หรือเป็นแสงสว่าง/มืด) ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณแสงนี้ เรียกว่า Electrical to Optical Converter หรือ E/O-Converter โดยเส้นใยแก้วนำแสงทำหน้าที่เป็นท่อนำหรือสายส่งสัญญาณ เส้นใยแก้วนำแสงซึ่งเป็นท่อแก้วหรือท่อสารซิลิกาหลอมละลาย (fused silica) ที่ถูกหุ้ม (Cladding) ด้วยแก้วที่มีคุณสมบัติการหักเหต่ำ ทำให้แสงไม่ออกไปจากท่อแก้ว อุปกรณ์กำเนิดแสงได้แก่ LED (Light Emitting Diode) หรือเลเซอร์ไดโอด (Laser Diode) ซึ่งจะให้แสงออกมาเมื่อมีกระแสไฟฟ้าวิ่งผ่าน (สำหรับคุณสมบัติที่แตกต่างของอุปกรณ์กำเนิดแสงทั้งสองได้แสดงในตารางที่ 3.1) ที่สถานีรับจะมีอุปกรณ์ตรวจจับแสง เช่น โฟโตไดโอด (Photodiode) และ โฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงที่รับได้ให้อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้า อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้านี้ เรียกว่า

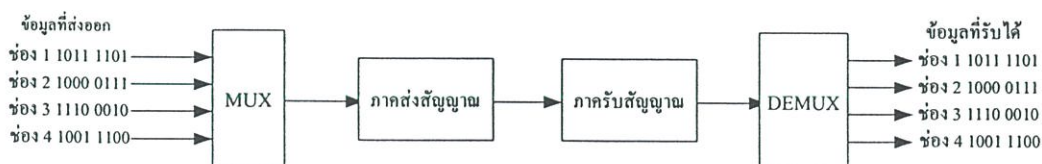
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Optical to Electrical Converter หรือ O/E-Converter แล้วส่งไปยังวงจรรักษาเพื่อถอดรหัสและตีโมดูลสัญญาณ ทำให้ได้สัญญาณที่มีลักษณะเดียวกับสัญญาณเดิม และใช้เป็นข้อมูลขาออกเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

ตารางที่ 3.1 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 |

เส้นใยแก้วนำแสงมักถูกนำมาใช้กับแอปพลิเคชันที่ต้องการคุณสมบัติเฉพาะของเส้นใยแก้วนำแสงที่ซึ่งตัวกลางอื่น ๆ ไม่มี แต่ถ้ากับแอปพลิเคชันที่ไม่ได้มีความต้องการคุณภาพของตัวกลางสูงมากนัก การนำเส้นใยแก้วนำแสงมาใช้อาจเป็นวิธีที่ทำให้เสียค่าใช้จ่ายมากเกินไป ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นวิธีต่าง ๆ เพื่อที่จะทำให้การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงคุ้มค่าต่อเงินที่ได้ลงทุนไปมากที่สุด โดยจะต้องส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงให้ได้มากที่สุด ซึ่งเทคโนโลยีที่รองรับความต้องการนั้นได้ก็คือ เทคนิคของการมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing: MUX) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำให้สามารถส่งและรับข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ จำนวนมากได้ในช่วงเวลาเดียวกัน โดยใช้ตัวกลางนำข้อมูลเดียวกัน ในระบบเส้นใยแก้วนำแสงถือว่ามีความซับซ้อนมาก เพราะเป็นระบบที่มีช่วงของแบนด์วิดท์กว้างมากอยู่แล้ว ดังนั้นหากมีการนำเอาระบบมัลติเพล็กซ์ซึ่งมีความสามารถสูงมาใช้ร่วมกัน ย่อมทำให้สามารถสื่อสารข้อมูลจำนวนมากได้ภายในช่วงเวลาเดียวกัน โดยรูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของระบบการมัลติเพล็กซ์



รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของระบบการมัลติเพล็กซ์

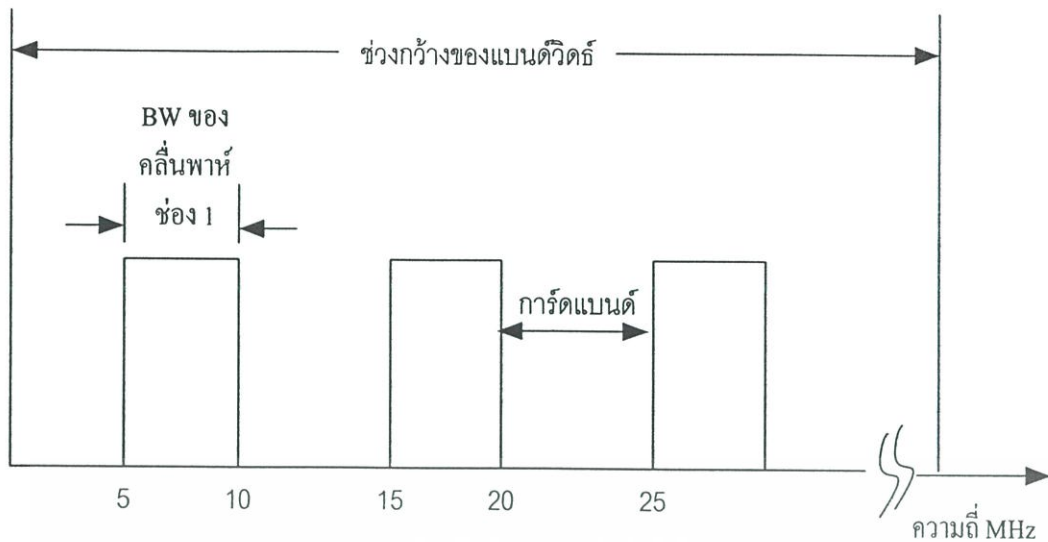
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคในการมัลติเพล็กซ์นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่น ระบบการแบ่งเวลา (Time Division Multiplexing: TDM) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้การแบ่งเวลาเป็นช่วง ๆ โดยในแต่ละช่วงจะใช้สำหรับการบรรจุข้อมูลดิจิทัลที่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ต่าง ๆ เรียงกันไป ดังรูปที่ 3.5 และระบบแบ่งความถี่ย่อย (Sub-Carrier Multiplexing: SCM) ซึ่งเป็นระบบมัลติเพล็กซ์ที่แบ่งช่วงความถี่ของสัญญาณส่งออกเป็นช่วงความถี่ย่อย เพื่อทำหน้าที่เป็นคลื่นพาห่อย่อยของข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณ โดยแต่ละช่องจะถูกส่งออกไปในเวลาเดียวกัน โดยรูปที่ 3.6 แสดงช่วงคลื่นพาห่อย่อยของแต่ละช่องสัญญาณที่รวมกันในระบบ SCM ซึ่งปัญหาการใช้งานระบบ SCM จะเกิดขึ้นในขณะที่มีการผสมคลื่นพาห่อย่อยทั้งหมดเข้าด้วยกันโดยใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เพราะจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เรียกว่า ครอสทอล์ค (Crosstalk) ขึ้นได้ง่าย ระบบมัลติเพล็กซ์แบบ SCM นี้ นิยมนำไปใช้กับการส่งข้อมูลที่ต้องการมีการแปลงกลับไปกลับมาระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับสัญญาณแสงในเส้นใยแก้วนำแสง สำหรับเทคนิคการมัลติเพล็กซ์อีกประเภทหนึ่งที่ใช้งานได้ดีกับเส้นใยแก้วนำแสงและใช้เฉพาะในระบบการสื่อสารข้อมูลทางแสงเท่านั้น คือ เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing: WDM) ซึ่งจุดเด่นของเทคโนโลยีนี้ คือ มีศักยภาพสูงสามารถเข้าใช้ประโยชน์แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณเส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีนี้จะช่วยลดปริมาณการใช้งานของเส้นใยแก้วนำแสงลงได้



รูปที่ 3.5 แสดงการทำงานของสวิตช์ในระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



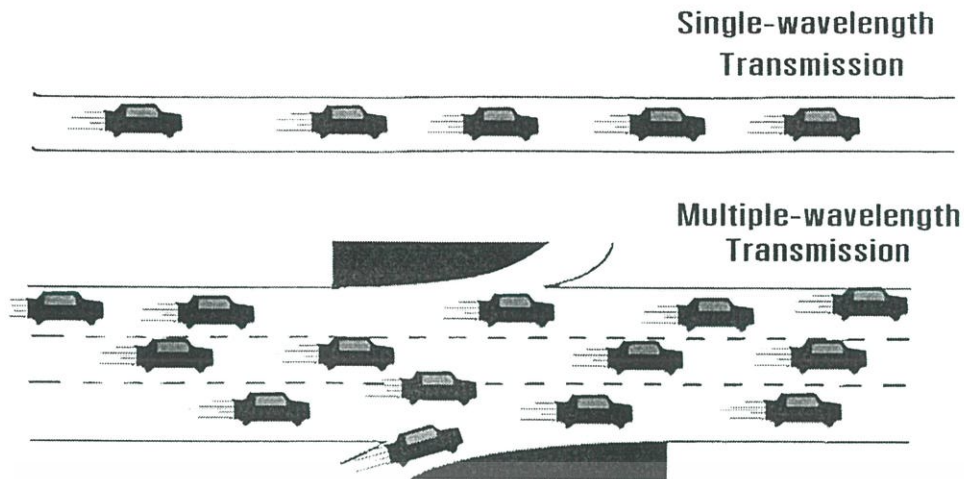
รูปที่ 3.6 แสดงช่วงคลื่นพาห้ย่อยของแต่ละช่องสัญญาณที่รวมกันในระบบ SCM

3.2 การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

ระบบ WDM เริ่มนำออกใช้งานสู่ตลาดระยะแรกเมื่อปี พ.ศ. 2538 ถูกพัฒนาโดยห้องวิจัยของเบล (Bell Labs) เพื่อติดตั้งใช้งานในเครือข่ายสื่อสารทางไกลของบริษัทเอทีแอนด์ที (AT&T) โดยส่งแสงที่มีค่าความยาวคลื่นแตกต่างกัน 8 ความยาวคลื่นในเส้นใยแก้วเพียงเส้นเดียว และต่อมาบริษัทอื่น ๆ WDM รูปแบบต่าง ๆ ออกมา เช่น ระบบ ERION (Ericsson Optical Networks) ของบริษัทอีริคสัน ที่เปิดตัวไปเมื่อตอนต้นปี พ.ศ. 2542 และระบบ WaveStar OLS400G ของบริษัทลูเซนส์เทคโนโลยี (Lucent Technologies) ที่สามารถส่งแสงที่มีค่าความยาวคลื่นได้ต่างกันถึง 80 ความยาวคลื่น โดยระบบมีอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดถึง 400 Gb/s ซึ่งในอัตราการส่งข้อมูลขนาดนี้สามารถใช้ส่งข้อความทั้งหมดในหนังสือสารานุกรมชนิด Encyclopedia ได้มากกว่า 1,000 เล่มภายในเวลาเพียงแค่วินาทีเดียวเท่านั้น ซึ่งการปรากฏโฉมของ WDM นี้ ถือว่าเป็นการพลิกโฉมหน้าของระบบสื่อสารโทรคมนาคมเลยทีเดียว

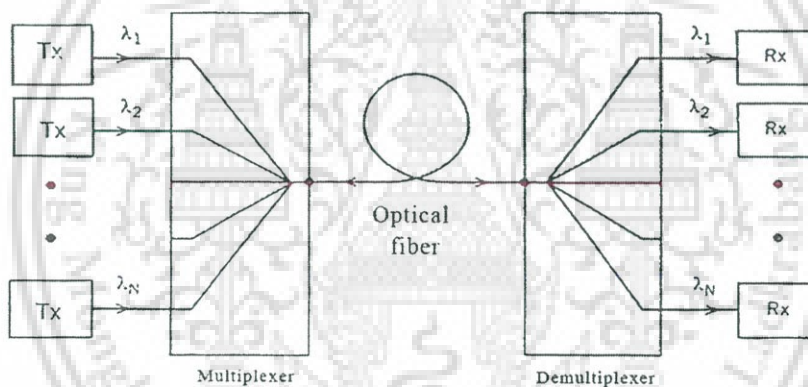
รูปที่ 3.7 แสดงการส่งข้อมูลแบบหลายความยาวคลื่น โดยเปรียบกับการวิ่งของรถยนต์บนถนน รถยนต์ที่วิ่งบนถนนเปรียบเสมือนข้อมูลที่ต้องการส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสง จำนวนเลนที่รถยนต์สามารถวิ่งได้เปรียบเสมือนจำนวนความยาวคลื่นที่เราใช้ส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสง จะเห็นได้ว่าในกรณีวิ่งบนถนนหลายเลนจะสามารถรองรับจำนวนรถยนต์ได้มากกว่าถนนแบบเลนเดียว ซึ่งนั่นก็คือ การใช้งานเทคโนโลยี WDM เป็นการเพิ่มความจุทำให้ระบบสามารถส่งข้อมูลได้มากขึ้นนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงการส่งข้อมูลแบบหลายความยาวคลื่น โดยเปรียบกับการวิ่งของรถยนต์บนถนน

3.2.1 หลักการของเทคโนโลยี WDM



รูปที่ 3.8 การทำงานของเทคโนโลยี WDM

หลักการการทำงานของเทคโนโลยี WDM คือ การมัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณหลายช่องสัญญาณรวมกันเพื่อส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียว โดยที่ช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณนั้นจะถูกแยกจากกันด้วยความยาวคลื่น ดังรูปที่ 3.8 แสดงลักษณะการทำงานของ การมัลติเพล็กซ์ด้วยความยาวคลื่น [4] คือแต่ละช่องสัญญาณจะมีแหล่งกำเนิดแสง เช่น เลเซอร์ หรือ LED โดยแหล่งกำเนิดแสงแต่ละตัวจะมีความยาวคลื่นต่างกัน โดยคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่งจะสามารถบรรจุข้อมูลได้ชุดหนึ่ง และข้อมูลแต่ละชุดนี้อาจเป็นข้อมูลเดี่ยวของหนึ่งช่องสัญญาณหรืออาจเป็นข้อมูลจำนวนมากที่มาจากหลายช่องสัญญาณที่ได้จากการจัดระบบข้อมูลด้วยเทคนิคของ TDM หรือ SCM มาแล้วก็ได้ จากนั้นความยาวคลื่นหลายๆ ความยาวคลื่นจะถูกมัลติเพล็กซ์รวมกันก่อนส่งออกไปบนเส้นใยแก้วนำแสงเส้นเดียวกันด้วยตัวออปติคัลคัปเปอร์ และที่ปลายทางก็จะมีตัวค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพลอร์ที่ทำหน้าที่ในการแยกแยะหรือสัญญาณออกเป็นความยาวคลื่นต่าง ๆ ด้วยการส่งออกด้วยมุมที่ต่างกันไปยังเส้นใยแก้วนำแสงที่ด้านรับ ในกรณีที่ตัวคอบเพลอร์ไม่สามารถแยกแยะสัญญาณรบกวนออกได้หมด อาจมีการนำตัวกรองความถี่มาช่วยอีกชั้นตอนหนึ่งเพื่อคุณภาพที่ดีขึ้นของสัญญาณ สัญญาณแสงที่ถูกแยกออกจากกันแล้ว จะถูกคีมอคูเลตและถอดรหัสด้วยวิธีที่เหมาะสมกับกระบวนการทางอินพุต และเนื่องจากสัญญาณคลื่นแสงที่มีค่าความยาวคลื่นต่างกันยอมให้สีที่ต่างกัน บางครั้งระบบ WDM จะถูกเรียกว่าระบบการผสมสีของแสง และเนื่องจากค่าความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กับค่าความถี่ การใช้ความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกันในการส่งข้อมูลจึงหมายถึงการใช้ค่าความถี่แสงที่ต่างกันด้วย คล้ายกับระบบแบ่งความถี่ทางไฟฟ้า (Frequency Division Multiplexing: FDM) ดังนั้นหากกล่าวถึงคำว่า FDM ในระบบของเส้นใยแก้วนำแสงโดยมิได้อธิบายให้ชัดเจนอาจก่อให้เกิดความสับสนระหว่าง WDM กับระบบ SCM ได้

3.2.2 ส่วนประกอบโครงข่ายใยแก้วนำแสงระบบ WDM

3.2.2.1 Optical Fiber เป็นเส้นใยแก้วที่ใช้สำหรับนำสัญญาณแสงที่ทนต่อสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี

3.2.2.2 Optical Source เนื่องจากเป็นโครงข่ายที่มีตัวนำเป็นแสง ดังนั้น จึงต้องมีการแปลงสัญญาณข้อมูลเดิมที่เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าให้กลายเป็นสัญญาณแสงสำหรับส่งผ่านเข้าไปในโครงข่าย อุปกรณ์เหล่านี้ได้แก่ LEDs (Light Emitting Diodes) หรือ LASER เป็นต้น

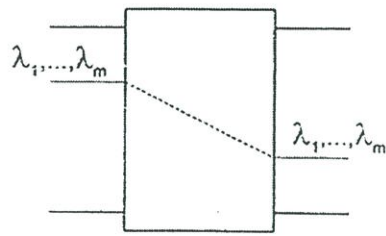
3.2.2.3 Optical Detector เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณแสงแล้วแปลงกลับเป็นสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าดั้งเดิม เช่น photodiodes

3.2.2.4 MUX/DEMUX เป็นอุปกรณ์ที่รวม/แยกระหว่างสัญญาณแสงสีหลายช่องสัญญาณกับสัญญาณแสงขาวที่ส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

3.2.2.5 Optical Transmitter เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ (coupling) สัญญาณแสงที่ได้จาก Optical Source ส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง

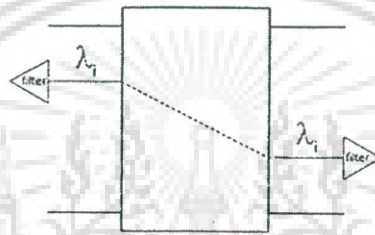
3.2.2.6 Amplifier เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณและสร้างสัญญาณแสงเดิมที่ถูกลดทอนขึ้นมาใหม่ เพื่อให้สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากยิ่งขึ้น โดยที่เกิดการผิดพลาดของข้อมูลน้อยที่สุด หรือ มี BER (Bit Error rate) ต่ำที่สุด

เมื่อข้อมูลที่ถูกส่งจากต้นทางไปยังปลายทางไม่ได้มีเพียงผู้ส่งและผู้รับเดียว จึงต้องมีอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งคือสวิตช์ (cross-connect switch) ที่คอยจัดการข้อมูลให้ส่งไปในทิศทางที่ต้องการ โดยทั่วไปสวิตช์ในแต่ละโหนดจะแบ่งได้ 3 รูปแบบ ดังรูป 3.9 ก , 3.9 ข , และ 3.9 ค



รูปที่ 3.9 ก แสดง Space Switch แบบธรรมดา

รูปที่ 3.9 ก เป็น space switch ธรรมดา มีเพียงการเปลี่ยนเส้นทางแต่ไม่มีการเปลี่ยนความยาวคลื่น



รูปที่ 3.9 ข แสดง Space Switch แบบแยกแต่ละความยาวคลื่น

รูปที่ 3.9 ข เป็น space switch ของแต่ละความยาวคลื่น คล้ายกับแบบที่ 1 แต่สัญญาณด้านเข้าและด้านออกมีเพียงความยาวคลื่นเดียว



รูปที่ 3.9 ค แสดงสวิตช์ที่เปลี่ยนเส้นทางและความยาวคลื่นของสัญญาณในคราวเดียวกัน

รูปที่ 3.9 ค เป็นสวิตช์ที่เปลี่ยนเส้นทางและความยาวคลื่นของสัญญาณในคราวเดียวกัน เป็นแบบที่สามารถเปลี่ยนได้ทั้งเส้นทางและความยาวคลื่น แต่จะมีความซับซ้อนมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ประเภทของ WDM

WDM เทคโนโลยีนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 เทคนิค คือ

3.3.1 Wavelength-Selective WDM

เทคนิค Wavelength-Routed หรือ Wavelength-Selective ของ WDM สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 แหล่งกำเนิดแสงทางด้านส่งจะทำงานกันที่ความถี่ต่างกัน กำลังในการส่งสัญญาณโดยทางอุดมคติแล้วจะเป็นผลรวมกำลังส่งของทุก ๆ ตัวส่งรวมกัน โดยไม่มีการสูญเสียของสัญญาณ และทางด้านรับซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดีมัลติเพล็กซ์นั้นจะทำการแยกแต่ละความยาวคลื่นไปยังตัวรับแต่ละตัว และโดยทางอุดมคติแล้วการแยกแต่ละความยาวคลื่น ไปยังตัวรับแต่ละตัวนั้นถือว่าไม่มีการสูญเสียของสัญญาณเช่นเดียวกัน ในทางทฤษฎีเราอาจถือได้ว่าในการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์นั้นมีความสูญเสียของสัญญาณต่ำ เนื่องจากกำลังส่งที่เกิดขึ้นในแต่ละความยาวคลื่นนั้นจะส่งไปยังเส้นทางที่ต้องการเพียงทางเดียว คือแต่ละความยาวคลื่นก็จะถูกส่งไปยังเส้นทางที่ต่างกัน และถ้าไม่คำนึงถึงความสูญเสียของสัญญาณที่เกิดจากการควมกันของสัญญาณ เราจะได้

$$P_{out}(\lambda_j) = P_{in}(\lambda_j) \quad (3.1)$$

แสงที่หลุดออกจากช่องสัญญาณหนึ่งไปยังช่องสัญญาณอื่น ๆ นั้น ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เรียกว่า Crosstalk โดยเฉพาะในระบบที่เป็นการสื่อสารแบบหลายช่องทาง โดย Crosstalk-CT ที่เกิดจากช่องสัญญาณ j ไปรบกวนช่องสัญญาณ i ในหน่วยเดซิเบล สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$CT_{ij} = 10 \log\left(\frac{P_{ij}}{P_{ii}}\right) \quad (3.2)$$

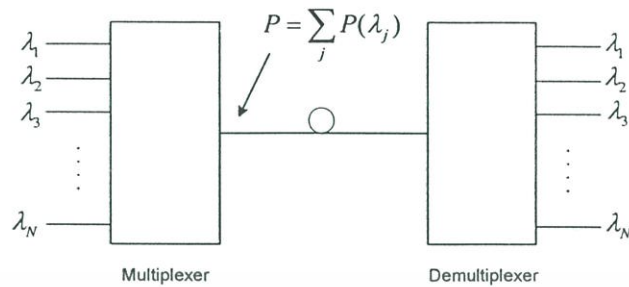
เมื่อ P_{ij} คือกำลังส่งที่วัดได้ในช่องสัญญาณ i เมื่อมีเพียงช่องสัญญาณ j เท่านั้นที่ทำการส่งสัญญาณในขณะนั้น และ P_{ii} เป็นกำลังในการส่งสัญญาณในช่องสัญญาณ i เมื่อช่องสัญญาณ i เป็นเพียงช่องสัญญาณเดียวที่ทำการส่ง ค่าของ Crosstalk จะสามารถแสดงได้ทั้งในรูปแบบของการเปรียบเทียบเป็นคู่ หรือค่าโดยรวม คือ

$$CT_{total} = 10 \log\left(\frac{\sum_j P_{ij}}{P_{ii}}\right) \quad (3.3)$$

โดยค่าในส่วนที่เป็นเศษของสมการที่ 3.3 คือผลรวมของกำลังส่งที่เกิดจากช่องสัญญาณอื่น ๆ ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

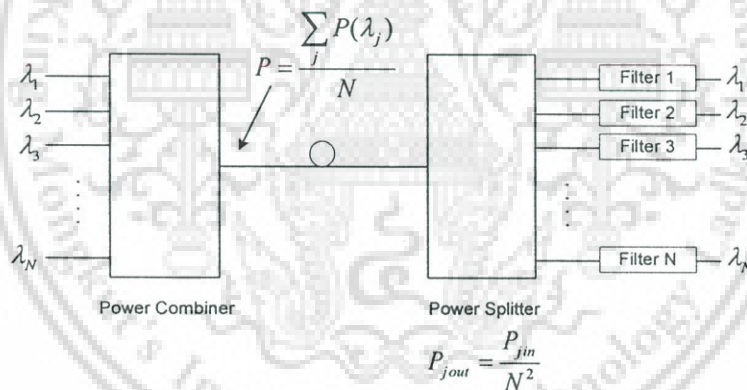
วัดได้ในช่องสัญญาณ i



รูปที่ 3.10 แสดงเทคนิค Wavelength-Selective WDM

3.3.2 Broadcast-and-Select WDM

เทคนิค Broadcast-and-Select หรือ Broadband สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.11 ด้วยกรรมวิธีนี้กำลังในการส่งสัญญาณจะเกิดจากผลรวมกำลังส่งทั้งหมดของแหล่งกำเนิดแสงที่ด้านส่งและเมื่อถึงปลายทางผลรวมของกำลังส่งทั้งหมดนี้ก็จะถูกแบ่งไปยังตัวรับแต่ละตัว



รูปที่ 3.11 แสดงเทคนิค Broadcast-and-Select WDM

จากรูปที่ 3.11 ตัวส่งแต่ละตัวจะถูกกำหนดให้ทำงานที่ความยาวคลื่นที่กำหนดไว้ จากนั้นทุก ๆ ความยาวคลื่นก็จะถูกส่งกระจายไปยังตัวรับทุกตัว ซึ่งตัวรับจะต้องมีส่วนที่ทำหน้าที่ในการแยกแยะช่องสัญญาณ สัญญาณที่ส่งมายังตัวรับก็จะถูกกรองเอาเฉพาะความยาวคลื่นที่ต้องการ แล้วจึงส่งผ่านสัญญาณนั้นไปยังตัวดีเทคเตอร์ (การทำงานจะคล้ายคลึงกับการส่งสัญญาณของระบบ TV Broadcast) นอกจากนั้นเทคนิคนี้ยังสามารถเลือกรูปแบบของตัวส่งให้เป็นแบบที่สามารถทำงานที่ความยาวคลื่นใด ๆ ก็ได้ (Tunable Transmitter) ในขณะที่ทางตัวรับจะทำงานที่ความยาวคลื่นที่กำหนด (Fixed Receiver) หรืออาจเป็นในลักษณะที่ตัวส่งและตัวรับสามารถที่จะทำงานที่ความยาวคลื่นใด ๆ ได้ทั้งคู่ (Tunable Transceiver) ก็เป็นไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบเหล่านี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ทำหน้าที่ในการแยกแยะและรวมสัญญาณ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณในขั้นตอนนี้เป็นปริมาณ $1/N$ ในอุปกรณ์แต่ละตัว [15] และความสูญเสียของสัญญาณจะเป็น $1/N^2$ (เมื่อ N คือจำนวนของตัวรับ-ส่ง) ดังนั้นความสูญเสียของสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณ โดยไม่คำนึงถึงความสูญเสียของสัญญาณที่เกิดจากการกวนกันของสัญญาณแล้ว จะแสดงได้ดังสมการ

$$P_{out}(\lambda_j) = \frac{P_{in}(\lambda_j)}{N^2} \quad (3.4)$$

ความสูญเสียของสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกแยะสัญญาณมีค่า $1/N$ หรือ $10 \log N$ เดซิเบล ซึ่งอาจมีผลเสียต่อระบบอย่างมากถ้าไม่มีอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงมาช่วย ซึ่งถือเป็นข้อดีอย่างหนึ่งของเทคนิคนี้ นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังเป็นที่ยอมรับใช้ในทางทหาร เนื่องจากความคล่องตัวของระบบ สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นที่ใช้ในการรับ-ส่งได้อย่างสะดวกและไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบการส่งสัญญาณ

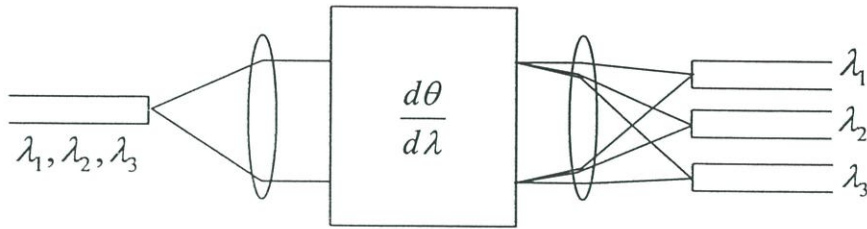
3.4 ตัวมัลติเพล็กซ์เซอร์

ระบบ WDM นั้นจะมีเทคนิคในการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ที่หลากหลาย ซึ่งรวมถึงเกรตติงและตัวกรองสเปคตรัม โดยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการแยกความยาวคลื่นมี 2 ประเภท คือ อุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุมและอุปกรณ์ฟิลเตอร์

3.4.1 อุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุม

อุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุม เช่น ปริซึม และ เกรตติง เป็นอุปกรณ์ซึ่งส่งผ่านหรือสะท้อนแสงที่มุม ซึ่งขึ้นกับค่าความยาวคลื่นของแสงตกกระทบ ค่าพารามิเตอร์หลักที่อธิบายถึงคุณลักษณะที่สำคัญของอุปกรณ์ชนิดนี้คือ ความสูญเสียส่วนเกินและการกระจายมุมของอุปกรณ์ ความสูญเสียส่วนเกินเป็นความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการผ่านเข้าสู่อุปกรณ์แล้วมีความสูญเสียมากกว่า $1/N$ ซึ่งเป็นค่าที่ควรเป็น เนื่องจากว่าอุปกรณ์เหล่านี้เป็นอุปกรณ์ที่มีช่วงความถี่กว้าง ความสูญเสียส่วนเกินนี้จึงควรจะถูกระบุไว้ที่ค่าความยาวคลื่นนั้น ๆ

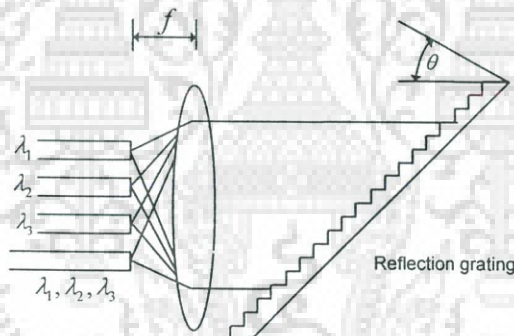
การกระจายเชิงมุมของอุปกรณ์ เป็นค่าประเมินการกระจายของมุม $d\theta$ ระหว่างสองลำแสงซึ่งตกกระทบในเวลาเดียวกันที่อินพุตโดยมีความแตกต่างของความยาวคลื่น $d\lambda$ การกระจายเชิงมุมจะเป็น $d\theta/d\lambda$ และการกระจายเชิงมุมนี้สามารถถูกเปลี่ยนกลับได้จากการใช้เลนส์ช่วยในการรวมกันของแสงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ระบบการแยกความยาวคลื่นโดยอุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุมและเลนส์

อุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุมต้องการตกกระทบของแสง ในรูปที่ 3.12 แสดงให้เห็นเลนส์ตัดขวางแสงจากอินพุตเส้นใยแก้วนำแสง ที่ปลายของเส้นใยแก้วนำแสงจะอยู่ในแนวระนาบส่วนหน้าของเลนส์ ส่วนอุปกรณ์แบบกระจายอยู่ในแนวระนาบส่วนหลังของเลนส์

ในระบบการกระจายเชิงมุมส่วนใหญ่ เกรตติ้งเป็นอุปกรณ์ซึ่งถูกใช้ร่วมกับเลนส์ดังรูปที่ 3.13 เกรตติ้งจะเป็นส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ในการสะท้อนและส่งผ่าน โดยที่พื้นผิวจะมีลักษณะเป็นลายเส้นฝังอยู่ และโดยทั่วไปอุปกรณ์นี้มีประสิทธิภาพจะมีความสูญเสียส่วนเกินอยู่ที่ 1-3 เดซิเบล มีขนาดความห่างของแต่ละช่องสัญญาณเป็นค่า 1-10 นาโนเมตร



รูปที่ 3.13 การทำงานของเกรตติ้งในตัวรับ WDM

3.4.2 อุปกรณ์ฟิลเตอร์

อุปกรณ์ฟิลเตอร์จะทำการสะท้อนหรือส่งผ่านแสงตามค่าความยาวคลื่น อุปกรณ์ฟิลเตอร์ที่นำมาใช้เพื่อแยกความยาวคลื่นนั้นมีหลากหลายประเภท โดยในตารางที่ 3.2 จะแสดงค่าแบนวิดท์ที่สามารถใช้กับประเภทของตัวกรองต่าง ๆ

3.4.2.1 Interference ฟิลเตอร์

ฟิลเตอร์ทางแสงส่วนใหญ่ที่ใช้วิธีมักเป็นลักษณะของการใช้งานทางไฟฟ้ามากกว่า เพื่อคุณภาพในการสะท้อนที่ค่าความยาวคลื่นที่ต้องการและลดปริมาณความสูญเสียของสัญญาณ ในการทำงานของฟิลเตอร์ ฟิลเตอร์จะยอมให้ค่าความยาวคลื่นค่าหนึ่งส่งผ่านไป (ที่มีการตอบสนองแบบเรโซแนนซ์) และจะสะท้อนค่าความยาวคลื่นอื่น ๆ เป็นค่ามากกว่า 10% เทียบจากค่าความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นศูนย์กลางของฟิลเตอร์ สำหรับในการใช้งานเมื่อมีมากกว่า 2 ช่องสัญญาณ การจัดการฟิลเตอร์ให้เหมาะสมก็เป็นเรื่องที่สำคัญเพื่อหลีกเลี่ยงความสูญเสียของสัญญาณ ในทางปฏิบัติการจำนวนของฟิลเตอร์ที่นำมาใช้งานก็มีข้อจำกัด อย่างเช่น ในระบบบรอดแบนด์จะจำกัดอยู่ที่ 5-6 ช่องสัญญาณ เพราะจำนวนฟิลเตอร์ที่มากขึ้นนำไปสู่ความสูญเสียของสัญญาณเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าแบนวิดท์ที่ใช้ในเทคนิคการกรองต่าง ๆ

| 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 |

3.4.2.2 ฟิลเตอร์เรโซแนนซ์แบบ Fabry-Perot

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

3.4.2.3 ฟิลเตอร์แบบอุปกรณ์ขยายกึ่งตัวนำ

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

3.4.2.4 ฟิลเตอร์ไฟฟ้าแบบ Coherent Detection

เทคนิคนี้จะถูกนำมาใช้เมื่อแหล่งกำเนิดแสงมีเส้นที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดแบนวิดท์ของสัญญาณที่เป็นไปได้ ในเทคนิคนี้สัญญาณจะถูกผสมเข้ากับสัญญาณอ้างอิงที่เป็นค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าความถี่ที่ถูกกำหนดไว้ในเลเซอร์ภายใน สัญญาณที่ผสมนี้จะสร้างเป็นความถี่ใหม่ขึ้นมา ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณของสัญญาณที่ดีจะถูกระบุได้จากค่าแบนวิดท์ของสัญญาณที่ถูกโมดูเลท และวิธีการจัดเรียงทางด้านตัวรับ

3.5 แหล่งกำเนิดแสง

ในระบบ WDM แหล่งกำเนิดแสงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญของระบบ แหล่งกำเนิดแสงจะต้องมีความคงที่และมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนเพื่อใช้ในการเลือกค่าความยาวคลื่นที่ต้องการได้ในตารางที่ 3.3 จะแสดงถึงความกว้างสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงที่จะกล่าวถึงในที่นี้

ตารางที่ 3.3 ความกว้างสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่าง ๆ

| 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 |

3.5.1 LED

LED (Light Emitting Diode) เป็นไดโอดที่ถูกออกแบบโครงสร้างให้สามารถทำงานเปล่งแสงออกมาได้ เมื่อมีการไบอัสที่ถูกต้อง ค่าแบนวิดท์ที่กว้างของ LED นั้นมักจะถูกพิจารณาเป็นข้อด้อยเนื่องจากทำให้เกิดการกระจายของเส้นใยแก้ว แต่เราก็สามารถนำไปผ่านสเปกตรัมฟิลเตอร์เพื่อให้ความกว้างของสเปกตรัมของ LED แคบลงได้ด้วยเทคนิคที่เรียกว่า Spectral Slicing หลักการนี้มีข้อดีคือเราสามารถใช่ LED ซึ่งราคาไม่แพงนี้เป็นแหล่งกำเนิดแสงได้ในตัวส่งหลาย ๆ ตัวทางด้านส่ง จากนั้นจึงใช้ฟิลเตอร์มาช่วยในการเลือกค่าความยาวคลื่นที่จะใช้งาน แต่ฟิลเตอร์นี้ก็จะไปลดระดับกำลังส่งที่ได้จากแหล่งกำเนิด LED ซึ่งทำให้ค่าแบนวิดท์ลดลงไปด้วย วิธีการนี้ในทางปฏิบัติแล้วจึงเหมาะสำหรับการสื่อสารที่มีอัตราการส่งข้อมูลต่ำและระยะทางสั้น

3.5.2 เลเซอร์ไดโอดแบบ Fabry-Perot

เลเซอร์ไดโอดแบบนี้โดยทั่วไปจะมีรูปแบบการสันสะท้อน 6-8 แบบ และมีช่องว่างเป็นค่า $c/2L$ เอิร์ช สำหรับเลเซอร์ชนิดนี้ค่าความยาวคลื่นศูนย์กลางมีค่าความเปลี่ยนแปลงที่สามารถยอมรับได้อยู่ที่ ± 3 นาโนเมตรและมีความกว้างของเส้นที่ 6 นาโนเมตร ค่าความเปลี่ยนแปลงที่สามารถยอมรับได้ของตัวมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์จะเป็น ± 1 นาโนเมตร ดังนั้นช่องว่างระหว่างช่องสัญญาณที่ดีที่สุดจะเป็น 14 นาโนเมตร และถ้ากำหนดให้ช่องว่างระหว่างช่องสัญญาณมีค่าเท่ากับความกว้างของช่องสัญญาณเองจะพบว่าในหนึ่งช่องสัญญาณเราจะต้องใช้ขนาดถึง 28 นาโนเมตร

3.5.3 เลเซอร์ไดโอด DFB

เลเซอร์ไดโอดชนิดนี้จะมีค่าความกว้างสเปกตรัมของสัญญาณอยู่ที่ 10-100 เมกะเฮิรซ์ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดสเปกตรัมของสัญญาณเองที่อัตราการส่งข้อมูลสูง ๆ หรือความยาวคลื่นที่สูงโค้งขึ้นมา (Chirp) ที่เกิดที่เอาท์พุทของเลเซอร์เมื่อเกิดการสั่น ความกว้างของช่องสัญญาณจะประมาณได้จากค่าความเปลี่ยนแปลงที่สามารถยอมรับได้ของความยาวคลื่นศูนย์กลางของแหล่งกำเนิดที่มีค่า ± 0.5 นาโนเมตร ค่าความเปลี่ยนแปลงที่สามารถยอมรับได้ของ Chirp ซึ่งมีค่า ± 0.2 นาโนเมตร และค่าความเปลี่ยนแปลงที่สามารถยอมรับได้ของฟิลเตอร์ซึ่งมีค่า ± 1 นาโนเมตร ดังนั้นความกว้างของช่องสัญญาณจะอยู่ที่ประมาณ 3.5 นาโนเมตร และถ้ากำหนดให้ช่องว่างระหว่างช่องสัญญาณมีค่าเท่ากับค่าความกว้างของช่องสัญญาณ จะได้หนึ่งช่องสัญญาณมีความกว้าง 7 นาโนเมตร

3.5.4 เลเซอร์ที่กำหนดค่าความถี่

เลเซอร์ชนิดนี้สามารถมีขนาดเส้นที่เล็กถึง 5 เมกะเฮิรซ์ได้ ซึ่งขนาดความกว้างของเส้นที่มีค่าน้อย ๆ นี้ทำให้แบนวิคท์ของช่องสัญญาณนั้นขึ้นอยู่กับค่าแบนวิคท์ ของสัญญาณโดยตรง โดยที่ค่าขนาดความกว้างของเส้นของแหล่งกำเนิดแสงไม่มีผลเลย ในกรณีนี้ การคิมัลติเพล็กซ์จะไม่สามารถใช้ฟิลเตอร์แบบที่กำหนดตายตัวได้ ต้องใช้ฟิลเตอร์แบบที่สามารถปรับเปลี่ยนได้แบบแบนด์วิคท์แคบ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าค่าความยาวคลื่นที่ส่งผ่านมาจากฟิลเตอร์นั้นจะตรงกับค่าความยาวคลื่นที่มาจากแหล่งกำเนิด

3.6 ระบบเครือข่ายแบบหลายความยาวคลื่น

ระบบ WDM เป็นระบบเครือข่ายที่ทำงานที่หลาย ๆ ความยาวคลื่น ดังนั้นอุปกรณ์ตัวรับ-ส่งจึงอาจจะต้องสามารถปรับเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น ไปตามที่ต้องการได้

3.6.1 ตัวส่งที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้

กรรมวิธีในการปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นในตัวส่งที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้อาจกล่าวพอสังเขปดังนี้

3.6.1.1 การปรับเปลี่ยนโดยใช้อุณหภูมิหรือกระแส

ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงในตัวส่งจะสามารถถูกปรับเปลี่ยนได้โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวส่ง ซึ่งจะสามารถปรับความยาวคลื่นได้ถึงประมาณ 0.08 นาโนเมตรต่อหนึ่งองศาเซลเซียส และในกรณีที่แหล่งกำเนิดแสงแบบเลเซอร์ DFB อาจทำได้ถึง 1 นาโนเมตร หรือการเปลี่ยนแปลงกระแสของเลเซอร์ก็สามารถปรับความยาวคลื่นได้เช่นกัน โดยจะสามารถปรับได้ประมาณ 200 เมกะเฮิรซ์ต่อมิลลิแอมแปร์

3.6.1.2 การปรับเปลี่ยนด้วย DFB และ DFR

ในการปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นแบบครั้งละมาก ๆ อาจทำได้โดยการรวมเลเซอร์ DFB กับ ส่วนที่ควบคุมเฟสและส่วนที่แอกทีฟ หรือกระทำโดยการปรับเปลี่ยนในระดับของโครงสร้างของ ตัวชิพที่ทำหน้าที่ในการควบคุมตัวเลเซอร์เพื่อที่จะให้เลเซอร์นั้นสามารถทำการจ่ายได้หลาย ๆ ความยาวคลื่น

3.6.1.3 การปรับเปลี่ยนโดยใช้อุปกรณ์ภายนอก

นอกจากนั้นเรายังสามารถใช้เลเซอร์แบบ Fabry-Perot กับอุปกรณ์ภายนอกแบบที่เป็นโพรงหรือรูที่มีเกรตติงเคลื่อนที่ติดอยู่ การปรับเปลี่ยนโดยเทคนิคนี้สามารถปรับได้ครั้งละมากกว่า 55 นาโนเมตร และด้วยความเร็วในการปรับเปลี่ยนนี้จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องด้วย

3.6.2 ตัวรับที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้

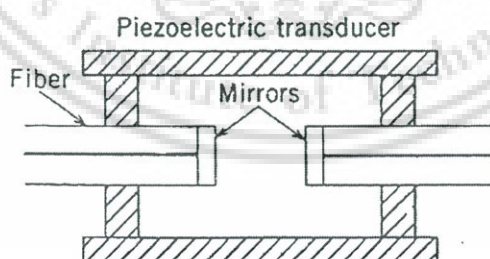
ในการปรับแต่งที่ตัวรับ ฟิลเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้นั้นสามารถเป็น ฟิลเตอร์แบบต่าง ๆ เหล่านี้

3.6.2.1 ฟิลเตอร์แบบหลายชั้น

ฟิลเตอร์ชนิดนี้จะประกอบไปด้วยหลาย ๆ ชั้น แต่ละชั้นก็จะมีความหนาแตกต่างกัน ในการปรับเปลี่ยนจะทำได้โดยการปรับฟิลเตอร์ ด้วยวิธีการนี้จะสามารถครอบคลุมได้ถึง 270 นาโนเมตร โดยมีพาสแบนด์อยู่ที่ 7 นาโนเมตร

3.6.2.2 ฟิลเตอร์แบบ Fabry-Perot Interferometer

การปรับเปลี่ยนในวิธีนี้จะกระทำโดยการเปลี่ยนความยาวของโพรงหรือรูของฟิลเตอร์ ซึ่งจากการทดลองสามารถรองรับได้ถึง 30 ช่องสัญญาณ โดยในการปรับเปลี่ยนนั้นจะใช้เวลาเพียงไม่กี่ ไมโครเซคคันด์ ฟิลเตอร์แบบ Fabry-Perot Interferometer แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงฟิลเตอร์แบบ Fabry-Perot Interferometer

3.6.2.3 เลเซอร์แบบ DFB ที่ทำงานที่ต่ำกว่าค่าเทรโซลด์

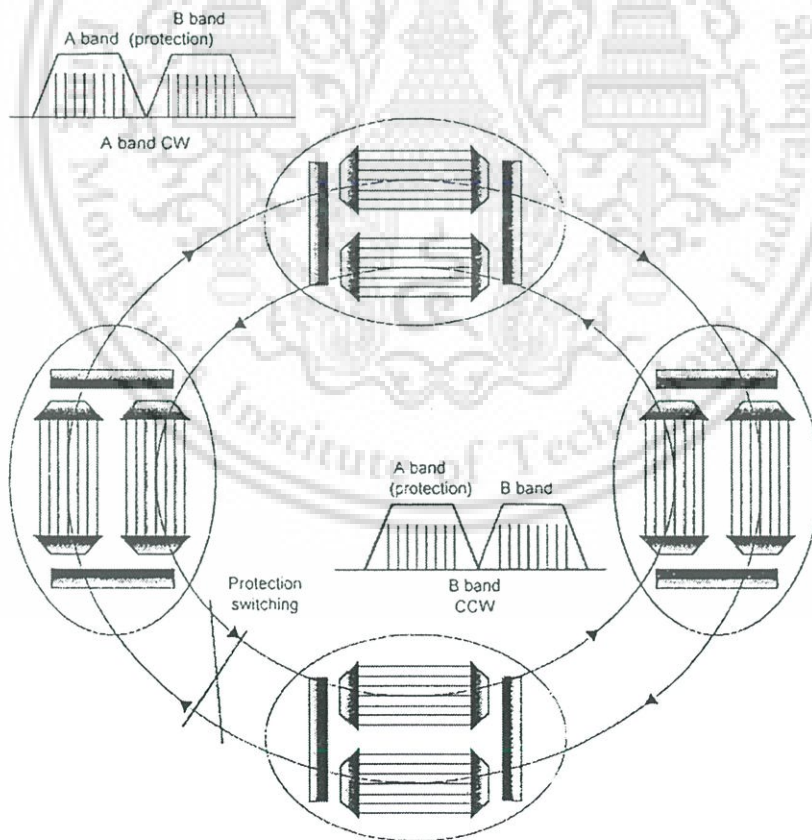
เลเซอร์แบบ DFB ที่ทำงานที่ต่ำกว่าค่าเทรโซลด์นี้จะทำหน้าที่คล้ายเป็นตัวขยายสัญญาณ และในที่นี้ทำหน้าที่เป็นฟิลเตอร์ที่ยอมให้แบนด์แคบ ๆ ผ่านได้ โดยในการปรับเปลี่ยนจะกระทำได้

โดยการทำงานร่วมกับส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมทางเฟส ซึ่งช่วงเวลาในการตอบสนองทำได้เร็วและมีช่วงในการปรับเปลี่ยนอยู่ที่ 71 กิกะเฮิรซ์ สำหรับในการทำงานของ 10 ช่องสัญญาณ

3.7 การป้องกันโครงข่ายล้ม

โครงข่ายแบบ All-optical เป็นโครงข่ายที่มีความสูง ในกรณีที่อุปกรณ์เพียงบางส่วนไม่ทำงาน ก่อให้เกิดผลกระทบค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกันโครงข่ายให้พ้นจากสภาวะที่ไม่สามารถใช้งานได้ โดยทั่วไปมักใช้การเตรียมแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเพื่อให้สามารถสลับการทำงานระหว่างส่วนที่ทำงานจริงในเวลาปกติและส่วนที่สำรองไว้ในยามฉุกเฉิน

จากรูปที่ 3.15 วงแหวนประกอบด้วยเส้นใยแก้วนำแสง 2 เส้น แต่ละเส้นเป็นการส่งในทิศทางเดียวคือเส้นหนึ่งส่งในทิศตามเข็มนาฬิกาใช้ความถี่ย่าน A band และอีกเส้นหนึ่งส่งในทิศทวนเข็มนาฬิกาใช้ความถี่ย่าน B band ดังนั้นโครงข่ายนี้จึงสามารถส่งแบบสองทาง (Duplex) ได้ เมื่อเส้นใยแก้วนำแสงถูกตัดหรือขาดแสดงดังในรูปที่ 3.15 สวิตช์สำหรับป้องกันการล้มของโครงข่ายจะต้องถึงกันระหว่างวงแหวนทั้งสองวง ทั้งด้านหัวและท้าย (แสดงเป็นเส้นประ) ทำให้โครงข่ายดังกล่าวสามารถใช้งานได้แม้ว่ามีกิ่งเชื่อมหนึ่งถูกตัดขาด

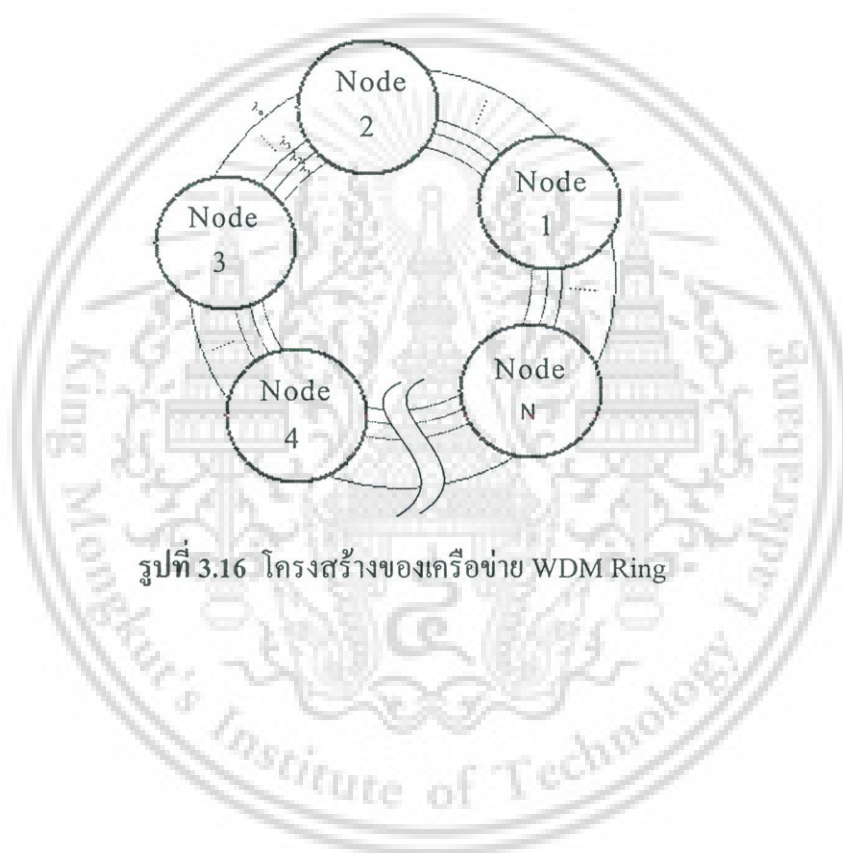


รูปที่ 3.15 แสดงการป้องกันโครงข่ายของ dual-fiber ring ด้วยการสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 โครงสร้างของเครือข่าย WDM Ring

สำหรับโครงสร้างของโครงข่าย WDM Ring ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 โดยมีสมมติฐานในการวิจัยดังนี้ คือ ในการเลือกช่องสัญญาณเพื่อใช้ในการรับ-ส่งนั้น ทั้งภาครับและภาคส่งของสถานีจะเป็นลักษณะที่สามารถปรับเลือกช่องสัญญาณที่จะทำการรับ-ส่งได้ (Tunable Transceiver) คือ สถานีจะสามารถใช้ช่องสัญญาณหรือ ความยาวคลื่นใด ๆ ก็ได้ที่วางอยู่ในการรับ-ส่งข้อมูล โดยการปรับภาคส่งและภาครับของสถานีไปยังช่องสัญญาณนั้น ๆ โดยการเข้าใช้ช่องสัญญาณจะเป็นแบบสุ่ม และการส่งข้อมูลจะส่งทีละแพ็กเก็ต (Packet-by-Packet) ด้วยกรรมวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ซึ่งรูปแบบของคิวหรือบัฟเฟอร์ของภาคส่งจะเป็นลักษณะแบบเข้าก่อน-ออกก่อน (First-in-First-out)



รูปที่ 3.16 โครงสร้างของเครือข่าย WDM Ring

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

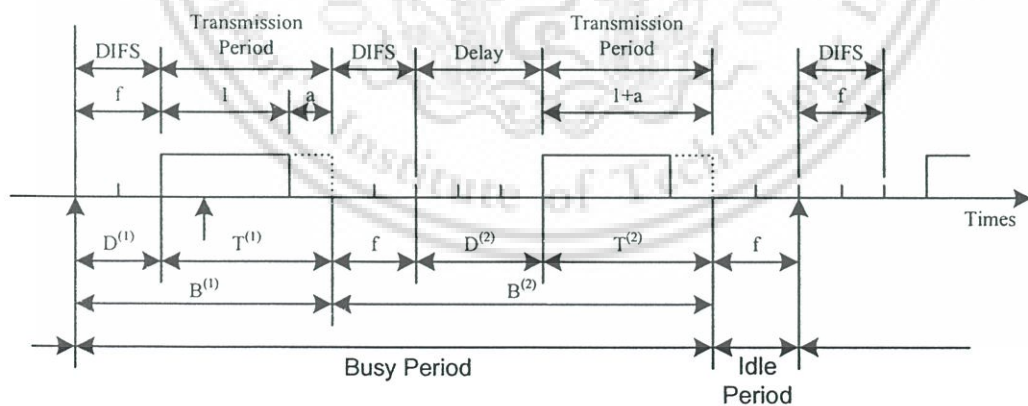
การวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอลแบบ CSMA/CA ในเครือข่าย WDM Ring

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอล CSMA/CA ในเครือข่าย WDM Ring โดยจะทำการวิเคราะห์ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) และค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย (Average Delay) ของเครือข่าย และในส่วนท้ายของบทจะกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอลเดิมที่มีใช้อยู่แล้วในเครือข่าย WDM Ring ซึ่งได้แก่ โปรโตคอลแบบ Slotted Ring เพื่อที่จะนำผลการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับสมรรถนะของโปรโตคอล CSMA/CA

4.1 การหาค่าวิสัยสามารถ (Throughput)

ในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์หาค่าวิสัยสามารถของเครือข่าย WDM Ring ที่ใช้โปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงแบบ CSMA/CA (Carrier sense multiple access with collision avoidance) โดยในการวิเคราะห์ จะใช้สมการทางความน่าจะเป็นง่ายๆ ในการวิเคราะห์ และผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงในรูปของค่าวิสัยสามารถที่ถูกนอร์มอไลซ์แล้ว (ค่าวิสัยสามารถมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1)

ตัวอย่างแบบจำลองช่องสัญญาณของการเข้าถึงแบบ CSMA/CA นั้น แสดงดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองช่องสัญญาณของโปรโตคอลแบบ CSMA/CA

ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการเข้าถึงแบบ CSMA/CA [15-18] โดยมีสมมติฐาน คือ ให้ขนาดความยาวของ slot เท่ากับ a (ค่า Propagation delay/Packet transmission time) การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบนี้จะจำกัดจำนวนสถานีที่เข้าใช้เพื่อประโยชน์ในการคำนวณ โดยให้จำนวนสถานีเท่ากับ M สถานี ความน่าจะเป็นที่สถานีจะสร้าง packet เท่ากับ g และสมมติว่าแต่ละสถานีจะส่ง Packet ออกไปด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ p โดยที่ค่า p นี้จะสัมพันธ์กับค่าช่วงเวลา backoff ในมาตรฐาน IEEE 802.11 ช่วงเวลาในการส่งข้อมูลกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 และสถานะของช่องสัญญาณมี 2 สถานะ คือว่าง (I: Idle) และไม่ว่าง (B: Busy) ให้ U เท่ากับเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลได้สำเร็จ (Useful Transmission)

ซึ่งสถานะช่องสัญญาณไม่ว่างนั้นสามารถแบ่งออกเป็น subbusy period ใดๆ $B^{(j)}$ สำหรับช่วงเวลาที่ใช้ในการรอคอยเนื่องจากค่าที่ส่งออกมาได้ของ subbusy period ใดๆ $D^{(j)}$ และ $T^{(j)}$ คือช่วงเวลาในการส่งสัญญาณข้อมูล

จะเห็นได้ว่ากรณี $B^{(1)}$ และ $T^{(1)}$ นั้น คือ ค่าช่วงเวลา DIFS แต่เนื่องจาก $D^{(j)}$ นั้นเป็นค่าตัวแปรสุ่มแบบ stochastic ดังนั้นเมื่อ $j \geq 2$ แล้ว $B^{(j)}$ จะประกอบด้วยค่าช่วงเวลา DIFS $D^{(j)}$ และ $T^{(j)}$ สมมติให้ค่าช่วงเวลา DIFS เป็น I สล็อต และมีขนาดเท่ากับ f และค่า $T^{(j)}$ ใดจะกำหนดให้คงที่ไม่ว่าการส่งนั้นจะสำเร็จหรือไม่ ให้ J เป็นจำนวนของ subbusy period ของ busy period และ U เป็นช่วงเวลาในการส่งสัญญาณข้อมูลได้สำเร็จแล้ว

$$B = \sum_{j=1}^J B^{(j)}, \quad U = \sum_{j=1}^J U^{(j)} \quad (4.1)$$

ต่อมาเราจะทำการหาจำนวนของ subbusy period ใน busy period ว่ามีค่าเท่าใด ในวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA นั้น ทุกสถานีจะสามารถส่งข้อมูลได้ก็ต่อเมื่อตรวจจับช่องสัญญาณว่างเป็นเวลานานกว่าหรือเท่ากับ DIFS ดังนั้นช่วงเวลาของ busy period นั้นจะยังคงอยู่ตลอดถ้ายังมี แพ็คเก็ตข้อมูลถูกสร้างขึ้นในช่วงเวลาการส่งสุดท้ายของเวลาหน่วง DIFS ถ้าให้ TP เป็นผลรวมของช่วงเวลาสุดท้ายในการส่งข้อมูลกับช่วงเวลาการส่งสุดท้ายของเวลาหน่วง DIFS แล้วจะได้ว่า

$$TP = 1 + a + f \quad (4.2)$$

เนื่องจาก J มีการแจกแจงแบบเรขาคณิต (Geometrically Distribution) จะได้

$$\Pr[J = j] = \left[1 - (1-g)^{(TP/a)M}\right]^{j-1} \cdot (1-g)^{(TP/a)M}$$

$$\bar{J} = \frac{1}{(1-g)^{(TP/a)M}}, \quad j = 1, 2, \dots \quad (4.3)$$

เราจะพิจารณาว่า $B^{(1)}$ นั้นจะเกิดขึ้นเมื่อมีแพ็กเก็ตเข้ามาในสล็อตสุดท้ายของสถานะว่างของช่องสัญญาณ (Idle Period) และ $B^{(2)}$ นั้นจะเกิดขึ้นเมื่อมีแพ็กเก็ตเข้ามาในช่วงเวลา $T^{(1)}$ แต่ถ้าขนาดของ $B^{(j)}$ ($j \geq 3$) ไม่ขึ้นอยู่กัย $B^{(2)}$ แล้วค่าเฉลี่ยของ $B^{(j)}$ ที่ ($j \geq 2$) จะเท่ากับ $(\bar{J}-1) \times E[B^{(2)}]$ เช่นเดียวกับกับ $U^{(j)}$ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ busy period สามารถหาได้ดังนี้

$$\bar{B} = E[B^{(1)}] + (\bar{J}-1)E[B^{(2)}], \quad \bar{U} = E[U^{(1)}] + (\bar{J}-1)E[U^{(2)}] \quad (4.4)$$

เนื่องจากเวลาที่ช่องสัญญาณว่างไม่ได้มีการส่งสัญญาณแพ็กเก็ตข้อมูล (Idle period) มีการแจกแจงแบบเรขาคณิต (Geometrically Distribution) จะได้

$$\Pr[I = ka] = (1-g)^{M(k-1)} \cdot \left[1 - (1-g)^M\right]$$

$$\bar{I} = \frac{a}{\left[1 - (1-g)^M\right]}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (4.5)$$

ในส่วนต่อไปนี้จะทำการหา $E[D^{(j)}]$ และ $E[U^{(j)}]$ สมมติให้ค่าความน่าจะเป็นที่จะมี n แพ็กเก็ตจากสถานีทั้งหมด M สถานีถูกสร้างเข้ามาระหว่าง X สล็อต แทนด้วย $P_n(X)$ ดังนั้น จะได้

$$P_n(X) = \frac{\binom{M}{n} \left[1 - (1-g)^{X/a}\right]^n (1-g)^{X(M-n)/a}}{1 - (1-g)^{XM/a}},$$

$$n = 1, 2, \dots, M \quad (4.6)$$

กำหนดให้ $N_0^{(j)}$ แทนจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกสร้างขึ้นและสะสมอยู่ ณ ที่จุดสิ้นสุดของช่วง TP ที่ j ใดๆ เพราะฉะนั้นความน่าจะเป็นที่ $N_0^{(j)}$ จะมีค่าเท่ากับ n สามารถแสดง ได้ดังนี้

$$\Pr[N_0^{(j)} = n] = P_n(TP), \quad j = 2, 3, \dots \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะหาสมการการแจกแจงของ $D^{(j)}$ เมื่อกำหนด $N_0^{(j)} = n$ โดยที่ $j \geq 2$ เราจะพิจารณาค่า k เมื่อ $k = 0, 1, 2, \dots$, แทนจำนวนขอบเขตของสล็อตของ $D^{(j)}$ ว่าจะต้องมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ k สล็อต ซึ่งเหตุการณ์นี้จะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อ มีสถานีจำนวน n สถานีที่มีการสร้างแพ็คเกจขึ้นมาเรียบร้อยแล้วแต่ยังไม่มีการส่ง และสถานีอีกจำนวน $M - n$ สถานีจะยังไม่มีการสร้างแพ็คเกจขึ้นมาในระหว่าง k สล็อตนี้ เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$\Pr[D^j \geq ka | N_0^{(j)} = n] = (1-p)^{kn} (1-g)^{k(M-n)} \quad (4.8)$$

เราสามารถหาค่าเฉลี่ยของ $D^{(j)}$ เมื่อกำหนด $N_0^{(j)} = n$ โดยไม่กำหนดค่าของ n จากสมการที่ (4.8) ได้ดังนี้

$$\bar{D} = E[D^{(j)}] = \begin{cases} f[1 - (1-g)^M], & j=1 \\ \frac{a}{1 - (1-g)^{(TP/a)M}} \left(\sum_{k=1}^{\infty} \left\{ (1-p)^k - (1-g)^{(TP/a)k} \right\} \cdot \left[(1-g)^k \right]^M \cdot (1-g)^{(TP/a)M} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} (1-g)^{kM} \right), & j=2, 3, \dots \end{cases} \quad (4.9)$$

จากสมการที่ (4.4), (4.5) และ (4.9) จะสามารถหาผลรวมของค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาการใช้ช่องสัญญาณ (Busy Period) และค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่ยังช่องสัญญาณว่าง (Idle Period) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{B} + \bar{I} &= f[1 - (1-g)^M] + 1 + a + \frac{1}{(1-g)^{(TP/a)M}} \\ &\quad \cdot \left((f+1+a)[1 - (1-g)^{(TP/a)M}] \right. \\ &\quad + a \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ (1-p)^k - (1-g)^{(TP/a)k} \right\} \left[(1-p)^k \right. \\ &\quad \left. \left. - (1-g)^k \right]^M - a(1-g)^{(TP/a)M} \sum_{k=1}^{\infty} (1-g)^{kM} \right) \\ &\quad + \frac{a}{1 - (1-g)^M} \end{aligned} \quad (4.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปเราก็จะทำการหาค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลได้สำเร็จ โดยจะพิจารณาที่ $N_0^{(j)} = n$ และ $D^{(j)} \geq ka$ ดังนั้นจะได้

$$E\{U^{(j)} | D^{(j)} \geq ka, N_0^{(j)} = n\} = \begin{cases} \sum_{k=1}^{\infty} \binom{M}{n} p^k (1-p)^{n-k}, & k=0 \\ \left(\sum_{i=1}^n \binom{M}{n} p^i (1-p)^{n-i} \sum_{l=1}^n \binom{M-n}{l} g^l (1-g)^{M-n-l} (i+l) \right), & k>0 \end{cases} \quad (4.11)$$

โดยที่ $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ และ i เป็นจำนวนของสถานีที่ต้องรอเป็นเวลา backoff เพื่อที่จะส่งแพ็กเก็ตด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ p และ l คือจำนวนของสถานีที่ทำการสร้างแพ็กเก็ตด้วยความน่าจะเป็นในการสร้างแพ็กเก็ตเท่ากับ g และใช้เงื่อนไขเดียวกับสมการที่ (4.10) เราสามารถหาค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาในการส่งข้อมูลได้สำเร็จ เมื่อ $U^{(j)}$ คือ ช่วงเวลาในการส่งข้อมูลได้สำเร็จเมื่อมีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลในช่วงสล็อตสุดท้ายของช่วงเวลาที่ช่องสัญญาณว่าง (Idle Period) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $P_1(1)$ จากสมการที่ (4.5) ดังนั้น จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \bar{U} = & \frac{M[1-(1-g)](1-g)^{M-1}}{1-(1-g)^M} + \left(\frac{1}{(1-g)^{(TP/a)M}} \right) \cdot \sum_{n=1}^M \left\{ [np(1-p)^{n-1} + \right. \\ & \left. (np(1-p)^{n-1}(1-g)^{M-n} + (1-p)^n(M-n)g(1-g)^{M-n-1}) \frac{(1-p)^n(1-g)^{M-n}}{1-(1-p)^n(1-g)^{M-n}} \right] \\ & \cdot \binom{M}{n} [1-(1-g)^{(TP/a)^n} (1-g)^{(TP/a)(M-n)} \} \end{aligned} \quad (4.12)$$

เมื่อนำโปรโตคอลแบบ CSMA/CA มาใช้ในเครือข่าย WDM Ring ซึ่งจากการศึกษาเราได้ทำการวิเคราะห์ว่า เครือข่าย WDM Ring เป็นเครือข่ายที่มีช่องสัญญาณเป็นแบบหลายช่องสัญญาณ (Multichannel) จะได้ว่า

$$\bar{U} = \frac{\lambda \cdot [1 - (1-g)](1-g)^{M-1}}{1 - (1-g)^M} + \left(\frac{\lambda}{M \cdot (1-g)^{(TP/a)M}} \right) \cdot \sum_{n=1}^M \left\{ [np(1-p)^{n-1} + \right. \\ \left. (np(1-p)^{n-1}(1-g)^{M-n} + (1-p)^n(M-n)g(1-g)^{M-n-1}) \cdot \frac{(1-p)^n(1-g)^{M-n}}{1 - (1-p)^n(1-g)^{M-n}} \right] \\ \cdot \binom{M}{n} [1 - (1-g)^{(TP/a)}]^n (1-g)^{(TP/a)(M-n)} \left. \right\} \quad (4.13)$$

โดยที่ λ คือ จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในการมัลติเพล็กซ์

เราจึงทำการหาค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ของวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ในเครือข่าย WDM Ring ได้ดังนี้ [12 - 14]

$$S = \frac{\bar{U}}{(\bar{B} + \bar{I})} \quad (4.14)$$

เมื่อ S เท่ากับค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ของช่องสัญญาณ

ทำการแทนค่าสมการที่ (4.10) และ (4.13) ลงในสมการที่ (4.14) เราก็จะสามารถหาค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ของช่องสัญญาณของวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ในเครือข่าย WDM Ring ได้

4.2 การหาค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย

ในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์หาค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของเครือข่าย WDM Ring ที่ใช้โปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงแบบ CSMA/CA (Carrier sense multiple access with collision avoidance) ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงในรูปของค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยที่ถูกลนอร์มอลไชน์แล้ว

ในการหาค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยเราจะใช้ค่า Offered traffic และ ค่าวิสัยสามารถของระบบ (Throughput) มาคำนวณ โดยในการวิเคราะห์นี้จะมีสมมติฐานว่าแต่ละช่องสัญญาณมีความเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งเราจะคำนวณค่าเฉลี่ยของจำนวนแพ็กเก็ตที่ต้องส่งใหม่ คือ $\left(\frac{G}{S} - 1\right)$ และเราสามารถหาค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย R ซึ่งเป็นการคิดค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยที่เริ่มตั้งแต่ เริ่มตรวจจับช่องสัญญาณซึ่งจะแบ่งได้เป็น 3 กรณี ดังนี้คือ

1. มีแพ็กเก็ตที่จะส่งและตรวจจับช่องสัญญาณที่กำลังว่างอยู่
2. มีแพ็กเก็ตที่จะส่งและตรวจจับช่องสัญญาณที่กำลังอยู่ในช่วงรอเวลา
3. มีแพ็กเก็ตที่จะส่งและตรวจจับช่องสัญญาณที่กำลังส่งสัญญาณอยู่

ให้ T เป็นช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ต โดย $T = (1+a)$ ดังนั้นเราจะสามารถคำนวณค่า R ได้ดังนี้

$$\bar{R} = \frac{\bar{I}}{B+\bar{I}} + \frac{\bar{D}}{B+\bar{I}} + \frac{\bar{B}-\bar{D}}{B+\bar{I}} \left[\frac{(T+f+E[D^{(2)}])^2}{2(T+f+E[D^{(2)}])} \right] \quad (4.15)$$

จากสมการที่ (4.4) จะได้

$$\bar{D} = E[D^{(1)}] + (\bar{J}-1)E[D^{(2)}] \quad (4.16)$$

และสมการที่ (4.16) หากำได้จาก สมการที่ (4.9) ดังนั้น เราสามารถหาค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยที่ถูกลนอร์มอลไชน์แล้ว ได้ดังนี้

$$L = \left(\frac{G}{S} - 1\right) [M + T + \bar{Y} + \bar{R}] + T + \bar{R} \quad (4.17)$$

โดยที่ Y คือ ค่าหน่วยเวลาแบบสุ่มเมื่อเกิดการชนกันของแพ็กเก็ตแล้วต้องรอเป็นเวลาเท่ากับ Y ก่อนที่จะตรวจจับช่องสัญญาณใหม่อีกครั้ง เมื่อนำค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ในหัวข้อ 4.1 มาแทนค่าในสมการ (4.17) ก็จะสามารถหาค่าเวลาหน่วยเฉลี่ยที่ถูกรบกวนมาได้แล้วได้

4.3 การวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอลแบบสล็อตตริง

ในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอลแบบสล็อตตริง ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงในรูปแบบของค่าเวลาหน่วยเฉลี่ยที่ถูกรบกวนมาได้แล้ว

ในการวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอลแบบสล็อตตริง [19-20] นั้นมีสมมติฐานว่าแต่ละช่องสัญญาณมีความเป็นอิสระต่อกัน โดยการเข้าใช้ช่องสัญญาณจะเป็นแบบสุ่ม จาก [17, 19-21] เราสามารถหาค่าวิสัยสามารถได้จากสมการนี้ คือ

$$S = \frac{M\lambda\bar{X}}{R} \quad (4.18)$$

โดยที่ M คือ จำนวนสถานีทั้งหมดในเครือข่าย

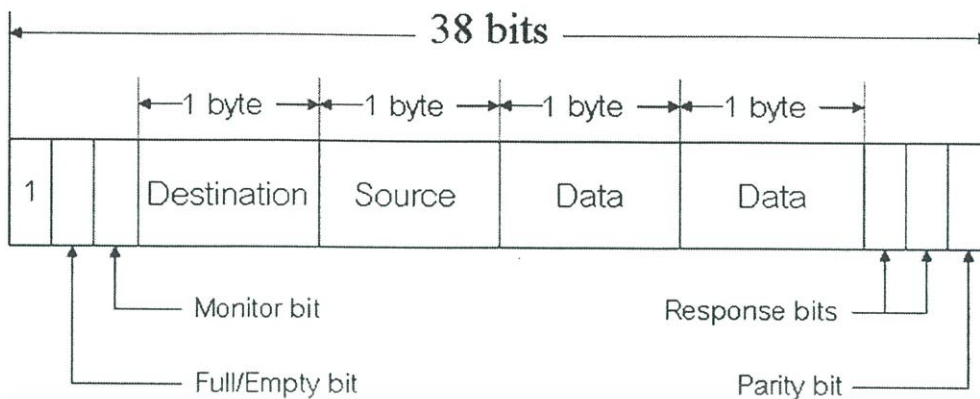
λ คือ อัตราการเข้ามาเป็นแบบปัวซอง ด้วยอัตรา λ แพ็กเก็ตต่อวินาที (Packets/sec)

\bar{X} คือ ความยาวแพ็กเก็ตเฉลี่ยมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

R คือ ความเร็วในช่องสัญญาณ (bps)

S คือ ค่าวิสัยสามารถของโปรโตคอลแบบสล็อตตริง

จากหลักการทำงานของสล็อตตริงที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 นั้น ได้กล่าวว่าสถานีส่งจะต้องแบ่งแพ็กเก็ตข้อมูลออกเป็นมินิแพ็กเก็ต (Mini packet) เพื่อให้สามารถบรรจุลงในสล็อตได้ ข้อมูลทั้งหมดที่บรรจุอยู่ในสล็อตนั้นมีรูปแบบ [19] ดังนี้



รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบของมินิแฟ้มเกิด

จากรูปจะเห็นได้ว่าจำนวนข้อมูลในมินิแฟ้มเกิดมีทั้งหมดแค่ 16 บิต จากจำนวนบิตในมินิแฟ้มเกิดทั้งหมด 38 บิต ซึ่งคิดเป็น % แค่ 42 % ที่เหลืออีก 58 % เป็นส่วนหัวของมินิแฟ้มเกิด (header) ดังนั้นในโปรโตคอลแบบสล็อตตรงจึงต้องพิจารณาเกี่ยวกับส่วนหัวของมินิแฟ้มเกิด (header) ด้วยโดยได้กำหนดตัวแปรโอเวอร์เฮดแฟกเตอร์ (overhead factor) ดังนี้ คือ

$$h = (L_h + L_d) \quad (4.19)$$

โดยที่ h คือ โอเวอร์เฮดแฟกเตอร์ (overhead factor)

L_h คือ จำนวนบิตส่วนหัวทั้งหมดในแต่ละสล็อต

L_d คือ จำนวนบิตข้อมูลทั้งหมดในแต่ละสล็อต

ดังนั้น จำนวนบิตทั้งหมดใน 1 สล็อต = $L_h + L_d$ และจาก [19, 21] เราสามารถหาค่าเวลาหน่วยเฉลี่ยที่ถูกรอมาไลซ์แล้ว ได้ดังนี้

$$\bar{T} = \frac{2(1+h)}{\delta - S(1+h)} + \frac{a'}{2} \quad (4.20)$$

โดยที่ δ คือ จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในการมัลติเพล็กซ์

S คือ ค่าวิสัยสามารถของโปรโตคอลแบบสล็อตตรง

a' คือ ค่านอร์มาไลซ์ลาเทนซีในวงแหวน และ $a' = \tau' \left(\frac{R}{X} \right)$

h คือ โอเวอร์เฮดแฟกเตอร์ (overhead factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถหาค่า τ' ได้จาก [19-20] ดังนี้

$$\tau' = \frac{m(L_h + L_d)}{R} + g = \tau + \frac{M \cdot B}{R} \quad (4.21)$$

โดยที่ m คือ จำนวนสล็อตในวงแหวน

g คือ ช่องว่างระหว่างสล็อต

R คือ ความเร็วในช่องสัญญาณ (bps)

B คือ station latency

τ คือ ค่าหน่วงเวลาในการแพร่ (Propagation delay)

M คือ จำนวนสถานีทั้งหมดในเครือข่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

ในบทนี้จะนำเสนอถึงผลจากการคำนวณเชิงตัวเลขของสมการค่าวิสัยสามารถ (Throughput) และค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย (Delay) ของระบบ โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอลแบบ CSMA/CA ซึ่งคำนวณได้จาก สมการ (4.14) และ (4.14) ส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอลสล็อตตรงซึ่งคำนวณได้จาก สมการ (4.18) และ (4.20) และในส่วนสุดท้ายจะเป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะของโปรโตคอลแบบ CSMA/CA กับ โปรโตคอลสล็อตตรง ในการคำนวณนั้นกระทำโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณ

5.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อใช้โปรโตคอลแบบ CSMA/CA

ในส่วนนี้จะแสดงผลการคำนวณค่าสมรรถนะของโปรโตคอล CSMA/CA ในเครือข่าย WDM Ring โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ มีดังนี้

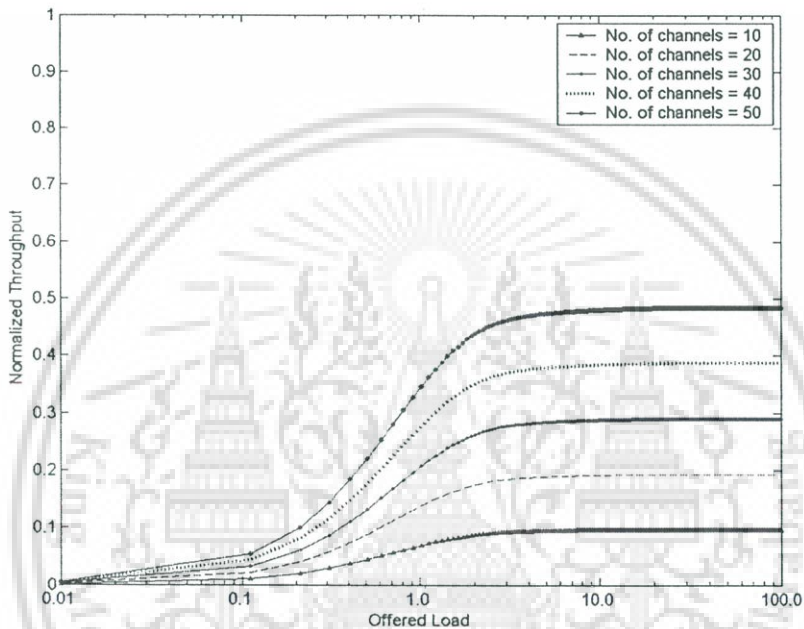
- ค่าการกระจายหน่วงเวลา (Propagation delay: a) = 0.01 และ 0.001 (normalized)
- ค่าความน่าจะเป็นที่สถานีจะส่งแพ็กเก็ตออกไป (p) = $3a$
- ค่าความต้องการใช้งาน (G) = gM/a
- จำนวนผู้ใช้ในระบบ (M) = 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 และ 300
- จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในการมัลติเพล็กซ์ (ช่องสัญญาณ) ของระบบ (λ) เป็น 10, 20, 30, 40, 50
- ค่าขนาดเฟรม DIFS (f) = $6a$
- ช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ต (T) = $1+a$
- ผลรวมของช่วงเวลาสุดท้ายในการส่งข้อมูลกับช่วงเวลาเวลาหน่วง DIFS (TP) = $1+a+f$

ค่าหน่วงเวลาแบบสุ่มเมื่อเกิดการชนกัน (random backoff: \bar{Y}) = 0.06

โดยผลการคำนวณนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นผลการคำนวณค่าวิสัยสามารถของระบบและส่วนที่สองเป็นการคำนวณค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของระบบ

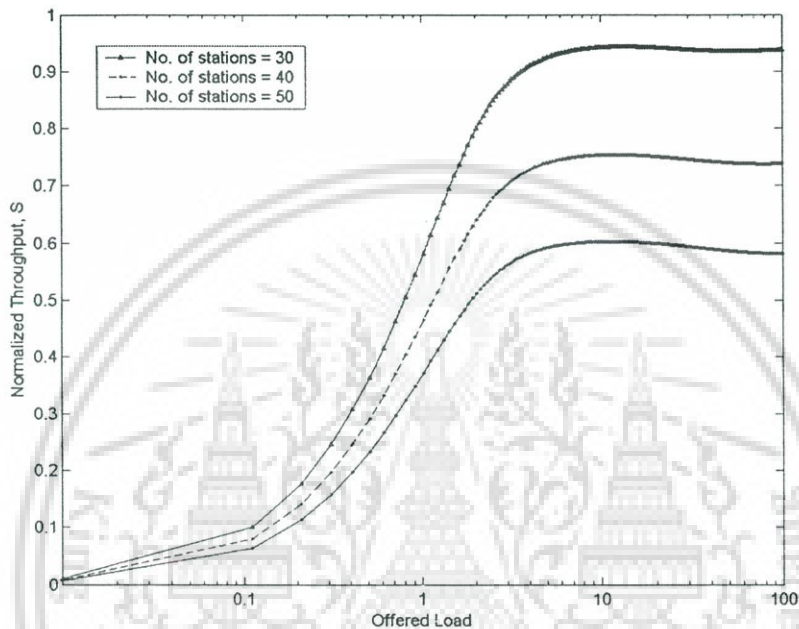
5.1.1 ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ของระบบ

รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิสัยสามารถของเครือข่าย WDM Ring กับ ค่าโหลดที่ต้องการ (Offered Load: G) เมื่อใช้โปรโตคอลการเข้าถึงแบบ CSMA/CA โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าจำนวนช่องสัญญาณ (λ) กำหนดให้ จำนวนของผู้ใช้ (M) มีค่าเท่ากับ 100 สถานี $G = gM/a$ เมื่อกำหนด $a = 0.01$, $p = 3a = 0.03$ และ $f = 6a = 0.06$



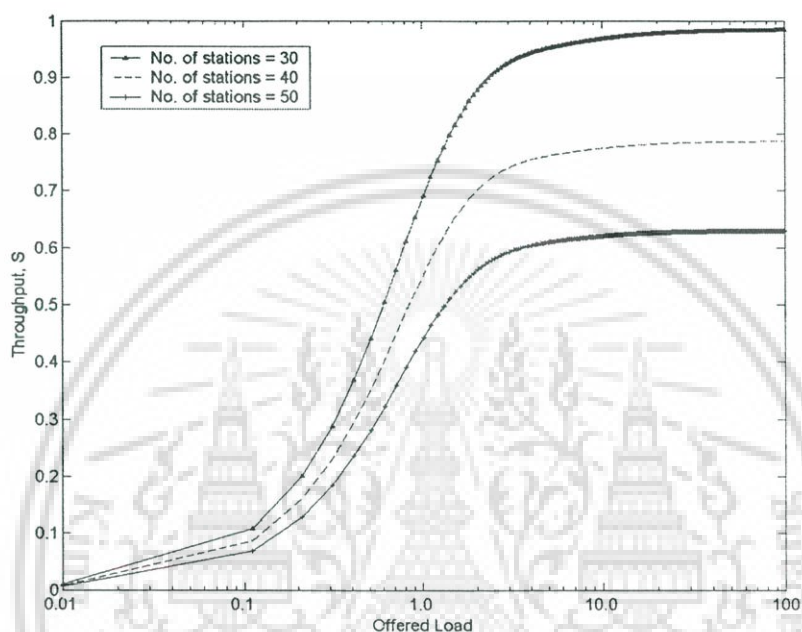
รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิสัยสามารถของเครือข่าย WDM Ring กับค่าโหลดที่ต้องการ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าจำนวนช่องสัญญาณ (λ) กำหนดให้ $M = 100$, $a = 0.01$, $p = 0.03$, และ $f = 0.06$

รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิสัยสามารถของเครือข่าย WDM Ring กับ ค่าโหลดที่
 ต้องการ (Offered Load: G) เมื่อใช้โปรโตคอลการเข้าถึงแบบ CSMA/CA โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่า
 จำนวนผู้ใช้งานช่องสัญญาณ (M) กำหนดให้ จำนวนช่องสัญญาณ (λ) มีค่าเท่ากับ 30 ช่องสัญญาณ
 $G = gM/a$ เมื่อกำหนด $a = 0.01$, $p = 3a = 0.03$ และ $f = 6a = 0.06$



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิสัยสามารถของเครือข่าย WDM Ring กับค่าโหลดที่ต้องการ
 โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าผู้ใช้งาน (M) กำหนดให้ $\lambda=30$, $a=0.01$, $p=0.03$ และ $f=0.06$

รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิสัยสามารถของเครือข่าย WDM Ring กับ ค่าโหลดที่
 ต้องการ (Offered Load: G) เมื่อใช้โปรโตคอลการเข้าถึงแบบ CSMA/CA โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่า
 จำนวนผู้ใช้งานช่องสัญญาณ (M) กำหนดให้ จำนวนช่องสัญญาณ (λ) มีค่าเท่ากับ 30 ช่องสัญญาณ
 $G = gM/a$ เมื่อกำหนด $a = 0.001$, $p = 3a = 0.003$ และ $f = 6a = 0.006$

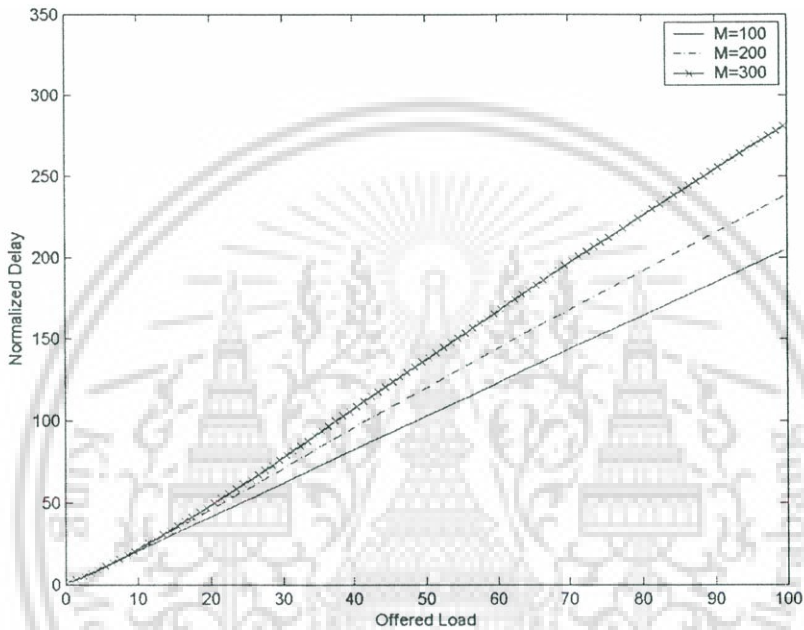


รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิสัยสามารถของเครือข่าย WDM Ring กับค่าโหลดที่ต้องการ
 โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าผู้ใช้ (M) กำหนดให้ $\lambda = 30$, $a = 0.001$, $p = 0.003$ และ $f = 0.006$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

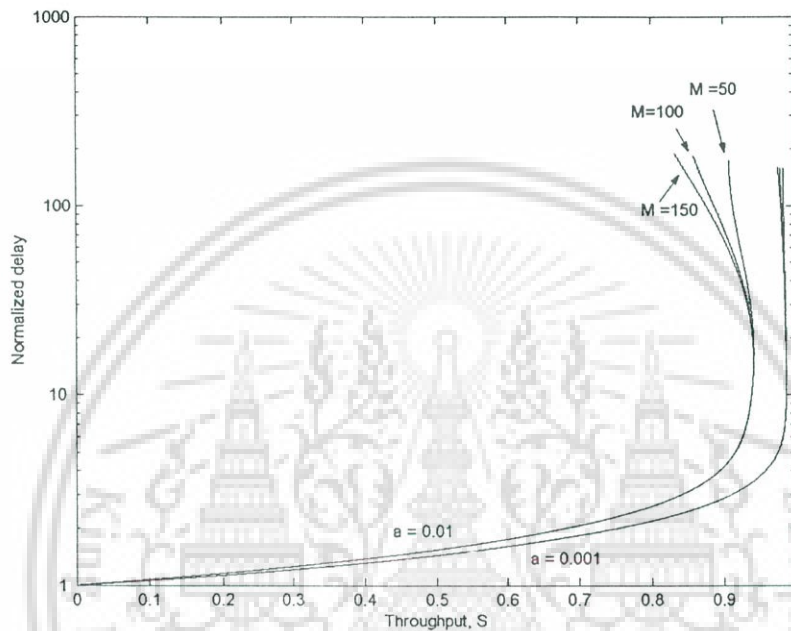
5.1.2 ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย (Delay) ของระบบ

รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลกับค่าโหลดที่ต้องการ (Offered Load: G) เมื่อใช้โปรโตคอลการเข้าถึงแบบ CSMA/CA โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าจำนวนผู้ใช้งานช่องสัญญาณ (M) กำหนดให้ จำนวนช่องสัญญาณ (λ) มีค่าเท่ากับ 30 ช่องสัญญาณ $G = gM/a$ เมื่อกำหนด $a = 0.01$, $p = 0.03$, $f = 0.06$ และ $\bar{Y} = 0.06$



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลกับค่าโหลดที่ต้องการ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าผู้ใช้ (M) กำหนดให้ $\lambda = 30$, $a = 0.01$, $p = 0.03$, $f = 0.06$ และ $\bar{Y} = 0.06$

รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลกับค่าวิสัยสามารถของเครือข่าย WDM Ring เมื่อใช้โปรโตคอลการเข้าถึงแบบ CSMA/CA โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนผู้ใช้งานช่องสัญญาณ (M) กำหนดให้ จำนวนช่องสัญญาณ (λ) มีค่าเท่ากับ 30 ช่องสัญญาณ, $G = gM/a$ เมื่อกำหนด $a = 0.01$, $p = 0.03$, $f = 0.06$ และ $\bar{Y} = 0.06$



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลกับค่าวิสัยสามารถของเครือข่าย WDM Ring เมื่อกำหนดให้ $a = 0.01$ และ $a = 0.001$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอลแบบสล็อตตริง

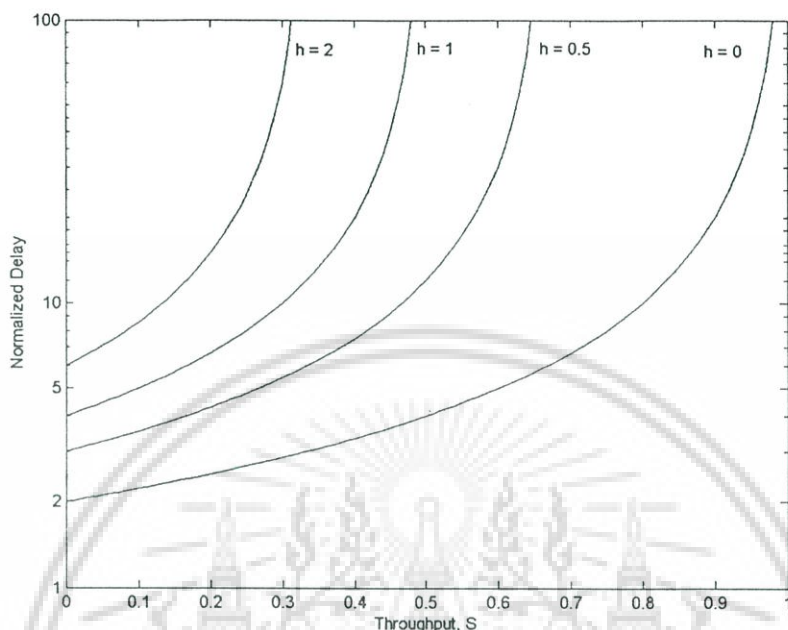
ในส่วนนี้จะแสดงผลการคำนวณค่าสมรรถนะของโปรโตคอลแบบสล็อตตริง โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ มีดังนี้

- จำนวนผู้ใช้ในระบบ (M) = 50
- อัตราการเข้ามาเป็นแบบปัวซอง ด้วยอัตรา 50 แพ็กเก็ตต่อวินาที (Packets/sec)
- ความยาวแพ็กเก็ตเฉลี่ย (\bar{X}) = 2,024 บิต
- ความเร็วในช่องสัญญาณ (R) = 5 Mbps
- ค่าการกระจายหน่วงเวลา (Propagation delay: τ) = 5×10^{-6} วินาที
- จำนวนบิตส่วนหัว = 24 บิต

ผลการคำนวณค่าสมรรถนะของโปรโตคอลแบบสล็อตตริงนั้น แสดงไว้ในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลกับค่าวิสัยสามารถของโปรโตคอลการเข้าถึงแบบสล็อตตรง โดยที่ $h=0, 0.5, 1, 2$



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลกับค่าวิสัยสามารถของโปรโตคอลแบบสล็อตตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การเปรียบเทียบสมรรถนะของโปรโตคอลแบบ CSMA/CA กับโปรโตคอลแบบ สล็อตริงเมื่อนำมาใช้ในเครือข่าย WDM Ring

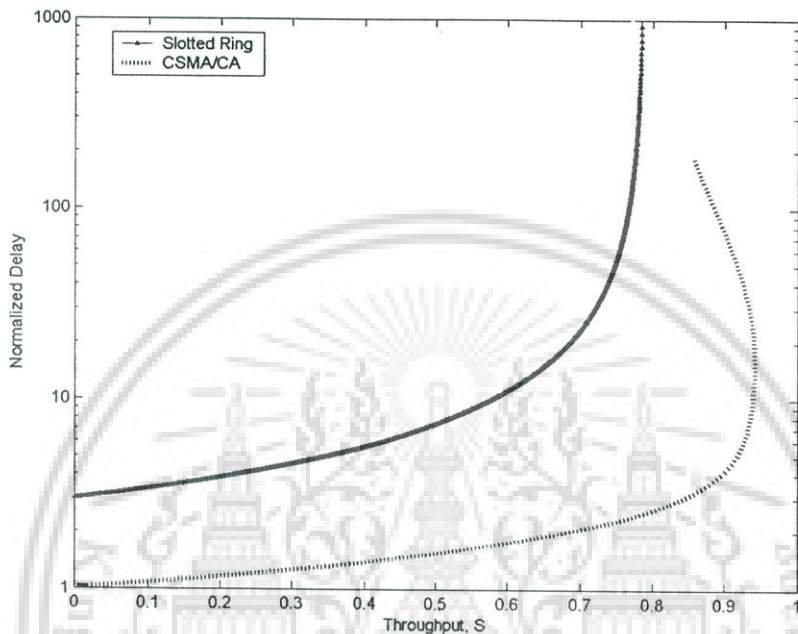
ในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของโปรโตคอลแบบ CSMA/CA กับโปรโตคอลแบบ สล็อตริงเมื่อนำมาใช้ในเครือข่าย WDM Ring ผลการคำนวณที่ได้นี้จะนำไปพล็อตเป็นกราฟแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลกับค่าวิสัยสามารถของ เครือข่าย WDM Ring เมื่อใช้โปรโตคอลทั้งสองแบบ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ มี ดังนี้

- จำนวนผู้ใช้ในระบบ (M) = 100
- จำนวนช่องสัญญาณของระบบ = 30 ช่องสัญญาณ
- อัตราการเข้ามาเป็นแบบปัวซอง ด้วยอัตรา 5,000 แพ็กเก็ตต่อวินาที (Packets/sec)
- ความยาวแพ็กเก็ตเฉลี่ย (\bar{X}) = 2,024 บิต
- ความเร็วในช่องสัญญาณ (R) = 1 Gbps
- ค่าการกระจายหน่วงเวลา (Propagation delay: τ) = 5×10^{-6} วินาที
- ค่า station latency (B) = 4 บิต
- จำนวนสล็อต (m) = 8 สล็อต
- จำนวนบิตส่วนหัว = 24 บิต
- ค่าการกระจายหน่วงเวลา (Propagation delay: a) = 0.01 (normalized)
- ค่าความน่าจะเป็นที่สถานีจะส่งแพ็กเก็ตออกไป (p) = $3a$
- ค่าความต้องการใช้งาน (G) = gM/a
- ค่าขนาดเฟรม DIFS (f) = $6a$
- ช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ต (T) = $1+a$
- ผลรวมของช่วงเวลาสุดท้ายในการส่งข้อมูลกับช่วงเวลาเวลาหน่วง DIFS (TP) = $1+a+f$

ค่าหน่วงเวลาแบบสุ่มเมื่อเกิดการชนกัน (random backoff: \bar{Y}) = 0.06 (normalized)

โดยผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของโปรโตคอลแบบ CSMA/CA กับโปรโตคอลแบบสล็อตริง เมื่อนำมาใช้ในเครือข่าย WDM Ring นั้น แสดงไว้ในรูปที่ 5.7

รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลกับค่าวิสัยสามารถของเครือข่าย WDM Ring เมื่อใช้โปรโตคอลทั้งสองแบบ โดยกำหนดให้จำนวนสถานี (M) เท่ากับ 100 และค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ได้แสดงไว้แล้วในตอนที่ 5.3



รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลกับค่าวิสัยสามารถของเครือข่าย WDM Ring เมื่อเปรียบเทียบระหว่างโปรโตคอลแบบ CSMA/CA และแบบสล็อตริง กำหนดให้จำนวนสถานี (M) เท่ากับ 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในปัจจุบัน ความต้องการในการส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายในบริเวณกว้างทั่วโลกมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ระบบที่มีความจุสูงและสามารถรองรับการส่งและรับข้อมูลปริมาณมากในเวลาอันรวดเร็ว ถูกพัฒนาขึ้นไปตามลำดับ ระบบโครงข่ายที่มีอุปกรณ์ทำงานอยู่ในรูปของแสงทั้งหมดช่วยลดปัญหาจากการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและช่วยให้สามารถส่งข้อมูลผ่านเส้นใยนำแสงไปในระยะทางไกลโดยมีการลดทอนของสัญญาณน้อยมากและมีความไวใจได้ของข้อมูลสูงหรือมีอัตราบิดผิดพลาดต่ำ ความเร็วในการส่งข้อมูลมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นในระดับที่มีหน่วยเป็น Tb/s [1-2] ระบบมัลติเพล็กซ์แบบหลายความยาวคลื่นช่วยเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณในการส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงทำให้สามารถส่งพร้อมกันหลายช่องสัญญาณด้วยความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากจำนวนช่องสัญญาณที่สามารถใช้งานได้มีอยู่อย่างจำกัด ผู้ใช้งานจึงต้องมีการแบ่งใช้ช่องสัญญาณนั้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถให้บริการแก่ผู้ใช้งานได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้ต้องใช้วิธีการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ ซึ่งโปรโตคอลแบบ CSMA/CA นั้นเป็นโปรโตคอลที่มีประสิทธิภาพดีช่วยทำให้การเข้าถึงช่องสัญญาณเป็นไปอย่างยุติธรรมและรวดเร็ว

จากผลการวิเคราะห์ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ของโปรโตคอล CSMA/CA ในโครงข่าย WDM Ring นั้นพบว่าเมื่อจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้มัลติเพล็กซ์ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ของระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้มัลติเพล็กซ์ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มความจุให้กับโครงข่าย ทำให้สามารถรองรับผู้ใช้งานได้มากขึ้น

เมื่อกำหนดให้จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้มัลติเพล็กซ์ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าคงที่ แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าจำนวนสถานีที่ต้องการใช้ช่องสัญญาณ พบว่าเมื่อจำนวนสถานีเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ของโครงข่ายลดลง เนื่องจากมีจำนวนสถานีที่ใช้แย่งช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น

จากรูปที่ 5.4 เมื่อทำการลดค่า a (Propagation Delay) ของระบบ จาก 0.01 เป็น 0.001 จะเห็นได้ว่าค่าวิสัยสามารถของระบบจะเพิ่มขึ้นกว่ารูปที่ 5.3 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากค่าหน่วงเวลาในการแพร่กระจายลดลง โปรโตคอลแบบนี้ไม่เหมาะกับระบบสื่อสารที่มีค่าหน่วงเวลาสูง เช่น ในระบบดาวเทียม แต่เนื่องจากโครงข่าย WDM เป็นโครงข่ายความเร็วสูงจึงนำมาใช้ได้ดี

จากผลการวิเคราะห์ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของระบบจะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนสถานีเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเนื่องจากการแย่งใช้ช่องสัญญาณเพิ่มขึ้น เกิดการชนกันมากขึ้น เวลาในการรอใช้ช่องสัญญาณจึงเพิ่มมากขึ้นด้วย

จากรูปที่ 5.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อ $a=0.001$ ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลจะต่ำกว่า ดังนั้น ค่าการกระจายหน่วงเวลา (a) ลดลง มีผลทำให้ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลลดลงด้วย

ในการวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอลสล็อตตริงนั้นจะเห็นได้ว่าค่า Overhead factor มีผลต่อระบบ เมื่อค่า Overhead factor เพิ่มขึ้นค่าหน่วงเวลาของแพ็กเก็ตข้อมูลจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งค่า Overhead factor นี้จะมีผลต่อโปรโตคอลแบบสล็อตตริงเป็นอย่างมากดังที่ได้กล่าวถึงไว้แล้วในตอนที่ 4.3

จากรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าการใช้โปรโตคอลแบบ CSMA/CA ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าโปรโตคอลแบบสล็อตตริง



เอกสารอ้างอิง

- [1] W. P. Chen, W. S. Hwang, and C. C. Li. "A Packet Pre-classification CSMA/CA MAC Protocol for IP over WDM Ring Network" 8th IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS2002). 2002. pp. 1222-1226.
- [2] K. S. Kim, H. Okagawa, K. Shrikhande and L. G. Kazovsky. "Unslotted optical CSMA/CA MAC Protocol with Fairness Control in Metro WDM Ring Networks" Proc. of GLOBECOM 2002, Taipei, Taiwan, Nov 2002.
- [3] A. Fumagalli, J. Cai and I. Chlamtac. "The Multi-Token Inter-Arrival Time (MTIT) Access Protocol for Support IP over WDM Ring Networks" IEEE Proc of ICC. 1-2, 1999. pp. 586 – 590.
- [4] 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.
- [5] M. A. Marsan, A. Bianco, E. Leonardi, F. Neri, and S. Toniolo. "MetaRing Fairness Control Schemes in All-Optical WDM Rings" Proc. IEEE INFOCOM. 2, 1997. pp. 752-760.
- [6] J. H. Lee and C. K. Un. "Dynamic Scheduling Protocol for Variable-Sized Messaged in a WDM Local Network" IEEE Journal of Lightwave Tech. 14, vol.7, 1996. pp. 1595-1600.
- [7] B. Mukherjee. "WDM-Based Local Lightwave Networks Part I: Single-hop systems" IEEE Networks Magazine, May 1992. pp. 12-27.
- [8] แซทท์, สเตน. เรียนรู้และเข้าใจการทำงาน Local Area Networks. แปลโดย กฤษฎา สิงหวงศ์ กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2540.
- [9] พิพัฒน์ หิรัญยวณิชชากร. ระบบการสื่อสารข้อมูลและเครือข่ายคอมพิวเตอร์. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2542.
- [10] อัครเสน สมุทรพองและจักร พิชัยสรทัต. ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2521.
- [11] ลัญจนกร วุฒิสัทติกุลกิจ. วิศวกรรมโทรคมนาคม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2544.
- [12] สุวิพล ลิทธิชีวะภาค. โคลด์แอสเซมบลีเน็ตเวิร์ค. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2535.
- [13] W. Stallings. 1998. **Wireless Communications and Networks**. Prentice-Hall International Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] J. Powers. **An Introduction to Fiber Optic Systems**. 2nd edition. McGraw-Hill International Editions. 1999.
- [15] 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.
- [16] L. Kleinrock and F. A. Tobagi. "Packet Switching in Radio Channels: Part I-CSMA Modes and Their Throughput-Delay Characteristics" IEEE Transactions on Communications, vol. COM23, no. 12, December 1975. pp. 1400-1416.
- [17] L. Kleinrock and R. Gail. **Queuing systems : problems and solutions**. New York : John Wiley, c1996.
- [18] M. A. Marsan and D. Roffinella. "Multichannel Local Area Network Protocols" Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, Volume1, Issue 5, Nov 1983. pp. 885 – 897.
- [19] J. L. Hammond and P. J. P. O'Reilly. **Performance Analysis of Local Computer Networks**. Addison Wesley, 1986.
- [20] W. Bux. "Local-Area Subnetworks: A Performance Comparison" IEEE Trans. on Commun., COM-29, 1981. pp. 1465-1473.
- [21] C. S. Kang, B. S. Park and I. K. Rhee. "Performance Comparison of a Class of Slotted ring networks" IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'95), 1995. pp. 220-226.

ภาคผนวก

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] **Monwipa Srisuriya**, Suvepon Sittichevapak and Kriengkrai Vonglodjanaporn “Performance Analysis of CSMA/CA Protocol of WDM Ring Network” The 2nd ECTI Annual Conference (ECTI-CON 2005), Pattaya, Thailand, May 12-13, 2005.
- [2] **Monwipa Srisuriya**, Ekanun Sombatsakulkit, Suvepon Sittichevapak and Kriengkrai Vonglodjanaporn “A Proposed Tunable Transmitter - Tunable Receiver Algorithm for Accessing the Multichannel Slotted-Ring WDM Metropolitan Network under Self-Similar Traffic” The 2004 International Conference on Information and Communication Technologies (ICT 2004), Bangkok, Thailand, November 18-19, 2004.



ประวัติผู้เขียน

| | |
|--------------------|--|
| ชื่อ-นามสกุล | นางสาวมณวิภา ศรีสุริยะ |
| วัน เดือน ปีเกิด | 17 มิถุนายน 2522 ที่สงขลา |
| ที่อยู่ | 2328/1662 ซ.รามคำแหง 52/2 ถ. รามคำแหง แขวงหัวหมาก เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ 10240 |
| ประวัติการศึกษา | 2545 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| ความชำนาญเฉพาะด้าน | 1) ระบบโทรคมนาคม 2) โปรโตคอลคอมพิวเตอร์ |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้