



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การวิเคราะห์และการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบส่ง  
สัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดโดย  
อาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์

โดย ผศ.ดร.สุรเชษฐ์ กานต์ประชา และคณะ

พฤษภาคม 2554

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การวิเคราะห์และการคัดสรรความถี่พหุคูณที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบส่ง  
สัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาหีย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดโดย  
อาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์

1. ผศ.ดร.สุรเชษฐ์ กานต์ประชา มหาวิทยาลัยนเรศวร
2. รศ.ดร.อิสสระชัย งามหรรุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## บทคัดย่อ

การสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงมีความสำคัญอย่างมากต่อการสื่อสารในปัจจุบัน ใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นชนิดหนึ่งของใยแก้วนำแสง ที่มีความสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสื่อสารข้อมูลที่มีอัตราเร็วสูง อย่างไรก็ตาม การจะส่งข้อมูลที่อัตราเร็วสูงผ่านใยแก้วนำแสงประเภทนี้นั้น ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด นั้น ย่นความถี่สูงนั้นมีความสำคัญ ในงานวิจัยชิ้นนี้ ได้มีการศึกษาถึงผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด และพบว่ามีความถี่มากมายที่สามารถใช้เป็นช่องส่งสัญญาณ อย่างไรก็ตาม การเลือกความถี่พาห้ที่เหมาะสมในการส่งสัญญาณผ่านแถบผ่านความถี่เหล่านี้จำเป็นต้องเลือกอย่างเหมาะสม จากงานวิจัย พบว่าการนำเอากระบวนการทางพันธุศาสตร์มาใช้ในการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม ทำให้ได้ความถี่พาห้ที่สามารถนำไปใช้ในการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยที่มีค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดที่ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งส่งผลให้การสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด มีประสิทธิภาพดีขึ้นทั้งในแง่ของอัตราเร็วของข้อมูลและความผิดพลาดในการส่ง

คำสำคัญ: ใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ผลตอบสนองทางความถี่ กระบวนการทางพันธุศาสตร์ ระบบสื่อสาร การส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อย ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด

## Abstract

Currently, optical fibers are one of major media for being used in communication systems. Multimode fiber is one type of optical fibers that can be used to carry a high-data-rate signal. However, to be able to do that, first, the frequency response at high frequency region of multimode fibers is very important. In this research, the frequency response of multimode fibers has been studied. It was found that at high frequency region of multimode fiber's frequency response, there are many available passbands that can be used as channels to carry many subcarrier signals. To successfully transmit such subcarrier signals over multimode fibers, the carrier frequencies have to be carefully selected. The well known technique called genetic algorithm has been adopted in order to use in the carrier-frequency selecting process. It was found that applying the suitable subcarrier frequencies found by such technique, the bit-error-rate of transmitting many subcarriers over multimode fibers has been reduced significantly. The results from this research can certainly be applied to the subcarrier multiplexing system over high frequency region of multimode fibers in order to improve the performance of the system in terms of bit rate and bit-error-rate.

Keywords: Multimode Fibers, Frequency Response, Genetic Algorithm, Communications Systems, Subcarrier Multiplexing, Bit-Error-Rate

## บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

งานวิจัยชิ้นนี้ เป็นการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปเป็นแบบจำลองในการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยบนใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ (Genetic Algorithm) และนำผลการคัดสรรความถี่พาห้ที่ได้มาประยุกต์ใช้เพื่อส่งสัญญาณพาห้ย่อยในระบบเพื่อหาประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณ

จากการศึกษาพบว่า ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ณ ย่านความถี่สูงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางการสื่อสารได้ เพราะมีแถบผ่านความถี่มากมาย อย่างไรก็ตามการจะนำแถบผ่านความถี่เหล่านั้นมาใช้ส่งสัญญาณพาห้ย่อยๆ ความถี่พาห้ที่จะใช้ในการส่งสัญญาณพาห้ต้องอยู่ ณ ความถี่ที่เหมาะสม ซึ่งการจะได้มาซึ่งความถี่พาห้ที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ พบว่าการนำเอากระบวนการทางพันธุศาสตร์มาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยในการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม ทำให้ได้ความถี่พาห้ที่สามารถใช้ในการส่งสัญญาณพาห้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นั่นคือความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าที่ต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการคัดสรรความถี่พาห้ ซึ่งผลการวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติ เพื่อช่วยให้การสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสง ณ ย่านความถี่สูง มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยการสนับสนุนทางการเงินจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ 2551 ซึ่งทางผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

นอกจากนี้ทางผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.อิสสระชัย งามหรรุ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นักวิจัยที่ปรึกษาที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะ จนทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จได้

ผู้วิจัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ก
Abstract.....	ข
บทสรุปผู้บริหาร.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญรูป.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 ไยแก้วนำแสง.....	5
2.2 ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด.....	10
2.3 การสื่อสารในระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อย .....	13
2.4 กระบวนการทางพันธุศาสตร์.....	14
<b>บทที่ 3 ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด.....</b>	<b>18</b>
3.1 การกระจายทางสถิติของเวลาหน่วงในใยแก้วนำแสง.....	18
3.2 ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทางความถี่ ณ ย่านความถี่สูง.....	22
3.3 ค่าเฉลี่ยของความกว้างทางความถี่ของแถบผ่านความถี่ ณ ย่านความถี่สูง .....	24

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

<b>บทที่ 4 การคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์.....</b>	<b>29</b>
4.1 กระบวนการทางพันธุศาสตร์สำหรับการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม.....	30
4.2 ผลการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม.....	32
<b>บทที่ 5 การคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์</b>	
<b>แบบขนาน.....</b>	<b>40</b>
5.1 กระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานสำหรับการคัดสรรความถี่พาห้ ที่เหมาะสม.....	41
5.2 ผลการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม จากกระบวนการทางพันธุศาสตร์ แบบขนาน ที่มีการแบ่ง 2 ย่านความถี่ย่อย.....	42
5.3 ผลการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม จากกระบวนการทางพันธุศาสตร์ แบบขนาน ที่มีการแบ่ง 3 ย่านความถี่ย่อย.....	46
5.4 การเปรียบเทียบผลการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม.....	49
<b>บทที่ 6 ประสิทธิภาพของความถี่พาห้ที่คัดสรรโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์</b>	
<b>ในการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยบนใยแก้วนำแสงประเภท</b>	
<b>หลายโหมด.....</b>	<b>56</b>
6.1 ระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภท หลายโหมด.....	57
6.2 ประสิทธิภาพของความถี่พาห้ที่คัดสรร โดยกระบวนการทางพันธุศาสตร์.....	60
<b>บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย.....</b>	<b>67</b>
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>69</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>71</b>

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างส่วนประกอบของใยแก้วนำแสง.....	6
2.2	การหักเหและการสะท้อนของรังสีแสงที่รอยเชื่อมระหว่าง 2 ตัวกลาง .....	6
2.3	การส่งรังสีแสงจากอากาศเข้าไปใน Core ของใยแก้วนำแสง.....	8
2.4	แสดงใยแก้วนำแสงแบบ step-index และ grade-index .....	9
2.5	แสดงตัวอย่างของผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด 3 เส้นที่แต่ละเส้นมีจำนวนโหมดในการส่งเท่ากับ 100 โหมด และค่าเฉลี่ยของ Time Delay เท่ากับ 5 $\mu$ s โดยที่ผลตอบสนองทางความถี่สำหรับ 2 เส้นด้านล่างนั้น ถูกลดขนาดลงมา 20 และ 40 dB ตามลำดับเพื่อให้สามารถพิจารณาในรูปกราฟเดียวกันได้ .....	12
2.6	การอธิบายกระบวนการทางพันธุศาสตร์.....	15
2.7	โครงสร้างขั้นตอนกระบวนการทางพันธุศาสตร์ .....	16
3.1	ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ที่มีการกระจายทางสถิติของการหน่วงทางเวลาแบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution) ของใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมดที่มีจำนวนโหมด 100 โหมด จำนวน 3 เส้นที่มีค่าเฉลี่ยทางเวลาหรือ $t_{d,avg}$ เท่ากับ 5 $\mu$ s และค่าเบี่ยงเบนทางเวลาหรือ $t_{d,dev}$ เท่ากับ 5 ns โดยมีการเลื่อนทางขนาดสำหรับเส้นที่ 2 และ 3 ลงมา 20 dB และ 40 dB ตามลำดับ.....	19
3.2	ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ที่มีการกระจายทางสถิติของการหน่วงทางเวลาแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ของใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมดที่มีจำนวนโหมด 100 โหมด จำนวน 3 เส้น ที่มีค่าเฉลี่ยทางเวลาหรือ $t_{d,avg}$ เท่ากับ 5 $\mu$ s และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือ $\sigma_d$ เท่ากับ 2.89 ns โดยมีการเลื่อนทางขนาดสำหรับเส้นที่ 2 และ 3 ลงมา 20 dB และ 40 dB ตามลำดับ.....	21
3.3	แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีการกระจายทางสถิติแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ที่มีจำนวนโหมด 50 และ 150 โหมด ที่มีค่าเฉลี่ยทางเวลาหรือ $t_{d,avg}$ เท่ากับ 5 $\mu$ s และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือ $\sigma_d$ เท่ากับ 2.89 ns.....	22
3.4	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนโหมดและค่าเฉลี่ยของการลดทอนในใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีการกระจายทางสถิติแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ที่มีค่าเฉลี่ยทางเวลาหรือ $t_{d,avg}$ เท่ากับ 5 $\mu$ s และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือ $\sigma_d$ เท่ากับ 1.5 3 และ 4.5 ns.....	23

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5	แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ที่มีการกระจายทางสถิติแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ที่มีจำนวนโหมด 100 โหมด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลาหรือ $\sigma_d$ เท่ากับ 1.5 และ 3 ns โดยมีการเลื่อนทางขนาดสำหรับเส้นที่ 2 (สำหรับ $\sigma_d$ เท่ากับ 3 ns) ลงมา 15 dB ..... 25
3.6	การเปรียบเทียบระหว่างความกว้างทางความถี่ (3-dB bandwidth) ของแถบผ่านความถี่ (Passband) ของผลตอบสนองทางความถี่ ณ ย่านความถี่สูงของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีการกระจายทางสถิติแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลา, $\sigma_d$ เท่ากับ 1.5 3 และ 4.5 ns..... 26
4.1	แผนภาพแสดงการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์... 30
4.2	ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ที่มีจำนวนโหมด 100 โหมด จำนวน 3 เส้น ที่มีค่าเฉลี่ยทางเวลาหรือ $t_{d,avg}$ เท่ากับ 5 $\mu$ s และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางเวลาหรือ $\sigma_d$ เท่ากับ 2.89 ns..... 33
4.3	ความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 50 รุ่น..... 34
4.4	ความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 100 รุ่น..... 35
4.5	ความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น..... 35
4.6	(รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น..... 37
4.7	(รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น..... 38

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.8	(รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 3 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น.....	38
5.1	แผนภาพแสดงการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนาน.....	42
5.2	(รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่ง 2 ย่านความถี่ย่อย โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น.....	43
5.3	(รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่ง 2 ย่านความถี่ย่อย โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น.....	45
5.4	(รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 3 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่ง 2 ย่านความถี่ย่อย โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น.....	45
5.5	(รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่ง 3 ย่านความถี่ย่อย โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น.....	47

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
5.6	(รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่ง 3 ย่านความถี่ย่อย โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น.....	48
5.7	(รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 3 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่ง 3 ย่านความถี่ย่อย โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น.....	48
5.8	ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น จากการดำเนินการคัดสรรโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบต่างๆ สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1.....	50
5.9	ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น จากการดำเนินการคัดสรรโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบต่างๆ สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2.....	51
5.10	ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น จากการดำเนินการคัดสรรโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบต่างๆ สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 3.....	52
5.11	ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น จากการดำเนินการคัดสรรโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบต่างๆ สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1.....	53
6.1	ระบบสื่อสารที่อาศัยการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยบนใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด.....	57
6.2	แสดงความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ ทั้งก่อน (แสดงด้วยสัญลักษณ์ วงกลม) และหลังการคัดสรร (แสดงด้วยสัญลักษณ์ กากบาท) สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด 3 เส้น.....	60

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
6.3	ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด (BER) สำหรับการสื่อสารผ่านระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห်ย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด เส้นที่ 1.....	61
6.4	ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด (BER) สำหรับการสื่อสารผ่านระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห်ย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด เส้นที่ 2.....	62
6.5	ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด (BER) สำหรับการสื่อสารผ่านระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห်ย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด เส้นที่ 3.....	63
6.6	ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด (BER) ที่ได้จากความถี่พาห်ที่ไม่ผ่านการคัดสรร สำหรับการสื่อสารผ่านระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห်ย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจำนวน 5 เส้น.....	64
6.7	ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด (BER) ที่ได้จากความถี่พาห်ที่ผ่านการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ สำหรับการสื่อสารผ่านระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห်ย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจำนวน 5 เส้น....	65

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การส่งข้อมูลจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งนั้นสามารถแบ่งได้ 2 วิธี นั่นคือ การส่งสัญญาณแบบไร้สาย (Wireless) โดยผ่านอากาศหรืออวกาศ และการส่งผ่านสายส่งสัญญาณ (Wire) ซึ่งในกรณีของการส่งผ่านสายส่งสัญญาณนั้นสามารถแบ่งลักษณะการส่งได้หลายแบบ โดยพิจารณาจากชนิดของสายส่งสัญญาณที่ใช้เป็นตัวกลางในการส่ง ยกตัวอย่างเช่น สาย UTP สาย Coaxial หรือสายใยแก้วนำแสง (Optical Fiber) ในปัจจุบันความต้องการในเรื่องของความเร็วและปริมาณข้อมูลที่ต้องการส่งเป็นปัจจัยสำคัญหลักอันหนึ่งที่ตั้งผลให้การเลือกใช้สื่อกลางในการเชื่อมต่อมีความสำคัญ สายใยแก้วนำแสง (Optical Fibers) เป็นสายส่งสัญญาณที่ส่งสัญญาณโดยอาศัยการแปลงข้อมูลที่ต้องการจะส่งไปอยู่ในรูปของแสง คุณสมบัติเด่นที่สำคัญของสายใยแก้วนำแสงมีหลายประการ ประการที่สำคัญก็คือช่องกว้างทางความถี่ หรือ Bandwidth ในการส่งสัญญาณที่มีความกว้างมาก ทำให้ความต้องการที่ต้องการส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงและปริมาณที่มากสามารถกระทำได้ นอกจากคุณสมบัติดังกล่าว ใยแก้วนำแสงยังมีคุณสมบัติอื่นๆอีก ยกตัวอย่างเช่น การลดทอนของสัญญาณที่มีขนาดเล็กน้อย เมื่อเทียบกับสายส่งสัญญาณประเภทอื่น ทำให้สามารถส่งสัญญาณได้เป็นระยะทางไกลๆ และการที่ไม่ถูกรบกวนโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆ เนื่องจากสัญญาณที่ส่งไปเป็นสัญญาณแสง

จากคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น ทำให้การสื่อสารโดยอาศัยใยแก้วนำแสงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในโลกปัจจุบัน ใยแก้วนำแสงที่ใช้อยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ Single-mode fiber และ Multimode fiber ใยแก้วนำแสงทั้งสองประเภทมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ทั้งในเรื่องของขนาดและช่องกว้างทางความถี่ที่ใช้ในการส่งข้อมูล นั่นคือ Multimode fiber จะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า (เส้นผ่านศูนย์กลางของ Multimode fiber มีขนาดมากกว่า 50 ไมโครเมตร ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของ Single-mode fiber มีขนาด 12.5 ไมโครเมตร) พิจารณาในส่วนช่องกว้างทางความถี่ หรือ Bandwidth ที่ใช้ในการส่งข้อมูลของ Single-mode fiber นั้นจะมี Bandwidth ที่กว้างกว่า Multimode fiber มาก (Bandwidth ของ Single-mode fiber มีค่าอยู่ในช่วง THz (นั่นคือ  $10^{12}$  Hz) ในขณะที่ Bandwidth ของ

Multimode fiber นั้นอยู่ในช่วง 300 – 500 MHz เท่านั้น) ซึ่งส่งผลให้ความเร็วในการส่งข้อมูลผ่าน Single-mode fiber นั้นสามารถทำได้ดีกว่า ยกตัวอย่างเช่นข้อมูลขนาด 2 Gbps นั้นสามารถส่งผ่านโดยอาศัย Single-mode fiber ได้อย่างไม่มีปัญหาเนื่องจาก Bandwidth ของ Single-mode fiber นั้นสามารถรองรับปริมาณข้อมูลขนาดนี้ได้ แต่อย่างไรก็ตาม หากต้องการจะส่งข้อมูลขนาด 2 Gbps ผ่าน Multimode fiber นั้นอาจสามารถกระทำได้แต่ระยะทางที่ใช้ในการส่งจะต้องเป็นระยะทางสั้นๆเท่านั้น (ไม่ถึง 1 กิโลเมตร) ซึ่งไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาผลตอบแทนทางความถี่ (Frequency Response) ของ Multimode fiber จะเห็นได้ว่าอันที่จริงแล้ว Bandwidth ที่สามารถใช้ในการส่งข้อมูลนั้น ไม่ได้มีเพียงแต่ Bandwidth ที่ใช้กันเป็นที่แพร่หลายที่เรียกว่า 3-dB intermodal Bandwidth (ซึ่งมีขนาดความกว้างอยู่ในช่วง 300 – 500 MHz) เท่านั้น หากแต่ยังมี Bandwidth อีกมากมายที่อยู่ ณ ความถี่ที่สูงขึ้น (Bandpass Bandwidth) ที่สามารถใช้ในการส่งข้อมูลได้ ซึ่งจากรายงานการวิจัยหลากหลายชิ้น ได้แสดงให้เห็นการนำช่องความถี่เหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ในการส่งข้อมูล โดยอาศัยเทคนิคต่างๆ ในการส่งเพื่อให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลปริมาณมาก (ในหลัก Gbps) ในระยะทางหลายกิโลเมตร ผ่าน Multimode fiber ได้

ช่องกว้างทางความถี่ ของ Multimode fiber ณ ความถี่ที่สูงขึ้นนั้น มีข้อจำกัดอยู่บางประการ ก็คือ ณ ความถี่ที่สูงขึ้น ผลตอบแทนทางความถี่ของ Multimode fiber มีลักษณะที่เป็น Frequency Selective Channel นั่นคือ ณ บางช่วงของความถี่ก็มีช่องส่งสัญญาณ หรือ Bandwidth ที่มีการลดทอนของสัญญาณไม่มากและสามารถใช้งานในการส่งสัญญาณได้ แต่ ณ บางความถี่ การลดทอน (Attenuation) ของสัญญาณมีค่าสูงมาก และไม่สามารถใช้ในการส่งสัญญาณได้ เนื่องจากหากเลือกเอาความถี่เหล่านั้น หรือส่งสัญญาณในย่านความถี่เหล่านั้น จะทำให้สัญญาณที่ได้รับตรงปลายทางมีความผิดเพี้ยนไปมาก อันเนื่องมาจากการลดทอนของสัญญาณนั่นเอง นอกจากนี้ Multimode fiber แต่ละเส้นจะมีผลตอบแทนทางความถี่ ณ ความถี่สูงแตกต่างกัน ดังนั้น หากต้องการนำเอา Bandwidths ณ ความถี่สูงเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ในการส่ง จำเป็นจะต้องมีการแบ่งข้อมูลที่ต้องการจะส่งออกเป็นข้อมูลย่อยๆ เพื่อที่จะส่งผ่านแต่ละ Bandwidths ณ ความถี่ที่ใช้ในการส่งต่างๆอย่างเหมาะสมต่อไป ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการส่งก็คือการทำ Subcarrier Multiplexing โดยในเทคนิคดังกล่าวจำเป็นต้องอยู่ ณ กึ่งกลางของ Bandwidth ที่กำหนดเพื่อให้การลดทอนของสัญญาณมีขนาดน้อยที่สุด ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นในการส่ง

สัญญาณผ่านช่อง Bandwidths เหล่านี้ก็คือการเลือกความถี่ต่างๆที่จะใช้ในการส่งข้อมูลสำหรับเทคนิค Subcarrier Multiplexing โดยจะต้องทำการเลือกความถี่ต่างๆที่ใช้ในการส่งให้เหมาะสมที่สุด นั่นคือให้อยู่ตรงกึ่งกลางของแต่ละ Bandwidth ที่ต้องการจะส่งข้อมูล

ในโครงการวิจัยชิ้นนี้ จะเป็นพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ของ Multimode Fiber เพื่อที่จะสามารถนำเอาช่องความถี่ที่อยู่ ณ ความถี่สูงมาใช้ประโยชน์ในการส่งข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการนำเอาเทคนิคซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายนั่นคือ Genetic Algorithm มาประยุกต์ใช้ในการเลือกความถี่ที่เหมาะสมในการส่งข้อมูล อย่างไรก็ตาม การเลือกความถี่ต่างๆที่เหมาะสมโดยอาศัยเงื่อนไขว่าความถี่เหล่านั้นจะต้องอยู่ ณ กึ่งกลางแต่ละ Bandwidth อาจจะไม่เพียงพอ เพราะหากมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนของความถี่ที่ส่งเพียงเล็กน้อยอาจทำให้ความถี่ที่ถูกเลือกอาจไม่เหมาะสม นั่นคือมีการลดทอนของสัญญาณมากเกินไป ดังนั้นจะมีการนำเอาเทคนิคที่เรียกว่า Parallel Genetic Algorithm เข้ามาประยุกต์ใช้เช่นกัน ซึ่งการเลือกความถี่ที่เหมาะสมจะมีการนำเอาเงื่อนไขเพิ่มเติมมาพิจารณา เพื่อให้ความถี่ต่างๆที่ถูกเลือกมีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยในการพิจารณาถึงประสิทธิภาพของระบบนั้นจะพิจารณาจากความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด (Bit-Error-Rate, BER) ที่ได้จากระบบ อัตราเร็วของข้อมูลหรือ Bit rate ที่ได้จากระบบ และระยะทางที่สามารถใช้ในการส่งข้อมูล

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อประยุกต์เทคนิค Genetic Algorithm มาใช้ในการเลือกความถี่ต่างๆที่ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านช่องความถี่ ณ ความถี่สูง ของ Multimode fiber
2. เพื่อประยุกต์เทคนิค Parallel Genetic Algorithm มาใช้ในการเลือกความถี่ต่างๆที่ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านช่องความถี่ ณ ความถี่สูง ของ Multimode fiber
3. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของเทคนิคทั้งสอง ในการนำมาประยุกต์ใช้ในการส่งข้อมูลผ่าน Multimode fiber โดยวิธี Subcarrier Multiplexing
4. เพื่อพัฒนาเทคนิคที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูลผ่านใยแก้วนำแสงประเภท Multimode Fiber ให้สามารถส่งข้อมูลที่มีอัตราเร็ว หรือ Bit Rate ที่สูงขึ้น
5. เพื่อก่อให้เกิดความร่วมมือในการทำวิจัยระหว่างนักวิจัยที่ปรึกษากับอาจารย์รุ่นใหม่

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ประยุกต์เทคนิค Genetic Algorithm มาใช้ในการเลือกความถี่ต่างๆที่ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านช่องความถี่ ณ ความถี่สูง ของ Multimode fiber
2. เปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของเทคนิคทั้งสอง ในการนำมาประยุกต์ใช้ในการส่งข้อมูลผ่าน Multimode fiber โดยวิธี Subcarrier Multiplexing
3. พัฒนาเทคนิคที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูลผ่านใยแก้วนำแสงประเภท Multimode Fiber ให้สามารถส่งข้อมูลที่มีอัตราเร็ว หรือ Bit Rate ที่สูงขึ้น

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เกิดความร่วมมือทำวิจัยระหว่างนักวิจัยรุ่นใหม่และนักวิจัยที่ปรึกษา
2. สามารถวิเคราะห์และพัฒนาประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลผ่านสายใยแก้วนำแสงประเภท Multimode Fiber โดยอาศัยเทคนิควิธี Genetic Algorithm
3. บทความวิชาการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ อย่างน้อย 1 ฉบับ
4. บทความลงตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ อย่างน้อย 2 ฉบับ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมในการส่งสัญญาณผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ณ ย่านความถี่สูง โดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ ซึ่งมีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอยู่หลายส่วน ได้แก่ ใยแก้วนำแสง ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด การสื่อสารในระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อย และกระบวนการทางพันธุศาสตร์ ทั้งนี้เนื้อหาทางทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวจะได้อธิบายในบทนี้

#### 2.1 ใยแก้วนำแสง

ใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณประเภทหนึ่งซึ่งมีความสำคัญในการติดต่อสื่อสารในปัจจุบันเป็นอย่างมาก เนื่องจาก มีความกว้างในทางความถี่ในการรองรับข้อมูลมาก (ประมาณมากกว่า 1 THz) มีการลดทอนในการส่งสัญญาณค่อนข้างต่ำ (ต่ำกว่า 0.5 dB/km ณ ความยาวคลื่นในการส่งที่ 1310 nm) ไม่ถูกรบกวนโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆเนื่องจากใช้แสงในการส่งสัญญาณ [1, 2] ใยแก้วนำแสงก็คือท่อนำคลื่นไดอิเล็กทริก (Dielectric waveguide) ที่ใช้งานในย่านความถี่ของแสง ซึ่งหน้าที่ของท่อนำคลื่นก็คือกักพลังงานไม่ให้มีการแพร่กระจายออกไปข้างนอกได้และเพื่อนำคลื่นจากแหล่งกำเนิดไปสู่ยังจุดหมายปลายทาง ซึ่งอาจจะเป็นสายอากาศหรือตัวรับแสง (photo detector)

โครงสร้างของใยแก้วนำแสงประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้ คือ

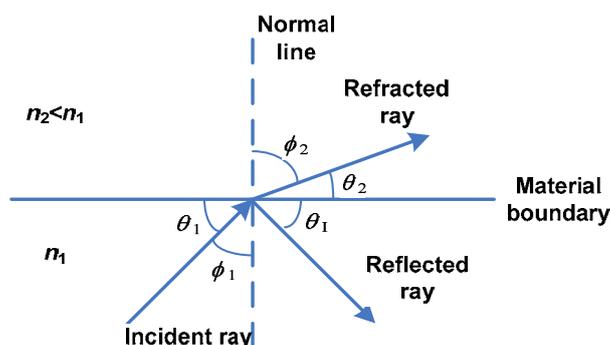
1. Core ทำหน้าที่เป็นช่องทางเพื่อให้คลื่นนำพลังงานจากตัวส่งไปยังตัวรับ โดยส่วนมากแล้วจะทำด้วยแก้วเพราะจะทำให้มีการสูญเสียต่ำ (low loss)
2. Cladding เป็นแก้วเช่นกันทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนกลับหมดเพื่อให้แสงไม่สามารถผ่านออกจาก Core ของใยแก้วได้
3. Buffer coating ส่วนมากทำด้วยพลาสติกหรือวัสดุสังเคราะห์ทั่วไปที่มีความยืดหยุ่นสูง มีหน้าที่เป็นตัวสร้างความแข็งแรง ป้องกันแรงกระแทกให้แก่ใยแก้วนำแสง

โดยลักษณะของส่วนประกอบทั้งสามที่ได้กล่าวมาแล้วแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างส่วนประกอบของใยแก้วนำแสง [1]

คุณสมบัติสำคัญที่ทำให้แสงสามารถเดินทางผ่านใยแก้วนำแสงจากต้นทางไปยังปลายทางได้นั้น เนื่องจากความแตกต่างของดัชนีหักเหของใยแก้วในส่วนที่เป็น Core และ Cladding โดยอาศัยทฤษฎีการหักเหของแสงซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การหักเหและการสะท้อนของรังสีแสงที่รอยเชื่อมระหว่าง 2 ตัวกลาง [1]

จากรูปที่ 2.2 เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกัน แสงส่วนหนึ่งจะสะท้อน (reflect) จากผิวรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสองกลับมายังตัวกลางเดิม ในขณะที่แสงอีกส่วนหนึ่งจะพุ่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สองและเกิดการหักเห (refract) ทำให้ทิศทางหรือแนวการเดินทางเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ลำแสงส่วนแรกที่ถูกกล่าวถึงเรียกว่า ลำแสงสะท้อนหรือรังสีสะท้อน (reflected ray) และรังสีส่วนหลังจะเรียกว่า รังสีหักเห (refracted ray) หากลากเส้นสมมติเชื่อมต่อตัวกลางทั้งสอง โดยให้ทำมุมตั้งฉากกับเส้นหรือระนาบรอยต่อระหว่างตัวกลางและลากผ่านตำแหน่งที่แสงตกกระทบตรงบริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลาง มุมที่เกิดจากเส้นตั้งฉากกระทำกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมตกกระทบ (incident angle) ทำนองเดียวกันมุมที่เกิดจากเส้นตั้งฉากกระทำกับรังสีสะท้อนและรังสีหักเหเรียกว่า มุมสะท้อน (reflected angle) และมุมหักเห (refracted angle) ตามลำดับ จากกฎการสะท้อนของแสง

จะได้ว่า มุมตกกระทบต้องเท่ากับมุมสะท้อน ในขณะที่มุมหักเหมีความสัมพันธ์กับมุมตกกระทบตามกฎของสเนลล์ (Snell's law) ดังสมการ (2.1)

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (2.1)$$

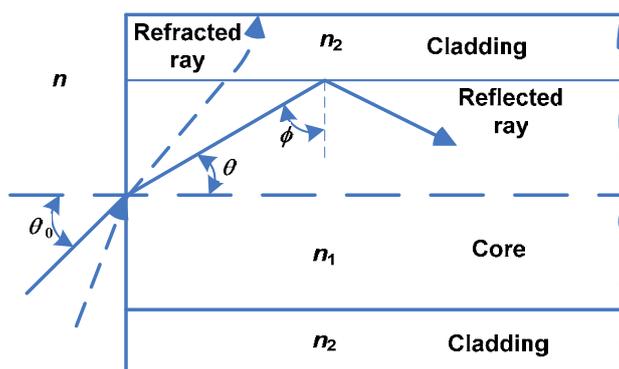
เมื่อ  $n_1$  เป็นค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 และ  $n_2$  เป็นค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 2

จากสมการ (2.1) สามารถแสดงในรูปตรีโกณมิติของโคซายน์ได้โดยยังคงคุณสมบัติตามกฎของสเนลล์ไว้ทุกประการคือ

$$n_1 \cos \theta_1 = n_2 \cos \theta_2 \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  เป็นค่าของมุมตกกระทบและมุมหักเห ที่เกิดจากรังสีตกกระทบและรังสีหักเหกระทำกับแนวรอยต่อระหว่างสองตัวกลางตามลำดับ

ในการเดินทางของแสง จากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหมากกว่าไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่า ทิศทางของรังสีหักเหจะถูกกำหนดโดยค่ามุมตกกระทบ แล้วถ้ามุมตกกระทบมีค่าลดลงเรื่อย ๆ รังสีหักเหจะเบี่ยงเบนออกจากแนวทางเดิมเข้าหาแนวระนาบหรือเส้นรอยต่อระหว่างตัวกลางมากขึ้น เมื่อมุมตกกระทบมีค่าลดลงถึงค่าหนึ่งจนทำให้รังสีหักเหจะเคลื่อนที่ไปในแนวของระนาบรอยต่อระหว่างตัวกลางแล้ว เหตุการณ์เช่นนี้ถือเป็นจุดเริ่มต้นของปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดหรือ TIR (Total Internal Reflection) คือถือว่าไม่มีแสงเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลางเลย โดยที่มุมตกกระทบนั้นนิยามว่าเป็นมุมวิกฤต (critical angle) ดังนั้นถ้าหากค่าของมุมตกกระทบมีค่าน้อยกว่าค่าของมุมวิกฤต แสงจะเกิดการสะท้อนกลับเข้าไปในตัวกลางเดิมแต่เพียงอย่างเดียว โดยจะไม่เกิดการหักเหเลย ดังนั้นระหว่าง Core กับ Cladding จะมีดัชนีการหักเหของแสงไม่เท่ากัน เมื่อแสงถูกป้อนเข้าไปด้วยมุมที่พอเหมาะ แสงจะเกิดการหักเหและเดินทางได้ภายในใยแก้วนำแสง โดยที่ Core จะต้องมียุคดัชนีหักเหมากกว่า Cladding ทำให้เกิดปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดหรือ TIR ทำให้แสงเดินทางในเส้นใยแก้ว ถูกจำกัดให้อยู่เฉพาะในส่วนที่เป็น Core เท่านั้น พลังงานแสงจึงไม่มีการสูญเสียออกไปใน Cladding หรือออกนอกเส้นใยแก้วนำแสง ส่วนการออกแบบลักษณะของดัชนีหักเห (Reflective indices profile) ของ Core และ Cladding ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งาน



รูปที่ 2.3 การส่งรังสีแสงจากอากาศเข้าไปใน Core ของใยแก้วนำแสง [1]

ในรูปที่ 2.3 แสดงการส่งรังสีแสงจากอากาศเข้าไปใน Core ของเส้นใยแก้ว โดยรังสีแสงเข้าสู่ Core ของเส้นใยแก้วจากตัวกลางหนึ่งที่มีค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) ทำมุม  $\theta$  เทียบกับเส้นใยแก้วและเดินทางเข้าไปชนกับรอยเชื่อมต่อ Core และ Cladding ที่ทำมุมกับเส้นปกติเท่ากับ  $\phi$  ถ้ารังสีแสงเคลื่อนที่ไปชนกับรอยเชื่อมต่อทำมุมค่าหนึ่งและรังสีแสงสะท้อนกลับหมด จะทำให้รังสีแสงเคลื่อนที่ตลอดความยาวของเส้นใยแก้วได้ โดยค่ามุมตกกระทบที่มากที่สุด  $\theta_{0,max}$  ที่รองรับการสะท้อนกลับหมดหรือเรียกสั้น ๆ ว่า มุมรองรับการส่งแสง (acceptance angle)

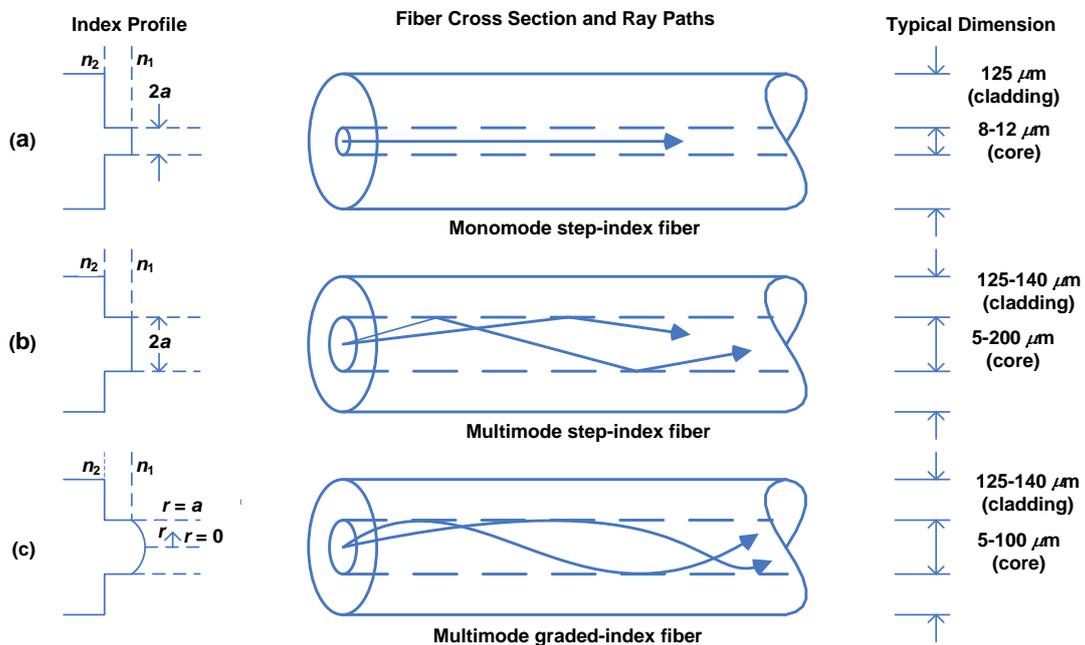
ชนิดของเส้นใยแก้วนำแสง สามารถแบ่งตามจำนวน Propagation Mode ได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. Single-Mode optic fiber (SM fiber) เส้นใยแก้วนำแสงประเภทโหมดเดี่ยวนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Core ประมาณ 5-10 ไมครอน และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ Cladding ประมาณ 125 ไมครอน ซึ่งส่วนของ Core ที่มีขนาดเล็กมากนี้เองมีผลทำให้แสงเดินทางออกมาเพียงโหมดเดียว มีการแตกกระจายของสัญญาณเกิดขึ้นได้ยาก ทำให้มีแบนด์วิดท์ที่กว้าง
2. Multi-Mode optic fiber (MM fiber) เส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนี้มีขนาดของ Core ประมาณ 50 ไมครอน และมีขนาดของ Cladding ประมาณ 125 ไมครอน ซึ่งจะเป็นว่าขนาดของ Core จะมีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดี่ยว มีผลทำให้แสงที่ตกกระทบที่ปลายอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงมีมุมตกกระทบที่แตกต่างกันหลายค่า ทำให้มีแนวลำแสงเกิดขึ้นหลายโหมด ซึ่งทำให้เกิดการแตกกระจายของโหมดแสง

นอกจากการแบ่งชนิดตามจำนวน Propagation Mode แล้ว โยแก้วนำแสงยังสามารถแบ่งตามลักษณะของดัชนีการหักเหได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. Step Index optic fiber (SI-fiber) เป็นเส้นใยแก้วนำแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหระหว่าง Core กับ Cladding เป็นในลักษณะขั้นที่ทันใดหรือขั้นบันได (Step) ดังได้แสดงในรูปที่ 2.4 (a) และ (b)
2. Graded Index optic fiber (GI-fiber) เป็นเส้นใยแก้วนำแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหระหว่าง Core กับ Cladding ค่อยๆ ลดลงทีละน้อยหรือแบบลาด จึงเรียกว่า Graded Index optic fiber ดังได้แสดงในรูปที่ 2.4 (c)

ใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียวนั้นจัดอยู่ในพวกของ SI-fiber เหมือนกันแต่เนื่องจากจุดประสงค์ที่ต้องการให้เป็นใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียว จึงทำให้อัตราส่วนผลต่างของค่าดัชนีการหักเหของ Core และ Cladding มีค่าน้อยมาก จึงแบ่งชนิดแยกออกมาต่างหาก ดังนั้นในกรณีนี้ที่เรียกว่า SI-fiber นั้น โดยทั่วไปจะหมายถึงใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมดที่มีผลต่างของดัชนีการหักเหเปลี่ยนแปลงเป็นขั้นบันได (Step)



รูปที่ 2.4 แสดงใยแก้วนำแสงแบบ step-index และ grade-index [1]

จากรูปที่ 2.4 เป็นการแสดงจำนวนของโหมดที่เคลื่อนที่ในเส้นใยแก้ว โดยที่รูปที่ 2.4 (a) เป็นเส้นใยแก้วชนิด Step-Index แบบโหมดเดียว คือเส้นใยแก้วที่มีคลื่นโหมดเดียวส่งผ่านได้เท่านั้น แสงส่งผ่านจะเดินทางอยู่ที่แกนกลางของ Core ตลอดเวลาตามความยาวเส้นใยแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Core เท่ากับ  $2a$  หรือประมาณ  $8-12\mu\text{m}$  และเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้ว มีค่า  $125\mu\text{m}$  สำหรับรูปที่ 2.4 (b) และรูปที่ 2.4 (c) เป็นเส้นใยแก้วชนิด Step-Index และชนิดเกรดอินเด็กซ์โหมดรวม ตามลำดับ โดยที่เส้นใยแก้วที่สามารถส่งผ่านคลื่นหลายโหมด แสงจะวิ่งอยู่ภายใน Core ในทิศทางต่าง ๆ ตามความยาวของเส้นใยแก้ว โครงสร้างแบบ Step-Index มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Core เท่ากับ  $2a$  หรือประมาณ  $50-200\mu\text{m}$  และแบบ Graded-Index มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Core เท่ากับ  $2a$  หรือประมาณ  $50-100\mu\text{m}$  แต่ทั้งสองแบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Cladding เท่ากับ  $125-400\mu\text{m}$

สำหรับในงานวิจัยนี้ นั้น ใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดถูกนำมาพิจารณา เพื่อใช้ในการส่งสัญญาณที่มีความถี่สูง ซึ่งผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทนี้ จำเป็นที่จะต้องถูกศึกษา ดังนั้น ในหัวข้อถัดไปจะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับ ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

## 2.2 ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

ผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response) สำหรับ Multimode Fiber ณ ความถี่ต่ำนั้นจะมีขนาดลดลงเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น หรืออธิบายอีกนัยหนึ่งก็คือเมื่อเพิ่มความถี่ขึ้น การลดทอน (Attenuation) ของสัญญาณที่ส่งผ่านใยแก้วนำแสงก็จะมากขึ้นตามลำดับนั่นเอง โดยจะมีค่าผลคูณระหว่างความกว้างทางความถี่และระยะทาง หรือ Bandwidth-Distance Product อยู่ที่ประมาณ 300 ถึง 500 MHz-km [1, 2] ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นตัวกำหนดความสามารถในการส่งข้อมูลของ Multimode Fiber ยกตัวอย่างเช่น ถ้าหากต้องการสื่อสารข้อมูลที่ต้องการ Bandwidth 500 MHz ก็จะสามารถส่งข้อมูลดังกล่าวผ่านสาย Multimode Fiber ได้ไม่เกินระยะทาง 1 กิโลเมตร หากส่งข้อมูลด้วยระยะทางที่มากกว่า 1 กิโลเมตร ก็จะทำให้สัญญาณที่ได้ตรงปลายทางมีโอกาสผิดเพี้ยนมากและเกิดข้อผิดพลาดในการติดต่อสื่อสารได้ นอกจากนี้ ในช่วงประมาณก่อนปี ค.ศ. 1995 นั้นวิศวกรหรือนักวิทยาศาสตร์ต่างคิดว่าเมื่อเพิ่มความถี่ออกไปอีก ผลตอบสนองทางความถี่ของ Multimode Fiber ก็คงจะมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ หรือมีการลดทอนของสัญญาณเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ และไม่มีประโยชน์ในการสื่อสารข้อมูลผ่าน Multimode Fiber ณ ความถี่สูงๆนั่นเอง อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองในงานวิจัยหลายๆฉบับ [3 - 7] ได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความถี่ ผลตอบสนองทางความถี่ของ Multimode Fiber มิได้ลดลงตามการเพิ่มของความถี่ หากแต่มีค่าค่อนข้างคงที่ ที่ขนาดประมาณ 6 - 10 dB ต่ำกว่าขนาด

ที่ได้จากการส่งที่ความถี่ต่ำ หรือมีการลดทอนของสัญญาณที่คงที่ ประมาณ 6 – 10 dB โดยจะมีบางความถี่ที่มีการตอบสนองทางความถี่ที่มีค่าต่ำมากสลับกับช่วงความถี่ที่มีลักษณะเป็น Passband ซึ่ง Passband เหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการส่งผ่านข้อมูลได้ ลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่เช่นนี้เรียกในทางเทคนิคว่ามีลักษณะเป็น Frequency Selective Channel นั่นเอง

ที่มาของผลตอบสนองทางความถี่ ณ ความถี่สูงของ Multimode Fiber ได้ถูกอธิบายไว้ว่าเป็นผลมาจากผลรวมของ Time Delay ของการเคลื่อนที่ของโหมดต่างๆใน Multimode Fiber ซึ่งแต่ละโหมดก็จะมีค่า Time Delay ที่แตกต่างกัน [4, 6] และมีการศึกษาวิเคราะห์ในทางทฤษฎี รวมทั้งมีการจำลองผลการศึกษาเพื่อสนับสนุนคำอธิบายดังกล่าวดังแสดงใน [8, 11] ซึ่งผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse Response) ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดสามารถแสดงได้จากผลรวมของอิมพัลส์ฟังก์ชันที่มีการหน่วงเวลาที่แตกต่างกัน ดังนี้

$$h_{fiber}(t) = \sum_{n=1}^N \delta(t - t_{d,n}) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $N$  คือจำนวนของโหมดทั้งหมดของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

$t_{d,n}$  คือ ค่าหน่วงเวลาของแต่ละโหมด

และจากสมการ (2.3) เมื่อทำการแปลงฟูเรียร์จะได้ผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response) ดังนี้

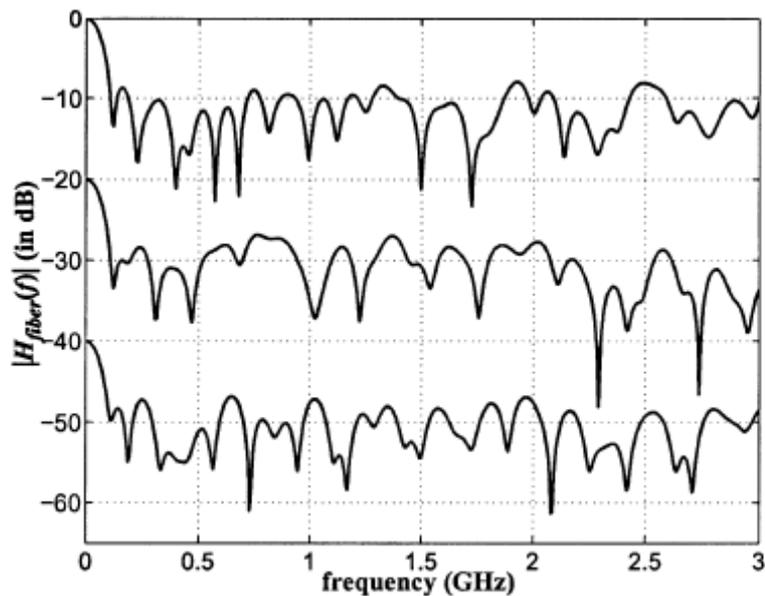
$$H_{fiber}(f) = \sum_{n=1}^N e^{-j2\pi f \cdot t_{d,n}} \quad (2.4)$$

จากสมการ (2.4) จะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงขึ้นอยู่กับค่าหน่วงเวลาของแต่ละโหมด ซึ่งค่าทางเวลาเหล่านี้จะมีค่าที่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากจำนวนโหมดที่อยู่ในใยแก้วนำแสงประเภทหลายโมนั้นมีจำนวนมาก (ในหลักร้อยโหมดขึ้นไป) การจะวิเคราะห์เพื่อหาค่าหน่วงเวลาทุกค่าไม่อาจจะกระทำได้ ดังนั้น ใน [8] จึงได้มีการอาศัยคุณสมบัติทางการวิเคราะห์ทางสถิติมาประยุกต์ใช้ นั่นคือ สมมติให้ค่าหน่วงเวลาเหล่านี้มีการกระจายทางสถิติที่เหมือนกันและเป็นอิสระต่อกัน โดยให้มีการกระจายแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) ที่มีค่าเฉลี่ยทางเวลาหรือ  $t_{d,avg}$  และค่าเบี่ยงเบนทางเวลาที่มากที่สุดหรือ  $t_{d,dev}$  ซึ่งจะได้ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ดังนี้

$$f_{t_{d,n}}(t_{d,n}) = \begin{cases} \frac{1}{2t_{d,dev}}, & \text{for } t_{d,avg} - t_{d,dev} \leq t_{d,n} \\ & \leq t_{d,avg} + t_{d,dev} \\ 0, & \text{elsewhere.} \end{cases} \quad (2.5)$$

เมื่อประยุกต์สมการ (2.4) และ (2.5) โดยให้ค่า  $N = 100$  โหมด  $t_{d,avg} = 5 \mu\text{s}$  และ  $t_{d,dev} = 5 \text{ ns}$  ตัวอย่างของผลตอบสนองทางความถี่ในทางขนาด (Magnitude Response) สำหรับ 3 กลุ่มของค่าหน่วงทางเวลา (หรือในทางปฏิบัติคือใยแก้วนำแสง 3 เส้นที่แตกต่างกัน) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5

ซึ่งจากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่ความถี่สูงประมาณ 0.5 GHz เป็นต้นไป ผลตอบสนองทางความถี่ของ Multimode Fiber ทั้ง 3 เส้นที่ถูกแสดงไว้มีลักษณะเป็น Frequency Selective Channel โดยมี Passband ต่างๆมากมาย หากแต่ลักษณะของ Passband ต่างๆเหล่านี้อยู่ ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกัน และมีบางความถี่ที่มีการลดทอนของสัญญาณที่ค่อนข้างมาก ซึ่งจะส่งผลให้เกิดข้อผิดพลาดในการส่งข้อมูลหากส่งสัญญาณครอบคลุมความถี่เหล่านั้น



รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างของผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด 3 เส้นที่แต่ละเส้นมีจำนวนโหมดในการส่งเท่ากับ 100 โหมด และค่าเฉลี่ยของ Time Delay เท่ากับ  $5 \mu\text{s}$  โดยที่ผลตอบสนองทางความถี่สำหรับ 2 เส้นด้านล่างนั้นถูกลดขนาดลงมา 20 และ 40 dB ตามลำดับเพื่อให้สามารถพิจารณาในรูปภาพเดียวกันได้ [11]

## 2.3 การสื่อสารในระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห่อย่อย (Subcarrier Multiplexing)

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าหากสามารถนำเอา Passband ต่างๆที่ ๓ ความถี่สูง มาใช้ประโยชน์ในการสื่อสารข้อมูลได้ Multimode Fiber ก็จะสามารถส่งข้อมูลที่มีอัตราเร็วสูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม ปัญหาในการนำเอา Passband ต่างๆมาใช้ส่งข้อมูลที่มีอัตราเร็วสูงๆนั้น จำเป็นที่จะต้องแบ่งข้อมูลออกเป็นข้อมูลย่อยๆเพื่อให้ข้อมูลย่อยๆเหล่านั้นมีอัตราเร็วของข้อมูลที่ลดลง เพื่อที่จะสามารถส่งผ่านแต่ละ Passband ได้ ซึ่งแต่ละข้อมูลย่อยก็จะถูกส่งผ่านโดยอาศัยการมอดูเลตแต่ละข้อมูลย่อยไปกับสัญญาณพาห่อย่อยๆ (Subcarrier) ต่างๆ ๓ ความถี่พาห่ (Subcarrier Frequency) ที่แตกต่างกันออกไป เทคนิคที่ใช้ในการส่งนี้เรียกว่า Subcarrier Multiplexing ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการส่งข้อมูลเพื่อใช้ในการแก้ปัญหา Frequency Selective Channel และได้ถูกประยุกต์ใช้ในงานทางด้านการสื่อสารต่างๆ [9, 10]

พิจารณารูปที่ 2.5 สำหรับผลตอบสนองทางความถี่เส้นบน จะเห็นว่า ในการส่งสัญญาณโดยอาศัยย่านความถี่ต่ำ (ประมาณ 0 ถึง 100 MHz) เท่านั้น จะได้อัตราเร็วในการส่งข้อมูลได้ไม่เกิน 100 Mbps แต่ถ้าหากส่งสัญญาณผ่านย่านความถี่สูงได้ โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห่อย่อย ก็จะทำให้สามารถเพิ่มอัตราเร็วในการส่งข้อมูลได้ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าส่งสัญญาณร่วมโดยอาศัยสัญญาณพาห่อย่อย ๓ ความถี่พาห่ 0.3 0.9 1.35 1.6 1.9 2.2 2.5 และ 2.85 GHz ทั้งหมดจำนวน 8 ความถี่ โดยแต่ละความถี่ส่งข้อมูลที่มีอัตราเร็ว 50 Mbps (เนื่องจากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าที่ย่านความถี่สูง ช่วง Passband มีความกว้างประมาณ 100 MHz ดังนั้นในแต่ละความถี่จึงสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วประมาณ 50 Mbpsเท่านั้น) จะทำให้ได้อัตราเร็วในการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นเป็น 400 Mbps โดยที่มีได้เปลี่ยนแปลงตัวกลางในการส่งเลย

อย่างไรก็ตาม สำหรับการนำเอาเทคนิคนี้มาใช้ในการส่งข้อมูลผ่าน Multimode Fiber นั้นจะเกิดข้อผิดพลาดขึ้นได้ถ้าหากว่าความถี่พาห่ของ Subcarrier อันใดอันหนึ่งหรือหลายๆอัน อยู่ ๓ ความถี่ซึ่งผลตอบสนองทางความถี่ของ Multimode Fiber มีค่าที่ต่ำมากๆ (ดังแสดงในรูปที่ 2.5) ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยอาศัยกระบวนการเข้ารหัส ซึ่งใน [11] มีการนำเอาการเข้ารหัสที่เรียกว่า Diversity Coding มาประยุกต์ใช้ โดยในการส่งนั้นจะทำการเข้ารหัสของข้อมูล และเพิ่มจำนวน Subcarrier ที่ใช้ในการส่งข้อมูลอีก 2 Subcarriers โดยทั้งหมดจะมีการส่งข้อมูลผ่าน Multimode Fiber จำนวน 10 ข้อมูลย่อยอาศัย Subcarrier ทั้งหมด 10 ความถี่ และตรงปลายทางจะนำเอาข้อมูลที่ดีที่สุดที่สุดจาก 8 ข้อมูลย่อยเหล่านั้นมาใช้ถอดรหัสเพื่อดึงเอาข้อมูลจริงที่ต้องการจะส่งออกมา ดังนั้นถ้าหากมี 2 ความถี่ที่อยู่ ๓ ความถี่ที่มี

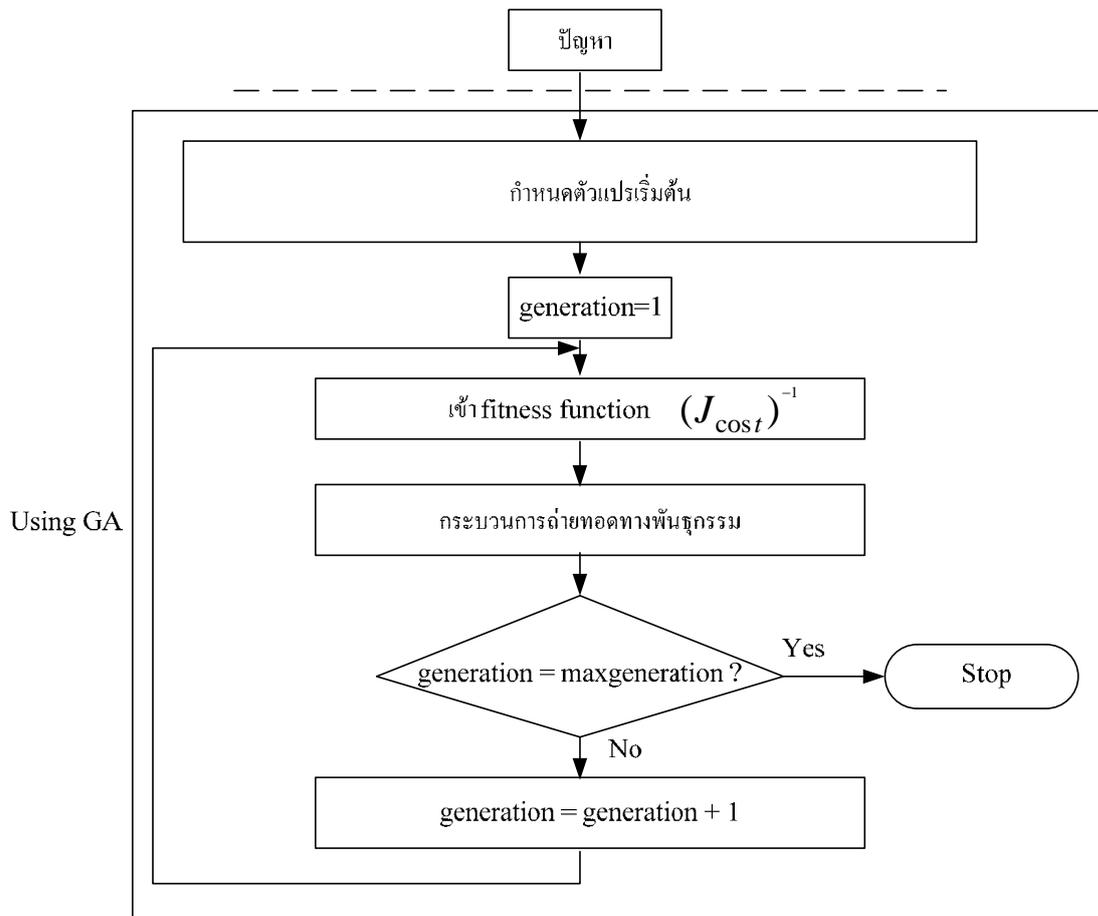
ผลตอบแทนทางความถี่ที่ค่อนข้างต่ำ ผลของ 2 ความถี่นั้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการสื่อสารแต่อย่างใด

ถึงแม้ว่าการเข้ารหัสสามารถช่วยลดปัญหาอันเนื่องมาจากการที่มีความถี่หนึ่งหรือสองความถี่ในการสื่อสารอาศัยเทคนิค Subcarrier Multiplexing อยู่ ณ ความถี่ที่ไม่เหมาะสมในการส่ง แต่ในทางปฏิบัติแล้ว หากมีจำนวนของความถี่ Subcarrier ที่อยู่ ณ ความถี่ที่ไม่เหมาะสมในการส่งมากขึ้น การเข้ารหัสดังกล่าวก็ไม่สามารถที่จะช่วยแก้ปัญหาได้ และทำให้การส่งข้อมูลเกิดความผิดพลาดขึ้น ดังนั้นเพื่อให้การสื่อสารผ่าน Multimode Fiber ณ ความถี่สูง มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น การเลือกความถี่ในการส่ง ก่อนการส่ง น่าจะเป็นวิธีที่ช่วยเสริมให้การส่งมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ เราไม่ทราบเกี่ยวกับผลตอบแทนทางความถี่ของ Multimode Fiber ณ ความถี่สูง การเลือกจึงจำเป็นต้องอาศัยเทคนิควิธีที่เหมาะสมในการเลือกความถี่ ซึ่งในโครงการวิจัยชิ้นนี้จะนำเอาเทคนิควิธีการทวนการทางพันธุศาสตร์ Genetic Algorithm (GA) มาใช้ในการเลือกความถี่ที่เหมาะสมในการส่งข้อมูล ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

## 2.4 กระบวนการทางพันธุศาสตร์ (Genetic Algorithm, GA)

Genetic Algorithm เป็นกระบวนการที่เลียนแบบการวิวัฒนาการทางชีววิทยาโดยใช้กระบวนการทางพันธุศาสตร์ ซึ่งจะมีการคัดเลือกเพื่อให้สามารถดำรงเผ่าพันธุ์อยู่ได้ ซึ่งแน่นอนว่าจำเป็นจะต้องมีการคัดเลือกสิ่งที่เหมาะสม และมีการพัฒนาการเพื่อให้ได้สิ่งที่เหมาะสมยิ่งขึ้น กระบวนการ Genetic Algorithm นี้ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยนักวิทยาศาสตร์สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์คือ John Holland [12] โดยการนำสิ่งที่ศึกษาในด้านพันธุศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการค้นหาและแก้ปัญหาให้ได้จุดหรือคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเทคนิค Genetic Algorithm จะประกอบไปด้วยหลายกระบวนการ เริ่มต้นจากการแปลงคำตอบต่างๆ ที่ต้องการศึกษาในขั้นเริ่มต้นให้มาอยู่ในรูปของโครโมโซม (โดยทั่วไปจะแสดงด้วยบิต 0 และ 1) จากนั้นนำเอาโครโมโซมเหล่านั้นมาหาค่าความเหมาะสมหรือ Fitness Value โดยอาศัย Fitness Function ซึ่งแต่ละโครโมโซมจะมีค่าความเหมาะสมที่แตกต่างกัน จากนั้นจะถึงกระบวนการสำคัญก็คือการดำเนินการทางพันธุกรรม ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการย่อย ก็คือการคัดสรรหรือการถอดแบบจากพ่อแม่ (Selection หรือ Reproduction) การผสมข้ามพันธุ์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อสร้างโครโมโซมรุ่น





รูปที่ 2.7 โครงสร้างขั้นตอนกระบวนการทางพันธุศาสตร์ (Genetic Algorithm)

จากรูปที่ 2.7 ในขั้นตอนที่หนึ่งเมื่อมีปัญหาที่จะใช้วิธี GA ในการแก้ปัญหา จำเป็นจะต้องเชื่อมโยงค่าที่ต้องการหาให้เป็นตัวเลขเสียก่อน โดยประชากรในรุ่นที่ 1 หรือ  $generation = 1$  จะถูกสุ่มขึ้นมาโดยอาศัยการสุ่มแบบปกติ ประชากรที่สุ่มได้แต่ละตัวในรุ่นที่ 1 จะถูกนำมาหาค่าความเหมาะสม (fitness value) โดยผ่าน fitness function นั้นเอง จากนั้นขั้นตอนที่สอง ให้กำหนดค่าของความน่าจะเป็นในการเลือกวิธีการถ่ายทอดพันธุกรรม ซึ่งส่วนใหญ่กำหนดให้ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการผสมข้ามพันธุ (Crossover) เท่ากับ 0.6 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการถอดแบบจากพ่อแม่ (Reproduction) เท่ากับ 0.3 และความน่าจะเป็นที่จะเกิดการกลายพันธุ์ (Mutation) เท่ากับ 0.1 ซึ่งค่าความน่าจะเป็นเหล่านี้ก็จะถูกใช้ในกระบวนการทางพันธุศาสตร์เพื่อให้ได้ประชากรรุ่นต่อไปมีเท่ากับจำนวนประชากรพ่อแม่ จากนั้นตรวจสอบว่าจำนวน  $generation$  เท่ากับจำนวน  $generation$  ที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าไม่ ให้ดำเนินการกระบวนการทางพันธุศาสตร์ต่อไป จนกระทั่งค่าของ  $generation$  เป็นไปตามที่กำหนด

เทคนิควิธี Genetic Algorithm นี้เป็นกระบวนการซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านต่างๆ เพื่อใช้ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ สำหรับการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงนั้นได้มีการนำเอา Genetic Algorithm มาประยุกต์ใช้ในการวิจัยหลายๆด้าน ยกตัวอย่างเช่น ทางด้านการออกแบบเครือข่ายใยแก้วนำแสง [13–17] หรือทางด้านการออกแบบวิเคราะห์อุปกรณ์ต่างๆในระบบใยแก้วนำแสง[18-20] และอื่นๆ นอกจากนี้ ยังมีการนำเอา Genetic Algorithm มาใช้ในการทดลองออกแบบเพื่อเลือกความถี่ที่เหมาะสมในการส่งสัญญาณผ่าน Multimode Fiber ดังแสดงไว้ใน [21] ซึ่งเป็นการนำเอา Genetic Algorithm มาช่วยในการเลือกความถี่ Subcarriers นั้นเอง อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่อยู่ใน [21] นั้นเป็นเพียงการนำเสนอแนวคิดและทดลองวิจัยเบื้องต้น โดยนำเอา Genetic Algorithm มาใช้ในการคัดเลือกความถี่ที่เหมาะสมจำนวน 6 ความถี่เท่านั้น ซึ่งสรุปผลเบื้องต้นได้ว่า Genetic Algorithm น่าจะเป็นเทคนิควิธีหนึ่งซึ่งสามารถช่วยเสริมความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูลผ่าน Multimode Fiber ด้วยการส่งแบบ Subcarrier Multiplexing ได้

สำหรับในโครงการวิจัยนี้ จะนำเอาเทคนิควิธี Genetic Algorithm มาประยุกต์ใช้ในการเลือกความถี่ต่างๆที่ใช้ในการส่งข้อมูล เพื่อให้ได้ความถี่ที่เหมาะสมในการส่ง โดยจะพิจารณาจำนวนของความถี่ที่ต้องการให้มีจำนวนตั้งแต่ 10 ความถี่ขึ้นไป เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์ Multimode Fiber ณ ช่วงความถี่สูงได้อย่างมีประสิทธิภาพในทางปฏิบัติ ซึ่งจะส่งผลให้อัตราเร็วในการส่งที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นได้ โดยจะมีการกำหนดเงื่อนไขที่ต้องการสำหรับการคัดเลือกความถี่ที่เหมาะสม ที่จะเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับทางเลือกมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น นำเอาผลการศึกษาเกี่ยวกับความกว้างของ Passband ณ ช่วงความถี่สูง และเงื่อนไขอื่นๆ เพื่อใช้ในการสร้าง Fitness Function และนำไปใช้ในการดำเนินการต่างๆที่เกี่ยวกับ Genetic Algorithm ซึ่งความถี่ต่างๆที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางการส่งข้อมูลของระบบในประเด็นต่างๆ ได้แก่ ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด หรือ Bit-Error-Rate และอัตราเร็วของข้อมูลหรือ Bit Rate ที่สามารถส่งได้ต่อไป

### บทที่ 3

#### ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

ก่อนที่จะตัดสรรความถี่ที่เหมาะสมในการส่งสัญญาณผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด นั้น เราจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงเสียก่อน ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลตอบสนองดังกล่าว โดยจะเป็นการศึกษาเพิ่มเติมจากสิ่งที่ได้ถูกเสนอไว้ในงานวิจัยก่อนหน้า [8, 11] เริ่มจากการศึกษาผลของการกระจายทางสถิติแบบเกาส์เซียนสำหรับเวลาหน่วงในใยแก้วนำแสง จากนั้นเป็นการศึกษาถึงขนาดโดยเฉลี่ยของช่วง Passbands และความกว้างทางความถี่ (bandwidth) โดยเฉลี่ยของช่วง Passbands ณ ความถี่สูงของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

#### 3.1 การกระจายทางสถิติของเวลาหน่วงในใยแก้วนำแสง

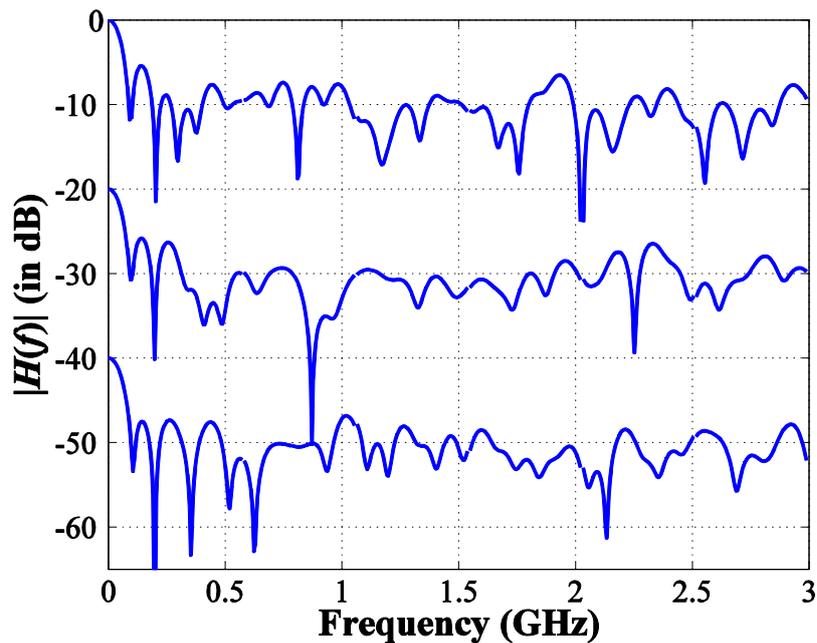
จากบทที่ 2 ผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response) ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด สามารถเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$H_{fiber}(f) = \sum_{n=1}^N e^{-j2\pi f t_{d,n}} \quad (3.1)$$

ซึ่งจากสมการ (3.1) จะเห็นได้ว่าค่าหน่วงทางเวลาในแต่ละโหมดของใยแก้วนำแสงมีความสำคัญ จากงานวิจัยก่อนหน้า [8, 11] ได้สมมติให้ค่าหน่วงทางเวลาที่มีการกระจายทางสถิติแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) ที่มีค่าเฉลี่ยทางเวลาหรือ  $t_{d,avg}$  และค่าเบี่ยงเบนทางเวลาที่มากที่สุดหรือ  $t_{d,dev}$  ซึ่งจะได้ฟังก์ชันความหนาแน่นทางความน่าจะเป็น ดังนี้

$$f_{t_{d,n}}(t_{d,n}) = \begin{cases} \frac{1}{2t_{d,dev}}, & \text{for } t_{d,avg} - t_{d,dev} \leq t_{d,n} \\ & \leq t_{d,avg} + t_{d,dev} \\ 0, & \text{elsewhere.} \end{cases} \quad (3.2)$$

เมื่อประยุกต์สมการ (3.1) และ (3.2) โดยให้ค่า  $N = 100$  โหมด  $t_{d,avg} = 5 \mu\text{s}$  และ  $t_{d,dev} = 5 \text{ ns}$  ขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงในหน่วยเดซิเบล (ซึ่งได้มาจาก  $10\log_{10}[|H_{fiber}(f)|]$ ) สำหรับใยแก้วนำแสง 3 เส้นที่แตกต่างกัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ที่มีการกระจายทางสถิติของการหน่วงเวลาแบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution) ของใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมดที่มีจำนวนโหมด 100 โหมด จำนวน 3 เส้นที่มีค่าเฉลี่ยทางเวลาหรือ  $t_{d,avg}$  เท่ากับ  $5 \mu s$  และค่าเบี่ยงเบนทางเวลาหรือ  $t_{d,dev}$  เท่ากับ  $5 ns$  โดยมีการเลื่อนทางขนาดสำหรับเส้นที่ 2 และ 3 ลงมา 20 dB และ 40 dB ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.1 เป็นผลตอบสนองทางความถี่ที่มีการกระจายทางสถิติของการหน่วงเวลาแบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution) ของใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมดที่มีจำนวนโหมด 100 โหมดจำนวน 3 เส้นด้วยกัน โดยแต่ละเส้นมีความยาว 1 km ดังนั้นจะได้ค่าเฉลี่ยทางเวลาหรือ  $t_{d,avg}$  เท่ากับ  $5 \mu s$  และค่าเบี่ยงเบนทางเวลาหรือ  $t_{d,dev}$  เท่ากับ  $5 ns$  จะเห็นว่าผลตอบสนองทั้ง 3 เส้นมีลักษณะที่เหมือนกันคือ ที่ความถี่ต่ำมีความกว้างของแถบความถี่ประมาณ 100 MHz และมีลักษณะที่ผ่านเฉพาะความถี่ต่ำ และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นมากกว่า 0.2 GHz ลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่จะมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงขึ้นลงโดยจะมีการลดทอนเกิดขึ้น โดยมีค่าลดทอนเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 10 dB และความกว้างทางความถี่ในช่วง Passbands ณ ความถี่สูง มีค่าใกล้เคียง 100 MHz สำหรับลักษณะที่ต่างกันระหว่างผลตอบสนองทั้งสามเส้นคือ ณ ความถี่สูง Passbands ที่เกิดขึ้นในแต่ละเส้นอยู่ที่ความถี่แตกต่างกัน

อย่างไรก็ตาม สมมติฐานที่ถูกใช้ในงานวิจัย [8, 11] อาจจะยังไม่เหมาะสมนัก เพราะสมมติให้การกระจายของการหน่วงเวลาของทุกโหมดในใยแก้วนำแสงมีการกระจายตัวแบบทางสถิติสม่ำเสมอ นั้นในทางปฏิบัติ โหมดในการเดินทางของแสงในใยแก้วนำแสงเริ่มต้นจากต้นทางในเวลาพร้อมกัน แต่ในแต่ละ

ละโหมค มีเส้นทางในการเดินทางที่แตกต่างกัน ซึ่งโหมคส่วนใหญ่จะไปถึงปลายทางในเวลาใกล้เคียงกัน จะมีบางโหมคซึ่งมีระยะทางในการเดินทางที่สั้นกว่าโหมคอื่นๆ โหมคดังกล่าวก็จะไปถึงปลายทางก่อนโหมคอื่น และจะมีบางโหมคซึ่งมีระยะทางในการเดินทางที่ยาวกว่าโหมคอื่นๆ โหมคดังกล่าวก็จะไปถึงปลายทางช้ากว่าโหมคอื่น ดังนั้น หากพิจารณาสิ่งที่ได้กล่าวไปแล้ว การกระจายทางสถิติของการหน่วงทางเวลาของแต่ละโหมคที่เหมาะสมน่าจะเป็นการกระจายแบบปกติ หรือการกระจายแบบเกาส์เซียน นั่นเอง ซึ่งสามารถเขียนความหนาแน่นของความน่าจะเป็นสำหรับการหน่วงทางเวลาได้เป็น

$$f(t_{d,n}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \exp\left[-\frac{(t_{d,n} - t_{d,avg})^2}{2\sigma_d^2}\right] \sim N[t_{d,avg}, \sigma_d^2] \quad (3.3)$$

เมื่อ  $t_{d,avg}$  คือ ค่าเฉลี่ยทางเวลาของการหน่วงทางเวลา

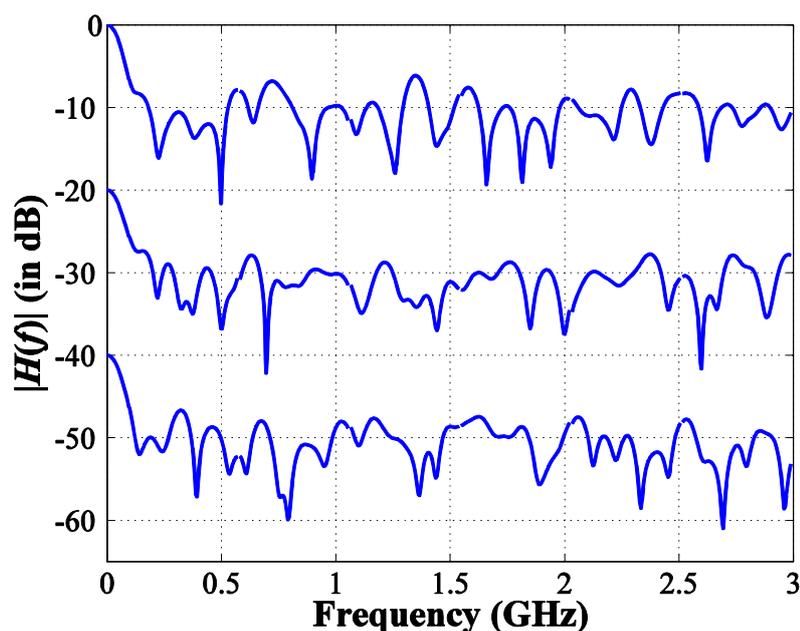
$\sigma_d$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของการหน่วงทางเวลา

จากสมการ (3.3) จะเห็นได้ว่า การกระจายตัวทางสถิติของการหน่วงทางเวลานั้นขึ้นอยู่กับ  $t_{d,avg}$  และ  $\sigma_d$  ซึ่งค่าทั้งสองนั้นสามารถประมาณได้จากความยาวของใยแก้วนำแสงที่ใช้ในระบบ ถ้าหากใยแก้วนำแสงมีความยาวมาก ก็จะทำให้ค่าทั้งสองมีค่ามากขึ้น

พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากสมการ (3.3) และค่าเบี่ยงเบนทางเวลาที่มากที่สุดหรือ  $t_{d,dev}$  จากสมการ (3.2) เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังนี้

$$\sigma_d = \frac{(t_{d,dev})}{\sqrt{3}} \quad (3.4)$$

สมการ (3.4) มีความสำคัญในแง่ของการศึกษาเปรียบเทียบของผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมคที่มีการกระจายทางสถิติของการหน่วงทางเวลาแบบสม่ำเสมอและแบบเกาส์เซียน ซึ่งจากรูปที่ 3.1 มีการศึกษาผลตอบสนองทางขนาดของใยแก้วนำแสงที่มีการกระจายตัวทางสถิติแบบของการหน่วงทางเวลาแบบสม่ำเสมอ โดยอาศัยค่าเฉลี่ยทางเวลาหรือ  $t_{d,avg}$  เท่ากับ  $5 \mu s$  และค่าเบี่ยงเบนทางเวลาหรือ  $t_{d,dev}$  เท่ากับ  $5 ns$  ดังนั้น หากจะศึกษากรณีใช้การกระจายตัวของการหน่วงทางเวลาเป็นแบบเกาส์เซียนก็ต้องใช้ค่าเฉลี่ยทางเวลาหรือ  $t_{d,avg}$  เท่ากับ  $5 \mu s$  และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\sigma_d$  เท่ากับ  $2.89 ns$



รูปที่ 3.2 ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ที่มีการกระจายทางสถิติของการหน่วงเวลาแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ของใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมดที่มีจำนวนโหมด 100 โหมด จำนวน 3 เส้น ที่มีค่าเฉลี่ยทางเวลา หรือ  $t_{d,avg}$  เท่ากับ  $5 \mu\text{s}$  และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือ  $\sigma_d$  เท่ากับ  $2.89 \text{ ns}$  โดยมีการเลื่อนทางขนาดสำหรับเส้นที่ 2 และ 3 ลงมา 20 dB และ 40 dB ตามลำดับ

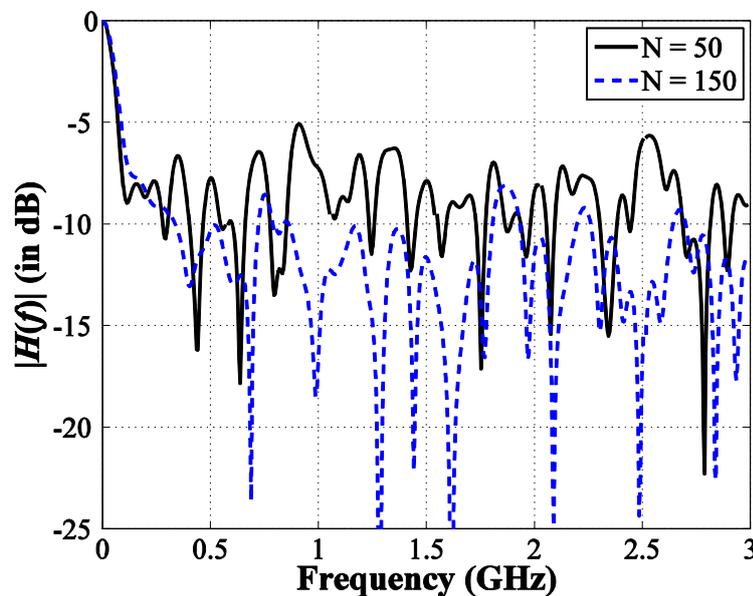
จากรูปที่ 3.2 เป็นผลตอบสนองทางความถี่ที่มีการกระจายทางสถิติของการหน่วงเวลาแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ของใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมดที่มีจำนวนโหมด 100 โหมดจำนวน 3 เส้น ด้วยกัน โดยกำหนดค่าเฉลี่ยทางเวลาหรือ  $t_{d,avg}$  เท่ากับ  $5 \mu\text{s}$  และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือ  $\sigma_d$  เท่ากับ  $2.89 \text{ ns}$  จะเห็นว่าผลตอบสนองทั้ง 3 เส้นมีลักษณะที่เหมือนกันคือ ที่ความถี่ต่ำมีความกว้างของแถบความถี่ประมาณ 100 MHz และมีลักษณะที่ผ่านเฉพาะความถี่ต่ำ และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นมากกว่า 0.2 GHz ลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่จะมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงขึ้นลง โดยจะมีการลดทอนเกิดขึ้น โดยมีค่าลดทอนเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 10 dB และความกว้างทางความถี่ในช่วง Passbands ณ ความถี่สูง มีค่าใกล้เคียง 100 MHz สำหรับลักษณะที่ต่างกันระหว่างผลตอบสนองทั้งสามเส้น คือ ณ ความถี่สูง Passbands ที่เกิดขึ้นในแต่ละเส้นอยู่ที่ความถี่แตกต่างกัน ดังนั้นหากจะนำ Passbands เหล่านี้มาใช้งาน จำเป็นจะต้องเลือกใช้ความถี่ที่เหมาะสม มิเช่นนั้น จะทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณเป็นอย่างมาก

พิจารณารูปที่ 3.1 และ 3.2 จะเห็นได้ว่าลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากการกระจายทางสถิติทั้งสองแบบมีลักษณะใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม การอาศัยการกระจายทางสถิติของการหน่วงเวลาแบบเกาส์เซียนจะมีความเหมาะสมกว่า ดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะเป็น

การศึกษาตัวแปรที่สำคัญที่จำเป็นจะต้องรู้หากต้องการจะใช้ย่านความถี่สูงของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในการส่งสัญญาณ ตัวแปรเหล่านี้คือ ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทางความถี่ หากส่งสัญญาณผ่านย่านความถี่สูง และค่าเฉลี่ยของความกว้างทางความถี่หรือ Bandwidth ของแต่ละ Passband ซึ่งการศึกษาตัวแปรเหล่านี้จะอาศัยการกระจายทางสถิติของการหน่วงทางเวลาแบบเกาส์เซียน

### 3.2 ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทางความถี่ ณ ย่านความถี่สูง

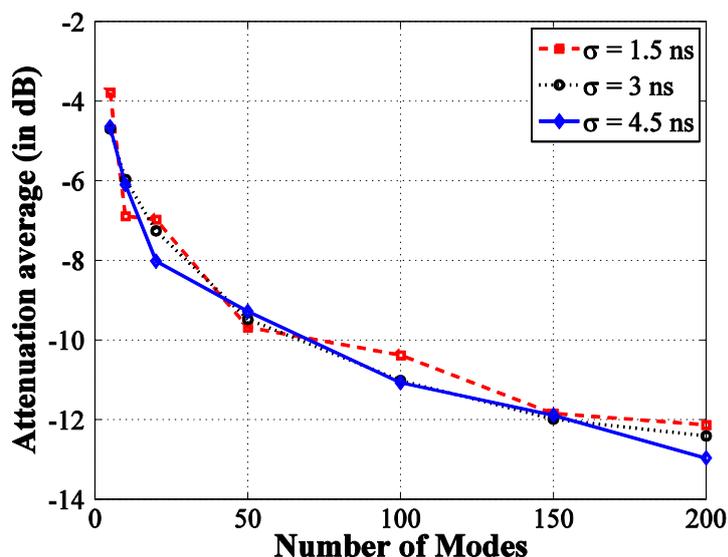
ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทางความถี่ ณ ย่านความถี่สูง เป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญในการส่งสัญญาณผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด เพราะจะทำให้สามารถทราบถึงการขยายสัญญาณ (Signal Amplification) ที่จำเป็นจะต้องเกิดขึ้นในระบบเพื่อชดเชยกับการลดทอนที่เกิดขึ้นระหว่างการส่ง จากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่า ณ ย่านความถี่สูง มีค่าผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำกว่าค่าผลตอบสนองทางความถี่ที่ความถี่ต่ำ (หรือ 0 Hz) อยู่ประมาณ 10 dB ซึ่งค่าดังกล่าวจะสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับใยแก้วนำแสงหรือไม่อย่างไร ในหัวข้อย่อๆนี้ จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทางความถี่ ณ ย่านความถี่สูง ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด โดยอาศัยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Computer Simulation)



รูปที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีการกระจายทางสถิติแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ที่มีจำนวนโหมด 50 และ 150 โหมด ที่มีค่าเฉลี่ยทางเวลาหรือ  $t_{d,avg}$  เท่ากับ  $5 \mu\text{s}$  และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือ  $\sigma_d$  เท่ากับ  $2.89 \text{ ns}$

ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ที่มีจำนวนโหมดที่แตกต่างกัน แสดงในรูปที่ 3.3 โดยจำนวนโหมดที่แสดงในรูปมีค่าเท่ากับ 50 โหมด (แสดงโดยเส้นทึบ) และ 150 โหมด (แสดงโดยเส้นประ) ทั้งสองกรณี ๓ ย่านความถี่ต่ำ มีลักษณะเหมือนกัน นั่นคือ มีลักษณะผ่านความถี่ต่ำ (Baseband) ที่มีความกว้างทางความถี่ประมาณ 100 MHz และที่ย่านความถี่สูง ผลตอบสนองทางความถี่ทั้งสองมีลักษณะค่อนข้างคงที่และมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง โดยมีการผ่านความถี่ Passband ๓ ความถี่ที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม สิ่งที่สังเกตเห็นได้ชัดเจนในแง่ความแตกต่างระหว่างผลตอบสนองทางความถี่ทั้งสองคือ ๓ ย่านความถี่สูง ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทางความถี่มีค่าที่แตกต่างกัน นั่นคือ สำหรับใยแก้วนำแสงที่มีจำนวนโหมด 50 โหมดจะมีค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทางความถี่ประมาณ -8 dB และสำหรับใยแก้วนำแสงที่มีจำนวนโหมด 150 โหมดจะมีค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทางความถี่ประมาณ -12 dB

จากการพิจารณาข้างต้น สามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่า ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ๓ ย่านความถี่สูง เปลี่ยนแปลงตามจำนวนโหมดของใยแก้วนำแสง นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทางความถี่มีค่าแปรผกผันกับจำนวนโหมด อย่างไรก็ตาม สิ่งที่จะศึกษาต่อไปก็คือ มีค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทางความถี่ขึ้นอยู่กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลาหรือไม่ การศึกษาดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนโหมดและค่าเฉลี่ยของการลดทอนในใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีการกระจายทางสถิติแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ที่มีค่าเฉลี่ยทางเวลาหรือ  $t_{d,avg}$  เท่ากับ  $5 \mu s$  และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือ  $\sigma_d$  เท่ากับ 1.5 3 และ 4.5 ns

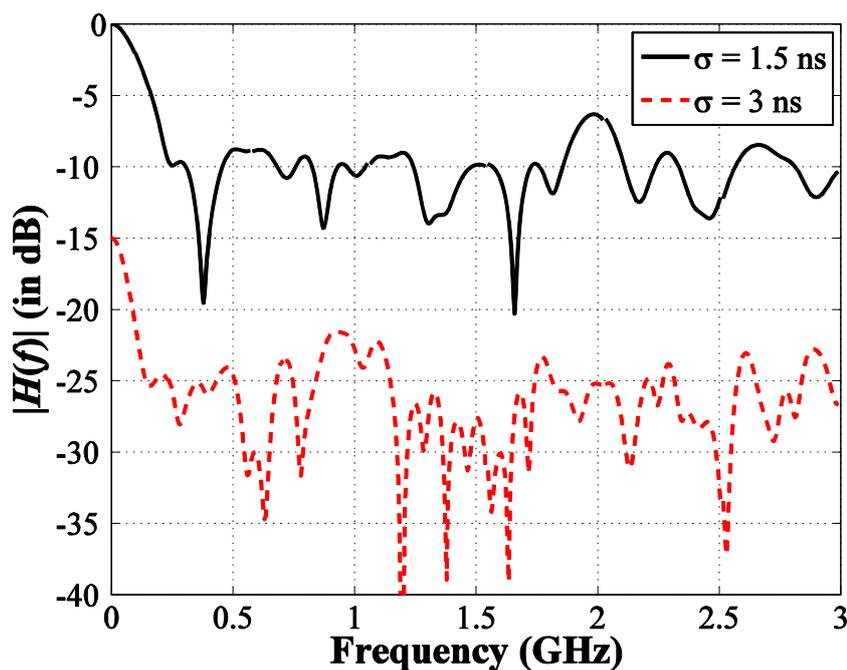
จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนโหนดในใยแก้วนำแสงเพิ่มมากขึ้นค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหนด หรือค่าเฉลี่ยของการลดทอนในการส่งสัญญาณ ผ่านย่านความถี่สูง จะมีความต่ำลง ยกตัวอย่างเช่น ที่จำนวนโหนดเท่ากับ 50 100 150 และ 200 โหนด ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทางความถี่จะมีค่าเท่ากับ -9.5 -10.5 -11.8 และ -12.5 dB ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลา จะเห็นได้ว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลาไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสง

จากผลการศึกษาในหัวข้อย่อยนี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการส่งสัญญาณผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหนดได้ นั่นคือ ถ้าหากเราทราบจำนวนโหนดของใยแก้วนำแสง(ซึ่งโดยทั่วไปสามารถคำนวณได้) อัตราขยายสัญญาณที่จะต้องถูกใช้ในระบบสื่อสารก็สามารถระบุได้ ซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณตรงปลายทางมีขนาดที่เหมาะสม ส่งผลให้การตีความข้อมูลมีความถูกต้องมากขึ้น

### 3.3 ค่าเฉลี่ยของความกว้างทางความถี่ของแถบผ่านความถี่ ณ ย่านความถี่สูง (Average Passband Bandwidth)

ในหัวข้อย่อยนี้ จะเป็นการศึกษาผลของจำนวนโหนดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลาที่มีผลต่อความกว้างทางความถี่ของแถบผ่านความถี่ ณ ย่านความถี่สูง ค่าความกว้างทางความถี่ หรือ Bandwidth นี้จะทำให้การส่งสัญญาณผ่านใยแก้วนำแสง ณ ย่านความถี่สูง แบบการส่งแบบสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห်ย่อย (Subcarrier Multiplexing) มีประสิทธิภาพมากขึ้น นั่นคือ ทำให้สามารถประมาณอัตราเร็วในการส่งข้อมูลผ่านแต่ละสัญญาณร่วมได้ ซึ่งในท้ายที่สุด ก็จะสามารถประมาณอัตราเร็วของการส่งข้อมูลโดยรวมได้

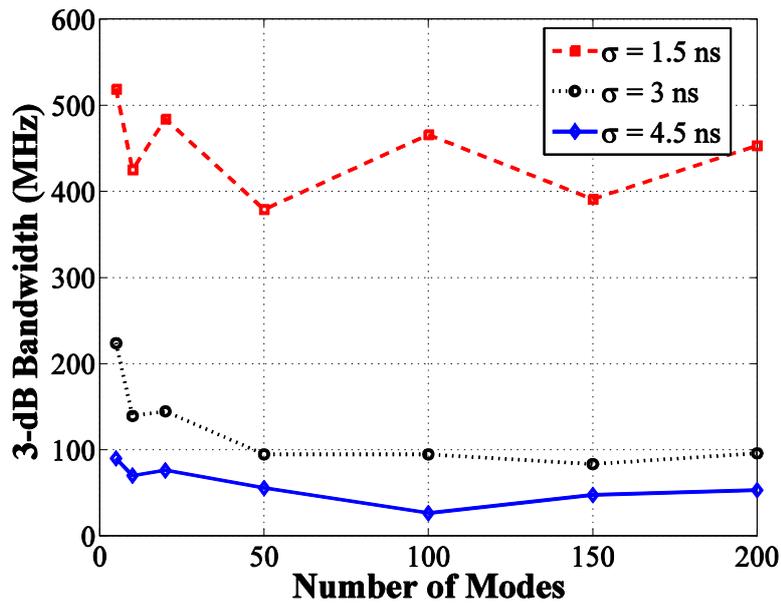
พิจารณาค่าเฉลี่ยของการลดทอนของสัญญาณ ณ ย่านความถี่จากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า ทั้งสองกรณี (นั่นคือ  $\sigma_d$  เท่ากับ 1.5 และ 3 ns) ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งสำหรับในประเด็นนี้ได้สรุปไปแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลาไม่มีผลต่อการลดทอนของสัญญาณในการส่งสัญญาณผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหนด และเมื่อพิจารณาความกว้างทางความถี่ของ Passband ต่างๆ ในรูปที่ 3.5 จะสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าค่าความกว้างทางความถี่จากกรณีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลาเท่ากับ 1.5 ns มีความกว้างทางความถี่มากกว่ากรณีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลาเท่ากับ 3 ns ซึ่งจากประเด็นนี้ จะเห็นได้ว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลาไม่มีผลต่อค่าความกว้างทางความถี่ของแถบผ่านความถี่ ณ ย่านความถี่สูง



รูปที่ 3.5 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ที่มีการกระจายทางสถิติแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ที่มีจำนวนโหมด 100 โหมด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงเวลาหรือ  $\sigma_d$  เท่ากับ 1.5 และ 3 ns โดยมี การเลื่อนทางขนาดสำหรับเส้นที่ 2 (สำหรับ  $\sigma_d$  เท่ากับ 3 ns) ลงมา 15 dB

จากผลของการพิจารณาข้างต้น ทำให้ต้องมีการศึกษาผลของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงเวลามีผลต่อค่าความกว้างทางความถี่ของแถบผ่านความถี่ ณ ย่านความถี่สูง เพิ่มเติม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.6 โดยในรูปที่ 3.6 จะเป็นการแสดงผลของทั้งจำนวนโหมดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงเวลาที่ มีผลต่อค่าเฉลี่ยของความกว้างทางความถี่ของแถบผ่านย่านความถี่ ณ ย่านความถี่สูง โดยการคำนวณค่าเฉลี่ย ของความกว้างทางความถี่ จะคำนวณจากค่าเฉลี่ยของความกว้างทางความถี่ 3 dB (หรือ 3-dB bandwidth) จาก Passband ทั้งหมดในย่านความถี่ตั้งแต่ 0.5 ถึง 3 GHz

จากรูปที่ 3.6 พิจารณาค่าความกว้างทางความถี่ 3 dB หรือ 3-dB Bandwidth เมื่อเทียบกับจำนวน โหมดของใยแก้วนำแสง จะได้ว่า สำหรับกรณีที่มีจำนวนโหมดของใยแก้วนำแสงมีค่าน้อยๆ ยกตัวอย่างเช่น ที่ จำนวนโหมดระหว่าง 5 ถึง 50 โหมด ค่าความกว้างทางความถี่มีลักษณะแปรผกผันกับจำนวนโหมดของใย แก้วนำแสง และสำหรับกรณีที่มีจำนวนโหมดของใยแก้วนำแสงมีค่ามากกว่า 50 โหมด ค่าความกว้างทาง ความถี่นั้นมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อมีการเปลี่ยนค่าจำนวนโหมดของใยแก้วนำแสง อย่างไรก็ตาม ใยแก้วนำแสง ประเภทหลายโหมดที่ใช้ในทางปฏิบัติ นั้น จะมีจำนวนโหมดมากกว่าหนึ่งร้อยโหมด ดังนั้น ประเด็นที่สรุป



รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบระหว่างความกว้างทางความถี่ (3-dB bandwidth) ของแถบผ่านความถี่ (Passband) ของผลตอบสองทางความถี่ ณ ย่านความถี่สูงของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีการกระจายทางสถิติแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลาหรือ  $\sigma_d$  เท่ากับ 1.5 3 และ 4.5 ns

ได้จากรูปที่ 3.6 เราควรจะพิจารณาเฉพาะกรณีที่จำนวนโหมดมีค่ามากกว่าหนึ่งร้อยโหมด ซึ่งสรุปได้ว่าจำนวนโหมดของใยแก้วนำแสงไม่มีผลต่อความกว้างทางความถี่ของแถบความถี่ ณ ย่านความถี่สูง

หมายเหตุ การแกว่งของกราฟทั้งสามเส้นในรูปที่ 3.6 เมื่อจำนวนโหมดมากกว่า 50 โหมด น่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากช่วงความถี่ที่ใช้ในการศึกษาในรูปนี้ใช้ช่วงความถี่ระหว่าง 0.5 ถึง 3 GHz ซึ่งถ้าหากมีการขยายย่านความถี่ที่ศึกษาให้กว้างขึ้น ก็น่าที่จะทำให้ได้ค่าที่คงที่มากขึ้น

และเมื่อพิจารณาผลของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลาที่มีต่อความกว้างทางความถี่จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลามีค่ามากขึ้น ค่าของความกว้างทางความถี่จะมีค่าลดลง ยกตัวอย่างเช่น ที่จำนวนโหมดเท่ากับ 100 โหมด ค่าความกว้างทางความถี่ที่ได้จากกรณี  $\sigma_d$  เท่ากับ 1.5 3 และ 4.5 ns มีค่าเท่ากับ 470 100 และ 30 MHz ตามลำดับ ดังนั้นในประเด็นนี้ สามารถสรุปได้ว่าความกว้างทางความถี่ของแถบความถี่ ณ ย่านความถี่สูง แปรผกผันกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลาของโหมดในใยแก้วนำแสง

ในส่วนของการศึกษาความกว้างทางความถี่ของแถบผ่านความถี่ ณ ย่านความถี่สูงของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด จะได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความกว้างทางความถี่ ก็คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลา ซึ่งในทางปฏิบัติ เราสามารถประมาณค่าดังกล่าวได้ โดยคำนวณจากระยะทางหรือความยาวของใยแก้วนำแสงที่ใช้ ถ้าใยแก้วนำแสงที่ใช้มีความยาวน้อย การเบี่ยงเบนของเวลาที่แต่ละโหมดจะไปถึงปลายทางก็จะมีค่าน้อย ส่งผลให้ความกว้างทางความถี่ของแถบผ่านความถี่มีค่าสูง แต่ถ้าใยแก้วนำแสงที่ใช้มีความยาวมากขึ้น การเบี่ยงเบนของเวลาที่แต่ละโหมดจะไปถึงปลายทางก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความกว้างทางความถี่ของแถบผ่านความถี่มีค่าต่ำลง ค่าความกว้างทางความถี่ของแถบผ่านความถี่ ณ ย่านความถี่สูงนี้จะเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการออกแบบการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห่อย่อยผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดได้อย่างเหมาะสม

สำหรับในบทนี้ ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดได้ถูกนำมาพิจารณา โดยมีการนำเอาการกระจายทางสถิติแบบเกาส์เซียนมาประยุกต์ใช้กับการหน่วงทางเวลาของโหมดต่างๆในใยแก้วนำแสง ซึ่งจากผลการศึกษาผลตอบสนองทางความถี่ดังกล่าว ทำให้สามารถสรุปถึงองค์ประกอบสำคัญ 2 ตัวที่เกี่ยวข้องกับการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห่อย่อยผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมคนั้นคือ

- ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทางความถี่ (หรือค่าการลดทอนของสัญญาณ) ณ ย่านความถี่สูง ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดขึ้นอยู่กับจำนวนโหมดของใยแก้วนำแสง
- ค่าความกว้างทางความถี่ของแถบผ่านความถี่ ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจะขึ้นอยู่กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลาของโหมดในใยแก้วนำแสง

โดยที่ในทางปฏิบัติ จำนวนโหมดของใยแก้วนำแสงและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลาในใยแก้วนำแสงนั้นสามารถคำนวณได้ ดังนั้น ในการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห่อย่อยผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด เราสามารถระบุถึงอัตราขยายของสัญญาณที่จำเป็นเพื่อใช้ชดเชยการลดทอนของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการส่งสัญญาณผ่านใยแก้วนำแสงได้ รวมทั้งยังสามารถประมาณอัตราเร็วของข้อมูลในการส่งสัญญาณผ่านแต่ละแถบผ่านความถี่ของใยแก้วนำแสงได้

อย่างไรก็ตาม ในการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห่อย่อยผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมคนั้น ยังมีอุปสรรคอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญ นั่นคือการเลือกความถี่ที่เหมาะสมในการส่งสัญญาณพาห่อย่อยต่างๆ เพราะถ้าหากความถี่พาห่อย่อย ณ ความถี่ที่ไม่เหมาะสม (นั่นคือ ณ ความถี่ซึ่งมีการลดทอน

ค่อนข้างมาก) สัญญาณพาดังกล่าวก็จะถูกลดทอนไปมากและทำให้ถูกต้องตรงปลายทางผิดพลาด ซึ่งส่งผลให้ข้อมูลโดยรวมผิดพลาดด้วยเช่นกัน การแก้ไขปัญหานี้จะถูกอธิบายในบทถัดไปซึ่งจะเป็นการศึกษาการคัดสรรความถี่พาดที่เหมาะสมในการส่งสัญญาณ โดยกระบวนการทางพันธุศาสตร์

## บทที่ 4

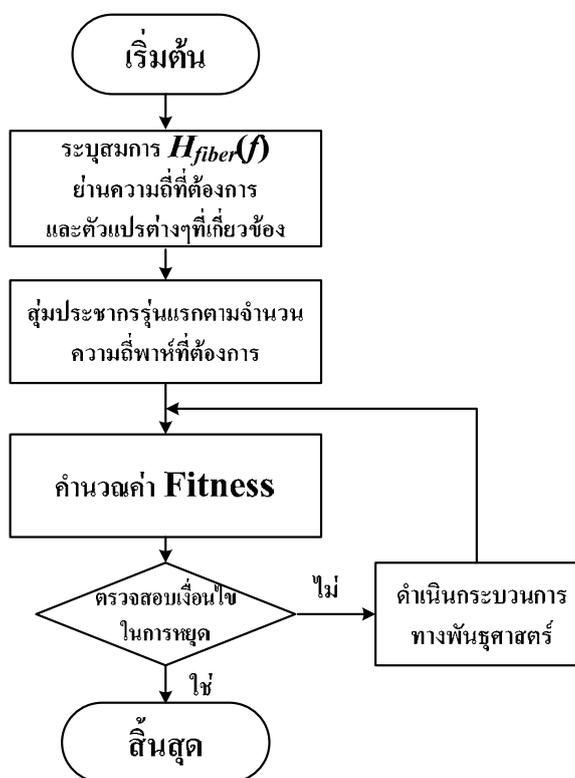
### การคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทก่อนหน้านี้ ประเด็นสำคัญอันหนึ่งในการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมคนั้น คือการเลือกความถี่พาห้ที่เหมาะสมในการส่งสัญญาณพาห้ ยกตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 3.1 กราฟผลตอบแทนของทางความถี่เส้นแรก (เส้นบนสุด) หากหนึ่งในความถี่พาห้ถูกเลือกที่ความถี่ 0.8 GHz จะทำให้สัญญาณพาห้ดังกล่าวถูกลดทอนเป็นอย่างมาก (ประมาณ -19 dB) และท้ายที่สุดสัญญาณพาห้จะถูกตีความตรงปลายทางผิดพลาด ซึ่งส่งผลให้สัญญาณร่วมทั้งหมดถูกตีความผิดพลาด จากตัวอย่างข้างต้น จะเห็นได้ว่าความถี่พาห้ที่ใช้ในการส่งสัญญาณมีความสำคัญเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ การส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมคนั้น เราไม่สามารถทราบผลตอบแทนของทางความถี่ของใยแก้วนำแสง เนื่องจาก หากต้องการทราบผลตอบแทนของทางความถี่ เราต้องทราบค่าหน่วยทางเวลาของโหมคนำแสงในใยแก้วนำแสงทุกโหมค ซึ่งเป็นเรื่องที่แทบจะเป็นไปไม่ได้เพราะการคำนวณเพื่อหาค่าหน่วยเวลาดังกล่าวจำเป็นต้องพิจารณาจากดัชนีหักเหของแสงสำหรับโหมคในใยแก้วนำแสงทุกโหมคและโหมคในใยแก้วนำแสงจะมีเป็นจำนวนหลักร้อยโหมคทำให้ใช้เวลามากในการพิจารณาและคำนวณ นอกจากเหตุผลดังกล่าวแล้ว การเปลี่ยนใยแก้วนำแสงจากเส้นหนึ่งไปยังอีกเส้นหนึ่ง องค์ประกอบทางด้านจำนวนโหมคอาจเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลให้องค์ประกอบการหน่วยทางเวลาของแต่ละโหมคในใยแก้วนำแสงจะเปลี่ยนแปลงไป และหากมีการขยับหรืองอตัวใยแก้วนำแสง(อาจจะเป็นจากการติดตั้งหรือการปรับเปลี่ยนในระบบ) ก็ส่งผลถึงการหน่วยทางเวลาเช่นเดียวกัน ปัจจัยต่างๆเหล่านี้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเลือกความถี่พาห้ที่เหมาะสมเป็นไปได้ยาก

สำหรับการแก้ไขปัญหาการคัดเลือกความถี่พาห้ในการส่งสัญญาณนั้น ในงานวิจัยในบทนี้นั้น จะการนำเอาเทคนิควิธีทางพันธุศาสตร์ (Genetic Algorithm) มาประยุกต์ใช้ในการหาความถี่พาห้ที่เหมาะสม โดยมีสมมติฐานในการนำเอาเทคนิคดังกล่าวมาใช้ว่าผลตอบแทนของทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมคที่นำมาศึกษาจะคงที่ (Static) ในระหว่างการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม สมมติฐานดังกล่าวถือว่าเหมาะสม เพราะในทางปฏิบัติหากมีการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม ใยแก้วนำแสงควรที่จะถูกติดตั้งในระบบเป็นที่เรียบร้อย การเปลี่ยนแปลงผลตอบแทนของทางความถี่ของใยแก้วนำแสงอันเนื่องมาจากการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนแปลงในทางกายภาพของใยแก้วนำแสงไม่น่าจะเกิดขึ้นอีก

เนื้อหาในบทนี้จะประกอบไปด้วย การดำเนินกระบวนการทางพันธุศาสตร์เพื่อคัดสรรความถี่ที่เหมาะสม รวมถึงองค์ประกอบที่สำคัญในการดำเนินกระบวนการทางพันธุศาสตร์ จากนั้นจะเป็นการแสดงผลการคัดสรรความถี่ที่เหมาะสม โดยจะแสดงความถี่พหุที่คัดสรรได้และเปรียบเทียบกับความถี่พหุก่อนการดำเนินกระบวนการทางพันธุศาสตร์ และค่าเฉลี่ยของความถี่พหุที่คัดสรรได้ในแต่ละครั้งของการดำเนินการกระบวนการทางพันธุศาสตร์เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพในการคัดสรร

#### 4.1 กระบวนการทางพันธุศาสตร์สำหรับการคัดสรรความถี่ที่เหมาะสม



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงการคัดสรรความถี่ที่เหมาะสมด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์

แผนภาพแสดงการคัดสรรความถี่ที่เหมาะสมด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ แสดงดังรูปที่ 4.1 จากแผนภาพ จะเริ่มต้นจากการกำหนดสมการผลตอบแทนของทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ย่านความถี่ที่ต้องการในการคัดสรร ตัวแปรอื่นๆที่จำเป็นจะประกอบไปด้วย

1. จำนวนความถี่พหุที่ต้องการคัดสรร

2. ความน่าจะเป็นในการดำเนินกระบวนการทางพันธุศาสตร์ ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ ความน่าจะเป็นในการถอดแบบจากพ่อแม่เท่ากับ 0.6 ความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์เท่ากับ 0.3 และความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์เท่ากับ 0.1
3. ระยะห่างทางความถี่ของความถี่พาห้ที่อยู่ติดกัน โดยตัวแปรนี้จะทำให้ความถี่พาห้ต่างๆ ไม่อยู่ใกล้กันจนเกินไป จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 ทำให้ทราบว่าความกว้างทางความถี่ของแถบผ่านความถี่ ณ ย่านความถี่สูง จะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลาของโหมดต่างๆ ในใยแก้วนำแสง ซึ่งในบทนี้ เราใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลาเท่ากับ 2.89 ns ในการกำหนดผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสง ซึ่งจะทำได้ค่าความกว้างทางความถี่ของแถบความถี่ประมาณ 100 MHz

ดังนั้น ระยะห่างทางความถี่ของความถี่พาห้ที่อยู่ติดกัน ถูกกำหนดให้ห่างกันอย่างน้อย 100 MHz

หลังจากกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่จะใช้ในกระบวนการคัดสรรความถี่ได้แล้ว ก็จะมาถึงการกำหนดหรือสร้างประชากรรุ่นแรกเพื่อใช้ในการคัดสรร โดยประชากรรุ่นแรกจะขึ้นอยู่กับจำนวนความถี่พาห้ที่ต้องการคัดสรร จากนั้นก็จะทำการคำนวณค่าความเหมาะสม หรือ Fitness value ของประชากรแต่ละตัว (หรือความถี่พาห้แต่ละความถี่) ซึ่งมีสมการคือ

$$Fitness(f_{sub}) = \frac{1}{|10 \log_{10} |H_{fiber}(f_{sub})|_{normalized}| + p} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $f_{sub}$  คือความถี่พาห้ หรือ Subcarrier frequency ที่พิจารณา

$p = 0.01$  เป็นค่าที่เพิ่มเข้าไปเพื่อป้องกันข้อผิดพลาด หากเกิดการหารด้วยศูนย์

$|H_{fiber}(f_{sub})|_{normalized}$  คือ ขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสง ณ ความถี่พาห้ที่พิจารณา เมื่อเปรียบเทียบกับค่าขนาดที่สูงสุดในผลตอบสนองทางความถี่ทั้งหมด ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$|H_{fiber}(f_i)|_{normalized} = \frac{|H_{fiber}(f_i)|}{\max\{|H_{fiber}(f)|\}} \quad (4.2)$$

หมายเหตุ สำหรับในใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ค่า  $\max\{|H_{fiber}(f)|\}$  จะเกิดขึ้นที่ความถี่ศูนย์ ดังนั้นสมการ (4.2) อาจเขียนใหม่ได้เป็น

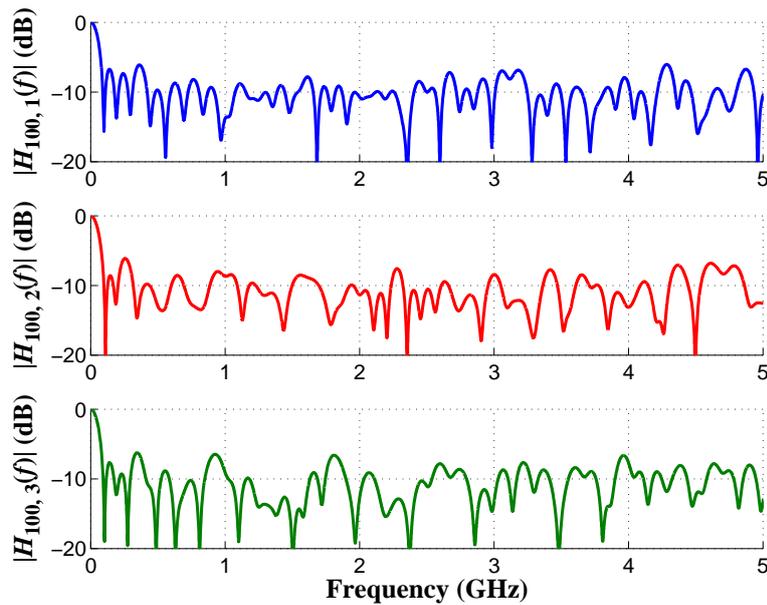
$$|H_{fiber}(f_i)|_{normalized} = \frac{|H_{fiber}(f_i)|}{\max\{|H_{fiber}(f=0)|\}} \quad (4.3)$$

จากสมการ (4.1) จะเห็นได้ว่าถ้าหากความถี่พาห้ อยู่ ณ ความถี่ซึ่งมีค่าขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่สูง (หรือการลดทอนน้อยนั่นเอง) ค่า Fitness ที่ได้ก็จะมีค่าสูง และถ้าหากความถี่พาห้ อยู่ ณ ความถี่ซึ่งมีค่าขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำ (หรือมีการลดทอนมาก) ค่า Fitness ที่ได้ก็จะมีค่าต่ำ ซึ่งค่า Fitness เหล่านี้ก็จะเป็นตัวแปรในการเข้าไปกำหนดความน่าจะเป็นของความถี่พาห้แต่ละตัวที่เกี่ยวข้องกับการคัดสรรความถี่พาห้ด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์

หลังจากคำนวณค่า Fitness ของความถี่พาห้ทุกตัวจากประชากรรุ่นปัจจุบันเรียบร้อยแล้ว ก็จะเป็นขั้นตอนในการตรวจสอบเงื่อนไขในการหยุดกระบวนการทั้งหมด โดยเงื่อนไข จะพิจารณาจากจำนวนรุ่นของประชากรว่ามีค่ามากกว่าจำนวนรุ่นที่ถูกกำหนดไว้หรือไม่ ถ้าหากว่าจำนวนรุ่นปัจจุบันมีค่าไม่มากกว่าจำนวนรุ่นที่กำหนดไว้ ความถี่พาห้จากประชากรในรุ่นปัจจุบัน ก็จะถูกส่งต่อไปยังกระบวนการทางพันธุศาสตร์ ซึ่งจะทำการคัดสรรความถี่พาห้หรือประชากรในรุ่นถัดไป กระบวนการทั้งหมดจะถูกกระทำซ้ำแล้วซ้ำเล่าจนกระทั่ง จำนวนรุ่นปัจจุบันมีค่ามากกว่าจำนวนรุ่นที่กำหนดไว้ กระบวนการทั้งหมดก็จะหยุดการทำงาน

#### 4.2 ผลการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม

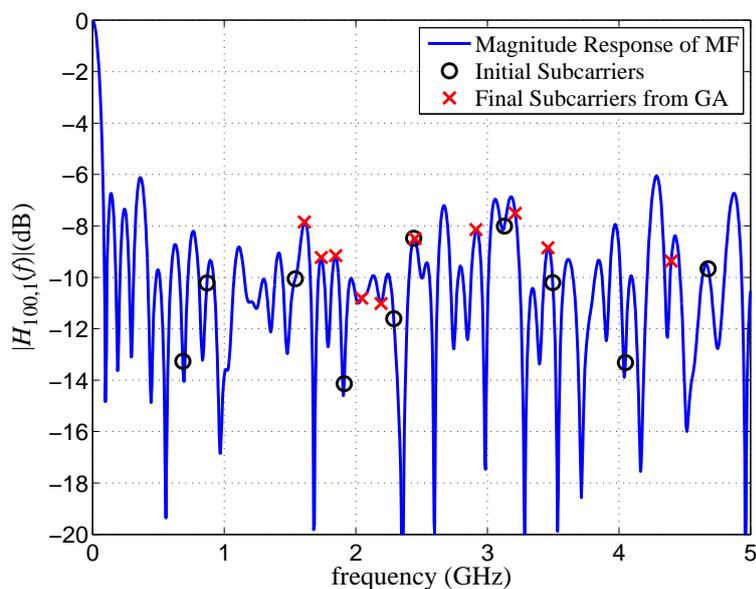
ในหัวข้อนี้ ความถี่พาห้ที่เหมาะสมจำนวน 10 ความถี่จะถูกแสดงหลังจากผ่านการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ โดยจะศึกษาการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมสำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจำนวน 3 เส้นซึ่งมีผลตอบสนองทางความถี่ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ที่มีจำนวนโหมด 100 โหมด จำนวน 3 เส้น ที่มีค่าเฉลี่ยทางเวลาหรือ  $t_{d,avg}$  เท่ากับ 5  $\mu$ s และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางเวลาหรือ  $\sigma_d$  เท่ากับ 2.89 ns

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดทั้งสามเส้น ณ ความถี่สูง อยู่ที่ประมาณ -10 dB โดยมีแถบผ่านความถี่ ณ ความถี่ที่แตกต่างกันไป การระบุผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วทั้งสามเส้นในรูปแบบ แสดงโดยสัญลักษณ์คือ  $H_{100,1}(f)$ ,  $H_{100,2}(f)$  และ  $H_{100,3}(f)$  โดยที่ตัวห้อยตัวแรก “100” หมายถึง จำนวนโหมดในใยแก้วนำแสงเท่ากับ 100 โหมด และตัวห้อยตัวที่สอง (นั่นคือ 1 หรือ 2 หรือ 3) จะหมายถึงใยแก้วนำแสงเส้นต่างๆ

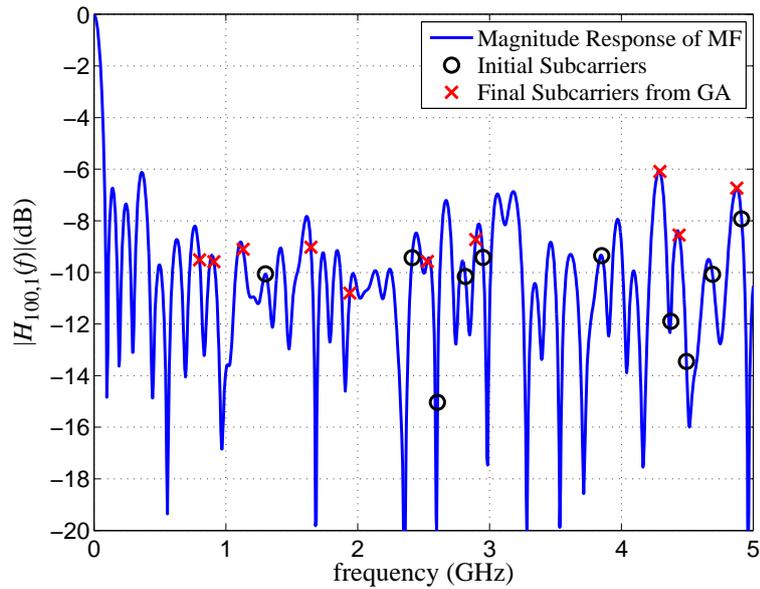
ถ้าหากความถี่พาห้ 10 ความถี่ที่ถูกเลือก อยู่ที่ความถี่ที่มีขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่มีค่าต่ำ (หรือมีการลดทอนสูงนั่นเอง) จะทำให้สัญญาณพาห้ที่ถูกส่งไปถูกลดทอนและเกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจข้อมูลตรงปลายทาง ดังนั้น ความถี่พาห้ที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญในการส่งสัญญาณพาห้ผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ผลการคัดสรรความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่สำหรับใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1 (นั่นคือ  $H_{100,1}(f)$ ) เมื่อกำหนดให้จำนวนรุ่นของประชากรในกระบวนการทางพันธุศาสตร์เป็น 50 100 และ 200 รุ่น แสดงดังรูปที่ 4.3 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



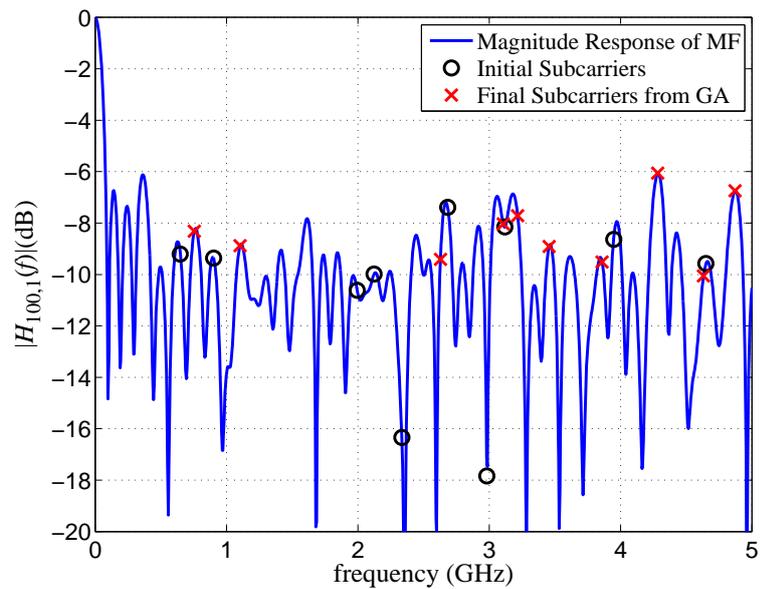
รูปที่ 4.3 ความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 50 รุ่น

พิจารณารูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าความถี่พาห้ก่อนเริ่มกระบวนการทางพันธุศาสตร์ (แสดงด้วยสัญลักษณ์รูป วงกลม) มีหลายความถี่พาห้ที่อยู่ ณ ความถี่ที่ไม่เหมาะสมในการส่งสัญญาณ ยกตัวอย่างเช่น ที่ความถี่ 0.7 1.9 และ 4.05 GHz ซึ่งความถี่เหล่านี้มีค่าขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำ นั่นคือ ประมาณ -13 ถึง -14 dB และเมื่ออาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์เพื่อคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม โดยอาศัยจำนวนประชากรในการดำเนินการทั้งหมด 50 รุ่น ความถี่พาห้ 10 ความถี่ที่คัดสรรได้ (ซึ่งแสดงด้วยสัญลักษณ์ กากบาท) ไม่มีความถี่ใดเลยที่อยู่ ณ ตำแหน่งที่มีค่าขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำกว่า -11 dB ซึ่งจะเห็นได้ว่า โดยเฉลี่ย ความถี่พาห้ที่ได้หลังจากการดำเนินกระบวนการดังกล่าวไป 50 รุ่นของประชากร จะมีค่าขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่สูงขึ้น

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า มีบางความถี่พาห้ซึ่ง อยู่ ณ ความถี่ ซึ่งมีค่าขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำกว่า -10 dB ซึ่งอาจจะทำให้สัญญาณพาห้ที่ส่งผ่านความถี่พาห้ดังกล่าวมีการลดทอนมากกว่าความถี่พาห้อื่นๆ และอาจส่งผลให้การตัดสินใจข้อมูลตรงปลายทางเกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้น จึงได้มีการเพิ่มจำนวนประชากรของการดำเนินกระบวนการทางพันธุศาสตร์เป็น 100 และ 200 รุ่น โดยผลของการคัดสรรความถี่พาห้แสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 ความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 100 รุ่น



รูปที่ 4.5 ความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าความถี่พาห้ 10 ความถี่ที่คัดสรรมาจากประชากร 100 รุ่น โดยเฉลี่ยแล้วมีค่าขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับความถี่พาห้ 10 ความถี่ก่อนที่จะทำการคัดสรร และเมื่อเปรียบเทียบความถี่พาห้ 10 ความถี่ที่คัดสรรได้จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ จากรูปที่

- 4.4 มีเพียง 1 ความถี่พาห้เท่านั้นที่มีขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำกว่า -10 dB ในขณะที่จากรูปที่ 4.3 มี 2 ความถี่พาห้ที่มีขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำกว่า -10 dB

และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.5 ก็จะได้ผลการคัดสรรในทำนองเดียวกัน นั่นคือ ความถี่พาห้ทั้ง 10 ความถี่ที่คัดสรรมาได้ โดยเฉลี่ยแล้วมีขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่สูงกว่าค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ก่อนดำเนินกระบวนการคัดสรร รวมทั้ง เมื่อพิจารณาจำนวนความถี่พาห้ที่ได้จากการคัดสรรที่มีค่าขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ต่ำกว่า -10 dB จะเห็นได้ว่า กรณีของการใช้จำนวนประชากร 200 รุ่นดังรูปที่ 4.5 นั้น ไม่มีความถี่พาห้ใดเลยที่มีค่าขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำกว่า -10 dB

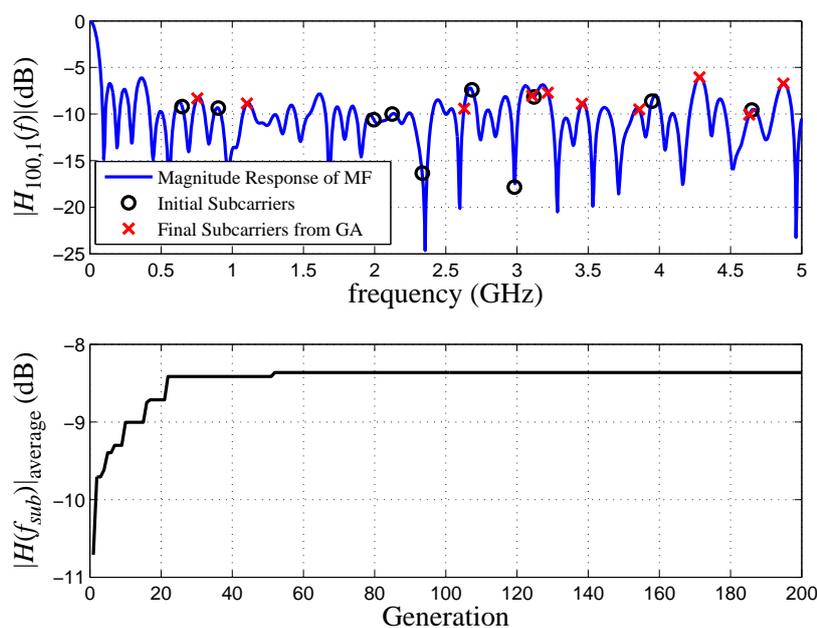
จากรูปที่ 4.3 ถึง 4.5 อาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่า ผลการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมนั้น ยิ่งจำนวนประชากรยิ่งมากขึ้น ความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ก็จะมีคุณสมบัติในแง่ของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่สูงขึ้น

ในการคัดสรรความถี่พาห้โดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์นั้น การจะอธิบายว่าในแต่ละรุ่นของประชากรมีการพัฒนาดีขึ้นหรือไม่อย่างไร โดยทั่วไปจะพิจารณาจากค่าความเหมาะสม หรือ Fitness value ของประชากรในรุ่นนั้นๆ ซึ่งสมการในการหาค่า Fitness value ได้ถูกอธิบายแล้วตามสมการ (4.1) อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาสมการ (4.1) จะเห็นได้ว่าค่า Fitness value นั้นสัมพันธ์กับค่าขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ ณ ความถี่พาห้ที่พิจารณา ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ สิ่งที่เป็นตัวอธิบายถึงการพัฒนาในแง่ของความถี่พาห้ที่เหมาะสมที่ได้มาในแต่ละรุ่นก็สามารถนำเอาค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่จากความถี่พาห้ทั้งหมดในแต่ละรุ่นมาพิจารณาได้ ดังสมการ (4.4)

$$\left| H(f_{sub}) \right|_{average} = \frac{1}{N_{f_{sub}}} \sum_{i=1}^{N_{f_{sub}}} 10 \log_{10} \left| H_{fiber}(f_{sub,i}) \right|_{normalized} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $N_{f_{sub}}$  คือ จำนวนของความถี่พาห้ที่พิจารณา

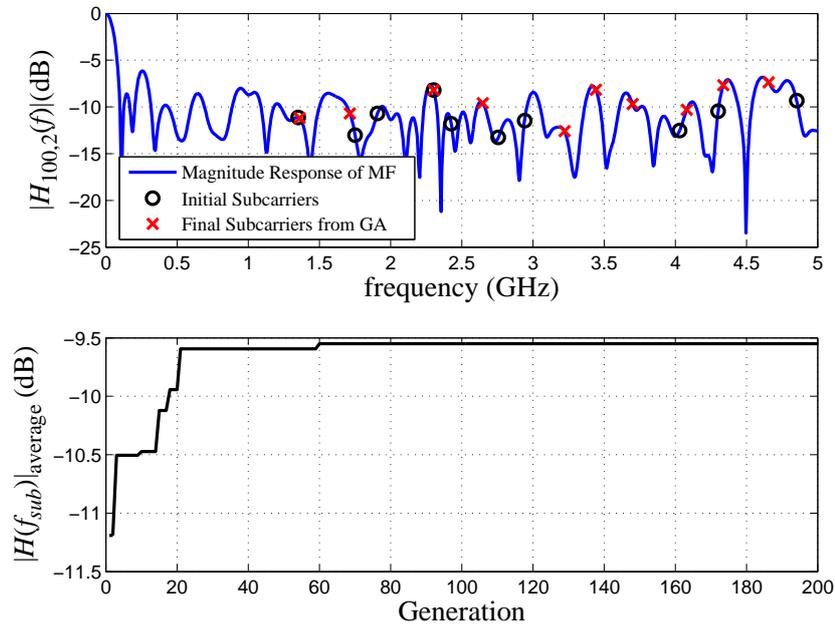
จากสมการ (4.4) เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนขึ้น ความถี่พาห้ 10 ความถี่ ทั้งก่อนและหลังการคัดสรรเมื่อใช้จำนวนประชากร 200 รุ่น และการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่จากความถี่พาห้ทั้งหมดเมื่อรุ่น (หรือ Generation) ของประชากรเพิ่มขึ้น จะถูกแสดง ดังรูปที่ 4.6



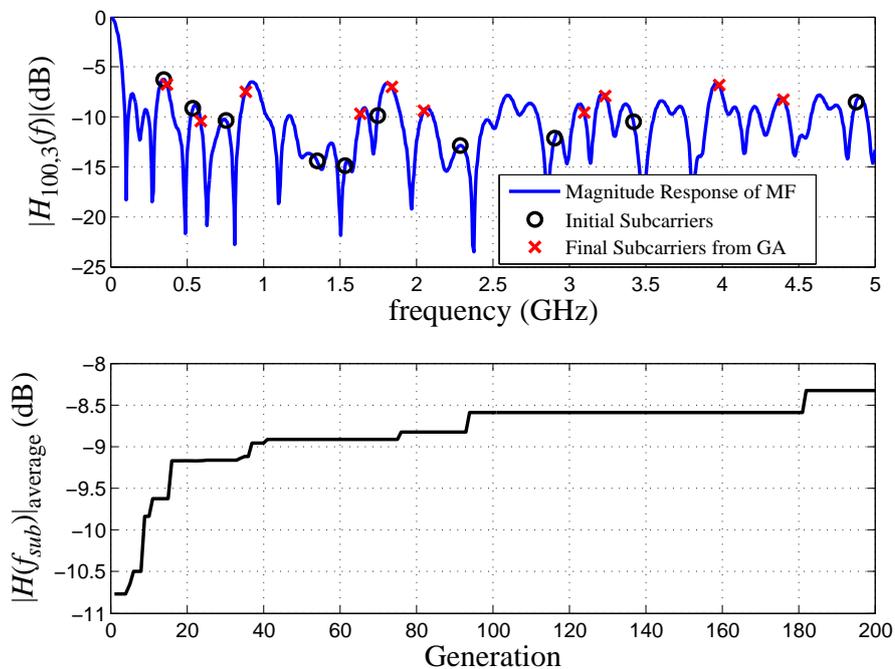
รูปที่ 4.6 (รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น

จากรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ จะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนรุ่นของประชากรเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยดังกล่าวก็จะสูงขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ที่จำนวนรุ่นของประชากรเป็น 10 20 40 และ 60 ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้จะเป็น -9 -8.7 -8.42 และ -8.36 dB ตามลำดับ และเมื่อจำนวนรุ่นเพิ่ม ค่าเฉลี่ยก็จะคงที่ที่ -8.36 dB

พิจารณารูปที่ 4.6 จะสามารถสรุปได้ว่า ความถี่พาห้ที่คัดสรรได้จะมีค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่สูงขึ้นเมื่อจำนวนรุ่นของประชากรมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ข้อสรุปดังกล่าว เป็นการสรุปจากการพิจารณาใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเพียงเส้นเดียว (นั่นคือ จาก  $H_{100,1}(f)$  ในรูปที่ 4.2) เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ ได้ดำเนินการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมจำนวน 10 ความถี่ สำหรับใยแก้วนำแสงอีก 2 เส้น นั่นคือ  $H_{100,2}(f)$  และ  $H_{100,3}(f)$  (จากรูปที่ 4.2) ซึ่งผลการคัดสรรความถี่พาห้หลังจากดำเนินการคัดสรรที่ประชากรรุ่นที่ 200 และการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.7 (รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น



รูปที่ 4.8 (รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 3 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น

ผลการคัดสรรความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2 ถูกแสดงดังรูปที่ 4.7 (รูปบน) ซึ่งจะเห็นได้ว่าความถี่พาห้ทั้ง 10 ความถี่ที่คัดสรรได้ โดยเฉลี่ยแล้วมีขนาดของผลตอบสนองทางความถี่สูงกว่าความถี่พาห้ก่อนดำเนินการคัดสรร ซึ่งค่าเฉลี่ยดังกล่าว สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.7 (รูปล่าง) ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า ก่อนดำเนินการคัดสรร ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ -11.2 dB และเมื่อรุ่นของประชากรเพิ่มขึ้นเป็น 10 20 40 และ 60 ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ทั้งหมดก็จะเพิ่มขึ้นเป็น -10.47 -9.95 -9.6 และ -9.55 dB ตามลำดับ นั่นคือเมื่อรุ่นของประชากรเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยทางขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ก็จะสูงขึ้น และสำหรับกรณีรูปที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยจะคงที่ที่ -9.55 dB เมื่อจำนวนรุ่นของประชากรมากกว่า 60 รุ่น

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณารูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงผลการคัดสรรความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 3 และค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้สัมพันธ์กับรุ่นของประชากรในการดำเนินกระบวนการทางพันธุศาสตร์ จะเห็นได้ว่า (จากรูปบนของรูปที่ 4.8) ความถี่พาห้ทั้ง 10 ความถี่ที่คัดสรรได้ โดยเฉลี่ยแล้วมีขนาดของผลตอบสนองทางความถี่สูงกว่าความถี่พาห้ก่อนดำเนินการคัดสรร และเมื่อรุ่นของประชากรเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยทางขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ก็จะสูงขึ้น โดยค่าเฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วเมื่อรุ่นของประชากรน้อยกว่ารุ่นที่ 20 และค่าเฉลี่ยจะมีการเพิ่มค่าที่ช้าลงและเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อรุ่นของประชากรมีค่าสูงกว่ารุ่นที่ 20

โดยสรุป สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด กระบวนการทางพันธุศาสตร์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมได้ นั่นคือความถี่พาห้ที่คัดสรรได้จะมีค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่สูงขึ้น และจะมีค่าที่สูงขึ้นมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับจำนวนรุ่นของการดำเนินกระบวนการทางพันธุศาสตร์ในการคัดสรร โดยค่าเฉลี่ยดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นค่อนข้างรวดเร็วในช่วงแรก (รุ่นที่น้อยกว่ารุ่นที่ 40) และเข้าสู่ค่าที่ค่อนข้างคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยเพียงเล็กน้อยเมื่อจำนวนรุ่นมีค่ามากขึ้น

## บทที่ 5

### การคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนาน

การคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม มีความสำคัญกับการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด เพราะหากความถี่พาห้ที่ใช้ในการส่งสัญญาณพาห้อยู่ ณ ความถี่ที่มีการลดทอนมาก จะทำให้สัญญาณพาห้ที่ส่งนั้นถูกลดทอนและส่งผลให้ข้อมูลที่รับตรงปลายทางผิดพลาด ในบทที่ 4 การคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ได้ถูกนำเสนอไปแล้ว อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาผลตอบแทนทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดทั้งสามเส้นที่แสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ณ ความถี่ที่สูงกว่า 0.3 GHz ไม่ว่าเราจะพิจารณาย่านความถี่ใดๆ ย่านความถี่นั้นก็จะมีแถบผ่านความถี่ หรือ Passbands เกิดขึ้นเสมอ ยกตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 4.2 สำหรับใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1 หากพิจารณาความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 2 GHz เราจะเห็นว่ามีการผ่านความถี่อยู่ 6 ถึง 7 แถบ หรือหากพิจารณาความถี่ตั้งแต่ 2 ถึง 3 GHz ก็จะเห็นว่ามีการผ่านความถี่อยู่ 6 ถึง 7 แถบเช่นเดียวกัน คุณลักษณะเช่นนี้ก็ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ไม่ว่าเราจะพิจารณาย่านความถี่ใดๆ หรือเปลี่ยนใยแก้วนำแสงเป็นเส้นที่ 2 หรือเส้นที่ 3 จากข้อพิจารณาดังกล่าว ทำให้ได้ประเด็นในการพิจารณาในเรื่องการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมในใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ว่าอันที่จริงแล้ว หากเราสามารถแก้ปัญหาในการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมสำหรับหนึ่งย่านความถี่ที่สนใจ เป็นการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมในแต่ละย่านความถี่ย่อยๆ โดยที่แต่ละย่านความถี่ย่อยก็จะคัดสรรจำนวนความถี่พาห้ที่เหมาะสมน้อยลง น่าจะทำให้การคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ดังนั้น ในบทนี้จึงเป็นการศึกษาเกี่ยวกับ การคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนาน ซึ่งคำว่าขนานในที่นี้จะหมายถึงการดำเนินกระบวนการทางพันธุศาสตร์ในแต่ละย่านความถี่ย่อยไปพร้อมๆกัน โดยเนื้อหาที่จะนำเสนอจะประกอบไปด้วย กระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานสำหรับการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม ผลการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม จากกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนาน ที่มีการแบ่ง 2 และ 3 ช่วงความถี่ และจากนั้นจะเป็นการเปรียบเทียบผลการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมจากกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบต่างๆ

## 5.1 กระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานสำหรับการคัดสรรความถี่พาหุที่เหมาะสม

จากคุณสมบัติเกี่ยวกับแถบผ่านความถี่  $\omega$  ย่านความถี่สูงของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด การคัดสรรความถี่พาหุที่เหมาะสมโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์สามารถแบ่งย่านความถี่ในการคัดสรรเป็นย่านความถี่ย่อยๆที่มีความกว้างทางความถี่เท่ากันได้ โดยที่แต่ละย่านความถี่ก็จะมีจำนวนความถี่พาหุที่จะคัดสรรน้อยลง ซึ่งหากดำเนินการดังกล่าวจะทำให้จำนวนความถี่พาหุที่ในแต่ละย่านความถี่ย่อยต้องการคัดสรร สามารถคำนวณได้จาก

$$n_{sub,i} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{N_{sub}}{N_{freq}} \right\rfloor & \text{for } i = 1 \\ \left\lfloor \frac{N_{sub} - \sum_{j=1}^{i-1} n_{sub,j}}{N_{freq} - i + 1} \right\rfloor & \text{for } i = 2, \dots, N_{freq} \end{cases} \quad (5.1)$$

เมื่อ  $n_{sub,i}$  คือ จำนวนความถี่พาหุที่ต้องการคัดสรรสำหรับ ย่านความถี่ย่อยที่  $i$

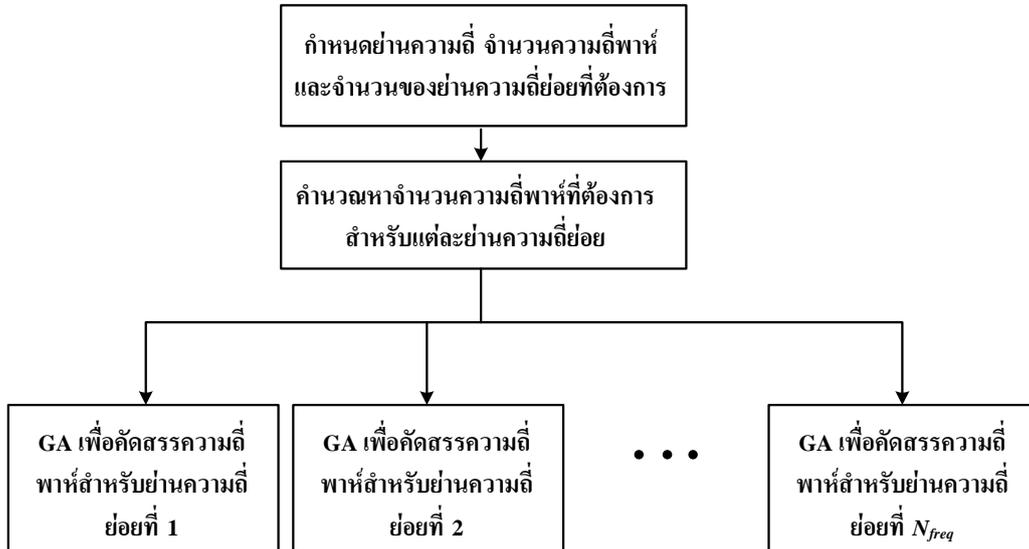
$N_{freq}$  คือ จำนวนย่านความถี่ย่อยทั้งหมดที่ถูกแบ่ง

$N_{sub}$  คือ จำนวนความถี่พาหุทั้งหมดที่ต้องการ

จากสมการ (5.1) จะเห็นได้ว่าจำนวนความถี่พาหุสำหรับย่านความถี่ย่อยต่างๆสามารถคำนวณได้ โดยถ้าหากผลของการหาร  $N_{sub}$  ด้วย  $N_{freq}$  ไม่ลงตัว ในย่านความถี่ย่อยบางย่านความถี่จะมีจำนวนความถี่พาหุที่ต้องการคัดสรรมากกว่าย่านความถี่อื่นๆอยู่ 1 ความถี่พาหุ ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการแบ่งความถี่ที่สนใจ ออกเป็น 2 ย่านความถี่ย่อย โดยมีจำนวนความถี่พาหุทั้งหมดที่ต้องการคัดสรรเท่ากับ 10 ความถี่พาหุ นั่นคือว่า  $N_{sub} = 10, N_{freq} = 2$  จากสมการ (5.1) จะได้ว่า  $n_{sub,1} = 5$  และ  $n_{sub,2} = 5$  และหากต้องการแบ่งความถี่ที่สนใจ ออกเป็น 3 ย่านความถี่ย่อย โดยมีจำนวนความถี่พาหุทั้งหมดที่ต้องการคัดสรรเท่ากับ 10 ความถี่พาหุ นั่นคือว่า  $N_{sub} = 10, N_{freq} = 3$  จากสมการ (5.1) จะได้ว่า  $n_{sub,1} = 3$   $n_{sub,2} = 3$  และ  $n_{sub,3} = 4$

จากสมการ (5.1) และตัวอย่างการคำนวณข้างต้น ทำให้เราได้ย่านความถี่ย่อย และจำนวนความถี่พาหุที่ต้องการคัดสรรสำหรับแต่ละย่านความถี่ย่อย ซึ่งขั้นตอนจากนี้ ก็จะเป็นการนำเอากระบวนการทางพันธุศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการคัดสรรความถี่พาหุสำหรับย่านความถี่ย่อยทุกย่านพร้อมกัน นั่นคือเหตุผล

ว่าเหตุใดกระบวนการดังกล่าวจึงถูกระบุว่าเป็น กระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนาน หรือ Parallel Genetic Algorithm



รูปที่ 5.1 แผนภาพแสดงการคัดสรรความถี่พาหุที่เหมาะสมด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนาน

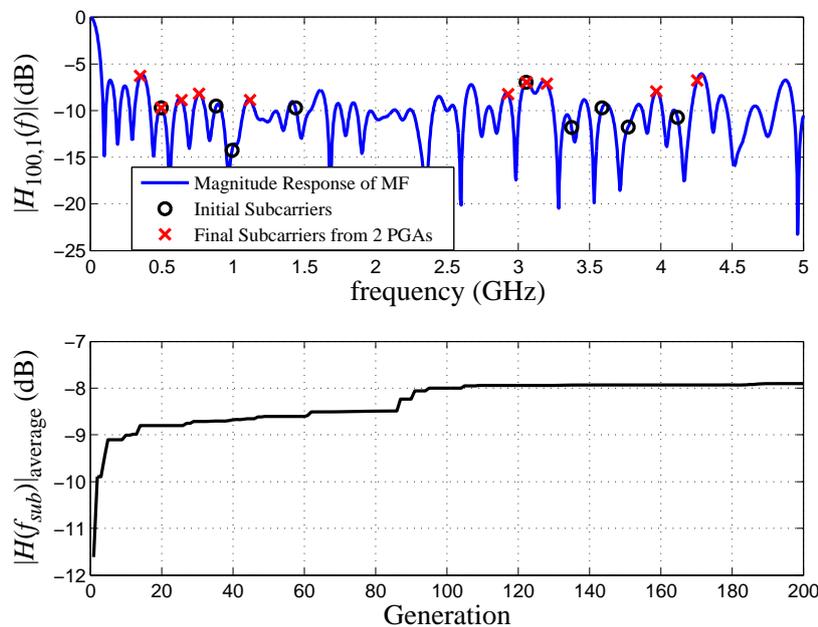
ขั้นตอนในการดำเนินการคัดสรรความถี่พาหุที่เหมาะสมด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนาน แสดงดังรูปที่ 5.1 จากรูปจะเห็นได้ว่า สิ่งที่จะต้องทราบก่อนเริ่มกระบวนการก็คือย่านความถี่ที่สนใจ จำนวนความถี่พาหุทั้งหมดที่ต้องการจะคัดสรร และจำนวนย่านความถี่ย่อยที่สนใจ ซึ่งจากข้อมูลเหล่านี้ทำให้สามารถคำนวณหาจำนวนความถี่พาหุสำหรับแต่ละย่านความถี่ย่อยที่ต้องการได้ จากนั้นข้อมูลต่างๆ ก็จะถูกแยกไปสำหรับแต่ละย่านความถี่ย่อยเพื่อเข้ากระบวนการทางพันธุศาสตร์เพื่อคัดสรรความถี่พาหุต่อไป โดยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่แสดงในรูปที่ 5.1 นั่นก็คือกระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่ได้อธิบายโดยละเอียดไว้แล้วในบทที่ 4 (รูปที่ 4.1)

## 5.2 ผลการคัดสรรความถี่พาหุที่เหมาะสม จากกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนาน ที่มีการแบ่ง 2 ย่านความถี่ย่อย

ในหัวข้อนี้ จะเป็นการศึกษาและแสดงความถี่พาหุที่เหมาะสมจำนวน 10 ความถี่สำหรับย่านความถี่ตั้งแต่ 0.3 ถึง 5 GHz สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ซึ่งจะถูกคัดสรรโดยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนาน ที่มีการแบ่งย่านความถี่ดังกล่าวเป็น 2 ย่านความถี่ย่อย นั่นคือย่านความถี่ตั้งแต่ 0.3 ถึง

2.65 GHz และย่านความถี่ตั้งแต่ 2.65 ถึง 5 GHz โดยที่แต่ละย่านความถี่ย่อยจะถูกคัดสรรเพื่อหาความถี่พาห้ที่เหมาะสมจำนวน 5 ความถี่

ใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่ถูกนำมาศึกษาในหัวข้อนี้ จะอาศัยใยแก้วนำแสงทั้งสามเส้นที่ได้ศึกษามาแล้วในบทที่ 4 เพื่อที่จะสามารถนำผลการคัดสรรมาเปรียบเทียบกันได้ โดยความถี่พาห้เริ่มต้นและความถี่พาห้ที่เหมาะสมหลังจากดำเนินการกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานไปแล้ว 200 รุ่นของประชากรจะถูกแสดง รวมทั้งค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ทั้งหมดก็จะถูกแสดงเช่นกัน



รูปที่ 5.2 (รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่ง 2 ย่านความถี่ย่อย โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น

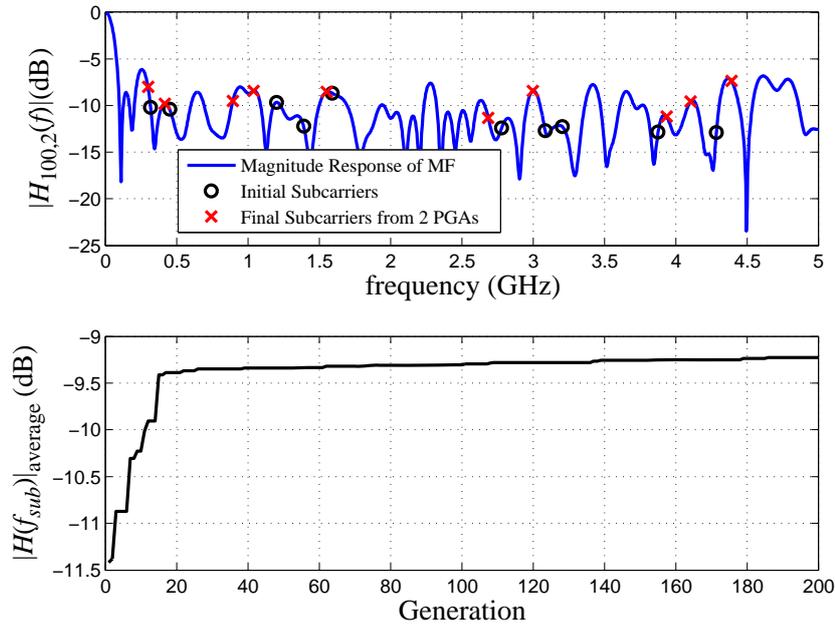
ใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 ถูกนำมาศึกษาเพื่อคัดสรรหาความถี่พาห้ที่เหมาะสมโดยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่งทางความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อย ซึ่งผลการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมจำนวน 10 ความถี่และค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ในแต่ละรุ่นของการดำเนินการกระบวนการถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.2 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปบน ในรูปที่ 5.2 จะเห็นว่า ความถี่พาห้เริ่มต้น (แสดงด้วยสัญลักษณ์ วงกลม) ทั้ง 10 ความถี่นั้น มีบางความถี่ที่อยู่ ณ ความถี่ที่ไม่เหมาะสม ยกตัวอย่างเช่น ที่ความถี่ 1 GHz ซึ่ง ณ ความถี่นี้ มีค่าขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่

ค่อนข้างต่ำ (นั่นคือ ทำให้เกิดการลดทอนมาก ถ้าหากส่งสัญญาณพาห์ผ่านความถี่นี้) รวมทั้งเมื่อพิจารณาค่าขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห์เริ่มต้นทั้งหมด จะเห็นได้ว่า มีค่าเฉลี่ยประมาณ -11.5 dB ซึ่งถือได้ว่ามีค่าขนาดที่ค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อนำเอาความถี่พาห์เหล่านี้เข้าสู่กระบวนการคัดสรรความถี่พาห์ที่เหมาะสมด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่งทางความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อย ความถี่พาห์ที่คัดสรรได้ (แสดงด้วยสัญลักษณ์ กากบาท) อยู่ ณ ความถี่ที่ซึ่งทำให้ค่าเฉลี่ยทางขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห์ทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น -7.9 dB ซึ่งสูงกว่าก่อนหน้าที่จะดำเนินกระบวนการคัดสรรถึง 3.6 dB นอกจากนี้ หากพิจารณาค่าแห่งของความถี่พาห์ที่คัดสรรได้ จะเห็นได้ว่า ความถี่พาห์ที่คัดสรรได้ทั้งหมด จะอยู่ ณ ความถี่ที่ตรงตำแหน่งยอดของแถบผ่านความถี่ (Passband) ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณพาห์แต่ละสัญญาณมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจาก Sidebands ทั้งสองข้างของสัญญาณพาห์แต่ละสัญญาณจะถูกส่งผ่านไปโดยที่มีการลดทอนที่สมมาตรกัน

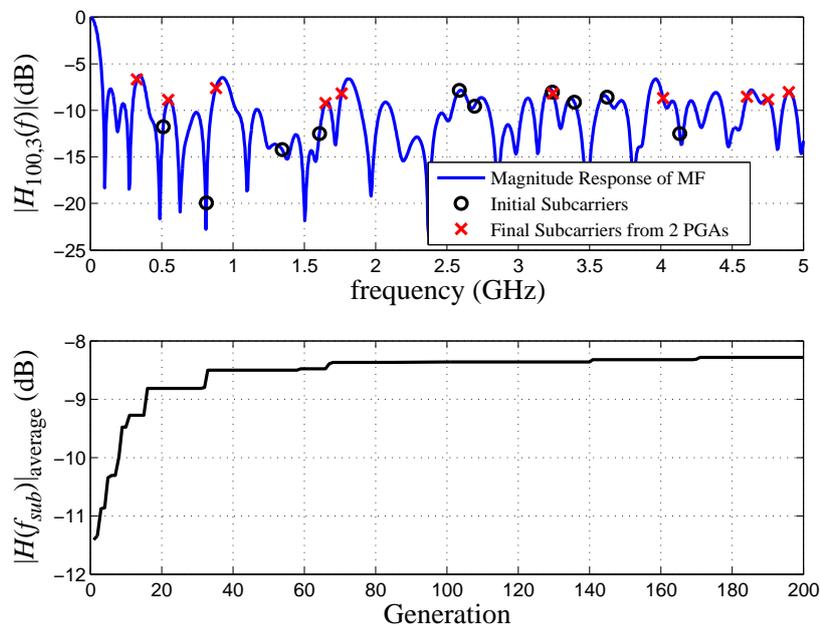
และเมื่อพิจารณารูปต่าง ของรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห์ที่ได้นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรุ่นของประชากรในการดำเนินกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานเพิ่มมากขึ้น โดยที่ การเพิ่มของค่าเฉลี่ยนี้จะเพิ่มอย่างรวดเร็วสำหรับประชากรในรุ่นที่ 1 ถึงรุ่นที่ 15 โดยจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ -8.9 dB ที่ประชากรรุ่นที่ 15 และจากนั้นก็ค่อยเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ที่ -7.9 dB สำหรับประชากรรุ่นที่ 110 เป็นต้นไป

นอกจากการพิจารณาใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 แล้ว ในหัวข้อนี้ยังนำเอากระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่งทางความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อย ไปประยุกต์กับใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 และ 3 ด้วยเช่นกัน ซึ่งผลการคัดสรรความถี่พาห์ที่ได้ แสดงดังรูปที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ

พิจารณารูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่า ความถี่พาห์ที่เหมาะสม 10 ความถี่สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2 ที่ถูกคัดสรรได้ อยู่ ณ ความถี่ที่เหมาะสมกว่า ความถี่พาห์ก่อนการคัดสรร และหลังจากการคัดสรรที่ประชากรรุ่นที่ 200 แล้ว ความถี่พาห์ที่ได้มีค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห์ทั้งหมดที่สูงกว่าค่าเฉลี่ยของความถี่พาห์ก่อนเริ่มกระบวนการคัดสรร โดยที่เมื่อพิจารณารูปต่างของรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยดังกล่าวเริ่มต้นที่ประมาณ -11.4 dB และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อรุ่นของประชากรเพิ่มขึ้นจนกระทั่งค่อนข้างคงที่ที่ -9.4 dB ที่ประชากรรุ่นที่ 15 จากนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ยก็ยังคงมีอยู่ แต่เป็นไปอย่างช้าๆ โดยที่ประชากรรุ่นที่ 200 ค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ -9.2 dB



รูปที่ 5.3 (รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่ง 2 ย่านความถี่ย่อย โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น



รูปที่ 5.4 (รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 3 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่ง 2 ย่านความถี่ย่อย โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น

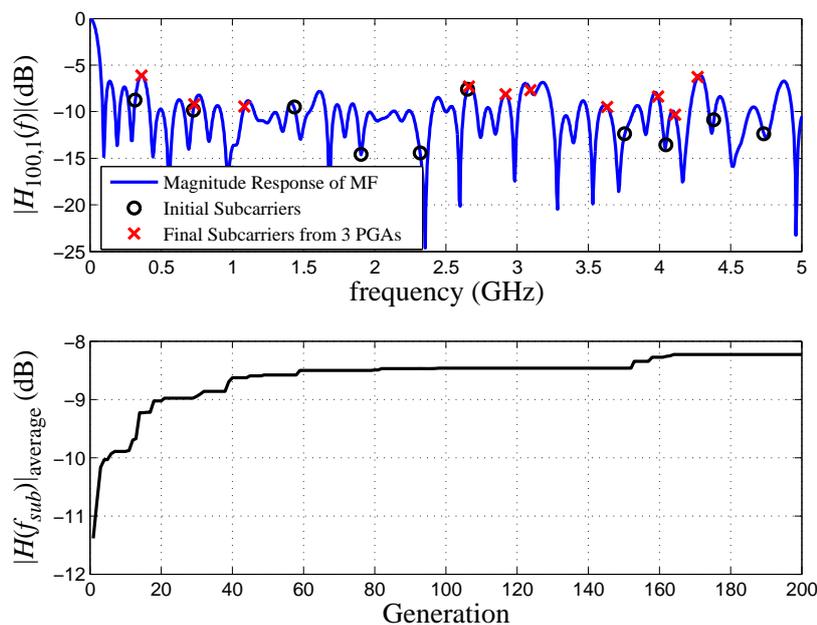
ลักษณะและตำแหน่งของความถี่พาห้ที่สามารถคัดสรรได้สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด เส้นที่ 3 แสดงในรูปที่ 5.4 ก็จะคล้ายกันกับลักษณะของความถี่พาห้ที่สังเกตได้จากกรณีเส้นที่ 1 และ 2 นั่นคือ ความถี่พาห้ทั้ง 10 ความถี่ที่คัดสรรได้ก็จะอยู่ ณ ตำแหน่งความถี่ที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยที่ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ จะเพิ่มขึ้นเมื่อรุ่นของประชากรในกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานเพิ่มมากขึ้น โดยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วสำหรับประชากรในรุ่นแรกๆตั้งแต่รุ่นที่ 1 ถึงรุ่นที่ 20 (โดยประมาณ) โดยในท้ายที่สุด ค่าเฉลี่ย ณ รุ่นที่ 200 จะมีค่าเท่ากับ  $-8.3$  dB ซึ่งเพิ่มขึ้นจากก่อนการดำเนินการคัดสรรประมาณ  $3.2$  dB

เมื่อพิจารณาผลการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม ที่แสดงดังรูปที่ 5.2 ถึง 5.4 สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 ถึง 3 จะเห็นได้ว่าการแบ่งทางความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อย แล้วดำเนินการทางพันธุศาสตร์เพื่อคัดสรรความถี่พาห้แบบขนานสำหรับทั้งสองย่านความถี่ย่อย สามารถคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมได้ โดยที่ความถี่พาห้ที่สามารถคัดสรรได้ มีค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่สูงขึ้นกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากก่อนการดำเนินการ

### 5.3 ผลการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม จากกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนาน ที่มีการแบ่ง 3 ย่านความถี่ย่อย

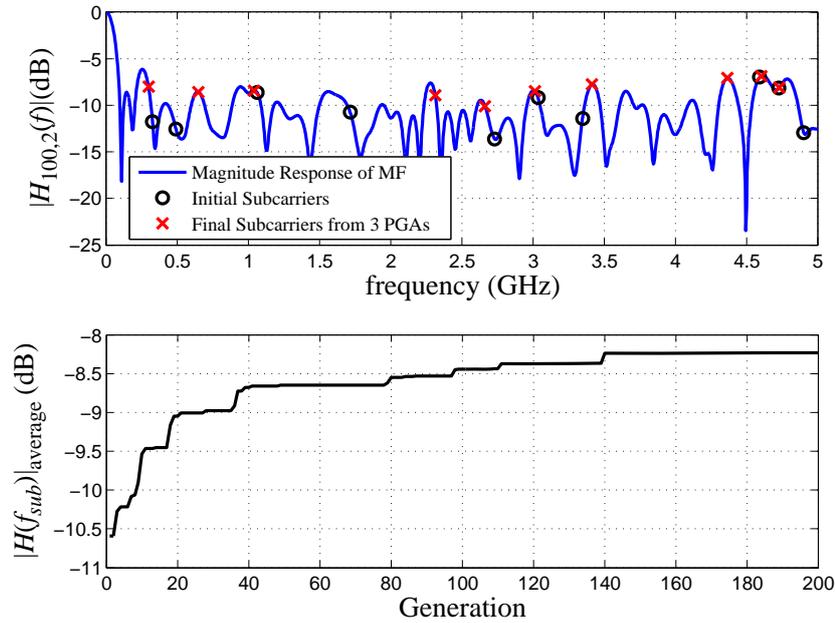
หลังจากที่ได้ศึกษาการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่งความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อยไปแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ในหัวข้อนี้ จะเป็นการศึกษาผลของการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมสำหรับกรณีที่มีการแบ่งความถี่ออกเป็น 3 ย่านความถี่ย่อย โดยในกรณีนี้ ความถี่ที่ศึกษาตั้งแต่  $0.3$  ถึง  $5$  GHz จะถูกแบ่งเป็น 3 ย่านความถี่ย่อย คือ  $0.3 - 1.85$  GHz  $1.85 - 3.4$  GHz และ  $3.4 - 5.0$  GHz โดยที่จำนวนความถี่พาห้ที่จะถูกคัดสรรในแต่ละย่านความถี่ย่อยมีค่าเท่ากับ 3 3 และ 4 ความถี่พาห้ โดยลำดับ (หมายเหตุ เนื่องจากจำนวนความถี่พาห้ที่ต้องการคัดสรรมีค่าเท่ากับ 10 ความถี่ แต่จำนวนย่านความถี่ย่อยมีค่าเท่ากับ 3 ดังนั้น จำนวนความถี่พาห้ที่ต้องคัดสรรในแต่ละย่านความถี่ย่อยจึงแตกต่างกันเล็กน้อย)

เช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ผ่านมา ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดทั้งสามเส้น ซึ่งผลการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม ถูกแสดงดังรูปที่ 5.5 ถึง 5.7 ดังนี้

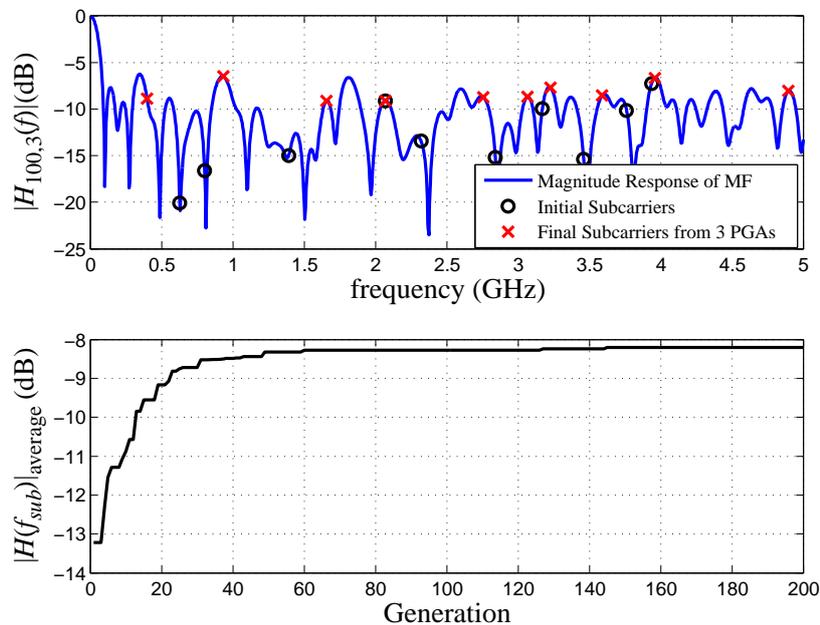


รูปที่ 5.5 (รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่ง 3 ย่านความถี่ย่อย โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น

พิจารณารูปที่ 5.5 จะเห็นได้ว่า ความถี่พาห้ที่สามารถคัดสรรได้จากกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่งความถี่เป็น 3 ย่านความถี่ย่อย สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 นั้น อยู่ ณ ความถี่ที่มีค่าขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่สูงกว่า ค่าขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ก่อนดำเนินการคัดสรร โดยตำแหน่งทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้จะอยู่ ณ ตำแหน่งที่ใกล้จุดยอดหรือ อยู่ ณ ตำแหน่งจุดยอด ของแถบผ่านความถี่ (Passband) ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ดีของความถี่พาห้ที่จะใช้ในการส่งสัญญาณพาห้ ดังที่ได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.5 รูปล่าง จะเห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่นก็จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อรุ่นของการดำเนินการคัดสรรเพิ่มมากขึ้น โดยมีการเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ยที่ค่อนข้างรวดเร็ว ในรุ่นแรกๆของการดำเนินกระบวนการคัดสรร (นั่นคือตั้งแต่ รุ่นที่ 1 จนถึงรุ่นที่ 20) จากนั้นก็จะค่อนข้างคงที่ โดยจะมีค่าเฉลี่ย ณ รุ่นที่ 200 เท่ากับ  $-8.2$  dB โดยประมาณ ซึ่งค่าเฉลี่ยดังกล่าวจะมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้ก่อนทำการคัดสรรอยู่ประมาณ 3 dB



รูปที่ 5.6 (รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่ง 3 ย่านความถี่ย่อย โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น



รูปที่ 5.7 (รูปบน) ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 3 และความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ สำหรับก่อนและหลังการดำเนินการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่ง 3 ย่านความถี่ย่อย โดยอาศัยจำนวนประชากรทั้งหมด 200 รุ่น และ (รูปล่าง) ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น

สำหรับรูปที่ 5.6 และ 5.7 จะเป็นการแสดงผลการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมสำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2 และ 3 ตามลำดับ การคัดสรรกระทำโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนาน ที่มีการแบ่งทางความถี่ออกเป็น 3 ย่านความถี่ย่อย ลักษณะของความถี่พาห้ทั้ง 10 ความถี่ที่สามารถคัดสรรได้จากทั้งสองรูป มีลักษณะที่คล้ายกัน นั่นคือ ความถี่พาห้ที่สามารถคัดสรรได้ จะอยู่ ณ ความถี่ซึ่งใกล้เคียงกับจุดยอดของแต่ละแถบผ่านความถี่ โดยที่ค่าเฉลี่ยของขนาดของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ ก็จะมีลักษณะที่ดีขึ้นจากการดำเนินการคัดสรร นั่นคือ ค่าเฉลี่ยก็จะมีค่าที่สูงขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 5.6 ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้จะมีค่าเท่ากับ -8.2 dB ในขณะที่ค่าเฉลี่ยดังกล่าวก่อนการดำเนินการคัดสรรจะมีค่าเท่ากับ -10.6 dB นอกจากนี้ หากพิจารณา รูปด้านล่าง ของรูปที่ 5.6 และ 5.7 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นค่อนข้างรวดเร็วสำหรับรุ่นของประชากรที่ต่ำกว่ารุ่นที่ 20 โดยที่เมื่อรุ่นของประชากรเพิ่มมากกว่ารุ่นที่ 20 ค่าเฉลี่ยดังกล่าวก็จะมีเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หรือในบางช่วงอาจจะมีค่าคงที่

จากรูปที่ 5.5 ถึง 5.7 จะเห็นได้ว่าการแบ่งทางความถี่เป็น 3 ย่านความถี่ย่อย แล้วดำเนินการคัดสรรทางพันธุศาสตร์เพื่อคัดสรรความถี่พาห้แบบขนานสำหรับทั้งสามย่านความถี่ย่อย สามารถคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมได้ โดยที่ความถี่พาห้ที่สามารถคัดสรรได้ มีค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่สูงขึ้นกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากก่อนการดำเนินการ

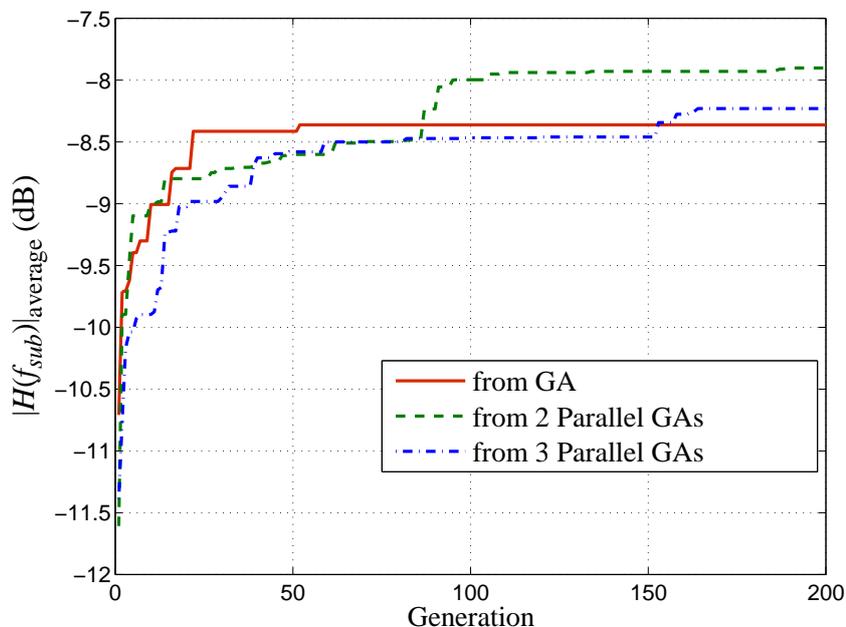
#### 5.4 การเปรียบเทียบผลการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม

พิจารณาลักษณะของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ ทั้งกรณีที่มาจากรกระบวนการทางพันธุศาสตร์ (ในบทที่ 4) และกรณีที่มาจากรกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานที่มีการแบ่ง 2 หรือ 3 ย่านความถี่ย่อย (ในบทนี้) สิ่งที่สามารถสรุปได้ก็คือ จากทั้งสองกรณี ความถี่พาห้ที่สามารถคัดสรรได้นั้นมีความเหมาะสมมากขึ้นสำหรับการนำไปใช้เป็นการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อย เพราะตำแหน่งของความถี่พาห้ที่สามารถคัดสรรได้อยู่ ณ ความถี่ที่ซึ่งอยู่ใกล้เคียงหรืออยู่ ณ จุดยอดของแถบผ่านความถี่ (Passband) รวมทั้งค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ก็จะมีค่าที่สูงขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาโดยละเอียดแล้ว ยังอาจมีประเด็นที่ต้องนำมาศึกษาเพิ่มเติม เพื่อให้การคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็นค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนอง

ทางความถี่ของความถี่พาห้ที่ได้ ว่าในแต่ละกรณีได้ค่าที่มากน้อยแตกต่างกันอย่างไร และอีกประเด็นก็คือ ความรวดเร็วในการเข้าสู่ค่าเฉลี่ยที่สูงขึ้นที่น่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทางปฏิบัติ ซึ่งในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์เปรียบเทียบประเด็นดังกล่าว

เพื่อให้การวิเคราะห์เปรียบเทียบมีความชัดเจนมากขึ้น รูปกราฟที่แสดงค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่ได้จากการคัดสรรโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบต่างๆจะถูกนำมาศึกษา ซึ่งจากบทที่ 4 และในบทนี้ในหัวข้อย่อย 2 หัวข้อก่อนหน้านี้ รูปแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยต่างๆ สามารถแสดงดังรูปที่ 5.8 ถึง 5.10 สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 ถึง 3 ตามลำดับ

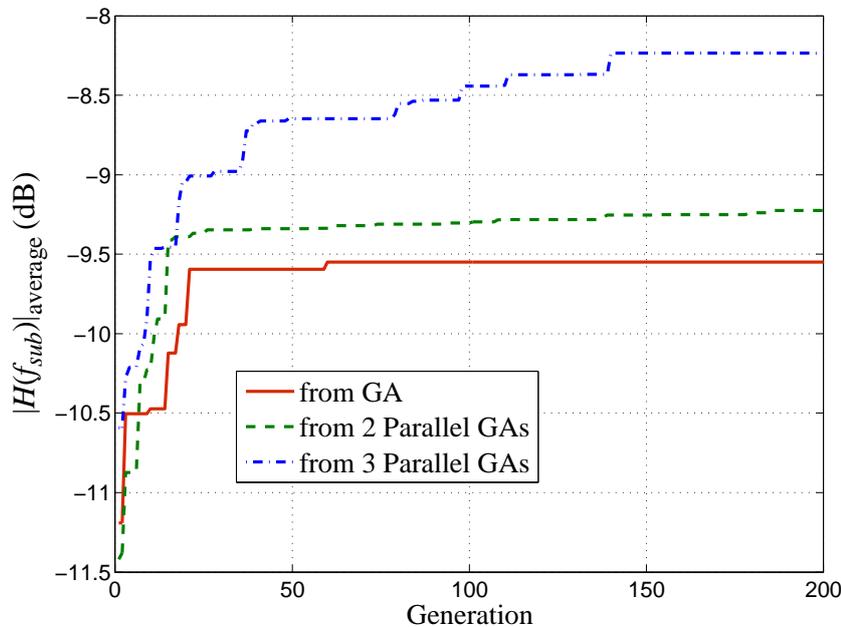


รูปที่ 5.8 ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น จากการดำเนินการคัดสรรโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบต่างๆ สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1

พิจารณารูปที่ 5.8 จะเห็นได้ว่ากราฟแสดงค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้ที่คัดสรรได้จากทั้งสามกระบวนการทางพันธุศาสตร์ (นั่นคือ กระบวนการทางพันธุศาสตร์ธรรมดา กระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่ง 2 ย่านความถี่ย่อย และ กระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่ง 3 ย่านความถี่ย่อย) แตกต่างกันบ้างในบางช่วงของรุ่นของประชากรที่พิจารณา โดยถ้าพิจารณาในด้านของค่าเฉลี่ยที่รุ่นสุดท้ายของการดำเนินการคัดสรร จะเห็นได้ว่า กรณีที่มีการแบ่ง 2 ย่านความถี่

จะทำให้ได้ค่าเฉลี่ยที่สูงที่สุด (นั่นคือ เท่ากับ  $-7.8$  dB ในขณะที่กรณีที่ไม่มีการแบ่งความถี่จะได้ค่าเฉลี่ยที่มีค่าต่ำที่สุด (นั่นคือ เท่ากับ  $-8.35$  dB)

และถ้าหากพิจารณารุ่นของการดำเนินกระบวนการคัดสรรที่ทำให้ได้ค่าที่เข้าสู่ค่าที่ใกล้ค่าสูงสุดในแต่ละกรณี จะเห็นได้ว่ากรณีที่ไม่มีการแบ่งความถี่ จะเข้าสู่ค่าที่สูงสุดได้ ณ ประชากรรุ่นที่ 20 (โดยประมาณ) ในขณะที่กรณีที่มีการแบ่งความถี่เป็นย่านความถี่ย่อยๆ ทั้งสองกรณี จะเข้าสู่ค่าสูงสุด ณ ประชากรรุ่นที่ 50 (โดยประมาณ) ซึ่งจากประเด็นนี้ เราอาจจะสรุปเบื้องต้นได้ว่า การคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมโดยที่ไม่มีการแบ่งความถี่น่าจะมีประสิทธิภาพมากกว่าเพราะใช้จำนวนรุ่นของประชากรที่น้อยกว่า (ทำให้เวลาในการคัดสรรน้อยกว่า) แต่หากพิจารณาค่าเฉลี่ยที่ได้จากกรณีที่ไม่มีการแบ่งทางความถี่ จะเห็นได้ว่า ในที่สุดแล้ว (ณ ประชากรรุ่นที่ 200) ค่าเฉลี่ยที่ได้มีค่าต่ำกว่ากรณีที่มีการแบ่งความถี่อยู่ถึงกว่า  $0.5$  dB ดังนั้นหากจะนำประเด็นนี้มาเป็นปัจจัยในการตัดสินใจอาจจะไม่เพียงพอนัก นอกจากนี้ รูปกราฟที่ได้จากรูปที่ 5.8 นั้นมาจากการศึกษาในใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 เพียงเส้นเดียวเท่านั้น หากต้องการได้ข้อสรุปที่น่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น เราควรจะพิจารณาในลักษณะเดียวกันนี้กับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่ได้ทำการศึกษาไปแล้วอีก 2 เส้นด้วย ซึ่งกราฟในลักษณะเดียวกันนี้สำหรับใยแก้วนำแสงทั้งสองเส้นถูกแสดงดังรูปที่ 5.9 และ 5.10

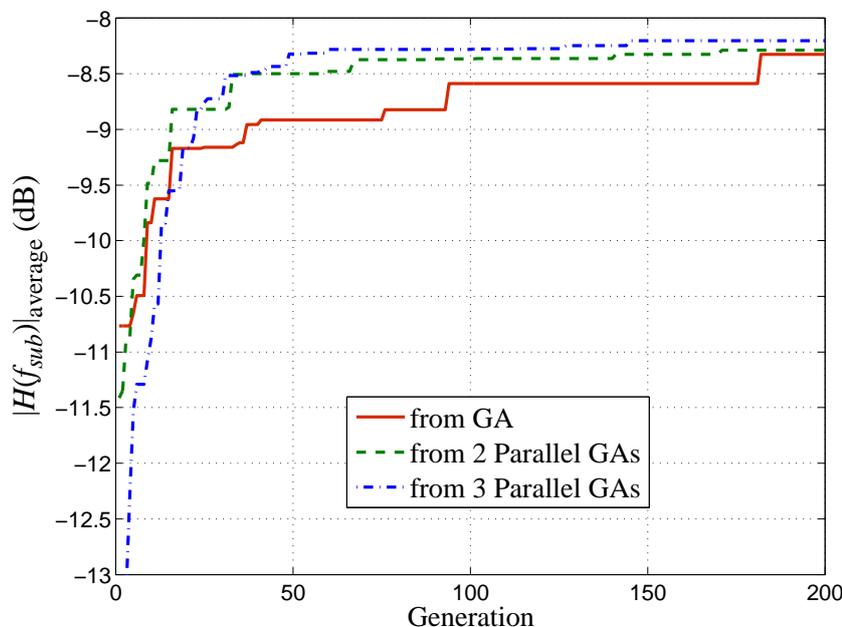


รูปที่ 5.9 ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น จากการดำเนินการคัดสรรโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบต่างๆ สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2

จากรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยที่ได้สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2 นั้น มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด นั่นคือ กราฟค่าเฉลี่ยที่ได้จากการแบ่งความถี่เป็น 3 ย่านความถี่ย่อยจะมีค่าเฉลี่ยที่สูงที่สุด (นั่นคือ มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการคัดสรรความถี่พาห้) และกราฟค่าเฉลี่ยที่ได้จากการแบ่งความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อยจะมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า และกราฟค่าเฉลี่ยที่ได้จากการที่ไม่มีการแบ่งทางความถี่จะมีค่าที่น้อยที่สุด โดยในกรณีที่มีการแบ่งความถี่เป็น 3 ย่านความถี่นั้นจะเข้าสู่ค่าที่ใกล้เคียงค่าสูงสุดที่ประชากรรุ่นที่ 50 และสำหรับอีก 2 กรณีที่เหลือจะเข้าสู่ค่าที่ใกล้เคียงค่าสูงสุดที่ประชากรรุ่นที่ 20 (โดยประมาณ)

ซึ่งหากพิจารณาผลการวิเคราะห์โดยอาศัยรูปที่ 5.8 และ 5.9 จะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้จะดูไม่ค่อยสอดคล้องกันสักเท่าไร เนื่องจากในรูปที่ 5.8 นั้น กรณีที่มีการแบ่งทางความถี่เป็น 3 ย่านความถี่ย่อยนั้น ค่าเฉลี่ยทางขนาดที่ได้มีได้มีประสิทธิภาพเหนือกว่าอีก 2 กรณีที่เหลือ แต่สำหรับรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ชัดว่า กรณีที่มีการแบ่งความถี่เป็น 3 ย่านความถี่ย่อยนั้น มีประสิทธิภาพในการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหนือกว่า 2 กรณีที่เหลือ

อย่างไรก็ตาม กราฟที่ได้จากใยแก้วนำแสงเส้นที่ 3 ยังไม่ได้ถูกวิเคราะห์ ซึ่งกราฟสำหรับใยแก้วนำแสงเส้นที่ 3 นี้แสดงในรูปที่ 5.10

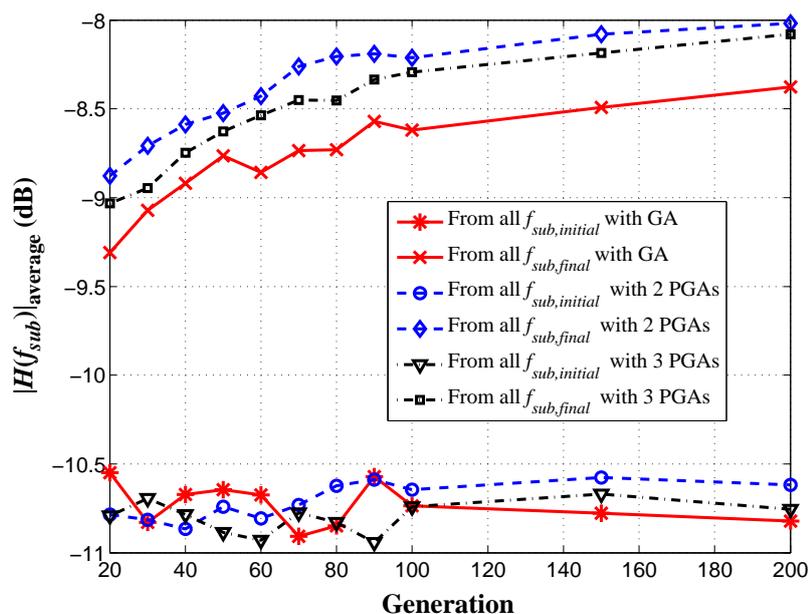


รูปที่ 5.10 ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น จากการดำเนินการคัดสรรโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบต่างๆ สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 3

สำหรับในกรณีใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหนดเส้นที่ 3 นี้ กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาร์ที่คัดสรรได้ จากทั้ง 3 กรณี แสดงดังรูปที่ 5.10 ซึ่งจากรูป จะเห็นว่ากราฟของค่าเฉลี่ยที่ได้จากทั้งสามกรณีนั้นแทบจะไม่แตกต่างกันเลย ยกตัวอย่างเช่น ช่วงของจำนวนรุ่นที่ค่าเฉลี่ยมีค่าเข้าใกล้ค่าสูงสุดในแต่ละกรณีก็จะมีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคือประมาณรุ่นที่ 50 และค่าเฉลี่ยที่ได้ในรุ่นสุดท้ายของการคัดสรร (รุ่นที่ 200) ก็มีค่าใกล้เคียงกันนั่นคือ  $-8.3$  dB โดยประมาณ

จากการวิเคราะห์รูปที่ 5.8 ถึง 5.10 จะเห็นได้ว่า ข้อสรุปเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการคัดสรรความถี่พาร์ที่เหมาะสม ว่ากระบวนการแบบใดที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ไม่สามารถสรุปได้ อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่า กราฟต่างๆที่อยู่ในรูปที่ 5.8 ถึง 5.10 นั้นเป็นการนำเอากระบวนการที่ศึกษาเข้าไปทดลองกับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหนดเส้นต่างๆเพียงครั้งเดียว ซึ่งเป็นที่ทราบกันคืออยู่แล้วว่า กระบวนการทางพันธุศาสตร์นั้นเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับความน่าจะเป็น และกระบวนการสุ่ม ดังนั้น การศึกษาผลที่ได้จากการนำเอากระบวนการที่ศึกษาไปทดลองใช้เพียงครั้งเดียวเพื่อหาข้อสรุปนั้นอาจจะไม่เพียงพอ และถึงแม้ว่าจะได้ข้อสรุปที่สอดคล้องกัน ก็ถือได้ว่าข้อสรุปที่ได้ไม่มีความเหมาะสม

เพื่อให้ได้ข้อสรุปเกี่ยวกับชนิดของกระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการคัดสรรความถี่พาร์ที่เหมาะสม กระบวนการทางพันธุศาสตร์ต่างๆที่ต้องการศึกษา ควรจะต้องถูกทดลองด้วยจำนวนครั้งของการทดลองที่มากขึ้น และหาค่าเฉลี่ย เพื่อนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาศึกษาวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 5.11 ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาร์จำนวน 10 ความถี่ที่คัดสรรได้ในแต่ละรุ่น จากการดำเนินการคัดสรรโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบต่างๆ สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหนดเส้นที่ 1

จากรูปที่ 5.11 ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห်ที่ได้จากกรณีต่างๆ สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 ถูกแสดงไว้ อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยที่แสดงนั้น จะมีที่เฉพาะประชากรรุ่นที่ 20 30 40 50 60 70 80 90 100 150 และ 200 เท่านั้น โดยค่าเฉลี่ยที่ระบุในกราฟ ได้มาจากการดำเนินกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบต่างๆ (ทั้งสามแบบ) จำนวน 20 ครั้ง ยกตัวอย่างเช่น ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห်ที่แสดงในรูปที่ 5.11 สำหรับแบบที่อาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่ไม่มีการแบ่งทางความถี่ (แสดงด้วยสัญลักษณ์ กากบาท “From all  $f_{sub,final}$  with GA”) ที่รุ่นที่ 40 ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-8.9$  dB โดยค่า  $-8.9$  dB นี้ได้มาจากการเฉลี่ยค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห်จำนวน 10 ความถี่โดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่ไม่มีการแบ่งทางความถี่ จำนวนทั้งสิ้น 20 ครั้งของการทดลอง

พิจารณาค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ จากรูปที่ 5.11 สำหรับความถี่พาห်ก่อนดำเนินกระบวนการคัดสรร ทั้งสามแบบ ไม่ว่าจะเป็นแบบที่อาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์โดยที่ไม่มีการแบ่งความถี่ (GA) (แสดงด้วยสัญลักษณ์ ดอกจัน) แบบที่อาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่งความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อย (2 PGAs) (แสดงด้วยสัญลักษณ์ วงกลม) หรือแบบที่อาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่งความถี่เป็น 3 ย่านความถี่ย่อย (3 PGAs) (แสดงด้วยสัญลักษณ์ รูปสามเหลี่ยมคว่ำ) จะเห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยที่ได้ไม่แตกต่างกัน อยู่ในช่วงประมาณ  $-11$  ถึง  $-10.5$  dB ซึ่งค่าเหล่านี้เกิดจากความถี่พาห်ที่ยังมิได้ผ่านกระบวนการคัดสรร ดังนั้นค่าที่ได้ก็จะมียุคที่อยู่ประมาณ  $-10.5$  dB (จากรูปที่ 3.4 ในบทที่ 3) เนื่องจากจำนวนโหมดที่ใช้ในใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่ศึกษาเท่ากับ 100 โหมด

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ สำหรับความถี่พาห်ที่คัดสรรได้จากการดำเนินกระบวนการคัดสรรทั้งสามแบบ ไม่ว่าจะเป็นแบบที่อาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์โดยที่ไม่มีการแบ่งความถี่ (GA) (แสดงด้วยสัญลักษณ์ กากบาท) แบบที่อาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่งความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อย (2 PGAs) (แสดงด้วยสัญลักษณ์ รูปกลมตัด) หรือแบบที่อาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่งความถี่เป็น 3 ย่านความถี่ย่อย (3 PGAs) (แสดงด้วยสัญลักษณ์ รูปสี่เหลี่ยม) จะเห็นได้ว่า กระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่ไม่มีการแบ่งความถี่มีค่าเฉลี่ยที่ต่ำกว่าอีก 2 แบบที่เหลือ โดยไม่ว่าจะพิจารณาจากประชากรรุ่นที่เท่าใด ค่าเฉลี่ยที่ได้จากกระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่ไม่มีการแบ่งความถี่ ก็จะมีค่าต่ำกว่าแบบอื่นๆอยู่ประมาณ  $0.1$  ถึง  $0.3$  dB และเมื่อพิจารณากระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่งความถี่ ซึ่งมี 2 แบบ นั่นคือแบบที่แบ่งเป็น 2 ย่านความถี่ย่อย และแบบที่แบ่งเป็น 3 ย่าน

ความถี่ย่อย จะเห็นได้ว่า กระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่งความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อยจะมีค่าเฉลี่ยที่สูงที่สุด ดังนั้น จากการวิเคราะห์รูปที่ 5.11 สามารถสรุปได้ว่า การคัดสรรความถี่พาห်ที่เหมาะสม กระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบที่มีการแบ่งความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดเนื่องจากให้ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห်ที่คัดสรรได้สูงที่สุด

หมายเหตุ รูปกราฟในลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 5.11 สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2 และ 3 ได้ถูกศึกษาเช่นเดียวกัน ซึ่งได้ข้อสรุปเช่นเดียวกันกับสิ่งที่ได้สรุปไปแล้ว นั่นคือ การแบ่งแบบ 2 ย่านความถี่ย่อยให้ประสิทธิภาพในการคัดสรรความถี่พาห်ที่เหมาะสมมีประสิทธิภาพที่สุด

โดยสรุป ในบทนี้ สิ่งที่ได้ดำเนินการศึกษา คือการนำเอากระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบขนานมาประยุกต์ใช้ในการคัดสรรความถี่พาห်ที่เหมาะสม โดยที่มีการแบ่งความถี่ที่ต้องการจะคัดสรรออกเป็น 2 และ 3 ย่านความถี่ย่อย ซึ่งความถี่พาห်ที่คัดสรรได้ในแต่ละกรณีสำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดทั้งสามเส้นได้ถูกแสดง จะเห็นได้ว่าความถี่พาห်ที่คัดสรรได้ อยู่ ณ ตำแหน่งความถี่ซึ่งเหมาะสมกับการส่งสัญญาณพาห် รวมทั้งค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของความถี่พาห်ที่คัดสรร ได้มีค่าที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยที่ได้จากความถี่พาห်ก่อนการคัดสรร และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการคัดสรรความถี่พาห်ที่เหมาะสมของกระบวนการทางพันธุศาสตร์ทั้งสามแบบ คือ กระบวนการทางพันธุศาสตร์โดยที่ไม่มีมีการแบ่งความถี่ (GA) กระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่งความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อย และ กระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่งความถี่เป็น 3 ย่านความถี่ย่อย สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่งความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อย เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการคัดสรรความถี่พาห်ที่เหมาะสม

## บทที่ 6

### ประสิทธิภาพของความถี่พาห้ที่คัดสรรโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ในการส่ง สัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยบนใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

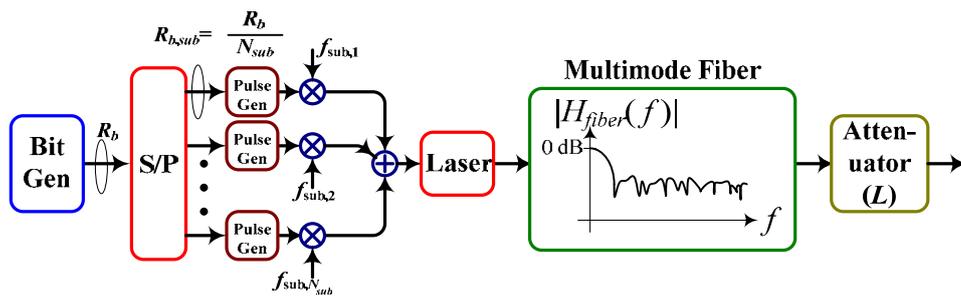
ในบทที่ผ่านมา การคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมในการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยบนใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดได้ถูกศึกษา โดยที่ความถี่พาห้ที่เหมาะสมสามารถถูกคัดสรรได้ด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่งทางความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อย อย่างไรก็ตาม สิ่งที่ยังไม่ได้นำไปศึกษาต่อก็คือ การนำเอาความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ไปประยุกต์ใช้กับระบบสื่อสารที่ใช้การส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อย เพื่อที่จะหาประสิทธิภาพของระบบสื่อสารดังกล่าวบนใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

การที่จะอธิบายประสิทธิภาพของระบบสื่อสารว่าดีหรือไม่เพียงใด ปัจจัยหนึ่งที่เป็นตัววัดค่าประสิทธิภาพก็คือ ค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด หรือ Bit-Error-Rate (BER) โดยที่ค่า BER ที่ต้องการในระบบควรมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ยกตัวอย่างเช่น ในระบบสื่อสารซึ่งทำการส่งข้อมูลระหว่างต้นทางและปลายทาง ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดควรจะน้อยกว่า  $10^{-9}$  (หมายความว่า ในบิตข้อมูล 1,000,000,000 บิตจะมีจำนวนบิตที่ถูกตัดสินใจผิดพลาดเพียง 1 บิต) จะเห็นได้ว่า ถ้าหากค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดมีค่ายิ่งน้อยลงเท่าไร การสื่อสารในระบบนั้นก็就会有ความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

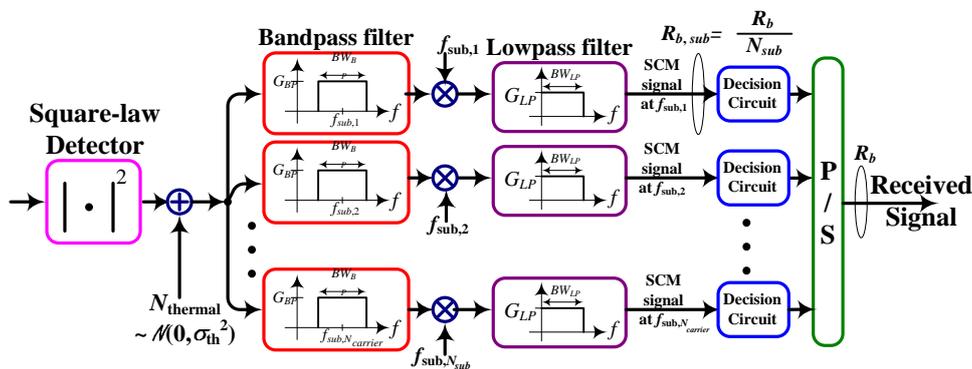
ดังนั้น เนื้อหาในบทนี้ จะเป็นการนำเอาความถี่พาห้ที่คัดสรรได้จากกระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่งความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อย มาประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารที่สนใจ โดยที่จะมีการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด ระหว่างกรณีที่ใช้ความถี่พาห้ที่ไม่ได้มาจากการคัดสรรและกรณีที่ใช้ความถี่พาห้ที่ได้มาจากการคัดสรร ซึ่งก่อนที่จะศึกษาเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดที่ได้จากความถี่พาห้ต่างๆ สิ่งที่ต้องถูกอธิบายในเบื้องต้น ก็คือ ระบบสื่อสารที่อาศัยการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยบนใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ว่ามีลักษณะและองค์ประกอบอย่างไรบ้าง ซึ่งเนื้อหาในส่วนนี้จะถูกอธิบายในหัวข้อย่อยถัดไป

6.1 ระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้อย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า สิ่งที่กำลังจะศึกษาในบทนี้คือการหาค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดของการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้อย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ดังนั้น ระบบสื่อสารที่เกี่ยวข้องกับการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้อย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด จะถูกอธิบายในหัวข้อต่อไปนี้



(ก) ภาคส่งและช่องส่งสัญญาณที่เป็นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด



(ข) ภาครับ

รูปที่ 6.1 ระบบสื่อสารที่อาศัยการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้อย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

ระบบสื่อสารด้วยแสงที่อาศัยการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้อย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ทั้งภาคส่ง (Transmitter) ช่องส่งสัญญาณ (Channel) ที่เป็นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด และภาครับ (Receiver) ได้ถูกแสดงในรูปแบบที่ 6.1 พิจารณาในส่วนของภาคส่ง (รูปที่ 6.1 (ก)) ข้อมูลที่ถูกสร้างโดยการสุ่มมาจากตัวสร้างข้อมูล (Bit Gen หรือ Bit Generator นั่นเอง) โดยอัตราเร็วของข้อมูล (Bit Rate) ที่ถูกสร้างขึ้นจะแทนด้วยสัญลักษณ์  $R_b$  ข้อมูลที่ถูกสุ่มขึ้นมาจะถูกสุ่มโดยอาศัยความน่าจะเป็นในการเกิดบิต “1” และบิต “0” เท่ากัน นั่นคือ ความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.5 โดยที่ข้อมูลนี้จะถูกส่งไปยังอุปกรณ์อีกตัวหนึ่งซึ่ง

เรียกว่า Serial-to-Parallel Converter (หรือ S/P) เพื่อทำการกระจายข้อมูลจาก 1 เส้นทางให้เป็น  $N_{sub}$  เส้นทางที่ถูกส่งไปพร้อมๆกัน เมื่อ  $N_{sub}$  คือจำนวนของสัญญาณพาห้ (หรือ จำนวนของความถี่พาห้) ที่จะใช้ในการส่งสัญญาณ ซึ่งเมื่อพิจารณาผลของการกระจายดังกล่าวทำให้ได้ค่าอัตราเร็วของข้อมูลในแต่ละเส้นทางย่อย ( $R_{b,sub}$ ) มีค่าเท่ากับ

$$R_{b,sub} = \frac{R_b}{N_{sub}} \quad (6.1)$$

จากสมการ (6.1) จะเห็นได้ว่าอัตราเร็วของข้อมูลในแต่ละเส้นทางย่อยมีค่าลดลง นั่นหมายความว่าความกว้างทางความถี่หรือ Bandwidth ที่แต่ละสัญญาณพาห้ที่จะส่งข้อมูลย่อยแต่ละอันก็จะมีค่าลดลง ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการจะส่งข้อมูลที่อัตราเร็ว  $R_b$  เท่ากับ 500 Mbps และมีจำนวนของความถี่พาห้เท่ากับ 10 ความถี่พาห้ อัตราเร็วของข้อมูลย่อยหรือ  $R_{b,sub}$  จะเท่ากับ  $500/10 = 50$  Mbps ซึ่งอัตราเร็วดังกล่าว เมื่อส่งผ่านย่านความถี่สูงของใยแก้วนำแสงจะมีค่าความกว้างทางความถี่หรือ Bandwidth เท่ากับ  $2 \times 50 = 100$  MHz เพราะคิดจากทั้งสองด้านของความถี่ของสัญญาณ (หรือ Double-Sideband bandwidth)

ข้อมูลย่อยต่างๆจะถูกส่งไปยังอุปกรณ์ Pulse Generator เพื่อแปลงข้อมูลเหล่านี้ให้เป็นสัญญาณพัลส์ ซึ่งรูปสัญญาณที่ใช้ในการส่งคือรูปสัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน (Gaussian Pulse Shape) จากนั้นสัญญาณพัลส์ที่ได้จะถูกย้ายความถี่ไปยังความถี่พาห้ต่างๆ โดยการกล้ำสัญญาณ (หรือ Modulation) กลายเป็นสัญญาณพาห้ย่อย ซึ่งสัญญาณพาห้ย่อยเหล่านี้ จะถูกนำมารวมกันกลายเป็นสัญญาณร่วม และถูกส่งไปยังตัว LASER ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณร่วมให้เป็นสัญญาณแสงเพื่อส่งผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดต่อไป สำหรับเนื้อหาเกี่ยวกับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั้นได้อธิบายโดยละเอียดแล้วในบทที่ 2 และ 3

สัญญาณเมื่อผ่านใยแก้วนำแสงมาแล้วจะไปถึงปลายทาง ซึ่งภาครับของระบบสื่อสารที่อาศัยการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยบนใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด แสดงดังรูปที่ 6.1 (ข) สัญญาณแสงที่รับมายังภาครับ จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ Square-law detector จากนั้นในระบบจะมีการเพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไปเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวนที่มีต่อระบบได้ โดยสัญญาณรบกวนที่เพิ่มเข้าไปจะเป็นสัญญาณรบกวนแบบ Thermal Noise ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และค่ากำลังเท่ากับ  $\sigma_n^2$  หรือสามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) คือ

$$f_{N_{thermal}}(n) = \mathcal{N}(0, \sigma_{th}^2) = \frac{1}{\sigma_{th} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{n^2}{\sigma_{th}^2}} \quad (6.2)$$

สมการ (6.2) เป็นสมการที่ใช้ในการสร้างสัญญาณสุ่มสำหรับสัญญาณรบกวน โดยที่ค่ากำลังของสัญญาณรบกวนนี้จะสัมพันธ์กับค่าความกว้างทางความถี่สัมพัทธ์ของสัญญาณรบกวน (Noise Equivalent Bandwidth) ที่เท่ากับ 8 GHz และค่ากระแส rms ของสัญญาณรบกวนแบบ Thermal Noise ที่เท่ากับ  $0.8 \mu A$

หลังจากที่เพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไปกับสัญญาณที่รับแล้ว สัญญาณทั้งหมดจะถูกแยกออกเป็น  $N_{sub}$  เส้นทาง โดยในแต่ละเส้นทางก็จะทำการคัดแยกเพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับแต่ละสัญญาณพาห่ออกมา ยกตัวอย่างเช่น ในเส้นทางย่อยที่ 1 ในรูปที่ 6.1 (ข) สัญญาณที่ถูกแบ่งออกมามจะถูกนำไปผ่านอุปกรณ์ Bandpass filter เพื่อกรองเอาเฉพาะสัญญาณพาห่อย่อยที่อาศัยความถี่พาห่  $f_{sub,1}$  ออกมาเท่านั้น จากนั้นสัญญาณพาห่อย่อยที่ 1 ก็จะถูกย้ายความถี่กลับมาที่ความถี่พื้นฐาน หรือทำการ Demodulation โดยอาศัย  $f_{sub,1}$  นั้นเอง สัญญาณพาห่ที่ถูกย้ายความถี่กลับมายังความถี่พื้นฐานก็จะถูกส่งผ่านไปยัง Lowpass filter เพื่อกรองเอาส่วนความถี่ต่ำที่สนใจให้ผ่านไปเท่านั้น เมื่อได้สัญญาณที่ต้องการแล้วก็จะทำการผ่านสัญญาณดังกล่าวไปยังวงจรตัดสินใจ (Decision Circuit) เพื่อทำการตัดสินใจว่าบิตข้อมูลย่อยที่รับมาเป็นบิต “1” หรือบิต “0” บิตข้อมูลที่ได้มาจากแต่ละสัญญาณพาห่อย่อยก็จะถูกนำมารวมกันอีกครั้งหนึ่งด้วยอุปกรณ์ Parallel-to-Serial Converter (หรือ P/S) ซึ่งจะทำได้ข้อมูลทั้งหมดออกมา

สำหรับการหาค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดนั้น จะทำโดยการเปรียบเทียบบิตข้อมูลที่ส่งจากภาคส่งและบิตข้อมูลที่ได้รับตรงภาครับว่ามีอัตราการผิดพลาดมากหรือน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$BER = \frac{n_{bit,error}}{N_{bit,sent}} \quad (6.3)$$

เมื่อ  $N_{bit,sent}$  คือ จำนวนของบิตข้อมูลที่ถูกส่งออกไปทั้งหมด

$n_{bit,error}$  คือ จำนวนของบิตข้อมูลที่ถูกตัดสินใจผิดพลาด

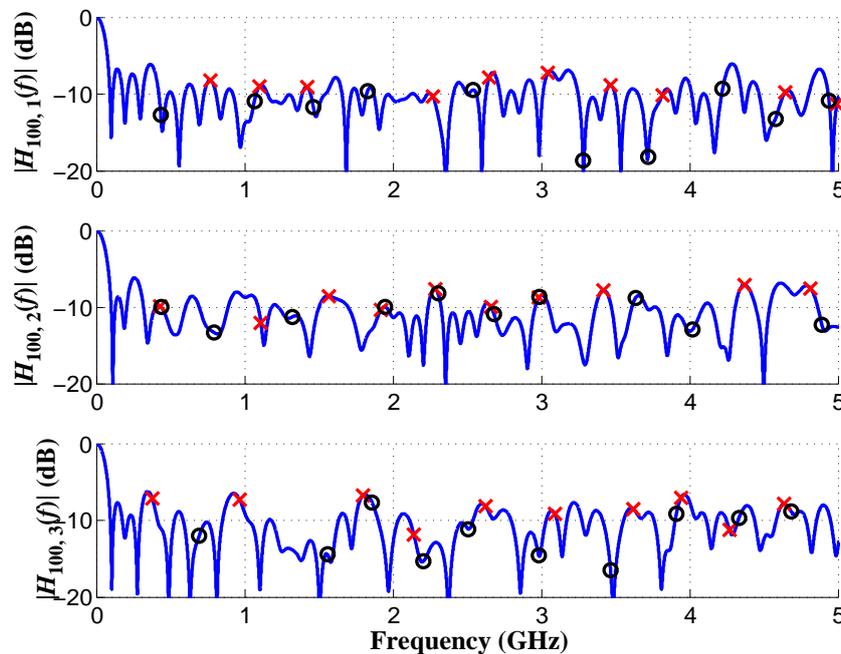
สำหรับในระบบการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงนั้น การศึกษาค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดนั้น โดยทั่วไปจะทำการศึกษาเมื่อเทียบกับค่ากำลังงานของสัญญาณแสงที่ภาครับต้องการ หรือ  $P_{r,optical,req}$  (หรือ required received optical power) ซึ่งโดยทั่วไป เมื่อค่ากำลังงานของสัญญาณแสงที่ภาครับต้องการมีค่ามากขึ้น ค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดก็จะมีค่าที่ลดลง

จากรูปที่ 6.1 เราสามารถนำเอาความถี่พาห้ที่คัดสรรมาประยุกต์ใช้เพื่อหาประสิทธิภาพในแง่ของความน่าจะเป็นของการตัดสินใจผิดพลาด ว่าจะมีค่าที่ดีหรือไม่ ซึ่งผลการศึกษาก็จะแสดงในหัวข้อถัดไป

## 6.2 ประสิทธิภาพของความถี่พาห้ที่คัดสรรโดยกระบวนการทางพันธุศาสตร์

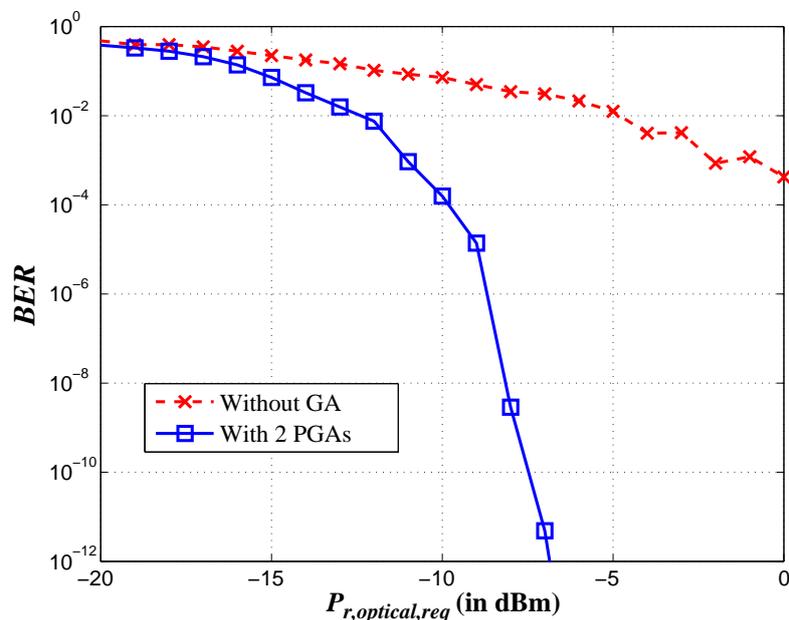
สำหรับการหาค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดนี้ ระบบที่จะทำการจำลองจะสมมติให้

- ย่านความถี่ที่ใช้ในการส่งสัญญาณ คือความถี่ตั้งแต่ 0.3 ถึง 5 GHz
- ความถี่พาห้ที่จะใช้มีจำนวน 10 ความถี่ โดยมาจาก 2 กรณี คือ
  - ความถี่พาห้ที่สุ่มขึ้นมาโดยที่ไม่มีการคัดสรร
  - ความถี่พาห้ที่ผ่านการคัดสรร โดยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่งทางความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อย ที่ผ่านการดำเนินการกระบวนการมา ณ รุ่นประชากรที่ 50
- อัตราเร็วของข้อมูลรวมเท่ากับ 500 Mbps ดังนั้นอัตราเร็วของข้อมูลสำหรับแต่ละสัญญาณพาห้จะมีค่าเท่ากับ 50 Mbps
- โยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจำนวน 3 เส้นถูกนำมาใช้เป็นช่องส่งสัญญาณ (จากรูปที่ 4.2) ความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ ทั้งก่อนที่จะมีการคัดสรรและหลังจากผ่านกระบวนการคัดสรรแล้ว สำหรับโยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดทั้งสามเส้น แสดงดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แสดงความถี่พาห้จำนวน 10 ความถี่ ทั้งก่อน (แสดงด้วยสัญลักษณ์ วงกลม) และหลังการคัดสรร (แสดงด้วยสัญลักษณ์กากบาท) สำหรับโยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด 3 เส้น

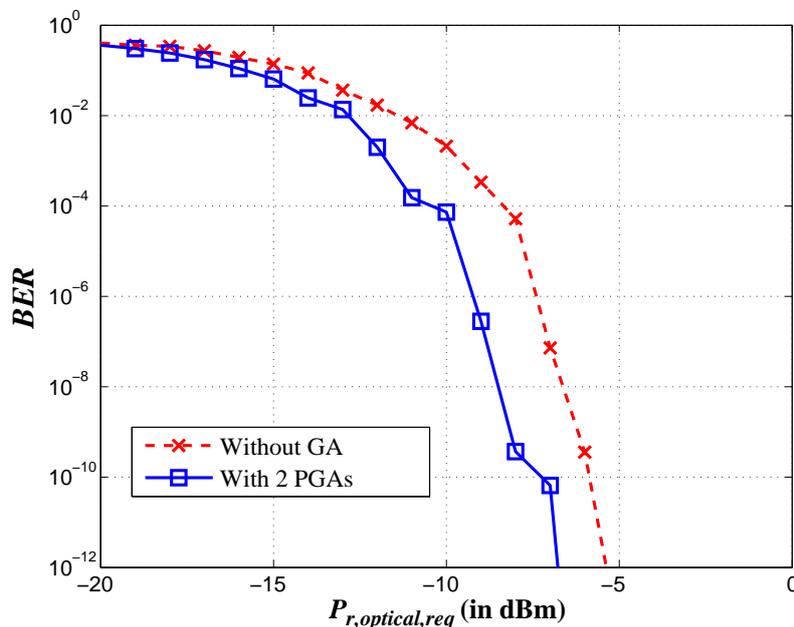
ความถี่พาท้ทั้งก่อนและหลังการคัดสรร ด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่งทางความถี่ เป็น 2 ย่านความถี่ย่อย ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.2 โดยความถี่พาท้มีจำนวน 10 ความถี่ และใยแก้วนำแสงที่ นำมาพิจารณามีจำนวน 3 เส้นตามที่แสดงดังรูป จากรูปจะเห็นได้ว่า ความถี่พาท้ที่ได้จากการคัดสรร อยู่ ณ ความถี่ซึ่งมีค่าขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่สูงกว่าความถี่พาท้ที่มีได้ผ่านการคัดสรร ซึ่ง เนื้อหาในส่วนนี้ได้ถูกอธิบายโดยละเอียดแล้วในบทที่ 5 สำหรับในหัวข้อนี้ ความถี่พาท้ทั้งหมดจะถูก นำมาประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารที่ได้อธิบายไว้แล้วในรูปที่ 6.1 ซึ่งผลการจำลองเพื่อหาค่าความน่าจะเป็น ในการตัดสินใจผิดพลาดแสดงดังรูปที่ 6.3 ถึง 6.5



รูปที่ 6.3 ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด (BER) สำหรับการสื่อสารผ่านระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาท้ย่อยบน สายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1

กราฟแสดงความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดสำหรับระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณ พาท้ย่อยบนใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 ถูกแสดงดังรูปที่ 6.3 โดยกราฟแสดงความน่าจะเป็น ในการตัดสินใจผิดพลาดมาจาก 2 กรณี คือ จากความถี่พาท้ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการคัดสรร (แสดงด้วย สัญลักษณ์ กากบาทและเส้นประ) และจากความถี่พาท้ซึ่งผ่านกระบวนการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุ ศาสตร์ที่มีการแบ่งความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อย (แสดงด้วยสัญลักษณ์ สี่เหลี่ยมและเส้นทึบ) จากรูป จะเห็น ได้ว่าค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดจากความถี่พาท้ที่ไม่ผ่านการคัดสรรนั้น แม้จะเพิ่มค่ากำลัง ของสัญญาณแสงที่ภาครับต้องการก็ไม่ทำให้ค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดลดน้อยลงเพียงพอ และเมื่อพิจารณากรณีของความถี่พาท้ที่ได้จากการคัดสรร จะเห็นได้ชัดเจนว่า กราฟของความน่าจะเป็นใน

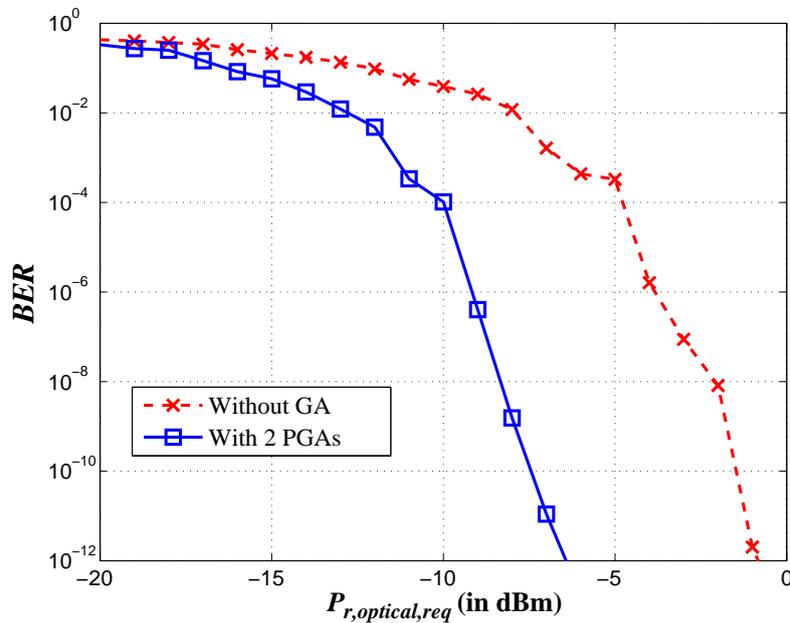
การตัดสินใจผิดพลาดมีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด โดยที่หากต้องการความน่าจะเป็นที่  $10^{-9}$  ค่ากำลังของของสัญญาณแสงที่ภาครับต้องการจะมีค่าเป็น  $-8$  dBm (หมายเหตุ ในการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสง โดยทั่วไปค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดที่ต้องการจะมีค่าอยู่ในช่วง  $10^{-9}$ ) จากรูปนี้ จะเห็นได้ว่า การนำเอาการคัดสรรความถี่พหุมาประยุกต์ใช้ ทำให้การสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม รูปที่ 6.3 นี้เป็นเพียงการพิจารณาผลจากใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 เท่านั้น ยังมีผลของการศึกษาในเรื่องนี้สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2 และ 3 ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.4 และ 6.5 โดยลำดับ



รูปที่ 6.4 ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด (BER) สำหรับการสื่อสารผ่านระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพหุขั้วบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2

พิจารณารูปที่ 6.4 สำหรับกรณีศึกษาเกี่ยวกับความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด สำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าความน่าจะเป็นที่ได้จากกรณีศึกษาที่อาศัยความถี่พหุที่ผ่านการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์นั้น มีค่าที่ต่ำกว่าค่าความน่าจะเป็นที่ได้จากกรณีศึกษาที่อาศัยความถี่พหุที่ไม่ได้ผ่านการคัดสรร ยกตัวอย่างเช่น ที่ค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ภาครับต้องการเท่ากับ  $-8$  dBm ค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดที่ได้จากความถี่พหุที่ผ่านการคัดสรรและไม่ผ่านการคัดสรรมีค่าเป็น  $10^{-8}$  และ  $10^{-4}$  โดยลำดับ หรือหากพิจารณาที่ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ  $10^{-9}$  ค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ภาครับต้องการจากกรณีความถี่พหุที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการคัดสรรจะมีค่าเท่ากับ  $-7.5$  และ  $-6$

dBm โดยลำดับ ซึ่งสำหรับกรณีนี้ สามารถสรุปได้ว่า การนำเอาความถี่พาห้ที่คัดสรรมาประยุกต์ใช้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

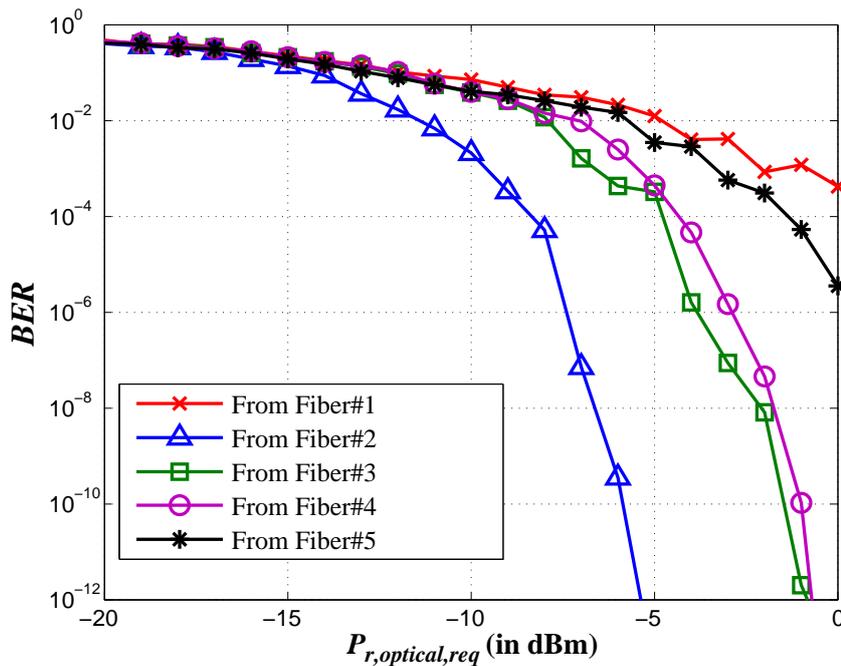


รูปที่ 6.5 ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด (BER) สำหรับการสื่อสารผ่านระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 3

ในทำนองเดียวกัน ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดสำหรับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 3 แสดงดังรูปที่ 6.5 จากรูปจะเห็นได้ว่าความน่าจะเป็นที่ได้จากกรณีที่อาศัยความถี่พาห้ที่มาจาก การคัดสรรมีค่าที่ต่ำกว่าความน่าจะเป็นที่ได้จากความถี่พาห้ที่ไม่ผ่านการคัดสรร โดยที่ ที่ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ  $10^{-9}$  ค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ภาครับต้องการจากกรณีความถี่พาห้ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการคัดสรรจะมีค่าเท่ากับ -7.8 และ -2 dBm โดยลำดับ

จากรูปที่ 6.3 ถึง 6.5 เราสามารถสรุปผลของการนำเอาความถี่พาห้ที่ได้มาจากการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ ว่าสามารถทำให้ประสิทธิภาพในแง่ของความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดดีขึ้น นั่นคือค่าความน่าจะเป็นที่ได้มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม ยังมีอีกประเด็นที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด นั่นคือ ความน่าเชื่อถือของประสิทธิภาพที่ได้รับว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อยเพียงใดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงใยแก้วนำแสง (หรือในทางเทคนิคอาจจะมาจากการที่การหน่วงเวลาในใยแก้วนำแสงมีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในระบบ) ซึ่งหากจะพิจารณาในประเด็นนี้ เราจำเป็นจะต้องนำเอากราฟความน่าจะเป็นที่ได้จากใยแก้วนำแสงประเภท

หลายโหมคทั้งสามมาพิจารณาพร้อมกัน และเพื่อให้การศึกษามีข้อมูลที่มากขึ้น ในรูปที่ 6.6 และ 6.7 ที่จะแสดงต่อไป จะมีการนำเอาผลของการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมที่ได้จากใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมคเส้นที่ 4 และ 5 เข้ามาพิจารณา โดยที่ผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงทั้งสองเส้นนี้มีได้ถูกแสดงด้วย

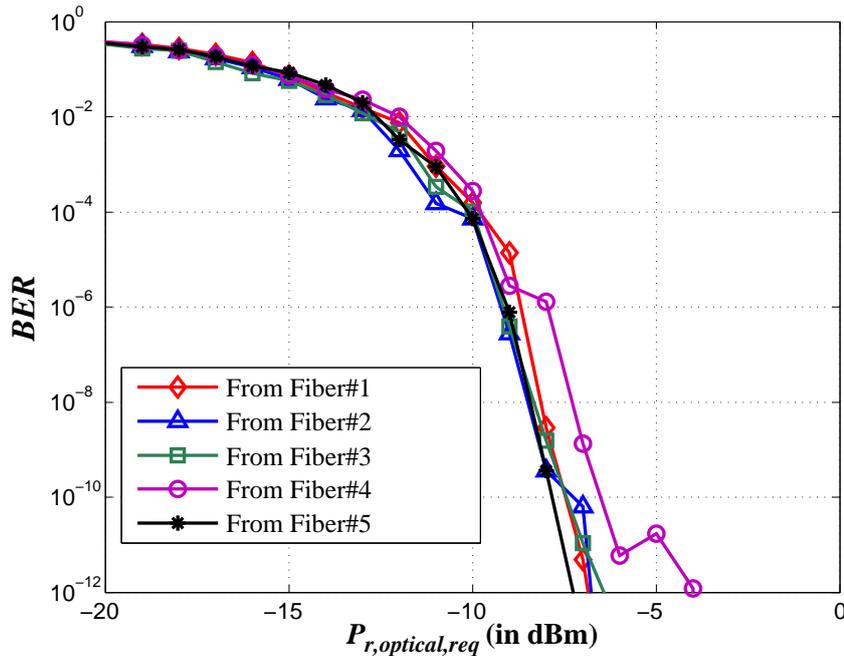


รูปที่ 6.6 ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด (BER) ที่ได้จากความถี่พาห้ที่ไม่ผ่านการคัดสรร สำหรับการสื่อสารผ่านระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมคจำนวน 5 เส้น

จากรูปที่ 6.6 จะเห็นได้ว่าค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดที่ได้จากใยแก้วนำแสงทั้ง 5 เส้นไม่มีความสอดคล้องกันเลย นั่นหมายความว่า ในทางปฏิบัติ หากมีการสุ่มความถี่พาห้ในการนำไปเพื่อใช้ในการส่งสัญญาณพาห้ย่อยบนใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมค ประสิทธิภาพในระบบที่ได้รับในแง่ของความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด ไม่มีความน่าเชื่อถือเลย จากรูปจะเห็นได้ว่าในบางกรณี กราฟของความน่าจะเป็นที่ได้อาจจะอยู่ในช่วงที่สามารถนำไปใช้งานในทางปฏิบัติได้ ยกตัวอย่างเช่น กราฟความน่าจะเป็นที่ได้จากใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 แต่สำหรับใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1 และ 5 แล้ว ความน่าจะเป็นที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้ส่งสัญญาณในทางปฏิบัติได้เพราะความน่าจะเป็นที่แสดงอยู่ในช่วง  $10^{-1}$  หรือมากกว่า

และถึงแม้หากพิจารณาความน่าจะเป็นที่ได้จากใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 ว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้ แต่สิ่งที่จะต้องพึงระลึกไว้ก็คือ ความถี่พาห้ที่ใช้ในกรณีนี้นั้น มาจากการสุ่ม ซึ่งในครั้งอื่นๆ

สำหรับใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 อาจจะไม่ได้รับความถี่พาห้ที่เหมาะสมเช่นนี้ก็ไม่ได้ ดังนั้น โดยสรุปจากรูปที่ 6.6 จะเห็นได้ว่า การนำเอาความถี่พาห้ที่ไม่ได้ผ่านการคัดสรรมาประยุกต์ใช้กับระบบสื่อสารผ่านระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั้น ทำให้ประสิทธิภาพของระบบที่ได้รับมีความไม่น่าเชื่อถือ



รูปที่ 6.7 ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด (BER) ที่ได้จากความถี่พาห้ที่ผ่านการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ สำหรับการสื่อสารผ่านระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยบนสายใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจำนวน 5 เส้น

พิจารณารูปที่ 6.7 โดยเปรียบเทียบกับรูปที่ 6.6 จะเห็นได้ชัดว่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดที่ได้มาจากการนำเอาความถี่พาห้ที่ผ่านการคัดสรรโดยกระบวนการทางพันธุศาสตร์มาประยุกต์ใช้นั้น มีลักษณะของค่าความน่าจะเป็นที่ได้อยู่ในช่วงเดียวกัน ไม่ขึ้นอยู่กัเส้นของใยแก้วนำแสงที่พิจารณา และไม่ขึ้นอยู่กัค่าความน่าจะเป็นที่ได้ก่อนหน้าที่จะมีการคัดสรร ซึ่งประเด็นนี้มีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก เพราะสามารถทำให้ระบบสื่อสารหรือความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดที่ได้รับมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เราสามารถระบุได้ว่าหากต้องการค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดเท่ากับ  $10^{-9}$  ค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ภากรับต้องการจะอยู่ในช่วง -8.5 ถึง -7 dBm (ซึ่งในขณะที่จากรูปที่ 6.6 ไม่สามารถระบุได้เลย)

โดยสรุป ในบทนี้ประสิทธิภาพของระบบสื่อสารที่อาศัยการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาหีย่อยบนใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดได้ถูกศึกษา ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดของระบบได้ถูกวิเคราะห์ โดยนำเอาความถี่พาห်ที่ได้จาก 2 กรณียมาใช้ในการส่งสัญญาณพาห် นั่นคือ ความถี่พาห်ที่ไม่ได้ผ่านการคัดสรร และความถี่พาห်ที่ผ่านการคัดสรรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่งทางความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อย ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การนำเอาความถี่พาห်ที่ผ่านการคัดสรรมาใช้ในระบบ ทำให้ค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดมีค่าลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับค่าความน่าจะเป็นที่ได้จากการนำเอาความถี่พาห်ที่ไม่ได้ผ่านการคัดสรรมาใช้ในระบบ นอกจากนี้ ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดที่ได้จากความถี่พาห်ที่ผ่านการคัดสรร ก็มีความน่าเชื่อถือและไม่ขึ้นอยู่กับใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดว่าเป็นใยแก้วนำแสงเส้นใด ซึ่งคุณสมบัติทั้งสองดังกล่าว ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการคัดสรรความถี่พาห်ที่เหมาะสมด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ ทำให้ระบบสื่อสารที่มีการส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาหีย่อยบนใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดมีประสิทธิภาพมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้ เป็นการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปเป็นแบบจำลองในการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในระบบส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อยบนใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ (Genetic Algorithm) และนำผลการคัดสรรความถี่พาห้ที่ได้มาประยุกต์ใช้เพื่อส่งสัญญาณพาห้ย่อยในระบบเพื่อหาประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณ

จากการศึกษาผลตอบสนองทางความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองทางความถี่โดยการนำเอาการกระจายทางสถิติแบบเกาส์เซียนมาประยุกต์ใช้กับการหน่วงทางเวลาของโหมดนำแสงต่างๆในใยแก้วนำแสง และพบว่า ณ ย่านความถี่สูงของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด มีแถบผ่านความถี่ (Passbands) อีกมากมายที่สามารถนำมาใช้เป็นช่องส่งสัญญาณได้ หากแต่แถบผ่านความถี่เหล่านี้ อยู่ ณ ความถี่ต่างๆที่แตกต่างกันไป โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าหน่วงทางเวลาไป แถบผ่านความถี่เหล่านี้ก็จะเปลี่ยนตำแหน่งไป อย่างไรก็ตาม ยังมีลักษณะที่เป็นลักษณะร่วมที่สำคัญในการสื่อสาร นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ และความกว้างทางความถี่ (Bandwidth) ของแถบผ่านความถี่ต่างๆ ซึ่งจากการศึกษา พบว่า ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่นั้นมีความสัมพันธ์กับค่าจำนวนโหมดในใยแก้วนำแสง และความกว้างทางความถี่ของแถบผ่านความถี่ต่างๆนั้นจะสัมพันธ์กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหน่วงทางเวลาของโหมดในใยแก้วนำแสง

สำหรับการนำเอาย่านความถี่สูงของใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดไปใช้ในการส่งสัญญาณนั้น จำเป็นจะต้องมีการเลือกความถี่พาห้ที่เหมาะสม โดยในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมโดยอาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะ ได้มาจากการคัดสรรที่อาศัยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ที่มีการแบ่งทางความถี่เป็น 2 ย่านความถี่ย่อย เพราะจะทำให้ค่าเฉลี่ยของขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากความถี่พาห้ที่คัดสรรได้มีค่าที่สูงกว่ากรณีอื่นๆที่ศึกษา โดยที่รุ่นของประชากรที่น่าจะนำไปใช้ในการคัดสรร อยู่ที่ประชากรรุ่นที่ 50 เพราะว่าหลังจากประชากรรุ่นที่ 50 ไปแล้วค่าเฉลี่ยที่ได้มิได้มีการเพิ่มขึ้นมากนัก

และท้ายที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำเอาความถี่พาห้ที่คัดสรรได้ด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ มาประยุกต์ใช้กับระบบจำลองเพื่อส่งสัญญาณร่วมด้วยสัญญาณพาห้ย่อย บนใยแก้วนำแสงประเภทหลาย โหมด โดยมีการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาด (Bit-Error-Rate) ที่ได้กับกรณีที่ใช้ ความถี่พาห้ที่มีได้มีการคัดสรร ซึ่งผลการวิจัย พบว่า ค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดที่ได้จาก การนำเอาความถี่พาห้ที่คัดสรรได้มาใช้ในระบบมีค่าที่ดีขึ้น (นั่นคือมีค่าที่ต่ำลง) อย่างเห็นได้ชัด เมื่อ เปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นที่ได้จากการนำเอาความถี่พาห้ที่ไม่ได้ผ่านการคัดสรรมาใช้ นอกจากนี้ ความน่าเชื่อถือของความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดที่ได้จากความถี่พาห้ที่คัดสรร มีความน่าเชื่อถือ ค่อนข้างมาก นั่นคือ เมื่อมีการเปลี่ยนใยแก้วนำแสงเป็นเส้นอื่น ค่าความน่าจะเป็นที่ได้ก็ยังคงมีค่าอยู่ในช่วง ที่ดีเหมือนเดิม

โดยสรุป งานวิจัยชิ้นนี้ ได้มีการศึกษาผลตอบแทนของความถี่ของใยแก้วนำแสงประเภทหลาย โหมด การประยุกต์เทคนิคกระบวนการทางพันธุศาสตร์เพื่อใช้ในการคัดสรรความถี่พาห้ที่เหมาะสม และมีการศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดโดยการส่งสัญญาณร่วม ด้วยสัญญาณพาห้ย่อยที่อาศัยความถี่พาห้ที่คัดสรรมาได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่า โดยรวมแล้ว ผลของการศึกษาวิจัย ชิ้นนี้ ทำให้การสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสง ณ ย่านความถี่สูง มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Gerd Keiser, *Optical Fiber Communications*, 3<sup>rd</sup> edition, McGraw-Hill, Inc.
- [2] Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley&Sons, Inc.
- [3] M.Webster and et al., “A multi-level subcarrier modulation technique for10Gb/s installed base multimode fiber links,” in *Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2001)*, 2001, pp.416-417.
- [4] L. Raddatz and et al., “High bandwidth multimode fiber links using subcarrier multiplexing in vertical-cavity surface-emitting lasers,” in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC’98)*, 1998, pp.358–359.
- [5] C.C. Lee and S. Chi, “Three-wavelength-division-multiplexed multi-channel subcarrier-multiplexing transmission over multimode fiber with potential capacity of 12 Gb/s,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Volume 11, August 1999, pp.1066–1068.
- [6] L. Raddatz and I. H. White, “Overcoming the modal bandwidth limitation of multimode fiber by using passband modulation,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Volume 11, February 1999, pp.266–268.
- [7] E. J. Tyler and et al., “Transmission of a single 2.5 Gb/s subcarrier modulated channel over 300 m of 62.5  $\mu\text{m}$  multimode fiber,” in *Proc. IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS 2000)*, Volume 2, November 2000, pp.354–355.
- [8] S. Kanprachar and I. Jacobs, “Bandpass transmission characteristics of multimode fiber,” in *Proc. Optics in the Southeast Meeting*, Clemson University, Clemson, SC, October 2001.
- [9] Q. Shi, “Error performance of OFDM-QAM in subcarrier multiplexed fiber-optic transmission,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Volume 9, June 1997, pp.845–847.
- [10] B. J. Dixon, R. D. Pollard, and S. Iezekiel, “Orthogonal frequency-division multiplexing in wireless communication systems with multimode fiber feeds,” *IEEE Transactions Microwave Theory Technology*, Volume 49, August 2001, pp.1404–1409.
- [11] Surachet Kanprachar and Ira Jacobs, “Diversity coding for subcarrier multiplexing on multimode fibers,” *IEEE Transactions on Communications*, Volume51, September 2003, pp.1546-1553.
- [12] John Holland, “Adaptation in natural and artificial systems,” *The university of Michigan Press*, Ann Arbor, 1975.
- [13] M. A. Abed and S. Ghanta, “Optimizing logical topology of lightwave network architecture (LNA) using genetic algorithms,” *The Fifteenth Annual International Phoenix Conference on Computers and Communications*, 27-29 March 1996.
- [14] R. Inkret, B. Mikac, and I. Podnar, “A heuristic approach to wavelength assignment in all-optical networks,” *The Ninth Mediteranean Electrotechnical Conference 1998*, Volume 2, 18-20 May 1998.
- [15] M. Markaki, I. Kassotakis, and A. Vasilakos, “An adaptive genetic algorithm for channel sharing in high speed networks,” *Global Telecommunications Conference 1998*, Volume 5, 8-12 Nov. 1998.

- [16] U. Mahlab and E. Dolev, "Optical Transmission Links Design Technique," *2006 International Conference on Transparent Optical Networks*, Volume 1, June 2006.
- [17] J.J. Liang and et al., "Wavelength detection in FBG sensor network using tree search DMS-PSO," *IEEE Photonics Technology Letters*, Volume 18, Issue 12, June 2006, Page(s):1305 - 1307
- [18] Hao Li and et al., "EDFA spectral equalization by using a genetic algorithm," *The Fifth Electronics Packaging Technology*, 10-12 December 2003.
- [19] Wen Zhang, and et al., "Design of fiber-optical parametric amplifiers by genetic algorithm," *IEEE Photonics Technology Letters*, Volume 16, Issue 7, July 2004, Page(s):1652 - 1654
- [20] G. Tremblay and et al., "Optimizing fiber Bragg gratings using a genetic algorithm with fabrication-constraint encoding," *Journal of Lightwave Technology*, Volume 23, Issue12, December 2005, Page(s):4382 – 4386
- [21] Surachet Kanprachar and Somyot Kaitwanidvilai, "Design of Suitable Subcarriers in Subcarrier Multiplexing on Multimode Fiber by Genetic Algorithm," *ECTI-CON 2005*, Chonburi, Thailand, May 12-13, 2005.

## ภาคผนวก

### - ผลงานวิจัยที่นำเสนอในการประชุมวิชาการนานาชาติ

1. P. Benprom, C. Pinthong, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai, and S. Kanprachar, "Suitable Subcarrier Design for Subcarrier Multiplexing on Multimode Fiber by Parallel Genetic Algorithm," *The 24<sup>th</sup> International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC2009)*, Jeju KAL Hotel, Jeju, Korea, July 5 – 8, 2009.
2. W. Naku, C. Pinthong, and S. Kanprachar, "Characteristics of Multimode Fibers at High Frequency Region using Gaussian Distribution," *ECTI-CON 2011*, Khon Kaen, Thailand, May 17-19, 2011.

### - ผลงานวิจัยที่นำเสนอในการประชุม นักวิจัยรุ่นใหม่...พบ...เมธีวิจัยอาวุโส สกว.

1. P. Benprom, C. Pinthong, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai, and S. Kanprachar, "Suitable Subcarrier Design for Subcarrier Multiplexing on Multimode Fiber by Parallel Genetic Algorithm," การประชุม นักวิจัยรุ่นใหม่...พบ...เมธีวิจัยอาวุโส สกว. ครั้งที่ 9 ระหว่างวันที่ 15 – 17 ตุลาคม 2552
2. S. Kanprachar and I. Ngamroo, "Performance of Subcarrier Multiplexing on Multimode Fiber using Parallel Genetic Algorithm in Designing Suitable Subcarriers," การประชุม นักวิจัยรุ่นใหม่...พบ...เมธีวิจัยอาวุโส สกว. ครั้งที่ 10 ระหว่างวันที่ 14 – 16 ตุลาคม 2553

### - รางวัลที่ได้รับจากการนำเสนองานวิจัย

1. เกียรติบัตรเสนองานวิจัยดีเยี่ยมแบบบรรยาย ในการประชุม นักวิจัยรุ่นใหม่..พบ..เมธีวิจัยอาวุโส สกว. ครั้งที่ 10 ระหว่างวันที่ 14 – 16 ตุลาคม 2553

# Suitable Subcarrier Design for Subcarrier Multiplexing on Multimode Fiber by Parallel Genetic Algorithm

Phongnawin Benprom<sup>1</sup>, Chairat Pinthong<sup>2</sup>, Somyot Kaitwanidvilai<sup>3</sup>, Issarachai Ngamroo<sup>4</sup> and Surachet Kanprachar<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 5</sup>*Faculty of Engineering, Naresuan University*

*99 Moo 9 Phitsanulok-Nakornsawan Rd., Muang, Phitsanulok 65000 Thailand*

<sup>3, 4</sup>*Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand*

<sup>1, 2, 5</sup>*Tel: +66-55-964357 Fax: +66-55-964005*

*Email: surachetka@nu.ac.th*

## Abstract

Genetic algorithm (GA) has been shown to be an alternative for achieving suitable subcarriers in subcarrier multiplexing (SCM) on multimode fiber. Because of the relatively-flat frequency response at high frequency range of the multimode fiber, the suitable subcarriers can be determined by applying GA to many divided frequency ranges simultaneously; that is, Parallel GA. In this paper, parallel GA is adopted for searching suitable subcarriers in SCM on multimode fiber. Thirty suitable subcarriers, which are not located at any nulls in the frequency response of multimode fiber, are determined. These subcarriers are then used for transmitting many subcarrier signals through the high frequency bands of multimode fiber resulting in a total data rate of 15 times larger than the data rate obtaining from the 3-dB intermodal bandwidth.

**Keywords:** Multimode Fiber, Subcarrier Multiplexing, Genetic Algorithm

## 1. Introduction

Multimode fiber has been widely used as a communication channel for more than 30 years. The characteristic in terms of supporting data rate has been known to be 300 to 500 MHz-km, which is from its 3-dB intermodal bandwidth. This makes multimode fiber less attractive comparing to singlemode fiber. However, it was shown that the available bandwidth of the multimode fiber is not only from its 3-dB intermodal bandwidth but also from the high-frequency passbands. It was shown that the frequency response of multimode fiber at frequencies much higher than the 3-dB intermodal bandwidth is relatively flat with an amplitude of 6 to 10 dB below the amplitude at zero frequency [1, 2]. One major advantage of these high frequencies is that they can be used as a medium to transmit a high bit rate signal. Many techniques have been applied to MF in order to make use of these available passbands; for example, an offset launch has been used in [3] and in [4] the electronic equalization

has been adopted. It has been shown in [5] that a high bit rate signal (up to 1.45 Gbps) can be transmitted over a distance of 5 km using subcarrier multiplexing (SCM) with multimode fiber (MF) system. Since the frequency response of multimode fiber at these high frequencies is not totally flat, there are many nulls within this passband region. If some subcarriers are located at deep nulls, the received signals from those subcarriers will be degraded significantly. The effects of having some subcarriers located at deep nulls can be overcome by using a technique called "Diversity coding" [6]. Applying theory from [6], the effects of having different number of subcarriers and different bandpass bandwidths on the achieved bit-rate and distance were investigated in [7]. However, in [6] and [7], there is no guarantee that the chosen subcarriers will not be at the nulls. To improve the system performance, there should be a way to determine suitable frequencies for being used as subcarriers in the system before the real transmission. It has been shown in [8] that a well-known algorithm called genetic algorithm can be used as the way for finding suitable subcarriers before the real transmission takes place. In [8], six subcarriers were determined using GA. However, considering the passbands in the high frequency range of multimode fiber, it is seen that there are many available passbands to be utilized. In this paper, more suitable subcarriers are determined by using parallel GA in order to help reduce the number of iterations in GA process.

The organization of this paper is as follows. In Section 2, the multimode fiber model is discussed. And, the basic background on GA and parameters used in this paper are described in Section 3. The results of applying parallel GA for searching suitable subcarriers in multimode fiber and discussion are shown in Section 4. And, finally, in Section 5, the conclusion is given.

## 2. Multimode Fiber Model

The impulse response of the multimode fiber with  $N$  guided modes is just the combination of the delta functions corresponding to different delays ( $t_{d,n}$ ) [2, 5]; that is,

$$h_{fiber}(t) = \sum_{n=1}^N \delta(t - t_{d,n}) \quad (1)$$

Taking the Fourier transform of the impulse response in (1), the frequency response of the complex envelope of the multimode fiber with  $N$  guided modes is given by

$$H_{fiber}(f) = \sum_{n=1}^N e^{-j2\pi f t_{d,n}} \quad (2)$$

From (2), it is seen that to get the frequency response of the multimode fiber, the delays for all  $N$  guided modes have to be found; that is, the modal index of each guided mode has to be found. However, for practical multimode fibers the number of guided modes has to be large to avoid modal noise; thus, many time delays have to be determined in order to construct the frequency response. It has been shown [2, 6] that these time delays can be modeled to be independent realizations of a random variable, which is uniformly distributed about an average time delay ( $t_{d,avg}$ ) with the maximum deviation of  $t_{d,dev}$ . Note that  $t_{d,avg}$  and  $t_{d,dev}$  depend on the fiber length, the number of guided modes, and the refractive index profile of the fiber.

Applying the maximum time deviation of 5 ns, and number of guided modes to be 100 modes; three different frequency responses of the complex envelope of the multimode fiber in units of dB are shown in Fig.1.

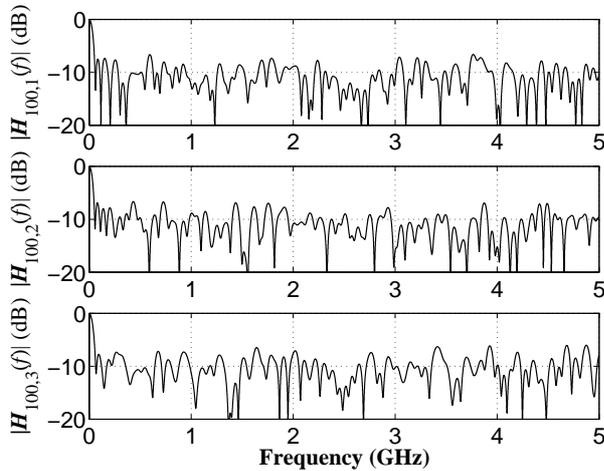


Fig. 1 Three magnitude responses of complex envelope of the multimode fiber modeled, each with  $N = 100$  and  $t_{d,dev} = 5$  ns.

Considering the magnitude responses in Fig.1, it is seen that they are almost identical for the response below 0.2 GHz. That is, if the signal is transmitted over the 3-dB intermodal bandwidth of this fiber, the achieved data rate will be approximately 200 Mbps since the 3-dB bandwidth is roughly 200 MHz. However, it is seen that there are many passbands at high frequencies, which can be used to carry many signals. Combining data rates from these passbands, it is clearly seen that the total data rate that can be

achieved will be significantly higher than the data rate achieving only from the 3-dB intermodal bandwidth. However, there is one question regarding how to choose the suitable subcarriers since there are many nulls in this high frequency range and if the fiber is changed, these passbands are also changed as seen in Fig. 1. If the chosen subcarriers are at these nulls, the signals carried by these subcarriers will then be degraded considerably resulting in an unacceptable received signal. Hence, there must be an approach for searching suitable subcarriers, which are not located at any nulls. It has been shown in [8] that GA is an algorithm for searching suitable subcarriers. In the next section, GA with parameters used in GA in this paper will be discussed.

### 3. Genetic Algorithm

Assume that the suitable subcarriers are unknown, but the frequency response of the complex envelope of multimode fiber is known. The GA's optimization problem is to determine the suitable subcarriers. Based on principle of genetic mechanics, a better population of candidate solution is obtained. The genetic algorithms can be described as follows.

#### 3.1 Coding and Decoding

To solve the optimization problem, the subcarriers should be coded to a string-called chromosome. A set of chromosomes in generation is called "population". Based on binary coding method, every element of the sub-carriers vector is coded as a string of length, which consists of "0's" and "1's". The desired resolution,  $R_i$ , can be written as follows.

$$R_i = \frac{p_i^U - p_i^L}{2^{l_i} - 1} \quad (3)$$

Where  $p_i^U$  is upper bound of the subcarrier vector  $f$ ,  
 $p_i^L$  is lower bound of the subcarrier vector  $f$ ,  
 $l_i$  is length of the binary code.

The following example illustrates the coding procedure. Assume that there are two subcarriers in the subcarrier vector,  $f = [f_1, f_2]$ , and the optimal subcarriers ( $f^*$ ) is in the following ranges.

$$f: 0.2 \text{ GHz} \leq f_1 \leq 1.0 \text{ GHz}$$

$$0.2 \text{ GHz} \leq f_2 \leq 1.0 \text{ GHz}$$

And length of the binary code is

$$l_1 = l_2 = 5$$

According to (3),  $R_1 = 0.0258$  and  $R_2 = 0.0258$ . Therefore,  $f_1$  and  $f_2$  can be coded as the following:

$f_1$	Code	$f_2$	Code
0.2000	00000	0.2400	00000
⋮	⋮	⋮	⋮
1.0000	11111	1.0000	11111

### 3.2 Fitness function and Selection

Fitness,  $F$ , is a measure to evaluate the suitability of a chromosome. By the concept of multi-objective GA (MOGA), the fitness function used in this paper can be written as follows.

$$F = \frac{1}{|10\log_{10} H_{fiber}(f)| + p} \quad (4)$$

Where

$p = 0.01$  when the penalty condition is not occurred.  
 $= 1000$  when the penalty condition is occurred.  
 $|10\log_{10} H_{fiber}(f)|$  is magnitude response the complex envelope of multimode fiber.

Penalty condition is occurred when there are at least two subcarriers, which the frequency difference between them is less than 3-dB intermodal bandwidth [6].

This fitness function is proposed to maximize the magnitude response of the subcarriers vector and also to avoid the frequency differences in subcarriers to be less than the 3-dB intermodal bandwidth.

Each chromosome is assigned by a fitness value based on the fitness function. At each step, called generation, fitness values for all chromosomes are evaluated. Chromosome, which has the maximum fitness value, is kept as a solution in the current generation and passed to the next generation. A common selection approach assigns a probability of selection  $P_j$  to each chromosome. Roulette wheel, developed by Holland [9], was the first selection method. The probability,  $P_j$ , for each chromosome is defined by

$$P_j = P[\text{Chromosome } j \text{ is chosen}] = \frac{F_j}{\sum_{i=1}^{PopSize} F_i} \quad (5)$$

where  $F$  is the fitness value,

$PopSize$  is the population size (Number of chromosomes in the population).

### 3.3 Genetic Operators

To form a new population of the next generation, genetic operators are performed. The basic operators of genetic algorithms are reproduction, crossover and mutation. Crossover randomly selects a point along the length of two chromosomes, and then splits the two chromosomes into two pieces by breaking them at the crossover point. The new chromosomes are then formed by matching the head piece of one chromosome with the tail piece of the other. Mutation operation forms a new chromosome by randomly changing value of a single bit in the chromosome. Reproduction operation forms a new chromosome by just copying the existing chromosome. The genetic algorithm in this paper is shown as Fig. 2.

Considering GA described, it is seen that if the number of required suitable subcarriers is large, the number of iterations will be large, as well. This is not practical to be used in real system since it would take much time for setting up the system. However, considering Fig.1, it is seen that for all three responses, there always are some passbands in any frequency range; for example, between 1 to 2 GHz, there are 6, 8, and 7 available passbands in  $H_{100,1}(f)$ ,  $H_{100,2}(f)$ , and  $H_{100,3}(f)$ , respectively. Hence, instead of applying GA to the whole frequency range (that is, 0.2 to 5 GHz, as seen in Fig.1) in order to find thirty suitable subcarriers, the frequency is divided into 6 frequency ranges; that is, 0.2 to 1 GHz, 1 to 1.8 GHz, 1.8 to 2.6 GHz, 2.6 to 3.4 GHz, 3.4 to 4.2 GHz, and 4.2 to 5 GHz. Then, for all six frequency ranges, GA is applied simultaneously in order to search for 5 suitable subcarriers in each range; that is, parallel GA. With this parallel GA, thirty suitable subcarriers are then obtained. The results of this are shown in the next section.

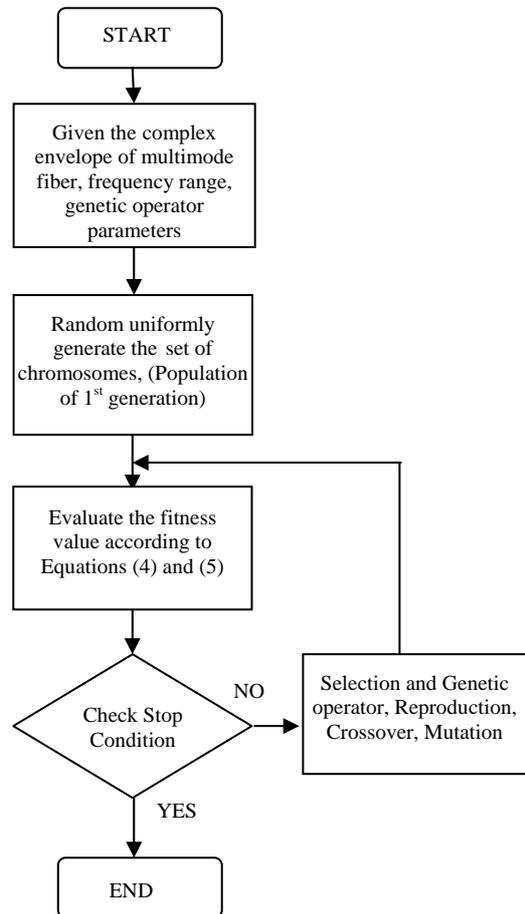


Fig. 2 Genetic algorithms for the optimization of subcarriers in SCM MF system.

## 4. Results and Discussion

In this section, the result of applying parallel genetic algorithm to search the suitable subcarriers in the complex envelope of multimode fiber frequency response problem is given. The frequency response is obtained by (1) and (2) where the number of guided

modes = 100, the maximum time deviation = 5 ns, and the average time delay = 5  $\mu$ s. The genetic parameters are shown in following:

In each frequency range, Population size = 5,  $f_i$  is in the range of 0.8 GHz (as explained previously) where  $i = 1, 2, \dots, N_{sub}$ ,  $N_{sub} = 5$ , probability of crossover=0.6, mutation = 0.1, reproduction = 0.3.

Applying parallel GA to  $H_{fiber,1}(f)$ , the optimal solutions are obtained as seen in Fig. 3. The improvement of fitness value by evolutionary process is shown in the figure, as well. Thirty suitable subcarriers are obtained.

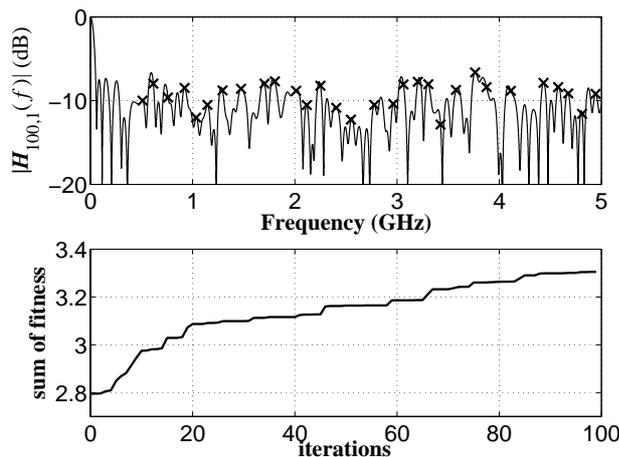


Fig. 3 (Upper) Multimode fiber frequency response with the obtained suitable subcarriers (marked as cross signs). (Lower) Sum of fitness values versus iteration (generation) using Parallel Genetic Algorithm.

From the results shown above, it is clearly seen that thirty suitable subcarriers can be determined. All of these thirty subcarriers are not located at or near any nulls. They are located at frequencies in which the magnitudes are quite large (that is, about 8 dB below the magnitude at the zero frequency) comparing to the magnitude at nulls. In [6], it was shown that statistically the width of each passband is identical to the 3-dB intermodal bandwidth; hence, the data rate transmitted over a possible passband is approximately one-half of the 3-dB intermodal bandwidth. Applying this result from [6] to this study, it is seen that thirty subcarrier signals can be transmitted over these subcarriers each with a bit rate of 100 Mbps resulting in a total bit rate of 3 Gbps, which is 15 times the bit rate achieving from the 3-dB intermodal bandwidth. Note that, parallel GA has also been applied to  $H_{fiber,2}(f)$  and  $H_{fiber,3}(f)$  in order to verify that this method is suited for being used. The obtained subcarriers are similar to what are shown in Fig.3; that is, all thirty obtained subcarriers are not located at any nulls of the multimode fiber response.

In system point of view, these thirty suitable subcarriers could be searched during the stage of setting up the SCM MF system, where the subcarrier frequencies are adjusted to the appropriate frequencies. The information from each iteration can be transmitted

back to the transmitting end by using the 3-dB intermodal bandwidth, which is guaranteed to be always usable. Hence, applying parallel GA to help design SCM MF system is feasible.

## 5. Conclusion

Thirty suitable subcarriers for being used as channels in subcarrier multiplexing on the multimode fiber are determined using parallel genetic algorithm. These subcarriers are not located at any nulls in the high frequency region of the frequency response of the multimode fiber. The resulting data rate achieving from these subcarriers are approximately 15 times the data rate achieving from the 3-dB intermodal bandwidth. It can then be concluded that parallel GA is a potential algorithm for designing SCM MF system.

## 6. Acknowledgement

This work was supported by the Thailand Research Fund (Project No. MRG5180080); and Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand.

## References

- [1] L. Raddatz and et al., "High bandwidth multimode fiber links using subcarrier multiplexing in vertical-cavity surface-emitting lasers," *OFC 1998*, pp 358-9.
- [2] S. Kanprachar and I. Jacobs, "Bandpass Transmission Characteristics of Multimode Fiber," in *Proc. Optics in the Southeast Meeting 2001*, October 4-5, 2001.
- [3] Diab, A.M.E-A, and et al, "10-Gb/s Transmission on Single-Wavelength Multichannel SCM-Based FDDI-Grade MMF Links at Lengths Over 300 m: A Statistical Investigation," *Journal of Lightwave Technology*, vol.25, pp. 2976 - 2983, October 2007.
- [4] Diab, A.M.E-A, and et al, "Experimental analysis of SCM-based transmission over 500 m of FDDI-grade multimode fiber with enhancement from electronic equalization," *Conference of Lasers and Electro Optics 2006 (CLEO 2006)*, May 21-26, 2006.
- [5] S. Kanprachar and I. Jacobs, "Bit-rate and distance limitations of subcarrier multiplexing on multimode fiber," *Conference of Lasers and Electro Optics 2003 (CLEO 2003)*, June 1-6, 2003.
- [6] S. Kanprachar and I. Jacobs, "Diversity coding for subcarrier multiplexing on multimode fibers," *IEEE Transactions on Communications*, vol.51, pp 1546-1553, September 2003.
- [7] S. Kanprachar, "Effects of subcarriers and bandpass bandwidth to bit-rate and distance of subcarrier multiplexing on multimode fiber," *Eighth International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT 2005)*, January 12 - 14, 2005.
- [8] S. Kanprachar and S. Kaitwanidvilai, "Design of Suitable Subcarriers in Subcarrier Multiplexing on Multimode Fiber by Genetic Algorithm," *ECTI-CON 2005*, May 12 - 13, 2005.
- [9] Holland, J., "Adaptation in natural and artificial systems," *The university of Michigan Press*, Ann Arbor, 1975.

# Bandpass Transmission Characteristics of Multimode Fibers using Gaussian Distribution

Wassana Naku, Chairat Pinthong, and Surachet Kanprachar

*Department of Electrical and Computer Engineering, Naresuan University, Muang, Phitsanulok 65000, Thailand*

**Abstract** – Multimode fiber (MF) has been used as a medium for transmitting a high data rate signal up to 10 Gbps over its high frequency region. This high frequency region of multimode fiber contains many passbands, which can be adopted as channels for sending many subcarrier signals. These passbands are located at different frequencies and vary from fiber to fiber depending on the delays of guided modes in the fiber. In this paper, the passbands at high frequency region of multimode fiber are studied. The delays of guided modes are assumed to be Gaussian distributed. The characteristics in terms of the average magnitude response and the average bandwidth of these passbands are determined. It is found that the average magnitude response of the passbands depends on the number of guided modes and the average bandwidth depends on the standard deviation of the delays.

**Keywords:** Multimode Fiber, Gaussian Distribution, Bandpass Bandwidth, Guided Modes

## I. INTRODUCTION

Optical fiber transmission has been developed to be one of the major channels for data transmission. The capacity of the optical fiber has been improved to be more than 10 Tbps [1]. Multimode fiber has been known for being a medium for transmitting a signal with data rate no more than 500 Mbps. However, considering the frequency response of multimode fiber, it has been shown that the frequency response of multimode fiber at frequencies much higher than the 3-dB intermodal bandwidth is relatively flat with amplitudes of 6 to 10 dB below the amplitude at zero frequency [2, 3]. The advantage of these high frequencies is that they can be used as a medium to transmit a high bit rate signal. In [4] it has been shown that a high bit rate signal (up to 1.45 Gbps) can be transmitted over a distance of 5 km using subcarrier multiplexing (SCM) with multimode fiber (MF) system. Since the frequency response of multimode fiber at these high frequencies is not totally flat, there are many nulls within this passband region. If some subcarriers are located at deep nulls, the received signals from those subcarriers will be degraded significantly. The effects of having some subcarriers located at deep nulls

can be overcome by using a technique called “Diversity coding” [4]. Considering the multimode fiber model shown in [3], it was assumed that the delays of guided modes are uniformly distributed. This might not be a correct distribution in practice since the guided modes travel along the fiber with different paths and the probability that each mode reaches the receiving end should not be uniformly distributed. Another distribution namely Gaussian distribution should be adopted since there are many guided modes in multimode fiber. The delays of the guided modes are assumed to be identically distributed. Hence, under Central Limit Theorem [5], the summation of these delays can be assumed to be Gaussian distributed. In this paper, the passbands of multimode fibers are studied assuming that the distribution of the delays is Gaussian distribution.

The organization of this paper is as followed. In Section II, the multimode fiber model will be given. Gaussian distribution is adopted for being the delay distribution. The average magnitude response of multimode fiber at high frequency region is studied in Section III. Also, in Section IV the average bandwidth of passband regions is discussed. Finally, in Section V, the work in this paper is summarized.

## II. MULTIMODE FIBER MODEL

The impulse response of the multimode fiber with  $N$  guided modes is considered as the combination of the delta functions corresponding to different delays ( $t_{d,n}$ ) [3, 4]; that is,

$$h_{fiber}(t) = \sum_{n=1}^{N_{mode}} \delta(t - t_{d,n}) \quad (1)$$

The frequency response of the complex envelope of the multimode fiber with  $N_{mode}$  guided modes is achieved by taking the Fourier transform of the impulse response in (1); that is,

$$H_{fiber}(f) = \sum_{n=1}^{N_{mode}} e^{-j2\pi f t_{d,n}} \quad (2)$$

From (2), in order to get the frequency response of the multimode fiber, the delays for all  $N$  guided modes have to be found; that is, the modal index of each

guided mode has to be found. However, for practical multimode fibers the number of guided modes has to be large to avoid modal noise. It has been shown [3, 4] that these time delays can be modeled to be independent realizations of a random variable, which is uniformly distributed about an average time delay ( $t_{d,avg}$ ) with the maximum deviation of  $t_{d,dev}$  as shown in (3).

$$f_{t_{d,n}}(t_{d,n}) = \begin{cases} \frac{1}{2t_{d,dev}} & ; t_{d,avg} - t_{d,dev} \leq t_{d,n} \leq t_{d,avg} + t_{d,dev} \\ 0 & ; \text{elsewhere.} \end{cases} \quad (3)$$

Note that  $t_{d,avg}$  and  $t_{d,dev}$  depend on the fiber length, the number of guided modes, and the refractive index profile of the fiber.

Applying the maximum time deviation of 5 ns, and number of guided modes to be 100 modes; the frequency response of the complex envelope of the multimode fiber in units of dB is shown Fig.1.

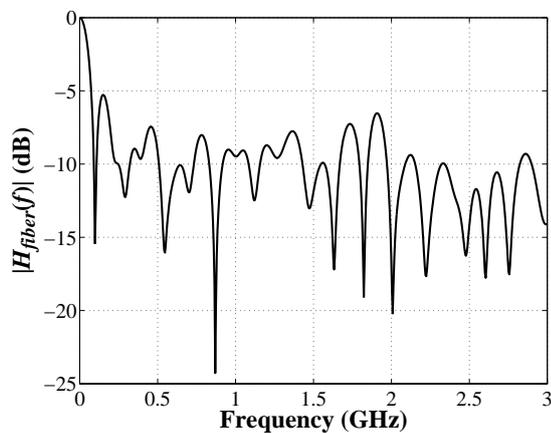


Fig. 1. Magnitude response of the complex envelope of the multimode fiber modeled with uniform distribution,  $N_{mode} = 100$  and  $t_{d,dev} = 5$  ns.

Considering the magnitude response in Fig.1, it is seen that if the signal is transmitted over the 3-dB intermodal bandwidth of this fiber, the achieved data rate will be approximately 100 Mbps since the 3-dB bandwidth is roughly 100 MHz. However, it is seen that there are many passbands at high frequencies, which can be used to carry many signals; for example, at 0.45 GHz, 0.75 GHz, 1.0 GHz, and so on. Combining data rates from these passbands, it is clearly seen that the total data rate that can be achieved will be significantly higher than the data rate achieving only from the 3-dB intermodal bandwidth. However, as discussed previously the uniform distribution in (3) might not be a correct distribution for being used. Next, the delay ( $t_{d,n}$ ) is assumed to be Gaussian distributed [5] with an average time delay ( $t_{d,avg}$ ) with the delay standard deviation of  $\sigma_d$ ; that is,

$$f_{t_{d,n}}(t_{d,n}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_d^2}} e^{-\frac{(t_{d,n}-t_{d,avg})^2}{2\sigma_d^2}} \quad (4)$$

To apply the Gaussian distribution to the delay,  $\sigma_d$  has to be determined. Here, the value of  $t_{d,dev}$  used in Fig.1, which is from uniform distribution, is translated to the standard deviation of 2.89 ns. Hence,  $\sigma_d$  of 2.89 ns with 100 guided modes are applied to (4) and (2), respectively. The frequency response of the complex envelope of the multimode fiber using Gaussian distribution is shown Fig.2.

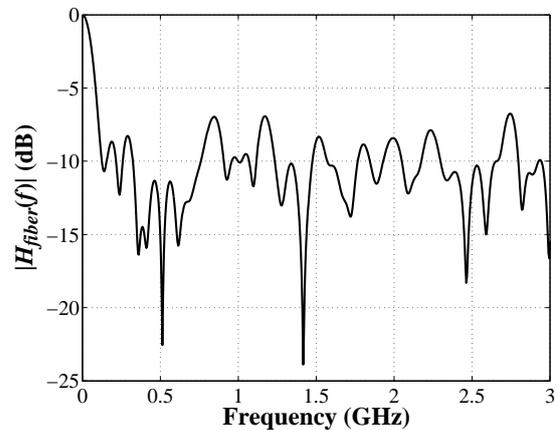


Fig. 2. Magnitude response of the complex envelope of the multimode fiber modeled with Gaussian distribution,  $N_{mode} = 100$  and  $\sigma_d = 2.89$  ns.

Considering Fig.2, it is seen that there are many available passbands at high frequency. Comparing this figure to Fig.1, it is seen that they are different in terms of the locations of passbands. This difference is from the fact that these two responses are from different sets of delays. However, there are many similarities among these two figures; for example, the 3-dB intermodal bandwidth at low frequency and the passband bandwidth at high frequency are almost identical. Additionally, considering the average magnitude of the high frequency region, it is seen that both responses have an average magnitude of -10 dB approximately.

In the following sections, the average magnitude at high frequency and the average bandwidth of passband will be studied using Gaussian distribution.

### III. AVERAGE MAGNITUDE RESPONSE

In this section, the average magnitude response of the multimode fiber at high frequency is determined. This parameter is quite important in practical system since it tells us about how much power we need to use in order to compensate for such attenuation. From Fig. 1 and 2, it is seen that the average magnitude is approximately -10 dB. However, the delay standard deviation used in these two figures is 2.89 ns with 100 guided modes. Here, the factors affecting the average magnitude are determined. This is done by studying different magnitude responses each with different parameters; that is, the number of modes ( $N_{mode}$ ) and delay standard deviation ( $\sigma_d$ ).

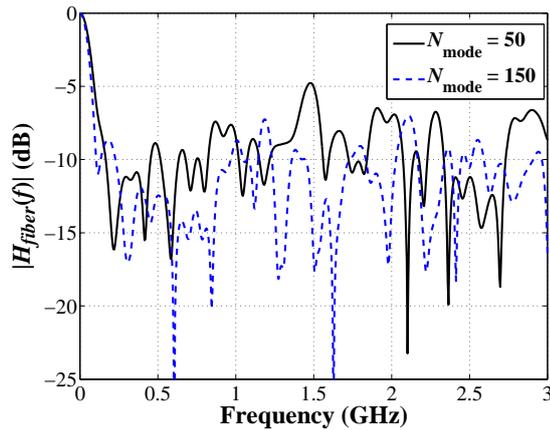


Fig. 3. Magnitude responses of the complex envelope of the multimode fiber modeled with Gaussian distribution,  $N_{mode} = 50$  (solid line) and 150 (dash line); and  $\sigma_d = 2.89$  ns.

The magnitude responses of multimode fiber with 50 and 150 guided modes are shown in Fig.3. These two responses are from the same  $\sigma_d$  of 2.89 ns. As seen from the figure, with 50 guided modes, at high frequency, the average magnitude response of MF is clearly higher than that from the case of 150 guided modes. It can be roughly concluded that the average magnitude response of MF depends on the number of guided modes. However, the effect of the delay standard deviation has not been determined. In Fig.4, the average magnitude response of MF at high frequency region is obtained and shown as a function on  $N_{mode}$  with different values of  $\sigma_d$ .

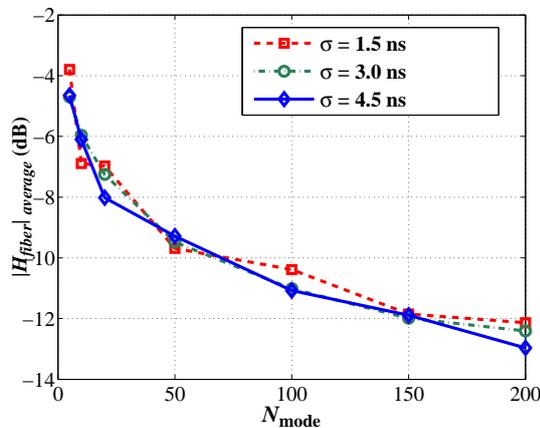


Fig. 4. Average magnitude response multimode fiber at high frequency region as a function of number of guided modes with  $\sigma_d = 1.5, 3.0,$  and  $4.5$  ns.

From Fig.4, it is clearly shown that there is no significant difference between three curves with different values of  $\sigma_d$ . Additionally, it is clearly seen that the average magnitude response of MF at high frequency region depends solely on the number of guided modes; that is, as the number of guided modes is increased, the average magnitude response is lessened. For example, at  $N_{mode} = 50, 100, 150$ ; the average magnitude responses are  $-9.5, -11,$  and  $-12$  dB, respectively.

#### IV. AVERAGE BANDPASS BANDWIDTH

In this section, the average bandpass bandwidth of MF at high frequency region is studied. It is seen from Fig. 2 that the bandwidth of these passbands is approximately 100 to 200 MHz depending on the chosen passband. However, the study on the average bandpass bandwidth has not been discussed. This average bandwidth is also another important parameter to be used in data transmission since it tells us how large the data rate can be carried by each passband. Considering Fig.2, it is seen that the number of guided modes and the delay standard deviation are fixed. Here, the effects of these two factors on the average bandpass bandwidth are determined.

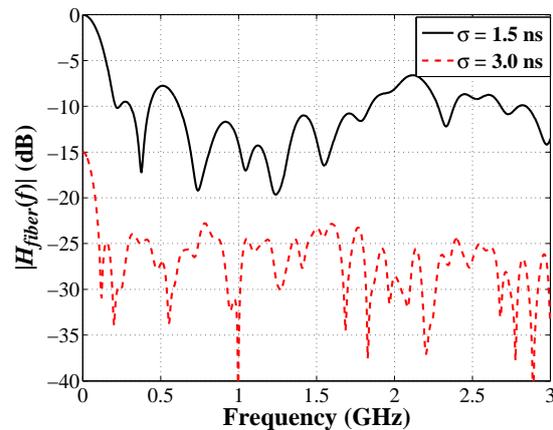


Fig. 5. Magnitude responses of the complex envelope of the multimode fiber modeled with Gaussian distribution with  $N_{mode} = 100$ . The two curves correspond to different values of  $\sigma_d$ , with the lower curve displaced by 15 dB.

From Fig.5, the effect of the delay standard deviation on the average bandpass bandwidth is studied. It is seen from this figure that the average bandpass bandwidth from the case of  $\sigma_d = 1.5$  ns is larger than that from the case of  $\sigma_d = 3.0$  ns. Hence, the delay standard deviation must affect the average bandpass bandwidth. The effect of number of guided modes cannot be obtained from this figure since the number of guided modes is fixed to be 100 modes.

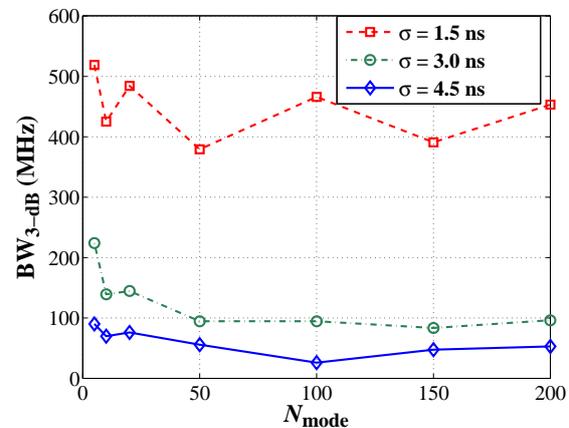


Fig. 6. Average bandpass bandwidth of multimode fiber at high frequency region as a function of number of guided modes with  $\sigma_d = 1.5, 3.0,$  and  $4.5$  ns.

The effect of guided modes on the average bandpass bandwidth is shown in Fig. 6. Note that the average bandpass bandwidth is obtained from the average of many 3-dB bandpass bandwidths. It is seen that the number of guided modes does not affect the achieved average bandpass bandwidth; for example, with  $\sigma_d = 3.0$  ns, the average bandpass bandwidths for  $N_{\text{mode}} = 50, 100,$  and  $150,$  are approximately 100 MHz. From these three curves, it is seen that for a particular  $\sigma_d,$  the average bandpass bandwidth is larger at the smaller number of guided modes comparing to that at the higher number of guided modes. This is correct from what has been obtained from the figure. However, in practice, the number of guided modes in MF is in the order of hundreds. This means that the average bandpass bandwidth at the small number guided modes does not give any important information for being used in practice.

Furthermore, from Fig. 6, at  $\sigma_d = 1.5, 3.0,$  and  $4.5$  ns, the average bandpass bandwidths are approximately 450, 100, and 50 MHz, respectively. It is seen that  $\sigma_d$  affects the average bandpass bandwidth.

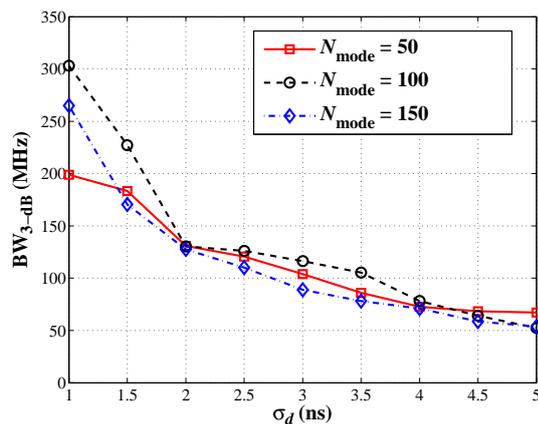


Fig. 7. Average bandpass bandwidth of multimode fiber at high frequency region as a function of delay standard deviation ( $\sigma_d$ ) with  $N_{\text{mode}} = 50, 100,$  and  $150$  modes.

The effects of  $N_{\text{mode}}$  and  $\sigma_d$  on the average bandpass bandwidth are also shown in Fig.7. From the figure, it is seen that the average bandpass bandwidth does not depend on the number of guided modes but only depends on the value of  $\sigma_d.$  As the value of  $\sigma_d$  is increased, the average bandpass bandwidth is decreased. For example, at  $\sigma_d$  of 2, 3, and 4 ns, the average bandpass bandwidth are 130, 100, and 70 MHz, respectively. Note that in practice, the value  $\sigma_d$  of depends on the length of the multimode fiber. If the fiber length increases, the value of  $\sigma_d$  becomes higher resulting in a smaller bandpass bandwidth.

## V. CONCLUSIONS

It has been discussed that Gaussian distribution for the delays in multimode fiber is more suitable than the previous study in which the uniform distribution was used. Applying Gaussian distribution to the delays, the

average magnitude response and the average bandpass bandwidth at high frequency region of multimode fiber have been studied. It is found that the average magnitude response is inversely proportional to the number of guided modes. And, the average bandpass bandwidth depends only on the delay standard deviation. This work can be applied to the real system for estimating the loss (attenuation) from transmitting signals over high frequency region of multimode fiber. Also, relating the delay standard deviation to the fiber length, the data rate in which each passband can be carried can be determined.

## ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Thailand Research Fund (Project No. MRG5180080) and Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand.

## REFERENCES

- [1] R. Lingle, "Capacity increases in optical fiber links," *Wireless and Optical Communications Conference (WOCC) 2010*.
- [2] L. Raddatz and et al., "High bandwidth multimode fiber links using subcarrier multiplexing in vertical-cavity surface-emitting lasers," *OFC 1998*, pp 358-9.
- [3] Surachet Kanprachar and Ira Jacobs, "Bandpass Transmission Characteristics of Multimode Fiber," in *Proc. Optics in the Southeast Meeting 2001*, October 4-5, 2001.
- [4] Surachet Kanprachar and Ira Jacobs, "Diversity coding for subcarrier multiplexing on multimode fibers," *IEEE Transactions on Communications*, vol.51, pp 1546-1553, September 2003.
- [5] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 3<sup>rd</sup> edition, McGraw-Hill, New York, 1991.

## Suitable Subcarrier Design for Subcarrier Multiplexing on Multimode Fiber by Parallel Genetic Algorithm

Kanprachar, S.<sup>1\*</sup>, Benprom, P.<sup>1</sup>, Pinthong, C.<sup>1</sup>, Kaitwanidvilai, S.<sup>2</sup>, Ngamroo, I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand*

<sup>2</sup>*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand*

### Abstract

Genetic algorithm (GA) has been shown to be an alternative for achieving suitable subcarriers in subcarrier multiplexing (SCM) on multimode fiber. Because of the relatively-flat frequency response at high frequency range of the multimode fiber, the suitable subcarriers can be determined by applying GA to many divided frequency ranges simultaneously; that is, Parallel GA. In this paper, parallel GA is adopted for searching suitable subcarriers in SCM on multimode fiber. Thirty suitable subcarriers, which are not located at any nulls in the frequency response of multimode fiber, are determined. These subcarriers are then used for transmitting many subcarrier signals through the high frequency bands of multimode fiber resulting in a total data rate of 15 times larger than the data rate obtaining from the 3-dB intermodal bandwidth.

**Keywords:** multimode fiber, subcarrier multiplexing, genetic algorithm

\*Corresponding author.

Tel.: 0-5596-4357; Fax: 0-5596-4005

E-mail: surachetka@nu.ac.th

## Performance of Subcarrier Multiplexing on Multimode Fiber Using Parallel Genetic Algorithm in Designing Suitable Subcarriers

Kanprachar, S.<sup>1\*</sup>, Ngamroo, I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand*

<sup>2</sup>*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand*

### Abstract

Parallel Genetic algorithm (GA) has been shown to be a potential alternative for designing suitable subcarriers in subcarrier multiplexing (SCM) on multimode fiber. Because of the relatively-flat frequency response at high frequency range of the multimode fiber, the suitable subcarriers can be determined by applying GA to many divided frequency ranges simultaneously; that is, Parallel GA. In this paper, the performance in terms of bit-error-rate (BER) of the subcarrier multiplexing system on multimode fiber, in which the suitable subcarriers are chosen using parallel GA, is studied. It is shown that the total BER achieved from these suitable subcarriers is as low as the one achieved from using coding techniques. However, with this designing technique, the passband regions of multimode fiber can be utilized more efficiently since most of the available passband regions in a given range of frequency can be taken to be the channels in transmitting signals without wasting some passband regions for redundant bits in the code. It can be concluded that with this subcarrier designing technique, a higher data rate can be achieved in a given frequency range with promising performance in terms of BER.

**Keywords:** multimode fiber, subcarrier multiplexing, parallel genetic algorithm, Bit-Error-Rate

\*Corresponding author  
Tel.: 0-5596-4357; Fax: 0-5596-4005  
E-mail: surachetka@nu.ac.th



สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) กระทรวงศึกษาธิการ  
OFFICE OF THE HIGHER EDUCATION COMMISSION



สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)  
THE THAILAND RESEARCH FUND

# เกียรติบัตรเสนอผลงานวิจัยดีเด่นแบบบรรยาย

## เพื่อแสดงว่า

**พศ.ดร. สุรเชษฐ์ กานต์ประชา**

เป็นผู้เสนอผลงานวิจัยดีเด่น

ในการประชุมนักวิจัยรุ่นใหม่..พบ..เมธีวิจัยอาวุโส สกว.

ระหว่างวันที่ ๑๔ - ๑๖ ตุลาคม ๒๕๕๓

ของมีความเจริญด้วยจตุรพิชพร ทำคุณประโยชน์ในด้านการศึกษาสร้างสรรค์ปัญญา

เพื่อพัฒนาประเทศสืบต่อไปชั่วกาลนาน

ดร. สุเมธ เข้มมนุ

เลขาธิการคณะกรรมการการอุดมศึกษา

ศาสตราจารย์ ดร. สวัสดิ์ ตันตระรัตน์

ผู้อำนวยการสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย