ประสิทธิภาพของการมัลติเพล็กซ์แบบคลื่นพาห์ย่อยผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่พาสแบนด์ความถี่ต่ำเมื่อมีการเข้ารหัสสัญญาณ

จารุวัฒน์ พัฒน์มณี

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

ประสิทธิภาพของการมัลติเพล็กซ์แบบคลื่นพาห์ย่อยผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่พาสแบนด์ความถี่ต่ำเมื่อมีการเข้ารหัสสัญญาณ

จารุวัฒน์ พัฒน์มณี

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร

เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "ประสิทธิภาพของการมัลติเพล็กซ์แบบคลื่นพาห์ย่อยผ่านเส้นใยแก้วนำแสง
ประเภทหลายโหมดที่พาสแบนด์ความถี่ต่ำเมื่อมีการเข้ารหัสสัญญาณ"
ของ จารุวัฒน์ พัฒน์มณี
ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จำนงไทย)

.... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ กานต์ประชา)

.... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร.ชัยรัตน์ พินทอง)

.... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห)

.... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ วัฒนวงค์พิทักษ์)

อนุมัติ

....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	ประสิทธิภาพของการมัลติเพล็กซ์แบบคลื่นพาห์ย่อยผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่พาสแบนด์ความถี่ต่ำเมื่อมีการเข้ารหัสสัญญาณ
ผู้วิจัย	จารุวัฒน์ พัฒน์มณี
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ กานต์ประชา
กรรมการที่ปรึกษา	ดร.ชัยรัตน์ พินทอง
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ ปร.ด. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2564
คำสำคัญ	เส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด Frequency Selective Subcarrier Multiplexing การเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น Direct Sequence Spread Spectrum

บทคัดย่อ

ระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้นได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบการสื่อสารที่มีระยะห่างระหว่างภาคส่งกับภาครับไม่มากนัก ซึ่งแบนด์วิธที่ถูกใช้งานโดยทั่วไปของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั้นจะถูกเรียกว่า 3-dB Modal Bandwidth โดยจะมีขนาดที่ถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 200 ถึง 500 MHz·km ดังนั้นผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจึงถูกศึกษาเพื่อหาวิธีการในการเพิ่มขนาดแบนด์วิธ ซึ่งจะพบว่าผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจะมีลักษณะเป็นแบบ Frequency Selective และมีพาสแบนด์ในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz ที่สามารถนำไปใช้งานเป็นช่องส่งสัญญาณได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการจำลองระบบสื่อสารที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณโดยอาศัยการมัลติเพล็กซ์แบบคลื่นพาห์ย่อย จากการจำลองระบบสื่อสารพบว่าสามารถใช้พาสแบนด์ในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz เป็นช่องส่งสัญญาณได้ แต่เนื่องจากภายในช่องส่งสัญญาณบางช่องนั้นได้เกิดการลดทอนของสัญญาณขึ้นจึงต้องมีการประยุกต์ใช้งานการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นและการเลือกใช้งานจำนวนช่องส่งสัญญาณเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น จากการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นและการเลือกใช้งานจำนวนช่องสัญญาณจะทำให้ได้แนวโน้มระหว่างค่า BER กับขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลเมื่อระบบสื่อสารมีการใช้งานจำนวนช่องส่งสัญญาณที่แตกต่างกัน จะพบว่าเมื่อมีการใช้งานช่องส่ง

สัญญาณจำนวนหลายช่องสัญญาณจะส่งผลให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลได้มาก แต่ก็จะส่งผลให้ระบบสื่อสารนั้นมีค่า BER ที่สูงซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน ในขณะเดียวกันการลดจำนวนช่องสัญญาณจะสามารถช่วยลดค่า BER ของระบบสื่อสารลงได้แต่ก็จะทำให้ขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลนั้นลดลงด้วยเช่นเดียวกัน และในระบบสื่อสารทางแสงที่ต้องการส่งสัญญาณข้อมูลด้วยบิตเรตที่สูงกว่า 490 Mbps และมีค่า BER ที่ต่ำกว่า 10^{-9} นั้น จะมีเพียงระบบสื่อสารที่ใช้งานช่องส่งสัญญาณจำนวน 5 ช่องสัญญาณที่สามารถส่งสัญญาณข้อมูลด้วยบิตเรต 494 Mbps ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ จะพบว่าขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลนั้นถูกจำกัดด้วยจำนวนช่องส่งสัญญาณ ดังนั้นการส่งสัญญาณในรูปแบบ 4-ASK จึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อเพิ่มขนาดบิตเรตสัญญาณข้อมูลให้กับระบบสื่อสาร ซึ่งจากการจำลองระบบสื่อสารพบว่าจะสามารถเพิ่มขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลได้เป็น 500 Mbps และยังคงมีค่า BER ที่ต่ำกว่า 10^{-9} โดยระบบสื่อสารดังกล่าวนี้ไม่ต้องอาศัยการเข้ารหัสสัญญาณ และเมื่อทำการเพิ่มการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 26) ไปยังระบบสื่อสารแล้ว จะสามารถส่งสัญญาณข้อมูลได้เพิ่มสูงขึ้นเป็น 546 Mbps ซึ่งมากกว่าขนาดบิตเรตที่สามารถส่งผ่าน 3-dB Modal Bandwidth ประมาณ 2.73 เท่า และยังให้ Coding gain ถึงประมาณ 6 dB เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารที่ไม่มีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อค่า BER ของระบบสื่อสารก็คือการลดทอนสัญญาณของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงจะทำการศึกษาการส่งสัญญาณแบบ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) เพื่อแก้ไขปัญหาการลดทอนสัญญาณที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการจำลองระบบสื่อสารพบว่าแบบรูปตาที่ได้จากสัญญาณแบบ DSSS ที่ภาครับนั้นเกิดความผิดเพี้ยนค่อนข้างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากการที่องค์ประกอบทางความถี่หลักของสัญญาณแบบ DSSS นั้นอยู่ในบริเวณที่เกิดการลดทอน ดังนั้นเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS ในกรณีที่มี Code length เป็น 3 และ 7 นั้น จึงไม่เหมาะสมกับระบบสื่อสารในวิทยานิพนธ์นี้

Title PERFORMANCE OF SUBCARRIER MULTIPLEXING TRANSMISSION OVER MULTIMODE FIBER AT LOW-FREQUENCY PASSBANDS WITH ENCODING

Author JARUWAT PATMANEE

Advisor Assistant Professor Surachet Kanprachar, Ph.D.

Co-Advisor Chairat Pinthong, Ph.D.

Academic Paper Ph.D. Dissertation in Electrical Engineering - (Type 2.1), Naresuan University, 2021

Keywords Multimode fibers Frequency Selective Subcarrier Multiplexing Linear Block Code Direct Sequence Spread Spectrum

ABSTRACT

Optical communication systems using MMF are widely used for short-haul communication. The most common used bandwidth is 3-dB modal bandwidth, which is limited to 200-500 MHz·km. In order to overcome this limitation, utilization of multimode fiber's low frequency region has been studied. From the studied, it is found that the frequency response of MMF is frequency selective and there are many available passbands at low frequencies, in the range 0 - 1.6 GHz. In this study, a communication system using MMF at low-frequencies, in the range 0 - 1.6 GHz is modelled by applying Subcarrier Multiplexing (SCM). The simulation results shown that the passbands at low frequency region are utilized as channels. However, a very high attenuation in signal transmission occurs in some of these low-frequency passbands. To lessen this problem, using linear block code (LCB) along with careful selection of passbands must be adopted. In this study, the estimation between BER and data rate for this particular communication already achieved, when the different number of passbands are used. The simulation results shown that using multiple passbands, resulting in a very high data rate. However, it is resulting in a very high BER as well, which cannot be used in an optical communication system. Therefore, reducing the number of used passbands can be reduced the BER of communication

system. However, it is resulting in a lower data rate as well. For the particular communication system that the minimum requirements are a data rate higher than 490 Mbps and BER values lower than 10^{-9}. Using only 5 passbands for data transmission can be applied for this requirement, with a data rate of 494 Mbps. It is shown from the previous results that a maximum data rate depend on the number of used passbands. Therefore, a communication system using MMF at low-frequency passbands is modelled by applying 4-Amplitude Shift Keying (4-ASK) with a careful selection of passbands for increasing a data transmission rate. It is found that a data rate is increased to 500 Mbps with a BER lower than 10^{-9}. Moreover, this particular communication system was done without encoding. Therefore, (31, 26) linear block encoding is now added to this particular communication system for increasing the performance. It is found that a data rate is increased to 546 Mbps, which is 2.73 times higher than the data rate using only the 3-dB modal bandwidth can be obtained with a BER lower than 10^{-9}. This obtained result provides a coding gain of more than 6 dB compared to the previous result without encoding. From the above studies, a very high attenuation in signal transmission is a majority problem that leading to a very poor signals at the receiving end. One way that may help to lessen this negative effect is using Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS). In this study, the performance of applying DSSS into this particular optical communication system is studied in terms of eye pattern. The eye pattern from the received signals shown that a degraded signal. This is the result of the main frequency component of DSSS signal is located at the null of its channel. So, the DSSS technique with codelength 3 and 7 may be not suitable for this particular optical communication system.

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ผู้ดำเนินวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และแนะนำข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินวิทยานิพนธ์ตลอดมาจนสำเร็จดังนี้ ครอบครัวที่คอยแนะนำให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจให้เสมอมา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ กานต์ประชา ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษาและแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จำนงไทย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ชัยรัตน์ พินทอง กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ วัฒนวงค์พิทักษ์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายในที่ได้ให้คำแนะนำและสละเวลาในการคุมสอบวิทยานิพนธ์นี้ สำนักหอสมุด และห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสืบค้นข้อมูล รวมถึงเอกสารและหนังสือประกอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรที่ได้สนับสนุนเงินทุนในการศึกษาระดับปรัชญาดุษฎีบัณฑิตครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคน และบุคลากรท่านอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงที่ได้ให้คำปรึกษาความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์ในการดำเนินวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ

จารุวัฒน์ พัฒน์มณี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

ประกาศคุณูปการ .... ช

สารบัญ .... ซ

บทที่ 1 บทนำ 1

ความเป็นมาของปัญหา 1

จุดมุ่งหมายของการศึกษา 3

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

ขอบเขตการวิจัย 4

สมมติฐานของการวิจัย 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวข้อง 6

เส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic) 6

ผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด 8

3-dB Modal Bandwidth 10

การเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น (Linear Block Code) 11

การส่งสัญญาณแบบ 4-Amplitude Shift Keying (4-ASK) 14

Subcarrier Multiplexing 16

เทคนิคการส่งสัญญาณแบบ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) 17

Bit Error Rate 20

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง....23

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย....35

วิธีดำเนินงานวิจัย....35

การเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสแบบบล็อกเชิงเส้นไปยังช่องสัญญาณ....39

การหาค่า BER ของระบบสื่อสาร....42

บทที่ 4 ผลการวิจัย....45

การศึกษาแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ....46

การศึกษาแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำที่อาศัยช่องส่งสัญญาณจำนวน 7 ช่องสัญญาณเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณและมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น....49

การศึกษาแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำที่อาศัยช่องส่งสัญญาณจำนวน 6 ช่องสัญญาณเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณและมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น....59

การศึกษาแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำที่อาศัยช่องส่งสัญญาณจำนวน 5 ช่องสัญญาณเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณและมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น....61

การประมาณประสิทธิภาพระบบสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้ว นำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ .63

การศึกษาแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณและมีการส่งญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 65

การศึกษาแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ เมื่อมีการส่งญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 และมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น....74

การศึกษาประสิทธิภาพของการส่งญาณแบบ Direct Sequence Spread Spectrum ผ่านผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำ 82

บทที่ 5 บทสรุป 90

บรรณานุกรม....93

ภาคผนวก....97

ภาคผนวก ก การเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น 98

ภาคผนวก ข การวัดค่า BER ของการส่งสัญญาณแบบ DSSS จากแบบรูปตา.... 102

ประวัติผู้วิจัย 111

สารบัญตาราง

ตาราง **หน้า**

1 พหุนามไม่ลดรูป (Irreducible Polynomials) ในฟิลด์กาลัว (Galois Fields).............. 20

2 คำรหัสที่เกิดขึ้นจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4)................................ 98

3 รูปแบบความผิดพลาดและค่าซินโดรมจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้น
แบบ (7, 4).. 100

สารบัญภาพ

ภาพ หน้า

1 โครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสง.. 6
2 การเดินทางของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสง.. 7
3 ผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด
ที่มีจำนวนโหมด 100 โหมด $t_{d,avg}$ = 5 μs และ $t_{d,dev}$ = 2.50 ns................... 9
4 ขนาดความกว้างของ 3 dB Modal Bandwidth... 10
5 การเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น (15, 11).. 13
6 การส่งสัญญาณข้อมูลแบบ ASK และ 4-ASK ในทางเวลาและความถี่....................... 15
7 การส่งสัญญาณโดยอาศัยเทคนิค SCM... 16
8 เทคนิคการส่งสัญญาณแบบ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)......... 18
9 การส่งสัญญาณโดยอาศัยเทคนิค DSSS ในทางเวลาและความถี่.............................. 19
10 วงจรไบนารีชิฟรีจิสเตอร์ที่มีการควบคุมแบบป้อนกลับ (Binary Shift Register
with Feedback) สำหรับสร้างรหัสแผ่แบบ Maximal-Length Sequence.... 20
11 แบบรูปตาของสัญญาณข้อมูลแบบ ASK ที่ภาครับ... 21
12 แบบรูปตาของสัญญาณข้อมูลแบบ 4-ASK ที่ภาครับ.. 22
13 การทดลองส่งสัญญาณด้วยเทคนิค Optical Orthogonal Frequency Division
Multiplexing (OOFDM)... 24
14 แผนผัง Constellation ของการส่งสัญญาณแบบ 16-QAM................................... 25
15 แบบรูปตาที่ได้จากการศึกษา.. 26
16 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่า $f_{Peak,Avg}$ เมื่อ $t_{d,dev}$ = 2.50 ns......................... 27
17 ผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดและสัญญาณ
ข้อมูลในทางความถี่.. 28
18 แบบรูปตาของช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3.. 29
19 ค่า BER ของแบบจำลองระบบสื่อสารที่มีการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบ
บล็อกเชิงเส้น (7, 4).. 30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ หน้า

20 แบบจำลองระบบสื่อสารที่มีตัวกลางในการส่งสัญญาณแบบ Selective Fading Channel ที่มีการกระจายแบบเรย์ลี.......... 32
21 ผลการจำลองระบบการสื่อสารที่มีตัวกลางในการส่งสัญญาณแบบ Selective Fading Channel.......... 33
22 แผนภาพวิธีการดำเนินงานวิจัย.......... 35
23 การเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น (7, 4).......... 40
24 การเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น (15, 11) และ (15, 7).......... 41
25 สัญญาณข้อมูลทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6.......... 46
26 ค่า BER ของการส่งสัญญาณด้วยบิตเรตเป็น 800 Mbps ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำจำนวน 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง.......... 47
27 แบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับสำหรับช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3.......... 48
28 ค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง.......... 49
29 ค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง.......... 51
30 ค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 26) ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง.......... 52
31 ค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 7) ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง.......... 54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ หน้า

32 ค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง... 55
33 ค่า BER เฉลี่ยของการส่งสัญญาณผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง.......... 56
34 สัญญาณข้อมูลทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 และแบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับ.. 58
35 ค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 6 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง... 59
36 ค่า BER เฉลี่ยของการส่งสัญญาณผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 6 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง.......... 60
37 ค่า BER เฉลี่ยของการส่งสัญญาณผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 5 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง.......... 62
38 การประมาณประสิทธิภาพระบบสื่อสารทางแสง.. 63
39 ค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีบิตเรตเป็น 600 Mbps ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 4 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง... 66
40 สัญญาณข้อมูลทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6... 67
41 แบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6................................ 67
42 ค่า BER เฉลี่ยของช่องส่งสัญญาณแต่ละช่องจากการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีบิตเรตเป็น 600 Mbps ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 4 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง................ 69

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ **หน้า**

43 ค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีบิตเรตเป็น 550 Mbps ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 4 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง.......... 70
44 สัญญาณข้อมูลทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6.......... 71
45 แบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6.......... 72
46 ค่า BER เฉลี่ยของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองจากการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0........... 73
47 ค่า BER เฉลี่ยของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองจากการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 และมีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4).......... 75
48 สัญญาณข้อมูลทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2.......... 76
49 แบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2.......... 77
50 ค่า BER เฉลี่ยของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองจากการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 และมีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11).......... 78
51 ค่า BER เฉลี่ยของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองจากการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 และมีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้น.......... 79
52 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบสื่อสารทางแสง.......... 81
53 สัญญาณ OOK กับสัญญาณ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 ในทางความถี่.......... 83

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ หน้า

54 ค่า BER เฉลี่ยของช่องส่งสัญญาณแต่ละช่องจากการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีบิตเรตเป็น 600 Mbps ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 4 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง................ 83
55 สัญญาณ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 ในทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1................................. 84
56 แบบรูปตาของสัญญาณ DSSS เมื่อมี Code length เป็น 3 ที่ภาครับ..................... 85
57 สัญญาณ OOK กับสัญญาณ DSSS ที่มี Code length เป็น 7 ในทางความถี่.......... 86
58 สัญญาณ DSSS ที่มี Code length เป็น 7 ในทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1................................. 87
59 แบบรูปตาของสัญญาณ DSSS เมื่อมี Code length เป็น 7 จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1... 87
60 แบบรูปตาของสัญญาณ DSSS เมื่อมี Code length เป็น 7 ที่ภาครับ..................... 88
61 สัญญาณ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 ในทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด และแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับ... 102
62 สัญญาณ DSSS ที่มี Code length เป็น 7 ในทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด และแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับ... 107

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

ระบบการสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้นได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบการสื่อสารที่มีระยะห่างระหว่างภาคส่งกับภาครับไม่ไกลมากนัก เนื่องมาจากระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้นจะมีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้เป็นปริมาณมากและมีต้นทุนในการวางระบบที่ไม่สูงมากนัก ในระบบการสื่อสารจะเรียกปริมาณของสัญญาณข้อมูลที่ตัวกลางในการส่งสัญญาณจะสามารถทำการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับได้ว่า แบนด์วิธ (Bandwidth) โดยเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีความยาว 1 กิโลเมตรจะมีขนาดของแบนด์วิธที่ถูกใช้งานโดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 200 ถึง 500 MHz ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะเฉพาะของเส้นใยแก้วนำแสง ขนาดของแบนด์วิธที่ถูกใช้งานโดยทั่วไปของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนี้จะถูกเรียกว่า 3-dB Modal Bandwidth จากการที่ขนาดของ 3-dB Modal Bandwidth ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดมีขนาดแบนด์วิธที่จำกัด จึงส่งผลให้ระบบการสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้นมีขนาดของแบนด์วิธที่จะสามารถทำการส่งสัญญาณข้อมูลจากภาคส่งไปยังภาครับมีขนาดที่จำกัดตามไปด้วย ดังนั้นผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจึงได้ถูกนำมาทำการศึกษาเพื่อหาช่องส่งสัญญาณที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการเพิ่มขนาดแบนด์วิธให้กับระบบการสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ซึ่งจากการศึกษาผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด จะพบว่าลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั้นจะมีลักษณะเป็นแบบ Frequency Selective กล่าวคือจะสามารถทำการส่งสัญญาณข้อมูลผ่านตัวกลางในการส่งสัญญาณแบบ Frequency Selective ได้เพียงบางย่านความถี่เท่านั้น และยังพบว่ามีพาสแบนด์ในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นช่องส่งสัญญาณให้กับระบบการสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางได้ ดังนั้นวิธีการหนึ่งที่จะสามารถเพิ่มขนาดแบนด์วิธให้กับระบบการสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางนั่นก็คือการอาศัยพาสแบนด์ในย่านความถี่ต่ำดังกล่าวของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั่นเอง เนื่องจากผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดมีลักษณะเป็นแบบ Frequency

Selective ดังนั้นในการส่งสัญญาณข้อมูลผ่านพาสแบนด์ในย่านความถี่ต่ำที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นช่องส่งสัญญาณให้กับระบบการสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจะต้องอาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณข้อมูลที่เรียกว่า การมัลติเพล็กซ์แบบคลื่นพาห์ย่อย (Subcarrier Multiplexing) ด้วย โดยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบมัลติเพล็กซ์แบบคลื่นพาห์ย่อยนั้นจะทำการแบ่งสัญญาณข้อมูลออกเป็นสัญญาณย่อยหลาย ๆ สัญญาณ และจะทำการมอดูเลชันสัญญาณย่อยแต่ละสัญญาณไปยังย่านความถี่ของช่องส่งสัญญาณแต่ละช่อง ดังนั้นการส่งสัญญาณข้อมูลโดยอาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณโดยการมัลติเพล็กซ์แบบคลื่นพาห์ย่อยจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะสามารถช่วยแก้ไขปัญหาของตัวกลางในการส่งสัญญาณที่มีลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่แบบ Frequency Selective ได้ เนื่องจากเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดแต่ละเส้นนั้นจะมีลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณลักษณะเฉพาะของเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละเส้น ซึ่งหากระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงเส้นใยแก้วนำแสงที่เป็นตัวกลางแล้วนั้น อาจทำให้ประสิทธิภาพที่ได้จากระบบสื่อสารมีการเปลี่ยนแปลงไป ในการทำให้ประสิทธิภาพของระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณมีความคงที่แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ อาจทำได้โดยอาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณข้อมูลที่จะมีการทำให้สัญญาณข้อมูลในทางความถี่มีการกระจายของสัญญาณในทางความถี่ที่กว้างมากขึ้นเพื่อเป็นลดผลกระทบที่เกิดจากการลดทอนของสัญญาณ ซึ่งการประยุกต์ใช้งานเทคนิคในการส่งสัญญาณดังกล่าวนี้จะทำให้ระบบสื่อสารทางแสงมีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างคงที่แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ หรืออาจกล่าวได้ว่าการประยุกต์ใช้งานเทคนิคในการส่งสัญญาณดังกล่าวนี้จะทำให้ระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณข้อมูลมีความน่าเชื่อถือของระบบเพิ่มสูงขึ้น นอกเหนือไปจากการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณด้วยการเพิ่มขนาดแบนด์วิธและการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบสื่อสารแล้วนั้น การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารในด้านของคุณภาพของสัญญาณที่ภาครับจะได้รับนั้นก็เป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญเช่นเดียวกัน โดยในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณในด้านของคุณภาพของสัญญาณข้อมูลที่ภาครับจะได้รับนั้นจะสามารถทำได้โดยการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูล

ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงจะทำการศึกษาและจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด (Multimode Fiber) ที่มีการกระจายทางสถิติของการหน่วงทางเวลาของสัญญาณเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) ในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz เพื่อหาวิธีการในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลาย

โหมดในย่านความถี่ดังกล่าวเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณทั้งในด้านของการเพิ่มขนาดแบนด์วิธให้กับระบบสื่อสาร การเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบสื่อสารและการเพิ่มคุณภาพให้กับสัญญาณข้อมูลที่ภาครับจะได้รับ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบมัลติเพล็กซ์และเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีลักษณะเป็นแบบ Frequency Selective และในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณในด้านของคุณภาพของสัญญาณข้อมูลที่ภาครับจะได้รับนั้นจะอาศัยการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้นที่ภาคส่ง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะจำลองระบบสื่อสารที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติกับระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณได้ ซึ่งเมื่อทำการประยุกต์ใช้ระบบสื่อสารทางแสงจากงานวิจัยนี้แล้ว จะส่งผลให้ระบบสื่อสารทางแสงที่มีอยู่เดิมประสิทธิภาพที่เพิ่มสูงขึ้น

จุดมุ่งหมายของการศึกษา

1. ศึกษาและประยุกต์ใช้งานผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด (Multimode Fiber) ที่มีการกระจายทางสถิติของการหน่วงทางเวลาของสัญญาณเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution)

2. ศึกษาการเข้ารหัสสัญญาณสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น

3. ศึกษาเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

4. วิเคราะห์ประสิทธิภาพและข้อจำกัดของระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ เมื่ออาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ DSSS

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้จากการศึกษาการจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด (Multimode Fiber) ในย่านความถี่ต่ำ ที่มีการกระจายทางสถิติของการหน่วงทางเวลาของสัญญาณเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution)

2. ได้ความรู้จากการศึกษาการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น (Linear Block Code)

3. ได้ความรู้จากการศึกษาเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS

4. ได้แนวโน้มระหว่างค่า BER กับขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่ระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณจะสามารถทำการส่งสัญญาณได้

ซึ่งจะสามารถนำผลที่ได้นี้ไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบหรือการปรับปรุงประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณได้

ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาและทำการจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด (Multimode Fiber) ในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz โดยที่มีการกระจายทางสถิติของการหน่วงทางเวลาของสัญญาณเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution)

2. ศึกษากระบวนการของการเข้ารหัสสัญญาณสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น

3. จำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ และอาศัยการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น

4. ศึกษาเทคนิคการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ DSSS

5. ศึกษาประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณข้อมูลด้วยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS ผ่านระบบการสื่อสารทางแสงที่มีตัวกลางในการส่งสัญญาณเป็นเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz

6. จำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ โดยอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS

7. วิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบสื่อสารด้วยค่า Bit Error Rate (BER) จากการวิเคราะห์แบบ Semi-Analytical Simulation ของตัวแปร Q

สมมติฐานของการวิจัย

1. ผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจะมีคุณสมบัติคงที่ (Static) โดยจะมีลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่เป็นแบบ Frequency Selective และจะสามารถทำการประมาณค่าความถี่มอดูเลชันได้ในย่านความถี่ตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz

2. สามารถใช้งานผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด (Multimode Fiber) ที่มีการกระจายทางสถิติของการหน่วงทางเวลาของสัญญาณเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) ในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz เป็นช่องส่งสัญญาณได้

3. การเข้ารหัสสัญญาณสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้นจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณได้

4. เมื่ออาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ DSSS แล้วจะทำให้ระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณมีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น

5. ค่า BER ที่ได้ของระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ เมื่ออาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ DSSS และทำการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้นจะมีค่าที่ต่ำกว่า 10^{-9} ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในการสื่อสารทางแสง

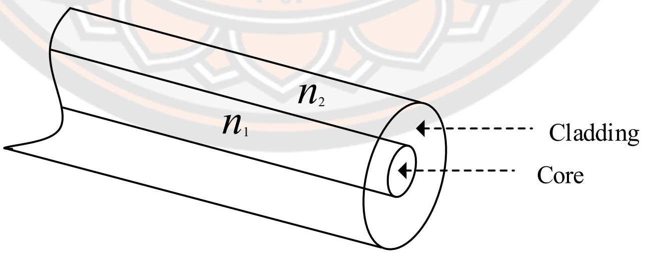
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวข้อง

ระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้นเป็นระบบการสื่อสารระบบหนึ่งจากระบบการสื่อสารที่ถูกใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยระบบการสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้นจะมีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูงสามารถส่งข้อมูลได้เป็นปริมาณมาก ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด โดยจะทำการจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดและทำการศึกษาช่องส่งสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำ จากนั้นจะทำการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ ดังนั้นในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวข้องที่มีความสำคัญในการนำไปใช้ในการศึกษาและการทำแบบจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำ

เส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic)

ในระบบสื่อสารทางแสงนั้นจะอาศัยอุปกรณ์ที่เรียกว่าเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับ โครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงนั้นจะสามารถแสดงได้ดังภาพ 1

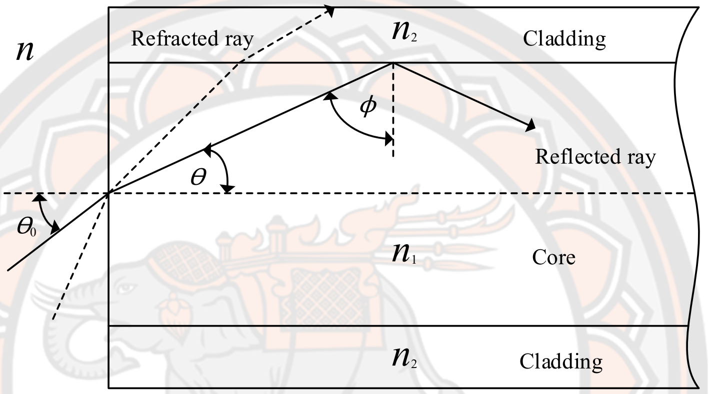


ภาพ 1 โครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสง (1)

จากภาพ 1 เป็นการแสดงโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งจะพบว่าโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงนั้นจะประกอบไปด้วย 2 โครงสร้างหลัก ๆ ได้แก่ คอร์ (Core) และแคลดดิ้ง (Cladding) โดยที่คอร์นั้นจะเป็น แกนกลางของเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งทำหน้าที่เป็นช่องทางในการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับ และสำหรับแคลดดิ้งนั้นจะเป็นผิวที่ห่อหุ้มคอร์ ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรง

ให้กับคอร์และเส้นใยแก้วนำแสงและยังทำหน้าที่สำคัญในการช่วยลดการสูญเสียที่เกิดจากการกระเจิงของแสงในคอร์

สำหรับการส่งสัญญาณแสงจากภาคส่งไปยังภาครับโดยการอาศัยเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้น จะอาศัยความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหในคอร์และแคลดดิ้ง โดยเมื่อค่าดัชนีหักเหในคอร์ถูกแทนด้วย n_1 ค่าดัชนีหักเหในแคลดดิ้งถูกแทนด้วย n_2 และค่าดัชนีหักเหในคอร์นั้นมีค่ามากกว่าค่าดัชนีหักเหในแคลดดิ้ง ($n_1 > n_2$) จะสามารถอธิบายการเดินทางของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสงได้ดังภาพ 2



ภาพ 2 การเดินทางของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสง (2)

จากภาพ 2 เป็นการแสดงการเดินทางของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสง โดยแสงจะเดินทางเข้าสู่คอร์ของเส้นใยแก้วนำแสงจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหเป็น n และทำมุม θ_0 กับคอร์และแสงจะหักเหไปด้วยมุม θ จนเข้าไปกระทบกับผิวรอยต่อระหว่างคอร์และแคลดดิ้งด้วยมุม $\emptyset$ ถ้ามุม $\emptyset$ มีขนาดที่ใหญ่เพียงพอ ก็จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดภายในคอร์ของเส้นใยแก้วนำแสงส่งผลให้สัญญาณแสงสามารถเดินทางจากต้นทางไปยังปลายทางภายในเส้นใยแก้วนำแสงได้

เส้นใยแก้วนำแสงนั้นจะสามารถทำการแบ่งประเภทตามจำนวนโหมดภายในเส้นใยแก้วนำแสงได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. เส้นใยแก้วนำแสงประเภทโหมดเดียว (Single mode fiber) โดยเส้นใยแก้วนำแสงประเภทโหมดเดียวนี้จะมีขนาดโครงสร้างของคอร์ที่ค่อนข้างเล็ก ทำให้สามารถส่งสัญญาณแสงเข้าไปในคอร์ได้เพียงสัญญาณเดียว อย่างไรก็ตามในระบบสื่อสารทางแสงที่อาศัยเส้นใยแก้วนำแสงประเภทโหมดเดียวเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้นจะมีข้อดีคือจะสามารถทำการส่งสัญญาณได้เป็นปริมาณมากในระยะทางที่ค่อนข้างไกล

2. เส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด (Multimode Fiber) จะมีขนาดโครงสร้างของคอร์ที่ค่อนข้างใหญ่ทำให้สามารถส่งสัญญาณแสงเข้าไปในคอร์ได้หลายสัญญาณ โดยโหมดแต่ละโหมดที่

เกิดขึ้นภายในเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั้นจะมีความเร็วในการเดินทางผ่านเส้นใยแก้วนำแสงที่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้สัญญาณแสงที่เดินทางไปในแต่ละโหมดเดินทางไปถึงยังปลายทางในเวลาที่ไม่พร้อมกันซึ่งทำให้เกิดการหน่วงเวลาที่แตกต่างกันไปแต่ละโหมด ดังนั้นเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจึงได้รับความนิยมในการนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบสื่อสารทางแสงที่มีระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับไม่มากนัก เช่น ระบบการสื่อสารภายในอาคารหรือระหว่างอาคาร

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด (Multimode Fiber) โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจะถูกศึกษาในหัวข้อต่อไป

ผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

ผลตอบสนองทางเวลาของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจะขึ้นอยู่กับจำนวนโหมดของเส้นใยแก้วนำแสงและเวลาหน่วงของสัญญาณในแต่ละโหมด (3) โดยผลตอบสนองทางความของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังนี้

$$h_{fiber}(t)=\sum_{n=1}^{N_{mode}}\delta(t-t_{d,n}) \tag{2.1}$$

เมื่อ $h_{fiber}(t)$ คือ ผลตอบสนองทางเวลาของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

N_{mode} คือ จำนวนโหมดของเส้นใยแก้วประเภทหลายโหมด

$t_{d,n}$ คือ เวลาหน่วงของสัญญาณ ณ โหมดที่ n

ผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจะสามารถหาได้จากการแปลงฟูเรียร์ในสมการ (2.1) ดังนี้

$$H_{fiber}(f)=\sum_{n=1}^{N_{mode}}e^{-j2\pi f t_{d,n}} \tag{2.2}$$

เมื่อ $H_{fiber}(f)$ คือ ผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

N_{mode} คือ จำนวนโหมดของเส้นใยแก้วประเภทหลายโหมด

$t_{d,n}$ คือ เวลาหน่วงของสัญญาณ ณ โหมดที่ n

จากสมการ (2.2) จะพบว่าผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด จะขึ้นอยู่กับจะขึ้นอยู่กับจำนวนโหมดของเส้นใยแก้วนำแสงและเวลาหน่วงของสัญญาณในแต่ละโหมด ซึ่งเมื่อพิจารณาให้เวลาหน่วงของสัญญาณในแต่ละโหมดในสมการ (2.2) มีการกระจายทาง

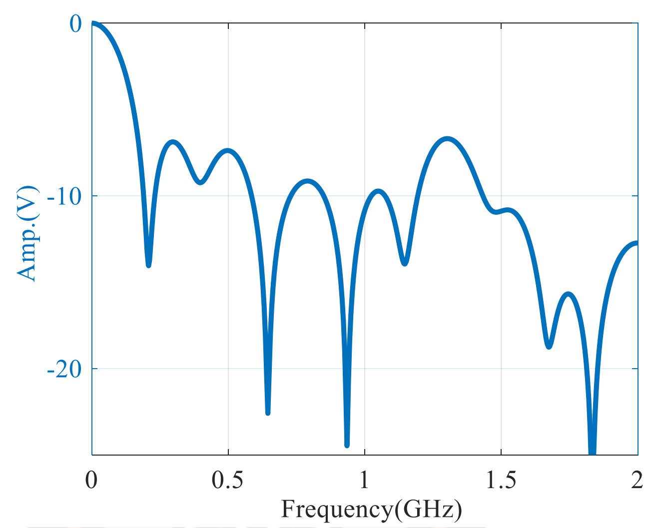
สถิติเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) แล้วจะทำให้สามารถแสดง Probability Density Function ของ $t_{d,n}$ ($f_{t_{d,n}}(t_{d,n})$) ได้ดังสมการ (2.3)

$$f_{t_{d,n}}(t_{d,n})=\begin{cases}\dfrac{1}{2t_{d,dev}}; & t_{d,avg}-t_{d,dev}\leq t_{d,n}\leq t_{d,avg}+t_{d,dev}\\ 0 \quad ; & \text{elsewhere}\end{cases} \tag{2.3}$$

เมื่อ $t_{d,avg}$ คือ ค่าเฉลี่ยของเวลาหน่วงที่เกิดขึ้นสำหรับสัญญาณในโหมดที่ n

$t_{d,dev}$ คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลาหน่วงที่เกิดขึ้นสำหรับสัญญาณโหมดที่ n

ผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจะสามารถทำการจำลองได้โดยอาศัยสมการ (2.2) และตัวแปร $t_{d,dev}$ จากสมการ (2.3) โดยจะสามารถแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดได้ดังแสดงในภาพ 3



ภาพ 3 ผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

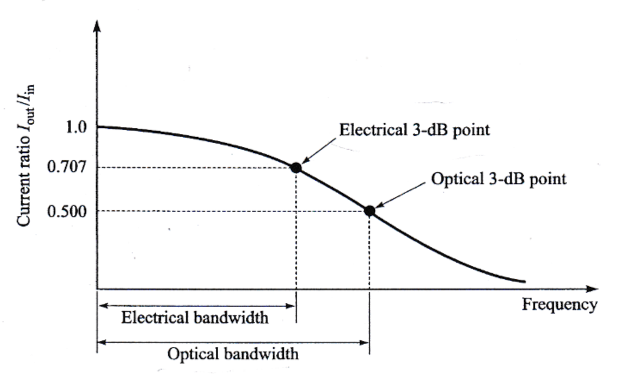
ที่มีจำนวนโหมด 100 โหมด $t_{d,avg}$ = 5 μs และ $t_{d,dev}$ = 2.50 ns

จากภาพ 3 เป็นการแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเมื่อมีจำนวนโหมด 100 โหมด $t_{d,avg}$ = 5 μs และมีค่า $t_{d,dev}$ เป็น 2.50 ns ซึ่งจากภาพ 3 นั้นจะพบว่าขนาดแอมพลิจูดของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจะมีขนาดลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น และผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั้นจะมีลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่เป็นแบบ Frequency Selective กล่าวคือจะสามารถทำการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดได้ในบางย่านความถี่เท่านั้น ซึ่งจากการศึกษา (21) จะพบว่ามีพาสแบนด์ของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภท

หลายโหมดในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 1.6 GHz ที่สามารถนำไปใช้งานเป็นช่องส่งสัญญาณได้ และที่ช่องสัญญาณแต่ละช่องในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 1.6 GHz นี้สามารถทำการประมาณค่าขนาดแอมพลิจูด ขนาดแบนด์วิธ และค่าความถี่มอดูเลชันของช่องส่งสัญญาณแต่ละช่องได้ด้วยสมการ ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการศึกษาผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด โดยจะทำการศึกษาผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ที่ 0 ถึง 1.6 GHz

3-dB Modal Bandwidth

3 dB-Modal Bandwidth คือขนาดความกว้างแบนด์วิธของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสง โดยที่ขนาดความกว้างแบนด์วิธแบบ 3 dB-Modal Bandwidth นี้จะสามารถนิยามได้โดยจุดความถี่ที่มีกำลังไฟฟ้า ($P(\omega)$) ของสัญญาณมีกำลังลดลงไปครึ่งหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าของสัญญาณอินพุต ซึ่งจุดที่ได้กล่าวข้างต้นนี้ก็คือจุด 3 dB นั่นเองขนาดของ Electrical 3 dB-Modal Bandwidth สามารถแสดงได้ดังภาพ 4



ภาพ 4 ขนาดความกว้างของ 3 dB Modal Bandwidth (2)

จากภาพ 4 จะพบว่าในการนิยาม 3 dB-Modal Bandwidth นั้นนอกจากจะนิยามเป็น Electrical 3 dB-Modal Bandwidth ดังกล่าวข้างต้นแล้วยังสามารถทำการนิยาม 3 dB-Modal Bandwidth ได้เป็น 3 dB-Modal Bandwidth อีกแบบหนึ่งด้วยนั่นก็คือ Optical 3-dB Modal Bandwidth โดยการนิยาม Optical 3-dB Modal Bandwidth นั้นจะสามารถทำได้โดยการพิจารณาจุดความถี่ที่มีกำลังของสัญญาณแสงที่ถูกมอดูเลชันแล้ว ($P(\omega)$) มีค่าลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของสัญญาณแสงที่ยังไม่ได้ถูกมอดูเลชัน ($P(0)$)

ขนาดของ 3 dB-Modal Bandwidth จะถูกแสดงอยู่ในรูปของผลคูณระหว่างแบนด์วิธและระยะทาง (Bandwidth-distance product) ซึ่งความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงที่ถูกแสดงใน Bandwidth-distance product นั้นจะถูกกำหนดด้วยความยาว 1 กิโลเมตร ดังนั้นหากใน

ระบบสื่อสารมีการใช้งานเส้นใยแก้วนำแสงที่มีความยาวน้อยกว่าหรือมากกว่า 1 กิโลเมตร จะทำให้ขนาดของ 3 dB-Modal Bandwidth มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยขนาดของ 3 dB-Modal Bandwidth ที่ความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงต่าง ๆ สามารถหาได้โดยอาศัยสมการ (2.4) ดังนี้

$$BW_{3dB,Modal,L} = BW_{3dB,modal} \times L \quad \text{(MHz-km)} \tag{2.4}$$

เมื่อ $BW_{3dB,Modal,L}$ คือ Bandwidth-Distance Product ของเส้นใยแก้วนำแสง
$BW_{3dB,Modal}$ คือ ขนาดของ 3 dB-Modal Bandwidth ในหน่วย MHz
L คือ ความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในการส่งสัญญาณในหน่วยกิโลเมตร (km)

ในระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้น จะมีขนาดแบนด์วิธที่ถูกใช้งานทั่วไปจำกัดอยู่ประมาณ 300 ถึง 500 MHz โดยจะเรียกขนาดแบนด์วิธของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่ถูกจำกัดอยู่นี้ว่า 3-dB Modal Bandwidth

เมื่อได้ทำการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสร้างแบบจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ขนาดแบนด์วิธในย่านความถี่ 3 dB-Modal Bandwidth แล้ว ในส่วนต่อไปที่จะต้องทำการศึกษาก็คือทฤษฎีที่จะถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ

การเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น (Linear Block Code)

การเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลเป็นหนึ่งในหลายกระบวนการที่จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารได้ อย่างไรก็ตามการเข้ารหัสสัญญาณจะทำให้ระบบสื่อสารมีความซับซ้อนที่เพิ่มสูงขึ้นและยังส่งผลให้ขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลมีค่าลดลง ดังนั้นการเลือกประเภทของการเข้ารหัสสัญญาณให้มีความเหมาะสมกับระบบสื่อสารจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง การเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลที่เป็นพื้นฐานและได้รับความนิยมโดยทั่วไปคือการเข้ารหัสสัญญาณแบบคอนโวลูชั่นและการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น ซึ่งเป็นการเข้ารหัสสัญญาณแบบ Forward Error Correction (FEC) กล่าวคือการเข้ารหัสสัญญาณดังกล่าวนี้จะมีความสามารถในการตรวจสอบและแก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดที่ปลายทางของระบบสื่อสารได้ โดยที่มีความซับซ้อนของการเข้ารหัสสัญญาณค่อนข้างน้อย สำหรับการเข้ารหัสแบบบล็อกเชิงเส้น (4-6) นั้นข้อมูลที่จะถูกเข้ารหัสจะถูกแบ่งออกเป็นบล็อกของข้อมูลซึ่งจะถูกเขียนแทนด้วยเมทริกซ์ **m** ขนาดบล็อกละ k บิตเท่า ๆ กัน โดยจะสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ (2.5) นั่นคือ

$$\mathbf{m} = \left[m_0, m_1, \ldots, m_{k-1}\right] \tag{2.5}$$

เมื่อ $\mathbf{m}$ คือ เมทริกซ์ข้อมูลขนาด 1×*k*

m_i คือ บิตข้อมูลที่จะถูกเข้ารหัส

บล็อกข้อมูลขนาด *k* บิตแต่ละบล็อกนั้นจะถูกนำไปสร้างเป็นคำรหัสหรือเมทริกซ์ **c** จำนวน *n* บิต ซึ่งในการสร้างคำรหัสหรือเมทริกซ์ **c** นั้นจะสามารถทำได้โดยการนำบล็อกข้อมูล **m** ไปคูณกับเมทริกซ์ **G** ซึ่งก็คือเบสซิสของคำรหัสและจะถูกเรียกว่า เมทริกซ์ตัวกำเนิด (Generator matrix) โดยในการสร้างคำรหัสนั้นจะสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ (2.6) และ (2.7) นั่นคือ

$$\mathbf{c} = \mathbf{mG} \tag{2.6}$$

$$\mathbf{c} = \left[m_0, m_1, \ldots, m_{k-1}\right] \begin{bmatrix} g_{0,0} & g_{0,1} & \cdots & g_{0,n-1} \\ g_{1,0} & g_{1,1} & \cdots & g_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{k-1,0} & g_{k-1,1} & \cdots & g_{k-1,n-1} \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

เมื่อ $\mathbf{c}$ คือ เมทริกซ์คำรหัสขนาด 1×*n*

g_{mn} คือ เบสซิสของคำรหัส

การเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นนั้นจะมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ ซึ่งในการนิยามรูปแบบของการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นนั้นจะถูกนิยามด้วยจำนวนบิตของคำรหัสและจำนวนบิตของข้อความซึ่งจะถูกเขียนในรูปของ (*n*, *k*) เช่น การเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น (7, 4) (15, 11) (15, 7) และ (31, 26) เป็นต้น ซึ่งการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในแต่ละแบบดังกล่าวข้างต้นนั้น จะมีลักษณะของเมทริกซ์ตัวกำเนิด **G** ที่แตกต่างคือ $g(x) = x^3 + x + 1$ $g(x) = x^4 + x + 1$ $g(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + 1$ และ $g(x) = x^{10} + x^9 + x^8 + x^6 + x^5 + x^3 + 1$ ตามลำดับ ในการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในแต่ละรูปแบบนั้นจะมีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันในเรื่องของจำนวนบิตข้อมูลที่ผิดพลาดที่จะสามารถทำการตรวจสอบและแก้ไขได้ที่ภาครับของระบบสื่อสาร ซึ่งจำนวนของบิตที่ผิดพลาดที่จะสามารถทำการตรวจสอบและแก้ไขได้ที่ภาครับของระบบสื่อสารจะสามารถหาได้โดยอาศัยระยะแฮมมิ่งต่ำสุด (Minimum Hamming Distance) โดยค่าระยะแฮมมิ่งต่ำสุดจะสามารถหาค่าได้ดังสมการ (2.8) จากจำนวนของบิตพาริตี้ซึ่งก็คือจำนวนของบิตที่ถูกเพิ่มเข้ามา *n*-*k* บิต

$$d_{\min} = n - k + 1 \tag{2.8}$$

เมื่อสามารถหาค่าระยะแฮมมิ่งต่ำสุดได้แล้วดังสมการ (2.8) การหาจำนวนบิตข้อมูลที่ผิดพลาดที่จะสามารถทำการตรวจสอบและแก้ไขได้ที่ภาครับของระบบสื่อสารจะสามารถหาได้ดังสมการ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ

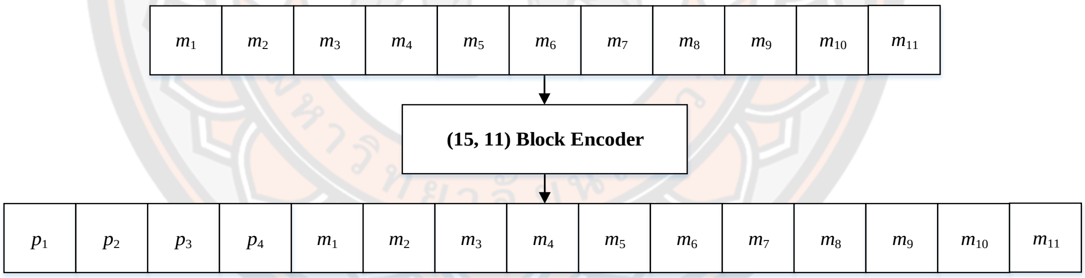
$$\text{Detectable Number of Error Bits} \leq d_{\min} - 1 \tag{2.9}$$

$$\text{Correctable Number of Error Bits} \leq \left| \frac{d_{\min} - 1}{2} \right| \tag{2.10}$$

และอีกสิ่งหนึ่งที่จะมีความแตกต่างกันก็คืออัตรารหัส (Code Rate, R_c) ซึ่งอัตรารหัสนั้นจะเป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงจำนวนของบิตข้อมูลที่จะสามารถถูกส่งออกไปได้เมื่อถูกเข้ารหัสแล้ว โดยอัตรารหัสจะสามารถหาค่าได้ด้วยสมการ (2.11)

$$R_c = \frac{k}{n} \tag{2.11}$$

จากทฤษฎีข้างต้นจะพบว่าเมทริกซ์ตัวกำเนิด **G** นั้นจะมีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น เมื่อการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นมีอัตรารหัสและความสามารถในการแก้ไขบิตที่ปลายทางสูงขึ้น โดยตัวอย่างแบบจำลองของการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น (15, 11) จะสามารถแสดงได้ดังภาพ 5



ภาพ 5 การเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น (15, 11)

จากภาพ 5 จะพบว่าการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น (15, 11) จะทำการแปลงบิตข้อความจำนวน 11 บิต (m_1, m_2, m_3, ..., m_{11}) ให้กลายเป็นคำรหัสจำนวน 15 บิต โดยจะมีจำนวนบิตที่ถูกเข้ามาคือบิตพาริตี้จำนวน 4 บิต (p_1, p_2, p_3, p_4) ซึ่งจะทำให้การเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น (15, 11) นั้นสามารถตรวจสอบบิตที่ผิดพลาดที่ปลายทางได้ 2 บิต และแก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดที่ปลายได้จำนวน 1 บิต โดยจะมีอัตรารหัสเป็น $\frac{15}{11}$ หรือ 0.73

จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเวกเตอร์ซับสเปซทำให้ทราบว่ายังมีดูอัลสเปซ (Dual Space) ของเมทริกซ์คำรหัส **c** ซึ่งดูอัลสเปซของเมทริกซ์ **c** นี้จะมีเมทริกซ์ตัวกำเนิดที่ถูกนิยามอยู่ในรูปของ

เมทริกซ์พาริตี้เช็ค **H** (Parity-Check Matrix) ซึ่งจะประกอบไปด้วย {$\mathbf{h}_0$, $\mathbf{h}_1$, ..., $\mathbf{h}_{n-k-1}$} ซึ่งเป็นเบซิสของดูอัลสเปซของเมทริกซ์ **c** โดยจะสามารถแสดงเมทริกซ์ **H** ได้ดังสมการ (2.12)

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_0 \\ \mathbf{h}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{h}_{n-k-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{0,0} & h_{0,1} & \cdots & h_{0,n-1} \\ h_{1,0} & h_{1,1} & \cdots & h_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n-k-1,0} & h_{n-k-1,1} & \cdots & h_{n-k-1,n-1} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

สำหรับการถอดรหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นนั้นที่ภาครับจะได้รับสัญญาณซึ่งจะกำหนดให้อยู่ในรูปของเมริกซ์ **r** ซึ่งสัญญาณที่ได้รับมานี้จะประกอบไปด้วยคำรหัสในรูปของเมริกซ์ **c** และรูปแบบของบิตที่ผิดพลาดซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวนในรูปของเมริกซ์ **e** (Error Pattern) ซึ่งจะสามรถอธิบายสัญญาณที่ภาครับได้รับมาเป็นสมการได้ดังสมการ (2.13)

$$\mathbf{r} = \mathbf{c} + \mathbf{e} \quad (2.13)$$

เมื่อภาครับได้รับสัญญาณ **r** มาแล้วนั้นจะนำสัญญาณ **r** ที่ได้มาใช้ในการหาค่าซินโดรม **s** (Syndrome) เพื่อทำการถอดรหัสสัญญาณที่ได้รับมา ค่าซินโดรมนั้นจะตัวบ่งบอกตำแหน่งของรูปแบบของบิตที่ผิดพลาดซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวน ซึ่งจะสามารถหาค่าของซินโดรมได้ดังสมการ (2.14)

$$\mathbf{s} = \mathbf{r}\mathbf{H}^T \quad (2.14)$$

จำนวนที่สามารถเป็นไปได้ของซินโดรมและรูปแบบของบิตที่ผิดพลาดซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวนนั้นจะมีอยู่ทั้งหมด 2^{n-k} รูปแบบ ดังนั้นหากต้องการให้รหัสแบบบล็อกเชิงเส้นสามารถทำการแยกความแตกต่างของความผิดพลาดได้มากยิ่งขึ้นก็จะสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนบิตพาริตี้นั่นเอง และเมื่อสามารถหาค่าซินโดรมเพื่อระบุตำแหน่งของรูปแบบของบิตที่ผิดพลาดซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวนได้แล้ว ในการแก้ไขบิตผิดพลาดนั้นก็จะสามารถทำได้โดยการนำสัญญาณที่ภาครับได้รับมารวมกับรูปแบบของบิตที่ผิดพลาดซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวนที่ได้ถูกระบุตำแหน่งด้วยค่าซินโดรมนั่นเอง

การส่งสัญญาณแบบ 4-Amplitude Shift Keying (4-ASK)

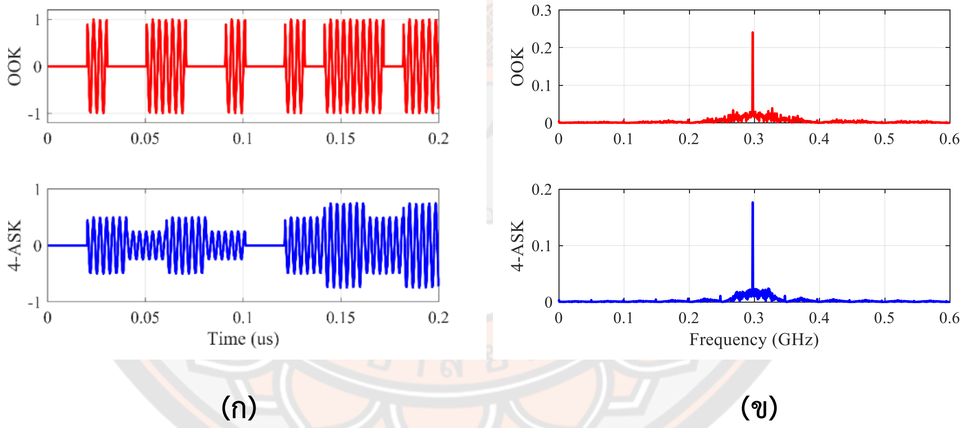
4-Amplitude Shift Keying (4-ASK) เป็นรูปแบบการส่งสัญญาณดิจิตอลรูปแบบหนึ่งซึ่งอาศัยพื้นฐานของการส่งสัญญาณแบบ Amplitude Shift Keying (ASK) (7, 8) โดยการส่งสัญญาณ

แบบ ASK นั้นจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณไปตามค่าของข้อมูลดิจิตอล ซึ่งการส่งสัญญาณแบบ ASK นั้นสามารถแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$s(t) = A_c m(t) \cos(\omega_c t) \tag{2.15}$$

เมื่อ $m(t)$ คือ สัญญาณข้อมูลแบบ unipolar

ในการส่งสัญญาณแบบ ASK โดยอาศัยสมการ (2.15) นั้นสัญญาณข้อมูล $m(t)$ จะถูกทำการพิจารณาทีละ 1 บิตข้อมูล ซึ่งจะส่งผลให้สัญญาแบบ ASK นั้นมีขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณที่แตกต่างกัน 2 ระดับ แต่สำหรับการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK นั้น สัญญาณข้อมูล $m(t)$ จะถูกทำการพิจารณาทีละ 2 บิตข้อมูล ซึ่งจะส่งผลให้สัญญาณแบบ 4-ASK นั้นมีขนาดของแอมพลิจูดที่แตกต่างกัน 4 ระดับ โดยจะสามารถแสดงรูปสัญญาณของการส่งสัญญาณแบบ ASK และ 4-ASK ในทางเวลาและทางความถี่ได้ดังภาพ 6



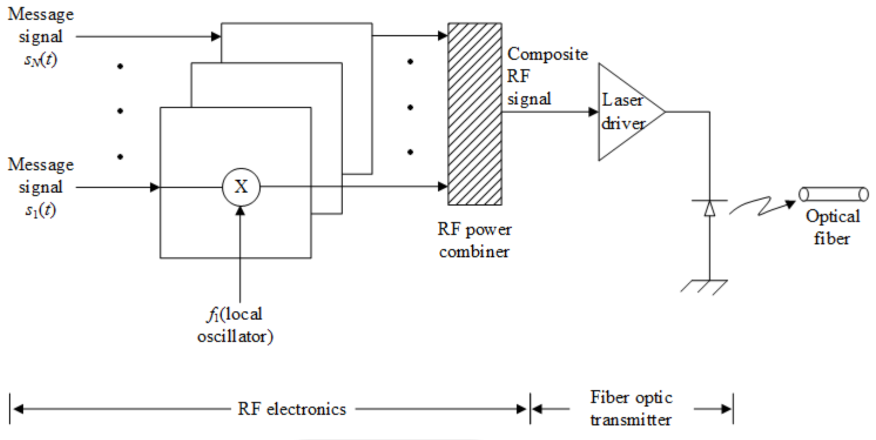
ภาพ 6 การส่งสัญญาณข้อมูลแบบ ASK และ 4-ASK ในทางเวลาและความถี่

จากภาพ 6(ก) นั้นจะเป็นการแสดงการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ ASK และ 4-ASK ในทางเวลา ซึ่งจะพบว่าการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ ASK นั้นจะมีขนาดแอมพลิจูดที่แตกต่างกัน 2 ระดับ โดยขนาดแอมพลิจูดของบิตข้อมูล 0 และ 1 นั้นจะถูกแทนด้วยขนาดแอมพลิจูดเป็น 0 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ ASK ในลักษณะดังกล่าวนี้จะถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าการส่งสัญญาณแบบ On-off Keying (OOK) และเมื่อพิจารณาการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ 4-ASK นั้นจะพบว่ามีขนาดแอมพลิจูดที่แตกต่างกัน 4 ระดับ โดยขนาดแอมพลิจูดที่แตกต่างกันแต่ละระดับนั้นจะถูกแทนด้วยสัญญาณข้อมูลที่แตกต่างกัน 2 บิตข้อมูล นั่นคือบิตข้อมูล 00 01 10 และ 11 จะถูกแทนด้วยขนาดแอมพลิจูดเป็น 0 0.25 0.50 และ 0.75 ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการส่ง

สัญญาณข้อมูลแบบ ASK กับการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ 4-ASK ในทางความถี่ดังแสดงในภาพ 6(ข) แล้วจะพบว่าเมื่อทำการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดของบิตเรตที่เท่ากันแล้วนั้น การส่งสัญญาณข้อมูลแบบ 4-ASK จะใช้แบนด์วิธในการส่งสัญญาณข้อมูลที่น้อยกว่าการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ ASK อยู่ครึ่งหนึ่ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่ออาศัยการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ 4-ASK แล้วนั้นจะทำให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลได้มากกว่าการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ ASK อยู่ประมาณ 2 เท่า

Subcarrier Multiplexing

Subcarrier Multiplexing (SCM) เป็นเทคนิคในการส่งสัญญาณประเภทหนึ่งที่มีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสง เนื่องจากเป็นเทคนิคในการส่งสัญญาณรูปแบบหนึ่งที่ช่วยให้สามารถทำการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงที่มีขนาดแบนด์วิธจำกัดให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุดได้ โดยระบบการสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางในการนำสัญญาณและทำการส่งสัญญาณโดยอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ SCM นั้นจะสามารถแสดงได้ดังภาพ 7



ภาพ 7 การส่งสัญญาณโดยอาศัยเทคนิค SCM (2)

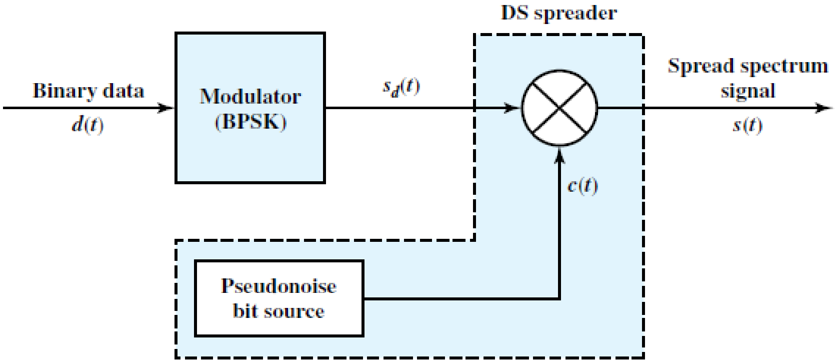
จากภาพ 7 เป็นระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณและอาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ SCM จะพบว่าที่ภาคส่งนั้นจะแบ่งสัญญาณออกเป็นสัญญาณย่อย N สัญญาณที่อิสระต่อกัน โดยสัญญาณย่อยแต่ละสัญญาณ ($s_i(t)$) นั้นจะถูกมอดูเลชันด้วยค่าความถี่มอดูเลชันที่แตกต่างกัน (f_i) จากนั้นสัญญาณย่อยที่ถูกมอดูเลชันแล้วจะถูกนำมารวมกันให้เป็นสัญญาณเพียงสัญญาณเดียวและจะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณแสงและส่งไปยังเส้นใยแก้วนำแสงด้วยเลเซอร์

เทคนิคการส่งสัญญาณแบบ SCM นั้นจะสามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์หรือที่เรียกว่า Inter Symbol Interference (ISI) ได้ โดยที่ภาคส่งจะทำการแบ่งสัญญาณข้อมูลที่มีบิตเรตสูงออกเป็นสัญญาณย่อยหลาย ๆ สัญญาณ ซึ่งจะส่งผลให้บิตเรตของสัญญาณย่อยแต่ละสัญญาณนั้นมีขนาดของบิตเรตที่ลดต่ำลง จึงทำให้การส่งสัญญาณข้อมูลโดยอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ SCM นั้นช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการเกยกันของสัญญาณได้ นอกจากนั้นเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ SCM ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการส่งสัญญาณผ่านตัวกลางในการส่งสัญญาณที่มีลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่เป็นแบบ Frequency Selective ได้ด้วย โดยการมอดูเลชันสัญญาณย่อยแต่ละสัญญาณ ($s_i(t)$) ไปยังค่าความถี่ (f_i) ที่มีความเหมาะสมกับผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกลางในการส่งสัญญาณ

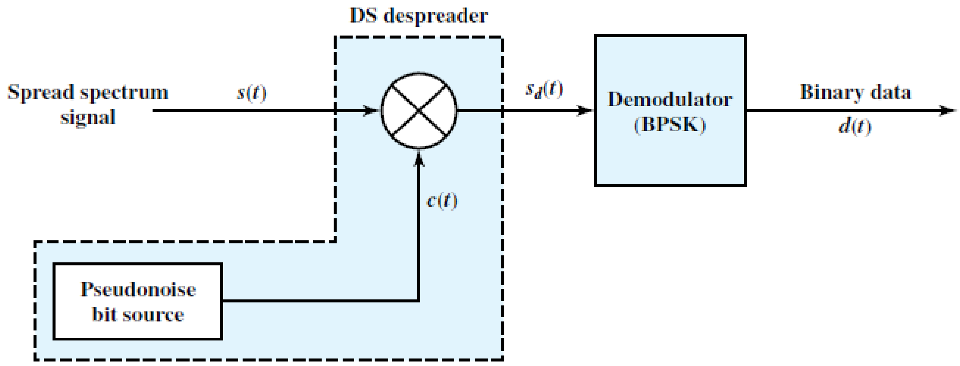
เทคนิคการส่งสัญญาณแบบ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

เทคนิคการมอดูเลชันสัญญาณแบบแผ่สเปกตรัม (Spread Spectrum Modulation) นั้นได้ถูกพัฒนาขึ้นมาครั้งแรกเพื่อใช้ในงานด้านการทหาร เนื่องจากเทคนิคการมอดูเลชันแบบแผ่สเปกตรัมนั้นจะสามารถป้องกันการดักจับสัญญาณและการส่งสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร (Jamming) ได้ โดยเทคนิคการมอดูเลชันแบบแผ่สเปกตรัมนั้นจะทำการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลด้วยสัญญาณรหัสแผ่ (Spread Sequence) ซึ่งรหัสแผ่แต่ละชุดนั้นจะมีคุณสมบัติความอิสระต่อกันกับรหัสแผ่ของผู้ใช้งานรายอื่น และขนาดความกว้างสเปกตรัมของรหัสแผ่จะต้องมีขนาดที่กว้างกว่าขนาดสเปกตรัมของสัญญาณข้อมูล จากคุณสมบัติดังกล่าวนั้นจะทำให้กำลังของสัญญาณข้อมูลมีการแผ่ออกตลอดช่วงของแถบความกว้างของสัญญาณรหัสแผ่นั้น และทำให้สัญญาณสเปกตรัมแผ่มีความหนาแน่นกำลังงาน (Power Spectral Density) ลดลง ซึ่งเป็นเหตุผลให้เทคนิคการมอดูเลชันแบบแผ่สเปกตรัมนั้นสามารถป้องกันการดักจับสัญญาณและการส่งสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารได้ เทคนิคการมอดูเลชันสัญญาณแบบแผ่สเปกตรัมที่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานนั้นจะมีอยู่ 2 วิธีการนั่นคือ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) และ Frequency Hopping (FH)

เทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS (9-11) นั้นจะเป็นการร่วมใช้ช่องสัญญาณด้วยวิธีการแผ่สเปกตรัมสัญญาณข้อมูลกับรหัสแผ่ ซึ่งแถบความกว้างของรหัสแผ่นั้นจะต้องมีความกว้างที่มากกว่าแถบสัญญาณของสัญญาณข้อมูล จึงทำให้สัญญาณที่ได้มีค่าความหนาแน่นกำลังงานต่ำอันจะส่งผลให้การรบกวนสัญญาณและการดักจับสัญญาณเป็นไปได้ยาก โดยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้นจะสามารถแสดงได้ดังภาพ 8



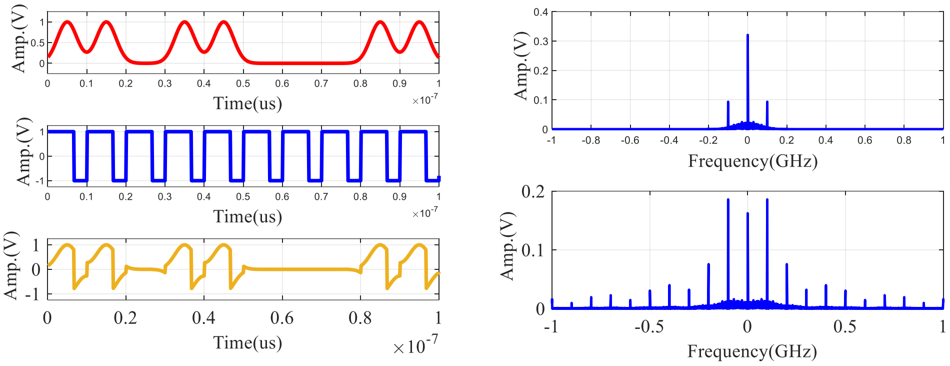
(ก) ภาคส่ง



(ข) ภาครับ

ภาพ 8 เทคนิคการส่งสัญญาณแบบ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) (10)

จากภาพ 8 เป็นการแสดงเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS โดยจากภาพ 8(ก) จะเป็นการแสดงเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่ภาคส่ง ซึ่งจะพบว่าการส่งสัญญาณข้อมูลโดยอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้น สัญญาณข้อมูล ($s(t)$) จะถูกคูณโดยตรงกับสัญญาณรหัสแผ่ (Spread Sequence) เพื่อสร้างเป็นสัญญาณแผ่ (Spread Spectrum Signal) ที่มีแถบความกว้างของสัญญาณแผ่ที่มากกว่าแถบความกว้างของสัญญาณข้อมูล และในการถอดรหัสการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้นจะสามารถทำได้ดังแสดงในภาพ 8(ข) โดยที่ภาครับจะทำการนำสัญญาณแผ่ไปคูณโดยตรงกับสัญญาณรหัสแผ่เพื่อเป็นการลดขนาดแถบความกว้างของสัญญาณแผ่ลงให้มีขนาดเท่ากับแถบความกว้างของสัญญาณข้อมูล โดยจะสามารถแสดงการส่งสัญญาณแบบ DSSS ในทางเวลาและความถี่ได้ดังภาพ 9

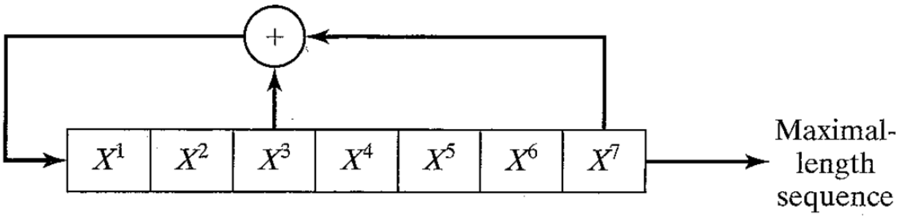


(ก) **(ข)**

ภาพ 9 การส่งสัญญาณโดยอาศัยเทคนิค DSSS ในทางเวลาและความถี่

จากภาพ 9 เป็นการแสดงการส่งสัญญาณแบบ DSSS โดยจากภาพ 9(ก) จะเป็นการแสดงการส่งสัญญาณแบบ DSSS ในทางเวลา ซึ่งจะพบว่าการส่งสัญญาณข้อมูลโดยอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้น สัญญาณข้อมูลจะถูกคูณโดยตรงกับสัญญาณรหัสแผ่ ซึ่งรหัสแผ่นี้จะประกอบไปด้วยบิตของรหัสที่เรียกว่า ชิป (Chip) ซึ่งมีค่าเป็น +1 และ -1 และอัตราชิป (Chip rate) ของสัญญาณรหัสแผ่นั้นจะต้องมีค่าสูงกว่าอัตราบิตของสัญญาณข้อมูล ซึ่งจะส่งผลให้สัญญาณข้อมูลในทางเวลาที่คูณกับรหัสแผ่แล้วมีอัตรารหัสที่เพิ่มสูงขึ้นตามอัตราชิปนั่นเอง และจะยังส่งผลให้สัญญาณข้อมูลที่คูณกับรหัสแผ่แล้วในทางความถี่ดังแสดงในภาพ 9(ข) มีการแผ่ออกตลอดช่วงของแถบความกว้างของสัญญาณรหัสแผ่และมีความหนาแน่นกำลังงานที่ลดลง

ในการสร้างรหัสแผ่นั้นจะมีจุดมุ่งหมายที่สำคัญคือเพื่อแบ่งแยกผู้ใช้งานแต่ละรายออกจากกัน ดังนั้นคุณสมบัติสำคัญที่รหัสแผ่จะต้องมีก็คือคุณสมบัติบัติการตั้งฉากกัน (Orthogonal) หรือมีค่าสหสัมพันธ์ (Cross Correlation) ระหว่างรหัสแผ่แต่ละชุดเป็นศูนย์ รหัสแผ่แบบ Maximal-Length Sequence เป็นรหัสแผ่รูปแบบหนึ่งที่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้งาน เนื่องจากรหัสแผ่แบบ Maximal-Length Sequence นั้นจะมีคุณสมบัติของการตั้งฉากระหว่างรหัสแผ่แต่ละชุดในทุกตำแหน่งเวลา และเนื่องจากในการส่งสัญญาณด้วยเทคนิค DSSS นั้นจำเป็นที่จะต้องมีการสร้างรหัสแผ่ทั้งในภาคส่งและภาครับดังแสดงในภาพ 8 ดังนั้นการสร้างรหัสแผ่จึงไม่ควรมีความซับซ้อนที่มากเกินไป ซึ่งรหัสแผ่แบบ Maximal-Length Sequence นั้นจะสามารถทำการสร้างได้โดยง่ายจากวงจรไบนารีชิฟรีจิสเตอร์ที่มีการควบคุมแบบป้อนกลับ (Binary Shift Register with Feedback) ดังแสดงในภาพ 10



ภาพ 10 วงจรไบนารีชิฟรีจิสเตอร์ที่มีการควบคุมแบบป้อนกลับ (Binary Shift Register with Feedback) สำหรับสร้างรหัสแผ่แบบ Maximal-Length Sequence

จากภาพ 10 จะพบว่าในการสร้างรหัสแผ่แบบ Maximal-Length Sequence ด้วยวงจรไบนารีชิฟรีจิสเตอร์ที่มีการควบคุมแบบป้อนกลับนั้น จะต้องมีการออกแบบจำนวนของชิฟรีจิสเตอร์ที่จะถูกใช้งานในวงจร โดยจำนวนของชิฟรีจิสเตอร์นั้นจะสอดคล้องกับพหุนามไม่ลดรูป (Irreducible Polynomials) ในฟิลด์กาลัว (Galois Fields) โดยตัวอย่างของพหุนามไม่ลดรูปในฟิลด์กาลัวจะสามารถแสดงได้ดังตาราง 1

ตาราง 1 พหุนามไม่ลดรูป (Irreducible Polynomials) ในฟิลด์กาลัว (Galois Fields)

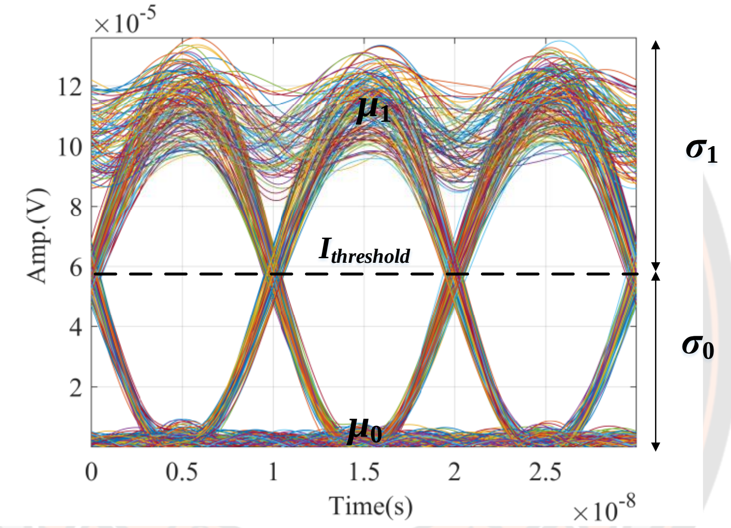
อันดับ	พหุนามไม่ลดรูป (Irreducible Polynomials)
2	$x^2 + x + 1$
3	$x^3 + x + 1, x^3 + x^2 + 1$
4	$x^4 + x + 1$
5	$x^5 + x^2 + 1, x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$
6	$x^6 + x + 1, x^6 + x^5 + x^2 + x + 1$
7	$x^7 + x^3 + 1, x^7 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + +1$

Bit Error Rate

Bit Error Rate (BER) นั้นเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญในระบบการสื่อสารดิจิตอล เนื่องจากค่า BER นั้นจะสามารถบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร โดยค่า BER นั้นจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบสื่อสารในลักษณะของความน่าจะเป็นที่ภาครับจะได้รับบิตข้อมูลที่ผิดพลาดไปจากภาคส่ง โดยสาเหตุที่ทำให้ภาครับได้รับสัญญาณข้อมูลที่ผิดพลาดไปนั้นอาจเกิดได้จากการลดทอนภายในช่องส่งสัญญาณและการเกิดสัญญาณรบกวน ในระบบการสื่อสารดิจิตอลนั้นจึงต้องการให้ระบบสื่อสารมีค่า BER ที่ต่ำมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่อย่างไรก็ตามหากระบบสื่อสารมีค่า BER ที่ต่ำมากเกินไปก็อาจจะเป็นการเพิ่มความซับซ้อนและการเพิ่มต้นทุนในการสร้างระบบสื่อสารโดยที่ไม่มี

ความจำเป็น ดังนั้นการเลือกใช้งานค่า BER ให้มีความเหมาะสมกับระบบสื่อสารที่จะถูกนำไปใช้งานจึงมีความสำคัญค่อนข้างมาก ซึ่งในระบบการสื่อสารทางแสงนั้นจะต้องการค่า BER ที่ต่ำกว่า 10^{-9}

ในการหาค่า BER ของระบบสื่อสารนั้นอาจทำการหาค่าได้โดยอาศัยการประยุกต์ใช้งานแบบรูปตา (Eye Pattern) ในการหาค่าแบบรูปตานั้นเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถนำไปใช้งานในการแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบสื่อสารได้ ซึ่งถ้าหากแบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับมีความแตกต่างระหว่างระดับสัญญาณค่อนข้างมากหรือกล่าวคือแบบรูปตามีลักษณะที่เปิดค่อนข้างกว้าง นั่นจะหมายถึงที่ภาครับน่าจะได้รับสัญญาณที่มีคุณภาพค่อนข้างดี โดยแบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับในทางเวลาจะสามารถแสดงได้ดังภาพ 11



ภาพ 11 แบบรูปตาของสัญญาณข้อมูลแบบ ASK ที่ภาครับ

จากภาพ 11 เป็นการแสดงแบบรูปตาของสัญญาณข้อมูลแบบ ASK ที่ภาครับของระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ ซึ่งจะพบว่าระดับสัญญาณระหว่างบิต 0 และบิต 1 นั้นมีความแตกต่างกันค่อนข้างมากหรือกล่าวคือแบบรูปตามีลักษณะที่เปิดค่อนข้างกว้าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ภาครับได้รับสัญญาณที่มีคุณภาพดีสามารถแยกแยะบิตข้อมูล 0 และบิตข้อมูล 1 ได้อย่างชัดเจน นอกจากการใช้งานแบบรูปตาด้วยการดูระดับความแตกต่างระหว่างบิตข้อมูล 0 และบิตข้อมูล 1 แล้วแบบรูปตายังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในการหาค่า BER ของระบบสื่อสารได้อีกด้วย โดยในการหาค่า BER ของระบบสื่อสารด้วยการอาศัยแบบรูปตานั้นจะสามารถทำได้โดยอาศัยการหาค่าของตัวแปร Q (12) ซึ่งในการหาค่าตัวแปร Q จากแบบรูปตานั้นจะสามารถทำได้โดยอาศัยค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิตข้อมูล 0 และบิตข้อมูล 1 ของแบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับในช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณ ซึ่งการหาค่า

BER ของช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณโดยอาศัยการหาค่าตัวแปร Q จากแบบรูปตาจะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (2.16) ดังนี้

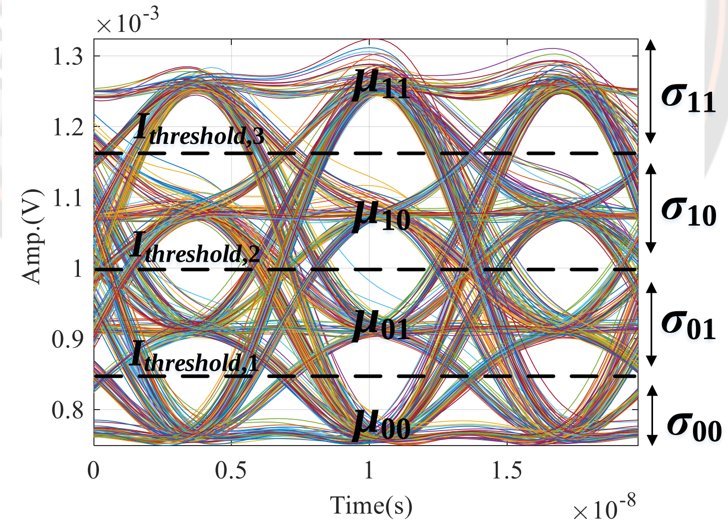
$$BER_{SCM} = K\left(\frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1}\right) = K\left(Q_{SCM}\right) \tag{2.16}$$

เมื่อ μ_0 และ μ_1 คือ ค่าเฉลี่ยของบิตข้อมูล 0 และบิตข้อมูล 1 ของสัญญาณที่ภาครับ

σ_0 และ σ_1 คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิตข้อมูล 0 และบิตข้อมูล 1 ของสัญญาณที่ภาครับ

และ $K(\cdot)$ จะสามารถหาค่าได้โดยอาศัย $\frac{1}{2}\left[1 - erf\left(\frac{Q_{SCM}}{\sqrt{2}}\right)\right]$

จากการศึกษาข้างต้นจะเป็นการหาค่า BER จากแบบรูปตาของการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ ASK แต่อย่างก็ตามในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการประยุกต์ใช้งานการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ด้วย โดยการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ 4-ASK นั้นจะมีขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณที่แตกต่างกัน 4 ระดับ โดยแบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับในทางเวลาของการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ 4-ASK จะสามารถแสดงได้ดังภาพ 12



ภาพ 12 แบบรูปตาของสัญญาณข้อมูลแบบ 4-ASK ที่ภาครับ

จากภาพ 12 เป็นการแสดงแบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับของการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ 4-ASK ซึ่งจะพบว่าแบบรูปตาจะมีขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณที่แตกต่างกัน 4 ระดับ โดยขนาดแอมพลิจูดแต่ละระดับนั้นจะแสดงถึงบิตข้อมูล 00 01 10 และบิตข้อมูล 11 ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานแบบรูปตาในการหาค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ 4-ASK โดยอาศัยการหาค่าตัวแปร Q จึง

จะต้องทำการหาค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดแอมพลิจูดของบิตข้อมูล 00 01 10 และบิตข้อมูล 11 ของสัญญาณที่ภาครับของระบบสื่อสาร ซึ่งการหาค่า BER ของด้วยการหาค่าตัวแปร Q จากแบบรูปตาของการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ 4-ASK จะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (2.17) (13) ดังนี้

$$BER_{SCM} = \frac{1}{4}\left[K\left(\frac{\mu_{01}-\mu_{00}}{\sigma_{01}+\sigma_{01}}\right)+K\left(\frac{\mu_{10}-\mu_{01}}{\sigma_{10}+\sigma_{01}}\right)+K\left(\frac{\mu_{11}-\mu_{10}}{\sigma_{11}+\sigma_{10}}\right)\right] \quad (2.17)$$

เมื่อ μ_{00} μ_{01} μ_{10} และ μ_{11} คือ ค่าเฉลี่ยของบิตข้อมูล 00 01 10 และบิตข้อมูล 11 ของสัญญาณที่ภาครับ

σ_{00} σ_{01} σ_{10} และ σ_{11} คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิตข้อมูล 00 01 10 และบิตข้อมูล 11 ของสัญญาณที่ภาครับ

จากการหาค่า BER ข้างต้นนั้นจะเป็นการหาค่า BER ของช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณ ซึ่งในการหาค่า BER ของระบบสื่อสารทั้งระบบนั้นจะต้องคำนึงถึงขนาดของบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่จะถูกส่งในช่องส่งสัญญาณแต่ละช่องด้วย โดยจะสามารถทำการหาค่า BER รวมของระบบสื่อสารได้ดังสมการ (2.18)

$$BER = \frac{\sum_{i=1}^{N_{carrier}} w_i BER_{SCM,i}}{\sum_{i=1}^{N_{carrier}} w_i} \quad (2.18)$$

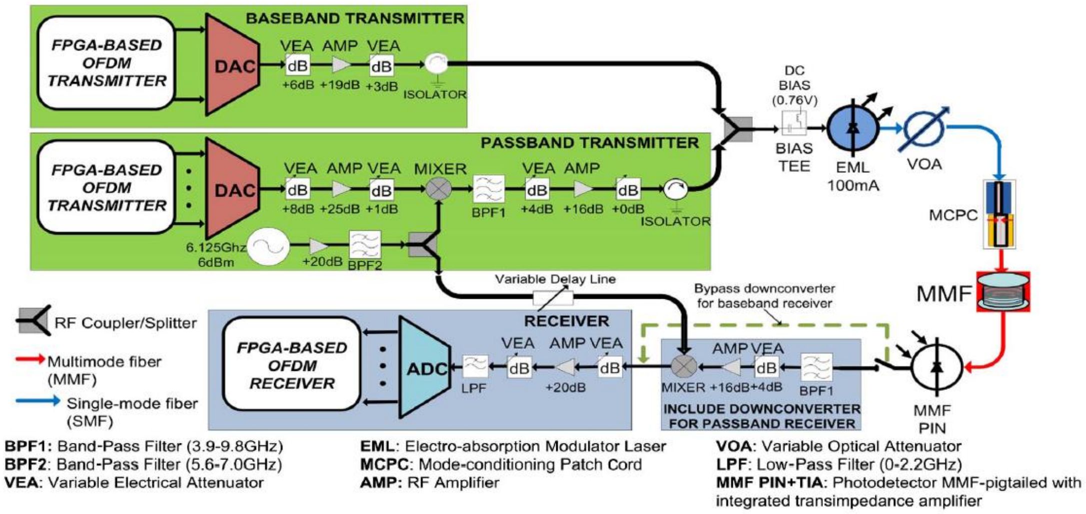
เมื่อ w_i คือ ค่าจำนวนเท่าของขนาดบิตเรต

จากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณดังกล่าวข้างต้นไปแล้วนั้น ในส่วนต่อไปนี้จะทำการศึกษางานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด และระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาข้างต้นจะพบว่าเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั้นจะมีขนาด 3-dB Modal Bandwidth ที่จำกัดอยู่ประมาณ 200-500 MHz ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะเฉพาะของเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งได้มีการศึกษาผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่าน

ความถี่สูงเพื่อที่จะได้นำเอาช่องสัญญาณในย่านความถี่สูงนี้ไปใช้งานเป็นช่องส่งสัญญาณเพื่อเพิ่มขนาดแบนด์วิธให้กับระบบสื่อสาร ซึ่งการส่งสัญญาณผ่านช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่สูงสามารถทำได้โดยการส่งสัญญาณที่มีบิตเรตสูงด้วยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ Subcarrier multiplexing (SCM) โดย (14-17) ได้ทำการส่งสัญญาณข้อมูลโดยอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ SCM ที่เรียกว่า Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) โดย (15) ได้ทำการทดลองส่งสัญญาณข้อมูลที่มีบิตเรตสูงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดดังแสดงในภาพ 13

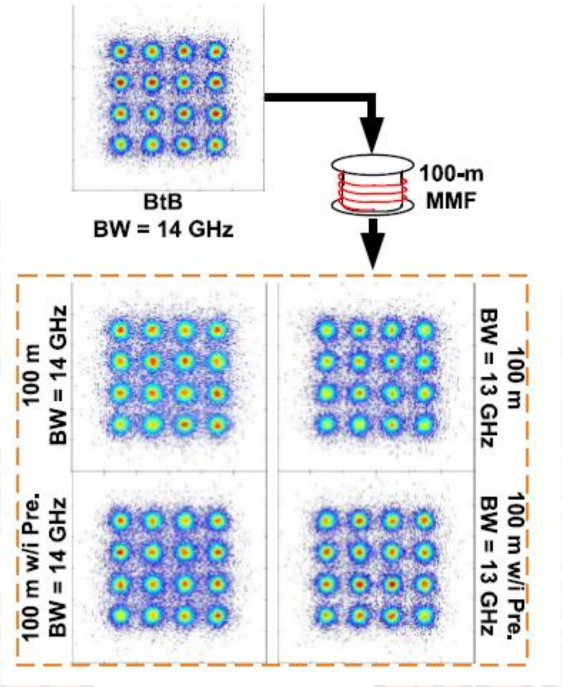


ภาพ 13 การทดลองส่งสัญญาณด้วยเทคนิค Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OOFDM) (15)

จากภาพ 13 เป็นแบบจำลองแสดงระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ โดยที่มีการประยุกต์ใช้เทคนิคการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OOFDM) ซึ่งในการทดลอง (15) นี้จะทำการส่งสัญญาณข้อมูลผ่านย่านความถี่สูงของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีอยู่ในย่านความถี่สูงประมาณ 6.125 GHz ซึ่งจากการศึกษาของ (15) พบว่าเมื่อทำการประยุกต์ใช้เทคนิคการาส่งสัญญาณแบบ OOFDM ในระบบสื่อสารดังแสดงในภาพ 13 แล้วจะสามารถทำการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรต 20.125 Gb/s ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่ยาว 100 เมตรได้ และเมื่อทำการเพิ่มความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงเป็น 1 กิโลเมตรแล้วจะส่งผลให้ขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลจะลดลงมาเป็น 19.375 Gb/s

การศึกษา (17) ได้ทำการทดลองส่งสัญญาณแบบ 16-Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM) ด้วยตัวกำเนิดแสงแบบ Vertical Cavity Emitting Laser (VCSEL) ที่

ประกอบด้วยธาตุอินเดียมความเข้มข้นสูง โดยจะทำการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่สูงที่มีขนาดของคอร์เป็น 50 ไมโครเมตรและมีความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงเป็น 100 เมตร ซึ่ง (17) ได้ทำการส่งสัญญาณแบบ 16-QAM ที่มีบิตเรตสูงมากกว่า 50 Gbps ซึ่งในการส่งสัญญาณนั้นได้อาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ OFDM โดยจะสามารถแสดงแผนผัง Constellation ที่ภาครับของการส่งสัญญาณดังกล่าวได้ดังภาพ 14



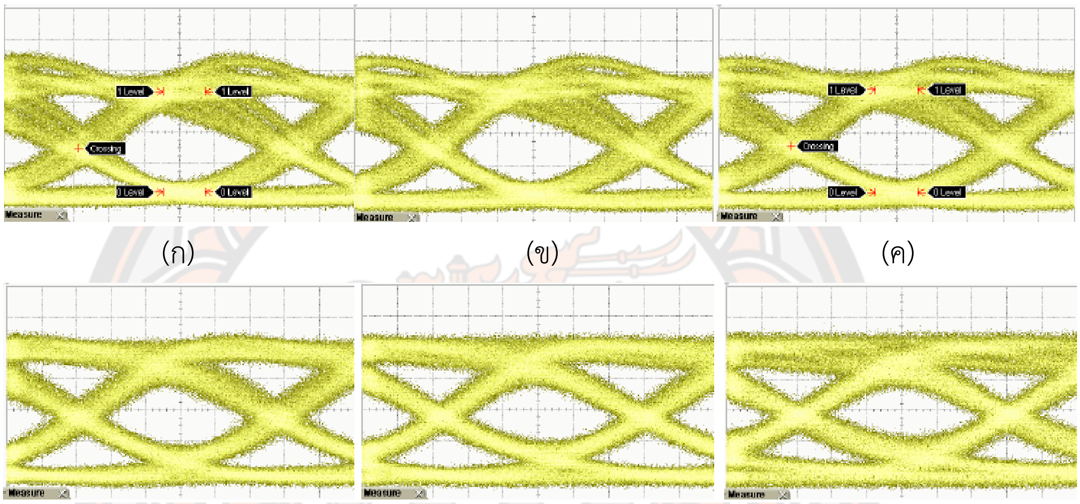
ภาพ 14 แผนผัง Constellation ของการส่งสัญญาณแบบ 16-QAM (17)

จากภาพ 14 เป็นการแสดงแผนผัง Constellation ที่ภาครับของการส่งสัญญาณแบบ 16- QAM ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่สูงด้วยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ OFDM โดยจะพบว่าแผนผัง Constellation ที่ได้จากภาครับของการส่งสัญญาณแบบ 16-QAM นั้นค่อนข้างมีความชัดเจน สามารถทำการแยกแยะจุดแต่ละระดับสัญญาณได้อย่างถูกต้อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่ออาศัยตัวกำเนิดแสงแบบ Vertical Cavity Emitting Laser (VCSEL) ที่ประกอบด้วยธาตุอินเดียมความเข้มข้นสูงและเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ OFDM แล้ว จะทำให้สามารถทำการส่งสัญญาณที่มีบิตเรตได้สูงกว่า 50 Gbps ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

นอกจากการใช้เทคนิคการส่งสัญญาณแบบ SCM แล้ว (18, 19) ได้อาศัยเทคนิคที่เรียกว่า Selective mode excitation ในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการส่งสัญญาณข้อมูลเพื่อเอาชนะข้อจำกัดทางขนาดของ 3-dB Modal Bandwidth โดยเทคนิคแบบ Selective mode excitation นั้นจะทำการกระตุ้นโหมดนำของเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งจะส่งผลให้ขนาดของ 3-dB Modal

Bandwidth ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าขนาดของผลคูณระหว่างแบนด์วิธและระยะทาง (Bandwidth-distance product) และค่า BER ของระบบสื่อสารสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ด้วยการอาศัย Selective mode excitation

ในการศึกษา (20) ได้ทำการทดลองส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่สูง โดยที่เส้นใยแก้วนำแสงนั้นจะมีความยาวที่ 1 กิโลเมตร และมีขนาดของคอร์เป็น 50 ไมโครเมตร โดยทำการส่งสัญญาณแบบ Non-Return to Zero (NRZ) โดยผลจากการส่งสัญญาณดังกล่าวสามารถแสดงได้ด้วยแบบรูปตาดังภาพ 15



(ก) (ข) (ค)

(ง) (จ) (ฉ)

ภาพ 15 แบบรูปตาที่ได้จากการศึกษา (20)

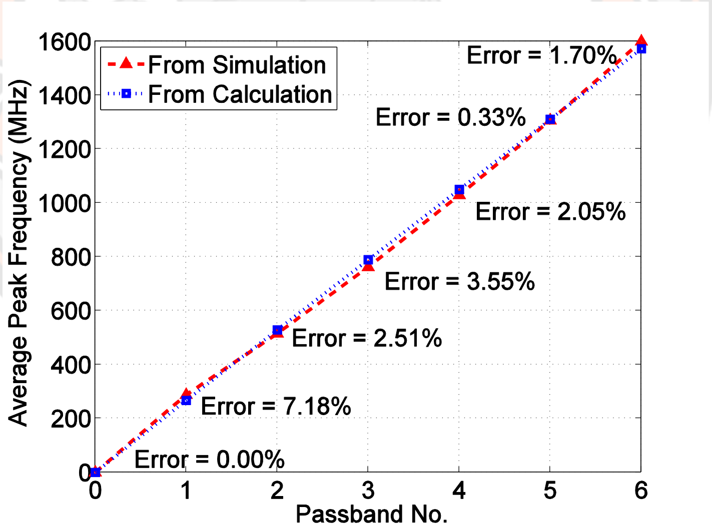
จากภาพ 15 เป็นการแสดงแบบรูปตาที่ได้จากการศึกษา (20) โดยภาพ 15 เป็นการแสดงแบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับที่เส้นใยแก้วนำแสงระยะ 100 300 500 700 และ 1000 เมตร ตามลำดับ จะพบว่าเมื่อเส้นใยแก้วนำแสงมีระยะทางมากขึ้นแล้วขนาดของความกว้างของแบบรูปตาจะลดลง แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองจะพบว่าสามารถทำการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ NRZ ได้ด้วยขนาดบิตเรตที่สูงถึง 25.75 Gb/s ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีความยาว 1 กิโลเมตร โดยอาศัยการส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1060 นาโนเมตร ซึ่งจากการทดลองดังกล่าวยังได้ค่า BER ที่ต่ำประมาณ 10^{-12} ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในการสื่อสารทางแสงอีกด้วย

อย่างไรก็ตามการส่งสัญญาณที่มีบิตเรตสูงโดยอาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ SCM ผ่านช่องส่งสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำได้ถูกนำมาศึกษาใน (21) เพื่อเป็นทางเลือกในการเอาชนะข้อจำกัดทางขนาดของ 3-dB Modal Bandwidth ซึ่งจากการศึกษาของ (21) พบว่ามีช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่

สามารถนำไปใช้งานเป็นช่องส่งสัญญาณได้ โดยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำเหล่านี้สามารถทำการประมาณค่าความถี่ในการส่งสัญญาณได้ด้วยสมการ โดย (21) ได้ทำการประมาณค่าความถี่ของจุด Peak Frequency (f_{Peak}) ณ ช่องส่งสัญญาณต่าง ๆ โดยที่ค่า $f_{Peak,Avg}$ จะมีค่าขึ้นอยู่กับตัวแปร $t_{d,dev}$ ในหน่วย ns ดังนั้นจะสามารถทำการประมาณค่า $f_{Peak,Avg}$ ในหน่วย MHz ได้ดังนี้

$$f_{Peak,Avg}(i) = \begin{cases} 0 & i = 0 \\ \dfrac{1.305i + 0.0298}{2t_{d,dev}} \quad \text{where} & i = 1,2,\ldots,6 \end{cases} \tag{2.19}$$

จากสมการ (2.19) เมื่อ $t_{d,dev}$ มีค่าเป็น 2.50 ns แล้วจะทำให้สามารถประมาณค่าความถี่ Peak Frequency ของช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 ถึงช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 ได้เป็น 0 267 528 789 1,050 1,311 และ 1,572 MHz ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า $f_{Peak,Avg}$ ที่ได้จากแบบจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดใน (21) กับค่า $f_{Peak,Avg}$ ที่ได้จากการอาศัยสมการความสัมพันธ์ที่ใช้ในการประมาณค่าดังสมการ (2.19) จะสามารถแสดงค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่า $f_{Peak,Avg}$ ของช่องส่งสัญญาณแต่ละช่องได้ดังแสดงในภาพ 16

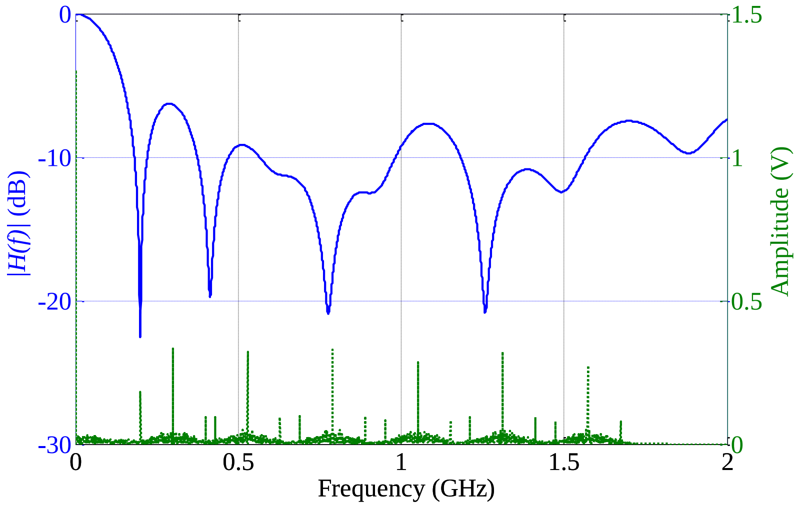


ภาพ 16 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่า $f_{Peak,Avg}$ เมื่อ $t_{d,dev}$ = 2.50 ns (21)

จากภาพ 16 เป็นการเปรียบเทียบค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่า $f_{Peak,Avg}$ ของช่องส่งสัญญาณแต่ละช่องโดยเป็นค่า $f_{Peak,Avg}$ ที่ได้จากแบบจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดและค่า $f_{Peak,Avg}$ ที่ได้จากการคำนวณโดยสมการ (2.19) เมื่อมีค่า $t_{d,dev}$ เป็น 2.50 ns จะพบว่าค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่า $f_{Peak,Avg}$ ของช่องส่งสัญญาณช่องที่ 1 นั้นจะมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือ 7.18 % และเมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบค่าร้อย

ละความคลาดเคลื่อนของค่า $f_{Peak,Avg}$ ของช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 ถึงช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 จะพบว่ามีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่า 8 % ดังนั้นจึงน่าจะสามารถนำสมการ (2.19) ไปใช้งานในการประมาณค่า $f_{Peak,Avg}$ ได้

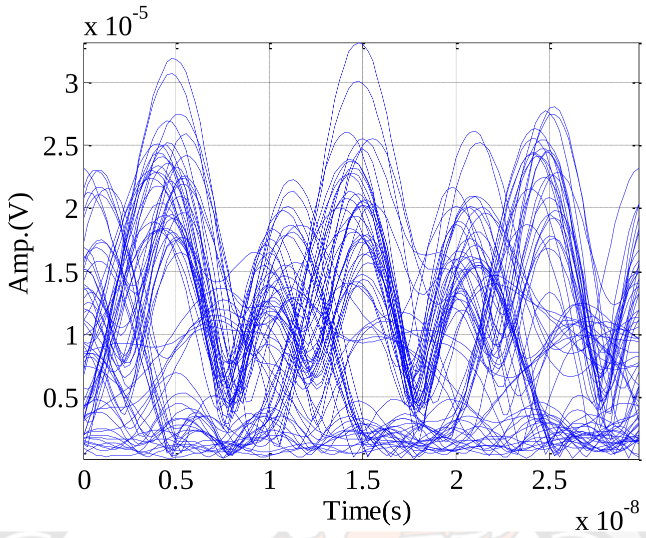
จากการศึกษาข้างต้น (22, 23) จึงได้นำสมการ (2.19) ซึ่งเป็นสมการในการประมาณค่าความถี่ของจุด Peak Frequency (f_{Peak}) มาใช้ในการสร้างระบบสื่อสารทางแสง โดยได้ทำการทดลองส่งสัญญาณข้อมูลแบบ Gaussian Pulse และอาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ Subcarrier Multiplexing (SCM) เพื่อทำการแบ่งสัญญาณให้เป็นสัญญาณย่อยไปยังความถี่มอดูเลชันที่ได้จากสมการ (2.19) ซึ่งจากการศึกษาพบว่ามีค่าความถี่ที่ได้จากสมการ (2.19) บางค่ามีความไม่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากค่าความถี่ของช่องส่งสัญญาณที่ได้จากสมการประมาณค่ามีค่าความถี่ที่ตรงกันกับค่าความถี่ที่เกิดการลดทอนของสัญญาณภายในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่ง (22) ได้ทำการพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงและสัญญาณข้อมูลในทางความถี่ดังแสดงในภาพ 17



ภาพ 17 ผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด และสัญญาณข้อมูลในทางความถี่ (22)

จากภาพ 17 เป็นการแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดและสัญญาณข้อมูลในทางความถี่ โดยเมื่อทำการพิจารณาที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 ซึ่งถูกส่งด้วยค่าความถี่มอดูเลชันเป็น 789 MHz จะพบว่าที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 จะเกิดการลดทอนของสัญญาณภายในเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ซึ่งจะส่งผลโดยตรงให้แบบรูปตาของช่องส่ง

สัญญาณช่องที่ 3 นั้นมีลักษณะของแบบรูปตาที่ผิดเพี้ยนไป ซึ่งจะส่งผลกับค่า BER ของระบบสื่อสาร โดยแบบรูปตาของช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 สามารถแสดงได้ดังภาพ 18



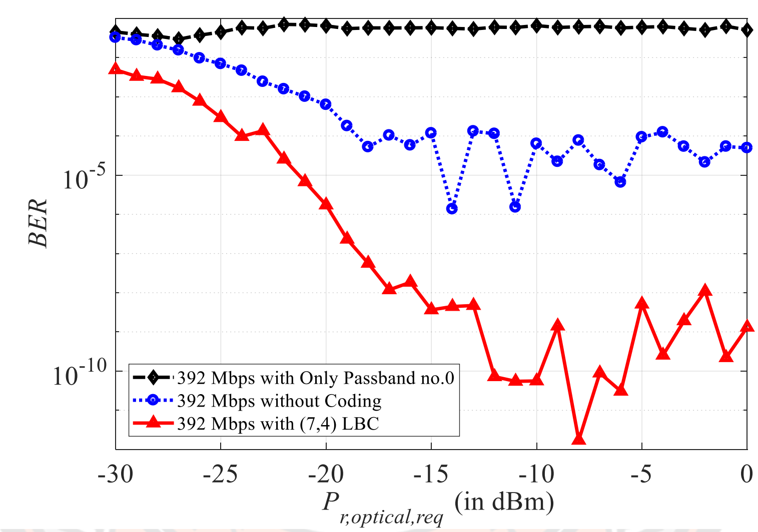
ภาพ 18 แบบรูปตาของช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 (22)

จากภาพ 18 เป็นการแสดงแบบรูปตาของช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 ซึ่งจะพบว่าแบบรูปตาของช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 นั้นจะไม่สามารถทำการแยกแยะระหว่างบิตข้อมูล 0 และบิตข้อมูล 1 ได้ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงให้ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 นี้มีค่า BER ที่ค่อนข้างสูง นอกเหนือจากที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 แล้ว (23) ยังพบว่าค่า BER ที่ได้จากช่องส่งสัญญาณช่องที่ 2 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 4 ก็จะมีค่าที่ค่อนข้างสูงเช่นเดียวกัน ดังนั้น (22) จึงได้ทำการจำลองระบบสื่อสารทางแสงด้วยการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดของบิตเรตเป็น 500 Mbps ผ่านช่องส่งสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำจำนวน 4 ช่องสัญญาณได้แก่ ช่องส่งสัญญาณช่อง 0 1 5 และช่องสัญญาณช่องที่ 6 ซึ่งจากผลการจำลองระบบสื่อสารพบว่าสามารถทำการส่งสัญญาณที่มีขนาดของบิตเรตเป็น 500 Mbps ได้โดยระบบสื่อสารจะมีค่า BER ที่ต่ำกว่า 10^{-6} แต่อย่างไรก็ตามค่า BER ที่ได้นั้นจะยังมีค่าที่ไม่ต่ำเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานทางแสง

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นพบว่าสามารถนำพาสแบนด์ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz มาประยุกต์ใช้งานเป็นช่องส่งสัญญาณได้ ซึ่งในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงนั้นจะต้องอาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ SCM เพื่อแบ่งสัญญาณให้เป็นสัญญาณย่อยและส่งไปยังค่าความถี่มอดูเลชันที่ได้จากสมการ (2.19) อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่าค่าความถี่ที่ได้จากสมการ (2.19) นั้นอาจไม่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งการที่ไม่ใช้งานช่องส่งสัญญาณบางช่องนั้นจะส่งผลโดยตรงให้จำนวนบิตเรตของข้อมูลที่สามารถทำ

การส่งได้นั้นลดลง และจากการศึกษาข้างต้นยังพบอีกว่าแม้จะเลือกใช้งานเฉพาะช่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมแล้วแต่ค่า BER ที่ได้ก็ยังคงมีค่าที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นในส่วนต่อไปจึงจะเป็นการศึกษางานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้งานการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสาร

งานวิจัย (24) ได้ทำการทดลองเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น (7, 4) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ ซึ่ง (24) พบว่าการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลนั้นจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถแสดงผลการวิจัยของ (24) ได้ดังภาพ 19



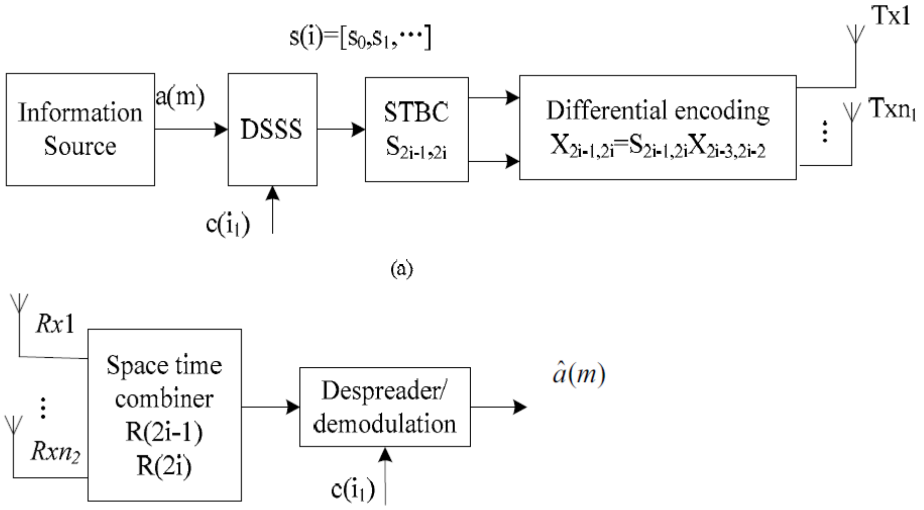
ภาพ 19 ค่า BER ของแบบจำลองระบบสื่อสาร
ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น (7, 4) (24)

จากภาพ 19 เป็นการแสดงประสิทธิภาพในรูปของค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ และมีการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น (7, 4) จะพบว่าเมื่อค่ากำลังแสงจากการส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเข้าสู่ตัวรับแสง ($P_{r,optical,req}$) ของระบบสื่อสารมีค่าสูงมากกว่า -15 dBm ค่า BER ของระบบสื่อสารที่ได้จะมีค่าที่อยู่ระหว่าง 10^{-12} ถึง 10^{-8} เมื่อทำการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีบิตเรตเป็น 392 Mbps โดยขนาดของบิตเรตที่สามารถส่งได้โดยอาศัยผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำนี้จะมีขนาดบิตเรตที่สูงกว่าบิตเรตของการส่งข้อมูลโดยอาศัย 3-dB Modal Bandwidth อยู่ประมาณ 2 เท่า

จากการศึกษาเอกสารงานวิจัยเกี่ยวข้องข้างต้นจะพบว่ามีการศึกษาและประยุกต์ใช้งานเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่าน 3-dB Bandwidth ในย่านความถี่สูง (>1 GHz) และในย่าน

ความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz แล้ว แต่สำหรับการประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่ต่ำนั้นยังมีค่า BER ที่ค่อนข้างสูงเกินไปสำหรับการนำไปใช้งานในระบบสื่อสารทางแสง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้งานการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นกับระบบการสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้นอาจยังไม่เพียงพอ จากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องข้างต้นพบว่าเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั้นจะมีผลตอบสนองทางความถี่เป็นแบบ Selective Fading Channel นั่นคือตัวกลางชนิดนี้จะยอมให้สัญญาณในทางความถี่สามารถทำการส่งสัญญาณผ่านได้เพียงในบางย่านความถี่เท่านั้น ซึ่งจากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องข้างต้นพบว่าวิธีการหนึ่งที่จะสามารถช่วยลดกระทบจากการส่งสัญญาณผ่านตัวกลางแบบ Frequency Selective Fading Channel นั่นก็คือการอาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) โดย (25-27) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้งานเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS กับการส่งสัญญาณวิทยุที่มีความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด และอาศัยการส่งสัญญาณในรูปแบบ Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการประยุกต์ใช้งานเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS กับระบบการสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้น จะมีความเหมาะสมนำไปใช้งานกับระบบการสื่อสารที่มีระยะทางไม่มากนักและเมื่ออาศัยรูปแบบในการส่งสัญญาณแบบ QPSK กับเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS แล้วจะทำให้สามารถส่งสัญญาณได้มากขึ้นถึงประมาณ 10 เท่า

ในงานวิจัย (28-30) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณโดยอาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ DSSS ผ่านช่องสัญญาณที่มีลักษณะแบบ Frequency Selective Fading Channel ที่มีการกระจายทางสถิติแบบเรย์ลี (Rayleigh Distribution) โดย (29) ได้ทำการประยุกต์ใช้เทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่ไม่สอดคล้องกัน (non-coherent DSSS modulation) ในขณะที่ (30) ได้อาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ Hybrid Spread Spectrum (HSSS) ซึ่งเป็นเทคนิคการส่งสัญญาณที่ประยุกต์ใช้เทคนิคแบบ DSSS และ FH ร่วมกัน โดยในการศึกษา (29, 30) นั้นพบว่าการประยุกต์ใช้เทคนิคการส่งสัญญาณที่มีพื้นฐานของเทคนิคแบบ DSSS นั้น จะสามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดการการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่มีลักษณะแบบ Frequency Selective Fading Channel ที่มีการกระจายทางสถิติแบบเรย์ลีได้ และ (28) ได้อาศัยเทคนิคในเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบการสื่อสารที่มีช่องสัญญาณที่มีลักษณะแบบ Frequency Selective Fading Channel ที่มีการกระจายทางสถิติแบบเรย์ลีที่แตกต่างออกไปกับงานวิจัยก่อนหน้า โดย (28) ได้อาศัยการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบ Space Time Block Code (STBC) ในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบการสื่อสาร โดยจะสามารถแสดงแบบจำลองระบบการสื่อสารที่ (28) ได้ทำการจำลองไว้ได้ดังภาพ 20

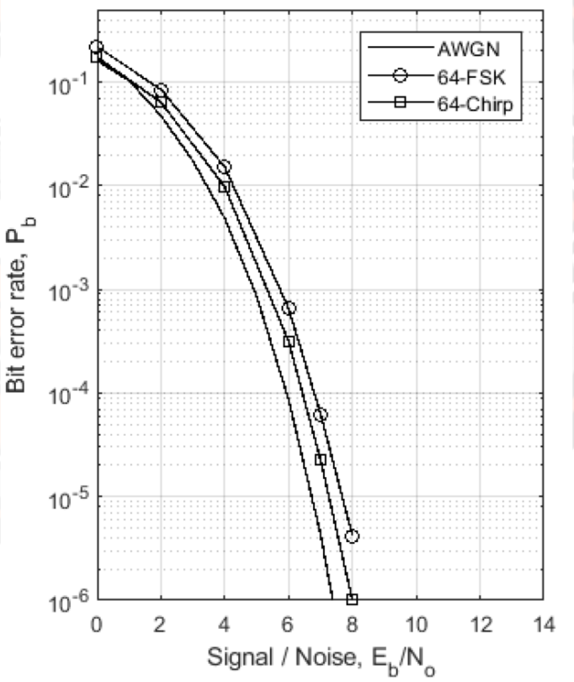


ภาพ 20 แบบจำลองระบบสื่อสารที่มีตัวกลางในการส่งสัญญาณ แบบ Selective Fading Channel ที่มีการกระจายแบบเรย์ลี (28)

จากภาพ 20 จะพบว่า (28) นั้นได้อาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ DSSS ร่วมกับการเข้ารหัสสัญญาณแบบ STBC เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบการสื่อสารที่มีช่องสัญญาณแบบ Frequency Selective Fading Channel และมีการกระจายทางสถิติแบบเรย์ลี ซึ่งจากการศึกษา (28) พบว่าการประยุกต์ใช้งานเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS ร่วมกับการเข้ารหัสสัญญาณแบบ STBC นั้น จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารในด้านของค่า BER ได้อย่างมีนัยสำคัญ

เทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้นยังได้รับความนิยมในการนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบการสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication) ด้วยเช่นกัน โดยในงานวิจัย (31, 32) ได้ประยุกต์ใช้งานเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ DSSS กับระบบการสื่อสารไร้สาย โดยที่ช่องส่งสัญญาณของระบบการสื่อสารไร้สายนั้นจะมีลักษณะเป็นแบบ Frequency Selective Fading Channel โดยในการศึกษา (31) นั้นได้ทำการออกแบบภาครับของระบบการสื่อสารที่มีคุณสมบัติแบบค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยแบบเชิงเส้น (Linear Minimum Mean Square Error, LMMSE) ซึ่งภาครับที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้จะทำให้เมื่อทำการรวมสัญญาณที่ภาครับแล้วจะได้ค่า BER ของระบบสื่อสารที่ค่อนข้างต่ำ และในการศึกษา (32) เทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้นได้ถูกนำไปใช้งานกับระบบการสื่อสารไร้สาย โดย (32) ได้ทำการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีแถบความกว้างของสัญญาณขนาดใหญ่เพียงหนึ่งสัญญาณ (Single Carrier Block Transmission with Frequency Domain Equalization, SC-FDE) ซึ่งการส่งสัญญาณในรูปแบบดังกล่าวนี้จะสามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากช่องส่งสัญญาณแบบ Frequency Selective Fading Channel ได้

นอกเหนือไปจากนี้เทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ DSSS ยังได้ถูกนำไปใช้ในการพัฒนาระบบโครงข่ายการสื่อสารใต้น้ำ (Underwater Acoustic Sensor Networks) ใน (33) โดยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้นจะมีบทบาทสำคัญในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบโครงข่ายดังกล่าวในด้านของ BER และนอกไปจากนั้น (34) ยังได้ทำการประยุกต์ใช้งานเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS กับเทคนิคในการส่งสัญญาณอีกแบบหนึ่งที่เรียกว่า Orthogonal Multiple Chirp Modulation ซึ่งเป็นเทคนิคที่จะสามารถช่วยลดค่า BER ให้กับระบบสื่อสารได้ด้วยการเพิ่มจำนวนของสัญลักษณ์ที่ตั้งฉากกัน (Orthogonal Symbol) ซึ่งการเพิ่มจำนวนของสัญลักษณ์ที่ตั้งฉากกัน (Orthogonal Symbol) จะทำให้สัญญาณที่ถูกส่งนั้นสามารถทนต่อการลดทอนภายในช่องส่งสัญญาณที่มีผลตอบสนองทางความถี่แบบ Frequency Selective Fading Channel ได้ โดยผลการทดลองที่ได้จากการศึกษา (34) จะสามารถแสดงได้ดังภาพ 21



ภาพ 21 ผลการจำลองระบบการสื่อสารที่มีตัวกลางในการส่งสัญญาณ แบบ Selective Fading Channel (34)

จากภาพ 21 จะพบว่าค่า BER ที่ได้จากการส่งสัญญาณแบบ 64-Frequency Shift Keying นั้นจะมีค่าที่ค่อนข้างสูง โดยเมื่อทำการประยุกต์ใช้งานเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ Orthogonal Multiple Chirp Modulation และทำการส่งสัญญาณแบบ 64-Chirp และยังอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS จะทำให้ค่า BER ของระบบการสื่อสารมีค่าลดลงประมาณ 0.6 dB ซึ่งจากการจำลองระบบการสื่อสารของ (34) สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนสัญลักษณ์ที่ตั้งฉากกัน

(Orthogonal Symbol) การอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ Orthogonal Multiple Chirp Modulation และการอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS จะสามารถช่วยลดผลการลดทอนที่เกิดขึ้นภายในช่องส่งสัญญาณแบบ Frequency Selective Fading Channel ได้

จากการศึกษาข้างต้นจะพบว่าเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้นสามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากตัวกลางที่มีผลตอบสนองทางความถี่แบบ Frequency Selective Fading Channel ได้จริง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงจะทำการศึกษาผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำนั่นคือในย่านความถี่ตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz และจะทำการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ 0 ถึง 1.6 GHz เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ โดยอาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ DSSS และมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารทางแสง

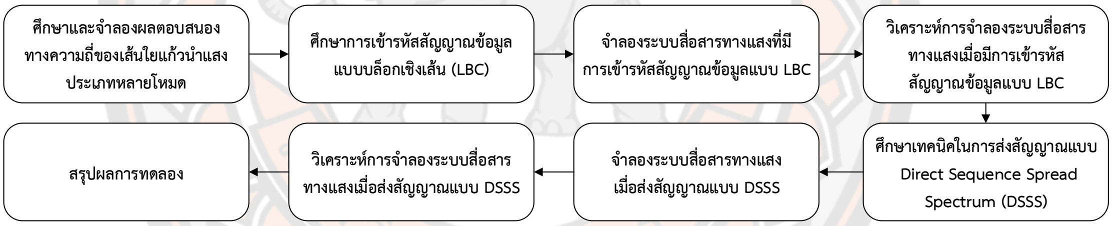
บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวข้องในบทที่ 2 นั้นจะทำให้สามารถนำความรู้ที่ได้รับมาประยุกต์ใช้ในการดำเนินงานวิจัยได้ โดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz จากนั้นจะทำการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำดังกล่าวเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ โดยที่จะทำการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้นและอาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ DSSS ซึ่งวิธีการในการดำเนินงานวิจัยจะสามารถแสดงได้ในบทที่ 3 ดังนี้

วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีการในการดำเนินงานวิจัยชิ้นนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน โดยวิธีการในการดำเนินงานวิจัยชิ้นนี้จะสามารถแสดงได้ดังภาพ 22



ภาพ 22 แผนภาพวิธีการดำเนินงานวิจัย

จากภาพ 22 จะพบว่าวิธีการในการดำเนินงานวิจัยชิ้นนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกจะทำการศึกษาและจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ต่อมาจะทำการศึกษาการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น จากนั้นจะทำการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณและมีการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น ในขั้นตอนต่อมาจะทำการวิเคราะห์ผลการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณและมีการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น จากนั้นจะทำการศึกษาการส่งสัญญาณแบบ DSSS และจะทำการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณและมีการส่งสัญญาณแบบ DSSS ในขั้นตอนต่อมาจะทำการวิเคราะห์ผลการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณและมีการส่งสัญญาณแบบ DSSS และในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการ

สรุปผลการทดลอง โดยรายละเอียดวิธีการในการดำเนินงานวิจัยของแต่ละขั้นตอนนั้นจะถูกแสดงในส่วนถัดไป

ศึกษาและจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic)
2. ศึกษางานวิจัยมีความเกี่ยวข้องกับเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz
3. ศึกษางานวิจัยมีความเกี่ยวข้องกับเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ที่สูงกว่า 1.6 GHz
4. จำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่ที่มีการกระจายทางสถิติของการหน่วงทางเวลาของสัญญาณเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) โดยที่มีจำนวนโหมดของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็น 100 โหมด และมีค่าเบี่ยงเบนการหน่วงเวลาเป็น 2.50 ns จำนวน 10 แบบจำลอง

ศึกษาการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น
2. ศึกษาวิธีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น และการสร้างเมทริกซ์ตัวกำเนิดของการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น
3. ศึกษารูปแบบของการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสแล้วในช่องส่งสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณ
4. ศึกษาวิธีการถอดรหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น

จำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณและมีการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น

1. สร้างสัญญาณข้อมูลแบบไบนารีและทำการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น (7, 4)
2. ทำการแยกสัญญาณข้อมูลแบบไบนารีที่ถูกเข้ารหัสแล้วเป็นสัญญาณย่อย 7 สัญญาณ โดยอาศัยรูปแบบของการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสแล้วแบบที่ 1
3. สร้างสัญญาณแบบ Gaussian pulse จากสัญญาณย่อยทั้ง 7 สัญญาณ และทำการมอดูเลชันสัญญาณ Gaussian pulse ทั้ง 7 สัญญาณด้วยค่าความถี่ที่ได้จากสมการประมาณค่าความถี่มอดูเลชัน

4. ทำการรวมสัญญาณย่อยทั้ง 7 สัญญาณและแปลงสัญญาณดังกล่าวให้เป็นสัญญาณแสงด้วยเลเซอร์ และส่งสัญญาณแสงที่ได้ไปยังภาครับโดยอาศัยเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดโดยที่มีจำนวนโหมด 100 โหมด และมีค่าเบี่ยงเบนการหน่วงเวลาเป็น 2.50 ns

5. ที่ภาครับจะได้รับจะได้รับสัญญาณแสงจากเส้นใยแก้วนำแสง ทำการแปลงสัญญาณแสงที่ได้รับจากเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยตัวรับแสง (Photo detector) โดยตัวรับแสงนี้จะมีคุณลักษณะทางคณิตศาสตร์เป็น Square-law detector

6. สร้างสัญญาณรบกวนแบบ Thermal noise และทำการรวมสัญญาณรบกวนนี้กับสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากตัวรับแสง

7. นำสัญญาณที่ได้รับมาเข้ากระบวนการดีมอดูเลชันโดยอาศัยค่าความถี่ที่ได้จากสมการประมาณค่าความถี่มอดูเลชัน

8. สร้างแบบรูปตาของสัญญาณที่ถูกดีมอดูเลชันแล้วของช่องส่งสัญญาณแต่ละช่อง

9. วัดประสิทธิภาพของสัญญาณในช่องส่งสัญญาณแต่ละช่องโดยอาศัยการหาค่าตัวแปร Q จาก Eye Pattern

10. ทำการทดลอง 1 ถึง 9 ซ้ำโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีความแตกต่างกันจำนวน 10 แบบจำลอง

11. ทำการทดลอง 1 ถึง 10 ซ้ำโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสแล้วเป็นแบบที่ 2

12. ทำการทดลอง 1 ถึง 11 ซ้ำโดยเปลี่ยนแปลงการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้นเป็น (15, 11) (15, 7) (31, 26) และ (31, 21)

13. ทำการทดลอง 1 ถึง 12 ซ้ำโดยทำการเปลี่ยนแปลงช่องส่งสัญญาณที่ถูกใช้งาน

วิเคราะห์ผลการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณและมีการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น

1. วิเคราะห์ค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีความแตกต่างกันจำนวน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ เมื่อมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นต่าง ๆ และมีรูปแบบการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสแล้วเป็นรูปแบบที่ 1 โดยอาศัยช่องส่งสัญญาณจำนวน 7 ช่องสัญญาณ

2. วิเคราะห์ค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีความแตกต่างกันจำนวน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ เมื่อมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นต่าง ๆ และมีรูปแบบการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสแล้วเป็นรูปแบบที่ 2 โดยอาศัยช่องส่งสัญญาณจำนวน 7 ช่องสัญญาณ

3. เปรียบเทียบค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีความแตกต่างกันจำนวน 10 แบบจำลอง เมื่อมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นต่าง ๆ และมีรูปแบบการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสแล้วเป็นรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 โดยอาศัยช่องส่งสัญญาณจำนวน 7 ช่องสัญญาณ

4. วิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีความแตกต่างกันจำนวน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ เมื่อมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นต่าง ๆ และมีรูปแบบการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสแล้วเป็นรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงช่องส่งสัญญาณที่ถูกใช้งาน

ศึกษาเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ Direct Sequence Spread Spectrum

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS
2. ศึกษาวิธีการสร้าง Spreading code และการสร้าง Spread signal
3. ศึกษาวิธีการถอดรหัส Spread signal

จำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ โดยอาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ DSSS

1. สร้างสัญญาณข้อมูลแบบไบนารี

2. สร้างสัญญาณรหัสแผ่ (Spreading code) ที่มี Code length เป็น 3 และทำการสร้าง Spreading Signal จากสัญญาณข้อมูลแบบไบนารี

5. มอดูเลชันสัญญาณที่ผ่านการแผ่ (Spread signal) ไปยังค่าความถี่ 800 MHz

6. ทำการแปลงสัญญาณดังกล่าวให้เป็นสัญญาณแสงด้วยเลเซอร์ และส่งสัญญาณแสงที่ได้ไปยังภาครับโดยอาศัยเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดโดยที่มีจำนวนโหมด 100 โหมด และมีค่าเบี่ยงเบนการหน่วงเวลาเป็น 2.50 ns

7. ที่ภาครับจะได้รับจะได้รับสัญญาณแสงจากเส้นใยแก้วนำแสง ทำการแปลงสัญญาณแสงที่ได้รับจากเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยตัวรับแสง โดยตัวรับแสงนี้จะมีคุณลักษณะทางคณิตศาสตร์เป็น Square-law detector

8. สร้างสัญญาณรบกวนแบบ Thermal noise และทำการรวมสัญญาณรบกวนนี้กับสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากตัวรับแสง

9. นำสัญญาณที่ได้รับมาเข้ากระบวนการดีมอดูเลชัน

10. ทำการถอดรหัสสัญญาณโดยอาศัยสัญญาณรหัสแผ่

11. สร้างแบบรูปตาของสัญญาณที่ถูกดีมอดูเลชันและถูกถอดรหัสถูกแล้ว

12. วัดประสิทธิภาพของสัญญาณโดยอาศัยการหาค่าตัวแปร Q จากแบบรูปตา

13. ทำการทดลอง 1 ถึง 12 ซ้ำโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีความแตกต่างกันจำนวน 10 แบบจำลอง

14. ทำการทดลอง 1 ถึง 13 ซ้ำสร้างสัญญาณรหัสแผ่ที่มี Code length เป็น 7

วิเคราะห์ผลการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ โดยอาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ DSSS

1. วิเคราะห์ค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีความแตกต่างกันจำนวน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ โดยอาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 3

2. วิเคราะห์ค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีความแตกต่างกันจำนวน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ โดยอาศัยเทคนิคในการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 7

สรุปผลการทดลอง

การเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสแบบบล็อกเชิงเส้นไปยังช่องสัญญาณ

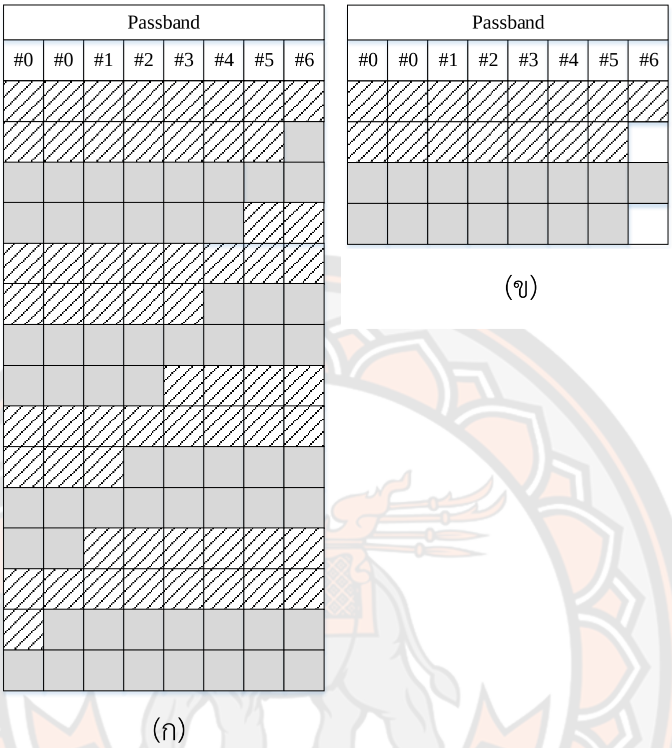
จากวิธีการในการดำเนินงานวิจัยข้างต้นนั้นจำนวนช่องส่งสัญญาณของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำสงประเภทหลายโหมดที่จะถูกใช้งานในแบบจำลองเบื้องต้นนั้นจะมีจำนวนทั้งหมด 7 ช่องสัญญาณ (ช่องส่งสัญญาณที่ 0 1 2 3 4 5 และ 6) ซึ่งจากการศึกษาการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นข้างต้นจะพบว่าบล็อกข้อมูลขนาด k บิตแต่ละบล็อกจะถูกนำไปสร้างเป็นคำรหัสจำนวน n บิต โดยจะมีจำนวนของบิตพาริตี้จำนวน n-k บิต ซึ่งการส่งสัญญาณข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสแล้วไปยังช่องส่งสัญญาณช่องต่าง ๆ ของบิตคำรหัสในแต่ละบล็อกนั้นจะสามารถแสดงได้ดังในภาพ 23

Passband							
#0	#0	#1	#2	#3	#4	#5	#6
p_1	**p_2**	**p_3**	**m_0**	**m_1**	**m_2**	**m_3**	p_1
p_2	p_3	m_0	m_1	m_2	m_3	**p_1**	**p_2**
p_3	**m_0**	**m_1**	**m_2**	**m_3**	p_1	p_2	p_3
m_0	m_1	m_2	m_3	**p_1**	**p_2**	**p_3**	**m_0**
m_1	**m_2**	**m_3**	p_1	p_2	p_3	m_0	m_1
m_2	m_3	**p_1**	**p_2**	**p_3**	**m_0**	**m_1**	**m_2**
m_3	p_1	p_2	p_3	m_0	m_1	m_2	m_3

ภาพ 23 การเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น (7, 4)

จากภาพ 23 เป็นการแสดงตัวอย่างของการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น (7, 4) เมื่ออาศัยช่องส่งสัญญาณจำนวน 7 ช่องสัญญาณ (ช่องส่งสัญญาณที่ 0 1 2 3 4 5 และ 6) ซึ่งจะพบว่าคำรหัสที่เกิดจากการเข้ารหัสดังกล่าวนี้จะมีจำนวน 7 บิต ซึ่งจะประกอบไปด้วยบิตข้อมูลจำนวน 4 บิต นั่นคือ m_0 m_1 m_2 และ m_3 และบิตพาริตี้จำนวน 3 บิต นั่นคือ p_1 p_2 และ p_3 เนื่องจากที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 หรือ 3-dB Modal Bandwidth นั้นจะมีความสามารถในการส่งสัญญาณได้มากกว่าช่องส่งสัญญาณช่องอื่น ๆ ประมาณ 2 เท่า ดังนั้นที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 จึงจะถูกใช้งานในการส่งสัญญาณจำนวนบิตที่มากกว่าที่ช่องส่งสัญญาณช่องอื่น ๆ เป็น 2 เท่า โดยเมื่อพิจารณาการส่งคำรหัสจำนวน 7 บิตชุดแรกซึ่งถูกแรเงาด้วยเส้นทแยงมุมขึ้น จะพบว่า บิต p_1 และ p_2 จะถูกส่งโดยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 และบิต p_3 m_0 m_1 m_2 และ m_3 จะถูกส่งโดยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 1 ถึงช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 ตามลำดับ ซึ่งจะยังมีช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 ที่ยังไม่ได้ถูกใช้งาน ดังนั้นในการส่งคำรหัสชุดที่ 2 ซึ่งเป็นช่องสีขาวนั้นจะทำการเริ่มส่งบิตคำรหัสด้วยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 นั่นคือ บิต p_1 จะถูกส่งโดยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 และบิต p_2 p_3 m_0 m_1 m_2 และ m_3 จะถูกส่งโดยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 ถึงช่องส่งสัญญาณช่องที่ 4 ตามลำดับ คำรหัสจะถูกทำการส่งวนซ้ำไปเรื่อย ๆ โดยเริ่มจากการส่งบิตคำรหัสผ่านช่องส่งสัญญาณที่อยู่ถัดไปจากช่องส่งสัญญาณช่องสุดท้ายที่ถูกใช้งานในการส่งคำรหัสชุดก่อนหน้า ซึ่งการส่งชุดคำรหัสในลักษณะดังกล่าวนี้เพื่อเป็นการกระจายบิตข้อมูลและบิตพาริตี้ให้ไปอยู่ในช่องสัญญาณทุก ๆ ช่องสัญญาณ และยังเป็นการใช้งานช่องส่งสัญญาณให้เกิดประสิทธิภาพที่สูงที่สุดอีกด้วย ซึ่งจากภาพ 23 จะพบว่าในการส่งคำรหัสบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) นั้นจะมีรูปแบบในการส่งคำรหัสที่แตกต่างกันถึง 8 รูปแบบ ซึ่งหากมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแล้วนั้น ก็จะส่งผลให้รูปแบบในการส่งคำรหัสมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป โดยตัวอย่างของรูปแบบในการส่งคำรหัสของการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้น

รูปแบบต่าง ๆ ที่จะถูกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสามารถแสดงได้ดังภาพ 24 ซึ่งจะทำการแทนรูปแบบในการส่งคำรหัสที่อยู่ติดกันแต่ละชุดด้วยเส้นทแยงมุมขึ้นและการแรเงา



ภาพ 24 การเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้น (15, 11) และ (15, 7)

จากภาพ 24 เป็นการแสดงการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น (15, 11) และ (15, 7) โดยเมื่อพิจารณาภาพ 24(ก) นั้นจะเป็นการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 ซึ่งจะพบว่าคำรหัสจะถูกทำการส่งวนซ้ำด้วยลักษณะในการส่งคำรหัสที่แตกต่างกันถึง 8 ลักษณะ และช่องส่งสัญญาณทุกช่องนั้นจะถูกนำมาใช้งานในการส่งคำรหัสซึ่งเป็นการใช้งานช่องส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามหากเกิดการลดทอนภายในช่องส่งสัญญาณขึ้นจะส่งผลให้ที่ปลายทางได้รับคำรหัสที่มีความผิดพลาดเป็นจำนวนหลายบิต และเมื่อพิจารณาภาพ 24(ข) ซึ่งเป็นการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 2 จะพบว่าคำรหัสนั้นจะมีลักษณะในการเรียงลำดับบิตเพียงลักษระเดียว โดยที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 นั้นจะมีช่องว่างเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้จำนวนสัญญาณข้อมูลที่จะสามารถส่งผ่านไปยังปลายทางได้มีจำนวนลดลง แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าหากเกิดการลดทอนของสัญญาณที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 ขึ้น จะทำให้บิตคำรหัสที่ผิดพลาดที่ปลายทางมีจำนวนน้อยกว่าในกรณีของภาพ 24(ก) ดังนั้นระบบสื่อสารที่อาศัยการส่งคำรหัสด้วยวิธีในภาพ 24(ข) จึงน่าจะมีค่า BER ที่ต่ำกว่า

ระบบสื่อสารที่อาศัยการส่งคำรหัสด้วยวิธีในภาพ 24(ก) และสำหรับการส่งคำรหัสของการเข้ารหัสบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 26) และ (31, 21) นั้นก็จะวิธีในการเรียงลำดับบิตที่คล้ายคลึงกันกับการเรียงลำดับบิตของการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) และ (15, 7) นั่นเอง

การหาค่า BER ของระบบสื่อสาร

จากการศึกษาการหาค่า BER โดยอาศัยการหาค่า Q-Parameter และการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแล้ว เมื่อพิจารณาการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) ดังแสดงในภาพ 24(ก) จะพบว่ามีรูปแบบในการส่งบิตคำรหัสไปยังช่องส่งสัญญาณที่แตกต่างกันอยู่ 8 รูปแบบ และสมมติให้การส่งบิตคำรหัสทั้ง 15 บิตนั้นเป็นอิสระต่อกันแล้ว จะสามารถหาค่าความน่าจะเป็นที่ภาครับของระบบสื่อสารจะได้รับบิตข้อมูลที่ถูกต้องทั้ง 15 บิตได้ดังนี้

$$P[\text{no error}]_{\text{Type I}} = \frac{\sum_{l=1}^{m}\left(\prod_{j=1}^{n}\left(1-p_j\right)\right)}{m} \tag{3.1}$$

เมื่อ p_j คือ ความน่าจะเป็นที่จะมีบิตผิดพลาด ณ ตำแหน่งบิตที่ j^{th}

n คือ จำนวนบิตของคำรหัส ซึ่งในกรณีนี้คือ 15

m คือ จำนวนรูปแบบในการส่งบิตคำรหัสซึ่งในกรณีนี้คือ 8

ซึ่งเมื่อแทนค่า n และ m ในสมการ (3.1) จะได้

$$P[\text{no error}]_{\text{Type I}} = \frac{\sum_{l=1}^{8}\left(\prod_{j=1}^{15}\left(1-p_j\right)\right)}{8} \tag{3.2}$$

และค่าความน่าจะเป็นที่ปลายทางของระบบสื่อสารจะได้รับบิตข้อมูลที่ผิดพลาด 1 บิต จะสามารถหาค่าได้ดังสมการ (3.3) ดังนี้

$$P[\text{1-bit error}]_{\text{Type I}} = \frac{\sum_{l=1}^{m}\left[\sum_{j=1}^{n}\left(\left[\prod_{i=1, i\neq j}^{n}(1-p_i)\right]\times p_j\right)\right]}{m} \tag{3.3}$$

เมื่อ p_i คือ ความน่าจะเป็นที่จะมีบิตผิดพลาด ณ ตำแหน่งบิตที่ i^{th}

ซึ่งเมื่อแทนค่า n และ m ในสมการจะได้

$$P[\text{1-bit error}]_{\text{Type I}} = \frac{\sum_{l=1}^{8}\left[\sum_{j=1}^{15}\left(\left[\prod_{i=1, i\neq j}^{15}(1-p_i)\right]\times p_j\right)\right]}{8} \tag{3.4}$$

จากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) จะทำให้ระบบสื่อสารมีความสามารถในการแก้ไขบิตที่ผิดพลาดที่ปลายทางได้ 1 บิต ดังนั้น BER ของระบบสื่อสารจะสามารถทำการประมาณค่าได้โดยอาศัยสมการ (3.5) ดังนี้

$$BER_{\text{Type I}} = \frac{1 - P[\text{no error}]_{\text{Type I}} - P[\text{1-bit error}]_{\text{Type I}}}{n} \tag{3.5}$$

แทนค่าจะได้

$$BER_{\text{Type I}} = \frac{1 - P[\text{no error}]_{\text{Type I}} - P[\text{1-bit error}]_{\text{Type I}}}{15} \tag{3.6}$$

ซึ่งการวิเคราะห์เพื่อหาค่า BER ของระบบสื่อสารที่มีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นที่มีความสามารถในการแก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดที่ปลายทางได้ 1 บิตในรูปแบบต่าง ๆ หรือแม้แต่การเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นที่มีลักษณะของรูปแบบการเรียงบิตคำรหัสเป็นรูปแบบที่ 2 นั้นก็จะสามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับที่กล่าวข้างต้น แต่จะต้องมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของจำนวนบิตของคำรหัสและจำนวนรูปแบบในการส่งบิตคำรหัสให้เหมาะสมกับลักษณะของรูปแบบของการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 7) ซึ่งมีความสามารถในการแก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดที่ปลายทางได้ 2 บิตนั้น จะสามารถทำได้โดยการหาค่าความน่าจะเป็นที่ปลายทางของระบบสื่อสารจะได้รับบิตข้อมูลที่ถูกต้องทั้งหมดและค่าความน่าจะเป็นที่ปลายทางของระบบสื่อสารจะได้รับบิตข้อมูลที่ผิดพลาด 1 บิตเช่นเดียวกันกับการพิจารณาที่ได้กล่าวมาข้างต้น แต่จะต้องทำการวิเคราะห์หาค่าความน่าจะเป็นที่ภาครับของระบบสื่อสารจะได้รับบิตข้อมูลที่ผิดพลาด 2 บิต ณ ตำแหน่งที่ i^{th} และ k^{th} เพิ่มเติมโดยจะสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$P[\text{2-bit error}]_{\text{Type I}} = \frac{\sum_{l=1}^{m}\left[\sum_{j=1}^{n}\left(\left[\prod_{i=1, i\neq j\neq k}^{n}(1-p_i)\right]\times p_j \times p_k\right)\right]}{m} \tag{3.7}$$

เมื่อ p_k คือ ความน่าจะเป็นที่จะมีบิตผิดพลาด ณ ตำแหน่งบิตที่ k^{th}

ซึ่งเมื่อแทนค่า n และ m ในสมการจะได้

$$P[\text{2-bit error}]_{\text{Type I}} = \frac{\sum_{l=1}^{8}\left[\sum_{j=1}^{15}\left(\left[\prod_{i=1, i\neq j\neq k}^{15}(1-p_i)\right]\times p_j \times p_k\right)\right]}{8} \tag{3.8}$$

ดังนั้น BER ของระบบสื่อสารที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 7) จะสามารถทำการประมาณค่าได้ดังนี้

$$BER_{\text{Type I}} = \frac{1 - P[\text{no error}]_{\text{Type I}} - P[\text{1-bit error}]_{\text{Type I}} - P[\text{2-bit error}]_{\text{Type I}}}{15} \quad (3.9)$$

สำหรับการพิจารณาเพื่อหาค่า BER ของระบบสื่อสารที่มีความสามารถในการแก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดที่ปลายทางได้ 2 บิตนั้นก็จะสามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์เช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

บทที่ 4

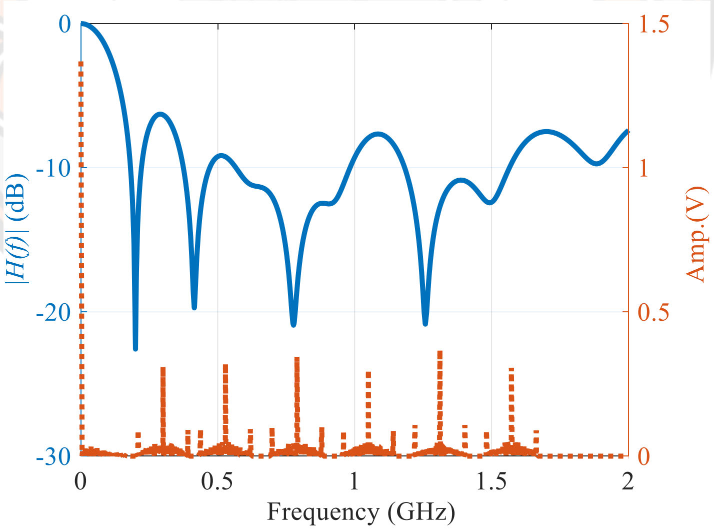
ผลการวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวข้องในบทที่ 2 พบว่าผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz นั้นได้ถูกทำการศึกษาแล้ว ซึ่งจากการศึกษาพบว่ามีพาสแบนด์ของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 1.6 GHz ที่สามารถนำไปใช้งานเป็นช่องส่งสัญญาณได้ และที่ช่องสัญญาณแต่ละช่องในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 1.6 GHz นั้นสามารถทำการประมาณค่าขนาดแอมพลิจูด ขนาดแบนด์วิธ และค่าความถี่มอดูเลชันของช่องส่งสัญญาณแต่ละช่องได้ด้วยสมการ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาการนำผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz มาใช้เป็นตัวกลางในระบบการสื่อสารทางแสงดังแสดงไว้ในวิธีการดำเนินงานวิจัยในบทที่ 3 ซึ่งในบทที่ 4 นี้จะได้ทำการแสดงผลการวิจัยที่ได้จากการสร้างแบบจำลองการสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz เป็นตัวกลางในระบบการสื่อสาร โดยจะทำการแสดงผลการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ ผลการจำลองการสื่อสารทางแสงเมื่อมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบล็อกเชิงเส้นและมีการใช้งานจำนวนช่องส่งสัญญาณที่แตกต่างกัน ผลการจำลองการสื่อสารทางแสงเมื่ออาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK และมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบล็อกเชิงเส้น และผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS

จากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ทำให้ทราบว่าในการจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz นั้นจะต้องอาศัยสมการ (2.2) ซึ่งในการจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดด้วยสมการ (2.2) นั้นจำเป็นที่จะต้องอาศัยตัวแปร $t_{d,dev}$ จากสมการ (2.3) โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกันจำนวน 10 เส้น ซึ่งเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดแต่ละเส้นนั้นจะมีจำนวนโหมด 100 โหมด และมีค่า $t_{d,dev}$ เป็น 2.50 ns สำหรับการวัดประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดดังกล่าวเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้นจะสามารถทำได้โดยการหาค่า BER จากแบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับ

การศึกษาแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ

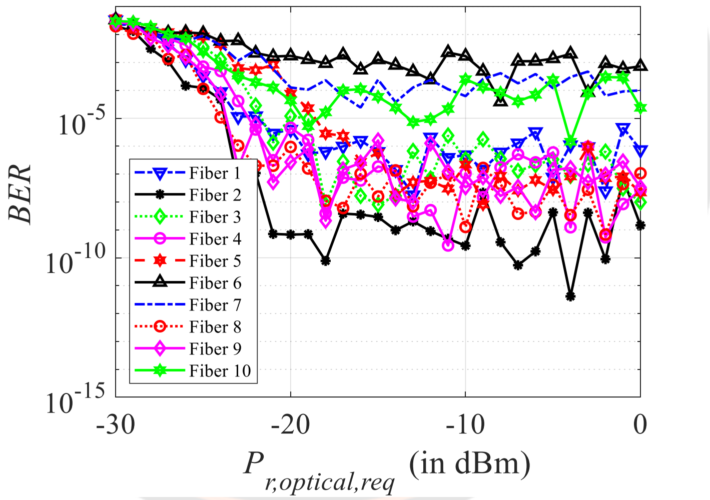
ในการศึกษาแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้น จะสามารถทำได้โดยการจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเมื่อมีจำนวนโหมด 100 โหมด และมีค่า $t_{d,dev}$ เป็น 2.50 ns ซึ่งจากการศึกษา (21) พบว่าในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz ของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดดังกล่าวนี้นั้นจะมีพาสแบนด์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นช่องส่งสัญญาณได้ 7 ช่องสัญญาณ ซึ่งช่องส่งสัญญาณดังกล่าวนี้จะถูกเรียกตามลำดับเป็นช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 ถึงช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 โดยที่ช่องส่งสัญญาณแต่ละช่องนั้นจะมีขนาดแบนด์วิธของช่องส่งสัญญาณกว้างประมาณ 200 MHz โดยเมื่อทำการทดลองจำลองการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีขนาดบิตเรตเป็น 800 Mbps ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่อาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz หรือกล่าวคืออาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำจำนวน 7 ช่องสัญญาณแล้ว จะสามารถแสดงภาพของการส่งสัญญาณข้อมูลในทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดได้ดังภาพ 25



ภาพ 25 สัญญาณข้อมูลทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6

จากภาพ 25 เป็นการแสดงการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีขนาดบิตเรตเป็น 800 Mbps ในทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด โดยจะพบว่าที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 นั้นจะทำการส่งสัญญาณเบสแบนด์แบบ OOK ที่มีขนาดบิตเรต 200 Mbps ซึ่งเป็นขนาดบิตเรตที่สูงที่สุดที่สามารถทำการส่งสัญญาณได้ และสำหรับช่องส่งสัญญาณช่องที่

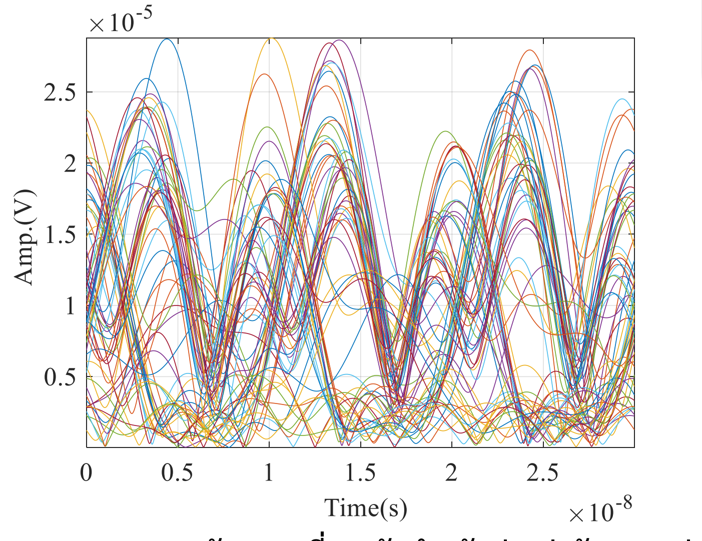
1 ถึงช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 นั้นจะทำการส่งสัญญาณพาสแบนด์แบบ OOK ที่มีขนาดบิตเรตเป็น 100 Mbps ซึ่งเป็นขนาดบิตเรตที่สูงที่สุดที่สามารถทำการส่งสัญญาณได้เช่นเดียวกัน ทำให้เมื่ออาศัยผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz หรือกล่าวคืออาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำจำนวน 7 ช่องสัญญาณเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณของระบบการสื่อสารทางแสงแล้ว จะสามารถทำการส่งสัญญาณข้อมูลจากภาคส่งไปยังภาครับได้มากที่สุดเป็น 800 Mbps นั่นเอง สำหรับค่าความถี่ในการมอดูเลชัน ($f_{Peak,Avg}$) ของช่องสัญญาณแต่ละช่องนั้นจะอาศัยค่าความถี่ที่ได้จาก (23) นั่นคือ ช่องสัญญาณช่องที่ 0 ถึงช่องสัญญาณช่องที่ 6 จะมีค่าความถี่มอดูเลชันเป็น 0 300 528 789 1,050 1,311 MHz ตามลำดับ โดยเมื่อทำการทดลองจำลองการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีขนาดบิตเรตเป็น 800 Mbps ผ่านช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำทั้ง 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองแล้ว จะสามารถแสดงค่า BER ของระบบสื่อสารทั้ง 10 แบบจำลองได้ดังภาพ 26



ภาพ 26 ค่า BER ของการส่งสัญญาณด้วยบิตเรตเป็น 800 Mbps ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำจำนวน 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง

จากภาพ 26 เป็นการแสดงค่า BER ของการจำลองการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีบิตเรตเป็น 800 Mbps ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง จะพบว่าเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm ค่า BER จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ กลุ่มที่มีค่า BER สูงกว่า 10^{-5} และกลุ่มที่มีค่า BER ต่ำกว่า 10^{-5} สำหรับค่า BER ที่ต่ำที่สุดจะมาจากระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณซึ่งจะมีค่าที่ต่ำกว่า 10^{-7} และค่า BER ที่สูงที่สุดนั้นจะมาจากระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 เป็น

ตัวกลางในการส่งสัญญาณซึ่งจะมีค่าที่สูงกว่า 10^{-5} อย่างไรก็ตามในระบบการสื่อสารทางแสงนั้นจะต้องการให้ระบบสื่อสารมีค่า BER ที่ต่ำกว่า 10^{-9} ทำให้ค่า BER ที่ได้จากระบบสื่อสารทางแสงทั้ง 10 แบบจำลองดังแสดงในภาพ 26 นี้นั้นมีค่า BER ที่สูงเกินไปไม่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน เพื่อศึกษาถึงสาเหตุของปัญหาที่ทำให้ค่า BER ของระบบสื่อสารดังแสดงในภาพ 26 มีค่าที่ค่อนข้างสูงนั้น สัญญาณข้อมูลแบบ OOK ทางความถี่และผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 จึงจะต้องถูกนำมาพิจารณา โดยภาพของสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ทางความถี่และผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 นั้นได้ถูกแสดงไว้แล้วในภาพ 25 โดยจะพบว่าที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 ซึ่งมีค่าความถี่มอดูเลชันเป็น 789 MHz นั้นเกิดการลดทอนของสัญญาณขึ้น เนื่องมาจากมีองค์ประกอบทางความถี่บางส่วนของสัญญาณทางความถี่ในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 อยู่ในบริเวณที่เกิดการลดทอนของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด โดยสาเหตุดังกล่าวนี้จะทำให้ที่ภาครับของระบบสื่อสารทางแสงได้รับสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไปจากภาคส่ง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการตีความบิตผิดพลาดที่ภาครับได้เป็นสาเหตุให้ค่า BER ที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 มีค่าที่ค่อนข้างสูง โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการวัดค่า BER ของระบบสื่อสารด้วยแบบรูปตาซึ่งแบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับสำหรับช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 นั้นจะสามารถแสดงได้ด้วยภาพ 27 ดังนี้



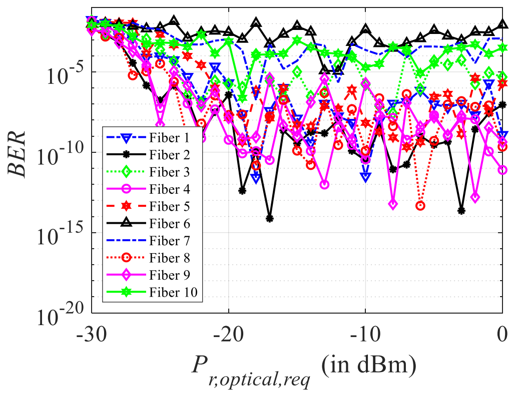
ภาพ 27 แบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับสำหรับช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3

จากภาพ 27 เป็นการแสดงแบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับสำหรับช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 จะพบว่าแบบรูปตานั้นจะมีลักษณะที่ปิดค่อนข้างสนิทและไม่สามารถทำการแยกแยะความแตกต่างระหว่างบิตข้อมูล 0 กับบิตข้อมูล 1 ได้ ซึ่งเป็นสาเหตุโดยตรงที่ทำให้ค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้นมีค่าที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อเป็น

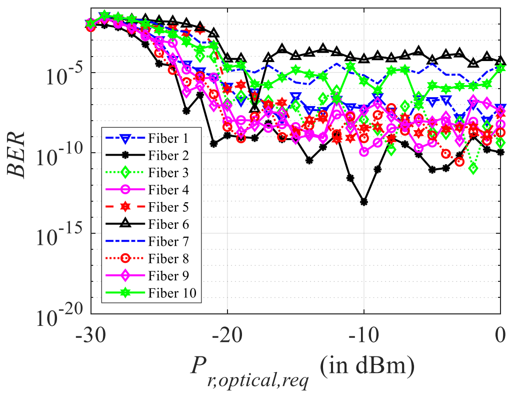
การแก้ไขปัญหาการตีความบิตข้อมูลผิดพลาดที่ภาครับ การเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นจึงได้ถูกนำมาศึกษาและประยุกต์ใช้งานระบบสื่อสารทางแสงดังกล่าวเพื่อทำให้ระบบสื่อสารทางแสงมีความสามารถในการแก้ไขบิตข้อมูลผิดพลาดที่ภาครับ ซึ่งจะส่งผลให้ระบบสื่อสารมีค่า BER ที่ลดต่ำลง

การศึกษาแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำที่อาศัยช่องส่งสัญญาณจำนวน 7 ช่องสัญญาณเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณและมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น

จากการทดลองจำลองการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีบิตเรตเป็น 800 Mbps ผ่านช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำทั้ง 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง พบว่าค่า BER ที่ได้มีค่าที่ค่อนข้างสูงซึ่งเป็นผลมาจากการตีความบิตข้อมูลผิดพลาดที่ภาครับ ดังนั้นในการทดลองส่วนนี้จะทำการทดลองส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดที่ภาครับ ผ่านช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำทั้ง 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง สำหรับการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นที่จะถูกใช้ในการทดลองนี้จะประกอบไปด้วยการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นที่แตกต่างกัน 5 แบบคือ การเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) (15, 11) (15, 7) (31, 26) และ (31, 21) โดยค่า BER ที่ได้จากการทดลองส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) ผ่านช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำทั้ง 7 ช่องสัญญาณ (ช่องส่งสัญญาณที่ 0 1 2 3 4 5 และ 6) ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองจะสามารถแสดงได้ดังภาพ 28



(ก)

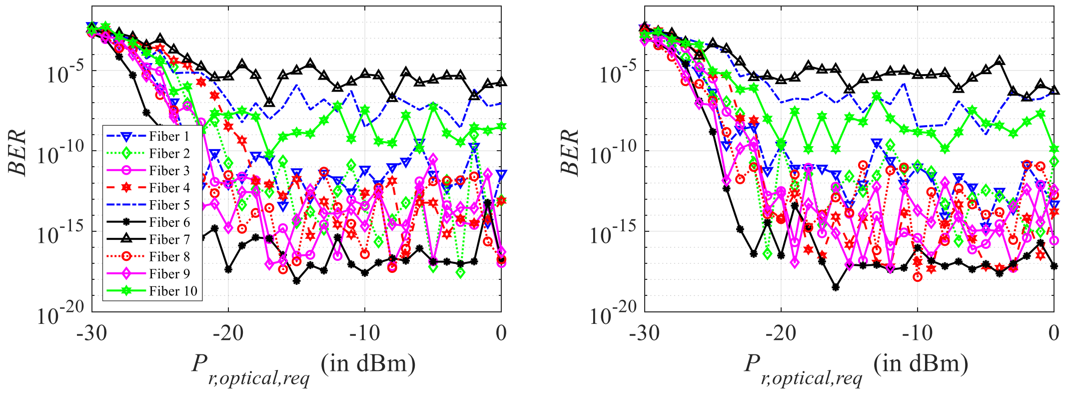


(ข)

ภาพ 28 ค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง

จากภาพ 28 เป็นการแสดงค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงที่อาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำทั้ง 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK โดยในภาพ 28(ก) เป็นการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีบิตเรตเป็น 350 Mbps โดยไม่มีการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูล โดยภาพ 28(ก) นี้จะถูกทำการทดลองเพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่น้อยที่สุดที่ระบบสื่อสารทางแสงที่อาศัยช่องส่งสัญญาณ 7 ช่องสัญญาณจะสามารถทำการส่งผ่านข้อมูลได้เมื่อมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น ซึ่งจะพบว่าเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm ค่า BER ที่สูงที่สุดนั้นจะมาจากระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 6 โดยจะมีค่า BER ที่สูงกว่า 10^{-5} ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้งานในระบบสื่อสารทางแสงได้ พิจารณาภาพ 28(ข) จะเป็นการจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีการส่งสัญญาณแบบ OOK ที่มีบิตเรตเป็น 798 Mbps อย่างไรก็ตามขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลจะมีขนาดลดลงเป็น 456 Mbps ซึ่งเป็นผลมาจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) ซึ่งมีความสามารถในการแก้ไขบิตผิดพลาดที่ภาครับได้ 1 บิต จะพบว่าเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm ค่า BER ที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงจะให้ค่าที่ต่ำที่สุดซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-13} ถึง 10^{-8} แต่อย่างไรก็ตามค่า BER ที่สูงที่สุดนั้นก็จะยังคงมาจากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 โดยจะมีค่า BER ที่ประมาณ 10^{-4} จะพบว่าค่า BER ที่ได้นั้นสูงกว่าในกรณีของภาพ 28(ก) แต่จะพบว่าบิตเรตของการส่งสัญญาณนั้นมีขนาดที่เพิ่มสูงขึ้น

ในส่วนของการทดลองต่อมาจะเป็นการทดลองส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) ผ่านช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำทั้ง 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง อย่างไรก็ตามจากการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสแบบบล็อกเชิงเส้นไปยังช่องสัญญาณในบทที่ 3 นั้น จะพบว่าการเข้ารหัสสัญญาณแบบ (15, 11) นั้นจะมีวิธีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นแล้วที่แตกต่างกันอยู่ 2 รูปแบบ โดยค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงของการทดลองส่งสัญญาณแบบ OOKที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) ทั้ง 2 รูปแบบนั้นจะสามารถแสดงได้ดังภาพ 29



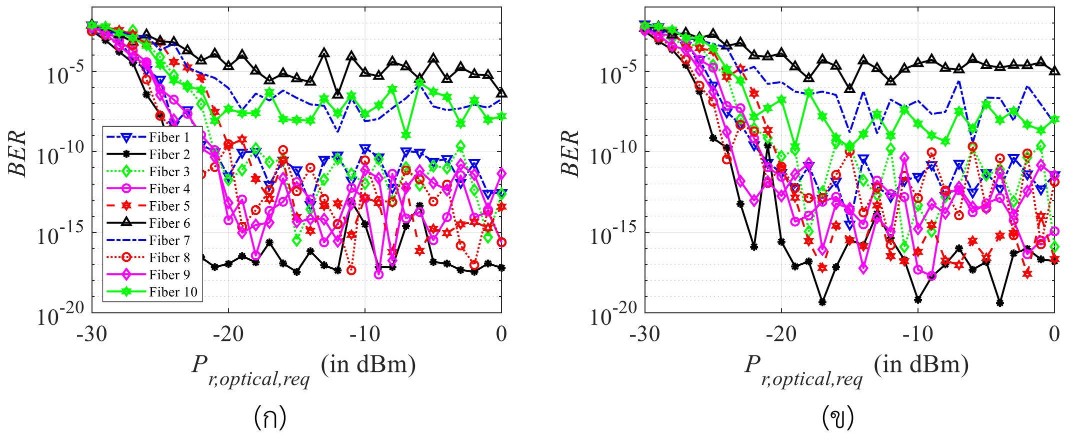
(ก) (ข)

ภาพ 29 ค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง

จากภาพ 29 เป็นการแสดงค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงที่อาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำทั้ง 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) ซึ่งสามารถแก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดที่ปลายทางได้ 1 บิต โดยเมื่อพิจารณาภาพ 29(ก) จะเป็นการจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีการส่งสัญญาณแบบ OOK ที่มีบิตเรตเป็น 795 Mbps แต่อย่างไรก็ตามขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลจะมีขนาดลดลงเป็น 583 Mbps ซึ่งเป็นผลมาจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 และเมื่อพิจารณาภาพ 29(ข) จะเป็นการจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีการส่งสัญญาณแบบ OOK ที่มีบิตเรตเป็น 750 Mbps แต่ขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลจะมีขนาดลดลงเป็น 550 Mbps ซึ่งเป็นผลมาจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 2 จะพบว่าการจำลองระบบสื่อสารในกรณีนี้จะมีขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่สูงกว่ากรณีก่อนหน้านี้ เนื่องมาจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) นั้นจะให้อัตรารหัสที่สูงกว่าการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) และเมื่อพิจารณาภาพ 29(ก) กับภาพ 29(ข) จะพบว่าการจำลองระบบสื่อสารในภาพ 29(ก) นั้นจะมีขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่มากกว่าการจำลองระบบสื่อสารในภาพ 29(ข) เนื่องจากภาพ 29(ก) นั้นจะมีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 ซึ่งจะใช้งานช่องส่งสัญญาณในการส่งบิตคำรหัสทุกช่องส่งสัญญาณ แตกต่างจากภาพ 29(ข) ซึ่งจะมีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 2 ซึ่งมี

ช่องว่างเกิดขึ้นในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 ดังที่ได้แสดงไว้แล้วในภาพ 24(ก) และ 24(ข) ตามลำดับ ในบทที่ 3 อย่างไรก็ตามจะพบว่าค่า BER ที่สูงที่สุดที่ได้จากทั้งภาพ 29(ก) และภาพ 29(ข) นั้นจะมาจากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 เหมือนกัน โดยเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm ค่า BER ที่สูงที่สุดที่ได้จากทั้ง 2 กรณีจะไม่แตกต่างกันโดยจะอยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-7} ถึง 10^{-4}

จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) นั้นจะทำให้ระบบสื่อสารสามารถทำการส่งสัญญาณข้อมูลได้มากกว่าการใช้งานการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่การเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) นั้นมีอัตรารหัสที่สูงกว่าการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลให้กับระบบสื่อสารทางแสง ในส่วนต่อไปจะเป็นการทดลองส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 26) ซึ่งเป็นการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นที่ให้อัตรารหัสที่สูงที่สุดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำหรับการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 26) นั้นก็จะมีอยู่ 2 รูปแบบเช่นเดียวกัน ดังนั้นค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงของการทดลองส่งสัญญาณแบบ OOK ที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 26) ทั้ง 2 รูปแบบนั้นจะสามารถแสดงได้ดังภาพ 30

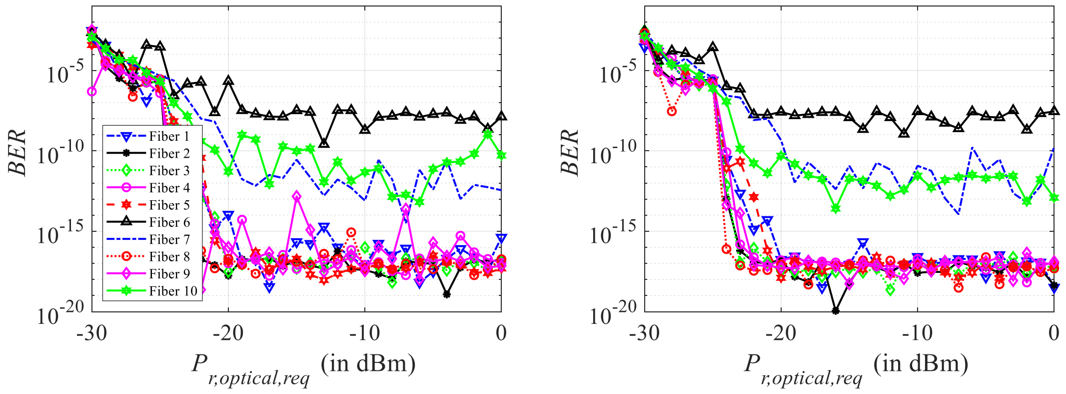


ภาพ 30 ค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 26) ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง

จากภาพ 30 เป็นการแสดงค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงที่อาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำทั้ง 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้น

แบบ (31, 26) ซึ่งสามารถแก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดที่ปลายทางได้ 1 บิต โดยเมื่อพิจารณาภาพ 30(ก) จะพบว่าจะเป็นการจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีการส่งสัญญาณแบบ OOK ที่มีบิตเรตเป็น 775 Mbps แต่อย่างไรก็ตามขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลจะมีขนาดลดลงเป็น 650 Mbps ซึ่งเป็นผลมาจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 26) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 และเมื่อพิจารณาภาพ 30(ข) จะเป็นการจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีการส่งสัญญาณแบบ OOK ที่มีบิตเรตเป็น 744 Mbps และขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลจะมีขนาดลดลงเป็น 624 Mbps ซึ่งเป็นผลมาจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 26) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 2 และจะพบว่าขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่ได้จากภาพ 30(ก) นั้นจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองก่อนหน้านี้ และจะพบว่าค่า BER ที่สูงที่สุดที่ได้จากทั้งภาพ 30(ก) และภาพ 30(ข) นั้นจะยังมาจากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 เหมือนกัน โดยเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm ค่า BER ที่ได้จะมีค่าต่ำกว่า 10^{-4}

จะพบว่าจากการทดลองที่ผ่านมาระบบการสื่อสารทางแสงที่มีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นที่มีประสิทธิภาพในการแก้ไขบิตข้อมูลผิดพลาดที่ภาครับ 1 บิตนั้นอาจยังให้ค่า BER ที่ไม่ต่ำเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานทางแสง ดังนั้นในส่วนของการทดลองต่อไปจะเป็นการทดลองส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 7) ซึ่งมีความสามารถในการแก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดที่ปลายทางได้ 2 บิต ผ่านช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำทั้ง 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง สำหรับการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 7) นั้นก็จะมีอยู่ 2 รูปแบบเช่นเดียวกันดังที่ได้แสดงไว้แล้วในบทที่ 3 ดังนั้นค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงของการทดลองส่งสัญญาณแบบ OOK ที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 7) ทั้ง 2 รูปแบบนั้นจะสามารถแสดงได้ดังภาพ 31

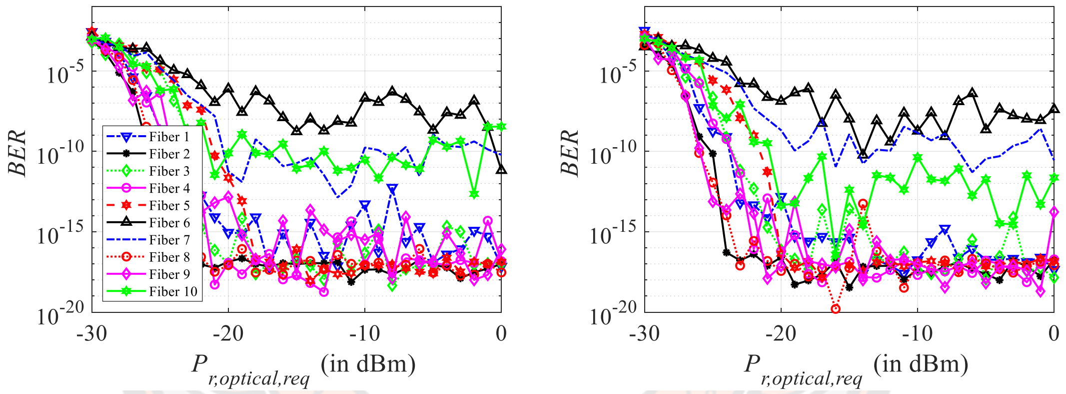


(ก) (ข)

ภาพ 31 ค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 7) ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง

จากภาพ 31 เป็นการแสดงค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงที่อาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำทั้ง 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 7) ซึ่งสามารถแก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดที่ปลายทางได้ 2 บิต อย่างไรก็ตามการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 7) นั้นจะมีอัตรารหัสที่ต่ำที่สุดในการทดลองของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยเมื่อพิจารณาภาพ 31(ก) จะพบว่าจะเป็นการจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีการส่งสัญญาณแบบ OOK ที่มีบิตเรตเป็น 795 Mbps และขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลจะมีขนาดลดลงเป็น 350 Mbps ซึ่งเป็นผลมาจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 7) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 และเมื่อพิจารณาภาพ 31(ข) จะเป็นการจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีการส่งสัญญาณแบบ OOK ที่มีบิตเรตเป็น 750 Mbps และขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลจะมีขนาดลดลงเป็น 350 Mbps ซึ่งเป็นผลมาจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 7) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 2 อย่างไรก็ตามจะพบว่าค่า BER ที่สูงที่สุดที่ได้จากทั้ง 2 กรณีนั้นจะยังคงมาจากเส้นใยแก้วนำแสง 6 แต่เมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm ค่า BER ที่ได้จะมีค่าที่ต่ำกว่า 10^{-7} ซึ่งค่า BER ที่ได้จากในกรณีนี้นั้นจะมีค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับในทุกกรณีที่ได้กล่าวมาข้างต้น แม้แต่กับในกรณีการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีบิตเรตเท่ากันเป็น 350 Mbps โดยไม่มีการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลในรูปที่ 28(ก) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบบล็อกเชิงเส้นที่มีความสามารถในการแก้ไขบิตผิดพลาดที่ปลายทางได้ 2 บิต แม้ว่าการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 7) นั้นจะส่งผลให้

ระบบสื่อสารทางแสงมีค่า BER ที่ต่ำลง แต่ขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลนั้นก็มีขนาดที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลแต่ยังคงประสิทธิภาพในการแก้ไขบิตผิดพลาดที่ปลายทางจำนวน 2 บิตให้กับระบบสื่อสารทางแสง ดังนั้นในส่วนต่อไปจึงจะเป็นการทดลองส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ซึ่งยังคงแก้ไขบิตผิดพลาดที่ปลายได้จำนวน 2 บิตและยังเป็นการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นที่มีอัตรารหัสสูงกว่าการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 7) อีกด้วย สำหรับการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 26) นั้นก็จะมีอยู่ 2 รูปแบบเช่นเดียวกัน โดยค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงของการทดลองส่งสัญญาณแบบ OOKที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ทั้ง 2 รูปแบบนั้นจะสามารถแสดงได้ดังภาพ 32

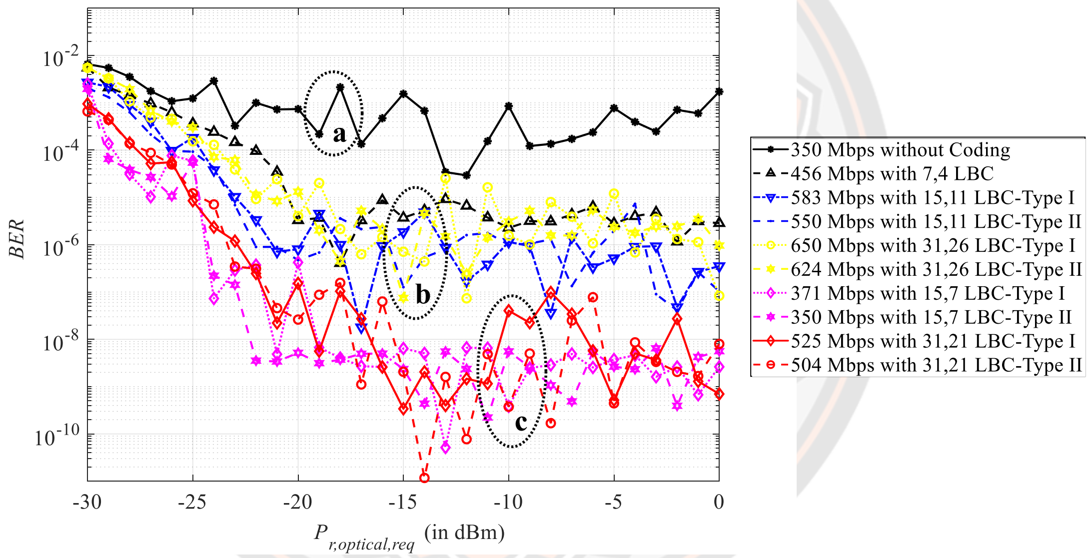


(ก) (ข)

ภาพ 32 ค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง

จากภาพ 32 เป็นการแสดงค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงที่อาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำทั้ง 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ซึ่งสามารถแก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดที่ปลายทางได้ 2 บิต โดยเมื่อพิจารณาภาพ 32(ก) จะพบว่าจะเป็นการจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีการส่งสัญญาณแบบ OOK ที่มีบิตเรตเป็น 775 Mbps และขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลจะมีขนาดลดลงเป็น 525 Mbps ซึ่งเป็นผลมาจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 และเมื่อพิจารณาภาพ 32(ข) จะเป็นการจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มี

การส่งสัญญาณแบบ OOK ที่มีบิตเรตเป็น 744 Mbps และขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลจะมีขนาดลดลงเป็น 504 Mbps ซึ่งเป็นผลมาจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 2 และจะพบว่าค่า BER ที่สูงที่สุดที่ได้จากทั้ง 2 กรณีนั้นจะยังคงได้มาจากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 โดยเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm ค่า BER ที่ได้จะมีค่าที่ต่ำกว่า 10^{-6} และเมื่อทำการพิจารณาค่า BER เฉลี่ยของระบบสื่อสารทางแสงที่อาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำทั้ง 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเชิงเส้นที่แตกต่างกันทั้ง 10 รูปแบบ ดังแสดงในภาพ 28 ถึง 32 แล้วนั้น จะสามารถทำการแสดงค่า BER เฉลี่ยของแต่ละกรณีได้ดังภาพ 33



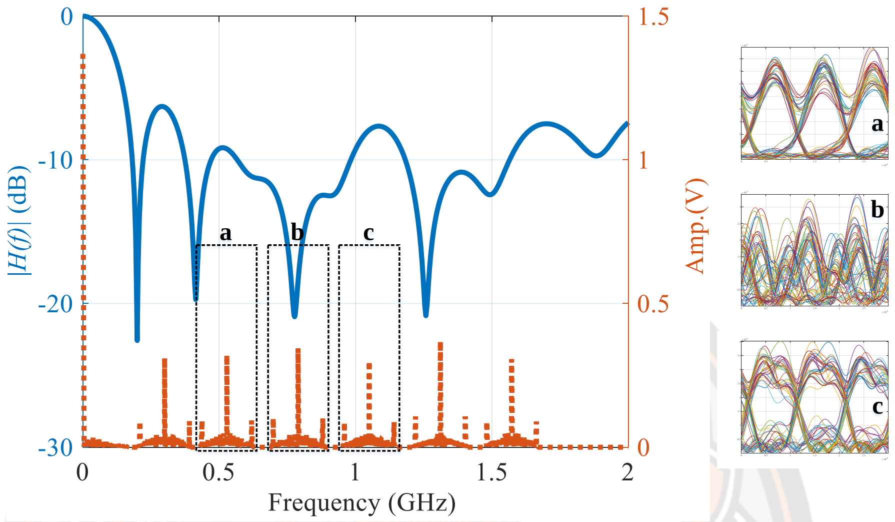
ภาพ 33 ค่า BER เฉลี่ยของการส่งสัญญาณผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง

จากภาพ 33 เป็นการแสดงค่า BER เฉลี่ยของระบบสื่อสารทางแสงที่อาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ 7 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นที่แตกต่างกัน 10 รูปแบบ จะพบว่าสามารถทำการแยกกลุ่มของค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากการจำลองระบบสื่อสารออกเป็น 3 กลุ่มนั่นคือ กลุ่ม a คือ ค่า BER เฉลี่ยของระบบสื่อสารที่ไม่มีการเข้ารหัสสัญญาณ ซึ่งเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm จะได้ค่า BER เฉลี่ยที่สูงกว่า 10^{-5} เมื่อทำการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตเป็น 350 Mbps

พิจารณาค่า BER เฉลี่ยของระบบสื่อสารในกลุ่ม b นั่นก็คือ กลุ่มของค่า BER เฉลี่ยที่มาจากการจำลองระบบสื่อสารที่มีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นที่มีความสามารถในการแก้ไขบิตผิดพลาดที่ปลายทาง 1 บิต ซึ่งก็คือการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7,4) การเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 การเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 2 การเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 26) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 และการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 26) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 2 จะพบว่าเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm ค่า BER เฉลี่ยของทั้ง 5 กรณีนี้นั้นจะมีค่าที่เกาะกลุ่มกันอยู่ระหว่าง 10^{-7} ถึง 10^{-5} โดยเมื่ออาศัยการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 26) มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 แล้วนั้น จะทำให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตสูงที่สุดได้เป็น 650 Mbps ซึ่งเป็นผลมาจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นที่จะมีอัตรารหัสที่สูงที่สุด และค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากกรณีนี้ยังมีค่าที่ต่ำกว่า 10^{-5} ซึ่งต่ำกว่าค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากกลุ่ม a อย่างเห็นได้ชัดเจน

พิจารณาค่า BER เฉลี่ยของระบบสื่อสารที่ได้ในกลุ่ม c นั่นคือ กลุ่มของค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากการจำลองระบบสื่อสารที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 7) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 การเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 7) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 2 การเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 และการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 2 ซึ่งมีความสามารถในการแก้ไขบิตผิดพลาดที่ปลายทาง 2 บิต จะพบว่าค่า BER เฉลี่ยที่ได้นั้นจะมีค่าที่เกาะกลุ่มกันทั้ง 4 กรณี โดยเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm ค่า BER เฉลี่ยของทั้ง 4 กรณีจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10^{-9} ถึง 10^{-7} โดยเมื่ออาศัยการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 แล้วนั้น จะทำให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตสูงที่สุดได้เป็น 525 Mbps โดยที่มีค่า BER เฉลี่ยที่ต่ำกว่า 10^{-7} และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากทั้ง 3 กลุ่มแล้ว จะพบว่าค่า BER เฉลี่ยที่สูงที่สุดนั้นจะมาจากกลุ่ม a และค่า BER เฉลี่ยที่ต่ำที่สุดนั้นจะมาจากกลุ่ม c ซึ่งการที่กลุ่ม c มีค่า BER เฉลี่ยที่ต่ำที่สุดนั้นจะเป็นผลมาจากความสามารถในการแก้ไขบิตผิดพลาดที่ปลายทางได้ 2 บิตนั่นเอง โดยหากระบบสื่อสารต้องการค่า BER ที่ประมาณ 10^{-7} แล้วนั้นจะพบว่าไม่สามารถใช้การส่งสัญญาณในกลุ่ม a ได้ และการส่งสัญญาณในกลุ่ม c จะให้ Coding gain ถึง 10 dB เมื่อเปรียบเทียบกับการส่งสัญญาณในกลุ่ม b แต่อย่างไรก็

ตามจากการพิจารณาผลการศึกษาข้างต้นจะพบว่าเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 จะให้ค่า BER ที่สูงที่สุด ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำเส้นที่ 6 เพื่อศึกษาหาสาเหตุและวิธีแก้ไขปัญหา โดยผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำเส้นที่ 6 จะสามารถแสดงได้ดังภาพ 34

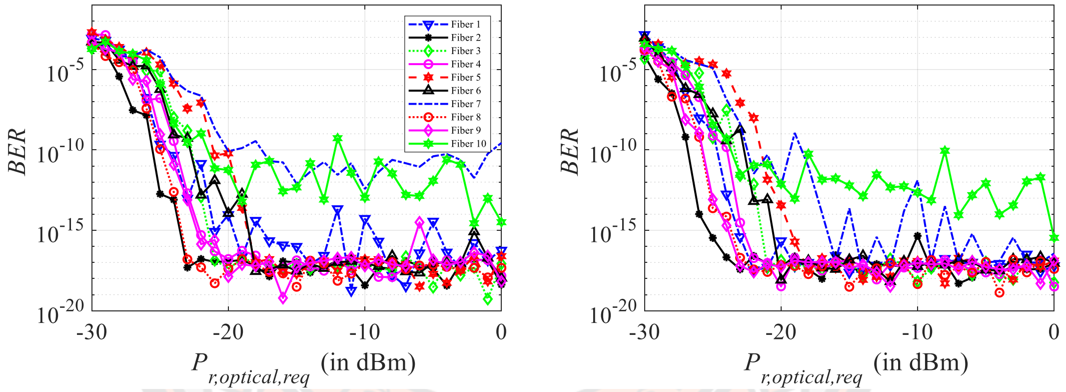


ภาพ 34 สัญญาณข้อมูลทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 และแบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับ

จากภาพ 34 เป็นการแสดงการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ในทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 6 จะพบว่าแบบรูปตาของภาพ 34 ภาพย่อย a นั้นสามารถแยกแยะบิต 0 และบิต 1 ได้อย่างชัดเจนซึ่งเป็นผลมาจากองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณที่ภาครับในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 2 นั้นมีค่า $f_{Peak,Avg}$ ที่เหมาะสมกับค่าความถี่ของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสง ในขณะเดียวกันองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 (ภาพ 34 ภาพย่อย b) นั้นมีค่า $f_{Peak,Avg}$ ที่ตรงกันกับค่าความถี่ที่เกิดการลดทอนของสัญญาณขึ้น ซึ่งส่งผลให้สัญญาณที่ภาครับของช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 นั้นเกิดการลดทอนของสัญญาณที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นที่ภาครับจึงได้รับสัญญาณที่มีการลดทอนของสัญญาณสูงเกิดความผิดพลาดของบิตข้อมูลทำให้ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างบิต 0 และบิต 1 ได้ดังแสดงในรูปแบบรูปตาของภาพ 34 ภาพย่อย b ซึ่งส่งผลโดยตรงให้ค่า BER ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 นั้นมีค่าที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารทางแสงช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 จึงจะไม่ถูกนำไปใช้งานในส่วนของการทดลองต่อไป โดยในส่วนต่อไปนั้นจะทำการจำลองระบบสื่อสารเมื่อทำการส่งสัญญาณโดยอาศัยช่องส่งสัญญาณเพียง 6 ช่องสัญญาณ นั่นคือ ช่องส่งสัญญาณที่ 0 1 2 4 5 และ 6

การศึกษาแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำที่อาศัยช่องส่งสัญญาณจำนวน 6 ช่องสัญญาณเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณและมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น

จากการจำลองระบบสื่อสารทางแสงข้างต้นพบว่าที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 นั้นจะมีการลดทอนของสัญญาณเกิดขึ้นค่อนข้างสูง ดังนั้นในการจำลองระบบสื่อสารในส่วนนี้จะทำการจำลองสื่อสารทางแสงโดยอาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ 6 ช่องสัญญาณ นั่นคือ ช่องส่งสัญญาณที่ 0 1 2 4 5 และ 6 ซึ่งเมื่อทำการทดลองจำลองการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ทั้ง 2 รูปแบบผ่านช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำทั้ง 6 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงที่แตกต่างกันทั้ง 10 แบบจำลองแล้วนั้น จะสามารถแสดงค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงดังกล่าวได้ดังภาพ 35



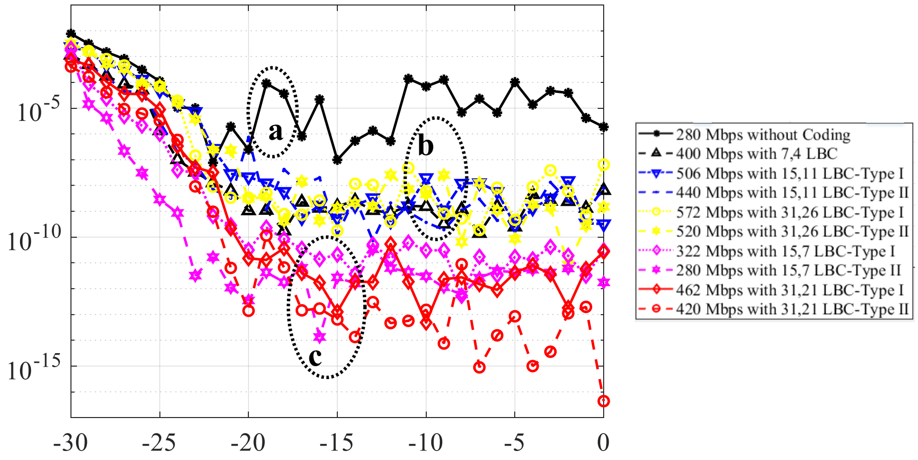
(ก) (ข)

ภาพ 35 ค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 6 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง

จากภาพ 35 เป็นการแสดงค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงที่อาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำทั้ง 6 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ซึ่งสามารถแก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดที่ปลายทางได้ 2 บิต โดยเมื่อพิจารณาภาพ 35(ก) จะพบว่าจะเป็นการจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีการส่งสัญญาณแบบ OOK ที่มีบิตเรตเป็น 682 Mbps และขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลจะมีขนาดลดลงเป็น 462 Mbps ซึ่งเป็นผลมาจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 โดยเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm ค่า BER ที่ได้จากเส้นใยแก้ว

นำแสงเส้นที่ 10 จะมีค่าที่สูงที่สุดโดยจะมีค่าที่ต่ำกว่า 10^{-9} ซึ่งก็เพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารบางระบบได้ และเมื่อพิจารณาภาพ 35(ข) จะเป็นการจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีการส่งสัญญาณแบบ OOK ที่มีบิตเรตเป็น 620 Mbps และขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลจะมีขนาดลดลงเป็น 420 Mbps ซึ่งเป็นผลมาจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 2 และเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm ค่า BER ที่สูงที่สุดก็จะได้มาจากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 10 เช่นเดียวกัน โดยจะมีค่าที่ต่ำกว่า 10^{-10} ซึ่งค่า BER ที่ได้นี้มีค่าที่ต่ำกว่ากรณีในภาพ 35(ก) อยู่เล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากการส่งสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 2 ซึ่งจะมีข้อดีกว่าการส่งสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 ในการช่วยลดจำนวนบิตผิดพลาดที่ปลายทาง

เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างภาพ 32(ก) และ 32(ข) กับภาพ 35(ก) และ 35(ข) จะพบว่าค่า BER ที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 ในภาพ 35(ก) และ 35(ข) มีค่าที่ลดต่ำลงอย่างชัดเจน โดยที่ค่า BER ที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นอื่น ๆ จะแตกต่างกันเล็กน้อย อย่างไรก็ตามขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่สูงที่สุดที่จะสามารถส่งไปยังปลายทางได้นั้นจะถูกลดลงมาจาก 525 Mbps เป็น 420 Mbps เนื่องมาจากการลดจำนวนช่องส่งสัญญาณที่ถูกใช้งานในแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสง และเมื่อทำการพิจารณาค่า BER เฉลี่ยของระบบสื่อสารทางแสงที่อาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ 6 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเชิงเส้นที่แตกต่างกันทั้ง 10 รูปแบบ จะสามารถทำการแสดงค่า BER เฉลี่ยของแต่ละกรณีดังภาพ 36



ภาพ 36 ค่า BER เฉลี่ยของการส่งสัญญาณผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 6 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง

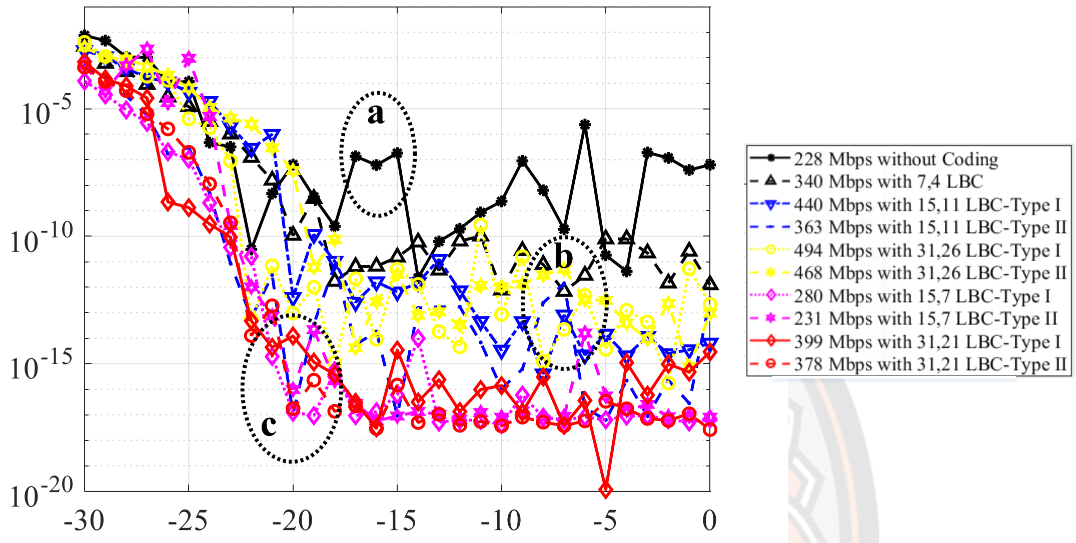
จากภาพ 36 เป็นการแสดงค่า BER เฉลี่ยของระบบสื่อสารทางแสงที่อาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ 6 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นที่แตกต่างกัน 10 รูปแบบ จะพบว่าเมื่อค่า BER เฉลี่ยของระบบสื่อสารในกลุ่ม a นั้นจะมีค่าที่สูงกว่า 10^{-7} เมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm และเมื่อพิจารณาค่า BER เฉลี่ยที่ได้ในกลุ่ม b จะพบว่าเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm ค่า BER เฉลี่ยของทั้ง 5 กรณีนั้นจะมีค่า BER เฉลี่ยที่ต่ำกว่า 10^{-7} โดยเมื่ออาศัยการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 26) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 แล้วนั้น จะทำให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตได้สูงที่สุดเป็น 572 Mbps พิจารณาค่า BER เฉลี่ยของระบบสื่อสารที่ได้ในกลุ่ม c จะพบว่าค่า BER เฉลี่ยที่ของทั้ง 4 กรณีนั้นจะมีค่าที่ต่ำกว่า 10^{-10} เมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm โดยค่า BER เฉลี่ยที่ได้นี้มีค่าที่ต่ำเพียงพอต่อการนำไปใช้งานในระบบสื่อสารทางแสง และเมื่ออาศัยการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 แล้วนั้น จะทำให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลในกรณีที่มีการแก้ไขบิตผิดพลาดที่ปลายทางได้ 2 บิตที่มีบิตเรตที่สูงที่สุดได้เป็น 462 Mbps และเมื่อพิจารณาที่ค่า BER เฉลี่ยเป็น 10^{-11} แล้วนั้น จะพบว่าการส่งสัญญาณในกลุ่ม c จะให้ค่า Coding gain ที่สูงกว่าการส่งสัญญาณในกลุ่ม b ถึง 8 dB

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า BER เฉลี่ยที่ได้ระหว่างภาพ 33 กับภาพ 36 จะพบว่าค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากภาพ 36 นั้นจะมีค่าที่ลดต่ำลงกว่าค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากภาพ 33 ในทุกกรณี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการที่ไม่ใช้งานช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 ในแบบจำลองระบบสื่อสารสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารได้จริง แต่อย่างไรก็ตามขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่สูงที่สุดที่จะสามารถส่งผ่านไปยังปลายทางได้ในภาพ 36 นั้นจะมีค่าที่ลดต่ำลง

การศึกษาแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำที่อาศัยช่องส่งสัญญาณจำนวน 5 ช่องสัญญาณเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณและมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น

จากการศึกษาใน (23) พบว่านอกจากช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 แล้วนั้นยังมีช่องส่งสัญญาณอีกหนึ่งช่องที่ไม่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบสื่อสารทางแสงนั่นก็คือช่องส่งสัญญาณช่องที่ 4 ซึ่งหากย้อนกลับไปพิจารณาภาพ 34 จะพบว่าถึงแม้ว่าแบบรูปตาของภาพ 34 ภาพย่อย c นั้นจะสามารถแยกแยะบิต 0 และบิต 1 ได้ แต่ลักษณะของแบบรูปตาที่ภาครับได้รับมานั้นก็ยังอาจทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลขึ้นมาได้ ดังนั้นในการจำลองระบบสื่อสารทางแสงในส่วนต่อไปนี้จะทำการจำลองระบบสื่อสารทางแสงโดยอาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ 5 ช่องสัญญาณ นั่นคือ

ช่องส่งสัญญาณที่ 0 1 2 5 และ 6 โดยจะสามารถแสดงค่า BER เฉลี่ยของระบบสื่อสารทางแสงที่อาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ 5 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเชิงเส้นที่แตกต่างกันทั้ง 10 รูปแบบ ได้ดังภาพ 37



ภาพ 37 ค่า BER เฉลี่ยของการส่งสัญญาณผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 5 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง

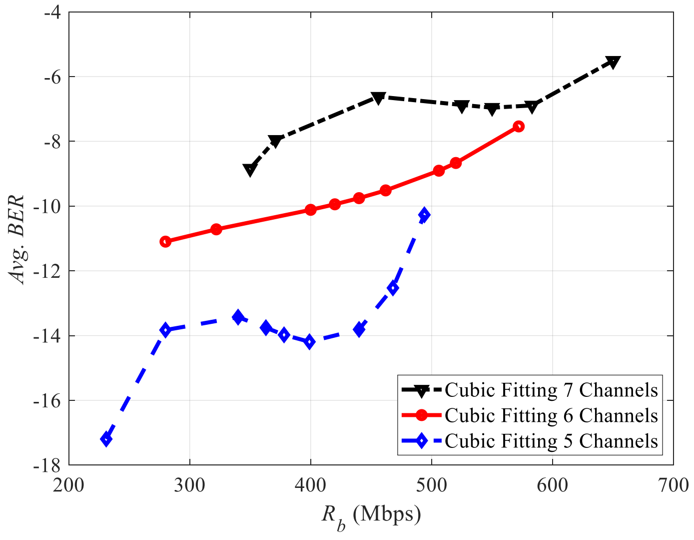
จากภาพ 37 เป็นการแสดงค่า BER เฉลี่ยของระบบสื่อสารทางแสงที่อาศัยช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ 5 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นที่แตกต่างกัน 10 รูปแบบ จะพบว่าค่า BER เฉลี่ยที่ได้ในกลุ่ม a นั้นจะมีค่าที่ต่ำกว่า 10^{-6} เมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm และค่า BER เฉลี่ยที่ได้ในกลุ่ม b จะมีค่า BER เฉลี่ยที่ต่ำกว่า 10^{-9} ทั้ง 5 กรณีเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm และเมื่ออาศัยการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 26) มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 แล้วนั้น จะทำให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตได้สูงที่สุดเป็น 494 Mbps และเมื่อพิจารณาค่า BER เฉลี่ยในกลุ่ม c จะพบว่าค่า BER เฉลี่ยของทั้ง 4 กรณีนั้นจะมีค่าที่กระจายเกาะกลุ่มกันค่อนข้างแคบ และมีค่าที่ต่ำกว่า 10^{-14} เมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm โดยค่า BER เฉลี่ยที่ได้ในกรณีนี้นั้นจะมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการนำไปใช้งานในระบบสื่อสารทางแสง และเมื่ออาศัยการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 21) ที่มีการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิง

เส้นในรูปแบบที่ 1 แล้วนั้น จะทำให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดของบิตเรตที่สูงที่สุดได้เป็น 399 Mbps หรือมากกว่าการส่งสัญญาณผ่าน 3-dB Modal Bandwidth อยู่ประมาณ 2 เท่านั่นเอง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า BER เฉลี่ยที่ได้ระหว่างภาพ 33 36 และ 37 จะพบว่าค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากภาพ 37 นั้นจะมีค่าที่ต่ำที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการที่ไม่ใช้งานช่องส่งสัญญาณช่องที่ 3 และช่องที่ 4 จะช่วยประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารได้อย่างมาก จากการทดลองข้างต้นจะพบว่า สามารถทำการประยุกต์ใช้งานระบบสื่อสารทางแสงได้หลายวิธี ดังนั้นในส่วนต่อไปจะเป็นการประมาณประสิทธิภาพของระบบสื่อสารทางแสงในด้านของค่า BER และขนาดของบิตเรตสัญญาณข้อมูล เพื่อให้สะดวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ

การประมาณประสิทธิภาพระบบสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ

จากการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณทั้ง 3 กรณีข้างต้นได้แก่ เมื่ออาศัยช่องส่งสัญญาณจำนวน 7 ช่องสัญญาณเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ เมื่ออาศัยช่องส่งสัญญาณจำนวน 6 ช่องสัญญาณเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ และเมื่ออาศัยช่องส่งสัญญาณจำนวน 5 ช่องสัญญาณเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ จะสามารถทำการประมาณค่า BER ของระบบสื่อสารต่อขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่จะสามารถทำการส่งจากภาคส่งไปยังภาครับได้ เพื่อเป็นการนำไปเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับความต้องการของระบบสื่อสารแต่ละประเภทได้ดังภาพ 38



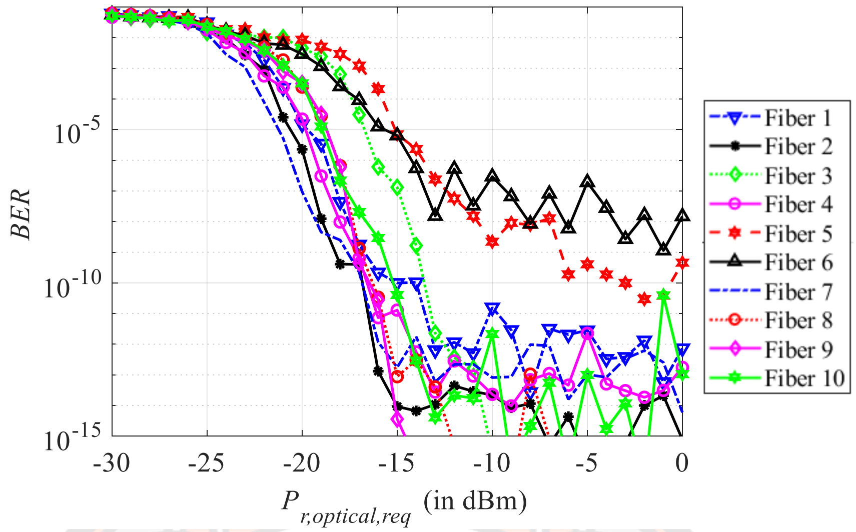
ภาพ 38 การประมาณประสิทธิภาพระบบสื่อสารทางแสง

จากภาพ 38 เป็นการแสดงค่าการประมาณประสิทธิภาพของระบบสื่อสารทางแสงในด้านของค่า BER ของระบบสื่อสารต่อขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่จะสามารถทำการส่งจากภาคส่งไปยังภาครับได้ โดยในการประมาณประสิทธิภาพนั้นจะได้มาจากการใช้งานระบบสื่อสารที่มีจำนวนช่องส่งสัญญาณที่แตกต่างกันคือ เมื่ออาศัยช่องส่งสัญญาณจำนวน 7 6 และ 5 ช่องสัญญาณ ซึ่งในการประมาณค่า BER นั้นพบว่าการประมาณค่าที่มีความเหมาะสมกับข้อมูลคือการประมาณค่าแบบกำลังสาม (Cubic Fitting) (35) โดยเมื่อพิจารณาการจำลองระบบสื่อสารด้วยช่องส่งสัญญาณจำนวน 7 ช่องสัญญาณ (เส้นประสีดำ-ข้าวหลามตัด) จะพบว่าสามารถทำการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตได้เป็น 350 ถึง 650 Mbps โดยที่จะมีค่า BER อยู่ระหว่าง 10^{-9} ถึง 10^{-5} พิจารณาการจำลองระบบสื่อสารด้วยช่องส่งสัญญาณ 6 ช่องสัญญาณ (เส้นประจุดสีน้ำเงิน-สามเหลี่ยม) จะพบว่าสามารถทำการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตได้เป็น 280 ถึง 572 Mbps โดยที่จะมีค่า BER อยู่ระหว่าง 10^{-11} ถึง 10^{-8} และเมื่อพิจารณาการจำลองระบบสื่อสารด้วยช่องส่งสัญญาณ 5 ช่อง (เส้นสีแดง-วงกลม) จะพบว่าสามารถทำการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตได้เป็น 231 ถึง 494 Mbps โดยที่จะมีค่า BER อยู่ระหว่าง 10^{-17} ถึง 10^{-11} ในการนำไปใช้งานนั้นหากต้องการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตเป็น 400 Mbps และระบบสื่อสารต้องการค่า BER ที่ต่ำกว่า 10^{-10} การใช้งานระบบสื่อสารที่มีจำนวนช่องส่งสัญญาณจำนวน 7 ช่องก็จะไม่มีความเหมาะสม เนื่องจากระบบสื่อสารดังกล่าวนี้จะสามารถให้ค่า BER ได้ที่ประมาณ 10^{-6} ซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการของระบบสื่อสาร ดังนั้นจึงต้องทำการลดการใช้งานช่องส่งสัญญาณลงมา โดยเมื่อใช้งานช่องส่งสัญญาณจำนวน 6 ช่องในระบบสื่อสาร จะทำให้ได้ค่า BER ที่ประมาณ 10^{-10} ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการของระบบ แต่อย่างไรก็ตามหากทำการลดการใช้งานช่องส่งสัญญาณลงมาเป็นจำนวน 5 ช่องสัญญาณ ก็จะทำให้ระบบสื่อสารมีค่า BER ที่ต่ำถึงประมาณ 10^{-14} และยังสามารถส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตเป็น 400 Mbps ได้ตามความต้องการของระบบอีกด้วย

จากการศึกษาการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นรูปแบบต่าง ๆ และการเลือกใช้งานช่องส่งสัญญาณให้มีความเหมาะสมกับระบบสื่อสารทางแสงข้างต้น จะพบว่าเมื่อต้องการให้ระบบสื่อสารทางแสงมีค่า BER ที่เพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานทางแสงกล่าวคือมีค่า BER ที่ต่ำกว่า 10^{-9} แล้วนั้น จะทำให้ขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่จะสามารถทำการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับได้นั้นมีขนาดที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นและการลดจำนวนช่องส่งสัญญาณที่ถูกใช้งาน ดังนั้นในส่วนต่อไปจึงจะทำการเปลี่ยนรูปแบบการส่งสัญญาณในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 จากการส่งสัญญาณแบบ OOK เป็นการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK

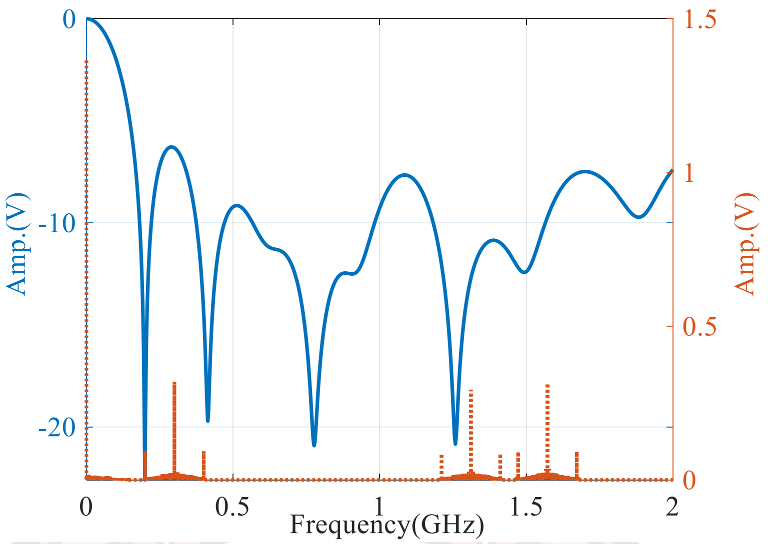
การศึกษาแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณและมีการส่งญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0

จากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ทำให้ทราบว่าการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK นั้นจะสามารถทำการส่งสัญญาณที่มีขนาดบิตเรตได้มากกว่าการส่งสัญญาณแบบ OOK ถึง 2 เท่า เมื่ออาศัยขนาดแบนด์วิธของการส่งสัญญาณที่เท่ากัน และเนื่องจากที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 นั้นจะมีการลดทอนของสัญญาณที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นในการทดลองในส่วนต่อไปนี้จึงจะทำการเปลี่ยนรูปแบบการส่งสัญญาณในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 จากการส่งสัญญาณแบบ OOK เป็นการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK เพื่อเป็นการเพิ่มขนาดบิตเรตให้กับระบบสื่อสารทางแสง จากผลการศึกษาก่อนหน้านี้ทำให้ทราบแล้วว่าการเลือกใช้งานช่องส่งสัญญาณให้มีความเหมาะสมกับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั้นค่อนข้างมีความสำคัญ ซึ่งในการศึกษาก่อนหน้านี้ได้พบว่าเมื่อเลือกใช้งานช่องส่งสัญญาณจำนวน 5 ช่องสัญญาณได้แก่ ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 1 2 5 และ 6 นั้น จะทำให้ระบสื่อสารทางแสงมีค่า BER ที่ต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษา (23) พบว่าช่องส่งสัญญาณช่องที่ 2 นั้นก็อาจเกิดปัญหาการลดทอนของสัญญาณขึ้นได้ ดังนั้นในการทดลองจำลองระบบสื่อสารในส่วนนี้จะทำการใช้งานช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจำนวน 4 ช่องสัญญาณได้แก่ ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 1 5 และ 6 นั่นเอง โดยจะทำการจำลองส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดของบิตเรตเป็น 600 Mbps ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีจำนวนโหมด 100 โหมดและมีค่า $t_{d,dev}$ เป็น 2.50 ns จำนวน 10 แบบจำลอง โดยอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ SCM ที่มีจำนวนช่องส่งสัญญาณจำนวน 4 ช่องสัญญาณ ได้แก่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 1 5 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 ซึ่งที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 นั้นสัญญาณข้อมูลจะถูกส่งในรูปแบบของสัญญาณ 4-ASK ที่มีบิตเรตเป็น 300 Mbps และที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 1 5 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 นั้นข้อมูลในแต่ละช่องส่งสัญญาณจะถูกส่งในรูปแบบ OOK ด้วยบิตเรตที่มีขนาดเป็น 100 Mbps โดยจะสามารถแสดงค่า BER ที่ได้จากแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงทั้ง 10 แบบจำลองดังแสดงในภาพ 39



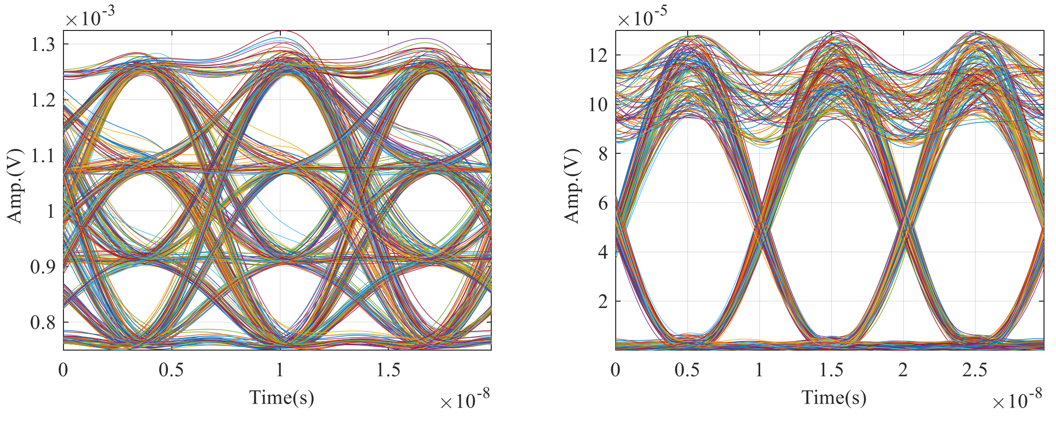
ภาพ 39 ค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีบิตเรตเป็น 600 Mbps ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 4 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง

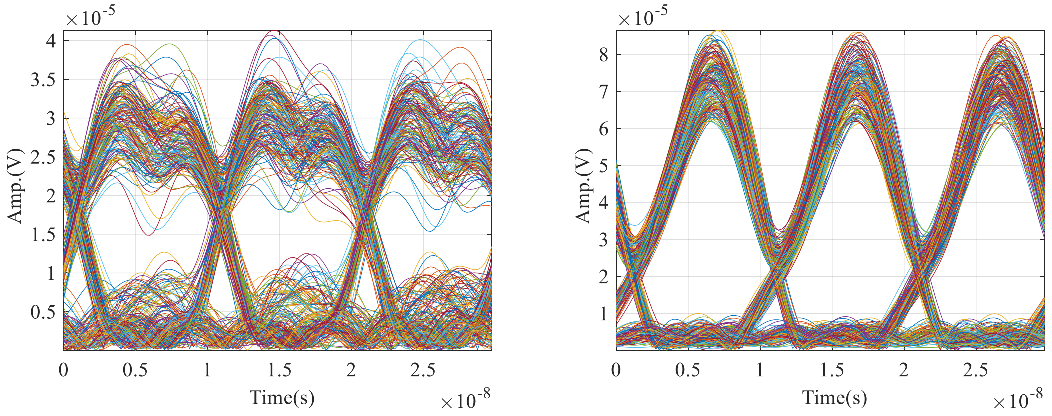
จากภาพ 39 เป็นการแสดงค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงที่ได้จากการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดของบิตเรตเป็น 600 Mbps ผ่านช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำจำนวน 4 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง จะพบว่าเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -14 dBm ค่า BER ที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงส่วนใหญ่จะมีค่าที่เกาะกลุ่มกันและต่ำกว่า 10^{-9} ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปใช้งานในระบบสื่อสารทางแสง แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าค่า BER ที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 5 และ 6 นั้นจะมีค่าที่ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะค่า BER ที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 จะมีค่า BER อยู่ระหว่างประมาณ 10^{-6} ถึง 10^{-8} ดังนั้นเพื่อที่จะศึกษาหาสาเหตุที่ทำให้ค่า BER ที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 มีค่าสูงนั้น จึงจะต้องทำการศึกษาผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 กับสัญญาณข้อมูลในทางความถี่ที่ถูกส่งผ่านไปยังเส้นใยแก้วนำแสงดังแสดงในภาพ 40



ภาพ 40 สัญญาณข้อมูลทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6

จากภาพ 40 เป็นการแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 6 กับสัญญาณข้อมูลในทางความถี่ จะพบว่าสัญญาณในทางความถี่สัญญาณย่อยที่ 3 ซึ่งถูกส่งที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 นั้น จะมีส่วนขององค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณย่อยที่เกิดการลดทอนของสัญญาณขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้สัญญาณข้อมูลเกิดการผิดเพี้ยนขึ้นและจะทำให้ที่ภาครับของระบบสื่อสารได้รับสัญญาณที่ผิดพลาดไปจากต้นทาง โดยจะสามารถแสดงแบบรูปตาของสัญญาณย่อยแต่ละสัญญาณที่ภาครับได้รับมาได้ดังภาพ 41





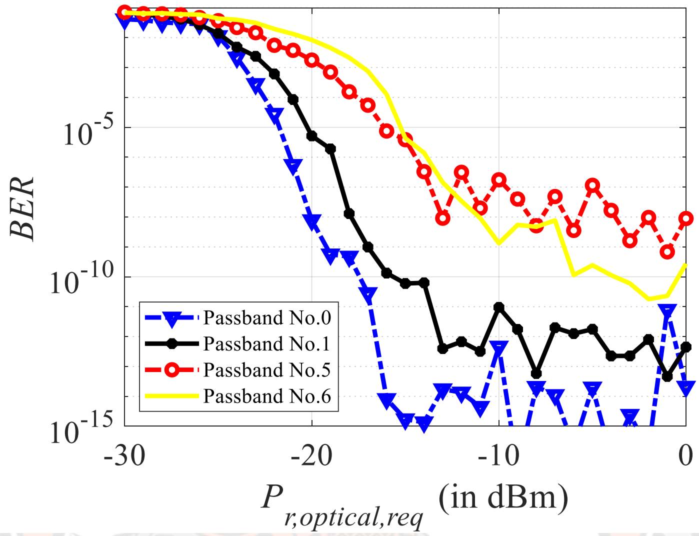
(ค) (ง)

ภาพ 41 แบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6

จากภาพ 41 เป็นการแสดงแบบรูปตาของสัญญาณย่อยที่ภาครับได้รับมา โดยรูปที่ 41(ก) เป็นการแสดงแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับสัญญาณย่อยสัญญาณที่ 1 ซึ่งถูกส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงโดยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 หรือ 3-dB Modal Band โดยในการส่งสัญญาณย่อยนี้จะส่งในรูปแบบของ 4-ASK ด้วยขนาดของบิตเรตเป็น 300 Mbps และมีขนาดแบนด์วิธเป็น 150 MHz จะพบว่าสามารถทำการแยกแยะขนาดของแอมพลิจูดของบิต 00 01 10 และ 11 ได้อย่างชัดเจน ดังนั้นค่า BER ที่ได้จากกรณีนี้จึงมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ พิจารณาภาพ 41(ข) 41(ค) และ 41(ง) ซึ่งเป็นการแสดงแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับสัญญาณย่อยสัญญาณที่ 2 3 และ 4 ซึ่งถูกส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงโดยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 1 5 และ 6 ตามลำดับ โดยในการส่งสัญญาณย่อยแต่ละสัญญาณดังกล่าวนี้จะส่งในรูปแบบของ OOK ด้วยขนาดของบิตเรตเป็น 100 Mbps และมีขนาดแบนด์วิธของแต่ละช่องสัญญาณเป็น 200 MHz จะพบว่าในภาพ 41(ข) และ 41(ง) ซึ่งเป็นแบบรูปตาของสัญญาณย่อยที่ 2 และ 4 ซึ่งถูกส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงด้วยช่องส่งสัญญาณที่ 1 และ 6 ตามลำดับนั้น จะสามารถทำการแยกแยะแอมพลิจูดของบิตข้อมูล 0 และบิตข้อมูล 1 ได้อย่างชัดเจน ส่งผลให้ค่า BER ที่ได้จากทั้ง 2 กรณีนี้มีค่าต่ำ และเมื่อพิจารณาภาพ 41(ค) ซึ่งเป็นแบบรูปตาของสัญญาณย่อยที่ 3 ซึ่งถูกส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงด้วยช่องส่งสัญญาณที่ 5 จะพบว่ามีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีส่วนขององค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณย่อยที่ 3 ไปตั้งอยู่ในบริเวณย่านความถี่ที่เกิดการลดทอนของสัญญาณของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงดังแสดงในภาพ 40 ซึ่งจะส่งผลโดยตรงให้ค่า BER ที่ได้จากในกรณีนี้มีค่าที่ค่อนข้างสูง

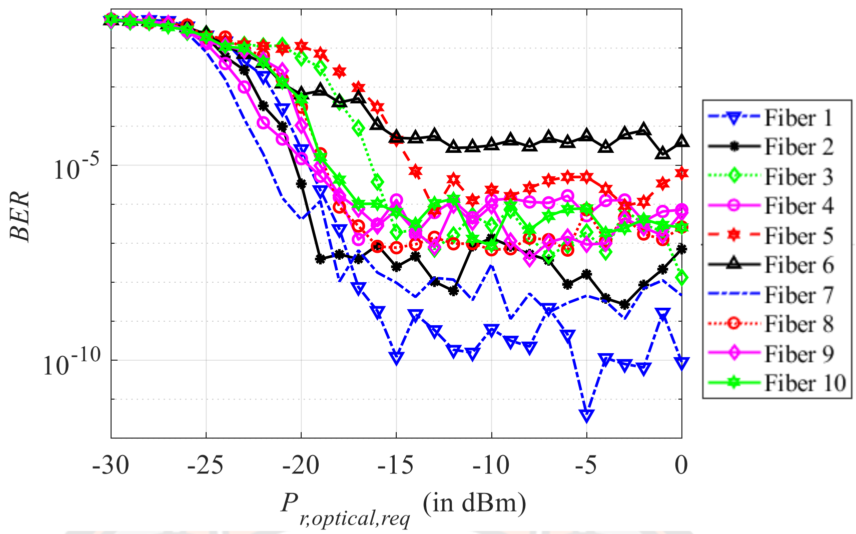
อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการยืนยันผลการลดทอนของช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 ดังนั้นในส่วนต่อไปนี้จึงจะทำการแสดงค่า BER เฉลี่ยของช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 1 5 และ 6 ที่ได้จากแบบจำลอง

ระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงที่แตกต่างกันทั้งหมด 10 แบบจำลองเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณดังแสดงในภาพ 42



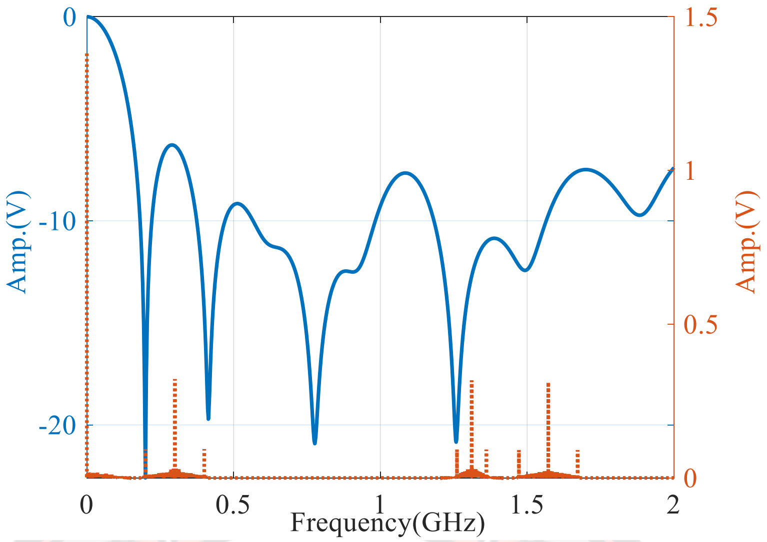
ภาพ 42 ค่า BER เฉลี่ยของช่องส่งสัญญาณแต่ละช่องจากการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีบิตเรตเป็น 600 Mbps ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 4 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง

จากภาพ 42 เป็นการแสดงค่า BER เฉลี่ยของช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 1 5 และ 6 จะพบว่า เมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm แล้วที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 1 นั้นจะมีค่า BER เฉลี่ยที่ต่ำกว่า 10^{-10} ซึ่งมีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งในการนำไปใช้งานในระบบสื่อสารทางแสง และในขณะเดียวกันที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 นั้นจะมีค่า BER เฉลี่ยที่สูงที่สุดซึ่งมีค่าประมาณ 10^{-6} ถึง 10^{-8} โดยผลการทดลองที่ได้นี้ก็จะมีความสอดคล้องกันกับผลการทดลองก่อนหน้าซึ่งได้แสดงแสดงให้เห็นแล้วด้วยแบบรูปตาดังแสดงในภาพ 41(ค) ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ค่า BER เฉลี่ยของระบบสื่อสารทางแสงนี้มีค่าที่ลดต่ำลงจึงจะต้องมีการปรับขนาดบิตเรตสัญญาณข้อมูลในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 โดยในส่วนต่อไปจึงจะทำการทดลองส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตเป็น 550 Mbps โดยที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 จะยังคงทำการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ 4-ASK ที่มีขนาดบิตเรตเป็น 300 Mbps ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 1 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 จะยังคงทำการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีขนาดบิตเรตเป็น 100 Mbps และที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 นั้นจะยังคงทำการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK แต่จะทำการลดขนาดของบิตเรตของสัญญาณข้อมูลลงเป็น 50 Mbps โดยค่า BER ที่ได้จากการจำลองระบบสื่อสารทางแสงทั้ง 10 แบบจำลองจะสามารถแสดงได้ดังภาพ 43



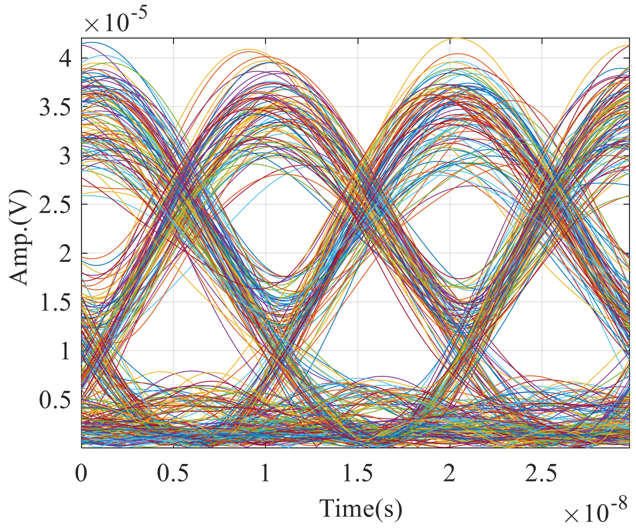
ภาพ 43 ค่า BER ของการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีบิตเรตเป็น 550 Mbps ผ่านช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำ 4 ช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง

จากภาพ 43 เป็นการแสดงค่า BER ที่ได้จากการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดของบิตเรตเป็น 550 Mbps ผ่านแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 เส้น จะพบว่าค่า BER ที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 นั้นจะให้ค่า BER ที่สูงที่สุดประมาณ 10^{-4} และค่า BER ที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นอื่น ๆ ส่วนใหญ่นั้นจะมีค่าที่กระจายเกาะกลุ่มกันอยู่ระหว่าง 10^{-5} ถึง 10^{-7} ซึ่งค่า BER ที่ได้จากกรณีนี้นั้นจะมีค่าที่ค่อนข้างไม่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารทางแสง และเมื่อทำการเปรียบเทียบภาพ 39 กับภาพ 43 จะพบว่าการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดของบิตเรตเป็น 600 Mbps ในภาพ 39 นั้น ค่า BER ที่ได้ส่วนใหญ่จะกระจายเกาะกลุ่มกันและมีค่า BER ที่ต่ำกว่าค่า BER ที่ได้จากการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดของบิตเรตเป็น 550 Mbps ในภาพ 43 อยู่พอสมควร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการพยายามเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารโดยการลดขนาดของบิตเรตของสัญญาณข้อมูลในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 ลงจาก 100 Mbps เป็น 50 Mbps นั้นไม่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารได้ อีกทั้งยังส่งผลให้ค่า BER ที่ได้ในกรณีนี้นั้นมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย ดังนั้นเพื่อที่จะศึกษาหาสาเหตุที่ทำให้การลดขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลไม่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารได้นั้น จึงจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงกับสัญญาณข้อมูลในทางความถี่ที่ถูกส่งผ่านไปยังเส้นใยแก้วนำแสง โดยจากภาพ 43 นั้นจะพบว่าค่า BER ที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 จะมีค่าที่สูงที่สุด ดังนั้นในส่วนต่อไปจึงจะทำการแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 กับสัญญาณข้อมูลในทางความถี่ที่ถูกส่งผ่านไปยังเส้นใยแก้วนำแสงดังแสดงในภาพ 44



ภาพ 44 สัญญาณข้อมูลทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6

จากภาพ 44 เป็นการแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 6 กับสัญญาณข้อมูลในทางความถี่ จะพบว่าเมื่อทำการลดขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 ลงจาก 100 Mbps เป็น 50 Mbps นั้นจะทำให้ขนาดแบนด์วิธของสัญญาณย่อยในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 ลดลงจาก 200 MHz เป็น 100 MHz ซึ่งจะพบว่าการลดลงของขนาดแบนด์วิธของสัญญาณย่อยในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 นั้นจะทำให้องค์ประกอบทางความถี่ทางด้านซ้ายของสัญญาณย่อยมีค่าความถี่ที่ตรงกับค่าความถี่ที่เกิดการลดทอนของสัญญาณของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลาย ซึ่งจะส่งผลให้สัญญาณย่อยในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 เกิดการผิดเพี้ยนขึ้นและจะทำให้ที่ภาครับของระบบสื่อสารได้รับสัญญาณที่ผิดพลาดไปจากภาคส่ง โดยจะสามารถแสดงแบบรูปตาของสัญญาณย่อยที่ภาครับในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 ได้ดังแสดงภาพ 45



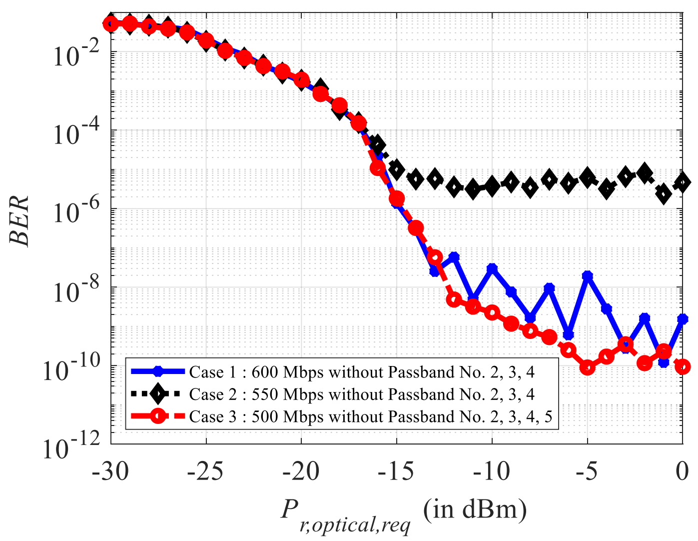
ภาพ 45 แบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6

จากภาพ 45 เป็นการแสดงแบบรูปตาของสัญญาณย่อยที่ภาครับในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 จะพบว่ามีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ขนาดแบนด์วิธของสัญญาณย่อยในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 มีขนาดที่เล็กลง ทำให้องค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณย่อยมีค่าความถี่ที่ตรงกันกับค่าความถี่ที่เกิดการลดทอนของสัญญาณของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด และเมื่อทำการเปรียบเทียบแบบรูปตาในภาพ 41(ค) ซึ่งเป็นแบบรูปตาของสัญญาณย่อยที่ภาครับในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 เมื่อมีการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีบิตเรตเป็น 100 Mbps และมีขนาดแบนด์วิธเป็น 200 MHz กับภาพ 45 ซึ่งเป็นแบบรูปตาของสัญญาณย่อยที่ภาครับในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 เมื่อมีการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีบิตเรตเป็น50 Mbps และมีขนาดแบนด์วิธเป็น 100 MHz จะพบว่าแบบรูปตาดังแสดงในภาพ 41(ค) นั้นจะเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณที่น้อยกว่าแบบรูปตาในภาพ 45 ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าการลดขนาดบิตเรตของการส่งสัญญาณไม่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารได้

พิจารณาภาพ 40 และภาพ 44 จะพบว่ายังมีช่องส่งสัญญาณที่สามารถใช้งานได้อยู่อีกหลายช่องสัญญาณ แต่อย่างไรก็ตามภาพ 40 และภาพ 44 นั้นเป็นการพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเพียงแค่ 1 แบบจำลอง ดังนั้นหากทำการเปลี่ยนแปลงเส้นใยแก้วนำแสงก็จะส่งผลให้ผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย และจากการศึกษาใน (23) ทำให้ทราบแล้วว่าช่องส่งสัญญาณช่องที่ 2 3 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 4 นั้นไม่เหมาะสมในการนำมาใช้งาน และจากผลการศึกษาข้างต้นก็ยังทำให้ทราบว่าการลดขนาดบิตเรตของการส่งสัญญาณข้อมูลในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 นั้นก็ไม่สามารถ

ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นการไม่ใช้งานช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 จึงอาจเป็นวิธีการในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารได้

ดังนั้นในส่วนต่อไปจึงจะทำการจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงที่แตกต่างกันจำนวน 10 เส้น เพื่อทำการเปรียบเทียบค่า BER เฉลี่ยจาก 3 กรณีที่แตกต่างกันนั่นคือ กรณีแรกเมื่อทำการทดลองส่งสัญญาณที่มีขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลเป็น 600 Mbps โดยอาศัยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 1 5 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 (แสดงด้วยเส้นทึบและเครื่องหมายดอกจัน) กรณีที่สองคือเมื่อทำการทดลองส่งสัญญาณที่มีขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลเป็น 550 Mbps โดยอาศัยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 1 5 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 (แสดงด้วยเส้นประและเครื่องหมายเพชร) และกรณีสุดท้ายคือการทดลองส่งสัญญาณที่มีขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลเป็น 500 Mbps โดยอาศัยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 1 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 (แสดงด้วยเส้นประและเครื่องหมายวงกลม) โดยจะสามารถแสดงค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงที่แตกต่างกัน 10 เส้นในทั้ง 3 กรณีได้ดังภาพ 46



ภาพ 46 ค่า BER เฉลี่ยของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง จากการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0

จากภาพ 6 เป็นการแสดงค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงที่แตกต่างกัน 10 เส้นใน 3 กรณีที่แตกต่างกัน พิจารณากรณีแรกซึ่งคือการส่งสัญญาณที่มีขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลเป็น 600 Mbps โดยอาศัยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 1 5 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 จะพบว่าเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -9 dBm ค่า BER เฉลี่ยที่ได้จะมีค่าที่ต่ำกว่า 10^{-7} ซึ่งค่า BER เฉลี่ยที่ได้นี้อาจจะยังไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานในระบบสื่อสารทางแสง

พิจารณากรณีที่สองคือการส่งสัญญาณที่มีขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลเป็น 550 Mbps โดยอาศัยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 1 5 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 จะพบว่าเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -9 dBm ค่า BER เฉลี่ยที่ได้จะมีค่าประมาณ 10^{-5} ซึ่งค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากกรณีนี้จะมีค่าที่ค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการลดขนาดบิตเรตของสัญญาณในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 ซึ่งทำให้ขนาดแบนด์วิธของสัญญาณย่อยในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 มีขนาดเล็กลง ซึ่งส่งผลให้องค์ประกอบของสัญญาณในทางความถี่มีค่าความถี่ตรงกันกับค่าความถี่ที่เกิดการลดทอนของสัญญาณ ทำให้สัญญาณย่อยที่ภาครับได้รับมานั้นเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงให้ค่า BER ที่ได้ในกรณีนี้นั้นมีค่าที่ค่อนข้างสูง

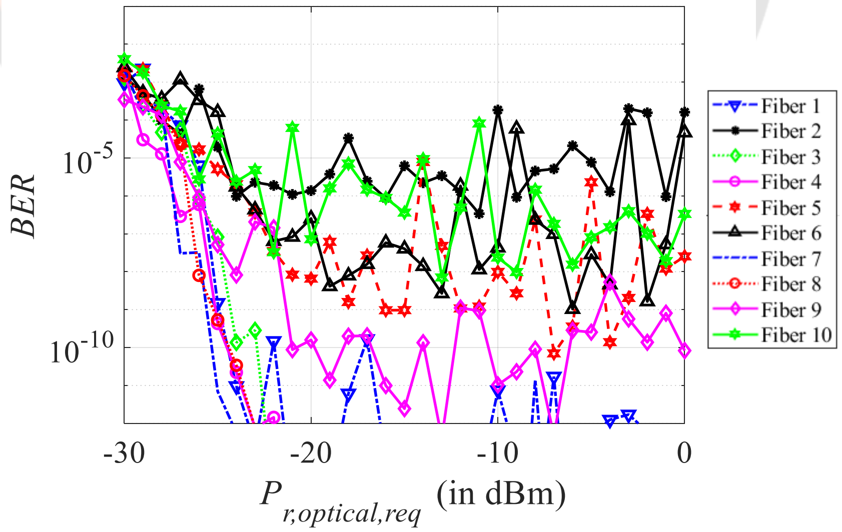
พิจารณากรณีที่สามคือการส่งสัญญาณที่มีขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลเป็น 500 Mbps โดยอาศัยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 1 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 โดยที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 จะทำการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตเป็น 300 Mbps และที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 1 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 นั้น จะทำการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตของแต่ละช่องสัญญาณเป็น 100 Mbps จะพบว่าค่า BER เฉลี่ยที่ได้ในกรณีที่สามนี้จะมีค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 2 กรณีก่อนหน้านี้ และเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -9 dBm ค่า BER เฉลี่ยที่ได้จะมีค่าที่ต่ำกว่า 10^{-9} ซึ่งค่า BER เฉลี่ยที่ได้ในกรณีนี้จะมีค่าที่ต่ำเพียงพอต่อการนำไปใช้งานในระบบสื่อสารทางแสง

จากผลการศึกษาข้างต้นทำให้ทราบว่าสามารถทำการประยุกต์ใช้งานการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 ได้ การลดขนาดบิตเรตของการส่งสัญญาณในช่องส่งสัญญาณแต่ละช่องนั้นไม่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารได้ และการไม่ใช้งานช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารในด้านของ BER ได้ แต่อย่างไรก็ตามผลการศึกษาที่ได้ข้างต้นนี้ไม่ได้มีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น ดังนั้นในส่วนต่อไปจึงจะทำการประยุกต์ใช้งานการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารทางแสง

การศึกษาแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ เมื่อมีการส่งญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 และมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น

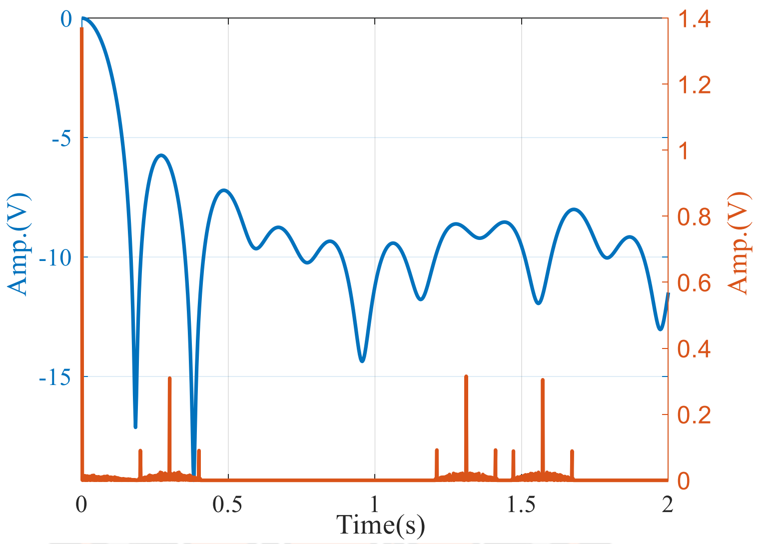
จากผลการศึกษาก่อนหน้านี้ทำให้ทราบว่าแล้วว่าสามารถทำการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 ได้ และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 อาจไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้ไขบิตผิดพลาดที่ภาครับนั้นยังไม่ได้ถูกนำไปพิจารณา ดังนั้นในการทดลองจำลองระบบสื่อสารต่อไปนี้จะทำการประยุกต์ใช้งานการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) (15, 11) และ (31, 26) โดยในการ

เข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นทั้ง 3 แบบนั้นจะอาศัยการเรียงลำดับบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบที่ 1 เพื่อให้ระบบสื่อสารทางแสงสามารถทำการส่งสัญญาณข้อมูลได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และในการทดลองส่วนนี้จะยังคงอาศัยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 5 ในการส่งสัญญาณ ทำให้จะมีจำนวนช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดจำนวน 4 ช่องสัญญาณคือ ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 1 5 6 ที่จะถูกใช้งานเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ ในการจำลองการส่งสัญญาณข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) นั้นสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตเป็น 400 Mbps จะถูกเปลี่ยนให้เป็นคำรหัสที่มีขนาดบิตเรตเป็น 700 Mbps โดยสัญญาณจะถูกส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่มีจำนวนโหมด 100 โหมด และมีค่า $t_{d,dev}$ เป็น 2.50 ns จำนวน 10 แบบจำลอง โดยอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ SCM ที่มีจำนวนช่องส่งสัญญาณจำนวน 4 ช่องสัญญาณ ได้แก่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 1 5 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 ซึ่งที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 นั้นสัญญาณจะถูกส่งในรูปแบบของสัญญาณ 4-ASK ที่มีบิตเรตเป็น 400 Mbps และที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 1 5 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 นั้น สัญญาณในแต่ละช่องส่งสัญญาณจะถูกส่งในรูปแบบ OOK ด้วยบิตเรตที่มีขนาดเป็น 100 Mbps โดยจะสามารถแสดงค่า BER ที่ได้จากแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงทั้ง 10 แบบจำลองดังแสดงในภาพ 47 ดังนี้



ภาพ 47 ค่า BER เฉลี่ยของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง จากการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 และมีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4)

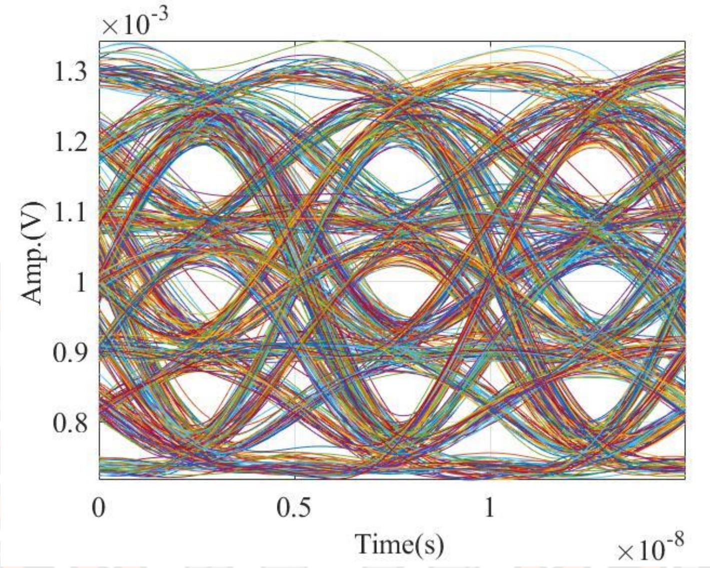
จากภาพ 47 เป็นการแสดงค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงที่ได้จากการส่งสัญญาณข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) โดยจะพบว่าเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm ค่า BER สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยที่กลุ่มแรกนั้นจะเป็นกลุ่มของค่า BER ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 10^{-9} ถึง 10^{-4} และกลุ่มที่ 2 นั้นจะเป็นกลุ่มของค่า BER ที่มีค่าต่ำกว่า 10^{-9} อย่างไรก็ตามจะพบว่าค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 นั้นจะมีค่าที่สูงที่สุดประมาณ 10^{-6} ซึ่งเป็นค่าที่สูงเกินกว่าที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางแสงได้ ดังนั้นเพื่อที่จะศึกษาหาสาเหตุที่ทำให้เส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 นั้นจะมีค่า BER ที่ค่อนข้างสูง จึงจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 กับสัญญาณข้อมูลในทางความถี่ที่ถูกส่งผ่านไปยังเส้นใยแก้วนำแสงดังแสดงในภาพ 48



ภาพ 48 สัญญาณข้อมูลทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2

จากภาพ 48 เป็นการแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2 กับสัญญาณข้อมูลในทางความถี่ จะพบว่าสัญญาณในทางความถี่สัญญาณย่อยที่ 1 ซึ่งถูกส่งที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 หรือกล่าวคือมีค่าความถี่มอดูเลชันเป็น 0 MHz นั้น จะมีส่วนขององค์ประกอบทางความถี่ทางด้านขวาของสัญญาณย่อยที่อยู่ตรงกับบริเวณที่เกิดการลดทอนของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2 นอกเหนือไปจากนั้นจะพบว่าสัญญาณในทางความถี่สัญญาณย่อยที่ 1 ซึ่งถูกส่งที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 หรือกล่าวคือมีค่าความถี่มอดูเลชันเป็น 0 MHz กับสัญญาณในทางความถี่สัญญาณย่อยที่ 2 ซึ่งถูกส่งที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 1 หรือกล่าวคือมีค่าความถี่มอดูเลชันเป็น 300 MHz นั้นเกิดการเกยกันของสัญญาณ (Intersymbol interference หรือ ISI) เนื่องจากสัญญาณย่อยที่ 1 ถูกส่งด้วยบิตเรตขนาด 400

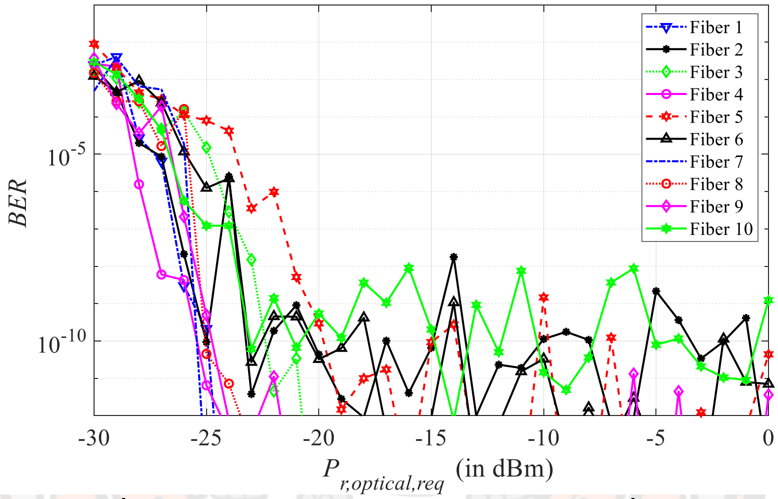
Mbps ทำให้ต้องอาศัยแบนด์วิธในการส่งสัญญาณขนาด 200 MHz และในขณะเดียวกันสัญญาณย่อยที่ 2 ถูกส่งด้วยบิตเรตขนาด 200 Mbps ทำให้ต้องอาศัยแบนด์วิธในการส่งสัญญาณขนาด 100 MHz ซึ่งจากการลดทอนของสัญญาณและการเกยกันของสัญญาณส่งผลให้แบบรูปตาของสัญญาณย่อยที่ 1 ซึ่งถูกส่งด้วยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 นั้นมีลักษณะดังภาพ 49



ภาพ 49 แบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 ของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2

จากภาพ 49 เป็นการแสดงแบบรูปตาของสัญญาณย่อยที่ภาครับในช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 จะพบว่ามีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการลดทอนของสัญญาณและการเกยกันของสัญญาณ ส่งผลให้ที่ภาครับได้รับสัญญาณที่เกิดการผิดเพี้ยนขึ้นไปจากภาคส่งเป็นผลให้ค่า BER ของระบบสื่อสารมีค่าที่ค่อนข้างสูงนั่นเอง เพื่อเป็นการลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการลดทอนของสัญญาณและการเกยกันของสัญญาณระหว่างสัญญาณในทางความถี่สัญญาณย่อยที่ 1 ซึ่งถูกส่งที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 กับสัญญาณในทางความถี่สัญญาณย่อยที่ 2 ซึ่งถูกส่งที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 1 นั้น ขนาดบิตเรตของสัญญาณที่จะถูกส่งด้วยช่องส่งสัญญาณแต่ละช่องนั้นจึงควรมีขนาดลดลง โดยในการทดลองส่วนนี้จะทำการลดขนาดบิตเรตของการส่งสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณลงด้วยการเปลี่ยนรูปแบบการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้น จากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) เป็นการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) นั่นเอง โดยนอกเหนือจากที่จะสามารถช่วยลดขนาดบิตเรตในแต่ละช่องสัญญาณลงได้แล้ว การเปลี่ยนรูปแบบการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นเป็นแบบ (15, 11) นั้นยังให้อัตรารหัสที่สูงกว่าการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) อีกด้วย ซึ่งเมื่อ

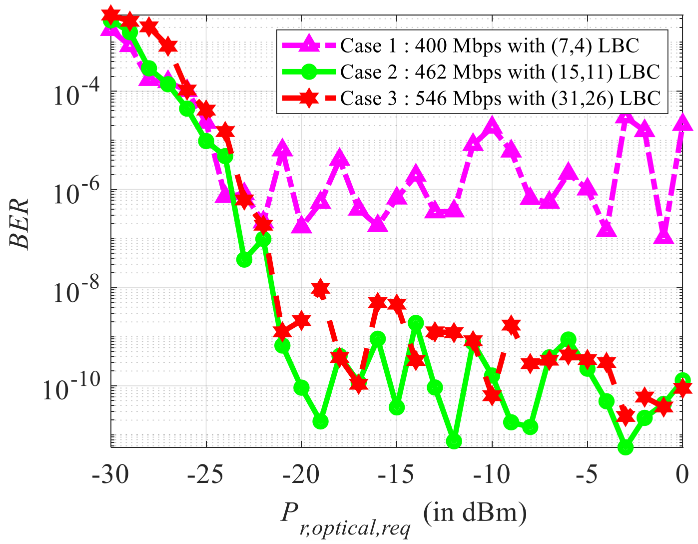
อาศัยการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นเป็นแบบ (15, 11) แล้วนั้นจะทำให้บิตเรตของการส่งสัญญาณลดลงเป็น 630 Mbps แต่กลับทำให้สัญญาณข้อมูลมีบิตเรตที่เพิ่มสูงขึ้นเป็น 462 Mbps โดยในการทดลองส่งสัญญาณครั้งนี้ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 นั้นสัญญาณจะถูกส่งในรูปแบบของสัญญาณ 4-ASK ที่มีบิตเรตลดลงเป็น 360 Mbps และที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 1 5 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 นั้น สัญญาณในแต่ละช่องส่งสัญญาณจะถูกส่งในรูปแบบ OOK ด้วยบิตเรตที่มีขนาดลดลงเป็น 90 Mbps โดยจะสามารถแสดงค่า BER ที่ได้จากแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงทั้ง 10 แบบจำลองดังแสดงในภาพ 50



ภาพ 50 ค่า BER เฉลี่ยของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง จากการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 และมีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11)

จากภาพ 50 เป็นการแสดงค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงที่ได้จากการส่งสัญญาณข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (15, 11) โดยจะพบว่าค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงที่ได้จากการอาศัยเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 2 เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้นมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm ค่า BER ที่ได้จากแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงทั้ง 10 แบบจำลองนั้นจะมีค่าที่ลดต่ำกว่า 10^{-8} ซึ่งค่า BER ที่ได้นี้เพียงพอที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบสื่อสารบางระบบได้ อย่างไรก็ตามขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่สามารถทำการส่งได้ด้วยการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นเป็นแบบ (15, 11) ดังภาพ 49 นั้นจะมีขนาดบิตเรตเป็น 462 Mbps ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการส่งสัญญาณดังภาพ 46 ในกรณีสุดท้าย (แสดงด้วยเส้นประและเครื่องหมายวงกลม) ซึ่งสามารถทำการส่งสัญญาณข้อมูลได้ถึง 500 Mbps และไม่ต้องอาศัยการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูล

ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในด้านขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลให้กับระบบสื่อสารทางแสงที่มีการประยุกต์ใช้การส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 และมีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นของสัญญาณข้อมูลให้กับระบบสื่อสารทางแสง การเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (31, 26) ซึ่งมีอัตรารหัสสูงที่สุดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงต้องถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำทั้ง 4 ช่องสัญญาณ โดยที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 นั้นจะถูกส่งสัญญาณด้วยสัญญาณ 4-ASK ที่มีบิตเรตเพิ่มขึ้นเป็น 372 Mbps และที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 1 5 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 นั้น สัญญาณในแต่ละช่องส่งสัญญาณจะถูกส่งในรูปแบบ OOK ด้วยบิตเรตที่มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 93 Mbps ทำให้สัญญาณที่ถูกส่งด้วยระบบสื่อสารทางแสงนี้มีบิตเรตที่เพิ่มขึ้นเป็น 651 Mbps และยังส่งผลให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลได้เพิ่มสูงขึ้นเป็น 546 Mbps โดยค่า BER เฉลี่ยของการจำลองระบบสื่อสารทางแสงทั้ง 10 แบบจำลองดังกล่าวนี้ และค่า BER เฉลี่ยของการจำลองระบบสื่อสารดังภาพ 47 และภาพ 49 จะสามารถแสดงได้ดังภาพ 51



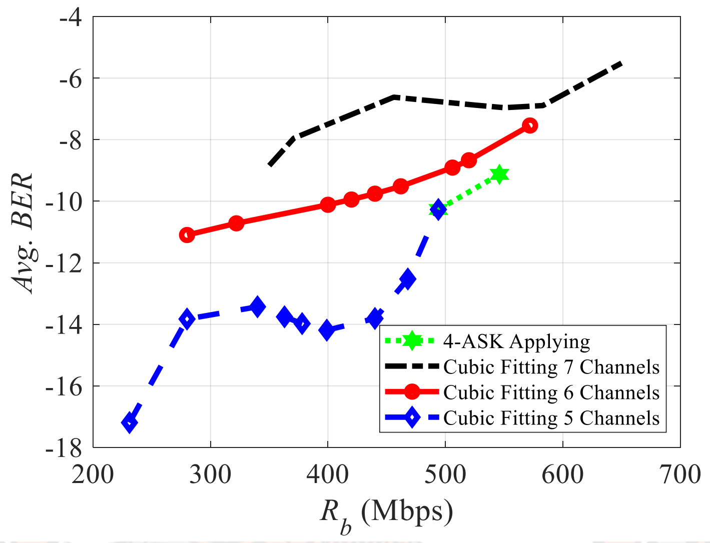
ภาพ 51 ค่า BER เฉลี่ยของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดที่แตกต่างกัน 10 แบบจำลอง จากการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 และมีการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้น

จากภาพ 51 เป็นการแสดงค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากการจำลองระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงที่แตกต่างกันจำนวน 10 เส้น เพื่อทำการเปรียบเทียบค่า BER เฉลี่ยจาก 3 กรณีที่แตกต่างกันนั่นคือ กรณีแรกเมื่อทำการทดลองส่งสัญญาณที่มีขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลเป็น 400 Mbps และอาศัยการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบ (7, 4) โดยอาศัยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 1 5 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 (แสดงด้วยเส้นประและเครื่องหมายสามเหลี่ยม) กรณีที่สองคือเมื่อทำการทดลองส่ง

สัญญาณที่มีขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลเป็น 462 Mbps และอาศัยการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบ (15, 11) (แสดงด้วยเส้นทึบและเครื่องหมายวงกลม) และกรณีสุดท้ายคือการทดลองส่งสัญญาณที่มีขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลเป็น 546 Mbps และอาศัยการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบ (31, 26) (แสดงด้วยเส้นประและเครื่องหมายดอกจัน) ซึ่งทั้ง 3 กรณีนี้จะอาศัยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 1 5 และช่องส่งสัญญาณช่องที่ 6 จะพบว่าค่า BER เฉลี่ยที่ได้จากทั้ง 3 กรณีนั้นจะเกิด Error floor ขึ้นเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -20 dBm ซึ่งสำหรับในกรณีแรกนั้นค่า BER ที่ได้จากแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงทั้ง 10 แบบจำลองจะมีค่ากระจายอยู่ในช่วง 10^{-7} ถึง 10^{-5} เมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm ซึ่งค่า BER ที่ได้ในกรณีแรกนี้นั้นจะเป็นค่า BER ที่ค่อนข้างสูงไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารทางแสงได้ ซึ่งสาเหตุที่กรณีแรกนี้มีค่า BER เฉลี่ยที่ค่อนข้างสูงเป็นผลมาจากการลดทอนของสัญญาณและการเกยกันของสัญญาณระหว่างสัญญาณย่อยที่ 1 ที่ถูกส่งโดยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 กับสัญญาณย่อยที่ 2 ที่ถูกส่งโดยช่องส่งสัญญาณช่องที่ 1 นั่นเอง เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับการทดลองส่งสัญญาณในกรณีแรกนั้นการส่งสัญญาณที่อาศัยการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบ (15, 11) ดังในกรณีที่ 2 จึงได้ถูกนำมาพิจารณา ซึ่งจะพบว่าเมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm ค่า BER ที่ได้จากแบบจำลองระบบสื่อสารทางแสงทั้ง 10 แบบจำลองนั้นจะมีค่าต่ำกว่า 10^{-8} ซึ่งค่า BER เฉลี่ยที่ได้ในกรณีที่ 2 นี้จะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกรณีแรก แต่อย่างไรก็ตามขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่ได้จากกรณีที่ 2 นี้นั้นอาจยังมีค่าที่ไม่สูงเพียงพอ ดังนั้นการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบ (31, 26) ซึ่งมีอัตรารหัสที่สูงกว่าการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลก่อนหน้านี้จึงได้ถูกนำมาพิจารณาดังแสดงในกรณีที่ 3 ซึ่งจะทำให้ขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลเพิ่มสูงขึ้นเป็น 546 Mbps โดยที่จะมีค่า BER ของระบบสื่อสารที่ต่ำกว่า 10^{-8} เมื่อ $P_{r,optical,req}$ มีค่าสูงกว่า -15 dBm และค่า BER ของระบบสื่อสารในกรณีที่ 3 นี้นั้นจะมีค่า BER ที่ต่ำกว่า 10^{-9} เมื่อพิจารณาที่ $P_{r,optical,req}$ ที่มีค่าสูงกว่า -9 dBm ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารทางแสง นอกเหนือไปจากนี้จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่า BER ที่ 10^{-8} ระบบการสื่อสารทางแสงในกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 จากภาพ 51 นั้นจะให้ Coding gain ถึงประมาณ 6 dB เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารทางแสงในกรณีที่ 3 จากภาพ 46 ที่เป็นการแสดงระบบการสื่อสารทางแสงที่ไม่มีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากภาพ 51 ซึ่งเป็นผลการทดลองที่ได้จากระบบสื่อสารที่มีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นและอาศัยการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 และ อาศัยการส่งสัญญาณแบบ OOK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 1 5 และ 6 กับภาพ 38 ซึ่งเป็นการแสดงค่าการประมาณประสิทธิภาพของระบบสื่อสารทางแสงในด้านของค่า BER ของระบบสื่อสารต่อขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่จะสามารถทำการส่งจากภาคส่งไปยังภาครับได้จากการใช้งานระบบสื่อสารที่มีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นและอาศัยการส่งสัญญาณแบบ

OOK ผ่านจำนวนช่องส่งสัญญาณที่แตกต่างกันแล้ว จะสามารถทำการแสดงภาพการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบสื่อสารทางแสงทั้ง 2 ระบบได้ดังภาพ 52



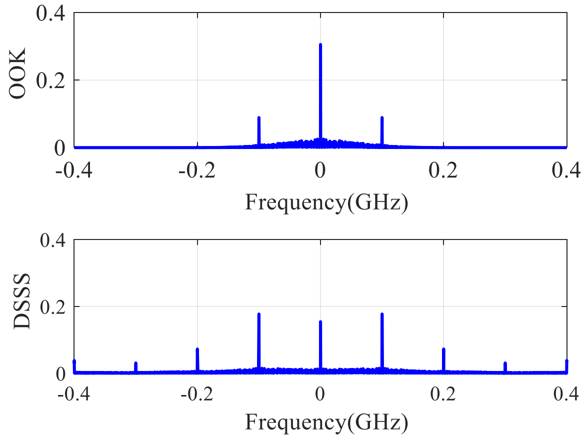
ภาพ 52 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบสื่อสารทางแสง

จากภาพ 52 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบสื่อสารทางแสงที่แตกต่างกัน โดยเมื่อทำพิจารณาระบบสื่อสารที่ได้จากภาพ 38 กล่าวคือ ระบบสื่อสารที่มีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นและอาศัยการส่งสัญญาณแบบ OOK ผ่านจำนวนช่องส่งสัญญาณที่แตกต่างกันเป็นจำนวน 7 6 และ 5 ช่องสัญญาณ ดังแสดงโดย เส้นประสีดำ เส้นสีแดง-วงกลม และเส้นประสีน้ำเงิน-ข้าวหลามตัด ตามลำดับ จะพบว่าในระบบการสื่อสารทางแสงที่ต้องการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตสูงกว่า 490 Mbps และมีค่า BER ที่ต่ำกว่า 10^{-9} นั้น จะไม่สามารถทำการใช้งานระบบการสื่อสารทางแสงที่มีการใช้งานช่องส่งสัญญาณจำนวน 7 และ 6 ช่องสัญญาณได้ จะมีเพียงแต่ระบบการสื่อสารทางแสงที่มีการใช้งานช่องส่งสัญญาณจำนวน 5 ช่องสัญญาณที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในเงื่อนไขนี้ได้ โดยจะสามารถส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตเป็น 494 Mbps อย่างไรก็ตามเมื่อทำการพิจารณาระบบสื่อสารที่มีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นและอาศัยการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 และอาศัยการส่งสัญญาณแบบ OOK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 1 5 และ 6 ดังแสดงโดยเส้นประสีเขียว-สัญลักษณ์ดาว จะพบว่าขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่จะสามารถทำการส่งจากภาคส่งไปยังภาครับได้นั้นจะมีค่าที่สูงถึง 546 Mbps และยังคงมีค่า BER ที่ต่ำกว่า 10^{-9} ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในการสื่อสารทางแสง และขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่ได้นี้จะยังมีค่ามากกว่าขนาดบิตเรตของการส่งสัญญาณผ่าน 3-dB Modal Bandwidth อยู่ถึงประมาณ 2.73 เท่าอีกด้วย

จากผลการศึกษาข้างต้นทั้งในหัวข้อของการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นในรูปแบบต่าง ๆ และการประยุกต์ใช้งานการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 จะพบว่าปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้นคือ การลดทอนสัญญาณของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ซึ่งผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั้นจะมีลักษณะเป็นแบบ Frequency Selective ดังนั้นการศึกษาการส่งสัญญาณแบบ DSSS จึงได้ถูกนำมาพิจารณาเพื่อเป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานช่องส่งสัญญาณที่มีลักษณะเป็นแบบ Frequency Selective โดยอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS

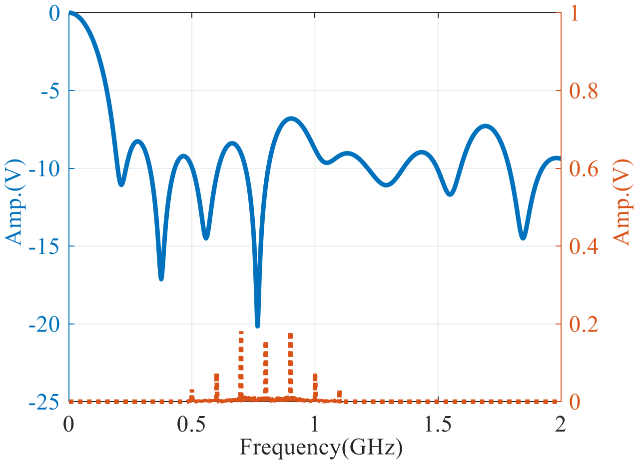
การศึกษาประสิทธิภาพของการส่งญาณแบบ Direct Sequence Spread Spectrum ผ่านผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำ

จากผลการศึกษาข้างต้นทำให้ทราบว่าช่องส่งสัญญาณช่องที่ 2 3 และช่องส่งสัญญาณช่อง 4 ของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz นั้น มีการลดทอนของสัญญาณที่ค่อนข้างมาก จึงอาจไม่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบการสื่อสารทางแสงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั้นจะมีลักษณะเป็นแบบ Frequency Selective และจากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ทำให้ทราบว่าเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้นเป็นเทคนิคในการส่งสัญญาณรูปแบบหนึ่งที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบการสื่อสารที่มีช่องส่งสัญญาณเป็นแบบ Frequency Selective ได้ ดังนั้นในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณแบบ DSSS ผ่านช่องส่งสัญญาณช่องที่ 2 3 และช่องส่งสัญญาณช่อง 4 ของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 GHz ที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้งานเนื่องจากปัญหาการลดทอนของสัญญาณ ซึ่งส่งผลโดยตรงให้แบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับจากช่องส่งสัญญาณดังกล่าวเกิดการผิดเพี้ยนและยากต่อการตีความบิตข้อมูล 0 และบิตข้อมูล 1 ดังที่ได้แสดงไว้แล้วในส่วนก่อนหน้านี้ ซึ่งในการศึกษาประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณแบบ DSSS ผ่านช่องส่งสัญญาณช่องที่ 2 3 และช่องส่งสัญญาณช่อง 4 ของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั้น จะสามารถทำได้โดยการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลเป็น 100 Mbps และอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 โดยการส่งสัญญาณแบบ OOK และการส่งสัญญาณโดยอาศัยเทคนิค DSSS สามารถแสดงได้ดังภาพ 53



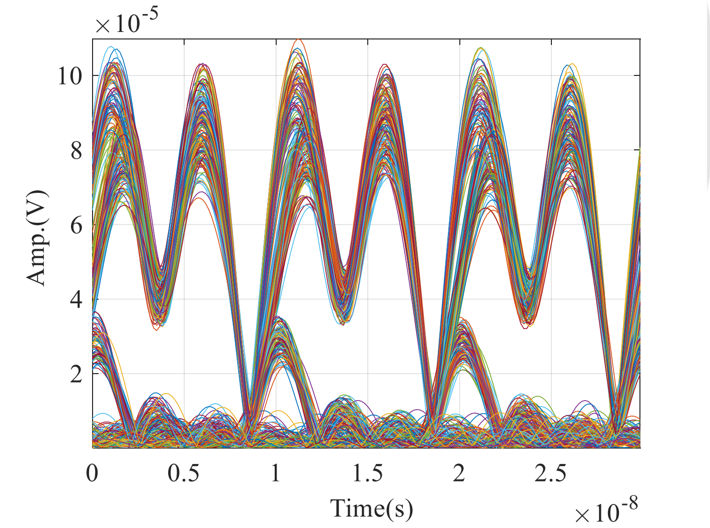
ภาพ 53 สัญญาณ OOK กับสัญญาณ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 ในทางความถี่

จากภาพ 53 เป็นการแสดงการส่งสัญญาณ OOK และสัญญาณ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 ในทางความถี่ ซึ่งจะพบว่าจากการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีบิตเรตเป็น 100 Mbps นั้น หลังจากที่ได้ทำการประยุกต์ใช้งานเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS แล้วจะทำให้ขนาดแบนด์วิธของการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้นกว้างขึ้นเป็น 600 MHz และมีขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณที่ลดต่ำลงกว่าการส่งสัญญาณแบบ OOK เมื่อสามารถสร้างสัญญาณแบบ DSSS ได้แล้ว ในส่วนต่อไปจะเป็นการส่งสัญญาณ DSSS ผ่านเส้นใยแก้วนำแสง เนื่องมาจากช่องส่งสัญญาณช่องที่ 2 3 และช่องส่งสัญญาณช่อง 4 นั้นจะมีค่า $f_{Peak,Avg}$ เป็น 528 798 และ 1,050 MHz ตามลำดับ ดังนั้นสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 จึงจะถูกส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดด้วยค่า $f_{Peak,Avg}$ ที่มีค่าความถี่เป็น 800 MHz โดยสัญญาณแบบ DSSS ทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 นั้น จะสามารถแสดงได้ดังภาพ 54



ภาพ 54 สัญญาณ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 ในทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1

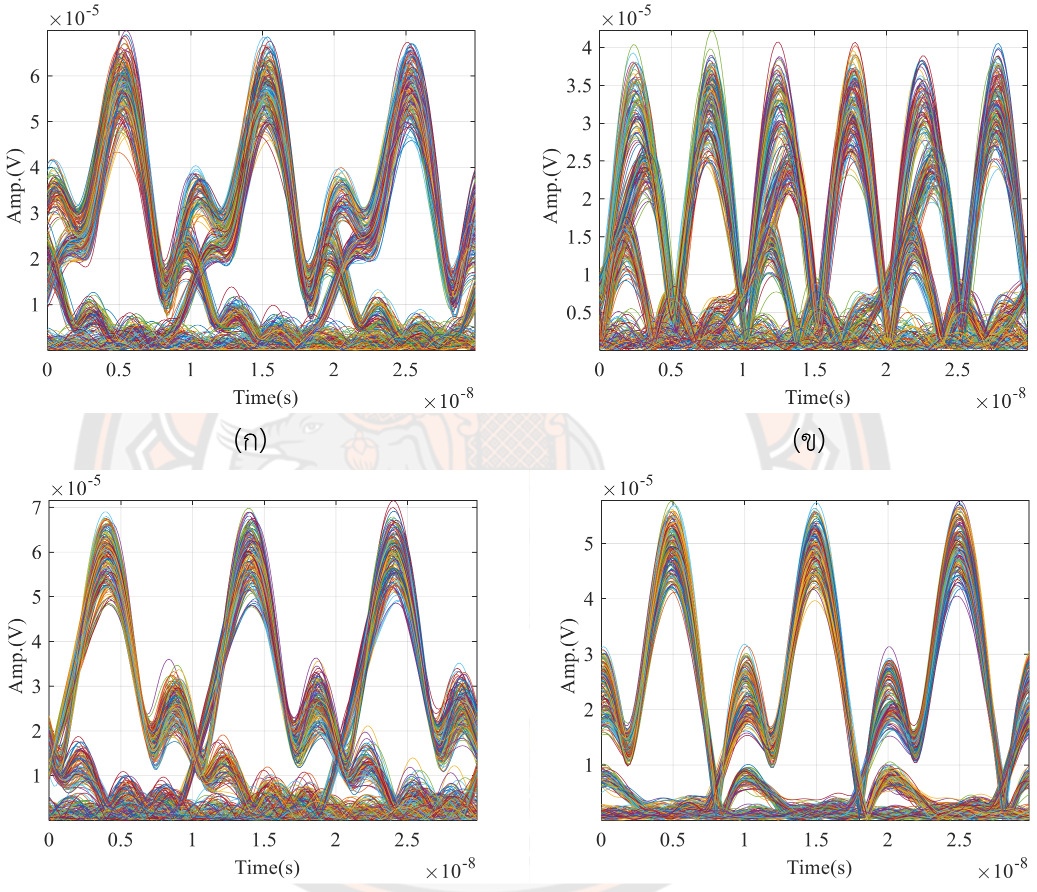
จากภาพ 54 เป็นการแสดงการส่งสัญญาณ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 ในทางความถี่ผ่านผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 ซึ่งจะพบว่าจากการที่ได้ทำการประยุกต์ใช้งานเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS ทำให้ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณ DSSS มีขนาดที่ลดต่ำลง และมีการกระจายองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณออกไป โดยที่จะมีขนาดแบนด์วิธของการส่งสัญญาณกว้างขึ้นเป็น 600 MHz ซึ่งจากทั้ง 2 ปัจจัยดังกล่าวนี้น่าจะส่งเสริมให้สามารถทำให้การประยุกต์ใช้งานเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS กับระบบการสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณได้ แต่จะพบว่าองค์ประกอบความถี่หลักของสัญญาณแบบ DSSS นั้นอยู่ตรงบริเวณที่เกิดการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ซึ่งอาจจะส่งผลให้สัญญาณข้อมูลเกิดความเสียหายได้ และอาจเป็นปัจจัยที่นำไปสู่การตีความบิตผิดพลาดที่ภาครับ ดังนั้นในส่วนต่อไปจึงจะทำการแสดงแบบรูปตาของสัญญาณ DSSS จากภาพ 54 โดยจะสามารถแสดงแบบรูปตาของสัญญาณที่ภาครับได้ดังภาพ 55



ภาพ 55 แบบรูปตาของสัญญาณ DSSS ที่ภาครับ จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1

จากภาพ 55 เป็นการแสดงแบบรูปตาของสัญญาณ DSSS ที่ภาครับ จะพบว่าแบบรูปตาที่ได้นั้นจะมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปจากการส่งสัญญาณที่ภาคส่งแบบ OOK ค่อนข้างมาก ซึ่งทำให้การวัดประสิทธิภาพของแบบรูปตานั้นเป็นไปได้ค่อนข้างยาก โดยการวัดประสิทธิภาพของแบบรูปตานั้นสามารถดูเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ข ดังนั้นการประยุกต์ใช้งาน DSSS เมื่อมี Code length เป็น 3 ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 2 3 และช่องส่งสัญญาณช่อง 4 ของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั้นจะมีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างต่ำหรือกล่าวได้ว่าการประยุกต์ใช้งาน DSSS

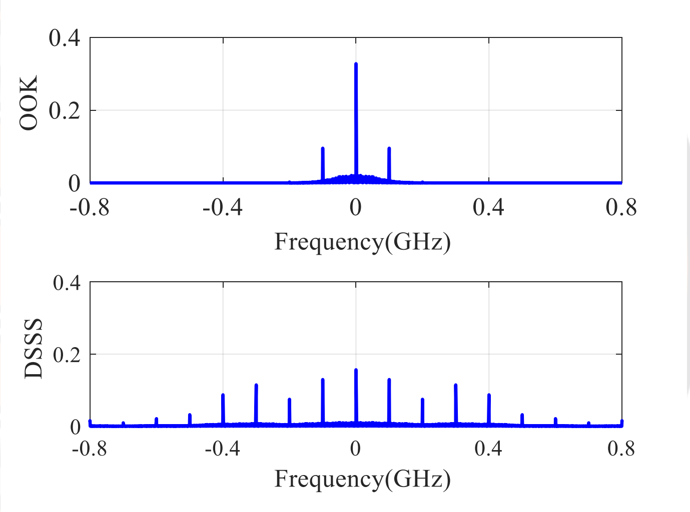
ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 2 3 และช่องส่งสัญญาณช่อง 4 ของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั้นจะทำให้ระบบการสื่อสารทางแสงมีค่า BER ที่ค่อนข้างสูงนั่นเอง อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้นี้ก็เป็นผลการทดลองที่มาจากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1 เพียงเส้นเดียว ดังนั้นในส่วนต่อไปจะทำการแสดงตัวอย่างแบบรูปตาของสัญญาณ DSSS ที่ภาครับที่มาจากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 3 6 8 และ 10 ดังภาพ 56



ภาพ 56 แบบรูปตาของสัญญาณ DSSS เมื่อมี Code length เป็น 3 ที่ภาครับ

จากภาพ 56 เป็นการแสดงแบบรูปตาของสัญญาณ DSSS ที่ภาครับ โดยที่แบบรูปตาของสัญญาณ DSSS ที่ภาครับที่มาจากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 3 6 8 และ 10 จะถูกแสดงด้วยภาพ 56(ก) 56(ข) 56(ค) และ 56(ง) ตามลำดับ จะพบว่าแบบรูปตาที่ได้มาจากสัญญาณ DSSS ที่ภาครับของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 3 และเส้นที่ 10 ซึ่งถูกแสดงด้วยภาพ 56(ก) และ 56(ง) ตามลำดับนั้น จะสามารถทำการแยกแยะบิตข้อมูล 0 และบิตข้อมูล 1 ได้อย่างชัดเจน แต่สำหรับแบบรูปตาที่ได้มาจากสัญญาณ DSSS ที่ภาครับของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 และเส้นที่ 8 ซึ่งถูกแสดงด้วยภาพ 56(ข) และ

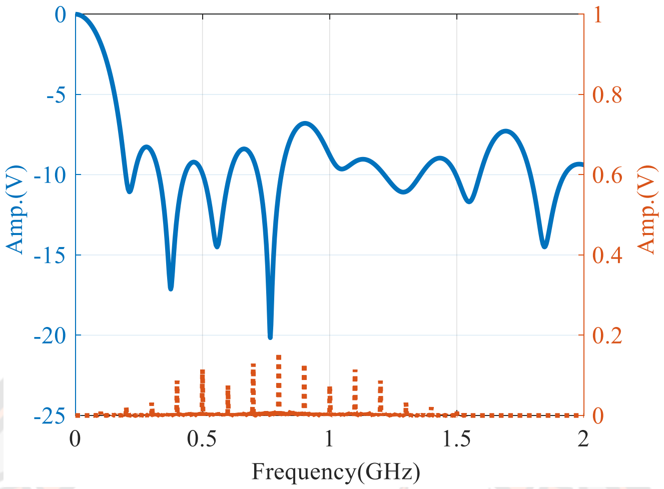
56(ค) ตามลำดับนั้น จะไม่สามารถทำการวัดประสิทธิภาพได้อย่างชัดเจนซึ่งจะส่งผลให้ค่า BER ที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 6 และเส้นที่ 8 มีค่าที่ค่อนข้างสูงดังเช่นเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1 ในภาพ 54 โดยการวัดประสิทธิภาพของแบบรูปตาจากเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 10 เส้นจะถูกแสดงเพิ่มเติมที่ภาคผนวก ข จากผลการศึกษาที่ได้ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้งานเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 นั้นอาจไม่มีความเหมาะสมกับระบบการสื่อสารทางแสงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการศึกษาให้เกิดชัดเจนในส่วนต่อไปจะเป็นการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลเป็น 100 Mbps และอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 7 โดยการส่งสัญญาณแบบ OOK และการส่งสัญญาณโดยอาศัยเทคนิค DSSS สามารถแสดงได้ดังภาพ 57



ภาพ 57 สัญญาณ OOK กับสัญญาณ DSSS ที่มี Code length เป็น 7 ในทางความถี่

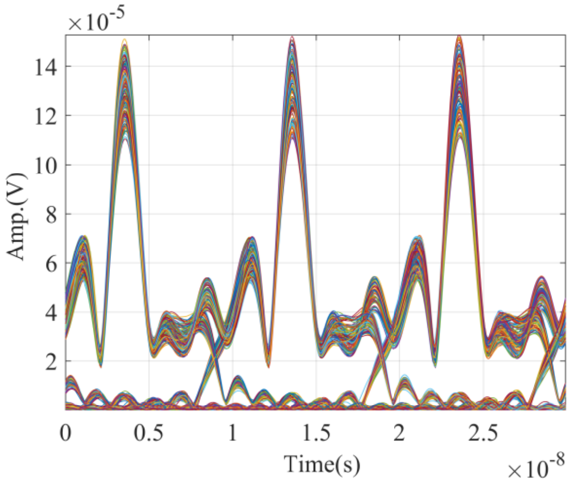
จากภาพ 57 เป็นการแสดงการส่งสัญญาณ OOK และสัญญาณ DSSS ที่มี Code length เป็น 7 ในทางความถี่ ซึ่งจะพบว่าจากการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ OOK ที่มีบิตเรตเป็น 100 Mbps นั้นหลังจากที่ได้ทำการประยุกต์ใช้งานเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS แล้วจะทำให้ขนาดแบนด์วิธของการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้นกว้างขึ้นเป็น 1,400 MHz และมีขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณที่ลดต่ำลงกว่าการส่งสัญญาณแบบ OOK และเมื่อทำการเปรียบเทียบสัญญาณ DSSS จากภาพ 53 กับสัญญาณ DSSS จากภาพ 57 จะพบว่าสัญญาณ DSSS ในทางความถี่จากภาพ 57 นั้นจะมีขนาดแบนด์วิธที่ถูกใช้งานในการส่งสัญญาณที่กว้างกว่าและขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณ DSSS ในทางความถี่จากภาพ 57 ก็จะมีขนาดที่เล็กกว่าขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณ DSSS ในทางความถี่จากภาพ 53 อีกด้วย ในส่วนต่อไปจะทำการส่งสัญญาณ DSSS ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด

ด้วยค่า $f_{Peak,Avg}$ ที่มีค่าความถี่เป็น 800 MHz โดยสัญญาณแบบ DSSS ทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 นั้น จะสามารถแสดงได้ดังภาพ 58



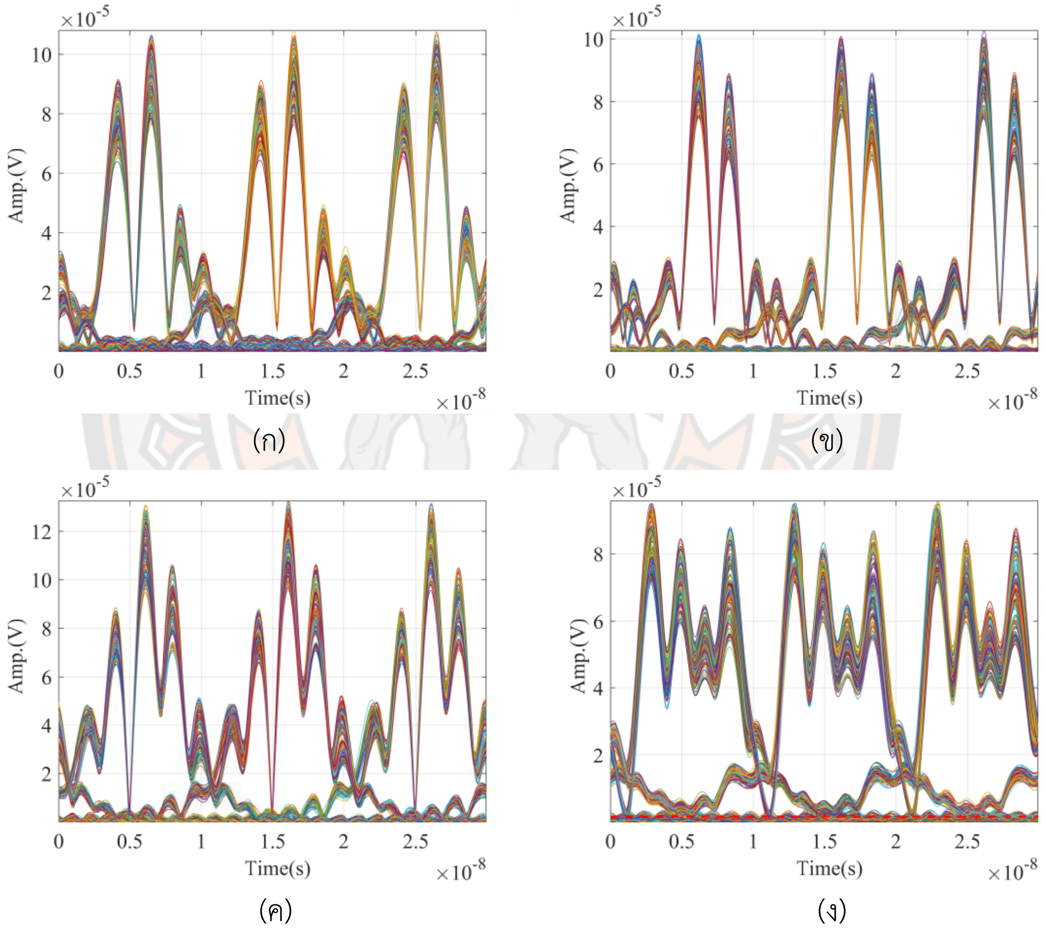
ภาพ 58 สัญญาณ DSSS ที่มี Code length เป็น 7 ในทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1

จากภาพ 58 เป็นการแสดงการส่งสัญญาณ DSSS ที่มี Code length เป็น 7 ในทางความถี่ผ่านผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 ซึ่งจะพบว่าองค์ประกอบความถี่หลักของสัญญาณแบบ DSSS นั้นจะอยู่ตรงบริเวณที่เกิดการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ซึ่งอาจจะส่งผลให้สัญญาณข้อมูลเกิดความเสียหายได้เช่นเดียวกันกับในภาพ 54 ดังนั้นในส่วนต่อไปจึงจะทำการแสดงแบบรูปตาของสัญญาณ DSSS ที่ภาครับได้ดังภาพ 59



ภาพ 59 แบบรูปตาของสัญญาณ DSSS เมื่อมี Code length เป็น 7 จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1

จากภาพ 59 เป็นการแสดงแบบรูปตาของสัญญาณ DSSS เมื่อมี Code length เป็น 7 ที่ภาครับ จะพบว่าแบบรูปตาที่ได้นั้นเกิดความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณที่ภาคส่งค่อนข้างมาก ดังนั้นการประยุกต์ใช้งาน DSSS เมื่อมี Code length เป็น 7 ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 2 3 และช่องส่งสัญญาณช่อง 4 ของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั้นจะทำให้ระบบการสื่อสารทางแสงมีค่า BER ที่ค่อนข้างสูง และเพื่อให้ผลการศึกษามีความชัดเจนยิ่งขึ้นในส่วนต่อไปจะทำการแสดงตัวอย่างแบบรูปตาของสัญญาณ DSSS เมื่อมี Code length เป็น 7 ที่ภาครับที่มาจากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 3 6 8 และ 10 ดังภาพ 60



ภาพ 60 แบบรูปตาของสัญญาณ DSSS เมื่อมี Code length เป็น 7 ที่ภาครับ

จากภาพ 60 เป็นการแสดงแบบรูปตาของสัญญาณ DSSS เมื่อมี Code length เป็น 7 ที่ภาครับ โดยที่แบบรูปตาของสัญญาณ DSSS ที่ภาครับที่มาจากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 3 6 8 และ 10 จะถูกแสดงด้วยภาพ 60(ก) 60(ข) 60(ค) และ 60(ง) ตามลำดับ จะพบว่ามีแบบรูปตาที่ได้มาจากสัญญาณ DSSS ที่ภาครับของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 10 ซึ่งถูกแสดงด้วยภาพ 60(ง) เพียงภาพเดียวที่

พอจะสามารถทำการแยกแยะบิตข้อมูล 0 และบิตข้อมูล 1 ได้ แต่สำหรับแบบรูปตาที่ได้มาจากสัญญาณ DSSS ที่ภาครับของเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 3 6 และเส้นที่ 8 ซึ่งถูกแสดงด้วยภาพ 60(ก) 60(ข) และ 60(ค) ตามลำดับนั้น จะไม่สามารถทำการวัดประสิทธิภาพได้อย่างชัดเจนซึ่งจะส่งผลให้ค่า BER ที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 3 6 และเส้นที่ 8 นั้นมีค่าที่ค่อนข้างสูงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน จากผลการศึกษาที่ได้ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้งานเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 7 นั้นก็อาจไม่เหมาะสมกับระบบการสื่อสารทางแสงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วยเช่นกัน

บทที่ 5

บทสรุป

จากการจำลองระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ จะพบว่าสามารถใช้งานช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำเป็นช่องส่งสัญญาณได้ แต่เนื่องจากภายในช่องส่งสัญญาณบางช่องนั้นได้เกิดการลดทอนของสัญญาณขึ้น การเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นจึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งจากผลการจำลองระบบสื่อสารทางแสง จะพบว่าประสิทธิภาพของระบบสื่อสารที่มีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นนั้นดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับการส่งสัญญาณข้อมูลที่ไม่มีการเข้ารหัสสัญญาณ แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ค่า BER ที่มีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานทางแสง ช่องส่งสัญญาณบางช่องนั้นจึงอาจต้องถูกละเว้นไม่นำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจะส่งผลโดยตรงให้ขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่จะสามารถทำการส่งจากภาคส่งไปยังภาครับได้นั้นมีขนาดที่ลดต่ำลง ดังนั้นในการใช้งานระบบสื่อสารที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ จึงจะต้องมีการเลือกใช้งานจำนวนช่องส่งสัญญาณให้เหมาะสม เพื่อที่จะทำให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตได้สูงที่สุดและได้ค่า BER ที่เหมาะสมกับระบบสื่อสารที่ต้องการนำไปใช้งานนั่นเอง โดยในการเลือกใช้งานระบบการสื่อสารทางแสงให้มีความเหมาะสมนั้นอาจดูได้จากการประมาณประสิทธิภาพระบบสื่อสารทางแสงที่มีผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดในย่านความถี่ต่ำเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณที่ได้แสดงไว้แล้วในบทที่ 4 ซึ่งจะพบว่าในระบบการสื่อสารทางแสงที่ต้องการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตสูงกว่า 490 Mbps และมีค่า BER ที่ต่ำกว่า 10^{-9} นั้น จะไม่สามารถทำการใช้งานระบบการสื่อสารทางแสงที่มีการใช้งานช่องส่งสัญญาณจำนวน 7 และ 6 ช่องสัญญาณได้ แม้ว่าระบบสื่อสารทางแสงดังกล่าวนั้นจะสามารถทำการส่งสัญญาณข้อมูลตามต้องการแต่ก็จะทำให้ระบบสื่อสารทางแสงมีค่า BER ที่สูงกว่า 10^{-9} นั่นเอง จะมีเพียงแต่ระบบการสื่อสารทางแสงที่มีการใช้งานช่องส่งสัญญาณจำนวน 5 ช่องสัญญาณที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในเงื่อนไขนี้ได้ โดยจะสามารถส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตเป็น 494 Mbps และมีค่า BER ที่ต่ำกว่า 10^{-9} ซึ่งถ้าหากระบบสื่อสารที่ทำการพิจารณานั้นมีความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงที่น้อยกว่า 1 กิโลเมตรแล้ว ก็จะส่งผลให้ขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่จะสามารถส่งไปยังภาครับได้นั้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย

นอกเหนือไปจากการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นและการเลือกใช้งานช่องส่งสัญญาณให้มีความเหมาะสมแล้ว รูปแบบในการส่งสัญญาณข้อมูลก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วย

เพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารได้ โดยจากการทดลองจำลองระบบสื่อสารที่มีการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 และการส่งสัญญาณแบบ OOK ที่ช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำช่องอื่น ๆ อีก 3 ช่องส่งสัญญาณ จะพบว่าสามารถทำการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่เพิ่มสูงขึ้นเป็น 600 Mbps และมีค่า BER ที่ต่ำกว่า 10^{-7} ได้ และเมื่อทำการเลือกใช้งานช่องส่งสัญญาณให้มีความเหมาะสมโดยการลดการใช้งานช่องส่งสัญญาณลงเป็น 3 ช่องสัญญาณนั่นก็คือทำการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 และทำการส่งสัญญาณแบบ OOK ที่ช่องส่งสัญญาณความถี่ต่ำช่องอื่น ๆ อีก 2 ช่องสัญญาณ จะทำให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลได้เป็น 500 Mbps และมีค่า BER ที่ต่ำกว่า 10^{-9} ได้ ซึ่งขนาดบิตเรตของสัญญาณข้อมูลที่สามารถทำการส่งได้และค่า BER ที่ได้ดังกล่าวนี้ไม่จำเป็นต้องอาศัยการเข้ารหัสสัญญาณ และเมื่อทำการประยุกต์ใช้งานการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK ที่ช่องส่งสัญญาณช่องที่ 0 และการส่งสัญญาณแบบ OOK ที่ช่องส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำช่องอื่น ๆ อีก 3 ช่องส่งสัญญาณที่มีความเหมาะสม ประกอบกับการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นแล้ว ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารทางแสงก็จะมีประสิทธิภาพที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจากการจำลองระบบสื่อสารทางแสงดังกล่าวข้างต้นนี้พบว่าจะสามารถทำการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีขนาดบิตเรตของการส่งสัญญาณข้อมูลที่เพิ่มสูงขึ้นเป็น 546 Mbps และมีค่า BER ที่ต่ำกว่า 10^{-9} ได้ ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารทางแสง และขนาดบิตเรตที่ได้นี้จะยังมีค่ามากกว่าขนาดบิตเรตของการส่งสัญญาณผ่าน 3-dB Modal Bandwidth อยู่ถึงประมาณ 2.73 เท่า นอกเหนือไปจากนี้ระบบการสื่อสารทางแสงดังกล่าวนี้ยังให้ Coding gain ถึงประมาณ 6 dB เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารทางแสงที่ไม่มีการเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นก่อนหน้านี้

จากผลการศึกษาข้างต้นจะพบว่าปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อค่า BER ของระบบสื่อสารทางแสงที่มีเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้นคือ การลดทอนสัญญาณของผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด ซึ่งผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดนั้นจะมีลักษณะเป็นแบบ Frequency Selective ดังนั้นการศึกษาการส่งสัญญาณแบบ DSSS จึงได้ถูกนำมาพิจารณาเพื่อเป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานช่องส่งสัญญาณที่มีลักษณะเป็นแบบ Frequency Selective โดยอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS ซึ่งจากการจำลองสัญญาณแบบ DSSS ในบทที่ 4 พบว่าแบบรูปตาที่ได้รับจากสัญญาณแบบ DSSS ที่ภาครับในกรณีที่มี Code length เป็น 3 และ 7 นั้น เกิดความผิดเพี้ยนของบิตข้อมูลที่ภาครับค่อนข้างมากไม่สามารถทำการแยกแยะบิตข้อมูลที่ภาครับได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีองค์ประกอบทางความถี่หลักของการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้นอยู่ในบริเวณที่เกิดการลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งบริเวณที่เกิดการลดทอนดังกล่าวนี้เป็นบริเวณที่เกิดการลดทอนค่อนข้างสูงมาก ซึ่งผลการศึกษาที่ได้นี้ก็มีความสอดคล้องกับ (23) ซึ่งไม่แนะนำให้ใช้งานย่านความถี่

ในบริเวณนี้เป็นช่องสัญญาณ ดังนั้นเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS ในกรณีที่มี Code length เป็น 3 และ 7 นั้น จึงไม่เหมาะสมกับระบบการสื่อสารทางแสงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จากผลการศึกษาพบว่าการประยุกต์ใช้งานการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 และ 7 นั้นอาจไม่เหมาะสมกับระบบสื่อสารทางแสงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เนื่องมาจากการที่มีองค์ประกอบทางความถี่หลักของการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้นอยู่ในบริเวณที่มีการลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงค่อนข้างสูง ดังนั้นสำหรับผู้ที่มีความสนใจในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงอาจจะสามารถนำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไปทำการศึกษาและทำการประยุกต์ใช้ต่อไปได้ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ในการมอดูเลชันสัญญาณสำหรับการส่งสัญญาณแบบ DSSS และทำการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสาร

บรรณานุกรม

1. Senior JM. Optical Fiber Communications Principles and Practice. United Kingdom: Pearson Prentice Hall; 2009.

2. Keiser G. Optical Fiber Communications. United States of America: Mc Graw Hill; 2010.

3. Naku W, Pinthong C, Kanprachar S. Bandpass transmission characteristics of Multimode Fibers using Gaussian distribution. The 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - Conference 2011; 17-19 May 2011; Thailand2011.

4. Costello SLaDJ. Error Control Coding. United States of America: Pearson Prentice Hall; 2004.

5. Grant IAGaPM. Digital Communications. United States of America: Pearson Prentice Hall; 2004.

6. Salehi JGPaM. Digital Communication. United States of America: McGraw-Hill; 2008.

7. Forouzan BA. Data Communications and Networking. Singapore: McGraw-Hill; 2007.

8. Couch L. Digital and Analog Communication Systems: Pearson; 2013.

9. Moher SHaM. Modern Wireless Communications. United States of America: Pearson Prentice Hall; 2005.

10. Stallings W. Data and Computer Communications. United States of America: Pearson Prentice Hall; 2007.

11. Tranter REZaWH. Principles of Communication; Systems, Modulation, and Noise. United States of America: John and Wiley & Sons, Inc; 2014.

12. Kanprachar S. MODELING, ANALYSIS, AND DESIGN OF SUBCARRIER MULTIPLEXING ON MULTIMODE FIBER. Virginia, USA: Virginia Polytechnic Institute and State University; 2003.

13. Velichko MA, Nanii OE, editors. Increase of Transmission Speed in Access Networks using 4-Ary Ask Directly Modulated Lasers. 2006 International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling; 2006 29 June-1 July 2006.

14. Rahim A, Schwarz S, Bruns J, Zimmermann L, Ahmed SJ, Schäffer CG, et al., editors. 16-channel O-OFDM demultiplexer in silicon photonics. OFC 2014; 2014 9-13 March 2014.

15. Hugues-Salas E, Zhang Q, Giddings RP, Wang M, Tang J. Adaptability-enabled record-high and robust capacity-versus-reach performance of real-time dual-band optical OFDM signals over various OM1/OM2 MMF systems [invited]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking. 2013;5(10):A1-A11.

16. Giacoumidis E, Ibrahim SK, Zhao J, Tang JM, Ellis AD, Tomkos I. Experimental and Theoretical Investigations of Intensity-Modulation and Direct-Detection Optical Fast-OFDM Over MMF-Links. IEEE Photonics Technology Letters. 2012;24(1):52-4.

17. Tsai C, Peng C, Wu C, Leong S, Kao H, Wang H, et al. Multi-Mode VCSEL Chip with High-Indium-Density InGaAs/AlGaAs Quantum-Well Pairs for QAM-OFDM in Multi-Mode Fiber. IEEE Journal of Quantum Electronics. 2017;53(4):1-8.

18. Benyahya K, Simonneau C, Ghazisaeidi A, Jian P, Morizur J, Labroille G, et al. High-Speed Bi-Directional Transmission Over Multimode Fiber Link in IM/DD Systems. Journal of Lightwave Technology. 2018;36(18):4174-80.

19. Kabbour AM, Amphawan A, Fadhil HA, Aljunid SA, editors. Selective mode excitation in SCM-OCDMA. 2013 IEEE 4th International Conference on Photonics (ICP); 2013 28-30 Oct. 2013.

20. Nagashima K, Kise T, Ishikawa Y, Nasu H. A Record 1-km MMF NRZ 25.78-Gb/s Error-Free Link Using a 1060-nm DIC VCSEL. IEEE Photonics Technology Letters. 2016;28(4):418-20.

21. Patmanee J, Kanprachar S. Analysis of the Multimode Fiber at Low-Frequency Passband Region. Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering 2017;9((2-6)):37-41

22. Patmanee J, Pinthong C, Kanprachar S. BER Performance of Multimode Fiber Low-Frequency Passbands in Subcarrier Multiplexing Transmission. The 3rd International Conference on Photonics Solutions (ICPS2017); Thailand2017.

23. Patmanee J, Pinthong C, Kanprachar S, editors. Performance of Subcarrier Multiplexing Transmission over Multimode Fiber at Low-Frequency Passbands. The 8th Annual International Conference on Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES2017); 2017; Thailand.

24. Patmanee J, Pinthong C, Kanprachar S, editors. Performance of linear block code with subcarrier multiplexing system on a multimode fiber using low frequency passbands. 2018 International ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering (ECTI-NCON); 2018 25-28 Feb. 2018.

25. Qian X, Hartmann P, Ingham JD, Diab A, Penty RV, White IH, editors. Modelling and simulation-based prediction of radio transmission over multimode fibre. 2004 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (IEEE Cat No04EX859); 2004 4-6 Oct. 2004.

26. Hai-Han L, Wen-Shing T, Heng-Sheng S, Po-Chou L, editors. Radio on multimode fiber systems based on VCSELs with external light injection technique. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2004 (CLEO); 2004 16-21 May 2004.

27. Chia MYW, Luo B, Yee ML, Hao EJZ. Radio over multimode fibre transmission for wireless LAN using VCSELs. Electronics Letters. 2003;39(15):1143-4.

28. Yao Y, Li N, Xu P, Zeng Z, editors. Chip-level differential space-time block coded direct-sequence spread-spectrum communication. 2012 International Symposium on Instrumentation & Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA); 2012 25-28 Aug. 2012.

29. Nir VL, Scheers B, editors. Performance of delay and add direct sequence spread spectrum modulation scheme with fast frequency hopping in frequency selective Rayleigh channels. 2011 - MILCOM 2011 Military Communications Conference; 2011 7-10 Nov. 2011.

30. Olama M, Smith S, Kuruganti T, Ma X, editors. Performance study of hybrid DS/FFH spread-spectrum systems in the presence of frequency-selective fading and multiple-access interference. 2012 IEEE International Workshop Technical Committee on Communications Quality and Reliability (CQR); 2012 15-17 May 2012.

31. Mao H, Pei Y, Ge N, editors. Full diversity achieving MMSE frequency-domain equalizer for single-carrier block transmission with DSSS. Wireless Telecommunications Symposium 2012; 2012 18-20 April 2012.

32. Zuo X, Wang D, Yao R, editors. On performance of MRC-FDE UWB system with direct sequence spreading. 2013 IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC 2013); 2013 5-8 Aug. 2013.

33. Puzyrev PI, Shein VY, Erohin VV, editors. Orthogonal Multiple Chirp Modulation for Tasks of Robust Data Transmission. 2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM); 2018 29 June-3 July 2018.

34. Zheng YR, Yang Z, Yue M, Han B, Chen Z, Wang J, editors. DSP implementation of direct-sequence spread spectrum underwater acoustic modems with networking capability. 2014 Oceans - St John's; 2014 14-19 Sept. 2014.

35. Papoulis A, Pillai SU. Probability, Random Variables and Stochastic Processes. United States of America: Mc Graw Hill; 2002.

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การเข้ารหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้น

การเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้นนั้นจะถูกนิยามด้วยจำนวนบิตของคำรหัสและจำนวนบิตของข้อความซึ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบบล็อกเชิงเส้นนั้นได้ถูกแสดงไว้แล้วในบทที่ 2 สำหรับในส่วนนี้นั้นจะทำการแสดงตัวอย่างของการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) ที่มีลักษณะของเมทริกซ์ตัวกำเนิดเป็น $g(x)=x^3+x+1$ ซึ่งจะสามารถสร้างเป็นเมทริกซ์ตัวกำเนิดได้ดังนี้

$$\mathbf{G}=\begin{bmatrix}1&1&0&1&0&0&0\\0&1&1&0&1&0&0\\1&1&1&0&0&1&0\\1&0&1&0&0&0&1\end{bmatrix} \quad (ก.1)$$

การเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) นั้นจะเป็นการแปลงบิตข้อมูลจำนวน 4 บิตไปเป็นคำรหัสจำนวน 7 โดยจะสามารถทำการสร้างคำรหัสได้จากการนำบล็อกของบิตข้อมูลไปคูณกับเมทริกซ์ตัวกำเนิดดังสมการ (2.6) และ (2.7) โดยเมื่อกำหนดให้บล็อกของบิตข้อมูลจำนวน 4 บิตเป็น $\mathbf{m}=[1\,0\,1\,1]$ จะสามารถทำการสร้างคำรหัสได้ดังนี้

จาก $$\mathbf{c}=\mathbf{mG} \quad (ก.2)$$

แทนค่า $$\mathbf{c}=[1\,0\,1\,1]\begin{bmatrix}1&1&0&1&0&0&0\\0&1&1&0&1&0&0\\1&1&1&0&0&1&0\\1&0&1&0&0&0&1\end{bmatrix} \quad (ก.3)$$

จะได้ $$\mathbf{c}=[1\,0\,0\,1\,0\,1\,1] \quad (ก.4)$$

จากการแบ่งบิตข้อมูลออกเป็นบล็อกละ 4 บิตนั้น จะทำให้เกิดบล็อกของบิตข้อมูลที่แตกต่างกันได้ทั้งหมด 16 บล็อก โดยจะสามารถแสดงคำรหัสที่จะสอดคล้องกับบล็อกของบิตข้อมูลที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้ได้ดังตาราง 2

ตาราง 2 คำรหัสที่เกิดขึ้นจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4)

บล็อกบิตข้อมูล	คำรหัส
(0 0 0 0)	(0 0 0 0 0 0 0)
(0 0 0 1)	(1 0 1 0 0 0 1)
(0 0 1 0)	(1 1 1 0 0 1 0)

ตาราง 2 คำรหัสที่เกิดขึ้นจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) (ต่อ)

บล็อกบิตข้อมูล	คำรหัส
(0 0 1 1)	(0 1 0 0 0 1 1)
(0 1 0 0)	(0 1 1 0 1 0 0)
(0 1 0 1)	(1 1 0 0 1 0 1)
(0 1 1 0)	(1 0 0 0 1 1 0)
(0 1 1 1)	(0 0 1 0 1 1 1)
(1 0 0 0)	(1 1 0 1 0 0 0)
(1 0 0 1)	(0 1 1 1 0 0 1)
(1 0 1 0)	(0 0 1 1 0 1 0)
(1 0 1 1)	(1 0 0 1 0 1 1)
(1 1 0 0)	(1 0 1 1 1 0 0)
(1 1 0 1)	(0 0 0 1 1 0 1)
(1 1 1 0)	(0 1 0 1 1 1 0)
(1 1 1 1)	(1 1 1 1 1 1 1)

สำหรับการถอดรหัสสัญญาณแบบบล็อกเชิงเส้นนั้นที่ภาครับจะได้รับสัญญาณในรูปของเมริกซ์ **r** ดังสมการ (2.13) ซึ่งการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) นั้นที่ภาครับจะสามารถทำการแก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดที่ภาครับได้ 1 บิต โดยในการตรวจสอบและแก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดนั้นจะต้องอาศัยการหาค่าซินโดรม **s** ดังสมการ (2.14) ซึ่งจากเมทริกซ์ตัวกำเนิดดังสมการ (ก.1) จะสามารถสร้างเมทริกซ์พาริตี้เช็คได้ดังนี้

$$\mathbf{H}=\begin{bmatrix}1&0&0&1&0&1&1\\0&1&0&1&1&1&0\\0&0&1&0&1&1&1\end{bmatrix} \quad \text{(ก.5)}$$

เมื่อกำหนดให้ที่ภาครับได้รับบิตคำรหัสที่ผิดพลาดเป็น $\mathbf{r}=[1\,0\,0\,1\,1\,1\,1]$ จากการส่งคำรหัส $\mathbf{c}=[1\,0\,0\,1\,0\,1\,1]$ จะสามารถทำหาค่าซินโดรมได้ดังนี้

จาก $$\mathbf{s}=\mathbf{r}\mathbf{H}^T \quad \text{(ก.6)}$$

แทนค่า

$$\mathbf{r} = [1\,0\,0\,1\,1\,1\,1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (ก.7)$$

จะได้

$$\mathbf{s} = [0\,1\,1] \quad (ก.8)$$

จากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) นั้นจะทำให้มีค่าระยะต่ำสุด (Minimum distance) เป็น 3 ซึ่งจะทำให้มีรูปแบบความผิดพลาดหรือเมทริกซ์ **e** (Error patterns) ที่แตกต่างกันได้ทั้งหมด 8 รูปแบบ ซึ่งรูปแบบความผิดพลาดแต่ละแบบนั้นก็จะสอดคล้องกับค่าซินโดรม โดยจะสามารถแสดงรูปแบบความผิดพลาดที่สอดคล้องกับสอดคล้องกับค่าซินโดรมได้ดังตาราง 3

ตาราง 3 รูปแบบความผิดพลาดและค่าซินโดรมจากการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4)

ค่าซินโดรม	รูปแบบความผิดพลาด
(0 0 0)	(0 0 0 0 0 0 0)
(0 0 1)	(0 0 1 0 0 0 0)
(0 1 0)	(0 1 0 0 0 0 0)
(0 1 1)	(0 0 0 0 1 0 0)
(1 0 0)	(1 0 0 0 0 0 0)
(1 0 1)	(0 0 0 0 0 0 1)
(1 1 0)	(0 0 0 1 0 0 0)
(1 1 1)	(0 0 0 0 0 1 0)

จากตาราง 3 จะพบว่าค่าซินโดรมจากสมการ (ก.8) นั้นจะมีค่าที่ตรงกับรูปแบบความผิดพลาด $\mathbf{e} = [0\,0\,0\,0\,1\,0\,0]$ ดังนั้นในการแก้ไขบิตที่ผิดพลาดจากสัญญาณที่ภาครับเพื่อทำให้ได้รับคำรหัสที่ถูกต้องจะสามารถทำได้โดยอาศัยสมการ (2.13) ดังนี้

จาก $$\mathbf{r} = \mathbf{c} + \mathbf{e} \quad (ก.9)$$

จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\mathbf{c}^* = \mathbf{r} + \mathbf{e} \quad (ก.10)$$

เมื่อ $\mathbf{c}^*$ คือ คำรหัสที่ได้รับการแก้ไขบิตที่ผิดพลาดแล้ว

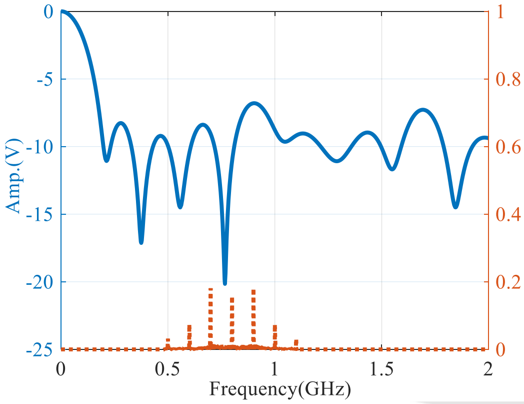
แทนค่า $$\mathbf{c}^* = [1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1] + [0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0] \quad (ก.11)$$

จะได้ $$\mathbf{c}^* = [1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1] \quad (ก.12)$$

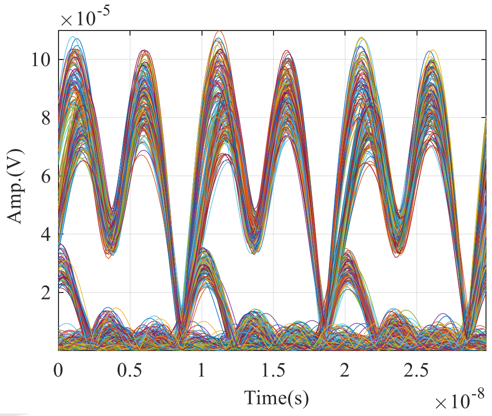
จะพบว่าคำรหัสที่ได้รับการแก้ไขบิตที่ผิดพลาดแล้วจากสมการ (ก.12) นั้นจะมีค่าตรงกันกับคำรหัสจากสมการ (ก.4) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเข้ารหัสสัญญาณบล็อกเชิงเส้นแบบ (7, 4) นั้นจะทำให้ที่ภาครับของระบบสื่อสารสามารถทำการแก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดได้จริงจำนวน 1 บิต

ภาคผนวก ข การวัดค่า BER ของการส่งสัญญาณแบบ DSSS จากแบบรูปตา

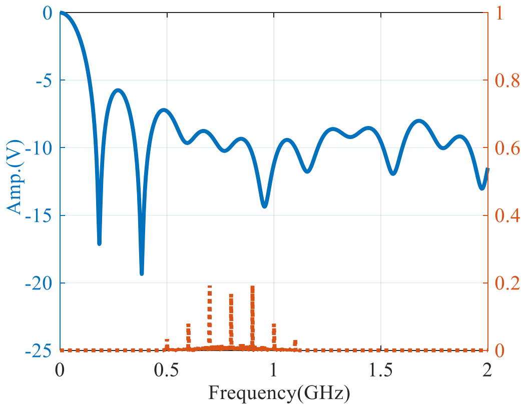
ในการหาค่า BER ของการส่งสัญญาณแบบ ASK และการส่งสัญญาณแบบ 4-ASK นั้นจะสามารถทำได้โดยการหาค่าตัวแปร Q จากแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับ ซึ่งได้แสดงวิธีในการหาค่าดังกล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองส่งสัญญาณข้อมูลแบบ ASK โดยอาศัยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้น พบว่าแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับที่ได้จากการส่งสัญญาณด้วยเทคนิคการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้นมีลักษณะที่บ่งชี้ถึงความแตกต่างระหว่างบิตข้อมูล 0 และบิตข้อมูล 1 ที่ไม่ชัดเจน ซึ่งได้ส่งผลให้ไม่สามารถทำการตีความสัญญาณที่ภาครับได้ โดยได้ทำการแสดงตัวอย่างแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับที่ได้จากการส่งสัญญาณแบบ DSSS ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดบางเส้นไปแล้วในบทที่ 4 ดังนั้นเพื่อให้การศึกษามีความละเอียดสมบูรณ์ยิ่งขึ้นในส่วนนี้จึงจะได้ทำการแสดงภาพของการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 ในทางความถี่ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดทั้ง 10 เส้น และภาพแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับที่ได้จากการส่งสัญญาณแบบ DSSS ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดแต่ละเส้น ซึ่งจะสามารถทำการแสดงภาพทั้งหมดได้ดังภาพ 61



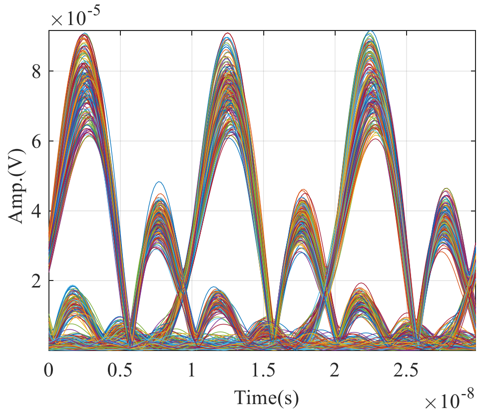
(ก)



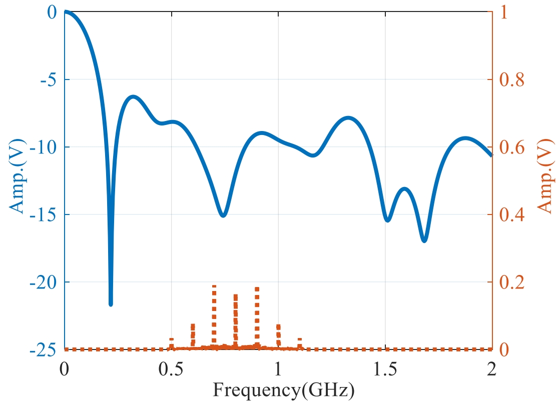
(ข)



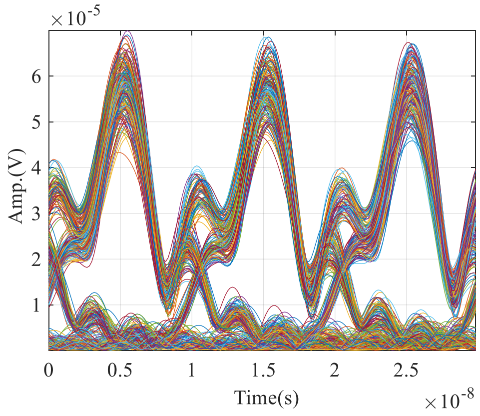
(ฃ)



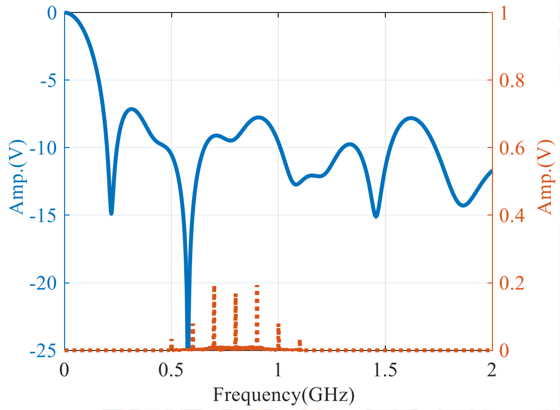
(ค)


Amp.(V)
Frequency(GHz)
Amp.(V)

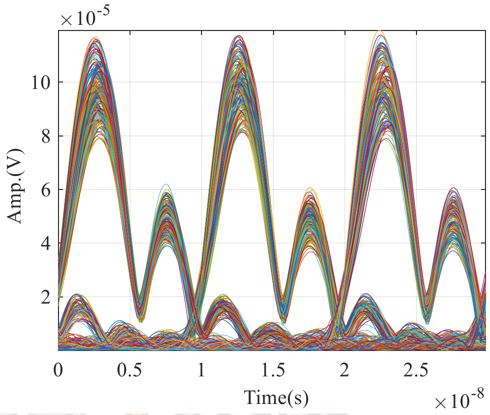
(ค)


×10-5
Amp.(V)
Time(s)
×10-8

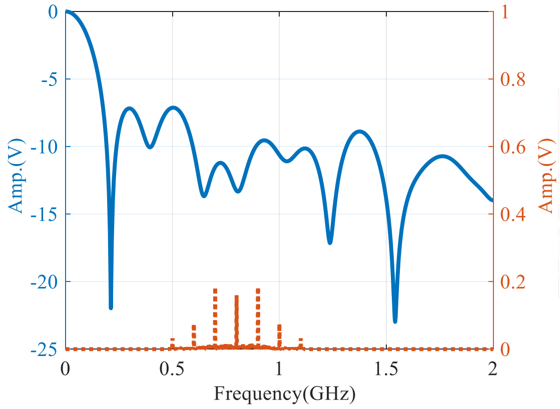
(ฆ)


Amp.(V)
Frequency(GHz)
Amp.(V)

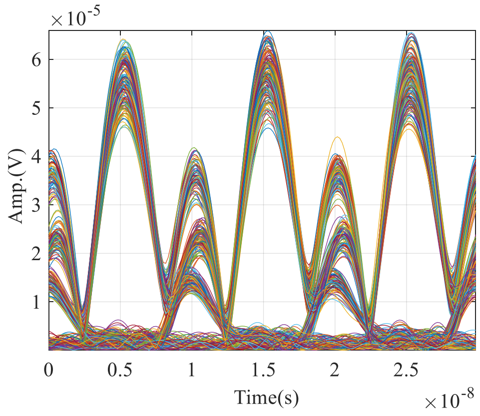
(ง)


×10-5
Amp.(V)
Time(s)
×10-8

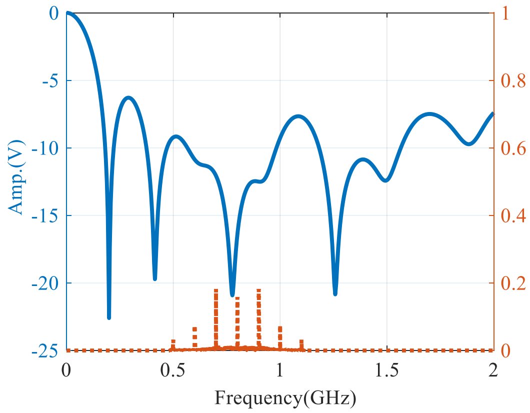
(จ)


Amp.(V)
Frequency(GHz)
Amp.(V)

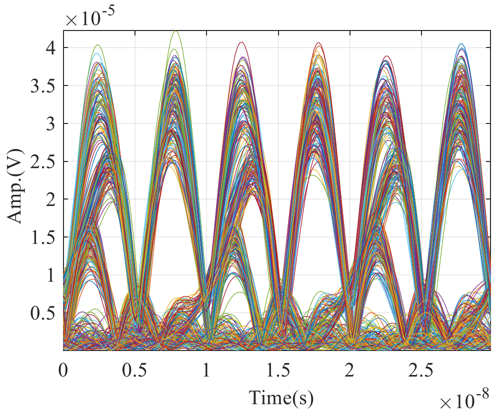
(ฉ)


×10-5
Amp.(V)
Time(s)
×10-8

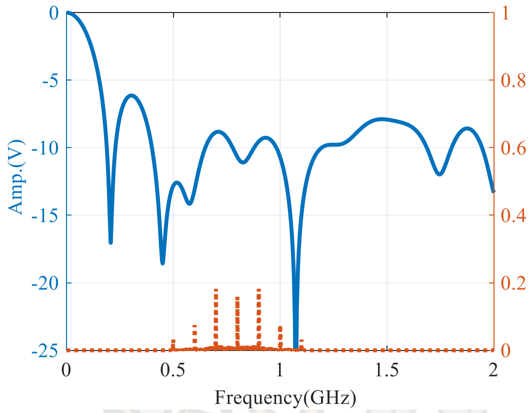
(ช)


Amp.(V)
Amp.(V)
Frequency(GHz)

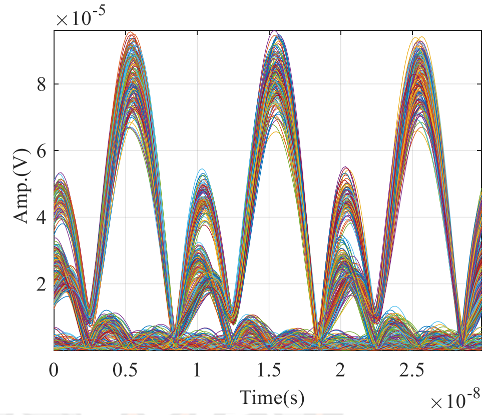
(ซ)


×10-5
Amp.(V)
Time(s)
×10-8

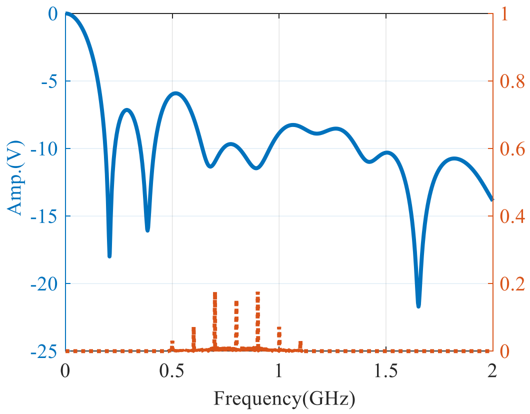
(ฌ)


Amp.(V)
Amp.(V)
Frequency(GHz)

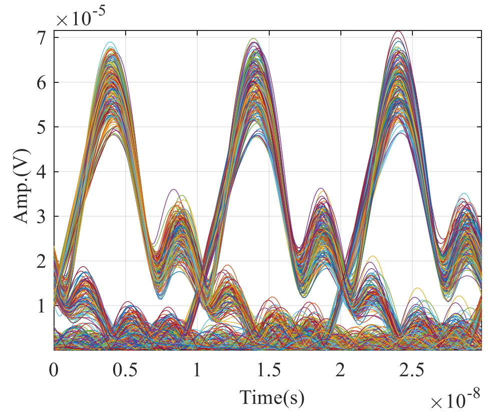
(ญ)


×10-5
Amp.(V)
Time(s)
×10-8

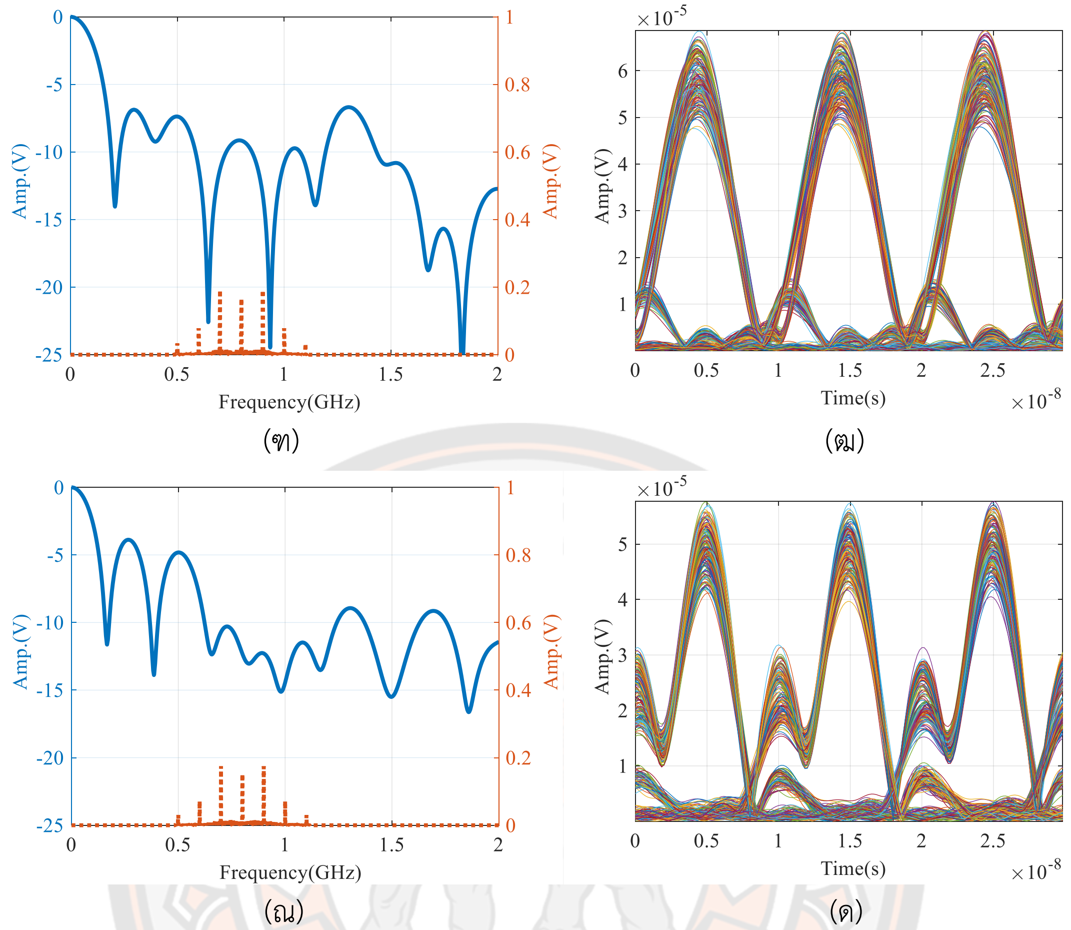
(ฎ)


Amp.(V)
Amp.(V)
Frequency(GHz)

(ฏ)


×10-5
Amp.(V)
Time(s)
×10-8

(ฐ)

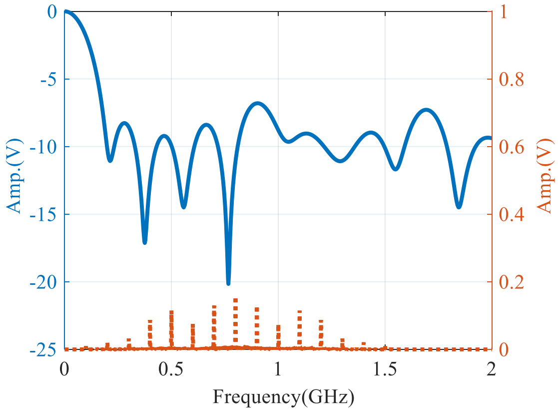


ภาพ 61 สัญญาณ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 ในทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด และแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับ

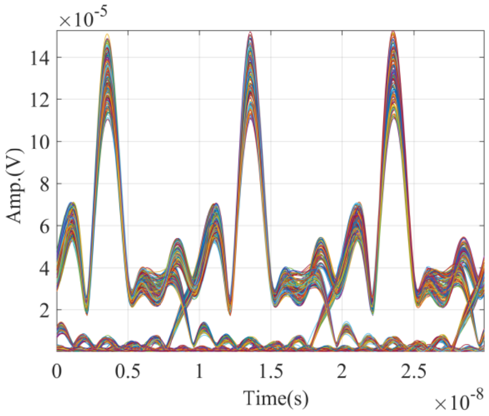
จากภาพ 61 เป็นการแสดงภาพของการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 ในทางความถี่ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดทั้ง 10 เส้น และภาพแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับที่ได้จากการส่งสัญญาณแบบ DSSS ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดแต่ละเส้น โดยที่ภาพของการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 ในทางความถี่ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 ถึงเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 10 จะถูกแสดงด้วยภาพ 61(ก) 61(ฃ) 61(ฅ) 61(ง) 61(ฉ) 61(ซ) 61(ญ) 61(ฏ) 61(ฑ) และ 61(ณ) ตามลำดับ และภาพแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับที่ได้จากการส่งสัญญาณแบบ DSSS ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 ถึงเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 10 จะถูกแสดงด้วยภาพ 61(ข) 61(ค) 61(ฆ) 61(จ) 61(ช) 61(ฌ) 61(ฎ) 61(ฐ) 61(ฒ) และ 61(ด) ตามลำดับ จะพบว่าภาพแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับที่ได้จากการส่งสัญญาณแบบ DSSS ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 3 5 7 8 9 และ 10 ซึ่งถูกแสดงด้วยภาพ 61(ฆ) 61(ช) 61(ฎ) 61(ฐ) 61(ฒ) และ 61(ด)

ตามลำดับนั้น จะสามารถทำการแยกแยะความแตกต่างระหว่างบิตข้อมูล 0 และบิตข้อมูล 1 จากแบบรูปตาได้อย่างชัดเจน ส่งผลให้ที่ภาครับของระบบสื่อสารสามารถทำการตีความบิตข้อมูลได้อย่างถูกต้องซึ่งจะส่งผลให้ค่า BER ที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 3 5 7 8 9 และ 10 นั้นมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารทางแสงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าภาพแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับที่ได้จากการส่งสัญญาณแบบ DSSS ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 2 4 และ 6 ซึ่งถูกแสดงด้วยภาพ 61(ข) 61(ค) 61(จ) และ 61(ฌ) ตามลำดับนั้น จะไม่สามารถทำการแยกแยะความแตกต่างระหว่างบิตข้อมูล 0 และบิตข้อมูล 1 จากแบบรูปตาได้อย่างชัดเจน โดยเป็นผลมาจากการที่มีองค์ประกอบทางความถี่หลักของการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้นอยู่ในบริเวณที่เกิดการลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงนั่นเอง และการที่ไม่สามารถทำการแยกแยะความแตกต่างระหว่างบิตข้อมูล 0 และบิตข้อมูล 1 ได้นั้นจะเป็นสาเหตุโดยตรงที่จะก่อให้เกิดการตีความบิตผิดพลาดที่ภาครับส่งผลให้ค่า BER ที่ได้มีค่าที่ค่อนข้างสูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 2 4 และ 6 นั้นมีความไม่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารทางแสงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังนั้นเมื่อทำการพิจารณาผลการทดลองที่ได้จากการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดทั้ง 10 เส้น จะพบว่ามีผลการทดลองที่ได้จากการส่งสัญญาณแบบ DSSS ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดถึง 4 การทดลองจากจำนวน 10 การทดลองที่ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้งานการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 กับระบบสื่อสารทางแสงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นค่อนข้างไม่เหมาะสม

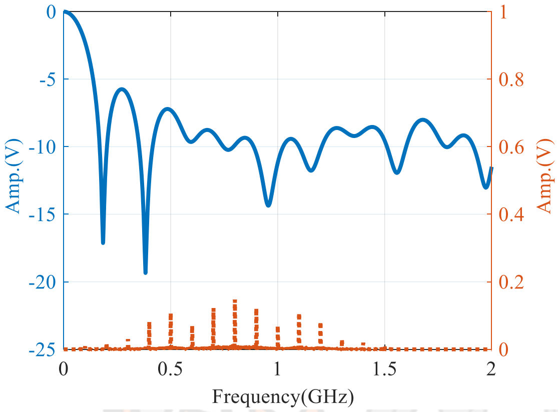
นอกเหนือไปจากการทดลองส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดทั้ง 10 เส้นแล้วนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้ทำการทดลองส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 7 ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดทั้ง 10 เส้นอีกด้วย โดยจะสามารถแสดงภาพของการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 7 ในทางความถี่ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดทั้ง 10 เส้น และภาพแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับที่ได้จากการส่งสัญญาณแบบ DSSS ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดแต่ละเส้น ซึ่งจะสามารถทำการแสดงภาพทั้งหมดได้ดังภาพ 62


Amp.(V)
Amp.(V)
Frequency(GHz)

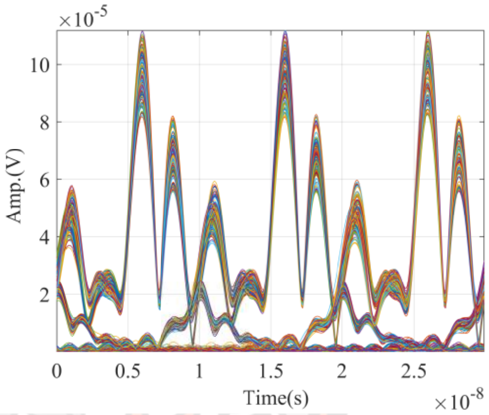
(ก)


×10^-5
Amp.(V)
Time(s)
×10^-8

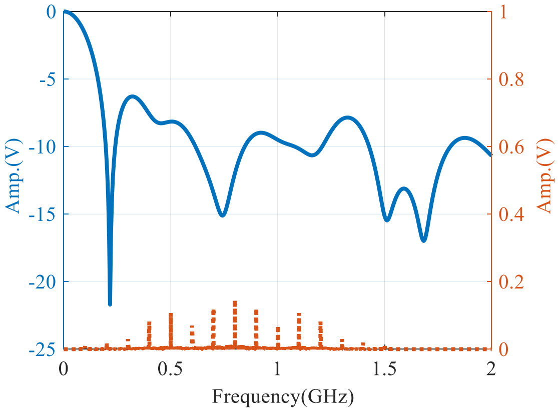
(ข)


Amp.(V)
Amp.(V)
Frequency(GHz)

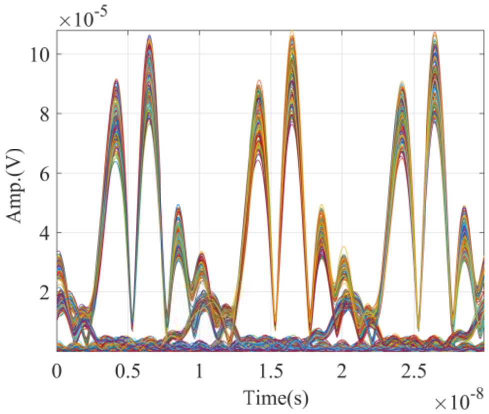
(ฃ)


×10^-5
Amp.(V)
Time(s)
×10^-8

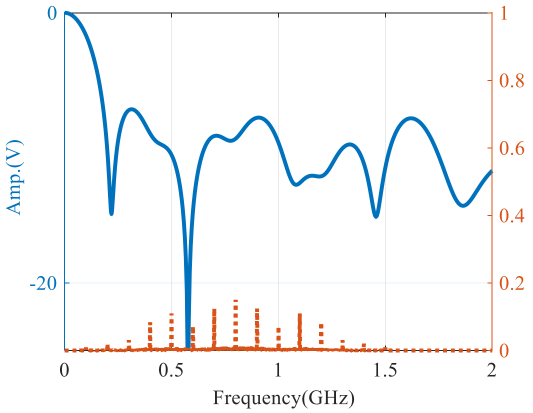
(ค)


Amp.(V)
Amp.(V)
Frequency(GHz)

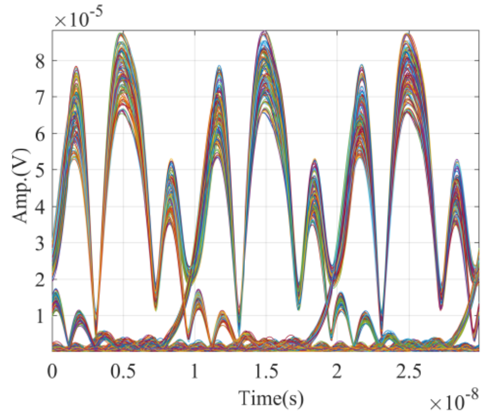
(ฅ)


×10^-5
Amp.(V)
Time(s)
×10^-8

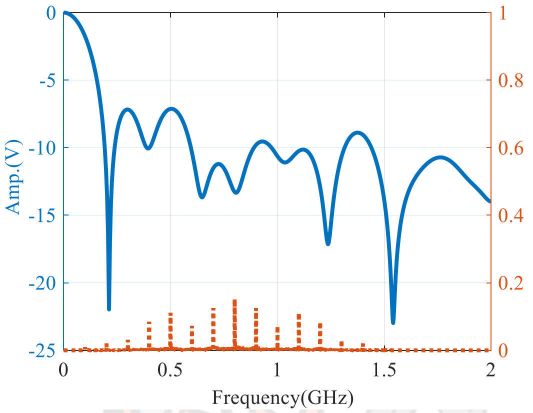
(ฆ)


Amp.(V)
Amp.(V)
Frequency(GHz)

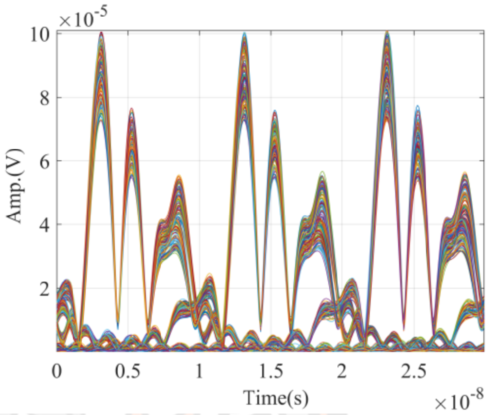
(ง)


×10-5
Amp.(V)
Time(s)
×10-8

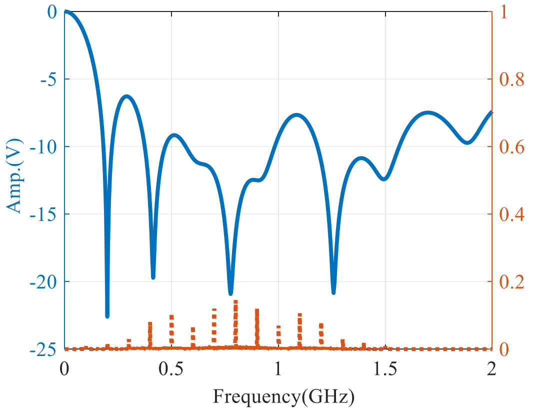
(จ)


Amp.(V)
Amp.(V)
Frequency(GHz)

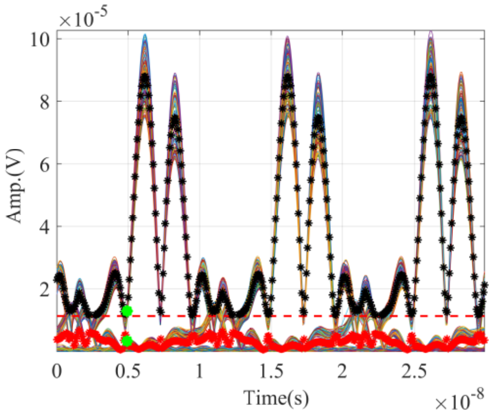
(ฉ)


×10-5
Amp.(V)
Time(s)
×10-8

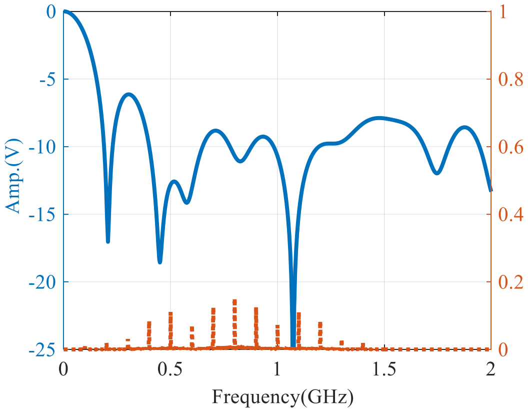
(ช)


Amp.(V)
Amp.(V)
Frequency(GHz)

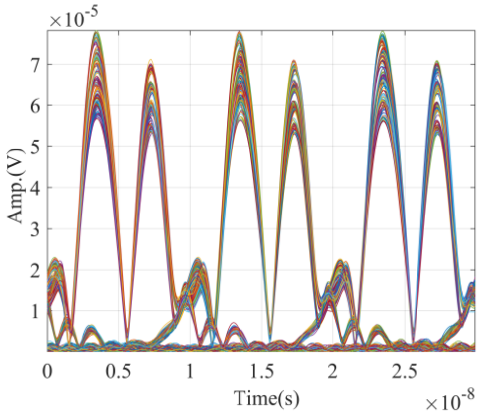
(ซ)


×10-5
Amp.(V)
Time(s)
×10-8

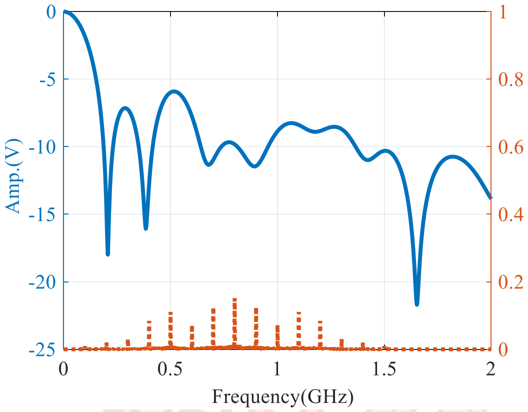
(ฌ)


0
-5
-10
-15
-20
-25
Amp.(V)
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Amp.(V)
0
0.5
1
1.5
2
Frequency(GHz)

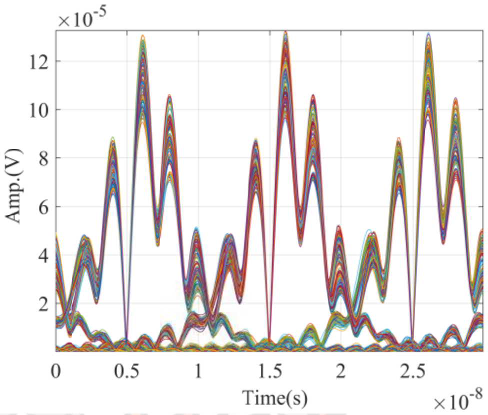
(ญ)


×10-5
7
6
5
4
3
2
1
Amp.(V)
0
0.5
1
1.5
2
2.5
Time(s)
×10-8

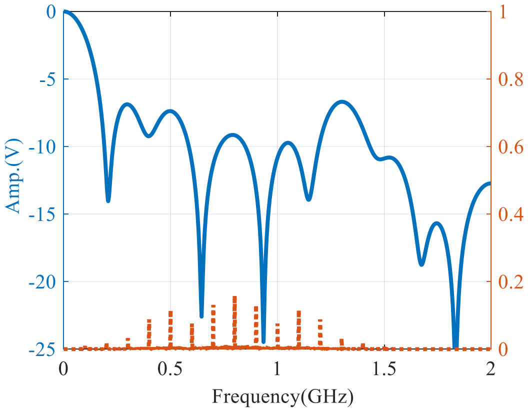
(ฎ)


0
-5
-10
-15
-20
-25
Amp.(V)
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Amp.(V)
0
0.5
1
1.5
2
Frequency(GHz)

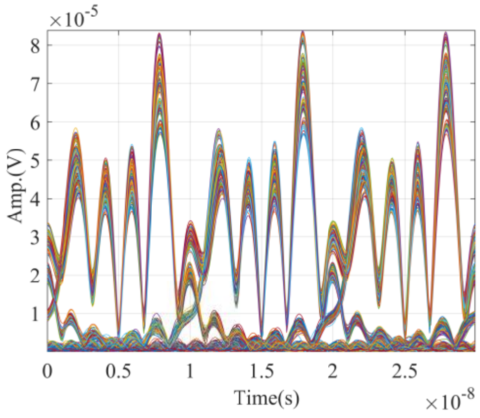
(ฏ)


×10-5
12
10
8
6
4
2
Amp.(V)
0
0.5
1
1.5
2
2.5
Time(s)
×10-8

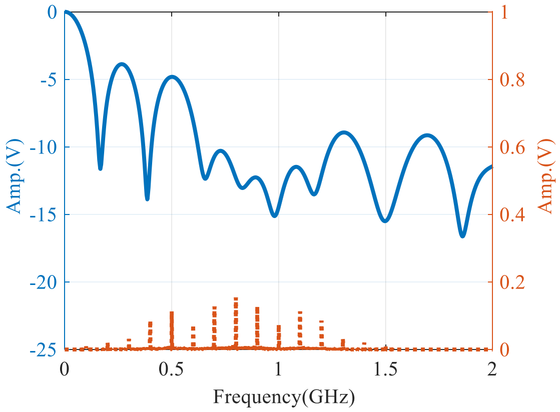
(ฐ)


0
-5
-10
-15
-20
-25
Amp.(V)
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Amp.(V)
0
0.5
1
1.5
2
Frequency(GHz)

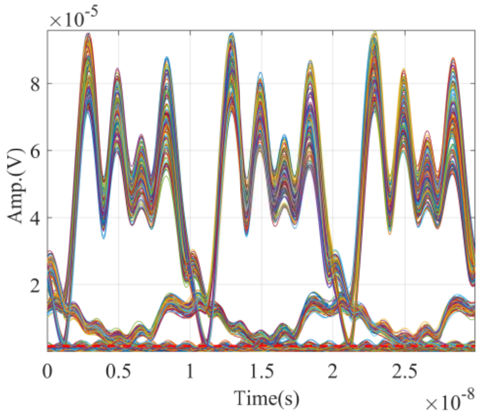
(ฑ)


×10-5
8
7
6
5
4
3
2
1
Amp.(V)
0
0.5
1
1.5
2
2.5
Time(s)
×10-8

(ฒ)



(ณ)



(ด)

ภาพ 62 สัญญาณ DSSS ที่มี Code length เป็น 7 ในทางความถี่กับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมด และแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับ

จากภาพ 62 เป็นการแสดงภาพของการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 7 ในทางความถี่ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดทั้ง 10 เส้น และภาพแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับที่ได้จากการส่งสัญญาณแบบ DSSS ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดแต่ละเส้น โดยที่ภาพของการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 7 ในทางความถี่ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 ถึงเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 10 จะถูกแสดงด้วยภาพ 62(ก) 62(ฃ) 62(ฅ) 62(ง) 62(ฉ) 62(ซ) 62(ญ) 62(ฏ) 62(ฑ) และ 62(ณ) ตามลำดับ และภาพแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับที่ได้จากการส่งสัญญาณแบบ DSSS ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 1 ถึงเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดเส้นที่ 10 จะถูกแสดงด้วยภาพ 62(ข) 62(ค) 62(ฆ) 62(จ) 62(ช) 62(ฌ) 62(ฎ) 62(ฐ) 62(ฒ) และ 62(ด) ตามลำดับ จะพบว่าภาพแบบรูปตาของสัญญาณในภาครับที่ได้จากการส่งสัญญาณแบบ DSSS ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประเภทหลายโหมดส่วนใหญ่นั้นไม่สามารถทำการแยกแยะความแตกต่างระหว่างบิตข้อมูล 0 และบิตข้อมูล 1 ได้อย่างชัดเจน ซึ่งก็เป็นผลมาจากการที่มีส่วนขององค์ประกอบทางความถี่หลักของการส่งสัญญาณแบบ DSSS นั้นอยู่ในบริเวณที่เกิดการลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงนั่นเอง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้งานการส่งสัญญาณแบบ DSSS ที่มี Code length เป็น 3 และ 7 นั้นจึงอาจไม่เหมาะสมกับระบบสื่อสารทางแสงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล	จารุวัฒน์ พัฒน์มณี
วัน เดือน ปี เกิด	
ที่อยู่ปัจจุบัน	
ประวัติการศึกษา	2556 วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยนเรศวร 2559 วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผลงานตีพิมพ์	Patmanee J, Pinthong C, Kanprachar S. Performance of Signal Transmission via Subcarrier Multiplexing with 4-ASK over Low-Frequency Passbands of Multimode Fibers. The SICE Annual Conference 2019 (SICE 2019). Patmanee J, Pinthong C, Kanprachar S. Performance of MMF at Low-Frequency Passbands in SCM with 4-ASK and Linear Block Codes. The 4th International Conference on Photonics Solutions (ICPS 2019).