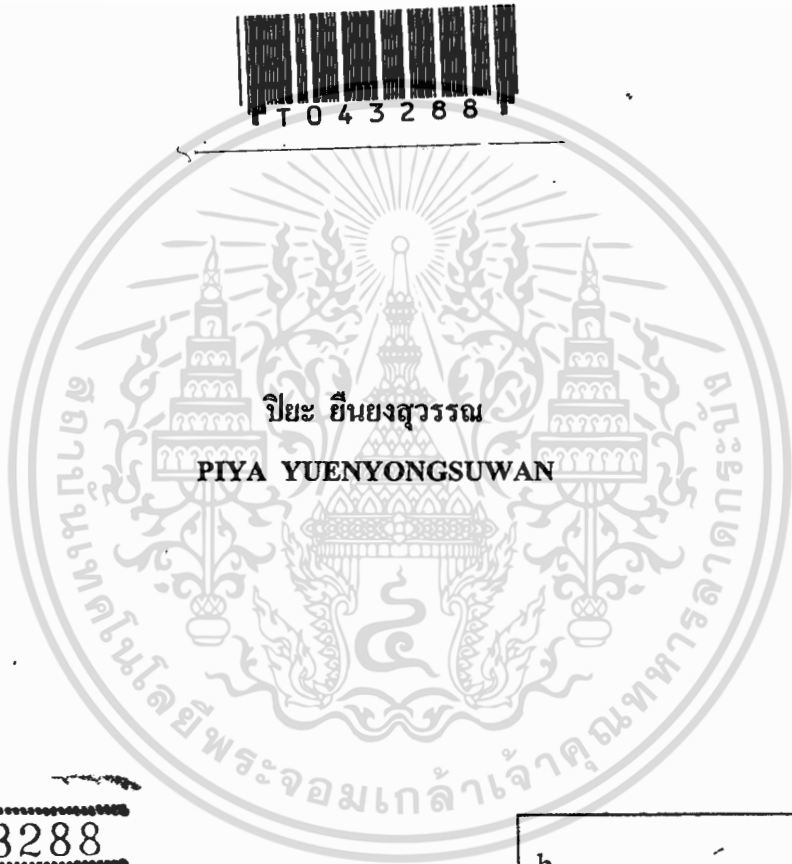


การวิเคราะห์สมรรถนะของการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงที่มี

สัญญาณรบกวนด้วยการเข้ารหัสแบบ  $2^N$  extended prime

PERFORMANCE ANALYSIS OF OPTICAL FIBER CDMA IN NOISE

CHANNEL WITH  $2^N$  EXTENDED PRIME CODE



ปิยะ ยืนยงสุวรรณ

PIYA YUENYONGSUWAN

เลขหมึก.....  
เลขทะเบียน.....43288  
วัน, เดือน, ปี 21 ส.ค. 2545

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-850-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

**PERFORMANCE ANALYSIS OF OPTICAL FIBER CDMA IN NOISE  
CHANNEL WITH  $2^N$  EXTENDED PRIME CODE**



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

**2002**

**ISBN 974-648-850-3**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2002**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สมรรถนะของการเข้าถึงแบบCDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีสัญญาณรบกวนด้วยการเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime
นักศึกษา	นายปิยะ ยืนยงสุวรรณ
รหัสประจำตัว	42061009
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวิพล สิริชีวะภาค

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะของการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงด้วยการเข้ารหัสวิธีใหม่ ที่เรียกว่า  $2^n$  extended prime ซึ่งการเข้ารหัสด้วยวิธีนี้จะมีคุณสมบัติเงื่อนไขของสหสัมพันธ์ข้ามเป็น 1 เป็นผลทำให้ลดผลกระทบจากการแทรกสอดของผู้ใช้บริการในช่องสัญญาณเดียวกันของการเข้าถึงแบบ CDMA ลงได้ และได้ทำการวิเคราะห์ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนจากอะวาลานซ์โฟโต้ไดโอด (APD noise) และสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (Thermal noise) ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนหลักที่มีอยู่ในภาครับของระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง นอกจากนี้ได้วิเคราะห์ระบบเมื่อมีการจำลองการนำอุปกรณ์ optical hard limiter มาวางไว้ในระบบ เพื่อลดผลกระทบจากการแทรกสอดของผู้ใช้บริการ

<b>Thesis Title</b>	Performance Analysis of Optical Fiber CDMA in Noise Channel with 2 <sup>n</sup> Extended Prime Code
<b>Student</b>	Mr.Piya Yuenyongsuwan
<b>Student ID.</b>	42061009
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2002
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr.Suvepon Sittichevapak

### ABSTRACT

This thesis presents the performance analysis of optical fiber code division multiple access (CDMA) with a new code, called 2<sup>n</sup> extended prime code that has cross correlation constraint equal to 1. This code property can reduce the effect of the multiple access interference users in the same channel of the CDMA system. Moreover APD noise and Thermal noise are principle noise of optical fiber communication, are included for analyzing. Also an optical hard-limiter is used for reducing the interference effect for optical fiber CDMA system.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาในการทำวิจัย ประกอบกับเอื้ออำนวยของวิทยุ รวมทั้งได้ทดสอบการตรวจเทียบจาก รศ.ดร. สุวิพล ลิทธิชีวะภาค ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณโปรเฟสเซอร์ มิกิ เทะซึยะ ของมหาวิทยาลัยอเล็กโทรคอมมิวนิเคชั่น ประเทศญี่ปุ่น ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการทำวิจัย ประกอบกับเอื้ออำนวยของวิทยุ ขณะที่ผู้วิจัยได้รับทุนวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่น

ขอกราบขอบพระคุณคุณแม่ คุณแม่ของผู้วิจัย ที่ได้อบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจอย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำต่างๆ พร้อมทั้งช่วยตรวจเทียบ และแก้ไขทฤษฎีและอื่นๆ ที่ผิดพลาด จนสำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้นและยังให้กำลังใจต่อผู้วิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ปิยะ ยืนยงสุวรรณ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 โครงร่างวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 การสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงด้วยการเข้าถึงแบบ CDMA.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 หลักการเบื้องต้นของการเข้าถึงแบบ CDMA.....	6
2.2.1 Frequency-hopping spread spectrum .....	6
2.2.2 Direct-sequence spread spectrum .....	7
2.3 องค์ประกอบของระบบ CDMA .....	8
2.3.1 Chip Rate .....	8
2.3.2 Correlation .....	8
2.3.3 Generate Code .....	9
2.3.4 วงจรภาครับของระบบ Direct Sequence ที่ใช้การมอดูเลต แบบ BPSK .....	10
2.4 หลักการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง .....	11
2.4.1 รูปแบบพื้นฐานของการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง.....	12
2.5 สัญญาณรบกวนที่อยู่ในเส้นใยแก้วนำแสงด้วยการเข้าถึงแบบ CDMA .....	14
2.5.1 พื้นฐานของสัญญาณรบกวน.....	15
2.5.2 สัญญาณรบกวนที่เครื่องรับทางแสง.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.3	สัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (Thermal noise).....	16
2.5.4	สัญญาณรบกวนเชิงความร้อนที่โฟโตนิกเตอร์.....	17
2.5.5	สัญญาณรบกวนใน APD .....	18

บทที่ 3	การเข้ารหัสแบบต่างๆที่ใช้ในการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ด้วยการเข้าถึงแบบ CDMA.....	21
3.1	บทนำ.....	21
3.2	การเข้ารหัสแบบ Optical Orthogonal Code (OOC).....	21
3.3	การเข้ารหัสแบบ prime.....	25
3.4	การเข้ารหัสแบบ $2^n$ prime.....	27
3.5	การเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime.....	32
3.6	Optical hard limiter.....	36
บทที่ 4	การวิเคราะห์ผลของการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงด้วยการเข้ารหัส แบบ $2^n$ extended prime.....	39
4.1	การวิเคราะห์ระบบเชิงคณิตศาสตร์กรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวน.....	40
4.1.1	กรณีไม่มีอุปกรณ์ Optical Hard-Limiter.....	40
4.1.2	กรณีมีอุปกรณ์ Optical Hard-Limiter.....	42
4.2	การวิเคราะห์ระบบเชิงคณิตศาสตร์กรณีที่มีสัญญาณรบกวน.....	43
4.2.1	กรณีไม่มีอุปกรณ์ Optical Hard-Limiter.....	46
4.2.2	กรณีมีอุปกรณ์ Optical Hard-Limiter.....	47
บทที่ 5	ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ.....	51
5.1	ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดของระบบที่ไม่มีสัญญาณรบกวน.....	51
5.1.1	กรณีที่ระบบไม่มีอุปกรณ์ Optical Hard-Limiter .....	52
5.1.2	กรณีที่ระบบมีอุปกรณ์ Optical Hard-Limiter.....	58
5.2	ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดของระบบที่มีสัญญาณรบกวนโดยใช้การเข้ารหัส ทางแสงแบบ $2^n$ extended prime.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.1 ผลของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ Optical hard-limiter.....	60
5.2.2 ผลของระบบที่มีอุปกรณ์ Optical hard-limiter.....	61
บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย.....	62
6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	62
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	66
ก. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	67
ประวัติผู้เขียน.....	75

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการเลื่อนบิตของลำดับสัญญาณ 15 ครั้ง.....	10
3.1 แสดงลำดับ prime $S_x$ และลำดับโค้ด $C_x$ สำหรับ GF(5).....	26
3.2 ลำดับ prime ใน GF(13).....	30
3.3 Adjacent relative cyclic delay ของลำดับ prime ใน GF(13).....	31
3.4 ลำดับ prime GF(13) ที่ถูกปรับปรุ้งแล้ว ด้วย $2^n=8$ .....	32
3.5 Adjacent relative cyclic delayของลำดับ prime ใน GF(13).....	33
3.6 ลำดับ prime GF(13) ที่ถูกปรับปรุ้งแล้ว ด้วย $2^n=8$ .....	34
3.7 จำนวนผู้ใช้บริการสูงสุดของการเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime.....	36
4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เราเลือกใช้ในการวิจัย.....	50



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบระบบ Frequency Hopping.....	6
2.2 รูปแบบสเปกตรัมดรัมด้วยวิธี Direct sequence.....	7
2.3 ตัวอย่างของซีพิต.....	8
2.4 รูปแบบของการสลับพินซ์.....	9
2.5 โครงสร้างของการสร้างโค้ด.....	9
2.6 รูปแบบวงจรและสัญญาณของระบบภาครับของ Direct Sequence.....	11
2.7 เครือข่ายของระบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง.....	12
2.8 a) รูปแบบโครงสร้างของตัว optical correlator ที่ใช้ในภาครับของระบบ.....	14
b) บล็อกไดอะแกรมของ optical matched filter.....	14
2.9 a) แบบจำลองของเครื่องรับทางแสง.....	16
b) สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่เครื่องรับ.....	16
2.10 สัญญาณรบกวนเชิงความร้อนที่อยู่ในโฟโตรีเซปเตอร์.....	17
2.11 สัญญาณรบกวนใน APD.....	20
3.1 a) โครงสร้างการเข้ารหัสของการเข้าถึงแบบ CDMA .....	22
b) โครงสร้างการถอดรหัสของการเข้าถึงแบบ CDMA.....	23
3.2 แสดงตัวอย่างของ 2 โค้ดแบบ OOC ด้วยความยาวโค้ด $F=32$ และน้ำหนักโค้ด $K=4$ .....	24
3.3 a) การสลับพินซ์ของลำดับโค้ด $C_3$ สำหรับชุดข้อมูล 1110010100 พิกสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ 5.....	26
b) การสลับพินซ์ข้ามระหว่างลำดับโค้ด $C_3$ กับลำดับโค้ด $C_2$ ซึ่งพิกสูงสุดของการสลับพินซ์ข้ามมีค่าเป็น 2.....	27
3.4 รูปแบบการเข้ารหัสแบบขนาน.....	28
3.5 รูปแบบการเข้ารหัสแบบอนุกรม.....	29
3.6 เครื่องรับ Optical CDMA ที่มีการใช้ idea optical hard limiter .....	36
3.7 ตัวอย่างจากผลกระทบของการใช้ Optical hard limiter .....	37
4.1 แสดงไดอะแกรมของระบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงในช่องสัญญาณรบกวนกรณีไม่มีอุปกรณ์ Optical hard-limiter .....	46
4.2 แสดงไดอะแกรมของระบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงในช่องสัญญาณรบกวนกรณีที่มีอุปกรณ์ Optical hard-limiter.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดของบิตกับระดับ Threshold โดยที่ $F=1000$ , $N=20$ และ $K=3, 5, 7, 11$ และ $17$ .....	52
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบที่ $F=1000$ , $N=20$ และ $K=5, 7, 9$ และ $11$ เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการในระบบ.....	53
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบเทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการ โดยมีค่าหมายเลข prime เท่ากับ $11, 13, 17, 23, 29$ และ $37$ .....	54
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบที่ใช้การเข้ารหัสแบบ $2^n$ prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการในเวลาเดียวกัน โดยการเปลี่ยนค่าหมายเลข prime กำหนดให้ค่าน้ำหนักโค้ดเป็น $2^2$ และ $2^3$ .....	55
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบที่ใช้การเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการในเวลาเดียวกัน ด้วยการเปลี่ยนค่าหมายเลข prime โดยกำหนดให้ค่าน้ำหนักโค้ดเป็น $2^2$ และ $2^3$ .....	56
5.6 เปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของการเข้ารหัสแบบ $2^n$ prime กับการเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime ด้วยค่าหมายเลข prime เท่ากันคือ $11, 23$ และ $37$ .....	57
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต ในกรณีที่ใช้การเข้ารหัสแบบ $2^n$ prime ด้วยหมายเลข prime เท่ากับ $11, 13, 17, 23$ และ $31$ .....	58
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต ในกรณีที่ใช้การเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime ด้วยหมายเลข prime เท่ากับ $11, 13, 17, 19, 23, 29$ และ $37$ .....	59
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต ในกรณีที่ใช้การเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนอยู่ในระบบ ด้วยหมายเลข prime เท่ากับ $13, 17$ และ $37$ .....	60
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต ในกรณีที่ใช้การเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime ในกรณีที่มีอุปกรณ์ Optical hard-limiter ไว้ในระบบที่มีสัญญาณรบกวน ด้วยหมายเลข prime เท่ากับ $13, 19$ และ $37$ .....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

ในช่วงประมาณ 20 ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงได้เติบโตเร็วมาก มีการทำให้ค่าความสูญเสียในเส้นใยแก้วแบบซิงเกิลโหมด (single-mode) ลดลง การทำให้ภาครับทางแสงมีความไวในการรับสูง การพัฒนาให้สารกึ่งตัวนำเลเซอร์ไดโอด (laser diode) มีความเร็วสูง และการทำให้ภาคขยายทางแสงมีค่าสูงขึ้นในช่องความจุสัญญาณ โดยมีอัตราบิดสูงที่สุดในระยะทางที่ไกลที่สุดที่ไม่ต้องใช้ตัวทวนสัญญาณ

ปัจจุบันได้มีการนำเส้นใยแก้วนำแสงไปประยุกต์ใช้งานหลายด้าน เช่น ในระบบการสื่อสารทางทะเล ระบบเครือข่ายโทรศัพท์ ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ เกี่ยวกับเรือและยานอวกาศ รวมไปถึงระบบเครือข่ายโทรศัพท์ผ่านสายเคเบิลด้วย

ถึงแม้ว่าความสามารถของเส้นใยแก้วนำแสงจะใช้ประโยชน์ได้มากมายก็ตาม แต่ปัจจุบันได้มีการนำเส้นใยแก้วนำแสงมาใช้ประโยชน์น้อย ซึ่งเหตุผลหลักก็คือว่าอุปกรณ์เกี่ยวกับออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (opto-electronic) ที่อินพุตและเอาต์พุตของเส้นใยแก้วไม่สามารถทำงานที่ความเร็วสัมพันธ์กับแบนด์วิดท์ของเส้นใยแก้วได้ ดังนั้นจึงมีการคำนึงถึงการแบ่งแบนด์วิดท์ของเส้นใยแก้วใช้ระหว่างการสื่อสาร โดยยอมให้มีการเข้าถึงหลายทาง (multiple access) ในช่องสัญญาณเดียวกัน

ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวความคิดใหม่ในการพัฒนาระบบเส้นใยแก้วขึ้น นั่นก็คือการเข้าถึงหลายทางในระบบเครือข่ายเส้นใยแก้วนำแสง [Cheung, 1990] ในระบบเครือข่ายเหล่านี้จะมีการใช้เส้นทางสื่อสารจากหลายๆ โหนดซึ่งจะแบ่งกันใช้ช่องสัญญาณที่มีอยู่ โดยปกติแล้วก็จะใช้อุปกรณ์พาสซีฟ (passive) (ยกเว้นในระบบที่มีภาคขยายทางแสง) และใช้อุปกรณ์ทางแสง จะไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณจากแสงเป็นอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอิเล็กทรอนิกส์เป็นแสงยกเว้นที่ปลายของจุดต่อเชื่อม

ในการเข้าถึงหลายทางในช่องสัญญาณเดียวกันนั้นจะมีการทำมัลติเพล็กซ์ (multiplex) กันจากหลายๆ โหนดในเชิงความถี่และเชิงเวลา สำหรับเชิงความถี่นั้นก็จะมีรูปแบบเป็นการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความยาวคลื่น (wavelength division multiple access WDMA) และการเข้าถึงหลายทางแบบคลื่นพาห่อย่อย (subcarrier multiple access SCMA) สำหรับเชิงเวลานั้นก็จะมีรูปแบบเป็นการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลาเวลา (time division multiple access TDMA) และการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (code division multiple access CDMA)

สำหรับเทคนิคแบบ CDMA เริ่มแรกถูกนำมาใช้ในการสื่อสารด้านไมโครเวฟ ซึ่งมันจะยอมให้ผู้ให้บริการสามารถเข้ามาใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน โดยการสุ่มที่เวลาใดๆ จากข้อดีตรงนี้มันจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในระบบเครือข่ายเส้นใยแก้วนำแสงในปี 1985 [Hui]

หลักการของ CDMA ที่ใช้ในเส้นใยแก้วนำแสง (optical CDMA) จะกำเนิดพัลส์เล็กลงทางแสง (ในช่วงพิโกวินาทีหรือเฟมโตวินาที) เพื่อทำการเข้ารหัสกับบิตข้อมูลที่มาจากโหนดต่างๆ ให้เป็นขบวนพัลส์โดยมีลักษณะเฉพาะของขบวนพัลส์นั้นๆ ซึ่งเป็นการเข้ารหัสแบบ CDMA สัญญาณ optical CDMA ที่ส่งมาในแต่ละโหนดจะมีแบนด์วิดท์กว้างมากซึ่งมากกว่าแบนด์วิดท์ของข้อมูลมาก ในการเข้ารหัสแบบ CDMA สัญญาณที่มาจากโหนดทั้งหมดในเครือข่ายจะไม่มีอาการแทรกสอดระหว่างกัน ซึ่งการเข้าถึงหลายทางในเวลาเดียวกันโดยไม่มีกรหน่วงเวลานั้นจะเกิดขึ้นโดยปราศจากความจำเป็นที่จะต้องใช้โปรโตคอลที่ซับซ้อนของเครือข่าย เพื่อให้สัมพันธ์กับการรับส่งข้อมูลกับโหนดต่างๆที่อยู่ในเครือข่าย

ข้อดีของ CDMA เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบอื่น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. เมื่อเปรียบเทียบกับ TDMA CDMA นั้นไม่ต้องการชิงโครนัสกันระหว่างโหนดทั้งหมดในเครือข่าย
2. เมื่อเปรียบเทียบกับ WDMA สำหรับ WDMA นั้นจะต้องมีอุปกรณ์รับส่งเวฟเล็งท์จูนเนเบิล(wavelength-tunable) หรือเวฟเล็งท์สเตบิไลเซชัน(wavelength-stabilization) อีกอย่างก็คือทุกโหนดเมื่อต้องการส่งข้อมูลออกไปจะต้องส่งไปที่ศูนย์กลางเวฟเล็งท์(wavelength) ก่อน

นอกจากนั้นแล้ว CDMA ยังมีข้อดีอีกอย่างก็คือ มันเป็นการยากที่จะเกิดการรบกวนกันระหว่างสัญญาณปลายทางกับสัญญาณจากโหนดอื่น เนื่องจากว่ามันถูกเข้ารหัสไว้ ซึ่งนี่เป็นคุณลักษณะเฉพาะที่ทำให้ข้อมูลมีความปลอดภัย แต่ CDMA ก็ยังมีข้อเสียซึ่งพอสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การเข้าถึงหลายทางแบบนี้ต้องการแหล่งกำเนิดแสงที่สร้างพัลส์ขนาดอัลตราชอร์ต(ultrashort pulse) ในช่วงพิโกวินาทีหรือเฟมโตวินาที ถึงแม้ว่าสารกึ่งตัวนำประเภทเลเซอร์จะสร้างพัลส์ขนาดอัลตราชอร์ตได้ตามห้องวิจัยต่างๆ แต่ว่าอุปกรณ์บางอย่างเพิ่งเริ่มที่จะคิดค้นขึ้นมาและต้องใช้ความพยายามที่จะสร้างมันขึ้นมาได้อย่างแพร่หลายได้
2. ในการนำเสนอการเข้ารหัสและการถอดรหัสของ optical CDMA จะต้องใช้อุปกรณ์สวิตซ์ทางแสงที่ควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์และเส้นใยแก้วนำแสงชนิดหน่วงเวลา(optical delay line) ซึ่งเป็นผลให้ต้องใช้อุปกรณ์ที่ค่อนข้างใหญ่

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิจัยเกี่ยวกับการเข้าถึงหลายทางแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง โดยคำนึงถึงสัญญาณรบกวนที่มีอยู่ในเส้นใยแก้วนำแสงด้วยการเข้ารหัสแบบใหม่ ที่เรียกว่า  $2^n$  extended prime ซึ่งในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ที่ใช้ในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง
2. เพื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ที่ใช้ในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงนี้ในเชิงคณิตศาสตร์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์สมรรถนะของการเข้าถึงหลายทางแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงด้วยการใช้การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime โดยในการนำการเข้ารหัสแบบนี้มาใช้ก็เพื่อเป็นการปรับปรุงการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง เนื่องจากว่าก่อนหน้านี้ได้มีการวิจัยนำเอาการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime มาใช้ในการเข้าถึงหลายทางแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งการเข้ารหัสแบบนี้มีคุณสมบัติเงื่อนไขของสหสัมพันธ์ข้าม (cross correlation constraint) มีค่าเป็น 2 ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่บอกถึงประสิทธิภาพของระบบที่มีการแทรกสอดของผู้ใช้บริการในระบบ ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยพัฒนาตัวแปรนี้ให้มีค่าลดลงเหลือ 1 เพราะว่ามีผลทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น จากการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime จึงถูกพัฒนามาเป็นการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้ ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงเริ่มศึกษาโครงสร้างการทำงานของ การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime ก่อน จากนั้นค่อยมาศึกษาโครงสร้างการทำงานของ การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ต่อจากนั้นได้ทำการศึกษาสัญญาณรบกวนที่สำคัญที่มีอยู่ภายในเส้นใยแก้วนำแสง โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราจะคำนึงถึงเฉพาะสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน และสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่ APD หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีสัญญาณรบกวนภายในช่องสัญญาณ สุดท้ายได้ทำการวิเคราะห์ระบบที่มีอุปกรณ์ optical hard limiter ที่ติดตั้งไว้ที่ภาครับของระบบ ซึ่งตัวอุปกรณ์ optical hard limiter นี้จะเป็นตัวทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีขึ้น

## 1.4 โครงร่างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พูดถึงภาพรวมของการเข้าถึงหลายทางแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงในบทที่ 1 ส่วนพื้นฐานของการเข้าถึงหลายทางแบบ CDMA โดยทั่วไปรวมถึงการเข้าถึงหลายทางแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง และสัญญาณรบกวนที่สำคัญที่อยู่ภายในเส้นใย

แคว้นนำแสงจะกล่าวไว้ในบทที่ 2 ส่วนการเข้ารหัสแบบต่างๆที่ใช้ในการเข้าถึงหลายทางแบบ CDMA ในเส้นใยแคว้นนำแสงจะพูดถึงในบทที่ 3 และจะพูดรวมไปถึงอุปกรณ์ที่ช่วยทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น ซึ่งก็คืออุปกรณ์ optical hard limiter ด้วย สำหรับการวิเคราะห์ผลการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแคว้นนำด้วยการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime และประสิทธิภาพของระบบจะพูดถึงในบทที่ 4 และบทที่ 5 ตามลำดับ สำหรับบทที่ 6 จะเป็นการกล่าวสรุปผลของการวิจัยและข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงด้วยการเข้าถึงแบบ CDMA

### 2.1 บทนำ

ในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงจะใช้ความถี่พาหะทางแสงอยู่ในช่วง  $10^{13}$ - $10^{16}$  Hz ด้วยเหตุนี้ระบบเส้นใยแก้วนำแสงจึงมีศักยภาพของแบนวิidth สำหรับส่งสัญญาณมากกว่าระบบสายเคเบิลต่างๆ ไป จากที่ผ่านมามีการวิจัยทางด้านพัฒนาเส้นใยแก้วนำแสงในเครือข่ายท้องถิ่น (LAN) กันมากมายซึ่งเกี่ยวกับการทำให้การส่งข้อมูลมีอัตราการส่งที่สูงขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้งานในระบบสำนักงาน และทำให้การติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์สะดวกขึ้น LAN จำเป็นในการให้บริการด้านสัญญาณดิจิทัลซึ่งรองรับสัญญาณข้อมูล สัญญาณแพคเกจ สัญญาณเสียงและสัญญาณวิดีโอ การใช้ช่องสัญญาณนี้ถูกกำหนดคุณสมบัติโดยเบิสต์ทราฟฟิก(bursty traffic) สำหรับยืนยันการส่งข้อมูลในเวลาเดียวกันหลายสถานี โดยที่การเข้าถึงหลายทางแบบอะซิงโครนัสจะเหมาะสมกว่าแบบซิงโครนัส สำหรับการเข้าถึงหลายทางในโพรโทคอล (multiple access protocol) นั้นได้มีการพัฒนากันอย่างหลากหลาย ซึ่งเป็นการยอมให้ผู้ให้บริการหลายรายได้แบ่งกันใช้ช่องสัญญาณสื่อสาร เช่นการเข้าถึงแบบ TDMA, WDMA, CDMA หรือ SCMA เป็นต้น

สำหรับการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสหรือที่เรียกว่า CDMA นั้นเป็นเทคนิคแบบสเปกตรัม (spread spectrum) ซึ่งแต่เดิมการเข้าถึงแบบนี้ถูกใช้ในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมและระบบสื่อสารผ่านคลื่นไมโครเวฟ แต่ต่อมาได้นำมาประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง สำหรับจุดเด่นของการเข้าถึงแบบนี้ก็คือสามารถให้ผู้ให้บริการหลายรายเข้าใช้ช่องสัญญาณเดียวกันในเวลาเดียวกันโดยไม่รบกวนกันระหว่างผู้ใช้บริการแต่ละราย ปัจจุบันได้ถูกนำมาวิจัยและพัฒนาปรับปรุงใช้ในระบบ LAN

ในการเข้าถึงแบบ CDMA สามารถใช้ประโยชน์จากแบนวิidth ในช่องสัญญาณทางแสงเพื่อที่จะจัดเตรียมการเข้าถึงโดยผู้ใช้บริการหลายรายในเวลาเดียวกัน ซึ่งจะเห็นว่าการเข้าถึงแบบ CDMA นั้นสามารถที่จะให้ผู้ให้บริการจำนวน K รายเข้าถึงช่องสัญญาณได้ในเวลาเดียวกันก่อนที่การส่งแพ็คเกจ(packet) ข้อมูลจะเกิดการล้มเหลวจนเกิดการเสียหายได้ ความสามารถในการเข้าถึงแบบ CDMA นั้นจะรองรับผู้ใช้บริการจำนวน K รายในเวลาเดียวกัน โดยจะใช้หลักการโคเรลซีควেনสสเปกตรัม(direct sequence spread spectrum) ซึ่งทำให้สามารถรับความแตกต่างระหว่างลำดับ (sequence) ของสัญญาณและลำดับของการแทรกสอดของผู้ให้บริการแต่ละรายได้ การกำหนดลำดับโค้ดที่ออร์โธกอนัล(orthogonal code sequence) กันนั้นจะต้องสอดคล้องกับตำแหน่งของปลายทางถัดไป เพื่อการส่งแต่ละข้อมูลจะได้เพิ่มมากขึ้นในแบนวิidthของการส่ง

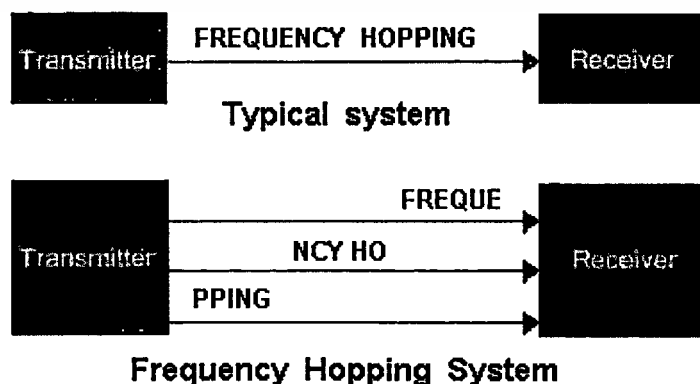
สัญญาณ แต่อย่างไรก็ตามแบนวิทท์ของช่องสัญญาณเส้นใยแก้วนำแสงยังสามารถทำให้ได้แบนวิทท์สัญญาณที่เพิ่มขึ้นด้วย ความสามารถในการเข้าถึงแบบ CDMA ที่รองรับผู้ใช้บริการจำนวน  $K$  รายในเวลาเดียวกัน ที่กล่าวมาแล้วนั้นยังทำให้ประสิทธิภาพของ delay/throughput ดีขึ้นด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับ การเข้าถึงแบบอื่นๆที่เคยกล่าวมาแล้ว ก่อนที่เราจะกล่าวถึงรายละเอียดของการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงต่อไป เราจะมากล่าวถึงรายละเอียดโดยทั่วไปของการเข้าถึงแบบ CDMA ก่อน โดยจะมีรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

## 2.2 หลักการเบื้องต้นของการเข้าถึงแบบ CDMA

ในการเข้าถึงแบบ TDMA และ FDMA จะใช้วิธีการจัดสรรคลื่นความถี่เป็นช่วงความถี่แคบๆสำหรับผู้ใช้บริการแต่ละคนในขณะที่การเข้าถึงแบบ CDMA ซึ่งเป็นระบบสเปกตรัมแผ่กระจายข้อมูลจะถูกส่ง (สเปกตรัม) ผ่านช่องสัญญาณพร้อมๆกับผู้ใช้บริการรายอื่นๆ เมื่อพิจารณาที่ผู้ใช้บริการแต่ละรายจะถือว่าสัญญาณของผู้ใช้บริการรายอื่นเป็นตัวแทรกสอด ดังนั้นจึงไม่จำกัดจำนวนของผู้ใช้บริการ ขึ้นอยู่กับว่าต้องการคุณภาพของระบบเท่าใด การทำสเปกตรัมแผ่กระจายยุคแรกๆมีจุดมุ่งหมายเพื่อนำมาใช้ทางด้านการทหารสำหรับป้องกันการรบกวนของศัตรู (enemy jamming) แต่ปัจจุบันนำมาใช้ทางพาณิชย์ การทำสเปกตรัมแผ่กระจายที่นิยมในปัจจุบันมี 2 วิธีคือ ฟรีควเอนซีฮอปปีง(Frequency hopping) และ ไคเร็กซีควเอน(Direct-sequence)

### 2.2.1 Frequency-hopping spread spectrum

การส่งสัญญาณกวน (Jamming) สามารถทำได้โดยส่งสัญญาณรบกวนที่มีกำลังสูงไปที่ความถี่ใดๆ ทำให้ที่ความถี่นั้นไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้ ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยส่งข้อมูลเป็นลักษณะแพ็คเก็ตที่ความถี่หนึ่ง สำหรับแพ็คเก็ตต่อมา ก็ส่งอีกความถี่หนึ่ง เป็นลักษณะนี้ไปเรื่อยๆ โดยที่ลำดับการเลือกความถี่จะเป็นไปตามลำดับเทียม (pseudorandom sequence) โดยเรียกลำดับนี้ว่าลำดับฟรีควเอนซีฮอปปีง โดยที่ลำดับของผู้ใช้บริการแต่ละรายจะไม่เหมือนกัน ลักษณะการส่งข้อมูลจะแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1

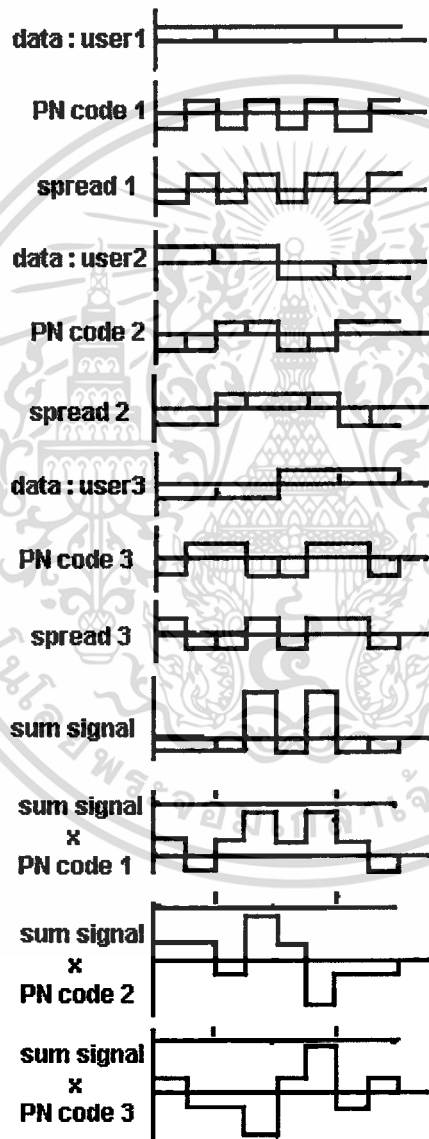


รูปที่ 2.1 รูปแบบระบบ Frequency Hopping

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 Direct-sequence spread spectrum

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงแนวคิดพื้นฐานของการทำสเปกตรัมแบบ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) แบบไครเรทซ์ที่ค่อนข้างง่ายเพื่อให้เข้าใจระบบ CDMA สมมติระบบที่เราสนใจมีผู้ใช้บริการ 3 ราย แต่ละรายได้รับรหัส PN ที่แตกต่างกัน ก่อนที่ผู้ใช้แต่ละคนจะส่งข้อมูลออกจะนำบิตข้อมูลเหล่านั้นไปสเปกตรัม โดยการนำบิตข้อมูลไปคูณกับรหัส PN ของตนเองทำให้มีอัตราบิต (bit rate) สูงขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้ก็คือข้อมูลที่ส่งจะมีอัตราการส่งสูงกว่าข้อมูลจริงมาก ด้วยเหตุนี้จึงเรียกว่ามีการสเปกตรัม และแบนด์วิธของช่องสัญญาณก็ต้องมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.2



Example of spread spectrum

รูปที่ 2.2 รูปแบบสเปกตรัมด้วยวิธี Direct sequence

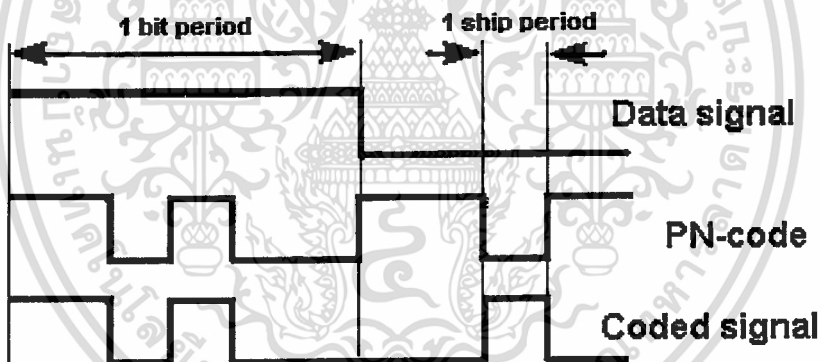
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้ผู้ใช้บริการหมายเลข 1, 2 และ 3 ส่งข้อมูล 11, 10 และ 01 ตามลำดับ สัญญาณที่ทำการสเปรดแล้วทั้ง 3 สัญญาณนี้จะถูกส่งออกไปบนคลื่นความถี่เดียวกัน ซึ่งหมายความว่าที่ภาครับจะได้รับสัญญาณที่เป็นผลรวมของ 3 สัญญาณรวมกัน สำหรับขั้นตอนในการแยกสัญญาณแต่ละรายสามารถทำได้โดยนำรหัส PN ของตัวเอง ไปคูณกับสัญญาณที่รับได้และบวกระดับสัญญาณแต่ละชิพ(chip) จนเท่ากับความยาวของบิตข้อมูลเดิม (ตามรูปคือ 4 บิต) โดยที่ผลรวมระดับสัญญาณจะบอกถึงข้อมูล นอกจากนี้สัญญาณที่สเปรดออกด้วยรหัส PN ชุดหนึ่งจะไม่สามารถตีสเปรด (despread) ออกด้วยรหัส PN ชุดอื่น ซึ่งทำให้เราสามารถส่งสัญญาณของผู้ใช้บริการหลายรายลงบนคลื่นพาห่ความถี่เดียวกันได้

## 2.3 องค์ประกอบของระบบ CDMA

### 2.3.1 Chip Rate

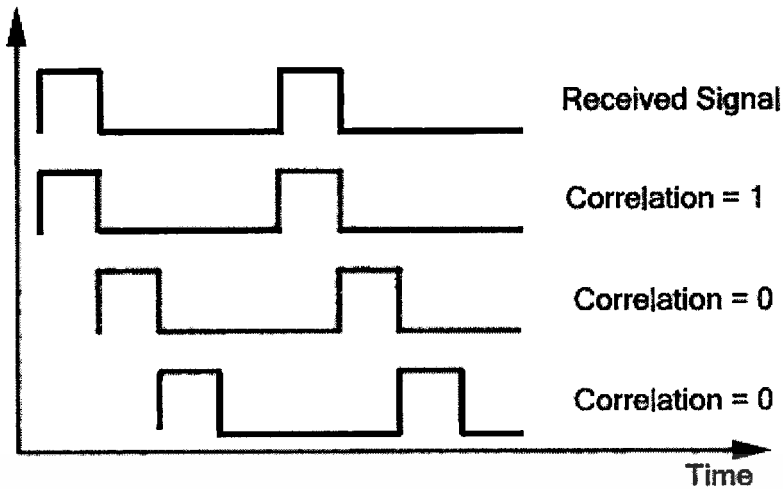
เมื่อนำข้อมูลที่มีอัตราบิตค่าหนึ่ง มาคูณกับรหัส PN จะทำให้สัญญาณใหม่ที่ได้มีอัตราบิตสูงขึ้น และเรียกอัตราบิตใหม่ที่สูงขึ้นนี้ว่าชิพบิต (Chip rate) โดยที่  $\text{Chip rate} = 1/\text{Chip period}$



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างของชิพบิต

### 2.3.2 Correlation

เป็นตัววัดว่าสัญญาณที่ได้รับมาตรงกับสัญญาณที่ต้องการมากขนาดไหน หากค่าสหสัมพันธ์(correlation)=1 แสดงว่าสัญญาณที่รับเข้ามากับสัญญาณที่ต้องการนั้นตรงกันพอดี และค่าสหสัมพันธ์นี้จะลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งเป็นศูนย์เมื่อเวลาผ่านไปตามรูปที่ 2.4

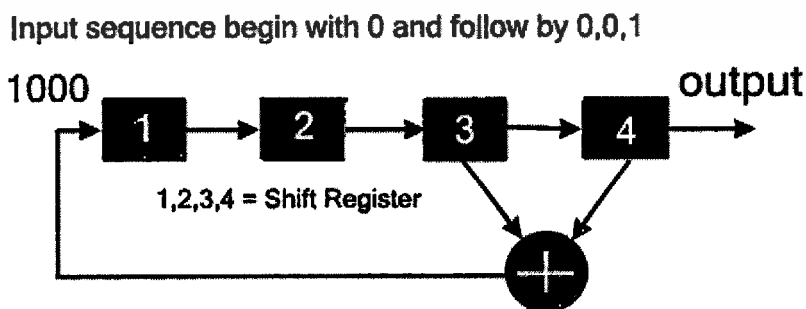


รูปที่ 2.4 รูปแบบของการสับสนพันธ์

นำความสัมพันธ์นี้ไปใช้ในระบบ CDMA ได้เช่น ใช้ชิพรีจิสเตอร์(Shift register) จำนวน 15 ตัว ในการสร้างรหัสที่มีความยาวเท่ากับ 32,768 ชิพ (2 ยกกำลัง 15 แล้วลบด้วย 1) สถานีฐานแต่ละแห่งจะใช้วงจรสร้างรหัสแบบเดียวกัน แต่จะมีการเลื่อนชิพของลำดับสัญญาณออกไปทีละ 64 ชิพ ดังนั้นจะมีรหัสที่แตกต่างกันสำหรับใช้งานได้ทั้งหมด  $32,768/64=512$  ชุดสำหรับใช้ระบุหมายเลขประจำตัวของสถานีฐานได้มากถึง 512 แห่ง เมื่อนำสัญญาณที่รับได้มาหาค่าสหสัมพันธ์กับรหัสที่มีก็จะรู้ว่าเป็นสัญญาณที่ส่งมาจากสถานีฐานใด

### 2.3.3 Generate Code

รูปที่ 2.5 แสดงวงจรการสร้างรหัสโดยใช้ชิพรีจิสเตอร์ 4 ตัว และวงจรวกเลขฐาน 2 วงจรนี้สามารถสร้างลำดับสัญญาณที่มีความยาวเท่ากับ 15 ชิพ (2 ยกกำลัง 4 ลบด้วย 1) เมื่อให้ค่าเริ่มต้นของชิพรีจิสเตอร์แต่ละตัวเท่ากับ 0 และอินพุตเท่ากับ 0 0 0 และ 1 ตามลำดับ จะได้ชุดรหัสทั้งหมด 15 ชุดตามตาราง



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของการสร้างโค้ด

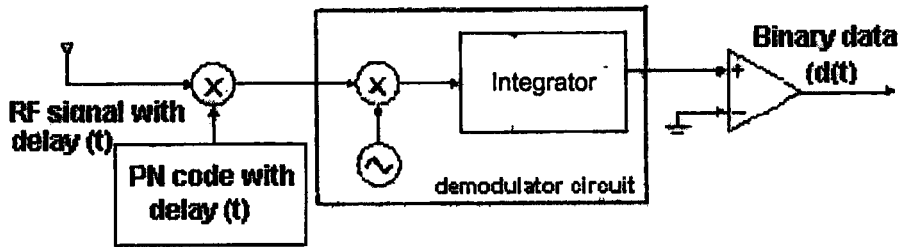
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงการเลื่อนบิตของลำดับสัญญาณ 15 ครั้ง

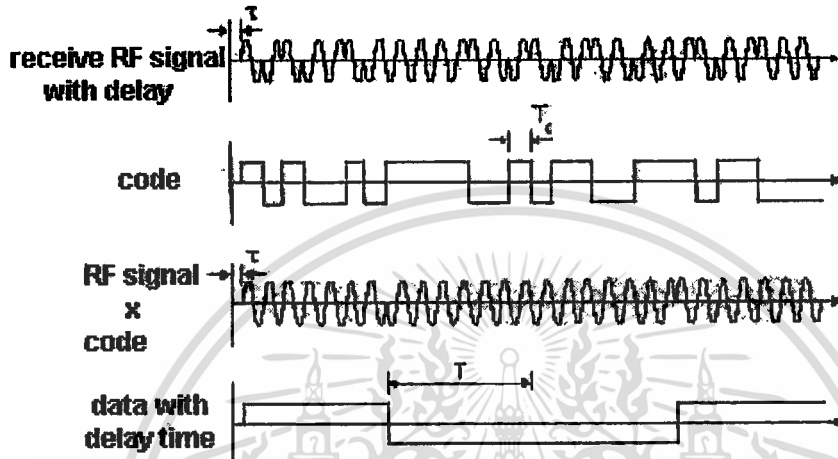
จำนวนchip ที่เลื่อนออกจากกัน	ลำดับสัญญาณ(Output)
0	000100110101111
1	100010011010111
2	110001001101011
3	111000100110101
4	111100010011010
5	011110001001101
6	101111000100110
7	010111100010011
8	101011110001001
9	110101111000100
10	011010111100010
11	001101011110001
12	100110101111000
13	010011010111100
14	001001101011110
15	000100110101111

#### 2.3.4 วงจรภาครับของระบบโคเรกซีแควนที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK

ในการดึงสัญญาณข้อมูล  $d(t)$  ออกจากสัญญาณ RF ที่รับได้และสัญญาณนี้จะมี Propagation delay ( $t$ ) ค่าหนึ่ง สามารถตีสเปรตได้โดยนำ  $c(t-t)$  มาคูณกับสัญญาณที่รับได้ จากนั้นนำไปตีมอดูเลเตอร์ โดยผ่านวงจรคูณและวงจรมอดูเลเตอร์ ให้สังเกตว่าวงจรภาครับจะต้องประมาณค่าการหน่วงเวลาให้ใกล้เคียงที่สุด



**Direct Sequence RF signal received Circuit  
with BPSK Demodulator**



**รูปที่ 2.6** รูปแบบวงจรและสัญญาณของระบบภาครับของ Direct Sequence

#### 2.4 หลักการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้พูดถึงการเข้าถึงแบบ CDMA โดยทั่วไป สำหรับในหัวข้อนี้จะมี การพูดถึงการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงว่ามีหลักการทางานและ โครงสร้างของระบบ เป็นอย่างไร

ในการประยุกต์การเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นสามารถกระทำได้ 2 วิธีคือ

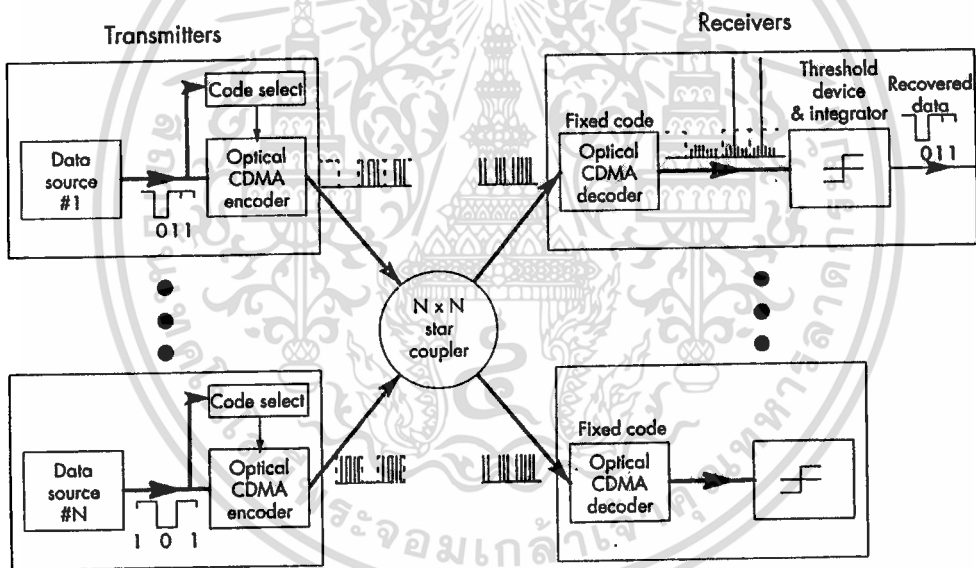
1. จะใช้เส้นใยแก้วนำแสงสำหรับส่งสัญญาณสื่อสารเท่านั้น ดังนั้นขบวนการเข้ารหัสจะถูกกระทำในรูปแบบสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นจะทำการเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณไฟฟ้าที่ได้นี้ไปอยู่ในรูปแบบสัญญาณแสงสำหรับส่งออกไปในเส้นใยแก้วนำแสง ส่วนทางด้านภาครับจะรับสัญญาณแสงเข้ามาและทำการเปลี่ยนกลับให้อยู่ในรูปแบบสัญญาณไฟฟ้าตามเดิม ก่อนที่จะผ่านขบวนการถอดรหัส สำหรับวิธีนี้จะมีการเข้ารหัสแบบ Gold sequence หรือ m-sequence รูปแบบโครงสร้างวิธีนี้จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าปรากฏการณ์คอขวดอิเล็กทรอนิกส์-ออฟติค (electronic-optic bottleneck) ทั้งทางด้านที่เข้ารหัสและถอดรหัส ซึ่งปรากฏการณ์นี้เป็นตัวจำกัดการใช้งานแบนด์วิธของระบบการสื่อสารทางแสง

2. วิธีนี้ทั้งทางด้านเข้ารหัสและถอดรหัสจะผ่านขบวนการทางแสง ดังนั้นจะลดปัญหาที่ เกิดจากปรากฏการณ์คอขวดออกไป

ถ้าพูดถึงระบบที่มีขบวนการเข้ารหัสและถอดรหัสทางแสง ด้วยการเข้ารหัสแบบ  $m$ -sequence หรือ Gold sequence การเข้ารหัสแบบนี้จริงๆแล้วมันถูกออกแบบมาสำหรับขบวนการทางไฟฟ้า ซึ่งไม่เหมาะสำหรับการสเปรด์โค้ดในขบวนการทางแสง เพราะว่าการเข้ารหัสแบบนี้จะมีส่วนของเนกะทีฟซึ่งเป็นโคเมนทางไฟฟ้า แต่ในโคเมนทางแสงจะต้องไม่มีส่วนของเนกะทีฟอยู่ ดังนั้นต่อมาจึงได้มีการคิดค้นวิธีการเข้ารหัสวิธีใหม่ขึ้นมา โดยจะต้องเป็นโคเมนทางแสง และต้องมีคุณสมบัติออธอโกนัลกันระหว่างรหัส

#### 2.4.1 รูปแบบพื้นฐานของการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง

จากรูปที่ 2.7 เป็นเครือข่ายของระบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งโหนดถูกต่อเข้าด้วยกันโดยผ่านตัวเชื่อมต่อ(coupler)ชนิด  $N \times N$  แบบดาว ที่ทางด้านตัวส่ง ข้อมูลบิต "1" จะถูกเข้ารหัสทางแสงให้กลายเป็นลำดับพัลส์ทางแสงที่มีอัตราพัลส์สูงมาก สำหรับข้อมูลบิต "0" จะไม่ถูกเข้ารหัสดังนั้นลำดับพัลส์จะกลายเป็นศูนย์ทั้งหมด



รูปที่ 2.7 เครือข่ายของระบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง

สัญญาณที่เข้ารหัสแล้วจะถูกเชื่อมต่อไปยังเส้นใยแก้วนำแสงชนิดซิงเกิลโหมด(single-mode fiber) และกระจายไปสู่โหนดต่างๆที่อยู่ในเครือข่าย ในลำดับพัลส์จะมีรหัสเฉพาะในแต่ละโหนดไม่เหมือนกัน ซึ่งเป็นตัวบอกตำแหน่งที่อยู่ของโหนดต่างๆ การส่งข้อมูลจากโหนด  $j$  ไปยังโหนด  $k$  นั้นรหัสของโหนด  $k$  จะถูกเข้ารหัสกับข้อมูลของโหนด  $j$  สำหรับเครือข่ายที่มีจำนวนผู้ใช้บริการอยู่  $n$  ราย เราสามารถเขียนสมการของผู้ใช้บริการทั้งหมดในเครือข่ายได้ดังนี้

$$s_n(t) = P b_n(t) c_n(t) \quad 0 \leq t \leq T = FTc \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ซึ่ง  $P$  คือพลังงานแสงเลเซอร์ทางค้ำรับ  
 $b_n(t)$  คือข้อมูลทางไบนารีของผู้ใช้บริการที่  $n$  ใดๆ  
 $c_n(t)$  คือลำดับโค้ดที่จะนำมาเข้ารหัสกับข้อมูลทางไบนารีของผู้ใช้บริการที่  $n$  ใดๆ  
 $T_c$  คือช่วงเวลาของชิพ(chip time)  
 $F$  คือความยาวของลำดับโค้ด  
 $T$  คือช่วงเวลาของลำดับโค้ด

สำหรับรหัสที่นำมาเข้ารหัสกับสัญญาณข้อมูลในแต่ละโหนดนั้นเราสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$c_n(t) = \sum_{j=1}^F c_n(j) P_{T_c}(t - jT_c) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2.2)$$

- ซึ่ง  $C_n(j)$  เท่ากับ 0 หรือ 1 โดยที่  $j$  อยู่ในช่วง 1 ถึง  $F$   
 $P_{T_c}$  คือพัลส์ในช่วงเวลา  $T_c$  ซึ่งเราจะเรียกว่าชิพ(chip)

ผลรวมของบิต “1” ในลำดับโค้ด(code sequence) เราจะเรียกว่าน้ำหนักโค้ด (code weight) ซึ่งแทนค่านี้ด้วย  $K$  ส่วนทางค้ำรับจะรับสัญญาณรวมทั้งหมดที่มีอยู่ในเครือข่ายและทำให้การสหสัมพันธ์กับลำดับโค้ดของเครื่องรับ ซึ่งสัญญาณรวมที่รับเข้ามาจะมีรูปแบบสมการดังต่อไปนี้

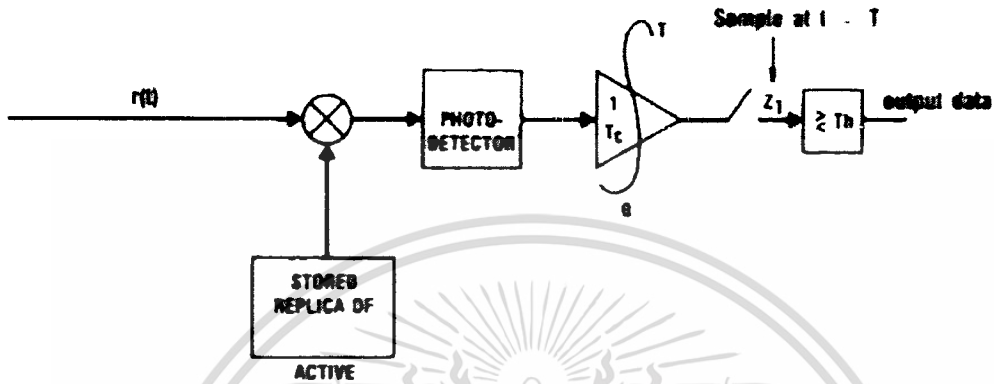
$$r(t) = \sum_{n=1}^N s_n(t - \tau_n) \quad (2.3)$$

- ซึ่ง  $s_n(t - \tau_n)$  จะต้องสัมพันธ์กับเครื่องรับ  
 และ  $\tau_n$  เป็นค่าหน่วงเวลาใดๆจากเครื่องส่งมายังเครื่องรับ

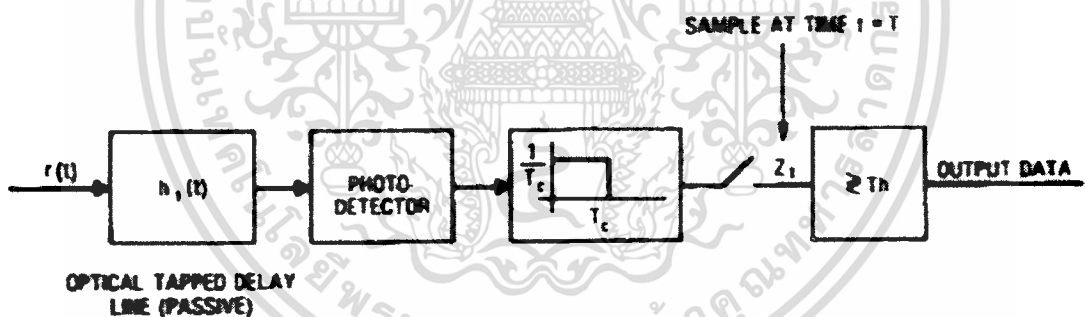
ส่วนโหนดทางค้ำรับจะต้องทำขบวนการสหสัมพันธ์กับสัญญาณรวมทั้งหมดที่ผ่านเข้ามาที่เครื่องรับ โดยที่เราสมมติว่าโหนดทางค้ำรับเป็นโหนด 1 และหลังจากที่ทำการสหสัมพันธ์เสร็จเรียบร้อยแล้วก็จะได้สัญญาณที่มีลักษณะดังสมการที่ 2.4 สำหรับรูปที่ 2.8 a) เป็นรูปของตัวออกพิดคอลลอเรเตอร์(optical correlator) ที่โหนด 1 และรูปที่ 2.8 b) แสดงบล็อกของออกพิดคอลลเมทซ์ฟิลเตอร์(optical match filter) ซึ่ง  $z_1$  เป็นเอาต์พุตของทั้งสองรูปที่เวลา  $t=T$  และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.5

$$z_1(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} r(t) \cdot s_1(t - \tau_n) \quad (2.4)$$

$$z_1 = \frac{1}{T_c} \int_0^T r(t) c_1(t) dt \quad (2.5)$$



a) รูปแบบโครงสร้างของตัว optical correlator ที่ใช้ในภาครับของระบบ



รูปที่ 2.8 b) บล็อกไดอะแกรมของ optical matched filter

## 2.5 สัญญาณรบกวนในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีการเข้าถึงแบบ CDMA

ในที่นี้เราจะพูดถึงสัญญาณรบกวน(noise)ที่มีอยู่ทางด้านรับของเส้นใยแก้วนำแสง ถ้าพูดถึงถึงสัญญาณรบกวนแล้ว จะมีอยู่ทุกที่ทุกเวลาขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อม ในระบบสื่อสารก็เหมือนกันไม่สามารถหลีกเลี่ยงจากสัญญาณรบกวนได้ สัญญาณรบกวนเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงสำหรับประสิทธิภาพของเครื่องรับในระบบสื่อสาร จำนวนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในตัวเครื่องรับจะเป็นปัจจัยพื้นฐาน ซึ่งเป็นตัวกำหนดความสามารถของเครื่องรับ ในหัวข้อนี้เราจะพูดถึงสัญญาณรบกวนทั่วไปที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 พื้นฐานของสัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวนเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในระบบการสื่อสาร ซึ่งเป็นตัวรบกวนระบบและยังเป็นตัวลดทอนรายละเอียดของข้อมูลระหว่างการสื่อสารด้วย สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่ทางด้านรับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้ดังนี้

1. สัญญาณรบกวนอินทรินซิก (intrinsic noise) เกิดจากผลทางกายภาพพื้นฐานในตัวอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์และอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ภายในเครื่องรับ
2. สัญญาณรบกวนเชื่อมร่วม (coupled noise) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างวงจรกับสถานะแวดล้อมของเครื่องรับ

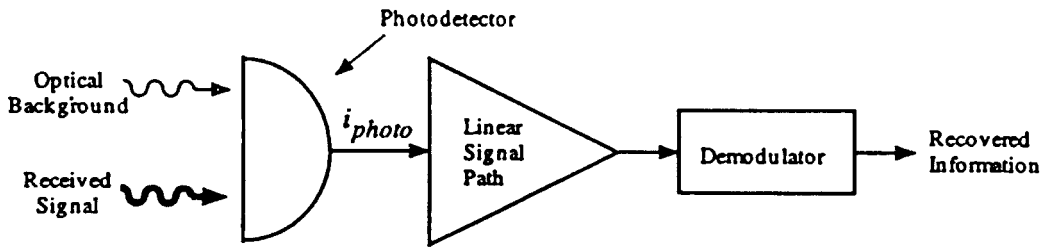
ตัวอย่างของสัญญาณรบกวนอินทรินซิกก็คือสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน(thermal-noise) ที่อยู่ในตัวต้านทาน สัญญาณรบกวนแบบช็อต (shot-noise) ทางอิเล็กทรอนิกส์และสัญญาณรบกวนเชิงความร้อนในตัวทรานส์ดีวเซอร์ และสัญญาณรบกวนแบบช็อตชนิดควอนตัมในตัวโฟโตดีเทกเตอร์ สัญญาณรบกวนทั้งหมดที่กล่าวมานี้จะถูพบในเครื่องรับทางแสง สำหรับสัญญาณรบกวนเชื่อมร่วมจะเกิดจากแสงอาทิตย์ รังสีคอสมิก หรือการรบกวนจากชั้นบรรยากาศ ที่อยู่ใกล้กับสายส่งสัญญาณ แหล่งจ่ายไฟ เป็นต้น สัญญาณรบกวนแบบนี้จะลดประสิทธิภาพของเครื่องรับในรูปแบบของการแทรกสอดหรือการไขว้แทรก (crosstalk) ที่วงจร จำนวนของสัญญาณรบกวนเชื่อมร่วมที่เกิดขึ้นที่เครื่องรับนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งทางกายภาพ และการวางวงจรของเครื่องรับที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นในการออกแบบเครื่องรับจะต้องทำการป้องกันให้ดี สัญญาณรบกวนเชื่อมร่วมมันมีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวนอินทรินซิก

มีตัวรบกวนระบบอีกชนิดหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณรบกวนเรียกว่าไมโครโฟนิกส์ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนทางกล ส่วนใหญ่แล้วเครื่องรับทางแสงจะมีผลจากการสั่นสะเทือนทางกล ทั้งจากพัดลมทำความเย็นให้กับแหล่งจ่ายไฟ อยู่ติดกับถนน หรือจากการเคลื่อนที่ของวัตถุที่อยู่ในตัวเครื่องรับเอง ไมโครโฟนิกส์จะเกิดขึ้นในตัวเครื่องรับทางแสงซึ่งมันจะปรับวงจรให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่มีความไวในการตอบสนอง ไมโครโฟนิกส์จะเกิดขึ้นถ้ามีการสะท้อนกลับจากผิวโฟโตดีเทกเตอร์และเส้นใยแก้วนำแสงขาเข้า ในการส่งแบบโพรงเรโซแนนซ์จะมีความไวต่อการสั่นสะเทือน ซึ่งแน่นอนว่าสิ่งที่เกิดขึ้นจะนำไปสู่สัญญาณรบกวนในเครื่องรับ ไมโครโฟนิกส์ที่เกิดขึ้นนี้มีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวนอินทรินซิก

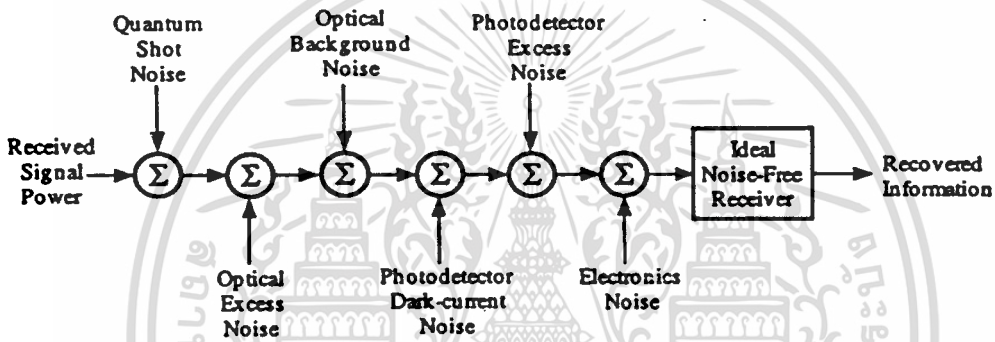
### 2.5.2 สัญญาณรบกวนที่เครื่องรับทางแสง

จากรูป 2.9 a) แสดงแบบจำลองของเครื่องรับทางแสง สัญญาณที่รับเข้ามาและองค์ประกอบทางแสงต่างๆจะเข้ามาที่โฟโตดีเทกเตอร์ ต่อจากนั้นจะเข้าไปที่ภาคขยายในรูปแบบของสัญญาณเชิงเส้น ที่ภาคคิมอดูเลเตอร์นั้นสัญญาณจะถูกขยายและคืนรูปสัญญาณกลับมาเป็นสัญญาณข้อมูลที่ส่งมาจากเครื่องส่ง ส่วนรูป 2.9 b) จะแสดงสัญญาณรบกวนหลัก 6 ตัวที่เกิดขึ้นทางเครื่องรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) แบบจำลองของเครื่องรับทางแสง



รูปที่ 2.9 b) สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่เครื่องรับ

สัญญาณรบกวนทั้ง 6 ตัวประกอบไปด้วย 1) quantum shot-noise, 2) optical excess noise, 3) optical background noise, 4) photodetector dark-current noise, 5) photodetector excess noise และ 6) electronics noise แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพูดถึงเฉพาะสัญญาณรบกวนที่เกิดจาก thermal noise ซึ่งมีอยู่ในตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และตัวโฟโตนิกเทคเตอร์ และ APD noise ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดของสัญญาณรบกวนทั้งสองแบบนี้ในหัวข้อถัดไป

### 2.5.3 สัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (Thermal noise)

สัญญาณรบกวนเชิงความร้อนหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Johnson noise เป็นผลของการเปลี่ยนแปลงความร้อนในการประจุคลื่นพาห์ในตัวต้านทาน สำหรับเครื่องรับจะมีสัญญาณรบกวนแบบนี้อยู่มาก คลื่นพาห์จะมีการเคลื่อนที่แบบสุ่มในตัวต้านทานทั้งหมดที่อุณหภูมิมากกว่าศูนย์ จำนวนการเคลื่อนที่จะเป็นในรูปแบบฟังก์ชันของอุณหภูมิของตัวต้านทาน ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (power spectral density) สำหรับสัญญาณรบกวนเชิงความร้อนเป็นหัวใจสำคัญของ white noise สำหรับความถี่ที่สูงขึ้นไปจนถึงความถี่อินฟราเรด และสัญญาณรบกวนเชิงความร้อนเป็นผลมาจากการสะสมผลของจำนวนประจุแต่ละตัวที่เคลื่อนที่ ซึ่งมันจะแสดงสถิติแบบเกาส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าแรงดัน RMS ที่เกิดจากตัวต้านทาน R ที่เป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนเชิงความร้อนจะมีรูปแบบสมการที่ 2.6

$$v_n = \sqrt{4kTBR} \text{ (volts rms)} \tag{2.6}$$

ซึ่ง  $k$  คือค่าคงที่ Boltzmann's ( $1.379 \times 10^{-23}$  joules/ $^{\circ}$ K)

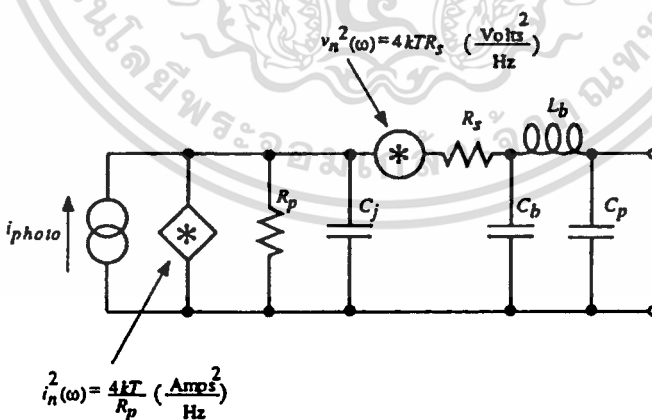
$T$  คืออุณหภูมิในหน่วย  $^{\circ}$ K

$B$  คือแบนด์วิดท์ในหน่วย Hz

สัญญาณรบกวนเชิงความร้อนจะเกิดขึ้นในตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีตัวต้านทานประกอบอยู่ทั้งหมดซึ่งมันจะกระจายพลังงาน แต่จะไม่เกิดในตัวต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงเวลา มันจะเกิดเฉพาะอุปกรณ์แบบแอคทีฟเท่านั้น

### 2.5.4 สัญญาณรบกวนเชิงความร้อนที่โฟโอดีเทกเตอร์

เมื่อสัญญาณรบกวนเชิงความร้อนมีอยู่ในอุปกรณ์ที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด ซึ่งมันจะอยู่ในรูปของตัวต้านทาน ดังนั้นจึงมีสัญญาณรบกวนเชิงความร้อนเกิดขึ้นที่ตัวต้านทานที่อยู่ภายในตัวโฟโอดีเทกเตอร์ด้วย มันจะเป็นความต้านทานแบบขนาน  $R_p$  ความต้านทานแบบอนุกรม  $R_s$  สัญญาณรบกวนที่สัมพันธ์กับตัวต้านทานเหล่านี้สามารถแสดงรายละเอียดเป็นสัญญาณรบกวนเชิงกระแสในรูปแบบขนาน  $R_p$  และสัญญาณรบกวนเชิงแรงดันในรูปแบบอนุกรม  $R_s$  ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 สัญญาณรบกวนเชิงความร้อนที่อยู่ในโฟโอดีเทกเตอร์

ผลของสัญญาณรบกวนเชิงความร้อนที่โฟโอดีเทกเตอร์จะมีผลกระทบมาจากการต่อโฟโอดีเทกเตอร์อย่างไร ในตัวโฟโอดีไดโอด ตัวต้านทานแบบขนานก็คือตัวต้านทานที่เกิดจากรอยต่อ

และตัวต้านทานแบบนี้มีค่ามาก ซึ่งตัวมันและตัวที่สัมพันธ์กับสัญญาณรบกวนเชิงกระแสสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้องกันได้ สำหรับตัวต้านทานแบบอนุกรมคือตัวต้านทานที่เกิดจากหน้าสัมผัสของสารกึ่งตัวนำ และเป็นตัวต้านทานแบบอนุกรมที่เกิดที่จุดต่อสายไฟและจุดเชื่อมในวงจร ตัวต้านทานแบบนี้มีค่าน้อยกว่า 10 โอห์ม ในตัวนำพลังแสง (photoconductor) ตัวต้านทานแบบขนานจะนำเสนอการรวมตัวของค่าความนำที่เหลือและค่าการนำพลังแสงให้เปลี่ยนค่าความนำของสารกึ่งตัวนำ และมันมีความสำคัญต่อการสนับสนุนประสิทธิภาพสัญญาณรบกวน สำหรับตัวต้านทานแบบอนุกรมนั้นตัวต้านทานที่เกิดจากหน้าสัมผัสโดยทั่วไปแล้วจะถูกตัดทิ้ง ตัวต้านทานแบบอนุกรมที่เหลือจะลดน้อยลงในค่าความนำที่เหลือ ค่าความนำทั้งหมดของตัวนำพลังแสงขึ้นอยู่กับจำนวนของความสว่าง ดังนั้นจำนวนของสัญญาณรบกวนเชิงความร้อนจะขึ้นอยู่กับความสว่างด้วย

### 2.5.5 สัญญาณรบกวนใน APD

ขบวนการ avalanche multiplication ในตัว APD จะให้ผลในการกำเนิดมัลติจูด(multitude) ของคลิ่นพาห์พลังแสง(photocarrier)ในแต่ละโฟตอนซึ่งมันถูกคูณคลิ่น เมื่อกระแสพลังแสงคงที่ ถูกขยายโดยกระแส multiplication factor  $M$  กำลังงานสัญญาณ DC จะเท่ากับกำลังสองของค่าเฉลี่ยของกระแสพลังแสง DC คูณกับกำลังสองของค่าคาดหวังของ multiplication ดังสมการ

$$P_s = i_{DC}^2 E\{M\}^2 \quad (2.7)$$

สำหรับกำลังงานของสัญญาณรบกวนถูกกำหนดโดยค่าความแปรปรวนในกระแสพลังแสง โดยที่สัญญาณรบกวนแบบควอนตัมร็ช็อต(quantum shot noise)คูณกับกำลังสองของมัลติพลีเคชัน (multiplication) ดังสมการ

$$P_n = 2qi_{DC}E\{M^2\}B \quad (2.8)$$

ดังนั้นค่า SNR หลังจากการทำมัลติพลีเคชันจะมีค่าเป็นดังสมการ

$$SNR = \frac{P_s}{P_n} = \frac{i_{DC}^2 E\{M\}^2}{2qi_{DC}E\{M^2\}B} = \frac{i_{DC}}{2qi_{DC}B} \times \frac{E\{M\}^2}{E\{M^2\}} \quad (2.9)$$

สำหรับขบวนการทำ noise-free multiplication กำลังสองของค่าคาดหวังเท่ากับค่าคาดหวังของกำลังสอง และค่า SNR หลังจากการทำมัลติพลีเคชันจะเป็นตัวบ่งบอกค่า SNR ก่อนการทำมัลติพลีเคชัน กำลังสัญญาณและกำลังสัญญาณรบกวนจะถูกขยายโดย  $M^2$

ขบวนการทำ avalanche multiplication ในตัว APD คือสถิติทางธรรมชาติ ปริมาณของคลิ่นพาห์ทางไฟฟ้าที่ให้ผลจากการคูณคลิ่นของโฟตอนเดี่ยวจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ในการคูณคลิ่นโฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอน, ชนิดของคลื่นพาห้(โฮล์หรืออิเล็กตรอน) ขนาดของสนามไฟฟ้า ความหนาแน่นในการโคปของสารกึ่งตัวนำ และเส้นทางที่คลื่นพาห้จะเดินทางผ่านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทั้งหมดนี้มันจะให้ผลเป็นค่าเฉลี่ยของกำลังสองมากกว่ากำลังสองของค่าเฉลี่ย และค่า SNR หลังจากการทำมัลติพลีเคชั่นจะน้อยกว่าก่อนทำมัลติพลีเคชั่น เราสามารถแสดงรายละเอียดของการลดลงของค่า SNR เนื่องจากการทำมัลติพลีเคชั่น โดยปรับปรุงจากสมการที่ 2.8 คือ

$$P_n = 2q i_{DC} M^2 F(M) B \quad (2.10)$$

ซึ่ง  $M$  คือค่าคาดหวังของมัลติพลีเคชั่น

$F(M)$  คือแฟกเตอร์ของสัญญาณรบกวนซึ่งกำหนดเป็น  $E\{M^2\}$  ต่อ  $E\{M\}^2$

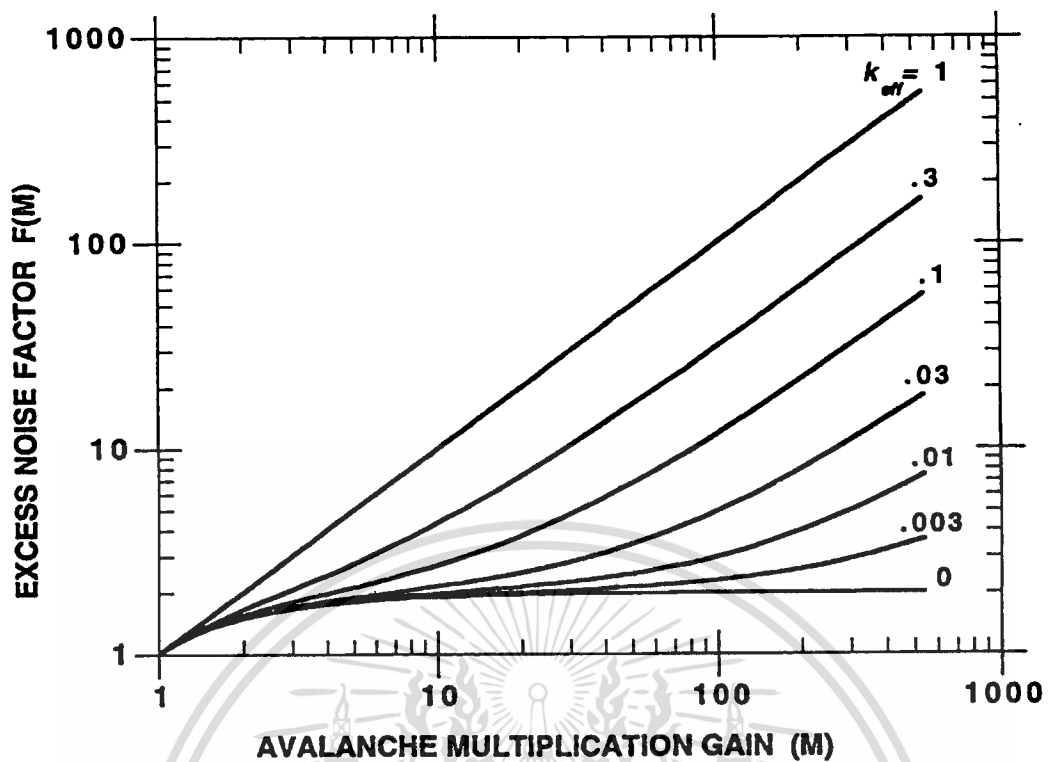
ค่าแฟกเตอร์ของสัญญาณรบกวนขึ้นอยู่กับวัสดุสารกึ่งตัวนำของ APD ทั้งโฮล์และอิเล็กตรอนที่เป็นคลื่นพาห้ที่มาจากการสร้างไอออน, และสนามไฟฟ้าใน APD สัญญาณรบกวนจะไวต่ออัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การสร้างไอออนสำหรับอิเล็กตรอนและโฮล์ มันจะมีค่าน้อยที่สุดในอุปกรณ์ที่ใช้เป็นคลื่นพาห้ที่มาจากการสร้างไอออนเท่านั้น และมันจะมีค่ามากที่สุดในอุปกรณ์ที่ทั้งโฮล์และอิเล็กตรอนผลิตไอออนเช่นกัน แฟกเตอร์ของสัญญาณรบกวนสามารถเขียนเป็นสมการในเทอมของสัมประสิทธิ์การสร้างไอออน  $k_{eff}$  และค่าเฉลี่ยของมัลติพลีเคชั่น

$$F(M) = k_{eff} M + (1 - k_{eff}) \left( 2 - \frac{1}{M} \right) \quad (2.11)$$

ในสมการที่ 2.11 อาจเขียนได้ใหม่เป็น

$$F(M) \cong M^x \quad (0.1 < x < 1.0) \quad (2.12)$$

ในรูปที่ 2.11 แสดงแฟกเตอร์ของสัญญาณรบกวนของสมการที่ 2.11 สำหรับช่วงของแฟกเตอร์มัลติพลีเคชั่นและอัตราส่วนประสิทธิผลของการสร้างไอออน



รูปที่ 2.11 สัญญาณรบกวนใน APD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การเข้ารหัสแบบต่างๆที่ใช้ในการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ด้วยการเข้าถึงแบบ CDMA

### 3.1 บทนำ

จากบทที่ที่ผ่านมา เราพอทราบมาแล้วว่าการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงมีลักษณะเป็นอย่างไร สำหรับบทนี้เราจะพูดถึงการเข้ารหัสที่ใช้การเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งแต่เดิมรหัสที่ใช้ในการเข้าถึงแบบนี้ได้แก่ gold code และ m-sequence เป็นต้น รหัสทั้งสองตัวนี้จะมีส่วนของโพลีทอปและเนกะทอป ซึ่งจริงๆแล้วในการเข้ารหัสทางแสงจะต้องไม่มีส่วนของเนกะทอปเลย ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นวิจัยการเข้ารหัสทางแสง โดยอาศัยระบบการตรวจสอบทางตรง (direct detector) ซึ่งสัญญาณจะมีส่วนประกอบเป็น “1” และ “0” ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการเข้ารหัสทางแสงอยู่ 4 ชนิด คือ 1) OOC, 2) prime code, 3)  $2^n$  prime code, 4)  $2^n$  extended prime code รหัสทั้ง 4 ชนิดนี้เราได้ศึกษาเพื่อนำมาทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.2 OOC

ย่อมาจาก optical orthogonal code คือรหัสที่ใช้พัฒนานำมาใช้ในการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งจะต้องมีคุณสมบัติสหสัมพันธ์ต่อไปนี้

1. แต่ละรหัสจะต้องมีค่าพีคของอัตสหสัมพันธ์สูงมากๆ

$$\sum_{j=0}^{F-1} C_n(j)C_n(j) = K \gg 0 \quad (3.1)$$

ซึ่ง  $K$  คือ จำนวนบิต “1” ในลำดับโค้ด ซึ่งเรียกว่าน้ำหนักโค้ด (code weight)

2. แต่ละรหัสจะต้องมีลักษณะเด่นที่ไม่เหมือนกัน หมายความว่าลำดับโค้ดจะต้องมีหน้าตาไม่เหมือนกัน ค่าสหสัมพันธ์ข้ามของระหว่าง 2 โค้ดจะต้องมีค่าต่ำมากๆ

$$\sum_{j=0}^{F-1} C_n(j)C_m(j-l) \leq \lambda c \quad \text{สำหรับ } 0 \leq l \leq F-1 \quad (3.2)$$

ซึ่ง  $\lambda c$  หมายถึง การจำกัดของสหสัมพันธ์ข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แต่ละรหัสจะต้องมีลักษณะเด่นจากการเลื่อนบิตของตัวเอง

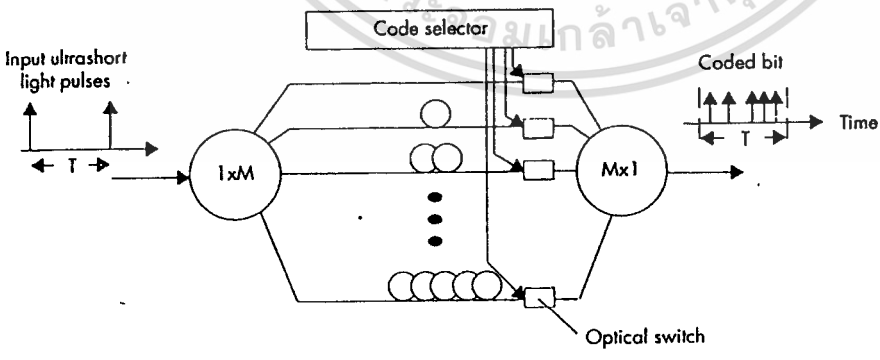
$$\sum_{j=0}^{F-1} C_n(j)C_n(j-l) \leq \lambda a \quad \text{สำหรับ } 1 \leq l \leq F-1 \quad (3.3)$$

ซึ่ง  $\lambda a$  หมายถึง การจำกัดของอัตราสัมพันธ์ข้าม

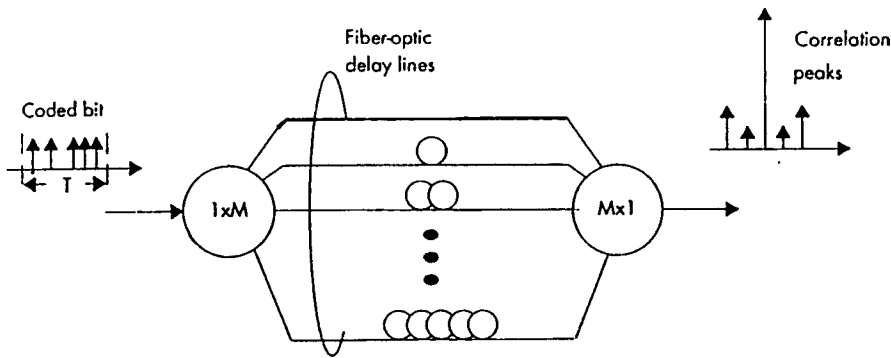
จากคุณสมบัติที่กล่าวมานี้ แน่ใจว่าพัลส์ทั้งหมดที่เอาท์พุททางดีโค๊ดเดอร์จะมีแอมพลิจูดน้อยกว่าหรือเทียบเท่ากับ  $\lambda a$  ยกเว้นพัลส์ที่ดีโค๊ดกับตัวมันเองจะมีแอมพลิจูดเท่ากับ  $K$  เงื่อนไขนี้อาจจะไม่มี ความหมายถ้าทางด้านรับถูกซิงโครไนส์กับตำแหน่งของพีคอัตราสัมพันธ์ ซึ่งมันเป็นการเข้าถึงแบบ synchronous CDMA

คุณสมบัติข้อที่ 3 จะถูกคำนึงถึงในกรณีของการเข้าถึงหลายทาง ซึ่งหมายถึงการเข้าถึงแบบ asynchronous CDMA จำนวนของลำดับไค้ดจะลดลงโดยแฟกเตอร์  $F-1$  เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี synchronous สำหรับ synchronous CDMA การเลื่อนบิตจำนวน  $F-1$  ครั้งของลำดับไค้ดสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ด้วย ในขณะที่ asynchronous CDMA นำมาใช้ไม่ได้ ดังนั้น synchronous CDMA สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการ ได้มากกว่า asynchronous CDMA

โดยทั่วไปแล้วไค้ดจะถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัว คือ  $F, K, \lambda a, \lambda c$  และประสิทธิภาพของระบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงจะขึ้นอยู่กับ การเลือกพารามิเตอร์เหล่านี้ สำหรับโครงสร้างของการเข้ารหัสและการถอดรหัสของระบบ CDMA จะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 a) โครงสร้างการเข้ารหัสของการเข้าถึงแบบ CDMA



b) โครงสร้างการถอดรหัสของการเข้าถึงแบบ CDMA

### รูปที่ 3.1 (ต่อ)

ทางด้านเครื่องส่งจะมีอุปกรณ์แบ่งแยกสัญญาณ (splitter)  $1 \times M$  เพื่อแบ่งพัลส์ 1 พัลส์ที่เข้ามาไปสู่  $M$  พัลส์ด้วยกำลังงานที่เท่ากัน  $M$  พัลส์เหล่านี้จะถูกส่งไปยังเส้นใยแก้วนำแสงแบบหน่วง (fiber optic delay line) ที่ต่อขนานกันอยู่ พัลส์ที่เข้ามาจะถูกหน่วงเวลาแตกต่างกันไป และจะถูกนำมารวมกันที่อุปกรณ์รวมสัญญาณ (coupler)  $M \times 1$  ก็จะได้รูปแบบของลำดับโค้ด CDMA

ส่วนทางด้านเครื่องรับ อุปกรณ์ดีโค้ดเดอร์ทางแสงจะประกอบด้วยเส้นใยแก้วนำแสงแบบหน่วงเวลาที่ต่อขนานกัน โดยต้องสัมพันธ์กับตำแหน่งบิต “1” ของลำดับโค้ด สัญญาณแสงทางด้านรับจะแยกชิพบิตเข้าไปตามเส้นใยแก้วนำแสง แล้วนำกลับมารวมสัญญาณกันใหม่ที่ทางด้านเอาท์พุท สำหรับทางด้านเอาท์พุทของดีโค้ดเดอร์จะถูกตรวจสอบระดับสัญญาณด้วยอุปกรณ์ตรวจจับระดับจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold) โดยโฟโตนิกเดเทกเตอร์เพื่อให้ได้สัญญาณข้อมูลกลับมาดังเดิม เมื่อระดับสัญญาณสูงกว่าจุดเริ่มเปลี่ยนจะถอดรหัสออกมาเป็นบิต “1” แต่ถ้าระดับสัญญาณต่ำกว่าจุดเริ่มเปลี่ยนจะถอดรหัสออกมาเป็นบิต “0”

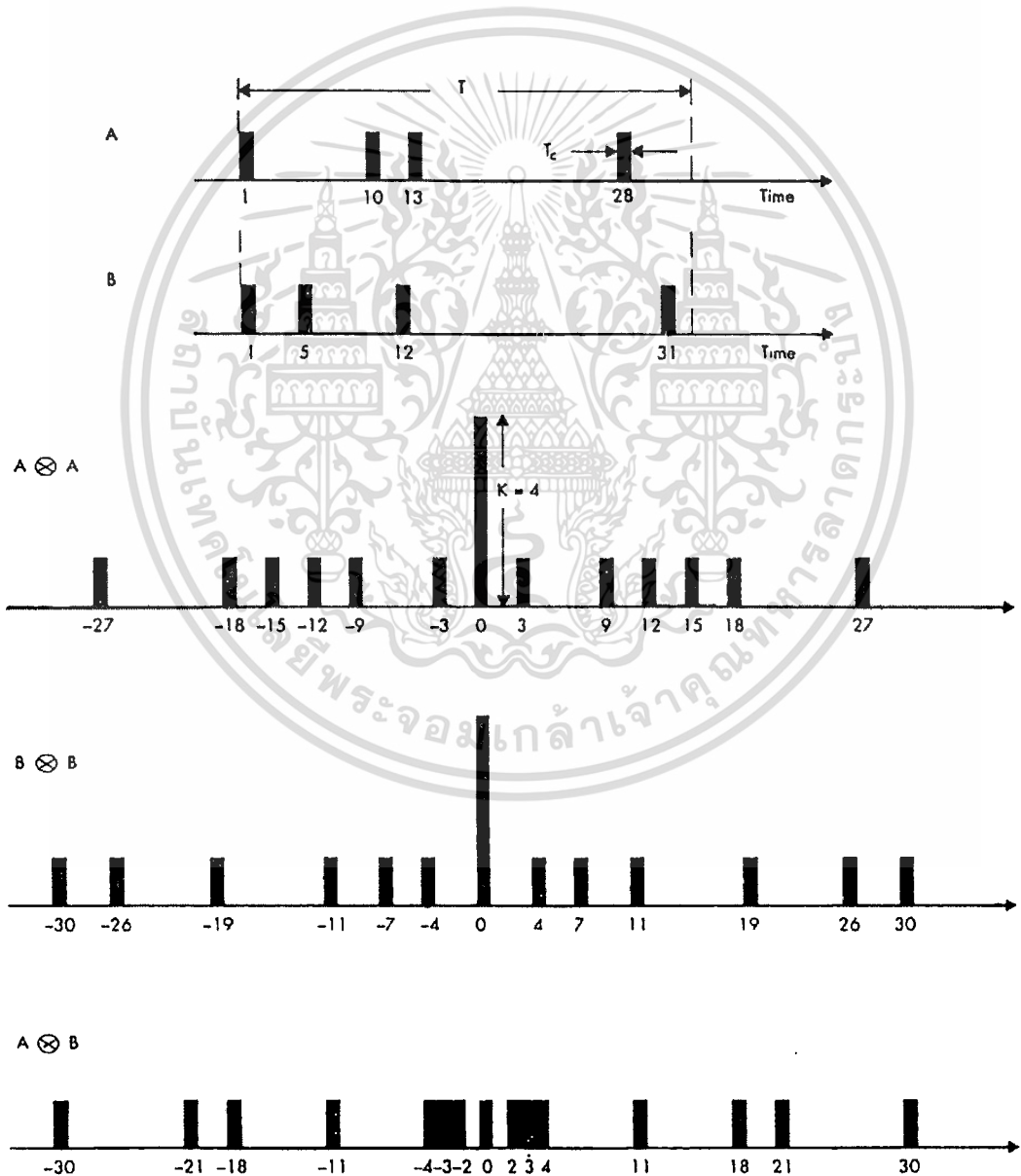
ความผิดพลาดจากการดีโค้ดเดอร์จะเกิดขึ้นเมื่อ โหนดส่งบิต “0” และการแทรกสอดเนื่องจาก โหนดอื่นจำนวน  $N-1$  ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดค่าผิดพลาดสัมพันธ์ข้ามเกินระดับ threshold ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดขึ้นอยู่กับระดับจุดเริ่มเปลี่ยน (th) คุณสมบัติสหสัมพันธ์ของโค้ด และจำนวนของสัญญาณแทรกสอด

ตัวอย่างให้โค้ดที่มีพารามิเตอร์  $(F, K, \lambda_a, \lambda_c)$  มีการจำกัดของสหสัมพันธ์ข้าม  $\lambda_c = 1$  ถ้าจำนวนทั้งหมดของสัญญาณแทรกสอด  $N-1$  มีค่าน้อยกว่าน้ำหนักโค้ด  $K$  จะไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ถ้ามีการเลือกให้ระดับจุดเริ่มเปลี่ยน  $Th > N-1$  (สมมุติไม่คิดสัญญาณรบกวนอื่นๆ เช่น สัญญาณรบกวนควอนตัม และสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน) ถ้าจำนวนของการแทรกสอดมีมากกว่าหรือเท่ากับน้ำหนักโค้ด (ถ้า  $N-1 \geq K$ ) แล้วสัญญาณแทรกสอดจะทำให้พิคของสหสัมพันธ์ข้ามมีค่ามากกว่า  $Th$  ซึ่งมีผลให้เกิดความผิดพลาดขึ้น ( $Th$  จะต้องเซตให้ต่ำกว่า  $K$  สำหรับการตรวจจับของพิคอัตราสัมพันธ์ของสัญญาณที่ต้องการ)

การจำกัดของอัตราสัมพันธ์ ( $\lambda a$ ) จะมีค่าเท่ากับ 1 ส่วนการจำกัดของสหสัมพันธ์ข้ามในงานวิจัยทั่วไปแล้วจะเซตให้เป็น  $\lambda c=1$  หรือ  $\lambda c=2$  แล้วแต่กรณี (ในระบบที่มี  $\lambda c=1$  จะเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพดีกว่าระบบที่มี  $\lambda c=2$  รูปที่ 3.2 จะแสดงตัวอย่างของ 2 OOC ด้วยความยาวโค้ด  $F=32$  และน้ำหนักโค้ด  $K=4$  ซึ่งจำนวนสูงสุดของผู้ใช้บริการ  $N$  ถูกกำหนดจากสมการที่ 3.4

$$N \leq \text{int} \left\lfloor \frac{F-1}{K(K-1)} \right\rfloor \quad (3.4)$$

ซึ่ง  $\lfloor x \rfloor$  คือ จำนวนเต็มบวกที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ  $x$



รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างของ 2 โค้ดแบบ OOC ด้วยความยาวโค้ด  $F=32$  และน้ำหนักโค้ด  $K=4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความยาวโค้ด  $F$  ใช้เพื่อรองรับจำนวนของผู้ใช้บริการ  $N$  ราย ส่วนค่าของ  $K$  จะต้องทำให้มีค่าน้อยๆ ค่า  $F$  และ  $N$  จะใช้เป็นตัวกำหนดจำนวนของชิพบิต “1” ดังสมการที่ 3.5

$$1 \leq K \leq \frac{1 + \sqrt{1 + 4(F-1)/N}}{2} \quad (3.5)$$

นอกจากนั้นแล้วโค้ด OOC จะต้องมีชิพบิต “1” น้อยๆ ด้วย เหตุผลที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่า จะได้รองรับผู้ให้บริการที่จะเพิ่มเข้ามาในอนาคตด้วย การที่ต้องมีชิพบิต “1” น้อยๆ มี 2 เหตุผลที่สำคัญสำหรับการออกแบบเครือข่าย คือ

1. เพื่อจะได้จำกัดกำลังงานที่ใช้งานในเครือข่ายทั้งหมด เพราะว่าจะได้พลังงานต่อบิตข้อมูลมีค่าต่ำ ยกเว้นชิพบิตที่ต้องการใช้กำลังงานสูงๆ
2. เพื่อจะได้อัตราส่วนระหว่าง  $F/K$  มีค่ามาก ซึ่งหมายความว่าความกว้างของชิพบิตจะต้องเล็กกว่าความกว้างของบิตข้อมูลมากๆ

### 3.3 การเข้ารหัสแบบ Prime

หัวข้อที่แล้วเราได้ศึกษาการเข้ารหัสแบบ OOC มาแล้ว สำหรับหัวข้อนี้เราจะพูดถึงการเข้ารหัสอีกตัวหนึ่ง ซึ่งมีคุณสมบัติ orthogonal code เหมือนกัน คือการเข้ารหัสแบบ Prime การเข้ารหัสแบบนี้จะอาศัยหลักการของ prime number โดยมีความยาวโค้ด  $F=P^2$  ซึ่ง  $P$  คือค่า prime number เราสามารถสร้างลำดับ โค้ดของ prime ได้ดังนี้

เริ่มจากกำหนดค่าของ Galois Field  $GF(P) = \{0, 1, \dots, j, \dots, P-1\}$  หลังจากนั้นจะสามารถสร้างลำดับ prime ได้เป็น  $S_x = (s_{x0}, s_{x1}, \dots, s_{xj}, \dots, s_{x(P-1)})$  โดยการรวมทุกๆส่วน  $j$  ของ  $GF(P)$  เข้ากับ  $x$  สำหรับตัวอย่างเรากำหนดให้ prime number  $(P) = 5$  ดังนั้นเราจะได้ลำดับ prime ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งแต่ละลำดับ prime  $S_x$  จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปลำดับของไบนารี  $C_x = (c_{x0}, c_{x1}, \dots, c_{xj}, \dots, c_{x(F-1)})$  โดยที่  $C_x$  จะขึ้นอยู่กับสมการที่ 3.6

$$C_{xi} = \begin{cases} 1 & \text{for } i = s_{xj} + jP \quad j = 0, 1, \dots, P-1, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.6)$$

ในการแปลงลำดับ prime  $S_x$  สำหรับ  $P = 5$  ไปอยู่ในรูปลำดับของไบนารีจะถูกแสดงให้ดูในตารางที่ 3.1 เช่นกัน จำนวนของบิต “1” ของลำดับก็คือค่า  $P$

ตารางที่ 3.1 แสดงลำดับ prime  $S_x$  และลำดับโค้ด  $C_x$  สำหรับ GF (5)

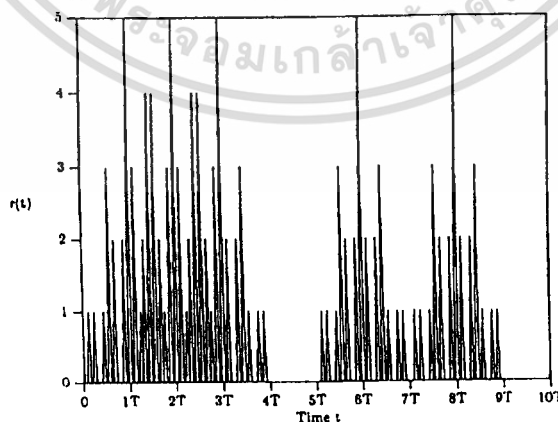
$x$	$i$					Sequence	Code Sequences
	0	1	2	3	4		
0	0	0	0	0	0	$S_0$	$C_0 = 10000 \ 10000 \ 10000 \ 10000 \ 10000$
1	0	1	2	3	4	$S_1$	$C_1 = 10000 \ 01000 \ 00100 \ 00010 \ 00001$
2	0	2	4	1	3	$S_2$	$C_2 = 10000 \ 00100 \ 00001 \ 01000 \ 00010$
3	0	3	1	4	2	$S_3$	$C_3 = 10000 \ 00010 \ 01000 \ 00001 \ 00100$
4	0	4	3	2	1	$S_4$	$C_4 = 10000 \ 00001 \ 00010 \ 00100 \ 01000$

สำหรับการจำกัดค่าสหสัมพันธ์ข้ามที่ตำแหน่งชีพ  $j$  ใดๆ ของคู่ลำดับโค้ด  $C_x$  และ  $C_y$  สามารถหาได้จากฟังก์ชันสหสัมพันธ์ข้าม

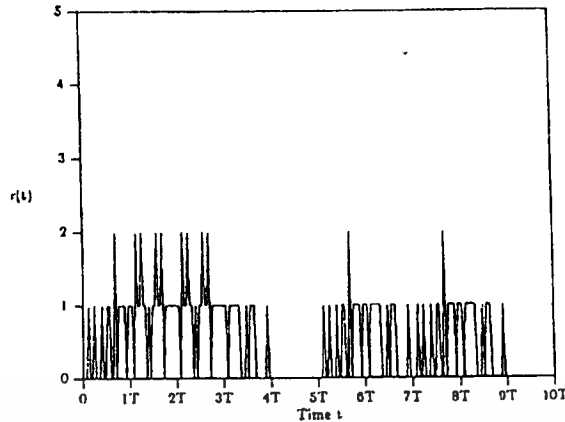
$$\theta_{C_x, C_y}(j\tau) = \sum_{i=0}^{p^2-1} C_x(i\tau) \cdot C_y(i\tau - j\tau) \quad 0 \leq j \leq (p^2 - 1) \quad (3.7)$$

ในช่วงที่มีการสหสัมพันธ์กับระหว่างลำดับโค้ดสองโค้ด จะมีค่าเป็นทั้ง 1 และ 2 (เป็น 1 ในกรณีที่ลำดับโค้ด  $C_0$  สหสัมพันธ์กับลำดับโค้ดอื่น แต่จะเป็น 2 ในกรณีที่ลำดับโค้ดต่างกันสหสัมพันธ์กัน) ดังนั้นพิกสูงสุดของการสหสัมพันธ์ข้ามจะมีค่าเป็น 2

รูปที่ 3.3 a) คือการสหสัมพันธ์ของลำดับโค้ด  $C_3$  สำหรับชุดข้อมูล 1110010100 พิกสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ 5 ส่วนในรูปที่ 3.3 b) คือการสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างลำดับโค้ด  $C_3$  กับลำดับโค้ด  $C_2$  ซึ่งพิกสูงสุดของการสหสัมพันธ์ข้ามมีค่าเป็น 2



รูปที่ 3.3 a) การสหสัมพันธ์ของลำดับโค้ด  $C_3$  สำหรับชุดข้อมูล 1110010100 พิกสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ 5



b) การสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างลำดับโค้ด  $C_1$  กับลำดับโค้ด  $C_2$  ซึ่งพีคสูงสุดของการสหสัมพันธ์ข้ามมีค่าเป็น 2

รูปที่ 3.3 (ต่อ)

เมื่อระบบมีผู้ใช้บริการอยู่  $K$  รายต้องการส่งข้อมูลในเวลาเดียวกัน การแทรกสอดทั้งหมดที่เครื่องรับจะเป็นการสหสัมพันธ์ข้ามจำนวน  $K-1$  ถ้าการแทรกสอดจำนวน  $K-1$  ไม่สัมพันธ์กันแล้ว ความแปรปรวนของการแทรกสอดทั้งหมดจะเท่ากับผลรวมของความแปรปรวนของการสหสัมพันธ์ข้ามจำนวน  $K-1$  สำหรับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ก็คืออัตราส่วนของกำลังสองของพีคสูงสุดของการอัดสหสัมพันธ์ต่อความแปรปรวนของขนาดของการแทรกสอด ค่าความแปรปรวนเฉลี่ยของการสหสัมพันธ์ข้ามคำนวณจากการใช้ลำดับโค้ดทั้งหมดที่เกิดจากค่าของ  $P$  ซึ่งจะมีค่าประมาณ 0.29

ค่า SNR ของลำดับโค้ดจะถูกกำหนดจากสมการที่ 3.8

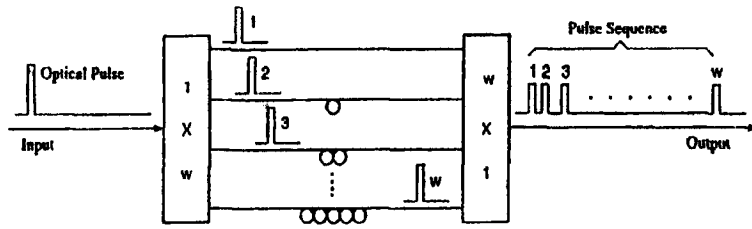
$$SNR \approx \frac{P^2}{0.29(K-1)} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ 3.8 ค่า SNR เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของชิพต่อลำดับโค้ด และค่า SNR จะลดลงเมื่อมีจำนวนของผู้ใช้บริการในเวลาเดียวกันเพิ่มขึ้นในระบบ

### 3.4 การเข้ารหัสแบบ $2^n$ prime

การเข้ารหัสทั้งสองแบบที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เป็นการเข้ารหัสและถอดรหัสที่มีรูปแบบขนานซึ่งมีรูปแบบการเข้ารหัสดังรูปที่ 3.4 จากการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงปรากฏว่าการเข้าถึงแบบนี้ไม่สามารถออกแบบโดยการคำนึงถึงแต่ประสิทธิภาพ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพของโค้ดเท่านั้น รูปแบบโครงสร้างของการเข้ารหัสก็เป็นแฟกเตอร์ที่ต้องคำนึงถึงด้วยเช่นกัน เนื่องจากว่ามันให้ผลเกี่ยวกับกำลังงานที่ใช้ในระบบทั้งหมด

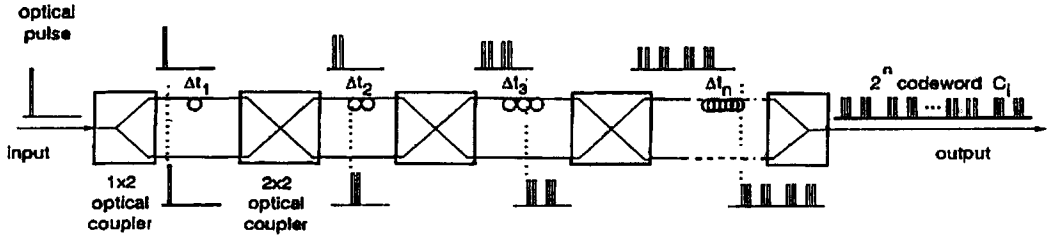


รูปที่ 3.4 รูปแบบการเข้ารหัสแบบขนาน

รูปแบบนี้เป็นรูปแบบพื้นฐานของการเข้า-ถอดรหัสด้วยสัญญาณทางแสง สำหรับระบบการสื่อสารเส้นใยแก้วนำแสงที่มีการเข้าถึงแบบ CDMA จะมีตัวแปรสำคัญ 2 ตัว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบคือ การแทรกสอดของผู้ใช้บริการในเวลาเดียวกันในช่องสัญญาณเดียวกัน และสัญญาณรบกวนที่มีอยู่ในระบบสื่อสารเส้นใยแก้วนำแสง จึงมีงานวิจัยต่างๆออกมาเพื่อลดผลกระทบของตัวแปรทั้งสองตัวนี้ ซึ่งการลดผลกระทบจากการแทรกสอดของผู้ใช้บริการต่างๆควรจะมีการจำกัดค่าสหสัมพันธ์ข้าม  $\lambda_c$  เท่ากับ 1

รูปแบบการเข้ารหัสแบบขนานนั้นมีขนาดใหญ่และไม่เหมาะสมสำหรับระบบที่มีน้ำหนักโค้ด (code weight)  $w$  มาก ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงรูปแบบการเข้ารหัสแบบใหม่เกิดขึ้น ซึ่งอาศัยคุณสมบัติแบบอนุกรมดังรูปที่ 3.5

รูปแบบโครงสร้างแบบอนุกรมที่ส่วนของการเข้ารหัสทางแสง(optical encoder) จะทำเป็น  $2 \times 2$  สวิตช์ทางแสง(optical switches)ต่อกันแบบอนุกรม ซึ่งระหว่างสวิตช์ทางแสงจะเป็นเส้นหน่วงเวลาทางแสง(optical delay line) แต่ละสวิตช์ทางแสงจะถูกไบแอสแบบ dc ในสภาวะอย่างใดอย่างหนึ่งของ 2 สภาวะนี้คือ mix-split หรือ straight-through ในสภาวะ mix-split จะทำให้พัลส์จากอินพุตทั้งสองผสมกันและแบ่งแยกออกไปที่เอาต์พุตทั้งสองของสวิตช์ ส่วนสภาวะ straight-through จะให้พัลส์จากอินพุตทั้งสองส่งตรงออกไปที่เอาต์พุตโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในการกำหนดจำนวน  $n$  สวิตช์ของสภาวะ mix-split ก็คือการสร้างพัลส์จำนวน  $2^n$  พัลส์ และในการแจกแจงพัลส์จำนวน  $2^m$  พัลส์นั้นจะขึ้นอยู่กับพัลส์ก่อนหน้าคือ  $2^{m-1}$  ซึ่ง  $1 < m \leq n$  โค้ดเหล่านี้จะมีการจำกัดการแจกแจงพัลส์แบบสมมาตร(symmetric pulse distribution)



รูปที่ 3.5 รูปแบบการเข้ารหัสแบบอนุกรม

ที่คือโค้ดเคอร์ทางแสงแต่ละตัวจะทำเป็นตัวเชื่อม (couple)  $n+1$  ตัว ต่อกันแบบอนุกรมด้วยการหน่วงเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าของการหน่วงเวลาถูกกำหนดโดยลำดับโค้ดของผู้ใช้บริการปลายทาง ถึงแม้ว่าการเข้ารหัสแบบ prime จะให้จำนวนของชุดรหัส (codeword) มากกว่าการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime แต่การเข้ารหัสแบบ prime นั้นมันมีรูปแบบการเข้ารหัสแบบขนาน ซึ่งมีคุณสมบัติของโค้ดไม่สมมาตรกัน มีผลทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียได้มาก

ในการเข้าถึงแบบ  $2^n$  prime นี้จะมีความยาวโค้ด (F) เท่ากับ  $P^2$  ซึ่ง P คือจำนวน prime โดยมีน้ำหนักโค้ดเท่ากับ  $2^n$  กำหนดให้ชุดลำดับ prime  $S_i = (s_{i,0}, s_{i,1}, \dots, s_{i,j}, \dots, s_{i,P-1})$  ซึ่ง  $s_{i,j}$  คือสมการดังต่อไปนี้

$$s_{i,j} = \{i, j\} \pmod{P} \quad (3.9)$$

ซึ่ง  $i, j \in GF(P)$  (Galois field ของ P) สำหรับตัวอย่างของลำดับ prime ใน GF(13) แสดงดังตารางที่ 3.2

ในการกำเนิครหัสนี้ ประการแรกต้องตรวจสอบว่าชุดรหัสที่ใช้ได้ต้องมีพัลส์ที่อยู่ติดกัน (two adjacent pulse) แยกจากกัน โดยดูจากค่า adjacent relative cyclic delay ( $t_j$ 's)

$$t_j = \begin{cases} s_{i,j+1} - s_{i,j} + P \\ s_{i,0} - s_{i,j} + P \end{cases} \quad (3.10)$$

ชุดรหัสที่ใช้ได้จะต้องเป็นไปตามกฎของการจำกัดการแจกแจงการหน่วงเวลา (delay distribution constraint) ดังต่อไปนี้ คือทุกๆชุดรหัสจะมี  $x \neq y$ ,  $x \in [0, 2^n - 2]$ ,  $y \in [0, 2^n - 2]$  และ  $z \in [1, n-1]$  ถ้า x และ y ถูกแบ่งด้วย  $2^z$  แล้ว ค่าเงื่อนไขข้างต้นจะถูกกำหนดโดย

$$t_{x \oplus (2^{z-1} - 1) \oplus m} = t_{y \oplus (2^{z-1} - 1) \oplus m} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $m \in [0, 2^n - 1]$ , และ “ $\oplus$ ” คือ modulo  $2^n$

ตารางที่ 3.2 ลำดับ prime ใน GF(13)

i	j												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	0	2	4	6	8	10	12	1	3	5	7	9	11
3	0	3	6	9	12	2	5	8	11	1	4	7	10
4	0	4	8	12	3	7	11	2	6	10	1	5	9
5	0	5	10	2	7	12	4	9	1	6	11	3	8
6	0	6	12	5	11	4	10	3	9	2	8	1	7
7	0	7	1	8	2	9	3	10	4	11	5	12	6
8	0	8	3	11	6	1	9	4	12	7	2	10	5
9	0	9	5	1	10	6	2	11	7	3	12	8	4
10	0	10	7	4	1	11	8	5	2	12	9	6	3
11	0	11	9	7	5	3	1	12	10	8	6	4	2
12	0	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

ถ้าเราทำตามกฎการจำกัดการแจกแจงการห้วงเวลาในสมการ 3.11 แล้ว ในลำดับ prime  $S_t$  จะมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

- ที่ตำแหน่ง  $s_{i,j+1}$  และ  $s_{i,j}$  จะเป็นตัวกำเนิดค่าการห้วงเวลา  $t_j$  ดังแสดงให้ดูในตารางที่ 3.3 เมื่อ  $t_j$  เป็นไปตามการจำกัดของสมการ 3.11 แล้ว ค่าในตำแหน่ง  $s_{i,j}$  นั้นจะไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนตำแหน่งอื่นของ  $s_{i,j}$  จะถูกแทนที่ด้วย  $x$
- ในกรณีอื่น  $s_{i,j}$  จะไม่ใช่ ดังแสดงให้ดูในตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 Adjacent relative cyclic delay ของลำดับ prime ใน GF(13)

i	j												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
1	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	1
2	15	15	15	15	15	15	2	15	15	15	15	15	2
3	16	16	16	16	3	16	16	16	3	16	16	16	3
4	17	17	17	4	17	17	4	17	17	4	17	17	4
5	18	18	5	18	18	5	18	5	18	18	5	18	5
6	19	19	6	19	6	19	6	19	6	19	6	19	6
7	20	7	20	7	20	7	20	7	20	7	20	7	7
8	21	8	21	8	8	21	8	21	8	8	21	8	8
9	22	9	9	22	9	9	22	9	9	22	9	9	9
10	23	10	10	10	23	10	10	10	23	10	10	10	10
11	24	11	11	11	11	11	24	11	11	11	11	11	11
12	25	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

สุดท้ายทำการแปลง  $s_i$  ที่ได้ให้อยู่ในรูปข้อมูลไบนารีของชุดรหัส  $C_i = \{c_{i,0}, c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,F-1}\}$  ซึ่ง  $F=P^2$  คือความยาวโค้ด

$$c_{i,k} = \begin{cases} 1 & \text{สำหรับ } k=s_{ij}+jP \text{ และ } s_{ij} \neq x \\ 0 & \text{กรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad (3.12)$$

ในกรณีที่ตำแหน่ง  $s_{ij}$  เป็น  $x$  จะถูกแทนที่ด้วยบิต "0" จำนวน  $P$  สำหรับความยาวของโค้ด ( $F$ ) ไม่จำกัดว่าจะต้องเท่ากับ  $P^2$  เสมอไป สามารถทำให้ลดลงได้แต่ต้องอยู่ในขอบเขตของ  $2^{n+1}P$  สำหรับทุกๆจำนวน prime ที่  $p > 2^{n+1}$

เพื่อให้เข้าใจโครงสร้างของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime เราได้ยกตัวอย่างให้ดูดังต่อไปนี้ โดยกำหนดให้  $P=13$ ,  $w=8$  ทำการกำหนดลำดับ prime จากสมการที่ 3.9 จะได้ผลตามตารางที่ 3.2 จากนั้นใช้สมการที่ 3.10 หาค่า  $t_j$  ซึ่งจะได้ผลตามตารางที่ 3.3 จากตารางที่ 3.3  $s_3$  คือ [16,16,16,16,3,16,16,16,3,16,16,16,3] ค่าการหน่วงเวลาใน  $s_3$  นี้ที่เป็นไปตามกฎของการจำกัดการแจกแจงการหน่วงเวลาตามสมการ 3.11 จะมีอยู่ 2 เงื่อนไขคือ  $t_m=t_{m+2}=t_{m+4}=t_{m+6}$  และ  $t_{m+1}=t_{m+5}$  โดยที่  $m=3$  ดังนั้นตำแหน่ง  $s_{3,0}, s_{3,1}, s_{3,2}, s_{3,11}$  และ  $s_{3,12}$  จะกลายเป็นค่า  $x$  ดังตารางที่ 3.4 ส่วนลำดับ prime เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่  $s_5$  และ  $s_8$  จะไม่ใช่ เพราะการจำกัดการแจกแจงการหน่วงเวลาไม่เป็นไปตามกฎของการจำกัดการแจกแจงการหน่วงเวลาตามสมการที่ 3.11

ตารางที่ 3.4 ลำดับ prime GF(13) ที่ถูกปรับปรุงแล้ว ด้วย  $2^n=8$

i	j												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	x	x	x	0	0	0	0	0	0	0	0	x	x
1	x	x	x	3	4	5	6	7	8	9	10	x	x
2	x	x	x	6	8	10	12	1	3	5	7	x	x
3	x	x	x	9	12	2	5	8	11	1	4	x	x
4	0	4	8	12	3	7	x	x	x	x	x	5	9
5													
6	x	x	x	5	11	4	10	3	9	2	8	x	x
7	x	x	x	8	2	9	3	10	4	11	5	x	x
8													
9	0	9	5	x	x	x	x	x	7	3	12	8	4
10	x	x	x	4	1	11	8	5	2	12	9	x	x
11	x	x	x	7	5	3	1	12	10	8	6	x	x
12	x	x	x	10	9	8	7	6	5	4	3	x	x

ในการตรวจสอบว่าลำดับ prime ( $s_p$ ) ไหนสามารถใช้งานได้หรือไม่ได้นั้น เราสามารถตรวจสอบได้จากค่า  $i$  ในสมการที่ 3.13 สำหรับลำดับ prime ที่  $s_0$  นั้นสามารถใช้งานได้อยู่แล้ว แต่สำหรับลำดับ prime อื่น ( $s_i$  และ  $s_{p-i}$ ) จะต้องตรวจสอบจากค่า  $i$  เสียก่อน

$$\frac{p(2^{\gamma+1} - 1)}{2^n - 2^{n-\gamma-1} - 1} \geq i \geq \frac{2p(2^\gamma - 1)}{2^n - 2^{n-\gamma} - 1} \quad (3.13)$$

ซึ่ง  $\gamma$  เท่ากับ  $\{0,1,\dots,n-2\}$

### 3.5 การเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime

การเข้ารหัสแบบนี้พัฒนามาจากการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime เพราะว่าการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime นั้นมีการจำกัดค่าสหสัมพันธ์ข้ามเป็น 2 ทำให้การเข้ารหัสแบบนี้มีผลของการแทรกสอดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงมีการคิดว่าวิจัยทำให้การจำกัดค่าสหสัมพันธ์ข้ามลดลงเหลือ 1 เพื่อให้ผลของการแทรกสอดลงได้ จากการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime จึงถูกพัฒนาเป็นการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime โดยการเพิ่มบิต "0" เข้าไปในแต่ละลำดับย่อยของชุดรหัส prime จำนวน  $P-1$  และการเข้ารหัสแบบนี้ยังสามารถรองรับผู้ใช้บริการในเวลาเดียวกันได้มากกว่าการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime

ความยาวของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime นี้จะมีค่า  $F=P(2P-1)$  ซึ่ง  $P$  คือจำนวน prime ส่วน  $2^n$  คือค่านำหนักโค้ด ในการกำหนดชุดลำดับ prime  $S_i$  ก็จะเหมือนกับการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime สำหรับวิธีการสร้างโค้ดนั้นจะเหมือนกับการสร้างโค้ดของ  $2^n$  prime แต่จะมีค่าพารามิเตอร์บางตัวที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งเราจะยกตัวอย่างเดียวกับการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime คือเราจะใช้ GF(13) เหมือนกัน โดยที่ก่อนอื่นเราต้องดูค่า adjacent relative cyclic delay ( $t_j$ 's) ซึ่งหามาจากตารางที่ 3.2 เสียก่อน ซึ่งค่านี้ถูกกำหนดจากสมการที่ 3.14

$$t_j = \begin{cases} s_{i,j+1} - s_{i,j} + 2P - 1 \\ s_{i,0} - s_{i,j} + 2P - 1 \end{cases} \quad (3.14)$$

ตารางที่ 3.5 Adjacent relative cyclic delay ของลำดับ prime ใน GF(13)

i	j												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
1	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	13
2	27	27	27	27	27	27	14	27	27	27	27	27	14
3	28	28	28	28	15	28	28	28	15	28	28	28	15
4	29	29	29	16	29	29	16	29	29	16	29	29	16
5	30	30	17	30	30	17	30	17	30	30	17	30	17
6	31	31	18	31	18	31	18	31	18	31	18	31	18
7	32	19	32	19	32	19	32	19	32	19	32	19	19
8	33	20	33	20	20	33	20	33	20	20	33	20	20
9	34	21	21	34	21	21	34	21	21	34	21	21	21
10	35	22	22	22	35	22	22	22	35	22	22	22	22
11	36	23	23	23	23	36	23	23	23	23	23	23	23
12	37	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดรหัสที่ใช้ได้จะต้องเป็นไปตามกฎของการจำกัดการแจกแจงการหน่วงเวลา(delay distribution constraint) ซึ่งต้องเป็นไปตามสมการที่ 3.11

ถ้าเราทำตามกฎการจำกัดการแจกแจงการหน่วงเวลาในสมการ 3.11 แล้ว ในลำดับ prime  $S_i$  จะมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

- ที่ตำแหน่ง  $s_{i,j+1}$  และ  $s_{i,j}$  จะเป็นตัวกำเนิดค่าการหน่วงเวลา  $t_j$  ดังแสดงให้ดูในตารางที่ 3.5 เมื่อ  $t_j$  เป็นไปตามเงื่อนไขบังคับตามสมการ 3.11 แล้ว ค่าในตำแหน่ง  $s_{i,j}$  นั้นจะไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนตำแหน่งอื่นของ  $s_{i,j}$  จะถูกแทนที่ด้วย  $x$
- ในกรณีอื่น  $s_i$  จะไม่ใช่ ดังแสดงให้ดูในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ลำดับ prime GF(13) ที่ถูกปรับปรุ้งแล้ว ด้วย  $2^8=8$

i	j												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	x	x	x	0	0	0	0	0	0	0	0	x	x
1	x	x	x	3	4	5	6	7	8	9	10	x	x
2	x	x	x	6	8	10	12	1	3	5	7	x	x
3	x	x	x	9	12	2	5	8	11	1	4	x	x
4	0	4	8	12	3	7	x	x	x	x	x	5	9
5													
6	x	x	x	5	11	4	10	3	9	2	8	x	x
7	x	x	x	8	2	9	3	10	4	11	5	x	x
8													
9	0	9	5	x	x	x	x	x	7	3	12	8	4
10	x	x	x	4	1	11	8	5	2	12	9	x	x
11	x	x	x	7	5	3	1	12	10	8	6	x	x
12	x	x	x	10	9	8	7	6	5	4	3	x	x

สุดท้ายทำการแปลง  $s_i$  ที่ได้ให้อยู่ในรูปข้อมูลไบนารีของชุดรหัส  $C_i = \{c_{i,0}, c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,F-1}\}$  ซึ่ง  $F=P(2P-1)$  คือความยาวของรหัส

$$c_{i,k} = \begin{cases} 1 & \text{สำหรับ } k=s_{i,j}+j(2P-1) \text{ และ } s_{i,j} \neq x \\ 0 & \text{กรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ตำแหน่ง  $s_{ij}$  เป็น  $x$  จะถูกแทนที่ด้วยบิต "0" จำนวน  $(2P-1)$  ความยาวของรหัส (F) ไม่จำกัดว่าจะต้องเท่ากับ  $P(2P-1)$  เสมอไป สามารถทำให้ลดลงได้แต่ต้องมีค่าการจำกัดค่าสหสัมพันธ์ข้ามเท่ากับ 1 ซึ่ง F จะอยู่ในช่วง

$$\min\{4Pw - 2w - 2P + 1, P(2P-1)\} \leq F \leq P(2P-1) \quad (3.16)$$

สำหรับชุดรหัสของ  $2^n$  extended prime จะถูกสร้างจากลำดับ prime  $s_0, s_i$  และ  $s_{P-i}$  ตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$\frac{2P(2^k - 1)}{2^{n-k}(2^k - 1) + 1} \leq i \leq \frac{P(2(2^k - 1) + 1)}{2^n(1 - \frac{1}{2^{k+1}}) - 1} \quad (3.17)$$

ซึ่ง  $k=0,1,\dots,n-2$  และ  $i=1,2,\dots,(P-1)/2$

เมื่อใช้  $P=13, n=3$  จะได้  $F=325$  และ  $w=8, i=\{1,2,3,4,6,7\}$  มาจากสมการ 3.17 ทำการรวม  $i=0$  และ  $P-i=\{9,10,11,12\}$  ดังนั้นชุดลำดับ prime ที่สามารถใช้ได้คือ

$$\{s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_6, s_7, s_9, s_{10}, s_{11}, s_{12}\}$$

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราได้สร้างตารางความสัมพันธ์ของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ระหว่างความยาวรหัส (F), น้ำหนักของรหัส (w) และจำนวนผู้ใช้บริการสูงสุดในแต่ละ prime number โดยค่า prime number ที่เราใช้ยกตัวอย่างนี้คือ 11, 13, 17, 19, 23, 29 และ 37 ซึ่งสามารถสร้างตารางได้ดังตารางที่ 3.7

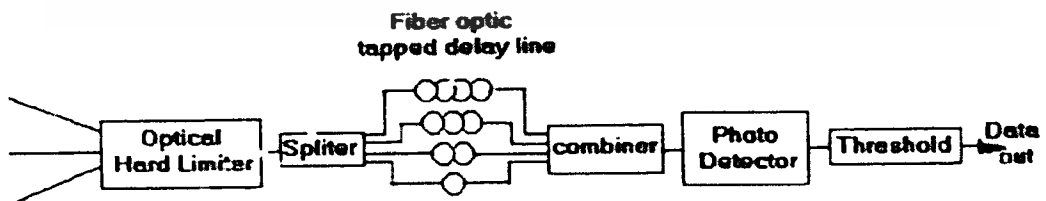
การเข้ารหัสทั้งหมดที่ได้นำเสนอมาคือการเข้ารหัสที่ผู้เขียนได้ศึกษาค้นคว้านำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยการเข้ารหัสทั้งหมดได้มีการพัฒนาต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง ในการปรับปรุงการเข้ารหัสนั้นถือเป็นการปรับปรุงจากความผิดพลาดที่เกิดจากการแทรกสอดในระบบ แต่ก็มีอีกวิธีหนึ่งที่ปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบให้ดียิ่งขึ้นคือ การนำอุปกรณ์ optical hard-limiter ไปใส่ไว้ในภาครับของระบบเพื่อลดปัญหาของการแทรกสอดลงได้ สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์ optical hard-limiter จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 3.7 จำนวนผู้ใช้บริการสูงสุดของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime

ค่า Prime	ความยาวรหัส (F)	น้ำหนักของรหัส (w)	จำนวนผู้ใช้บริการสูงสุด
11	$147 \leq F \leq 231$	4	11
	$F=231$	8	9
13	$175 \leq F \leq 325$	4	13
	$F=325$	8	11
17	$231 \leq F \leq 561$	4	17
	$495 \leq F \leq 561$	8	15
	$F=561$	16	9
19	$259 \leq F \leq 703$	4	19
	$555 \leq F \leq 703$	8	17
	$F=703$	16	9
23	$315 \leq F \leq 1035$	4	23
	$675 \leq F \leq 1035$	8	19
	$F=1035$	16	11
29	$399 \leq F \leq 1653$	4	29
	$855 \leq F \leq 1653$	8	25
	$F=1653$	16	13
37	$511 \leq F \leq 2701$	4	37
	$1095 \leq F \leq 2701$	8	33
	$2263 \leq F \leq 2701$	16	17
	$F=2701$	32	9

### 3.6 Optical hard limiter

เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงจะขึ้นอยู่กับค่าความนำจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดในแต่ละบิตของโค้ดทางแสง ซึ่งควรมีค่าน้อยที่สุด และการลดค่าความผิดพลาดนี้สามารถทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ที่มีชื่อเรียกว่า Optical hard limiter ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดผลกระทบจากความเข้มของสัญญาณแทรกแซง (interference signal intensity) ซึ่งก่อให้เกิดความผิดพลาดในแต่ละบิตของโค้ดทางแสง โดยการใช้ Optical hard limiter ไว้ก่อนอุปกรณ์ correlator (optical delay line) ทางเครื่องรับดังรูปที่ 3.6

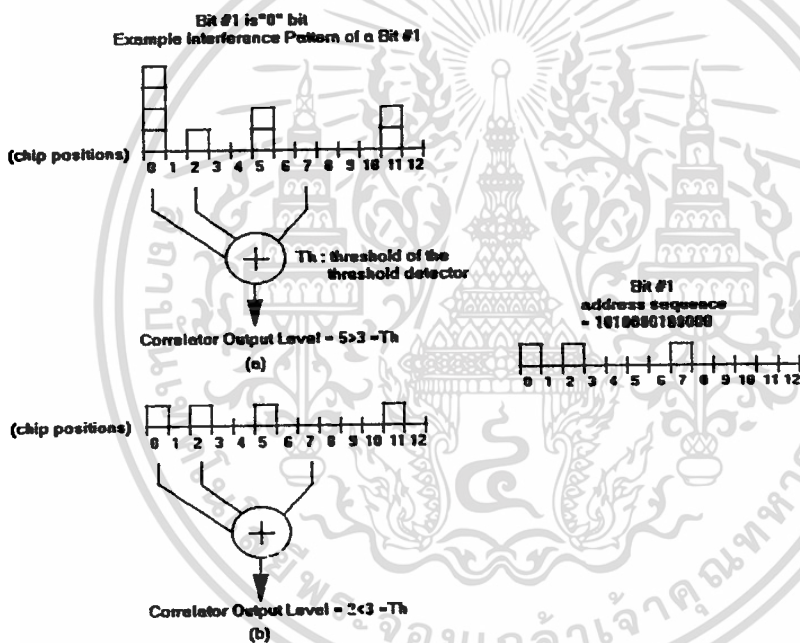


รูปที่ 3.6 เครื่องรับ Optical CDMA ที่มีการใช้ idea optical hard limiter

โดยฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์ Optical hard limiter จะแสดงได้ดังนี้

$$h(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 1 \\ 0 & 0 \leq x < 1 \end{cases} \quad (3.18)$$

นั่นคือถ้าความเข้มของแสง (optical light intensity : X) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1, Optical hard limiter จะทำการจำกัดความเข้มแสงให้กลับมาเท่ากับ 1 และถ้าความเข้มแสงต่ำกว่า 1 ค่าที่เอาท์พุทของ Optical hard limiter จะเป็น 0 ซึ่งจะเป็นการจำกัดส่วนประกอบบางส่วนของ pattern ของการแทรกสอด ซึ่งก่อให้เกิดความผิดพลาด โดยตัวอย่างผลกระทบของ pattern ของการแทรกสอดเมื่อมีการใช้และไม่ได้ใช้ Optical hard limiter แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างจากผลกระทบของการใช้ Optical hard limiter

จากรูปที่ 3.7 พิจารณาตัวถอดรหัสทางแสงที่มี address sequence = 1010000100000 จากรูปที่ 3.7 (a) เมื่อไม่มี Optical hard limiter และ pattern ของการแทรกสอดที่อินพุทของ correlator เป็น 4010020000020 จะทำให้ระดับของสัญญาณที่เอาท์พุทของ correlator = 5 ซึ่งมากกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งไว้เท่ากับ 3 ของตัวถอดรหัส ซึ่งก่อให้เกิดความผิดพลาดขึ้น แต่เมื่อใส่ Optical hard limiter เข้าไป pattern ของสัญญาณที่อินพุทของ correlator จะเป็น 1010010000010 ซึ่งค่าเอาท์พุทของ correlator จะมีค่าเป็น 2 ต่ำกว่าระดับของจุดเริ่มเปลี่ยนซึ่งเป็นค่าที่ถูกต้อง โดยในรูปแบบของลำดับชิพบิต ความผิดพลาดจะเกิดขึ้นเมื่อเครื่องส่งที่ต้องการส่งบิต "0" และสัญญาณจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทรกสอดที่เกิดจากผู้ให้บริการรายอื่นๆก่อให้เกิดรูปแบบสัญญาณที่มีระดับความเข้มแสงสูงกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งไว้ที่อินพุตของ correlator



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# การวิเคราะห์ผลของการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง ด้วยการเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime

จากบทที่ผ่านมาจะพูดถึงรูปแบบการเข้ารหัส ซึ่งทั้งหมดเป็นการเข้ารหัสที่ใช้ในระบบ CDMA ผ่านเส้นใยแก้วนำแสง แต่ในบทนี้เราจะกล่าวเน้นถึงการวิเคราะห์สมรรถนะของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime เนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ การวิเคราะห์ระบบเชิงคณิตศาสตร์กรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวน และการวิเคราะห์ระบบเชิงคณิตศาสตร์กรณีที่มีสัญญาณรบกวน การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ถูกพัฒนามาจากการเข้ารหัสแบบอื่นดังที่กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมา ดังนั้นก่อนที่เราจะทำการวิเคราะห์การเข้ารหัสแบบนี้ เราต้องศึกษาและทำการวิเคราะห์สมรรถนะของการเข้ารหัสแบบอื่นเสียก่อนเพื่อเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime

### 4.1 การวิเคราะห์ระบบเชิงคณิตศาสตร์กรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวน

ในการวิเคราะห์ระบบแบบนี้จะไม่คำนึงถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ มีอยู่สองกรณีที่ถูกระบุคือ กรณีที่ระบบทางด้านเครื่องรับ ไม่มีอุปกรณ์ optical hard-limiter ต่ออยู่ และกรณีที่ระบบทางด้านเครื่องรับมีอุปกรณ์ optical hard-limiter ต่ออยู่

#### 4.1.1 กรณีไม่มีอุปกรณ์ Optical Hard-Limiter

ในกรณีนี้ก่อนอื่นเราต้องทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ OOC ก่อน เพราะว่าเป็น ใค้คพื้นฐานทางอุดมคติของการเข้ารหัสทางแสง

##### 4.1.1.1 ประสิทธิภาพการเข้ารหัสแบบ OOC

สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเข้ารหัสแบบ OOC นั้น จะเริ่มจากการพิจารณาฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของการแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบ โดยเราสมมติให้  $I_i$  แทนค่าการแทรกสอดในระบบ ถ้าในระบบมีจำนวนผู้ใช้บริการอยู่  $N$  ราย ดังนั้นค่า  $I_i$  จะเท่ากับ  $(N-1)$  ราย ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของการแทรกสอดที่เรานำมาศึกษาในงานวิจัยในครั้งนี้จะมีสมการดังนี้

$$P_{I_1}(i) = \sum_{i=0}^{N-1} \binom{N-1}{i} p^i q^{N-1-i} \delta(I_1 - i) \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่เราทราบสมการของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของการแทรกสอดแล้ว เราจะนำสมการนี้ไปหาค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต

$$PE = \frac{1}{2} \int_{Th}^{\infty} P_{I_1}(i) di \quad (4.2)$$

สำหรับสมการที่ 4.2 คือสมการความน่าจะเป็นของความผิดพลาด ซึ่งเรานำสมการที่ 4.1 มาแทนค่า  $P_{I_1}$  ในสมการที่ 4.2 ทำให้เราได้สมการความน่าจะเป็นของความผิดพลาดใหม่เป็น

$$PE = \frac{1}{2} \sum_{i=Th}^{N-1} \binom{N-1}{i} \left( \frac{K^2}{2F} \right)^i \left( 1 - \frac{K^2}{2F} \right)^{N-1-i} \quad (4.3)$$

ซึ่ง  $K$  คือนำหนักโค้ด(จำนวนชิพบิต "1" ในลำดับโค้ด)

$F$  คือความยาวโค้ด

$N$  คือจำนวนผู้ใช้บริการสูงสุดในระบบ

$Th$  คือค่าจุดเริ่มเปลี่ยน(threshold)

$i$  คือจำนวนการแทรกสอด

ประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ OOC คือการนำสมการที่ 4.3 ไปพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของความผิดพลาดเทียบกับค่าจุดเริ่มเปลี่ยน(threshold) หรือหาความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของความผิดพลาดเทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ เช่น  $K, F, N$  ซึ่งเราจะแสดงผลของประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบนี้ในบทที่ 5 ต่อไป

#### 4.1.1.2 ประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ prime

การเข้ารหัสแบบ prime นี้ก็เป็นการเข้ารหัสอีกตัวหนึ่งที่เป็นพื้นฐานของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาดูประสิทธิภาพของการเข้ารหัสนี้เช่นกัน สำหรับประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ prime นี้ก็คือค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดที่ประยุกต์มาจากค่า  $SNR$  ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งบทที่ 3 กล่าวไว้ว่าการลดลงของค่า  $SNR$  มีผลทำให้สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการในเวลาสั้นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในการลดลงของค่า  $SNR$  จะทำให้ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดเพิ่มมากขึ้นด้วย ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดสามารถหาได้จากค่า  $SNR$  ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$PE = Q\left(\frac{-\sqrt{SNR}}{2}\right) = Q\left(\frac{-P}{\sqrt{1.16(K-1)}}\right) \quad (4.4)$$

ซึ่ง $Q(x)$	คือฟังก์ชัน Q
$P$	คือค่าหมายเลข prime
$K$	คือน้ำหนักโค้ด
$SNR$	คืออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

สำหรับประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ prime นี้ จะเป็นการนำเสนอสมการที่ 4.4 ไปพล็อตกราฟ โดยเราจะหาความสัมพันธ์ของค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดเทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการในเวลาเดียวกันในบทที่ 5

#### 4.1.1.3 ประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ $2^n$ prime

การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime นี้พัฒนามาจากการเข้ารหัสแบบ prime โดยที่การเข้ารหัสแบบนี้จะกำหนดให้น้ำหนักโค้ดมีค่าเท่ากับ  $2^n$  ส่วนความยาวโค้ดจะมีความยาวเท่ากับการเข้ารหัสแบบ prime คือ  $F = P^2$  ประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime จะขึ้นอยู่กับสมการที่ 4.5 ซึ่งเป็นการหาความน่าจะเป็นของความผิดพลาด

$$PE = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{2^n} (-1)^i \frac{2^n!}{i!(2^n - i)!} \left[ 1 - \frac{2^n i}{4F} \left( 2 - \frac{i}{2^n} \right) \right]^{N-1} \quad (4.5)$$

ซึ่ง $i$	คือจำนวนการแทรกสอด
$2^n$	คือน้ำหนักโค้ด
$F$	คือความยาวโค้ด
$N$	คือจำนวนผู้ใช้บริการสูงสุดของระบบ

ในการวิจัยเราจะนำเสนอสมการที่ 4.5 นี้ไปพล็อต เพื่อหาค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตเทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการในระบบ ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 5

#### 4.1.1.4 ประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime นี้ จะวิเคราะห์จากสมการที่ 4.6 การเข้ารหัสแบบนี้พัฒนามาจากการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime โดยที่การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime จะมีค่าสหสัมพันธ์ข้ามเป็น 2 แต่สำหรับการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime จะมีค่าสหสัมพันธ์ข้ามเป็น 1 โดยการเพิ่มบิต “0” จำนวน  $P-1$  บิตเข้าไปในแต่ละลำดับโค้ด การเข้ารหัสทั้งสองแบบจะมีน้ำหนักโค้ดเท่ากัน แต่ว่าความยาวโค้ดจะไม่เท่ากัน การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime จะมีความยาวโค้ด  $F = P(2P-1)$

$$PE = \frac{1}{2} \sum_{i=2^n}^{N-1} \binom{N-1}{i} \left( \frac{2^{2n}}{2P(2P-1)} \right)^i \left( 1 - \frac{2^{2n}}{2P(2P-1)} \right)^{N-1-i} \quad (4.6)$$

เราจะนำสมการที่ 4.6 นี้ไปพล็อตกราฟ เพื่อหาค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการในระบบ ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 5 ต่อไป

#### 4.1.2 กรณีมีอุปกรณ์ Optical Hard-Limiter

สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการนำอุปกรณ์ Optical hard-limiter มาใช้ในระบบทางเครื่องรับ มีผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น ในการวิจัยเราจะนำเฉพาะการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime และการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime มาวิเคราะห์ ซึ่งรูปแบบของการเข้ารหัสทั้งสองแบบจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.1.2.1 การเข้ารหัสแบบ $2^n$ prime โดยมี Optical hard-limiter ไว้ในระบบ

สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ optical hard-limiter ไว้ในระบบ จากสมการที่ 4.5 เมื่อมีการใส่ optical hard-limiter ไว้ที่ภาครับทำให้เราได้สมการใหม่เป็นสมการที่ 4.7

$$PE \leq \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{2^{n-1}} (-1)^i \binom{2^{n-1}}{i} \left( 1 - \frac{2^{n-1} i}{P^2} \right)^{N-1} \quad (4.7)$$

เราจะนำสมการที่ 4.7 นี้ไปพล็อตกราฟ เพื่อดูประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ optical hard-limiter ไว้ที่ภาครับ

##### 4.1.2.2 การเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime โดยมี Optical hard-limiter ไว้ในระบบ

สำหรับหัวข้อนี้ก็คล้ายกับหัวข้อที่ 4.1.2.1 เพียงแต่ใช้โค้ดต่างกัน หัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ optical hard-limiter ไว้ที่ภาครับของระบบ โดยในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบนี้เราจะวิเคราะห์จากสมการที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$PE \leq \frac{1}{2} \prod_{i=0}^{2^n-1} \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{2^{n-1}}{P(2P-1)} \right)^{N-1-i} \right\} \quad (4.8)$$

ในงานวิจัยนี้จะใช้สมการที่ 4.8 นี้พล็อตกราฟ เพื่อดูประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ optical hard-limiter ไว้ที่ภาครับ

#### 4.2 การวิเคราะห์ระบบเชิงคณิตศาสตร์กรณีที่มีสัญญาณรบกวน

ในการวิเคราะห์ระบบแบบนี้จะคำนึงถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งสัญญาณรบกวนที่เราจะมาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้คือสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (thermal noise) และสัญญาณรบกวนที่ APD (APD noise) ซึ่งสัญญาณรบกวนทั้งสองนี้จะเกิดขึ้นที่อุปกรณ์ตัวรับแสง (photodetector) และอุปกรณ์ต่างๆที่ภาครับของระบบ โดยในการวิเคราะห์ระบบแบบนี้เราเลือกใช้เฉพาะการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime เนื่องจากการเข้ารหัสแบบนี้มีคุณสมบัติการจำกัดค่าสหสัมพันธ์ข้ามเป็น 1 ซึ่งทำให้ลดผลกระทบจากการแทรกสอดของผู้ใช้บริการที่มีอยู่ในระบบ อีกทั้งการเข้ารหัสแบบนี้มีรูปแบบโครงสร้างเป็นแบบอนุกรม ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าต่ำ สำหรับในการวิเคราะห์เราจะทำการวิเคราะห์ห้อยู่สองกรณี คือ กรณีที่ระบบทางด้านเครื่องรับไม่มีอุปกรณ์ optical hard-limiter ต่ออยู่ และกรณีที่ระบบทางด้านเครื่องรับมีอุปกรณ์ optical hard-limiter ต่ออยู่ ก่อนอื่นเราจะกล่าวถึงพารามิเตอร์ต่างๆที่เกิดจากสัญญาณรบกวนก่อน หลังจากนั้นจะนำพารามิเตอร์เหล่านี้ไปทำการวิเคราะห์ในการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime

ในตัวโฟโตนิกไดโอดจำนวนของโฟตอนจะถูกดูดกลืนจากดีเทกเตอร์แบบ APD โดยที่ค่าเฉลี่ยของการดูดกลืนโฟตอนจะมาจาก  $\lambda_s T_c$  ซึ่ง  $\lambda_s$  คืออัตราส่วนการดูดกลืนโฟตอนจากชิพบิต “1” ของลำดับไค้ดที่ต้องการ โดยมีรูปแบบสมการดังสมการที่ 4.9

$$\lambda_s = \frac{\eta P_o}{hf} \quad (4.9)$$

ซึ่ง  $P_o$  คือกำลังงานที่รับเข้ามา

$\eta$  คือสัมประสิทธิ์ของ APD ในการเปลี่ยนรูปโฟตอนไปสู่โฟโตนิกไดโอด

$h$  คือค่าคงที่ของ Plank ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $6.624 \times 10^{-34}$

$f$  คือความถี่แสง

ในตัวดีเทกเตอร์แบบ APD นั้นจะมีการดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดที่เข้ามาและแปลงเป็น  $m$  อิเล็กตรอน โดยเฉลี่ยแล้วในการดูดกลืนจะมีค่าเป็น  $\lambda T_c$  โดยที่  $\lambda$  คืออัตราการดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดจากสัญญาณ, แสงรอบๆตัว APD, และกระแสรั่วไหลจากตัว APD

$$\lambda = \frac{\lambda_s + \lambda_b + I_b / e}{\lambda_s / M_e + \lambda_b + I_b / e} \quad (4.10)$$

- ซึ่ง  $\lambda_b$  คืออัตราการดูดกลืนโฟตอนจากแสงรอบๆตัว APD ( $n_b(i)$ )  
 $e$  คือประจุของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.601 \times 10^{-19}$  คูโลมบ์  
 $I_b / e$  คือการรั่วไหลของกระแสรั่วไหลของตัว APD  
 $M_e$  คืออัตราการสูญเสียของกำลังงานเลเซอร์ในสถานะชีพบิต “1” และ “0”

สำหรับทางภาครับ เอาท์พุทของการทำสหสัมพันธ์ลำดับไค้คจะได้สัญญาณที่ต้องการปนกับสัญญาณรบกวน ซึ่งจะมีรูปแบบสมการดังสมการที่ 4.11

$$Z_1 = \frac{1}{T_c} \int_0^T APD(r(t)C_1(t) + n_b(t))dt \quad (4.11)$$

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ  $Z_1$  เราจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองส่วนคือการวิเคราะห์ลำดับไค้คที่ชีพบิต “1” และการวิเคราะห์ลำดับไค้คที่ชีพบิต “0” จากสมการที่ 4.11 จะกลายเป็นสมการที่ 4.12

$$Z_1 = \sum_{k=1}^K X_{m,k} + \sum_{i=1}^{F-K} X_{s,i} \quad (4.12)$$

ในสมการที่ 4.12 เทอมแรกคือ การวิเคราะห์ลำดับไค้คที่ชีพบิต “1” ซึ่ง  $m$  คือความหมายของชีพบิต “1” และ  $k$  คือจำนวนชีพบิต “1” ส่วนเทอมที่สองคือ การวิเคราะห์ลำดับไค้คที่ชีพบิต “0” ซึ่ง  $s$  คือความหมายของชีพบิต “0” และ  $i$  คือจำนวนชีพบิต “0”

$$I_1 = \sum_{k=1}^K i_k \quad (4.13)$$

เรากำหนดให้  $I_1$  คือจำนวนการแทรกสอดที่ไม่ต้องการทั้งหมดทางภาครับ ส่วน  $i_k$  คือจำนวนชิพบิตที่แทรกสอดที่ตำแหน่งชิพบิต “1” ของสัญญาณที่ต้องการ สำหรับค่าแฟกเตอร์สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสง ( $F$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ 4.14

$$F_e = k_{eff}G + (2 - 1/G)(1 - k_{eff}) \quad (4.14)$$

ซึ่ง  $G$  คืออัตราขยายเฉลี่ยของ APD

$k_{eff}$  คืออัตราการไอออนไนท์ของประสิทธิผลของ APD

ในการส่งสัญญาณข้อมูลบิต “1” มาที่เครื่องรับ เอาท์พุทของการทำสหสัมพันธ์ที่เครื่องรับ ( $Z$ ) จะประกอบด้วยสัญญาณข้อมูลกับสัญญาณรบกวน ซึ่งฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ  $Z$ , สามารถหาได้จากสมการที่ 4.15

$$pz_1(z|I_1, b=1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{b1}^2}} e^{-(z-\mu_{b1})^2/2\sigma_{b1}^2} \quad (4.15)$$

โดยที่ค่าความเบี่ยงเบนจากสัญญาณรบกวนในกรณีที่ส่งสัญญาณข้อมูลบิต “1” ( $\mu_{b1}$ ) และค่าความแปรปรวนจากสัญญาณรบกวนในกรณีที่ส่งสัญญาณข้อมูลบิต “1” ( $\sigma_{b1}^2$ ) หาได้จากสมการที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ

$$\mu_{b1} = GT_c [(K + I_1)\lambda_s + (KN - (K + I_1))\lambda_s / M_e + F(\lambda_b + I_b / e)] + FT_c I_s / e \quad (4.16)$$

$$\sigma_{b1}^2 = G^2 F_e T_c [(K + I_1)\lambda_s + (KN - (K + I_1))\lambda_s / M_e + F(\lambda_b + I_b / e)] + F(T_c I_s / e + \sigma_{th}^2) \quad (4.17)$$

ซึ่ง  $I_s$  คือกระแสรั่วไหลตรงผิวของ APD

$\sigma_{th}^2$  คือค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน ซึ่งหาได้จากสมการที่ 4.18

$$\sigma_{ch}^2 = 2k_b T_r T_c / (e^2 R_L) \quad (4.18)$$

ซึ่ง  $k_b$  คือค่าคงที่ Boltzmann ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.379 \times 10^{-23}$

$T_r$  คืออุณหภูมิจากสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับ

$R_L$  คือตัวต้านทานที่เครื่องรับ

ในการส่งสัญญาณข้อมูลบิต “0” มาที่เครื่องรับ เราสามารถหาฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ  $Z$ , ได้จากสมการที่ 4.19

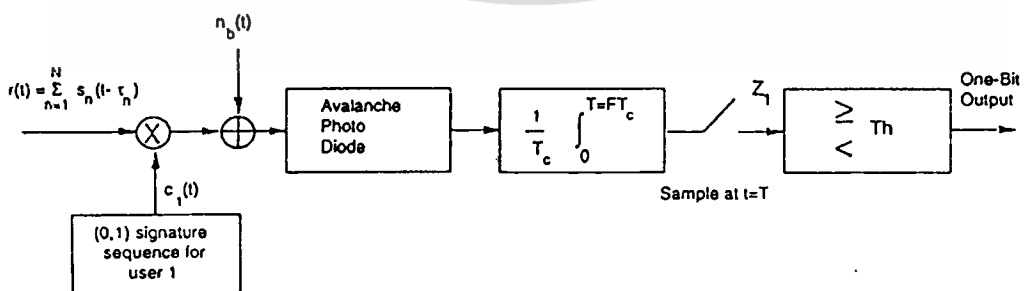
$$p_{Z_1}(z|I_1, b=0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{b_0}^2}} e^{-(z-\mu_{b_0})^2/2\sigma_{b_0}^2} \quad (4.19)$$

ซึ่งค่าความเบี่ยงเบนจากสัญญาณรบกวนในกรณีที่ส่งสัญญาณข้อมูลบิต “0” ( $\mu_{b_0}$ ) และค่าความแปรปรวนจากสัญญาณรบกวนในกรณีที่ส่งสัญญาณข้อมูลบิต “0” ( $\sigma_{b_0}^2$ ) หาได้จากสมการที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ

$$\mu_{b_0} = GT_c [I_1 \lambda_s + (KN - I_1) \lambda_s / M_e + F(\lambda_b + I_b / e)] + FT_c I_s / e \quad (4.20)$$

$$\sigma_{b_0}^2 = G^2 F_e T_c [I_1 \lambda_s + (KN - I_1) \lambda_s / M_e + F(\lambda_b + I_b / e)] + F(T_c I_s / e + \sigma_{ch}^2) \quad (4.21)$$

#### 4.2.1 กรณีไม่มีอุปกรณ์ Optical Hard-Limiter



รูปที่ 4.1 แสดงไดอะแกรมของระบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงในช่องสัญญาณรบกวน กรณีไม่มีอุปกรณ์ Optical hard-limiter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1.1 การเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime ที่มีสัญญาณรบกวน

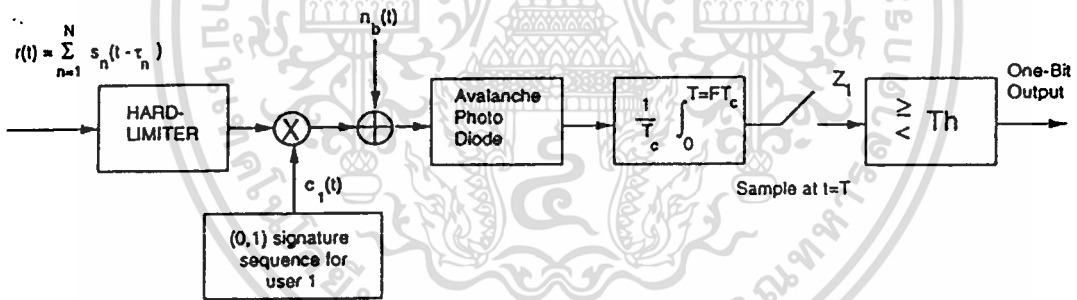
ในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อพิจารณาสัญญาณข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนปนเข้ามา โดยสมการของการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ โดยการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ที่มีสัญญาณรบกวนนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ 4.22

$$PE_{noise} = E_{I_1, b} [P_b(\text{Error} | I_1, b, Th)]$$

$$= \frac{1}{2} \left[ 1 + PE \left\{ Q \left( \frac{Th - \mu_{b0}(i)}{\sigma_{b0}(i)} \right) - Q \left( \frac{Th - \mu_{b1}(i)}{\sigma_{b1}(i)} \right) \right\} \right] \quad (4.22)$$

ซึ่ง  $PE$  ในสมการที่ 4.22 นี้คือสมการของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ในกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์ optical hard-limiter ซึ่งก็คือการนำสมการที่ 4.6 มาทำการวิเคราะห์ในช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน

#### 4.2.2 กรณีมีอุปกรณ์ Optical Hard-Limiter



รูปที่ 4.2 แสดงไดอะแกรมของระบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงในช่องสัญญาณรบกวน กรณีที่มีอุปกรณ์ Optical hard-limiter

##### 4.2.2.1 การเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime ที่มีสัญญาณรบกวน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime โดยมีอุปกรณ์ optical hard-limiter ต่อไว้ที่ภาครับ โดยคำนึงถึงสัญญาณรบกวนที่มีอยู่ในภาครับของระบบ ในการวิจัยเรากำหนดให้  $I_1$  เป็นผลรวมทั้งหมดของซิฟบิตของการแทรกสอด และ  $|i|$  เป็นจำนวนของตำแหน่งซิฟบิตที่ไม่เป็นศูนย์ของ  $i$  ซึ่ง  $i$  เท่ากับ  $(i_1, i_2, \dots, i_k)$  ประสิทธิภาพของระบบที่มีอุปกรณ์ optical hard-limiter ติดตั้งอยู่จะขึ้นอยู่กับ  $|i|$  และ  $I_1$  ส่วนประสิทธิภาพของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ optical hard-limiter ติดตั้งอยู่จะขึ้นอยู่กับ  $I_1$  เพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าความน่าจะเป็นของเวกเตอร์การแทรกสอด  $i$  ที่มีตำแหน่งชีพิตที่ไม่เป็นศูนย์อยู่  $m$  ตำแหน่ง จะมีสมการดังสมการที่ 4.23

$$\Pr(|i| = m | I_1) = \sum_{\substack{i \in G_{I_1} \\ \text{and} \\ |i|=m}} NDP(i) P(i; F_{I_1}) \quad (4.23)$$

ซึ่ง  $F_{I_1}$  คือชุดของเวกเตอร์การแทรกสอดทั้งหมด โดยที่น้ำหนักโค้ดทั้งหมดเท่ากับ  $I_1$

$G_{I_1}$  คือชุดของเวกเตอร์การแทรกสอดใน  $F_{I_1}$

$NDP(i)$  คือจำนวนของการเปลี่ยนลำดับของเวกเตอร์  $i$  ใน  $G_{I_1}$

$P(i; F_{I_1})$  คือการแจกแจงแบบมัลติโนเมียลสำหรับเวกเตอร์การแทรกสอด  $i$  ใน  $F_{I_1}$

สำหรับในการวางอุปกรณ์ optical hard-limiter ไว้ในระบบ จะมีฟังก์ชันสำหรับตัดสินใจว่าตำแหน่งชีพิตที่พิจารณานั้นเป็นชีพิต “1” หรือว่า “0” ซึ่งฟังก์ชันนั้นก็คือ

$$i_{Me} = \begin{cases} 1 & \text{if } N \geq M_e \\ 0 & \text{if } N < M_e \end{cases} \quad (4.24)$$

ซึ่ง  $N$  คือจำนวนผู้ใช้บริการสูงสุดในระบบ

$M_e$  คืออัตราส่วนของกำลังงานเลเซอร์ในสถานะชีพิต “1” กับสถานะชีพิต “0”

ในกรณีที่สัญญาณบิตข้อมูล “0” ส่งมาที่ภาครับ เราสามารถหาประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime โดยมีอุปกรณ์ optical hard-limiter ต่อไว้ที่ภาครับ จากสมการที่ 4.25

$$\begin{aligned} & P_b(\text{Error} | "0" \text{ bit}, Th) \\ &= \Pr(z_1 \geq Th | I_1 = 0, "0" \text{ bit}) p_{I_1}(I_1 = 0) \\ &+ \sum_{j=1}^{N-1} \Pr(z_1 \geq Th | I_1 = j, "0" \text{ bit}) p_{I_1}(j) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \Pr(z_1 \geq Th | I_1 = 0, "0" \text{ bit}) p_{I_1}(I_1 = 0) \\
&\quad + \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{m=1}^{\min(K, I_1=j)} \Pr(z_1 \geq Th | I_1 = j, |i| = m, "0" \text{ bit}) p_{I_1}(j) \Pr(|i| = m | I_1 = j) \\
&= Q\left(\frac{Th - \mu_0}{\sigma_0}\right) p_{I_1}(I_1 = 0) + \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{m=1}^{\min(K, I_1=j)} \\
&\quad Q\left(\frac{Th - \mu_0}{\sigma_0}\right) p_{I_1}(j) \Pr(|i| = m | I_1 = j)
\end{aligned} \tag{4.25}$$

ซึ่ง  $\mu_0 = \mu_{b0}$  จากสมการที่ 4.20 โดยที่  $I_1$  ในเทอมแรกถูกกำหนดให้เป็น  $K \cdot i_{Me}$  และ  $(KN - I_1)\lambda_s / M_e$  ของเทอมที่สองถูกกำหนดให้เป็นศูนย์  
 $\sigma_0^2 = \sigma_{b0}^2$  จากสมการที่ 4.21 โดยที่  $I_1$  ในเทอมแรกถูกกำหนดให้เป็น  $K \cdot i_{Me}$  และ  $(KN - I_1)\lambda_s / M_e$  ของเทอมที่สองถูกกำหนดให้เป็นศูนย์  
 $\mu_0(m) = \mu_{b0}$  จากสมการที่ 4.20 โดยที่  $I_1$  ในเทอมแรกถูกกำหนดให้เป็น  $m$  และ  $(KN - I_1)\lambda_s / M_e$  ของเทอมที่สองถูกกำหนดให้เป็น  $(K - m) \cdot i_{Me} \cdot \lambda_s$   
 $\sigma_0^2(m) = \sigma_{b0}^2$  จากสมการที่ 4.21 โดยที่  $I_1$  ในเทอมแรกถูกกำหนดให้เป็น  $m$  และ  $(KN - I_1)\lambda_s / M_e$  ของเทอมที่สองถูกกำหนดให้เป็น  $(K - m) \cdot i_{Me} \cdot \lambda_s$   
 $p_{I_1}(j) = PE$  ของสมการที่ 4.6

สำหรับกรณีที่สัญญาณบิตข้อมูล "1" ส่งมาที่ภาครับ เราสามารถหาประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบ 2<sup>n</sup> extended prime โดยมีอุปกรณ์ optical hard-limiter ต่อไว้ที่ภาครับ จากสมการที่ 4.26

$$\begin{aligned}
&P_b(\text{Error} | "1" \text{ bit}, Th) \\
&= \sum_{j=0}^{N-1} \Pr(z_1 < Th | I_1 = j, "1" \text{ bit}) p_{I_1}(j) \\
&= \sum_{j=0}^{N-1} \left( 1 - Q\left(\frac{Th - \mu_1}{\sigma_1}\right) \right) p_{I_1}(j)
\end{aligned} \tag{4.26}$$

ซึ่ง  $\mu_1 = \mu_{b1}$  จากสมการที่ 4.16 โดยที่  $(K + I_1)$  ในเทอมแรกถูกกำหนดให้เป็น  $K$  และ  $(KN - (K + I_1))\lambda_s / M_e$  ของเทอมที่สองถูกกำหนดให้เป็นศูนย์  
 $\sigma_1^2 = \sigma_{b1}^2$  จากสมการที่ 4.17 โดยที่  $(K + I_1)$  ในเทอมแรกถูกกำหนดให้เป็น  $K$  และ  $(KN - (K + I_1))\lambda_s / M_e$  ของเทอมที่สองถูกกำหนดให้เป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ระบบ ในการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime โดยมีอุปกรณ์ optical hard-limiter ต่อไว้ที่ภาครับ สามารถหาได้จากสมการที่ 4.27 โดยการรวมกันของสมการที่ 4.25 และสมการที่ 4.26

$$P_b = \frac{\min 1}{Th} \frac{1}{2} \{P_{b,Error}|"0" bit,Th} + P_{b,Error}|"1" bit,Th\} \quad (4.27)$$

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เราเลือกใช้ในการวิจัย

(Laser wavelength=825 nm)	$3.634 \times 10^{14}$ Hz
APD Quantum Efficiency	0.6
APD Gain	100
APD Effective Ionization Ratio	0.02
APD Bulk Leakage Current	0.1 nA
APD Surface Leakage Current	10 nA
Background Light Photon Arrival Rate	$10^9$ counts/s
Modulation Extinction Ratio	100
Data Bit Rate for 1 bit/sequence period	30 Mbs
Receiver Noise Temperature	1100 K
Receiver Load Resistor	1030 $\Omega$
Laser Power at Receiver	-60 dBW

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบที่มีสัญญาณรบกวน ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆนี้ถูกแสดงให้ดูในตารางที่ 4.1

## บทที่ 5

### ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ

สำหรับบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ โดยการใช้โปรแกรม Matlab เพื่อเลียนแบบทำงาน โดยจะใช้สมการจากบทที่ 4 มาทำการวิเคราะห์ระบบ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการเข้ารหัสทางแสงแบบต่างๆที่ใช้ในเส้นใยแก้วนำแสง โดยเลือกใช้การเข้ารหัสแบบ OOC, การเข้ารหัสแบบ prime, การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime และการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime นอกจากนี้ยังได้เลือกใช้การเข้ารหัสทางแสงแบบ  $2^n$  extended prime มาวิเคราะห์ในระบบที่มีสัญญาณรบกวนเชิงความร้อนและสัญญาณรบกวนที่ APD โดยแบ่งหัวข้อในการวิเคราะห์ได้ดังนี้

#### 5.1 ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดของระบบที่ไม่มีสัญญาณรบกวน

##### 5.1.1 ระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ Optical hard-limiter

5.1.1.1 ผลของการเข้ารหัสแบบ OOC เทียบกับค่าจุดเริ่มเปลี่ยน(threshold)

5.1.1.2 ผลของการเข้ารหัสแบบ OOC เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการ

5.1.1.3 ผลของการเข้ารหัสแบบ prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการ

5.1.1.4 ผลของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการ

5.1.1.5 ผลของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการ

5.1.1.6 เปรียบเทียบผลของการเข้ารหัสระหว่าง  $2^n$  prime กับ  $2^n$  extended prime

##### 5.1.2 ระบบที่มีอุปกรณ์ Optical hard-limiter

สำหรับหัวข้อนี้เราจะนำเฉพาะ 2 โค้ดเท่านั้น มาวิเคราะห์คือ การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime กับ การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime

5.1.2.1 ผลของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการ

5.1.2.2 ผลของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการ

#### 5.2 ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดของระบบที่มีสัญญาณรบกวน โดยใช้ การเข้ารหัสทางแสงแบบ $2^n$ extended prime

##### 5.2.2 ผลของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ Optical hard-limiter

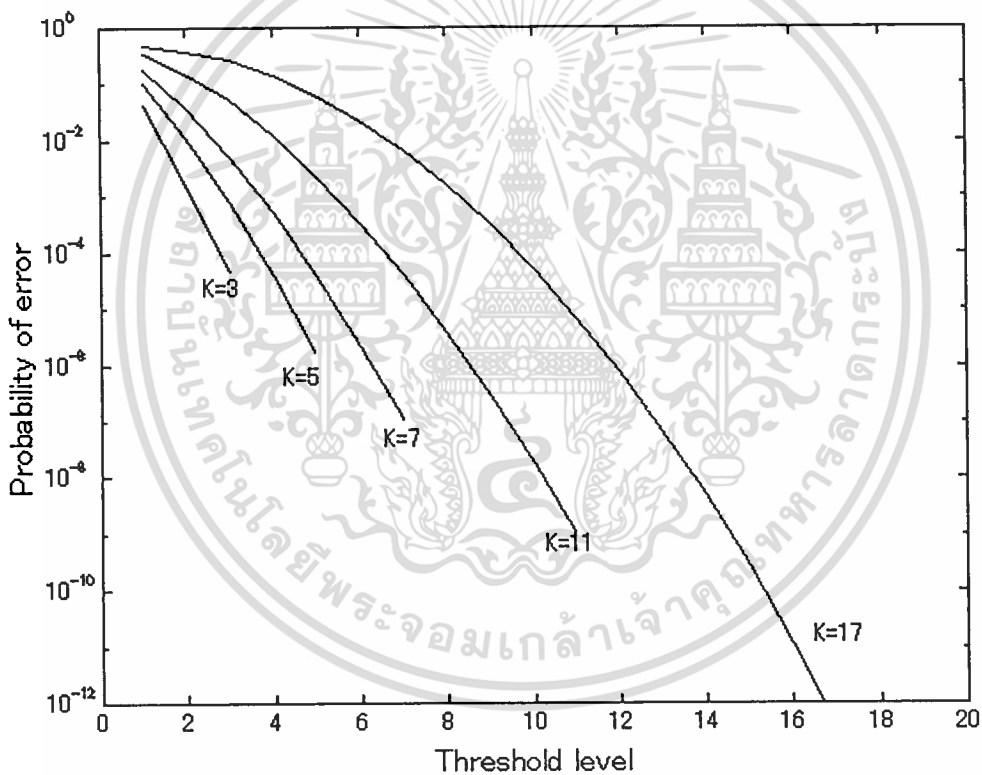
##### 5.2.3 ผลของระบบที่มีอุปกรณ์ Optical hard-limiter

## 5.1 ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดของระบบที่ไม่มีสัญญาณรบกวน

### 5.1.1 ระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ Optical hard-limiter

#### 5.1.1.1 ผลของการเข้ารหัสแบบ OOC เทียบกับค่าจุดเริ่มเปลี่ยน(threshold)

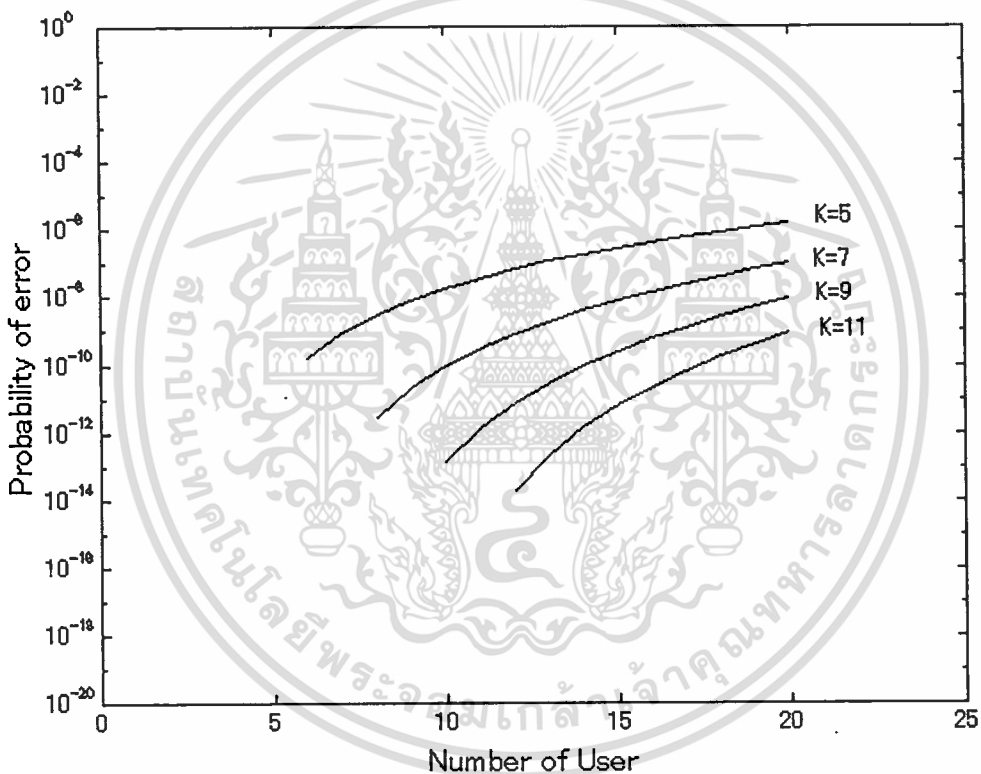
รูปที่ 5.1 แสดงค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดของระบบเทียบกับค่าจุดเริ่มเปลี่ยน(threshold) โดยใช้การเข้ารหัสแบบ OOC ด้วยการกำหนดค่าน้ำหนักโค้ดเท่ากับ 3, 5, 7, 11 และ 17 ความยาวโค้ดเท่ากับ 1000 และจำนวนผู้ใช้บริการสูงสุดในระบบเท่ากับ 20 จากรูปจะเห็นว่าประสิทธิภาพของระบบจะลดลงเมื่อในระบบที่มีน้ำหนักโค้ดมากมีการใช้ค่าจุดเริ่มเปลี่ยน(threshold) ต่ำ ซึ่งสังเกตได้จากที่จุดเริ่มเปลี่ยน(threshold) เท่ากับ 1 จะเห็นว่าระบบที่มีค่าน้ำหนักโค้ดน้อยจะมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบที่มีค่าน้ำหนักโค้ดมาก



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดของบิตกับระดับ Threshold โดยที่  $F=1000$ ,  $N=20$  และ  $K=3, 5, 7, 11$  และ  $17$

### 5.1.1.2 ผลของการเข้ารหัสแบบ OOC เทียบกับจำนวนผู้ให้บริการ

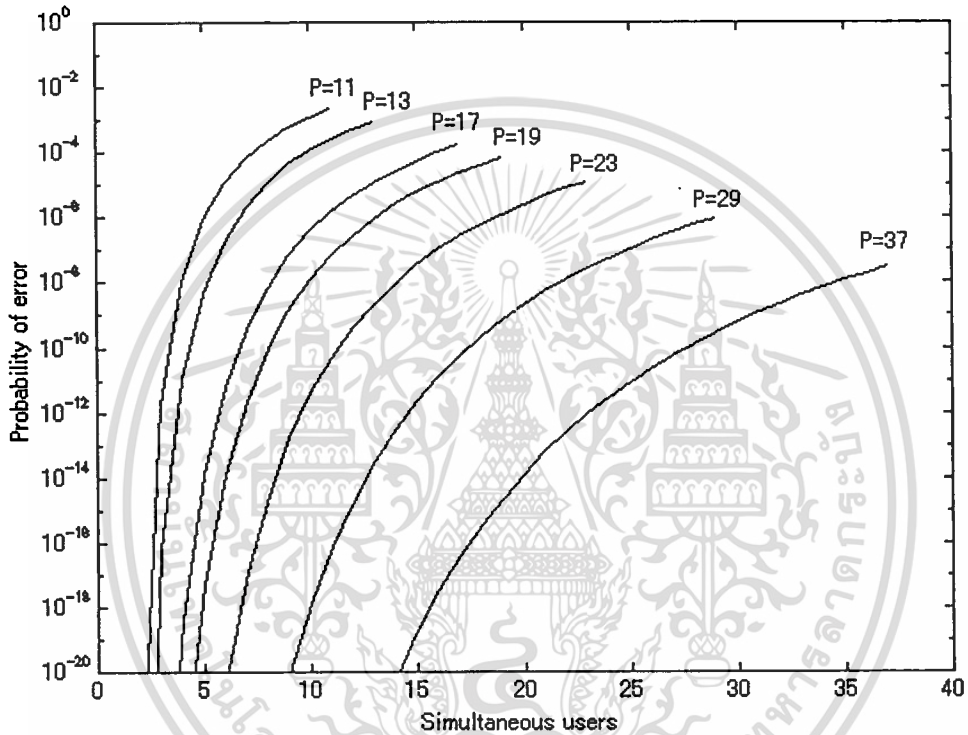
รูปที่ 6.2 แสดงค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบเทียบกับจำนวนผู้ให้บริการในระบบ โดยใช้การเข้ารหัสทางแสงแบบ OOC ซึ่งได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับหัวข้อ 5.1.1.1 คือกำหนดค่าน้ำหนักโค้ดเท่ากับ 3, 5, 7, 11 และ 17 ความยาวโค้ดเท่ากับ 1000 และจำนวนผู้ให้บริการสูงสุดในระบบเท่ากับ 20 จากรูปจะเห็นว่าระบบที่มีน้ำหนักโค้ดมากจะมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบที่มีน้ำหนักโค้ดน้อยในกรณีที่ผู้ใช้บริการในระบบมาก ซึ่งสังเกตได้จากจุดที่ผู้ใช้บริการเท่ากับ 20 แต่อย่างไรก็ตามระบบที่มีน้ำหนักโค้ดมากจะสามารถรองรับจำนวนผู้ให้บริการในระบบได้น้อยกว่าระบบที่มีน้ำหนักโค้ดน้อย



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบที่  $F=1000$ ,  $N=20$  และ  $K=5, 7, 9$  และ  $11$  เทียบกับจำนวนผู้ให้บริการในระบบ

### 5.1.1.3 ผลของการเข้ารหัสแบบ prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการ

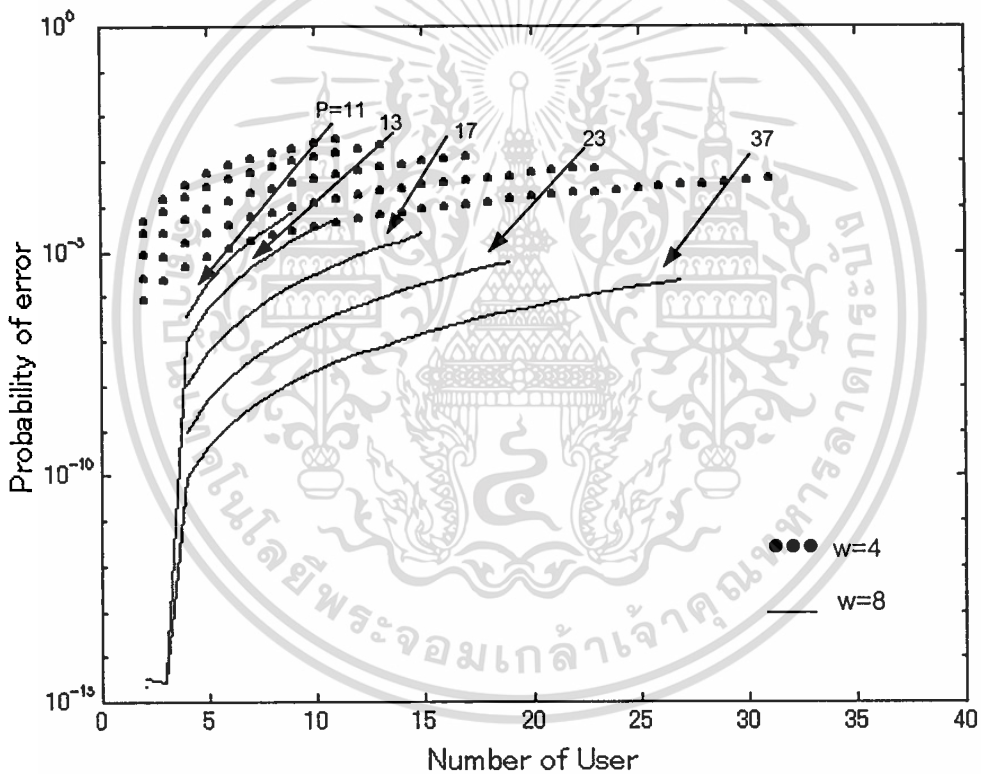
จากรูปที่ 6.3 แสดงค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบที่ใช้การเข้ารหัสแบบ prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการในระบบในเวลาเดียวกัน โดยกำหนดให้ความยาวโค้ดเท่ากับ  $P^2$  และในหัวข้อนี้กำหนดให้  $P = 11, 13, 17, 19, 29$  และ  $37$  จากรูปจะเห็นว่าระบบที่มีค่าหมายเลข prime มากจะมีประสิทธิภาพดีกว่าระบบที่มีค่าหมายเลข prime น้อย และยังสามารถรองรับผู้ใช้บริการในเวลาเดียวกันได้มากกว่าด้วย



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบเทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการ โดยมีค่าหมายเลข prime เท่ากับ 11, 13, 17, 23, 29 และ 37

#### 5.1.1.4 ผลของการเข้ารหัสแบบ $2^n$ prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการ

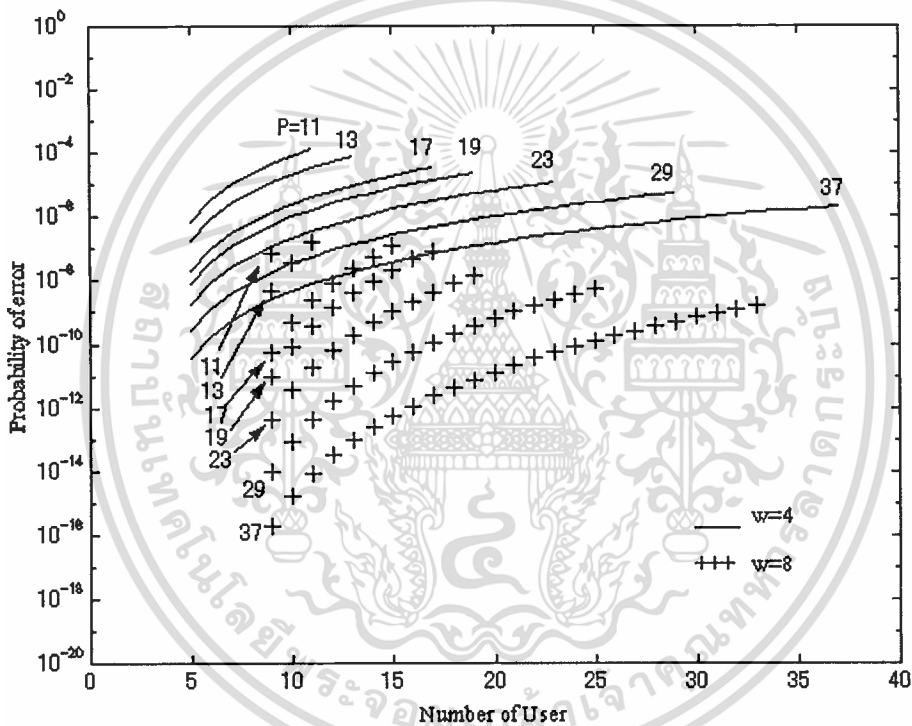
จากรูปที่ 5.4 แสดงค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบโดยใช้การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการในเวลาเดียวกัน ซึ่งกำหนดให้ค่าน้ำหนักโค้ดเท่ากับ  $2^2$  และ  $2^3$  (ในที่นี้แทนด้วย  $\bullet$  และ  $-$  ตามลำดับ) ค่าความยาวโค้ดเท่ากับ  $P^2$  ส่วนค่าหมายเลข prime เท่ากับ 11, 13, 17, 23 และ 37 จะเห็นว่าระบบที่มีค่าหมายเลข prime มากจะมีประสิทธิภาพดีกว่าระบบที่มีค่าหมายเลข prime น้อย และระบบที่มีค่าน้ำหนักโค้ดมากก็จะมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบที่มีค่าหมายเลข prime น้อยด้วยเช่นกัน แต่ระบบที่มีค่าน้ำหนักโค้ดมากจะเห็นว่าสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการได้น้อยกว่าระบบที่มีค่าน้ำหนักโค้ดน้อย



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบที่ใช้การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการในเวลาเดียวกัน โดยการเปลี่ยนค่าหมายเลข prime กำหนดให้ค่าน้ำหนักโค้ดเป็น  $2^2$  และ  $2^3$

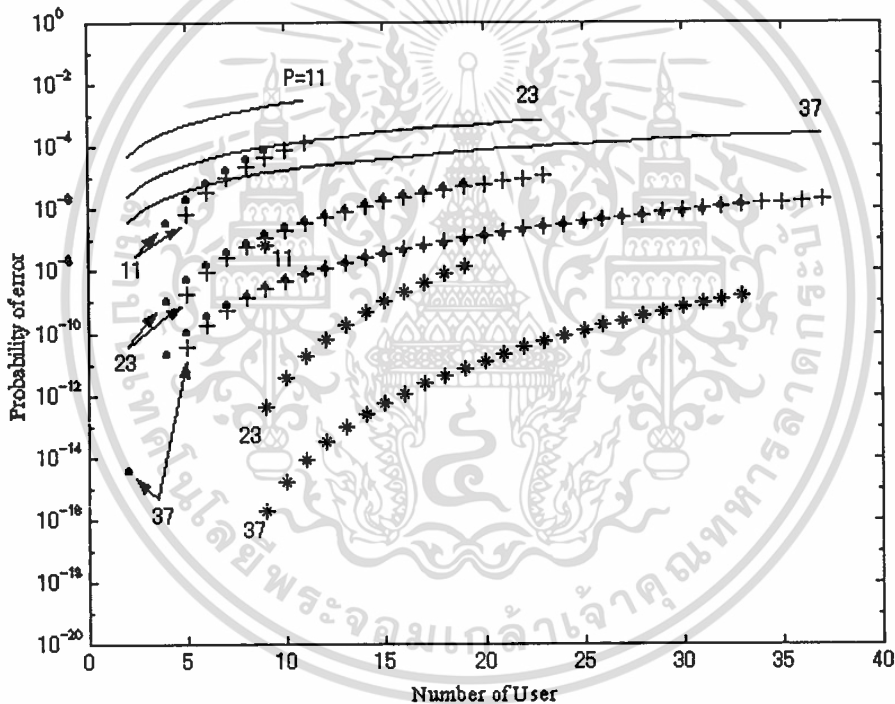
### 5.1.1.5 ผลของการเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการ

จากรูปที่ 5.5 แสดงค่าความน่าจะเป็นของความคิดพลาดบิตของระบบที่ใช้การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime เทียบจำนวนผู้ใช้บริการในเวลาเดียวกัน ซึ่งกำหนดให้ค่าน้ำหนักโค้ดเท่ากับ  $2^2$  และ  $2^3$  (ในที่นี้แทนด้วย  $-$  และ  $+$  ตามลำดับ) ค่าความยาวโค้ดเท่ากับ  $P(2P-1)$  ส่วนค่าหมายเลข prime เท่ากับ 11, 13, 17, 19, 23, 29 และ 37 จะเห็นว่าระบบที่มีค่าหมายเลข prime มากจะมีประสิทธิภาพดีกว่าระบบที่มีค่าหมายเลข prime น้อย และระบบที่มีค่าน้ำหนักโค้ดมากก็จะมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบที่มีค่าหมายเลข prime น้อยด้วยเช่นกัน แต่ระบบที่มีน้ำหนักโค้ดมากจะเห็นว่าสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการได้น้อยกว่าระบบที่มีน้ำหนักโค้ดน้อย



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความคิดพลาดบิตของระบบที่ใช้การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการในเวลาเดียวกัน ด้วยการเปลี่ยนค่าหมายเลข prime โดยกำหนดให้ค่าน้ำหนักโค้ดเป็น  $2^2$  และ  $2^3$

5.1.1.6 เปรียบเทียบผลของการเข้ารหัสระหว่าง  $2^n$  prime กับ  $2^n$  extended prime จากรูปที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตระหว่างการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime กับ  $2^n$  extended prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการในระบบ โดยกำหนดให้น้ำหนักโค้ดเท่ากับ  $2^2$  และ  $2^3$  (ซึ่ง  $-$  คือ  $2^n$  prime ด้วย  $K=2^2$ ,  $\bullet$  คือ  $2^n$  prime ด้วย  $K=2^3$ ,  $+$  คือ  $2^n$  extended prime ด้วย  $K=2^2$ , และ  $*$  คือ  $2^n$  extended prime ด้วย  $K=2^3$ ) และค่าหมายเลข prime เท่ากับ 11, 23 และ 37 จะเห็นว่าการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime มีประสิทธิภาพต่ำกว่าการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ทั้งสองค่าน้ำหนักโค้ดที่เลือกใช้ สังเกตได้จากที่หมายเลข prime เท่ากับ 11 การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ถึงแม้จะมีน้ำหนักโค้ดเท่ากับ  $2^2$  แต่ก็ยังมีประสิทธิภาพมากกว่าการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime ที่มีน้ำหนักโค้ดเท่ากับ  $2^3$

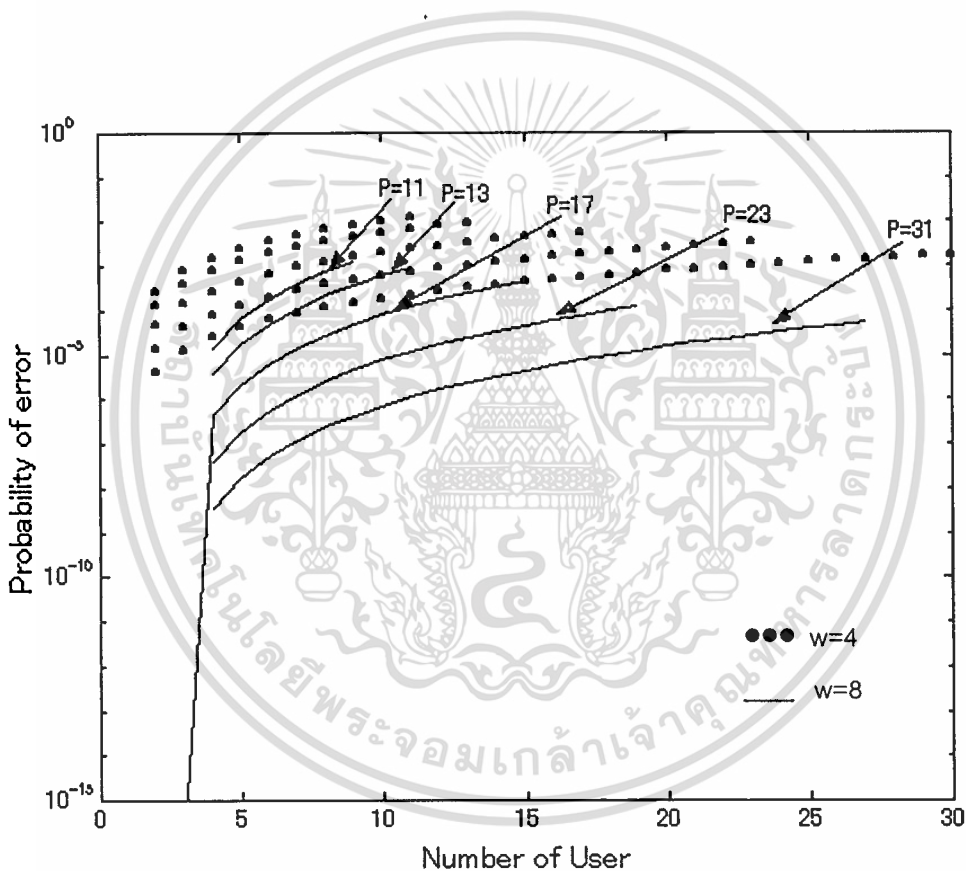


รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime กับ การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ด้วยค่าหมายเลข prime เท่ากันคือ 11, 23 และ 37

## 5.1.2 ระบบที่มีอุปกรณ์ Optical hard-limiter

### 5.1.2.1 ผลของการเข้ารหัสแบบ $2^n$ prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการ

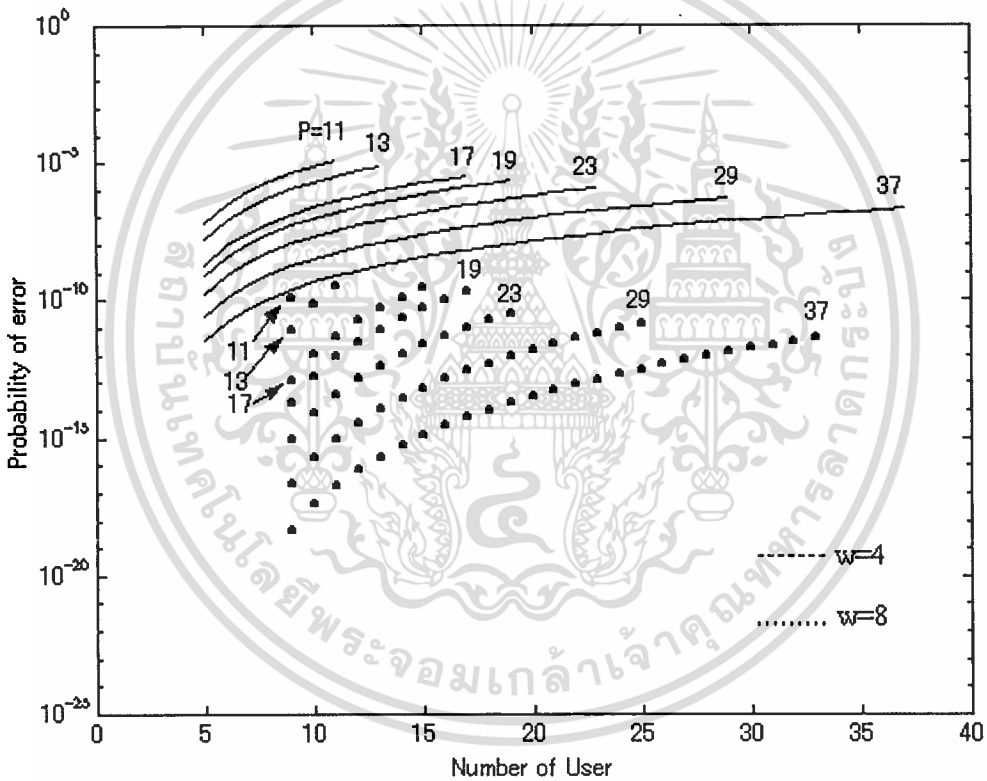
จากรูปที่ 5.7 แสดงค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบด้วยการใช้การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime ในระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ Optical hard-limiter ไว้แล้ว โดยกำหนดให้ค่าน้ำหนักโค้ดมีค่าเท่ากับ  $2^2$  และ  $2^3$  (ซึ่ง  $\bullet$  แทนน้ำหนักโค้ด  $2^2$  และ  $-$  แทนน้ำหนักโค้ด  $2^3$ ) และค่าหมายเลข prime เท่ากับ 11, 13, 17, 23 และ 31 จะเห็นว่าเมื่อระบบที่มีค่าหมายเลข prime มากๆ ประสิทธิภาพของระบบจะดีขึ้น และระบบไหนที่มีค่าน้ำหนักโค้ดมาก ประสิทธิภาพของระบบก็จะมากขึ้นด้วย แต่ระบบที่มีน้ำหนักโค้ดมากจะสามารถรองรับผู้ใช้บริการในระบบได้น้อยกว่า



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต ในกรณีที่ใช้การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  prime ด้วยหมายเลข prime เท่ากับ 11, 13, 17, 23 และ 31

### 5.1.2.2 ผลของการเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime เทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการ

จากรูปที่ 5.8 แสดงค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบด้วยการใช้การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ในระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ Optical hard-limiter ไว้แล้ว โดยกำหนดให้ค่าน้ำหนักโค้ดมีค่าเท่ากับ  $2^2$  และ  $2^3$  (ซึ่ง  $\bullet$  แทนน้ำหนักโค้ด  $2^2$  และ  $-$  แทนน้ำหนักโค้ด  $2^3$ ) และค่าหมายเลข prime เท่ากับ 11, 13, 17, 19, 23, 29 และ 37 จะเห็นว่าเมื่อระบบที่มีค่าหมายเลข prime มากๆ ประสิทธิภาพของระบบจะดีขึ้น และระบบไหนที่มีค่าน้ำหนักโค้ดมาก ประสิทธิภาพของระบบก็จะมากขึ้นด้วย แต่ระบบที่มีน้ำหนักโค้ดมากจะสามารถรองรับผู้ใช้บริการในระบบได้น้อยกว่า

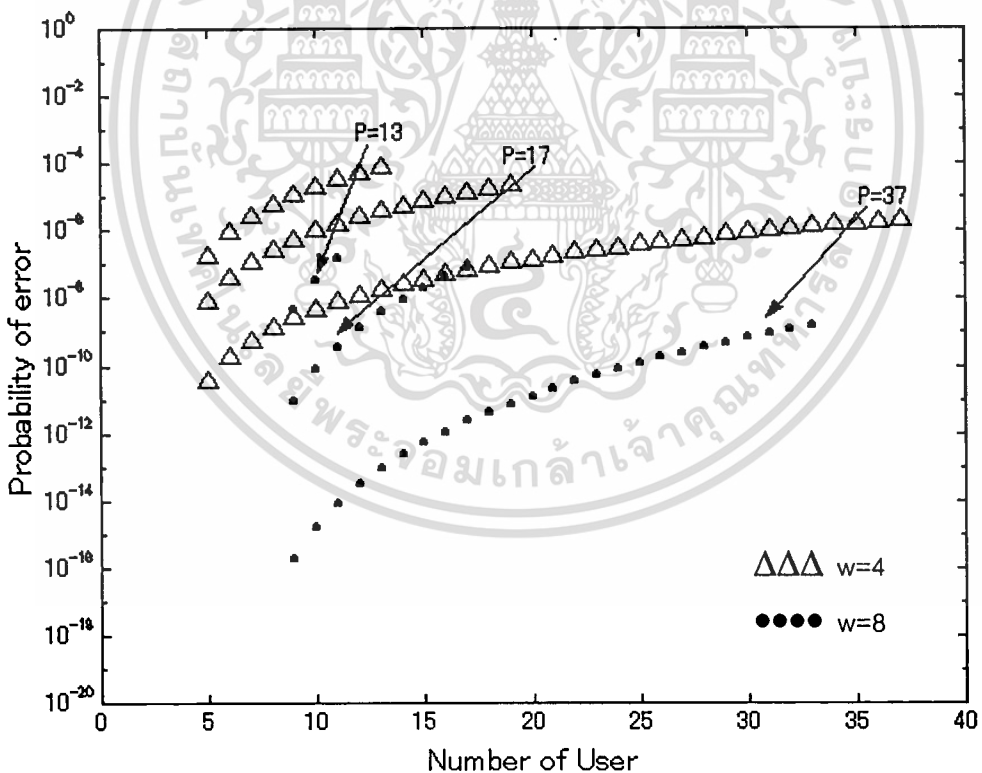


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต ในกรณีที่ใช้การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ด้วยหมายเลข prime เท่ากับ 11, 13, 17, 19, 23, 29 และ 37

## 5.2 ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดของระบบที่มีสัญญาณรบกวน โดยใช้การเข้ารหัสทางแสงแบบ $2^n$ extended prime

### 5.2.1 ผลของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ Optical hard-limiter

จากรูปที่ 5.9 แสดงค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบด้วยการใช้การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ในระบบที่มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น โดยกำหนดให้ค่าน้ำหนักโค้ดมีค่าเท่ากับ  $2^2$  และ  $2^3$  (ซึ่ง  $\Delta$  แทนน้ำหนักโค้ด  $2^2$  และ  $\bullet$  แทนน้ำหนักโค้ด  $2^3$ ) และค่าหมายเลข prime เท่ากับ 13, 17 และ 37 จะเห็นว่าเมื่อระบบที่มีค่าหมายเลข prime มากๆ ประสิทธิภาพของระบบจะดีขึ้น และระบบไหนที่มีค่าน้ำหนักโค้ดมาก ประสิทธิภาพของระบบก็จะมากขึ้นด้วย แต่ระบบที่มีน้ำหนักโค้ดมากจะสามารถรองรับผู้ใช้บริการในระบบได้น้อยกว่า จะเห็นว่าค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบที่มีสัญญาณรบกวนจะมีค่าประมาณค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบที่ไม่มีสัญญาณรบกวน ซึ่งแสดงว่าสัญญาณรบกวนมีผลต่อระบบน้อยมาก

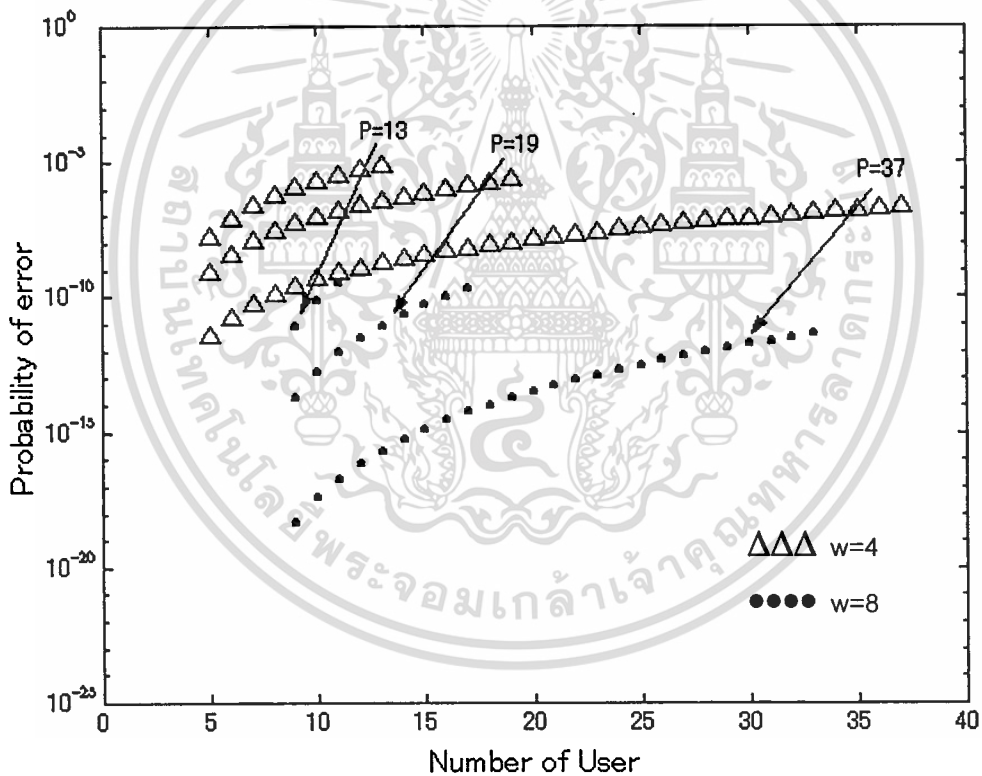


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต ในกรณีที่ใช้การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนอยู่ในระบบ ด้วยหมายเลข prime เท่ากับ 13, 17 และ 37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2 ผลของระบบที่มีอุปกรณ์ Optical hard-limiter

จากรูปที่ 5.10 แสดงค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบด้วยการใช้การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ที่มีการติดตั้ง Optical hard-limiter ไว้ในระบบที่มีสัญญาณรบกวน โดยกำหนดให้ค่าน้ำหนักโค้ดมีค่าเท่ากับ  $2^2$  และ  $2^3$  (ซึ่ง  $\Delta$  แทนน้ำหนักโค้ด  $2^2$  และ  $\bullet$  แทนน้ำหนักโค้ด  $2^3$ ) และค่าหมายเลข prime เท่ากับ 13, 19 และ 37 จะเห็นว่าเมื่อระบบที่มีค่าหมายเลข prime มากๆ ประสิทธิภาพของระบบจะดีขึ้น และระบบไหนที่มีค่าน้ำหนักโค้ดมาก ประสิทธิภาพของระบบก็จะมากขึ้นด้วย แต่ระบบที่มีน้ำหนักโค้ดมากจะสามารถรองรับผู้ใช้บริการในระบบได้น้อยกว่า จะเห็นว่าค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบที่มีสัญญาณรบกวนจะมีค่าประมาณค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบที่ไม่มีสัญญาณรบกวน ซึ่งแสดงว่าสัญญาณรบกวนมีผลต่อระบบน้อยมาก



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต ในกรณีที่ใช้การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ในกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์ Optical hard-limiter ไว้ในระบบที่มีสัญญาณรบกวน ด้วยหมายเลข prime เท่ากับ 13, 19 และ 37

## บทที่ 6

# บทสรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการสรุปและการวิจารณ์ผลการวิจัยที่ได้ทำมาทั้งหมด โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ และข้อเสนอแนะ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

ระบบ CDMA ปกติใช้ในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยมีข้อดีตรงที่มีความปลอดภัยในการส่งข้อมูลสูง ต่อมาจึงได้มีการทำวิจัยโดยนำระบบ CDMA มาใช้ในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงมาใช้ในระบบเครือข่าย สำหรับการเข้ารหัสของระบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นจะต้องเป็นการเข้ารหัสทางแสง โดยจะต้องมีคุณสมบัติสหสัมพันธ์กันระหว่างโค้ดทางแสง สำหรับในงานวิจัยเกี่ยวกับการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นจะมีตัวแปรใหญ่ๆอยู่ 2 ตัวที่ลดทอนประสิทธิภาพของระบบคือ รูปแบบโครงสร้างของการเข้ารหัส และสัญญาณรบกวนที่มีอยู่ในระบบ สำหรับรูปแบบโครงสร้างของการเข้ารหัสทางแสงมีอยู่ 2 แบบคือ โครงสร้างแบบขนาน และ โครงสร้างแบบอนุกรม แต่เดิมการเข้ารหัสทางแสงจะใช้รูปแบบโครงสร้างแบบขนาน แต่เนื่องจากว่าโครงสร้างแบบนี้มีกำลังงานสูญเสียค่อนข้างมาก จึงมีการวิจัยโครงสร้างรูปแบบใหม่ขึ้นโดยอาศัยคุณสมบัติอนุกรมทำให้ลดการสูญเสียของกำลังงานลงได้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเข้ารหัสทางแสง 4 แบบคือ การเข้ารหัสแบบ OOC, prime,  $2^n$  prime และ  $2^n$  extended prime ซึ่ง 2 แบบแรกมีรูปแบบโครงสร้างแบบขนานและ 2 แบบหลังมีรูปแบบโครงสร้างแบบอนุกรม นอกจากนั้นยังได้วิเคราะห์สัญญาณรบกวนที่มีอยู่ในระบบด้วย ซึ่งสัญญาณรบกวนที่เราคำนึงถึงคือ สัญญาณรบกวนเชิงความร้อน และสัญญาณรบกวนที่ APD

จากการวิเคราะห์ผลจะพบว่าในการเข้ารหัสด้วยหมายเลข prime สูง จะทำให้ค่าประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น และระบบที่มีการใช้น้ำหนักโค้ดสูง ก็ทำให้ค่าประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นด้วย แต่จะสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการในเวลาเดียวกันของระบบลดลง สำหรับรูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงผลของระบบที่มีสัญญาณรบกวนชนิดสัญญาณรบกวนเชิงความร้อนและสัญญาณรบกวนที่ APD จะพบว่าสัญญาณรบกวนที่มีอยู่ในระบบมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบน้อยมากเมื่อเทียบกับความผิดพลาดอื่นๆที่เกิดขึ้นในระบบ เช่น ความผิดพลาดที่เกิดจากการแทรกสอด สำหรับปัญหาความผิดพลาดที่เกิดจากการแทรกสอดของผู้ใช้บริการรายอื่นในระบบสามารถลดลงได้ ถ้าทำให้ระบบมีค่าสหสัมพันธ์ข้ามมีค่าเท่ากับ 1

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอผลงานเกี่ยวกับการเข้าถึงแบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง ดังนั้นในการทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นต้องใช้การเข้ารหัสทางแสงที่มีค่าสหสัมพันธ์ข้ามที่มีค่าเป็น 1 โดยการเข้ารหัสทางแสงที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอคือ การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime เนื่องจากการเข้ารหัสแบบนี้มีคุณสมบัติของการสหสัมพันธ์ข้ามเป็น 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Jawad A.S. "Code Division Multiple-Access Techniques in Optical Fiber Networks-Part I: Fundamental principles." IEEE Trans. on commun., vol. 37, no. 8, Aug. 1989. pp. 824-833.
- [2] Jawad A.S., Charles A.B. "Code Division Multiple-Access Techniques in Optical Fiber Networks-Part II: Systems Performance Analysis." IEEE Trans. on commun., vol. 37, no. 8, Aug. 1989. pp. 834-842.
- [3] Wing C.K., Philippe A.P., and Paul R.P. "Performance Comparison of Asynchronous and Synchronous Code-Division Multiple-Access Techniques for Fiber-Optic Local Area Networks." IEEE Trans. on commun., vol. 39, no. 11, Nov. 1991. pp. 1625-1634.
- [4] Hyuck M.K. "Optical Orthogonal Code-Division Multiple-Access System—Part I: APD Noise and Thermal Noise." IEEE Trans. on commun., vol. 42, no. 7, Jul. 1994. pp. 2470-2478.
- [5] Wing C.K., Guu-Chang Y. "Performance Analysis of Optical CDMA with Prime Codes." Electronics letter., vol. 31, no. 7, Mar. 1995. pp. 569-570.
- [6] Wing C.K., Guu-Chang Y., and Jian-Guo Z. " $2^n$  Prime-Sequence Codes and Coding Architecture for Optical Code-Division Multiple-Access." IEEE Trans. on commun., vol. 44, no. 9, Sep. 1996. pp. 1152-1162.
- [7] Tomoaki O. "Direct-Detection Optical Asynchronous CDMA Systems with Double Optical Hard-Limiters: APD Noise and Thermal Noise." IEEE Trans. on commun., vol. W81-B, no. 7, Jul. 1998. pp. 1491-1499.
- [8] Lee S.W., Green D.H. "Performance Analysis of Optical orthogonal codes in CDMA LANs." IEE Proc.-commun., vol. 145, no. 4, Aug. 1998. pp. 265-271.
- [9] Jian-Guo Z., Wing C.K., and Mann S. "Construction of  $2^n$  Extended Prime Codes with Cross-Correlation constraint of one." IEE Proc.-commun., vol. 145, no. 5, Oct. 1998. pp. 297-303.
- [10] Jian-Guo Z., Wing C.K., and Sharma A.B. "All-Optical  $2^n$  Extended Prime Codes for Optical Fiber Code-Division Multiple-Access Applications." IEEE Trans. on commun. 1998. pp. 926-930.
- [11] Stephen B. Alexander. **Optical Communication Receiver Design**. United States of America : The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. 1997.
- [12] Denis J.G. Mestdagh. **Fundamentals of Multiaccess Optical Fiber Networks**. United States of America : Artech House, Inc. 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541. คู่มือเรียบเรียงวิทยานิพนธ์.  
กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

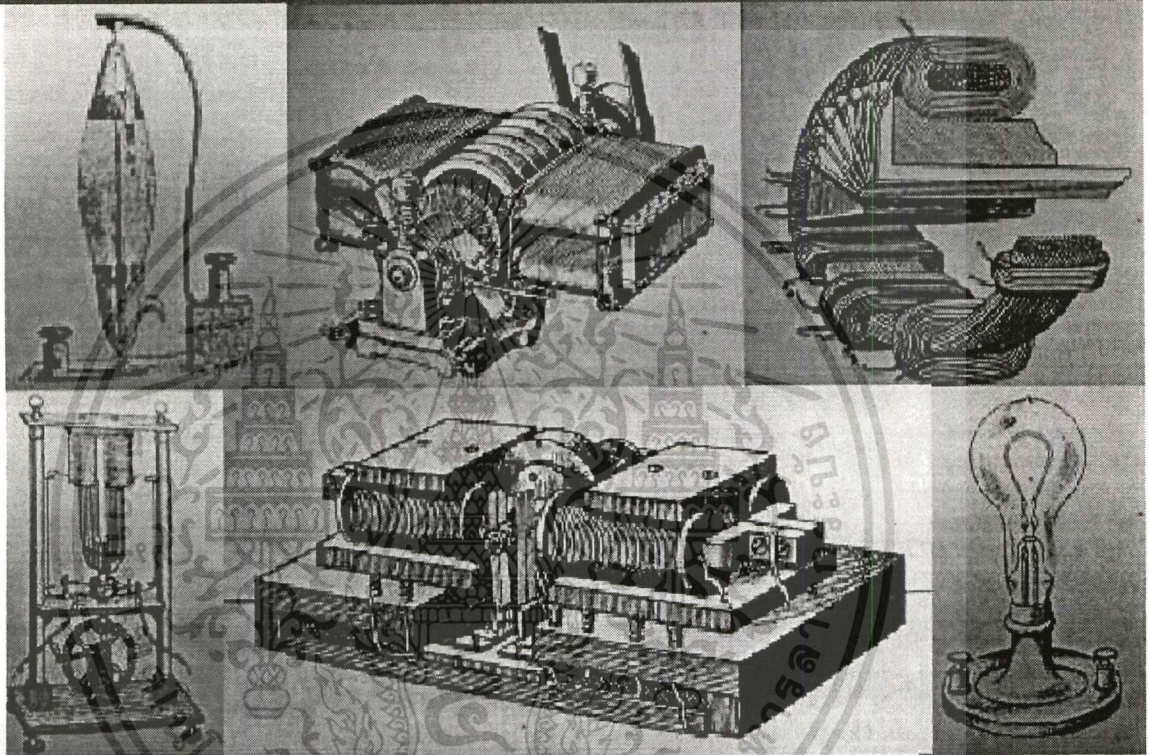
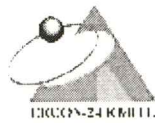
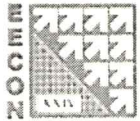
1. “การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้การเข้าถึงแบบ CDMA ด้วยการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
2. “Performance analysis of optical fiber CDMA system with  $2^n$  extended prime code” การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24

## 24th Electrical Engineering Conference (EECON-24)



22-23 พฤศจิกายน 2544

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้การเข้าถึงแบบ CDMA

## ด้วยการเข้ารหัสแบบ $2^n$ extended prime

### Performance analysis of optical fiber CDMA system with $2^n$ extended prime code

ปิยะ ยืนขงสุวรรณ สุวิพล สิริชิวภาค และเกรียงไกร วงศ์โรจน์ภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

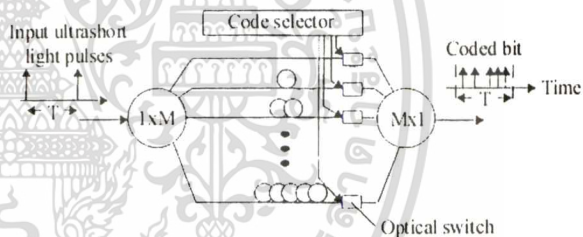
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร : (02)737-2500 ต่อ 5028 E-mail : s2061009@kmitl.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอ การนำการเข้ารหัส(code)ใหม่ คือ  $2^n$  extended prime code มาใช้ในระบบการสื่อสารของเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้การเข้าถึงแบบ CDMA โดยการเข้ารหัสแบบนี้มีคุณสมบัติเงื่อนไขบังคับของสหสัมพันธ์ข้าม(cross correlation constraint)มีค่าเป็น 1 บทความนี้ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเข้ารหัสแบบใหม่นี้กับการเข้ารหัสแบบเก่าที่ใช้ในเส้นใยแก้วนำแสง อีกทั้งได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทั้งแบบซิงโครนัส(synchronous) และอะซิงโครนัส(asynchronous) โดยมี optical hard limiter วางไว้ในระบบเพื่อลดผลจากการแทรกสอดของผู้ใช้บริการอื่น ซึ่งจะพบว่าการใช้การเข้ารหัสแบบใหม่นี้สามารถรองรับผู้ใช้บริการในเวลาเดียวกันได้มากและมีประสิทธิภาพว่าการเข้ารหัสแบบเก่า

จำนวนมากในเวลาเดียวกันและช่องสัญญาณเดียวกัน โดยปราศจากการหน่วง [1-5] การใช้เทคนิค CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสงนั้น จะมีขบวนการเข้ารหัสและถอดรหัสด้วยสัญญาณทางแสง เพื่อลดปัญหาที่เกิดจากเหตุการณ์คอขวด(bottleneck)ในระบบ การเข้ารหัสและถอดรหัสด้วยแสงนั้นจะมีคุณสมบัติ orthogonal กันระหว่างรหัส โดยหลักการนี้เรียกว่า optical orthogonal codes [1] โดยจะมีรูปแบบการเข้ารหัสเป็นลักษณะขานานดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปแบบการเข้ารหัสแบบขานาน

#### Abstract

This paper, we analyzed a new family of prime codes, called  $2^n$  extended prime code, to use in the optical fiber code division multiple access (CDMA) communication system. This code has a characteristic of cross correlation constraints, is equal to one. In this paper, we did compare performance of this code and old prime code, have used in the optical fiber. Moreover, we analyzed the probability of error of synchronous system and asynchronous system, by placing the optical hard limiter in the optical fiber for reducing the effective multiple access interference. The result, it showed that the new code can support a larger number of user and more performance than old prime code.

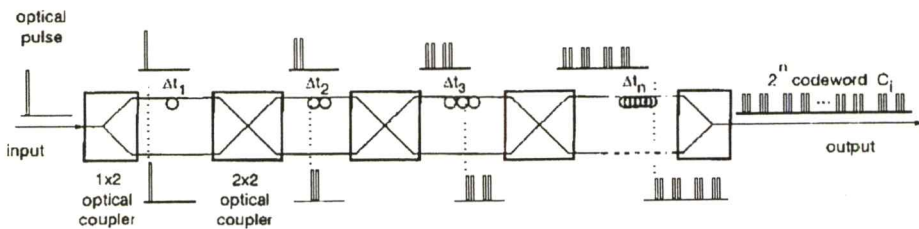
#### 1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคเส้นใยแก้วนำแสง CDMA มาใช้ในระบบสื่อสาร LAN เนื่องจากว่ามันสามารถรองรับผู้ใช้บริการได้เป็น

ในระบบการสื่อสารเส้นใยแก้วนำแสงที่มีการเข้าถึงแบบ CDMA จะมีตัวแปรสำคัญ 2 ตัว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบคือ จำนวนการแทรกสอดของผู้ใช้บริการในเวลาเดียวกัน และสัญญาณรบกวนที่มีอยู่ในระบบ จึงมีงานวิจัยต่างๆออกมาเพื่อลดผลกระทบของตัวแปรทั้งสองตัวนี้ ซึ่งการลดผลกระทบจากการแทรกสอดของผู้ใช้บริการต่างๆควรมีเงื่อนไขบังคับของสหสัมพันธ์ข้าม  $\lambda_c$  เท่ากับ 1 [3-4]

รูปแบบการเข้ารหัสแบบขานานนั้นจะมีขนาดใหญ่และไม่เหมาะสำหรับระบบที่ต้องใช้ chip bit มากๆ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงรูปแบบการเข้ารหัสแบบใหม่เกิดขึ้น ซึ่งอาศัยคุณสมบัติแบบอนุกรม

ในบทความนี้เราได้้นำการเข้ารหัสที่มีรูปแบบอนุกรมคือ การเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime มาใช้เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้การเข้าถึงแบบ CDMA ซึ่งการเข้ารหัสแบบนี้ที่



รูปที่ 2 รูปแบบการเข้ารหัสแบบอนุกรม

ส่วนของการเข้ารหัสทางแสง(optical encoder) จะทำเป็น 2x2 สวิตซ์ทางแสง(optical switches)ต่อกันแบบอนุกรม ซึ่งระหว่างสวิตซ์ทางแสงจะเป็น optical delay line ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 การเข้ารหัสแบบ 2<sup>n</sup> extended prime นี้มีคุณลักษณะที่เรียกว่า “การแจกแจงพัลส์แบบสมมาตร”(symmetric pulse distribution) ในแต่ละชุดรหัส(codeword) โดย 2<sup>n</sup> คือน้ำหนักของรหัส(code weight) ส่วน n>1 คือเลขจำนวนเต็มบวก ซึ่งคุณลักษณะนี้ทุก 2<sup>k</sup> ของชุดรหัส จะได้จาก 2<sup>k-1</sup> ของตัวมันเองรวมกับ 2<sup>k-1</sup> ที่ถูกหน่วงเวลา โดยที่ 2 ≤ k ≤ n

2. รูปแบบของการเข้ารหัสแบบ 2<sup>n</sup> extended prime

ในแต่ละลำดับย่อยของชุดรหัส prime จะมีการเพิ่มบิต “0” เข้าไปจำนวน P-1 เพื่อลดผลกระทบจากการแทรกสอดของผู้ใช้บริการ และสามารถรองรับผู้ใช้บริการในเวลาเดียวกันได้มากกว่าการเข้ารหัสแบบ prime ธรรมดา

ความยาวของการเข้ารหัสแบบ 2<sup>n</sup> extended prime มีค่า F=P(2P-1) ซึ่ง P คือจำนวน prime ส่วน 2<sup>n</sup> คือค่าน้ำหนักของชุดรหัส กำหนดให้ชุดลำดับ prime S<sub>i</sub> = {s<sub>i,0</sub>, s<sub>i,1</sub>, ..., s<sub>i,P-1</sub>} ซึ่ง s<sub>i,j</sub> คือสมการดังต่อไปนี้ [ 2-4]

$$s_{i,j} = \{i,j\} \pmod{P} \tag{1}$$

ซึ่ง i,j ∈ GF(P) (Galois field ของ P) สำหรับตัวอย่างของลำดับ prime ใน GF(13) แสดงดังตารางที่ 1

ในการกำเนิดรหัสนี้ ประการแรกต้องตรวจสอบว่าชุดรหัสที่ใช้ได้ต้องมีพัลส์ที่อยู่ติดกัน(two adjacent pulse)แยกจากกัน โดยดูจาก adjacent relative cyclic delay (t<sub>j</sub>'s)

$$t_j = \begin{cases} s_{i,j+1} - s_{i,j} + 2P - 1 \\ s_{i,0} - s_{i,j} + 2P - 1 \end{cases} \tag{2}$$

ชุดรหัสที่ใช้ได้จะต้องเป็นไปตามกฎของเงื่อนไขการแจกแจงการหน่วงเวลา(delay distribution constraint)ดังต่อไปนี้ คือทุกๆชุดรหัสจะมี x≠y, x ∈ [0,2<sup>n</sup>-2], y ∈ [0,2<sup>n</sup>-2] และ z ∈ [1,n-1] ถ้า x และ y ถูกแบ่งด้วย 2<sup>z</sup> แล้ว ค่าเงื่อนไขข้างต้นจะถูกกำหนดโดย

$$t_{x \oplus (2^{z-1}-1) \oplus m} = t_{y \oplus (2^{z-1}-1) \oplus m} \tag{3}$$

ซึ่ง m ∈ [0,2<sup>n</sup>-1], และ “⊕” คือ modulo 2<sup>n</sup>

ตารางที่ 1 ลำดับ prime ใน GF(13)

i	j												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	0	2	4	6	8	10	12	1	3	5	7	9	11
3	0	3	6	9	12	2	5	8	11	1	4	7	10
4	0	4	8	12	3	7	11	2	6	10	1	5	9
5	0	5	10	2	7	12	4	9	1	6	11	3	8
6	0	6	12	5	11	4	10	3	9	2	8	1	7
7	0	7	1	8	2	9	3	10	4	11	5	12	6
8	0	8	3	11	6	1	9	4	12	7	2	10	5
9	0	9	5	1	10	6	2	11	7	3	12	8	4
10	0	10	7	4	1	11	8	5	2	12	9	6	3
11	0	11	9	7	5	3	1	12	10	8	6	4	2
12	0	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

ถ้าเราทำตามกฎเงื่อนไขข้างต้นกับการแจกแจงการหน่วงเวลาในสมการ (3) แล้ว ในลำดับ prime S<sub>i</sub> จะมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

- ที่ตำแหน่ง s<sub>i,j+1</sub> และ s<sub>i,j</sub> จะเป็นตัวกำเนิดค่าการหน่วงเวลา t<sub>j</sub> เมื่อ t<sub>j</sub> เป็นไปตามเงื่อนไขข้างต้นตามสมการ (3)

แล้ว ค่าในตำแหน่ง  $s_{ij}$  นั้นจะไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนตำแหน่งอื่นของ  $s_{ij}$  จะถูกแทนที่ด้วย  $x$

- ในกรณีอื่น  $s_i$  จะไม่ใช่ ดังแสดงให้ดูในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 Adjacent relative cyclic delay ของลำดับ prime ใน GF(13)

i	j												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
1	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	13
2	27	27	27	27	27	27	14	27	27	27	27	27	14
3	28	28	28	28	15	28	28	28	15	28	28	28	15
4	29	29	29	16	29	29	16	29	29	16	29	29	16
5	30	30	17	30	30	17	30	17	30	30	17	30	17
6	31	31	18	31	18	31	18	31	18	31	18	31	18
7	32	19	32	19	32	19	32	19	32	19	32	19	19
8	33	20	33	20	20	33	20	33	20	20	33	20	20
9	34	21	21	34	21	21	34	21	21	34	21	21	21
10	35	22	22	22	35	22	22	22	35	22	22	22	22
11	36	23	23	23	23	23	36	23	23	23	23	23	23
12	37	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24

ตารางที่ 3 ลำดับ prime GF(13) ที่ถูกปรับปรุงแล้ว ด้วย  $2^n=8$

i	j												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	x	x	x	0	0	0	0	0	0	0	0	x	x
1	x	x	x	3	4	5	6	7	8	9	10	x	x
2	x	x	x	6	8	10	12	1	3	5	7	x	x
3	x	x	x	9	12	2	5	8	11	1	4	x	x
4	0	4	8	12	3	7	x	x	x	x	x	5	9
5													
6	x	x	x	5	11	4	10	3	9	2	8	x	x
7	x	x	x	8	2	9	3	10	4	11	5	x	x
8													
9	0	9	5	x	x	x	x	x	7	3	12	8	4
10	x	x	x	4	1	11	8	5	2	12	9	x	x
11	x	x	x	7	5	3	1	12	10	8	6	x	x
12	x	x	x	10	9	8	7	6	5	4	3	x	x

สุดท้ายทำการแปลง  $s_i$  ที่ได้ไปอยู่ในรูปโบนารีของชุดรหัส

$$C_i = \{c_{i,0}, c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,P-1}\} \text{ ซึ่ง } F = P(2P-1) \text{ คือความยาวของรหัส}$$

$$c_{i,k} = \begin{cases} 1 & \text{สำหรับ } k = s_{ij} + j(2P-1) \text{ และ } s_{ij} \neq x \\ 0 & \text{กรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad (4)$$

ในกรณีที่ตำแหน่ง  $s_{ij}$  เป็น  $x$  จะถูกแทนที่ด้วยบิต "0" จำนวน  $(2P-1)$  ความยาวของรหัส(F)ไม่จำกัดว่าจะต้องเท่ากับ  $P(2P-1)$  สามารถทำให้ลดลงได้แต่ต้องมีค่าเงื่อนไขสหสัมพันธ์ข้ามเท่ากับ 1 ซึ่ง F จะอยู่ในช่วง

$$\min\{4Pw - 2w - 2P + 1; P(2P-1)\} \leq L \leq P(2P-1) \quad (5)$$

เพื่อให้เข้าใจโครงสร้างของการเข้ารหัส  $2^n$  extended prime เราได้ยกตัวอย่างดังต่อไปนี้ โดยกำหนดให้  $P=13, w=8$  ทำการกำหนดลำดับ prime จากสมการ (1) จะได้ผลตามตารางที่ 1 จากนั้นใช้สมการที่ 2 หาค่า  $t_j$  ซึ่งจะได้ผลตามตารางที่ 2 จากตารางที่ 2  $s_3$  คือ  $[28, 28, 28, 28, 15, 28, 28, 28, 15, 28, 28, 28, 15]$  ค่าการหน่วงเวลาใน  $s_3$  นี้ที่เป็นไปตามกฎของเงื่อนไขการแจกแจงการหน่วงเวลาตามสมการ (3) จะมีอยู่ 2 เงื่อนไขคือ  $t_m = t_{m+2} = t_{m+4} = t_{m+6}$  และ  $t_{m+1} = t_{m+5}$  โดยที่  $m=3$  ดังนั้นตำแหน่ง  $s_{3,0}, s_{3,1}, s_{3,2}, s_{3,11}$  และ  $s_{3,12}$  จะกลายเป็นค่า  $x$  ดังตารางที่ 3 ส่วนลำดับ prime ที่  $s_5$  และ  $s_8$  จะไม่ใช่ เพราะเงื่อนไขการแจกแจงการหน่วงเวลาไม่เป็นไปตามกฎ

ชุดรหัสของ  $2^n$  extended prime จะถูกสร้างจากลำดับ prime  $s_0, s_1$  และ  $s_{P-1}$  ตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$\frac{2P(2^k-1)}{2^{n-k}(2^k-1)+1} \leq i \leq \frac{P(2(2^k-1)+1)}{2^n(1-\frac{1}{2^{k+1}})-1} \quad (6)$$

ซึ่ง  $k=0, 1, \dots, n-2$  และ  $i=1, 2, \dots, (P-1)/2$

เมื่อใช้  $P=13, n=3$  จะได้  $F=325$  และ  $w=8, i=\{1, 2, 3, 4, 6, 7\}$  มาจากสมการ (6) ทำการรวม  $i=0$  และ  $P-i=\{9, 10, 11, 12\}$  ดังนั้นชุดลำดับ prime นี้เขียนได้เป็น

$$\{s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_6, s_7, s_9, s_{10}, s_{11}, s_{12}\}$$

### 3. ประสิทธิภาพความน่าจะเป็นของความผิดพลาด(BER)

#### 3.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพ BER กับการเข้ารหัสแบบอื่น

เราสมมติว่าการแทรกสอดของผู้ใช้บริการในเวลาเดียวกันเป็นการแจกแจงแบบ Gaussian โดยที่ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดมีสมการดังนี้

$$BER = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\sqrt{SNR}}{2}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (7)$$

ซึ่งค่า SNR ของรหัสแบบ 2<sup>n</sup> extended prime มีค่าดังต่อไปนี้

$$SNR = \frac{2N}{[1 - \frac{w^2}{2N}](q-1)} \quad (8)$$

ตารางที่ 4 จำนวนผู้ใช้บริการสูงสุดของการเข้ารหัสแบบ 2<sup>n</sup> extended prime

ค่า Prime	ความยาวรหัส (L)	น้ำหนักของรหัส (w)	จำนวนผู้ใช้บริการสูงสุด
11	147<=L<=231	4	11
	L=231	8	9
13	175<=L<=325	4	13
	L=325	8	11
17	231<=L<=561	4	17
	495<=L<=561	8	15
19	L=561	16	9
	259<=L<=703	4	19
19	555<=L<=703	8	17
	L=703	16	9
23	315<=L<=1035	4	23
	675<=L<=1035	8	19
23	L=1035	16	11
	399<=L<=1653	4	29
29	855<=L<=1653	8	25
	L=1653	16	13
37	511<=L<=2701	4	37
	1095<=L<=2701	8	33
37	2263<=L<=2701	16	17
	L=2701	32	9

เราได้ทำการนำ การเข้ารหัส 2<sup>n</sup> extended prime นี้ไปเปรียบเทียบกับ การเข้ารหัส prime แบบอื่น เพื่อดูประสิทธิภาพความน่าจะเป็นของความคิดพลาด ซึ่งรหัส prime ที่เราได้นำมาวิเคราะห์ร่วมในบทความนี้คือ การเข้ารหัสแบบ prime และการเข้ารหัสแบบ extended prime โดยค่า SNR ของแต่ละรหัสมีค่าดังต่อไปนี้ [5]

การเข้ารหัสแบบ prime (PSC)

$$SNR = \frac{w^2 12P^2}{(5P^2 - 2P - 4)(q-1)} \quad (9)$$

การเข้ารหัสแบบ extended prime (EPSC)

$$SNR = \frac{w^2 4(2P-1)^2}{P(3P-2)(q-1)} \quad (10)$$

### 3.2 ประสิทธิภาพเชิงโคโรนัสและ อะซิงโครนัส

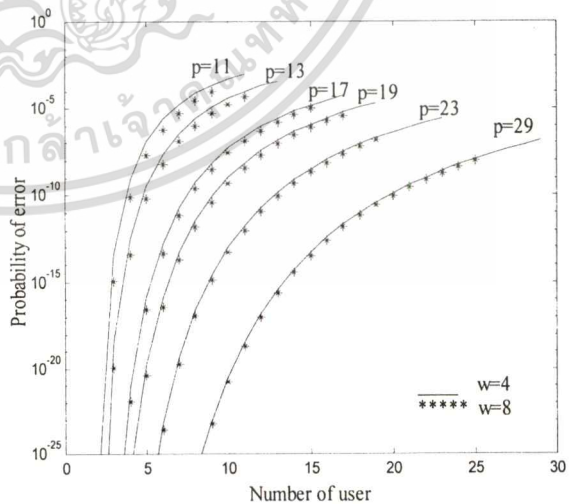
ในส่วนนี้เราจะสมมติว่าระบบได้ใช้อุปกรณ์ hard limiter ในภาครับ และกำหนดให้ค่า threshold Th=2<sup>n</sup> (ซึ่งเป็นค่า threshold ที่ดีที่สุด) ในกรณีของซิงโครนัสเราจะได้สมการดังต่อไปนี้ [1,4]

$$PE(Syn) = \frac{1}{2} \prod_{i=0}^{2^n-1} \{1 - (1 - \frac{2^n}{2P(2P-1)})^{N-1-i}\} \quad (11)$$

ส่วนกรณีของอะซิงโครนัสเราจะได้สมการดังนี้ [1]

$$PE(Asyn) = \frac{1}{2} \prod_{m=0}^{2^n-1} (1 - [(1 - \frac{2^n}{P(2P-1)})^{N-1-m} + (N-1-m) * (\frac{2^n}{P(2P-1)}) (1 - \frac{2^n}{P(2P-1)})^{N-2-m} + \sum_{i=2}^{N-1-m} \binom{N-1-m}{i} * (\frac{2^n}{P(2P-1)})^i (1 - \frac{2^n}{P(2P-1)})^{N-1-i-m} (1 - Q(\frac{1-i/2}{\sqrt{i/12}}))])]) \quad (12)$$

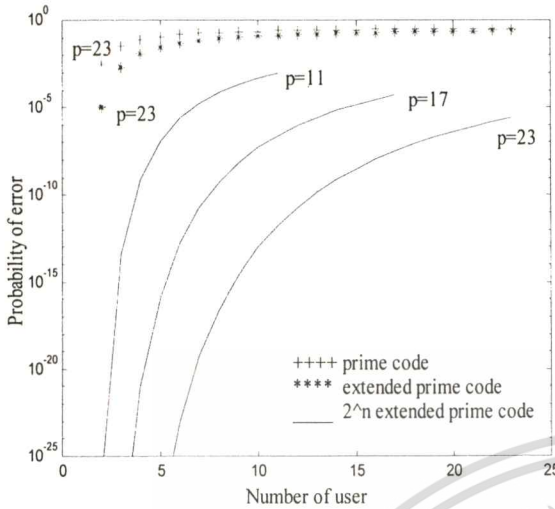
### 4. ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพของ P ต่างๆเทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการ เมื่อ กำหนดให้ w=4 และ 8

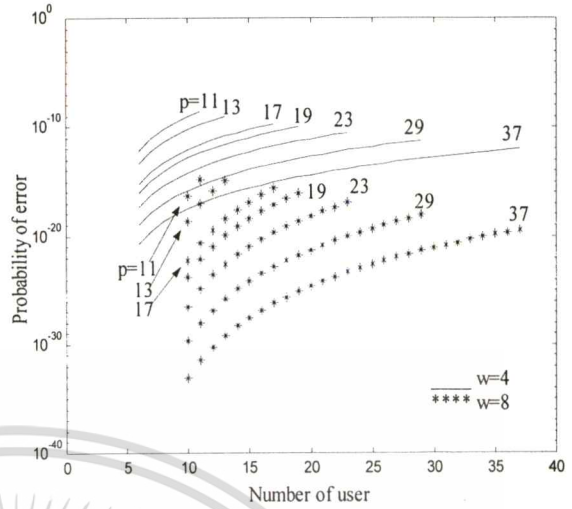
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 (ECON-24) สจล. 22-23 พฤศจิกายน 2544 และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



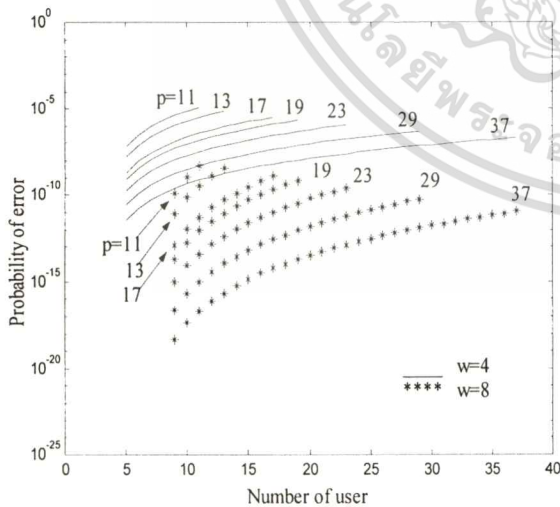
รูปที่ 4 เปรียบเทียบความน่าจะเป็นของความผิดพลาดระหว่างการเข้ารหัสทั้งสามแบบ

จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าเมื่อค่า P เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นและยังรองรับจำนวนผู้ใช้บริการได้มากขึ้น และเมื่อเพิ่มน้ำหนักของรหัสมากขึ้น ก็จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นด้วยเช่นกัน ส่วนรูปที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแต่ละแบบ โดยกำหนดให้แต่ละรหัสค่า P มีค่าเท่ากัน จะเห็นว่าการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime นี้มีประสิทธิภาพมากกว่าการเข้ารหัสแบบ prime และ extended prime มาก



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพของการเข้ารหัสในรูปแบบอะซิงโครนัส โดยกำหนดให้ภายในระบบมีอุปกรณ์ optical hard limiter

จากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 กำหนดให้ระบบมี optical hard limiter ซึ่งเป็นตัวลดผลกระทบจากการแทรกสอดของผู้ใช้บริการรายอื่น ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในรูปที่ 5 เป็นการเข้ารหัสในรูปแบบซิงโครนัส จะเห็นว่าเมื่อน้ำหนักของรหัสเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นมาก แต่ไม่สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการจำนวนน้อยได้ ส่วนรูปที่ 6 เป็นการเข้ารหัสในรูปแบบอะซิงโครนัส จะเห็นว่าเมื่อน้ำหนักของรหัสเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่ก็ไม่สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการจำนวนน้อยได้เช่นกัน แต่การเข้ารหัสแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบซิงโครนัส



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพของการเข้ารหัสในรูปแบบซิงโครนัส โดยกำหนดให้ภายในระบบมีอุปกรณ์ optical hard limiter

5. สรุปผล

ในบทความนี้เราได้นำเสนอการเข้ารหัสแบบ  $2^n$  extended prime ซึ่งมีค่าเงื่อนไขบังคับของสหสัมพันธ์ข้ามเท่ากับ 1 ทำให้ลดผลกระทบจากการแทรกสอดของผู้ใช้บริการรายอื่นลงได้ จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่า การเข้ารหัสแบบนี้มีประสิทธิภาพมากกว่าการเข้ารหัสแบบอื่นมาก รวมทั้งการเข้ารหัสแบบนี้จะมีโครงสร้างเป็นแบบอนุกรม ดังนั้นจึงมีต้นทุนและกำลังงานสูญเสียต่ำกว่าการเข้ารหัสแบบที่มีโครงสร้างเป็นแบบขนาน ในรูปที่ 5 และ 6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อวางอุปกรณ์ hard limiter ไว้ในระบบ จะทำให้ลดความน่าจะเป็นของความผิดพลาดในระบบลงได้มาก

6. เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 (EECON-24) ต.จ.ล. 22-23 พฤศจิกายน 2544 และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [1] J.A.Salehi, C.A.Brackett "Code division multiple-access techniques in optical fiber networks-partII:systems performance analysis" IEEE Trans. Commun.,1989,vol 37, no 8, pp.834-842.
- [2] W.C.Kwong, G.C.Yang and J.G.Zhang "2" prime sequence codes and coding architecture for optical code- division multiple-access" IEEE Trans. Commun.,1996,vol 44,no 9,pp.1152-1162.
- [3] J.G Zhang, W.C. Kwong and A.B.Sharma "All-optical 2" extended prime codes for optical fiber code-division multiple-access applications" IEEE,1998,pp.926-930.
- [4] J.G Zhang, W.C. Kwong and S.Mann "Construction of 2" extended prime codes with cross-correlation constraint of one" IEE Proc.-Commun.,1998,vol 145,no 5,pp.297-303.
- [5] S.W.Lee, D.H.Green "Performance analysis of optical orthogonal codes in CDMA LANs" IEE Proc.-Commun.,1998,vol 145,no 4,pp.265-271.



อ.เกรียงไกร วงศ์โรจน์ภรณ์สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีศ.บ. จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีปีพ.ศ.2523 และปริญญาโทไอไอโอปีพ.ศ.2526 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการส่งสัญญาณในระบบดิจิทัลผ่านสภาวะช่องสัญญาณรูปแบบต่างๆ การออกแบบและวิเคราะห์การทำงานระบบสื่อสารแบบมีสายและไร้สาย



ปิยะ ชื่นขงสุวรรณ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีศ.บ. จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2542 ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโทที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่ทำอยู่เกี่ยวกับระบบ CDMA ในสายนำสัญญาณแบบเส้นใยแก้วนำแสง



รศ.ดร.สุวิพล สัทธีชิวภาค สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีศ.บ.(เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง)จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังปีพ.ศ.2525 ปริญญาโท M.Eng. จากมหาวิทยาลัยโอซาก้าปีพ.ศ.2530 และปริญญาเอก Ph.D. จากมหาวิทยาลัยโกเบปีพ.ศ.2534 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการส่งสัญญาณในระบบดิจิทัลผ่านสภาวะช่องสัญญาณรูปแบบต่างๆ การออกแบบและวิเคราะห์การทำงานระบบสื่อสารแบบมีสายและไร้สาย

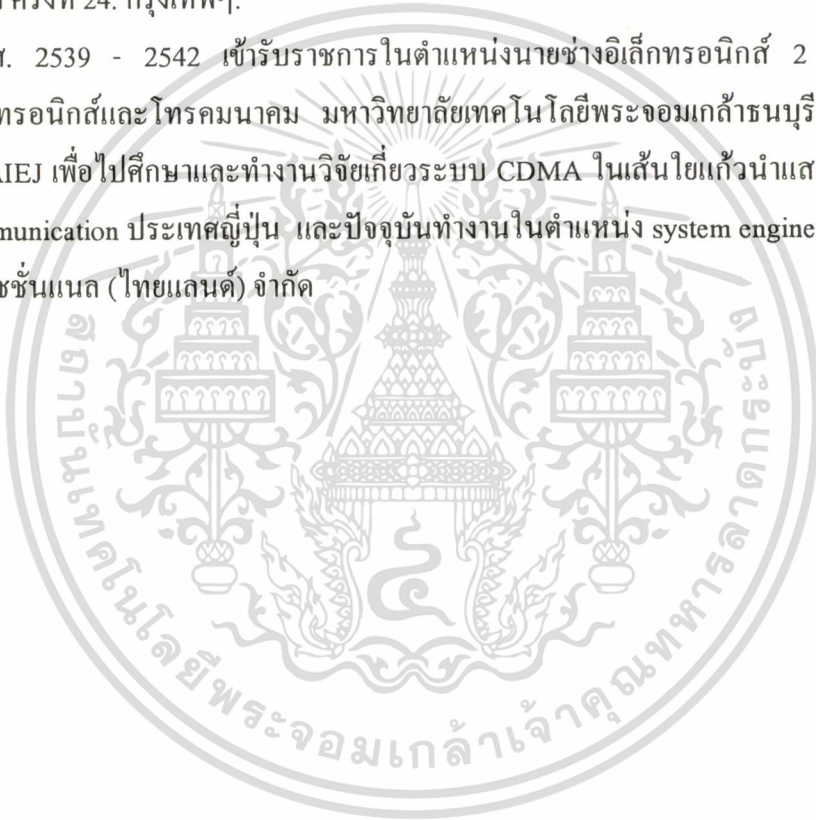
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 (EECON-24) สจล. 22-23 พฤศจิกายน 2544

## ประวัติผู้เขียน

นายปิยะ ยืนยงสุวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 23 ตุลาคม 2518 ที่จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2541 และ ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (อิเล็กทรอนิกส์) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2538 ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ คือ 1. “การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้การเข้าถึงแบบ CDMA ด้วยการเข้ารหัสแบบ 2<sup>n</sup> extended prime” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24. กรุงเทพฯ.

ปี พ.ศ. 2539 - 2542 เข้ารับราชการในตำแหน่งนายช่างอิเล็กทรอนิกส์ 2 สังกัดภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปี พ.ศ. 2543 ได้รับทุนจาก AIEJ เพื่อไปศึกษาและทำงานวิจัยเกี่ยวกับระบบ CDMA ในเส้นใยแก้วนำแสง ที่ University of electro-communication ประเทศญี่ปุ่น และปัจจุบันทำงานในตำแหน่ง system engineer ที่บริษัทคอลลิย อินเทอร์เน็ตเนชชั่นแนล (ไทยแลนด์) จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้