

การศึกษาโปรโตคอล TCP/IP ผ่านระบบสายไฟฟ้าภายในอาคารที่มี
สัญญาณรบกวนแบบ IMPULSIVE NOISE

TCP/IP PROTOCOL OVER POWER LINE COMMUNICATION
CONTAMINATED WITH IMPULSIVE NOISE

อรญา รัตนกันนกกาญจน์
ORAYA RATTANAKANOKKAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMUTL.-2008-EN-M-010-054

การศึกษาโปรโตคอล TCP/IP ผ่านระบบสายไฟฟ้าภายในอาคารที่มี
สัญญาณรบกวนแบบ IMPULSIVE NOISE

TCP/IP PROTOCOL OVER POWER LINE COMMUNICATION
CONTAMINATED WITH IMPULSIVE NOISE

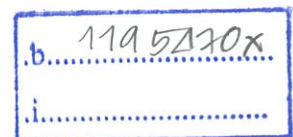


อรญา รัตนกนกกาญจน์

ORAYA RATTANAKANOKKAN

จพ.
๑3/87
2551

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 82854
วัน,เดือน,ปี..... 25 ก.พ. 2551



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2551

KMITL-2008-EN-M-010-054

**TCP/IP PROTOCOL OVER POWER LINE COMMUNICATION
CONTAMINATED WITH IMPULSIVE NOISE**

ORAYA RATTANAKANOKKAN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2008
KMITL-2008-EN-M-010-054**

COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาโปรโตคอล TCP/IP ผ่านระบบสายไฟฟ้าภายในอาคารที่มีสัญญาณรบกวนแบบ Impulsive Noise
TCP/IP Protocol Over Power Line Communication Contaminated with Impulsive Noise




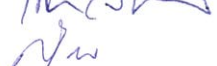
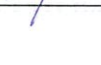
นักศึกษา นางสาวอรุณา รัตนกนกกาญจน์

รหัสประจำตัว 48060958

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุวิพล ลิทธิชีวะภาค

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.กอบชัย	เดชหาญ	
ผศ.ดร.พิเชฐ	ม่วงนวล	
ผศ.ดร.เผ่าภัก	ศิริสุข	
ผศ.เกรียงไกร	วงศ์โรจนภรณ์	
รศ.ดร.สุวิพล	ลิทธิชีวะภาค	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 4 มีนาคม 2551 เวลา 11.30-13.30 น.

สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 2 ชั้น 3 อาคาร A


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว
(รศ.ดร.รวีวรรณ ชินะตระกูล)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....10.....เดือน.....เมษายน.....พ.ศ.....2551.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาโปรโตคอล TCP/IP ผ่านระบบสายไฟฟ้าภายในอาคาร ที่มีสัญญาณรบกวนแบบ Impulsive Noise
นักศึกษา	นางสาวอรุณา รัตนกนกกาญจน์
รหัสนักศึกษา	48060958
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวิพล สิทธีชีวะภาค

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การรับ-ส่งข้อมูลด้วยโปรโตคอล TCP/IP ผ่านระบบสายไฟฟ้าภายในอาคารที่มีสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์บนพื้นฐานของชั้นกายภาพ โดยใช้สายส่งที่มีขนาดและความยาวต่างกัน ซึ่งในการจำลองแบบได้นำเทคนิคการเข้าถึงแบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉากกัน ร่วมกับการเข้ารหัสแบบรีดโซโลมอน เพื่อลดการผิดพลาดของข้อมูล และผลของการจำลองแบบจะพิจารณาออกมาในรูปของ อัตราบิตผิดพลาด (Bits Error Rate) ค่าเฉลี่ยของการส่งซ้ำ (Average Retransmissions) และค่าวิสัยสามารถ (Throughput) จากผลการจำลองแบบด้วยโปรแกรม Matlab พบว่า ขนาดและความยาวของสายส่ง มีผลต่อการรับ-ส่งข้อมูล

Thesis Title	TCP/IP Protocol over Power Line Communication Contaminated with Impulsive noise
Student	Ms. Oraya Rattanakanokkan
Student ID.	48060958
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunication Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Suvepol Sittichevapak

ABSTRACT

This thesis presents data communication via TCP/IP protocol over indoor power line communication contaminated with impulsive noise on physical layer was considered. The transmission lines have different section areas and lengths. The orthogonal frequency division multiplexing technique and Reed-Solomon coding was used for decreasing bits error. The performances illustrate as bits error rate, average retransmission and throughput. The simulation results show that the section area and length of transmission have significantly affected to data communication a lot.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีโดยได้รับคำแนะนำ การช่วยเหลือ และการสนับสนุนจากบุคคลหลายท่าน ทั้งความรู้ เอกสาร แหล่งที่มาของข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ รวมทั้งกำลังใจ ผู้เขียนมีความทราบซึ่งและขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

รศ. ดร. สุวิพล สิริชิวภาค อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยนี้กระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณาจารย์ บุคลากร ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่กรุณาให้การอบรมสั่งสอนและความรู้

คณาจารย์ บุคลากร ประจำบัณฑิตศึกษา และบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และแนะนำในเรื่องต่างๆ ลุล่วงสำเร็จ

เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกท่าน ในห้องปฏิบัติการ 3104 ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำและคำปรึกษาในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี และทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัว ผู้ซึ่งคอยเป็นกำลังใจ และเป็นแรงผลักดันสำหรับการศึกษาวิจัย

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อรุณา รัตนกนกกาญจน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ความเป็นมาของการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	5
2.3 แถบความถี่สัญญาณการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	6
2.4 หลักการของการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	7
2.5 การสื่อสารข้อมูล.....	8
2.5.1 องค์ประกอบของการสื่อสาร.....	8
2.5.2 แบบจำลองของทีซีพี/ไอพี.....	9
2.5.3 หน้าที่ของแต่ละลำดับชั้น.....	11
2.6 เทคนิคการมอดูเลตชั้นสัญญาณดิจิทัล.....	17
2.6.1 การมอดูเลตทางขนาด.....	17
2.6.2 การมอดูเลตทางความถี่.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.3 การมอดูเลตทางเฟส.....	22
2.7 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉาก.....	27
2.7.1 คุณลักษณะของสัญญาณ OFDM.....	29
2.7.2 การเพิ่ม cyclic prefix บนการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉาก.....	31
2.7.3 การประมาณค่าช่องสัญญาณ.....	33
2.8 รหัสรีดโซโลมอน.....	34
2.8.1 คุณสมบัติของรหัสรีดโซโลมอน.....	35
2.8.2 สถาปัตยกรรมสำหรับการเข้ารหัสและถอดรหัสของรหัสรีดโซโลมอน.....	36
บทที่ 3 สายส่งกำลังไฟฟ้า.....	39
3.1 โครงสร้างของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	39
3.1.1 ตัวนำ.....	39
3.1.2 ฉนวน.....	40
3.2 คุณลักษณะของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	40
3.2.1 ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ.....	40
3.2.2 ความต้านทานฉนวน.....	41
3.2.3 ความเหนี่ยวนำ.....	41
3.3 ประเภทของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	41
3.3.1 สายไฟฟ้าแรงสูง.....	41
3.3.2 สายไฟฟ้าแรงต่ำ.....	43
3.4 ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	44
3.4.1 ระบบสายส่งหลัก.....	44
3.4.2 ระบบสายส่งรอง.....	45
3.4.3 ระบบจำหน่าย.....	45
3.4.4 ระบบใช้งาน.....	46
3.5 ความผิดปกติของระบบสายไฟฟ้ากำลัง.....	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.1 ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในชั่วพริบตา.....	48
3.5.2 ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ.....	48
3.5.3 ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาก่อนข้างนาน.....	49
3.5.4 แรงดันกระเพื่อม.....	50
3.5.5 ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไฟฟ้า.....	50
3.5.6 แรงดันไม่สมดุล.....	52
3.5.7 ความถี่ไฟฟ้าไม่คงที่.....	52
3.6 สภาพแวดล้อมของสายไฟฟ้ากำลังในการสื่อสารข้อมูล.....	52
3.6.1 การลดทอน.....	52
3.6.2 สัญญาณรบกวนและสัญญาณแทรกสอด.....	52
3.6.3 การติดตั้งสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	53
3.7 สัญญาณรบกวน.....	54
3.7.1 สัญญาณรบกวนพื้นหลังสี.....	54
3.7.2 สัญญาณรบกวนแถบแคบ.....	54
3.7.3 สัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซิปรายคาบ ที่ไม่มีการประสานจังหวะในเชิง ความถี่.....	54
3.7.4 สัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซิปรายคาบ ที่มีการประสานจังหวะในเชิงความถี่...	55
3.7.5 สัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซิปไม่ประสานจังหวะ.....	55
3.7.6 แบบจำลองสำหรับสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซิป.....	57
3.7.7 Binary-state แบบจำลองสำหรับสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์.....	58
บทที่ 4 แบบจำลองและผลการวิเคราะห์การจำลองแบบ.....	61
4.1 ลักษณะทั่วไปของช่องสัญญาณสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	61
4.1.1 การจำลองแบบสายส่งกำลังไฟฟ้า (Power Line Model)	61
4.1.2 พารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาว (Per-unit-length parameter).....	62
4.2 แบบจำลองช่องสัญญาณสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 แบบจำลองช่องสัญญาณ (Channel Model)	64
4.3 แบบจำลองสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซีพ.....	74
4.4 การจำลองการทำงานระบบ.....	78
4.5 ผลวิเคราะห์การจำลองแบบ.....	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	87
เอกสารอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	91
ประวัติผู้เขียน.....	103

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ระดับแรงดันไฟฟ้าของประเทศไทย.....	44
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาว.....	64
4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองการทำงาน.....	71
4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	72
4.4 มาตรฐานของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	72
4.5 การคำนวณคุณลักษณะของช่องสัญญาณตามแบบจำลองรูปที่ 4.4.....	73

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงข่ายของสายส่งกำลังไฟฟ้าอย่างง่าย.....	6
2.2 แถบความถี่สัญญาณการสื่อสารผ่านไฟฟ้ากำลัง (Bandwidth of AC PLC).....	6
2.3 หลักการสื่อสารข้อมูลผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	7
2.4 องค์ประกอบของการสื่อสาร.....	8
2.5 ลำดับชั้นทีซีพี/ไอพี.....	10
2.6 การสื่อสารข้อมูลระหว่างลำดับชั้นภายใต้แบบจำลองทีซีพี/ไอพี.....	11
2.7 ลำดับชั้นกายภาพ.....	12
2.8 ลำดับชั้นเชื่อมต่อข้อมูล.....	13
2.9 ลำดับชั้นเครือข่าย.....	14
2.10 ลำดับชั้นถ่ายโอน.....	15
2.11 ลำดับชั้นใช้งาน.....	16
2.12 (ก) Binary ASK (BASK) (ข) Multi-level (4-ary) amplitude shift keying (4-ary ASK)).....	18
2.13 (ก) Binary FSK (BFSK) (ข) Multi-level (4-ary) frequency shift keying (4-ary FSK).....	21
2.14 (ก) Binary PSK (BPSK) (ข) Multi-level (4-ary) phase shift keying (PSK).....	23
2.15 สัญญาณ constellation (ก) Multi-level (8-ary) phase shift keying (PSK) (ข) Multi-level (16-ary) phase shift keying (PSK).....	24
2.16 (ก) แผนภาพ constellation สัญญาณ QPSK (ข) รหัส 4 คู่ของสัญญาณ QPSK.....	25
2.17 แผนภาพการมอดูเลตทางเฟสแบบควอดเจอร์.....	26
2.18 แผนผังการทำงานโดยทั่วไปของระบบ OFDM.....	28
2.19 การซ้อนทับกันของคลื่นพาห่อย่อยของสัญญาณ OFDM.....	30
2.20 การใช้ช่องสัญญาณอย่างคุ้มค่าของระบบ OFDM.....	30
2.21 รูปแบบการเพิ่ม cyclic prefix เข้าไปในสัญลักษณ์ OFDM.....	31
2.22 แผนภาพแสดงตัวอย่างประเภทของระบบ.....	34
2.23 ข้อมูลที่ผ่านการเข้ารหัสรีดโซโลมอน.....	35
2.24 โครงสร้างโดยรวมของกระบวนการถอดรหัสรีดโซโลมอน.....	38

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 โครงสร้างและลักษณะพื้นที่หน้าตัดของสายไฟฟ้ากำลัง (ก) ตัวนำเส้นเดียว แบบกลมตัน (ข) ตัวนำแบบกลมหลายเส้น (ค) ตัวนำแบบกลมประกอบด้วยส่วน ของวงกลมมีรูกลวง.....	40
3.2 ตัวอย่างสายไฟฟ้ากำลังในระบบแรงดันสูงที่มีจำหน่าย.....	42
3.3 ตัวอย่างสายไฟฟ้ากำลังในระบบแรงดันต่ำที่มีจำหน่าย.....	43
3.4 เป็นรูปแสดงตัวอย่างโครงข่ายพื้นฐานของระบบจำหน่ายพลังงานอย่างง่าย.....	46
3.5 ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดจากความผิดปกติที่เกิดขึ้นในช่วงพรีบิดา.....	48
3.6 ตัวอย่างสัญญาณไฟกระพริบ.....	49
3.7 ตัวอย่างสัญญาณไฟกระพริบ.....	49
3.8 ตัวอย่างสัญญาณ Swells.....	49
3.9 ตัวอย่างสัญญาณที่มีแรงดันกระเพื่อม.....	50
3.10 ตัวอย่างสัญญาณที่มีการปะปนของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	50
3.11 ตัวอย่างสัญญาณที่มีการปะปนของฮาร์มอนิก.....	51
3.12 ตัวอย่างสัญญาณเกิด Notching.....	51
3.13 ตัวอย่างสัญญาณที่มีความถี่ไฟฟ้าไม่คงที่.....	52
3.14 สภาพแวดล้อมของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	53
3.15 สัญญาณรบกวนของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงดันต่ำ.....	54
3.16 (a) พัลส์หนึ่งหน่วย (b) พัลส์ที่กลายเป็นอิมพัลส์ $\Delta \rightarrow 0$ (c) แถบกำลังงานของอิม พัลส์.....	56
3.17 (a) อิมพัลส์ในอุดมคติ (b) และ (c) พัลส์ที่มีช่วงเวลาที่แคบ.....	57
3.18 รูปแบบของผลตอบสนองอิมพัลส์ในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	57
3.19 แผนภาพของสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์.....	58
3.20 แผนภาพแสดงการเกิดสัญญาณรบกวนอิมพัลส์ชีพด้วยแบบจำลองไปนารีสเตท.....	60
4.1 แบบจำลองของสายส่งกำลังไฟฟ้า 2 เส้น (2 ตัวนำ)	61
4.2 วงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ (Uniform)	62
4.3 แผนผังสำหรับ โครงข่ายที่มีสาขาเดียว (single-branch network).....	66
4.4 แผนผังสำหรับ โครงข่ายที่มี 2 สาขา (two-branch network)	71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 โหลดที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนของระบบสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	74
4.6 แผนภาพแสดงสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพแบบไบนารีสเตท.....	75
4.7 แผนภาพแสดงสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพแบบไบนารีสเตท.....	75
4.8 แสดง Binary Sequence สำหรับสร้างสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพ.....	76
4.9 แสดง Amplitude Modulation Sequence สำหรับสร้างสัญญาณรบกวน แบบอิมพัลส์ชีพ.....	76
4.10 แผนภาพแสดงสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพแบบไบนารีสเตทจากแบบจำลอง...	77
4.11 แผนผังแสดงส่วนประกอบของการจำลองระบบ.....	78
4.12 ความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดของสายส่งกำลังไฟฟ้าพื้นที่หน้าตัด 10 มิลลิเมตร....	80
4.13 ค่าเฉลี่ยการส่งซ้ำของสายส่งกำลังไฟฟ้าพื้นที่หน้าตัด 10 มิลลิเมตร.....	81
4.14 ค่าวิสัยสามารถของสายส่งพื้นที่หน้าตัด 10 มิลลิเมตร.....	82
4.15 ความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดของสายส่งกำลังไฟฟ้าพื้นที่หน้าตัด 25 มิลลิเมตร....	83
4.16 ค่าเฉลี่ยการส่งซ้ำของสายส่งกำลังไฟฟ้าพื้นที่หน้าตัด 25 มิลลิเมตร.....	83
4.17 ค่าวิสัยสามารถของสายส่งกำลังไฟฟ้าพื้นที่หน้าตัด 25 มิลลิเมตร.....	84
4.18 ค่าเฉลี่ยการส่งซ้ำของสายส่งกำลังไฟฟ้าพื้นที่หน้าตัด 10 มิลลิเมตร และ 25 มิลลิเมตร.....	85
4.19 วิสัยสามารถของสายส่งพื้นที่หน้าตัด 10 มิลลิเมตร และ 25 มิลลิเมตร.....	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารได้เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตประจำวันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ตัวอย่างเช่น โทรศัพท์ คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ทำให้มีผู้ค้นคว้า วิจัย พัฒนาเทคโนโลยีทั้งแบบมีสาย (wire line) และ แบบไร้สาย (wireless) อย่างต่อเนื่อง และเทคโนโลยีการสื่อสารแบบใช้สายเป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาศึกษาอีกครั้ง เนื่องด้วยโครงข่ายแบบใช้สายที่ทราบกันนั้น จำเป็นต้องติดตั้งสายสื่อสารสัญญาณใหม่ ทำให้สิ้นเปลือง เวลา และค่าใช้จ่าย จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนามาสายส่งกำลังไฟฟ้าที่มีติดตั้งตามบ้านพักอาศัยและอาคารสำนักงาน มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยการประยุกต์นำสายส่งกำลังไฟฟ้ามาเป็นเส้นทางสื่อสารข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ เรียกเทคโนโลยีนี้ว่า “เทคโนโลยีการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าภายในอาคาร (Indoor Power Line Communication: Indoor PLC)” เพื่อการรับ-ส่งข้อมูล กล่าวคือ ที่ใดที่มีสายส่งกำลังไฟฟ้าและปลั๊กไฟ ที่นั่นก็สามารถสร้างระบบเครือข่ายสำหรับสื่อสารข้อมูลขึ้นมาใช้งานได้ทันที โดยไม่ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายสื่อสารสัญญาณ

การใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าภายในอาคาร พบปัญหาด้านต่างๆ ที่เกิดมาจาก ปัญหาการผิดพลาดของข้อมูล ปัญหาการลดทอนของสัญญาณ ปัญหาด้านระยะทางของการติดต่อ รวมถึงผลกระทบจากคุณลักษณะของสายส่งกำลังไฟฟ้า ปัญหาเหล่านี้ล้วนส่งผลกระทบต่อข้อมูลทั้งสิ้น เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงมีการศึกษาและพัฒนาแก้ไข หลากหลายวิธี ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ศึกษาปัญหาที่มีสาเหตุมาจากการรบกวนในช่องสัญญาณอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซีฟ (Impulsive Noise) และคุณลักษณะของสายส่งกำลังไฟฟ้า ที่ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบลดลง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สนใจศึกษาและทำการปรับปรุง ด้วยการใช้เทคโนโลยีการการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉาก และการเข้ารหัสรีดโซโลมมนมาศึกษาร่วม เพื่อปรับปรุงความถูกต้องของข้อมูล

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษารูปแบบการทำงานพื้นฐานของระบบสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงดันต่ำภายในอาคาร
- 2) เพื่อศึกษาปัญหาในการรับ-ส่งข้อมูลของระบบสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงดันต่ำ เมื่อเจอปัญหาการรบกวนในช่องสัญญาณ
- 3) เพื่อศึกษาคุณลักษณะของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการรับ – ส่งข้อมูล
- 4) เพื่อทำการศึกษาวิธีปรับปรุงประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลในระบบใช้สาย
- 5) เพื่อศึกษาวิธีการแก้ปัญหาอันมีผลมาจากสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณ และคุณลักษณะของสาย

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

เมื่อมีการใช้งานการสื่อสารบนระบบสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าในอาคารพร้อมกัน ส่งผลให้บางสถานะความถี่ที่ใช้งานใกล้เคียงกับของระบบสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าอาจเกิดการรบกวนโดยการรบกวนในสถานะแวลลุ่มของสายส่งกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่มาจากสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพ และคุณลักษณะของสายส่งกำลังไฟฟ้าเอง ซึ่งผลกระทบดังกล่าวทำให้ข้อมูลที่ส่งเกิดความผิดพลาด รวมทั้งประสิทธิภาพในการทำงานของระบบการสื่อสารแบบใช้สายบนสายส่งกำลังไฟฟาลดลง ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการศึกษาวิธีแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีควบคุมการไหลและการเข้ารหัสร่วมกัน เพื่อลดปริมาณความผิดพลาดของข้อมูล และระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการจำลองการทำงานของระบบสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าที่มีการติดต่อสื่อสารในอาคาร โดยทำการส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ เลือกการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉาก (Orthogonal Frequency Division Multiplexing; OFDM) ซึ่งเป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์สัญญาณที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพสูง เหมาะสำหรับการรับ-ส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงบนตัวกลางนำสัญญาณที่มีพฤติกรรมตอบสนองต่อความถี่ที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง โดยเทคนิคดังกล่าวจะทำการแบ่งแถบความถี่ 0.5 – 30 เมกะเฮิรต์ ออกเป็นความถี่ย่อย (subcarrier) ร่วมกับการเข้ารหัสแบบรีดโซโลมอน เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบเมื่อมีการเปลี่ยน

ขนาด และความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้า และการรบกวนในช่องสัญญาณจากสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซีฟ

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาการทำงานของระบบสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าที่มีการติดต่อสื่อสารในอาคาร โดยระบบมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์เพียงอย่างเดียว และผลกระทบจากสายส่งกำลังไฟฟ้า ประกอบด้วยความยาว พื้นที่หน้าตัดของสาย ที่ก่อให้เกิดปัญหาความผิดพลาดของข้อมูล ซึ่งปัญหานี้ถูกทำการแก้ไขโดยการใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉาก ร่วมกับการเข้ารหัสแบบรีดโซโลมอน และกำหนดให้เมื่อมีการเกิดการสูญหายของแพคเกจ หรือ แพคเกจข้อมูลเกิดการผิดพลาด ให้มีการร้องขอการส่งซ้ำจากผู้รับ โดยอัตโนมัติ เมื่อผู้ส่งได้รับการร้องขอจะทำการส่งซ้ำทันที ผลจากการทดลองจะใช้ ค่าอัตราบิตผิดพลาด (Bits Error Rate) ค่าเฉลี่ยของการส่งซ้ำ (Average of Retransmission) และค่าวิสัยสามารถ (Throughputs) เป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพ

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงการทำงานพื้นฐานของเทคโนโลยีการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในงานวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงสายส่งกำลังไฟฟ้า ประกอบด้วยคุณลักษณะของสายส่งกำลังไฟฟ้า และสัญญาณรบกวนที่พบในระบบการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าในอาคาร อันเป็นพื้นฐานของวิทยานิพนธ์

บทที่ 4 กล่าวถึงแบบจำลองและผลการวิเคราะห์การจำลองแบบ

บทที่ 5 บทสรุปและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารโทรคมนาคมได้รับการพัฒนาอย่างกว้างขวาง จากการสื่อสารด้านเสียงเพียงอย่างเดียวในยุคแรกๆ จนมาถึงการหลอมรวม (Convergence) ด้านข้อมูล เสียง และ มัลติมีเดีย เข้าด้วยกัน เพื่อเป็นไปตามนวัตกรรมของเทคโนโลยีและสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค เป็นที่ทราบแล้วว่าโครงสร้างหลักของการสื่อสารโทรคมนาคม ประกอบด้วยส่วนใหญ่ๆ 3 ส่วนคือ ชุมสาย (central switching node) ระบบสื่อสารสัญญาณ (transmission) และ โครงข่ายท้องถิ่น (local loop หรือ access network) ซึ่ง access network นี้ มีทั้งแบบใช้สาย (wired) และ ไร้สาย (wireless) ในที่นี้จะขอกล่าวถึงการสื่อสารโทรคมนาคมแบบใช้สาย คือ access network ที่ใช้สายส่งกำลังไฟฟ้าตามอาคาร บ้านเรือน มาใช้แทนคู่สายโทรศัพท์ติดต่อสื่อสารกับโลกภายนอก และสามารถรองรับบริการ เสียง ข้อมูล และมัลติมีเดียได้ รวมถึงการรองรับการให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง เรียกเทคโนโลยีนี้ว่า การสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า, Power Line Communications (PLC), Power line telecom (PLT), Broadband over Power line (BPL) หรือ Ethernet over Power line PLC หรือ BPL เทคโนโลยีนี้ประยุกต์นำสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ทั่วไปภายในอาคารมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด จากเดิมเพื่อนำสัญญาณเหล่านี้ทำหน้าที่เพียงนำพากระแสไฟฟ้าที่มีความถี่ 50 เฮิร์ตเท่านั้น มาเป็นเส้นทางในการรับ-ส่งข้อมูลดิจิทัล ซึ่งเป็นการลดระยะเวลา ประหยัดค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง และเพิ่มความสะดวกในการใช้งานสำหรับรับ-ส่งข้อมูลความเร็วสูง เช่น อินเทอร์เน็ตความเร็วสูง (high speed internet), video streaming, VoIP, มัลติมีเดีย การควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน การเฝ้าระวังรักษาความปลอดภัยภายในบ้าน และใช้ในการควบคุม สั่งการของการไฟฟ้าเอง เช่น การควบคุมการทำงานของ switch gear (ปิด-เปิด อุปกรณ์ป้องกันระบบจ่ายไฟฟ้า), automatic meter reading (AMR), tariff broadcast เป็นต้น ระยะเริ่มแรกการไฟฟ้าใช้สายส่งแรงดันสูง เพื่อติดต่อสื่อสาร และใช้ในการควบคุมสถานีจ่ายไฟฟ้า (substation) แต่ปัจจุบันได้พัฒนาให้สามารถส่งข้อมูลได้รวดเร็ว ผ่านระบบจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ จึงสามารถใช้เป็น access network ได้

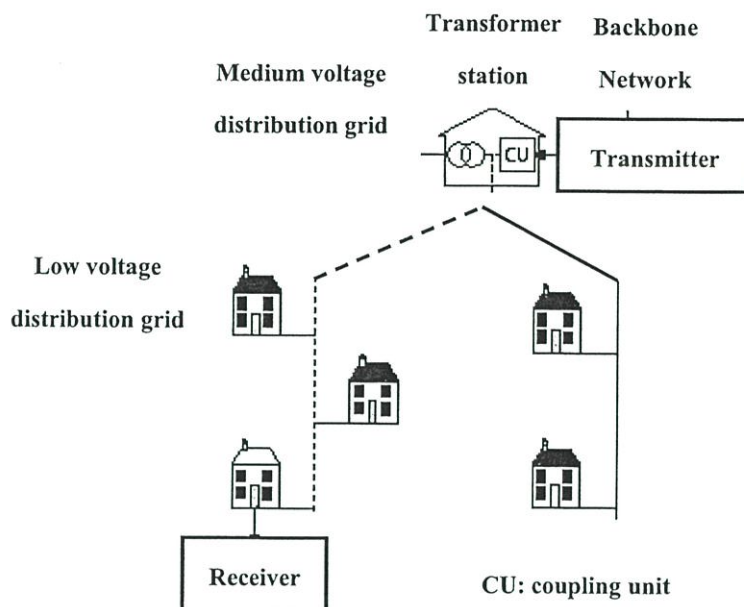
2.2 ความเป็นมาของการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า

การริเริ่มนำเทคโนโลยีการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า มาใช้งานตั้งแต่ปี ค.ศ 1922 โดยใช้ carrier frequency (15–500 kHz) ป้อนในสายส่งแรงดันสูง เพื่อใช้ในการทำโทรมาตร (telemetry) ต่อมาในปี ค.ศ 1930–1940 ได้มีการนำสัญญาณพลาห์ (ripple carrier signaling) มาใช้ในระบบจำหน่ายที่มีแรงดันไฟฟ้า 10–20 KV และ 240/415 V หลังจากนั้นในปี ค.ศ 1970 บริษัท Tokyo Electric Power ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการอ่านมาตรวัดไฟฟ้าระยะไกล (remote meter reading) และประสบความสำเร็จ จนกระทั่งประมาณปี ค.ศ 1985 ได้ให้ความสนใจและทำการศึกษาการนำ การสื่อสารดิจิทัล (digital communications) และการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (digital signal processing) มาส่งผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า และได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ปัจจุบันการสื่อสารผ่านสายส่ง กำลังไฟฟ้าสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบทั้งในส่วนของการไฟฟ้าเอง และ ประชาชนทั่วไป

การสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยมีองค์กร Universal Powerline Alliance (UPA) เป็นหน่วยงานกลางในการประสานงานเพื่อกำหนดมาตรฐาน และ ข้อบังคับในการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ ซึ่งมาตรฐานต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ก. โดยการ กำหนดมาตรฐานมีวัตถุประสงค์ที่จะรับรองผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติครบถ้วน ถูกต้อง และ รับประกันการใช้งานที่มีประสิทธิภาพสูง และมีคุณภาพที่ดี ระบบการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้ากำลัง ปัจจุบันประกอบด้วยอุปกรณ์ปลายทางที่ต่อหรือเสียบอยู่ที่ปลั๊กไฟฟ้า โดยจะส่งข้อมูลผ่านสายส่ง กำลังไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์อื่น ซึ่งไม่ต้องเดินสายสื่อสารสัญญาณใหม่ทำให้ลดค่าใช้จ่าย และเพิ่มความ สะดวกในการใช้งาน

ผู้ให้บริการสาธารณูปโภคด้านไฟฟ้าในประเทศไทยนั้น ส่วนใหญ่เป็นรัฐวิสาหกิจ แบ่งตาม หน้าที่ได้เป็น 2 ส่วน คือ ฝ่ายผลิตไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และ ผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ ที่ผลิตไฟฟ้าให้นิคมอุตสาหกรรมต่าง ซึ่งมีทั้ง IPP (Independent Power Producer) และ SPP (Small Power Producer) และฝ่ายจำหน่าย ซึ่งประกอบด้วย 2 รัฐวิสาหกิจใหญ่ คือ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และ การไฟฟ้านครหลวง โดยแต่ละการไฟฟ้ามีระบบจำหน่าย เป็นของ ตัวเอง ซึ่งประกอบด้วย เสาไฟฟ้า สายส่งกำลังไฟฟ้า และหม้อแปลง เป็นต้น ในการจ่าย กระแสไฟฟ้า ระหว่างเมือง หรือระหว่างชุมชน จะจ่ายที่ระดับแรงดัน 11,000 – 33,000 V เราเรียกว่า Middle Voltage – MV และจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้า ลดระดับแรงดันลง เพื่อจ่ายไปตามบ้านเรือน อาคารชุด และสำนักงาน ด้วยระบบจำหน่ายแรงต่ำ 230 – 400 V หรือ Low Voltage – LV ส่วน ระบบสายส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะจ่าย

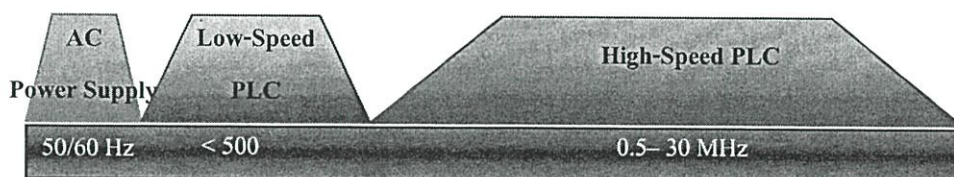
เชื่อมโยงภูมิภาคต่างของประเทศไทยที่ระดับแรงดัน ระหว่าง 115 KV – 500 KV หรือ High Voltage - HV



รูปที่ 2.1 โครงข่ายของสายส่งกำลังไฟฟ้าอย่างง่าย

2.3 แถบความถี่สัญญาณการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า (Bandwidth of AC PLC)

แถบความถี่ของการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 3 ย่าน ดังรูปที่ 2.2

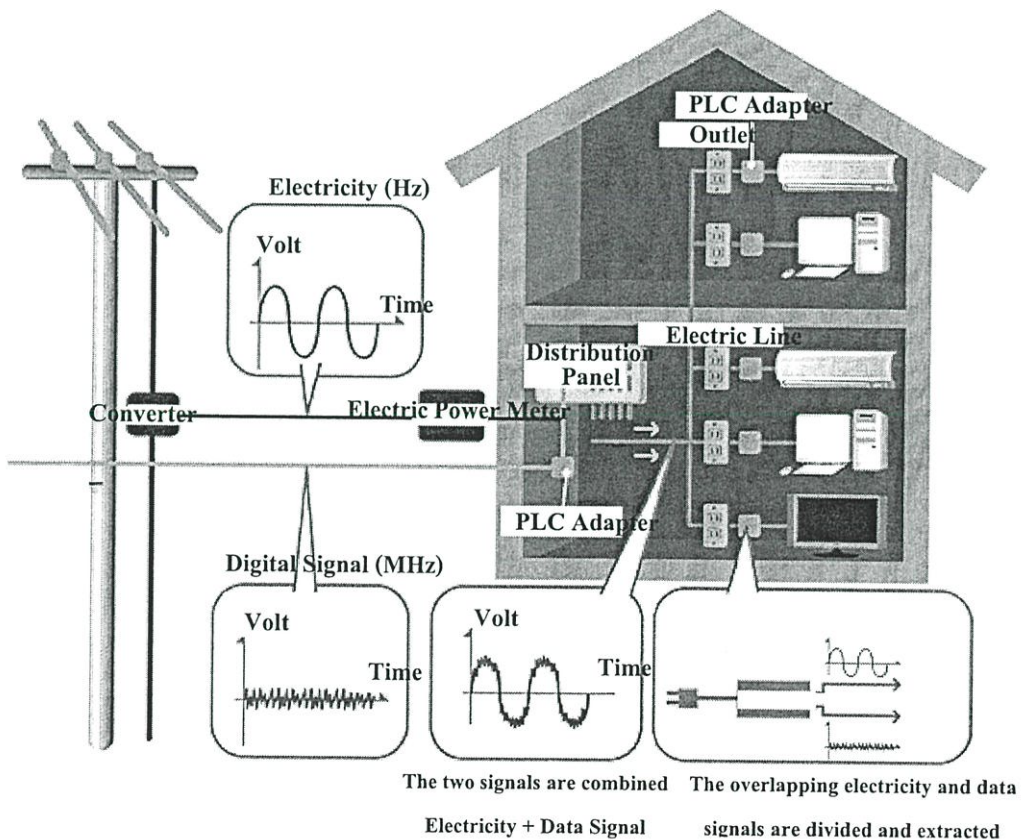


รูปที่ 2.2 แถบความถี่สัญญาณการสื่อสารผ่านไฟฟ้ากำลัง (Bandwidth of AC PLC)

- ความถี่ 50/60 Hz เป็นความถี่ที่ใช้ในแหล่งจ่ายไฟฟ้ากำลังกระแสสลับ ซึ่งแตกต่างกันในแต่ละประเทศ โดยประเทศไทยใช้ความถี่ที่ 50 Hz.
- ความถี่ < 500 kHz เป็นย่านความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูลที่มีความเร็วต่ำ เช่น การควบคุมการเปิด-เปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน เป็นต้น
- ความถี่ 0.5 – 30 MHz เป็นย่านความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูลที่ต้องการความเร็ว เช่นการส่งข้อมูลมัลติมีเดีย เป็นต้น

2.4 หลักการของการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า

ระบบการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า เป็นการส่งสัญญาณข้อมูลรวมกับสัญญาณไฟฟ้าที่วิ่งอยู่ในสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยทำการมอดูเลตสัญญาณทั้งสองเข้าด้วยกัน ซึ่งความถี่ของสัญญาณไฟฟ้านั้นทำหน้าที่เป็นความถี่พาห้ (Carrier) ในการรับ-ส่ง ข้อมูล จากต้นทางไปปลายทาง และจากปลายทางกลับมาต้นทาง



รูปที่ 2.3 หลักการสื่อสารข้อมูลผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า

2.5 การสื่อสารข้อมูล (Data Communications)

ความหมายของการสื่อสารข้อมูล เป็นการแลกเปลี่ยนข่าวสารหรือข้อมูลกันระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสาร โดยมีสื่อกลางในการโอนถ่ายข้อมูล เช่น สายทองแดง ดาวเทียม เป็นต้น ยกตัวอย่างเช่น การสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์คอมพิวเตอร์สองเครื่องด้วยการใช้สายเคเบิลเป็นตัวกลางในการสื่อสาร โดยการสื่อสารข้อมูลนี้มีทั้งการสื่อสารระยะใกล้หรือแบบโลคอล (Local) กรณีที่อุปกรณ์การสื่อสารต่างๆ อยู่ในบริเวณหรือตึก อาคารเดียวกัน และการสื่อสารระยะไกลหรือแบบรีโมต (Remote) ซึ่งอุปกรณ์การสื่อสารจะอยู่ไกลกัน หรือต่างพื้นที่ คุณสมบัติพื้นฐานของการสื่อสารข้อมูล ประกอบด้วย

1. ความถูกต้องของการส่ง (Delivery) หมายถึง ข้อมูลจะต้องไปถึงปลายทางได้อย่าง

ถูกต้อง และไปยังปลายทางตามจุดมุ่งหมายที่ต้องการ

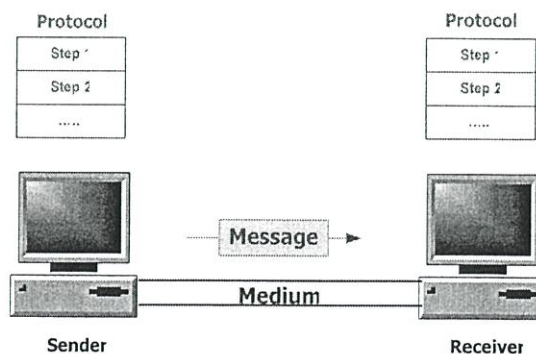
2. ความถูกต้องของข้อมูล (Accuracy) หมายถึง ข้อมูลที่ไปถึงปลายทางนั้นจะต้องเหมือนกับที่ต้นทางส่งไป มีความถูกต้องและแน่นอน อีกทั้งยังต้องส่งสัญญาณเตือนให้รับทราบในกรณีที่การส่งข้อมูลในขณะนั้น ไม่ถูกต้อง สูญหาย หรือไม่สามารถใช้งานได้

3. เวลาที่เหมาะสม (Timeliness) หมายถึง เวลาที่ใช้ในการเดินทางของข้อมูลนั้นต้องมี

ระยะเวลาที่เหมาะสมไม่นานจนเกินไป ที่สามารถนำไปใช้งานเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์โดยปราศจากนัยสำคัญว่าเกิดการหน่วงเวลา

2.5.1 องค์ประกอบของการสื่อสาร

ในการสื่อสารข้อมูลนั้นมีองค์ประกอบสำคัญหลักอยู่ 5 อย่าง ดังนี้



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของการสื่อสาร

2.5.1.1 ข้อมูลข่าวสาร (Message) คือ ข้อมูลหรือสารสนเทศต่างๆ ที่ต้องการสื่อสาร สามารถเป็นได้ทั้ง ข้อความ ตัวเลข ภาพ เสียง หรือ วิดีโอ เป็นต้น

2.5.1.2 ผู้ส่ง (Sender) คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งข้อมูลได้ เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ กล้อง วิดีโอ เป็นต้น

2.5.1.3 ผู้รับ (Receiver) คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการรับข้อมูล เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ กล้อง วิดีโอ เป็นต้น

2.5.1.4 สื่อกลางรับ-ส่ง (Medium) คือ เส้นทางหรือสื่อกลางที่ใช้ในการนำส่งข้อมูล ระหว่างผู้ส่งและผู้รับ โดยสื่อกลางการรับ-ส่งข้อมูลมีทั้งแบบมีสาย เช่น สายคู่ตีเกลียว สายใยแก้วนำแสง สายไฟฟ้ากำลัง เป็นต้น และแบบไร้สาย เช่น คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ เป็นต้น

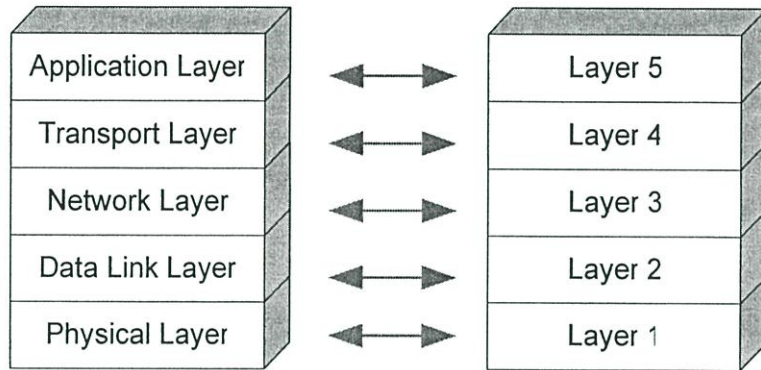
2.5.1.5 โปโตคอล (Protocol) คือ กฎเกณฑ์ ระเบียบ หรือข้อกำหนดต่างๆ ของการสื่อสาร ที่กำหนดขึ้นมาเพื่อเป็นข้อตกลงสำหรับโดยป็นมาตรฐานในการกำหนดบทบาท หน้าที่ที่ในการสื่อสารข้อมูลให้ตรงกัน บทบาทสำคัญของ โปโตคอลก็เพื่อให้อุปกรณ์ทั้งสองฝั่งสามารถสื่อสารและเข้าใจตรงกัน และผลของการสื่อสารระหว่างกันเป็นไปตามขั้นตอนที่ถูกต้อง ดังนั้นก่อนที่ผู้ส่งและผู้รับจะสามารถติดต่อกันได้นั้น จะต้องสร้างข้อตกลงของการสื่อสารกันก่อน เพื่อที่จะให้สามารถเข้าใจกันได้ เช่น สมมติว่าคนไทยต้องการพูดคุยกับคนต่างชาติ จะต้องมีการข้อตกลงกันก่อนว่าในการสื่อสารกันนั้นจะใช้ภาษาอะไร เพื่อที่จะให้พูดจาภาษาเดียวกันและเข้าใจตรงกัน เป็นต้น

2.5.2 แบบจำลองของทีซีพี/ไอพี (TCP/IP Protocol model)

การส่งข้อมูลจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ซึ่งจะต้องผ่านกระบวนการต่างๆ มากมาย จำเป็นที่จะต้องแบ่งการทำงานเหล่านั้นออกเป็นลำดับชั้น ในระบบเครือข่ายก็เหมือนกันจะต้องมีการแบ่งการทำงานลำดับชั้น เนื่องจากการทำงานของเครือข่ายมีความซับซ้อน ดังนั้น จึงต้องมีการออกแบบมาตรฐานของแบบจำลองของเครือข่าย (Network Model) เพื่อใช้ในการลดความซับซ้อนและให้ง่ายในการทำเข้าใจ

เนื่องจากแบบจำลองของเครือข่ายที่ใหญ่ที่สุดและมีผู้ใช้งานเครือข่ายกันอยู่ทั่วโลกคือแบบจำลองเครือข่ายอินเทอร์เน็ต หรือสามารถเรียกได้อีกชื่อหนึ่งที่อยู่จักกันโดยทั่วไปคือ ชุดโปโตคอลทีซีพี/ไอพี (TCP/IP Protocol suite) ซึ่งจะประกอบไปด้วยลำดับชั้น (Layer) ที่ซ้อนทับกันอยู่ทั้งหมด 5 ลำดับชั้น คือ ลำดับชั้นกายภาพ (physical layer) ลำดับชั้นเชื่อมโยงข้อมูล (data link layer) ลำดับชั้นเครือข่าย (network layer) ลำดับชั้นถ่ายโอน (transport layer) และ ลำดับชั้นใช้งาน (application layer)

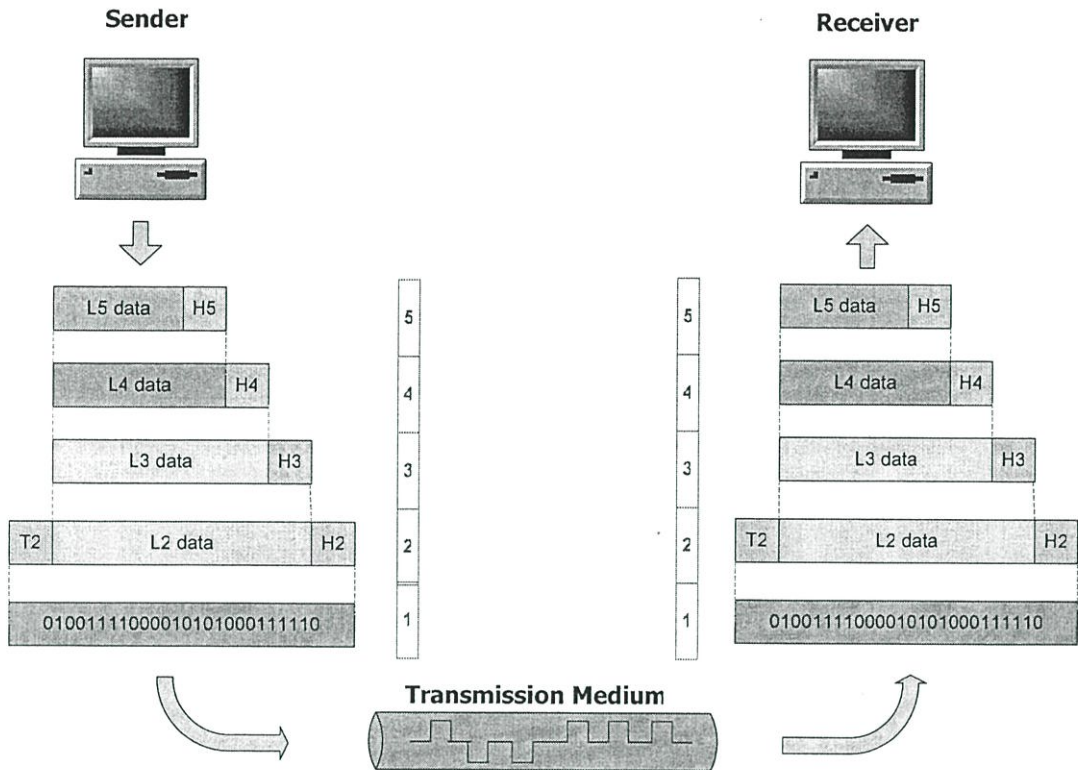
อุปกรณ์ที่ใช้งานในเครือข่ายที่ซีพี/ไอพี แต่ละตัวไม่จำเป็นต้องทำงานให้ครบทั้ง 5 ลำดับชั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะของการใช้งาน เช่น ในการส่งข้อมูลจากต้นทาง A ไปยังปลายทาง B ซึ่งอยู่กันคนละที่นั้น จำเป็นที่ข้อมูลนั้นจะต้องผ่านอุปกรณ์ต่างๆ มากมายกว่าที่จะถึงจุดหมายปลายทางแต่ อุปกรณ์บางตัวที่ข้อมูลวิ่งผ่านไบนั้นอาจจะทำงานแค่ 2 หรือ 3 ลำดับชั้นเท่านั้น



รูปที่ 2.5 ลำดับชั้นที่ซีพี/ไอพี

การจำลองแบบเครือข่ายที่ซีพี/ไอพี แต่ละลำดับชั้นมีความรับผิดชอบหรือหน้าที่การทำงานที่แตกต่างกันออกไป และแต่ละลำดับชั้นทำหน้าที่ให้บริการ (service) กับลำดับชั้นถัดไป เช่น ลำดับชั้น 2 จะให้บริการกับลำดับชั้น 3 ส่วนลำดับชั้น 3 จะให้บริการกับลำดับชั้น 4 เป็นต้น ส่วนในการติดต่อกันระหว่างต้นทางกับปลายทางนั้น ถึงแม้ว่าจะมีการส่งข้อมูลลงหรือขึ้นไปตามลำดับชั้นต่างๆ แต่ความจริงแล้วการติดต่อกัน จะเป็นการติดต่อกันระหว่างลำดับชั้นเดียวกันเท่านั้น เช่น ลำดับชั้น x ของต้นทาง จะติดต่อกับลำดับชั้น x ของปลายทาง เป็นต้น เนื่องจากว่าภายใต้ลำดับชั้นเดียวกันจะมีโปรโตคอลเหมือนกัน ทำให้สามารถพูดจาภาษาเดียวกัน ส่วนลำดับชั้นอื่นๆ ก็จะมีโปรโตคอลที่แตกต่างกันไป

จากรูปที่ 2.6 ข้อมูล (L5 data) จะถูกส่งมาจากลำดับชั้น 5 ลงมาตามลำดับชั้นต่างๆ โดยผ่านจุดต่อร่วม (Interface) ซึ่งในแต่ละลำดับชั้นนั้นมีการเพิ่มส่วนหัว (header) เข้าไปส่วนหัวของเฟรมข้อมูล ส่วนลำดับชั้น 2 จะมีการเพิ่มทั้งส่วนหัว (header) และส่วนท้าย (trailer) เข้าไปด้วย เมื่อข้อมูลถูกส่งลงมาถึงลำดับชั้น 1 ข้อมูลนั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อส่งต่อไปยังสื่อที่ใช้ในการส่งข้อมูลต่อไป

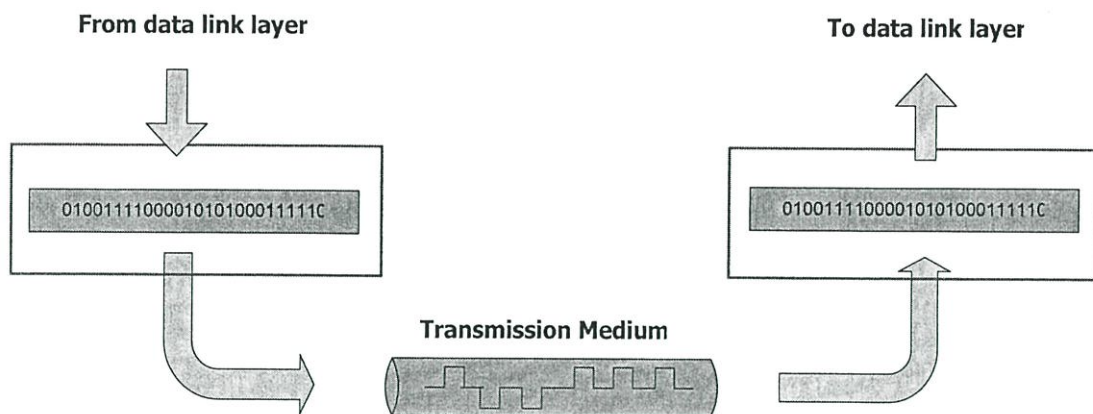


รูปที่ 2.6 การสื่อสารข้อมูลระหว่างลำดับชั้นภายใต้แบบจำลองทีซีพี/ไอพี

เมื่อสัญญาณถูกส่งออกไป ถึงปลายทางแล้วลำดับชั้น 1 ของปลายทางจะทำการแปลงสัญญาณที่เข้ามานั้นให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลเชิงเลข (digital) แล้วส่งต่อไปให้กับลำดับชั้น 2 ต่อไป ลำดับชั้น 2 ที่รับข้อมูลแล้วจะทำการถอดส่วนหัวและส่วนท้ายออก และทำงานตามโปรโตคอลที่อยู่ในลำดับชั้น 2 เสร็จแล้วจึงจะส่งข้อมูลนั้นไปยังลำดับชั้นถัดไปเรื่อยๆ ในแต่ละลำดับชั้นจะใช้หลักการเดียวกัน คือ ทำการถอดส่วนหัวออกจากข้อมูล และทำงานตามโปรโตคอลของลำดับชั้นข้อมูลนั้น หลังจากลำดับชั้น 5 ถอดส่วนหัวออกแล้ว ก็จะได้ข้อมูลเหมือนกับที่ต้นทางได้ส่งมาให้

2.5.3 หน้าทีของแต่ละลำดับชั้น

2.5.3.1 ลำดับชั้นกายภาพ (Physical Layer) เป็นลำดับชั้นล่างสุดที่ทำการส่งข้อมูลในระดับบิตไปยังสื่อกลาง (media) ที่ใช้ในการส่งข้อมูล ภายในลำดับชั้นนี้จะเกี่ยวข้องกับการกำหนดคุณสมบัติทางกล (mechanical) และทางไฟฟ้า (electrical) ใหกับการต่อเชื่อมและสื่อกลางที่ใช้ส่งข้อมูล จากรูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับชั้นกายภาพกับลำดับชั้นเชื่อมโยงข้อมูล และสื่อกลางที่ใช้ในการส่งข้อมูล



รูปที่ 2.7 ลำดับชั้นกายภาพ

หน้าที่หลักของลำดับชั้นกายภาพ มีดังนี้

- กำหนดคุณสมบัติของการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์และสื่อกลางที่ใช้ในการรับ

ส่งข้อมูล

- สร้างข้อกำหนดในการแปลงข้อมูลระดับบิตให้เป็นสัญญาณ (signal) ต่างๆ

เช่น สัญญาณทางไฟฟ้า หรือ แสง เป็นต้น ภายในลำดับชั้นนี้จะมีข้อกำหนดว่าจะแปลงบิตข้อมูล 0 และ 1 ไปเป็นสัญญาณต่างได้อย่างไรบ้าง

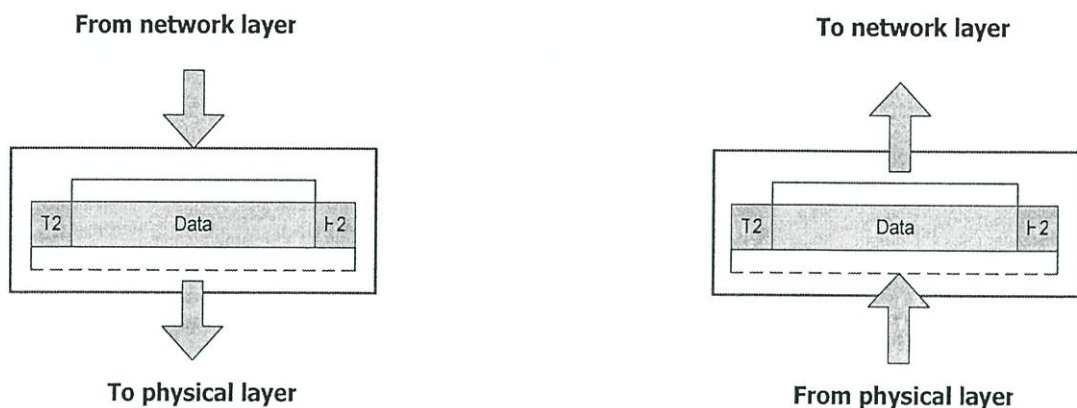
- กำหนดอัตราการส่งข้อมูล (Transmission rate) แต่ละวินาทีที่สามารถส่งข้อมูล

ได้จำนวนเท่าใด

- กำหนดความสอดคล้องกันของการรับ-ส่งข้อมูล (synchronization of bits) โดย

ทั้งฝ่ายรับและส่งจะต้องมีสัญญาณนาฬิกา (clock) ที่สอดคล้องกัน

2.5.3.2 ลำดับชั้นเชื่อมต่อข้อมูล (Data Link Layer) จะรับข้อมูลจากลำดับชั้นกายภาพ ข้อมูลที่ได้รับมานั้นอาจเกิดความผิดพลาด (error) จากการเดินทางของข้อมูลมาจากต้นทาง ดังนั้น ลำดับชั้นเชื่อมต่อข้อมูลนี้จะต้องทำการแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูล เพื่อที่จะให้ลำดับชั้นเครือข่ายได้ข้อมูลที่ปราศจากความผิดพลาด

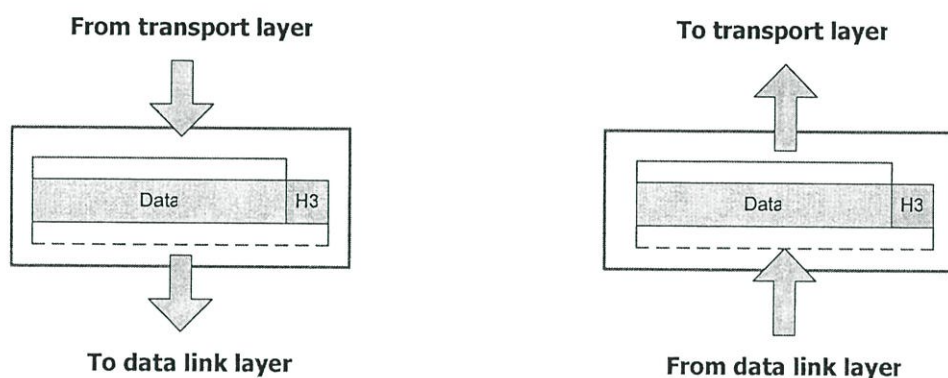


รูปที่ 2.8 ลำดับชั้นเชื่อมต่อข้อมูล

จากรูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับชั้นเชื่อมต่อข้อมูลกับลำดับชั้นเครือข่าย โดยหน้าที่หลักของลำดับชั้นเชื่อมต่อข้อมูล มีดังนี้

- รับข้อมูลจากลำดับชั้นเครือข่าย มาทำการแบ่งออกเป็นเฟรม เพื่อให้สะดวกในการจัดส่งข้อมูล
- เพิ่มฟิสิคัลแอดเดส (physical address) เข้าไปที่ส่วนหัว เพื่อจะได้ทราบแอดเดรสของอุปกรณ์ทั้งต้นทางและปลายทาง
- ควบคุมการไหลของข้อมูล (Flow control) ในกรณีที่ต้นทางและปลายทางมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลไม่เท่ากัน จะทำให้เกิดการสูญเสียได้ ดังนั้น จึงต้องมีกลไกการควบคุมอัตราการไหลของข้อมูล เพื่อที่จะให้การรับ-ส่งข้อมูลของทั้งฝ่ายส่งและฝ่ายรับเกิดความสมดุล
- ควบคุมความผิดพลาดของข้อมูล (Error control) ในกระบวนการรับ-ส่งข้อมูลนั้นมีความเป็นไปได้ที่ข้อมูลจะเกิดการสูญหาย หรือมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น เช่น มีเฟรมข้อมูลสูญหาย หรือมีการส่งเฟรมข้อมูลซ้ำ เป็นต้น โดยการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลนั้นสามารถตรวจสอบได้จากส่วนท้ายของเฟรม (trailer)
- ควบคุมการใช้สื่อกลางในการส่งข้อมูล (Access control) เมื่ออุปกรณ์ต่างๆ ต้องมีการใช้สื่อกลางในการส่งข้อมูลร่วมกันแล้ว มีความเป็นไปได้ที่อุปกรณ์เหล่านั้นจะส่งข้อมูลออกมาพร้อมๆ กัน ซึ่งจะทำให้เกิดการชนกันของข้อมูล

2.5.3.3 ลำดับชั้นเครือข่าย (Network Layer) ลำดับชั้นเครือข่ายจะรับผิดชอบในการส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทาง (source-to-destination delivery) ให้เป็นได้อย่างถูกต้อง ถึงแม้ว่าการส่งข้อมูลนั้นจะเป็นการส่งข้ามเครือข่ายกัน เนื่องจากในลำดับชั้นเชื่อมต่อข้อมูลจะเน้นการส่งข้อมูลภายในเครือข่ายเดียวกัน รูปที่ 2.9 แสดงถึงความสัมพันธ์กันระหว่างลำดับชั้นเครือข่าย ลำดับชั้นเชื่อมต่อข้อมูล และลำดับชั้นถ่ายโอน

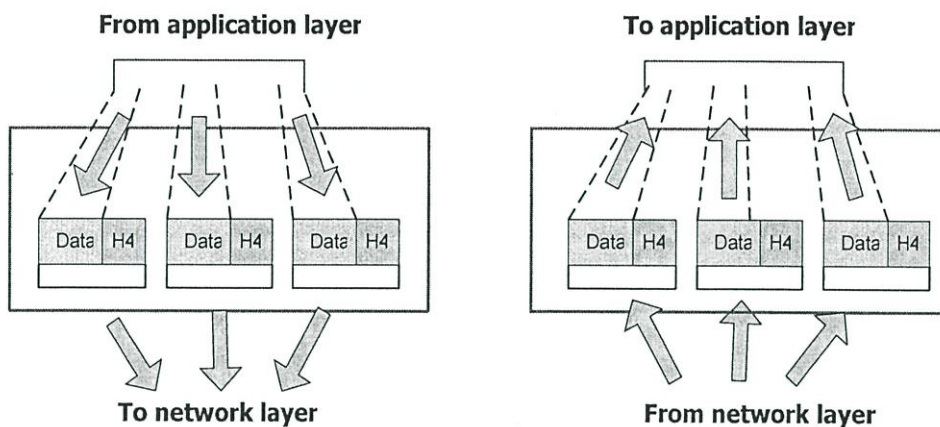


รูปที่ 2.9 ลำดับชั้นเครือข่าย

หน้าที่หลักของลำดับชั้นเครือข่าย

- กำหนดลอจิกคอลแอดเดรส (Logical address) ของต้นทางและปลายทางให้กับแพ็กเกต (packet) โดยใส่เข้าไปที่ส่วนหัวของแพ็กเกต เพื่อให้สามารถส่งข้อมูลข้ามเครือข่ายกันได้ เนื่องจากฟิสิคอลลแอดเดรสที่ถูกกำหนดในลำดับชั้นเชื่อมต่อข้อมูลนั้นจะใช้กันภายในเครือข่ายเดียวกันเท่านั้น ดังนั้น การส่งข้อมูลข้ามเครือข่ายกันจึงต้องมีการกำหนดลอจิกคอลแอดเดรสขึ้นมา
- การหาเส้นทาง (Routing) การส่งข้อมูลข้ามเครือข่ายกันนั้น จะต้องส่งต่อกันเป็นทอดๆ จากเครือข่ายหนึ่งไปยังอีกเครือข่ายหนึ่ง กว่าที่ข้อมูลจะถึงปลายทางได้อาจจะต้องผ่านเครือข่ายหลายเครือข่าย อีกทั้งยังสามารถเดินทางไปได้หลายเส้นทางอีกด้วย ดังนั้น ลำดับชั้นนี้จะต้องมีการกำหนดกลไกในการหาเส้นทางของการส่งข้อมูล เพื่อให้ข้อมูลเหล่านั้นสามารถเดินทางไปยังปลายทางได้เร็วที่สุด

2.5.3.4 ลำดับชั้นถ่ายโอน (Transport Layer) ลำดับชั้นถ่ายโอนจะทำการส่งข้อมูลจากต้นทาง (source) ไปปลายทาง (destination) ให้ได้อย่างถูกต้อง ถ้าทั้งต้นทางและปลายทางมีกระบวนการ (process) ในการรับ-ส่งข้อมูลเพียงเพียงกระบวนการเดียว แต่ทั้งต้นทางและปลายทางนั้นสามารถมีกระบวนการรับ-ส่งข้อมูลได้หลายกระบวนการ ดังนั้น ลำดับชั้นถ่ายโอนจึงต้องมีข้อกำหนดการรับ-ส่งข้อมูลกันระหว่างกระบวนการ (process to process delivery) ด้วย



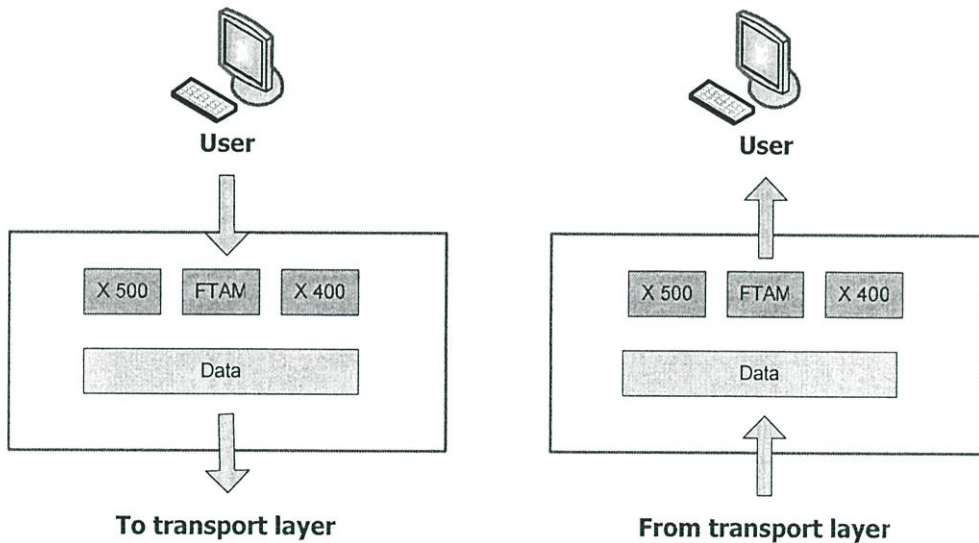
รูปที่ 2.10 ลำดับชั้นถ่ายโอน

หน้าที่หลักของลำดับชั้นถ่ายโอน มีดังนี้

- ลำดับชั้นถ่ายโอนมีการกำหนดลอจิกคอลแอคเตอรส์ ซึ่งเป็นแอคเตอรส์ของเครื่องนั้นๆ แต่ถ้าภายในเครื่องนั้นมีกระบวนการอยู่กระบวนการ กำหนดลอจิกคอลแอคเตอรส์เพียงอย่างเดียว ไม่เพียงพอที่จะทำให้ทราบได้ว่าข้อมูลเหล่านั้นจะต้องส่งต่อไปให้กับกระบวนการใด ดังนั้น จึงต้องมีการกำหนดพอร์ต (port) ขึ้นมา เพื่อเป็นหมายเลขที่บ่งบอกถึงกระบวนการต่าง ๆ นั้นเอง
- ข้อมูลที่จะส่งออกจากลำดับชั้นจะถูกแบ่งออกเป็นเซ็กเมนต์ (segment) โดยที่แต่ละเซ็กเมนต์จะมีหมายเลขกำกับ (sequence number) อยู่ ดังนั้น เมื่อกระบวนการที่รับข้อมูลได้รับเซ็กเมนต์เหล่านี้แล้ว ก็จะนำมารวมกันอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งการรวมเซ็กเมนต์นั้นจะใช้หมายเลขกำกับในการรวมข้อมูลในการรวมข้อมูลให้เป็นเหมือนเดิม ก่อนที่จะส่งต่อไปยังลำดับชั้นใช้งาน
- ควบคุมการติดต่อระหว่างกระบวนการ (connection control) ในการติดต่อกันระหว่างกระบวนการสามารถทำได้ 2 แบบ คือ คอนเน็กชันเลส (connectionless) และคอนเน็กชันโอเรียนเต็ล (connection-oriented) โดยที่คอนเน็กชันเลสไม่ต้องมีการสร้างการติดต่อระหว่างกระบวนการ เมื่อต้องการรับ-ส่งข้อมูลก็สามารถทำได้เลย แต่คอนเน็กชันโอเรียนเต็ลจะต้องมีการสร้างการติดต่อกันระหว่างกระบวนการเสียก่อน จึงจะสามารถทำการรับ-ส่งข้อมูลได้
- ควบคุมการไหลของข้อมูล (flow control) ซึ่งจะคล้ายกับลำดับชั้นเชื่อมต่อข้อมูล เพียงแต่จะเป็นการควบคุมการไหลของข้อมูลระหว่างกระบวนการเท่านั้น
- ควบคุมข้อผิดพลาดของข้อมูล (error control) โดยจะควบคุมข้อผิดพลาดของข้อมูลระหว่างกระบวนการ

2.5.3.5 ลำดับชั้นใช้งาน (Application Layer) ลำดับชั้นนี้เน้นในส่วนของการติดต่อกับผู้ใช้ (user interface) ต่างๆ และบริการ (service) ต่างๆ ของเครือข่ายที่จะมีให้ใช้ เช่น จดหมายอิเล็กทรอนิกส์ (electronic mail) การโอนย้ายไฟล์ (file transfer) หรือการใช้งานเว็ลด์ไวด์เว็บ (www) เป็นต้น และลำดับชั้นนี้มีหน้าที่หลัก ดังนี้

- ให้บริการจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ (Mail service) เช่นการรับ-ส่ง การส่งจดหมายต่อกันเป็นทอด (Forward) เป็นต้น
- การเข้าถึงและการโอนถ่ายข้อมูล (File transfer and access) เช่น การเข้าถึง (Access) ไฟล์จากระยะไกลการโอนย้ายไฟล์กันระหว่างเครื่อง เป็นต้น
- การเข้าใช้งานเครื่องจากระยะไกล (Remote log-in) เช่น ผู้ใช้สามารถที่ ล็อคอินเข้าไปใช้งานเครื่องอื่นๆ ได้
- การใช้งานเว็ลด์ไวด์เว็บ (Accessing the world wide web)



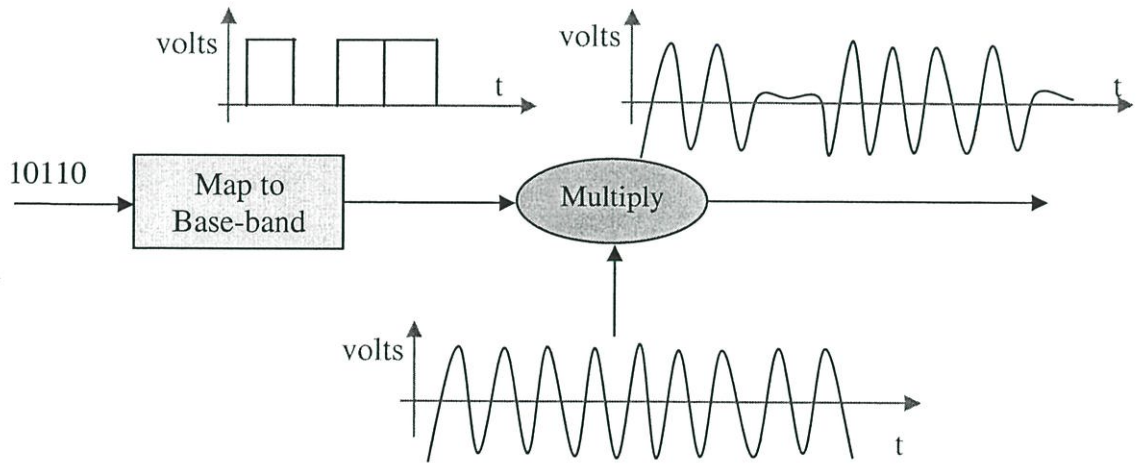
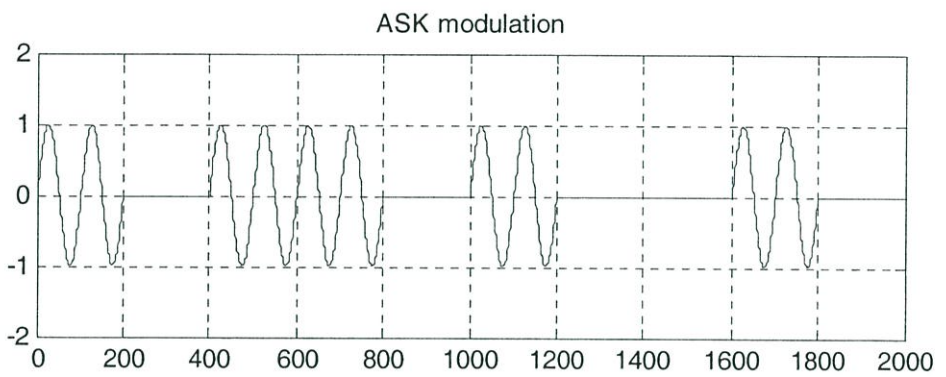
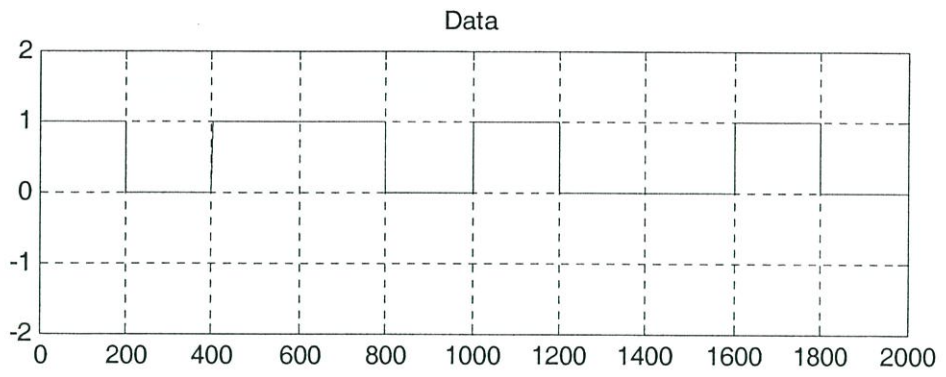
รูปที่ 2.11 ลำดับชั้นใช้งาน

2.6 เทคนิคการมอดูเลตชั้นสัญญาณดิจิทัล (Digital Modulation Technique)

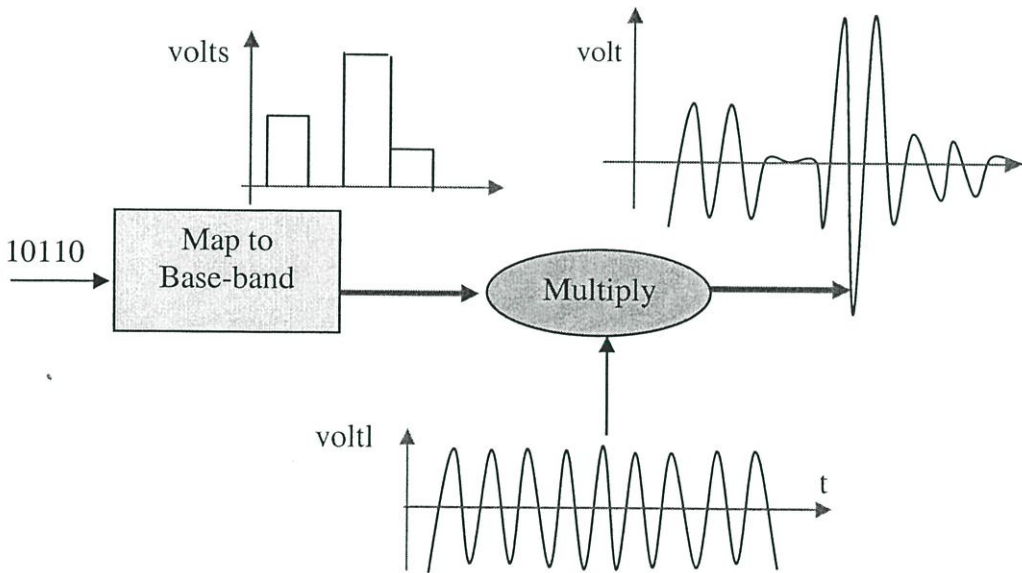
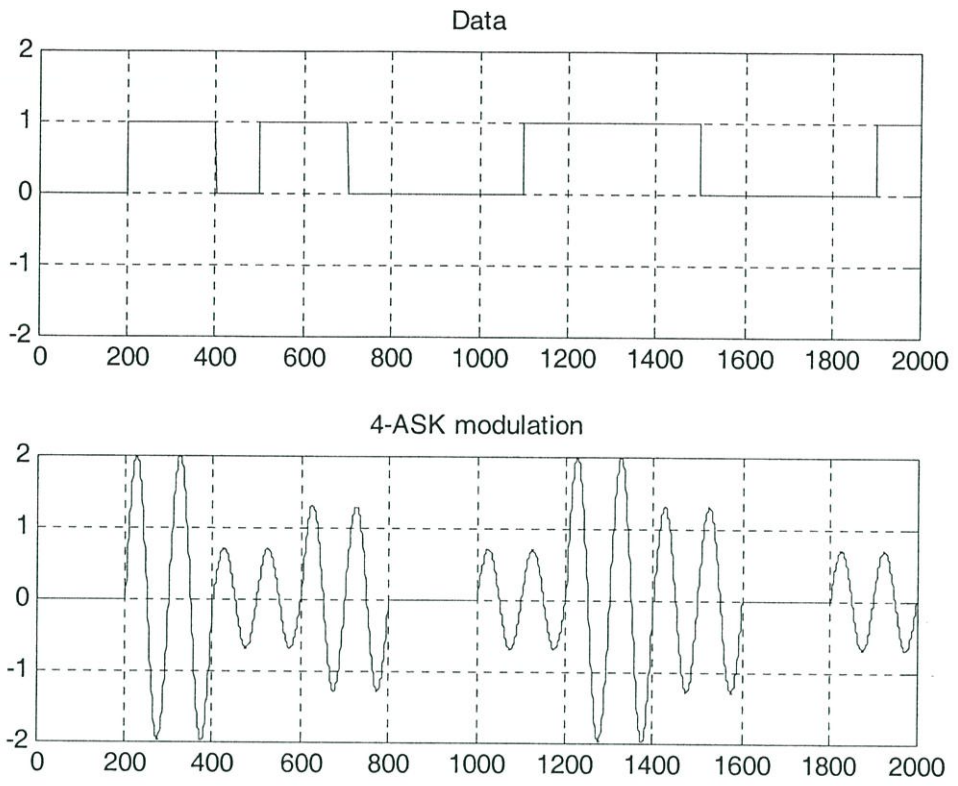
การสื่อสารข้อมูลดิจิทัลบนช่องสัญญาณต่างๆ ในบางช่องสัญญาณก็ไม่เหมาะสม เช่น การส่งสัญญาณดิจิทัลเข้าช่องสัญญาณอนาล็อก ที่คุ้นเคยกัน คือ ช่องสัญญาณกำลังไฟฟ้าซึ่งออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับส่งกำลังงานไฟฟ้า เมื่อนำมาใช้ส่งสัญญาณดิจิทัล จะต้องเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลนั้นให้เหมาะสมกับช่องสัญญาณ เทคนิคที่นำมาใช้เปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลให้เหมาะสมกับช่องสัญญาณอนาล็อก คือ การมอดูเลชัน โดยสัญญาณพาห้เป็นตัวพาสัญญาณข้อมูลผ่านเข้าช่องสัญญาณ และนอกจากการเปลี่ยนสัญญาณให้เหมาะสมกับช่องสัญญาณแล้ว เทคนิคการมอดูเลชันยังให้อัตราเร็วที่สูงขึ้นในช่องสัญญาณที่มีความกว้างแถบ (Bandwidth) จำกัดเท่าเดิม ซึ่งเทคนิคการมอดูเลชัน คือ การเปลี่ยนแปลงขนาด ความถี่ และเฟสของสัญญาณพาห้ (Carried signal) โดยสัญญาณดิจิทัลที่ต้องการมอดูเลตมีขนาดแน่นอนเป็นระดับ สัญญาณพาห้จะถูกเปลี่ยนขนาด ความถี่ หรือเฟส เป็นระดับที่แน่นอน จึงเรียกว่าเป็นการเปลี่ยน (shift) โดยเมื่อเปลี่ยนขนาด ความถี่ หรือเฟสไปตามบิตข้อมูลที่เข้ามาก็จะเรียกว่า Amplitude-shift Keying; ASK, Frequency-shift Keying; FSK, Phase-shift Keying; PSK ตามลำดับการเลือกวิธีการมอดูเลตรูปแบบต่างนั้นจะพิจารณาสิ่งเหล่านี้

- ความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสุด (Maximum data rate)
- ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดต่ำที่สุด (Minimum probability of symbol error)
- กำลังในการส่งต่ำที่สุด (Minimum transmitted power)
- แบนด์วิดท์ของสัญญาณน้อยที่สุด (Minimum channel bandwidth)
- การทนต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุด (Maximum resistance to interfering signal)
- ความยุ่งยากของวงจรน้อยที่สุด (Minimum circuit complexity)

2.6.1 การมอดูเลตทางขนาด (Amplitude-shift Keying: ASK) เป็นการเปลี่ยนขนาดของสัญญาณพาห้ ซึ่งการเปลี่ยนเป็นระดับที่แน่นอน เช่น การเปลี่ยนตามบิตข้อมูล '0' '1' จะได้สัญญาณที่แน่นอนสองระดับเรียกว่า การมอดูเลตแบบ binary ASK ในกรณีที่ใช้ระดับสูงสุดแทนข้อมูล '1' และระดับสัญญาณพาห้เป็นศูนย์ เมื่อข้อมูลเป็น '0' จะเรียกว่า การมอดูเลตแบบ on-off keying: OOK ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก)



(n) Binary ASK (BASK)

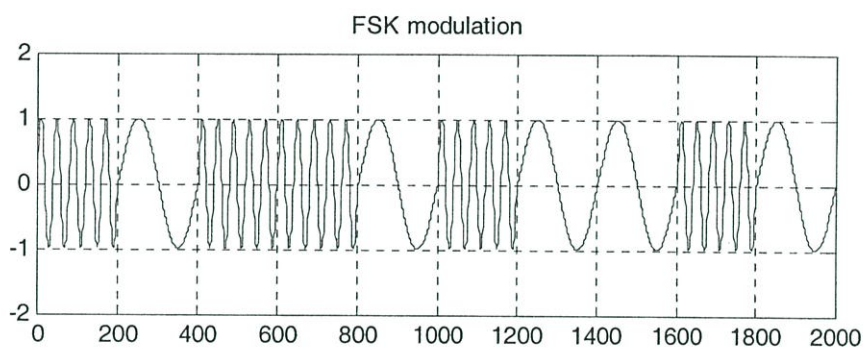
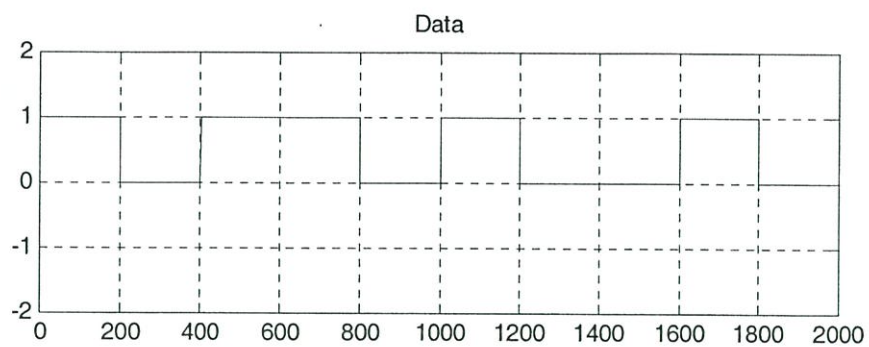


(๗) Multi-level (4-ary) amplitude shift keying (4-ary ASK)

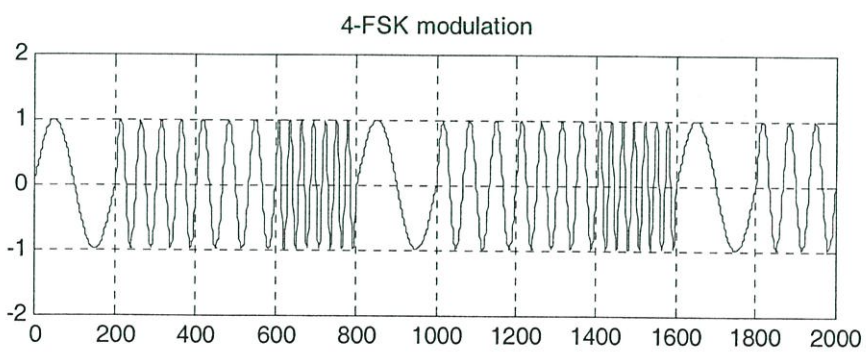
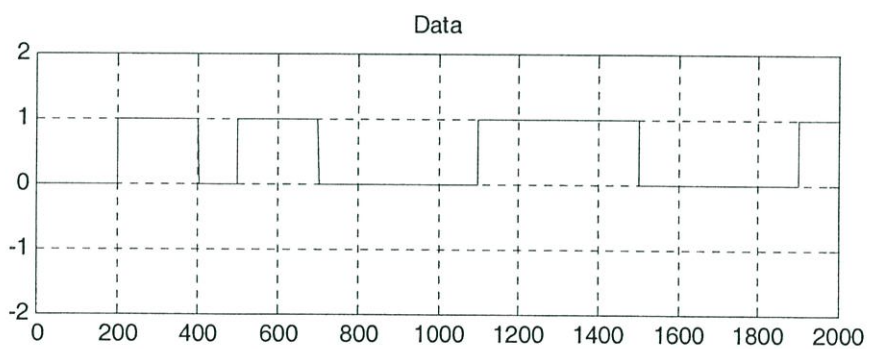
รูปที่ 2.12 สัญญาณ ASK

ส่วนรูปที่ 2.12 (ข) เป็นการเปลี่ยนระดับของสัญญาณพาหะเป็น 4 ระดับ ซึ่งจะทำให้สามารถแทนบิตข้อมูลได้สองบิตในแต่ละระดับของสัญญาณพาหะ เรียกว่า การมอดูเลตแบบ M-ary ASK โดยที่ $M=4$ และจะพบว่าในรูปที่ 2.12 (ก) กรณี binary ASK การเปลี่ยนแปลงพาหะแต่ละครั้ง หมายถึง มีบิตข้อมูลหนึ่งบิตถูกส่งออกไปหรือรับเข้ามา แต่ในกรณีรูป 2.12 (ข) การเปลี่ยนแปลงสัญญาณพาหะแต่ละครั้งแสดงว่ามีบิตข้อมูลสองบิตถูกส่งออกไปหรือรับเข้ามาแสดงให้เห็นว่าจำนวนบิตข้อมูลที่เท่ากัน กรณี M-ary ASK จะใช้จำนวนการเปลี่ยนแปลงสัญญาณพาหะน้อยกว่า หมายถึง การส่งได้เร็วขึ้น ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณพาหะนี้จะเรียกว่า บอด (baud) นิยามเป็นอัตราเร็วของสัญลักษณ์มีความสัมพันธ์กับอัตราเร็วบิต คือ ถ้าหนึ่งสัญลักษณ์ คือหนึ่งบิตอัตราเร็วบิตเท่ากับบอด เช่น กรณี binary ASK แต่ ถ้าหนึ่งสัญลักษณ์ เท่ากับ 2 บิต เช่น กรณี 4-ary ASK อัตราเร็วบิตก็จะมากกว่าบอด เนื่องจากในกรณีนี้บอดเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณพาหะมีค่าเท่ากันทั้งกรณี binary ASK และ 4-ary ASK ถ้าส่งสัญญาณนี้ไปในช่องสัญญาณหนึ่งจะพบว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณทั้งสองแทบจะไม่ต่างกันแต่ได้อัตราบิตที่ต่างกันด้วยวิธีนี้จึงทำให้สามารถส่งข้อมูลที่มีอัตราบิตสูงไปในช่องสัญญาณที่มี แบนด์วิดท์แคบได้

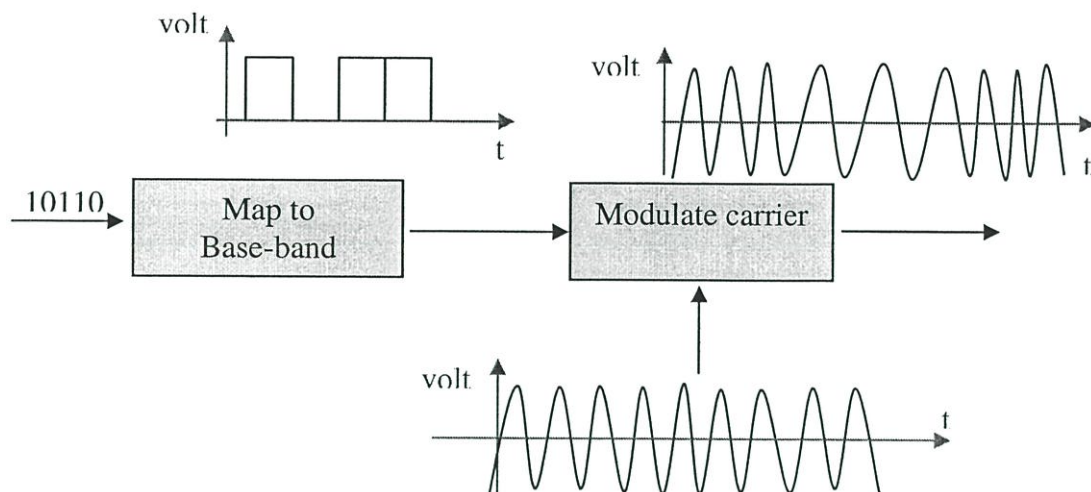
2.6.2 การมอดูเลตทางความถี่ (Frequency-shift Keying: FSK) เป็นการเปลี่ยนความถี่ของพาหะทำนองเดียวกับ ASK การเปลี่ยนแปลงความถี่ เนื่องจากการมอดูเลตด้วยสัญญาณดิจิทัลจะทำให้ พาหะของสัญญาณเปลี่ยนไปเป็นความถี่ที่แน่นอนในลักษณะของการเลื่อนความถี่ ซึ่งถ้าเป็นกามอดูเลตแบบ binary FSK คือ อมีคอมบิเนชันของบิตข้อมูล 0 กับ 1 ก็จะทำให้สัญญาณพาหะเปลี่ยนไปเป็นความถี่สองความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ก) และเมื่อ ใช้หลายความถี่เพื่อแทนคอมบิเนชันของบิตข้อมูลที่มากขึ้น จะทำให้ความถี่ของพาหะเปลี่ยนไปหลายความถี่ได้เป็นการมอดูเลตแบบ M-ary FSK ดังรูปที่ 2.13 (ข) ซึ่ง เป็นกรณี 4-ary FSK จะทำให้ได้อัตราบิตที่สูงขึ้นทำนองเดียวกับ M-ary ASK แต่การใช้หลายความถี่ ในการแทนคอมบิเนชันของบิตข้อมูลเช่นนี้จะทำให้แบนด์วิดท์ของสัญญาณที่มอดูเลตแล้วกว้างขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ต่างกับกรณีของ M-ary ASK ที่ยังคงเป็นความถี่เดียวอยู่ทำให้แบนด์วิดท์ของสัญญาณที่มอดูเลตแล้ว ไม่กว้างมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การมอดูเลตแบบ FSK นี้จึงมักนิยมใช้ กันในการส่งสัญญาณที่มีอัตราบิตไม่สูงนัก เช่น 800,1200 บิตต่อวินาที



(n)



(u)



รูปที่ 2.13 สัญญาณ FSK

(ก) Binary FSK (BFSK)

(ข) Multi-level (4-ary) frequency shift keying (4-ary FSK)

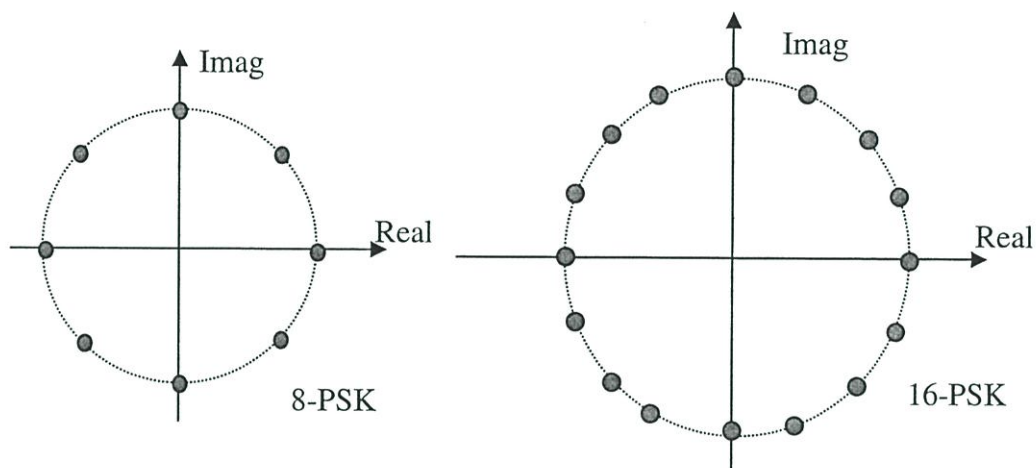
2.6.3 การมอดูเลตทางเฟส (Phase-shift Keying: PSK) เป็นการเปลี่ยนเฟสของสัญญาณพาหะตามการเปลี่ยนบิตข้อมูล ดังนั้น การส่งผ่านข้อมูลไบนารี (Binary data transmission) ที่ส่งบิต “1” กับบิต “0” โดยมีระยะห่างบิต (bit interval) เท่ากับ T_b ในส่วนของการส่งข้อมูลหลายระดับ (Multi-level: M-ary data transmission) จะส่ง M ค่า (ที่เป็นไปได้) แต่ละตัวของสัญญาณ M เรียกว่า “สัญลักษณ์ (symbol)” และมีระยะห่างสัญลักษณ์เท่ากับ T

เมื่อ $M=2^n$ และ $T = nT_b$ โดยที่ n = จำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ (จำนวนเต็มบวก) ยกตัวอย่างเช่น

กรณีของการมอดูเลตทางเฟสแบบไบนารี (BPSK) เป็นการเปลี่ยนเฟสของพาหะระหว่างสองเฟส โดยจะเป็นการกลับเฟส คือ ให้ความแตกต่างของเฟสมากที่สุด ซึ่งมีค่าจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ $n = 1$ ทำให้สามารถคำนวณค่าได้เป็น $M = 2^1$ คือมีบิต “1” กับบิต “0” และระยะห่างบิต $T = 1 \cdot T_b = T_b$ ส่วนอัตราการส่งสัญลักษณ์ผ่านช่องสัญญาณ (channel) เรียกว่า “ไบต์ (Bauds)”

$$\text{Baud} = \text{symbol / s} \quad (\text{จะได้ } \log_2 M \text{ bit / s}) \quad (2.1)$$

สัญญาณที่แสดงในรูปที่ 2.14 (ก) เป็นสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตทางเฟสแบบไบนารี (BPSK) และเมื่อเปลี่ยนการมอดูเลตเป็นแบบหลายระดับ M-ary PSK จะได้สัญญาณในรูปที่ 2.14 (ข) ซึ่งเป็น 4-ary PSK การมอดูเลตแบบหลายระดับ M-ary PSK จะไม่ทำให้แบนด์วิดท์ของสัญญาณที่มอดูเลตแล้วกว้างมากขึ้นเมื่อจำนวนระดับ M สูงขึ้น ซึ่งดีกว่าการมอดูเลตแบบหลายระดับ M-ary FSK ทำนองเดียวกัน M-ary ASK ที่เมื่อเพิ่มจำนวนระดับ M จะทำให้ความแตกต่างของแต่ละสัญญาณที่แทนคอมบิเนชันของบิต ข้อมูลลดลง โอกาสที่จะเกิดการรับและตีความที่ผิดพลาดจะสูงขึ้น



รูปที่ 2.15 สัญญาณ constellation

(ก) Multi-level (8-ary) phase shift keying (PSK)

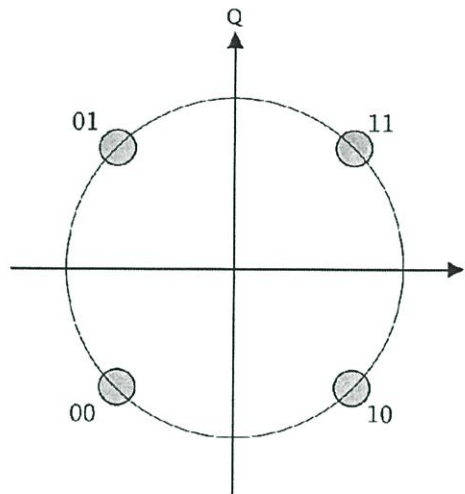
(ข) Multi-level (16-ary) phase shift keying (PSK)

พิจารณารูปที่ 2.15 แสดงสัญญาณ constellation ของสัญญาณ (ก) 8-ary PSK และ (ข) 16-ary PSK จะเห็นว่าความต่างเฟสของแต่ละสัญญาณในกรณีของ 16-ary PSK จะน้อยกว่าทำให้บริเวณที่ยอมให้มีการผิดพลาดของสัญญาณแต่ยังสามารถรับได้อย่างถูกต้องจะแคบกว่ากรณีของ 4-ary PSK มาก (ดูจากบริเวณที่แบ่งโดยเส้นประของแต่ละจุด)

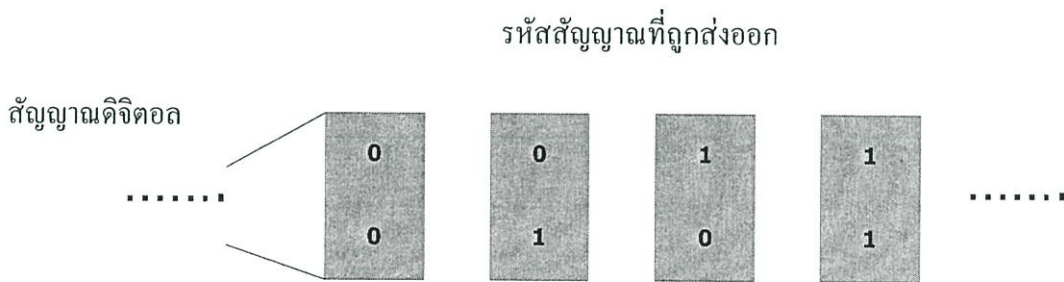
นอกจากนี้ ยังมีเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณดิจิทัลอีกหลายรูปแบบในแต่ละแบบก็จะมีข้อดีที่แตกต่างกันไป การมอดูเลตที่นิยมใช้กันนอกจากที่ได้กล่าวไปแล้ว เช่น Quadrature Phase-shift Keying: QPSK, Minimum-shift Keying: MSK เป็นต้น ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะ QPSK ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในแบบจำลองเพิ่มเติมดังนี้

- การมอดูเลตทางเฟสแบบควอดเรเจอร์ (Quadrature Phase-shift Keying: QPSK)

การมอดูเลตทางเฟสแบบควอดเรเจอร์ หรือที่ทราบกันในชื่อของ 4-PSK สามารถแสดงได้ 2 วิธี วิธีแรกเป็นการส่งสัญญาณดิจิทัล 2 บิต (dibit) ในเวลาเดียวกัน และจะมีการรวมเป็น 4 ตัวด้วยกันคือ 00, 01, 10 และ 11 โดยแต่ละตัวที่ประกอบด้วย 2 บิต เรียกว่า สัญลักษณ์ (symbol) เทียบเท่ากับเฟส



(ก)



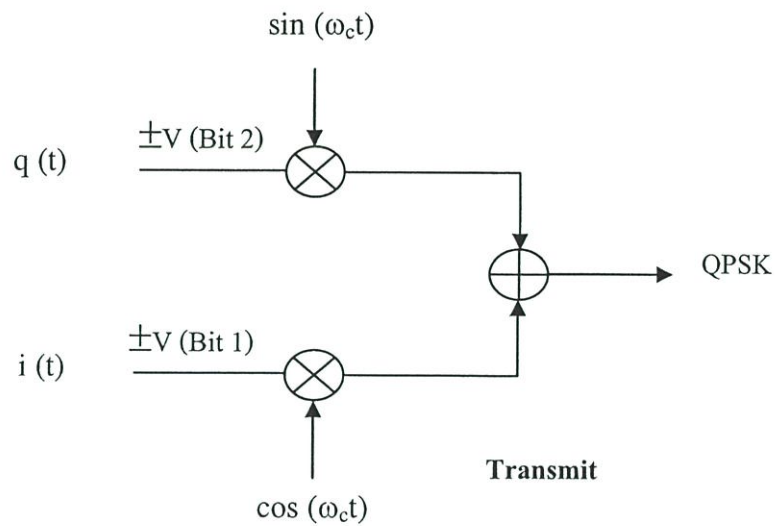
(ข)

รูปที่ 2.16 สัญลักษณ์ QPSK

(ก) แผนภาพ constellation สัญลักษณ์ QPSK

(ข) รหัส 4 คู่ของสัญลักษณ์ QPSK

เพื่อความเข้าใจการมอดูเลตทางเฟสแบบควอดเรเจอร์ QPSK สามารถอธิบายได้ด้วยการมอดูเลตเวกเตอร์ ด้วยแผนภาพดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แผนภาพการมอดูเลตทางเฟสแบบควอดเรเจอร์

เมื่อ $i(t)$ คือ สัญญาณอินเฟสที่มอดูเลต $\cos(\omega_c t)$
 $q(t)$ คือ สัญญาณควอดเรเจอร์เฟสที่มอดูเลต $\sin(\omega_c t)$

ส่วนวิธีที่สองของการมอดูเลตทางเฟสแบบนี้เกิดจากการสร้างสัญญาณ BPSK ขึ้นมาสองชุด โดยต้องตระหนักเสมอว่าสัญญาณทั้งสองชุด คือ $\cos(\omega_c t)$ และ $\sin(\omega_c t)$ ต้องมีคุณสมบัติตั้งฉาก (orthogonality) กันในคาบ

$$\int_0^{T_c} \cos \omega_c t \times \sin \omega_c t = 0 \quad (2.1)$$

โดยที่ T_c คือ คาบของสัญญาณคลื่นพาห้
 ω_c คือ ความถี่เชิงมุมของคลื่นพาห้
 $\omega_c = 2\pi f_c$

$$f_c = \frac{1}{T_c} \quad (2.2)$$

กรณีการมอดูเลตทางเฟสแบบควอดเจอร์ (QPSK) $M = 4$ จะมี 4 ค่าที่เป็นไปได้แต่ละค่าเรียกว่า dibit เช่น dibit 00, 10, 11 และ 01 ซึ่งบิตข้อมูลจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า จัดให้อยู่ในรูปสมการ QPSK คือ

$$S(t) = A_c \cos \left[\omega_c t + \phi(t) \right] \quad (2.3)$$

โดยที่ Phase $\phi(t)$ มีค่าดังนี้

$$\phi(t) = \begin{cases} -\frac{3\pi}{4}, & \text{dibit00} \\ -\frac{\pi}{4}, & \text{dibit10} \\ \frac{\pi}{4}, & \text{dibit11} \\ \frac{3\pi}{4}, & \text{dibit01} \end{cases}$$

$$S(t) = A_c \cos[\phi(t)] \cos(2\pi f_c t) - A_c \sin[\phi(t)] \sin(2\pi f_c t) \quad (2.4)$$

$A_c \cos[\phi(t)]$ คือ ส่วน In-phase

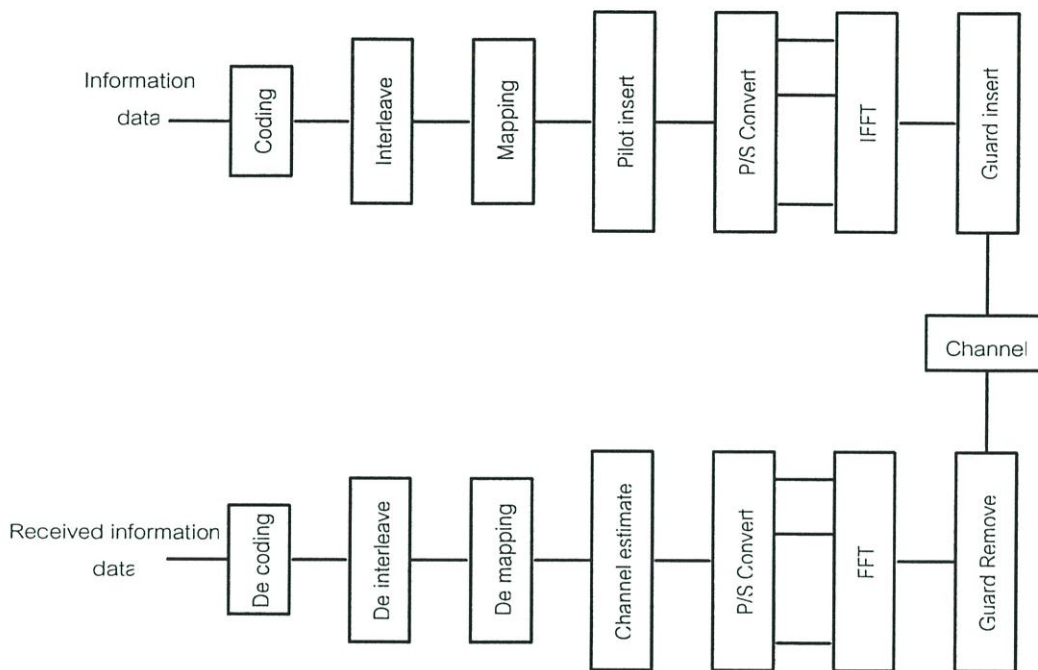
$A_c \sin[\phi(t)]$ คือ ส่วน quadrature phase

โดยการมอดูเลตแบบนี้ จะแปลงข้อมูลเป็นแบบขนาน ซึ่งจะใช้ตัวเลื่อนเฟส (phase shifter)

2.7 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉาก

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉาก (Orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ชนิดหนึ่งที่ได้ความนิยมเป็นอย่างมากในระบบการสื่อสารบนสายส่งกำลังไฟฟ้าภายในบ้าน (Power line communications) [1] OFDM ถูกพัฒนาขึ้นโดยการแบ่งย่อยอัตราการส่งข้อมูลที่สูงๆ ให้เหลืออัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำลงเพื่อส่งเข้าไปในสายส่งกำลังไฟฟ้าได้ (Power line) และส่งบิตข้อมูลจากที่แบ่งย่อยออกมาไปพร้อมๆ กันในรูปแบบขนานคลื่นพาห่อย่อยที่ตั้งฉาก (Orthogonal subcarriers) และจากคุณสมบัติของการตั้งฉากซึ่งกันและกันนี้ทำให้ไม่เกิดการรบกวนซึ่งกันและกันของคลื่นพาห่อย่อยอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามในสภาวะแวดล้อม

จริงที่เครื่องรับ ซึ่งรับคลื่นจากหลายทิศทาง (Multi-path) หรือเนื่องจากความไม่คงที่ของช่องสัญญาณ (Channel non-stationary) จึงอาจทำให้เกิดการแทรกสอด (Interference) และการแทรกสอดระหว่างคลื่นพาห้ (Inter-carrier interference: ICI) ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปแผนผังการทำงานได้ดังด้านล่างนี้



รูปที่ 2.18 แผนผังการทำงานโดยทั่วไปของระบบ OFDM

จากรูปที่ 2.18 สามารถกล่าวสรุปการทำงานโดยสังเขปได้ดังนี้ เมื่อบิตข้อมูลถูกส่งไปบนหนึ่งคลื่นพาห้ย่อย ทำให้ได้หนึ่งบิตจะมีแถบความถี่ร่วมในของตัวเอง (Coherence bandwidth) ซึ่งถ้าหากแถบความถี่ของการส่งสัญญาณของบิตข้อมูล น้อยกว่าแถบความถี่ร่วมในของช่องสัญญาณ จะทำให้ไม่เกิดการแทรกสอดซึ่งกันและกันของสัญลักษณ์ (Inter-symbol Interference :ISI) จึงแสดงให้เห็นว่าถ้าเราเลือกแถบความถี่คลื่นพาห้ย่อยให้เพียงพอกับบิตข้อมูล เราจะได้อัตราการส่งข้อมูลขนานที่ต่ำมากๆ เมื่อเทียบกับคลื่นพาห้ย่อย ดังนั้นจึงไม่เกิด ISI ขึ้น และเพื่อป้องกันการเกิด ISI อย่างสมบูรณ์ ระบบ OFDM ได้เพิ่มเวลาป้องกัน (Guard time interval) เข้าไปกับสัญลักษณ์ ข้อมูล (OFDM symbol) และต้องมีคาบเวลามากกว่ากำหนดช่วงเวลาแพร่ (Delay spread) ของช่องสัญญาณทั้งหมด

การแบ่งบิตข้อมูลของแต่ละคลื่นพาห้ย่อยๆ นั้นสามารถทำได้โดยวิธีการของ การแปลงผกผันฟูริเยร์แบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform: IFFT) และที่เครื่องรับของแต่ละคลื่นพาห้ย่อยๆ ทำการแปลงกลับโดยใช้วิธี การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) ซึ่งในการสื่อสาร

ในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าและใช้วิธีการตรวจจับแบบร่วมในนี้ (Coherence detection) จำเป็นต้อง
ใช้วิธีการของการประมาณค่าช่องสัญญาณ (Channel estimate) เพื่อกำหนดค่าของขนาด
(Amplitude) และ เฟส (Phase) ซึ่งช่วยในการตีความคุณลักษณะสัญญาณกลับคืนมาอย่างถูกต้องจาก
คลื่นพหุย่อยที่ส่งมาจากต้นทางด้านเครื่องส่ง

2.7.1 คุณลักษณะของสัญญาณ OFDM

สัญญาณของ OFDM ประกอบไปด้วย N คลื่นพหุตั้งฉากย่อย (Orthogonal subcarriers)
ถูกมอดูเลตด้วย N ข้อมูลขนาน ซึ่งแต่ละเบสแบนด์ (Baseband) คลื่นพหุย่อยมีค่าเป็นดังนี้

$$\phi_k(t) = e^{j2\pi f_k t} \quad (2.5)$$

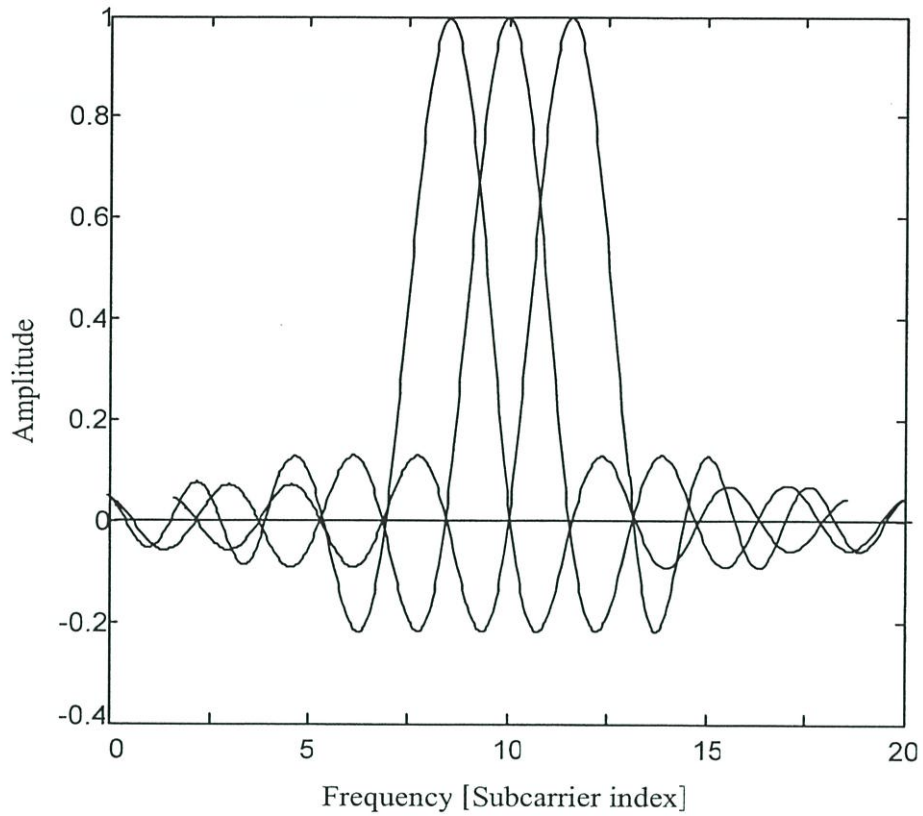
ที่ f_k คือความถี่ของคลื่นพหุย่อยที่ k^{th} และจะได้สัญญาณที่ถูกมอดูเลตด้วย N
คลื่นพหุย่อยมีค่าเป็นดังนี้

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \phi_k(t) \quad , \quad 0 < t < NT \quad (2.6)$$

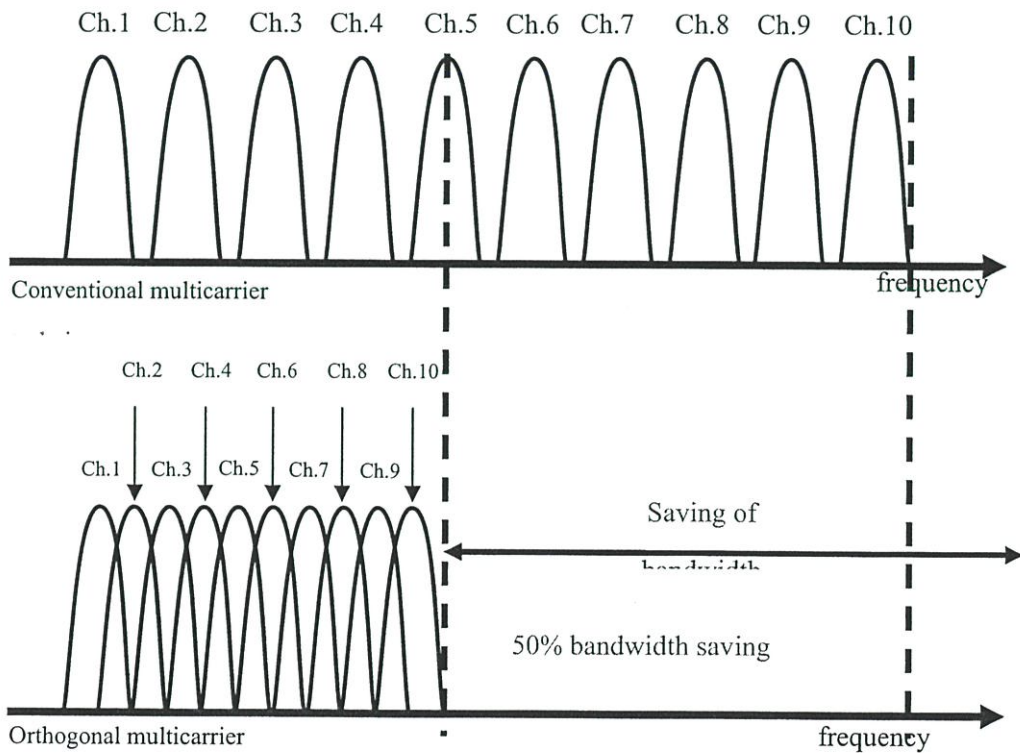
ที่ x_k คือ k^{th} สัญลักษณ์ข้อมูลเชิงซ้อน (Complex Data) และ NT คือความยาว
ทั้งหมดของสัญญาณ OFDM ทำให้

$$f_k = \frac{k}{NT} \quad (2.7)$$

และทำให้คลื่นพหุย่อย $\phi_k(t)$ มีการตั้งฉากบนช่วง $0 < t < NT$ และยังทำให้พบอีกว่า เป็นการ
แบ่งสัญญาณข้อมูลในเชิงความถี่ที่มีค่าซ้อนทับกันของคลื่นพหุย่อยแต่ละคลื่นพหุย่อย และทำ
ให้การใช้ช่องสัญญาณที่คุ้มค่าอีกด้วย ดังรูปด้านล่างที่ 2.18 และ 2.19



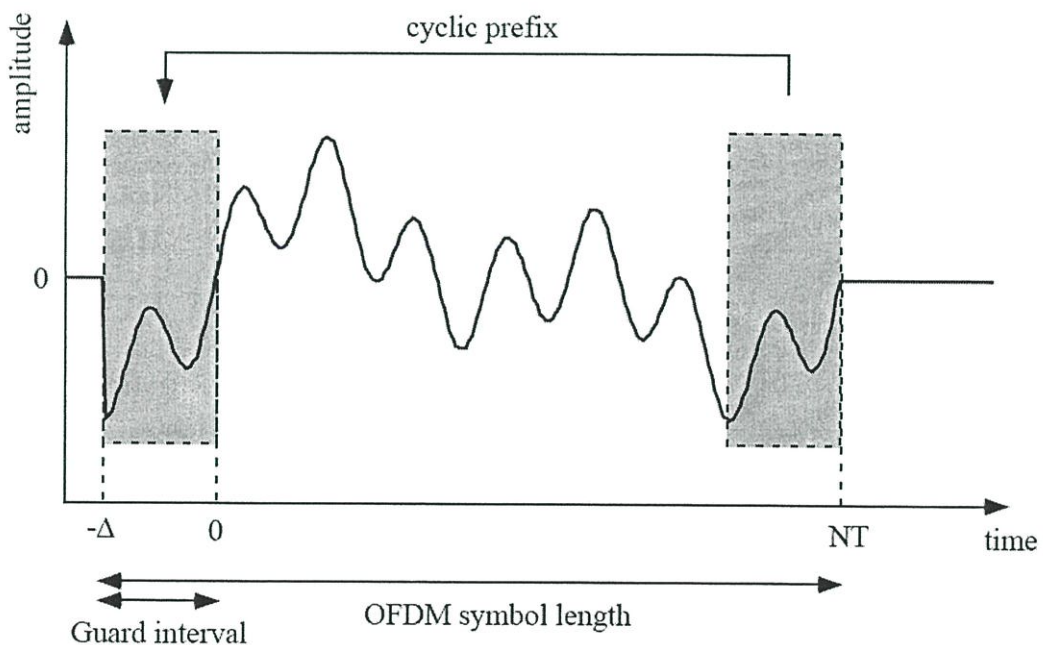
รูปที่ 2.19 การซ้อนทับกันของคลื่นพาห่อย่อยของสัญญาณ OFDM



รูปที่ 2.20 การใช้ช่องสัญญาณอย่างคุ้มค่าของระบบ OFDM

2.7.2 การเพิ่ม cyclic prefix บนการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ตั้งฉาก

ความยาก 2 ประการของการส่งข้อมูลเมื่อสัญญาณ OFDM ที่ถูกมอดูเลตด้วย N คลื่นพาห่อย่อยนาน (จากสมการที่ (2.6)) ไปบนช่องสัญญาณที่มีการกระจาย (Dispersive) ออกของพัลส์บิตข้อมูล ที่ประกอบไปด้วยประการแรก คือ การกระจายออกของช่องสัญญาณ (Channel dispersion) ทำให้ความถี่ของสัญญาณลดน้อยลงระหว่างคลื่นพาห่อย่อย จึงทำให้เกิดการแทรกสอดคลื่นพาห่อย่อยซึ่งกันและกัน (Inter-carrier interference: ICI) และอีกประการหนึ่งเกิดจากเหตุการณ์การส่งสัญลักษณ์ OFDM พร้อมๆ กันหลายสัญลักษณ์ทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ขึ้น (Intersymbol interference: ISI) ระหว่างสัญลักษณ์ OFDM ด้วยกันเอง การแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการเพิ่มช่วงเวลาป้องกัน (Guard period) ระหว่าง OFDM สัญญาณลักษณะนี้อาจแก้ปัญหาด้านของ ISI ได้แต่ยังไม่สามารถแก้ปัญหาของ ICI ได้ 100% ดังนั้นการรักษาการตั้งฉากซึ่งกันและกันของสัญญาณข้อมูลแทรกสอดซึ่งกันและกันเอง สามารถแก้ไขได้ด้วยการเพิ่ม cyclic prefix ซึ่งถูกคิดค้นโดย Peled และ Ruiz [2]



รูปที่ 2.21 รูปแบบการเพิ่ม cyclic prefix เข้าไปในสัญลักษณ์ OFDM

จากรูปที่ 2.20 ความยาวทั้งหมดของสัญลักษณ์ OFDM (OFDM symbol) จะถูกเพิ่มด้วย Cyclic prefix เข้าไปทางหัวและท้ายของสัญลักษณ์ OFDM ดังนั้นจากสมการที่ (2.6) จะได้สัญญาณใหม่บนช่วงเวลา Δ ดังนี้

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{j2\pi f_k t} \quad , \quad -\Delta < t < NT \quad (2.8)$$

จากนั้นสัญญาณจากสมการที่ (2.8) จะถูกส่งผ่านเข้าไปในช่องสัญญาณ ซึ่งช่องสัญญาณนี้มีผลตอบสนองพัลส์จำกัด (Finite-length impulse response) อยู่ในช่วงของ $[0, \Delta_h]$ และถ้าคาบเวลาของ cyclic prefix ที่ $\Delta > \Delta_h$ ที่เครื่องรับสามารถหาค่าบนช่วง $[0, NT]$ เมื่อไม่คำนึงถึงสัญญาณรบกวนได้ดังนี้

$$r(t) = s(t) * h(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} H_k x_k e^{j2\pi f_k t} \quad , \quad 0 < t < NT \quad (2.9)$$

ที่

$$H_k = \int_0^{\Delta_h} h(\tau) e^{j2\pi f_k \tau} d\tau \quad (2.10)$$

สมการที่ (2.10) คือการแปลงฟูรีเยร์ ของ $h(\tau)$ ที่ความถี่ f_k ซึ่งภายในช่วงเวลานี้สัญญาณที่รับเข้ามาจะเหมือนกับสัญญาณที่ส่งมายกเว้นเมื่อ $H_k x_k$ ที่ถูกมอดูเลตที่ k^{th} คลื่นพาห่อย่อยแทนด้วยแค่ x_k และจากสมการที่ (2.8)-(2.11) นี้ทำให้ cyclic prefix สามารถป้องกันการไม่ตั้งฉากของคลื่นพาห่อย่อยได้นั่นเอง

$$y_k = H_k x_k, \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.9) การดีมอดูเลตสามารถทำได้โดยการใช้การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (FFT) บนช่วง $[0, NT]$ และไม่สนใจสัญญาณที่รับได้ในช่วงเวลา $0 < t < NT$ และสามารถแทนค่าใหม่ได้ดังสมการที่ (2.11) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการนำ cyclic prefix มาใช้ทำให้ต้องใช้กำลังงานในการส่งข้อมูลมากขึ้น จึงสามารถหาค่ากำลังงานสูญเสียได้ดังสมการที่ (2.12)

$$E_{loss} = \frac{NT}{NT + \Delta} \quad (2.12)$$

สมการที่ (2.12) ยังหาค่าของอัตราการลดบิตข้อมูล นั่นคือเมื่อแต่ละคลื่นพาห่อย่อยสามารถส่ง b บิต จะได้อัตราบิตข้อมูลทั้งหมดของระบบ OFDM เมื่อนำ cyclic prefix มาใช้งานได้ดังนี้

$$BitRate_{OFDM} = \frac{Nb}{NT + \Delta}, \quad bps \quad (2.13)$$

และเมื่อไม่นำเอา cyclic prefix มาใช้งาน จะได้อัตราบิตข้อมูลทั้งหมดของระบบ OFDM เป็น

$$BitRate_{OFDM_no} = \frac{b}{T}, \quad bps \quad (2.14)$$

2.7.3 การประมาณค่าช่องสัญญาณ (Channel estimation)

โดยมากแล้วผลตอบสนองอิมพัลส์ช่องสัญญาณ (Channel impulse response: CIR) ถูกประมาณด้วยลำดับของ training ที่ทราบอยู่แล้ว ซึ่งถูกส่งไปบนทุกๆ สัญลักษณ์ OFDM ดังนั้นที่ภาครับสัญญาณสามารถใช้ลำดับของ training ที่ทราบอยู่แล้วนี้เพื่อประมาณค่า CIR ได้สำหรับทุกๆ สัญลักษณ์ OFDM ที่ส่งมาได้

ระบบ OFDM มีการมอดูเลตด้วยคลื่นพาห่อย่อยที่แตกต่างกันสองรูปแบบ คืออาจถูกเข้ารหัสที่แตกต่างกันจากสัญญาณ OFDM หนึ่งไปสัญญาณข้างเคียงในคลื่นพาห่อย่อยอื่นๆ หรืออีกรูปแบบหนึ่งคือถูกเข้ารหัสจากสัญญาณ OFDM ภายในคลื่นพาห่อย่อยข้างเคียงในสัญญาณ OFDM เดียวกัน และจากสมการที่ (2.11) เมื่อในสภาวะแวดล้อมการจางหายของสัญญาณ (Fading channel environment) บวกกับสัญญาณรบกวน n ทำให้ที่ภาครับสัญญาณสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$y = Xh + n \quad (2.15)$$

X คือเมตริกทแยงมุม (Diagonal matrix) ที่ประกอบไปด้วยสัญญาณที่ทางด้านภาคส่งออก และเวกเตอร์ y ได้จากการทำการแปลงผกผันฟูริเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier transform: DFT) ที่ภาครับ ดังนั้นจะได้การประมาณค่าช่องสัญญาณด้วยวิธีการ Least-squares (LS) ดังนี้

$$\hat{h}_{LS} = X^{-1} y = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \dots & y_{N-1} \\ x_0 & x_1 & & x_{N-1} \end{bmatrix}^T \quad (2.16)$$

ส่วนการประมาณค่าของสัญญาณค่าของสัญญาณด้วยวิธีการ Minimum mean-squared error (MMSE) สามารถหาค่าได้เป็น

$$\hat{h}_{MMSE} = A \hat{h}_{LS} \quad (2.17)$$

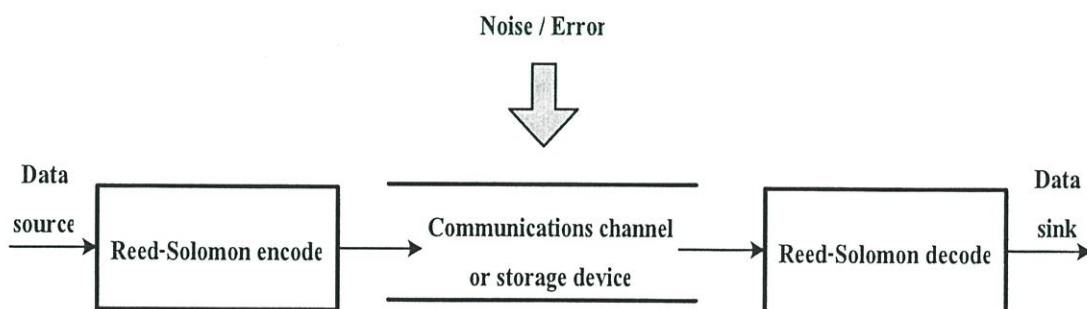
ที่

$$A = R_{hh}^{-1} R_{hh}^{-1} R_{hh}^{-1} = R_{hh} (R_{hh} + \sigma_n^2 (XX^H)^{-1})^{-1} \quad (2.18)$$

และ $R_{hh} = E\{hh^H\}$ คือเมตริกซ์การทำอัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation) ของช่องสัญญาณ ซึ่งประกอบไปด้วยเมตริกของการลดทอนบนช่องสัญญาณบนคลื่นพาห่อย่อย ส่วน $R_{hh_{LS}}$ คือเมตริกซ์สหสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนบนช่องสัญญาณและการประมาณค่าของสัญญาณด้วยวิธี LS

2.8 รหัสรีดโซโลมอน (Reed Solomon: RS codes)

รหัสรีดโซโลมอน เป็นรหัสบล็อกเชิงเส้นประเภทหนึ่ง ที่ใช้กันกว้างขวางในการสื่อสารดิจิทัล โดยการเข้ารหัสแบบนี้จะมีการเพิ่มบิต (redundant bits) เพื่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวนขณะส่งผ่านข้อมูลสามารถแก้ไขข้อมูลที่ผิดพลาดกลับมาเหมือนกับข้อมูลที่ส่ง



รูปที่ 2.22 แผนภาพแสดงตัวอย่างประเภทของระบบ

2.8.1 คุณสมบัติของรหัสรีดโซโลมอน (Property of Reed Solomon Codes)

เนื่องจากรหัสรีดโซโลมอนถูกจัดว่าเป็นกลุ่มย่อยเฉพาะหรือส่วนหนึ่งของรหัสรหัสโบเซ-โชคสุริ-ฮ็อกเค็งเฮม (Bose – Chaudhuri – Hocqenghem: BCH) แบบที่ไม่ใช่ไบนารี (Non-binary BCH) ดังนั้น การระบุถึงชุดของรหัสรีดโซโลมอนจึงทำได้เหมือนกับรหัสบล็อกทั่วไป คือ เขียนอยู่ในรูปของ RS (n, k) โดย k เป็นเลขที่แสดงถึงจำนวนสัญลักษณ์ของข้อมูล (Data Symbol) ที่จะนำไปเข้ารหัสแต่ละครั้ง และ n เป็นจำนวนสัญลักษณ์ที่ได้จากหลังการเข้ารหัสแล้ว (Codeword Symbol) ทั้งนี้สัญลักษณ์หนึ่งประกอบด้วย s บิต (number of bits per symbol) รหัสรีดโซโลมอนจึงมีขีดความสามารถในการแก้ไขสัญลักษณ์ที่ผิดพลาดได้มากถึง t สัญลักษณ์ [3-4] โดยที่

$$2t = n - k \quad (2.19)$$

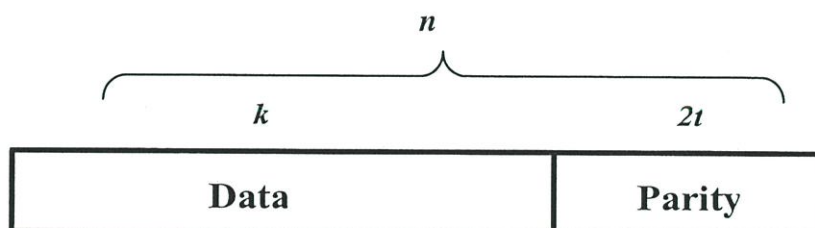
เมื่อ

$$2t = \text{Parity Symbol}$$

$$n = \text{Codeword Symbol}$$

$$k = \text{Data Symbol}$$

จากสมการ (2) แสดงด้วยแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งทราบกันว่า รหัสเป็นระบบ (Systematic Code) เพราะข้อมูลอยู่ทางด้านซ้ายไม่มีการเปลี่ยนแปลง และมีการเติมพาริตีเพิ่มเข้ามา



รูปที่ 2.23 ข้อมูลที่ผ่านการเข้ารหัสรีดโซโลมอน

ขนาดของสัญลักษณ์ s จะเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความยาวสูงสุดของข้อมูลที่ผ่านการเข้ารหัสรีดโซโลมอน (maximum codeword length : n) ดังสมการที่ (2.20)

$$n = 2^s - 1 \quad (2.20)$$

เมื่อ

n = Maximum codeword length

s = Number of bits per symbol

กระบวนการของรหัสรีดโซโลมอนในการแก้ไขความผิดพลาด (Correction error) และ ลบ (erasures) โดยการลบจะเกิดขึ้นเมื่อทราบตำแหน่งของสัญลักษณ์ที่ผิดพลาด ตัวถอดรหัสสามารถแก้ไขความผิดพลาด t หรือ ลบความผิดพลาดถึง $2t$ ข้อมูลที่ลบจะถูกจัดการด้วยตัวคีมอดูเลตในระบบการสื่อสารดิจิทัล ตัวอย่างเช่น ตัวคีมอดูเลตจะทำการ "flags" สัญลักษณ์ฝั่งรับว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้น เมื่อชุดข้อมูลถูกนำมาถอดรหัส จะปรากฏผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ 3 อย่าง คือ

- ถ้า $2s + r < 2t$ (s errors, r erasures) แล้วชุดข้อมูลที่ส่งมาจะสามารถแก้ไขและนำชุดข้อมูลนั้นกลับมาได้เหมือนกับชุดข้อมูลเดิมที่ส่งเสมอ

- ตัวถอดรหัสจะตรวจจับความผิดพลาดโดยไม่สามารถนำชุดข้อมูลนั้นกลับมาให้เหมือนชุดข้อมูลเดิมที่ส่งไม่ได้ และแสดงชุดข้อมูลตามที่รับได้

- ตัวถอดรหัสไม่สามารถถอดรหัสและนำชุดข้อมูลนั้นกลับมาให้เหมือนชุดข้อมูลเดิมที่ส่งได้และไม่พบชุดข้อมูลนั้น

ความน่าจะเป็นของผลลัพธ์ทั้ง 3 อย่างขึ้นกับรหัสรีดโซโลมอน จำนวนและการกระจายตัวของความผิดพลาด

2.8.2 สถาปัตยกรรมสำหรับการเข้ารหัสและถอดรหัสของรหัสรีดโซโลมอน

(Architectures for encoding and decoding Reed Solomon Codes)

การเข้ารหัสและถอดรหัสรีดโซโลมอนจำเป็นต้องอาศัยคณิตศาสตร์สาขาหนึ่งที่เรียกว่าฟิลด์กาลัว (Galois field) หรือ ฟิลด์ไฟไนท์ (Finite field) ซึ่งความยาวของรหัส n จะขึ้นอยู่กับขนาดของฟิลด์กาลัวที่ใช้ในการนิยามสัญลักษณ์ โดยความยาวของรหัสที่มากขึ้นต้องใช้ฟิลด์กาลัวที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

2.8.2.1 พหุนามตัวกำเนิด (Generator Polynomial)

การเลือกพหุนามตัวกำเนิดเพื่อสร้างชุดรหัสรีดโซโลมอนสามารถทำได้โดยง่าย ให้เลือกจำนวน $2t$ ตัว ที่เป็นค่าตั้งต้น α^i ไปถึง α^{i+2t-1} ในการเลือกจุดตั้งต้น i สามารถทำได้โดยอิสระไม่มีข้อบังคับใดๆ รูปแบบทั่วไปของพหุนามตัวกำเนิดแสดงด้วยสมการ (2.21)

$$g(x) = (x - \alpha^i)(x - \alpha^{i+1}) \dots (x - \alpha^{i+2t}) \quad (2.21)$$

2.8.2.2 การเข้ารหัส (Encoding)

การเข้ารหัสรีดโซโลมอนเป็นกระบวนการที่จัดว่าไม่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการถอดรหัส โดยหลักการแล้วการเข้ารหัส คือ การนำสัญลักษณ์ข้อมูล $m(x)$ ที่จะเข้ารหัสไปแปลงให้ได้เป็นคำรหัส $c(x)$ สามารถเขียนในรูปของพหุนามได้เป็น

$$c(x) = p(x) + x^{n-k} m(x) \quad (2.22)$$

และกรณีพิจารณาคำรหัสที่มีพหุนามตัวกำเนิด $g(x)$ เป็นตัวประกอบ

$$c(x) = a(x)g(x) \quad (2.23)$$

ฉะนั้น การเข้ารหัสรีดโซโลมอน คือการหาค่าของพหุนาม $p(x)$ ที่ทำให้เงื่อนไขตามสมการที่ (2.23) เป็นจริง วิธีการทั่วไปคือนำพหุนาม $x^{n-k} m(x)$ ไปหารด้วยพหุนาม $g(x)$ ผลที่ได้จากการหารประกอบด้วยสองส่วน คือ ค่าที่ได้จากการหาร $a(x)$ และเศษที่เหลือจากการหาร $b(x)$ แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (2.24)

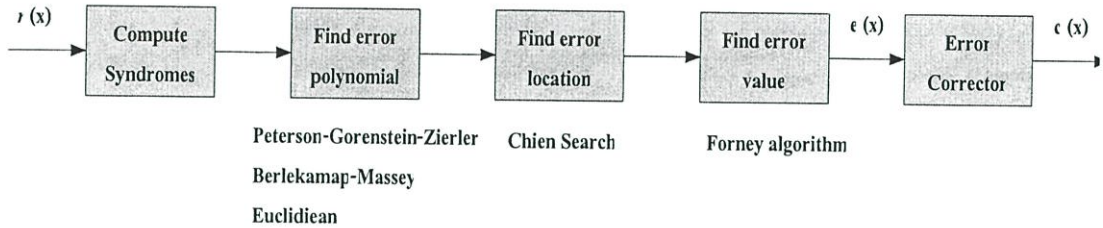
$$x^{n-k} m(x) = a(x)g(x) + b(x) \quad (2.24)$$

แทนความสัมพันธ์ที่ได้นี้ในสมการที่ (2.22) จะได้ผลดังสมการ (2.25)

$$c(x) = p(x) + a(x)g(x) + b(x) \quad (2.25)$$

2.8.2.3 การถอดรหัส (Decoding)

การถอดรหัสรีดโซโลมอน เพื่อตรวจแก้ความผิดพลาดสัญลักษณ์ประกอบด้วยกระบวนการทำงานหลายขั้นตอน สามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.24 โครงสร้างโดยรวมของกระบวนการถอดรหัสรีดโซโลมอน

พบว่าในขั้นแรกนำพหุนามชุดสัญลักษณ์ที่รับได้ $r(x)$ ไปใช้คำนวณหาค่าซินโดม เพื่อหาพหุนามระบุตำแหน่งความผิดพลาด $\sigma(x)$ เป็นลำดับถัดไป ขั้นตอนนี้มีอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณค่าพหุนามดังกล่าวอยู่หลายวิธี เช่น อัลกอริทึม Peterson-Gorenstein-Zierler อัลกอริทึม Berlekamp-Massey และอัลกอริทึม Euclidian เป็นต้น เมื่อได้พหุนาม $\sigma(x)$ แล้วหารากของพหุนามนี้โดยอาศัยการหารากตามแบบของ Chien เพื่อระบุตำแหน่งของสัญลักษณ์ที่เกิดความผิดพลาด จากนั้นจึงคำนวณหาพหุนามระบุค่าความผิดพลาด $\omega(x)$ ทำให้ทราบถึงรูปแบบของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดสัญลักษณ์ และนำไปใช้ในการแก้ไขกับชุดสัญลักษณ์ที่รับได้ให้มีความถูกต้อง สามารถแสดงความสัมพันธ์ด้วยสมการดังนี้

$$r(x) = c(x)e(x) \quad (2.27)$$

บทที่ 3

สายส่งกำลังไฟฟ้า

สายส่งกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน มีผู้ผลิตและจำหน่ายมากมายหลายชนิด แต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ทั้งทางด้านโครงสร้างของสาย ชนิดของตัวนำ ชนิดของฉนวน สภาวะแวดล้อมการนำไปใช้งาน โดยยึดถือกฎเกณฑ์ของการไฟฟ้านครหลวงเป็นเกณฑ์สำหรับสภาวะแวดล้อมการใช้งาน ส่วนมาตรฐานของโครงสร้างสายจะใช้มาตรฐาน มอก. 11-2531 เป็นเกณฑ์ เพื่อการผลิตและการนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม

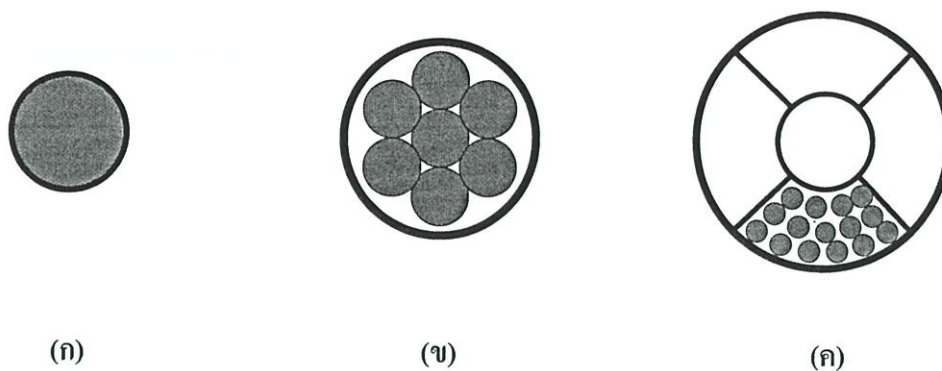
3.1 โครงสร้างของสายส่งกำลังไฟฟ้า

สายส่งกำลังไฟฟ้า มีหน้าที่สำหรับส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้า หรือสัญญาณไฟฟ้าไหลผ่านตามความยาวของสายส่งจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ สายส่งกำลังไฟฟ้าจึงถูกจัดเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ประกอบไปด้วย [5]

3.1.1 ตัวนำ (Conductor)

ตัวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้ากำลังต้องทำจากวัสดุที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มีความนำไฟฟ้าสูงนั่นเอง ลักษณะของตัวนำอาจจะเป็นตัวนำเดี่ยวนั้น (Solid) หรือตัวนำหลายเส้นตีเกลียว (Strand) ซึ่งประกอบไปด้วยตัวนำเล็กๆ ตีเป็นเกลียว โดยทั่วไปมักนิยมทำจากทองแดงและอลูมิเนียม มีลักษณะกลม ถ้าตัวนำมีขนาดพื้นที่หน้าตัดมากกว่า 1000 ตารางมิลลิเมตร (mm^2) ขึ้นไป สายตัวนำกลมจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนของวงกลม เพื่อลดปรากฏการณ์ทางผิว (Skin effect)

- ทองแดง เป็นโลหะที่มีความนำไฟฟ้าสูงมาก แข็งแรง เหนียว และทนต่อการกัดกร่อนได้ดี เหมาะกับการใช้งานทั่วไป โดยเฉพาะงานในอาคาร แต่มีข้อเสียคือน้ำหนักมาก ราคาสูง จึงไม่เหมาะกับงานด้านแรงดันสูง
- อลูมิเนียม เป็นโลหะที่มีความนำไฟฟ้าสูงรองจากทองแดง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับที่กระแสเท่ากัน พบว่าอลูมิเนียมจะมีน้ำหนักเบาและราคาถูกกว่าจึงเหมาะกับการใช้งานภายนอกอาคารและงานด้านแรงดันสูง แต่มีข้อเสียเช่นกันคือเชื่อมต่อยาก



รูปที่ 3.1 โครงสร้างและลักษณะพื้นที่หน้าตัดของสายไฟฟ้ากำลัง

(ก) ตัวนำเส้นเดียวแบบกลมตัน

(ข) ตัวนำแบบกลมหลายเส้น

(ค) ตัวนำแบบกลมประกอบด้วยส่วนของวงกลมมีรูกลวง

3.1.2 ฉนวน (Insulator)

ฉนวน ทำหน้าที่เป็นตัวห่อหุ้มตัวนำ เพื่อป้องกันการสัมผัสโดยตรงระหว่างตัวนำกับฉนวน หรือระหว่างตัวนำกับพื้นดิน ทั้งยังป้องกันตัวนำจากผลกระทบทางเคมีและทางกลต่างๆ ด้วย ขณะที่ตัวนำนำกระแสไฟฟ้าจะเกิดพลังงานสูญเสียในรูปของความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทไปยังเนื้อฉนวน ซึ่งความสามารถในการทนความร้อนของฉนวนจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการทนความร้อนของสายส่งไฟฟ้า ดังนั้น การเลือกวัสดุที่ใช้ทำฉนวนขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้งาน ระดับแรงดันของระบบ และสภาพแวดล้อมที่ติดตั้ง โดยปัจจุบันวัสดุที่นิยมใช้เป็นฉนวน ได้แก่ Polyvinyl Chloride (PVC) และ Cross Linked Polyethylene (XLPE)

3.2 คุณลักษณะของสายส่งกำลังไฟฟ้า

3.2.1 ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current Resistance)

ความต้านทานกระแสสลับของสายส่งกำลังไฟฟ้า มาจากค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง อนุกรมต่างๆ ของตัวนำ ผลจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า สลับที่ไหลในตัวนำ ทำให้กระแสไฟฟ้ามีความหนาแน่นมากที่ผิวตัวนำและตรงแกนกลางตัวนำจะไม่มีกระแสไหลเลย โดยเฉพาะตัวนำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดมาก (> 185 ตารางมิลลิเมตร) จะเห็นได้ชัด ซึ่งปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า “ปรากฏการณ์ทางผิว (Skin effect)” นอกจากนี้ ลักษณะการติดตั้งสายส่งกำลังไฟฟ้าหลายๆ เส้น ที่มีระยะห่างระหว่างสายส่งกำลังไฟฟ้าแต่ละเส้นน้อย ทำให้

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่ข้างเคียงก็จะมีผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในตัวนำสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงเช่นกัน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์ความใกล้ชิด (Proximity effect)”

3.2.2 ความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance)

ความต้านทานฉนวน คือ ความต้านทานที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านไดอิเล็กทริกระหว่างอิเล็กโทรด 2 ขั้ว ขั้วหนึ่งคือ ตัวนำไฟฟ้าบนสายส่งกำลังไฟฟ้าเอง อีกขั้วหนึ่งทำให้เกิดความต้านทานฉนวนระหว่างตัวนำกับสายดิน เปลือกโลหะ เสื้อโลหะ หรือตัวนำข้างเคียง

3.2.3 ความเหนี่ยวนำ (Inductance)

ความเหนี่ยวนำ ของสายส่งกำลังไฟฟ้าขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ ระยะห่างระหว่างตัวนำ และลักษณะการตีเกลียว

3.3 ประเภทของสายส่งกำลังไฟฟ้า

ประเภทของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานกับสถานที่ปกติทั่วไป โดยไม่มีข้อจำกัดหรือข้อหวงห้ามพิเศษใดๆ ที่เป็นอันตรายต่อบุคคลทั่วไป จึงเหมาะสำหรับใช้งานกับอาคารบ้านเรือน โรงงาน อุตสาหกรรมในส่วนที่ไม่เป็นอันตราย เนื่องจากสารเคมี เปลวไฟ ความร้อน และความเสียงอื่นๆ ทำให้สายส่งกำลังไฟฟ้าประเภทนี้มีคุณสมบัติของฉนวนไม่เสื่อมตามสภาพแวดล้อมดังกล่าว โดยง่าย สามารถแบ่งสายส่งกำลังไฟฟ้าออกตามพิกัดแรงดันได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

3.3.1 สายไฟฟ้าแรงสูง (High voltage cable)

สายไฟฟ้ากำลัง สำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูงเป็นสายที่มีขนาดใหญ่ ลักษณะตัวนำเป็นเกลียว สามารถแบ่งย่อยออกได้ 2 ประเภท คือ

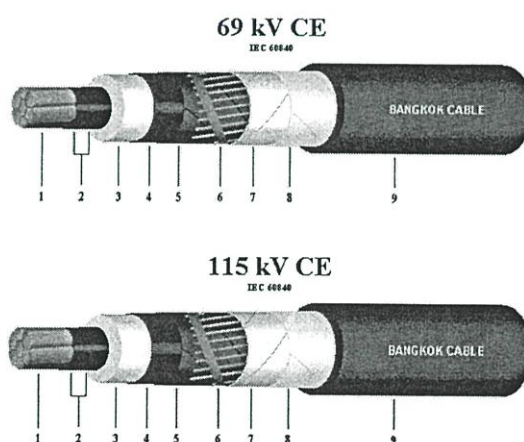
- **สายเปลือย (Bare Cable)** เป็นสายที่ไม่มีฉนวนหุ้มสาย ไม่เหมาะสำหรับใช้กับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำเนื่องจากไม่ปลอดภัย จึงนำสายชนิดนี้มาใช้กับงานระบบแรงดันสูงระดับ 11 kV ขึ้นไป สายเปลือยที่นิยมใช้ส่วนมากทำจากอลูมิเนียม เพราะมีน้ำหนักเบา และราคาถูก แต่สายอลูมิเนียมล้วนจะสามารถรับระดับแรงดันได้ต่ำ จึงมีการพัฒนาให้สามารถรับแรงดันได้สูงขึ้น โดยการเสริมแกนเหล็ก หรือใช้โลหะอื่นผสม สายเปลือยที่นิยมใช้งานได้แก่

- สายอลูมิเนียมผสมตะกั่วเคลือบ (ACC: Aluminum Alloy conductor)
- สายอลูมิเนียมผสม (AAAC: All Aluminums Alloy conductor)
- สายอลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR: Aluminum Conductor Steel Reinforced)

สายเปลือยทั้ง 3 ชนิด มีใช้งานทั่วไปในระบบส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสำหรับสาย ACC นั้นยังมีใช้งานในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงด้วย แต่ปัจจุบันทางการไฟฟ้าได้มีนโยบายที่จะยกเลิกใช้สายชนิดนี้แล้วเนื่องจากการลัดวงจรเนื่องจากสัตว์ และกิ่งไม้บ่อยครั้ง และได้หันมาใช้หุ้มฉนวนประเภท PIC และ SAC ที่จะกล่าวต่อไป

- **สายหุ้มฉนวน (Insulated Cable)** การติดตั้งสายไฟฟ้าแรงสูงผ่านบริเวณที่ผู้คนอาศัย เพื่อความปลอดภัยจึงต้องใช้สายส่งกำลังไฟฟ้าที่มีฉนวนหุ้ม เพราะช่วยลดการเกิดไฟฟ้าลัดวงจรจากสัตว์ หรือกิ่งไม้แตะถูกสายส่งกำลังไฟฟ้า ทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือสูงขึ้น โดยสายส่งไฟฟ้าแรงสูงหุ้มฉนวนที่นิยมใช้ได้แก่

- สาย Partial Insulated Cable (PIC)
- สาย Space Aerial Cable (SAC)
- สาย Preassembly Aerial Cable (PAC)
- สาย Cross-Linked Polyethylene (XLPE)



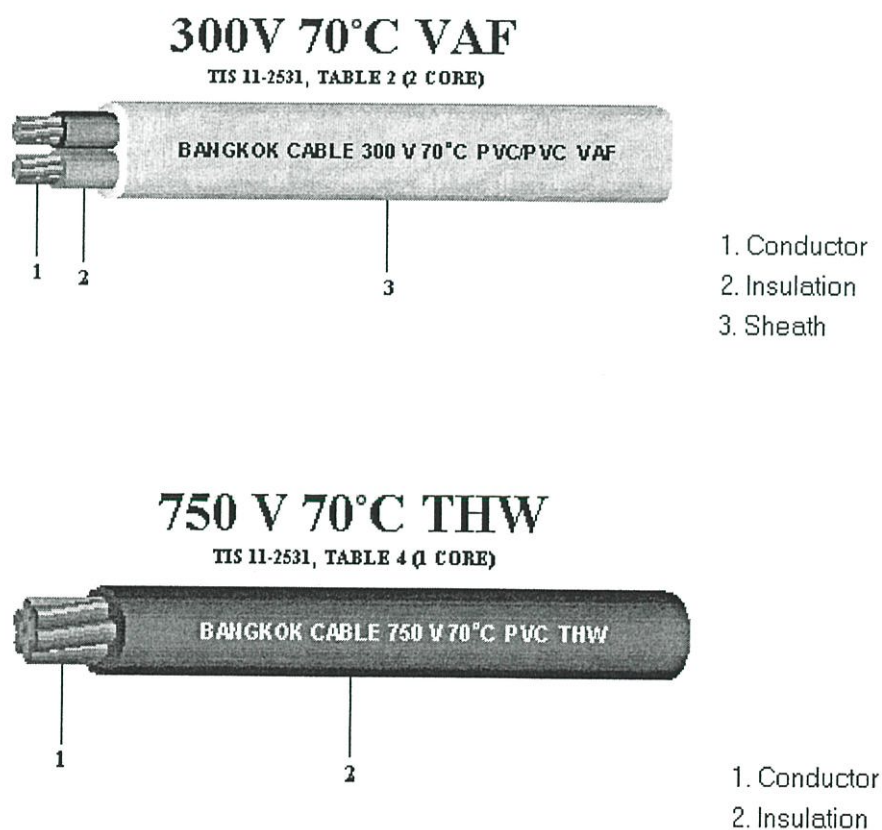
1. Conductor
2. Conductor screen
3. Insulation
4. Insulation screen
5. Water blocking tape
6. Metallic screen
7. Water blocking and Cushioning tape
8. Radial water barrier
9. Sheath

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างสายไฟฟ้ากำลังในระบบแรงดันสูงที่มีจำหน่าย

3.3.2 สายไฟฟ้าแรงต่ำ (Low voltage cable)

สายไฟฟ้ากำลัง สำหรับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ ไม่เกิน 750 โวลต์ มีลักษณะเป็นสายส่งกำลังไฟฟ้าหุ้มฉนวน โดยที่ตัวนำอาจจะใช้ทองแดง หรืออลูมิเนียม แต่ที่นิยมใช้สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงดันต่ำจะเป็นสายทองแดง สายไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ตัวนำจะมีลักษณะเป็นตัวนำเกลียว ส่วนสายไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดเล็ก ตัวนำจะมีลักษณะเป็นตัวนำเดี่ยว วัสดุฉนวนที่นิยมใช้กับสายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ได้แก่ Polyvinylchloride (PVC) และ Cross-Linked Polyethylene (XLPE)

สำหรับฉนวน PVC นั้นเดิมตาม มอก.11-2518 ได้แบ่งชนิดของฉนวน PVC ที่ใช้งานเป็น 2 ชนิด คือ ฉนวน PVC ธรรมดา มีอุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส และฉนวน Heat Resisting PVC มีอุณหภูมิไม่เกิน 75 องศาเซลเซียส แต่ในปัจจุบันตาม มอก. 11-2531 จะมีฉนวน PVC เพียงชนิดเดียวเท่านั้น คือ อุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างสายไฟฟ้ากำลังในระบบแรงดันต่ำที่มีจำหน่าย

3.4 ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า

3.4.1 ระบบสายส่งหลัก (Transmission Line)

พลังงานงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ผลิตได้จะถูกส่งออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังแหล่งผู้ใช้งาน โดยผ่านทาง สายส่งไฟฟ้า (Transmission Line) ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าส่งผ่านตั้งแต่ 115kV 230kV จนถึง 500kV ในปัจจุบันโดยระบบสายส่งจะมีพิกัดกำลังตั้งแต่ 100 จนถึง 4000 MVA ระบบสายส่งที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่ 2 ระบบ คือ ระบบเหนือดิน (overhead) และระบบใต้ดิน (underground) แต่ที่พบเห็นอยู่ทั่วไป จะเป็นระบบสายส่งเหนือดิน ซึ่งจะใช้เป็นระบบสายส่งที่มีระยะทางส่งไกลๆ มักจะยาวกว่า 100 กิโลเมตร โดยสายตัวนำที่ใช้จะเป็นสายแบบเปลือยไม่มีฉนวนหุ้มยึดอยู่กับเสาส่ง (tower) โดยใช้ลูกถ้วยฉนวนเป็นตัวยึด ดังนั้นระบบสายส่งแบบนี้จึงต้องมีการระวังและป้องกันผลกระทบจาก ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าค่อนข้างมาก และระบบไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกันโดยประสานกันเป็นโครงข่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่ ซึ่งต่อเชื่อมระบบสายส่งเข้าด้วยกันทั้งหมด (ties)

ตารางที่ 3.1 ระดับแรงดันไฟฟ้าของประเทศไทย [6]

ระดับชั้นของแรงดันไฟฟ้า	แรงดันระหว่างสาย
ต่ำ (Low Voltage)	220V, 380V
ปานกลาง (Medium Voltage)	11 kV, 12 kV, 22 kV, 24 kV, 33 kV, 69 kV
สูง (High Voltage)	115 kV, 132 kV, 230 kV
สูงพิเศษ (Extra high Voltage)	500 kV

เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตออกมาจากตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีระดับแรงดันไฟฟ้าไม่สูงมากนัก ซึ่งยังไม่เหมาะที่จะทำการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าด้วยระดับแรงดันขนาดนั้น ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังชนิดปรับเพิ่มแรงดัน (Step-up power transformer) จึงเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำ จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ส่งต่อไปยังระบบสายส่งที่ใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าสูง เพื่อให้กระแสที่ไหลในระบบสายส่งมีขนาดเล็กกว่าที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเดียวกัน ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดทั้งทางด้านพลังงานไฟฟ้าและราคา พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ถูกส่งผ่าน โดยระดับแรงดันไฟสูงนี้จะถูกส่งผ่าน โดยระยะทางไกลๆ ไปจนถึงสถานีไฟฟ้าหลัก (bulk station) และสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบสายส่ง (Transmission substation) ซึ่งจะทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้าลงมาเพื่อแยกส่งผ่านไปยังแหล่งผู้ใช้งานหลายทิศทาง โดยผ่านทางสายส่งไฟฟ้ารอง (Subtransmission line) ในหลายระดับแรงดันที่เหมาะสม

3.4.2 ระบบสายส่งรอง

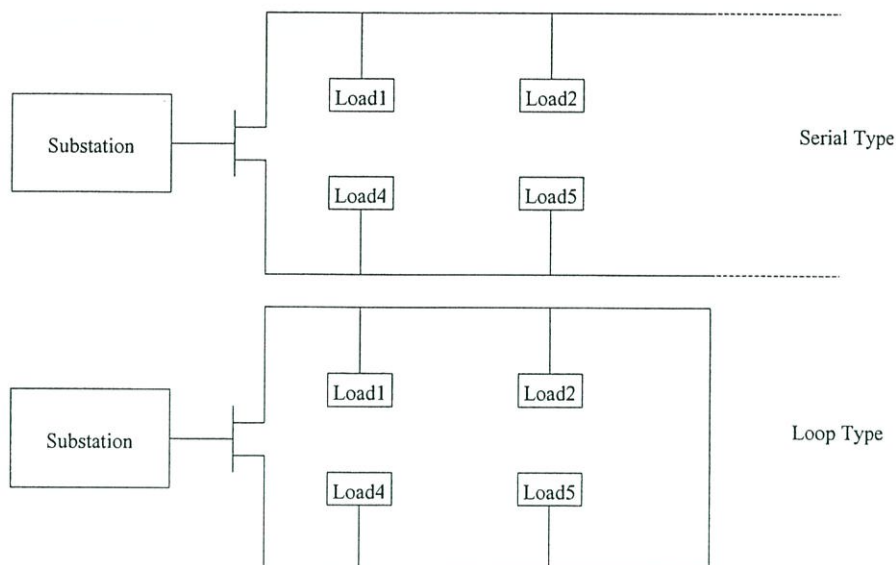
สายส่งไฟฟ้ารองจะต่อออกจากสถานีไฟฟ้าหลักหรือสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบสายส่งและแยกออกไปหลายทิศทางที่ต้องการ โดยทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้าลงมาด้วยการใช้ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังชนิดปรับลดแรงดัน (Step-down power transformer) ลดระดับแรงดันลงมาเป็น 115kV หรือ 69kV และมีระยะทางส่งไม่ไกลจากแหล่งผู้ใช้งานมากนัก โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ปรับลดลงมาของสถานีไฟฟ้าหลักๆ นั้น อาจมีได้หลายระดับ ตามความต้องการของระบบสายส่งรองต่างๆกัน นั่นคือ สายส่งไฟฟ้ารอง จะเป็นสายตัวนำที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าสูงปานกลางต่อเชื่อมระหว่างระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกับระบบจำหน่ายที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ ดังเช่นในประเทศไทยสายส่งรองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 69kV จะต่อออกจากสถานีไฟฟ้าย่อยที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 230kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 24kV ของการไฟฟ้านครหลวง หรือถ้าเป็นส่วนภูมิภาค สายส่งรองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 33 kV จะต่อออกจากสถานีไฟฟ้าย่อยที่ระดับแรงดัน 115kV ของไฟฟ้าฝ่ายผลิตไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 22kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ดังนั้นระบบสายส่งไฟฟ้ารอง จะมีคุณสมบัติที่เป็นสายส่งระยะทางไกล (ประมาณ 10 กิโลเมตร) มีพิกัดกำลังต่ำ (น้อยกว่า 100 MVA) และมีจุดต่อแยกออกไปได้หลายจุดโดยมีระดับแรงดันไฟฟ้า ลดลงมาจากระบบสายส่งหลักเพื่อส่งต่อไปยังระบบจำหน่าย

3.4.3 ระบบจำหน่าย (Distribution)

การส่งไฟฟ้ารอง จะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับแหล่งใช้งานได้โดยผ่าน สถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) เพื่อทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้าลงมาเหลือ 12-24kV หรือ 11-33kV ส่งจ่ายไปตามระบบจำหน่าย (distribution system) สถานีไฟฟ้าย่อยจะจัดส่งพลังงานไฟฟ้าเพื่อการจำหน่ายแก่ผู้ใช้งาน โดยมีระบบจำหน่ายหลัก (primary distribution system) เป็นโครงข่ายในเมืองใหญ่ และแหล่งอุตสาหกรรม หรือผู้ใช้พลังงานๆไฟฟ้าขนาดใหญ่ มีลักษณะการจัดโครงข่ายพื้นฐานสองแบบคือ

1. แบบเส้น (radial) โครงข่ายแบบนี้ นับเป็น โครงข่ายที่ง่ายที่สุดที่พลังงานไฟฟ้าจะไหลไปในทิศทางเดียวกันจาก สถานีไฟฟ้าย่อยไปยังโหลดที่ใช้งาน
2. แบบรูป (loop) โครงข่ายแบบนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบหน่วยพลังงานไฟฟ้า โดยผู้ใช้งานสามารถรับพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าหนึ่งทาง



รูปที่ 3.4 เป็นรูปแสดงตัวอย่างโครงข่ายพื้นฐานของระบบจำหน่ายพลังงานอย่างง่าย

สำหรับผู้ใช้ไฟขนาดเล็ก เช่น บ้านเรือนที่อยู่อาศัย หรืออาคารร้านค้าขนาดเล็ก แรงดันไฟฟ้าจะถูกส่งจำหน่ายด้วยระดับแรงดันต่ำ 416/240 V หรือ 410/230V ในระบบแรงดันต่ำ 220V โดยการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าลดระดับแรงดันลงจากกระแสดสายจำหน่ายหลักเรียกว่า ระบบจำหน่ายรอง (Secondary distribution system) ส่งจ่ายผู้ใช้ระบบ 1 เฟส และ 3 เฟส ดังนั้นระยะทางของสายจำหน่ายรองจะต้องมีความยาวน้อยมากจากหม้อแปลงไฟฟ้าลดแรงดันถึงแหล่งใช้งาน

3.4.4 ระบบใช้งาน

หัวใจหลักของระบบไฟฟ้ากำลังก็คือ ความสามารถในการจัดหาและส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบที่เหมาะสมไปยังผู้ใช้งาน จะเห็นได้ว่า อุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้านั้นมีอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ทั้งหมดเป็นอุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนรูปพลังงานทั้งสิ้น เราจะพบความจริงที่ว่า พลังงานที่อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้านั้น ไม่มีประโยชน์หรือใช้งานได้เลย เครื่องใช้ไฟฟ้าจึงเป็นอุปกรณ์ที่นำพลังงานมาเปลี่ยนไปเป็นพลังงานอื่นๆ เพื่อการใช้งาน เช่น แสงสว่าง ความร้อน มอเตอร์ เสี่ยง หรือแรงบิดทางกล

ผลจากการวิเคราะห์หาข้อดีข้อเสียและประโยชน์การใช้สอยทางคุณลักษณะการใช้ไฟฟ้าของ อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า เราพอจะแบ่งลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าของ โครงข่ายออกได้เป็น 2 ระบบ คือ

1. ระบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant voltage)
2. ระบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (Constant current)

จะพบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยทั่วไป จะเป็นระบบแรงดันไฟฟ้าจ่ายโหลดคงที่ โดยกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงตามโหลด และจะเป็นโครงข่ายของลักษณะการต่อโหลดขนานกัน ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงของโหลดหนึ่งๆ จะไม่กระทบต่อพลังงานไฟฟ้าทางโหลดอื่นๆ ที่อยู่ในโครงข่ายเดียวกัน ดังนั้นระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องออกแบบ และปฏิบัติงานให้สอดคล้องกับความต้องการของโครงข่ายแหล่งผู้ใช้งานเป็นสำคัญ

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเป็นโครงข่ายขนาดใหญ่ จุดที่ผู้ใช้งานดึงเอาพลังงานไฟฟ้าออกไปใช้เรียกว่า บัส (Bus) ซึ่งผู้ใช้อย่อมมีความประสงค์ที่จะให้แรงดันที่ปรากฏหรือป้อนให้บัสนั้นๆ มีลักษณะที่แน่นอนเหมือนแหล่งจ่ายในอุดมคติ (ideal voltage source) นั่นคือ ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีคุณภาพที่ดีเป็นที่ต้องการของผู้ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลังกระแสสลับ จะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ 3 ประการคือ

1. ขนาดแรงดันไฟฟ้าคงที่
2. ความถี่ไฟฟ้าคงที่
3. รูปร่างเป็นคลื่นรูปไซน์แท้จริง

ซึ่งการพิจารณาว่าระบบไฟฟ้าใดมีคุณภาพนั้นพิจารณาได้จาก

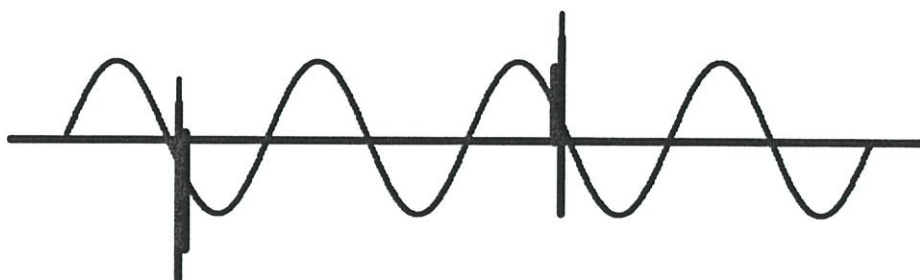
- อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Regulation) จะเป็นการหาเปอร์เซ็นต์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงของระบบแรงดันไฟฟ้าเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง จากขณะที่ไม่มีโหลดจนถึงการต่อโหลดเต็มพิกัด ซึ่งควรจะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 5%
- การเบี่ยงเบนของความถี่ (Frequency Regulation) ในระบบไฟฟ้ากำลังขณะใช้งานปกติ ค่าความถี่ไฟฟ้าควรจะมีการคลาดเคลื่อนเบี่ยงเบนไปจากค่าปกติน้อยมาก ประมาณ ± 0.1 Hz
- สัมประสิทธิ์ฮาร์โมนิก (Harmonic constant) สัมประสิทธิ์ฮาร์โมนิกที่มีความถี่ต่างๆ กันนั้นสามารถวิเคราะห์ได้จากวิธีการ Fourier series ซึ่งความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ฮาร์โมนิกที่ทับกันกับสัมประสิทธิ์หลัก 50 Hz (fundamental frequency) จะเป็นผลให้คุณภาพสัมประสิทธิ์หลักที่ได้จะไม่เป็นรูปไซน์ ที่แท้จริง

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของระบบไฟฟ้านั้นมีระบบย่อยหลายระบบประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งแต่ละระบบย่อยต่างก็มีความสำคัญ และทำงานต่อเนื่องสอดคล้องประสานกันจากแหล่งผลิตจนถึงแหล่งใช้งาน โดยเป็นการนำพลังงานจากแหล่งให้กำเนิดพลังงานต่างๆ มาแปรเป็นพลังงานไฟฟ้าส่งผ่านไปแปรใช้งานในรูปแบบพลังงานที่ต้องการ

3.5 ความผิดปกติของระบบสายไฟฟ้ากำลัง

ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังมีมากมาย แต่ละรูปแบบก็มีชื่อเรียกเฉพาะต่างกันไปได้ดังนี้ [8]

3.5.1 ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในช่วงพริบตา (Transients)



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดจากความผิดปกติที่เกิดขึ้นในช่วงพริบตา (Transients)

ความผิดปกตินี้เป็นความเปลี่ยนแปลงของปริมาณทางไฟฟ้า เช่น แรงดัน, กระแส, ความถี่ เป็นต้น ซึ่งเกิดขึ้นและหายไปอย่างรวดเร็วมาก แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

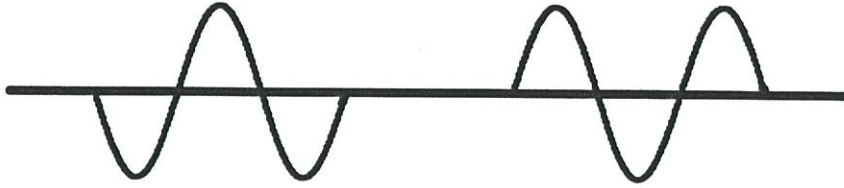
3.5.1.1 Impulsive Transient เป็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสและ/หรือแรงดัน ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น เช่น ฟิวส์ทำให้เกิดกระแสจำนวนมากแล้วหายไป เรียกอย่างไม่เป็นทางการว่า เสิร์จ (surge)

3.5.1.2 Oscillatory Transient เป็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสและ/หรือแรงดัน ทั้ง 2 ทิศทางเช่นการสับคาปาซิเตอร์ เข้าในวงจรทำให้เกิดกระแส oscillatory transient ปริมาณมากในช่วงพริบตาแล้วหายไป

3.5.2 ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ (Short Duration)

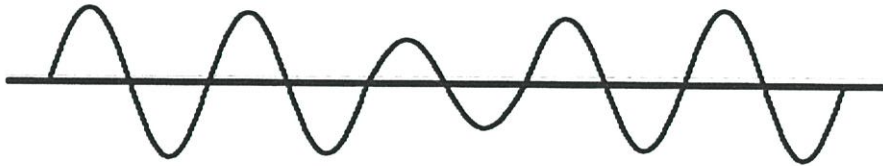
ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ โดยทั่วไปหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า (rms) ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ มี 3 ลักษณะคือ

3.5.2.1. Interruption เป็นภาวะแรงดันมีค่าน้อยกว่า 1 pu. เช่น เกิดลัดวงจรไฟฟ้าจนแรงดันในระบบลดลงมากกว่า 90% เป็นเวลาไม่เกิน 1 นาที หลังจากที่ทำกร clear fault แล้วแรงดันไฟฟ้าก็จะกลับคืนเป็นปกติ เรียกอย่างไม่เป็นทางการคือ ไฟกระพริบ



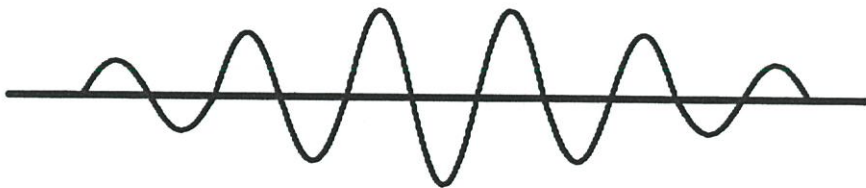
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างสัญญาณไฟกระพริบ (Interruption)

3.5.2.2. Sags (Dips) เป็นภาวะแรงดันมีค่าระหว่าง 0.1 - 0.9 pu. เช่นมีการเริ่มเดินมอเตอร์ขนาดใหญ่ทำให้แรงดันลดลง 10-90% เป็นเวลาไม่เกิน 1 นาทีแรงดันก็จะกลับมาเป็นปกติ หรือเกิดการลัดวงจรในสายส่งอื่นที่มาจากสถานีไฟฟ้าย่อยเดียวกัน ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันในสายส่งที่ไม่ลัดวงจรลดลงด้วย เรียกอย่างไม่เป็นทางการคือ ไฟกระพริบ



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างสัญญาณไฟกระพริบ (Sags)

3.5.2.3. Swells เป็นภาวะที่แรงดันหรือกระแสไหลลดมีค่าระหว่าง 1.1 - 1.8 pu. เช่นการหยุดเดินมอเตอร์ขนาดใหญ่ หรือการต่อคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เข้าระบบไฟฟ้า ทำให้แรงดันมีค่าสูงขึ้น 10 - 80% เป็นเวลาไม่เกิน 1 นาที



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างสัญญาณ Swells

3.5.3 ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาค่อนข้างนาน (Long Duration)

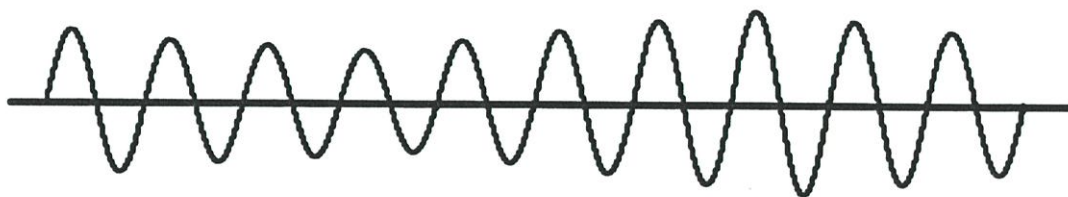
ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาค่อนข้างนาน โดยทั่วไปหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า (rms) ที่นานกว่า 1 นาที มี 3 ลักษณะคือ

3.5.3.1. Sustained interruption หมายถึงเกิดไฟฟ้าดับนานเกินกว่า 1 นาที คำศัพท์ที่ไม่เป็นทางการคือ Outage, Black out

3.5.3.2. Undervoltage หมายถึงเกิดแรงดันตกมากกว่า 10% (0.8 - 0.9 pu.) นานเกินกว่า 1 นาที เช่นการตั้งแท็บของหม้อแปลงไม่ถูกต้อง การเดินเครื่องจักรขนาดใหญ่หรือการตัดคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่ออกจากระบบไฟฟ้า คำศัพท์ที่ไม่เป็นทางการคือ ไฟตก , Brown out

3.5.3.3. Overvoltage หมายถึงเกิดแรงดันเกินมากกว่า 10% (1.1 - 1.2 pu.) นานเกินกว่า 1 นาที ศัพท์ที่ไม่เป็นทางการคือ ไฟเกิน

3.5.4 แรงดันกระเพื่อม (Voltage fluctuation)



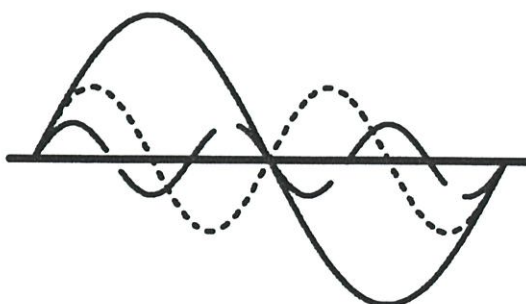
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างสัญญาณที่มีแรงดันกระเพื่อม

แรงดันกระเพื่อม หมายถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า (rms) ที่ไม่เกิน $\pm 10\%$ (0.9 - 1.1 pu.) ทั้งแบบเป็นระบบและแบบไม่ต่อเนื่อง บางครั้งเรียกว่า flicker คือไฟกระเพื่อม เช่นการทำงานของเตาหลอมไฟฟ้า (Arc furnace)

3.5.5 ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไฟฟ้า (Waveform distortion)

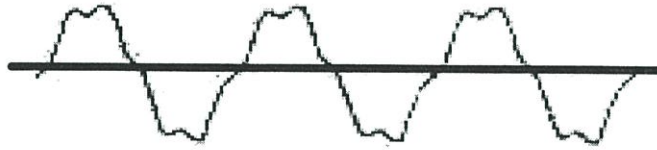
ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไฟฟ้า หมายถึง การที่รูปคลื่นทางไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์สมบูรณ์แบบในสภาวะอยู่ตัว (steady state) มี 5 แบบคือ

3.5.5.1. DC offset หมายถึง ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) มีกระแสหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ปะปนมาด้วย โดยอาจเกิดจากการใช้วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งลูกคลื่น (Half-wave Rectifier)



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างสัญญาณที่มีการปะปนของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

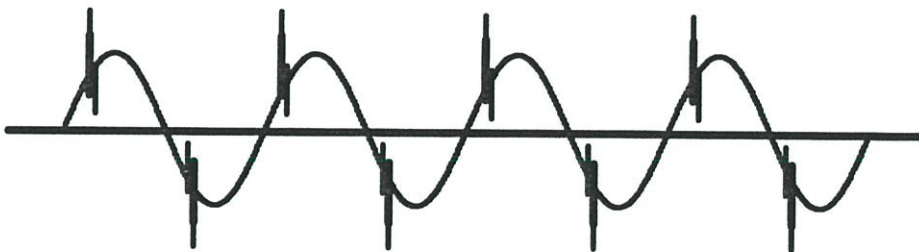
3.5.5.2. Harmonics หมายถึง กระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าที่เป็นจำนวนเต็ม ของความถี่มูลฐาน 50 Hz. อาจเป็น 2 เท่า (100Hz.) หรือมากกว่านั้น โดยอาจเกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น หลอด gas discharge , บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น โดยฮาร์มอนิกจะปนมากับไฟ 50 Hz. ปกติ ซึ่งจะทำให้รูปคลื่นไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากเดิม



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างสัญญาณที่มีการปะปนของฮาร์มอนิก

3.5.5.3. Interharmonic หมายถึงกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าที่ไม่เป็นจำนวนเต็ม ของความถี่มูลฐาน 50 Hz. เช่น 2.5 เท่า หรือ 125 Hz. เป็นต้น โดยอาจเกิดจากเตาหลอมไฟฟ้า (Arc furnace)

3.5.5.4. Notching หมายถึงความผิดปกติทางแรงดันไฟฟ้าแบบเป็นคาบที่เกิดจากคอมมิวเตชันของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น ทรานซิสเตอร์ไครว์ โดยทั่วไปมีความถี่สูงมากและตรวจวัดได้ยาก



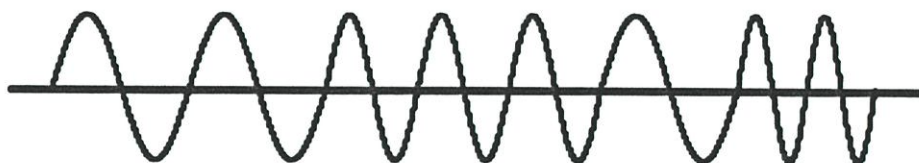
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างสัญญาณเกิด Notching

3.5.5.5. Noise หมายถึงสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าความถี่สูงในรูปของกระแสและแรงดันจากอุปกรณ์ที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์กำลัง หรือเตาหลอมไฟฟ้าที่สามารถรบกวนการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือคอมพิวเตอร์ได้

3.5.6 แรงดันไม่สมดุล (Voltage unbalance)

แรงดันไม่สมดุล โดยทั่วไปมักเกิดจากการใช้โหลดในแต่ละเฟสต่างกันมากเกินไปหรือเกิดจากการที่คาปาซิเตอร์มีพิวส์ขาดไปบางเฟส

3.5.7 ความถี่ไฟฟ้าไม่คงที่ (Power frequency variation)



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างสัญญาณที่มีความถี่ไฟฟ้าไม่คงที่

ความถี่ไฟฟ้าไม่คงที่ หมายถึง การที่ความถี่ไฟฟ้าในระบบไม่เท่ากับ 50Hz. อันอาจเกิดจากการลัดวงจรอย่างรุนแรงในระบบส่งกำลังไฟฟ้า หรือการตัดโหลดปริมาณมากจากระบบไฟฟ้า จนทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตอบสนองไม่ทันจนความถี่เปลี่ยนแปลงไป

3.6 สภาพแวดล้อมของสายไฟฟ้ากำลังในการสื่อสารข้อมูล

สายส่งกำลังไฟฟ้าแบบพื้นฐานทั่วไป ถูกออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับการส่งสัญญาณไฟฟ้ากำลัง (50 Hz หรือ 60 Hz) เท่านั้น โดยไม่ได้คำนึงถึงการส่งสัญญาณสื่อสารข้อมูลความถี่สูง ดังนั้นปัญหาที่พบที่อาจจะเกิดขึ้นกับการส่งสัญญาณสื่อสารข้อมูล คือ [7]

3.6.1 การลดทอน (Attenuation)

การลดทอนของสัญญาณสื่อสารข้อมูล อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า เมื่อความยาวของสายเพิ่มขึ้น มีอุปกรณ์ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า และจุดเชื่อมต่อของสายไฟฟ้าที่มีค่าอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากัน

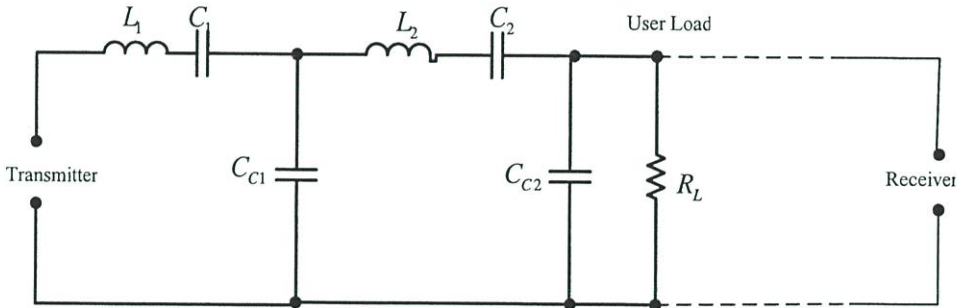
3.6.2 สัญญาณรบกวนและสัญญาณแทรกสอด (Noise and Interference)

สัญญาณรบกวนและสัญญาณแทรกสอดในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น สัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ (Impulse noise), สัญญาณรบกวนแบบขาว (White noise), Continuous wave source เป็นต้น

โดยสัญญาณรบกวนแบบพัลส์ เกิดจากการต่อโหลดประเภทเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductive) เข้ากับระบบไฟฟ้า ทำให้มีหน้าคลื่นชัน ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่ป้องกันได้ยาก ถ้าหากในระบบมีโหลดประเภทความจุไฟฟ้า (Capacitive) ที่สามารถเกิดเรโซแนนซ์กับความถี่ของสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์พอดีก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เรียกว่า Continuous wave source ซึ่งจะรบกวนสัญญาณสื่อสารตลอดเวลา โดยที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ว่าสัญญาณรบกวนนี้จะมีค่าเท่าใด และยังมีสัญญาณรบกวนอีกอย่างหนึ่งที่มีการกระจายของพลังงานทุกความถี่ เรียกว่า สัญญาณรบกวนแบบขาว

3.6.3 การติดตั้งสายส่งกำลังไฟฟ้า

ผลกระทบจากการติดตั้งสายส่งกำลังไฟฟ้าหลายเส้นทาง เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังจะมีการส่งสัญญาณไฟฟ้าไปตามสายส่งกำลังไฟฟ้าหลายเส้นทาง และความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่มีระยะต่างกัน ทำให้สัญญาณสื่อสารข้อมูลที่ถูกส่งไปในสายส่งกำลังไฟฟ้าแต่ละเส้น มีเฟสต่างกัน หากมาบรรจบกัน สัญญาณอาจถูกลดทอนได้ หรืออาจจะหายไปที่จุดเชื่อมต่อนั้น ถ้าสัญญาณสื่อสารข้อมูลของสองเส้นทางมีเฟสต่างกัน 180 องศาพอดี

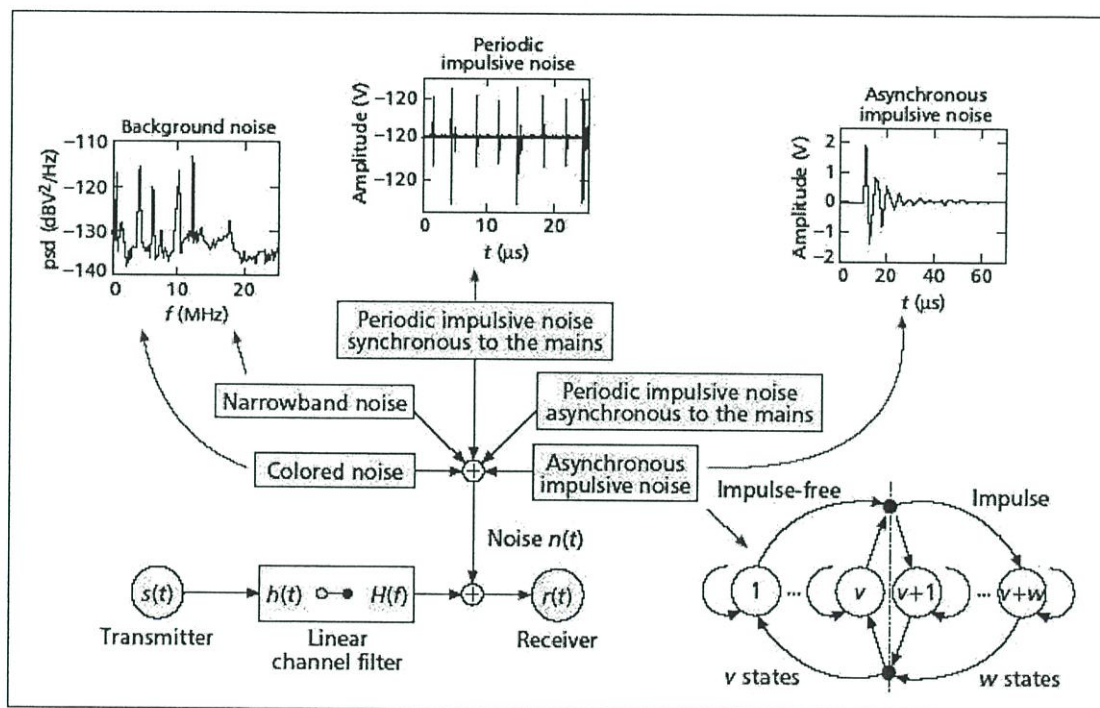


รูปที่ 3.14 สภาพแวดล้อมของสายส่งกำลังไฟฟ้า

อิมพีแดนซ์ภายในสายไฟฟ้ามีค่าประมาณ 10-100 โอห์ม ขนาดของตัวเก็บประจุภายในสายประมาณ 10-100 พิโคฟารัดต่อ 1000 ฟุต ขนาดความต้านทานในสายประมาณ 0.1- 1 โอห์มต่อ 1000 ฟุต ความต้านทานในสายยังมีความไม่แน่นอนซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนการต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าอีกด้วย

3.7 สัญญาณรบกวน (Noise)

สัญญาณรบกวนของสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงดันต่ำ มีแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนที่สามารถเกิดขึ้นภายใน (ภายในโครงข่ายกำลัง) หรือ ภายนอก (ภายนอกโครงข่ายกำลัง) รายละเอียดการแบ่งประเภทสัญญาณรบกวนของสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงดันต่ำได้ ดังรูปที่ 3.15 [9-11]



รูปที่ 3.15 สัญญาณรบกวนของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงดันต่ำ

3.7.1. สัญญาณรบกวนพื้นหลังสี (Color background noise) มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมต่ำ (Low Power Spectrum Density: PSD) ซึ่งสาเหตุของการเกิดสัญญาณรบกวนนี้ มาจากผลรวมของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนกำลังต่ำ

3.7.2. สัญญาณรบกวนแคบแคบ (Narrowband noise) ส่วนมากสัญญาณรบกวนนี้เกิดจากการมอดูเลตเชิงขนาดของสัญญาณวิทยุ อันมีสาเหตุจากการเข้าถึงสถานีแพร่สัญญาณวิทยุ (Radio broadcasting station)

3.7.3. สัญญาณรบกวนแบบอพัลส์ซิงโครนัสที่ไม่มีการประสานจังหวะในเชิงความถี่ (Periodic Impulsive noise asynchronous to the mains frequency) ส่วนมากเกิดจากวิธีสลับ (switched-mode) ของแหล่งจ่ายกำลัง

3.7.4. สัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซิงโครนัสที่มีการประสานจังหวะในเชิงความถี่ (Periodic Impulsive noise asynchronous to the mains frequency) โดยสาเหตุการเกิดสัญญาณรบกวนประเภทนี้มาจากพฤติกรรมการทำงานของเครื่องสลับกระแสไฟฟ้าที่มีสองขั้ว ซึ่งพบมาในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า

3.7.5 สัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซิงโครนัสไม่ประสานจังหวะ (Asynchronous impulsive noise) มีสาเหตุจากการปิด-เปิด สลับกันชั่วขณะในโครงข่ายกำลังไฟฟ้าแรงดันต่ำ

โดยปกติ ขนาดรากของกำลังสองเฉลี่ย (root mean square: rms) ของสัญญาณรบกวนสองประเภทแรกมีการเปลี่ยนแปลงช้ามากเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้น สามารถรวมสัญญาณรบกวนทั้งสองประเภทนี้ และเรียกว่า สัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ได้ ส่วนสัญญาณรบกวนสามประเภทหลังจำแนกสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซิงโครนัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดอย่างรวดเร็ว ที่สถานะจริงสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซิงโครนัสมีแหล่งกำเนิดมาจากเครื่องใช้ไฟฟ้าในโครงข่ายกำลังไฟฟ้าแรงดันต่ำ โดยสัญญาณรบกวนในสายส่งกำลังไฟฟ้าแบ่งโดยรวมสัญญาณรบกวนพื้นหลังกับสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซิงโครนัสจากเครื่องใช้ไฟฟ้าที่อยู่ใกล้ทั้งหมด

- สัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซิงโครนัส

แบบจำลองสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซิงโครนัสบนช่องสัญญาณไฟฟ้ากำลังแถบกว้างเริ่มมีการศึกษามาตั้งแต่ต้นปีคริสต์ศักราช 1980 การแสดงแบบจำลองหลายครั้งมีความแตกต่างกันเนื่องจากช่องสัญญาณไฟฟ้ากำลังแรงดันต่ำมีความแตกต่างจากช่องสัญญาณสื่อสารประเภทอื่นทำให้สัญญาณรบกวนในสภาพแวดล้อมของสายส่งไฟฟ้าไม่สามารถแสดงรายละเอียดได้ด้วยแบบจำลองสัญญาณรบกวนแบบขาวบวก (Additive white Gaussian noise: AWGN) ดังนั้นจำเป็นต้องทราบถึงคุณลักษณะและประเภทของสัญญาณรบกวนของช่องสัญญาณดังกล่าว

แนวคิดทางคณิตศาสตร์ของอะนาล็อกและดิจิทัลของอิมพัลส์ ในส่วนของอะนาล็อกอิมพัลส์ได้แสดงดังรูปที่ 3.16 พื้นที่รูปพัลส์เดี่ยว $p(t)$ แสดงดังรูป 3.16 (a) ความกว้างของพัลส์ Δ เข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้น พัลส์ที่ได้จึงเข้าใกล้สู่อิมพัลส์เช่นกันอิมพัลส์ฟังก์ชันแสดงในรูปที่ 3.16 (b)

$$\delta(t) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} p(t) = \begin{cases} 1/\Delta & |t| \leq \Delta/2 \\ 0 & |t| > \Delta/2 \end{cases} \quad (3.1)$$

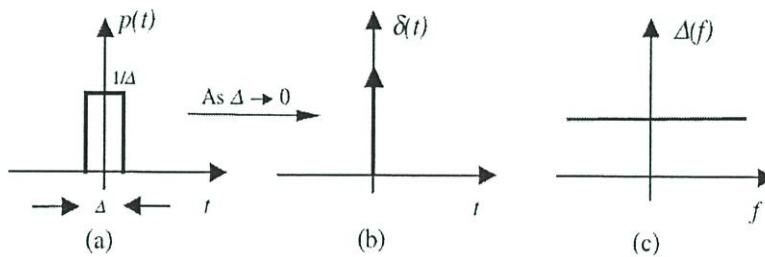
อินทิกรัลของอิมพัลส์ฟังก์ชัน

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = \Delta \times \frac{1}{\Delta} = 1 \quad (3.2)$$

การแปลงฟูริเยร์ของฟังก์ชันอิมพัลส์ฟังก์ชัน

$$\Delta(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) e^{-j2\pi ft} dt = e^0 = 1 \quad (3.3)$$

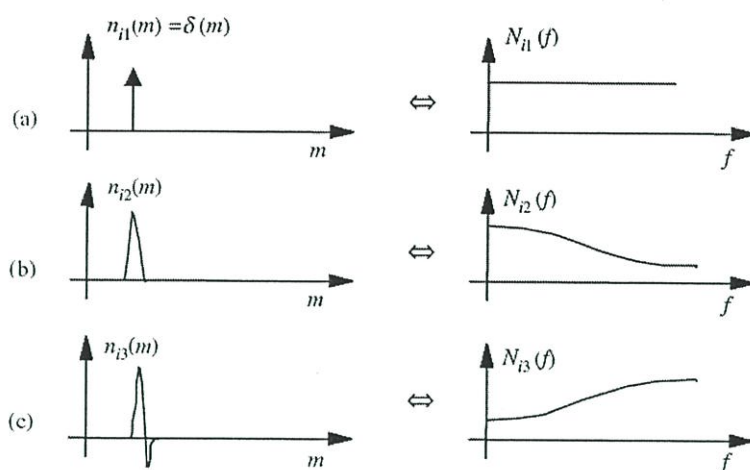
เมื่อ f คือ ตัวแปรความถี่อิมพัลส์ฟังก์ชันถูกใช้ในการทดสอบเพื่อให้ได้มาซึ่งผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบแสดงดังรูปที่ 3.16 (c)



รูปที่ 3.16 (a) พัลส์หนึ่งหน่วย (b) พัลส์ที่กลายเป็นอิมพัลส์ $\Delta \rightarrow 0$ (c) แถบกำลังงานของอิมพัลส์

ดิจิตอลอิมพัลส์ $\delta(m)$ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.16 (a) กำหนดให้เป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นหนึ่งตัวอย่างสามารถเขียนได้โดย

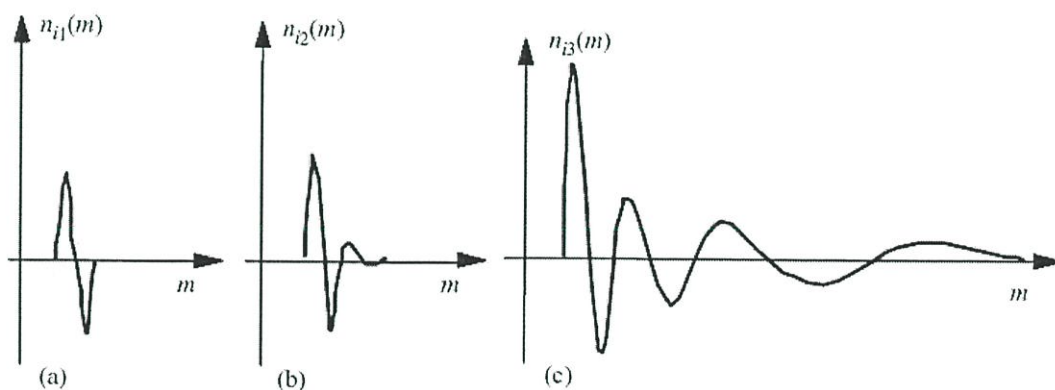
$$\delta(m) = \begin{cases} 1 & m = 0 \\ 0 & m \neq 0 \end{cases} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.17 (a) อิมพัลส์ในอุดมคติ (b) และ (c) พัลส์ที่มีช่วงเวลาที่แคบ

เมื่อตัวแปร m คือ คำนวณที่เพิ่มขึ้นทางเวลาใช้การแปลงฟูริเยร์แปลงไปยังโดเมนทางความถี่ของดิจิตอลอิมพัลส์จะได้

$$\Delta(f) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(m) e^{-j2\pi fm} = 1 \quad -\infty < f < \infty \quad (3.5)$$



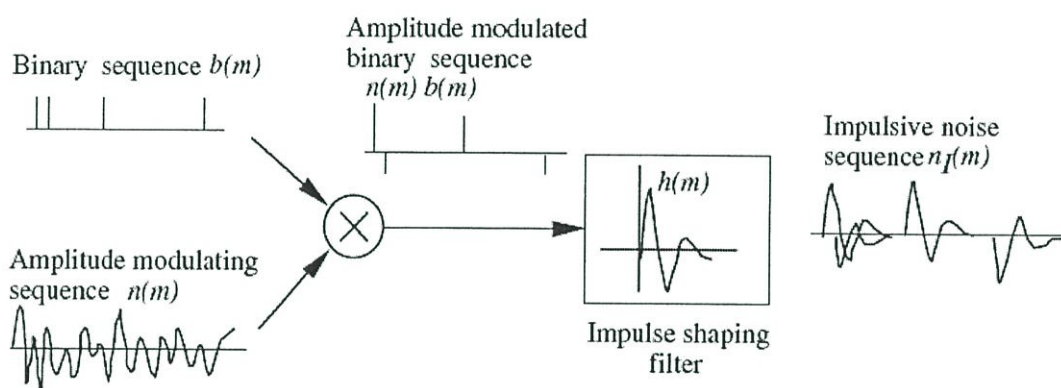
รูปที่ 3.18 รูปแบบของผลตอบสนองอิมพัลส์ในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

3.7.6 แบบจำลองสำหรับสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพ

แบบจำลองทางสถิติสำหรับคุณสมบัติของกระบวนการของสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพ ลำดับของสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพ $n_i(m)$ ประกอบด้วยพัลส์ที่มีการสุ่มทางขนาด

$$n_i = \sum_{k=0}^{P-1} h_k n(m-k) b(m-k) \quad (3.6)$$

รูปที่ 3.19 แสดงแบบจำลองสำหรับระบบการแบบอิมพัลส์ซีฟ $b(m)$ คือ ลำดับไบนารีแบบสุ่ม $n(m)$ คือ ค่าต่อเนื่องของกระบวนการแบบสุ่ม และ $h(m)$ คือ ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองกระบวนการสำคัญของกระบวนการสำหรับการจำลองแบบสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซีฟ คือ กระบวนการ Bernoulli-Gaussian กระบวนการ Passion-Gaussian และ กระบวนการ Binary-State สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้กระบวนการ Binary-State



รูปที่ 3.19 แผนภาพของสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์

3.7.7 Binary-state แบบจำลองสำหรับสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์

สัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซีฟ [12] ประกอบด้วยสัญญาณรบกวนพัลส์ที่มีช่วงกว้างของพัลส์น้อยมากๆ สามารถเกิดมาจากหลายแหล่งกำเนิดตามที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น โดยสัญญาณรบกวนแบบนี้จะมีลักษณะไม่คงที่ ลำดับไบนารีสเตท (binary-state sequence) ของอิมพัลส์โดยสุ่มขนาดและตำแหน่งการเกิด ลักษณะไม่คงที่ของสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซีฟสามารถพิจารณากำลังเชิงสเปกตรัม (Power spectrum) ของกระบวนการสัญญาณรบกวนด้วยอิมพัลส์ เมื่อสัญญาณรบกวนไม่ปรากฏ กระบวนการมีกำลังงานเป็นศูนย์ ในทางตรงกันข้ามอิมพัลส์ปรากฏกำลังสัญญาณรบกวน (Noise power) จะเป็นกำลังของอิมพัลส์ ดังนั้นกำลังเชิงสเปกตรัมและอัตราสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซีฟเป็น ไบนารีสเตท (binary-state), กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเวลา (Time-varying process) ลำดับสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซีฟสามารถแสดงแบบจำลองด้วยลำดับไบนารีสเตท มอดูเลชันทางขนาด

$$n_i(m) = n(m)b(m) \quad (3.6)$$

เมื่อ $b(m)$ = ลำดับสุ่มสถานะทวิภาคของ '1' และ '0'

$n(m)$ = กระบวนการสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม (random noise process)

สมมติให้สัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซิทึมมีกระบวนการสุ่มไม่เป็นสหสัมพันธ์ (Uncorrelated) ดังนั้น อัตสหสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซิทึมจะนิยามได้ด้วย กระบวนการไบนารีสเตต

$$r_{nn}(k, m) = E[n_i(m)n_i(m+k)] = \sigma_n^2 \delta(k)b(m) \quad (3.7)$$

เมื่อ $\delta(m)$ = ฟังก์ชัน Kronecker delta

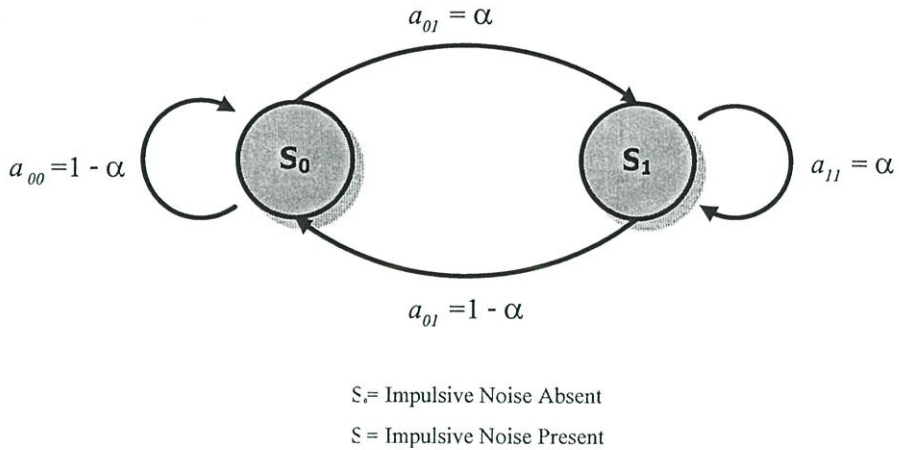
จากสมการที่ (3.7) กำหนดให้สัญญาณรบกวนมีกระบวนการไม่เป็นสหสัมพันธ์ ทำให้อัตสหสัมพันธ์มีค่าเป็นศูนย์ที่ $k \neq 0$ ดังนั้น สมการที่ (3.7) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (3.8)

$$r_{nn}(0, m) = \sigma_n^2 b(m) \quad (3.8)$$

กระบวนการของสัญญาณรบกวนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์, $r_{nn}(0, m)$ กำลังของสัญญาณรบกวนไบนารีสเตตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา กำลังเชิงสเปกตรัมของลำดับสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซิทึมหาได้จากการแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transform) ของสมการอัตสหสัมพันธ์ สมการที่ 3.8

$$P_{N,N_i}(f, m) = \sigma_n^2 b(m) \quad (3.9)$$

สมการที่ 3.8 และ 3.9 คือ สมการอัตสหสัมพันธ์ และ กำลังเชิงสเปกตรัมแสดงด้วยฟังก์ชันไบนารีสเตต ค่าเหล่านี้ขึ้นกับสถานะ “ปรากฏสัญญาณรบกวน/ ไม่ปรากฏสัญญาณรบกวน (on/off)” ของสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซิทึมที่เวลา m



รูปที่ 3.20 แผนภาพแสดงการเกิดสัญญาณรบกวนอิมพัลส์ชีพด้วยแบบจำลองไบนารีสเตต

แบบจำลองไบนารีสเตต กำหนดให้ที่สเตต S_0 จะไม่ปรากฏสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพ และไม่มีการสุ่ม ส่วนที่สเตต S_1 จะปรากฏสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพ โดยเกิดพัลส์ที่มีความกว้างน้อยๆ ซึ่งทั้งขนาดและความกว้างของพัลส์เป็นแบบสุ่ม ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสเตต (Probability of transition) S_i ไป S_j แสดงด้วย a_{ij} ดังรูปที่ 3.18 แผนภาพแสดงสเตตการเกิดสัญญาณรบกวนอิมพัลส์ชีพ โดยความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสเตต S_i ขึ้นกับสเตตปัจจุบันของแบบจำลอง ในกรณีความน่าจะเป็นที่เวลา $t+1$ สัญญาณในสเตต S_0 ขึ้นกับสเตตที่เวลา t แทนด้วยสมการความน่าจะเป็นได้

$$P(s(t+1) = S_0 | s(t) = S_0) = P(s(t+1) = S_0 | s(t) = S_1) = 1 - \alpha \quad (3.10)$$

เมื่อ s_t คือ สเตตที่เวลา t ทำนองเดียวกันที่เวลา $t+1$ แบบจำลองอยู่ที่สเตต S_1 แสดงด้วยสมการความน่าจะเป็นได้

$$P(s(t+1) = S_1 | s(t) = S_0) = P(s(t+1) = S_1 | s(t) = S_1) = \alpha \quad (3.11)$$

ในรูปแบบทั่วไปของแบบจำลองไบนารีสเตต สามารถอธิบายด้วยแบบจำลองมาร์คอฟโดยแบบจำลองจะขึ้นกับกระบวนการของสัญญาณรบกวนได้เช่นกัน

บทที่ 4

แบบจำลองและผลการวิเคราะห์การจำลองแบบ

4.1 ลักษณะทั่วไปของช่องสัญญาณสายส่งกำลังไฟฟ้า

ลักษณะของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้ง ภายในบ้านเรือน อาคาร ทั่วไปใช้สำหรับส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้า และไม่ได้ออกแบบมาสำหรับการส่งสัญญาณข้อมูลโดยตรง ดังนั้น การนำสายส่งกำลังไฟฟ้า มาใช้ในการส่งผ่านสัญญาณข้อมูลจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของช่องสัญญาณสายส่งกำลังไฟฟ้า อาทิ พารามิเตอร์ของสาย ฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer function) การรบกวนจากสิ่งแวดล้อม (Interference scenario) เพื่อให้สามารถเลือกกระบวนการส่งสัญญาณข้อมูลผ่านช่องสัญญาณดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม บทนี้นำเสนอการจำลองแบบสายส่งกำลังไฟฟ้า 1 เฟส (Phase) แบบจำลองของสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพ และผลการวิเคราะห์การจำลองแบบสำหรับการศึกษาการส่งผ่านข้อมูลอ้างอิงที่ชั้นกายภาพ (Physical Layer) ของโปรโตคอลที่ซีพี/ไอพีบนช่องสัญญาณดังกล่าว

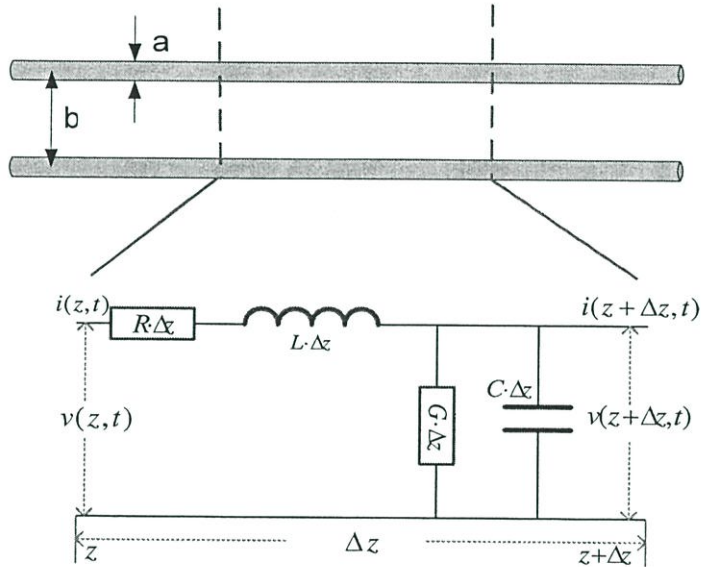
4.1.1 การจำลองแบบสายส่งกำลังไฟฟ้า (Power Line Model)

การจำลองแบบของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่นำมาอ้างอิงสำหรับงานวิจัย กำหนดว่าสายส่งกำลังไฟฟ้าเป็นแบบ 2 สาย หรือ 2 ตัวนำ ประกอบด้วย ตัวนำไฟฟ้า (Conductance) 1 สาย และตัวนำไฟฟ้าที่มีความเป็นกลางทางไฟฟ้า (Neutral Conductance) หรือไม่นำไฟฟ้านั่นเอง 1 สาย พื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม มีไดอิเล็กตริกชนิดเดียวกัน โดยเลือกสายส่งกำลังไฟฟ้าภายใน 2 เส้นจากสายส่งกำลังไฟฟ้าภายในทั้งหมด 4 เส้น คือ เลือกสาย 1 กับสาย 2 ดังรูปที่ 4.1 [13-14]



รูปที่ 4.1 แบบจำลองของสายส่งกำลังไฟฟ้า 2 เส้น (2 ตัวนำ)

สายส่งกำลังไฟฟ้าเส้นคู่ขนานซึ่งประกอบด้วยลวดตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง a จำนวน 2 สาย วางขนานกันตามความยาว โดยให้เส้นผ่านศูนย์กลางของทั้ง 2 สายห่างกันเป็นระยะทาง b ดังแสดงในรูปที่ 4.2 สายส่งชนิดนี้จะมีพารามิเตอร์ต่างๆ กระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ (Uniform) ตลอดความยาวของสาย จึงอาจเรียกสายส่งนี้ว่าเป็นสายส่งแบบสม่ำเสมอ ถ้าให้ R L G และ C เป็นค่าคงตัวแบบกระจายตัวของความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ ความนำ และความจุต่อหนึ่งหน่วยความยาว ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป [15]



รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ (Uniform)

4.1.2 พารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาว (Per-unit-length parameter)

คุณลักษณะของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามารถแสดงได้ด้วย ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) และค่าคงตัวการแพร่กระจาย (Propagation Constant) หรือ แทนด้วยค่าพารามิเตอร์ต่อ 1 หน่วยความยาว ของสายส่งไฟฟ้ากำลัง คือ

- R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อเมตร (Ω/m)
- L คือ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่อเมตร (H/m)
- G คือ ค่าความนำไฟฟ้าต่อเมตร (S/m)
- C คือ ค่าความจุไฟฟ้าต่อเมตร (F/m)

โดยพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาว ค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะ (Z_o) และค่าคงตัวการแพร่กระจาย (γ) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่าดังกล่าว ดังสมการที่ 4.1

$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

Per-unit-length parameter



(4.1)

$$R = \text{Re}(Z_o \gamma)$$

$$L = \text{Im}(Z_o \gamma) / \omega$$

$$G = \text{Re}(\gamma / Z_o)$$

$$C = \text{Im}(\gamma / Z_o) / \omega$$

สำหรับการจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้าแบบ 2 เส้น ที่สภาวะความถี่สูง พบว่าการประมาณพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาวนั้นขึ้นกับค่าความถี่ ดังสมการที่ 4.2

$$\left. \begin{aligned} R &= r_1 \sqrt{f} \\ L &= l_1 + (l_2 / \sqrt{f}) \\ G &= g_1 f \\ C &= c_1 \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

จากสมการที่ 4.2 เป็นการจำลองแบบของพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ r_1 , l_1 , l_2 , g_1 และ c_1 มาจากกระบวนการหาค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (least-square) รวมกับการวัดค่าพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาว ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ r_1 , l_1 , l_2 , g_1 , c_1 และขนาดของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการจำลองแบบช่องสัญญาณ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์และขนาดของค่าพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาว

พารามิเตอร์	r_1 ($\mu\Omega\text{m}^{-1}\text{s}^{\frac{1}{2}}$)	l_1 (μHm^{-1})	l_2 ($\mu\text{Hm}^{-1}\text{s}^{\frac{1}{2}}$)	g_1 (pSm^{-1}s)	c_1 (pFm^{-1})
$4 \times 10 \text{ mm}^2$ 1-2	142	0.287	22.3	4.68	91.0
$4 \times 25 \text{ mm}^2$ 1-2	79.1	0.248	16.8	8.57	111

4.2 แบบจำลองช่องสัญญาณสายส่งกำลังไฟฟ้า

ปัจจุบันความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลมีการพัฒนา และขยายโครงข่ายอย่างกว้างขวาง โดยการนำตัวกลางสื่อสัญญาณหลากหลายรูปแบบมาใช้งาน ตัวกลางสื่อสัญญาณอย่างหนึ่งที่ถูกเลือกมาศึกษา วิจัย คือ สายส่งกำลังไฟฟ้า หรือ ช่องสัญญาณกำลังไฟฟ้า ซึ่งมีการติดตั้งอยู่ทั่วไป ดังนั้น การพัฒนาการสื่อสารข้อมูลโดยใช้สายส่งกำลังไฟฟ้า ดำเนินการตามมาตรฐานขององค์กรกำหนดมาตรฐาน IEEE (IEEE P1901) และ ETSI PLT (ETSI ES 201 867: Draft) ซึ่งมาตรฐานเดิมที่มีการใช้งานคือ CENELEC (EN50065-1) เพื่อรองรับการใช้งานสายส่งกำลังไฟฟ้า [16-17]

4.2.1 แบบจำลองช่องสัญญาณ (Channel Model)

การจำลองแบบช่องสัญญาณที่ศึกษาใช้สายส่งกำลังไฟฟ้าเป็นแบบมีโครงข่าย และจำลองพฤติกรรม ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับสภาพแวดล้อมการติดตั้งระบบสายส่งสัญญาณไฟฟ้าจริง รวมถึงคุณลักษณะต่างๆ ไว้นในฟังก์ชันถ่ายโอน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองช่องสัญญาณแบบการแพร่กระจายหลายวิถี (Multi Path Propagation Model) [18]

4.2.1.1 แบบจำลองช่องสัญญาณการแพร่กระจายหลายวิถี

(Multi Path Propagation Model)

การจำลองแบบช่องสัญญาณไฟฟ้ากำลัง คือ การนำสายส่งสัญญาณกำลังไฟฟ้ามาเป็นตัวกลางสื่อสัญญาณข้อมูล โดยสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อ้างอิงเป็นแบบ 2 ตัวนำ ที่มีพารามิเตอร์ต่างๆ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (uniform two-conductor distributed transmission-line) ตามทฤษฎีของ

สายส่ง ดังรูปที่ 4.2 พิจารณาสายส่งไร้คลื่นสะท้อน (Match transmission line) ฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer function) ของสายส่งสามารถแสดงด้วยสมการ (4.3)

$$H(f) = e^{-\gamma l} \quad (4.3)$$

เมื่อ γ คือ ค่าคงตัวการแพร่กระจาย (Propagation constant)

l คือ ความยาวของสาย (Line length)

จากสมการ (4.3) พารามิเตอร์ค่าคงตัวการแพร่กระจายอธิบายด้วยสมการ (4.4) โดย α เป็นส่วนจริง และ β เป็นส่วนจินตภาพ สำหรับสายส่ง 2 ตัวนำ ทั้งขนาดและค่าคงตัวเฟสขึ้นกับความถี่ [19-20]. ซึ่งสามารถเขียนสมการ (4.4) ใหม่ในรูปของความถี่ได้ดังสมการ (4.5)

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (4.4)$$

เมื่อ α คือ ค่าคงตัวลดทอน (Attenuation constant)

β คือ ค่าคงตัวเฟส (Phase constant)

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (4.5)$$

$$\omega = 2\pi f$$

เมื่อ f คือ ความถี่

อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสาย (Z_o)

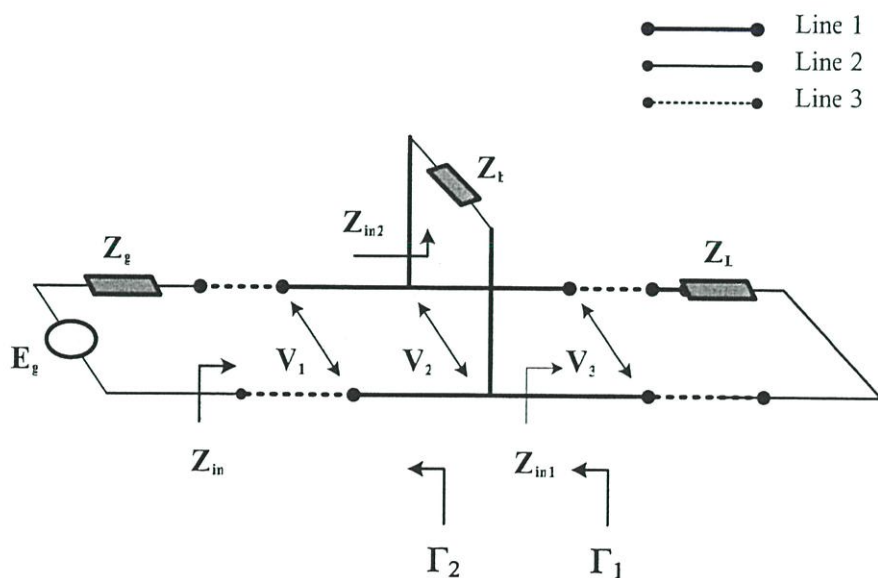
$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (4.6)$$

ค่าคงตัวการแพร่กระจาย และ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น เป็นตัวกำหนด ฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณสายส่งกำลังไฟฟ้า อันมีกลไกการลดทอนของสัญญาณ

กำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยสามารถแบ่งการลดทอนสำหรับการแพร่กระจายคลื่นทิศทางไปด้านหน้า (Forward direction) ออกเป็น 3 ชนิดหลัก ดังนี้ [21]

1. การลดทอนของสายเอง (Line attenuation)
2. การสะท้อนที่เกิดจากจุดของอิมพีแดนซ์ไม่ต่อเนื่องบนช่องสัญญาณการแพร่กระจาย (Reflection from point of impedance discontinuities)
3. การหน่วงของการแพร่กระจายไปด้านหน้า
(Delay of forward propagation)

การศึกษาฟังก์ชันการถ่ายโอนที่นำเสนอจะพิจารณาในรูปแบบทางความถี่ เนื่องจากการพิจารณาด้วยรูปแบบทางเวลาค่อนข้างยุ่งยาก และในสภาพแวดล้อมจริงของ โครงข่ายสายส่งกำลังไฟฟ้าภายในที่อาคารทั่วไปมีสาขา (branch) จำนวนมากออกไปตามส่วนต่างๆ ของตัวอาคาร ทำให้ช่องสัญญาณถูกแยกย่อยเป็น โครงข่าย N สาขา (N-branch network) มีความไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นการจำลองแบบช่องสัญญาณจึงแบ่งช่องสัญญาณกำลังไฟฟ้าออกเป็นกลุ่มของ โครงข่ายที่มีสาขาเดียวจำนวน N กลุ่มต่อเรียงกัน (cascade) เมตริกซ์การกระจายของแต่ละโครงข่ายสาขาเดียว (single-branch network) จะได้แสดงต่อไป และเมตริกซ์การกระจายตัวของช่องสัญญาณไฟฟ้าทั้งหมดคำนวณโดยใช้วิธีเมตริกซ์การกระจายลูกโซ่ (chain-scattering matrix)



รูปที่ 4.3 แผนผังสำหรับโครงข่ายที่มีสาขาเดียว (single-branch network)

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ S ของโครงข่ายที่มีสาขาเดียวตามแผนผังในรูปที่ 4.3 สามารถคำนวณโดย

กำหนดให้

l_1 คือ ความยาวสายจากปลายด้านซ้ายของสายวิถีถึงจุดแบ่ง (tap point)

l_2 คือ ความยาวสายของสายสาขาจากจุดแบ่ง

l_3 คือ ความยาวสายจากจุดแบ่งถึงปลายด้านขวาของสายวิถี

นำทฤษฎีสายส่งมาคำนวณหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ Z_{in1} , Z_{in2} , Z_{in} สัมประสิทธิ์การสะท้อน Γ_1 , Γ_2 ตามลำดับดังนี้

อินพุทอิมพีแดนซ์

$$Z_{in1} = Z_o \cdot \frac{Z_L + Z_o \cdot \tanh(\gamma l_3)}{Z_o + Z_L \cdot \tanh(\gamma l_3)} \quad (\Omega) \quad (4.5)$$

$$Z_{in2} = Z_o \cdot \frac{Z_b + Z_o \cdot \tanh(\gamma l_2)}{Z_o + Z_b \cdot \tanh(\gamma l_2)} \quad (\Omega) \quad (4.6)$$

$$Z_{in} = Z_o \cdot \frac{(Z_{in1} // Z_{in2}) + Z_o \cdot \tanh(\gamma l_1)}{Z_o + (Z_{in1} // Z_{in2}) \cdot \tanh(\gamma l_1)} \quad (\Omega) \quad (4.7)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อน

$$\Gamma_1 = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \quad (4.8)$$

$$\Gamma_2 = \frac{(Z_{in1} // Z_{in2}) - Z_o}{(Z_{in1} // Z_{in2}) + Z_o} \quad (4.9)$$

- เมื่อ
- Z_o คือ อิมพีแดนซ์แหล่งกำเนิด
(Source impedance)
- Z_L คือ อิมพีแดนซ์ของโหลดที่จุดปลายสาย
(Load impedance at path end)
- Z_b คือ อิมพีแดนซ์ของโหลดที่จุดปลายสาขา
(Load impedance at branch end)
- Z_{in1} คือ อินพุทอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายด้านขวาจุดแยก
(Input impedance of the network on the right of the tap)
- Z_{in2} คือ อินพุทอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายสาขา
(Input impedance of the branch network)
- Z_{in} คือ อินพุทอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายที่มีสาขาเดียว
(Input impedance of the single branch network)
- Γ_1 คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนจากปลายสาย
(Reflection coefficient from the path end)
- Γ_2 คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนจากจุดแยก
(Reflection coefficient from the tap point)
- Line 1 คือ สายไฟฟ้ากำลังวิธีมีพารามิเตอร์ของสาย (Z_o, γ)
(The path power line with line parameter: Z_o, γ)
- Line 2 คือ สายไฟฟ้ากำลังสาขาวิธีมีพารามิเตอร์ของสาย (Z_o, γ)
(The branch power line with line parameter: Z_o, γ)
- Line 3 คือ สายส่งมีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ 50 โอห์ม
(The transmission line with 50 ohms characteristic impedance)

ตาม [22] พารามิเตอร์ S_{11} และ S_{21} ของโครงข่ายเมตริกซ์การกระจัดกระจาย (scattering matrix) แสดงด้วยสมการ

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - 50}{Z_{in} + 50} \quad (4.10)$$

$$S_{21} = 2 \cdot \frac{V_3}{E_g} \quad (4.11)$$

เนื่องจากระบบโครงข่ายมีคุณสมบัติภาวะย้อนกลับ (reciprocal network) ทำให้พารามิเตอร์ $S_{12} = S_{21}$ และจากสมการที่ (4.11) การคำนวณหา S_{21} ไม่ได้ง่ายสำหรับการได้มาซึ่งอัตราส่วนของ E_g และ V_3 ดังนั้น สามารถคำนวณพารามิเตอร์ S_{21} โดยอ้อมด้วย

$$S_{21} = 2 \cdot \frac{V_3}{V_2} \cdot \frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{V_1}{E_g} \quad (4.12)$$

$$\frac{V_1}{E_g} = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_g} \quad (4.13)$$

และนำการเลื่อนระนาบอ้างอิง (Shift in reference plane) มาช่วยในการคำนวณด้วย

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{(1 + \Gamma_1) \cdot e^{-\gamma l_3}}{1 + \Gamma_1 \cdot e^{-\gamma l_3}} \quad (4.14)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{(1 + \Gamma_2) \cdot e^{-\gamma l_1}}{1 + \Gamma_2 \cdot e^{-\gamma l_1}} \quad (4.15)$$

แทนสมการ (4.13), (4.14) และ (4.15) ในสมการที่ (4.12) สามารถคำนวณ S_{21} ได้ วิธีเดียวกันนี้ยังสามารถใช้คำนวณพารามิเตอร์ S_{12} และ S_{22} โดยการสลับตำแหน่งของแหล่งกำเนิดกับโหลด

หลังจากวิเคราะห์โครงข่ายสาขาเดียว ส่วนที่เหลือ คำนวณเมตริกซ์การกระจายสำหรับการต่อเรียงกัน (Cascade) ของโครงข่ายสาขาเดียว โดยใช้ทฤษฎีไมโครเวฟทั่วไปมีอยู่ 2 วิธี ที่สามารถใช้ได้ วิธีแรกใช้เมตริกซ์การกระจายลูกโซ่ (หรือเมตริกซ์ที) และวิธีที่สองใช้กราฟแผนผังสัญญาณ สำหรับการจำลองแบบในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีแรก

ย้อนกลับไปเมตริกซ์ทีสำหรับโครงข่ายสามารถหาได้โดยการคูณเมตริกซ์ทีทั้งหมดที่ต่อเรียงกัน ความสัมพันธ์ระหว่างเมตริกซ์เอสและเมตริกซ์ทีแสดงตามสมการ (4.16)

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{S_{22}}{S_{21}} \\ \frac{S_{21}}{S_{11}} & S_{12} - \frac{S_{21}S_{22}}{S_{11}S_{21}} \\ \frac{S_{21}}{S_{11}} & S_{21} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

ดังนั้น เมตริกซ์ทั้งหมดสำหรับโครงข่ายที่มี N สาขา แทนด้วยสมการ (4.17)

$$[T] = \prod_{k=1}^N [T_k] \quad (4.17)$$

เมื่อ T_k = เมตริกซ์ที่
 k = ส่วนที่ต่อเรียงกันในโครงข่าย

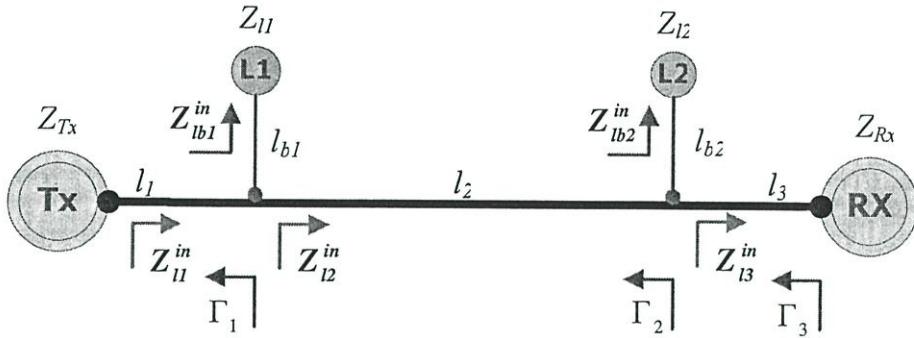
ลำดับสุดท้าย เมตริกซ์ S สำหรับโครงข่ายทั่วไปสามารถหาโดยใช้สมการแปลงกลับของสมการ (4.17) ได้ดังสมการ (4.18)

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_{21}}{T_{11}} & T_{22} - \frac{T_{21}T_{12}}{T_{11}} \\ 1 & -\frac{T_{12}}{T_{11}} \\ \frac{T_{21}}{T_{11}} & T_{11} \end{bmatrix} \quad 4.18$$

S_{21} ในสมการที่ (4.18) คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของโครงข่าย (Network transfer function)

4.2.1.2 การจำลองแบบช่องสัญญาณไฟฟ้ากำลังที่ใช้อ้างอิงในวิทยานิพนธ์

การจำลองแบบช่องสัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ใช้อ้างอิงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองแบบ โดยมีลักษณะของโครงข่าย 2 สาขา ดังรูปที่ 4.4 และรายละเอียดของพารามิเตอร์ในโครงข่ายแสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.4 แผนผังสำหรับโครงข่ายที่มี 2 สาขา (two-branch network)

ช่องสัญญาณที่นำมาทดสอบเป็นสายส่งสัญญาณกำลังไฟฟ้าที่มี 2 ขนาด คือ พื้นที่หน้าตัด 10 ตารางมิลลิเมตร และ 25 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์แบบกระจาย (distributed parameter) ตามตารางที่ 4.1 การทดสอบจะเปลี่ยนระยะทางระหว่างต้นทางกับปลายทางทั้งหมด 4 ระยะ คือ 3.2, 5.2, 7.2 และ 9.2 เมตร

4.2.1.3 สถานะแวดล้อมของการจำลองแบบ

สถานะแวดล้อมจริงของระบบกำลังไฟฟ้าจะถูกรบกวนจากหลายแหล่งกำเนิด และหลายรูปแบบ เช่น การเกิดฮาร์โมนิกของความถี่ 50 Hz, การกระเพื่อมของแรงดัน เป็นต้น ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจการรบกวนที่เกิดขึ้นชั่วขณะซึ่งอยู่ในกลุ่มของ Impulsive Transient คือ สัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซีฟ (Impulsive Noise) จะได้กล่าวถึงวิธีการจำลองในหัวข้อถัดไป ในส่วนของระบบให้มีการส่ง-รับข้อมูลจากเครื่องส่งต้นทางไปเครื่องรับปลายทาง ที่ระยะห่างแตกต่างกัน และพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในแบบจำลองประกอบด้วยค่าดังในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองระบบ

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์และรูปแบบวิธีการ
ระบบกำลังไฟฟ้า (Power System)	ระบบ 1 เฟส 2 สาย
ระดับแรงดัน (Voltage Level)	220 โวลต์ (Vrms)
ความถี่การซิกตัวอย่าง (Sampling Frequency)	$3 f_c$
ความถี่กลาง (Center Frequency: f_c)	12.5 MHz

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์และรูปแบบวิธีการ
อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR)	0-13
อัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Mbps)	14
จำนวนการส่งข้อมูลซ้ำสูงสุด (ครั้ง)	16
การมอดูเลชัน (Modulation Method)	QPSK
การเข้ารหัส (Coding)	
การเข้ารหัสรีดโซโลมอน	(11,15)
สัญญาณรบกวน (Noise)	
สัญญาณรบกวนในระบบ	สัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพ
ความน่าจะเป็นของการเกิดสัญญาณรบกวน (α)	0.1

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้า

ชนิดของตัวนำ	ทองแดง
ลักษณะของตัวนำ	พื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมตัน
ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ	10 ตารางมิลลิเมตร และ 25 ตารางมิลลิเมตร
ความยาวสาย (เมตร)	$l_1 = l_3 = l_{b1} = l_{b2} = 0.1, l_2 = 3, 5, 7, 9$
อิมพีแดนซ์ (โอห์ม)	$Z_g = Z_{b1} = Z_{b2} = Z_{Rx} = 50$

ตารางที่ 4.4 มาตรฐานของสายส่งกำลังไฟฟ้า

Power Line Standard	
Frequency Range	0.5 – 30 MHz (4-21 MHz *)
Bandwidth	25 MHz (17 MHz*)
No. of Subcarrier	128 Subcarrier (84 Subcarrier*)

หมายเหตุ: * จำนวนของคลื่นพาหีย่อย และช่วงความถี่ที่นำมาใช้งานจริง

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ที่แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณสายส่งกำลังไฟฟ้าได้ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งประกอบด้วย

- ค่าคงตัวของการแพร่กระจาย
- อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ
- สัมประสิทธิ์การสะท้อน
- อินพุตอิมพีแดนซ์

ตารางที่ 4.5 การคำนวณคุณลักษณะของช่องสัญญาณตามแบบจำลองรูปที่ 4.4

ค่าคงตัวการแพร่กระจาย (Propagation constant)	สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient)	อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)
$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$	$\Gamma_1 = \frac{(Z_{lb1} // Z_{l2}) - Z_o}{(Z_{lb1} // Z_{l2}) + Z_o}$	$Z_{lb1}^{in} = Z_o \frac{Z_{l1} + Z_o \tanh(\gamma l_{b1})}{Z_{l1} + Z_o \tanh(\gamma l_{b1})}$
อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance)	$\Gamma_2 = \frac{(Z_{lb2} // Z_{l3}) - Z_o}{(Z_{lb2} // Z_{l3}) + Z_o}$	$Z_{lb2}^{in} = Z_o \frac{Z_{l2} + Z_o \tanh(\gamma l_{b2})}{Z_{l2} + Z_o \tanh(\gamma l_{b2})}$
$Z_o = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}}$	$\Gamma_3 = \frac{(Z_{Rx} - Z_o)}{(Z_{Rx} + Z_o)}$	$Z_{l1}^{in} = Z_o \frac{(Z_{lb1}^{in} // Z_{l2}^{in}) + Z_o \tanh(\gamma l_1)}{Z_o + (Z_{lb1}^{in} // Z_{l2}^{in}) \cdot \tanh(\gamma l_1)}$
เมื่อ R คือ ความต้านทาน (Ω/m) L คือ ความเหนี่ยวนำ (H/m) G คือ ความนำ (S/m) C คือ ความจุ (F/m)		$Z_{l2}^{in} = Z_o \frac{(Z_{lb2}^{in} // Z_{l3}^{in}) + Z_o \tanh(\gamma l_2)}{Z_o + (Z_{lb2}^{in} // Z_{l3}^{in}) \cdot \tanh(\gamma l_2)}$
		$Z_{l3}^{in} = Z_o \frac{Z_{Rx} + Z_o \tanh(\gamma l_3)}{Z_{Rx} + Z_o \tanh(\gamma l_3)}$

ฟังก์ชันการถ่ายโอนของแบบจำลองสามารถเขียนได้ดังสมการ (4.19)

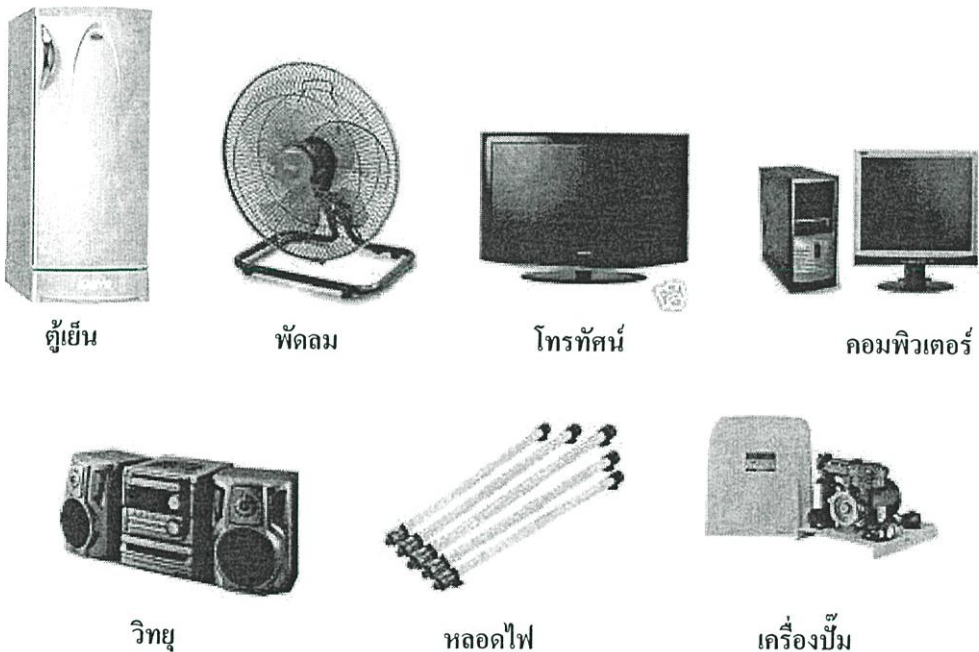
$$H(\omega) = 2 \frac{(1 + \Gamma_3(\omega)) e^{-\gamma(\omega)l_3}}{1 + \Gamma_3(\omega) e^{-\gamma(\omega)l_3}} \cdot \frac{(1 + \Gamma_2(\omega)) e^{-\gamma(\omega)l_2}}{1 + \Gamma_2(\omega) e^{-\gamma(\omega)l_2}} \cdot \frac{(1 + \Gamma_1(\omega)) e^{-\gamma(\omega)l_1}}{1 + \Gamma_1(\omega) e^{-\gamma(\omega)l_1}} \cdot \frac{Z_{l1}^{in}(\omega)}{Z_{l1}^{in}(\omega) + Z_{Tx}} \quad (4.19)$$

จากสมการที่ (4.19) สามารถจัดสมการฟังก์ชันการถ่ายโอนอยู่ในรูปแบบทั่วไป กรณีที่จำนวนสาขา มี N สาขาดังสมการ (4.20)

$$H(\omega) = 2 \prod_{n=1}^{N+1} \left(\frac{(1+\Gamma_n(\omega)) e^{-\gamma(\omega)l_n}}{1+\Gamma_n(\omega) e^{-\gamma(\omega)l_n}} \right) \frac{Z_{l1}^{in}(\omega)}{Z_{l1}^{in}(\omega)+Z_{Tx}} \quad (4.20)$$

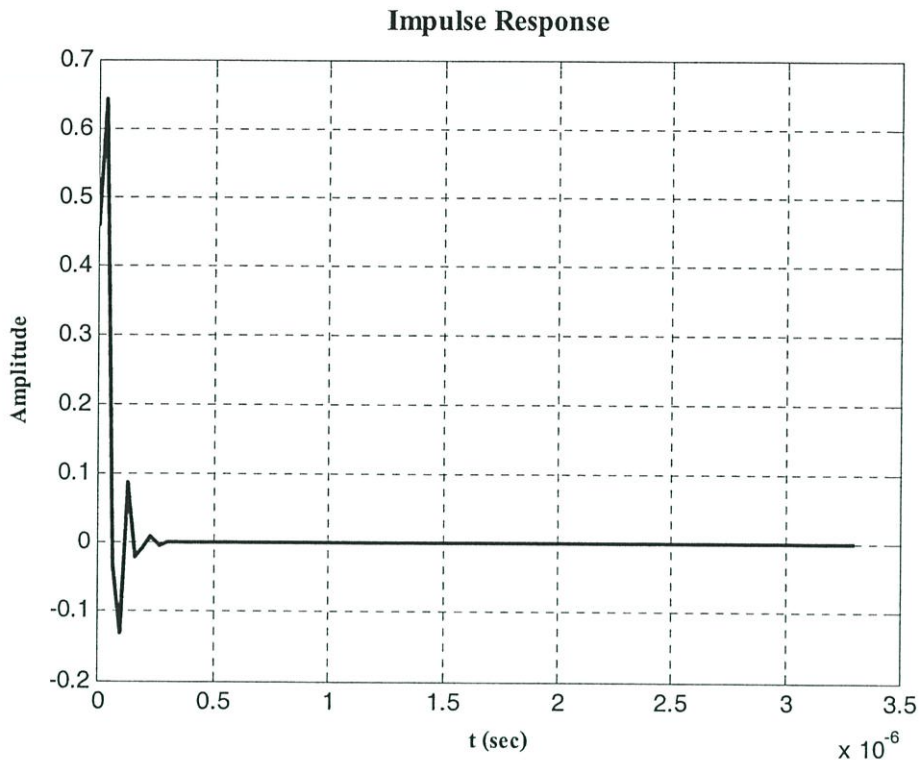
4.3 แบบจำลองสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพ

การจำลองแบบสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์มีอยู่หลากหลายวิธี โดยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการจำลองแบบ Binary-state Model สำหรับการสื่อสารข้อมูลบนช่องสัญญาณไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพที่เกิดจากแหล่งจ่ายอื่นๆ ที่มีช่วงของแถบกำลังงานไฟฟ้าครอบคลุมถึงช่วงการสื่อสารบนช่องสัญญาณกำลังไฟฟ้า (0.5 MHz – 30 MHz)



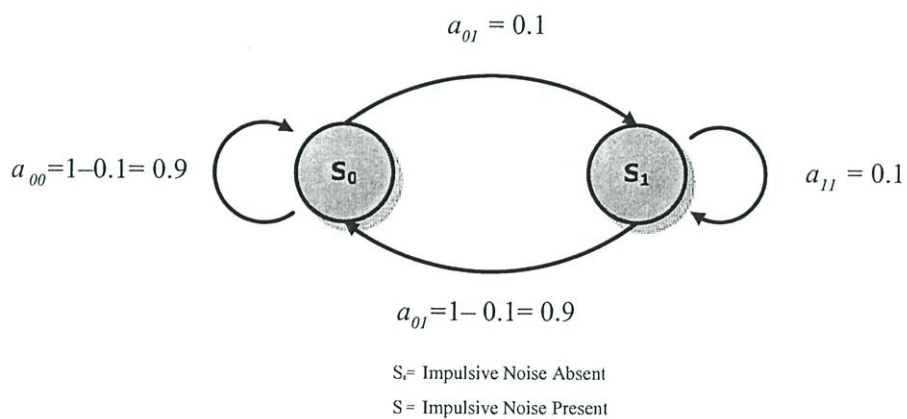
รูปที่ 4.5 โหลดที่มีทำให้เกิดสัญญาณรบกวนของระบบสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า

ขั้นตอนการจำลองสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพ เริ่มจากการสุ่มข้อมูลเลขฐานสองโดยใช้กระบวนการของ Bernoulli $b(m)$ นำมาคูณกับกระบวนการแบบเกาส์ $n(m)$ เกิดเป็นสัญญาณขึ้นมาใหม่ หลังจากนั้นส่งสัญญาณดังกล่าวผ่านเข้าไปในวงจรกรอง $h(m)$ สำหรับการทดลองนี้วงจรกรองแถบความถี่ที่นำมาใช้เป็นวงจรกรองแบบ Butter worth Order เท่ากับ 2 ซึ่งผลตอบสนองต่ออิมพัลส์แสดงดังรูปที่ 4.6 และสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพที่มีผลกระทบต่อ การสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าจะต้องมีแถบความถี่อยู่ในช่วง 0.5 MHz – 30 MHz



รูปที่ 4.6 แผนภาพแสดงสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพแบบไบนารีสเตท

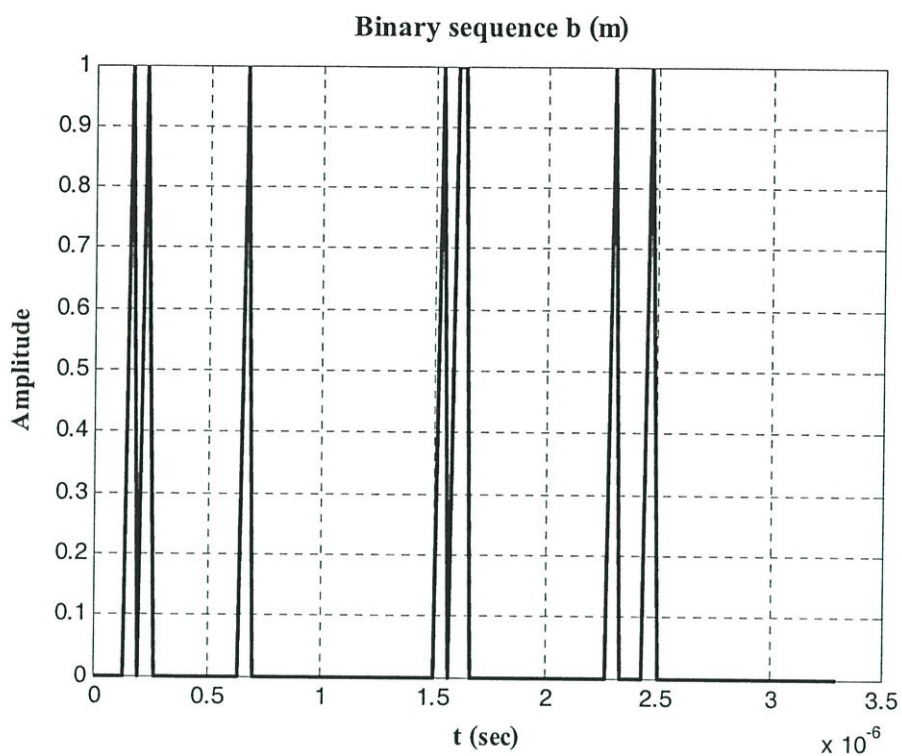
สัญญาณรบกวนที่เกิดจากแหล่งต่างๆ เมื่อผ่านเข้ามายังเครื่องรับของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ภาครับจะประกอบด้วยวงจรแถบความถี่ของสายส่งกำลังไฟฟ้าใช้ ดังนั้น สัญญาณรบกวนที่มีผลต่อการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าต้องมีความถี่ในช่วงดังกล่าวด้วยเช่นกัน



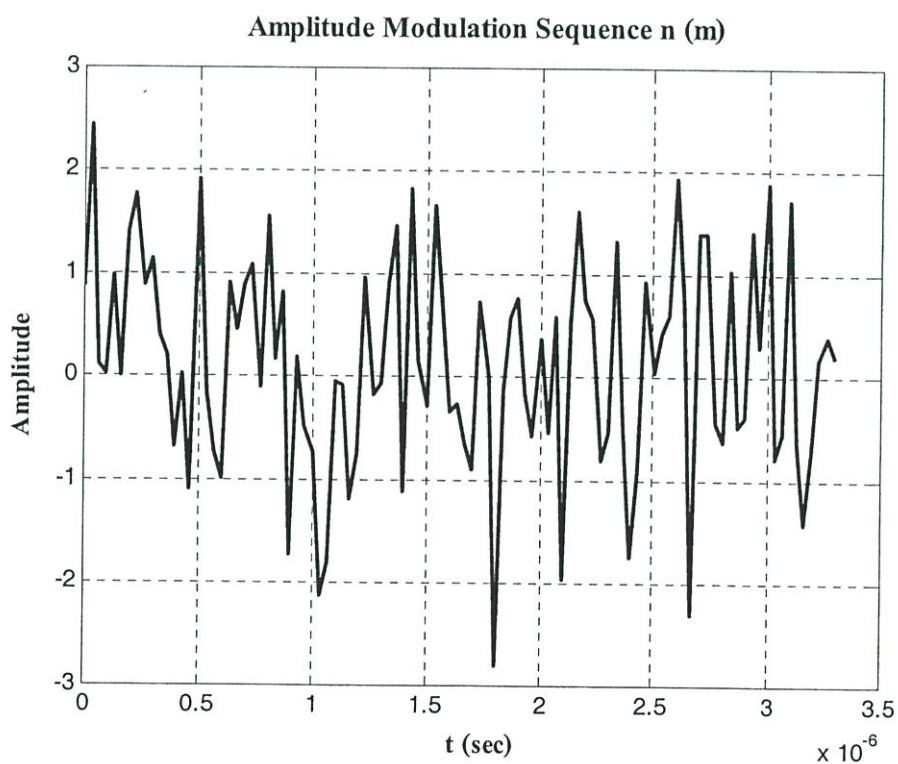
รูปที่ 4.7 แผนภาพแสดงสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพแบบไบนารีสเตท

ในรูปที่ 4.7 แสดงลำดับของการจำลองแบบสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพโดยกำหนด $\alpha =$

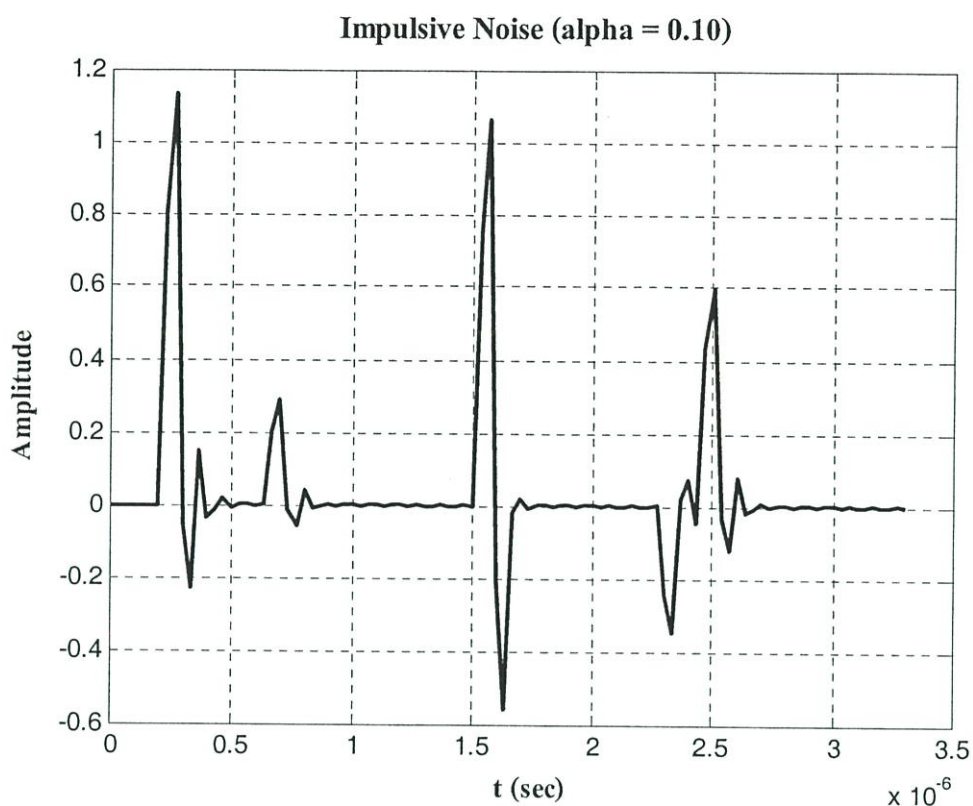
0.1



รูปที่ 4.8 แสดง Binary Sequence สำหรับสร้างสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพ



รูปที่ 4.9 แสดง Amplitude Modulation Sequence สำหรับสร้างสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพ

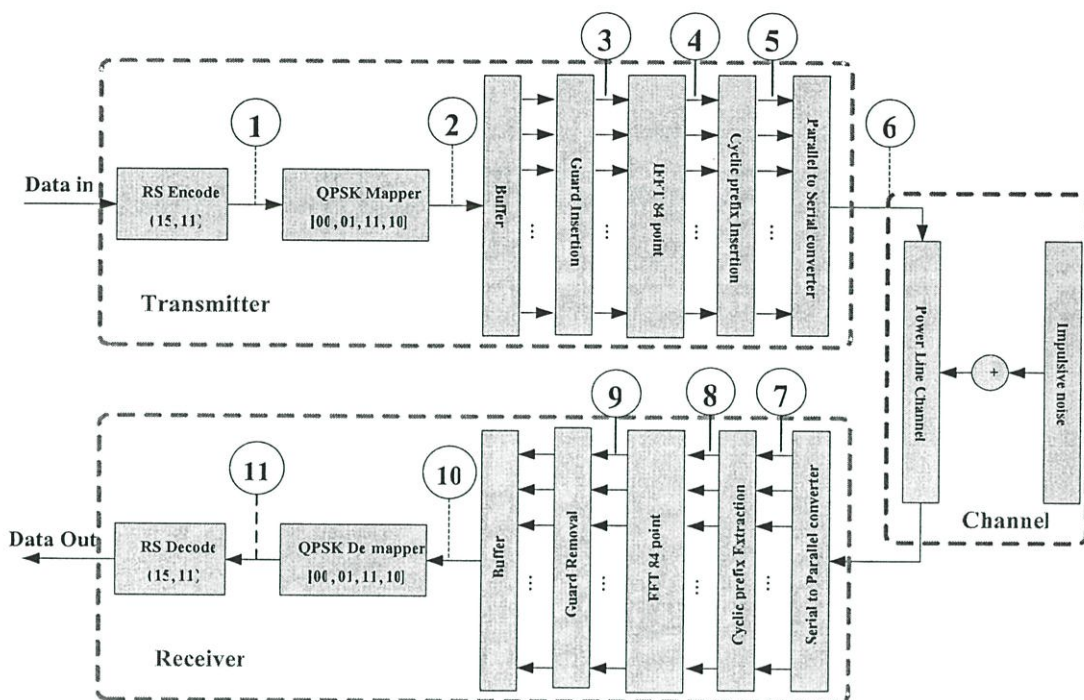


รูปที่ 4.10 แผนภาพแสดงสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพแบบไบนารีสเตทจากแบบจำลอง

โดยปกติสัญญาณอิมพัลส์ในทางอุดมคติซึ่งไม่เกิดขึ้นจริงในความเป็นจริงจึงต้องมีวงจรกรองความถี่ที่เหมาะสมเพื่อจำลองสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพที่สามารถเกิดได้ดังสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพที่แสดงในรูปที่ 4.10

สำหรับการทดลองผลกระทบจากสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพจะจำลองแบบในเชิงสถิติของจำนวนอิมพัลส์ที่แทรกสอดเข้าในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า ดังนั้น การเกิดสัญญาณรบกวนนี้จึงสามารถเกิดได้หลายแบบ ซึ่งสามารถกำหนดอัตราการเกิดสัญญาณรบกวนได้โดยการกำหนดค่า α สำหรับการทดลองนี้จะกำหนดค่า $\alpha = 0.1$ และได้แสดงไว้แล้วในข้างต้น ในส่วนของการแสดงผลจะแสดงผลกระทบจากอัตราส่วนของ SNR (Signal to Noise Ratio) โดย สัญญาณรบกวน (Noise: N) คือ สัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพ เมื่อเพิ่ม SNR ให้สูงขึ้นเป็นผลให้กำลังงานของสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพน้อยกว่ากำลังงานของสัญญาณ (Signal: S) ตามสัดส่วนกำลังงานที่จะนำไปคำนวณอัตราบิดผิดพลาด

4.4 การจำลองการทำงานระบบ



รูปที่ 4.11 แผนผังแสดงส่วนประกอบของการจำลองระบบ

การทำงานของระบบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ภาครับ ภาคส่ง และ ช่องสัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซีฟ โดยในแต่ละส่วนประกอบไปด้วยส่วนย่อยๆ ดังรูปที่ 4.11 และในการจำลองแบบนี้ใช้โปรแกรม Matlab ในการจำลองแบบ โดยแบ่งการทำงานออกเป็นส่วนๆ ดังนี้

- ส่วนข้อมูลที่ส่งเข้าระบบ ทำการสร้างแพ็คเกจข้อมูลมีขนาด 4400 บิตต่อหนึ่งแพ็คเกจ ภายในแพ็คเกจข้อมูลนี้จะรวมองค์ประกอบทุกส่วนของข้อมูล ส่วนหัว ส่วนข้อมูล และส่วนท้ายโดยมีการกำหนดช่วงเวลาการเกิดแบบสุ่ม ซึ่งแต่ละแพ็คเกจข้อมูลไม่มีการเกิดในเวลาเดียวกัน

- ส่วนการเข้ารหัสข้อมูลแบบรีดโซโลมอน (RS code) ในส่วนนี้ทำการเข้ารหัสด้วย (15, 11) โดยจำนวนสัญลักษณ์ข้อมูลที่นำมาเข้ารหัส 11 สัญลักษณ์ และหลังจากการเข้ารหัสข้อมูลแล้วจะมีจำนวนสัญลักษณ์เพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 15 สัญลักษณ์ ดังจุดที่ 1

- ส่วนการมอดูเลตสัญญาณด้วย QPSK (QPSK mapper) เป็นส่วนที่ทำการแมป (มอดูเลตสัญญาณ) สัญญาณจากข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสแบบรีดโซโลมอนแล้ว เพื่อให้ได้สัญญาณย่อยที่มีเฟสต่างกัน $\pi/4$ และกำหนดให้จำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 84 คลื่นพาห่อย่อย

- ส่วนการแปลงข้อมูลจากอนุกรมเป็นข้อมูลแบบขนาน ในส่วนนี้ทำเพื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างสัญลักษณ์ (Guard insertion) อันเป็นการลดการแทรกสอดระหว่างคลื่นพาห์ ดังรูปที่ 2.21 ตามลำดับ

- ส่วนการแปลงฟูรีเยร์กลับแบบเร็ว จำนวน 84 จุด (IFFT 84 point) ส่วนนี้จะทำการแปลงจากโดเมนทางความถี่ ไปเป็นโดเมนทางเวลา เพื่อให้สามารถเพิ่ม cyclic prefix เข้าไปเพื่อลดการเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ ดังจุดที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ

โดยการทำขั้นตอนที่กล่าวมานี้ อัตราการส่งข้อมูลจะถูกแบ่งย่อยเพื่อลดอัตราการส่งข้อมูลให้ต่ำลง (โดยวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้มีอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 14 Mbps) และอัตราการส่งข้อมูลจะมีค่ากลับมาเหมือนเดิมเมื่อผ่านตัวแปลงข้อมูลจากขนาน ไปเป็นอนุกรม เพื่อส่งเข้าไปในสายส่งที่มีสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซีฟ ดังจุดที่ 6

- ส่วนทางภาครับ รับสัญญาณข้อมูลที่มีถูกแทรกสอดด้วยสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ซีฟเข้าไปด้วยนั้น ซึ่งการนำสัญญาณกลับมาโดยการทำการกระบวนการย้อนกลับของภาคส่งมีดังนี้คือ ทำการแปลงสัญญาณข้อมูลที่ได้รับ ได้ จากรูปแบบอนุกรมเป็นขนาน เพื่อตัดส่วนของ cyclic prefix ออกต่อมานำข้อมูลทำการตัดส่วนของ cyclic prefix ออกแล้วมาทำการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว และถอดส่วนช่วงเวลาป้องกันออกที่เดิมมาที่ภาคส่ง ดังจุดที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

จากนั้นทำการแมปสัญญาณกลับ (เดิมอคูเลตด้วย QPSK) เพื่อผู้สัญญาณกลับคืนมานั่นเอง ดังจุดที่ 9-10 สุดท้ายทำการคำนวณจำนวนบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ โดยมีสมการดังนี้

$$BER = \frac{E}{B} \quad (4.21)$$

E คือ จำนวนบิตที่ผิดพลาดทั้งหมด

B คือ จำนวนบิตทั้งหมดที่ใช้ในการส่งในระบบ

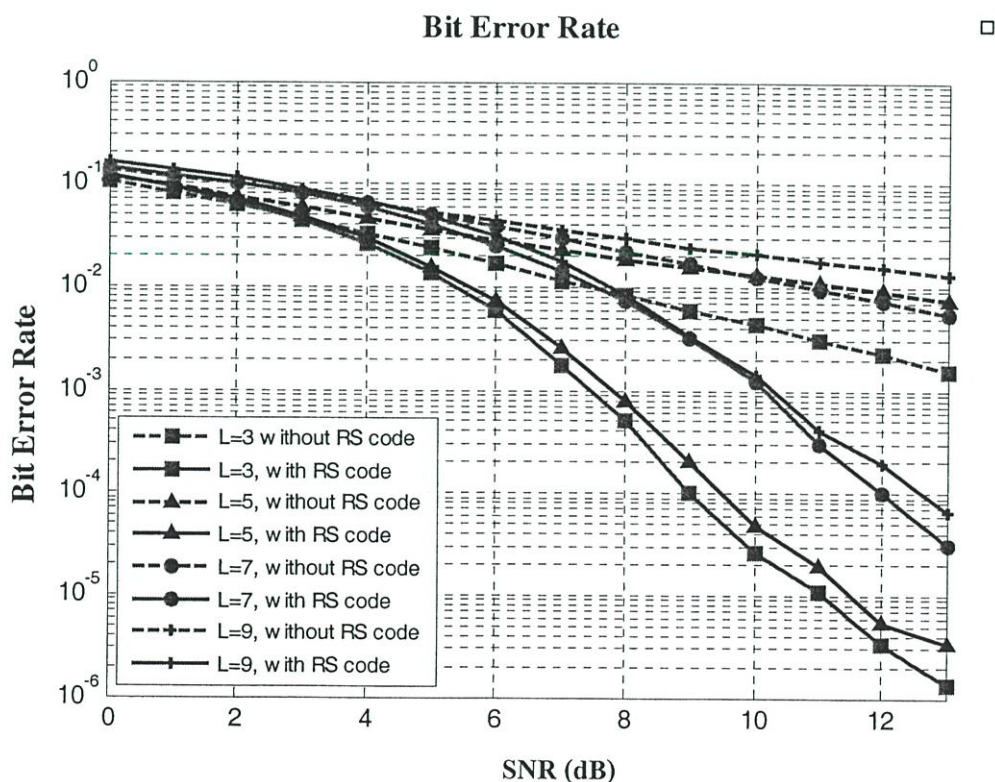
อย่างไรก็ตามเมื่อนำการส่งข้อมูลแบบ TCP/IP มาใช้ ดังนั้นเมื่อเกิดบิตผิดพลาดขึ้น ซึ่งระบบสามารถตรวจจับข้อมูลผิดพลาดได้ที่ ระดับชั้นที่ 2 ของทั้ง 5 ระดับ TCP/IP โมเดล

ดังนั้นเมื่อเกิดบิตผิดพลาดระบบจะทำการส่งข้อมูลที่ผิดพลาดซ้ำใหม่อีกครั้ง จนกว่าจะส่งข้อมูลนั้นๆ สำเร็จ โดยกำหนดให้การส่งซ้ำได้ไม่เกิน 16 ครั้ง เพื่อลดค่าหน่วงเวลาให้น้อยลง และเมื่อเกิน 16 ครั้งจะถือว่าข้อมูลนั้นเสียและตัดทิ้งไปเลย ตามหัวข้อที่ 2.5.2

4.5 ผลวิเคราะห์การจำลองแบบ

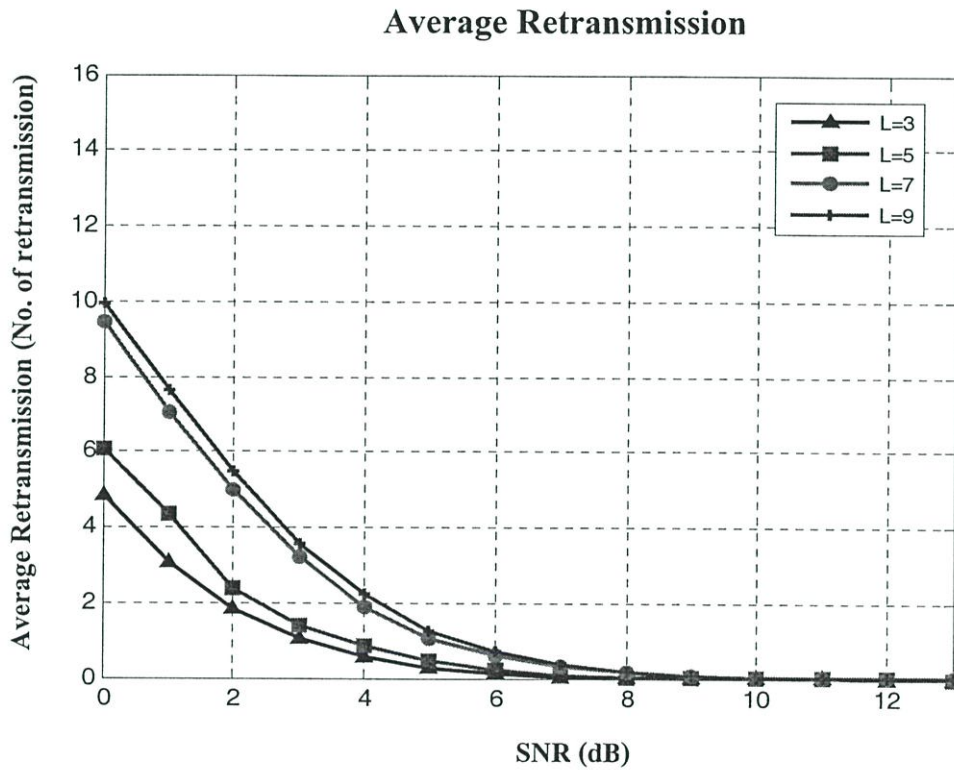
ผลการทดลองที่ได้จากการจำลองแบบช่องสัญญาณสายส่งกำลังไฟฟ้า และสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพ ที่นำเทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ตั้งฉาก และการเข้ารหัสรีดโซโลมอน โดยทำการปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่หน้าตัดของสาย 10 ตารางมิลลิเมตร และ 25 ตารางมิลลิเมตร ร่วมกับการปรับค่าระยะทางระหว่างเครื่องรับกับเครื่องส่ง เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อระบบ ดังนี้

จากรูปที่ 4.12-รูปที่ 4.14 เป็นผลการวิเคราะห์ที่ได้จากจำลองแบบสายส่งกำลังไฟฟ้าที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 10 มิลลิเมตร โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้มีดังนี้ รูปที่ 4.12 แสดงอัตราบิดผิดพลาด ในการส่งข้อมูลที่พื้นที่หน้าตัดสายส่งกำลังไฟฟ้า 10 มิลลิเมตร โดยเปลี่ยนค่าระยะทางระหว่างเครื่องรับกับเครื่องส่ง ทั้งที่ใช้ และไม่ใช้การเข้ารหัสรีดโซโลมอน เพื่อเปรียบเทียบผลของการนำ การเข้ารหัสรีดโซโลมอนมาลดโอกาสที่ข้อมูลจะผิดพลาด ที่ความยาวสายส่งกำลังไฟฟ้าต่างๆ กัน ประกอบด้วย 3 เมตร, 5 เมตร, 7 เมตร และ 9 เมตร ผลที่ได้พบว่าข้อมูลที่ส่งจากต้นทางผ่าน ช่องสัญญาณที่มีการรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพนั้น ที่ระยะห่างเท่ากับรหัสรีดโซโลมอนช่วยลดความผิดพลาดของข้อมูลได้



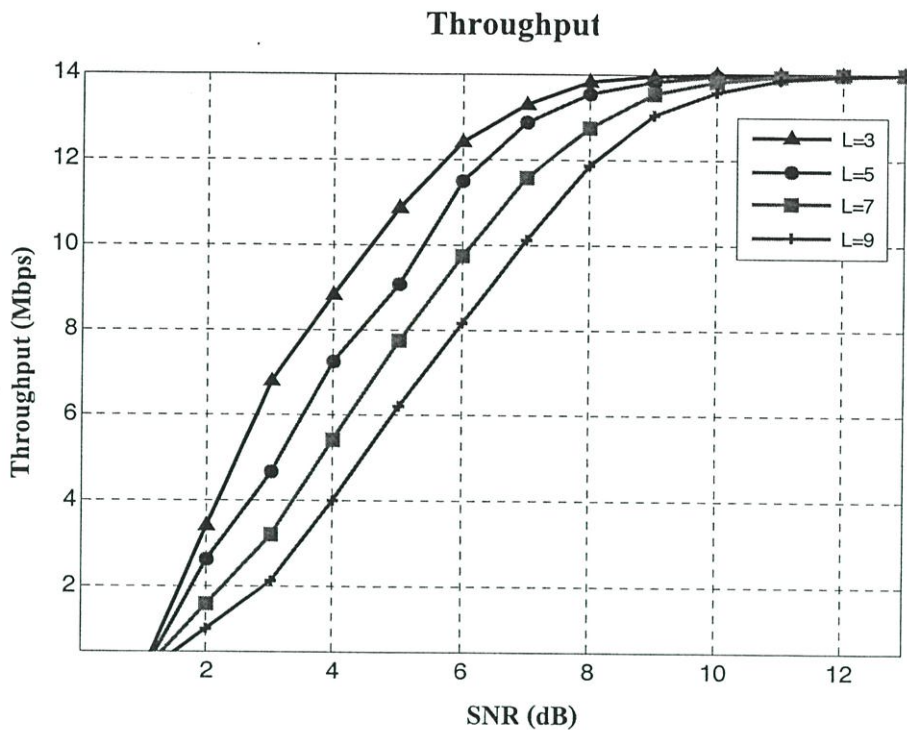
รูปที่ 4.12 อัตราบิดผิดพลาดของสายส่งกำลังไฟฟ้าพื้นที่หน้าตัด 10 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.13 แสดงค่าเฉลี่ยของการส่งซ้ำของข้อมูล กรณีปลายทางตรวจสอบพบความผิดพลาดของข้อมูล พบว่าแนวโน้มของค่าระยะห่างของเครื่องส่งกับเครื่องรับที่มากขึ้นมีผลต่อการส่งซ้ำของข้อมูล หรือกล่าวได้ว่า ค่าเฉลี่ยของการส่งซ้ำแปรผันตรงกับความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้า เนื่องจากยิ่งความยาวสายส่งกำลังไฟฟ้ามกขึ้น การลดทอนกำลังงานภายในสายส่งกำลังไฟฟ้า ทำให้สัญญาณข้อมูลที่ได้รับได้ผิดพลาด อีกทั้งยังถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนด้วย



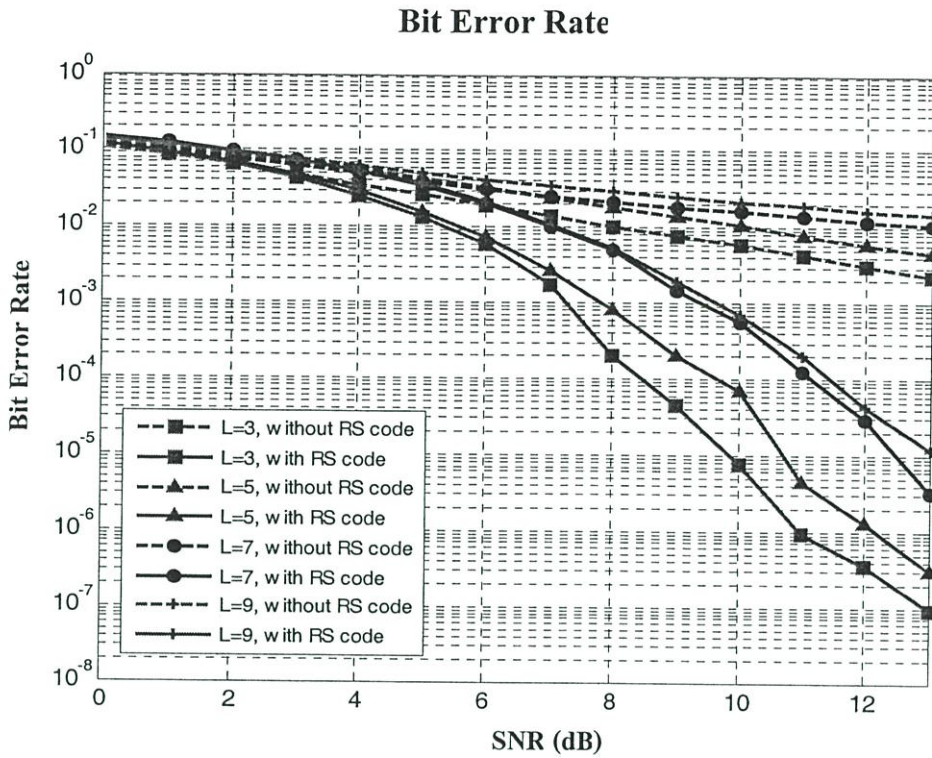
รูปที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยการส่งซ้ำของสายส่งกำลังไฟฟ้าพื้นที่หน้าตัด 10 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.14 แสดงค่าวิสัยสามารถของสายส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งเป็นดัชนีตัวหนึ่งที่สามารถบอกประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้ ค่าวิสัยสามารถที่ได้จากการจำลองแบบที่สายส่งกำลังไฟฟ้าพื้นที่หน้าตัด 10 ตารางมิลลิเมตร นั้นพบว่าที่ค่ากำลังของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพเท่ากัน และที่ความยาวสายต่างกันพบว่าเมื่อความยาวสายเพิ่มขึ้นค่าวิสัยสามารถจะมีค่าน้อยลง ดังนั้น รูปที่ 4.12 – 4.14 มีความสัมพันธ์กัน คือ เมื่อสายส่งกำลังไฟฟ้ามีความยาวเพิ่มขึ้น ที่พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน สภาวะแวดล้อมเดียวกัน ความน่าผิดพลาดของข้อมูล และ ค่าเฉลี่ยของการส่งซ้ำเพิ่มขึ้นตามกัน ส่วนค่าวิสัยสามารถนั้นจะมีค่าผกผันกัน

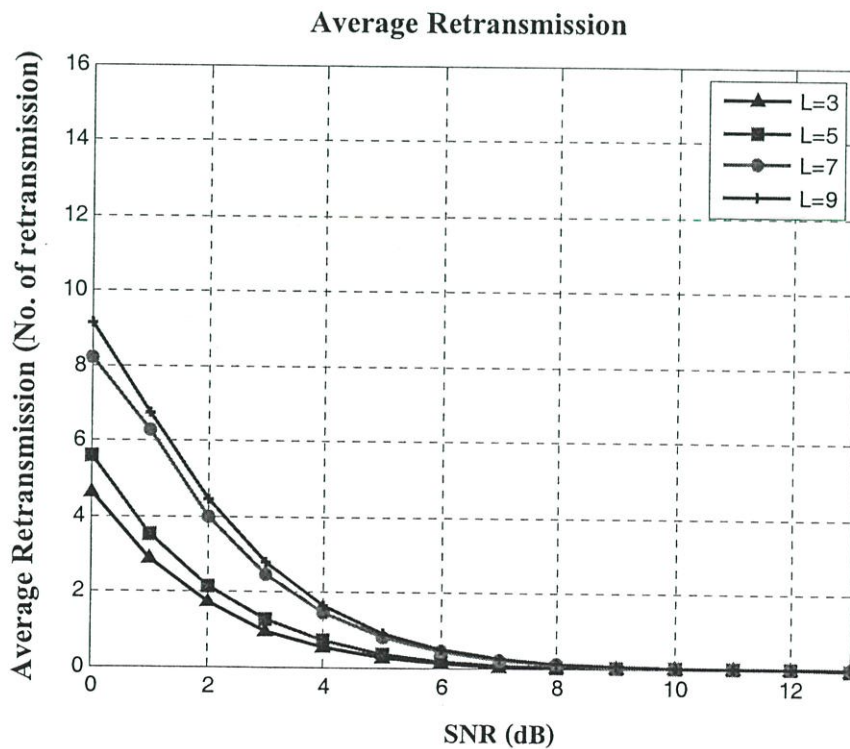


รูปที่ 4.14 ค่าวิสัยสามารถของสายส่งพื้นที่หน้าตัด 10 มิลลิเมตร

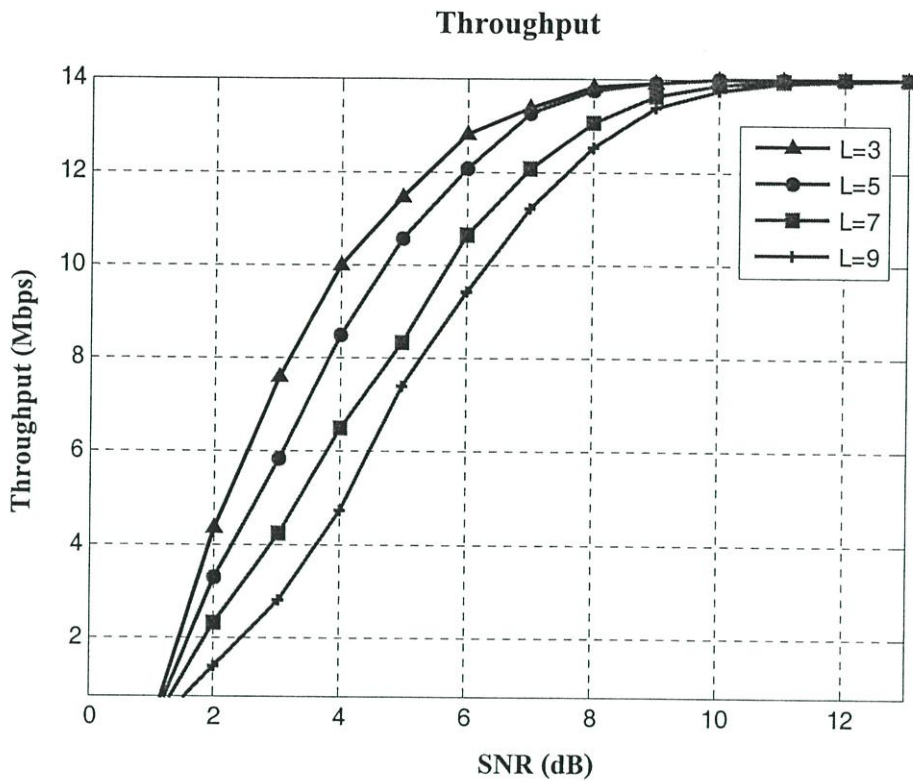
จากรูปที่ 4.15-รูปที่ 4.17 เป็นผลการวิเคราะห์ที่ได้จากจำลองแบบสายส่งกำลังไฟฟ้าที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 25 มิลลิเมตร โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้มีดังนี้ รูปที่ 4.15 รูปที่ 4.16 รูปที่ 4.17 แสดง อัตราบิดผิวดัด ค่าเฉลี่ยของการส่งซ้ำ และค่าวิสัยสามารถตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้มี แนวโน้ม และความสัมพันธ์ของดัชนีชี้วัดทั้งสามค่าคล้ายกัน คือ เมื่อสายส่งกำลังไฟฟ้ามีความยาวเพิ่มขึ้น ที่พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกัน ความน่าผิดพลาดของข้อมูล และ ค่าเฉลี่ยของการส่งซ้ำเพิ่มขึ้นตามกัน ส่วนค่าวิสัยสามารถนั้นจะมีค่าผกผันกัน



รูปที่ 4.15 อัตราบิตผิดพลาดของสายส่งกำลังไฟฟ้าพื้นที่หน้าตัด 25 มิลลิเมตร

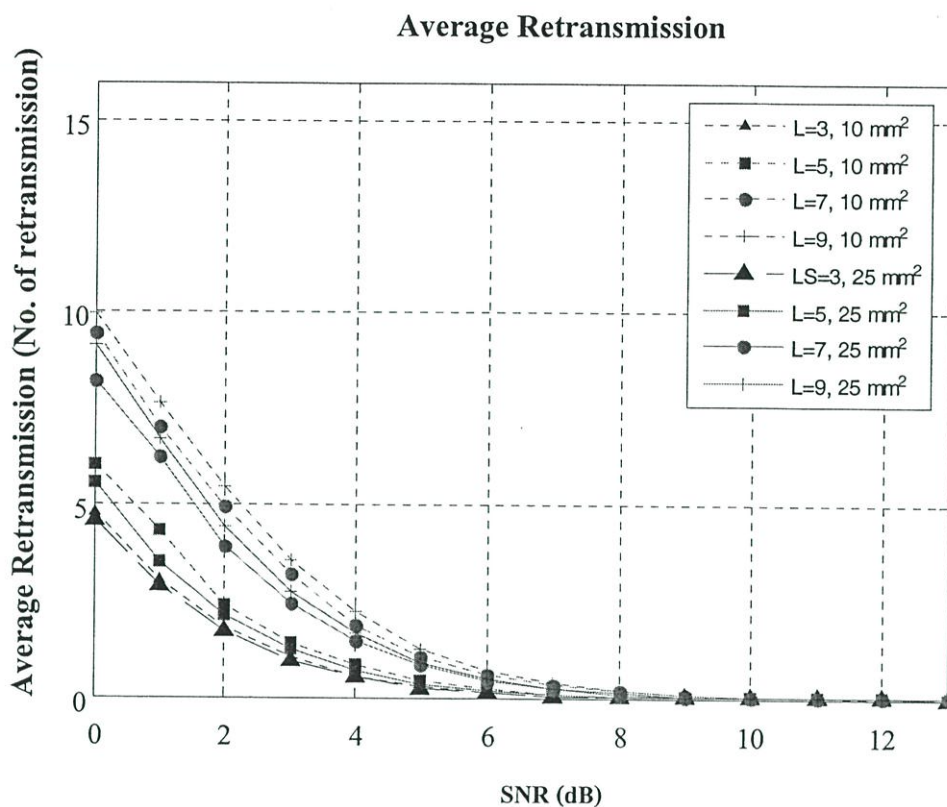


รูปที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยการส่งซ้ำของสายส่งกำลังไฟฟ้าพื้นที่หน้าตัด 25 มิลลิเมตร



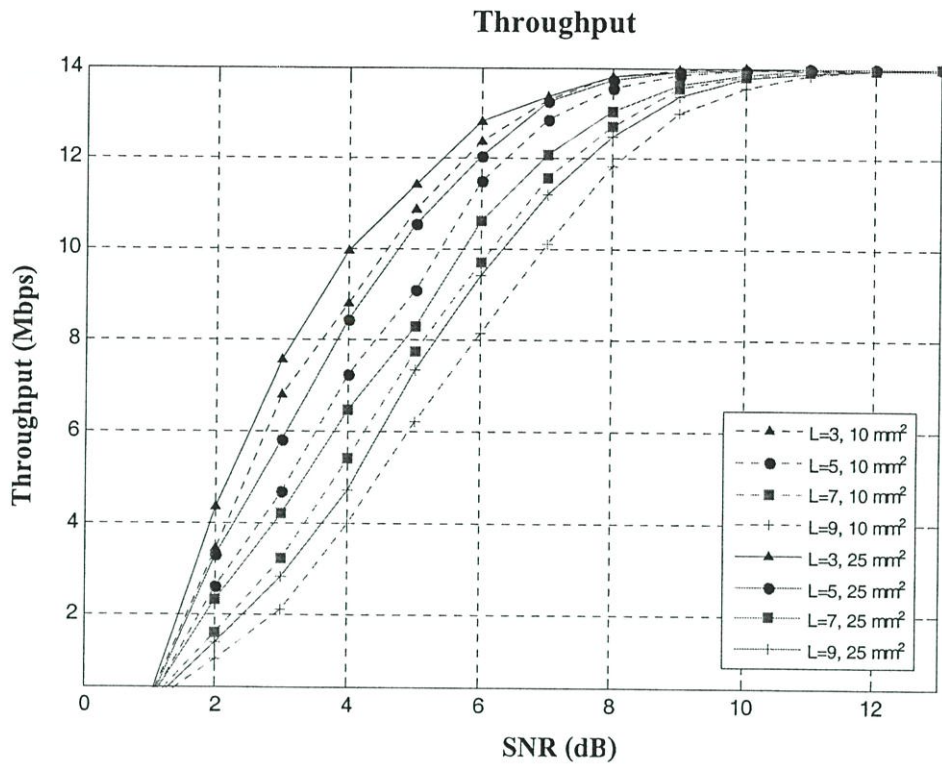
รูปที่ 4.17 ค่าวิสัยสามารถของสายส่งพื้นที่หน้าตัด 25 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.15 เปรียบเทียบค่าอัตราบิดผิดพลาด โดยเปรียบเทียบขนาดของพื้นที่หน้าตัดของสายส่งกำลังไฟฟ้าขนาด 10 ตารางมิลลิเมตร กับ 25 ตารางมิลลิเมตร ทั้งข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสรีดโซโลมอน และข้อมูลที่ไม่ได้ผ่านการเข้ารหัสรีดโซโลมอน พบว่าที่ขนาดพื้นที่ 25 ตารางมิลลิเมตรอัตราบิดผิดพลาดน้อยกว่าขนาดพื้นที่หน้า 10 ตารางมิลลิเมตร ผลมาจากสายส่งที่มีขนาดใหญ่สามารถส่งผ่านข้อมูลได้ในปริมาณที่มากกว่า ทั้งยังมีการลดทอนภายในสายน้อยกว่า ทำให้ข้อมูลที่ส่งมีความถูกต้องมากกว่าที่สถานะแวดล้อมของการรบกวนเดียวกัน



รูปที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยการส่งซ้ำของสายส่งพื้นที่หน้าตัด 10 มิลลิเมตร และ 25 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.18 แสดงค่าเฉลี่ยของการส่งซ้ำเปรียบเทียบขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายส่งกำลังไฟฟ้า พบว่าที่ความยาวเท่ากัน พื้นที่หน้าตัด 10 ตารางมิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยของการส่งซ้ำสูงกว่า 25 ตารางมิลลิเมตร ผลดังกล่าวมาจากความผิดพลาดของข้อมูลที่มีมากกว่าตามรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.19 วิสัยสามารถของสายส่งพื้นที่หน้าตัด 10 มิลลิเมตร และ 25 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.19 แสดงค่าวิสัยสามารถเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของสายส่งกำลังไฟฟ้า เช่นกันจากการทดลองพบว่า พื้นที่หน้าตัด 10 ตารางมิลลิเมตร มีค่าวิสัยสามารถต่ำกว่า 25 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งรูป 4.18 – รูปที่ 4.19 มีความสัมพันธ์กัน คือ เมื่อขนาดพื้นที่หน้าตัดมีขนาดมากขึ้น แนวโน้มของอัตราบิดผิดพลาดและค่าเฉลี่ยของการส่งซ้ำแปรผกผันกัน ส่วนค่าวิสัยสามารถแปรผันตามกัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารได้เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตประจำวันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทำให้มีผู้ค้นคว้า วิจัย พัฒนานำเทคโนโลยีแบบมีสาย (wire line) มาศึกษาอีกครั้ง เนื่องด้วยโครงข่ายแบบใช้สายที่ทราบกันนั้น จำเป็นต้องติดตั้งสายสื่อสารสัญญาณใหม่ ทำให้สิ้นเปลือง เวลา และค่าใช้จ่ายจากปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนานำสายส่งกำลังไฟฟ้าที่มีติดตั้งตามบ้านพักอาศัยและอาคารสำนักงาน มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยการประยุกต์นำสายส่งกำลังไฟฟ้ามาเป็นเส้นทางสื่อสารข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์เรียกเทคโนโลยีนี้ว่า “เทคโนโลยีการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าภายในอาคาร (Indoor Power Line Communication: Indoor PLC)” เพื่อการรับ-ส่งข้อมูล กล่าวคือ ที่ใดที่มีสายส่งกำลังไฟฟ้าและปลั๊กไฟ ที่นั่นก็สามารถสร้างระบบเครือข่ายสำหรับสื่อสารข้อมูลขึ้นมาใช้งานได้ทันที โดยไม่ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายสื่อสารสัญญาณ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ การรับ-ส่งข้อมูลด้วย โพรโทคอล TCP/IP ผ่านระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าภายในอาคารที่มีสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ชีพบนพื้นฐานของชั้นกายภาพ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยใช้สายส่งกำลังไฟฟ้าที่มีขนาดและความยาวต่างกัน ซึ่งในการจำลองแบบได้นำเทคนิคการเข้าถึงแบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉากกัน ร่วมกับการเข้ารหัสแบบรีดโซโลมอน เพื่อลดการผิดพลาดของข้อมูล และผลของการจำลองแบบจะพิจารณาออกมาในรูปของ อัตราบิตผิดพลาด (Bits Error Rate) ค่าเฉลี่ยของการส่งซ้ำ (Average Retransmissions) และค่าวิสัยสามารถ (Throughput) จากผลการจำลองแบบด้วยโปรแกรม Matlab พบว่า ขนาดและความยาวของสายส่ง มีผลต่อการรับ-ส่งข้อมูล ที่พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน เปลี่ยนแปลงความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้า ความผิดพลาดของข้อมูล และค่าเฉลี่ยการส่งซ้ำจะแปรผันตามกับความยาวสาย ในส่วนของค่าวิสัยสามารถจะแปรผกผันกัน เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ความยาวสายเท่ากัน เปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด ค่าความผิดพลาดของข้อมูล และค่าเฉลี่ยการส่งซ้ำจะแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัด และค่าวิสัยสามารถจะแปรผันตามกัน

วิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เป็นเทคนิคหนึ่งเท่านั้นที่ช่วยลดความผิดพลาดของข้อมูล และปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบการสื่อสารข้อมูลผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า ยังมีวิธีการปรับปรุงการทำงานที่น่าสนใจอยู่อีกมาก อาทิเช่น การปรับปรุงวงจรกรองสัญญาณ เป็นต้น อีกทั้งรูปแบบการเข้ารหัสข้อมูลนั้น ได้มีการสร้างรูปแบบการเข้ารหัสมากมาย รวมถึงสัญญาณรบกวนใน

ระบบการทำงานก็ขึ้นกับสภาพแวดล้อม อาจมีสัญญาณรบกวนอื่นที่มีผลต่อการทำงาน หากเมื่อทำการนำปัจจัยต่างๆ มาศึกษาเพิ่มเติมระบบสื่อสารข้อมูลผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า จะมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.J. van de Beek. P. Ödling. S.K. Wilson and P.O. Börjesson. “Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)” **International Union of Radio Science (URSI)** [online] Available: <http://www.s3.kth.se/signal/grad/OFDM/URSIOFDM9808.htm>
- [2] A. Peled. and A. Ruiz 1980. “Frequency Domain Data Transmission Using Reduced Computational Complexity Algorithms,” **Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP’80)**, pp. 964-967.
- [3] ลัญฉกร วุฒิสถิตติกุลกิจ. เทคโนโลยีสื่อสารไร้สาย CDMA. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548
- [4] 4i2i Communications Ltd. “Reed Solomon Codes” [online] Available: http://www.4i2i.com/reed_solomon_codes.htm
- [5] นพพร ลีปรีชานนท์. “การวิเคราะห์และเลือกใช้สายเคเบิลในระบบไฟฟ้ากำลัง” วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2539
- [6] ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล. ระบบไฟฟ้ากำลัง (Electrical Power Systems) เล่ม 1 พื้นฐานระบบไฟฟ้า. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 14-50, 2539
- [7] เกรียงไกร พุ่มพวง, “การประยุกต์ใช้งานการสื่อสารผ่านระบบสายไฟฟ้ากำลัง”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 6, 2539
- [8] วารสารคุณภาพไฟฟ้า Vol.2, April - June 2000
- [9] M. Zimmermann and K. Dostert, “Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band power line communications” , **IEEE Trans. Electromagn. Compat.** vol. 44, no. 1, pp. 249–258, Feb. 2002.
- [10] H. Meng, Y. L. Guan, and S. Chen, “Modeling and Analysis of Noise Effects on Broadband Power-Line Communications”, **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**, Vol. 20, No. 2, pp. 630-637, APRIL 2005
- [11] Matthias Götz, Manuel Rapp, and Klaus Dostert, University of Karlsruhe, “Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design”, **IEEE Communications Magazine**, pp. 78-86, April 2004
- [12] Saeed V. Vaseghi, **Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction**. John Wiley&Sons Ltd., pp.355-377

- [13] Tom Bostoen and Olivier Van de Wiel, "Modelling The Low Voltage Power Distribution Network in The Frequency Band From 0.5 MHz to 30 MHz for Broadband Powerline Communications (PLC)", IEEE, p.171-178
- [14] C. R. Paul, **Analysis of multi-conductor transmission lines**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994
- [15] Yangpo Gao, "Broadband Characterization of Indoor Power line Channel and Its Capacity Consideration", **Proceeding of ICC 2005**, May, Korea
- [16] https://spadev.ieee.org/cgi-bin/sadb/print_par?print:1609
- [17] K. Dostert, *Powerline Communications*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 2001, pp. 73-76
- [18] Ioannis C. Papaleonidopoulos, Christos N. Capsalis, Constantinos G.Karagiannopoulos and Nickolas J. Theodorou, "Statistical Analysis and Simulation of Indoor Single-phase Low Voltage Power-Line Communication Channels on the basis of Multipath Propagation", **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, Vol. 49, No. 1, FEBRUARY 2003, p. 89-99
- [19] C.R. Paul, "Introduction to Electromagnetic Compatibility", **John Wiley and Sons, Inc.:** New York, 1992, pp. 231-247.
- [20] S. Ramo, J.R. Whinnery, and T. van Duzer, "Fields and Waves in Communication Electronics", **John Wiley & Sons, Inc.:** New York, 1994.
- [21] H. Meng, S. Chen, "Modeling of Transfer Characteristics for the Broadband Power Line Communication Channel", **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**, VOL. 19, NO. 3, JULY 2004, pp. 1057-1064
- [22] D. M. Pozar, **Microwave Engineering**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998, pp. 196-206

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

องค์การกรที่กำหนดมาตรฐาน และมาตรฐานของการสื่อสารข้อมูลผ่านสายไฟฟ้า

มาตรฐานของการสื่อสารข้อมูลผ่านสายไฟฟ้า

มาตรฐานการที่มีการแข่งขันกันในปัจจุบัน เพื่อให้เป็นที่ยอมรับในขณะนี้ เช่น HomePlug Powerline Alliance, Universal Powerline Association, ETSI – European Telecommunications Standards Institute และ IEEE เป็นต้น ซึ่งยังไม่มีมาตรฐานใดจะเหมาะสมที่สุด ดังจะได้แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1 ETSI Project PLT (PLT – Power-Line Telecommunication)

ได้ทำการศึกษาเพื่อกำหนดมาตรฐานและคุณสมบัติเฉพาะ ที่ครอบคลุมในเรื่องการให้บริการเสียงและข้อมูลผ่านสายไฟฟ้า ระบบ MV และ LV รวมทั้งสายไฟฟ้าภายในบ้าน มาตรฐานนี้กำหนดให้อุปกรณ์ของผู้ผลิตแต่ละรายสามารถใช้งานร่วมกันได้ (interoperability) กับระบบไฟฟ้าที่มีอยู่ และมาตรฐานจะต้องพัฒนาให้สอดคล้องกับข้อกำหนดของ EU/EC

2 HomePlug Powerline Alliance

HomePlug Powerline Alliance เป็นกลุ่มพันธมิตรทางการค้าประกอบด้วยสมาชิก 65 ราย ก่อตั้งเมื่อ เดือนมีนาคม ปี 2000 โดยบริษัทที่เป็นทางเทคโนโลยี รวมตัวกันกำหนดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์และบริการสำหรับโครงข่ายภายในบ้านที่ใช้สายไฟฟ้า กลุ่มพันธมิตรนี้มีผู้ให้การสนับสนุน และคณะผู้บริหาร ประกอบด้วย GE, Earthlink, Intel, Lynksys, Motorola, Samsung, Sharp และ Sony เป็นต้น มีหน้าที่ส่งเสริมและดำเนินการในเรื่องมาตรฐานให้เป็นรูปธรรม เนื่องจากมาตรฐาน HomePlug เกิดจากความร่วมมือของหลากหลายบริษัทจากทั่วโลก ทำให้ได้มาตรฐานที่มีคุณภาพสูง เช่น

- HomePlug 1.0 – มาตรฐานสำหรับอุปกรณ์ต่อพ่วงผ่านสายไฟฟ้าภายในบ้านที่สามารถส่งข้อมูลได้ 8.2 Mbps
- HomePlug AV – ใช้สำหรับส่ง HDTV และ VoIP ภายในบ้านที่สามารถส่งข้อมูลได้ประมาณ 150 Mbps
- HomePlug BPL – ใช้เป็น broadband access เพื่อใช้งานในบ้าน
- HomePlug CC (Command and Control) – เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ความเร็วในการส่งข้อมูลต่ำ และลงทุนน้อย ใช้สำหรับสั่งการ และควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน ตลอดจนการเฝ้าระวังความปลอดภัยในบ้าน

3 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)

องค์กรที่เป็นศูนย์รวมของนักวิชาการทางด้านวิศวกรรมและทำหน้าที่ในการคิดค้น วิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และสาขาที่เกี่ยวข้องในด้านวิศวกรรม

- IEEE P1675 – “Standard for Broadband over Powerline Hardware”

มาตรฐาน

สำหรับอุปกรณ์ broadband ที่ใช้งานผ่านสายไฟฟ้า และความปลอดภัยในการติดตั้ง

- IEEE P1775 – “Powerline Communication Equipment – Electromagnetic Compatibility (EMC) Requirements Testing and Measurement Methods” เป็นคณะทำงานที่เน้นในเรื่องของอุปกรณ์ PLC ที่เกี่ยวข้องกับ EMC รวมถึงวิธีทดสอบและการวัดค่าต่างๆ

- IEEE BPL Study Group – “Standardization of Broadband over Power line Technology” อยู่ระหว่างการกำหนดคณะทำงานในหัวข้อที่น่าสนใจ

- IEEE P1901 – “Draft Standard for Broadband over Power Line Network: Medium Access Control and Physical Layer Specifications” เป็นคณะทำงานที่กำหนดมาตรฐานการให้บริการ broadband ผ่านสายไฟฟ้า โดยมีเป้าหมายในการกำหนดคุณสมบัติเฉพาะของ Medium Access Control และ Physical Layer สำหรับอุปกรณ์ BPL ทั้งที่ชุมสาย และภายในบ้าน

4 OPERA

Open PLC European Research Alliance เป็นโครงการวิจัยและพัฒนาซึ่งได้รับการอุดหนุนจาก European Commission มีวัตถุประสงค์ที่จะปรับปรุงระบบที่มีอยู่แล้ว พัฒนาบริการ PLC และกำหนดมาตรฐานของ PLC

5 Universal Powerline Association (UPA)

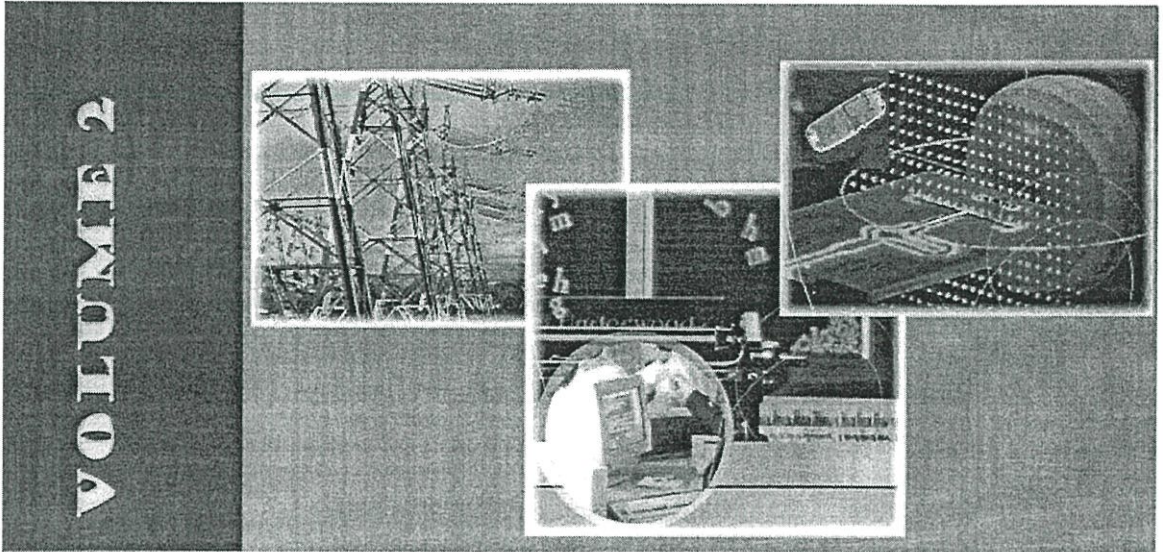
UPA เป็นผู้วางกรอบให้ผู้นำทางการตลาดด้านอุตสาหกรรม PLC ในตลาดโลก ซึ่งครอบคลุมถึงผู้ผลิตอุปกรณ์ด้าน access และอุปกรณ์ภายในบ้าน ดำเนินการให้เกิดการแข่งขันเสรี และเป็นธรรม ในการนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาติดตั้งใช้งาน และสามารถทำงานร่วมกันได้ เพื่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้บริโภคอย่างทั่วถึง UPA มีการส่งเสริมการใช้ผลิตภัณฑ์ UPA Digital Home Standard สำหรับใช้งานเป็นโครงข่ายภายในบ้าน และมาตรฐาน OPERA สำหรับ BPL Power line access

ภาคผนวก ข.

บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

1. Oraya Rattanakanokkan, Suvepon Sittichivapak and Kriengkai Vonglodjanaporn. TCP/IP Protocol over Power Line Communication System Contaminated with Impulsive noise. ECTI-CON 2007 Vol.2 (May 9-12, 2007):777-780.

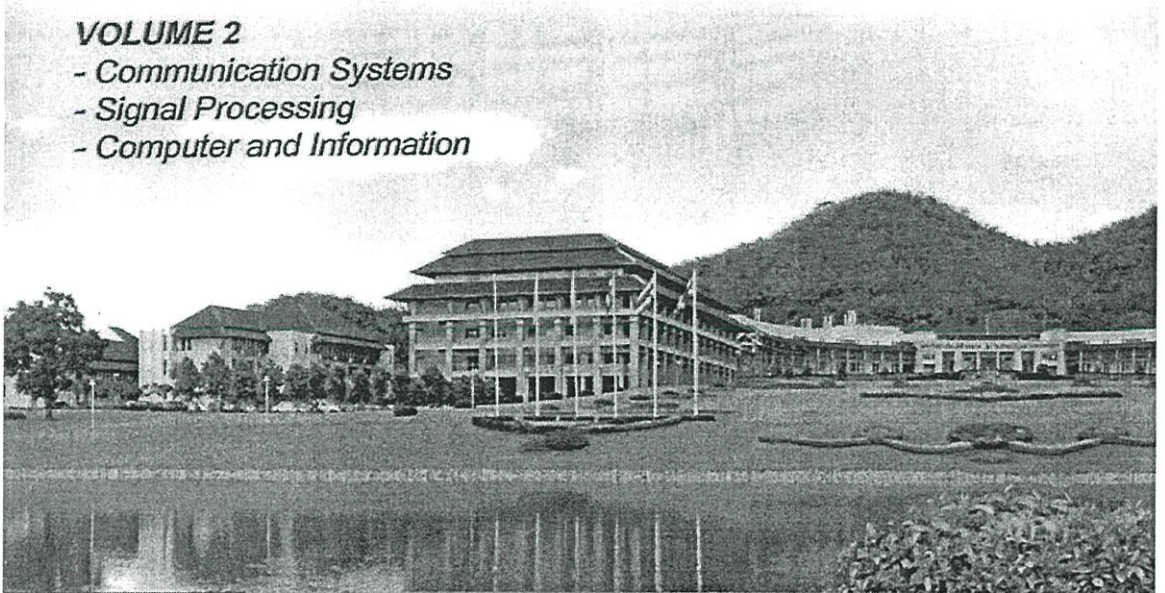


ECTI-CON 2007

*Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand
May 9-12, 2007*

VOLUME 2

- *Communication Systems*
- *Signal Processing*
- *Computer and Information*



ECTI
Association

IEEE
THAILAND SECTION

NECTEC
a member of NSTDA

WD Western
Digital



ECTI-CON 2007

*Proceedings of the 2007 Electrical Engineering/Electronics,
Computer, Telecommunications and Information Technology
(ECTI) International Conference*

Wednesday May 9 – Saturday May 12, 2007

Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand

Organized by

*Electrical Engineering/Electronics, Computer,
Telecommunications and Information Technology (ECTI)
Association*

TCP/IP Protocol over Power Line Communication System Contaminated with Impulsive noise

Oraya Rattanakonkkan, Suvepon Sittichivapak and Kriengkai Vonglodjanaporn

Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Bangkok, Thailand 10520 Tel +66-2737-2500 Ext.5028
Email: oraya_rat@hotmail.com

Abstract- In this paper, we present the throughput, probability of bits error and average retransmission on various signals to noise ratio when comparing of M-ary parameter and bits rate of Power Line Communication (PLC) system base on the physical layer. Our study indicates that the system using TCP/IP and M-ary FSK modulation scheme for solving packet loss and packet corrupt correction that is affected by impulsive noise channels can provided the high efficiency and throughput enhancement.

I. INTRODUCTION

Nowadays, one of wireline communication technology that are attractive for the provision of narrow-band communications that is Power line Communication (PLC). It uses existing electric lines to transmit data communication for home users or small business. Power lines in-house are low voltage lines on the basic of European standard, in particular the European CENELEC standard EN 50065 [1]. The advantage of using PLC is that it can reduce or eliminate the cost of wiring new networks. However, the noises in PLC are present in many types. The typical noises over power line are background noise, thermal noise, narrowband noise, impulsive noise etc. This paper, our main interest is impulsive noise and ignores other noises. An impulsive noise have caused by variety of sources, such as switching noise, adverse channel environments in a communication system, clicks from computer keyboards, and so on.

The main contribute of this paper is proposed to use TCP/IP and M-ary FSK modulation for studying the performance of PLC that is affected by impulsive noise. Simulation results are given to support the scheme in terms of the probability of bits error, average packets retransmission and throughput compared with signal to noise ration (SNR) when $M=2$ and 4 . In order to, our can be analyze the optimum performance of system and reliability.

The remainder of this paper is organized as follows. Section II reviews the architecture and standard of the PLC, Impulsive noise model, M-ary FSK modulation scheme and protocol stack respectively, section III describes the simulation, section IV presents the simulation results, and section V describe the conclusions

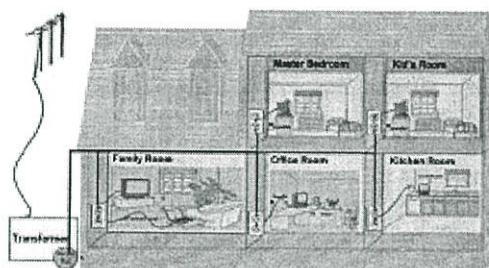


Figure 1: Typical Architecture of PLC

II. POWER LINES

A. Power Line Architectures and Standard

In power line system where the transmission medium is the electrical power network based on the European CENELEC standard EN 50065 include parameters as show in Table I. This standard rules the use of frequency range from 3 to 148.5 kHz on Low voltage while the range from 95 to 148.5 kHz is for the use, mainly, within buildings and operating home users. The architecture of PLC system is shown in Fig. 1. With the systems provided, the user can be send-receive data via power lines that are already installed. The data will be transferred data with TCP stack protocol. With the chosen modulation scheme of M-ary FSK, this M-ary parameter is the number of frequencies used in the modulated signal. Using M-ary FSK, a binary 1 for a high frequency and binary 0 for low frequency [2-4].

TABLE I
PARAMETER AND STANDARD PLC

Parameter	PLC
Standard	EN 50065 (specific standard)
AC frequency	50 or 60 Hz.
Low Voltage level	220 - 400 V.
Frequency range for in-house	95 - 148.5 KHz.
Transmission Rate	1 - 10 Mbps
Usable distance	about 500 meter
Work law	use send - receive data by electric lines in house

B. Impulsive Noise Model

Impulsive noise is non-stationary, binary state sequence of impulse with random amplitudes and random instances of occurrence. An impulsive noise sequence can be modeled as an amplitude-modulation binary state sequence, and express as [5-6]

$$n_i(m) = n(m)b(m) \quad (1)$$

Where $b(m)$ is binary-value random sequence of ones and zeros, that signals the presence or absence of noise pulse, and $n(m)$ is random noise process. the autocorrelation and power spectrum are express as binary state function depend on the "on/off" state of impulsive noise at time m . A real impulsive-type noise sequence, $n_i(m)$, as the output of channel filter excited by an amplitude modulation random binary sequence as

$$n_i(m) = \sum_{k=0}^{p-1} h_k n(m-k) b(m-k) \quad (2)$$

Where h_k is impulse response of a filter that models the duration and the shape of each impulse.

An alternative for an impulsive noise sequence is binary model, in which the state S_0 corresponds to the "off" condition when impulsive noise is absent; in this state, the model emits zero-valued samples. The state S_1 corresponds to the "on" condition; in this state the model emits short-duration pulses of random amplitudes and durations. The probability of a transition from state S_0 to state S_1 is denoted by a_{01} . In its simplest form, as shown in Fig.2, the model is memoryless, and the probability of a transition to state S_1 is independent of the current state of the model. In this case, the probability that at time $t=1$

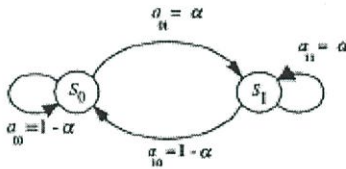


Figure 2. A binary-state model of an impulsive noise generator.

the signal is in the state S_0 is independent of the state at time t , and is given by

$$P(s(t+1) = S_0 | s(t) = S_0) = P(s(t+1) = S_0 | s(t) = S_1) = 1 - \alpha \quad (3)$$

where s_t denotes the state at time t . Likewise, the probability that at time $t+1$ the model is in state S_1 is given by

$$P(s(t+1) = S_1 | s(t) = S_0) = P(s(t+1) = S_1 | s(t) = S_1) = \alpha \quad (4)$$

In general, the power line is share by all of users connected that impulsive noise may be present different on time of day depend electronic device are plug-in.

C. M-ary FSK

The M-ary communication scenarios that the M-ary is form multi-level of symbol. These symbols are indexed m by the integers 0 through $M-1$. In here, we consider the M-ary Frequency Shift Keying (M-ary FSK) where the source wishes to send one of M symbols. The M signal waveforms, u_0, u_1, \dots, u_{M-1} or u_m that are available to the transmitter. The u_m controls a switch that selects the modulated frequency from a bank of M oscillators. The modulation is continuous phase at the edges of symbols. Mathematically can write as

$$u_m(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + 2\pi m \Delta f t) \quad (5)$$

where $E_s = kE_b$ is the energy per symbol, $T = kT_b$ is the symbol interval, f_c is carrier frequency, and Δf is the frequency separation between successive frequencies that is, $\Delta f = f_m - f_{m-1}$ for all $m = 0, 1, 2, \dots, M-1$, $0 \leq t \leq T$; when M is an integer power of 2 and $f_m = f_c + m\Delta f$.

D. Protocol Stack

TCP/IP is a communication protocol stack designed to provide a reliable data stream between two hosts. It is a popular means of communicating data over a network. A reliable transport typically uses a connection-oriented to establish connection [7]. The data can be transmitted from transmitter to receiver on time digital duplex (TDD) channel. In a TDD that shares carriers between the uplink and downlink, the resource being switched in time so users are allocated one or more time slots for uplink and downlink transmission. The main advantage to TDD operation is that it allows asymmetric flow which is more suited data transmission. Therefore, the PLC system presented in this paper operated base on TDD scheduling algorithm, which is basically operated with the by-exchanges of round-robin policy, many be wasted by exchanges of POLL or NULL packets even when there no data waiting for transmission in queues. The transmitter will transmit and receive from receivers that are allocated address and are active at that time. If there is nothing to send, the transmitter may either omit that receivers or transmit a NULL packet.

III. SIMULATION

The TCP/IP over PLC system of this simulation as show in Fig. 3 that consist of three parts: 1) Transmitter 2) Noise and Receiver, respectively.

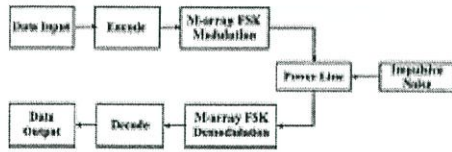


Figure 3. Block diagram of system.

Method of the transmitter is describes as follows. The input data are encoded by binary code and then modulated using M-ary FSK modulation, M-ary parameter value are set to 2 and 4 over TDD channel with TCP/IP protocol. Outputs from the transmitter are sent to the receiver via power line. The received signal includes the effect of impulsive noise channels, with zero mean and 1-sided power spectral density. In the receiver, the received signals are demodulated and sent to decoder module. This received data stems are compared against with the input data stems from the transmitter. The differences from the comparison are used for calculating the BER. The program simulated of this paper, as show in Fig.4

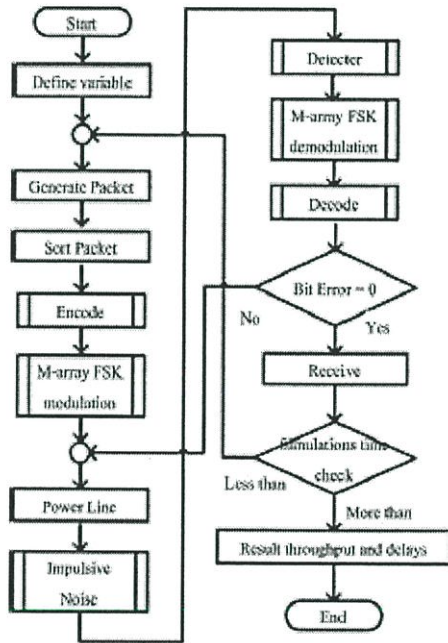


Figure 4. Flow chart of TCP/IP over PLC system contaminated with impulsive noise

This paper uses TCP/IP protocol for flow control. Packet loss and packet corruption are main problems in PLC system. We solve these problems using TCP/IP. An acknowledgment (ACK) is generated only after the receiver receives the data correctly. TCP transmitter is guaranteed that the data have reached the receiver correctly when it receives an ACK. Also, Negative Acknowledgement (NAK) is generated when the packet loss or packet corruption. In the case that binary code cannot correct the packet corruption, the NAK packet is send out to the transmitter for requesting packet retransmission. Then, the transmitter will keep retransmitting the packet until it corrects.

IV. SIMULATION RESULTS

In this section, we present simulation results that show performance improvement of PLC system when using TCP/IP and M-ary FSK modulation scheme. In the simulation, we compared M-ary parameters of FSK modulation that are two and four. The bit rates used for M=2 are 10 kbps, 20 kbps, 30 kbps and 20 kbps, 40 kbps, 60 kbps for M=4. For the noise on power line, we considerate impulsive noise and ignore other noise. Therefore, we indicate the occurrence of impulsive noise with various SNR from 0 to 12 and amplitude of impulsive noise.

Fig. 5 shows the probability of bits error. The data contaminated with impulsive noise of PLC for the case of M=2 and M=4 when various bit rate. The result shows that the probability of bits error decreased when SNR increases (decreased noise). And in the case of M=4 the probability of bits error is lower than in the case of M=2 at same the symbol rate, that the symbol rate of M=4, if we rewrite in bit rate form it has double value of M=2. In the same trend, Fig. 6 shows the average packets retransmission decreases as SNR increases. However, the both figures have show in the relation between the data transmission and the average packets retransmission when the data has a few bit errors rate, the number of average packets retransmission is also low.

Fig. 7 shows the throughput is succeeding packets complete in transmission. They illustrate the throughput of data using TCP/IP over PLC system that has effect of impulsive noise. The curves present the different throughput that has performed by TCP/IP and M-ary. The results of increasing M-ary value, which can be increase throughput due to one symbol, have number of bits increasable. At M=4 that has throughput higher than M=2 and the throughput will be limit to maximum bit rate of each M-ary value, which depends the effect from impulsive noise as show in SNR. According to the throughput curve where SNR is equal to five (Selected SNR value can be seen all vary M-ary) the throughput of M=4, bit rate=20 kbps approaches the maximum bit rate more rapidly than M=2, bit rate 10 kbps that represent the same symbol rate and the both M=2 and M=4 at the symbol rate increases to 20 symbols/s, 30 symbols/s and show the same result as previous above.

Therefore, the relation of all simulate figures when considered the throughput of M=4 and bit rate =20 kbps these are given the optimum performance of system because this M-

ary value can transfer many data and low probability of bits rate. Both values are conceded for simulation result that shows perform of TCP/IP protocol and M-ary FSK method. In this perform increasing the noise immunity of data transmissions and perform can be improve performance of PLC system.

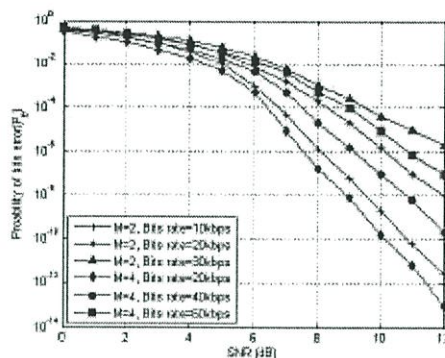


Figure 5. Probability of bits error versus SNR when M=2 and 4

V. CONCLUSION

In this paper, we presented a simulation of procedure to evaluate the throughput of PLC system with corrupted by impulsive noise that we considered data transmission on TDD channel used TCP/IP protocol and M-ary FSK method. An advantage of TCP/IP designed to provide a reliable data stream between two hosts and M-ary FSK increased the noise immunity of modulation format that data receive have correction and reliability. Therefore, the simulation results also indicate that the TCP/IP and M-ary FSK method can provide a useful tool for performance improvement.

REFERENCES

- [1] K. Dostert, *Powerline Communications*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 2001, pp. 73-76
- [2] N. Pavlidou et al., "Power Line Communications: State of the Art and Future Trends", *IEEE Communication Magazine*, April 2003.
- [3] J. G. Proakis, M. Salehi and G. Bauch, *Contemporary Contemporary Communication Systems, 2nded* Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 2001, pp. 311-315
- [4] F. J. Canete et al., "Modeling and evaluation of the Indoor Power Line Transmission Medium", *IEEE communication Magazine*, April 2003.
- [5] S. V. Vaseghi, B.P. Millner, "Speech Recognition in Impulsive Noise", *IEEE Proc., ICASSP-95*, vol.1, pp. 437-440
- [6] S. V. Vaseghi, *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction, 2nded*, John Wiley & Sons Ltd., New York, 2000, pp. 355-376
- [7] A. Chockalingam, "Performance of TCP/IP Protocol Stack on Correlated Fading DS-CDMA Wireless Link", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.49, January 2000.

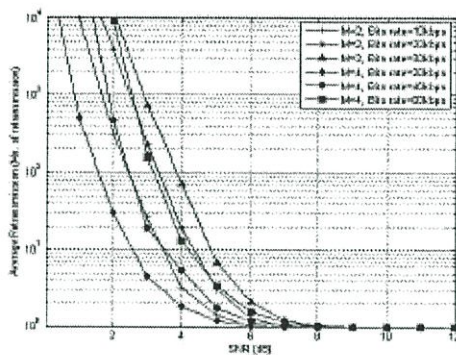


Figure 6. Average Retransmission versus SNR when M=2 and 4

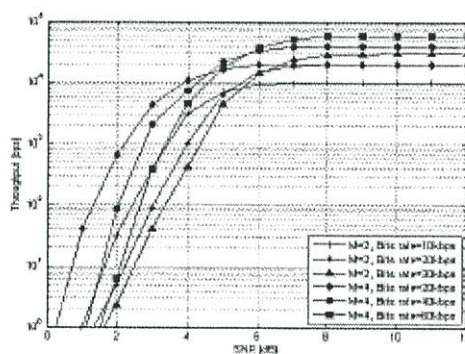


Figure 7. Throughput versus SNR when M=2 and 4

ประวัติผู้เขียน

นางสาวอรุณา รัตนกนกกาญจน์ เกิดเมื่อวันที่ 3 มีนาคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดหนองคาย สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากสำนักวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548