

การศึกษาสัญญาณแคว่โศติกในสายไฟฟ้ากำลัง

STUDY OF CHAOTIC SIGNAL OVER POWER LINE TRANSMISSION

นฤมล ทูมมาเกิด

NARUMON THUMMAKERD

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสัญญาณเคออสติกในสายไฟฟ้ากำลัง

STUDY OF CHAOTIC SIGNAL OVER POWER LINE TRANSMISSION



นฤมล ทูมมาเกิด

NARUMON THUMMAKERD

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

STUDY OF CHAOTIC SIGNAL OVER POWER LINE TRANSMISSION

NARUMON THUMMAKERD

**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**

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสัญญาณเคโอติกในสายไฟฟ้ากำลัง
นักศึกษา	นางสาวนฤมล ทูมมาเกิด
รหัสนักศึกษา	46064124
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สุวิพล สิริชิวภาค

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับอัตราผิดพลาดของบิต (BER) ของการมอดูเลตที่มีสัญญาณเคโอติกเป็นฟังก์ชันพื้นฐานในระบบสายไฟฟ้ากำลัง โดยระบบสายไฟฟ้ากำลังอยู่ในเทอมความแตกต่างของระบบที่มีลักษณะช่องสัญญาณที่มีการกระจายกำลังสำหรับกระจายของข้อมูล และสัญญาณอนาลอกมีมาตรฐานอยู่ที่ 50-60 เฮิร์ตของไฟฟ้ากระแสสลับ โดยจะแบ่งวิธีการมอดูเลตสัญญาณเคโอติกออกเป็น 3 วิธี คือ coherent antipodal chaos shift keying (Coherent Antipodal CSK), coherent differential chaos shift keying (Coherent DCSK) และ differential coherent DCSK ซึ่งวิธีการเหล่านี้จะใช้ประโยชน์จากความไม่เป็นรายคาบของสัญญาณเคโอติก ทำให้สัญญาณที่ส่งออกไปมีช่วงความกว้างคล้ายกับการใช้เทคนิคการขยายความถี่ ซึ่งใน differential coherent DCSK นั้น จะได้มีการศึกษาว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงช่วงแถบความถี่ที่ใช้งานในสายส่งไฟฟ้ากำลังแล้ว จะมีผลอย่างไรต่อประสิทธิภาพของระบบ และศึกษาการใช้เทคนิค Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) เข้าร่วมกับการมอดูเลตแบบ CSK ในการส่งข้อมูลสื่อสาร จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าการมอดูเลตโดยใช้สัญญาณเคโอติกนี้ สามารถเป็นอีกทางเลือกที่ใช้ในการส่ง/รับข้อมูลด้วยสายส่งไฟฟ้ากำลัง

Thesis Title	Study of Chaotic Signal Over Power Line Transmission
Student	Miss Narumon Thummakerd
Student ID.	46064124
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Suvepon Sittichivapak

ABSTRACT

This study aimed to investigate a bit error rate (BER) of chaotic modulation, a principle function in a distributed power wires, used in a simultaneous distribution. Moreover, this distributed power wires were in the different term of the distributed signal which was in the range of 50-60 Hz of the alternating current (AC) in order to transfer the data needed. Then, the three approaches of chaotic signal modulations were proposed, coherent antipodal chaos shift keying (Coherent Antipodal CSK), coherent differential chaos shift keying (Coherent DCSK), and differential coherent DCSK. From the different technique of chaotic signal modulation, the advantage of non-periodic chaotic signal was often used. The transmitted signal from those systems exhibited a band signal as wide as the signal obtained from spectrum technique. According to the differentially coherent DCSK, we have analyzed the effect of the signal bandwidth changing on the system performance when the signal against its own channels fading. And study about performance of CSK with OFDM technique. The results exhibited that the chaotic modulation is a promising technique to send/receive the digital information on a power line transmission.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.สุวิพล สิริชิวภาค ที่ให้ คำปรึกษา และความรู้ในการทำงานวิจัย ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำเนิด อบรมสั่งสอน โอกาส และกำลังใจในการศึกษาทำวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ อีกทั้งช่วยเหลือค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณพี่ยอดพี่อ้อมที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ รวมทั้งน้องหน้อยที่ช่วยเป็นกำลังใจเสมอ

ขอขอบคุณพี่เศรษฐกร กาเมือง น้องปิยะพันธ์ คงเศรษฐ น้องกฤษณะพงศ์ พันธุ์ศรี และ น้องวรรณรีย์ วงศ์ไครรัตน์ ในความช่วยเหลือแนะนำการเขียนโปรแกรมรวมถึงความรู้ต่างๆ ขอขอบคุณน้องอาจริยา รักงาม ที่ให้ความช่วยเหลือด้านภาษาอังกฤษ และขอขอบคุณพิษุกรณ์ ชอบเที่ยงธรรม รวมถึงน้องอุษา พรหมอยู่ ที่ช่วยเป็นแรงผลักดันในการทำวิจัยจนเป็นผลสำเร็จ

ขอขอบคุณ น้องๆ โทคมណာကမ္မတူကု
น้องไพร น้องตาล น้องโอ น้องจอย น้องเป็ล น้องจ๊อบ
น้องแป็บ น้องจูน น้องแพท อีกทั้ง สมาชิกห้อง T304 ทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำ มิตรภาพ และ
กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นฤมล ทูมมาเกิด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 การสื่อสารด้วยสัญญาณแคโอดิก.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 การสร้างสัญญาณแคโอดิก.....	5
2.2.1 รูปแบบของการสร้างรูปสัญญาณแคโอดิกโดย Lorenz.....	5
2.2.2 รูปแบบของการสร้างรูปสัญญาณแคโอดิกโดย Lorenz.....	5
2.3 การสื่อสารแบบดิจิทัล.....	8
2.3.1 โครงสร้างระบบสื่อสารแบบดิจิทัล.....	8
2.3.2 การวัดประสิทธิภาพของระบบ.....	8
2.3.3 การมอดูเลตและดีมอดูเลตโดยวิธีใช้ฟังก์ชันพื้นฐาน.....	11
2.3.3.1 ฟังก์ชันพื้นฐานแบบตั้งฉาก.....	11
2.3.3.2 การสร้างชุดสัญญาณ.....	11
2.3.3.3 การหาเวกเตอร์สัญญาณโดยใช้สหสัมพันธ์.....	12
2.3.4 รูปแบบพื้นฐานของเครื่องรับที่ใช้คิเทคสัญญาณ.....	13
2.3.4.1 เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์.....	13
2.3.4.2 เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์.....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.4.2 เครื่องรับแบบร่วมนัยและไม่ร่วมนัย.....	14
2.4 การมอดูเลตสัญญาณแคะ โอติกในการสื่อสารแบบดิจิทัล.....	14
2.4.1 การมอดูเลตแบบ Chaos Shift Keying.....	15
2.4.2 การมอดูเลตแบบ Coherent Antipodal CSK.....	17
2.4.3 การมอดูเลตแบบ Coherent Differential Chaos Shift Keying.....	18
2.4.4 การมอดูเลตแบบ Differential Coherent DCSK.....	20
บทที่ 3 ความรู้พื้นฐานในสายส่งไฟฟ้ากำลัง.....	22
3.1 ระบบสายส่งหลัก.....	22
3.2 ระบบสายส่งรอง.....	23
3.3 ระบบจำหน่าย.....	23
3.4 ระบบใช้งาน.....	24
3.5 สภาพแวดล้อมของสายไฟฟ้ากำลังในการสื่อสารข้อมูล.....	26
3.6 มาตรฐาน.....	27
บทที่ 4 ช่องสัญญาณสื่อสารในสายส่งไฟฟ้ากำลัง.....	28
4.1 บทนำ.....	28
4.2 ลักษณะทั่วไปของช่องสัญญาณ.....	28
4.3 คุณลักษณะสายส่งไฟฟ้ากำลัง.....	28
4.3.1 ลักษณะทั่วไป.....	30
4.3.2 การสะท้อน.....	31
4.3.3 การถ่ายโอนพลังงาน.....	31
4.4 ช่องสัญญาณสายส่งใน 1 หน่วยความยาว.....	32
4.4.1 พารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาว.....	32
4.4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาว.....	33
4.5 โครงข่ายสายส่งไฟฟ้ากำลัง.....	34
4.5.1 ลักษณะทั่วไปของโครงข่ายสายส่งไฟฟ้ากำลัง.....	34
4.5.2 แบบจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังระดับแรงดันต่ำ.....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 สัญญาณรบกวน.....	37
4.6.1 สัญญาณรบกวนแบบอินพัลส์.....	38
4.6.2 สัญญาณรบกวนแบบ Background.....	39
บทที่ 5 เทคนิคการมอดูเลชันแบบหลายคลื่นพาห์ด้วย OFDM.....	41
บทที่ 6 แบบจำลองและผลการจำลองแบบ.....	44
6.1 แบบจำลองสัญญาณแคโอดิก.....	44
6.2 แบบจำลองช่องสัญญาณสายส่งไฟฟ้ากำลัง.....	46
6.3 แบบจำลองสัญญาณรบกวน.....	50
6.3.1 Impulsive Noise.....	50
6.3.2 Background Noise.....	50
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	57
บรรณานุกรม.....	58
ภาคผนวก.....	66
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	67
ประวัติผู้เขียน.....	68

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ระดับแรงดันไฟฟ้าของประเทศไทย.....	22
4.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของค่าพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาว.....	33

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สัญญาณแคโอดิกโดยใช้หลักการของ Lorenz.....	6
2.2 สัญญาณแคโอดิกโดยใช้หลักการของ Rossler.....	7
2.3 การสื่อสารด้วยระบบคิจิตอล.....	9
2.4 ตัวอย่างกราฟแสดงบิตผิดพลาดของระบบ.....	10
2.5 การสร้างองค์ประกอบของชุดสัญญาณที่ใช้ฟังก์ชันพื้นฐาน 2 ชุด.....	12
2.6 การหาค่า s_{mj} ที่เครื่องรับโดยใช้ฟังก์ชันพื้นฐาน 2 ชุด.....	12
2.7 โครงสร้างของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ที่ใช้ฟังก์ชันพื้นฐาน 2 ชุด.....	13
2.8 ลักษณะของสัญญาณแคโอดิกในแกนเวลาและแกนความถี่.....	15
2.9 การสร้างองค์ประกอบของชุดสัญญาณ CSK.....	16
2.10 แผนภาพของเครื่องรับแบบร่วมนัยที่ใช้ฟังก์ชันพื้นฐานจำนวน N ชุด.....	17
2.11 การมอดูเลตแบบ CSK โดยใช้ฟังก์ชันพื้นฐานชุดเดียว.....	17
2.12 เครื่องรับแบบร่วมนัยของสัญญาณ Antipodal CSK.....	18
2.13 ส่วนอ้างอิง และส่วนข้อมูลของรูปแบบสัญญาณ DCSK.....	19
2.14 สัญญาณ DCSK ที่ได้จากการมอดูเลตบิต 1100.....	19
2.15 การใช้เครื่องรับแบบร่วมนัยกับสัญญาณ DCSK.....	20
2.16 เครื่องรับของวิธี Differential Coherent DCSK.....	21
2.17 ผลที่ได้จากการใช้เครื่องรับแบบ Differentially coherent DCSK ที่ส่งบิต “1010”.....	21
3.1 เป็นรูปแสดงตัวอย่างโครงข่ายพื้นฐานของระบบจำหน่ายพลังงานอย่างง่าย.....	21
3.2 สภาพแวดล้อมของสายไฟฟ้ากำลัง.....	26
4.1 โครงข่ายของสายส่งไฟฟ้ากำลังระดับแรงดันต่ำอย่างง่ายในยุโรป.....	29
4.2 การเชื่อมต่อโหมค: (a) เลือกลาย 1 กับสาย 2, (b) เลือกลาย 1 กับสาย 3 และ (c) โหมคที่ 3 คือ เลือกลาย 1 กับ สาย 2-3-4 เข้าด้วยกัน.....	30
4.3 การต่อโครงข่ายสายส่งไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย เชื่อมต่อสายภายในเป็น 1-(2+3+4).....	34
4.4 การต่อโครงข่ายสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีลูกข่าย 30 ช่อง.....	35
4.5 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ระยะต่างๆ เมื่อให้จุดที่ไม่มี NT มีการต่อแบบเปิด.....	35
4.6 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ระยะต่างๆ เมื่อให้จุดที่ไม่มี NT มีการต่อแบบแมท.....	36
4.7 แสดงสัญญาณรบกวนที่มีในระบบสายส่งไฟฟ้ากำลัง.....	37
4.8 สัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์แบบ Bernoulli-Gaussian.....	38

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.9 ลักษณะสัญญาณรบกวนแบบ Background.....	40
5.1 ระบบการสื่อสารด้วย OFDM.....	42
6.1 แบบจำลองระบบการส่งสัญญาณสายส่งไฟฟ้ากำลัง.....	44
6.2 แบบจำลองรูปสัญญาณแคะโอดิกด้วย Lorenz.....	45
6.3 ลักษณะสัญญาณแคะโอดิกแบบ Lorenz.....	45
6.4 ลักษณะสัญญาณออกซีเลเตอร์ในแกน y(volt)-time(s)-x(volt).....	46
6.5 ลักษณะสัญญาณออกซีเลเตอร์ในแกน z(volt)-time(s)-x(volt).....	46
6.6 แบบจำลองสัญญาณเพาเวอร์ไลน์.....	47
6.7 แบบจำลองช่องสัญญาณสายส่งไฟฟ้ากำลังในแกนความถี่.....	49
6.8 แบบจำลองช่องสัญญาณสายส่งไฟฟ้ากำลังในแกนเวลา.....	49
6.9 ลักษณะสัญญาณรบกวนแบบ Impulsive ในแกนเวลา.....	50
6.10 ลักษณะสัญญาณรบกวนแบบ Background ในแกนเวลา.....	51
6.11 ลักษณะสัญญาณรบกวนแบบ Background ในแกนเวลา.....	51
6.12 อัตราการผิดพลาดของบิตในการมอดูเลตแบบ CSK.....	52
6.13 อัตราผิดพลาดของบิตในการมอดูเลตแบบ DCSK.....	53
6.14 อัตราการผิดพลาดของบิตในการมอดูเลตแบบ Differential CSK.....	54
6.15 อัตราการผิดพลาดของบิตในการมอดูเลตแบบ Differential CSK เมื่อเปลี่ยนแบนวิคท์ของช่องสัญญาณ.....	55
6.16 อัตราการผิดพลาดของบิตในการมอดูเลตแบบ CSK ร่วมกับเทคนิค OFMD.....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในอดีตการสื่อสารด้วยช่องสัญญาณสื่อสารไฟฟ้ากำลัง จำกัดอยู่เพียงการส่งด้วยความเร็วขนาด 3 kHz ถึง 148.5 kHz ตามมาตรฐานของ CHANCAL EN50065-1 แต่ในปัจจุบันการส่งด้วยสายส่งไฟฟ้ากำลังได้เพิ่มระดับขีดความสามารถของสายส่งในช่องสัญญาณไฟฟ้ากำลังให้สูงขึ้นเป็นระดับ 100 MHz ตามมาตรฐาน IEEE P1901 ทำให้ส่งข้อมูลได้มากขึ้นกว่าเดิมเป็นอย่างมาก อีกทั้งราคายังถูกกว่าเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับราคาที่ต้องสูญเสียไปในการสื่อสารด้วยช่องสัญญาณแบบอื่นๆ

เนื่องจากสายส่งไฟฟ้ากำลังนั้น มีการติดตั้งจุดเชื่อมต่อเพื่อใช้ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าไว้ก่อนแล้ว ทำให้การส่งผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีการนำสัญญาณพาหะที่ในรูปแบบของคลื่นไซน์ จะทำให้สามารถตรวจจับสัญญาณได้โดยง่าย ทำให้สัญญาณข่าวสารที่ส่งผ่านช่องสัญญาณไฟฟ้ากำลังไม่มีความปลอดภัย ดังนั้นด้วยเหตุผลดังกล่าว ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอทางเลือกโดยใช้สัญญาณพาหะเป็นแบบแคโอดิก เพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้กับการสื่อสารในสายส่งไฟฟ้ากำลัง ด้วยลักษณะเด่นของสัญญาณแคโอดิกนั้นที่มีลักษณะเหมือนสัญญาณรบกวน รวมทั้งการไม่เป็นรายคาบของช่องสัญญาณ ทำให้ไม่สามารถตรวจจับสัญญาณและตรวจสอบข้อมูลได้โดยง่าย ทำให้การสื่อสารมีความปลอดภัยขึ้นด้วยรูปสัญญาณแคโอดิกเอง โดยไม่ต้องอาศัยการเข้ารหัสเพื่อความปลอดภัยของข้อมูลดังเช่นการส่งด้วยสัญญาณพาหะแบบรูปคลื่นไซน์

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษารูปแบบการสร้างสัญญาณพาหะในรูปแบบแคโอดิกที่ใช้ในงาน รวมถึงระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลด้วยสัญญาณแคโอดิก
- 2) เพื่อศึกษาคุณลักษณะของสายส่งไฟฟ้ากำลังที่ใช้เป็นสายส่งสัญญาณสื่อสาร
- 3) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณแคโอดิกในสายไฟฟ้ากำลัง
- 4) เพื่อศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของระบบด้วยเทคนิค OFDM

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การส่งสัญญาณข้อมูลสื่อสารด้วยสัญญาณพาหะรูปแบบสัญญาณแคโอดิก ผ่านช่องสัญญาณสื่อสารด้วยไฟฟ้ากำลัง สามารถทำได้ แม้ว่าจะมีคุณลักษณะของสายส่งที่ไม่ได้

ออกแบบมาเพื่อรองรับการสื่อสารข้อมูล และประสิทธิภาพของการส่งที่ได้ ก็มีแนวโน้ม เช่นเดียวกับการส่งด้วยสัญญาณพาหะแบบรูปคลื่นไซน์

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการสร้างสัญญาณแบบแคโอดิก โดยอาศัยหลักการสร้างของ Lorenz โดยทฤษฎีดังกล่าวจะสามารถสร้างสัญญาณรูปแบบแคโอดิกอย่างง่ายขึ้นมาได้ และนำมาใช้เป็นสัญญาณพาหะ ศึกษากระบวนการสัญญาณแคโอดิกในระบบดิจิทัลทั้งภาครับและภาคส่ง รวมถึงการจำลองแบบในแต่ละส่วนของการส่งผ่านข้อมูล

สายส่งไฟฟ้ากำลังที่นำมาเป็นช่องสัญญาณสื่อสารนั้น จะนำรูปแบบการวิเคราะห์แบบหลักการการส่งด้วยสาย (Transmission line) มาใช้วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อจำลองแบบช่องสัญญาณขึ้นมา โดยสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการพิจารณานั้นเป็นสายไฟฟ้ากำลังตามมาตรฐานของยุโรปที่ได้มีการวิเคราะห์แล้วว่าแบนวิidthช่องสัญญาณคือช่วง 0.5MHz-30MHz [1]

ส่วนประสิทธิภาพของระบบ จะทำการทดสอบในแต่ละบิตเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลสื่อสารที่ส่งเข้ามาในรูปแบบดิจิทัล กับสัญญาณที่ได้รับจากกระบวนการต่างๆ ของภาครับซึ่งได้ถูกปรับเป็นสัญญาณดิจิทัลแล้ว เปรียบเทียบกันในลักษณะบิตต่อบิต เพื่อคำนวณหาบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อระบบถูกรบกวนด้วยระดับสัญญาณรบกวนที่ทำการวิเคราะห์

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาการส่งสัญญาณแคโอดิกในสายส่งไฟฟ้ากำลัง ซึ่งศึกษาเริ่มต้นจากการสร้างสัญญาณแคโอดิกเป็นสัญญาณพาหะ ศึกษาการสื่อสารแคโอดิกในระบบดิจิทัลโดยเปลี่ยนแปลงการมอดูเลตสัญญาณรูปแบบแคโอดิกในรูปแบบต่างๆ อันประกอบด้วย

- 1) Coherent Antipodal Chaos Shift Keying (Coherent Antipodal CSK)
- 2) Coherent Differential Chaos Shift Keying (Coherent DCSK)
- 3) Differential Coherent DCSK

ต่อจากนั้นทำการศึกษาคูณลักษณะของช่องสัญญาณสายส่งไฟฟ้ากำลังพร้อมทั้งจำลองแบบช่องสัญญาณการส่งดังกล่าว เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบที่ทำการวิเคราะห์ด้วยการพิจารณาอัตราบิตผิดพลาด และมีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้วยเทคนิค OFDM

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงการลักษณะพื้นฐานของสัญญาณแคโอดิก ได้แก่ ลักษณะของสัญญาณแคโอดิก การสื่อสารด้วยระบบดิจิทัลด้วยสัญญาณแคโอดิก การมอดูเลตสัญญาณแคโอดิก กระบวนการภาครับ-ภาคส่งของสัญญาณแคโอดิก

บทที่ 3 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานด้านการสื่อสารด้วยสายไฟฟ้ากำลัง โดยจะกล่าวถึง ลักษณะทั่วไปทางกายภาพของสายไฟฟ้ากำลัง ลักษณะช่องสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสาร รวมทั้ง มาตรฐานที่ต้องคำนึงถึงในการสื่อสารด้วยสายส่งไฟฟ้ากำลัง

บทที่ 4 ช่องสัญญาณสายส่งไฟฟ้ากำลัง ในการสื่อสารข้อมูล ซึ่งในบทนี้จะแสดงให้เห็นแนวคิดของแบบจำลองช่องสัญญาณที่ผู้วิจัยสนใจนำมาเป็นหลักในการจำลองแบบ รวมถึงสัญญาณรบกวนที่ผู้วิจัยนำมาวิเคราะห์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 5 กล่าวถึงเทคนิค OFDM เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ

บทที่ 6 แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย บทนี้จะกล่าวถึงการกำหนดขอบเขตสิ่งแวดล้อมต่างๆ รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการจำลองแบบ

บทที่ 7 บทสรุปและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

บทที่ 2

การสื่อสารด้วยสัญญาณแคโอดิก

2.1 บทนำ

ในระบบการสื่อสารต่างๆ ไป สัญญาณอนาลอก ที่ใช้แทนแต่ละสัญลักษณ์ในช่วงเวลา T นั้น จะเป็นการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นของฟังก์ชันพื้นฐานที่เป็นสัญญาณรายคาบคือสัญญาณไซน์ หรือ สัญญาณโคไซน์ เมื่อพิจารณาฟังก์ชัน ในรูปแบบ $\cos(n\omega_0 t)$ และ $\sin(n\omega_0 t)$ หรือ $\cos(n\omega_0 t + \phi_n)$ แต่ละฟังก์ชันจะมีค่าที่เกิดแล้วกลับมาซ้ำรูปแบบค่าเดิมอีกทุกคาบเวลา $T = \frac{2\pi}{n\omega_0}$ ดังนั้นค่า T จึงเป็นจำนวนเท่าของระยะทางของฟังก์ชันพื้นฐาน [2] ส่วนระบบการสื่อสารที่ใช้สัญญาณแคโอดิกนั้น สัญญาณอนาลอก ที่แทนแต่ละสัญลักษณ์ในช่วงเวลาดังกล่าว จะเป็นรูปแบบสัญญาณแคโอดิก เมื่อพิจารณาจากรูปแบบและเงื่อนไขของการเป็นระบบการมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่แล้ว จะพบว่าระบบการสื่อสารด้วยสัญญาณแคโอดิก เป็นรูปแบบพิเศษของระบบการมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่ โดยที่มีสัญญาณแคโอดิก เป็นสัญญาณที่แผ่ออก (Spreading Signal) นอกจากนี้ด้วยคุณสมบัติของสัญญาณแคโอดิกที่มีลักษณะไม่เป็นรายคาบ[3] ทำให้สัญญาณที่ส่งออกไปในแต่ละช่วงเวลา T จะมีความแตกต่างกัน แม้ว่าจะมีการส่งสัญลักษณ์ที่ซ้ำกันอย่างต่อเนื่องก็ตาม

วิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการวิเคราะห์ระบบการสื่อสารบนสายไฟฟ้ากำลัง ที่มีการนำสัญญาณแคโอดิกมาใช้เป็นสัญญาณพาหะ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยของข้อมูลข่าวสารที่ส่ง ซึ่งการวิเคราะห์จะทำการพิจารณาการมอดูเลตสัญญาณแคโอดิกกับข้อมูลข่าวสาร เมื่อสัญญาณผ่านการมอดูเลตแล้ว สัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยไม่มีลักษณะการเป็นรายคาบดังเช่นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดเนื่องจากคุณลักษณะของสัญญาณแคโอดิกที่ถูกสร้างขึ้น การสร้างสัญญาณดังกล่าวจะทำให้สัญญาณอยู่ในรูปแบบที่มีความถี่แบบกว้าง และมีลักษณะคล้ายสัญญาณรบกวน มีความทนทาน และสามารถกำหนดคุณลักษณะเชิงสถิติได้ ทำให้สัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตที่ใช้สัญญาณแคโอดิกเป็นฟังก์ชันพื้นฐานนั้น สามารถทนทานต่อการกระจายของคลื่นหลายวิถี ได้ดีกว่าแบบใช้สัญญาณคลื่นรูปไซน์ ที่เป็นสัญญาณที่มีแถบความถี่แบบแคบ โดยในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงการสร้างสัญญาณพาหะในรูปแบบแคโอดิก จากนั้นจะทำการศึกษาระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลในระบบทั่วไป และลักษณะของสัญญาณแคโอดิกเมื่อมีการสื่อสารในระบบดิจิทัล

2.2 การสร้างสัญญาณแคโอดิก

2.2.1 รูปแบบของการสร้างรูปสัญญาณแคโอดิกโดย Lorenz

ในหัวข้อนี้จะแสดงการจำลองแบบที่ใช้ในระบบสื่อสารได้ใช้รูปแบบออสมิเตอร์ของ Lorenz และ Rossler โดยระบบของ Lorenz ได้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการศึกษาเรื่องของเคออส (chaos) และการประสานจังหวะ (Synchronization) และสมการลำดับที่ 3 (third-order system) คือ

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sigma(y-x) \\ \dot{y} &= rx - y - xz \\ \dot{z} &= xy - bz\end{aligned}\quad (2.1)$$

โดยที่ x, y และ z เป็นสถานะของระบบ

σ, r และ b เป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดคุณลักษณะของแคโอดิก

ในสมการที่ 2.1 สามารถแสดงเป็นระบบย่อยสองระบบได้ นั่นคือ ระบบย่อย $x-z$ และ ระบบย่อย $y-z$ ตัวอย่างเช่น เมื่อระบบย่อย $x-z$ ถูกใช้งานทำให้ค่า y เป็นส่วนของภาคส่ง ในสมการที่ 2.1 ขณะที่ $r = r(t)$ เป็นส่วนที่ถูกเลือกใช้ในการเลือกค่าพารามิเตอร์สำหรับการมอดูเลต เมื่อสมการที่ 2.1 ประกอบขึ้นเป็นภาคส่งจะได้ระบบย่อยของภาครับเป็น

$$\begin{aligned}\dot{x}_r &= \sigma(y - x_r) \\ \dot{y}_r &= x_r y - bz_r\end{aligned}\quad (2.2)$$

ส่วนฟิลเตอร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ในการดีมอดูเลตสัญญาณ คือ

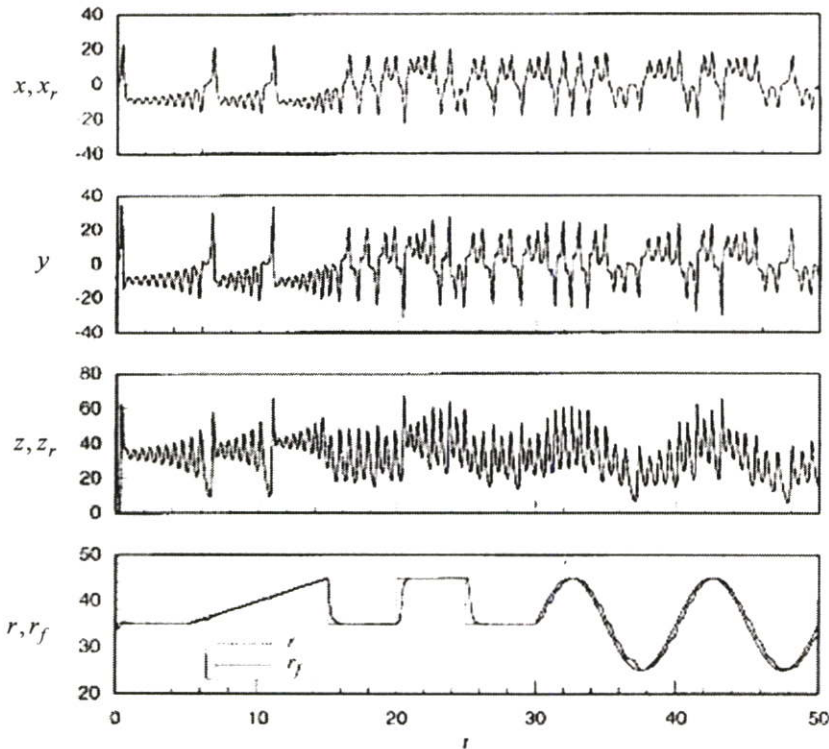
$$\begin{aligned}\dot{w}_0 &= (k-1)y - x_r z_r - kw_0 \\ \dot{w}_1 &= x_r - kw_1 \\ \dot{r}_f &= \frac{q \operatorname{sgn}(w_1)}{1+|w_1|} (y - w_0 - w_1 r_f)\end{aligned}\quad (2.3)$$

โดยที่ k และ q เป็นพารามิเตอร์ฟิลเตอร์ที่เกิดคุณสมบัติที่ดีที่สุด

ในสมการที่ 2.3 r_f จะเป็นการประมาณฟิลเตอร์ที่สัญญาณถูกส่งมาแล้ว และได้รับการเข้ารหัส โดยใช้ $r = r(t)$ ที่แสดงในสมการที่ 2.1

ตัวอย่างระบบการสื่อสารที่ใช้หลักของ Lorenz นี้แสดงในรูปที่ 2.1 เป็นตัวอย่างการสร้างโดยการอินทิเกรตสมการที่ 2.1, สมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3 โดยให้ค่าคงที่ $b = \frac{8}{3}$, $\sigma = 10$,

$k = 20$ และ $q = 20$ รูปสัญญาณที่แสดงในรูปที่ 2.1 โดยสามรูปแรกจะแสดงสถานะ x, y และ z ที่มาจากสมการที่ 2.1 รูปสัญญาณที่ 1 และ รูปสัญญาณที่ 3 จะแสดงโดยใช้ x_r และ z_r จากสมการที่ 2.2 อย่างไรก็ตามส่วนที่ประสานจังหวะ จะมีการรับสัญญาณอย่างรวดเร็วดังแสดงในส่วนเป็นเวลา และ corresponding state ในภาคส่งและภาครับ ไม่สามารถแสดงกราฟแยกจากกันได้ รูปสัญญาณในกราฟที่ 4 เป็นส่วนแสดงค่ามอดูเลตของ r และส่วนที่ถูกกู่จะเป็นสัญญาณ r , จากสมการที่ 2.3



รูปที่ 2.1 สัญญาณแคโอดิกโดยใช้หลักการของ Lorenz

โดยที่ r คือขอบเขตที่ถูกใช้ในการสร้างสัญญาณเป็นลักษณะแคโอดิก ซึ่งจากรูปที่ 2.1 นั้น กราฟทั้งหมดจะแสดงให้เห็นคุณลักษณะของการส่งและการรับข้อมูลข่าวสารโดยใช้แคโอดิกเป็นคลื่นพาหะ(chaotic carrier)

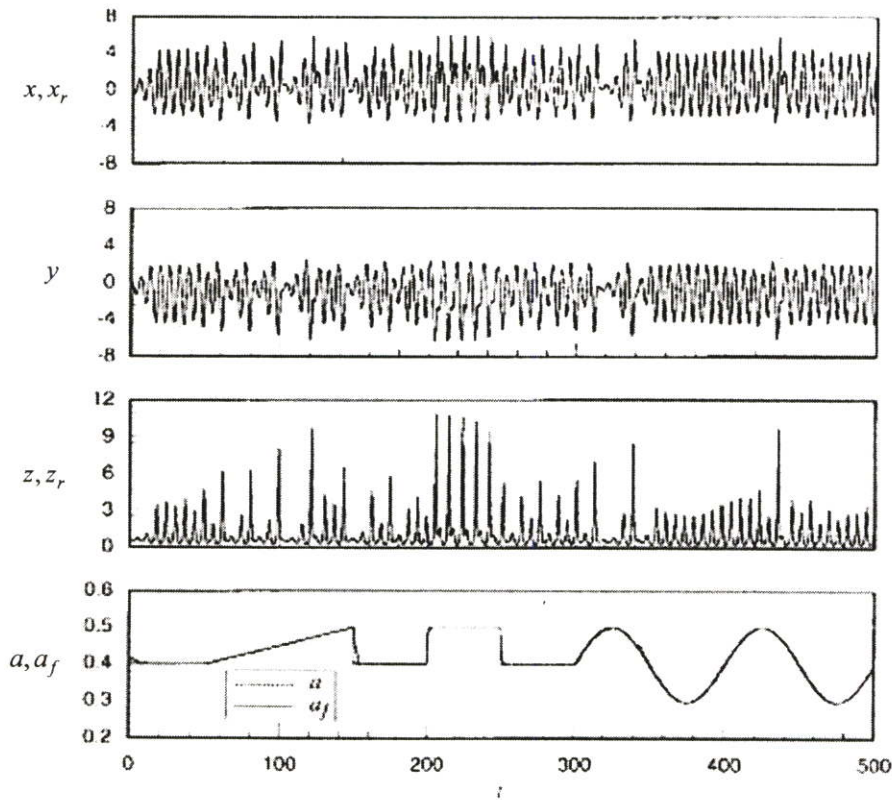
2.2.2 รูปแบบของการสร้างรูปสัญญาณแคโอดิกโดย Rossler

ส่วนระบบของ Rossler นั้นได้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการศึกษาส่วนของการไม่เป็นเชิงเส้นของเคออส โดยแสดงระบบของสมการได้เป็น

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= -y - z \\
 \dot{y} &= x + ay \\
 \dot{z} &= b + z(x - c)
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

โดยที่ x, y และ z เป็นสถานะของระบบ

a, b และ c เป็นพารามิเตอร์ที่ถูกกำหนดแน่นอน



รูปที่ 2.2 สัญญาณแคโอดิกโดยใช้หลักการของ Rossler

ในส่วนของการประสานจังหวะ (synchronization) จะมีเฉพาะระบบย่อย $x - z$ ที่มีค่าคงที่ และมีขอบเขตที่จำกัด ดังนั้นระบบย่อยนี้จะถูกใช้เพื่อแสดงระบบการสื่อสารที่ y เป็นส่วนสัญญาณที่ถูกส่งออกไปและ $a = a(t)$ เป็นพารามิเตอร์มอดูเลต ที่ตรงกัน

ระบบย่อยภาครับ คือ

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_r &= -y - z_r \\
 \dot{z}_r &= b + z_r(x_r - c)
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

และส่วนที่เป็นคิมมอดูเลเตอร์ฟิลเตอร์เป็นดังสมการที่ 2.6

$$\begin{aligned}
 \dot{w}_0 &= x_r + ky - kw_0 \\
 \dot{w}_1 &= y - kw_1 \\
 \dot{a}_r &= \frac{q \operatorname{sgn}(w_1)}{1 + |w_1|} (y - w_0 - w_1 a_r)
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

ตัวอย่างของระบบ Rossler ถูกแสดงในรูปที่ 2.2 โดยที่การแทนค่าต่างๆ ในสมการที่ 2.4 ถึง สมการที่ 2.6 เป็น $b = 2, c = 4, k = 8$ และ $q = 8$ เมื่อพิจารณาตัวอย่างนี้เป็น ฟิเลเตอร์ที่ใช้ดีมอดูเลตรูปสัญญาณเคโอติก และแยกสัญญาณที่มีการเข้ารหัสมาแล้ว

2.3 การสื่อสารแบบดิจิตอล

การสื่อสารโดยใช้สายส่งนั้น การส่งผ่านข้อมูลจะต้องส่งไปในรูปแบบของสัญญาณอนาลอก ทำให้ภาคส่งต้องแปลงข้อมูลดิจิตอลที่จะส่งผ่านระบบสื่อสารให้อยู่ในรูปแบบสัญญาณอนาลอกก่อน เพื่อให้สามารถทำการส่งข้อมูลผ่านระบบได้ ส่วนภาครับจะทำการรับสัญญาณจากภาครับที่ผ่านการรบกวนและการแปลงสัญญาณมาก่อนแล้ว และนำเข้าสู่กระบวนการทางภาครับต่อไป ซึ่งโครงสร้างที่ใช้ในการมอดูเลต ของสัญญาณเคโอติกนั้น จะแตกต่างจากการมอดูเลตแบบการสื่อสารทั่วไปเล็กน้อยดังจะกล่าวในโอกาสต่อไป

2.3.1 โครงสร้างระบบสื่อสารแบบดิจิตอล

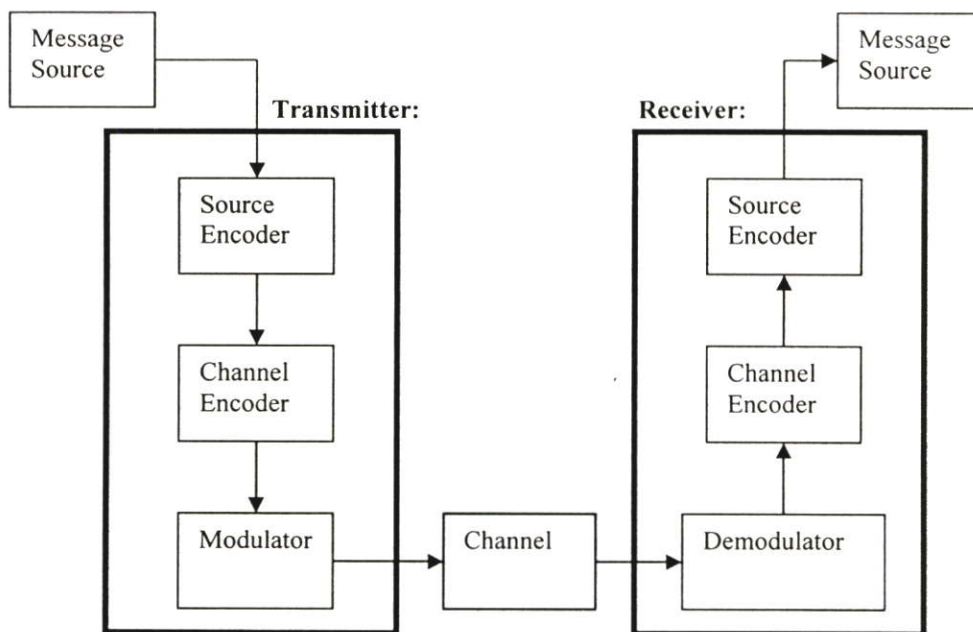
ทฤษฎีของระบบการสื่อสารนั้นจะเกี่ยวข้องกับ การส่งข้อมูลจากแหล่งกำเนิดผ่านตัวกลาง เพื่อส่งต่อไปยังเครื่องรับ โดยระบบการสื่อสารด้วยระบบดิจิตอลนั้นแสดงในรูปที่ 2.3 โดยภาคส่ง จะทำการส่งข้อมูลจากแหล่งกำเนิดข้อมูลดิจิตอล อาทิ คอมพิวเตอร์ ไปยังเครื่องรับ ให้ได้ประสิทธิภาพตามที่กำหนดในแต่ละมาตรฐาน ซึ่งขั้นตอนการแปลงข้อมูลดิจิตอลให้เป็นลำดับสัญญาณ นั้นจะทำการเปลี่ยนคุณสมบัติของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็น “คลื่นพาห้” (Carrier Signal) กระบวนการนี้คือกระบวนการ “มอดูเลต” (Modulate) สัญญาณส่ง การสื่อสารส่วนใหญ่จะใช้กระบวนการมอดูเลตเพื่อทำให้ข้อมูลที่มีลักษณะสัญญาณแบบดิจิตอลสามารถส่งผ่านช่องสัญญาณที่เป็นแบบอนาลอกได้ ส่วนเครื่องรับจะทำหน้าที่รับสัญญาณที่ผ่านช่องทางโดยใช้ตัวกรอง จากนั้นจะทำการดีมอดูเลต แล้วผ่านไปยังส่วนตีความหมาย เพื่อหาข้อมูลดิจิตอลที่ถูกส่งมาก่อนที่จะผ่านกระบวนการต่างๆ

นอกจากนี้ การแปลงสัญญาณดิจิตอลให้เป็นสัญญาณอนาลอก เพื่อส่งสัญญาณนั้นอาจจะมีกระบวนการอื่นๆ เข้าร่วมด้วย เช่น การเข้ารหัส(Encryption) การบีบอัดข้อมูล (Data Compression) การตรวจสอบความถูกต้อง (Error-Correction Capability) โดยเฉพาะการตรวจสอบความถูกต้อง

มักมีความจำเป็นเนื่องจากช่องสัญญาณอนาล็อก ในทางปฏิบัติสามารถทำให้เกิดการรบกวนของสัญญาณได้หลายรูปแบบ ทั้งแบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น

การมอดูเลตนั้นเป็นกระบวนการที่ทำการเปลี่ยนสัญลักษณ์ให้เป็นรูปคลื่นอนาล็อกที่เหมาะสม โดยทั่วไปการมอดูเลตจะเป็นการมอดูเลตทางเลขเชิงแอมพลิจูด (Amplitude Shift Keying) การมอดูเลตทางเลขเชิงเฟส (Frequency Shift Keying), Continuous Phase Modulation (CPM) และ Amplitude Phase Keying (APK) โดยวิธีการเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของรูปคลื่น ให้สอดคล้องกับสัญญาณที่ต้องการส่ง

ช่องสัญญาณที่เป็นตัวกลางในระบบการสื่อสารนั้น จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากเครื่องรับ ทำให้สัญญาณที่ภากรับได้ ไม่ใช่สัญญาณที่ถูกส่งมาเพียงอย่างเดียว ซึ่งการคิดมอดูเลต ทำได้เพียงการประมาณค่าสัญลักษณ์เท่านั้น



รูปที่ 2.3 การสื่อสารด้วยระบบดิจิทัล[5]

2.3.2 การวัดประสิทธิภาพของระบบ

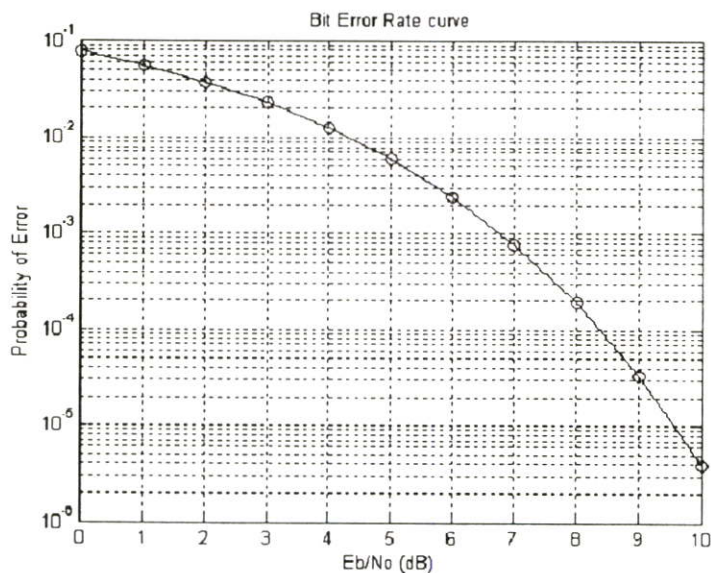
ส่วนที่ทำให้ระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลเกิดความผิดพลาดขึ้นนั้น ส่วนใหญ่เกิดจากส่วนที่เป็นช่องสัญญาณอนาล็อก การสื่อสารด้วยระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลมักจะเป็นการหาวิธีที่ทำให้ประสิทธิภาพในการส่งผ่านข้อมูลสูงที่สุด และให้พลังงานที่ใช้ในการส่งต่อ 1 บิตข้อมูลมีค่าน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงแบนวิดท์ที่ใช้ในการส่งอีกด้วย โดยการวัดประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบดิจิทัล มักจะอยู่ในรูปของค่าอัตราความผิดพลาดของบิต (Bit Error Rate: BER) ซึ่ง

เป็นค่าความน่าจะเป็นจะขึ้นกับวิธีการเข้ารหัส วิธีการมอดูเลต และดีมอดูเลต ค่าพลังงานของเครื่องส่งที่ใช้ รวมถึงคุณสมบัติของช่องสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามสภาพแวดล้อมด้วย

กราฟของอัตราการผลิตของบิตข้อมูล ถูกใช้เพื่อที่จะวัดประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งกราฟนี้แสดงความน่าจะเป็นของบิตที่ผิดพลาดที่เกิดขึ้นในกลุ่มข้อมูลที่รับมาได้ ตัวอย่างของกราฟดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.4 ค่าของข้อมูลจะแสดงด้วยกราฟเซมิล็อก (semi-log graph) ระหว่างแกน y เป็นแกนค่าลอการิทึม แสดงค่าจำนวนบิตที่ผิดพลาด (BER) ส่วนแกน x แสดงค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณส่งต่อสัญญาณรบกวน E_b/N_o (Signal-to-Noise ratio: SNR) โดยค่า E_b คือ ค่าพลังงานที่ใช้ในการส่ง 1 บิตข้อมูล (energy per bit) และ N_o คือ ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวน (power spectral density) ที่มาจากช่องสัญญาณสื่อสาร ซึ่งมีค่าอัตราส่วนดังกล่าวแสดงในสมการที่ 2.7

$$SNR(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{E_b}{N_o} \right) \quad (2.7)$$

กราฟแสดงการผลิตของบิตข้อมูลนี้ จะสามารถใช้พิจารณา และเปรียบเทียบกราฟที่เกิดความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดของบิตทางทฤษฎี โดยการเปรียบเทียบนั้นจะสร้างขึ้น ระหว่างค่าที่กำหนดไว้ และ ผลที่ได้จากการจำลองแบบ โดยการให้ E_b เป็นค่าคงที่ และทำการลดค่าของระดับสัญญาณรบกวน จะทำให้ค่าอัตราส่วนดังกล่าวสูงขึ้น [5]



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างกราฟแสดงบิตผิดพลาดของระบบ

2.3.3 การมอดูเลต และดีมอดูเลต โดยวิธีใช้ฟังก์ชันพื้นฐาน

การมอดูเลตเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสัญลักษณ์ให้อยู่ในรูปคลื่นสัญญาณอนาล็อก (องค์ประกอบของชุดสัญญาณ $s_m(t)$) จากนั้นสัญญาณดังกล่าวจะถูกส่งผ่านไปยังตัวกลางในการส่งซึ่งจะทำให้เกิดการลดทอนและมีสัญญาณเข้ามารบกวน จากนั้น ดีมอดูเลตจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณที่มาถึงยังภาครับ $r_m(t)$ ให้กลับเป็นสัญญาณข้อมูล

2.3.3.1 ฟังก์ชันพื้นฐานแบบเชิงตั้งฉาก

เมื่อพิจารณาถึงการใช้แบนวิคท์ของระบบจะพบว่า ยิ่งชุดสัญญาณมีขนาดใหญ่เท่าไร ประสิทธิภาพการใช้งานของแบนวิคท์ก็จะสูงตามไปด้วย โดยข้อได้เปรียบหลักของฟังก์ชันพื้นฐานที่เป็นเชิงตั้งฉาก คือ การที่สามารถสร้างชุดสัญญาณขนาดใหญ่ได้โดยใช้ฟังก์ชันพื้นฐานเพียงไม่กี่ชุด ทำให้เราสามารถกำหนดฟังก์ชันพื้นฐานเหล่านี้ที่เครื่องรับได้อย่างไม่ยุ่งยาก

กำหนดให้องค์ประกอบของชุดสัญญาณคือ $s_m(t)$ สามารถเขียนอยู่ในรูปผลรวมเชิงเส้นได้เป็น

$$s_m(t) = \sum_{j=1}^N s_{mj} g_j(t) dt \quad 0 \leq t \leq T, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (2.8)$$

โดยที่ T คือ ค่าช่วงของสัญลักษณ์

s_{mj} คือ ค่าน้ำหนักของฟังก์ชันพื้นฐานที่ j

g_j โดยที่ $j = 1, 2, \dots, N$ เป็นฟังก์ชันพื้นฐานแบบตั้งฉาก

N เป็นฟังก์ชันพื้นฐานที่ใช้ ($N \leq M$)

และฟังก์ชันพื้นฐานแบบเชิงตั้งฉาก จะมีคุณสมบัติ คือ

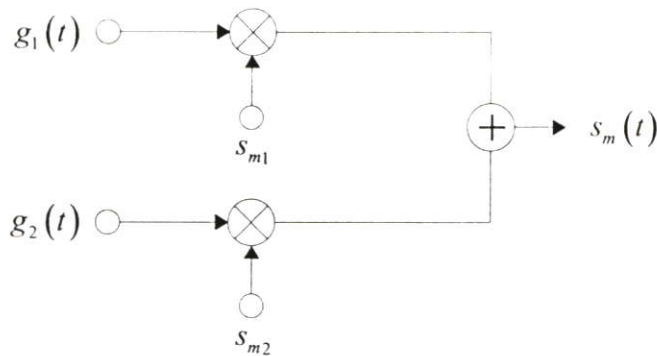
$$\int_0^T g_l(t) g_j(t) dt = \begin{cases} 1 & \text{กรณี } l = j \\ 0 & \text{กรณี } l \neq j \end{cases} \quad (2.9)$$

2.3.3.2 การสร้างชุดสัญญาณ

ค่าสัมประสิทธิ์ s_{mj} ในสมการที่ 2.8 เป็นส่วนประกอบลำดับที่ j (j th) ของเวกเตอร์สัญญาณ s_m ขนาด N โดยบิตข้อมูลที่ส่งเข้ามาจะถูกแปลงให้เป็นลำดับสัญลักษณ์ ซึ่งค่าองค์ประกอบของชุดสัญญาณจะเกิดจากการรวมกันของลำดับสัญญาณระหว่างค่าน้ำหนักของฟังก์ชันพื้นฐานที่ j กับค่าฟังก์ชัน g_j ตามสมการที่ 2.8

รูปที่ 2.5 แสดงถึงตัวอย่างของการสร้างสัญญาณ $s_m(t)$ โดยใช้ผลรวมทางน้ำหนักรวมของฟังก์ชันพื้นฐาน 2 ชุด คือ $g_1(t)$ และ $g_2(t)$ เมื่อต้องการส่งสัญลักษณ์ "1" ค่าสัมประสิทธิ์ จะถูก

กำหนดให้เป็น $s_{m1} = 1$ และ $s_{m2} = 0$ และค่าของสัมประสิทธิ์จะกลับค่ากันเมื่อ ส่งสัญลักษณ์ “2” กล่าวคือ เมื่อส่งด้วยสัญลักษณ์ “2” ค่าของสัมประสิทธิ์จะเป็น $s_{m1} = 0$ และ $s_{m2} = 1$



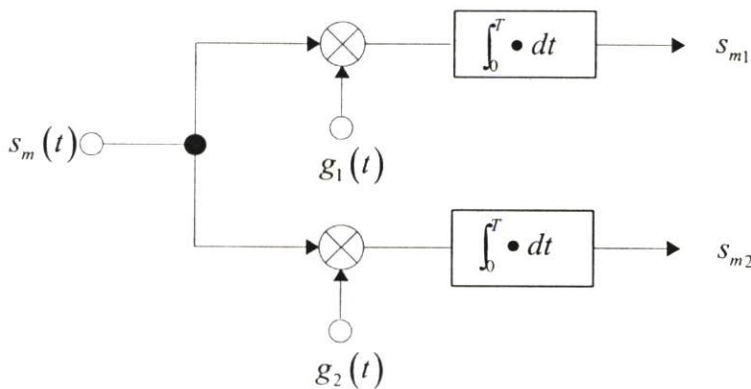
รูปที่ 2.5 การสร้างองค์ประกอบของชุดสัญญาณที่ใช้ฟังก์ชันพื้นฐาน 2 ชุด

2.3.3.3 การหาเวกเตอร์สัญญาณโดยใช้สหสัมพันธ์

การหาเวกเตอร์สัญญาณนั้นทำได้โดยการอาศัยองค์ประกอบของชุดสัญญาณ เนื่องจากชุดสัญญาณที่มีฟังก์ชันเชิงตั้งฉากเป็นฟังก์ชันพื้นฐานนั้น ในส่วนเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์จะต้องมีฟังก์ชันพื้นฐานทุกชุดอยู่ในเครื่องรับ โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ s_{mj} ได้จาก

$$s_{mj} = \int_0^T g_i(t)g_j(t) dt \quad , \quad \begin{cases} m=1,2,3,\dots,M \\ n=1,2,3,\dots,N \end{cases} \quad (2.10)$$

ในรูปที่ 2.6 แสดงถึงการหาค่าสัมประสิทธิ์ s_{mj} ที่ใช้เป็นฟังก์ชันพื้นฐาน 2 ชุด ซึ่งในการตีมอดูเลตจะใช้การสหสัมพันธ์ 2 ชุด ทำหน้าที่หา s_{m1} และ s_{m2} จากการใช้ฟังก์ชันพื้นฐาน $g_1(t)$ และ $g_2(t)$ เข้ามาตีมอดูเลตตามลำดับ



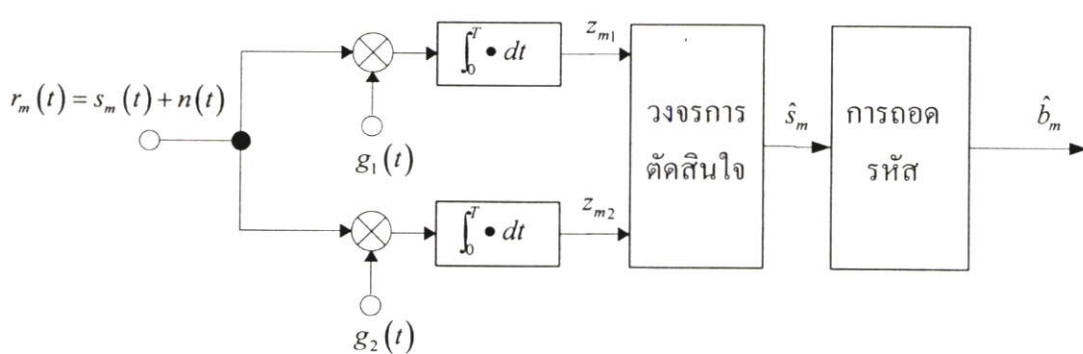
รูปที่ 2.6 การหาค่า s_{mj} ที่เครื่องรับโดยใช้ฟังก์ชันพื้นฐาน 2 ชุด

2.3.4 รูปแบบพื้นฐานของเครื่องรับที่ใช้เทคนิคสัญญาณ

2.3.4 .1 เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์

จากสมการที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่าการหาค่าเวกเตอร์สัญญาณจากสัญญาณที่รับได้โดยใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์นั้น เงื่อนไขที่สำคัญคือจะต้องมีค่าฟังก์ชันพื้นฐาน $g_i(t)$ ทั้งหมดทุกค่าอยู่ในเครื่องรับ อีกทั้งต้องทราบค่า timing information ซึ่งประกอบด้วยค่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์ (T) และเวลาที่เริ่มทำการส่ง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7

ในช่องสัญญาณที่ใช้ในทางปฏิบัติ นั้น สัญญาณ $r_m(t)$ ที่เป็นอินพุท ของเครื่องรับจะเป็นผลรวมระหว่างสัญญาณที่ส่งออกมาจากภาครับ $s_m(t)$ กับสัญญาณรบกวน $n(t)$ ทำให้การหาองค์ประกอบของชุดสัญญาณ s_{mj} ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการใช้วิธีสหสัมพันธ์เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น โดยจากรูปที่ 2.4 ทำการแทนค่าประมาณเป็นเวกเตอร์สังเกตการณ์ (Observation vector) z_{m1} และ z_{m2} หลังจากนั้นจะถูกนำไปเป็นอินพุทของวงจรการตัดสินใจ (Decision Circuit) เพื่อหาค่า \hat{s}_{mj} ที่ใกล้เคียงกับ s_{mj} จากนั้นทำการถอดรหัสเพื่อให้ได้ข้อมูลสุดท้ายออกมา โดยหลักสำคัญของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ คือ การหาฟังก์ชันพื้นฐานที่ใช้ทั้งหมด และ ข้อมูล timing information จากสัญญาณที่รับมาได้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ที่ใช้ฟังก์ชันพื้นฐาน 2 ชุด

2.3.4 .2 เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์

การใช้แมตซ์ฟิลเตอร์ในการหาเวกเตอร์สังเกตการณ์ z_{mj} แทนเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ได้ โดยอาศัยข้อแตกต่างที่ว่า เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์นั้นจะมีฟังก์ชันพื้นฐานทั้งหมดเก็บไว้ในเครื่องรับ ในรูปของผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ (Impulse Response) ทำให้ไม่ต้องหาฟังก์ชันพื้นฐานจากสัญญาณที่รับมาได้เช่นเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์

2.3.4.3 เครื่องรับแบบร่วมนัยและไม่ร่วมนัย

เครื่องรับแบบร่วมนัยจะเป็นจะต้องมีค่าฟังก์ชันพื้นฐานที่เป็นสำเนาที่ถูกต้อง โดยในทางปฏิบัติเครื่องรับแบบร่วมนัยมักจะใช้ในการคิโมตคูลเลตสัญญาณที่เกิดจากการมอดูเลตทางเลขเชิงแอมปลิจูด, การมอดูเลตทางเลขเชิงเฟส, Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), M-ary PSK (MPSK) และ M-ary Quadrature Amplitude Modulate (MQAM) โดยค่าฟังก์ชันพื้นฐานนั้นหาได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ หรือเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ก็ได้ แต่ความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยของผลการตอบสนองต่ออิมพัลส์ในแมตซ์ฟิลเตอร์จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงอย่างมาก ดังนั้นเครื่องรับแบบร่วมนัยจึงมักหลีกเลี่ยงการใช้เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ในการหาฟังก์ชันพื้นฐาน

ส่วนเครื่องรับแบบไม่ร่วมนัยนั้น ไม่จำเป็นต้องหาค่าฟังก์ชันพื้นฐานจากสัญญาณที่รับได้ เครื่องรับแบบไม่ร่วมนัยจะใช้คุณสมบัติอื่นๆ ของสัญญาณ s_{m_j} ในการคิโมตคูลเลต โดยการเลือกคุณสมบัติดังกล่าวนั้นจะขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการมอดูเลตด้วย

ประสิทธิภาพของระบบในช่องสัญญาณ ที่มีสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนแบบบวกนั้น เครื่องรับแบบร่วมนัยจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า เครื่องรับแบบไม่ร่วมนัย ในทางปฏิบัติถ้าอัตราความผิดพลาดของบิต (BER) สูงกว่า 10^{-2} หรือ 10^{-3} ระบบจะไม่สามารถทำงานได้ อีกทั้งเครื่องรับแบบร่วมนัยยังสามารถสร้างชุดสัญญาณขนาดใหญ่ได้ โดยใช้ฟังก์ชันพื้นฐานที่เป็นเชิงตั้งฉากเพียงไม่กี่ชุด ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้แบนวิทที่มีค่าสูงด้วย แต่เครื่องรับแบบไม่ร่วมนัยนั้นมีข้อดีที่หากสภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถหาค่าฟังก์ชันพื้นฐานได้นั้นหมายถึง ในกรณีที่เครื่องรับแบบร่วมนัยไม่สามารถทำงานได้ แต่เครื่องรับแบบไม่ร่วมนัยนั้นสามารถทำงานได้ อีกทั้งความซับซ้อนของวงจรการทำงานของเครื่องรับดังกล่าวมีความซับซ้อนน้อยกว่าเครื่องรับแบบร่วมนัยด้วย

หัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงลักษณะสำคัญของสัญญาณแคโอดิกที่นำมาใช้ในการสื่อสาร การมอดูเลตสัญญาณ และการหาค่าอัตราความผิดพลาดของบิตตามลำดับ

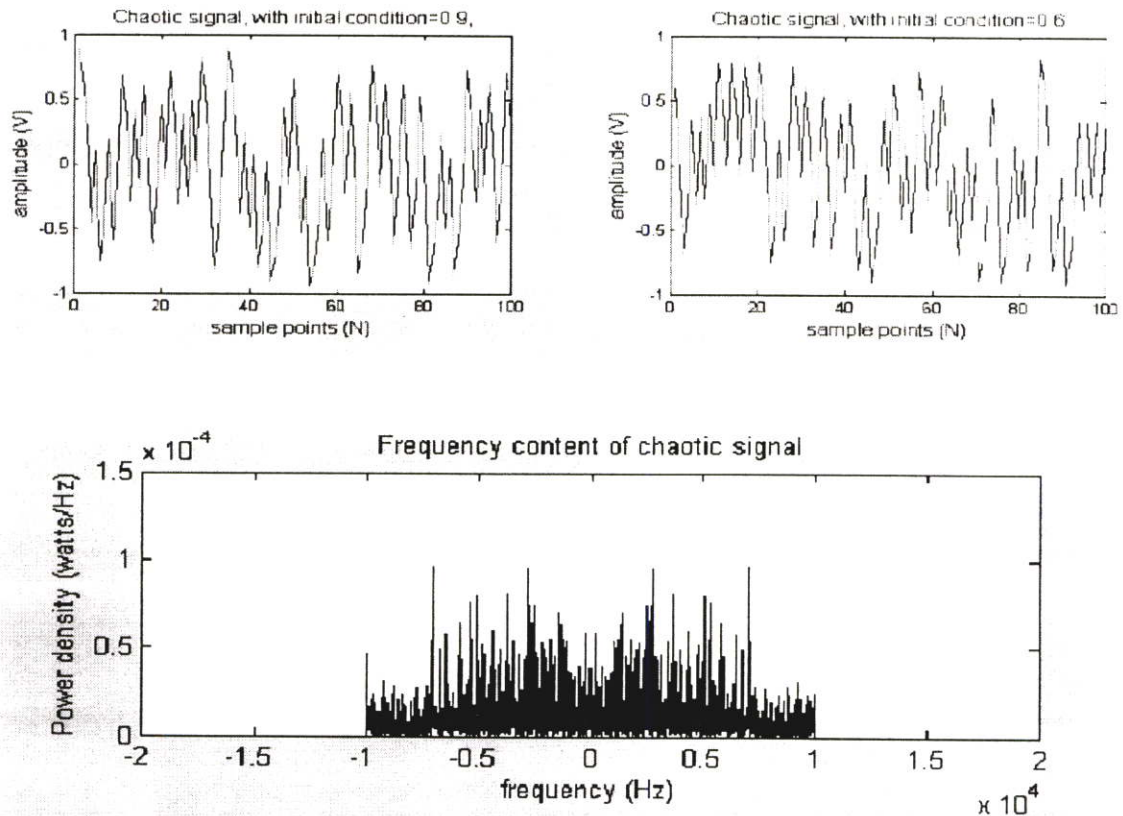
2.4 การมอดูเลตสัญญาณแคโอดิก

สัญญาณแคโอดิกเป็นสัญญาณที่ได้จากระบบพลวัตที่กำหนดได้รูปแบบหนึ่ง (Determine Dynamic System) ระบบแคโอดิกมีคุณสมบัติสำคัญคือ “ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขเริ่มต้น” ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขเริ่มต้นเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับสถานะของระบบได้เป็นอย่างมาก

คุณสมบัติของสัญญาณแคโอดิกในช่องสัญญาณการสื่อสาร

- 1) ลักษณะสัญญาณไม่เป็นรายคาบ (Nonperiodic Signal)
- 2) สเปกตรัมของพลังงานมีช่วงความถี่กว้าง (Broadband Power Spectrum)

3) วัตถุประสงค์การเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขเริ่มต้น (Sensitive Dependent on Initial Condition) โดยในรูปที่ 2.8 จะแสดงถึงสัญญาณเคออสติกในแกนเวลา (Time Domain) และแกนความถี่ (Frequency Domain)[5]



รูปที่ 2.8 ลักษณะของสัญญาณเคออสติกในแกนเวลา และแกนความถี่

การมอดูเลตสัญญาณดิจิทัลโดยใช้สัญญาณเคออสติกนั้นเป็นการมอดูเลตข้อมูลสื่อสารที่ต้องการส่งให้กลายเป็นรูปคลื่นสัญญาณเคออสติก โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการมอดูเลตทั้งหมด 3 วิธี นั่นคือ Coherent Antipodal Chaos Shift Keying (Coherent Antipodal CSK), Coherent Differential Chaos Shift Keying (Coherent DCSK) และ Differential Coherent DCSK โดยจะกล่าวถึงการมอดูเลตทั้ง 3 แบบตามลำดับ

2.4.1 การมอดูเลตแบบ Chaos Shift Keying (CSK)

Chaos Shift Keying (CSK) เป็นวิธีการมอดูเลตสัญญาณดิจิทัลโดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณเคออสติกที่แตกต่างกัน หรือเครื่องเดียวกันแต่จัดให้มีค่าสถานะเริ่มต้นที่แตกต่างกัน มาใช้เป็นฟังก์ชันพื้นฐาน ซึ่งเครื่องกำเนิดสัญญาณเคออสติกดังกล่าวอาจได้จาก ระบบพลวัตเดียวกันที่มีค่าพารามิเตอร์ต่างกัน หรือคนละระบบพลวัตเลยก็ได้

เนื่องจากสัญญาณแคโอดิกที่นำมาใช้เป็นฟังก์ชันพื้นฐานมีคุณสมบัติที่ไม่เป็นรายคาบ ทำให้องค์ประกอบของชุดสัญญาณที่ถูกส่งออกไปในช่องสัญญาณมีรูปร่างที่แตกต่างกันในทุกๆ ช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณ แม้ว่าจะส่งด้วยสัญลักษณ์เดียวกันก็ตาม

องค์ประกอบของชุดสัญญาณ คือ

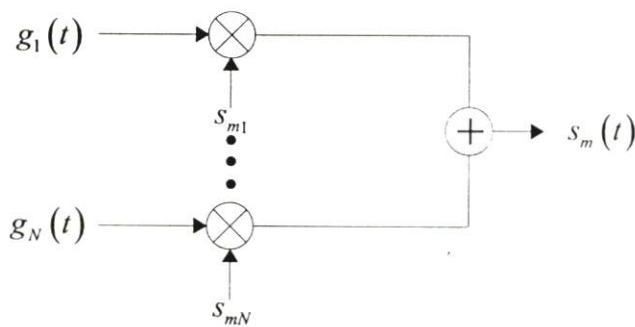
$$s_m(t) = \sum_{j=1}^N s_{mj} g_j(t), \quad j=1,2,\dots,N \quad (2.11)$$

โดยที่ m คือ ลำดับของส่วนประกอบของสัญญาณ

N คือ จำนวนฟังก์ชันพื้นฐานทั้งหมดที่ใช้

$g_j(t)$ คือ รูปคลื่นของสัญญาณแคโอดิก

จากสมการที่ 2.11 สามารถเขียนแผนภาพได้เป็น



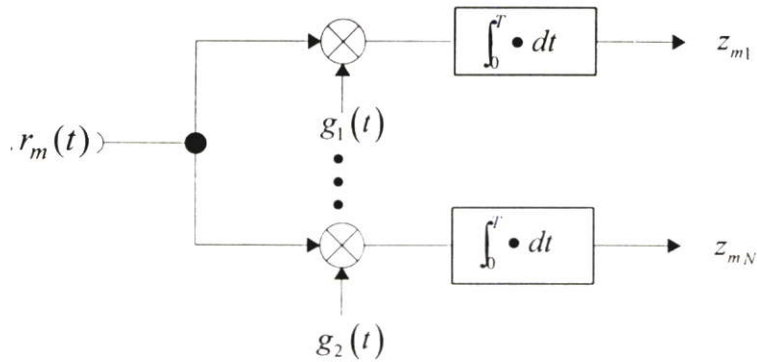
รูปที่ 2.9 การสร้างองค์ประกอบของชุดสัญญาณ CSK

นอกจากนี้ฟังก์ชันพื้นฐานของสัญญาณแคโอดิกแบบตั้งฉาก คือ

$$E \left[\int_0^T g_l(t) g_j(t) dt \right] = \begin{cases} 1 & \text{กรณี } l = j \\ 0 & \text{กรณี } l \neq j \end{cases} \quad (2.12)$$

โดยที่ $E[\cdot]$ แทน Expectation operator

การหาค่าน้ำหนัก s_{mj} ของเวกเตอร์ที่เครื่องรับสามารถทำได้โดยการหาสหสัมพันธ์ของสัญญาณที่รับมาได้ กับชุดสัญญาณที่มีอยู่ที่เครื่องรับ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งอาจจะเป็น z_{mj} ที่เป็นค่าประมาณของ s_{mj}



รูปที่ 2.10 แผนภาพของเครื่องรับแบบร่วมนัยที่ใช้ฟังก์ชันพื้นฐานจำนวน N ชุด

2.4.2 การมอดูเลตแบบ Coherent Antipodal CSK

การมอดูเลตแบบ Coherent Antipodal CSK จะใช้ฟังก์ชันพื้นฐาน $g_1(t)$ เพียงชุดเดียวในการกำหนดค่าส่วนประกอบของชุดสัญญาณ แผนภาพของการมอดูเลตโดยใช้ฟังก์ชันชุดเดียวในการมอดูเลตแสดงในรูปที่ 2.11 และสามารถแสดงสมการของสัญญาณได้เป็น

$$s_m(t) = s_{m1}g_1(t) \tag{2.13}$$

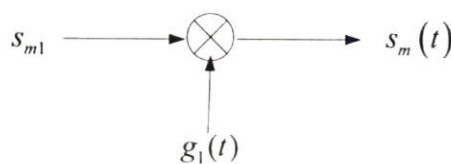
บิต “1” จะถูกแทนด้วย

$$s_1(t) = s_{11}g_1(t) \tag{2.14}$$

บิต “0” จะถูกแทนด้วย

$$s_2(t) = s_{21}g_1(t) \tag{2.15}$$

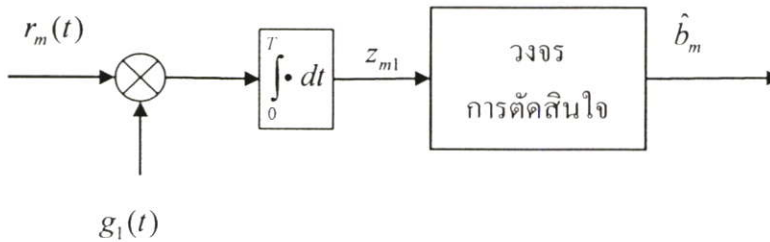
โดยที่ $s_{11} = \sqrt{E_b}$ และ $s_{21} = -\sqrt{E_b}$ โดยที่ E_b คือพลังงานที่ใช้ในการส่งของ 1 บิตข้อมูล



รูปที่ 2.11 การมอดูเลตแบบ CSK โดยใช้ฟังก์ชันพื้นฐานชุดเดียว

ที่เครื่องรับแบบร่วมนัย สัญญาณที่รับได้จะมีสัญญาณรบกวนร่วมเข้ามาด้วย เมื่อนำไปสหสัมพันธ์กับฟังก์ชันพื้นฐาน $g_1(t)$ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 จะหาค่า z_{m1} ได้จากสมการที่ 2.16

$$z_{m1} = s_{m1} \int_0^T g_1^2(t) dt + \int_0^T \tilde{n}(t) g_1(t) dt \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.12 เครื่องรับแบบร่วมนัยของสัญญาณ Antipodal CSK

วงจรรวบรวมการตัดสินใจจะทำการเลือก โดยมีข้อกำหนดว่า ถ้า $z_{m1} > z_T$ ข้อมูลที่ได้คือ บิต “1” และถ้า $z_{m1} < z_T$ ข้อมูลที่ได้คือ บิต “0” เมื่อ z_T เป็นค่าเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสม (Appropriate Threshold) ของการมอดูเลต

ในเครื่องรับนั้นจะต้องมีวงจรที่ใช้ในการผลิตสัญญาณ $g_1(t)$ ที่เหมือนกันเครื่องส่ง หรือเรียกว่า มีการซิงค์โครไนซ์กัน (Synchronize) ระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับนั่นเอง ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว การทำให้ซิงค์โครไนซ์กันอย่างสมบูรณ์ทำได้ยาก จึงเป็นการพิจารณาในทางทฤษฎีเท่านั้น และค่าอัตราความผิดพลาดของบิตจะนำเสนอในโอกาสต่อไป

2.4.3 การมอดูเลตแบบ Coherent Differential Chaos Shift Keying (Coherent DCSK)

Differential Chaos Shift Keying (DCSK) เป็นการมอดูเลตที่ใช้สัญญาณแคโอดิกโดยมีฟังก์ชันพื้นฐาน 2 ชุด ซึ่งมีหลักสำคัญคือ ฟังก์ชันพื้นฐานแต่ละชุดจะประกอบด้วยส่วนที่ซ้ำกันของคลื่นสัญญาณแคโอดิก ซึ่งจากคุณสมบัตินี้ทำให้สามารถนำเทคนิค Differentially Coherent มาใช้ได้ ชุดสัญญาณที่เกิดจากการมอดูเลตสัญญาณไบนารี โดยใช้เทคนิค DCSK คือ

$$s_m(t) = s_{m1}g_1(t) + s_{m2}g_2(t) \quad (2.17)$$

โดยที่ $(s_{11} \ s_{12}) = (\sqrt{E_b} \ 0)$ และ $(s_{21} \ s_{22}) = (0 \ \sqrt{E_b})$

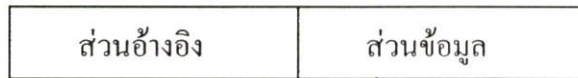
ซึ่งในการมอดูเลตแบบ DCSK จะมีรูปแบบของฟังก์ชันพื้นฐานเป็น

$$g_1(t) = \begin{cases} +\frac{1}{\sqrt{E_b}}c(t) & ; 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ +\frac{1}{\sqrt{E_b}}c\left(t - \frac{T}{2}\right) & ; \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases} \quad (2.18)$$

$$g_2(t) = \begin{cases} +\frac{1}{\sqrt{E_b}}c(t) & ; 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ -\frac{1}{\sqrt{E_b}}c\left(t - \frac{T}{2}\right) & ; \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases}$$

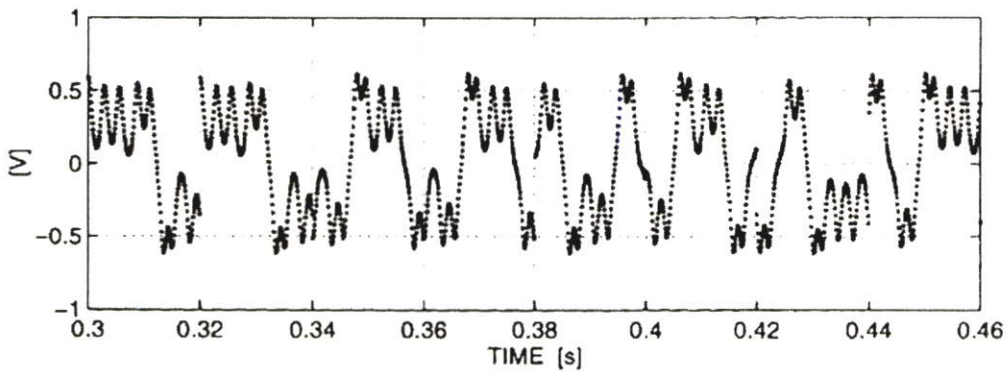
โดยที่ $c(t)$ คือ รูปสัญญาณคลื่นแคโอดิก

สำหรับโครงสร้างของการมอดูเลตแบบ DCSK นี้จะเหมือนกับการมอดูเลตที่ใช้ฟังก์ชันพื้นฐาน 2 ชุด สังเกตว่า ในฟังก์ชันพื้นฐานแต่ละชุดจะประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือ ส่วนอ้างอิง (referent-chip) และส่วนที่ 2 คือ ส่วนข้อมูล (information bearing-chip) ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ส่วนอ้างอิง และส่วนข้อมูลของรูปแบบสัญญาณ DCSK

เมื่อสัญญาณผ่านการมอดูเลตแบบ DCSK นั้น การส่งบิต “1” จะมีสมการเป็น $s_1(t) = \sqrt{E_b} g_1(t)$ ส่วนการส่งบิต “0” จะมีสมการเป็น $s_2(t) = \sqrt{E_b} g_2(t)$ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 [6]

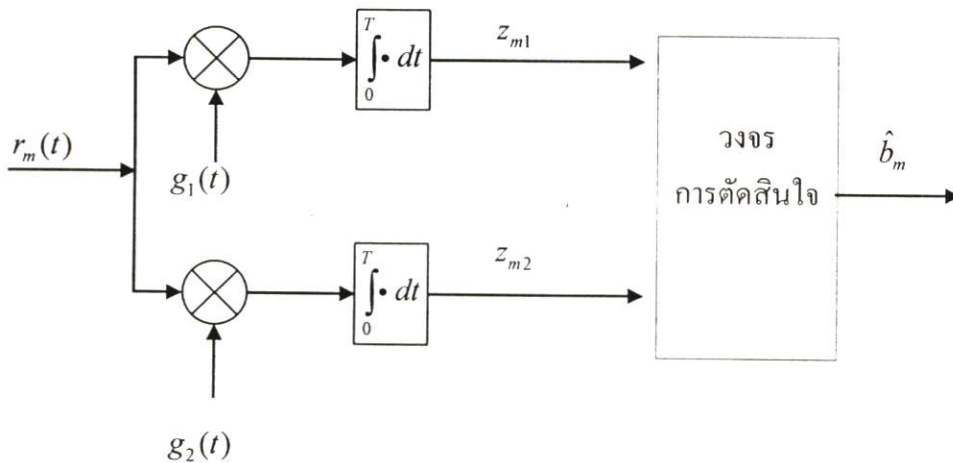


รูปที่ 2.14 สัญญาณ DCSK ที่ได้จากการมอดูเลตบิต 1100

การใช้เครื่องรับแบบร่วมนัยกับสัญญาณ DCSK นั้นแสดงดังรูปที่ 2.15 ซึ่งการใช้เครื่องรับดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันพื้นฐาน $g_1(t)$ และ $g_2(t)$ เช่นเดียวกับวิธี Coherent Antipodal CSK และสามารถหาที่ผ่านการมอดูเลตได้เป็น

$$\begin{aligned} z_{m1} &= s_{m1} \int_0^T g_1^2(t) dt + s_{m2} \int_0^T g_2(t)g_1(t) dt + \int_0^T \tilde{n}(t)g_1(t) dt \\ z_{m2} &= s_{m1} \int_0^T g_1(t)g_2(t) dt + s_{m2} \int_0^T g_2^2(t) dt + \int_0^T \tilde{n}(t)g_2(t) dt \end{aligned} \quad (2.19)$$

โดยกระบวนการตัดสินใจของเครื่องรับแบบนี้ จะตั้งค่าเงื่อนไขจากการเปรียบเทียบค่า z_{m1} กับ z_{m2} ในกรณีที่ $z_{m1} > z_{m2}$ ถือว่าบิตที่ถูกส่งมาคือบิต "1" และ การพิจารณาว่า บิตที่ถูกส่งมาเป็นบิต "0" อยู่ในกรณีที่ $z_{m1} < z_{m2}$



รูปที่ 2.15 การใช้เครื่องรับแบบร่วมนัยกับสัญญาณ DCSK

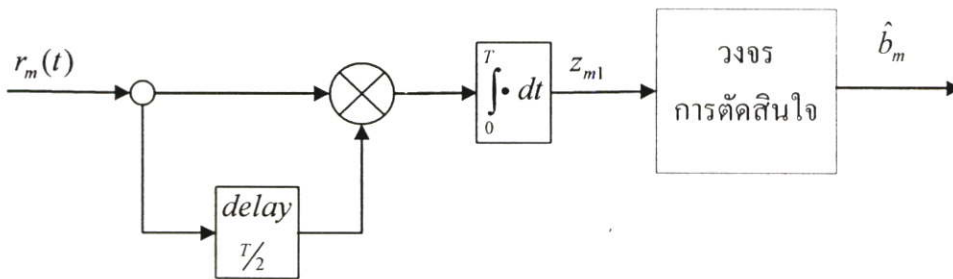
2.4.4 การมอดูเลตแบบ Differentially Coherent DCSK

ในวิธีการมอดูเลตแบบนี้ไม่จำเป็นต้องใช้เทคนิคการซิงโครไนซ์ของสัญญาณแคโอดิกในการหาฟังก์ชันพื้นฐานเพื่อนำมาคิมอดูเลตข้อมูลที่เครื่องรับ วิธีการมอดูเลตแบบนี้จะนำโครงสร้างของสัญญาณ DCSK ที่ประกอบด้วยของรูปคลื่นสัญญาณส่วนอ้างอิงและส่วนข้อมูล ซึ่งส่วนที่เป็นข้อมูลนี้จะขึ้นกับข้อมูลที่ทำการส่ง กล่าวคือ อาจจะมีลักษณะรูปสัญญาณที่เหมือนกันส่วนอ้างอิง หรือ มีลักษณะรูปสัญญาณที่เป็นส่วนกลับจากส่วนอ้างอิงก็ได้

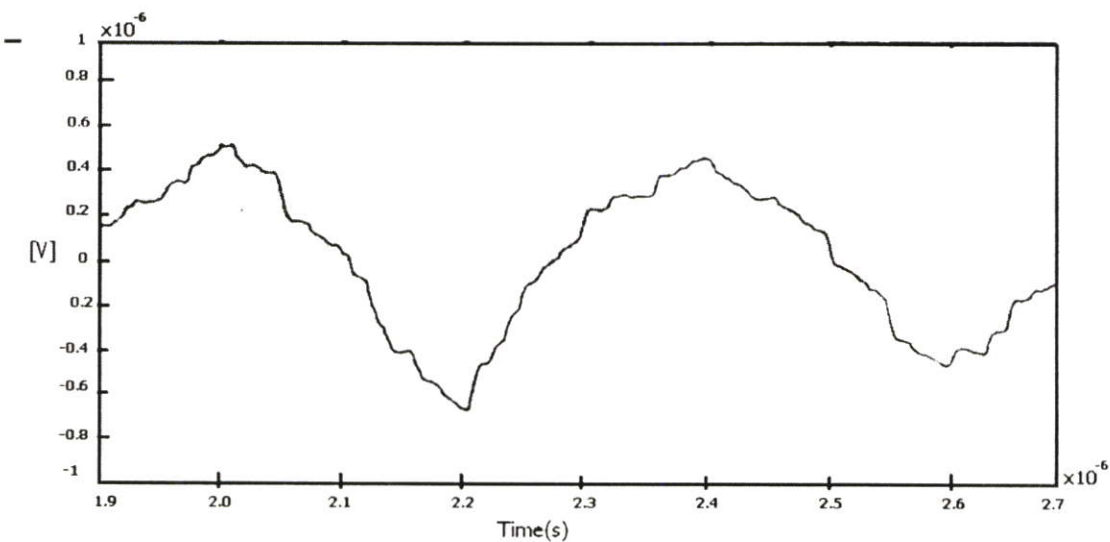
ในรูปที่ 2.16 แสดงถึงเครื่องรับแบบ Differential Coherent DCSK เมื่อรับสัญญาณแล้วจะมีการประวิงเวลาช่วงหนึ่ง โดยค่าที่ประวิงมีค่าเท่ากับ $\frac{T}{2}$ ผ่านไปยังส่วนหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่รับได้กับสัญญาณที่ถูกประวิงเวลา และสามารถหาค่า z_m ได้จาก

$$z_m = \int_{T/2}^T [\tilde{s}_m(t) + \tilde{n}(t)][\tilde{s}_m(t - \frac{T}{2}) + \tilde{n}(t - \frac{T}{2})] dt \quad (2.20)$$

วงจรตัดสินใจที่เครื่องรับจะทำการเปรียบเทียบกันระหว่างส่วนอ้างอิงกับส่วนข้อมูล โดยกำหนดว่า ถ้าผลการเปรียบเทียบเหมือนกัน นั่นคือ มีการส่งบิต “1” ถ้าการเปรียบเทียบแล้วเป็นส่วนกลับของส่วนอ้างอิงนั่นคือ มีการส่งด้วยบิต “0” รูปที่ 2.17 จะแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบเมื่อมีการส่งบิตข้อมูล “1010” ในภาครับ



รูปที่ 2.16 เครื่องรับของวิธี Differential Coherent DCSK



รูปที่ 2.17 ผลที่ได้จากการใช้เครื่องรับแบบ Differentially coherent DCSK ที่ส่งบิต “1010”

บทที่ 3

ความรู้พื้นฐานสายส่งไฟฟ้ากำลัง

3.1 ระบบสายส่งหลัก (Transmission Line)

พลังงานงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ผลิตได้จะถูกส่งออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังแหล่งผู้ใช้งานโดยผ่านทาง สายส่งไฟฟ้า (Transmission Line) ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าส่งผ่านตั้งแต่ 115kV 230kV จนถึง 500kV ในปัจจุบันโดยระบบสายส่งจะมีพิกัดกำลังตั้งแต่ 100 จนถึง 4000 MVA ระบบสายส่งที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่ 2 ระบบ คือ ระบบเหนือดิน (overhead) และระบบใต้ดิน (underground) แต่ที่พบๆ เห็นอันอยู่ทั่วไป จะเป็นระบบสายส่งเหนือดิน ซึ่งจะใช้เป็นระบบสายส่งที่มีระยะทางส่งไกลๆ มักจะยาวกว่า 100 กิโลเมตร โดยสายตัวนำที่ใช้จะเป็นสายแบบเปลือยไม่มีฉนวนหุ้มยึดอยู่กับเสาส่ง (tower) โดยใช้ลู่ล้วยฉนวนเป็นตัวยึด ดังนั้นระบบสายส่งแบบนี้จึงต้องมีการระวังและป้องกันผลกระทบจาก ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าค่อนข้างมาก และระบบไฟฟ้าจะเชื่อมต่อโยงประสานกันเป็นโครงข่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่ ซึ่งต่อเชื่อมระบบสายส่งเข้าด้วยกันทั้งหมด (ties)

ตารางที่ 3.1 ระดับแรงดันไฟฟ้าของประเทศไทย[7]

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

จะเห็นได้ว่าเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตออกมาจากตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีระดับแรงดันไฟฟ้าไม่สูงมากนัก ซึ่งยังไม่เหมาะที่จะทำการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าด้วยระดับแรงดันขนาดนั้น ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังชนิดปรับเพิ่มแรงดัน (Step-up power transformer) จึงเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำ จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ส่งต่อไปยังระบบสายส่งที่ใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าสูง เพื่อให้กระแสที่ไหลในระบบสายส่งมีขนาดเล็กลงที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเดียวกัน ซึ่งจะช่วยประหยัดทั้งทางด้านพลังงานไฟฟ้าและราคา พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ถูกส่งผ่านโดยระดับแรงดันไฟสูงนี้จะถูกส่งผ่านโดยระยะทางไกลๆ ไปจนถึงสถานีไฟฟ้าหลัก (bulk station) และสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบสายส่ง (Transmission substation) ซึ่งจะทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้า

ลงมาเพื่อแยกส่งผ่านไปยังแหล่งผู้ใช้งานหลายทิศทาง โดยผ่านทางสายส่งไฟฟ้ารอง (Subtransmission line) ในหลายระดับแรงดันที่เหมาะสม

3.2 ระบบสายส่งรอง

สายส่งไฟฟ้ารองจะต่อออกจากสถานีไฟฟ้าหลักหรือสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบสายส่งและแยกออกไปหลายทิศทางที่ต้องการ โดยทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้าลงมาด้วยการใช้ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังชนิดปรับลดแรงดัน (Step-down power transformer) ลดระดับแรงดันลงมาเป็น 115kV หรือ 69kV และมีระยะทางส่งไม่ไกลจากแหล่งผู้ใช้งานมากนัก โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ปรับลดลงมาจากสถานีไฟฟ้าหลักๆ นั้น อาจมีได้หลายระดับ ตามความต้องการของระบบสายส่งรองต่างๆกัน นั่นคือ สายส่งไฟฟ้ารอง จะเป็นสายตัวนำที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าสูงปานกลางต่อเชื่อมระหว่างระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกับระบบจำหน่ายที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ ดังเช่นในประเทศไทยสายส่งรอง 69kV จะต่อออกจากสถานีไฟฟ้าย่อย 230kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ไปยังสถานีไฟฟ้าย่อย 24kV ของการไฟฟ้านครหลวง หรือถ้าเป็นส่วนภูมิภาค สายส่งรอง 33 kV จะต่อออกจากสถานีไฟฟ้าย่อย 115kV ของไฟฟ้าฝ่ายผลิตไปยังสถานีไฟฟ้าย่อย 22kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

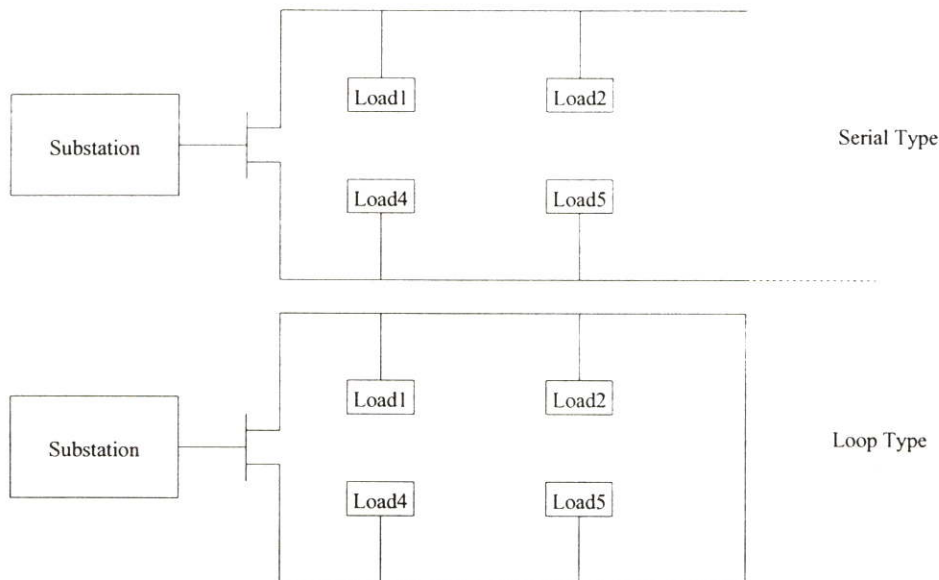
ดังนั้นระบบสายส่งไฟฟ้ารอง จะมีคุณสมบัติที่เป็นสายส่งระยะทางไกล (ประมาณ 10 กิโลเมตร) มีพิกัดกำลังต่ำ (น้อยกว่า 100 MVA) และมีจุดต่อแยกออกไปได้หลายจุดโดยมีระดับแรงดันไฟฟ้า ลดลงมาจากระบบสายส่งหลักเพื่อส่งต่อไปยังระบบจำหน่าย

3.3 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 3.1 เป็นรูปแสดงตัวอย่างโครงข่ายพื้นฐานของระบบจำหน่ายพลังงานอย่างง่าย

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

3.4 ระบบใช้งาน

หัวใจหลักของระบบไฟฟ้ากำลังก็คือ ความสามารถในการจัดหาและส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบที่เหมาะสมไปยังผู้ใช้งาน จะเห็นได้ว่า อุปกรณ์ที่จะเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้านั้นมีอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ทั้งหมดเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนรูปพลังงานทั้งสิ้น เราจะพบความจริงที่ว่า พลังงานที่อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้านั้นไม่มีประโยชน์หรือใช้งานได้เลย เครื่องใช้ไฟฟ้าจึงเป็นอุปกรณ์ที่นำพลังงานมาเปลี่ยนไปเป็นพลังงานอื่นๆ เพื่อการใช้งาน เช่น แสงสว่าง ความร้อน มอเตอร์ เสียง หรือแรงบิดทางกล

ผลจากการวิเคราะห์หาข้อดีข้อเสียและประโยชน์การใช้สอยทางคุณลักษณะการใช้ไฟฟ้าของอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า เราพอจะแบ่งลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าของโครงข่ายออกได้เป็น 2 ระบบ คือ

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

จะพบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยทั่วไป จะเป็นระบบแรงดันไฟฟ้าจ่ายโหลดคงที่ โดยกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงตามโหลด และจะเป็นโครงข่ายของลักษณะการต่อโหลดขนานกัน ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงของโหลดหนึ่งๆ จะไม่กระทบต่อพลังงานไฟฟ้าทางโหลดอื่นๆ ที่อยู่โครงข่ายเดียวกัน ดังนั้นระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องออกแบบ และปฏิบัติงานให้สอดคล้องกับความต้องการของโครงข่ายแหล่งผู้ใช้งานเป็นสำคัญ

ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเป็นโครงข่ายขนาดใหญ่ จุดที่ผู้ใช้งานดึงเอาพลังงานไฟฟ้าออกไปใช้เรียกว่า บัส (bus) ซึ่งผู้ใช้อย่อมมีความประสงค์ที่จะให้แรงดันที่ปรากฏหรือป้อนให้บัสนั้นๆ มีลักษณะที่แน่นอนเหมือนแหล่งจ่ายในอุดมคติ (ideal voltage source) นั่นคือ ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีคุณภาพที่ดีเป็นที่ต้องการของผู้ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลังกระแสสลับ จะต้องมีความสมบัติที่สำคัญ 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

- สัญญาณฮาร์โมนิก (Harmonic constant) สัญญาณคลื่นที่มีความถี่ต่างๆ กันนั้นสามารถถวิเคราะห์ได้จากวิธีการ Fourier series ซึ่งความสัมพันธ์ของสัญญาณความถี่ฮาร์โมนิก ที่ทับกันกับสัญญาณหลัก 50Hz (fundamental frequency) จะเป็นผลให้คุณภาพสัญญาณหลักที่ได้จะไม่เป็นรูปไซน์ ที่แท้จริง

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของระบบไฟฟ้านั้นมีระบบย่อยหลายระบบประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งแต่ละระบบย่อยต่างก็มีความสำคัญ และทำงานต่อเนื่องสอดประสานกันจากแหล่งผลิตจนถึงแหล่งใช้งาน โดยเป็นการนำพลังงานจากแหล่งให้กำเนิดพลังงานต่างๆ มาแปรเป็นพลังงานไฟฟ้าส่งผ่านไปแปรใช้งานในรูปแบบพลังงานที่ต้องการ

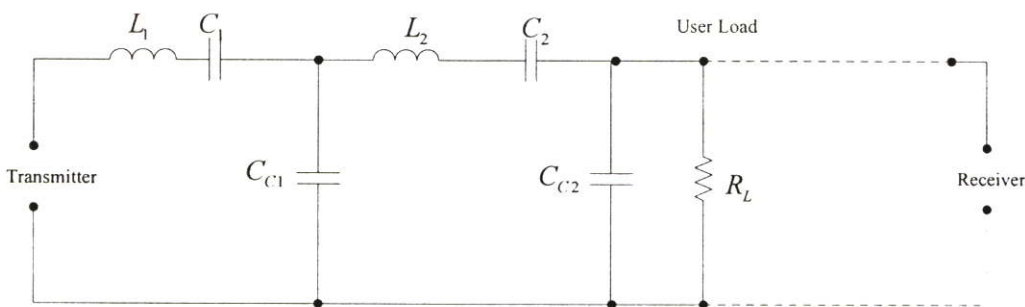
3.5 สภาพแวดล้อมของสายไฟฟ้ากำลังในการสื่อสารข้อมูล

เนื่องจากสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลังถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการส่งสัญญาณไฟฟ้ากำลัง (ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz) เท่านั้น จึงไม่ได้คำนึงถึงการส่งด้วยความถี่สูง ดังนั้นปัญหาสำคัญที่อาจเกิดขึ้นกับการใช้สายสื่อสารดังกล่าวเป็นสายส่งสัญญาณข้อมูลสื่อสาร[8] คือ

1. การลดทอนของสัญญาณสื่อสารอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้า ซึ่งอิมพีแดนซ์จะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุปกรณ์ที่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า ทำให้สัญญาณสื่อสารถูกลดทอนได้ อีกประการหนึ่งคือ จุดเชื่อมต่อของสายไฟฟ้ามีอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากัน สัญญาณสื่อสารบางส่วนจะสะท้อนกลับทำให้เกิดการรบกวนได้เช่นกัน

2. สัญญาณรบกวนต่างๆ ในระบบไฟฟ้า เช่น Impulse noise, White noise, Continuous wave source โดย Impulse noise เกิดจากการต่อโหลดประเภท inductive เข้ากับระบบไฟฟ้า จะเกิดสัญญาณ impulse ขึ้นทำให้มีหน้าคลื่นชัน ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่ป้องกันได้ยาก ถ้าหากในระบบมีโหลดประเภท capacitive ที่สามารถเกิดเรโซแนนซ์กับความถี่ของ impulse noise พอดีจะเกิดสัญญาณรบกวนที่เรียกว่า Continuous wave source ซึ่งจะรบกวนสัญญาณสื่อสารตลอดเวลา โดยที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ว่าสัญญาณรบกวนนี้จะมีค่าเท่าใด และยังมีสัญญาณรบกวนอีกอย่างหนึ่งที่มีการกระจายของพลังงานทุกความถี่ เรียกว่า White noise

3. ผลกระทบจากการติดตั้งสายไฟฟ้าหลายเส้นทาง เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังจะมีการส่งสัญญาณไฟฟ้าไปตามสายไฟฟ้ากำลังหลายเส้นทาง และความยาวของสายไฟฟ้าก็จะมีระยะต่างกัน สัญญาณสื่อสารที่ถูกส่งไปในสายไฟฟ้าเส้นต่างๆ จะมีเฟสต่างกัน หากมาบรรจบกัน สัญญาณอาจถูกลดทอนได้ หรืออาจจะหายไปจุดเชื่อมต่อต้นนั้น หากสัญญาณสื่อสารของสองเส้นทางมีเฟสต่างกัน 180 องศาพอดี



รูปที่ 3.2 สภาพแวดล้อมของสายไฟฟ้ากำลัง

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

1000 ฟุต ความต้านทานในสายยังมีความไม่แน่นอนซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนการต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าอีกด้วย

3.6 มาตรฐาน

มาตรฐานของ IEEE P1901

มาตรฐาน IEEE P1901 มีข้อกำหนดเพื่อใช้สำหรับ บอร์ดแบนด์บนสายส่งไฟฟ้ากำลัง โดยกำหนดการใช้งานในชั้นของ Medium Access Control และที่ชั้น Physical Layer ซึ่งในมาตรฐานนี้จะทำการพัฒนามาตรฐานเพื่อรองรับการส่งด้วยความเร็วสูง (ในชั้น Physical Layer จะส่งที่ความเร็วมากกว่า 100 Mbps) ผ่านอุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้ากำลัง อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ หรือเรียกว่า “Broadband over Power Line (BPL)” ใช้สำหรับ ระยะทางของสายที่น้อยกว่า 1,500 เมตร

บทที่ 4

ช่องสัญญาณสายส่งไฟฟ้ากำลัง

4.1 บทนำ

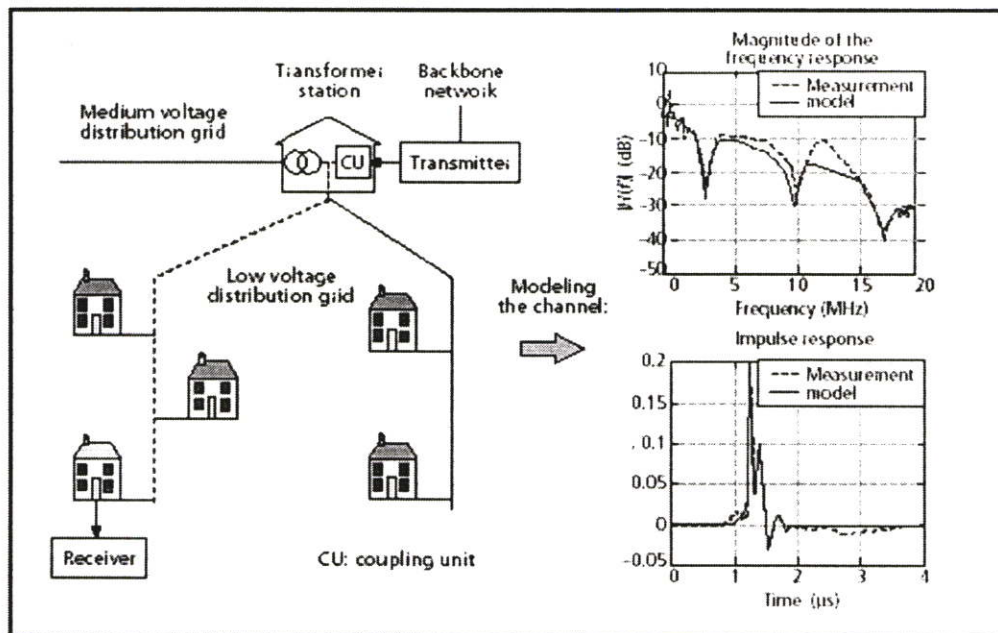
ความก้าวหน้าทางด้านวิทยาการของอินเทอร์เน็ตมีความต้องการให้มีแบนด์วิธขนาดใหญ่ เนื่องจากความต้องการของผู้ใช้งานมีความต้องการใช้เทคโนโลยี ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) ทำให้ทางผู้ประกอบการด้านสื่อสาร และผู้ประกอบการด้านพลังงานได้ร่วมกันพัฒนาการสื่อสารโดยใช้สายส่งไฟฟ้ากำลังในยุโรปซึ่งมาตรฐานเดิมที่มีการใช้งานคือ EN50065-1 ให้สามารถรองรับการเติบโตของการใช้งานอินเทอร์เน็ตในปัจจุบันได้ และทาง IEEE ได้กำหนดมาตรฐาน IEEE P1901 เพื่อรองรับการใช้งานสายส่งไฟฟ้ากำลังให้มีการใช้งานในระดับบอร์ด์แบนด์ [9]

4.2 ลักษณะทั่วไปของช่องสัญญาณ

การนำโครงข่ายสายส่งไฟฟ้ากำลังมาใช้ในการสื่อสารข้อมูลนั้นไม่ใช่เรื่องใหม่ ในหลายทศวรรษที่ผ่านมาผู้ประกอบการด้านสายส่งไฟฟ้ากำลังนำสายส่งดังกล่าวมาใช้ในการสื่อสารข้อมูลเพื่อการดูแลและควบคุมโครงข่ายการส่งไฟฟ้ากำลังในโครงข่ายของตน โดยการใช้งานข้อมูลจะเป็นการใช้งานในระดับความเร็วต่ำโดยอยู่ที่หน่วยความเร็วกิโลบิตต่อวินาที แต่เมื่อมีการเปิดกว้างให้ใช้งานสายส่งไฟฟ้ากำลังทำให้เกิดการพัฒนาในระดับความเร็วในการส่งข้อมูลมากขึ้น การใช้สายส่งไฟฟ้ากำลังที่ต้องการใช้งานอยู่ในช่วงสายระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer) กับผู้ใช้งาน ซึ่งก็คือ ที่พักอาศัย หรือ โรงงาน โดยเป็นสายส่งสำหรับการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตความเร็วสูง ที่มีการติดตั้งภายในสถานทีนั้นๆ ลักษณะเชื่อมต่อเช่นเดียวกับโครงข่ายแบบท้องถิ่น (local area network) ซึ่งการศึกษาการใช้งานสายส่งไฟฟ้ากำลังนั้นต้องคำนึงถึงลักษณะเฉพาะของสายส่งไฟฟ้ากำลังเป็นสำคัญ อาทิ การที่สายส่งดังกล่าวมีลักษณะทางแยกไปส่วนอื่นๆ ทำให้เกิดการสูญเสียระดับของสัญญาณซึ่งเกิดจากการสะท้อนกลับที่จุดแยกดังกล่าวเป็นอย่างมาก

ในยุโรป การใช้งานสายส่งไฟฟ้ากำลังระดับแรงดันต่ำแสดงดังรูปด้านบน การส่งถ่ายข้อมูล อาจจะเชื่อมต่อไปยังอินเทอร์เน็ตโดยผ่านทางสายส่งใยแก้วนำแสงในส่วนที่เป็น backbone network เมื่อพิจารณาการสูญเสียในโครงข่ายดังกล่าว สัญญาณที่มีความถี่สูงจะถูกกระทบจากการสะท้อนทำให้สัญญาณดังกล่าวได้รับความเสียหาย โดยการแทรกสอดของ echo ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการจางหายของสัญญาณดังแสดงในกราฟแสดงระดับสัญญาณกับความถี่ในรูปที่ 4.1 ซึ่งรอยบาก (notch) ของรูปสัญญาณดังกล่าวคือการจางหายของสัญญาณที่เกิดขึ้น อีกทั้งความถี่ที่เปลี่ยนแปลง

ไปยังส่งผลให้การลดทอนเปลี่ยนแปลงไปด้วยซึ่งการสูญเสียระดับสัญญาณนั้นต้องพิจารณาจากโครงสร้างของโครงข่ายและช่องสัญญาณการจ่ายของควมถี่ที่ใช้งานด้วย ในทางปฏิบัติแล้วจะต้องรักษาระดับสัญญาณที่มีระดับต่ำให้สามารถส่งผ่านข้อมูลได้ตลอดทั้งโครงข่าย ซึ่งความยาวของสายที่ใช้เชื่อมต่อจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยความยาวของสายไม่ควรเกิน 300 เมตร [10] โครงข่ายย่อยที่มีลักษณะถาวร หรือสำหรับการส่งด้วยควมถี่สูง (เช่น 10 MHz) จุดเชื่อมต่อที่ใช้งานได้จะอยู่ในระยะใกล้เคียงๆ เท่านั้น นอกจากการลดทอนจะเกิดจากวัสดุที่ใช้ทำสายไฟฟ้ากำลังแล้ว การเพิ่มจำนวนโครงข่ายย่อย ยังส่งผลให้เกิดการลดทอนได้ด้วยเช่นกัน อย่างเช่น กรณีที่สายส่งในที่พักอาศัยมีการต่อพ่วงสายไฟฟ้าเข้าร่วมเพื่อแยกพลังงานไฟฟ้ากำลังไปใช้ ก็ส่งผลให้เกิดการลดทอนได้



รูปที่ 4.1 โครงข่ายของสายส่งไฟฟ้ากำลังระดับแรงดันต่ำอย่างง่ายในยุโรป

การที่จะทำให้สายส่งไฟฟ้ากำลังสามารถใช้งานในเทคโนโลยีดังกล่าวได้นั้น ต้องใช้ frequency band ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งแบบจำลองที่ใช้งานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ frequency band ในช่วง ความถี่ 0.5MHz -30MHz บนสายส่งไฟฟ้ากำลังระดับแรงดันต่ำ (Low Voltage) ของ Tom Bostoen และ Olivier Van de Wiel [11]

ในโครงข่ายของสายส่งไฟฟ้ากำลังแรงดันต่ำนั้น พื้นที่การเชื่อมต่อจะเริ่มจากห้องเล็กไปจนถึงทางออกของที่พักอาศัย หรือ โรงงาน เชื่อมต่อไปยังสายส่งไฟฟ้าแรงดันกำลังระดับกลาง (Medium Voltage) ที่ทำด้วยอลูมิเนียม ขนาด 4×95 ตารางมิลลิเมตร หรือ 4×150 ตารางมิลลิเมตร ส่วนสายส่งไฟฟ้ากำลังแรงดันต่ำที่ใช้ในสถานที่พักอาศัยหรือ โรงงานนั้น ทำด้วยลวดทองแดง

ขนาด 4×10 ตารางมิลลิเมตร หรือ 4×25 ตารางมิลลิเมตร ความยาวของสายคือ 500 เมตร และมีการใช้งานทั้งหมด 30 หลัง โดยกำหนดให้การใช้งานของโครงข่ายอยู่ในช่วง 25 ลูกบาศก์เมตร

สายส่ง 1 เส้น จะประกอบด้วยสายภายใน 4 เส้น คือ สายสำหรับต่อ neutral 1 สาย และสายส่งต่างเฟส อีก 3 สาย แรงดันระหว่าง 2 เฟสเท่ากับ 400 โวลต์ และกำลังระหว่างสายส่งกับสาย neutral เท่ากับ 230 โวลต์ (ในประเทศไทยแรงดันอยู่ที่ 220 โวลต์) จากสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มี สายภายใน 4 เส้น เมื่อเชื่อมต่อมาถึงผู้ใช้งานจะมีการใช้งานอยู่ที่ 2 เส้น หรือ 3 เส้น นั่นคือ ไฟ 1 เฟสคือการใช้สายเฟส 1 เส้นร่วมกับสาย neutral 1 เส้น ($230\text{V} / 63\text{A}$) และ ไฟ 3 เฟสคือการใช้สายเฟส 3 ($3 \times 230\text{V} / 32\text{A}$)

4.3 คุณลักษณะสายส่งไฟฟ้ากำลัง

4.3.1 ลักษณะทั่วไป

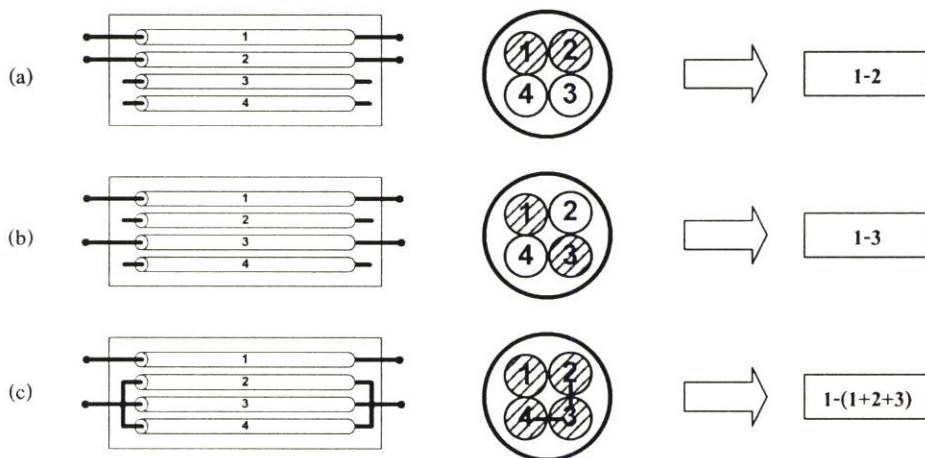
การประมาณการจำลองแบบ จะกำหนดว่าสายส่งเป็นแบบ 2 สาย คือ เลือกสายส่งภายใน 2 เส้นจากสายภายในทั้งหมด 4 เส้น (สายเฟส 1 เส้น ร่วมกับ สาย Neutral 1 เส้น) หรือ กำหนดให้เป็นการใช้ สายไฟ 3 เฟสในระยะทางสั้นๆ และกำหนดการพิจารณาการเลือกสายส่งเป็น 3 โหมดคือ

โหมดที่ 1 คือ เลือกสาย 1 กับสาย 2

โหมดที่ 2 คือ เลือกสาย 2 กับสาย 3

และโหมดที่ 3 คือ เลือกสาย 1 กับ การเชื่อมต่อสาย 2-3-4 เข้าด้วยกัน

ทั้ง 3 โหมดนี้ แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การเชื่อมต่อโหมด: (a) เลือกสาย 1 กับสาย 2, (b) เลือกสาย 1 กับสาย 3 และ (c) โหมดที่ 3 คือ เลือกสาย 1 กับ สาย 2-3-4 เข้าด้วยกัน

จากการพิจารณาสายส่งไฟฟ้ากำลังให้เป็นสายส่งสัญญาณแบบ 2 เส้นจากที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นการสื่อสารแบบสายส่งสัญญาณที่มีการสื่อสาร 2 ช่องทาง (port) และแทนด้วยค่า ABCD แบบ 2×2 เมตริก เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของแรงดันด้านรับ V_{in} กระแสด้านรับ I_{in} ร่วมกับ แรงดันด้านส่ง V_{out} กระแสด้านส่ง I_{out} เมตริก ABCD ของสายส่งสัญญาณจะกำหนดโดย ความยาวสาย (d), ค่าอิมพีแดนซ์ (Z_c) และค่าคงที่การแพร่กระจาย (γ) ของสายส่ง ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma d) & Z_c \sinh(\gamma d) \\ \sinh(\gamma d)/Z_c & \cosh(\gamma d) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

4.3.2 การสะท้อน(Reflection)

การวัดการสะท้อน เราจะกำหนดค่า อิมพีแดนซ์ด้านรับเป็น Z_{in}^0 และ Z_{in}^x ของวงจรแบบ ปิด (short-circuit) และ วงจรแบบเปิด (open-circuit) ของสายส่งตามลำดับ เมื่อพิจารณาคุณลักษณะของพารามิเตอร์ต่างๆ ด้วยรูปแบบอย่างง่าย จะแสดงได้เป็น

$$\begin{cases} Z_{in}^0 = Z_c \tanh(\gamma d) \\ Z_{in}^x = Z_c / \tanh(\gamma d) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} Z_c = \sqrt{Z_{in}^0 Z_{in}^x} \\ \gamma = \tanh^{-1}(\sqrt{Z_{in}^0 Z_{in}^x})/d \end{cases} \quad (4.2)$$

จากการวัดค่าโดย Tom Bostorm และ Olivirer Van de Wiel จะได้คุณลักษณะของอิมพีแดนซ์สำหรับความถี่สูงจะเข้าใกล้ค่าคงที่ และ ค่าจำนวนจริง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 23 โอห์ม การกระเพื่อม (ripple) บนค่าอิมพีแดนซ์ จะเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเสมอสำหรับการใช้งานส่งผ่านความถี่สูงในวงจรแบบปิด หรือวงจรเปิด ดังนั้นในสมการข้างต้น จึงเป็นเพียงการประมาณค่าเท่านั้น

4.3.3 การถ่ายโอนพลังงาน (Transmission)

ในการวัดค่าการถ่ายโอนพลังงาน แทนด้วย ฟังก์ชันถ่ายโอน $TF = V_{out}/V_{in} = \exp(-\gamma d)$ ของสายส่ง โดยการใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบพื้นฐาน และ ความยาวของสายส่ง ค่าของการแพร่จะเป็นค่าคงที่ ของสายส่งนั่นคือ

$$TF = \exp(-\gamma d) \Leftrightarrow \gamma = -\ln(TF)/d \quad (4.3)$$

4.4 ช่องสัญญาณของสายส่งใน 1 หน่วยความยาว

4.4.1 พารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาว (Per-unit-length parameter)

การกำหนดคุณลักษณะของสายส่ง จะแสดงด้วย ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าการแพร่กระจายแบบคงที่ หรือ แทนด้วยค่าพารามิเตอร์ต่อ 1 หน่วยความยาวนั้นคือ

- r คือ ค่าความต้านทานต่อเมตร (Ω/m)
- l คือ ค่าความเหนี่ยวนำต่อเมตร (H/m)
- g คือ ค่าคอนดักแตนซ์ต่อเมตร (S/m)
- c คือ ค่าตัวเก็บประจุต่อเมตร (S/m)

ซึ่งความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ดังกล่าว กับค่าต่างๆ แสดงดังสมการที่ 4.4

$$\begin{cases} Z_c = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} \\ \gamma = \sqrt{(r + j\omega l)(g + j\omega c)} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} r = \text{Re}(Z_c \gamma) \\ l = \text{Im}(Z_c \gamma) / \omega \\ g = \text{Re}(\gamma / Z_c) \\ c = \text{Im}(\gamma / Z_c) / \omega \end{cases} \quad (4.4)$$

สำหรับสายส่งแบบ 2 เส้น และการแบ่งความกว้าง และการประมาณความถี่ต่อหน่วยความยาวนั้น ขึ้นกับค่าความถี่ดังสมการที่ 4.5

$$\begin{cases} r = r_1 \sqrt{f} \\ l = l_1 + (l_2 / \sqrt{f}) \\ g = g_1 f \\ c = c_1 \end{cases} \quad (4.5)$$

สมการที่ 4.5 เป็นการจำลองแบบของพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาว โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ r_1, l_1, l_2, g_1 และ จากกระบวนการของ least-square จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ดังนี้

- ค่าสัมประสิทธิ์ r_1 มีค่าเท่ากับ $32.9 \mu\Omega \text{m}^{-1} \text{s}^{\frac{1}{2}}$
- ค่าสัมประสิทธิ์ l_1 มีค่าเท่ากับ $0.112 \mu\text{Hm}^{-1}$
- ค่าสัมประสิทธิ์ l_2 มีค่าเท่ากับ $9.22 \mu\text{Hm}^{-1} \text{s}^{\frac{1}{2}}$
- ค่าสัมประสิทธิ์ g_1 มีค่าเท่ากับ $13.0 \text{pSm}^{-1} \text{s}$
- ค่าสัมประสิทธิ์ c_1 มีค่าเท่ากับ 216pFm^{-1}

โดยสรุปการจำลองแบบนั้น ค่า l กับค่า c มีความน่าเชื่อถือมากกว่า ค่า r และค่า g เนื่องจากการหาค่า Z_c และ γ สำหรับค่าความถี่สูงนั้นเมื่อพิจารณาจาก สมการที่ 4.4 ขึ้นอยู่กับค่า l กับค่า c มากกว่าค่าอื่นๆ ดังนั้นการหาค่า Z_c และ γ จะทำให้สามารถหาค่าเมตริก ABCD ใน สมการที่ 4.1 ของสายส่งได้

4.4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาว (coefficient for the per-unit-length parameter)

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ ของค่าพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาว สำหรับการจะลองแบบในแต่ละชนิดของขนาดสายส่งไฟฟ้ากำลังที่ใช้งาน

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ ของค่าพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาว

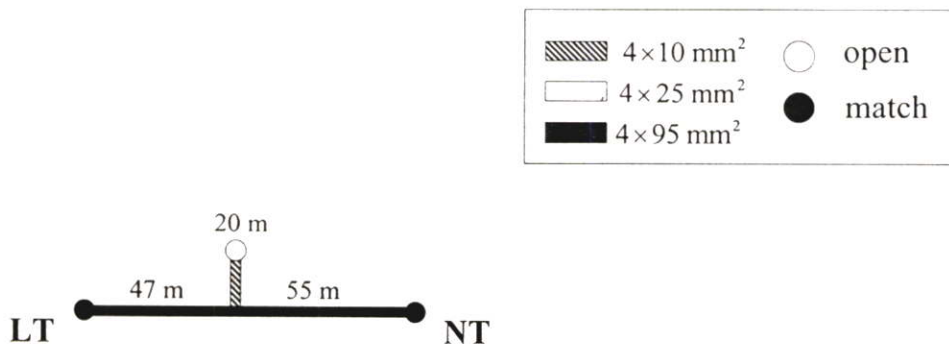
พารามิเตอร์	r_1 ($\mu\Omega\text{m}^{-1}\text{s}^{\frac{1}{2}}$)	l_1 (μHm^{-1})	l_2 ($\mu\text{Hm}^{-1}\text{s}^{\frac{1}{2}}$)	g_1 (pSm^{-1}s)	c_1 (pFm^{-1})
$4 \times 10 \text{ mm}^2$ 1-2	142	0.287	22.3	4.68	91.0
$4 \times 10 \text{ mm}^2$ 1-3	178	0.369	32.7	2.99	68.8
$4 \times 10 \text{ mm}^2$ 1-(2-3-4)	116	0.195	17.9	2.50	133
$4 \times 25 \text{ mm}^2$ 1-2	79.1	0.248	16.8	8.57	111
$4 \times 25 \text{ mm}^2$ 1-3	164	0.372	24.8	4.18	73.8
$4 \times 25 \text{ mm}^2$ 1-(2-3-4)	93.9	0.191	23.2	8.71	142
$4 \times 95 \text{ mm}^2$ 1-2	61.1	0.166	92.6	7.56	141
$4 \times 95 \text{ mm}^2$ 1-3	51.8	0.219	17.9	6.76	110
$4 \times 95 \text{ mm}^2$ 1-(2-3-4)	31.9	0.112	9.22	13.0	216

4.5 โคร่งข่ายสายส่งไฟฟ้ากำลัง

4.5.1 ลักษณะทั่วไปของโคร่งข่ายสายส่งไฟฟ้ากำลัง

ในระบบการสื่อสารในทางปฏิบัตินั้น จะมีการเชื่อมต่อระบบเป็นโคร่งข่ายทำให้การจำลองแบบสายส่งไฟฟ้ากำลังนั้นต้องคำนึงถึงเรื่องดังกล่าวด้วย โดยฟังก์ชันถ่ายโอนแบบพื้นฐานด้วยเมตริก ABCD ได้แสดงไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ในการจำลองการต่อเครือข่ายแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยจุดแยกของโคร่งข่ายใช้สายส่งขนาด $4 \times 95 \text{ mm}^2$ อาจจะต้องเชื่อมกับสายส่งขนาด $4 \times 10 \text{ mm}^2$ หรือ $4 \times 25 \text{ mm}^2$ การเชื่อมต่อสายภายในเป็นแบบ 1-(2+3+4) ซึ่งมีการเชื่อมแบบวงจรเปิด(open circuit) แทนด้วยสัญลักษณ์วงกลมสีขาว(○) และการเชื่อมแบบแมท (match) แทนด้วยสัญลักษณ์วงกลมสีดำ(●)

การเชื่อมต่อนั้นส่วนปลายของสายส่งไฟฟ้ากำลัง (Line termination: LT) ที่ติดตั้งไว้แล้วจะมีการเชื่อมต่อกับส่วนปลายของโคร่งข่าย (Network termination: NT) จุดเชื่อมต่อนี้สำคัญสำหรับการหาค่าเมตริก ABCD ของทุกๆ โคร่งข่ายที่มีการพิจารณาจากจุดที่เป็นปลายสายส่งไปยังสายโคร่งข่าย เรียกว่า “down stream” หรือพิจารณาจากปลายสายโคร่งข่ายไปยังสายส่ง เรียกว่า “up stream” ซึ่งการพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของการพิจารณาทั้ง 2 แบบจะมีค่าเท่ากัน



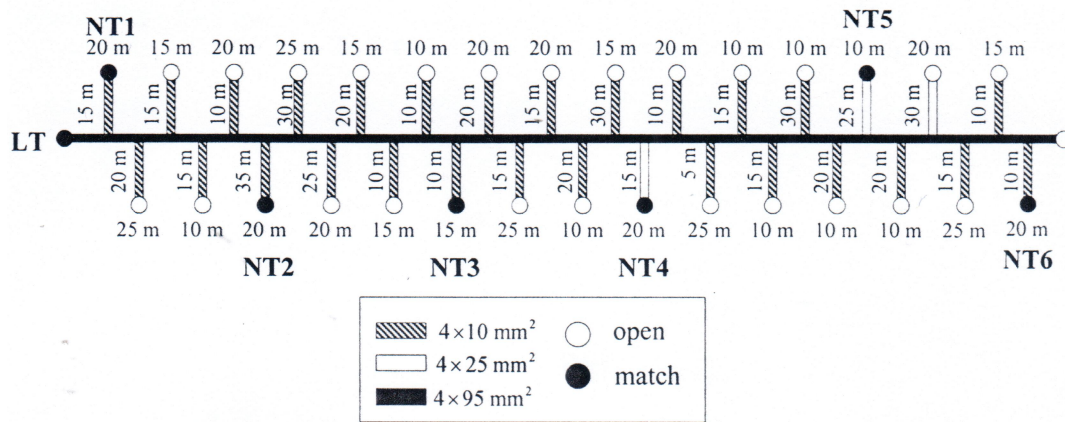
รูปที่ 4.3 การต่อโคร่งข่ายสายส่งไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย เชื่อมต่อสายภายในเป็น 1-(2+3+4)

เมื่อทำการเพิ่มลูกข่ายในโคร่งข่ายสายส่งจะทำให้มีคิฟขนาดใหญ่ขึ้นในฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่งเกิดจากการทำลายของคลื่นที่เข้ามาแทรกระหว่าง Direct กับ reflected sinusoid

4.5.2 แบบจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังระดับแรงดันต่ำ (Modeling a realistic low-voltage power distribution network)

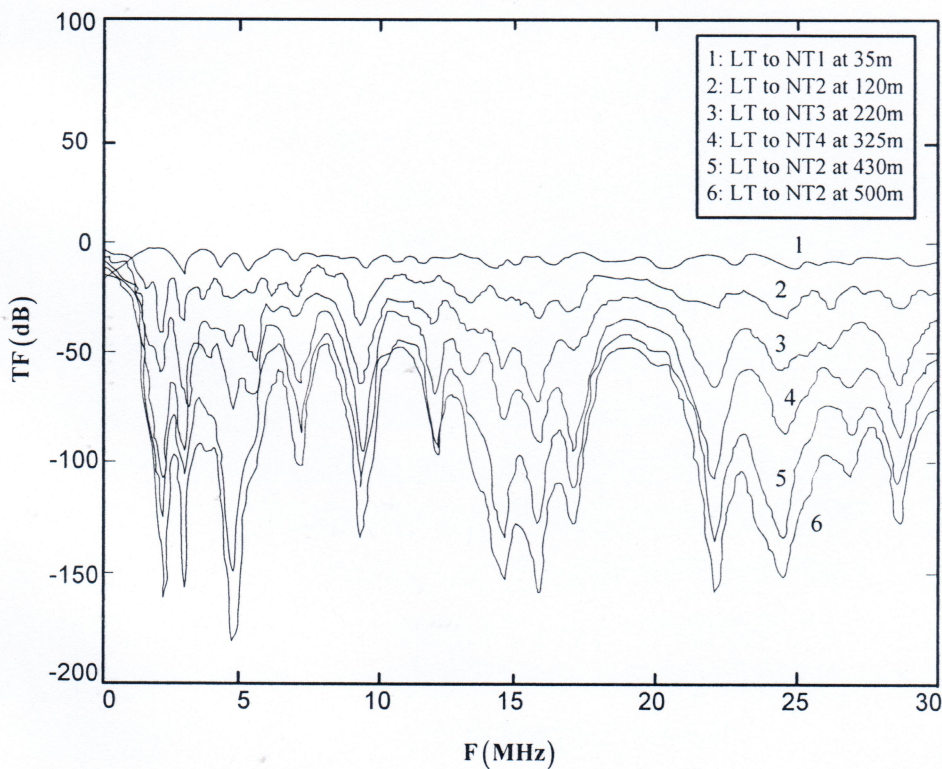
ในรูปที่ 4.3 แสดงเครือข่ายที่ต่อด้วยสายส่งไฟฟ้ากำลังแรงดันต่ำ การสื่อสารดังกล่าวจะมีการเดินสาย LT อยู่ก่อนแล้ว และจะมีการต่อแยกไปใช้งานโดยลูกข่าย NT สำหรับในกรณีของ

รูปที่ 4.4 จะมีการเชื่อมต่อไปใช้งานทั้งหมด 30 ช่อง โดยที่ 6 ช่องจาก 30 ช่องดังกล่าว จะเป็นช่องสัญญาณของ NT จะมีค่าเท่ากับ 20% ของช่องสัญญาณทั้งหมด



รูปที่ 4.4 การต่อโครงข่ายสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีลูกข่าย 30 ช่อง

การกำหนดการเชื่อมต่ออย่างง่าย คือ กำหนดให้ LT หรือ NT เป็นแมท จุดปลายเครือข่ายทั้งสองจุดมี NT การเชื่อมต่อในส่วนที่ไม่มี NT จะเป็นแบบเปิดทั้งหมด และส่วนที่เป็น NT จะมีการเชื่อมเป็นแมท

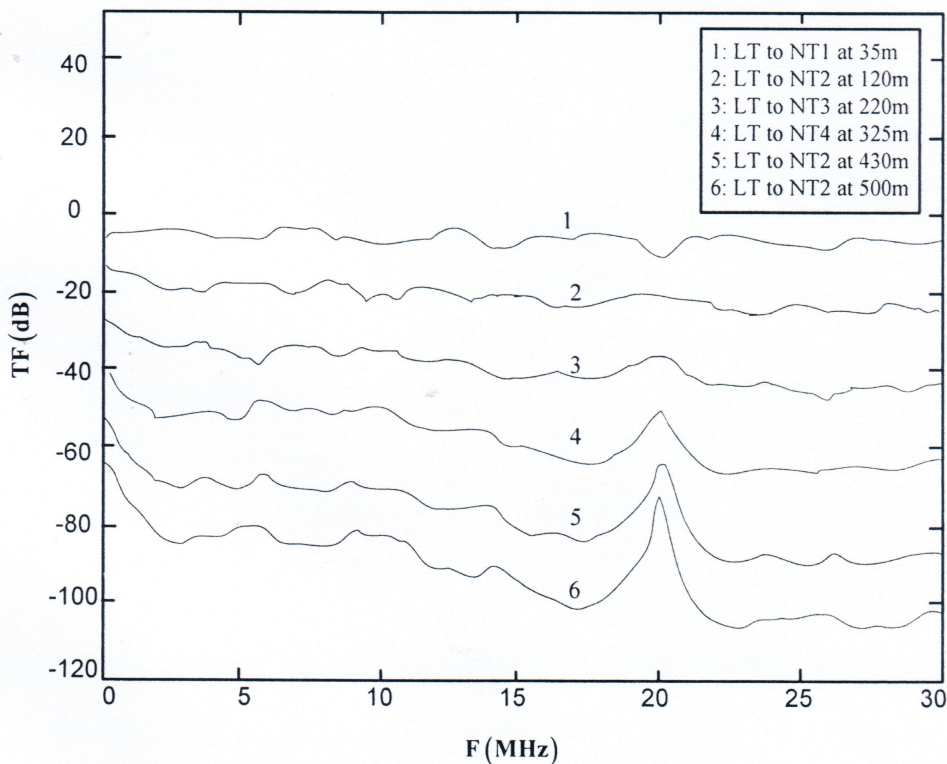


รูปที่ 4.5 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ระยะต่างๆ เมื่อให้จุดที่ไม่มี NT มีการต่อแบบเปิด

รูปที่ 4.5 แสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอน ในทางความถี่ ซึ่งกำหนดโครงข่ายว่า

- ในลูกข่ายที่ไม่มี NT ให้เป็นแบบเปิด
- พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนจากจุด LT ถึง NT₁ ด้วยระยะ 35 เมตร
- พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนจากจุด LT ถึง NT₂ ด้วยระยะ 120 เมตร
- พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนจากจุด LT ถึง NT₃ ด้วยระยะ 220 เมตร
- พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนจากจุด LT ถึง NT₄ ด้วยระยะ 325 เมตร
- พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนจากจุด LT ถึง NT₅ ด้วยระยะ 430 เมตร
- พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนจากจุด LT ถึง NT₆ ด้วยระยะ 500 เมตร

ฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีระยะทางเพิ่มขึ้น จะทำให้ลำดับของการกระเพื่อมสูงขึ้น มีการทำลายสูงขึ้น มีคลื่นรบกวนมากขึ้น และ การสะท้อนเป็นเส้นโค้งไซน์มากขึ้น ซึ่งการที่ลูกข่ายไม่มี NT ที่เป็นแบบเปิด นั้นหมายความว่า ค่าสะท้อนกลับจะมีมากที่สุด (reflection factor =1) และยังมีควมสูงชันเป็นลำดับ รวมถึงการคิฟ ด้วย ดังนั้น ในการสื่อสารบนสายส่งไฟฟ้ากำลังแรงดันต่ำ การกระจายโครงข่ายในสถานที่ที่ไม่มี NT จะได้รับผลกระทบรุนแรงจากสภาพแวดล้อม และการสะท้อนที่รุนแรงซึ่งเกิดจากการสื่อสารหลายช่องทางในระบบ



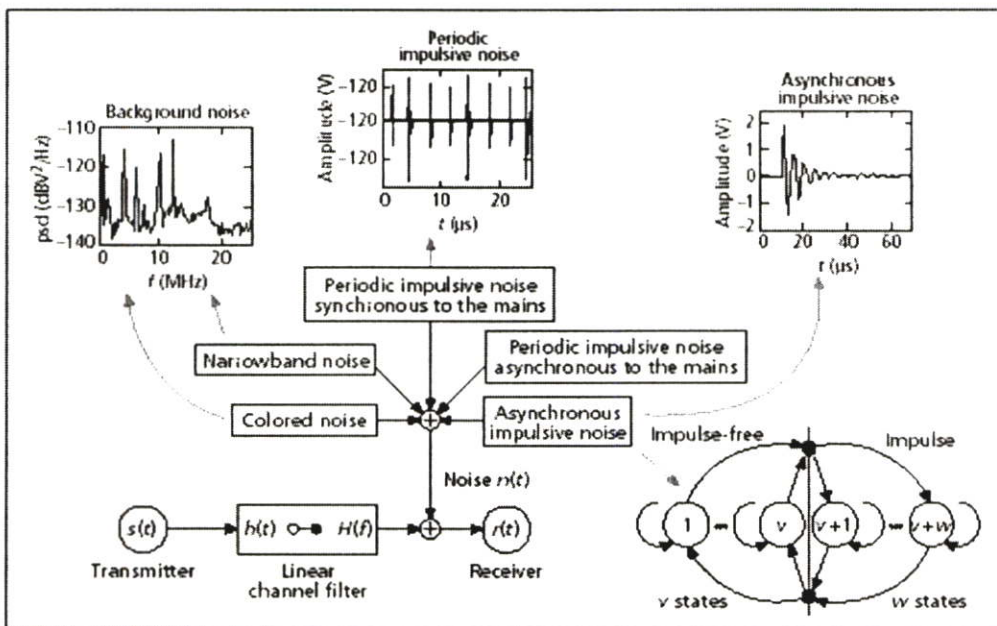
รูปที่ 4.6 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ระยะต่างๆ เมื่อให้จุดที่ไม่มี NT มีการต่อแบบเมท

เมื่อจำลองเงื่อนไขของการสร้างโครงข่าย โดยให้ส่วนที่ไม่มี NT เป็นการต่อแบบเมท และ ลูกข่ายเป็นอย่างกรณีข้างต้นกล่าวคือ มีลูกข่ายที่มี NT ทั้งหมด 6 ช่อง และพิจารณาค่าฟังก์ชันถ่ายโอนดังกรณีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ค่าฟังก์ชันการถ่ายโอนจะมีริบเปิดเล็กๆ แต่ก็ถือว่าน้อยกว่า ริบเปิดในฟังก์ชันการถ่ายโอนที่แสดงมาก่อนแล้วในรูปที่ 4.5 ซึ่งการที่ NT มีการต่อแบบเมท หมายถึงการที่การสะท้อนมีประมานน้อยสุด นอกจากนั้นที่ จุดเชื่อมต่อระหว่างสายส่งหลักกับลูกข่าย ก็ทำให้เกิดการสะท้อนกลับเช่นเดียวกัน ในรูปที่ 4.6 แสดงการถ่ายโอนฟังก์ชันทางความถี่ แสดงให้เห็นว่า ถ้าลูกข่ายยังอยู่ใกล้กับสายส่งหลัก จะมีค่าฟังก์ชันการถ่ายโอนมาก ซึ่งเป็นพฤติกรรมตามปกติสำหรับส่วนที่เป็นสายส่งแบบเดี่ยว (single cable) ส่วนค่า CD ในฟังก์ชันถ่ายโอน จะมีค่าต่ำลงเมื่อระยะทางระหว่างสายส่งกับลูกข่ายมีความยาวมากขึ้น

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้้นำการจำลองแบบของ Tom Bostoen และ Olivier Van de Wiel ดังรายละเอียดที่กล่าวไว้แล้วข้างต้นมาทำการจำลองแบบ โดยรายละเอียดและขอบเขตการจำลองแบบจะกล่าวในโอกาสต่อไป

4.6 สัญญาณรบกวน

สำหรับการสื่อสารด้วยสายส่งไฟฟ้ากำลังนั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ การแทรกสอดจากสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งในช่องสัญญาณดังกล่าวนี้ไม่สามารถที่จะแทนด้วยสัญญาณรบกวนแบบช่องสัญญาณรบกวนแบบขาวได้ [12-14]



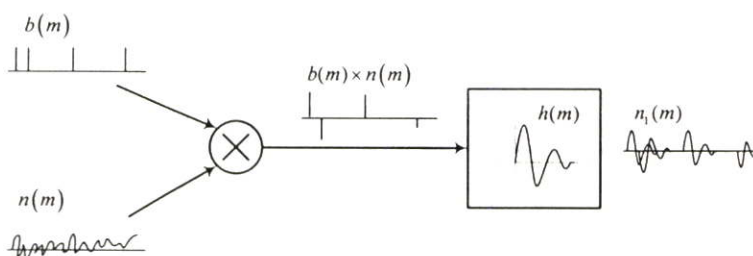
รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณรบกวนที่มีในระบบสายส่งไฟฟ้ากำลัง

เมื่อพิจารณาสัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบต่อสายส่งไฟฟ้ากำลังแสดงในรูปที่ 4.7 เมื่อสัญญาณข้อมูลสื่อสาร $s(t)$ ผ่านช่องสัญญาณด้วยผลตอบสนองความถี่ $h(t)$ แล้วไปยังช่องสัญญาณสายส่งไฟฟ้ากำลัง ซึ่งมีสัญญาณรบกวน $n(t)$ เข้ามาร่วมในระดับสัญญาณดังรูป 4.7 สัญญาณข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนร่วมด้วยดังกล่าวจะผ่านไปถึงภาครับ โดยสัญญาณที่รับได้จากภาครับคือ $r(t)$ ซึ่งเกิดจากสัญญาณส่งบวกกับสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในช่วงเวลาส่งนั้นๆ สัญญาณรบกวนที่มีในสายส่งไฟฟ้าคือ colored background noise, narrowband noise, periodic impulsive noise asynchronous to the mains frequency, periodic impulsive noise synchronous to the mains frequency และ asynchronous impulsive noise [15] โดยที่

- colored background noise ที่ลักษณะที่มีความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมต่ำ (Low power spectrum density : low PSD) ซึ่งเกิดมาจากการรวมกันของ สัญญาณรบกวนจากต้นกำเนิดที่มีพลังงานต่ำ
- narrowband noise เป็นระดับสัญญาณรบกวนในการมอดูเลตฟังก์ชันชายด์ โดยส่วนมาก ซึ่งเกิดที่การเข้าถึงสถานีความถี่แบบกระจาย (radio broadcasting)
- สัญญาณรบกวนแบบคาบของอินพัลส์ ที่ไม่ประสานจังหวะในเชิงความถี่ (periodic impulsive noise asynchronous to the mains frequency) โดยส่วนใหญ่เกิดจาก switch-mode ของเครื่องจ่ายพลังงาน
- สัญญาณรบกวนแบบคาบของอินพัลส์ ที่มีประสานจังหวะในเชิงความถี่ (periodic impulsive noise synchronous to the mains frequency) เกิดจากการที่มีการเปิดปิดของ rectifier diodes ที่พบทั่วไปในเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ [16]
- asynchronous impulsive noise เกิดจากการเปิด-ปิด ชั่วขณะหนึ่ง (switching transients) ในโครงข่ายสายส่งไฟฟ้ากำลังแรงดันต่ำ

4.6.1 สัญญาณรบกวนแบบอินพัลส์

การจำลองสัญญาณรบกวนแบบอินพัลส์ ที่มีโมเดลของ Bernoulli-Gaussian ดังแสดงในรูปที่ 4.8 [17]



รูปที่ 4.8 สัญญาณรบกวนแบบอินพัลส์แบบ Bernoulli-Gaussian

- เมื่อ $b(m)$ คือ กระบวนการเบอร์นูลี
 $n(m)$ คือ กระบวนการแบบเกาส์
 $h(m)$ คือ อิมพัลส์เซปริงค์ฟิลเตอร์
 $b(m)$ คือ ลำดับสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์

ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของกระบวนการเบอร์นูลี

$$P_B(b(m)) = \begin{cases} \alpha & \text{for } b(m) = 1 \\ \alpha - 1 & \text{for } b(m) = 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

เมื่อ α คือความน่าจะเป็นของการเกิดค่า “1” และ $\alpha - 1$ คือความน่าจะเป็นของการเกิดค่า “0” ในกระบวนการเบอร์นูลี ค่าความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเกาส์โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์

$$f_N(n(m)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_n} \exp\left[-\frac{n^2(m)}{2\sigma_n^2}\right] \quad (4.7)$$

เมื่อ σ_n^2 คือ ค่าความเบี่ยงเบนของขนาดของสัญญาณรบกวน
 ค่าความน่าจะเป็นของสัญญาณรบกวนแบบพัลส์ $n_i(m)$

$$f_N^{BG}(n_i(m)) = (1 - \alpha)\delta(n_i(m))\alpha f_N(n(m)) \quad (4.8)$$

เมื่อ $\delta(n_i(m))$ คือ ฟังก์ชัน Kronecker delta

อัตราส่วนของกำลังงานของสัญญาณรบกวนแบบอินพัลส์และ สัญญาณรบกวนขาวแบบ
 บวกแทนด้วย γ_p

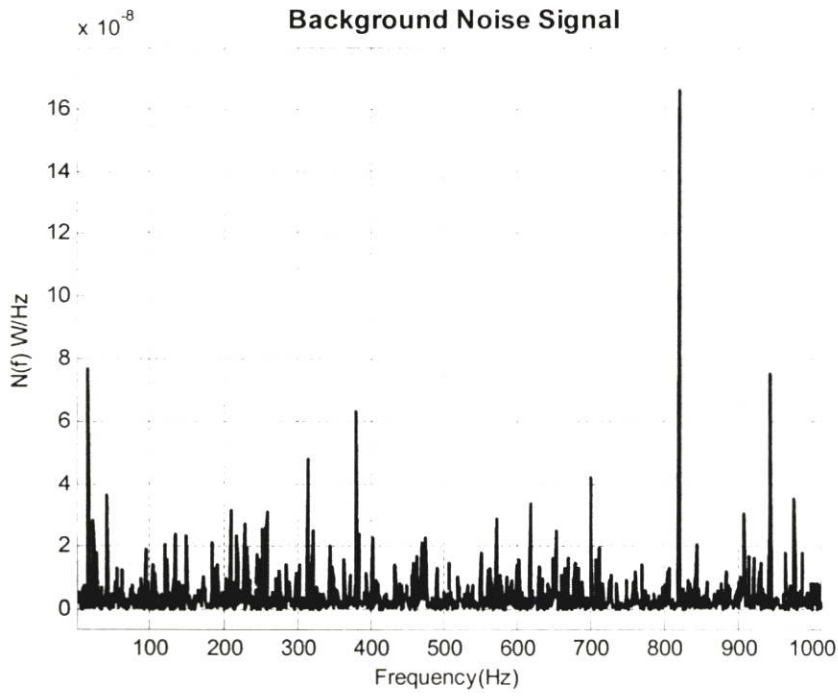
$$\gamma_p = \frac{\text{power(implusive component)}}{\text{power(AWGN component)}} \quad (4.9)$$

4.6.2 Background Noise

จาก [18] สัญญาณรบกวนซึ่งประกอบด้วยสัญญาณรบกวนแบบ colored background noise และ narrowband noise สามารถแทนได้ด้วยสมการที่ 4.10

$$N(f) = 10^{(K - (3.95 \times 10^{-5} \times f))} \left(\frac{\text{W}}{\text{Hz}} \right) \quad (4.10)$$

กำหนดให้ K คือ ค่าตัวแปรที่มีการสุ่มแบบเกาส์เซียนส์ ด้วยค่าเฉลี่ย $\mu = -8.64$ และ ค่ากลาง $\sigma = 0.5$ รูปสัญญาณดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ลักษณะสัญญาณรบกวนแบบ Background ในแกนความถี่

บทที่ 5

เทคนิคการมอดูเลชันแบบหลายคลื่นพาห์ด้วย OFDM

Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) เป็นเทคนิคการมอดูเลชันแบบหลายคลื่นพาห์ (Multiple Carrier Modulation) ซึ่งมีรูปแบบของการสื่อสารแบบขนาน ซึ่งปัญหาทางด้านการสื่อสาร จำพวกช่องสัญญาณการจากหาย การรบกวนแบบแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Inter Symbol Interference: ISI) ของสัญญาณข้อมูลในด้านภาครับ ซึ่งการมอดูเลตและการส่งสัญญาณแบบอนุกรมจะแก้ไขปัญหาลำบากได้ค่อนข้างยาก โดยเฉพาะเมื่อเป็นการสื่อสารที่มีอัตราส่งสูงๆ แต่สำหรับเทคนิคการส่งแบบ OFDM นี้ สามารถแก้ไขปัญหาลำบากนี้ได้ ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการส่งผ่านด้วยการประสานจังหวะ (Synchronization) .ในการส่งด้วยเทคนิค OFDM ในช่องสัญญาณไฟฟ้ากำลัง เมื่อข้อมูลข่าวสารมีลักษณะข้อมูลแบบดิจิทัลเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ซึ่งการกำหนดการส่งผ่านแบบประสานจังหวะนี้คือ

- สัญญาณคลื่นพาห์จะมีการประสานจังหวะ ให้ตรงกันทั้งเฟส และความถี่ ของออสซิลเลเตอร์ด้านภาครับ กับออสซิลเลเตอร์ด้านภาคส่ง
- เวลาต้องประสานกัน โดยสมบูรณ์เพื่อใช้ในการปรับค่า การชักตัวอย่าง (sampling frequency)
- Coarse timing เพื่อที่จะปรับค่าเริ่มต้นและค่าสิ้นสุดของเฟรมใน OFDM

การส่งผ่านข้อมูลแบบ OFDM

รูปแบบการส่งข้อมูลแบบ OFDM สามารถทำได้โดยการเลือกความถี่โดยการหารค่าแบนด์วิด (B) ด้วยค่าความถี่แบบแคบจำนวนค่าสัญลักษณ์ N ค่า ซึ่งขนาดของความถี่แบบแคบจะมีขนาด $f_c = B/N$ ค่าของขบวนข้อมูล (data stream) ของค่าสัญลักษณ์ N จะมีคลื่นพาห์ย่อยๆ เป็น f_k และมีการส่งแบบขนาน ประโยชน์ที่สำคัญของ OFDM ในการเลือกความถี่ในช่องสัญญาณการจากหาย อาทิ ช่องสัญญาณสายส่งไฟฟ้ากำลัง ฟังก์ชันการถ่ายโอนข้อมูล $H(f)$ จะถูกประมาณด้วยการแบ่งเป็นส่วนๆ นั่นคือ $H(k) = H(k \cdot f_c)$ ที่อยู่รอบๆ ความถี่คลื่นพาห์ การผิเคเขียน $H(k)$ ของแต่ละส่วนย่อยๆ k ด้วยค่าตามลำดับแถวสัญญาณ และ ค่าตรงข้าม ด้วยการสร้างค่าสัมประสิทธิ์ $C(k)$ สำหรับการตั้งค่าแทบของตัวกรองสัญญาณ ซึ่งสัญลักษณ์ที่รับได้เมื่อผ่านตัวกรองสัญญาณสามารถเขียนได้เป็น

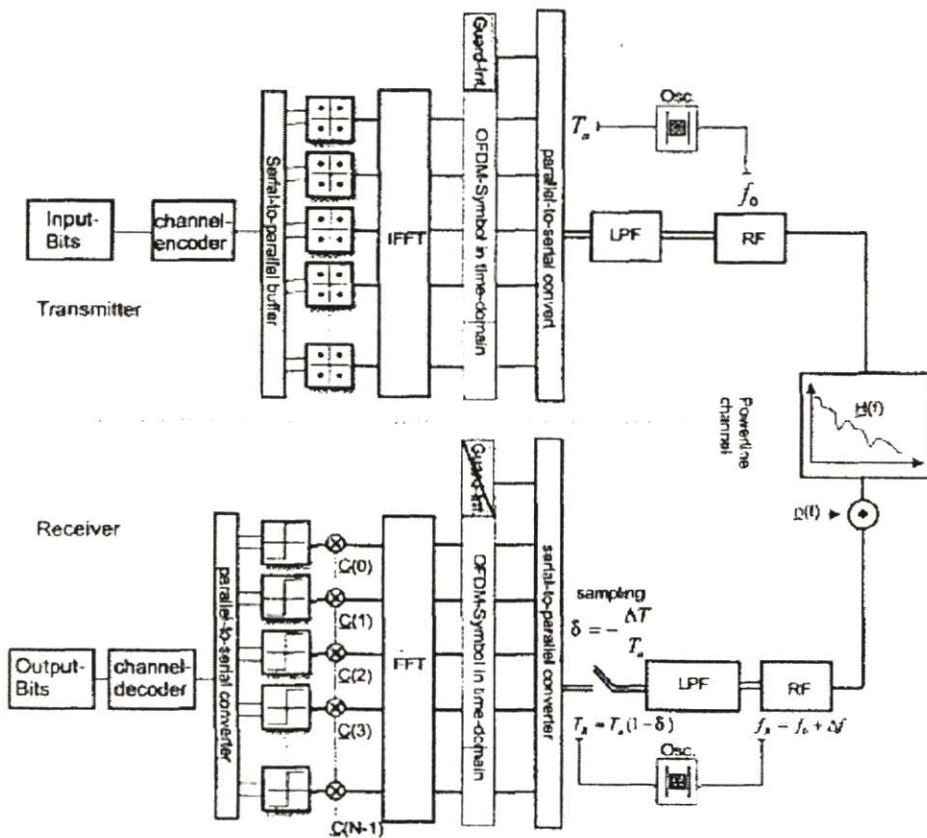
$$r_c(k) = \frac{1}{H(k)} \cdot r(k) = C(k) \cdot r(k) \quad (5.1)$$

ในส่วนคลื่นพาห้ในส่วนย่อยๆ สำหรับการเลือกความถี่ย่อยนั้น จะต้องพิจารณาจากค่าคาบของการซ้กตัวอย่าง T_a ดังสมการต่อไปนี้

$$T_s = \frac{1}{f_c} = \frac{N}{f_A} = N \cdot T_A \quad (5.2)$$

ซึ่งค่าสเปกตรัมของคลื่นพาห้ย่อยๆ ที่ใช้นั้น จะต้องมัลักษณะ orthogonal แม้ว่าคลื่นดังกล่าวจะมีการซ้อนทับกัน แต่จะไม่มีแทรกแซงเกิดขึ้น ทำให้แบนวิดท์มีค่าสูง การมอดูเลตคลื่นพาห้ย่อยๆ สามารถทำได้โดยอาศัยหลักการของ Fast Fourier Transformation (FFT) โดยที่บล็อกของ N ที่ประกอบด้วยข้อมูลสื่อสาร $X(t)$ ด้วยความถี่ f_k จะได้ค่าสัญลักษณ์ทางแกนเวลาในการส่งข้อมูลข่าวสารเป็นดังสมการที่ 5.3

$$s(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot e^{j2\pi f_k t} \quad , f_k = k \cdot f_c = \frac{k}{NT_a} \quad (5.3)$$



รูปที่ 5.1 ระบบการสื่อสารด้วย OFDM

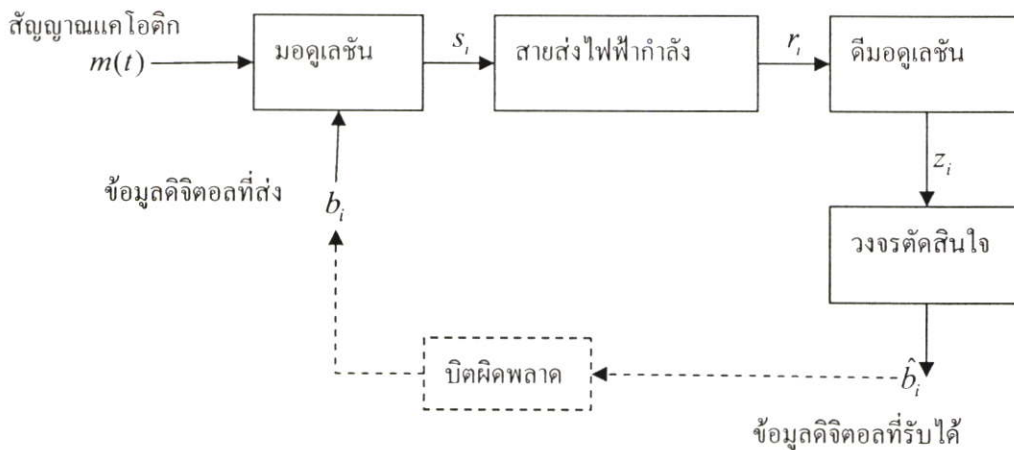
สำหรับสัญลักษณ์ที่อยู่ใน T_s การส่งสัญลักษณ์ของข้อมูล OFDM จะมีการเหลื่อมซ้อนที่ด้านภาครับเนื่องจากการผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้นหลังผ่านช่องสัญญาณ ซึ่งผลของ ISI ทำให้เกิดการสูญเสียการเป็น orthogonal ของสัญญาณ การสร้างขอบเขตเป็นการป้องกันระยะห่างของความยาว T_G โดยในแต่ละสัญลักษณ์ของ OFDM จะมีการส่งคาบของความยาวข่าวสารของตนมาก่อน การเป็น orthogonal จะถูกรักษาไว้และ ISI จะสามารถแยกแยะข้อมูลได้ โดยค่าระยะเวลาจะถูกขยายออกให้เป็น $T = T_S + T_G = (N + G) \cdot f_a$ ขอบเขตของการป้องกันนั้นจะมีความยาวมากกว่าผลตอบสนองทางด้านอิมพัลท์ของช่องสัญญาณสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีหน่วยเป็นไมโครวินาที และจะเพิ่มความทนทานในการปะทะกับส่วนที่เป็นมัลติพาท

ในการพิจารณาการส่งด้วยเทคนิค OFDM บนช่องสัญญาณสายส่งไฟฟ้ากำลัง ดังรูปที่ 5.1 การเดินทางของสายบิต จะมีลักษณะเป็นเหมือนการเข้ารหัส และแพ็กเป็นกลุ่มสัญลักษณ์ข้อมูลสื่อสาร การมอดูเลต ด้วย QPSK หรือ DQPSK จะเป็นการมอดูเลตในความถี่คลื่นพาห่อย่อย ในส่วนด้านออกของสัญญาณเมื่อผ่าน IFFT บนข้อมูลสัญลักษณ์สื่อสาร ที่ถูกสร้างโดย OFDM ในส่วนของการป้องกันสำหรับ ISI จะถูกสร้างขึ้น และผ่านไปยังส่วนของฟิวเตอร์และเปลี่ยนเป็นสัญญาณอนาลอก ที่ความถี่ f_0 ที่ด้านภาครับ จะมีกระบวนการที่เรียกว่า down-convert ด้วยค่าความถี่ f_R ผ่านไปยังส่วนที่เป็นการเลือกสุ่มตัวอย่าง ด้วยค่า คาบการสุ่ม T_R หลังจากนั้นจะผ่านเข้าสู่กระบวนการป้องกัน แล้วทำ FFT ในส่วนของการทำการปรับสัญญาณนั้นจะทำการปรับสัญญาณที่ผิดรูปไปให้กลับมา และขั้นตอนสุดท้าย สัญญาณจะถูกผ่านเข้ากระบวนการตัดสินใจ เพื่อพิจารณาข้อมูลข่าวสารที่ถูกส่งมาจากต้นทาง

บทที่ 6

แบบจำลองและผลการจำลองแบบ

การศึกษาสัญญาณแคโอดิกในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้การจำลองแบบช่องสัญญาณอย่างง่าย เพื่อพิจารณาคูณลักษณะของสัญญาณแคโอดิกเมื่อผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลัง โดยระบบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 6.1



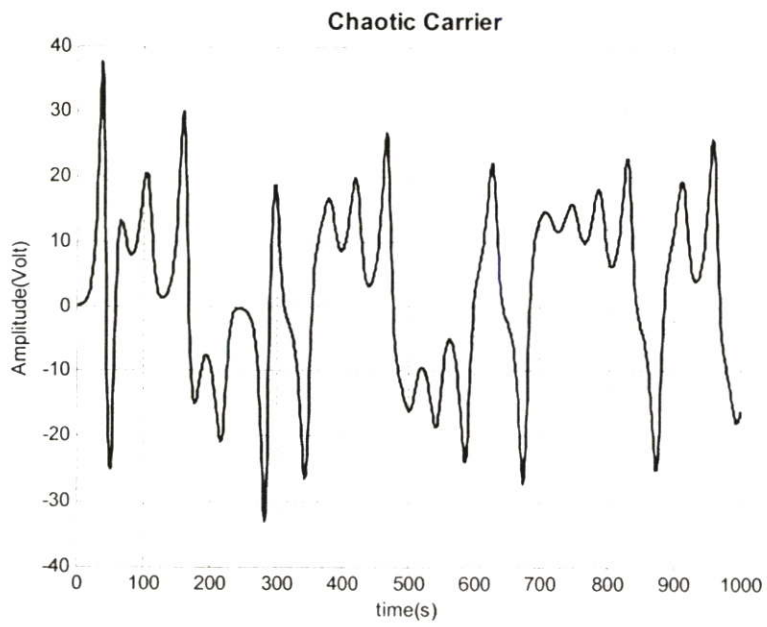
รูปที่ 6.1 แบบจำลองระบบการส่งสัญญาณสายส่งไฟฟ้ากำลัง

6.1 แบบจำลองสัญญาณแคโอดิก

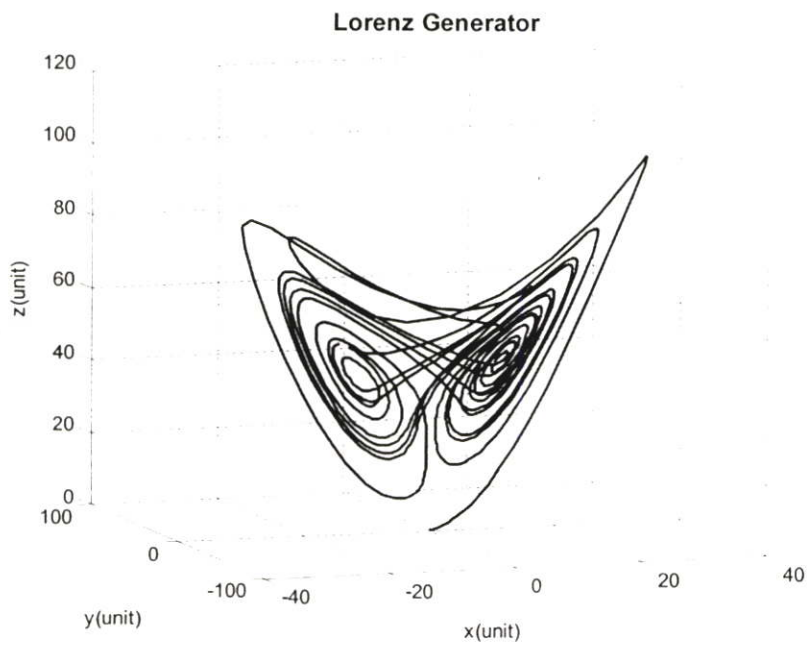
ในการจำลองสัญญาณแคโอดิก รูปแบบออกซิเลเตอร์จะใช้รูปแบบของ Lorenz

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= 16(y - x) \\ \frac{dz}{dt} &= (49.52 \times x) - y - xz \\ \frac{dz}{dt} &= (x \times y) - (4 \times z)\end{aligned}\tag{5.1}$$

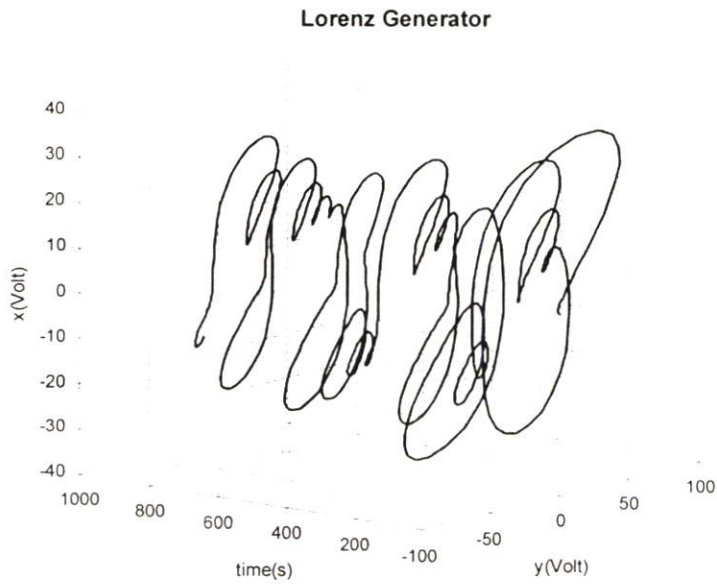
โดยค่าเริ่มต้น $x_0 = 0.1$, $y_0 = 0.1$ และ $z_0 = 0.1$



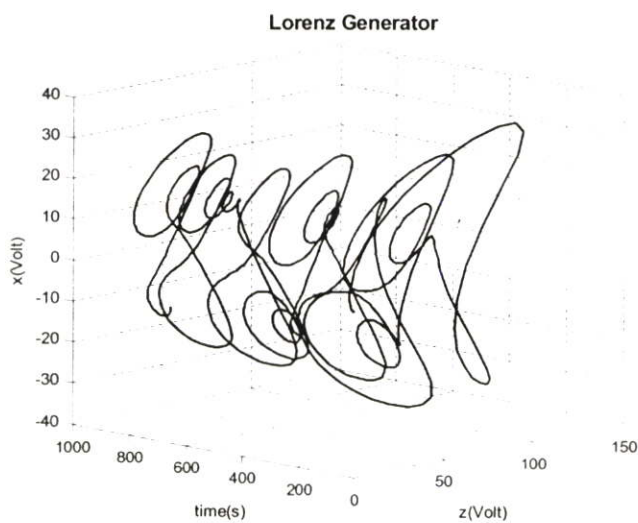
รูปที่ 6.2 แบบจำลองรูปสัญญาณออกซีเลเตอร์แคโอติกด้วย Lorenz



รูปที่ 6.3 ลักษณะสัญญาณแคโอติกด้วยตัวสร้างสัญญาณแบบ Lorenz



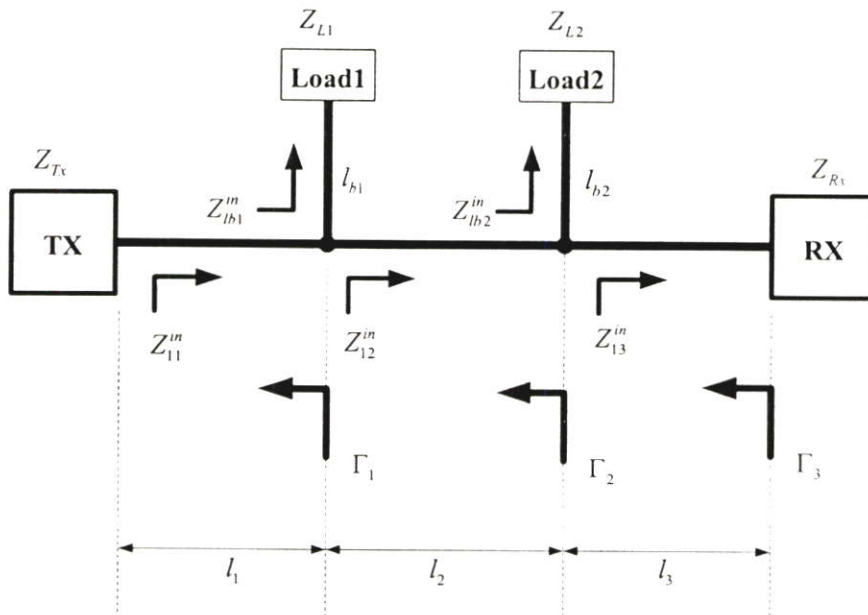
รูปที่ 6.4 ลักษณะสัญญาณออกซีเลเตอร์ในแกน $y(\text{volt})\text{-time(s)}\text{-}x(\text{volt})$



รูปที่ 6.5 ลักษณะสัญญาณออกซีเลเตอร์ในแกน $z(\text{volt})\text{-time(s)}\text{-}x(\text{volt})$

6.2 แบบจำลองช่องสัญญาณสายส่งไฟฟ้ากำลัง

การจำลองแบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์จะใช้แบบจำลองแบบดังที่แสดงไว้ในบทที่ 4 โดยจะกำหนดแบบจำลองให้มีการรับส่ง 1 ช่องทาง คือ ภาครับ 1 ตัว และ ภาคส่ง 1 ตัว ต่ออยู่กับเครื่องใช้ไฟฟ้าอยู่ระหว่างสายส่ง ซึ่งเครื่องใช้ไฟฟ้านี้ ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนจำพวกอินพัลส์ซีฟเข้าสู่ระบบการสื่อสาร ซึ่งเส้นทางของสายส่ง แสดงดังรูป



รูปที่ 6.6 แบบจำลองสัญญาณพหุแวลูไลน์

ค่าพารามิเตอร์เพื่อการจำลองแบบแบ่งเป็น ค่าคงที่ของการกระจาย(Propagation Constant) ค่าอิมพีแดนซ์ที่แต่ละจุด(input impedance at each point) และ ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน (Reflection coefficient) ซึ่งแสดงรายละเอียดดังนี้

- ค่าคงที่การกระจาย (Propagation Constant)

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (6.1)$$

- Characteristic impedance

$$z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (6.2)$$

โดยที่

R คือ ค่าความต้านทาน (Ω/m)

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (H/m)

G คือ ค่าคอนดักแตนซ์ (S/m)

C คือ ค่าความเก็บประจุ (F/m)

- ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน (Reflection coefficient)

$$\begin{aligned}\Gamma_3 &= \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \\ \Gamma_2 &= \frac{(Z_{b2} // Z_{l3}) - Z_0}{(Z_{b2} // Z_{l3}) + Z_0} \\ \Gamma_1 &= \frac{(Z_{b1} // Z_{l2}) - Z_0}{(Z_{b1} // Z_{l2}) + Z_0}\end{aligned}\quad (6.3)$$

และฟังก์ชันการถ่ายโอนของแบบจำลองข้างต้น เป็น

$$H(\omega) = 2 \times \frac{(1 + I_3(\omega))e^{-\gamma(\omega)l_3}}{1 + \Gamma_3(\omega)e^{-\gamma(\omega)l_3}} \times \frac{(1 + I_2(\omega))e^{-\gamma(\omega)l_2}}{1 + \Gamma_2(\omega)e^{-\gamma(\omega)l_2}} \times \frac{(1 + I_1(\omega))e^{-\gamma(\omega)l_1}}{1 + \Gamma_1(\omega)e^{-\gamma(\omega)l_1}} \times \frac{Z_{l1}^m(\omega)}{Z_{l1}^m(\omega) + Z_{Tx}} \quad (6.4)$$

กำหนดให้สายส่งไฟฟ้ากำลัง ที่ใช้ในการจำลองมีคุณสมบัติดังนี้

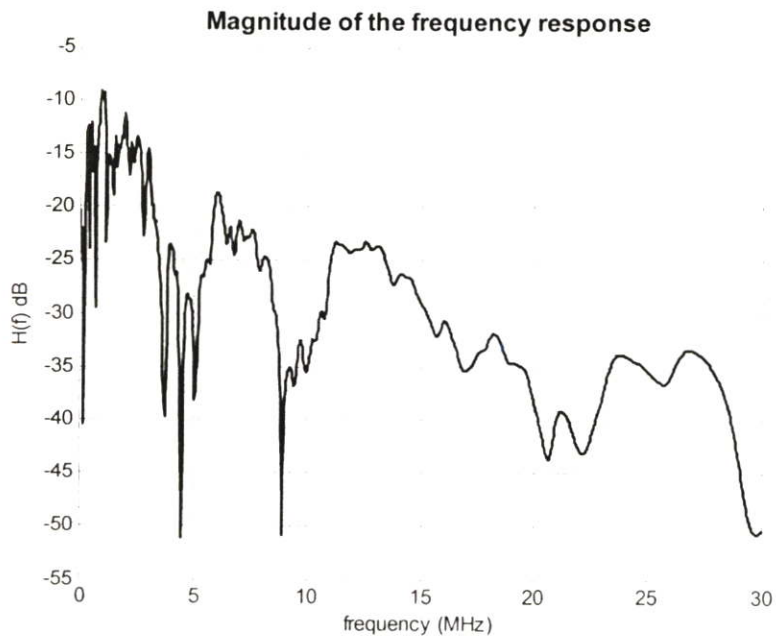
- $R = 142\sqrt{f} \text{ M}\Omega/\text{m}$
- $L = 0.287 + \frac{22.3}{\sqrt{f}} \text{ }\mu\text{H}/\text{m}$
- $G = 4.68\sqrt{f} \times 10^{-12} \text{ S}/\text{m}$
- $C = 91.0 \text{ pF}/\text{m}$

ระยะทางระหว่างทางแยกและช่องสัญญาณสื่อสารเป็น

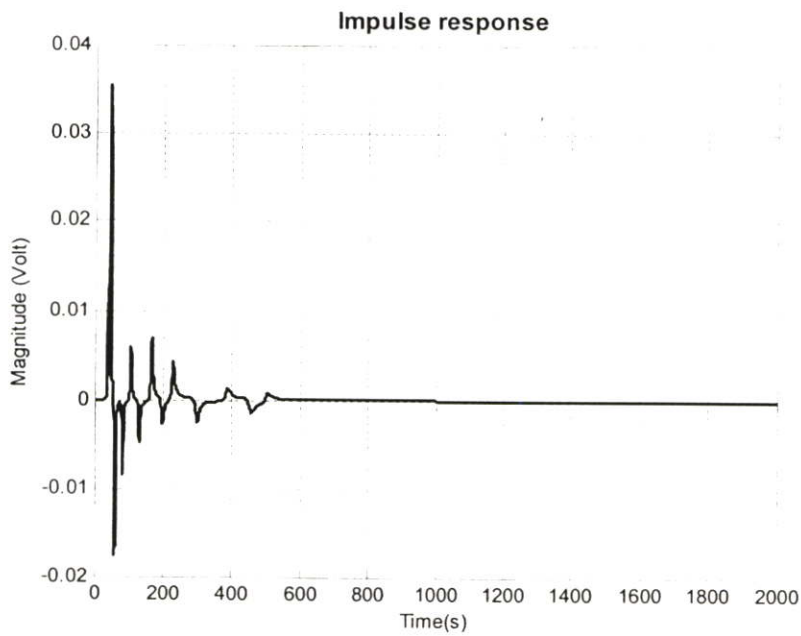
- $l_1 = 10 \text{ เมตร}$
- $l_2 = 10 \text{ เมตร}$
- $l_3 = 10 \text{ เมตร}$
- $l_{b1} = 2 \text{ เมตร}$
- $l_{b2} = 2 \text{ เมตร}$

ค่าอิมพีแดนซ์เป็น

- $Z_{Tx} = 50\Omega$
- $Z_{Rx} = Z_L = 50\Omega$
- $Z_{L1} = Z_{L2} = 50\Omega$



รูปที่ 6.7 แบบจำลองช่องสัญญาณสายส่งไฟฟ้ากำลังในแกนความถี่

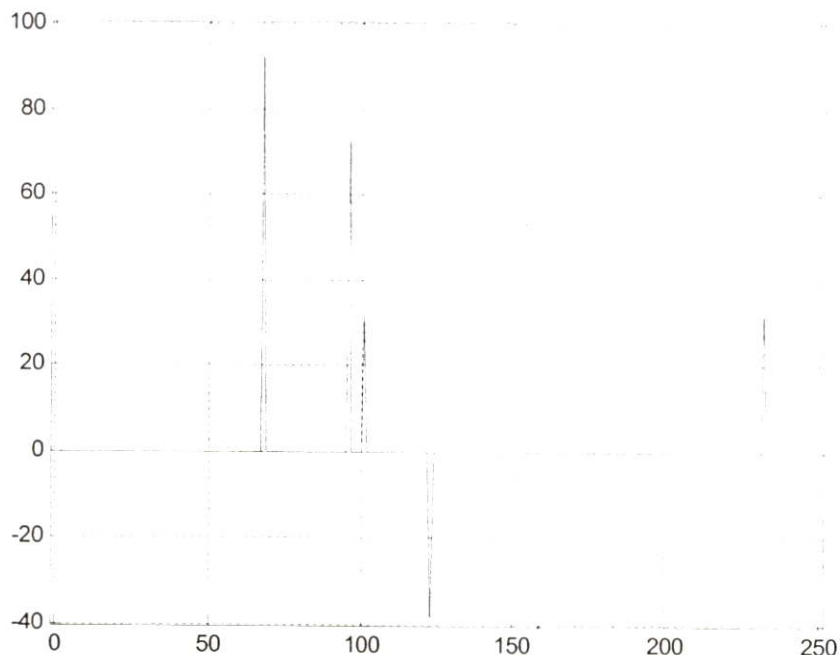


รูปที่ 6.8 แบบจำลองช่องสัญญาณสายส่งไฟฟ้ากำลังในแกนเวลา

6.3 แบบจำลองสัญญาณรบกวน

6.3.1 Impulsive Noise

การจำลองสัญญาณรบกวนแบบอินพัลส์ ที่มีโมเดลของ Bernoulli-Gaussian ดังแสดงในรูปที่ 6.9



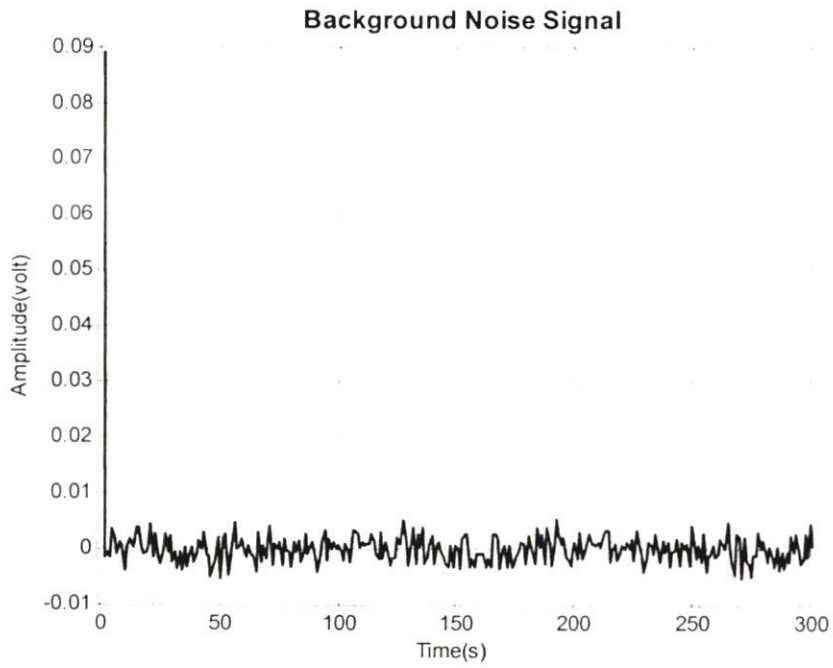
รูปที่ 6.9 ลักษณะสัญญาณรบกวนแบบ Impulsive ในแกนเวลา

6.3.2 Background Noise

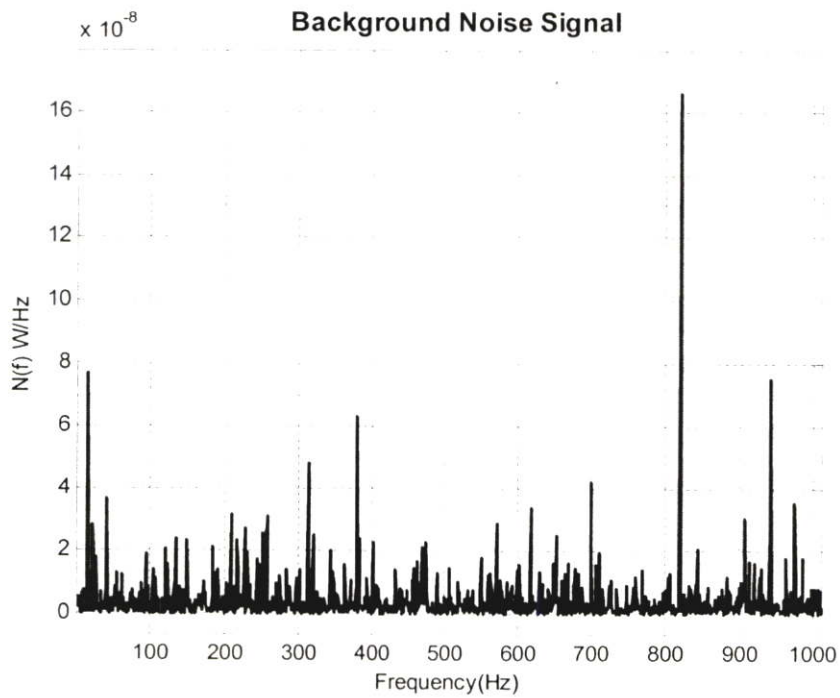
สัญญาณรบกวนซึ่งประกอบด้วยสัญญาณรบกวนแบบ colored background noise และ narrowband noise ดังแสดงในรูปที่ 4.3 สามารถแทนได้ด้วยสมการที่ 6.5

$$N(f) = 10^{(K - (3.95 \times 10^{-5} \times f))} \left(\frac{W}{\text{Hz}} \right) \quad (6.5)$$

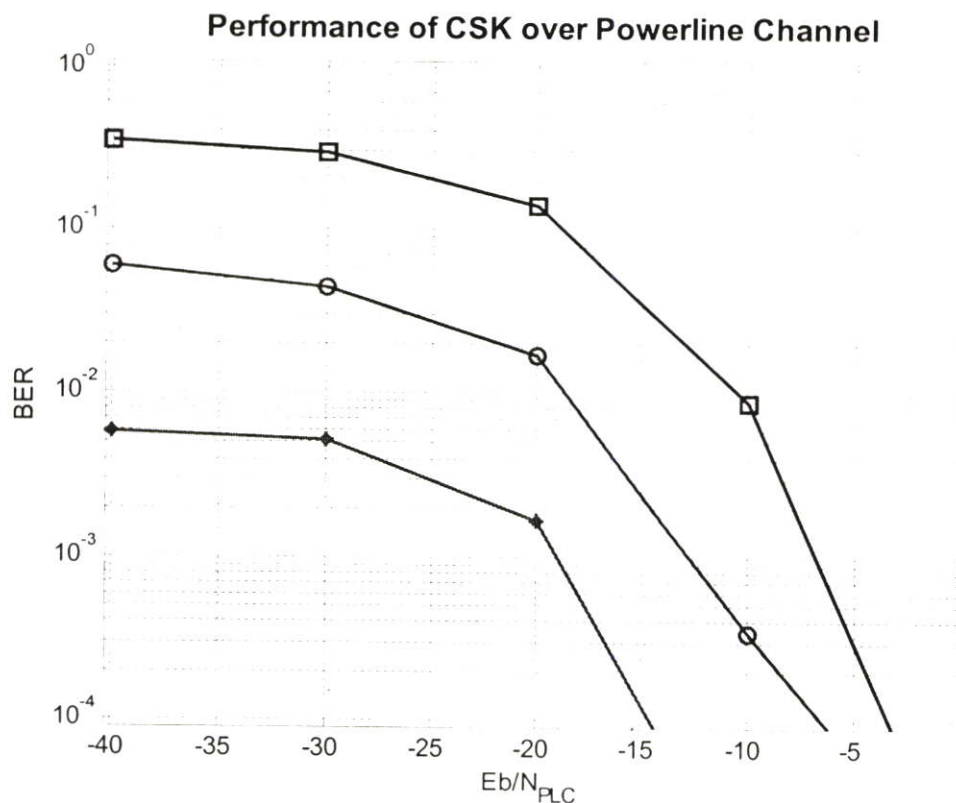
กำหนดให้ K คือ ค่าตัวแปรที่มีการสุ่มแบบเกาเซียนส์ ด้วยค่าเฉลี่ย $\mu = -8.64$ และ ค่ากลาง $\sigma = 0.5$ รูปสัญญาณดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 ลักษณะสัญญาณรบกวนแบบ Background ในแกนเวลา

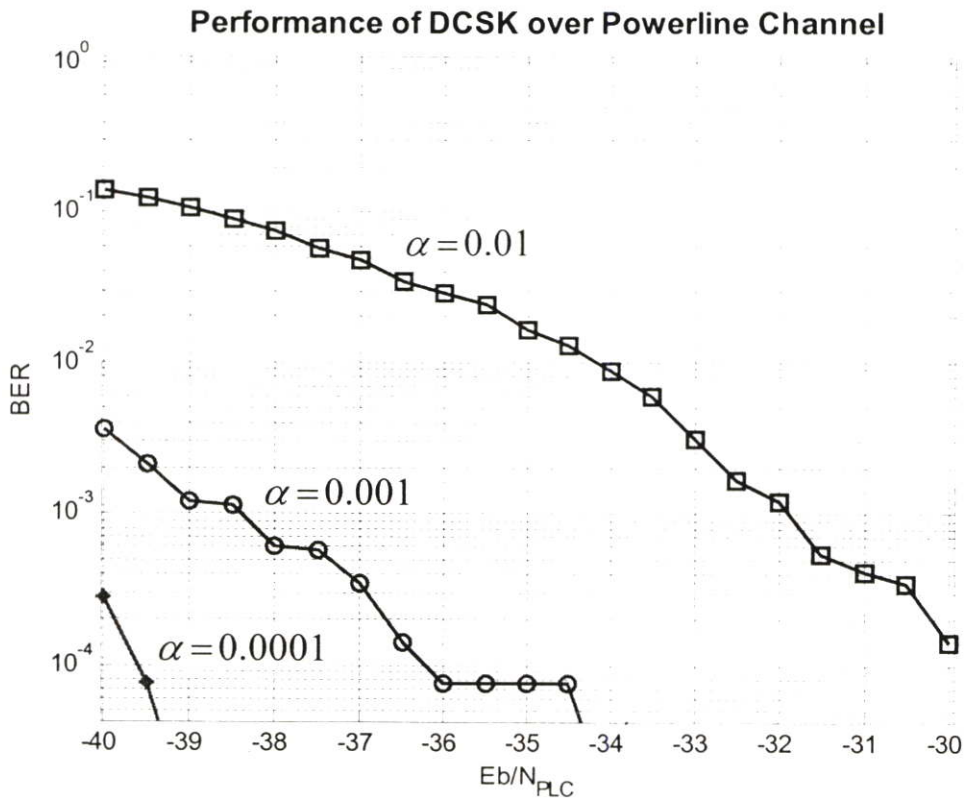


รูปที่ 6.11 ลักษณะสัญญาณรบกวนแบบ Background ในแกนความถี่



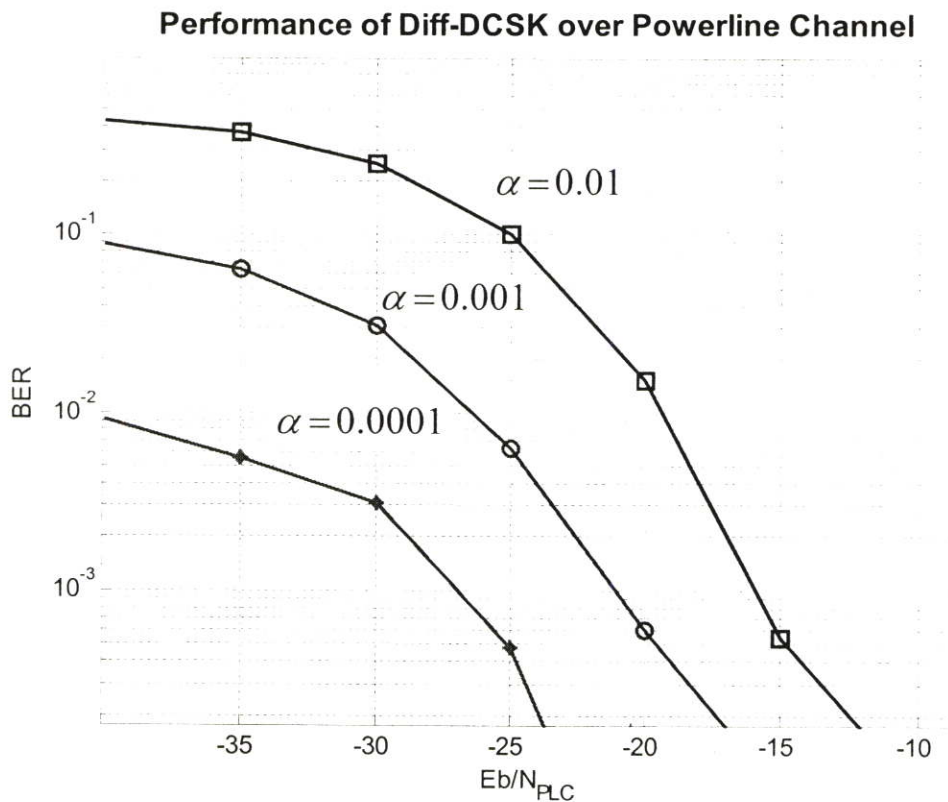
รูปที่ 6.12 อัตราการผิดพลาดของบิตในการมอดูเลตแบบ CSK

การส่งสัญญาณแควโอดิกที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ Coherent antipodal shift keying (CSK) จากรูปที่ 6.12 เมื่อทำการส่งสัญญาณที่อัตราเร็ว 50 Mbps ด้วยช่องสายส่งไฟฟ้ากำลัง และทำการเปลี่ยนแปลงค่า α ซึ่งเป็นอัตราความถี่การเกิดสัญญาณพัลส์ ของสัญญาณรบกวนแบบอินพัลซีฟ จะได้ว่า เมื่อ อัตราความถี่การเกิดสัญญาณพัลส์มีค่ามากจะทำให้สมรรถนะ ของระบบไม่ดี แต่เมื่ออัตราการอัตราความถี่การเกิดสัญญาณพัลส์มีค่าน้อยจะทำให้สมรรถนะ ของระบบดีขึ้น



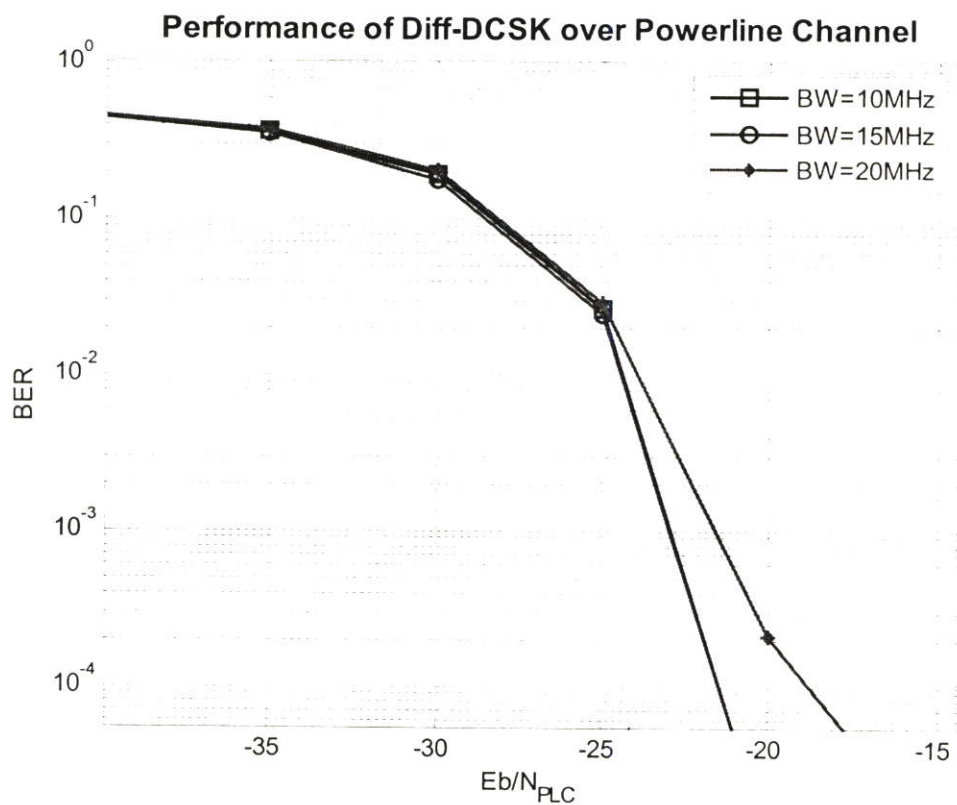
รูปที่ 6.13 อัตราการผิดพลาดของบิตในการมอดูเลตแบบ DCSK

การส่งสัญญาณแคโอดิกที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ Coherent differential chaos shift keying (Coherent differential DCSK) จากรูปที่ 6.13 เมื่อทำการส่งสัญญาณที่อัตราเร็ว 50 Mbps ด้วยช่องสายส่งไฟฟ้ากำลัง และทำการเปลี่ยนแปลงค่า α ซึ่งเป็นอัตราความถี่การเกิดสัญญาณพัลส์ของสัญญาณรบกวนแบบอินพัลซีฟ จะได้ว่า เมื่อ อัตราความถี่การเกิดสัญญาณพัลส์มีค่ามากจะทำให้สมรรถนะ ของระบบไม่ดี แต่เมื่ออัตราการอัตราความถี่การเกิดสัญญาณพัลส์มีค่าน้อยจะทำให้สมรรถนะ ของระบบดีขึ้น



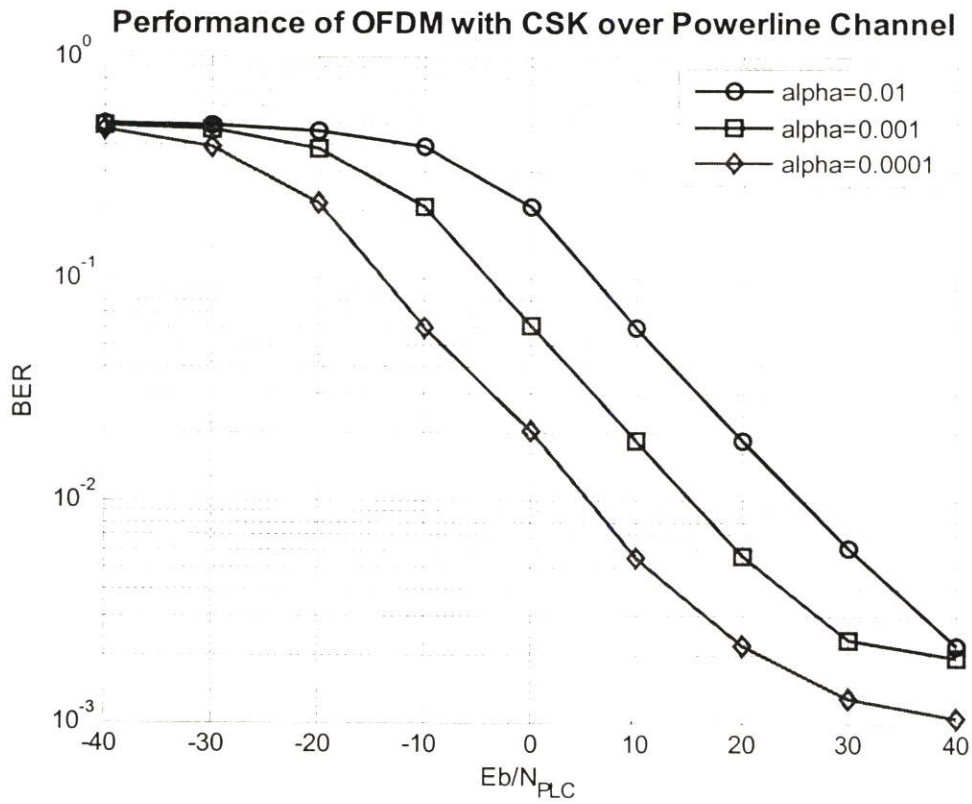
รูปที่ 6.14 อัตราการผิดพลาดของบิตในการมอดูเลตแบบ Differential DCSK

การส่งสัญญาณแอดโฮคที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ Differential Coherent DCSK (Diff-DCSK) จากรูปที่ 6.14 เมื่อทำการส่งสัญญาณที่อัตราเร็ว 50 Mbps ด้วยช่องสายส่งไฟฟ้ากำลัง และทำการเปลี่ยนแปลงค่า α ซึ่งเป็นอัตราความถี่การเกิดสัญญาณพัลส์ ของสัญญาณรบกวนแบบอินพัลซีฟ จะได้ว่า เมื่อ อัตราความถี่การเกิดสัญญาณพัลส์มีค่ามากจะทำให้สมรรถนะ ของระบบไม่ดี แต่เมื่ออัตราการอัตราความถี่การเกิดสัญญาณพัลส์มีค่าน้อยจะทำให้สมรรถนะ ของระบบดีขึ้น



รูปที่ 6.15 อัตราการผิดพลาดของบิตในการมอดูเลตแบบ Differential DCSK
เมื่อเปลี่ยนแบนวิทซ์ของช่องสัญญาณ

เมื่อทำการเปลี่ยนช่วงความถี่ในการส่งข้อมูลผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลัง ที่ความถี่ 10MHz, 15MHz และ 20MHz และกำหนดค่า $\alpha = 0.1$ แนวนอนของสมรรถนะจะมีลักษณะใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6.16 อัตราการผิดพลาดของบิตในการมอดูเลตแบบ CSK ร่วมกับเทคนิค OFDM

เมื่อนำเทคนิคการส่งผ่านข้อมูลแบบ OFDM มาร่วมในการส่งข้อมูลกับการมอดูเลต จะส่งผลให้ประสิทธิภาพดีขึ้นเป็นอย่างมาก

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การสื่อสารข้อมูลด้วยสายส่งไฟฟ้ากำลังในปัจจุบัน อยู่ในลำดับขั้นตอนการศึกษา โดยหลายประเทศได้มีผลการวิจัยออกมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นทางเลือกในการสื่อสารด้านโทรคมนาคม นอกเหนือจากการส่งกระแสและพลังงานไฟฟ้าตามหน้าที่หลักของสายส่งไฟฟ้ากำลัง ในปัจจุบันได้มีการผลิต โมเด็มสำหรับการสื่อสาร ในสายส่งไฟฟ้ากำลังแรงดันต่ำออกมาจำหน่าย แสดงให้เห็นว่า เทคโนโลยีด้านนี้สามารถเป็นไปได้จริงในปัจจุบัน โดยอุปกรณ์ดังกล่าวได้มีการสื่อสารด้วยการส่งสัญญาณไบนารี และใช้สัญญาณรูปไซน์เป็นพาหะ แต่การส่งข้อมูลดังกล่าวไม่มีการป้องกันความปลอดภัยของข้อมูลทางด้านสื่อสาร ทำให้ข้อมูลไม่มีความปลอดภัยในการส่งข้อมูลที่สำคัญๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ สนใจที่จะเพิ่มความปลอดภัยของข้อมูลสื่อสาร โดยใช้สัญญาณพาหะที่มีจุดเด่นในเรื่องความปลอดภัยนั่นคือ สัญญาณแคโอดิก เนื่องจากรูปสัญญาณที่มีลักษณะผันผวน ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ถูกมองว่าเป็นสัญญาณรบกวนมิใช่สัญญาณสื่อสาร

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสนใจศึกษาการส่งสัญญาณรูปแบบอื่นในการสื่อสารด้วยสายส่งไฟฟ้ากำลัง โดยทำการจำลองแบบระบบดังกล่าว ด้วยการส่งสัญญาณแคโอดิกในระบบดิจิทัล มีคลื่นพาหะที่สร้างด้วยหลักการกำเนิดสัญญาณแคโอดิกของ Lorenz ผ่านกระบวนการมอดูเลตด้วย 3 รูปแบบ คือ Coherent Antipodal Chaos Shift Keying (Coherent Antipodal CSK), Coherent Differential Chaos Shift Keying (Coherent DCSK) และ Differential Coherent DCSK โดยจะกล่าวการมอดูเลตทั้ง 3 แบบตามลำดับ และอีกรูปแบบหนึ่ง จะนำเสนอเทคนิคการส่งผ่านข้อมูลด้วย OFDM ของการมอดูเลตแบบ CSK การผ่านช่องสัญญาณการสื่อสารที่เป็นสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีการจำลองแบบซึ่งได้ศึกษาในรูปแบบอย่างง่ายที่มีการเชื่อมต่อเพียงเครื่องรับ-เครื่องส่ง แบบ หนึ่งต่อหนึ่งเท่านั้น และมีการจำลองว่า มีในช่องสัญญาณมีการต่อใช้งานของเครื่องใช้ไฟฟ้าทำให้เกิดสัญญาณรบกวนจำพวกอินพัลส์ฟเกิดขึ้น เมื่อสัญญาณผ่านมาถึงเครื่องรับเครื่องรับจะมีการรับข้อมูลที่ส่งมาพร้อมกับสัญญาณรบกวน อีกทั้งยังผ่านการลดทอนเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของสายส่งอีกด้วย

ผลการจำลองแบบแสดงให้เห็นว่า การสื่อสารด้วยสัญญาณแคโอดิกในสายส่งไฟฟ้ากำลังนั้นสามารถทำได้เช่นเดียวกับการส่งด้วยสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีการศึกษามาก่อนแล้ว แต่ประสิทธิภาพของการสื่อสารยังมีอัตราการผิดพลาดของบิตยังสูง ดังนั้นจึงควรศึกษาการเข้ารหัสสัญญาณเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบให้ดียิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] Bostoen T. & Van de Wie, **Modelling the low-voltage power distribution network in the frequency band from 0.5 MHz to 30 MHz for broadband powerline communications (PLC)**, Broadband Communications, Proceedings, International Zurich Seminar on, 2000, pp.171-178.
- [2] รศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์, **วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร(COMMUNICATION ENGINEERING)**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540, หน้า 21-36.
- [3] Heru Supriyono, Chaos-Based Digital Communication System, TEKNIK GELAGAR Vol.16 No 02 October 2005, pp 94-101, 2005.
- [4] Ned J. Corron, Daniel W.Hahs, **A New Approach to Communications Using Chaotic Signals**, IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS—I: FUNDAMENTAL THEORY AND APPLICATIONS, VOL. 44, NO. 5, MAY 1997, pp 373-382, 1997.
- [5] GÉZA KOLUMBÁN, MICHAEL PETER KENNEDY, **Chaotic Communications With Correlator Receivers: Theory and Performance Limits**, IEEE, pp 711-732, 2002.
- [6] http://www.kemt.fe.i.tuke.sk/predmety/KEMT350_EP/_materialy/
- [7] ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, ระบบไฟฟ้ากำลัง(Electrical Power Systems) เล่ม 1 พื้นฐานระบบไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 14-50, 2539
- [8] นายการ์น มหาวิเชียร, นายบุญชัย อังคณาภักดิ์, **ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านผ่านสายไฟฟ้ากำลัง (Power Line Remote Control System)**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า1-10, 2544.
- [9] https://spadev.ieee.org/cgi-bin/sadb/print_par?print:1609
- [10] Matthias Götz, Manuel Rapp, and Klaus Dostert, **Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design**, IEEE Communications Magazine, April 2004, pp78-86.
- [11] Bostoen T. & Van de Wie, **Modelling the low-voltage power distribution network in the frequency band from 0.5 MHz to 30 MHz for broadband powerline communications (PLC)**, Broadband Communications, Proceedings, International Zurich Seminar on, 2000, pp.171-178.

- [12] Manfred Zimmermann and Klaus Dostert, Analysis and Modeling of Impulsive Noise in Broad-Band Powerline Communications, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.44, NO.1, Feb 2002, pp.250-258.
- [13] Y. H. Ma, P. L. So and E. Gunawan, **Performance Analysis of OFDM Systems for Broadband Power Line Communications Under Impulsive Noise and Multipath Effects**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.20, NO.2, April2005, pp674-682.
- [14] A.Papaioannou, G. Papadopoulos and F. Pavlidou, **Performance of Space-Time Block Coding in Powerline and Satellite Communications**, Journal of Communication and Information Systems, Vol.20, NO.3, 2005, pp174-181.
- [15] 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, April 2005, pp630-637.
- [16] S. Ohmi, S. Yoshida, T. Yamaguchi and G. Kuroda, **A Media Access Control Method for High-Speed Power Line Communication System Modems**, IEEE 2004 , pp 295-300.
- [17] Saeed V. Vaseghi, **Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction**, John Wiley&Sons, Ltd. London, pp 355-377.
- [18] L.T. Tang, P.L.So, E. Gunawan, Y.L.Guan and T:T. Lie, **Characterization and Modeling of In-Building Power Lines for High-Speed Data Transmission**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.18, NO. 1, January 2003, pp 69-77.

ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. N. Thummakerd, S. Sittichivapak and K. Puntsri “**Chaotic Direct Sequence Spread Spectrum for Power line Datacommunication,**” Proceedings of the 2007 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) International Conference, Mae Fah Luang Univerity , Chiang Rai, Thailand, May 9-12, 2007, page781-784.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวนฤมล ทুমมาเกิด เกิดเมื่อวันที่ 22 กันยายน พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดสกลนคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากสำนักวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2546