

การจำลองแบบการทำงานของการใช้เวฟเล็ตในระบบฟรีคววนซ์ฮอปป์
ซีดีเอ็มเอบนช่องสัญญาณการจางหาย

SIMULATION OF WAVELET-BASED FREQUENCY HOPPED
CDMA SYSTEM OVER FADING CHANNELS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

จพ.

บัณฑิตวิทยาลัย

๖ ๒๕๕๗

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

๒๕๔๗

พ.ศ. ๒๕๔๗

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน... 51085

วัน,เดือน,ปี... ๒ ก.ค. ๒๕๔๗

ISBN 974-324-991-5

๒๕๕๗/๒๒๒

สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกฉบับ

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจำลองแบบการทำงานของการใช้เวฟเล็ดในระบบ
พีริแควนซีฮอปป์ิงซีดีเอ็มเอบนช่องสัญญาณการจางหาย

นักศึกษา

นางสาววรรณภา ภูนิลามัย

รหัสนักศึกษา

44611212

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมโทรคมนาคม

พ.ศ.

2547

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.สุวิพล สิทธีชีวภาค

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอคุณสมบัติของการใช้เวฟเล็ดในการมอดูเลตสัญญาณ ในระบบการสื่อสารที่มีการเข้าถึงช่องสัญญาณหลายทางแบบแยกความแตกต่างทางรหัส โดยวิธีการกระโดดเปลี่ยนความถี่(Frequency-Hopped CDMA) เวฟเล็ดเป็นสัญญาณที่มีคุณสมบัติที่น่าสนใจ เช่น ตำแหน่งในทางเวลาและทางความถี่ การมีคุณสมบัติเชิงตั้งฉากบนสเกลและกระบวนการแปลงสัญญาณ คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้เวฟเล็ดมีความเหมาะสมในการนำมาทำการมอดูเลตสัญญาณ โดยกระบวนการแปลงเวฟเล็ดแบบดิคคริตจะถูกนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผลจากการจำลองแบบการทำงานของระบบที่ทำงานบนช่องสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณที่มีการรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก (AWGN)พร้อมกับสัญญาณการรบกวน และการทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบต่างๆ จะเห็นว่าระบบจะมีความสามารถในการลดการแทรกสอดสัญญาณแถบแคบ และให้ประสิทธิภาพของระบบดีกว่าระบบที่มีการมอดูเลตแบบเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Simulation of Wavelet-based Frequency Hopped CDMA Systems over fading channels.
Student	Miss Wannapha Phoonilamai
Student ID.	44611212
Degree	Master of Engineering
Programme	Telecommunication Engineering
Year	2547
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Suvepon Sittichivapak

ABSTRACT

This thesis presents the performance of Wavelet Based modulation for Frequency Hopped CDMA system. We use wavelet properties such as orthogonality over scale and translation for modulation waveforms. The scheme can be efficiently implemented using the Discrete Wavelet Transform and Inverse Discrete Wavelet Transform. The system is performed on AWGN with Narrow band Interference signal and Fading Channels. The simulation results show that the propose system can reduces interchannel interference and narrow band interference. This method can improve performance of system.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 หลักการของระบบซีดีเอ็มเอ.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 การมอดูเลตแบบสเปกตรัม.....	7
2.2.1 การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมโดยการจัดลำดับแบบตรง.....	7
2.2.2 ระบบสเปกตรัมแบบการกระโดดของความถี่.....	10
2.2.2.1 ระบบฟรีแควนซ์ฮอปปีงสเปกตรัมที่มีการเปลี่ยนความถี่แบบเร็ว.....	10
2.2.2.1.1 เครื่องส่งของระบบฟรีแควนซ์ฮอปปีงสเปกตรัม.....	12
2.2.2.1.2 แบนด์วิดท์.....	14
2.2.2.1.3 เครื่องรับของระบบฟรีแควนซ์ฮอปปีงซีดีเอ็มเอ.....	14
2.2.2.1.4 ระบบฟรีแควนซ์ฮอปปีงสเปกตรัมที่มีการเปลี่ยนความถี่แบบเร็วที่ทำการมอดูเลตแบบ M-ary เอฟเอสเค.....	15
2.2.2.2 อัตราเร็วของสัญญาณพาหะของลำดับพีเอ็นสำหรับระบบฟรีแควนซ์ฮอปปีงสเปกตรัมที่มีการเปลี่ยนความถี่แบบเร็ว.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.2.3 ระบบฟรีควอนซ์ฮอปปีงสเปกตรัมที่มีการเปลี่ยนความถี่แบบช้า.....	17
2.2.2.4 คุณสมบัติของระบบฟรีควอนซ์ฮอปปีง.....	19
2.2.3 การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแบบการกระโดดของเวลา.....	21
2.2.4 การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแบบการผสม.....	23
บทที่ 3 หลักการของเวฟเล็ดในระบบการสื่อสาร.....	24
3.1 คลื่นสัญญาณและเวฟเล็ด.....	24
3.2 การแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่อง.....	29
3.3 การแปลงเวฟเล็ดแบบไม่ต่อเนื่อง.....	29
3.4 การแปลงเวฟเล็ดแบบไม่ต่อเนื่องและกระบวนการของฟิลเตอร์แบงค์.....	33
3.4.1 การลดอัตราเร็วของการสุ่มหลังจากการคอนโวลูชัน.....	33
3.4.2 การคอนโวลูชันหลังจากการเพิ่มอัตราเร็วการสุ่ม.....	33
3.4.3 กระบวนการกระจายองค์ประกอบของเวฟเล็ด.....	34
3.5 ขบวนการสังเคราะห์สัญญาณของเวฟเล็ด.....	36
3.6 การใช้เวฟเล็ดแบบแพ็คเกิดในการมอดูเลตสัญญาณในระบบการสื่อสาร.....	37
3.7 การใช้เวฟเล็ดในระบบสเปกตรัม.....	42
บทที่ 4 ช่องสัญญาณการจางหาย.....	47
4.1 สาเหตุของการเกิดการจางหาย.....	47
4.2 คุณสมบัติของช่องสัญญาณการจางหาย.....	48
4.2.1 การแกว่งขึ้นๆลงๆของกรอบคลื่นและเฟส.....	48
4.2.2 การจางหายแบบช้าและแบบเร็ว.....	48
4.2.3 การจางหายแบบ Frequency-Flat และ Frequency Selective.....	50
4.3 แบบจำลองของช่องสัญญาณการจางหาย.....	50
4.3.1 แบบจำลองของช่องสัญญาณแบบเรลีย์และไรเซียน.....	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.3 แบบจำลองของช่องสัญญาณแบบนาคากามิ-เอ็ม.....	56
บทที่ 5 การจำลองแบบและการวิเคราะห์ผลจากการจำลองแบบระบบ.....	60
5.1 การจำลองแบบระบบ.....	60
5.2 การวิเคราะห์ผลจากการจำลองแบบระบบ.....	63
5.2.1 ผลการจำลองแบบระบบที่ผู้ใช้ทุกคนมีรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความ ที่ตั้งจากกัน.....	63
5.2.2 ผลการจำลองแบบระบบที่ผู้ใช้ทุกคนมีรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่ แบบสุ่ม.....	68
บทที่ 6 สรุปผลการวิเคราะห์.....	74
บรรณานุกรม.....	76
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	77
ประวัติผู้เขียน.....	78

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่า a_1, a_2, a_3, b_1 และ b_2 ที่สอดคล้องกับค่า m ต่างๆ.....	59



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบการส่งสัญญาณในระบบสเปกตรัม.....	6
2.2 การลดกำลังของสัญญาณแทรกสอดแถบแคบในระบบการสเปกตรัม.....	7
2.3 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของเครื่องส่งของระบบแบบ ไคเร็กซ์เควินซีดีเอ็มเอ.....	8
2.4 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของเครื่องส่งของระบบแบบ ไคเร็กซ์เควินซีดีเอ็มเอ.....	8
2.5 แผนภาพแสดงความถี่ของระบบฟรีควอนซ์ฮอปปีงสเปกตรัมที่มีการเปลี่ยนความถี่แบบเร็วที่มีการมอดูเลตแบบเอฟเอสเค.....	11
2.6 บล็อก ไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบฟรีควอนซ์ฮอปปีงสเปกตรัม.....	13
2.6 แผนภาพแสดงความถี่ของระบบฟรีควอนซ์ฮอปปีงสเปกตรัมที่มีการเปลี่ยนความถี่แบบเร็วที่ทำการมอดูเลตแบบMaryเอฟเอสเค.....	16
2.8 แผนภาพแสดงค่าความถี่ของระบบที่มีค่า $T/T_h = 1/2$	18
2.9 ไดอะแกรมความถี่สำหรับระบบที่มีค่า $M = 4$ และช่วงคาบเวลาของสัญลักษณ์เป็น $T \log_2(M)$ และมี $T_h = 3T_s$	19
2.10 แผนภาพแสดงช่วงเวลาและความถี่ของระบบการเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแบบการกระโดดของเวลา.....	22
2.11 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่ง.....	23
3.1 แผนภาพแสดงช่วงเวลาและความถี่ (a) การแปลงฟูเรียร์แบบช่วงสั้นๆ (b)การแปลงแบบเวฟเล็ต.....	28
3.2 รูปแบบของฟิลเตอร์แบงค์โดยสร้างจากการขยายและการย่อด้วยค่า a ของเวฟเล็ตแม่.....	29
รูปสัญญาณและการตอบสนองทางความถี่ของเวฟเล็ต	32
3.4 บล็อกไดอะแกรมของการลดอัตราเร็วของการสุ่มหลังจากการคอนโวลูชัน.....	33
3.5 บล็อกไดอะแกรมของการคอนโวลูชันหลังจากการเพิ่มอัตราเร็วการสุ่ม.....	34
3.6 สัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ตการแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ตบนแกนของเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง.....	35
3.7 ขบวนการหาค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ตและสเกลลิงฟังก์ชันที่ระดับการวิเคราะห์ต่างๆหรือการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง.....	36
3.8 ขบวนการสังเคราะห์สัญญาณของเวฟเล็ตหรือการแปลงเวฟเล็ตไม่ต่อเนื่องแบบผกผัน37	
3.9 ฟังก์ชันเวฟเล็ตแบบเพ็ทเก็ต 4 รูปแบบ.....	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 การแปลงฟูเรียร์ของฟังก์ชันเวฟเล็ทแบบแพ็กเก็ต.....	41
3.11 การสังเคราะห์สัญญาณพัลส์เวฟเล็ทจากโครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตร.....	43
3.12 สัญญาณที่ได้จากเวฟเล็ท โครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตร.....	44
3.13 การแสดงลำดับของบิตข้อมูล โดยใช้เวฟเล็ทแบบฮาร์ทีสเกลต่างกัน.....	45
3.14 ความถี่ของสัญญาณเบสแบนด์ที่ได้จากการสเปคตรัมข้อมูลออกไปโดยเวฟเล็ท.....	46
4.1 รูปแบบของการจางหายของสัญญาณ.....	47
4.2 การแบ่งชนิดของการจางหาย.....	49
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องสัญญาณทางกายภาพ แบบจำลองอ้างอิง แบบจำลองกำหนดได้ และ ค่าที่ได้จากการวัด.....	51
4.4 การหา $\mu, (y)$ โดยการใช้ฟิลเตอร์.....	53
4.5 การหา $\mu, (y)$ โดยวิธีการไรซ์.....	53
4.6 แบบจำลองของกระบวนการเชิงสถิติ.....	54
4.7 แบบจำลองของกระบวนการกำหนดได้.....	54
4.8 แผนภาพการสร้างช่องสัญญาณการจางหายแบบเรลีย์.....	55
4.9 แผนภาพการสร้างช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซียน.....	55
4.10 โครงสร้างของแบบจำลองช่องสัญญาณการจางหายแบบนาคากามิ-เอ็ม.....	57
5.1 แผนผังแสดงการทำงานของการทำงานแบบระบบเพื่อหาค่าอัตราความผิดพลาดของบิต.....	61
5.2 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยน ความถี่แบบตั้งฉากกันซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก.....	63
5.3 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยน ความถี่แบบตั้งฉากกัน ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก ที่มีการแทรกสอดจากสัญญาณแถบแคบ.....	64
5.4 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่ แบบตั้งฉากกันซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบเรย์.....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบตั้งฉากกัน ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซียนที่ค่าแอมพลิจูดของเส้นทางสัญญาณตรงมีค่าเป็น0.5.....	66
5.6 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบตั้งฉากกันซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซียนที่ค่าแอมพลิจูดของเส้นทางสัญญาณตรงมีค่าเป็น2.....	66
5.7 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบตั้งฉากกัน ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบนาคากามิที่ค่าตัวแปรการจางหายมีค่าเป็น 0.5.....	67
5.8 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่มซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก.....	69
5.9 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่ม ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวกและการแทรกสอดจากสัญญาณแถบแคบ.....	69
5.10 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่มซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบเรย์ลี.....	70
5.11 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่มกันซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซียนที่ค่าแอมพลิจูดของเส้นทางสัญญาณตรงมีค่าเป็น 0.5.....	71
5.12 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่มกัน ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซียนที่ค่าแอมพลิจูดของเส้นทางสัญญาณตรงมีค่าเป็น2.....	72
5.13 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่มกันซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบนาคากามิ ที่มีค่า $m=0.5$	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบที่มีการเข้าถึงหลายทางแบบแยกความแตกต่างทางรหัส(CDMA) เป็นเทคนิคที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในระบบการสื่อสารในปัจจุบัน ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อต้านทานต่อผลการแทรกสอดของสัญญาณรบกวนซึ่งทำได้ด้วยการขยายสเปกตรัมของสัญญาณออกไป โดยกระบวนการที่จะขยายสเปกตรัมของสัญญาณออกไปนั้นมีหลายวิธี ที่นิยมใช้กันมากอีกวิธีหนึ่ง คือ ระบบที่มีการเข้าถึงหลายทางแบบแยกความแตกต่างทางรหัสโดยวิธีการกระโดดเปลี่ยนความถี่ (FH-CDMA) ซึ่งข้อมูลที่ส่งจะมีการกระโดดเปลี่ยนความถี่ไปบนเซตของความถี่ที่กำหนดจากรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่ของผู้ใช้แต่ละคนที่มีรูปแบบเฉพาะตัว รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่อาจจะอยู่ในแบบตั้งฉากกันคือผู้ใช้ทุกคนทำการส่งบิตข้อมูลไม่ซ้ำกันหรือแบบสุ่ม โดยในกรณีที่เป็นแบบตั้งฉากนั้นหากผู้ใช้มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นจะไม่สามารถทำได้ โดยทั่วไปการกระโดดเปลี่ยนความถี่จะใช้สัญญาณไซน์ในการมอดูเลตเพื่อให้ข้อมูลเปลี่ยนความถี่ไปสามารถเกิดการแทรกสอดจากสัญญาณแถบแคบได้ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบไม่ดีนัก

สัญญาณเวฟเล็ดมีคุณสมบัติที่น่าสนใจและได้มีการค้นคว้าและวิจัยอย่างต่อเนื่องแต่โดยส่วนใหญ่มักจะพัฒนาไปในรูปแบบของการวิเคราะห์สัญญาณรูปภาพ และมีคุณสมบัติที่น่าสนใจ เช่นความเป็นเชิงตั้งฉากกับสัญญาณที่เกิดจากการเลื่อนและการสเกล วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเอาเทคนิคที่เรียกว่าการแปลงเวฟเล็ด เข้ามาใช้ในการมอดูเลตสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบฟรีควอนซ์ฮอปปีงซีดีเอ็มเอ โดยใช้วิธีการในการแปลงเวฟเล็ดแบบไม่ต่อเนื่องจะต้องอาศัยหลักการของฟิลเตอร์แบงก์ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ดในแต่ละสเกล ซึ่งโครงสร้างของฟิลเตอร์แบงก์มีทั้งในรูปแบบโครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตร และแบบโครงสร้างต้นไม้แบบไม่สมมาตร รูปแบบของสัญญาณที่ได้จากโครงสร้างต้นไม้มีความเป็นเชิงตั้งฉากกันมีความเหมาะสมในการนำไปมอดูเลตสัญญาณ เพื่อให้ข้อมูลมีการก้าวกระโดดไปด้วยสัญญาณเวฟเล็ดในแต่ละสเกล

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาการทำงานของระบบการสื่อสารแบบเข้าถึงหลายทาง เทคนิคในการแผ่ขยายย่านความถี่ของสัญญาณหรือการสเปกตรัมเพื่อป้องกันการรบกวนของสัญญาณแถบแคบของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.2 ศึกษาเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบฟรีควอนซีธ้อปปีงสเปกตรัม การพิจารณาประสิทธิภาพของระบบด้านค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลของระบบ ในกรณีที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่ซึ่งตั้งฉากกันซึ่งจะไม่มีการใช้ความถี่ซ้ำกันในช่วงเวลาการส่งบิตข้อมูลเดียวกันของผู้ใช้ทุกคน รวมทั้งในกรณีที่มีการใช้ความถี่ซ้ำกันในช่วงเวลาการส่งบิตข้อมูลเดียวกันของผู้ใช้แต่ละคนด้วย

1.2.3 ศึกษาคุณสมบัติของเวฟเล็ต กระบวนการการแปลงเวฟเล็ต และการนำเวฟเล็ตมาปรับปรุงใช้งานกับระบบการสื่อสารแบบสเปกตรัมรวมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่ได้กับระบบแบบเดิมที่มีการใช้กันโดยทั่วไป

1.2.4 ศึกษาการทำงานของช่องสัญญาณการจางหายแบบต่างๆ อันประกอบด้วย ช่องสัญญาณการจางหายแบบเรย์ลี ช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซียน ช่องสัญญาณการจางหายแบบนาคามิ พิจารณาค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลเมื่อทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบต่างๆ

1.2.5 ศึกษาการจำลองแบบการทำงานของระบบฟรีควอนซีธ้อปปีงที่ใช้เวฟเล็ตในการมอดูเลตสัญญาณ แบบจำลองการทำงานของช่องสัญญาณการจางหายแบบต่างๆ การหาค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลของระบบ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1.3.1 เวฟเล็ตมีคุณสมบัติเชิงตั้งฉากกับสัญญาณที่เกิดจากการเลื่อนและการสเกลของตัวมันเอง ซึ่งมีความน่าสนใจในการนำมาพัฒนาใช้กับการมอดูเลตแบบฟรีควอนซีธ้อปปีงสเปกตรัมซึ่งบิตข้อมูลจะมีการกระโดดเปลี่ยนความถี่ไปตามรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่ที่ระบบกำหนด และในแต่ละความถี่ที่กระโดดไป ถ้าบิตข้อมูลมีความเป็นเชิงตั้งฉากกันจะทำให้ประสิทธิภาพในการตีเทคข้อมูลที่ทางด้านรับดีขึ้น

1.3.2 เวฟเล็ตที่มีโครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตรจะให้สัญญาณที่มีความเป็นเชิงตั้งฉากกัน มีช่วงเวลาของสัญญาณที่ได้เท่ากันทุกตัวและมีค่าแผ่ขยายออกไปทั้งในทางเวลาและทางความถี่ นำจะสามารถต้านทานการรบกวนจากสัญญาณแทรกสอดแถบแคบได้ดี สัญญาณที่ทางด้านรับที่ซึ่งโครโนสกับรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนที่ทางด้านส่งประสิทธิภาพของระบบควรจะดีขึ้น เวฟเล็ตที่มีโครงสร้างต้นไม้แบบไม่สมมาตร สัญญาณที่ได้มีค่าช่วงเวลาในแต่ละสเกลไม่เท่ากันต้องมีการเลื่อนเพื่อให้มีค่าเท่ากับช่วงเวลาของบิตที่ข้อมูลที่จะส่ง หากมีการใช้ความถี่ซ้ำกันระหว่างผู้ใช้แต่ละคนจะทำให้ยากต่อการตีเทคสัญญาณที่ทางด้านรับ ดังนั้นเมื่อผู้ใช้แต่ละคนใช้รูปแบบการกระโดด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระโดดเปลี่ยนความถี่ที่มีค่าความถี่ซ้ำกันในช่วงเวลาของการส่งเดียวกันประสิทธิภาพของระบบที่ใช้เวฟเล็ดโครงสร้างต้นไม้แบบไม่สมมาตรจะมีค่าลดลงได้

1.3.3 เมื่อส่งบิตข้อมูลผ่านช่องสัญญาณการจางหายในแบบเรย์ลี แบบไรเซียน และแบบนาคากามิ อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่ได้ควรจะมีค่ามากขึ้นเนื่องจากผลจากการจางหายของสัญญาณที่เกิดขึ้น ในช่องสัญญาณแบบไรเซียนเมื่อค่าแอมพลิจูดการลดทอนของสัญญาณในแนวสายตามีค่าเพิ่มขึ้นควรจะมีประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น และในช่องสัญญาณแบบนาคากามิเมื่อตัวแปรการจางหาย (m) มีค่าเป็น 0.5 จะเกิดการจางหายที่รุนแรงที่สุดค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่ได้ควรจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ศึกษาคุณสมบัติของเวฟเล็ดการแปลงเวฟเล็ดแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระบวนการของฟิลเตอร์แบงก์ ซึ่งมีทั้งแบบโครงสร้างต้นไม้สมมาตรและไม่สมมาตร พิจารณา รูปแบบของสัญญาณที่ได้ทั้งคุณสมบัติทางเวลาและความถี่

1.4.2 ทำการจำลองแบบการทำงานของระบบฟรีควอนซ์ฮอปปีงซีดีเอ็มเอทีที่ใช้เวฟเล็ดในการมอดูเลต หากค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล มาทำกราฟเปรียบเทียบกับการมอดูเลตด้วย ไซน์ ซึ่งจะทำการศึกษาในสองกรณีได้แก่ กรณีที่ผู้ใช้ทุกคนมีรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่ต่างกันหรือไม่มีการส่งที่ความถี่ซ้ำกันในช่วงเวลาเดียวกัน และในกรณีที่ผู้ใช้ทุกคนมีรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่มคือ ผู้ใช้แต่ละคนอาจจะส่งบิตข้อมูลที่มีความถี่ซ้ำกันในช่วงเวลาเดียวกันได้

1.4.3 ทำการจำลองแบบช่องสัญญาณการจางหายแบบเรย์ลี ไรเซียน และนาคากามิ หากค่าอัตราความผิดพลาดที่ได้จากการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณการจางหายที่จำลองแบบขึ้น

1.4.4 สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบด้านค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลของระบบการใช้เวฟเล็ดในระบบฟรีควอนซ์ฮอปปีงซีดีเอ็มเอ

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

1.5.1 เริ่มจากการศึกษาหลักการการทำงานและเทคนิคการมอดูเลตของระบบฟรีควอนซ์ฮอปปีงซีดีเอ็มเอ โดยที่เนื้อหาส่วนนี้จะอยู่ในบทที่ 2

1.5.2 ศึกษาคุณสมบัติของเว็บไซต์ที่ได้มีการพัฒนามาใช้ในระบบการสื่อสาร กระบวนการฟิลเตอร์เบงค์กับกระบวนการแปลงเว็บไซต์แบบไม่ต่อเนื่อง คุณสมบัติของสัญญาณที่ได้จากเว็บไซต์ที่มีโครงสร้างต้นไม้ทั้งแบบไม่สมมาตรและสมมาตร ซึ่งเนื้อหาส่วนนี้จะอยู่ในบทที่ 3

1.5.3 ทำการจำลองแบบการทำงานของระบบที่ผู้ใช้แต่ละคนมีรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบตั้งฉากกัน ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก เปรียบเทียบการใช้เว็บไซต์โครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตร เว็บไซต์โครงสร้างต้นไม้แบบไม่สมมาตร กับรูปแบบการมอดูเลตแบบเดิมที่ใช้สัญญาณไซน์ ทำการเพิ่มสัญญาณการแทรกสอดแถบแคบเข้าไปในระบบ หาค่าอัตราความผิดพลาดของบิตที่เกิดขึ้น ทำกราฟเปรียบเทียบค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่ค่าพลังงานของบิตข้อมูลต่อสัญญาณรบกวนค่าต่างๆ ของระบบที่ใช้การมอดูเลตในทั้งสามกรณี ซึ่งผลที่ได้จะอยู่ในหัวข้อที่ 5.2.1 ในบทที่ 5

1.5.4 ขั้นตอนต่อมาทำการจำลองแบบช่องสัญญาณการจางหายแบบเรย์ลี ไรเซียน และแบบนาคาгами ทำการหาอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่ได้ของระบบที่ทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบต่างๆ ทำกราฟเปรียบเทียบค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่ค่าพลังงานของบิตข้อมูลต่อสัญญาณรบกวนค่าต่างๆ ซึ่งผลที่ได้จะอยู่ในหัวข้อที่ 5.2.1 ในบทที่ 5

1.5.5 จำลองแบบการทำงานของระบบที่ผู้ใช้แต่ละคนมีรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่ม โดยทำการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่มีการรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก และมีการเพิ่มสัญญาณการแทรกสอดลงไป แล้วส่งผ่านช่องสัญญาณแบบเรย์ลี ไรเซียน และแบบนาคาгами ทำการหาอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่ได้ของระบบที่ทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบต่างๆ ทำกราฟเปรียบเทียบค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่ค่าพลังงานของบิตข้อมูลต่อสัญญาณรบกวนค่าต่างๆ ซึ่งผลที่ได้จะอยู่ในหัวข้อที่ 5.2.2 ในบทที่ 5

1.5.6 สรุปและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองแบบการทำงานของระบบ ซึ่งจะอยู่ในบทที่ 6 และ โปรแกรมที่ใช้จำลองแบบการทำงานของระบบทั้งหมดจะอยู่ในส่วนของภาคผนวก

บทที่ 2

หลักการของระบบซีดีเอ็มเอ

2.1 บทนำ

การเข้าถึงหลายทางแบบซีดีเอ็มเอนั้น การเข้าถึงสามารถทำได้โดยการเข้ารหัสซึ่งผู้ใช้แต่ละคนจะถูกกำหนดด้วยรหัสที่แตกต่างกัน โดยเครื่องรับที่รู้รหัสของผู้ใช้เท่านั้นที่สามารถทำการถอดรหัสและกู้คืนข้อมูลเดิมออกมาได้ เนื่องจากแบนด์วิธของสัญญาณรหัสนั้นจะเลือกให้มีค่ามากกว่าแบนด์วิธของสัญญาณข้อมูลทำให้สัญญาณที่ส่งออกไปเกิดการแผ่กว้างของสเปกตรัม จึงเรียกกระบวนการนี้ว่าการมอดูเลตแบบสเปกตรัม และเรียกสัญญาณที่ถูกเข้ารหัสว่า สัญญาณสเปกตรัม และมักจะเรียกการเข้าถึงแบบซีดีเอ็มเอว่าการเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัม

การมอดูเลตแบบสเปกตรัมนั้นได้มีการเริ่มใช้งานในระบบเรดาร์ทางการทหารเพราะสามารถป้องกันการส่งสัญญาณรบกวนและมีความน่าจะเป็นที่จะถูกดักจับต่ำ และได้มีการนำมาพัฒนาใช้ในระบบการสื่อสารทั่วไปเมื่อหลายสิบปีที่ผ่านมา

การมอดูเลตแบบสเปกตรัมจะทำการเข้ารหัสข้อมูลด้วยรหัสที่มีความเป็นอิสระจากข้อมูลเดิมและมีความกว้างของสเปกตรัมมากกว่าสัญญาณข้อมูล ซึ่งเป็นผลให้กำลังงานของข้อมูลมีการแผ่กระจายออกไปครอบคลุมตลอดย่านความถี่ของการสเปกตรัม ค่าความหนาแน่นของกำลังงานของสัญญาณสเปกตรัม (Power density) จึงลดลง อัตราส่วนระหว่างแบนด์วิธของสัญญาณสเปกตรัมและแบนด์วิธของข้อมูล เรียกว่า อัตราขยายการประมวลผล (Processing Gain: Gp) ของระบบ ซึ่งมีค่าเป็นดังสมการ

$$G_p = \frac{B_t}{B_i} \quad (2.1)$$

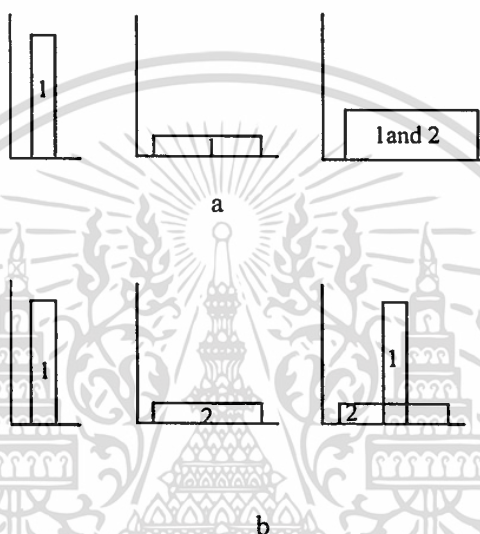
เมื่อ B_t เป็นแบนด์วิธของการสัญญาณที่ส่งออกไป และ B_i เป็นแบนด์วิธของข้อมูล

เครื่องรับจะทำการสหสัมพันธ์สัญญาณที่รับได้กับรหัสที่เหมือนกับทางด้านส่งซึ่งมีความซิงโครไนซ์กัน ทำให้ได้ข้อมูลเดิมกลับคืนมา เนื่องจากการเข้ารหัสทำให้แบนด์วิธของข้อมูลมีขนาดกว้างขึ้น ดังนั้นสัญญาณสเปกตรัมจึงมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากสัญญาณแถบแคบ (Narrowband) ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของการใช้เทคนิคสเปกตรัมมีดังนี้

1. ความสามารถในการเข้าถึงหลายทาง (Multiple Access Capability)

เมื่อผู้ใช้หลายคนส่งสัญญาณในเวลาเดียวกัน เครื่องรับจะแยกความแตกต่างได้โดยการให้ผู้ใช้แต่ละคนใช้รหัสที่มีค่าสหสัมพันธ์ข้าม (cross correlation) ระหว่างผู้ใช้ที่ต้องการคิเทียบกับผู้ใช้อื่นมีค่าต่ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการสหสัมพันธ์สัญญาณที่รับได้กับรหัสของผู้ใช้ที่เราต้องการตีเทค ก็จะเป็นการตีสเปรดสัญญาณของผู้ใช้ที่เราต้องการเท่านั้น ในขณะที่สัญญาณสเปรดสเปกตรัมของผู้ใช้อื่นๆจะยังคงมีลักษณะเหมือนเดิม ดังนั้นกำลังงานของสัญญาณข้อมูลที่เราต้องการตีเทคจะมีค่ามากกว่าสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อื่นหลายๆ ดังนั้นจึงสามารถทำการตีเทคสัญญาณที่ต้องการออกมาได้ หลักการระบบนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 รูป 2.1a แสดงการสร้างสัญญาณสเปรดสเปกตรัมของผู้ใช้สองคนจากข้อมูลเดิมที่มีลักษณะเป็นสัญญาณแถบแคบ รูป 2.1b แสดงการส่งสัญญาณสเปรดสเปกตรัมของผู้ใช้ทั้งสองในเวลาเดียวกัน โดยที่เครื่องรับจะมีเพียงสัญญาณของผู้ใช้คนที่ 1 เท่านั้นที่ถูกตีสเปรดและกู้คืนสัญญาณกลับมา



รูปที่ 2.1 รูปแบบการส่งสัญญาณในระบบสเปรดสเปกตรัม

2. การป้องกันการแทรกสอดแบบหลายเส้นทาง

สำหรับการส่งสัญญาณนั้น เส้นทางเดินของสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับไม่ได้มีเพียงเส้นทางเดียว การสะท้อนและการหักเหทำให้สัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับมาจากหลายเส้นทาง แต่เป็นสัญญาณที่ส่งออกจากเครื่องส่งเดียวกันแต่มีเฟสและแอมพลิจูดต่างกัน การรวมสัญญาณเหล่านี้เข้าด้วยกันที่เครื่องรับนั้นอาจจะเป็นการรวมแบบเสริมกันที่บางความถี่และหักล้างกันที่ความถี่อื่นๆ ในทางเวลาจะทำให้สัญญาณเกิดการกระจายออก (Dispersed signal) ซึ่งการมอดูเลตแบบสเปรดสเปกตรัมสามารถแก้ปัญหานี้ได้ แต่ก็ขึ้นกับชนิดของการมอดูเลตที่ใช้

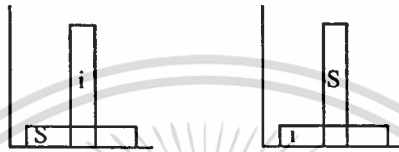
3. ความเป็นส่วนตัว (Privacy)

สัญญาณที่ถูกส่งออกไปสามารถตีสเปรดและกู้คืนสัญญาณเดิมมาได้เมื่อเครื่องรับรู้รหัสของผู้ใช้หรือซิงโครไนซ์กับเครื่องส่งเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การกำจัดสัญญาณแทรกสอด (Interference rejection)

การทำสหสัมพันธ์ข้าม(Cross correlation) สัญญาณรหัสด้วยสัญญาณแถบแคบทำให้กำลังงานของสัญญาณแบนแคบนั้นถูกแผ่ออกไป จึงเป็นการลดกำลังงานของสัญญาณแทรกสอดที่อยู่ในแบนวิธของสัญญาณข้อมูลลง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 สัญญาณสเปกตรัม (S) ถูกรบกวนจากสัญญาณแทรกสอดแถบแคบ (I) ที่เครื่องรับสัญญาณ S จะถูกตีสเปกตรัมที่เครื่องรับ ในขณะที่สัญญาณแทรกสอด (I) จะถูกสเปกตรัมออกไปที่เครื่องรับ ทำให้สัญญาณแทรกสอดดังกล่าวปรากฏเป็นสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background Noise)



รูปที่ 2.2 การลดกำลังของสัญญาณแทรกสอดแถบแคบในระบบการสเปกตรัม

5. ความสามารถในการป้องกันการรบกวนจากผู้อื่น

คุณสมบัตินี้คล้ายกับการกำจัดสัญญาณแทรกสอด แต่สัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในกรณีนี้เกิดขึ้นแบบเจตนาให้เกิดจากผู้อื่น

6. ความน่าจะเป็นในการถูกดักจับสัญญาณมีค่าต่ำ (Low Probability of Intercept:LPI)

เนื่องจากสัญญาณสเปกตรัมมีความหนาแน่นของกำลังงานต่ำ จึงทำให้ยากต่อการที่จะถูกดักจับสัญญาณจากผู้อื่น

2.2 การมอดูเลตแบบสเปกตรัม

การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมหากแบ่งตามวิธีการมอดูเลตจะได้เป็น

1. การจัดลำดับแบบตรง(Direct-Sequence)
2. การกระโดดของความถี่ (Frequency Hopping)
3. การกระโดดของเวลา(Time Hopping)
4. แบบผสม(Hybrid)

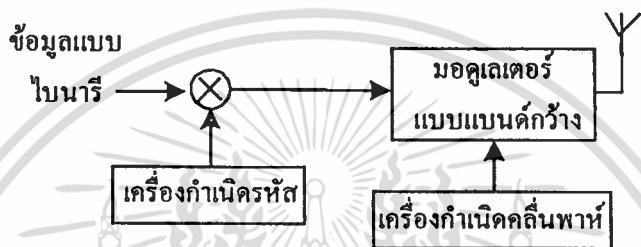
โดยแต่ละวิธีการมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมโดยการจัดลำดับแบบตรง (DS-SS)

สัญญาณข้อมูลที่ผ่านการมอดูเลตกับสัญญาณคลื่นพาห้มาแล้วจะถูกมอดูเลต โดยตรงกับรหัสที่เป็นแบบดิจิทัล โดยที่สัญญาณข้อมูลนั้นอาจจะเป็นได้ทั้งอนาล็อกและดิจิทัลแต่โดยส่วนใหญ่จะเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบดิจิทัล ซึ่งในกรณีที่มันเป็นแบบดิจิทัลมักจะทำการคูณสัญญาณดิจิทัลนั้นกับรหัสโดยตรง แล้วจึงนำสัญญาณที่ได้ไปมอดูเลตกับคลื่นพาห์แบนกว้าง จึงเรียกว่า การเข้าถึงหลายทางแบบแยกความแตกต่างทางรหัสโดยใช้วิธีการจัดลำดับแบบตรงโคเร็คทีแคว้นซีดีเอ็มเอ

บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งแบบตรงโคเร็คทีแคว้นซีดีเอ็มเอแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 เมื่อข้อมูลไบนารีถูกมอดูเลตกับคลื่นพาห์แล้ว จะถูกนำไปมอดูเลตกับรหัสซึ่งรหัสนี้ประกอบด้วยบิตต่างๆ ที่เรียกว่า ชิพ(chip) อาจจะมีค่าเป็น +1 หรือ -1 เพื่อให้สัญญาณเกิดการสเปรดสเปกตรัม อัตราเร็วชิพ (Chip rate) จะต้องมีค่าสูงกว่าอัตราเร็วของบิตข้อมูลมากๆ สำหรับวิธีการมอดูเลตรหัสสามารถใช้ได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันคือ การมอดูเลตแบบ PSK เช่น BPSK , QPSK หรือ MSK



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของเครื่องส่งของระบบแบบโคเร็คทีแคว้นซีดีเอ็มเอ

อัตราการขยายการประมวลผล จะมีค่าเท่ากับอัตราเร็วของชิพต่ออัตราเร็วของข้อมูล ซึ่งในทางปฏิบัติจะมีค่าเป็น 10^2 ถึง 10^3

เครื่องรับแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ใช้การมอดูเลตแบบร่วมนัย (Coherence) กระบวนการดีสเปรดจะทำให้สำเร็จนั้นไม่เพียงแต่เครื่องรับจะต้องรู้ลำดับรหัสที่ใช้ในการสเปรดสัญญาณในทางด้านส่งเท่านั้น แต่ยังต้องทำให้รหัสทางด้านรับมีความซิงโครไนซ์กับทางด้านส่งด้วย ซึ่งการซิงโครไนซ์จะต้องเริ่มตั้งแต่การรับสัญญาณ ไปจนกระทั่งรับสัญญาณมาได้ทั้งหมด



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของเครื่องรับของระบบแบบโคเร็คทีแคว้นซีดีเอ็มเอ

**SIMULATION OF WAVELET-BASED FREQUENCY HOPPED
CDMA SYSTEM OVER FADING CHANNELS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATION ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2004

ISBN 974-324-991-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยคำปรึกษาจาก รศ.ดร. สุวิพล ลิทธิชีวะภาค ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณเพื่อนานักศึกษาทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ พร้อมทั้งช่วยตรวจเทียบและแก้ไขที่ผิดพลาดจนสำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้นและทำให้การเรียนที่สถาบันแห่งนี้ไม่เจียบเหงา

ขอขอบพระคุณ พ่อ แม่และพี่ไก่อที่เอาใจใส่ ให้กำลังใจ สนับสนุนในด้านการศึกษา และทุกเรื่องมาตลอด สุดท้ายขอขอบคุณตัวเองที่ไม่ท้อแท้และให้กำลังใจตัวเองจนสามารถทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จได้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอบอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วรรณภา ภูนิลามัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติการเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมโดยการจัดลำดับแบบ ไคเร็กซ์เควินซีดีเอ็มเอ

1. ความสามารถในการเข้าถึงหลายทาง

ถ้ามีผู้ใช้หลายคนส่งสัญญาณในเวลาเดียวกันจะทำให้มีสัญญาณสเปกตรัมหลายสัญญาณที่มีความทับซ้อนกัน(overlap) ในทางเวลาและความถี่ ที่เครื่องรับจะใช้การคิมอดูเลตแบบร่วมนัยเพื่อกำจัดผลของการมอดูเลตและรหัสออกไป กระบวนการดังกล่าวเป็นการรวมกำลังงานของผู้ใช้ที่ต้องการตีเทคให้อยู่ในช่วงแบนวิคท์ของข้อมูล ถ้าค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างรหัสของผู้ใช้ที่ต้องการและรหัสของผู้ใช้อื่นมีค่าน้อย การตีเทคแบบร่วมนัยจะทำให้มีค่ากำลังงานของสัญญาณแทรกสอดในแบนวิคท์นั้นมีค่าน้อยเท่านั้น

2. การป้องกันการแทรกสอดแบบหลายเส้นทาง

ถ้าลำดับรหัสมีฟังก์ชันสหสัมพันธ์ตามอุดมคติแล้ว ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ที่อยู่ภายนอกช่วง $[-T_c, T_c]$ มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อ T_c เป็นคาบเวลาของชิพ แสดงว่าถ้าทำการรับสัญญาณที่ต้องการซึ่งถูกหน่วงเวลาไปมากกว่า $2T_c$ และใช้การคิมอดูเลตแบบร่วมนัยจะทำให้สัญญาณที่ถูกหน่วงไปถูกมองว่าเป็นสัญญาณแทรกสอด และมีค่ากำลังงานของสัญญาณแทรกสอดนี้อยู่ในช่วงแบนวิคท์ของข้อมูลเพียงเล็กน้อย

3. การกำจัดสัญญาณแทรกสอดแถบแคบ

การตีเทคแบบร่วมนัยที่เครื่องรับทำได้โดยการคูณสัญญาณที่รับได้กับรหัสที่ถูกสร้างขึ้นที่ทางด้านรับ ซึ่งจะเหมือนกับการคูณสัญญาณแถบแคบด้วยลำดับของรหัสแบนกว้างที่เครื่องส่ง ทำให้สเปกตรัมของสัญญาณแบนด์แคบมีการแผ่สเปกตรัมกว้างออกไป กำลังงานของสัญญาณแถบแคบซึ่งอยู่ในช่วงแบนวิคท์ของสัญญาณข้อมูลมีค่าลดลงด้วยอัตราเท่ากับอัตราขยายการประมวลผล

4. ความน่าจะเป็นในการถูกตัดจิบสัญญาณมีค่าต่ำ

เนื่องจากสัญญาณแบบ ไคเร็กซ์เควินซีดีเอ็มเอจะใช้แบนวิคท์ของสัญญาณทั้งหมดตลอดเวลา ทำให้มีกำลังส่งต่อความถี่มีค่าต่ำมาก จึงเป็นการยากที่จะทำการตีเทคสัญญาณนี้ นอกจากคุณสมบัติข้างต้นแล้วระบบไคเร็กซ์เควินซีดีเอ็มเอ ยังมีคุณสมบัติเฉพาะอื่นๆ อีก ซึ่งสามารถแยกเป็นทั้งข้อดีและข้อเสียได้ดังนี้

ข้อดีของระบบไคเร็กซ์เควินซีดีเอ็มเอ

1. การเข้ารหัสสัญญาณสามารถทำได้ง่ายโดยใช้กระบวนการคูณแบบธรรมดา
2. วงจรสังเคราะห์ความถี่ทำได้ง่าย เนื่องจากใช้คลื่นพาห้เพียงความถี่เดียว
3. การคิมอดูเลตสัญญาณแบบสเปกตรัมใช้แบบร่วมนัยได้
4. ไม่จำเป็นต้องมีการซิงโครไนซ์ระหว่างผู้ใช้แต่ละคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสียของระบบโคเร็กซ์เควันซีดีเอ็มเอ

1. การชิงโครโนซ์ระหว่างรหัสของสัญญาณที่รับได้กับสัญญาณรหัสที่สร้างขึ้นทางด้านรับทำได้ยาก และการชิงโครโนซ์นี้จะต้องเกิดขึ้นภายในช่วงคาบเวลาของชีพ
2. การที่รหัสที่สร้างขึ้นต้องชิงโครโนซ์กันในช่วงคาบเวลาของชีพทำให้ขนาดของแบนวิทถูกจำกัดในช่วง 10–20 เมกกะเฮิร์ต
3. กำลังงานของสัญญาณจากผู้ใช้ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานจะมีค่ามากกว่ากำลังงานของสัญญาณจากผู้ใช้ที่อยู่ไกลออกไปมาก เนื่องจากผู้ใช้แต่ละคนจะส่งสัญญาณโดยใช้แบนวิทที่มีทั้งหมด ดังนั้นผู้ใช้ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานจะทำให้ค่าการแทรกสอดต่อผู้ใช้ที่อยู่ไกลมีค่ามาก ทำให้ไม่สามารถทำการรับสัญญาณจากผู้ใช้ที่ไกลจากสถานีฐานได้ ผลกระทบที่เกิดคืออิทธิพลของความใกล้-ไกลของสัญญาณ (Near-far Effect) นี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้อำนาจควบคุมกำลังงาน (Power Control) จะทำให้สถานีฐานรับสัญญาณจากผู้ใช้ทุกคนด้วยกำลังงานเฉลี่ยเท่ากัน ในทางปฏิบัติกระบวนการควบคุมกำลังงานสามารถทำได้ยาก

2.2.2 ระบบสเปกตรัมแพร่กระจายแบบการกระโดดของความถี่ (Frequency Hopping Spread spectrum)

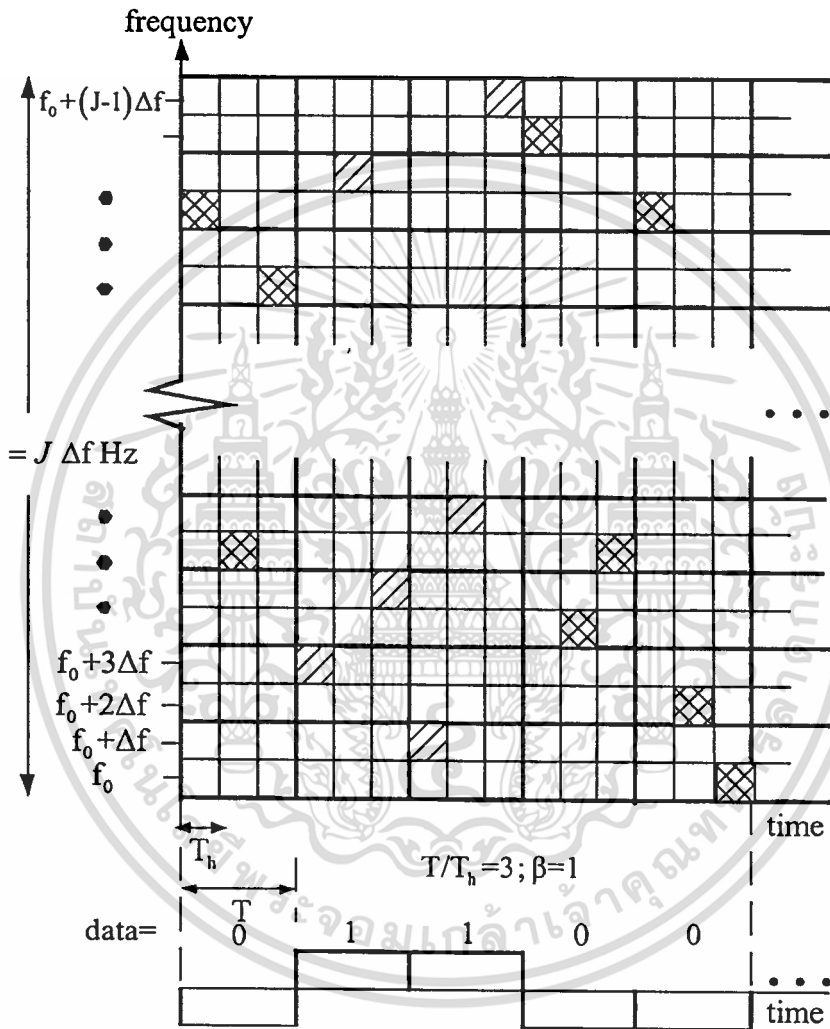
ระบบแบบสเปกตรัมแพร่กระจายอีกประเภทหนึ่ง คือ ระบบฟรีควอนซ์ฮอปป์ิงสเปกตรัมแพร่กระจาย แนวคิดคือ การเปลี่ยนความถี่ของคลื่นพาห่ตามเซตของความถี่ที่มี โดยรูปแบบการเปลี่ยนความถี่จะเปลี่ยนตามค่าของลำดับพีเอ็น (PN-sequence) รูปแบบของลำดับพีเอ็นที่ใช้ในระบบนี้ ไม่จำเป็นต้องมีอยู่ในรูป $+1, -1$ เหมือนกับระบบโคเร็กซ์เควัน แต่จะมาเป็นลักษณะที่เป็นตัวกำหนด รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่ของคลื่นพาห่ของสัญญาณ อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ (Hop rate) หรืออัตราการฮอปป์ จะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าอัตราเร็วของข้อมูลก็ได้ ถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่มีค่ามากกว่าอัตราเร็วของข้อมูลจะเรียกว่าการเปลี่ยนแปลงความถี่แบบเร็ว (fast hopping) และในทางกลับกันเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่มีค่ามากกว่าอัตราเร็วของข้อมูลจะเรียกว่าการเปลี่ยนแปลงความถี่แบบช้า (slow hopping)

เราจะให้ T_h แทนคาบเวลาของการฮอปป์และใช้ T แทนคาบเวลาของบิตข้อมูลในระบบ ระบบฟรีควอนซ์ฮอปป์ิงสเปกตรัมแพร่กระจาย โดยจะใช้อำนาจมอดูเลตแบบ เอฟเอสเค ซึ่งในระบบที่มีการเปลี่ยนค่าความถี่ของคลื่นพาห่อย่างรวดเร็ว ในทางปฏิบัตินั้นจะใช้อำนาจมอดูเลตแบบไม่ร่วมนัยจะอธิบายถึงระบบแบบไม่ร่วมนัย ที่มีการมอดูเลตแบบ เอฟเอสเค

2.2.2.1 ระบบฟรีควอนซ์ฮอปป์ิงสเปกตรัมแพร่กระจายที่มีการเปลี่ยนความถี่แบบเร็ว (Fast Frequency Hopping)

ระบบนี้จะมีค่า $T/T_h \geq 1$ ดังนั้นค่าต่ำที่สุดที่จะเป็นไปได้คือมีการฮอปป์ 1 ครั้งต่อ 1 บิตข้อมูล โดยช่วงเวลาของการฮอปป์ T_h วินาที ค่าความถี่หนึ่งใน J ความถี่ได้แก่ $\{ f_0, f_0 + \Delta f, \dots, f_0 + (J-1)\Delta f \}$ จะ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับเป็นเอกสารเชิงพาณิชย์
 ไม่ว่าจะตีพิมพ์ที่ไหน อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกส่งออกไป แผนภาพที่แสดงความถี่ของระบบพรีแควนซ์ช็อบปีงส์แปรคสเปกตรัมที่มีการเปลี่ยนความถี่แบบเร็วที่มีการมอดูเลตแบบ เอฟเอสเค แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 โดยแกนตั้งแสดงถึงช่วงความถี่ แกนนอนเป็นแกนของเวลา เป็นลายขวางเมื่อข้อมูลเป็น 1 หรือเป็นจุดเมื่อข้อมูลเป็น 0 ซึ่งจะเห็นว่าความถี่จะมีการเปลี่ยนแปลงทุกๆ T_h วินาทีและความถี่จะถูกแบ่งออกเป็นช่วงย่อยๆ มีค่าช่วงละ Δf ซึ่งในรูปมีค่า $T=3T_h$ อัตราการช็อบเป็น 3 เท่าของอัตราเร็วของข้อมูล สัญญาณที่ถูกส่งออกไปในแต่ละความถี่จะมีค่าแบนวิดท์ประมาณได้เป็น $2/T_h$ เฮิรท์



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงความถี่ของระบบพรีแควนซ์ช็อบปีงส์แปรคสเปกตรัมที่มีการเปลี่ยนความถี่แบบเร็วที่มีการมอดูเลตแบบ เอฟเอสเค

ค่าของ Δf จะเลือกให้มีค่าเท่ากับเป็น $1/T_h$ โดยเหตุผลที่เลือกเพราะจะทำให้สัญญาณมีความเป็นเชิงตั้งฉากกัน(Orthogonal) ในแต่ละช่วงเวลการช็อบ สัญญาณในแต่ละช็อบจะมีค่าสหสัมพันธ์เข้าเป็นศูนย์เมื่อ $\Delta f = m/T_h$ โดยที่ m เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เท่ากับ 0 ดังนั้นค่าต่ำสุดที่ Δf จะเป็นได้คือ

$1/T_h$ แสดงได้ดังสมการ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_0^{T_h} \cos(2\pi(f_0 + i\Delta f)t + \theta_i) \cos(2\pi(f_0 + k\Delta f)t + \theta_k) dt = 0 \quad \text{เมื่อ } i \neq k \quad (2.2)$$

ในระบบแบบที่ใช้การคิมอดูเลตแบบไม่ร่วมนัย การใช้เซตของสัญญาณที่มีความเป็นเชิงตั้งฉากกันจะทำให้ค่าสมรรถนะของระบบที่ดี

2.2.2.1.1 เครื่องส่งของระบบฟรีคววนซ์อ้อมปีงสปรดสเปกตรัม

บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งแสดงได้ดังรูป 2.6 (a) เมื่อสัญญาณ $b(t)$ ส่งเข้ามาจะมีการเข้ารหัสมอดูเลตแบบ เอฟเอสเค ได้เอาท์พุตเป็น $I(t)$ ซึ่งมีความถี่ที่เป็นไปได้ 2 ความถี่ คือ f' เมื่อข้อมูลเป็น 0 และ $f' + \Delta f$ เมื่อข้อมูลเป็น 1 เขียนแทนข้อมูลได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} I(t) &= \cos(2\pi f' t) && \text{เมื่อบิตข้อมูลเป็น 0} \\ &= \cos(2\pi(f' + \Delta f)t) && \text{เมื่อบิตข้อมูลเป็น 1} \end{aligned} \quad (2.3)$$

สัญญาณนี้จะถูกรวมเข้ากับสัญญาณ $y(t)$ ที่ได้มาจากเครื่องส่งเคราะห์ความถี่ซึ่งความถี่ของสัญญาณ $y(t)$ นี้จะเปลี่ยนแปลงทุกๆ T_h วินาที โดยเปลี่ยนแปลงตามค่าของลำดับพีเอ็น J บิตซึ่งจะมีความถี่ที่แตกต่างกันที่สามารถส่งได้ทั้งหมด 2^J ความถี่

สัญญาณ $y(t)$ ที่เอาท์พุตของเครื่องส่งเคราะห์ความถี่ที่อ้อมปีที่ 1 เขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$y(t) = 2A \cos(2\pi(f_g + i\Delta f)t + \theta_i) \quad \text{เมื่อ } IT_h < t < (I+1)T_h \quad (2.4)$$

i มีค่าเป็นหนึ่งในเซตของ $\{0, 2, \dots, 2^J - 1\}$ ซึ่งเป็นจำนวนเต็มคู่ที่กำหนดจาก J บิตของลำดับพีเอ็น f_g เป็นค่าความถี่ที่มีค่าคงที่ และ θ_i เป็นเฟส

สัญญาณ $s(t)$ ที่ได้หลังจากการรวมกับ $y(t)$ กับ $I(t)$ และผ่านวงจรกรองผ่านแถบความถี่แล้วจะได้เอาท์พุตดังสมการ

$$s(t) = A \cos(2\pi(f_0 + i\Delta f + b_i\Delta f)t + \theta_i) \quad \text{เมื่อ } IT_h < t < (I+1)T_h \quad (2.5)$$

b_i มีค่า 0 หรือ 1 และ $f_0 = f' + f_g$ โดยที่ค่าความถี่จะเป็น $f_0 + i\Delta f$ เมื่อบิตเป็น 0 และเป็น $f_0 + i\Delta f + \Delta f$ เมื่อบิตเป็น 1 ความถี่ทั้งหมดที่สามารถเป็นไปได้ในการส่ง คือ $\{f_0, \dots, f_0 + (J-1)\Delta f\}$ โดย $J = 2^{J+1}$ มีทั้งหมด J อ้อมปีงและค่าเฟส θ_i จะมีค่าเปลี่ยนแปลงทุกอ้อมปีงแทนได้ด้วยสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

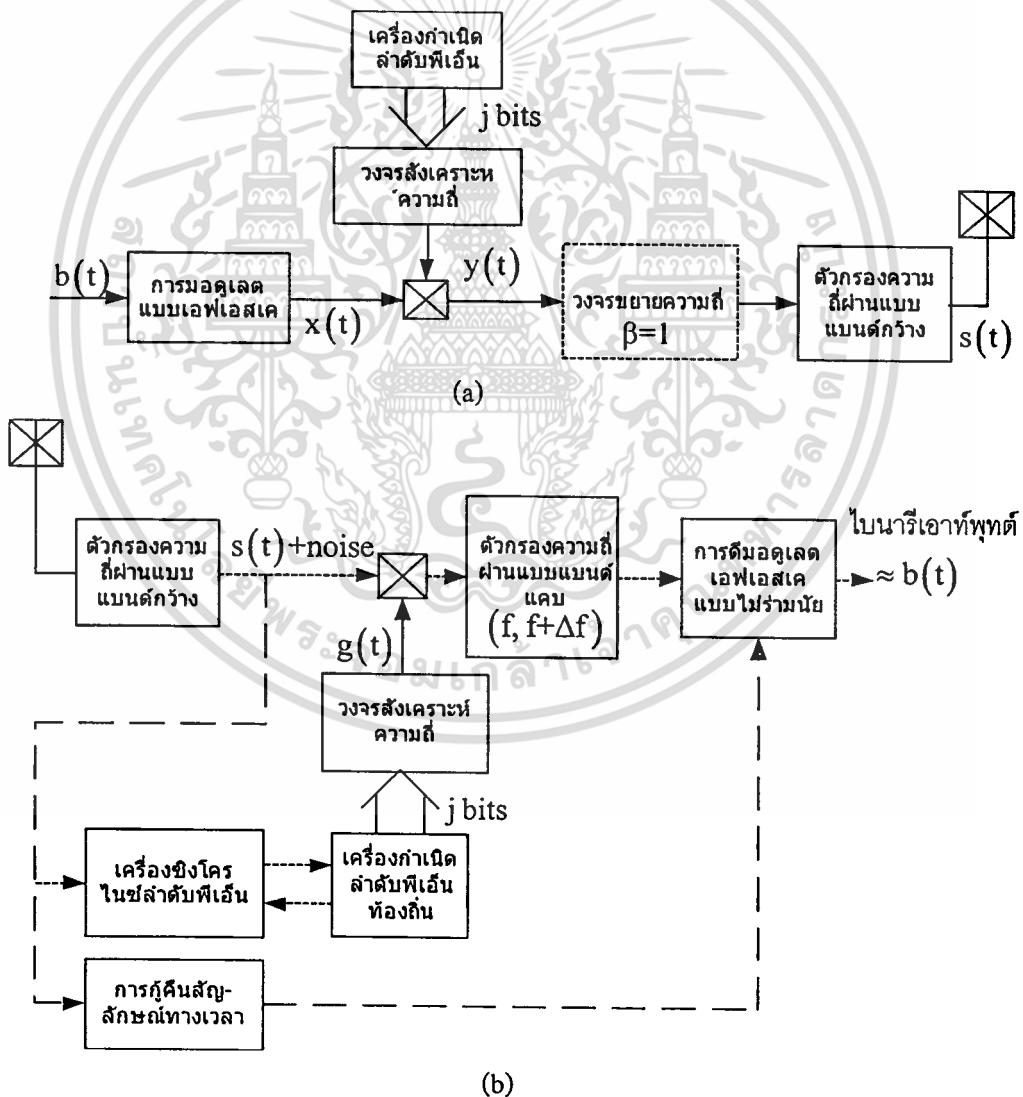
$$s(t) = A \sum_{l=-\alpha}^{\alpha} \cos(2\pi(f_0 + i_l \Delta f + b_l \Delta f)t + \theta_l) p_{T_h}(t - lT_h) \tag{2.6}$$

เมื่อ $p_T(t)$ เป็นพัลส์

เครื่องขยายค่าความถี่ในรูปที่ 2.6(a) ซึ่งใช้ในระบบที่ต้องการขยายเป็นระบบแบบความถี่แบนด์กว้างซึ่งขยายด้วยค่า β ซึ่งจะทำให้การขยายความถี่และเฟสของอินพุต สัญญาณที่ได้จะเป็นดังสมการ

$$s'(t) = A \cos(2\pi\beta(f_0 + i_l \Delta f + b_l \Delta f)t + \beta\theta_l) \quad \text{เมื่อ} \quad lT_h < t < (l+1)T_h \tag{2.7}$$

ผลของ β จะทำให้ Δf เปลี่ยนเป็น $\beta\Delta f$ และความถี่ในแต่ละข้อปเป็น $\beta f_0, \beta(f_0 + \Delta f), \dots$



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบฟรีแควนซีที่ข้อปึงสเปคตัม

(a) เครื่องส่ง และ (b) เครื่องรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.1.2 แบนวิดท์

ความถี่ของสัญญาณในระบบพรีแควนซ์ฮอปปีงสเปกตรัมแบบเร็ว มีค่าคงที่ในระหว่างฮอป สัญญาณทั้งหมดที่ส่งไปในช่วงเวลา J ความถี่ จะมีแบนวิดท์ทั้งหมดเป็น

$$B_{FFH} \approx J\Delta f \text{ เฮิรท์}$$

ในการหาค่าอัตราขยายการประมวลผล โดยที่แบนวิดท์ของข้อมูลมีค่า $1/T$ เฮิรท์ จะได้ค่าเป็นดังสมการ

$$\text{อัตราขยายการประมวลผล} = \frac{\text{แบนวิดท์ของสัญญาณ}}{2 * \text{แบนวิดท์ของบิตข้อมูล}} = \frac{J\Delta f}{2/T} = \frac{JT}{2Th}$$

โดยสมมติว่าความถี่ที่ทำการแบ่งนั้นมีค่าเท่ากับ Δf มีค่าเป็น $1/Th$

ถ้าความถี่มีการขยายออกไปด้วยค่า β ความถี่ของสัญญาณจะถูกขยายออกไป β เท่าโดยแบนวิดท์สุดท้ายของระบบจะมีค่าเป็น $\beta J\Delta f$ เฮิรท์ และค่า อัตราขยายการประมวลผล มีค่าเท่ากับ $\beta J\Delta fT/2 = \beta JT/2Th$

อีกวิธีหนึ่งที่จะหาแบนวิดท์ของสัญญาณในระบบได้คือ การหาการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณ $s(t)$ ในสมการ 2.7 โดยให้ $f_i = f_0 + i\Delta f + b_i\Delta f$ จะได้ค่าการแปลงฟูเรียร์

$$s(f) = \frac{AT_h}{2} \sum_{l=-\alpha}^{\alpha} \{\text{sinc}((f-f_l)T_h)\} e^{j\theta_l - j2\pi(f-f_l)t} \quad (2.8)$$

ในเทอมที่ 1 ค่าของฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม จะมีศูนย์กลางอยู่ที่ $+f_i, -f_i$ มีแบนด์วิดท์จากศูนย์ถึงศูนย์ มีค่าเท่ากับ $2/Th$ มีรูปทรงเป็นแบบฟังก์ชันซิงค์ (Sinc function) ซึ่งแต่ละฮอปมีความถี่ประมาณ $2/Th$ มีศูนย์กลางที่ $+f_i, -f_i$ สัญญาณทั้งหมดจะกระโดดอยู่ครอบคลุมความถี่ J ความถี่ ทำให้ความถี่เหล่านี้ขยายออกไปกว้าง $(J-1)\Delta f$ เฮิรท์ ดังนั้นสมการ (2.8) จะมีความถี่ทั้งหมดเป็น $(J-1)\Delta f + 2/Th$ และเมื่อแทน $\Delta f=1/Th$ จะมีค่าเป็น $(J-1)\Delta f$ และแบนด์วิดท์จะมีค่าประมาณ $J\Delta f$ เมื่อ J มีค่ามากๆ

2.2.2.1.3 เครื่องรับของระบบพรีแควนซ์ฮอปปีงซีดีเอ็มเอ

เครื่องรับแสดงได้ดังรูป 2.6(b) สัญญาณที่เข้ามาจะถูกกรองโดย ตัวกรองแถบความถี่แบบผ่านที่มีค่าความถี่ที่สามารถผ่านได้ครอบคลุมความถี่ของสัญญาณสเปกตรัม เช่น จาก $f_0-0.5\Delta f$ ถึง $f_0 + (J-0.5)\Delta f$ เฮิรท์ ในระบบจะมีบล็อกของการกู้คืนสัญลักษณ์เชิงเวลา (symbol timing recovery) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การซิงโครไนซ์ลำดับพีเอ็น (PN sequence synchronization) โดยที่เครื่องรับจะใช้การคิมอดูเลตแบบไม่ร่วมนัย ซึ่งไม่ต้องการการกู้คืนค่าเฟสของคลื่นพาห์โดยเหตุผลในการใช้ คือ เมื่อมีอัตราการใช้ช่องสัญญาณสูง จะยากในการตรวจจับค่าเฟสของคลื่นพาห์ซึ่งมีการเปลี่ยนค่าไปในทุกๆ ช่วงการซิงโครไนซ์

ในระหว่างการซิงโครไนซ์ที่ 1 เอาท์พุทจากเครื่องสังเคราะห์ความถี่ จะมีค่าเป็น

$$g(t) = \cos(2\pi(f_g + i_f\Delta f)t + \theta'_i) \quad \text{สำหรับ } lT_h < t < (l+1)T_h \quad (2.9)$$

เมื่อไม่คิดค่าของสัญญาณรบกวน อินพุทที่เข้าสู่ ตัวกรองแถบความถี่แบบผ่าน ที่มีค่าเป็น $g(t)$ จะถูกคูณกับ $s(t)$ ดังสมการ

$$g(t)s(t) = \frac{A}{2} [\cos(2\pi(f_g + f_0 + 2i_f\Delta f + b_f\Delta f)t + \theta'_i + \theta_i) + \cos(2\pi(f_0 - f_g + b_f\Delta f)t + \theta_i - \theta'_i)] \quad (2.10)$$

ส่วนของความถี่สูงในสมการจะถูกกรองออกเหลือแค่เทอมที่ 2 ของสมการ เมื่อแทน $f_0 = f_g + f'$ จะได้ อินพุทเข้าไปในกระบวนการคิมอดูเลตแบบ เอฟเอสเค เป็นดังสมการ

$$w(t) = \begin{cases} \frac{A}{2} \cos(2\pi f' t + \theta'_i - \theta'_i) & \text{เมื่อ บิตข้อมูลเป็น 0} \\ \frac{A}{2} \cos(2\pi(f' + \Delta f)t + \theta'_i - \theta'_i) & \text{เมื่อ บิตข้อมูลเป็น 1} \end{cases} \quad (2.11)$$

ซึ่งจะมีค่าอยู่ที่ความถี่ f' หรือ $f' + \Delta f$ ความถี่ใดความถี่หนึ่ง ในระหว่างช่วงคาบเวลาของบิตข้อมูล T วินาที ถ้า b_f มีค่าบิตข้อมูลเดียวกัน สัญญาณ $w(t)$ จะมีความถี่เดียวกัน ตัวคิมอดูเลตแบบ เอฟเอสเค จะทำการดีเทคความถี่ในแต่ละ T วินาที จะได้เอาท์พุทเป็นบิตข้อมูล 0 หรือ 1 และเราสามารถดีเทคความถี่ใน $w(t)$ สำหรับแต่ละซิงโครไนซ์ได้โดยใช้ค่าช่วงคาบของบิต T/T_h วินาที

2.2.2.1.4 ระบบฟรีควีนซ์ซิงโครไนซ์สเปกตรัมที่มีการเปลี่ยนความถี่แบบเร็วที่ทำการมอดูเลตแบบ M-ary เอฟเอสเค (Fast FH with M-ary เอฟเอสเค)

รูปแบบทั่วไปของการเข้ารหัสแบบ เอฟเอสเค คือ M-ary เอฟเอสเค ซึ่งมีการใช้ความถี่ M ความถี่แทนข้อมูล $\log_2(M)$ บิต ในระบบฟรีควีนซ์ซิงโครไนซ์ ความถี่ที่มีการซิงโครไนซ์จะถูกส่งออกไปในหลายความถี่ เมื่อลำดับพีเอ็นถูกสร้างออกมา j บิต และส่งให้เครื่องสังเคราะห์ความถี่ ความถี่ที่เราทำการส่งออกไปก็จะมีทั้งหมดเป็น $2^j M$

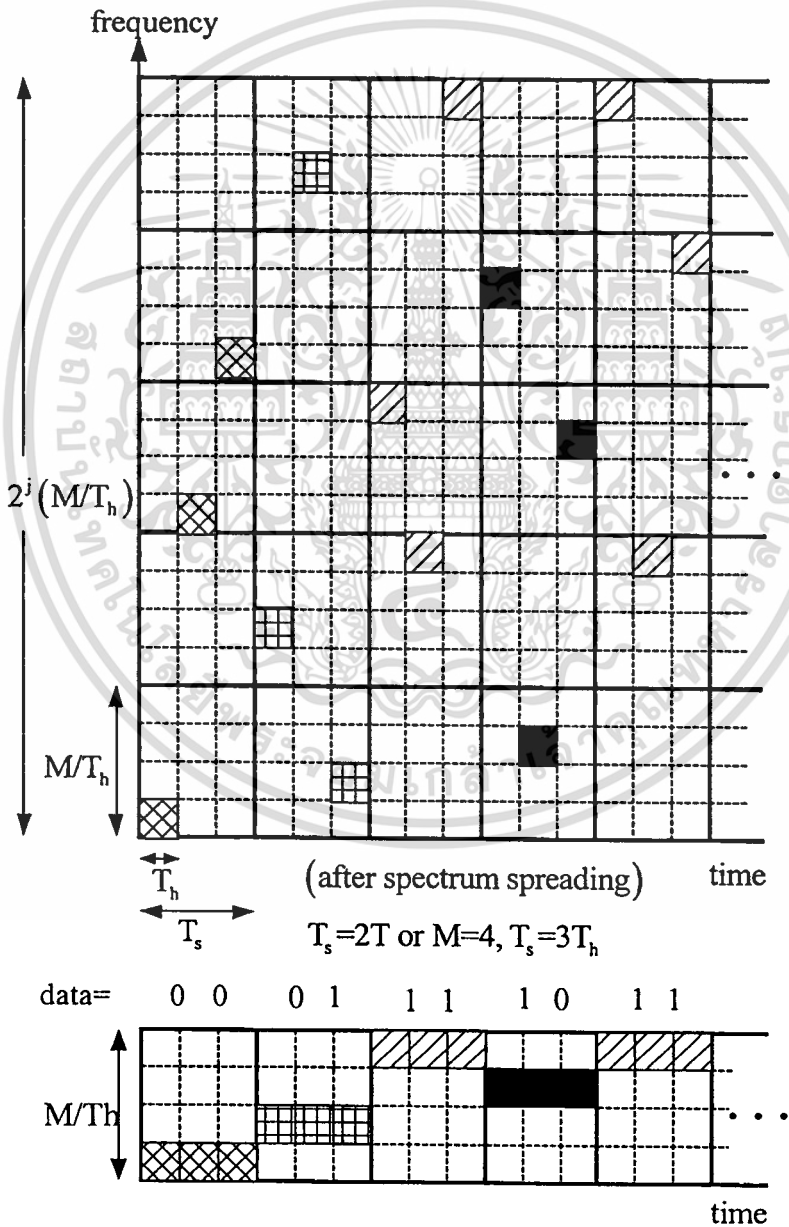
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บล็อกของเครื่องส่งและเครื่องรับยังคงเหมือนเดิมคือรูปที่ 2.6 (a) และ (b) แต่เปลี่ยนเครื่องมอดูเลตและดีมอดูเลตจาก เอฟเอสเค เป็นแบบ M-ary-เอฟเอสเค โค้ดแอมพลิจูดแสดงค่าความถี่เป็นดังรูป 2.7 โดยจะสมมติว่า $M=4$ ทำการพิจารณาครั้งละ 2 บิต มีการฮอป 3 ครั้งต่อ 1 คาบเวลาของสัญลักษณ์ข้อมูล (data symbol) โดยที่ 1 สัญลักษณ์ข้อมูลมีค่าเป็น $\log_2(M)$ บิต กำหนดให้

T_s แทน 1 คาบเวลาของสัญลักษณ์ข้อมูล (symbol duration) มีค่าเท่ากับ $\log_2(M)T$

T_h แทน 1 คาบเวลาของการฮอป (hop duration)

แกนความถี่ (แกนตั้ง) จะถูกแบ่งออกเป็น 2^j กลุ่ม กลุ่มละ 4 ความถี่ ความถี่ที่ถูกส่งออกไปทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนแปลงทุก T_h sec ความถี่ต่ำสุดมีค่าเป็น $1/T_h$ สำหรับสัญญาณที่มีความเป็นเชิงตั้งฉาก ดังนั้นแบนวิดท์ ทั้งหมดของระบบจะมีค่าประมาณ $2^j M/T_h$ เฮิรท์



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงความถี่ของระบบพรีแควนซ์ฮอปป์ิงสเปกตรัมที่มีการเปลี่ยนความถี่แบบ

เร็วที่ทำการมอดูเลตแบบ M-ary เอฟเอสเค

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.2 อัตราเร็วของสัญญาณพาหิของลำดับพีเอ็นสำหรับระบบพรีแควนซ์ฮอปปีงสเปกตรัมที่มีการเปลี่ยนความถี่แบบเร็ว

ข้อดีของระบบพรีแควนซ์ฮอปปีงเมื่อเทียบกับระบบโคเร็คซีแควนคือ ความเร็วสัญญาณพาหิของเครื่องกำเนิดลำดับพีเอ็นมีค่าไม่สูง เมื่อคิดที่แบนวิทท์เท่ากัน ซึ่งเราจะทำการเปรียบเทียบอัตราเร็วสัญญาณพาหิของทั้งสองระบบ

ในระบบโคเร็คซีแควนแบบ BPSK อัตราเร็วสัญญาณพาหิของเครื่องกำเนิดลำดับพีเอ็นมีค่าเท่ากับอัตราเร็วของชิพ(chip) คือ $1/T_c$ และมีแบนวิทท์ $2/T_c$ เฮิรท์

ในระบบพรีแควนซ์ฮอปปีงในแต่ละฮอป เราต้องการลำดับพีเอ็น j บิต ซึ่งหมายความว่าเครื่องกำเนิดลำดับพีเอ็นจะต้องกำเนิดลำดับพีเอ็น j บิตในเวลา T_h วินาที จะได้ว่าอัตราเร็ว สัญญาณพาหิมีค่า j/T_h เฮิรท์ และมีแบนวิทท์ $2^{j+1} \Delta f = 2^{j+1}/T_h$

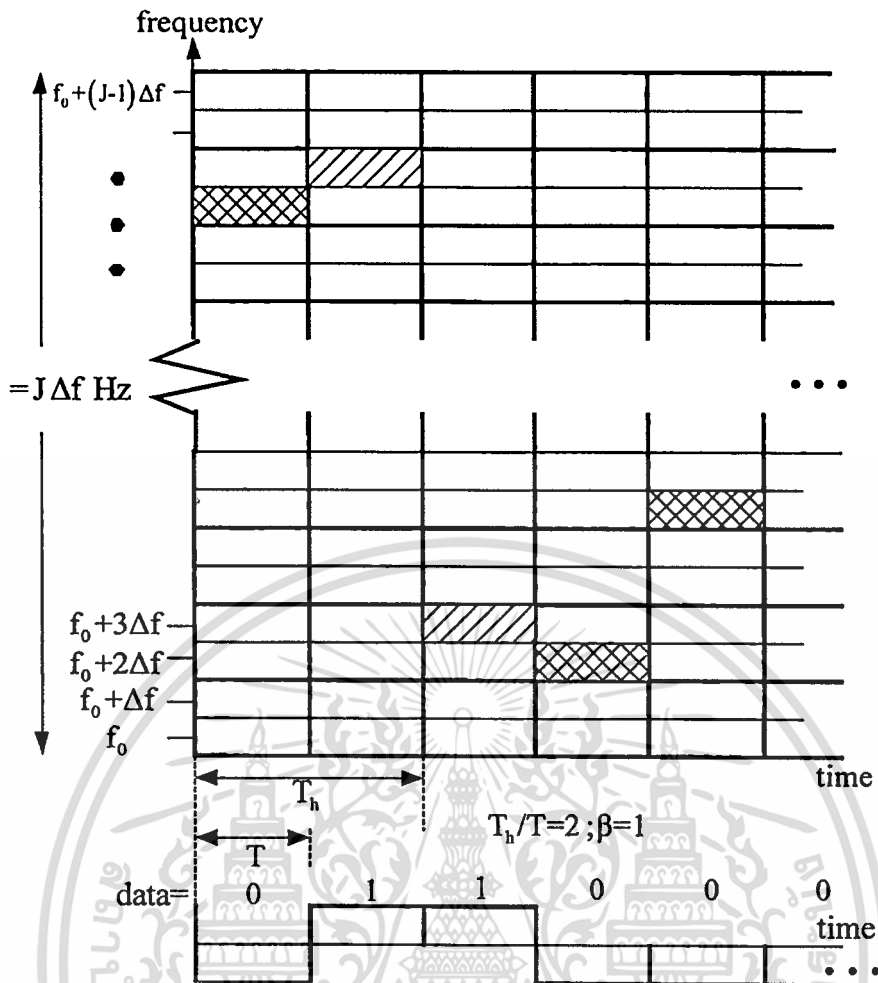
เมื่อให้แบนวิทท์ของสองระบบเท่ากัน จะได้

$$\frac{2}{T_c} = \frac{2^{j+1}}{T_h} \tag{2.12}$$

ดังนั้น อัตราเร็ว clock ในระบบโคเร็คซีแควน = $\frac{1/T_c}{j/T_h} = \frac{2^j}{j}$
 อัตราเร็ว clock ในระบบพรีแควนซ์ฮอปปีง
 มีค่ามากกว่า 1 ในทุกๆ ค่าของ j

2.2.2.3 ระบบพรีแควนซ์ฮอปปีงสเปกตรัมที่มีการเปลี่ยนความถี่แบบช้า (Slow FH SS)

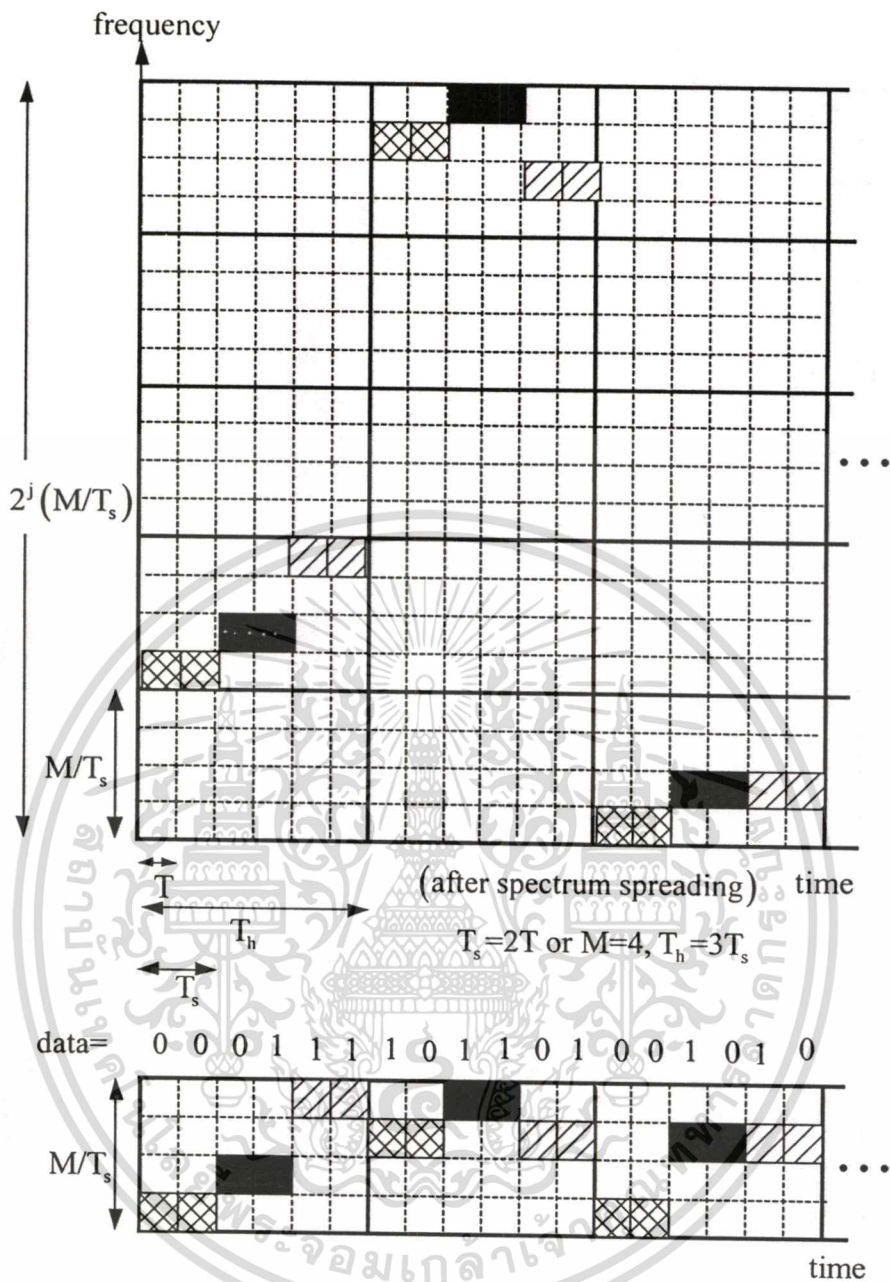
เมื่อ T/T_h มีค่าน้อยกว่า 1 จะได้ว่าระบบของเราเป็นระบบที่มีการเปลี่ยนความถี่แบบช้า แผนภาพแสดงค่าความถี่ของระบบที่มีค่า $T/T_h = 1/2$ แสดงได้ดังรูปที่ 2.8 คือมีการฮอป 1 ครั้งต่อข้อมูล 2 บิต ซึ่งในแต่ละฮอปข้อมูลอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง 0 และ 1



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงค่าความถี่ของระบบที่มีค่า $T/Th = 1/2$

ความถี่ที่ส่งออกไปจะมีการเปลี่ยนทุกๆ T วินาที โดยสัญญาณที่เป็นเชิงตั้งฉากความถี่จะถูกแบ่งออกเป็นช่วงย่อยๆ Δf ซึ่งมีค่า $\Delta f = m/T$ ซึ่ง m เป็นจำนวนเต็มที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ถ้าเราใช้ $\Delta f = 1/T$ และเครื่องส่งกระจายความถี่จะสร้างความถี่ออกมา 2^j ความถี่ ดังนั้นย่านความถี่ทั้งหมดมีค่า $J\Delta f = J/T$ เฮิรท์ โดย $J = 2^{j+1}$ ค่า อัตราขยายการประมวลผล = $J/2$ เมื่อมีการขยายที่เครื่องส่งเป็น β ความถี่ย่อยสุดท้ายที่เอาท์พุทจะมีค่าเป็น $\beta\Delta f$, และระบบจะมีแบนวิดท์เป็น $\beta J/T$ ค่า อัตราขยายการประมวลผล = $\beta J/2$

สำหรับระบบที่มีการเข้ารหัสแบบ M-ary เอฟเอเอสเค สามารถแสดงไดอะแกรมความถี่สำหรับระบบที่มีค่า $M = 4$ และช่วงคาบเวลาของสัญลักษณ์เป็น $T \log_2(M)$ และมี $Th = 3Ts$ ซึ่งแสดงว่ามีการซ้อน 1 h ครั้งในช่วง 3 สัญลักษณ์ แสดงได้ดังรูป 2.9 ความถี่ย่อยต่ำสุดสำหรับสัญญาณที่เป็นเชิงตั้งฉากมีค่า $1/Ts$ เฮิรท์ แบนวิดท์ของระบบมีค่า $2^j M/Ts$ เฮิรท์ โดย j เป็นจำนวนบิตที่ทำการควบคุมเครื่องส่งกระจายความถี่



รูปที่ 2.9 โค้ดแกระความถี่สำหรับระบบที่มีค่า $M = 4$ และช่วงคาบเวลาของสัญลักษณ์เป็น $T \log_2(M)$ และมี $T_h = 3T_s$

2.2.2.4 คุณสมบัติของระบบฟรีควมถี่ออปปีงแสดงได้ดังนี้

1. ความสามารถในการเข้าถึงหลายทาง

ในระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่แบบเร็ว (FFH) บิตข้อมูล 1 บิตข้อมูลจะถูกส่งไปในย่านความถี่ต่างๆกัน ถ้าผู้ใช้ที่ต้องการเป็นผู้ใช้เดี่ยวที่ทำการส่งสัญญาณไปในย่านความถี่ทั้งหมด กำลังงานที่รับได้ของสัญญาณที่ต้องการจะมีความมากกว่ากำลังงานของสัญญาณแทรกสอดมาก ดังนั้นจึงสามารถรับสัญญาณได้อย่างถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่แบบช้า(SFH) บิตข้อมูลหลายบิตจะถูกส่งออกไปโดยใช้ความถี่เดียวกัน ถ้าความน่าจะเป็นที่จะมีผู้ใช้อื่นทำการส่งสัญญาณในย่านความถี่เดียวกันมีค่าต่ำ สัญญาณที่ต้องการจะสามารถรับได้อย่างถูกต้องตลอดเวลาที่ทำการส่ง ในช่วงเวลาดังกล่าวถ้ามีสัญญาณแทรกสอดที่ส่งมาจากผู้ใช้อื่นที่ความถี่เดียวกัน จะใช้รหัสตรวจสอบความผิดพลาด(Error correction code) ในการนำสัญญาณข้อมูลที่ถูกส่งมาในช่วงเวลานั้นกลับคืนมาได้

2. สัญญาณแทรกสอดแบบหลายเส้นทาง

ระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่แบบเร็ว ความถี่ของคลื่นพาห้จะมีการเปลี่ยนแปลงหลายครั้งในช่วงของการส่ง 1 บิตข้อมูล สัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วจะถูกนำมามอดูเลตอีกครั้งและส่งออกไปด้วยคลื่นพาห้ที่มีความถี่ต่างๆกัน สัญญาณที่มีความถี่ต่างกันจะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณแบบหลายเส้นทางต่างกัน เป็นผลให้ความถี่ของสัญญาณที่ถูกมอดูเลตนี้อาจจะถูกขยายที่ความถี่หนึ่งแต่ถูกลดทอนที่อีกความถี่หนึ่ง ที่เครื่องรับผลตอบสนองของความถี่ในการกระโดดต่างๆกันจะถูกเฉลี่ยและทำให้ผลของการแทรกสอดแบบหลายเส้นทางลดลง

3. การลดการแทรกสอดของสัญญาณแบนด์แคบ

เมื่อมีการแทรกสอดจากสัญญาณแถบแคบที่ความถี่หนึ่ง โดยที่มีความถี่ในการกระโดดทั้งหมด G_p ความถี่ ผู้ใช้หนึ่งคนจะใช้ความถี่ที่ถูกแทรกสอดอยู่เพียง $1/G_p$ เท่านั้น ดังนั้นสัญญาณแทรกสอดจะถูกทำให้ลดลงด้วยค่า G_p

4. ความน่าจะเป็นในการถูกดักจับสัญญาณมีค่าต่ำ

ความยากในการดักจับสัญญาณของระบบนี้ไม่ได้ขึ้นกับการใช้กำลังส่งต่ำ ในช่วงเวลาการส่งสัญญาณระบบจะใช้กำลังส่งต่อเฮิร์ตสูงพอๆกับการส่งแบบต่อเนื่อง แต่ความถี่ที่สัญญาณจะถูกส่งออกไปนั้นไม่สามารถทราบได้จากระบบอื่น นอกจากนี้ช่วงเวลาของการส่งสัญญาณที่แต่ละความถี่ก็ยังมีสั้นมากด้วย ดังนั้นแม้ว่าสัญญาณสเปกตรัมแบบกระโดดเปลี่ยนความถี่จะถูกดักจับได้ง่ายกว่าสัญญาณแบบโคเร็คซีแควน แต่ก็ยังต้องใช้กระบวนการที่ยุ่งยากมากที่จะทราบความหมายของสัญญาณ

ข้อดีและข้อเสียของระบบนี้มีดังนี้

ข้อดีของระบบฟรีแควนซีฮอปปีงซีดีเอ็มเอ

1. การชิงโครโนซ์ของระบบสามารถทำได้ง่ายกว่าระบบโคเร็คซีแควนมากและจะทำภายในช่วงเวลาในการกระโดด(time hop) การสเปกตรัมแบบกระโดดไม่ได้ทำโดยการกระโดดความถี่ด้วยอัตราเร็วสูง แต่จะทำโดยให้มีเซตของการกระโดดเปลี่ยนความถี่หลายความถี่ ดังนั้นช่วงคาบเวลาในการกระโดดจะมีค่ามากกว่าช่วงคาบเวลาของชิพในระบบโคเร็คซีแควน ทำให้ระบบนี้สามารถยอมรับให้มีค่าความผิดพลาดในการชิงโครโนซ์ได้มากกว่าระบบโคเร็คซีแควน

2. แบนวิดท์ที่ใช้ในการกระโดดเปลี่ยนความถี่ต่างๆ สัญญาณที่ในระบบนี้สามารถครอบครองใช้งานไม่จำเป็นต้องอยู่ติดกัน เนื่องจากสามารถสร้างวงจรสังเคราะห์ความถี่ให้สังเคราะห์ความถี่กระโดดข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของสเปกตรัมทางความถี่ที่แน่นอนได้ เมื่อประกอบกับการชิง โคร โนซ์ที่ง่าย ทำให้สามารถมีแบน วิดท์สเปกตรัมที่กว้างมากขึ้น

3. ระบบเป็นการสเปกตรัมแบบหลีกเลี่ยง(Avoidance SS) ความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้หลายคนจะส่ง สัญญาณในย่านความถี่เดียวกันในขณะเวลาเดียวกันจะมีค่าน้อย ถ้าผู้ใช้ที่อยู่ไกลสถานีฐานทำการส่ง สัญญาณ สัญญาณนั้นจะถูกรับได้แม้ว่าผู้ใช้ที่อยู่ใกล้ทำการส่งอยู่ก็ตาม เนื่องจากผู้ใช้นั้นอาจจะ กำลังส่งสัญญาณที่ความถี่อื่นๆ อยู่ก็ได้ สมรรถนะของผลกระทบการความถี่ไกลจะดีกว่าระบบไคเร็ค ซีเควินมาก

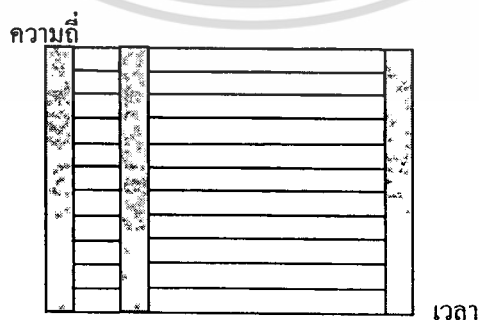
4. ระบบแบบนี้มีความเป็นไปได้ที่จะลดผลของสัญญาณแทรกสอดแถบแคบได้ดีกว่าระบบไคเร็ค ซีเควินเนื่องจากการที่จะมีแบนวิดท์มากกว่า

ข้อเสียของระบบฟรีควอนซีฮอปป์ซิดีเอ็มเอ

1. ต้องใช้วงจรสังเคราะห์ความถี่ที่มีความซับซ้อนมาก
2. การเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณอย่างทันทีทันใด จะทำให้การครอบครองความถี่ในการ กระโดดใดๆเพิ่มมากขึ้น เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงกรณีดังกล่าวสัญญาณต้องถูกปิดและเปิดใหม่เมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงความถี่
3. การมอดูเลตแบบร่วมนี้ทำได้ยาก เนื่องจากเฟสของแต่ละช่วงเวลาของการกระ โดดเปลี่ยนความถี่ ไม่มีความสัมพันธ์กัน

2.2.3 การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแบบการกระโดดของเวลา (TH-SS)

ข้อมูลในระบบนี้จะถูกส่งไปในช่วงเวลาที่ถูกกำหนดจากรหัสของผู้ใช้แต่ละคน เวลาจะถูกแบ่ง ออกเป็นเฟรม โดยแต่ละเฟรมจะถูกแบ่งออกเป็นสล็อตทั้งหมด M สล็อต ในช่วงคาบเวลาของแต่ละ เฟรมผู้ใช้สามารถส่งสัญญาณ ไปใน 1 ไทม์สล็อตใด 1 ไทม์สล็อตหนึ่งจากทั้งหมด โดยขึ้นกับรหัสที่กำหนด ให้แก่ผู้ใช้แต่ละคนในระบบ ผู้ใช้จะทำการส่งข้อมูลทั้งหมดใน 1 ไทม์สล็อตดังนั้นความถี่ที่ใช้ในการส่ง จะเพิ่มขึ้นด้วยค่าแฟคเตอร์ M



รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงช่วงเวลาและความถี่ของระบบการเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแบบ การกระโดดของเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดอะแกรมแสดงช่วงเวลาและความถี่ของระบบแสดงดังรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าระบบใช้สเปกตรัมแบนกว้างทั้งหมดในช่วงเวลาสั้นๆ และคุณสมบัติของการสเปกตรัมแบนแบบนี้มีดังนี้

1. ความสามารถในการเข้าถึงหลายทาง

การส่งสัญญาณทั้งหมดจะส่งไปในย่านความถี่เดียวกัน ค่าความน่าจะเป็นที่จะมีการส่งสัญญาณจากผู้ใช้นามากกว่า 1 คนในเวลาเดียวกันจะต้องมีค่าน้อย ซึ่งสามารถทำได้โดยการกำหนดรหัสกับผู้ใช้แต่ละคนให้ใช้ไทม์สล็อตต่างกัน ถ้ามีการส่งสัญญาณจากผู้ใช้หลายคนก็สามารถใช้รหัสเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดได้ เมื่อมีการชิงโครไนซ์ระหว่างผู้ใช้ทั้งหมด จะทำให้ไม่มีการส่งสัญญาณในไทม์สล็อตเดียวกันมากกว่า 1 คน ดังนั้นจะทำให้ระบบสามารถเป็น TDMA ได้เมื่อไทม์สล็อตที่ผู้ใช้ทำการส่งไม่ได้ถูกกำหนดไว้ตายตัวแต่จะมีการเปลี่ยนแบบเฟรมต่อเฟรม

2. การป้องกันการแทรกสอดแถบแคบ

สัญญาณที่ส่งออกไปจะถูกลดช่วงคาบเวลาลงไปในอัตราส่วน $1/G_p$ ที่เครื่องรับสัญญาณแทรกสอดจะถูกรับเข้ามาเพียงแคในช่วงเวลาที่ทำการรับเท่านั้น สัญญาณแทรกสอดเข้าเพียง $1/G_p$ ของเวลาทั้งหมดเท่านั้น จึงเป็นการลดกำลังงานของสัญญาณแทรกสอดลงด้วยค่า G_p

3. ความน่าจะเป็นในการถูกคักจับสัญญาณมีค่าต่ำ

ผู้ใช้แต่ละคนทำการส่งสัญญาณด้วยความถี่คงที่ ช่วงเวลาในการส่งของผู้ใช้แต่ละคนนั้นสั้นมากและไม่สามารถทราบได้จากระบบอื่น และมีลักษณะของเวลาที่ทำการส่งแต่ละคนไม่เหมือนกัน ดังนั้นระบบอื่นจึงยากที่จะสามารถแบ่งแยกจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของการส่งสัญญาณได้ และไม่สามารถแยกได้ว่าเป็นข้อมูลของผู้ใช้ใด หากไม่ทราบรหัส

ข้อดีและข้อเสียของระบบ TH-CDMA นี้สามารถแสดงได้ดังนี้

ข้อดีของระบบ

1. การนำไปใช้งานสามารถทำได้ง่ายกว่าระบบ FH-CDMA
2. ระบบนี้เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานในระบบที่เครื่องส่งมีกำลังงานเฉลี่ยในการส่งต่ำ แต่ค่ากำลังงานสูงสุดมีค่าไม่จำกัด
3. ปัญหาที่เกิดจากผลกระทบใกล้-ไกลมีค่าน้อยมาก เนื่องจากเป็นระบบแบบมีการหลีกเลี่ยง ตลอดเวลาที่เครื่องที่อยู่ไกลสถานีฐานทำการส่งสัญญาณจะไม่ถูกระบบกวนจากการส่งสัญญาณจากเครื่องที่อยู่ใกล้สถานีฐาน

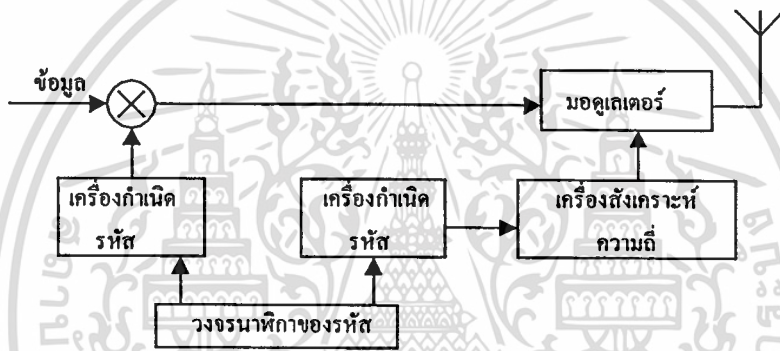
ข้อเสียของระบบ

1. การชิงโครไนซ์รหัสต้องใช้เวลานาน แต่เครื่องรับรักษาการชิงโครไนซ์ไว้เพียงช่วงควาเวลาสั้นๆ เท่านั้น
2. ถ้ามีการส่งสัญญาณจากผู้ใช้หลายคน จะทำให้บิตข้อมูลเกิดความเสียหายเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจะต้องใช้รหัสที่ดี เพื่อตรวจสอบความผิดพลาดและจำเป็นต้องมีการวางสลับกันระหว่างบิต (Data Interleaving)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การเข้าถึงหลายทางแบบสเปรตสเปกตรัมแบบการผสม

ระบบนี้จะรวมระบบทั้งหมดที่กล่าวมา โดยใช้เทคนิคแบบสเปรตสเปกตรัมตั้งแต่ 2 วิธีขึ้นไปร่วมกัน ทำให้ระบบแบบผสมที่อาจเป็นไปได้ดังนี้ DS/FH , DS/TH, FH/TH และ DS/FH/TH แนวความคิดของระบบนี้คือ รวมข้อดีของเทคนิคต่างๆเข้าด้วยกัน ระบบ DS/FH จะมีข้อดีในเรื่องของการต่อต้านผลกระทบจากสัญญาณหลายเส้นทางของระบบไคเร่คซีแคว้น รวมกับคุณสมบัติในเรื่องผลกระทบจากการโกส้ไกลของระบบฟรีแควนซ์ฮอปปีง แต่ข้อเสียของระบบผสมนี้คือ เครื่องส่งและเครื่องรับที่มีความซับซ้อนมากขึ้น บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งสัญญาณข้อมูลจะถูกทำให้เป็นสัญญาณสเปรตสเปกตรัมโดยใช้รหัสไคเร่คซีแคว้น หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกนำไปมอดูเลตกับคลื่นพาหะที่มีการกระโดดเปลี่ยนความถี่ที่ถูกกำหนดจากรหัสอีกตัวหนึ่งโดยใช้สัญญาณนาฬิกาควบคุมรหัสให้มีความสัมพันธ์กันคงที่



รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่ง

บทที่ 3

หลักการของเวฟเล็ตในระบบการสื่อสาร

การแปลงเวฟเล็ตถูกนำเสนอขึ้นเพื่อเป็นเครื่องมือที่มีความยืดหยุ่นสำหรับการ กระจายองค์ประกอบ(decomposition) ของสัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลาให้อยู่ในหลายๆ ระดับการวิเคราะห์ (resolution) ซึ่งได้มีการวิจัยและปรับปรุงการทำงานของเวฟเล็ตและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

3.1 กลืนสัญญาณและเวฟเล็ต (Wave and Wavelet)

เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจการทำงานของเวฟเล็ต จะต้องกล่าวอ้างอิงถึงการแปลงแบบฟูเรียร์ โดยที่การแปลงแบบฟูเรียร์อาจมองได้ว่าเป็นกรณีหนึ่งของการแปลงเวฟเล็ต โดยจะทำการพิจารณาสัญญาณ $f(t)$ ซึ่งสัญญาณจะมีค่าตั้งแต่ $-\alpha$ ถึง $+\alpha$ หรืออาจจะเป็นสัญญาณที่มีค่าจำกัดในช่วงเวลาใดๆ (time limited)

การแปลงฟูเรียร์ เป็นการแปลงเชิงเส้น (linear transform) ที่ทำการเปลี่ยนสัญญาณ $f(t)$ ลงในอีกโดเมนหนึ่งคือ โดเมนความถี่ซึ่งแทนด้วย $F(\Omega)$ หากทำการแปลงความฟูเรียร์ได้จาก

$$F(\Omega) = \int_{-\alpha}^{\alpha} f(t)e^{-j\Omega t} dt \quad (3.1)$$

โดย $e^{j\Omega t}$ เป็น ฟังก์ชันพื้นฐานของการแปลง ซึ่งถ้าทำการเปลี่ยนค่า Ω ไปเรื่อยๆ จะได้เซตของฟังก์ชันพื้นฐานที่มีคุณสมบัติเป็นเชิงตั้งฉากกันและสามารถหาค่าสัญญาณ $f(t)$ ในโดเมน Ω ได้โดยที่ค่า $\Omega = \Omega_1$ จะให้ค่าเป็น $F(\Omega_1)$ และที่ค่า $\Omega = \Omega_2$ จะให้ค่าเป็น $F(\Omega_2)$ ไปเรื่อยๆโดยที่ฟังก์ชันพื้นฐาน เหล่านี้เป็นฟังก์ชันที่มีคาบและที่มีค่าตั้งแต่ $-\alpha$ ถึง $+\alpha$ เมื่อทำการเปลี่ยน Ω เป็น $1/a$ จะทำให้ค่า $e^{j\Omega t}$ มีค่าเป็น $e^{(jt/a)}$ ลักษณะที่สำคัญสองอย่างของฟังก์ชันพื้นฐาน นี้คือ

- มีค่าแผ่ไปในทุกเวลาและค่าของสัญญาณ ไม่ได้จำกัดแค่ช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งเท่านั้น
- สามารถสร้างเซตของ ฟังก์ชันพื้นฐาน ได้โดยการเปลี่ยนค่า a ได้

จากคุณสมบัติที่ 2 จะสามารถเขียนรูปทั่วไปของ ฟังก์ชันพื้นฐาน โดยให้ค่า $a=1$ และเรียกว่าเป็นฟังก์ชันแม่ ดังสมการ

$$\Psi_a(t) = e^{jt} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเซตของ ฟังก์ชันพื้นฐาน อื่นๆ จะสร้างได้จากการสเกลตัวฟังก์ชันแม่ สามารถเขียนได้เป็น

$$\Psi_a = \Psi\left(\frac{t}{a}\right) = e^{j(t/a)} \quad (3.3)$$

เมื่อทำการเลือกค่า a ที่ต่างกันออกไปจะได้ฟังก์ชันแม่ที่มีความถี่สูงชันและต่ำลงได้ตามค่า a

การแปลงฟูเรียร์เป็นที่นิยมนักมากในระบบการประมวลสัญญาณแบบดิจิทัลและการนำไปใช้อีกหลายอย่างแต่ในบางกรณีก็ยังไม่สามารถใช้ได้สมบูรณ์นัก พิจารณาสัญญาณ $f(t)$ ที่มีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมจะได้ค่าการแปลงฟูเรียร์เป็นฟังก์ชันซิงค์ (sinc function) ดังนั้นในการแทนหรือแสดงค่าของฟังก์ชันพัลส์สี่เหลี่ยมจะต้องใช้ฟังก์ชันซิงค์ที่ค่าเวลาดั้งแต่ $-\alpha$ ถึง $+\alpha$ เป็นองค์ประกอบ

เมื่อคลื่นแม่มีค่าอยู่ที่ทุกๆช่วงเวลา สัญญาณที่มีลักษณะแบบมีค่าจำกัดในช่วงเวลาใดๆจะให้ประสิทธิภาพไม่ดีนักเมื่อใช้การแปลงแบบฟูเรียร์ โดยการแก้ปัญหานี้ได้มีการพัฒนาขึ้นมา เช่นการใช้ฟังก์ชันหน้าต่างคูณเข้าไปในสัญญาณที่จะทำการแปลงซึ่งมีการเรียกว่า การแปลงฟูเรียร์แบบช่วงสั้นๆ (short time Fourier transform หรือ Gabor transform)

จะเห็นได้ว่า การแก้ปัญหานี้จะอาศัยการใช้ฟังก์ชันแม่ซึ่งเป็นคลื่นที่ไม่ครอบคลุมทุกช่วงเวลา แต่จะใช้คลื่นเล็กๆที่มีค่าแค่ในช่วงๆหนึ่งหรือที่เรียกว่า เวฟเล็ต (wavelet)

ในการแสดงค่าสัญญาณซึ่งมีค่าอยู่ทุกๆช่วงเวลา ด้วยฟังก์ชันเวฟเล็ตจะต้องมีการเลื่อนฟังก์ชันเวฟเล็ตไปที่ค่าเวลาต่างๆ ดังนั้นฟังก์ชันเวฟเล็ตจึงสามารถนิยามขึ้นโดยใช้ ตัวแปร 2 ตัว คือ a เป็นตัวแปรการสเกล (dilation parameter) และ b เป็นตัวการเลื่อน (shift parameter) ซึ่งนิยามได้ดังสมการ

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.4) จะเห็นว่าการแปลงแบบเวฟเล็ตใช้สองตัวแปรคือ a ในการสเกลค่าความถี่และ b ในการเลื่อนไปในทางเวลา ในการแปลงฟูเรียร์จะทำการเปลี่ยนสัญญาณที่มีทิศทางเดียว(one dimension signal) ให้ไปอยู่ในอีก โดเมนของสัญญาณหนึ่งซึ่งเป็นแบบทิศทางเดียวเหมือนกัน แต่การแปลงแบบเวฟเล็ตจะทำการเปลี่ยนสัญญาณแบบทิศทางเดียวเข้าไปใน โดเมนสัญญาณสองทิศทาง ในการเพิ่มตัวแปรเข้าไปหนึ่งตัวจะเป็นการเพิ่มความซับซ้อน(complexity)ให้กับการแปลง แต่ก็ทำให้แก้ปัญหาในการแปลงสัญญาณที่มีค่าที่ทุกๆเวลาได้

ในกรณีของอนาล็อก เราจะนิยามการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณแบบต่อเนื่องทางเวลาได้ดังสมการ

$$w(a,b) = \int_{-a}^a f(t) \Psi_{ab}^*(t) dt \quad (3.5)$$

โดย * หมายถึง complex conjugate

ความแตกต่างระหว่างการแปลงแบบฟูเรียร์ในสมการที่ (3.1) กับสมการการแปลงเวฟเล็ตในสมการ(3.5) คือ

- ฟังก์ชันพื้นฐานที่ใช้ในการแปลงเวฟเล็ต สามารถระบุตำแหน่งในทางเวลาได้ (localized in time)

- เราสามารถสร้างเซตของ ฟังก์ชันพื้นฐานที่ใช้ในการแปลงเวฟเล็ต ได้โดยการสเกลและการเลื่อนตัวแปร a และ b

โดยถ้าเรากำหนดตัวแปร $a=1$ และ $b=0$ จะได้ฟังก์ชันซึ่งเรียกว่า เวฟเล็ตแม่(mother wavelet) และเมื่อทำการสเกลหรือเลื่อนฟังก์ชันนี้ออกไปจะได้ฟังก์ชันที่มีลักษณะและคุณสมบัติเปลี่ยนไป จึงเห็นได้ว่าคุณสมบัติใหม่เหล่านี้ทำให้เวฟเล็ตเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการประมวลผลสัญญาณ แม้ว่าจะมีความแตกต่างจากฟูเรียร์บ้างเล็กน้อย

ในการแปลงฟูเรียร์จะมีการใช้ ฟังก์ชันพื้นฐาน คือ $e^{j\Omega t}$ และในส่วนของ การแปลงเวฟเล็ตฟังก์ชันทุกฟังก์ชันไม่สามารถเลือกมาเป็นฟังก์ชันแม่ของเวฟเล็ตได้ทั้งหมด ฟังก์ชันที่เลือกต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม โดยการเลือกจะขึ้นกับว่าจะนำไปใช้แก้ปัญหาใดในการประมวลผลสัญญาณ

เพื่อให้เข้าใจถึงข้อจำกัดในการเลือกเวฟเล็ตแม่ เราจะทำการพิจารณาการ เปลี่ยน สัญญาณจากโดเมนของเวลาเข้าไปใน โดเมนของเวฟเล็ต แล้วแปลงกลับมาอีกทีโดยไม่เกิดความผิดพลาดในกระบวนการแปลง จากสมการการแปลงฟูเรียร์แบบผกผัน

$$f(t) = \int_{-a}^a F(\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega \quad (3.6)$$

เราจะสามารถนิยามการแปลงเวฟเล็ตแบบผกผัน(Inverse wavelet Transform) ได้ดังสมการ

$$f(t) = \frac{1}{C_\Psi} \int_0^a \int_{-a}^a \frac{\Psi_{ab}(t) w(a,b)}{a^2} da db \quad (3.7)$$

เหตุผลในการใช้ค่าคงที่ C_Ψ คือ การแปลงกลับสัญญาณดั้งเดิมสัญญาณจะต้องแสดงด้วยฟังก์ชันเวฟเล็ตอย่างสมบูรณ์แบบ เนื่องจากเซตของเวฟเล็ตมีค่าไม่จำกัดแล้วต้องนำมารวมกันทั้งหมดเพื่อแปลงกลับเป็นสัญญาณดั้งเดิม ถ้าค่าเฉลี่ยหรือค่ากระแสตรงมีค่าไม่เป็นศูนย์จะได้ค่าองค์ประกอบของกระแสตรง(dc value) ของสัญญาณดั้งเดิมมีค่าไม่ถูเข้าเมื่อนำกลับมารวมกัน ดังนั้นการกู้คืนสัญญาณดั้งเดิม โดยการรวมกันของฟังก์ชันลูกต้องมีเงื่อนไขว่าฟังก์ชันเวฟเล็ตต้องไม่มีค่าองค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยู่เห็นข้อผิดพลาดประการใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบของกระแสดรงและเนื่องจากเวฟเล็ดถูกสร้างจากเวฟเล็ดแม่ ดังนั้นเวฟเล็ดแม่ก็ค้องไม่มีค่ากระแสดรงด้วย โดยเงื่อนไขแบบที่ยอมรับได้ จะสามารถหาค่าคงที่ c_ψ ได้ดังสมการ

$$C_\psi = \int_0^\alpha w \frac{|\Psi(\Omega)|^2}{\Omega} d\Omega < \alpha \quad (3.8)$$

โดย $\varphi(\Omega)$ คือค่าการแปลงฟูเรียร์ของเวฟเล็ดแม่ $\varphi(t)$

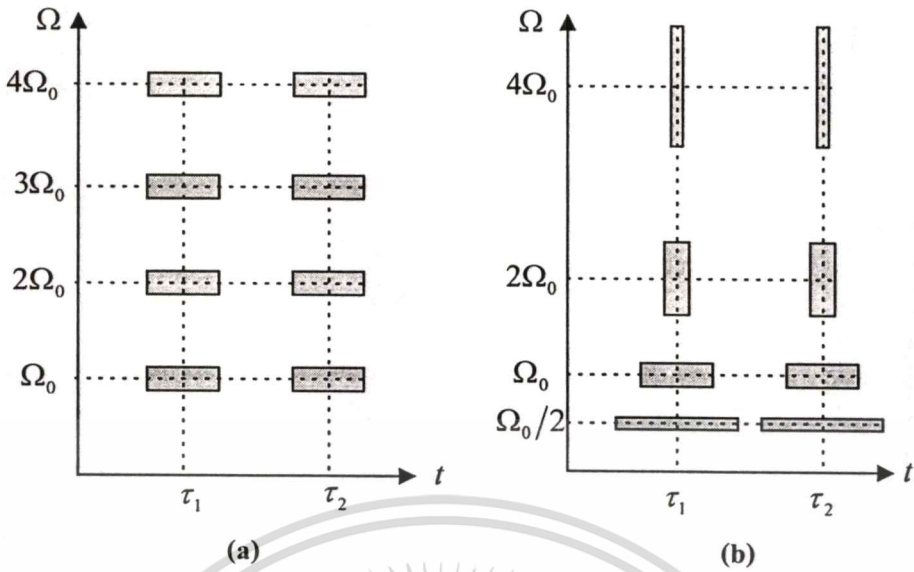
ค่า c_ψ สามารถคำนวณได้เมื่อทำการแปลงเวฟเล็ดแบบผกผัน ดังนั้นทุกฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติเป็นเงื่อนไขแบบที่ยอมรับได้ จะสามารถเลือกให้เป็นเวฟเล็ดแม่ได้และต้องขึ้นกับการนำไปประยุกต์ใช้ด้วย

ในการแปลงฟูเรียร์การกำหนดตำแหน่งของสัญญาณในทางเวลาจะใช้ฟังก์ชันหน้าต่างเข้ามาใช้ร่วมกับการแปลง โดยเรียกว่าเป็นการแปลงฟูเรียร์แบบช่วงสั้นๆ โดยสมการการแปลงจะได้เป็น

$$F(\Omega, \tau) = \int_{-\alpha}^{\alpha} f(t) g^*(t - \tau) e^{-j\Omega t} dt \quad (3.9)$$

เมื่อจำกัดหรือกำหนดช่วงคาบของฟังก์ชันหน้าต่าง จะได้การวิเคราะห์ที่สามารถกำหนดค่าทางเวลาและทางความถี่ได้ดังรูปที่ 3.1 a

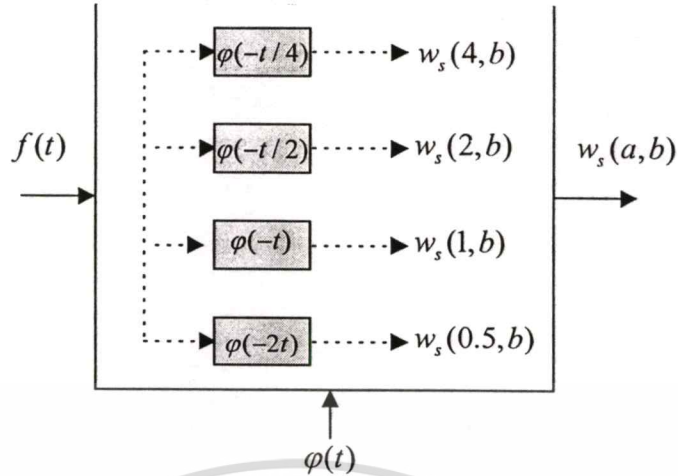
และในการแปลงแบบเวฟเล็ดจะมีการสเกลและการเลื่อนของฟังก์ชันเวฟเล็ด $\varphi(t)$ เข้ามา ดังนั้นการแปลงก็จะมีคุณสมบัติของการสเกลเข้ามาในการวิเคราะห์ทางเวลาและความถี่ ดังนั้นการวิเคราะห์จะออกมาในรูปแบบของการวิเคราะห์ในหลายระบบ และแสดงแผนผังทางเวลาและความถี่ได้ดังรูปที่ 3.1 b



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงช่วงเวลาและความถี่

(a) การแปลงฟูเรียร์แบบช่วงสั้นๆ และ (b) การแปลงแบบเวฟเล็ต

นิยามการแปลงเวฟเล็ตคือ การทำสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณและเซตของเวฟเล็ตจากสมการที่ (3.4) ถ้าเวฟเล็ตเป็นตัวกรองแถบความถี่แบบผ่าน ที่ความถี่ f_0 และมีแบนวิดท์ Δf_0 จะได้ว่าเวฟเล็ตที่ถูกสเกลด้วยค่า a เป็นตัวกรองผ่านแถบความถี่ ที่มีความถี่กลางที่ af_0 มีแบนวิดท์ $a\Delta f_0$ และค่าแบนวิดท์สัมพัทธ์ $f/\Delta f = Q$ จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับค่าตัวแปรการสเกล การแปลงเวฟเล็ตจึงสามารถแสดงได้ด้วยรูปแบบของฟิลเตอร์แบงก์ โดยสร้างจากการขยายและการย่อของฟังก์ชันเดียวกันคือ $\varphi(t)$ ดังรูปที่ 3.2 โดยฟิลเตอร์ที่สร้างจากการขยายของเวฟเล็ตแม่จะทำการประมวลผลข้อมูลที่มีค่าความถี่ต่ำของฟังก์ชัน $f(t)$ และฟิลเตอร์ที่ได้จากการย่อของเวฟเล็ตแม่จะทำการประมวลผลข้อมูลที่มีค่าความถี่สูง จากรูป $a=0.5$ เวฟเล็ตจะอยู่ในรูป $\varphi(-2t)$ และ $\varphi(-t/4)$ ซึ่งเป็นการขยายโดยค่า $a=2$ จากรูปที่ 3.2 เอาท์พุทของฟิลเตอร์แบงก์ไม่ได้ขึ้นกับอินพุต $f(t)$ เพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับตัวกรองแบบอะนาล็อก $\{\varphi_{a,b}(t)\}$ ด้วย ถ้าเลือกเวฟเล็ตแม่ที่ต่างกันเอาท์พุทของฟิลเตอร์แบงก์ก็จะมีลักษณะแตกต่างกันด้วย ในกรณีของการแปลงฟูเรียร์แบบช่วงสั้นๆ ค่าแบนด์วิดท์ที่สัมพัทธ์ Q จะมีค่าไม่คงที่ การแปลงฟูเรียร์แบบช่วงสั้นๆ เป็นระบบ Time-variant-linear system ซึ่งการใช้สัญญาณแบบ real time ต้องสมบูรณณ์กว่าการแปลงแบบเวฟเล็ต



รูปที่ 3.2 รูปแบบของฟิลเตอร์แบงก์โดยสร้างจากการขยายและการย่อด้วยค่า a ของเวฟเล็ตแม่

3.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform)

จากที่กล่าวมาจะสรุปได้ว่าเวฟเล็ต $\varphi(t)$ เป็นฟังก์ชันแบบกรองความถี่ผ่านแบบต่อเนื่องทางเวลาที่มีค่ากลางเป็น 0 เวฟเล็ตสร้างเซตของฟังก์ชันด้วยการสเกล

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.10)$$

$\{\varphi_{a,b}(t)\}$ เรียกว่าเซตของเวฟเล็ต เมื่อตัวแปร $\{a,b\}$ เป็นค่าแบบต่อเนื่อง การแปลงเวฟเล็ตจะเรียกว่าเป็น การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (CWT) รูปที่ 3.3 จะแสดงการตอบสนองทางความถี่ของเวฟเล็ตแบบคูบิชี (Daubichies)

3.3 การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform)

โดยทั่วไปตัวแปรการสเกลและเลื่อนของเวฟเล็ตจะถูกพิจารณา ให้อยู่ในรูป $a = a_0^m$ $b = nb_0 a_0^m$ โดยที่ m และ n เป็นค่าจำนวนเต็ม ดังนั้นเซตของเวฟเล็ต ที่ถูกกระจายจะออกมาในรูป

$$\Psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \Psi(a_0^{-m} t - nb_0) \quad (3.11)$$

$\{\varphi_{m,n}(t)\}$ จะเรียกว่าเป็นฟังก์ชันพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง ถึงจะเรียกว่าการแปลงแบบไม่ต่อเนื่องแต่ตัวแปรทางเวลาของการแปลงยังคงมีค่าต่อเนื่อง สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องของฟังก์ชันต่อเนื่องทางเวลาจะถูกนิยามได้เป็น

$$\begin{aligned} d_{m,n} &= \langle f(t), \Psi_{m,n}(t) \rangle \\ &= \frac{1}{a_0^{m/2}} \int f(t) \Psi(a_0^{-m}t - nb_0) dt \end{aligned} \quad (3.12)$$

เมื่อแทนค่าเซต $\{\varphi_{m,n}(t)\}$ ลงไปจนครบจะได้ว่าฟังก์ชัน $f(t)$ สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$f(t) = \sum_m \sum_n d_{m,n} \Psi_{m,n}(t) \quad (3.13)$$

โดยทั่วไปการแสดงสัญญาณ $f(t)$ จะต้องใช้เซตของเวฟเล็ต $\{\varphi_{m,n}(t)\}$ เป็นจำนวนไม่จำกัด จากการใช้ฟังก์ชันการสเกลลิงซึ่งเป็นคู่ที่ทำให้สมบูรณ์ (complementary scaling function : $\phi(t)$) ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบหลายระดับการวิเคราะห์ (Multiresolution) และทฤษฎีของเวฟเล็ต ฟังก์ชันจะสามารถแทนได้ด้วยการใช้ระดับการวิเคราะห์ที่จำกัดค่า L ของเวฟเล็ตและสเกลลิงฟังก์ชัน ด้วยค่าตัวแปร $a_0=1, b_0=1$ ฟังก์ชัน $f(t)$ สามารถเขียนได้เป็น

$$f(t) = \sum_{n=-\alpha}^{\alpha} c_{L,n} 2^{-\frac{L}{2}} \phi\left(\frac{t}{2^L} - n\right) \quad (3.14)$$

และค่าสัมประสิทธิ์ของสเกลลิง $\{C_{L,n}\}$ จะหาค่าได้จาก

$$\begin{aligned} c_{L,n} &= \langle f(t), \phi_{L,n}(t) \rangle = \int f(t) 2^{-\frac{L}{2}} \phi\left(\frac{t}{2^L} - n\right) dt \\ \phi_{L,n}(t) &= 2^{-L/2} \phi(2^{-L}t - n) \end{aligned} \quad (3.15)$$

คุณสมบัติการวิเคราะห์แบบหลายระดับการวิเคราะห์ จะสามารถเขียนเวฟเล็ตและสเกลลิงฟังก์ชันได้ดังสมการ

$$\Psi = 2 \sum_n h_1(n) \phi(2t - n) \quad (3.16)$$

$$\phi(t) = 2 \sum_n h_0(n) \phi(2t - n) \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\{h_0(n)\}$ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการสเกลลิง (inter scale scaling)

$\{h_1(n)\}$ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันเวฟเล็ต (wavelet basis coefficient)

ซึ่งมีค่าการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง(DTFT) เป็นดังสมการ

$$\begin{aligned} H_0(e^{jw}) &= \sum_n h_0(n)e^{-jwn} \\ H_1(e^{jw}) &= \sum_n h_1(n)e^{-jwn} \end{aligned} \quad (3.18)$$

ดังนั้นค่าสมการเวฟเล็ตและสเกลลิงจะมีค่าทางโดเมนความถี่ดังสมการ

$$\Psi(\Omega) = H_1(e^{jw/2}) \prod_{k=2}^{\alpha} H_0(e^{2^k}) \quad (3.19)$$

$$\Phi(\Omega) = \prod_{k=1}^{\alpha} H_0(e^{jw/2^k}) \quad (3.20)$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่าเวฟเล็ตและสเกลลิงฟังก์ชันแบบต่อเนื่องประกอบด้วยค่าการแปลงฟูเรียร์ของ $h_0(n)$ และ $h_1(n)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันแบบไม่ต่อเนื่อง ที่ค่าความถี่ $w=\Omega$ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของทฤษฎีการวิเคราะห์แบบหลายระดับการวิเคราะห์ ที่สามารถทำให้เราสร้างฟังก์ชันแบบต่อเนื่องทางเวลาโดยใช้การออกแบบฟังก์ชันแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาได้

การตั้งฉากของสัญญาณ (Orthogonality) ของเวฟเล็ตและสเกลลิงมี 3 แบบ คือ

1. การตั้งฉากแบบการสเกลภายนอก (Interscale) ของสเกลลิงฟังก์ชัน

$$\langle \phi_{m,n}(t), \phi_{m',n'}(t) \rangle = \delta_{n-n'} \quad (3.21)$$

2. การตั้งฉากแบบ ภายใน และ ภายนอกของเวฟเล็ตฟังก์ชัน

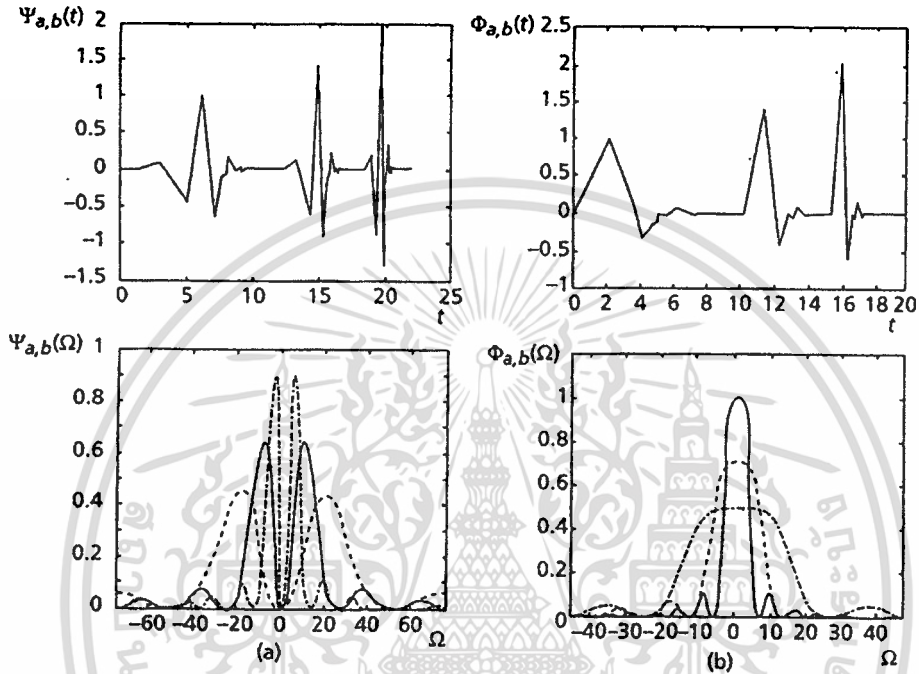
$$\langle \Psi_{m,n}(t), \Psi_{m',n'}(t) \rangle = \delta_{m-m'} \delta_{n-n'} \quad (3.22)$$

3. คุณสมบัติการมีองค์ประกอบที่ทำให้สมบูรณ์ของเวฟเล็ตและสเกลลิง

$$\langle \Psi_{m,n}(t), \Psi_{m',n'}(t) \rangle = 0 \quad \forall m, n, m', n' \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างของเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องที่มีคุณสมบัติความเป็นเชิงตั้งฉาก คือ เวฟเล็ตแบบคูบิซี ซึ่งจะแสดงค่าเวฟเล็ตและฟังก์ชันสเกลลิงได้ดังรูปที่ 3 ลักษณะแบบความถี่ผ่านของ $\phi(\Omega)$ และการกรองแถบความถี่ผ่านต่ำของ $\psi(\Omega)$ แสดงให้เห็นได้ชัดว่ามีลักษณะเป็นแบบหลายระดับการวิเคราะห์



รูปที่ 3.3 รูปสัญญาณและการตอบสนองทางความถี่ของเวฟเล็ต

(a) แบบคูบิซีที่มีตัวแปรการสเกลเป็น 2 และ 1/2 และ (b) แบบฟังก์ชันสเกลลิง

เงื่อนไขความเป็นเชิงตั้งฉากในสมการ (3.21)-(3.23) สามารถสรุปได้เป็นสมการ

$$\sum_n h_0(n)h_0(n+2k) = \delta(k) \quad (3.24)$$

จะสังเกตว่าเงื่อนไขในสมการ (3.24) เหมือนกับเงื่อนไขของการกู้คืนสัญญาณเดิมแบบสมบูรณ์แบบ (Perfect Reconstruction) ของฟิลเตอร์แบบ 2-band QMF ซึ่งมีค่าลำดับของฟิลเตอร์ความถี่สูง $\{h_1(n)\}$ เป็นภาพสะท้อน (mirror image) ของความถี่ต่ำ $\{h_0(n)\}$ ดังสมการ

$$h_1(n) = (-1)^n h_0(n) \quad (3.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการออกแบบเวฟเลตและสเกลลิงฟังก์ชันแบบต่อเนื่องทางเวลาตามสมการ (3.16), (3.17) จะต้องออกแบบลำดับ $\{h_0(n)\}$ และ $\{h_1(n)\}$ จากสมการ (3.19),(3.20) ก่อน ซึ่งในทางปฏิบัติจะใช้แค่ 10 หรือ 11 เทอมเท่านั้นในการประมาณค่าฟังก์ชันเวฟเลตและสเกลลิงในสมการ (3.19), (3.20)

3.4 การแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่องและกระบวนการของฟิลเตอร์แบงก์

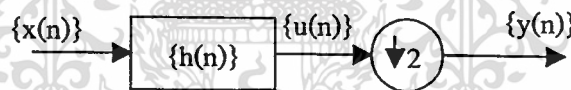
3.4.1 การลดอัตราเร็วของการสุ่มหลังจากการคอนโวลูชัน(Convolution followed Decimation)

เขียนสมการแทนระบบการทำงานนี้ได้ดังสมการ (3.26) และแสดงบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.4 เอาท์พุตออกจากระบบแสดงได้ดังสมการ (3.28)

$$y(n) = \{h(n) * x(n)\}_{\downarrow 2} \quad (3.26)$$

$$u(n) = \sum_k x(k)h(n-k) \quad (3.27)$$

$$y(n) = u(2n) = \sum_k x(k)h(2n-k) \quad (3.28)$$



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมของการลดอัตราเร็วของการสุ่มหลังจากการคอนโวลูชัน

3.4.2 การคอนโวลูชันหลังจากการเพิ่มอัตราเร็วการสุ่ม(Interpolation followed by Convolution)

เขียนสมการแทนระบบนี้ได้ดังสมการ (3.29) และเอาท์พุตของระบบแสดงได้ดังสมการ (3.30) และแสดงบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.5

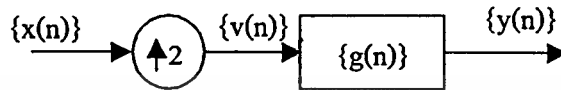
$$y(n) = \{g(n) * [x(n)]_{\uparrow 2}\} \quad (3.29)$$

$$y(n) = \sum_k v(k)g(n-k) \quad (3.30)$$

เมื่อค่า $v(k) = x(k/2)$ สำหรับ ค่า k ที่เป็นเลขคู่ จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 y(n) &= \sum_{k=\text{even}} x\left(\frac{k}{2}\right)g(n-k) \\
 &= \sum_l x(l)g(n-2l)
 \end{aligned}
 \tag{3.31}$$



รูปที่ 3.5 บล็อกโคอะแกรมของการคอนโวลูชันหลังจากการเพิ่มอัตราเร็วการสุ่ม

3.4.3 กระบวนการการกระจายองค์ประกอบของเวฟเล็ต

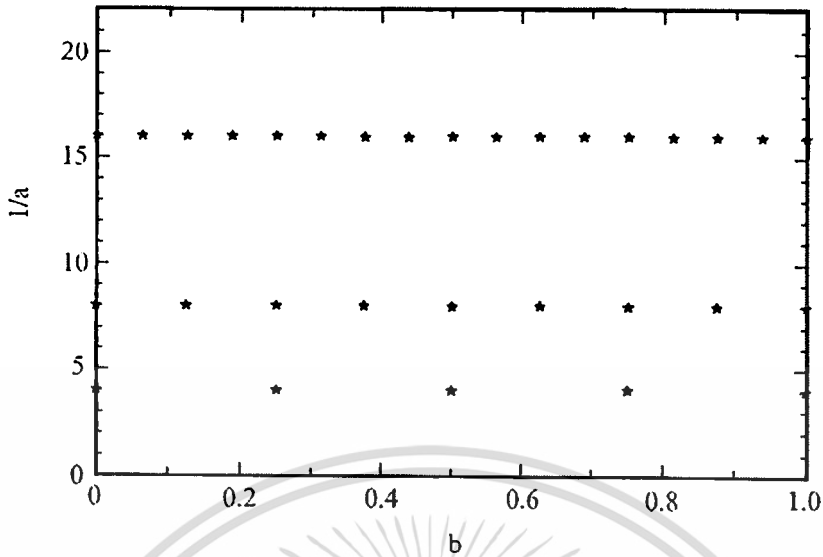
สมการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องของสัญญาณ เมื่อ $x(t)$ เขียนได้ดังสมการ (3.32)

$$W_\varphi x(b,a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-a}^a x(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt
 \tag{3.32}$$

เมื่อเรากำหนดให้ค่า $a = 1/2^s$ และ $b = k/2^s$ เมื่อ s เป็นค่าจำนวนเต็ม จะเป็นการหาค่าการแปลงเวฟเล็ตที่ค่า a, b ซึ่งจะให้ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง $x(t)$ และเวฟเล็ต $\bar{\psi}(t)$ ออกมามีค่าจุดต่อจุด ซึ่งเราจะเรียกค่าเหล่านี้ว่า การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (DWT) ซึ่งสามารถแทนค่าได้ดังสมการ

$$w_{k,s} = W_\varphi x\left(\frac{k}{2^s}, \frac{1}{2^s}\right) = \int_{-a}^a x(t) \varphi\left(\frac{t-k/2^s}{1/2^s}\right) dt
 \tag{3.33}$$

ซึ่งเราจะเรียก $w_{k,s}$ ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ตมีค่า $a = 1/2^s, b = k/2^s$ การแสดงค่า $x(t)$ บนแกนของเวลาแบบไม่ต่อเนื่องแสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 สัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ดการแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ดบนแกนของเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง

ในทางปฏิบัติจำนวนของสัมประสิทธิ์ที่ต้องการให้เพื่อให้กระบวนการแปลงเวฟเล็ดแบบไม่ต่อเนื่องมีข้อมูลที่สามารถทำการกู่กลับสัญญาณเดิมแบบสมบูรณ์ จะต้องมีค่าเท่ากับอัตราการสุ่มที่เรียกว่ากันอัตราส่วนสุ่มวิกฤต คือ ค่าที่ต่ำสุดที่จะต้องใช้เป็นสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ด

เมื่อมี (3.33) และการวิเคราะห์ในหลายระดับจะได้สมการ (3.34) และแทนค่าสมการความสัมพันธ์ของการกระจายของค้ประกอบ (3.35) ลงในสมการ จะได้ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ของ $\phi_{k,s}(t)$ และ $\omega_{k,s}(t)$ ดังสมการ (3.36)

$$\sum_k a_{k,s+1} \phi_{k,s+1}(t) = \sum_k a_{k,s} \phi_{k,s}(t) + \sum_k w_{k,s} \phi_{k,s}(t) \quad (3.34)$$

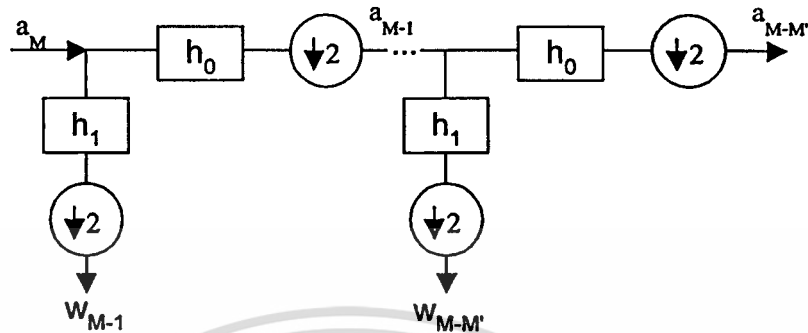
$$\phi(2^{s+1}t - l) = \sum_k \{h_0[2k - l] \phi(2^s t - k) + h_1[2k - l] \phi(2^s t - k)\} \quad (3.35)$$

และสามารถแก้หาค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ดและฟังก์ชันสเกลลิ่งได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} a_{k,s} &= \sum_l h_0[2k - l] a_{l,s+1} \\ w_{k,s} &= \sum_l h_1[2k - l] a_{l,s+1} \end{aligned} \quad (3.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเหมือนกับขบวนการลดอัตราเร็วของการสุ่มหลังจากการคอนโวลูชันที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้น
สัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ตและสเกลลิงซึ่งสามารถหาค่าได้จากโครงสร้างคังรูป 3.7



รูปที่ 3.7 ขบวนการหาค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ตและสเกลลิงฟังก์ชันที่ระดับการวิเคราะห์ต่างๆ
หรือการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง

เมื่อเซตของอินพุตและเอาต์พุตแทนด้วย

$$a_s := \{a_{k,s}\} \quad w_s := \{w_{k,s}\} \quad h_0 := \{h_0[k]\} \quad h_1 := \{h_1[k]\}$$

การกระจายองค์ประกอบของสัญญาณสามารถทำได้โดยการนำเอาสัมประสิทธิ์ของสเกลลิงฟังก์ชันไปเข้าสู่กระบวนการนี้อีกครั้ง และทำไปเรื่อยๆ จนถึงการวิเคราะห์ขั้นต่ำสุด

รูปภาพของโครงสร้างจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 จะเห็นว่าการกระจายองค์ประกอบของเวฟเล็ตเป็นโครงสร้างต้นไม้แบบไม่สมมาตร เพราะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของสเกลลิงฟังก์ชันเพียงค่าเดียวไปการจำแนกอีกครั้งถ้ามีการนำเอาค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ตไปทำการจำแนกด้วย จะได้โครงสร้างต้นไม้ที่สมมาตร

3.5 ขบวนการสังเคราะห์สัญญาณของเวฟเล็ต

ในการแปลงผกผันของเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (IDWT) หรือบางครั้งเรียกว่า การแปลงสังเคราะห์ (Synthesis transform) ฟังก์ชันต้นกำเนิดสามารถกู้คืนกลับมาได้อย่างสมบูรณ์แบบจากค่าองค์ประกอบต่างๆที่อยู่ในแต่ละสเกล โดยโครงสร้างนี้อาศัยความสัมพันธ์ใน 2 สเกลของสเกลลิงฟังก์ชันและเวฟเล็ต โดยทำการพิจารณาค่าองค์ประกอบที่ระดับการวิเคราะห์ที่ s

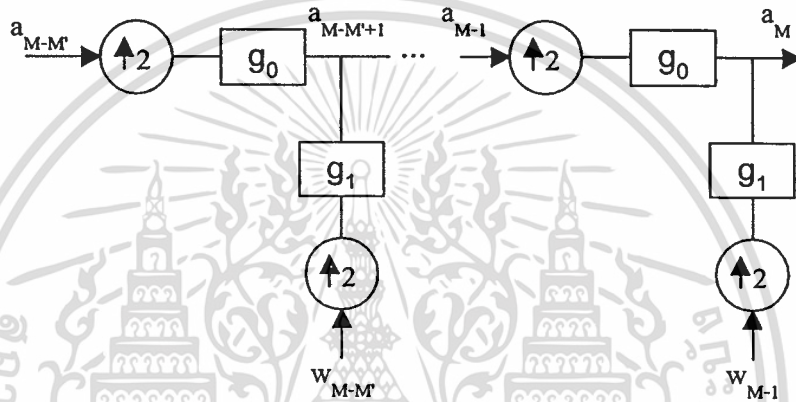
$$x_s(t) + y_s(t) = \sum_k a_{k,s} \phi_{k,s}(t) + \sum_k w_{k,s} \varphi_{k,s}(t) = x_{s+1}(t) \quad (3.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนความสัมพันธ์ แบบ 2 สเกลลงไปได้

$$a_{l,s+1} = \sum_k \{g_0[l-2k]a_{k,s} + g_1[l-2k]w_{k,s}\} \quad (3.38)$$

ทางด้านขวามือของสมการเป็นความสัมพันธ์ของการทำคอนโวลูชันหลังการเพิ่มอัตราเร็วการสุ่ม ดังที่กล่าวมาในหัวข้อที่แล้ว และเขียนโครงสร้างได้ดังรูป 3.8



รูปที่ 3.8 ขบวนการสังเคราะห์สัญญาณของเวฟเลตหรือการแปลงเวฟเลตไม่ต่อเนื่องแบบผกผัน

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าเราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเลตที่สเกลต่างๆ ได้ด้วยการใช้โครงสร้างของฟิลเตอร์แบงก์ ซึ่งสามารถเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของฟิลเตอร์เวฟเลตในแบบต่างๆ ได้

3.6 การใช้เวฟเลตแบบแพ็คเก็ตในการมอดูเลตสัญญาณในระบบการสื่อสาร

การใช้ฟังก์ชันเวฟเลตในระบบสื่อสารมีแนวความคิด คือ ทั้งฟังก์ชันเวฟเลตและฟังก์ชันสเกลลิ่งมีความเป็นเชิงตั้งฉากกับสัญญาณที่ถูกเลื่อนของตัวเอง ดังสมการ

$$\int_{-\alpha}^{\alpha} \phi(t) \cdot \phi(t-n) dt = 0$$

$$\int_{-\alpha}^{\alpha} \varphi(t) \cdot \varphi(t-n) dt = 0 \quad (3.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเห็นได้ว่าสามารถใช้ได้กับการส่งข้อมูลแบบเบสแบนด์ โดยฟังก์ชันเวฟเล็ตที่ได้รับ ความนิยามที่มีคุณสมบัติ compacted support จะเป็นสัญญาณแถบกว้าง แต่ฟังก์ชันเวฟเล็ตที่เป็น แบบที่มีค่าในช่วงเวลาที่จำกัดทำให้เกิดทางเลือกอื่นขึ้น

ประเด็นที่น่าสนใจคือ การสร้างสัญญาณดิจิทัลคลื่นพาห้สำหรับมอดูเลตสัญญาณโดยใช้ เซตของฟังก์ชันเวฟเล็ตแบบแพ็คเก็ต $\varepsilon_k(t), k \in \tau = \{M, M+1, \dots, M+K-1\}$ โดยที่ฟังก์ชัน เวฟเล็ตแพ็คเก็ตเหล่านี้มีความเป็นเชิงตั้งฉากกับฟังก์ชันที่เกิดจากการเลื่อนตัวมันเองและตั้งฉากกับ การเลื่อนของฟังก์ชันอื่นด้วย

$$\int_{-\alpha}^{\alpha} \zeta_j(t-m) \cdot \zeta_k(t-n) dt = \delta_{j,k} \cdot \delta_{m,n} \quad (3.40)$$

และการแปลงฟูเรียร์ $\hat{\varepsilon}_k(f)$ และ $\hat{\varepsilon}_j(f)$ อาจเกิดการทับซ้อน(overlap) กัน แต่เราสามารถใช้นัน ในการมอดูเลตในวิธีการเดียวกันได้ ซึ่งจะลดย่านความถี่ที่สามารถเพิ่มสมรรถนะของการใช้ย่าน ความถี่ได้ โดยที่ $\hat{\varepsilon}_k(f)$ มีลักษณะเป็นสัญญาณแบนแวกและมีความถี่สูงอยู่แล้วจึงไม่จำเป็นต้อง ทำการมอดูเลตอีก และจะได้เวฟเล็ตแบบอะนาล็อกซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการส่งข้อมูล

จากวิธีการดังกล่าวสมรรถนะของการใช้ย่านความถี่จะเพิ่มขึ้นกว่า 3/2 เท่า เมื่อแบนวิดท์มี ค่า B จะสามารถส่งข้อมูลได้ถึง 3B/2 ตัวอย่าง ต่อช่วงเวลา เมื่อเทียบกับระบบแบบเดิม FSK ,ASK ที่มีอัตราเร็วของบิตข้อมูลเป็น B หรือน้อยกว่า B ตัวอย่าง ต่อช่วงเวลาและเมื่อทำการส่งแบบหลาย ช่องสัญญาณ(multi channal) ไม่ต้องมีการป้องกันย่านความถี่(Preventative band) ซึ่งโดยทั่วไปต้อง ใช้ระหว่าง 2 ย่านความถี่ที่อยู่ติดกันทำให้ประสิทธิภาพไม่ลดลง

ที่ทางด้านรับฟังก์ชันเวฟเล็ตแพ็คเก็ตแบบผกผัน(inverse wavelet packet) จะเป็นฟังก์ชัน ในการดีมอดูเลต ซึ่งทำหน้าที่เหมือนฟิลเตอร์ที่เหมาะสมกับสัญญาณที่ส่ง โดยจะได้ค่าสัญญาณต่อ สัญญาณรบกวน (SNR) ออกมา ในการชิงโครโมโซมจะมีวิธีการที่ง่ายกว่าแบบพีเอสเค หรือ เอฟเอส เคแบบไม่รวมนัยและเอเอสเค โดยเราต้องการการชิงโครโมโซมสัญญาณเพียง .1 ครั้งสำหรับช่อง สัญญาณทั้งหมด

วิธีการที่พูดมานี้มีประโยชน์ที่ได้ก็คือ สมรรถนะของการใช้ย่านความถี่ดีขึ้น ได้ค่าสัญญาณ ต่อสัญญาณรบกวนที่เอาที่พูดที่ดีและง่ายต่อการชิงโครโมโซม แต่ข้อเสียคือ ระบบการมอดูเลตจะมี ความซับซ้อน ระบบการมอดูเลตแบบหลายฟังก์ชัน ต้องการระบบการมอดูเลตแบบพัลส์ส่งไปที่ค่า ความถี่ต่างๆกันและทำงานไปพร้อมๆกัน

เวฟเล็ตแบบจำกัดย่านความถี่(Band limited wavelet function)

ถ้ากำหนดให้ลำดับ $h_n, n \in z$

$$h_n < c(1+n^2)^{-1}, \quad c > 0$$

$$|\hat{h}(0)| = 1$$

$$|\hat{h}(w)|^2 + |\hat{h}(w+\pi)|^2 = 1 \quad (3.41)$$

$$|\hat{h}(w)| \geq \frac{\sqrt{2}}{2} \quad \text{for } |w| < \pi/2$$

เมื่อ $\hat{h}(w)$ เป็นค่าการแปลงฟูเรียร์ของลำดับ h_n
ฟังก์ชันสเกลลิงของ h_n จะสามารถหาได้จาก h_n ดังสมการ

$$\phi(t) = \sqrt{2} \cdot \sum_n h_n \cdot \phi(2t-n)$$

$$\hat{\phi}(w) = \prod_{j=1}^{\infty} \hat{h}(w/2^j) \quad (3.42)$$

และฟังก์ชันเวฟเล็ทหาค่าได้ดังสมการ

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \cdot \sum_n g_n \cdot \phi(2t-n)$$

$$\hat{\varphi}(w) = e^{w/2} \cdot \hat{h}^* \left(\frac{w+\pi}{2} \right) \prod_{j=2}^{\infty} \hat{h}(w/2^j) \quad (3.43)$$

โดยที่ $g(n) = (-1)^n \cdot h_{-n}$ และ * คือ complex conjugate

เมื่อเราให้ $|\hat{h}(w)| = 0$ สำหรับ $2\pi/3 < |w| < \pi$ และจากสมการ (4) และ (5) เราจะได้

$$|\hat{h}(w)| = 0, \quad \text{for } \frac{2\pi}{3} < |w| < \pi \quad (3.44)$$

$$\hat{\phi}(w) = \begin{cases} \hat{h}(w/2), & |w| < \frac{4\pi}{3} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\hat{\phi}(w) = \begin{cases} \hat{h}(w/4) \cdot e^{w/2} \cdot \hat{h} \left(\frac{w+\pi}{2} \right), & \frac{2\pi}{3} < |w| < \frac{8\pi}{3} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขสมการที่ (3.44) ทำให้ฟังก์ชันสเกลลิงและเวฟเล็ตเป็นค่าจำกัดในช่วงความถี่ใดๆ ถ้าแบนวิธของฟังก์ชันเวฟเล็ตเป็น 1 แบนวิธของสเกลลิงฟังก์ชันเป็น 2/3 แต่แบนวิธของฟังก์ชันทั้งสองรวมกันมีค่าเป็น 4/3 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1+2/3 เนื่องจากเกิดการเลื่อมทับกันในทางโดเมนความถี่

ทั้งฟังก์ชันสเกลลิงและเวฟเล็ต สามารถใช้เป็นคลื่นสัญญาณสำหรับการส่งสัญญาณแบบแบนด์ไวด์ทั้งคู่ ถ้าใช้แค่เวฟเล็ตส่งข้อมูล 1 ตัวอย่าง ในแต่ละช่วงเวลาก็ไม่คุ้ม ดังนั้นจึงเลือกใช้สเกลลิงและเวฟเล็ตในเวลาเดียวกัน เพื่อสร้างสองช่องสัญญาณ แล้วรวมกันส่งออกไปที่ช่องสัญญาณจะเพิ่มสมรรถนะความจุของช่องสัญญาณได้ 3/2 เท่า เนื่องจากมันเลื่อมทับกันความเป็นเชิงตั้งฉากกันของทั้งสองทำให้ ที่ทางด้านรับสามารถแยกลักษณะที่แตกต่างของทั้งคู่ออกด้วยฟังก์ชันเดิมอูเลตของมันเอง

ฟังก์ชันเวฟเล็ตแบบแพ็คเกจ (wavelet packet function)

จากการใช้ขบวนการทำซ้ำ (iteration) ดังสมการที่ (3.42) และ (3.43) เราสามารถหาค่าฟังก์ชันเวฟเล็ตแบบแพ็คเกจ $\varepsilon_k(t)$ ได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}\xi_{2k'}(t) &= \sqrt{2} \sum_n h_n \cdot \xi_k(2t-n) \\ \xi_{2k'+1}(t) &= \sqrt{2} \sum_n g_n \cdot \xi_k(2t-n)\end{aligned}\tag{3.46}$$

k' คือค่า index ที่หาได้จาก

$$k' = a_0' + a_1' \cdot 2 + a_2' \cdot 2^2 + \dots\tag{3.47}$$

และความถี่ index ของฟังก์ชันเวฟเล็ตแบบแพ็คเกจ คือ

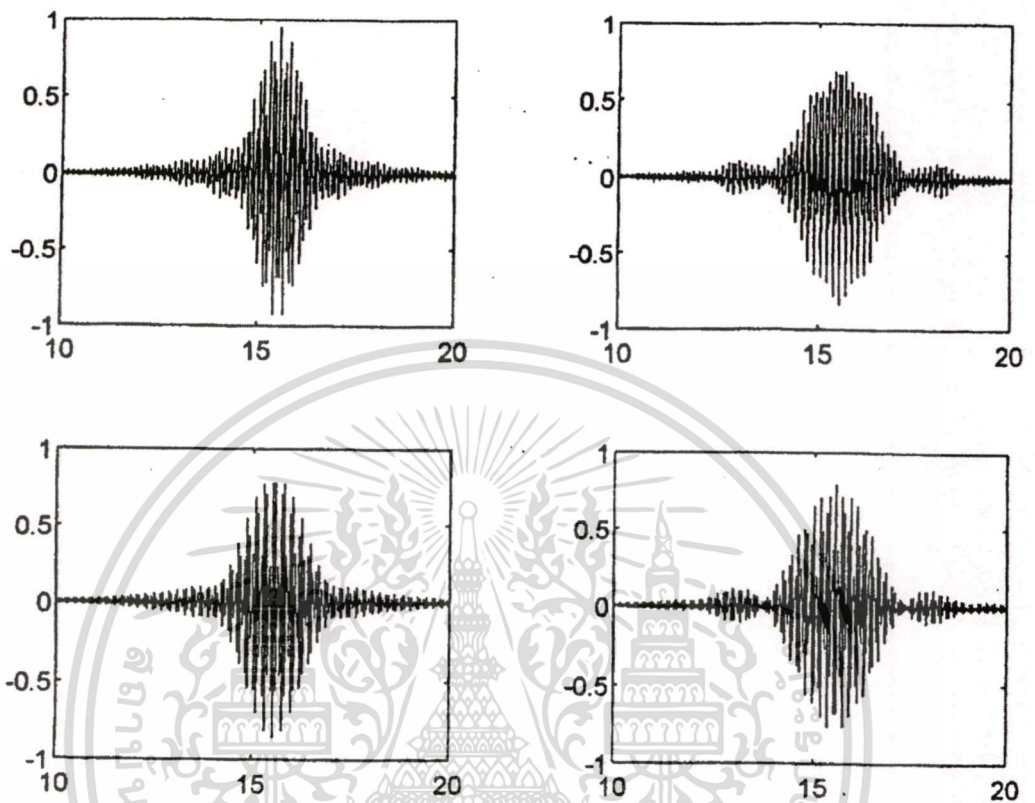
$$\begin{aligned}k &= a_0 + a_1 \cdot 2 + a_2 \cdot 2^2 + \dots \\ a_i &= a_i' \oplus a_{i+1}' \oplus a_{i+2}' \oplus \dots\end{aligned}\tag{3.48}$$

\oplus คือ exclusive or

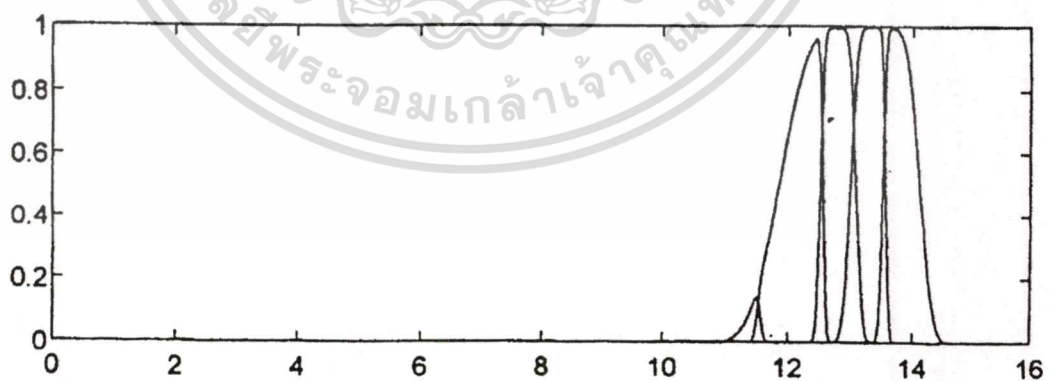
ฟังก์ชันเวฟเล็ตแบบแพ็คเกจที่ได้จากสมการที่ (3.46) จะมีความเป็นเชิงตั้งฉากกัน ดังสมการที่(3.40) เมื่อเราเลือกฟังก์ชันเวฟเล็ตแบบแพ็คเกจ $\varepsilon_k(t)$ $k \in \{1, 2, \dots, k = 2^p\}$ เป็นคลื่นในการส่งที่ K ช่องสัญญาณ และใช้วิธีการแบบหลายช่องสัญญาณ(multi channel) จึงสามารถส่งข้อมูล K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างต่อวินาทีด้วยแบนวิดท์ทั้งหมดเป็น $2K/3$ รูปที่ 3.10 แสดงเวฟเล็ดแบบแพ็คเกต 4 เซต ที่ได้จากสมการ (3.46) และค่าการแปลงฟูเรียร์ของมัน



รูปที่ 3.9 ฟังก์ชันเวฟเล็ดแบบแพ็คเกต 4 รูปแบบ



รูปที่ 3.10 การแปลงฟูเรียร์ของฟังก์ชันเวฟเล็ดแบบแพ็คเกต

3.7 การใช้เวฟเลตในระบบสเปกตรัม

ระบบที่ให้สัญญาณแบบใหม่ซึ่งสามารถสร้างได้จากโครงสร้างของเวฟเลตที่มีคุณสมบัติเชิงตั้งฉากกันที่มีการสเปกตรัมสัญญาณออกไปในโดเมนของเวฟเลตโดยใช้รหัสแบบพีเอ็น จะได้พัลส์ที่มีความกว้างทั้งด้านเวลาและความถี่

3.7.1 สัญญาณพัลส์ที่มีความเป็นเชิงตั้งฉากกัน

พัลส์ $\varphi_m(t)$, $m=0,1,\dots,M-1$ ที่มีความเป็นเชิงตั้งฉากกันบนช่วงคาบเวลา $T=MT_s$ ซึ่งเขียนได้เป็น เซตของพัลส์ที่มีความเป็นเชิงตั้งฉากกันดังสมการ

$$s_0(t) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m \varphi_m(t) \quad (3.49)$$

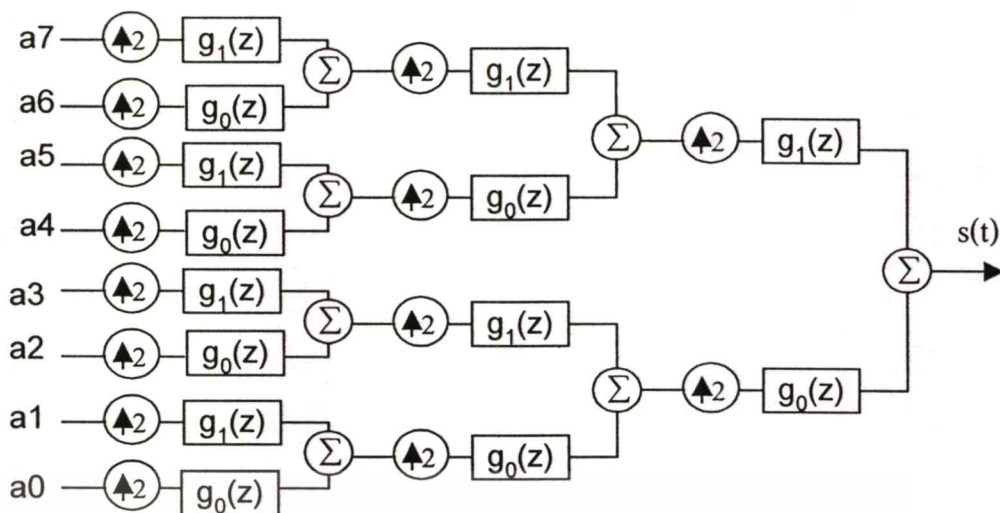
โดยที่ T_s เป็นคาบเวลาของสัญลักษณ์ เมื่อมอง $\varphi_m(t)$ เป็นช่องสัญญาณและ a_m เป็นคลื่นพาห์ จะได้เวกเตอร์ $A = [a_0, a_1, \dots, a_{M-1}]$ เป็นสัญลักษณ์หลัก โดยที่ข้อมูลเบสแบนด์ที่จะทำการส่งจะเขียนได้เป็น

$$s(t) = \sum_{-\alpha}^{\alpha} \sum_{m=0}^{M-1} a_{n,m} \varphi_m(t-nT) = \sum_{n=-\alpha}^{\alpha} \underline{A}_n^T \varphi(t-nT) \quad (3.50)$$

ที่เครื่องรับจะต้องเตรียมค่าช่วงเวลาไว้ให้ตรงกับช่วงเวลาที่ส่ง และสัญญาณที่ทางด้านรับ จะทำการสหสัมพันธ์กับ $\varphi(t-nT)$ เพื่อทำการดีเทคสัญลักษณ์ที่ n ที่เวลา nT จะใช้พัลส์ที่เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง

3.7.2 พัลส์ที่มีความเป็นเชิงตั้งฉากจากฟิลเตอร์เวฟเลตซึ่งได้จากโครงสร้างต้นไม้ (Full Tree)

โครงสร้างแบบต้นไม้แบบสังเคราะห์จะทำการสร้างพัลส์เวฟเลต $\varphi_m(t)$ ที่จะใช้เป็นพัลส์พื้นฐาน(Basis pulse) แสดงได้ดังรูปที่ (3.11) ซึ่งในรูปจะมีทั้งหมด 3 ระดับ โดยทั่วไปโครงสร้างต้นไม้ที่มีจำนวนระดับเป็น S จะมีอินพุตเป็น $M=2^S$ ดังนั้นรูปนี้จะมีอินพุตทั้งหมด 2^3 อินพุต เมื่อใส่อินพุตที่โหนด m เป็น 1 และที่โหนดอื่นเป็น 0 จะได้พัลส์แบบเวฟเลตที่ m ซึ่งแทนด้วย $\varphi_m(t)$



รูปที่ 3.11 การสังเคราะห์สัญญาณพัลส์เวฟเกิดจากโครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตร

3.7.3 คุณสมบัติเชิงตั้งฉากสองชั้น (Double Orthogonal)

จากรูปที่ (3.11) สามารถเขียนผลตอบสนองต่อพัลส์ (Impulse response) ของอินพุตโหนดที่ m ได้เป็นดังสมการ

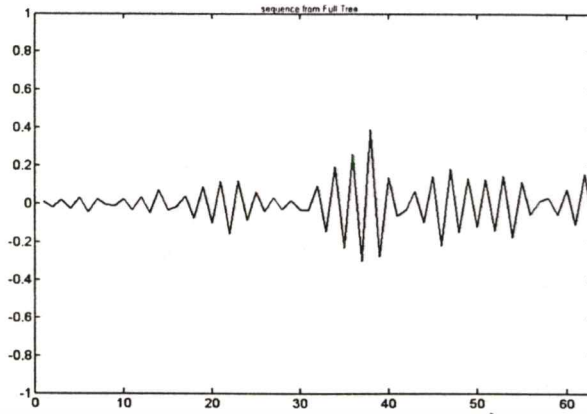
$$\varphi_i(t), i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (3.51)$$

ฟิลเตอร์ต้นแบบ g_0 สามารถเลือกให้เป็น ฟิลเตอร์แบบคูบิซึ หรือแบบอื่นๆ ดังนั้นเซตของพัลส์ทั้งหมดที่ได้ สามารถแสดงความเป็นเชิงตั้งฉากกันได้ดังสมการ

$$\langle \varphi_i(t), \varphi_k(t) \rangle = \delta_{ik} \quad i, k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (3.52a)$$

$$\langle \varphi_i(t), \varphi_i(t-nT) \rangle = \delta_n \quad \text{for all } n \quad (3.52b)$$

สัญญาณที่ได้จากโครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตรดังรูปที่ (3.12)



รูปที่ 3.12 สัญญาณที่ได้จากเวฟเล็ด โครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตร

ระบบซีดีเอ็มเอ็็นจะต้องใช้รหัสที่มีคุณสมบัติเชิงตั้งฉากกับผู้ใช้อื่น ระบบ FDMA ใช้สัญญาณไซน์ความถี่ต่างกันในแต่ละช่องสัญญาณ เพื่อให้ผู้ใช้ไม่เกิดการรบกวนกับช่องสัญญาณอื่น อย่างไรก็ตามการส่งสัญญาณออกไปแบบมีการเจาะจงย่านความถี่ในการส่งจะสามารถเกิด narrowband interference และง่ายต่อการดักจับสัญญาณ และเกิดการแทรกสอดได้ ส่วนในระบบโคเดอเรดิชั่น ใช้ความเป็นเชิงตั้งฉากของรหัสพีเอ็น แต่ก็มีข้อเสียคือระบบ FDMA เราจะอธิบายถึงระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแยกความต่างทางรหัส โดยใช้สัญลักษณ์แบบเวฟเล็ดซึ่งมีความเป็นเชิงตั้งฉากกัน ซึ่งจะสามารถกำจัดสัญญาณการรบกวนแถบแคบ

3.7.4 การเข้าถึงหลายทางแบบแยกความแตกต่างด้วยสเกล

ทฤษฎีของเวฟเล็ดทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ป็นรหัสที่มีความเป็นเชิงตั้งฉากกัน ที่เกิดจากการเลื่อนฟังก์ชันฟังก์ชันเพียงฟังก์ชันเดียว เมื่อแทนเวฟเล็ดด้วย w ดังสมการ

$$w_{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} w\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.53)$$

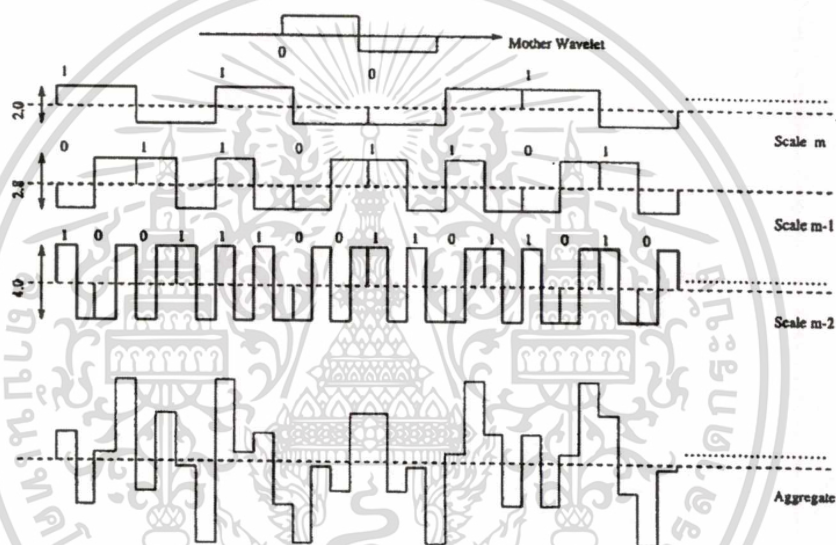
พิจารณาบิตข้อมูลแบบไบนารีทั้งหมด k บิตแทนด้วย m_k ที่มีค่า 0 หรือ 1 สำหรับ $k=0,1,\dots,K$ ถ้ามีเซตของ $w(2^k, n2^k T)$, $T > 0$ เป็นเซตของฟังก์ชันที่มีความเป็นเชิงตั้งฉากกันแล้วจะสามารถรวมสัญญาณ m_k เข้าด้วยกันได้เป็นสัญญาณซึ่งมีค่าดังสมการ

$$c(t) = \sum_{k=0}^K \sum_n m_k(n) w(2^k, n2^k T)(t) \quad (3.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งรูปแบบของสมการเป็นกระบวนการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณ C โดยใช้ฟังก์ชันเวฟเล็ต w ในทางปฏิบัติเพื่อให้มีสัจพจน์ของระบบดีขึ้นจะให้ค่าของบิตข้อมูลเป็น $+\lambda$ และ $-\lambda$

บิตข้อมูลเดิมจะถูกถอดรหัสจากสัญญาณที่รวมกันแล้วโดยการการแปลงแบบเวฟเล็ตด้วยฟังก์ชันเวฟเล็ตเดิม เพราะที่แต่ค่าสเกลและในแต่ละเวลาที่ทำการเลื่อนไป จะมีความเป็นเชิงตั้งฉากกัน ซึ่งระบบแบบเข้าถึงหลายทาง การแยกช่องสัญญาณจะใช้ค่าของสเกลเป็นตัวแยกความแตกต่าง เหมือนกับที่แยกด้วยค่าความถี่ เวลา หรืออื่นๆ สังเกตว่าค่าการเลื่อนและการสเกลของเวฟเล็ตไม่ ต้องมีคุณสมบัติความเป็นเชิงตั้งฉาก ประสิทธิภาพจะดีขึ้นถ้าเซตของฟังก์ชันเวฟเล็ตสำหรับ m และ n มีค่าเฟสใกล้เคียงกัน ตัวอย่างสัญญาณเป็นดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การแสดงลำดับของบิตข้อมูลโดยใช้เวฟเล็ตแบบฮาร์ทีสเกลต่างกัน

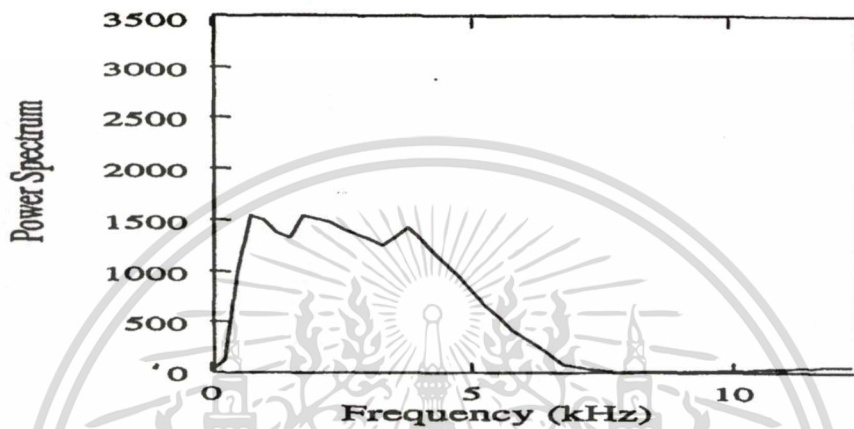
3.7.5 การกำจัดสัญญาณรบกวนในระบบการสื่อสาร

ค่าฟังก์ชันเวฟเล็ตมีหลายชนิดซึ่งค่าที่ต่างกันไปจะให้ค่าความถี่ของสัญญาณ C ซึ่งเป็นสัญญาณที่ทำการส่งออกไปยังช่องสัญญาณแตกต่างกันออกไป ถ้าเราทราบคุณสมบัติของข้อมูล m_k จะสามารถหาค่าความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของสัญญาณ C ได้ในเทอมของการแปลงฟูเรียร์ของ w

$$\phi_{ss}(w) = \sum_m \phi_{ii}(2^m w) |\hat{w}(2^m w)|^2 \quad (3.55)$$

โดยที่ $\phi_{ii}(w)$ เป็นค่าความหนาแน่นพลังงานเชิงสเปกตรัมของบิตข้อมูลทั้งหมด

การสเปคข้อมูลออกไปโดยเวฟเล็ดทำให้ยากต่อการตีเทคจากผู้ใช้อื่นได้โดยการเลือกเวฟเล็ดที่ทำให้ข้อมูลที่ส่งมีคุณสมบัติทางความถี่คล้ายกับสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร เวฟเล็ดที่มีคุณสมบัติ compactly supported ทางเวลาและมีค่าลดลงอย่างช้าๆ ในทางความถี่ เหมาะกับการสื่อสารที่มีการเข้ารหัสซึ่งทำให้ออกาสที่จะดักจับสัญญาณจากผู้อื่นได้มีค่าต่ำ ส่วนเวฟเล็ดที่มีการกระจายพลังงานของข้อมูลไปในแต่ละแถบความถี่ย่อย จะทำให้สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดแถบแคบได้ โดยแสดงได้ดังรูปที่ 3.14

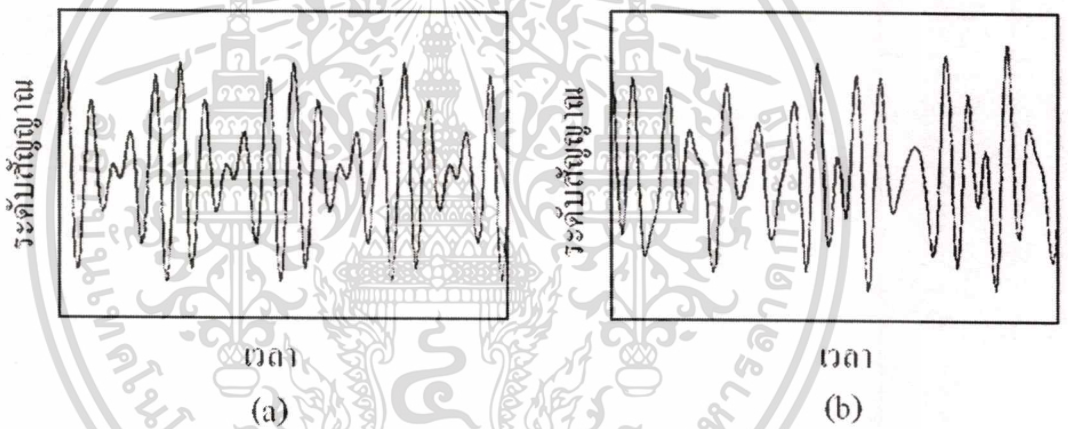


รูปที่ 3.14 ความถี่ของสัญญาณเบสแบนด์ที่ได้จากการสเปคข้อมูลออกไปโดยเวฟเล็ด

ที่น่าสนใจ คือความน่าเชื่อถือในการป้องกันข้อมูลของระบบ เมื่อข้อมูลถูกกระจายหรือส่งออกไป ผู้รับที่รู้ว่าส่งด้วยเวฟเล็ดชนิดใดจะสามารถรับและกู้คืนข้อมูลได้ง่าย แต่ผู้ที่ไม่รู้จะทำได้ยาก และการป้องกันเหล่านี้จะเพิ่มสรรณนะได้โดยการเปลี่ยนความถี่ของเวฟเล็ดในช่วงเวลาที่ผู้รับและผู้ส่งรู้กันทั้งสองฝ่ายซึ่งการเปลี่ยนความถี่ไปตามรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่ของผู้ใช้แต่ละคนจะอยู่ในรูปของการสเปคสเปกตรัมด้วยการใช้การกระโดดเปลี่ยนค่าสเกลของเวฟเล็ด

ช่องสัญญาณการจางหาย

เนื่องจากระบบการสื่อสารไร้สายทุกชนิดต้องใช้สื่อที่เป็นอากาศในการเชื่อมต่อกัน ดังนั้นจึงต้องมีการรับ-ส่ง สัญญาณผ่านอากาศ ซึ่งสัญญาณจะต้องผ่านสิ่งแวดล้อมต่างๆ ทั้งที่หยุดนิ่ง เช่น อาคาร บ้าน หรือกำแพง เป็นต้น และสิ่งแวดล้อมที่มีการเคลื่อนที่เช่น ต้นไม้ เป็นต้น สิ่งแวดล้อมต่างๆเหล่านี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ระดับสัญญาณ ในแต่ละจุดไม่คงที่ มีการแกว่งขึ้นๆลงๆ โดยการแกว่งของสัญญาณนี้เราเรียกว่า “การจางหาย” ซึ่งจะเกิดในลักษณะที่มีรูปแบบ หรือไม่มีรูปแบบก็ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยรูปที่ 4.1 (a) เป็นการจางหายของสัญญาณในลักษณะที่มีรูปแบบ และรูปที่ 4.1 (b) เป็น การจางหายของสัญญาณในลักษณะที่ไม่มีรูปแบบ



รูปที่ 4.1 รูปแบบของการจางหายของสัญญาณ

4.1 สาเหตุของการเกิดการจางหาย

ลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นจะเกิดตามลักษณะความยาวคลื่นของคลื่นพาห์ที่ใช้ในการกระจายสัญญาณ เนื่องจากสิ่งก่อสร้างต่างๆ ที่มนุษย์สร้างขึ้นมีขนาดที่ต่างกันถ้าสิ่งก่อสร้างเหล่านี้มีขนาดเท่ากับความยาวคลื่นของคลื่นพาห์ที่แพร่กระจาย จะทำให้การกระจายของคลื่นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น เกิดการกระจาย และการสะท้อนของคลื่น เป็นต้น ดังนั้นการวิเคราะห์ระดับสัญญาณจะต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมของการแพร่กระจายของคลื่นด้วย จากการแพร่กระจายของคลื่นในสภาพแวดล้อมต่างข้างต้น ทำให้เราสามารถแยกคลื่นที่เดินทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับได้เป็น 2 ประเภท คือ คลื่นตรง (Direct Wave) และ คลื่นสะท้อน (Reflected

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wave) เครื่องรับจะได้รับคลื่นตรงจากทิศทางเดียวและมีสัญญาณที่แรงที่สุด ส่วนคลื่นสะท้อน จะได้รับจากทุกทิศทางที่เข้ามาและมีสัญญาณที่อ่อนกว่า มีเฟสของคลื่นที่เหมือนกันและแตกต่างกัน ซึ่งจะเป็นการเสริมหรือหักล้างกับคลื่นตรง ทำให้สัญญาณที่ได้รับมีการแกว่งขึ้นๆลงๆ ที่เราเรียกว่า การจางหายของสัญญาณ

4.2 คุณสมบัติของช่องสัญญาณการจางหาย

4.2.1 การแกว่งขึ้นๆลงๆของกรอบคลื่นและเฟส

กรอบคลื่นและเฟสของสัญญาณที่รับ ได้จะเกิดการแกว่งขึ้นๆลงๆเมื่อสัญญาณมีการผ่านการจางหายระหว่างการส่ง โดยในการมอดูเลตแบบร่วมนัย ผลกระทบจากการผ่านการจางหายที่เกิดขึ้นกับเฟสนั้น จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงอย่างรุนแรง ถ้าไม่มีการชดเชยสัญญาณที่เครื่องรับ จึงทำให้ในการวิเคราะห์ระบบที่ใช้การมอดูเลตในการสื่อสารส่วนใหญ่ จะตั้งสมมติฐานไว้ว่า ผลกระทบที่มีต่อเฟสอันเนื่องมาจากการจางหายจะไม่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง ที่มักจะถูกเรียกว่า การคิมมอดูเลตแบบร่วมนัยในอุดมคติ ส่วนการมอดูเลตแบบไม่ร่วมนัย เครื่องรับไม่จำเป็นต้องใช้เฟสในการคิมมอดูเลต ทำให้การเปลี่ยนแปลงของเฟสอันเนื่องมาจากการจางหาย จึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบที่ใช้การมอดูเลตแบบร่วมนัยในอุดมคติและแบบไม่ร่วมนัย ในช่องสัญญาณการจางหาย จึงใช้การเปลี่ยนแปลงทางสถิติของกรอบคลื่นเท่านั้น

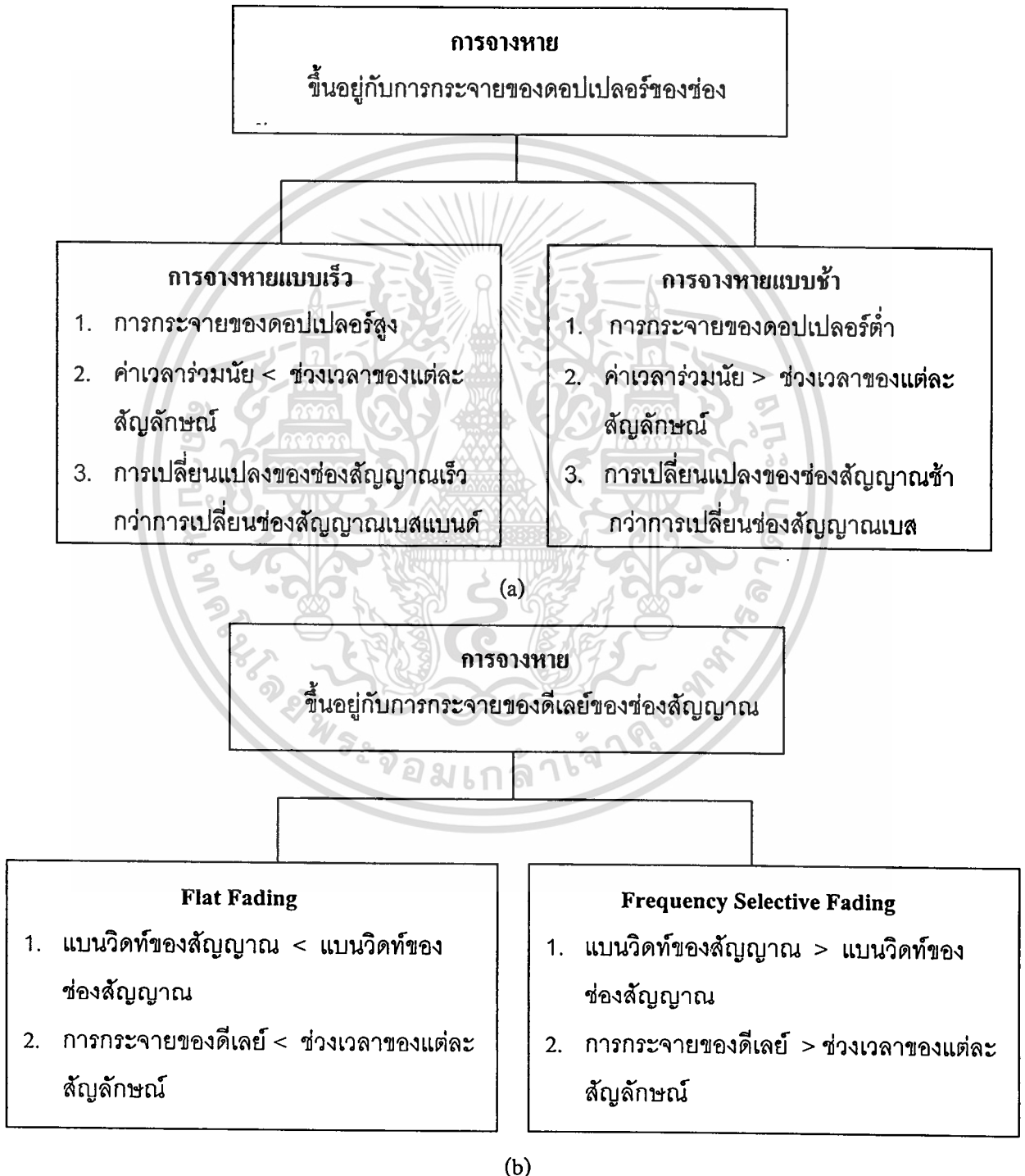
4.2.2 การจางหายแบบช้าและแบบเร็ว

การแบ่งระหว่างการจางหายแบบช้าและแบบเร็วมีความสำคัญมากกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของช่องสัญญาณการจางหาย และการประเมินประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารที่ผ่านช่องสัญญาณเหล่านี้ ซึ่งการแบ่งนี้จะเกี่ยวข้องกับค่าเวลาร่วมนัย (Coherent Time) T_c ของช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่กระบวนการการจางหายเกิดสหสัมพันธ์ โดยค่าเวลาร่วมนัยนี้จะสัมพันธ์กับค่าการกระจายของดอปเปลอร์ของช่องสัญญาณ (Doppler Spread) f_d โดยที่

$$T_c = \frac{1}{f_d}$$

โดยที่เราจะพิจารณาว่าเป็นการจางหายแบบช้า ถ้าช่วงเวลาของแต่ละสัญญาณ T_s มีค่าน้อยกว่าค่าเวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณ T_c และจะเป็นการจางหายแบบเร็วถ้า ช่วงเวลาของแต่ละสัญญาณ T_s มีค่ามากกว่าค่าเวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณ T_c ซึ่งในการจางหายแบบช้าระดับของการจางหายจะมีผลกระทบต่อสัญญาณลักษณะหลายๆสัญญาณลักษณะต่อเนื่องกันซึ่งจะทำให้เกิดความผิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาตที่สูง ขณะที่การจางหายแบบเร็ว จะเกิดการกระทบกระเทือน จากสัญญาณลักษณะหนึ่งไปอีก สัญญาณลักษณะหนึ่ง ซึ่งถ้าเครื่องรับที่ใช้เป็นแบบที่ทำการตัดสินใจบนพื้นฐานของของการสังเกตค่า สัญญาณที่รับได้บนช่วงเวลาของสัญญาณ 2 ช่วงหรือมากกว่า จะทำให้การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณการจางหายจากช่วงสัญญาณหนึ่งกับช่วงสัญญาณถัดไปมีความสำคัญมาก โดยรูปที่ 4.2(a) แสดงถึงการแบ่งการจางหายโดยอาศัยการกระจายของคอปเพลอร์ของช่องสัญญาณ



รูปที่ 4.2 การแบ่งชนิดของการจางหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การจางหายแบบ Frequency-Flat และ Frequency Selective

Frequency Selectivity เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของช่องสัญญาณการจางหาย โดยถ้าส่วนประกอบเชิงสเปกตรัมของสัญญาณที่ส่งออกไป ถูกกระทบในรูปแบบเดียวกัน เราจะเรียกว่าเป็นการจางหายแบบ Frequency Nonselective หรือ Frequency-Flat ซึ่งกรณีนี้จะเกิดขึ้นกับระบบที่มีแถบความถี่แคบ (Narrowband System) ที่แบนวิidth์ของสัญญาณที่ส่งออกไปมีค่าน้อยกว่าแบนวิidth์ร่วมนัยของช่องสัญญาณ (Coherent Bandwidth) f_c ซึ่งจะสามารถวัดได้จากช่วงความถี่ที่กระบวนการการจางหายถูกสหสัมพันธ์ โดยค่าแบนวิidth์ร่วมนัยของช่องสัญญาณจะสัมพันธ์กับการกระจายของดีเลย์สูงสุด (Maximum Delay Spread) τ_{max} เป็น

$$f_c = \frac{1}{\tau_{max}}$$

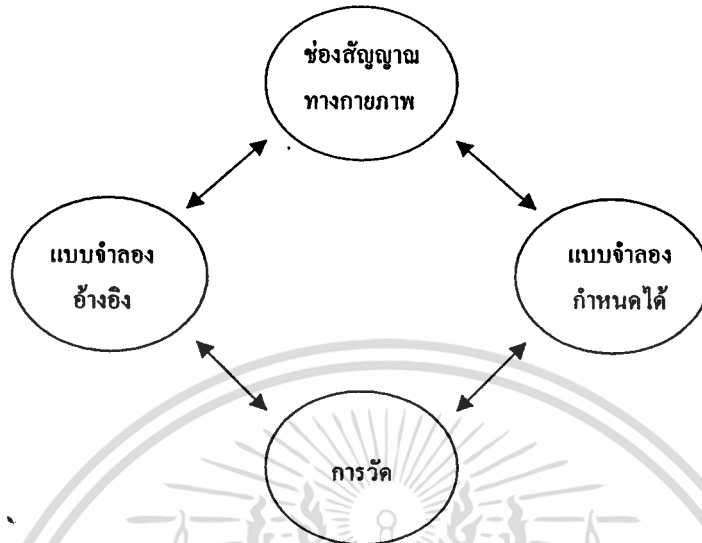
แต่ถ้าส่วนประกอบเชิงสเปกตรัมของสัญญาณที่ส่งออกไปถูกกระทบโดยอัตราขยายของแอมพลิจูดและการเลื่อนของเฟสที่แตกต่างกันเราจะเรียกว่าเป็นการจางหายแบบ Frequency Selective ซึ่งมักจะเกิดขึ้นกับระบบที่มีช่วงแถบความถี่กว้าง ซึ่งมีค่าแบนวิidth์ที่ใช้ในการส่งมากกว่าค่าแบนวิidth์ร่วมนัยของช่องสัญญาณ โดยรูปที่ 4.2 (b) จะแสดงถึงการแบ่งการจางหายโดยอาศัยการกระจายของดีเลย์ของช่องสัญญาณ

4.3 แบบจำลองของช่องสัญญาณการจางหาย (Model of Fading Channel)

4.3.1 แบบจำลองของช่องสัญญาณแบบเรลลีย์และไรเซียน

วิธีการสร้างแบบจำลองในปัจจุบันมีความสำคัญอย่างมาก โดยวิธีการเหล่านี้ไม่เพียงแต่สามารถที่จะเป็นแบบจำลองคุณสมบัติทางสถิติลำดับที่หนึ่ง เช่น ค่าฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ของแอมพลิจูดบนช่องสัญญาณได้เท่านั้น ยังสามารถที่จะพิจารณาค่าคุณสมบัติทางสถิติลำดับที่สอง เช่น ค่า level-crossing rate ได้ด้วย ซึ่งแบบจำลองเหล่านี้มีหลักการที่สำคัญอยู่ 2 ประการ ประการแรกจะเป็นการหาแบบจำลองช่องสัญญาณที่สามารถอธิบายได้ด้วยกระบวนการเชิงสถิติ (Stochastic Process) ในอุดมคติ ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในการเป็นแบบจำลองช่องสัญญาณแบบ Frequency Selective และ Frequency Flat โดยเราเรียกแบบจำลองชนิดนี้ว่า แบบจำลองอ้างอิง (Reference Model) ส่วนประการที่ 2 จะเป็นการหาแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นเพียงพอที่จะใช้แทนช่องสัญญาณซึ่งอยู่หลายรูปแบบ ที่เราเรียกว่าแบบจำลองกำหนดได้ (Deterministic Model) โดยรูปที่ 4.3 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างช่องสัญญาณทางกายภาพ

แบบจำลองอ้างอิงและแบบจำลองกำหนดได้ ซึ่งคุณภาพของแบบจำลองอ้างอิงและแบบจำลองกำหนดได้ จะประเมินจากค่าคุณสมบัติต่างๆกับค่าที่ได้จากการวัดจากช่องสัญญาณจริง



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องสัญญาณทางกายภาพ แบบจำลองอ้างอิง แบบจำลองกำหนดได้ และค่าที่ได้จากการวัด

เมื่อสัญญาณถูกส่งไปยังเครื่องรับ สภาพแวดล้อมแต่ละแบบจะทำให้สัญญาณเกิดการหักเห เบี่ยงเบน และกระจายออกเป็นหลายทิศทาง ซึ่งถ้าเส้นทางสัญญาณตรงถูกบดบังโดยวัตถุบางอย่างแบบจำลองที่เหมาะสมควรจะเป็นแบบเรลีย์ แต่ถ้าสัญญาณที่รับได้มีส่วนที่เป็นเส้นทางสัญญาณตรงควรจะอ้างอิงโดยแบบจำลองไรเซชัน โดยสามารถอธิบายกระบวนการสร้างแบบจำลองทั้ง 2 นี้ ได้จากผลรวมส่วนประกอบต่างๆของสัญญาณที่รับได้ $\mu(t)$ ซึ่งอยู่ในรูป

$$\mu(t) = \mu_1(t) + j\mu_2(t) \quad (4.1)$$

โดยที่ $\mu_1(t)$ และ $\mu_2(t)$ เป็นค่าจากกระบวนการสุ่มแบบเกาส์ (Gaussian random process) กำหนดให้ค่าความแปรปรวนของ $\mu_i(t)$ มีค่า $Var[\mu_i(t)] = \sigma_0^2$ ($i = 1, 2$) และค่าความแปรปรวนของ $\mu(t)$ เป็น $Var[\mu(t)] = 2\sigma_0^2$ จากนั้นให้ค่าเส้นทางสัญญาณตรงของสัญญาณที่รับได้เป็น

$$m(t) = m_1(t) + jm_2(t) = \rho e^{j(2\pi f_p t + \theta_p)} \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ρ , f_ρ และ θ_ρ เป็นค่าแอมพลิจูด ความถี่คอปเพลอร์ และ เฟสของเส้นทางสัญญาณตรง ตามลำดับ ซึ่งสัญญาณที่รับได้เป็นผลรวมของส่วนที่กระจาย และส่วนที่เป็นเส้นทางสัญญาณตรง โดยผลรวมนี้จะเป็น

$$\mu_\rho(t) = \mu_{\rho_1}(t) + j\mu_{\rho_2}(t) = \mu(t) + m(t) \quad (4.3)$$

แบบจำลองเรลีย์ที่ไม่มีเส้นทางสัญญาณตรงจะมีค่าเป็นค่าสัมบูรณ์ของสมการ (4.1) จะได้

$$\zeta(t) = |\mu(t)| = |\mu_1(t) + j\mu_2(t)| \quad (4.4)$$

และค่าสัมบูรณ์จากสมการ (4.3) จะเป็นแบบจำลองไรซ์

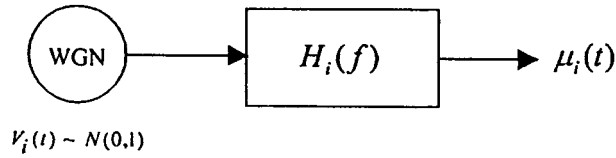
$$\xi(t) = |\mu_\rho(t)| = |\mu(t) + m(t)| \quad (4.5)$$

สังเกตว่าการหาแบบจำลองเรลีย์และไรซ์จะได้จากกระบวนการสุ่มแบบเกาส์ ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ในการหากระบวนการสุ่มแบบเกาส์มีอยู่ 2 วิธีคือ การใช้ฟิลเตอร์ และวิธีการไรซ์ โดยรูปที่ 4.4 แสดงถึงการใช้ฟิลเตอร์ เมื่อกำหนดให้สัญญาณรบกวนเกาส์ขาว (White Gaussian Noise) $V_i(t)$ เป็นอินพุตของฟิลเตอร์แบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-invariant filter) ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอน $H_i(f)$ เป็นแบบอุดมคติ คือสามารถใช้ได้กับทุกค่าการตอบสนองทางความถี่ ซึ่งถ้า $V_i(t) \sim N(0,1)$ เราจะได้ค่า $\mu_i(t)$ ที่เอาพุตของฟิลเตอร์เป็นกระบวนการสุ่มแบบเกาส์

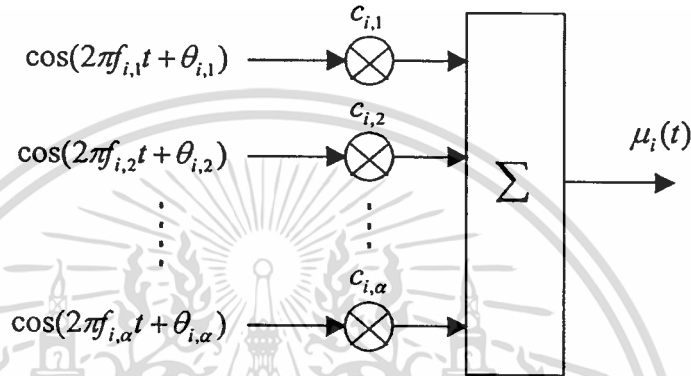
รูปที่ 4.5 แสดงถึงหลักการของวิธีการไรซ์ โดยมีพื้นฐานมาจากผลรวมค่าน้ำหนักของฟังก์ชันฮาร์โมนิกจำนวนไม่จำกัด โดยฟังก์ชันฮาร์โมนิกเหล่านี้จะมีช่วงห่างของความถี่เท่าๆกัน และและมีเฟสแบบสุ่ม จากหลักการนี้จะทำให้ได้ $\mu_i(t)$ เป็น

$$\mu_i(t) = \lim_{N_i \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^{N_i} c_{i,n} \cos(2\pi f_{i,n}(t) + \theta_{i,n}) \quad , (n = 1, 2, \dots, N_i) \quad (4.6)$$

โดยที่ $c_{i,n}$, $f_{i,n}$ และ N_i เป็น ค่าสัมประสิทธิ์คอปเพลอร์ ค่าความถี่คอปเพลอร์ และจำนวนของฟังก์ชันฮาร์โมนิกตามลำดับ ส่วน $\theta_{i,n}$ เป็นเฟสซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายตัวแบบ uniform



รูปที่ 4.4 การหา $\mu_i(t)$ โดยการใช้ฟิลเตอร์



รูปที่ 4.5 การหา $\mu_i(t)$ โดยวิธีการไรซ์

กระบวนการทั้ง 2 วิธีนี้เป็นกระบวนการแบบ stochastic แบบอุดมคติและสามารถใช้เป็นแบบจำลองอ้างอิงได้เท่านั้น เนื่องจากกระบวนการทั้ง 2 นี้มีข้อจำกัดที่ทำให้ไม่สามารถหาค่า $\mu_i(t)$ ที่ถูกต้องแน่นอนได้ โดยในการใช้ฟิลเตอร์ ค่าฟังก์ชันถ่ายโอน $H_i(f)$ จะต้องเป็นแบบอุดมคติ ส่วนวิธีการไรซ์ จำนวนของฟังก์ชันฮาร์โมนิก N_i จะต้องมีค่าไม่จำกัด ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการนำวิธีการไรซ์มาประยุกต์เพื่อให้ได้แบบจำลองของช่องสัญญาณการจางหาย ถ้าเรากำหนดให้จำนวนของฟังก์ชันฮาร์โมนิก N_i มีค่าจำกัดจากสมการ (4.6) จะได้กระบวนการการเชิงสถิติ เป็น

$$\hat{\mu}_i(t) = \sum_{n=1}^{N_i} c_{i,n} \cos(2\pi f_{i,n}(t) + \theta_{i,n}) \quad (4.7)$$

แบบจำลองของสมการ (4.7) แสดงในรูปที่ 4.6 โดยที่ $\hat{\mu}_i(t) \approx \mu_i(t)$ ก็ต่อเมื่อ $N_i \rightarrow \infty$ ซึ่งถ้าพิจารณา $\theta_{i,n}$ เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายตัวแบบ uniform จะได้กระบวนการกำหนดได้ $\tilde{\mu}_i(t)$ เป็น

$$\tilde{\mu}_i(t) = \sum_{n=1}^{N_i} c_{i,n} \cos(2\pi f_{i,n}t + \theta_{i,n}) \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

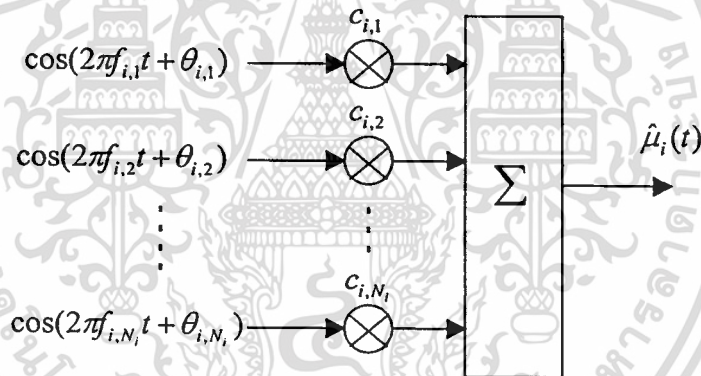
รูปที่ 4.7 แสดงถึงแบบจำลองของกระบวนการกำหนดได้ $\tilde{\mu}_i(t)$ โดยที่การเลือกค่าตัวแปร $c_{i,n}$, $f_{i,n}$, N_i และ $\theta_{i,n}$ ที่เหมาะสมจะมีผลทำให้ $\tilde{\mu}_i(t) \approx \mu_i(t)$ และจากสมการที่ 4.4 จะได้กระบวนการกำหนดได้ แบบเรลีย์ เป็น

$$\tilde{\zeta}(t) = |\tilde{\mu}(t)| = |\tilde{\mu}_1(t) + j\tilde{\mu}_2(t)| \quad (4.9)$$

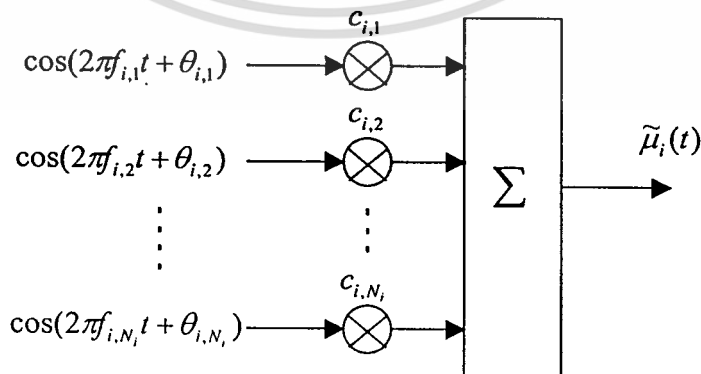
และค่า กระบวนการกำหนดได้แบบไรซ์ เป็น

$$\tilde{\zeta}(t) = |\tilde{\mu}_p(t)| = |\tilde{\mu}(t) + m(t)| \quad (4.10)$$

รูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงถึง โครงสร้างของกระบวนการกำหนดได้แบบเรลีย์ และกระบวนการกำหนดได้แบบไรซ์ ตามลำดับ

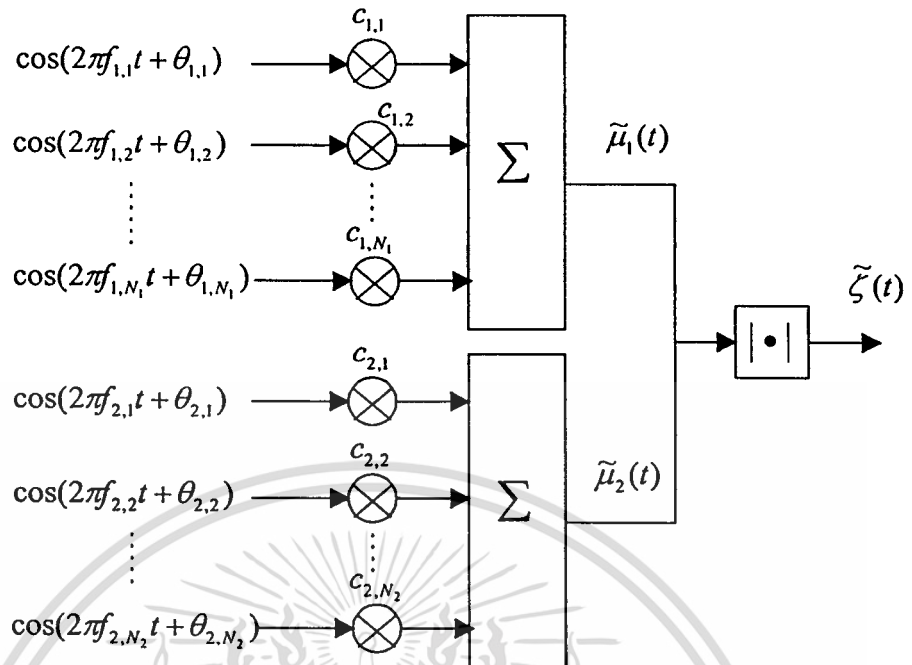


รูปที่ 4.6 แบบจำลองของกระบวนการเชิงสถิติ

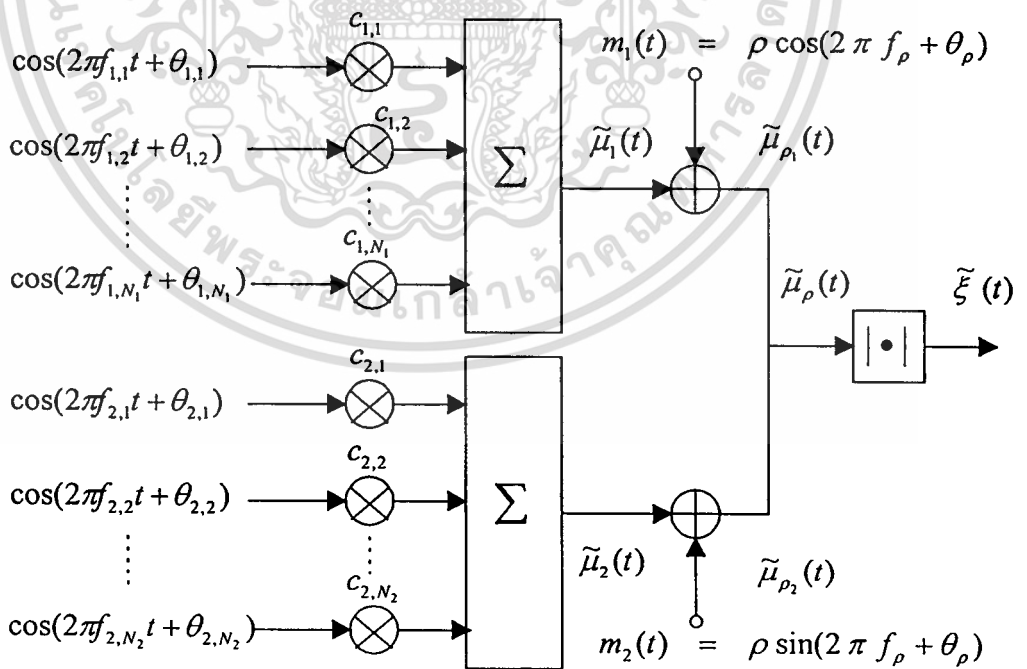


รูปที่ 4.7 แบบจำลองของกระบวนการกำหนดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แผนภาพการสร้างช่องสัญญาณการจางหายแบบเรลีย์



รูปที่ 4.9 แผนภาพการสร้างช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 แบบจำลองของช่องสัญญาณแบบนาคาгами-เอ็ม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์ผ่านทาง การจางหายแบบเรลีย์ในการหาแบบจำลองของช่องสัญญาณการจางหายแบบนาคาгами-เอ็ม โดยพิจารณาจาก รูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงถึงสภาพแวดล้อมของการจางหายที่เกิดขึ้น เมื่อที่เรากำหนดให้สัญญาณผ่านสภาพแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกระจายตัวออกเป็นหลายทิศทาง เหมือนกับสัญญาณผ่านการจางหายแบบเรลีย์ นอกจากนั้นยังกำหนดให้สัญญาณที่ผ่านการจางหายแบบเรลีย์นี้ผ่านสภาพแวดล้อมอีก จนได้สัญญาณสุดท้ายเป็นสัญญาณที่ผ่านการจางหายแบบนาคาгами-เอ็ม ซึ่งแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ ทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการจางหายแบบนาคาгами-เอ็มที่สอดคล้องกับการจางหายแบบเรลีย์โดยอาศัยค่าฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเพิ่ม ดังนั้นถ้าเราระบุให้สัญญาณที่ผ่านการจางหายแบบเรลีย์มีค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ตัวเองที่แน่นอน เราก็สามารถจะหาค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ตัวเองของสัญญาณที่ผ่านการจางหายแบบนาคาгами-เอ็มได้จากการเปลี่ยนรูปค่า ฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเพิ่ม ที่เปลี่ยนการจางหายแบบเรลีย์ให้เป็นการจางหายแบบนาคาгами-เอ็ม

แบบจำลองของช่องสัญญาณการจางหายแบบนาคาгами-เอ็ม แสดงในรูปที่ 4.10 โดยจะใช้แบบจำลองของการจางหายแบบเรลีย์ เพื่อหากรอบคลื่นและเฟสของการจางหายแบบเรลีย์ จากนั้นกำหนดให้ตัวแปรสุ่ม R แทนกรอบคลื่น และตัวแปรสุ่ม θ แทนเฟสที่สอดคล้องกับ R จะได้การเปลี่ยนรูปเป็น

$$u = F_{Ray}(r) = 1 - e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (4.11)$$

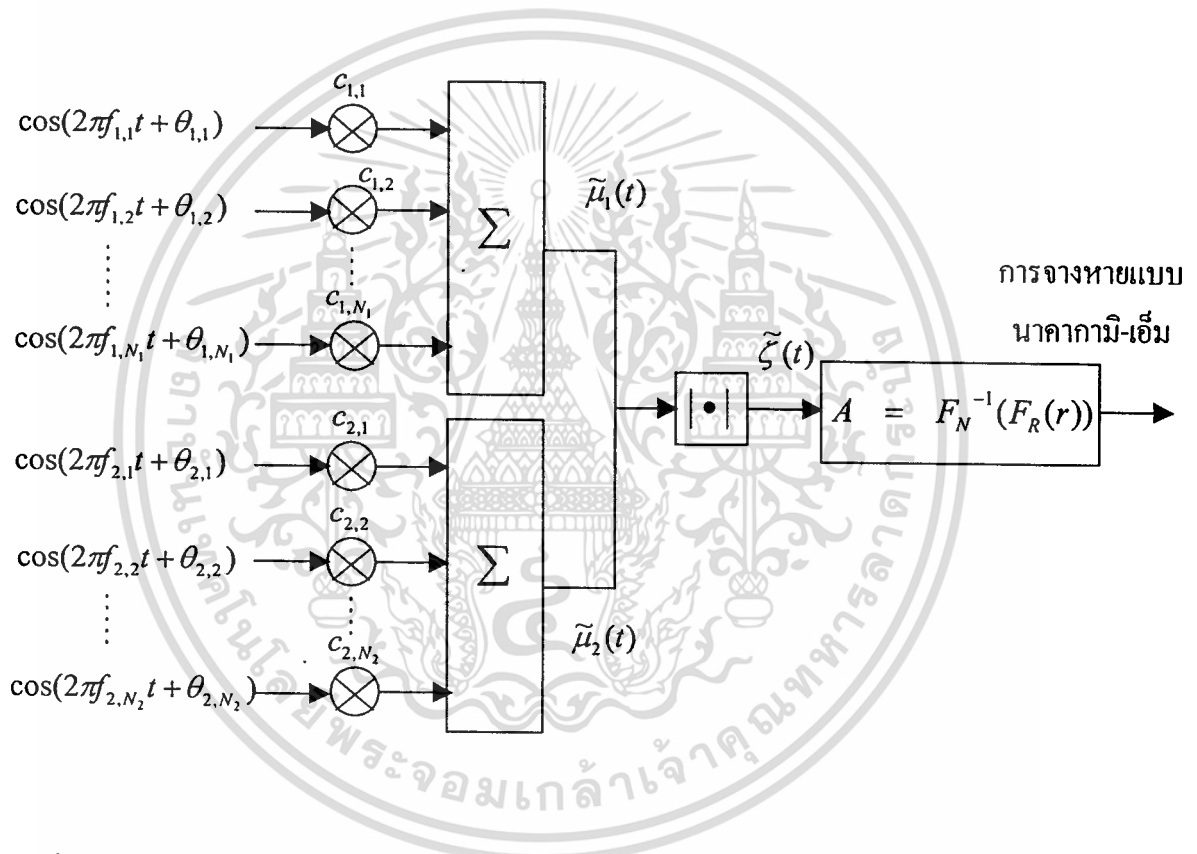
โดยที่ σ^2 แทนค่าโมเมนต์อันดับที่สองของตัวแปรสุ่ม R ($\sigma^2 = E[R^2]$) ซึ่งสมการที่ (4.11) จะทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรสุ่ม R ให้เป็น ตัวแปรสุ่มแบบสม่ำเสมอ (uniform random variable) ที่มีค่าอยู่ในช่วง $[0,1)$ ในส่วนของฟังก์ชันผกผันของค่าฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเพิ่มของการจางหายแบบนาคาгами-เอ็ม $F_R^{-1}(u)$ จะสามารถหาค่าที่เกี่ยวข้องได้โดย

$$F_R(x) = \int_0^{x(\mu)} \left[\frac{2 m^m t^{2m-1}}{\Gamma(m) \Omega^m} \right] e^{-\left(\frac{m}{\Omega}\right)t^2} dt \quad (4.12)$$

ซึ่งการเปลี่ยนรูปตัวแปรสุ่มแบบสม่ำเสมอ u โดยใช้ฟังก์ชันผกผันของค่าฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเพิ่ม $F_R^{-1}(u)$ นั้นผลที่ได้จะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเพิ่มเป็น $F(x)$ ดังนั้นจะได้

$$A = F_R^{-1}(u) \quad (4.13)$$

เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายตัวแบบนาคากามิ-เอมिंग สังกัดว่าแบบจำลองนี้จะเป็นการสร้างตัวแปรสุ่มแบบสมมาตรที่มีการกระจายตัวแบบนาคากามิ-เอมिंगจากตัวแปรสุ่มแบบเรลลีย์ โดยการใช้การเปลี่ยนรูปในสมการที่ (4.13) แทนที่จะสร้างโดยตรงจากตัวแปรสุ่มแบบสมมาตร ซึ่งการออกแบบนี้ทำให้ได้ค่าตัวแปรสุ่มแบบนาคากามิ-เอมिंगในสถานะสุดท้ายที่มีคุณสมบัติทางสหสัมพันธ์และคุณสมบัติทางสถิติที่เหมาะสม



รูปที่ 4.10 โครงสร้างของแบบจำลองช่องสัญญาณการจางหายแบบนาคากามิ-เอมिंग

ในการหาค่าตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายตัวแบบนาคากามิ-เอมिंग ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นนั้น จำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันผกผันของฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเรลลีย์ ของการจางหายแบบนาคากามิ-เอมिंग $F_R^{-1}(u)$ ซึ่งไม่มีค่าสมการสำเร็จรูปที่แน่นอน จึงได้มีการคิดวิธีในการประมาณค่าฟังก์ชันผกผันนี้ โดยอาศัยวิธีการของ Hasting [13] จะได้

$$G(\eta) = \eta + \frac{a_1\eta + a_2\eta^2 + a_3\eta^3}{1 + b_1\eta + b_2\eta^2} \quad (4.14)$$

โดยที่ η เป็นค่า ancillary variable ซึ่งมีค่าเป็นดังสมการ

$$\eta = \left(\sqrt{\ln \frac{1}{1-u}} \right) m$$

ค่า a_1, a_2, a_3, b_1 และ b_2 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และทำให้ $G(u) \approx F_R^{-1}(u)$ ส่วนค่า m เป็นตัวแปรของการแจกแจงแบบนาคากามิ-เอ็ม ตารางที่ 4.1 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้ที่สอดคล้องกับค่าตัวแปรของการแจกแจงแบบนาคากามิ-เอ็ม



ตารางที่ 4.1 ค่า a_1 , a_2 , a_3 , b_1 และ b_2 ที่สอดคล้องกับค่าตัวแปรของการจางหายแบบนาคามี-เอ็ม ที่ค่าต่างๆ

m	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2
0.65	-0.0828	-4.5634	-15.8819	63.1955	23.2981
0.75	-0.0547	-0.3679	-1.0336	6.2107	1.8533
0.85	-0.0336	0.1543	-0.4733	4.9250	1.2082
1.5	0.0993	0.0560	0.2565	0.5276	0.0770
2.0	0.1890	-0.0128	0.2808	-0.0809	0.0638
3.0	0.3472	-0.2145	0.2626	-0.3446	0.1690
4.0	0.4846	-0.4231	0.2642	-0.9729	0.2727
5.0	0.6023	-0.6238	0.789	-1.1798	0.3732
6.0	0.7139	-0.8305	0.3223	-1.3232	0.4558
7.0	0.8167	-1.0244	0.3761	-1.4233	0.5192
8.0	0.9260	-1.2350	0.4557	-1.4872	0.5628
10.0	1.1088	-1.6095	0.6015	-1.6046	0.6488

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การจำลองแบบและการวิเคราะห์ผลจากการจำลองแบบระบบ

5.1. การจำลองแบบระบบ

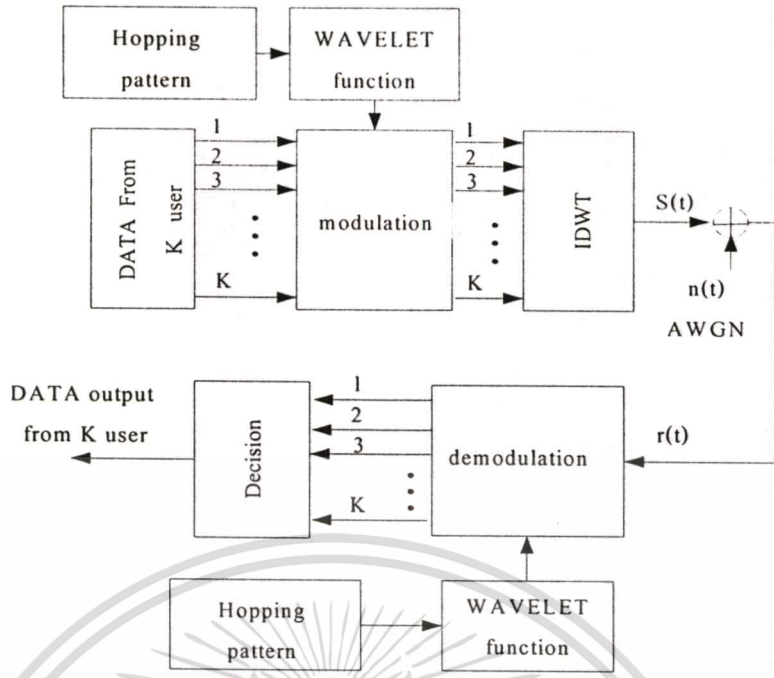
ทำการจำลองแบบระบบฟรีแควนซีฮอปปีงซีดีเอ็มเอด้วยวิธีการแบบมอนติคาร์โล โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบใน 3 วิธีการ คือ การใช้เวฟเล็ดโครงสร้างต้นแบบไม่สมมาตร การใช้เวฟเล็ดโครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตร และการใช้สัญญาณไซน์ ในการมอดูเลตสัญญาณในระบบ โดยการจำลองแบบจะเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบด้วยการหาค่าความผิดพลาดของบิตที่ค่ากำลังงานของบิตต่อสัญญาณรบกวนที่ค่าต่างๆ โดยพิจารณาการทำงานบนช่องสัญญาณ 4 แบบได้แก่ ช่องสัญญาณแบบ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก ซึ่งรวมถึงการเพิ่มสัญญาณแทรกสอดลงไปในระบบ ช่องสัญญาณแบบการจางหายแบบเรย์ลี ช่องสัญญาณการจางหายแบบโรเซินและช่องสัญญาณการจางหายแบบนาคากามิ โดยได้แยกการพิจารณาระบบออกเป็นสองกรณี คือ

1. ระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบตั้งฉากกัน ซึ่งการกระโดดเปลี่ยนค่าความถี่แต่ละครั้ง บิตข้อมูลของผู้ใช้ทุกคนจะถูกส่งออกไปด้วยความถี่แตกต่างกันและไม่เกิดการส่งที่ความถี่เดียวกัน (Hit) ของผู้ใช้แต่ละคน
2. ระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่ม ซึ่งจะทำบิตข้อมูลสามารถเกิดการส่งข้อมูลที่ความถี่เดียวกันได้หรือชนกันของผู้ใช้แต่ละคนได้

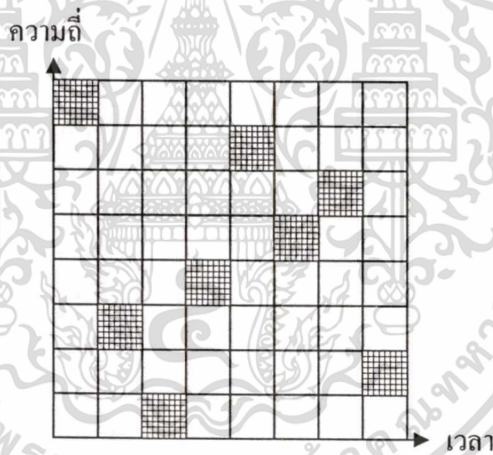
ระบบที่ทำการจำลองแบบประกอบด้วย

- ผู้ใช้ทั้งหมด 32 ผู้ใช้
- ความถี่ย่อยที่ใช้ในการฮอปมีค่า 32 ความถี่
- ใช้เวฟเล็ดแบบคูบิซี

ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานของระบบโดยรวมเป็นดังไดอะแกรมที่ 5.1(ก) และมีแผนผังแสดงการทำงานของกรจำลองแบบระบบเพื่อหาค่าอัตราความผิดพลาดของบิตเป็นดังรูปที่ 5.1(ค)



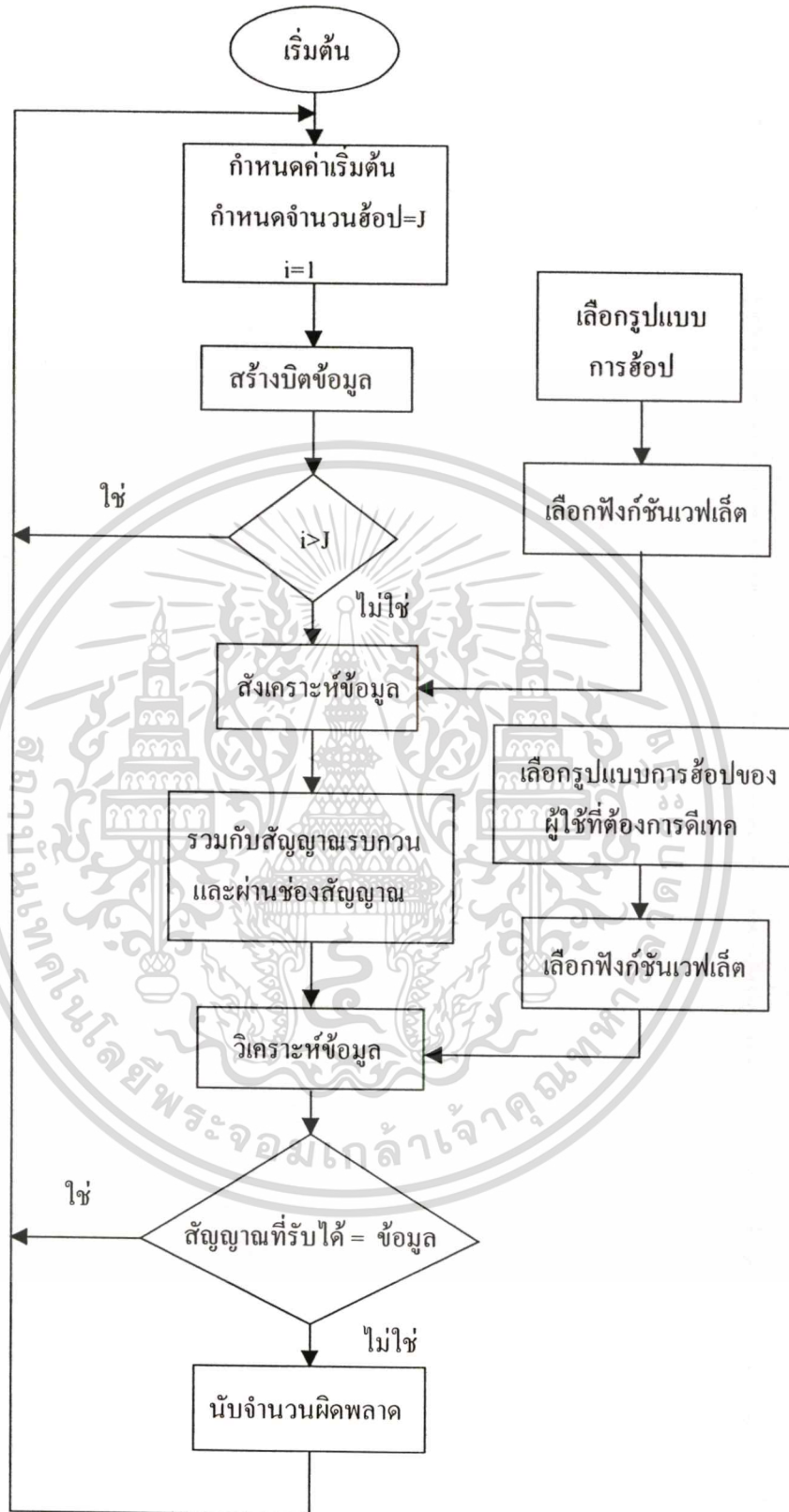
รูปที่ 5.1 (ก) บล็อกโคดแอมแกรมของการใช้เวฟเล็ตในระบบพรีควมซีสเอ็มพีเอสเปรดสเปกตรัม



รูปที่ 5.1 (ข) รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณของผู้ใช้ในระบบ

บิตข้อมูลจะถูกส่งเข้าไปในฟิลเตอร์สังเคราะห์เพื่อทำการกระบวนการแปลงเวฟเล็ตผกผันแบบไม่ต่อเนื่อง โดยช่วงเวลาและย่านความถี่ที่ส่งจะถูกกำหนดจากรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่ของผู้ใช้แต่ละคน แล้วทำการส่งข้อมูลเข้าไปยังช่องสัญญาณการจางหายรวมกับสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวกที่มีการแทรกสอดของสัญญาณรบกวนเข้ามาด้วย ที่ทางด้านเครื่องรับข้อมูลที่ได้อาจถูกนำมา เพื่อทำการกระบวนการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง และข้อมูลก็จะถูกเลือกโดยรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่โดยที่เครื่องรับและเครื่องส่งต้องซิงโครไนซ์กัน แล้วจึงส่งไปยังดีเท็คเตอร์ทำการตรวจจับค่าข้อมูลที่ได้รับและเปรียบเทียบกับบิตข้อมูลที่ส่งออกมาตอนแรก เพื่อทำการหาค่าอัตราความผิดพลาดของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



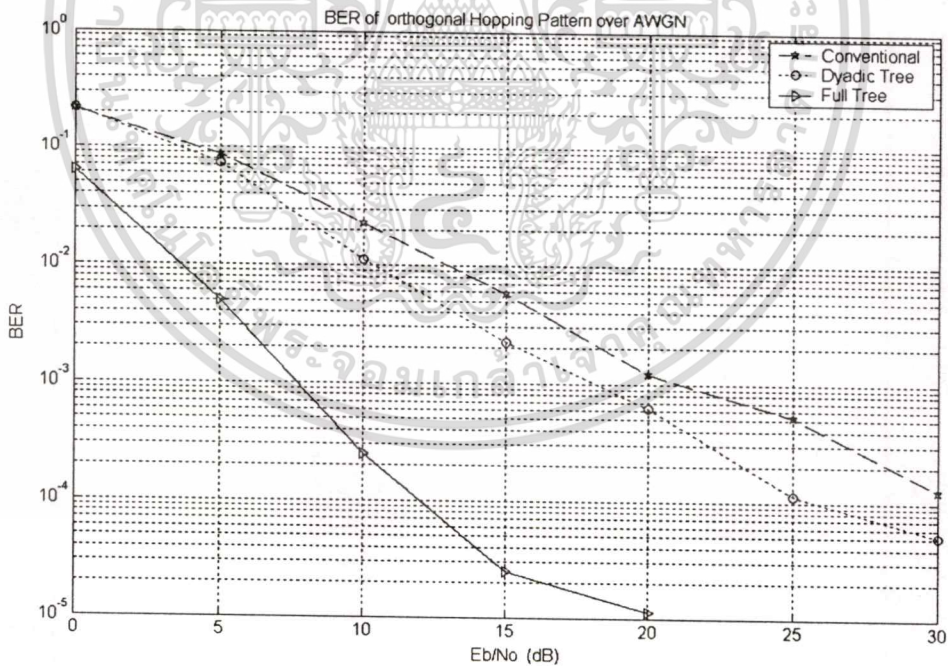
รูปที่ 5.1(ค) แผนผังแสดงการทำงานของการทำงานของระบบเพื่อหาค่าอัตราความผิดพลาดของบิต
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การวิเคราะห์ผลจากการจำลองแบบระบบ

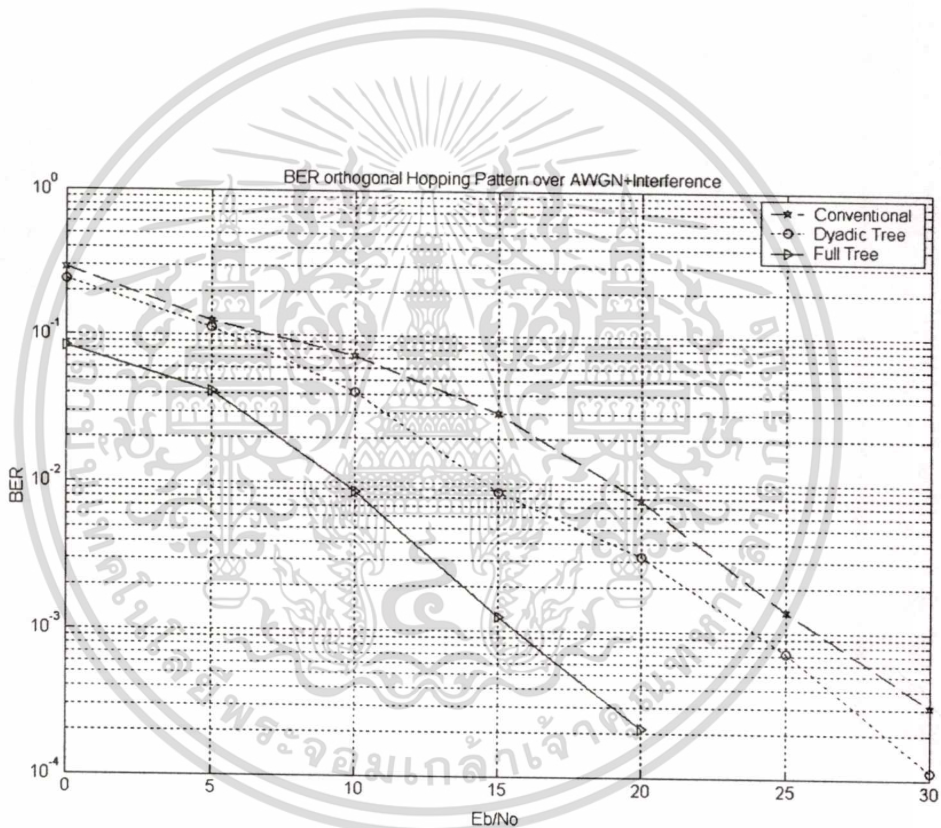
5.2.1 ผลการจำลองแบบระบบที่ผู้ใช้ทุกคนมีรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่ต่างกัน

1. ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นที่ทำงานบนช่องสัญญาณแบบ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 จะเห็นว่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลของระบบที่ใช้เวฟเล็ดที่ได้จากโครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตรจะมีค่าอัตราความผิดพลาดของบิตต่ำที่สุด และอัตราความผิดพลาดของบิตในระบบที่ใช้วิธีการมอดูเลตโดยใช้เวฟเล็ดจากโครงสร้างแบบไม่สมมาตรมีค่าต่ำกว่าระบบแบบเดิมที่ใช้สัญญาณไซน์ในการมอดูเลตสัญญาณ เมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลเป็น 10^{-3} จะเห็นว่าพลังงานของบิตข้อมูลต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ใช้เวฟเล็ดที่มีโครงสร้างแบบสมมาตรมีค่าเป็น 7 dB ซึ่งต่ำกว่าระบบแบบดั้งเดิมอยู่ 14 dB และระบบที่มีโครงสร้างแบบไม่สมมาตรมีค่าต่ำกว่าระบบแบบดั้งเดิมอยู่ 3 dB แสดงได้ว่าระบบซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณแบบ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก ที่ใช้เวฟเล็ดโครงสร้างต้นไม้ทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร มีประสิทธิภาพของระบบดีกว่าระบบเดิม



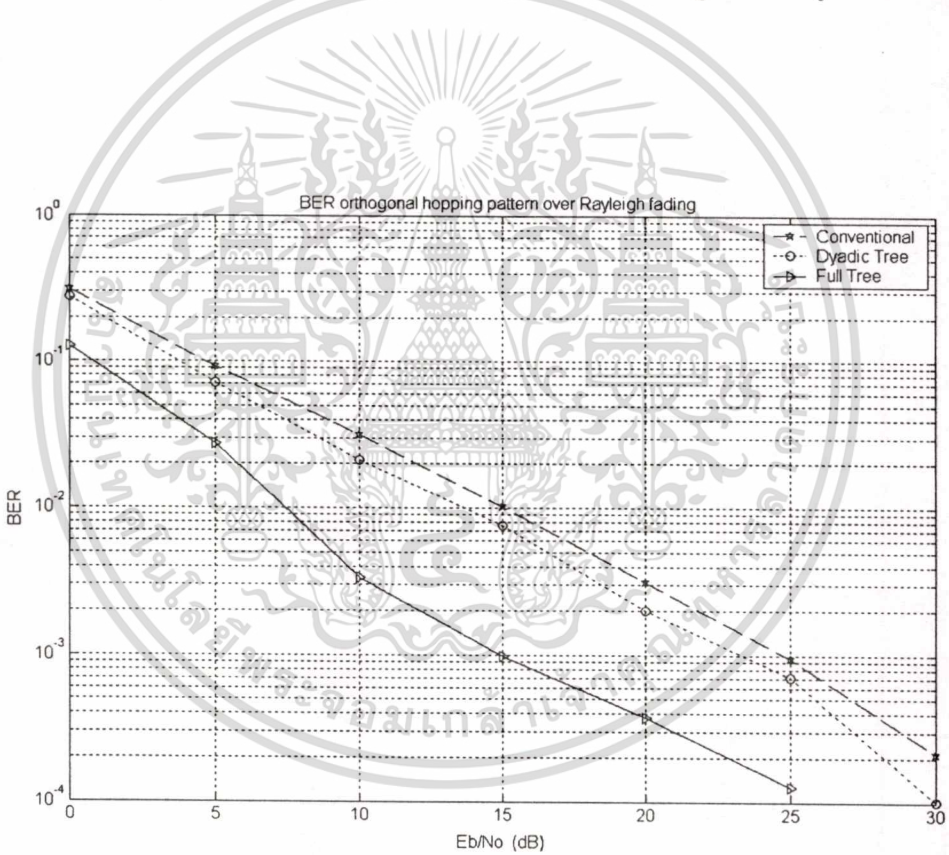
รูปที่ 5.2 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบต่างหากกัน ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก

2. ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลของระบบที่ทำงานบนช่องสัญญาณแบบ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก และเพิ่มค่าสัญญาณการแทรกสอดลงด้วย แสดงได้ดังรูปที่ 5.3 เมื่อทำการพิจารณาที่ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตเป็น 10^{-3} จะเห็นว่าพลังงานของบิตข้อมูลต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ใช้เวฟเล็ดที่มีโครงสร้างแบบสมมาตรมีค่าเป็น 16 dB ซึ่งต่ำกว่าระบบแบบดั้งเดิมอยู่ 10 dB และระบบที่มีโครงสร้างแบบไม่สมมาตรมีค่าต่ำกว่าระบบแบบดั้งเดิมอยู่ 2 dB แสดงได้ว่าระบบซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณแบบ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก ที่เกิดสัญญาณแทรกสอดเข้ามา ระบบที่ใช้เวฟเล็ดโครงสร้างต้นไม้ทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร มีประสิทธิภาพของระบบดีกว่าระบบเดิม

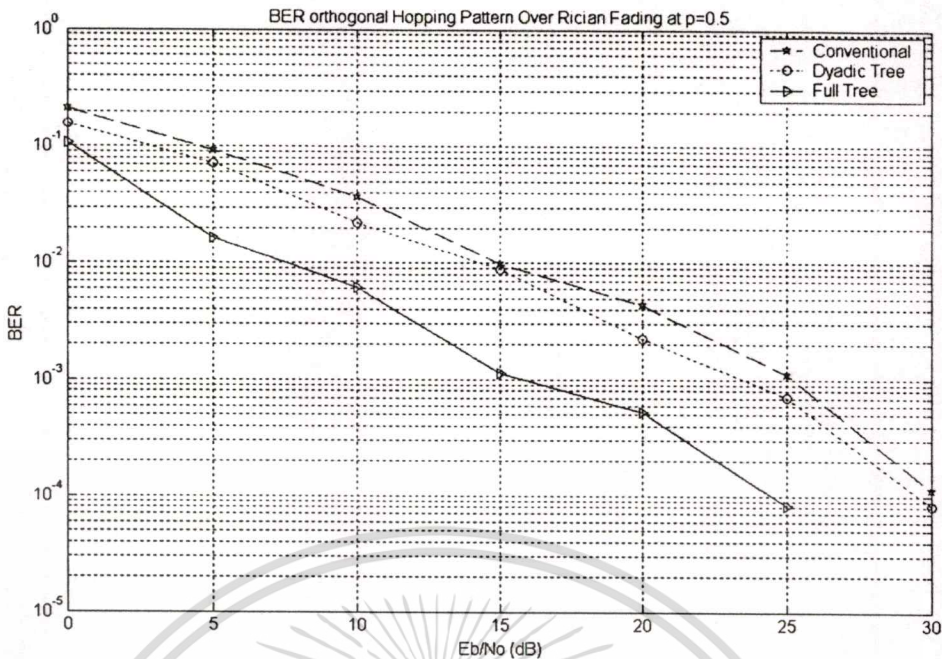


รูปที่ 5.3 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบตั้งฉากกัน ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวกที่มีการแทรกสอดจากสัญญาณแถบแคบ

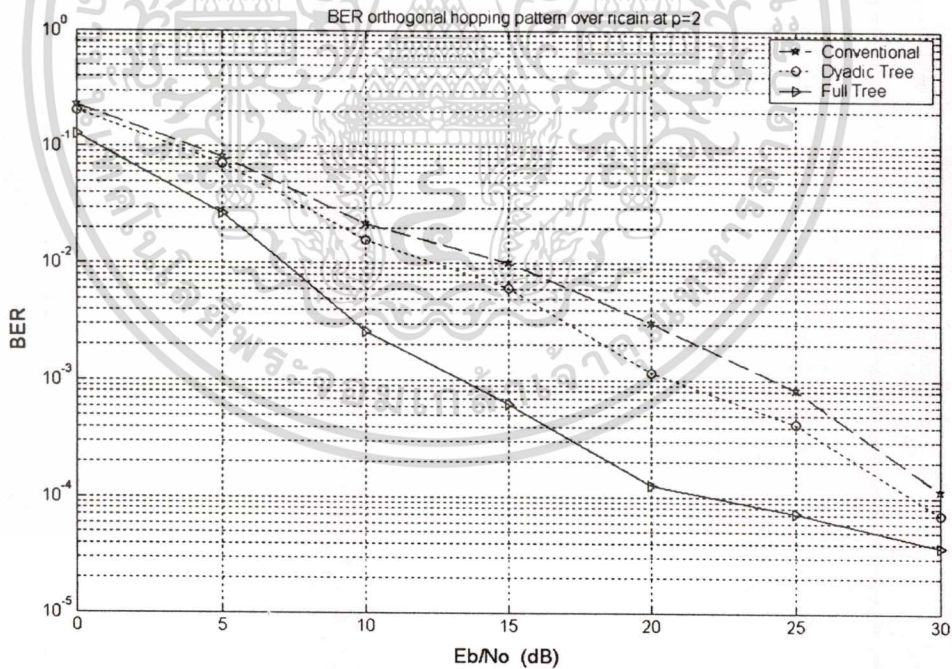
3. ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลของระบบที่ทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบเรย์ลี ซึ่งสัญญาณที่ส่งออกไปถูกลดทอนด้วยค่าแอมพลิจูดและเฟสจากช่องสัญญาณแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 เมื่อพิจารณาที่ค่าความผิดพลาดของบิตเป็น 10^{-3} จะพบว่าค่าพลังงานของบิตข้อมูลต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ใช้เวฟเล็ดที่มีโครงสร้างแบบสมมาตรมีค่าต่ำที่สุดซึ่งมีค่าต่ำกว่าระบบแบบเดิมอยู่ 10 dB และระบบที่มีโครงสร้างแบบไม่สมมาตรมีค่าต่ำกว่าระบบแบบดั้งเดิมอยู่ 2 dB แสดงได้ว่าระบบซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบเรย์ลี ระบบที่ใช้เวฟเล็ดโครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตรให้ประสิทธิภาพของระบบบิตที่ดีที่สุด และการใช้เวฟเล็ดทั้งโครงสร้างแบบต้นไม้ทั้งสองแบบให้ประสิทธิภาพของระบบบิตดีกว่าระบบเดิม เมื่อพิจารณาค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลเทียบกับระบบที่ทำงานบนช่องสัญญาณแบบ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก จะเห็นว่าการจางหายของช่องสัญญาณทำให้ประสิทธิภาพของระบบที่ใช้การมอดูเลตทั้ง 3 รูปแบบมีค่าลดลง



รูปที่ 5.4 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบตั้งฉากกัน ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบเรย์ลี



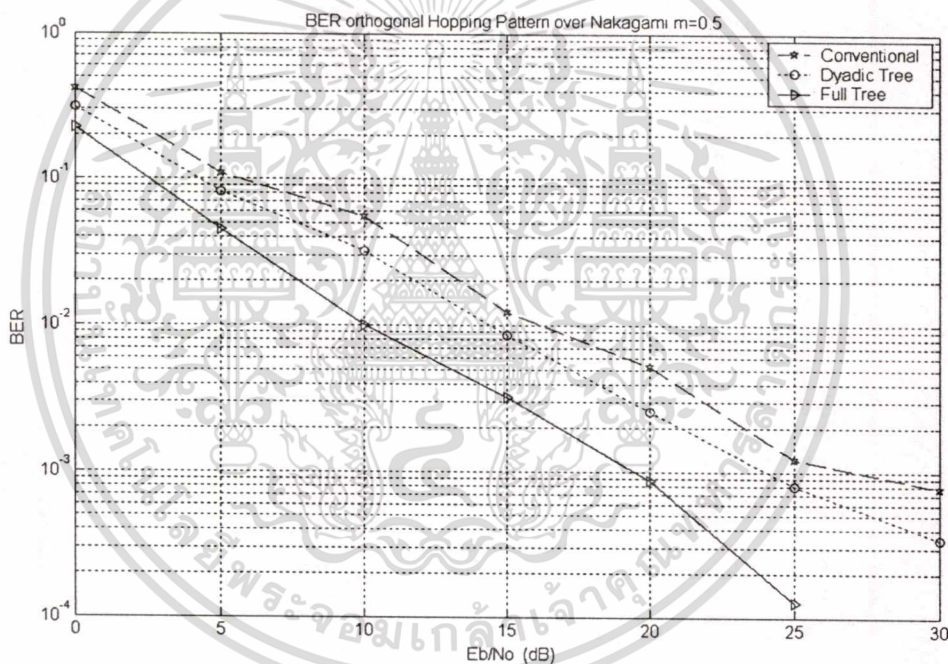
รูปที่ 5.5 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบตั้งฉากกัน ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซียนที่ค่าแอมพลิจูดของเส้นทางสัญญาณตรงมีค่าเป็น 0.5



รูปที่ 5.6 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบตั้งฉากกัน ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซียนที่ค่าแอมพลิจูดของเส้นทางสัญญาณตรงมีค่าเป็น 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เมื่อระบบทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซียนซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสัญญาณในแนวสายตา เป็น 0.5 และ 2 แสดงได้ดังรูปที่ 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ จะพบว่าค่าพลังงานของบิตข้อมูลต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ใช้เวฟเล็ดที่มีโครงสร้างแบบสมมาตรมีค่าต่ำที่สุด และระบบที่มีโครงสร้างแบบไม่สมมาตรมีค่าต่ำกว่าระบบแบบดั้งเดิม แสดงได้ว่าระบบซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซียน ระบบที่ใช้เวฟเล็ดโครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตรให้ประสิทธิภาพของระบบบิตที่ดีที่สุด และการใช้เวฟเล็ดทั้งโครงสร้างแบบต้นไม้ทั้งสองแบบให้ประสิทธิภาพของระบบดีกว่าระบบเดิม และเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราความผิดพลาดของช่องสัญญาณแบบไรเซียนจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนในแนวสายตาเป็น 2 จะมีค่าความผิดพลาดของบิตที่เกิดขึ้นต่ำกว่าระบบที่มีสัมประสิทธิ์การลดทอนแนวสายตาเป็น 0.5 แสดงได้ว่าเมื่อสัมประสิทธิ์การลดทอนแนวสายตาเป็นค่าเพิ่มขึ้นระบบจะมีประสิทธิภาพดีขึ้น เป็นไปตามทฤษฎีของการจางหายช่องสัญญาณ

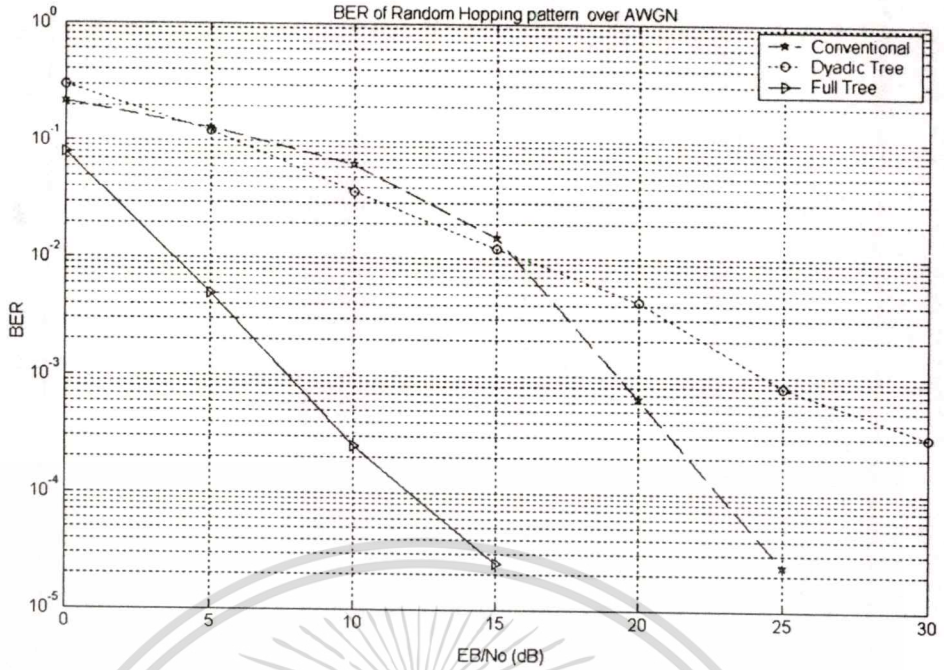


รูปที่ 5.7 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบตั้งฉากกัน ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบนาคากามิที่มีค่าตัวแปรการจางหายมีค่าเป็น 0.5

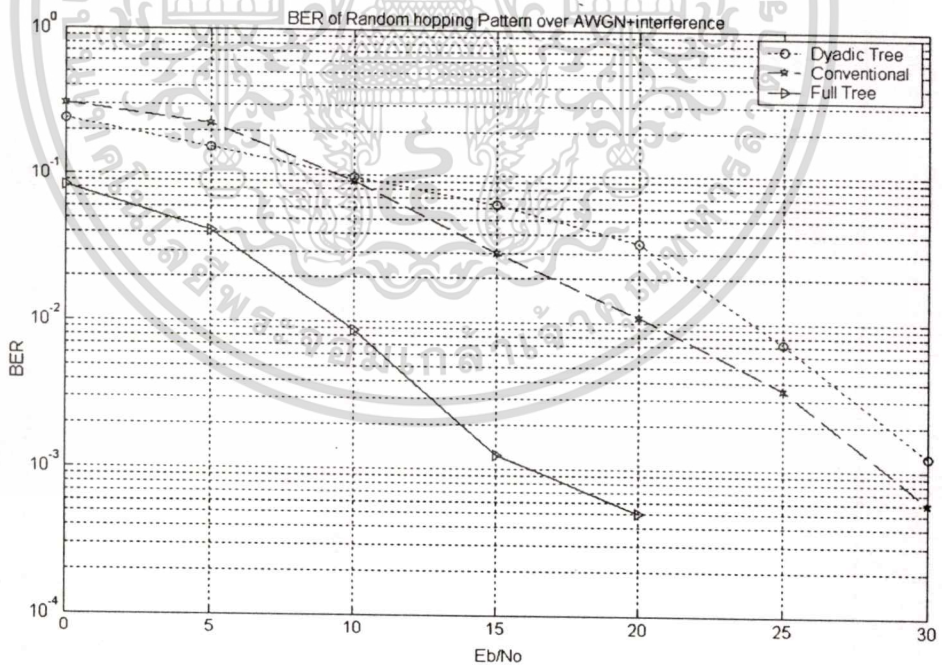
5. ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลของระบบเมื่อทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบนาตากามิ ที่ค่า m เป็น 0.5 แสดงได้ดังรูปที่ 5.7 จะพบว่าที่ค่าอัตราความผิดพลาดของระบบเป็น 10^{-3} จะพบว่าพลังงานของบิตต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ใช้เวฟเล็ด โครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตรมีค่าต่ำสุด และพลังงานของบิตของสัญญาณรบกวนของระบบแบบเดิมมีค่าสูงสุด แสดงให้เห็นว่าเมื่อระบบทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบนาตากามิที่ ค่า m เป็น 0.5 ระบบที่ใช้เวฟเล็ด โครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตรให้ประสิทธิภาพดีที่สุด และการใช้เวฟเล็ดใน โครงสร้างทั้งสองแบบให้ค่าประสิทธิภาพของระบบดีกว่าแบบเดิมด้วย

5.2.2 ผลการจำลองแบบระบบที่ผู้ใช้ทุกคนมีรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่ม

1. เมื่อทำการจำลองแบบระบบบนช่องสัญญาณแบบ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก จะได้อัตราความผิดพลาดของบิตแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 เมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตเป็น 10^{-3} ค่าพลังงานของบิตข้อมูลต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ใช้เวฟเล็ด โครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตรมีค่า 8 dB ระบบที่ใช้เวฟเล็ด โครงสร้างต้นไม้แบบ ไม่สมมาตรมีค่าเป็น 24 dB และระบบแบบเดิมมีค่าเป็น 19 dB ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบที่ใช้เวฟเล็ดแบบ โครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตรมีประสิทธิภาพดีที่สุด และระบบแบบเดิมที่ใช้ไซนัสในการมอดูเลตมีประสิทธิภาพดีกว่าระบบที่ใช้เวฟเล็ดแบบ โครงสร้างต้นไม้แบบไม่สมมาตร เมื่อเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดระหว่างระบบที่ใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่เชิงตั้งฉากกัน(รูปที่ 5.2) ระหว่างผู้ใช้ทุกคนกับระบบที่ใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่มซึ่งทำให้เกิดการใช้ย่านความถี่ซ้ำกันแล้ว จะพบว่าอัตราความผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดในระบบที่เกิดการใช้ย่านความถี่ชนกันจะมีค่ามากกว่าระบบที่ไม่เกิดการใช้ย่านความถี่ชนกัน และระบบที่ใช้เวฟเล็ด โครงสร้างต้นไม้แบบ ไม่สมมาตรมีประสิทธิภาพลดลงอย่างมากเมื่อเกิดการใช้ย่านความถี่เดียวกันของผู้ใช้แต่ละคน และเมื่อเพิ่มสัญญาณการแทรกสอดเข้ามาในระบบจะได้ค่าอัตราความผิดพลาดเป็นดังรูปที่ 5.9 ประสิทธิภาพของระบบจะออกมาในแนวทางเดียวกันแต่จะให้ค่าอัตราความผิดพลาดของระบบสูงกว่า



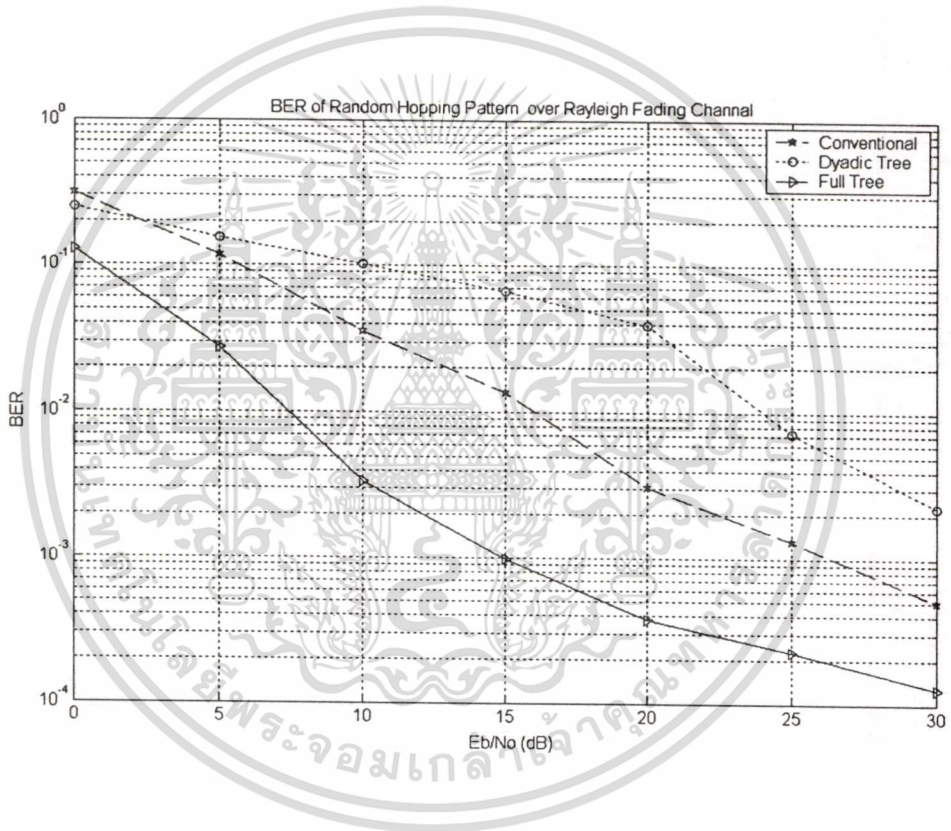
รูปที่ 5.8 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่ม ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก



รูปที่ 5.9 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่ม ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวกและการแทรกสอดจากสัญญาณแถบแคบ

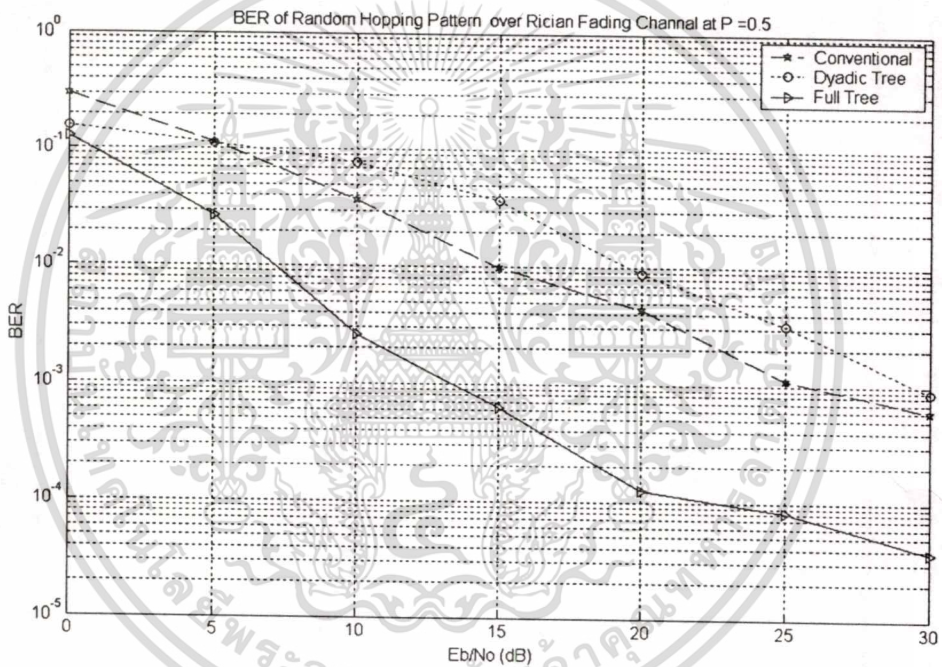
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลของการจำลองแบบระบบที่ทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบเรย์ลีแสดงได้ดังรูปที่ 5.10 เมื่อทำการพิจารณาที่ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลเป็น 10^{-3} จะเห็นว่าพลังงานของบิตข้อมูลต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ใช้เวฟเล็ด โครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตร ระบบที่ใช้เวฟเล็ด โครงสร้างต้นไม้แบบไม่สมมาตร และระบบที่ใช้การมอดูเลตแบบเดิมมีค่าเป็น 7 dB , 24 dB และ 16 dB ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบที่ใช้เวฟเล็ด โครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตรให้ประสิทธิภาพของระบบดีที่สุด แต่ในระบบที่ใช้เวฟเล็ด โครงสร้างต้นไม้แบบไม่สมมาตรระบบจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าระบบที่มีการมอดูเลตแบบเดิม เมื่อทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบเรย์ลี

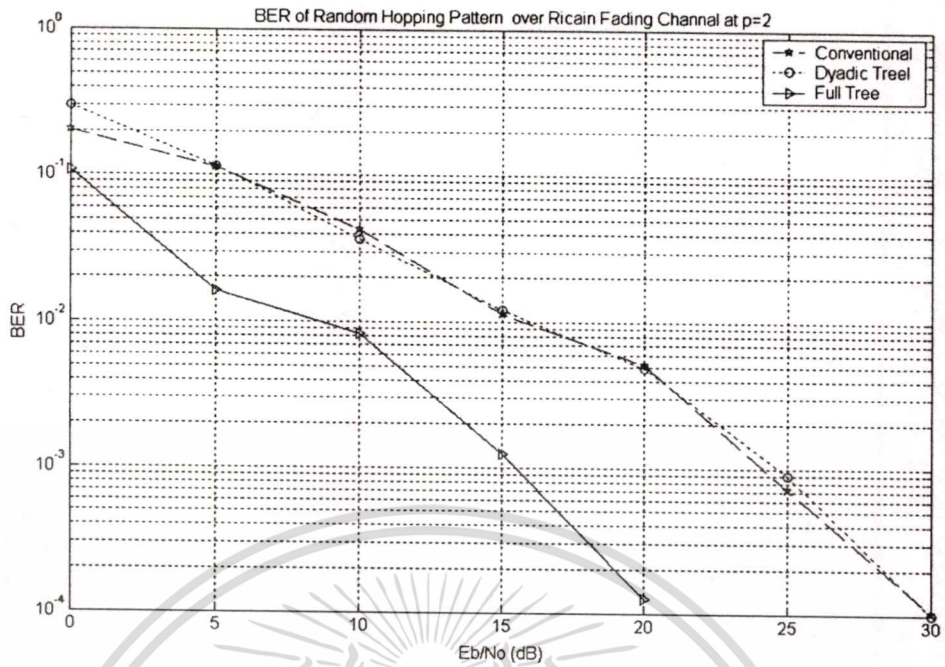


รูปที่ 5.10 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่ม ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบเรย์ลี

3. เมื่อทำการจำลองแบบระบบซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซียนที่ค่าแอมพลิจูดการลดทอนของสัญญาณในแนวสายตาเป็น 0.5 และ 2 แสดงได้ดังรูปที่ 5.11 และ 5.12 เมื่อทำการพิจารณาที่ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลเป็น 10^{-3} จะเห็นว่าพลังงานของบิตข้อมูลต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ใช้เวฟเล็ดโครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตร ระบบที่ใช้เวฟเล็ดโครงสร้างต้นไม้แบบไม่สมมาตร และระบบที่ใช้การมอดูเลตแบบเดิมมีค่าเป็น 14 dB, 29 dB และ 26 dB ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าระบบที่ใช้เวฟเล็ดโครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตรมีประสิทธิภาพดีที่สุด แต่ในระบบที่ใช้เวฟเล็ดโครงสร้างต้นไม้แบบไม่สมมาตรระบบจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าระบบที่มีการมอดูเลตแบบเดิม เมื่อทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซียน เมื่อค่าแอมพลิจูดการลดทอนของสัญญาณในแนวสายตามีค่าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของระบบจะดีขึ้น

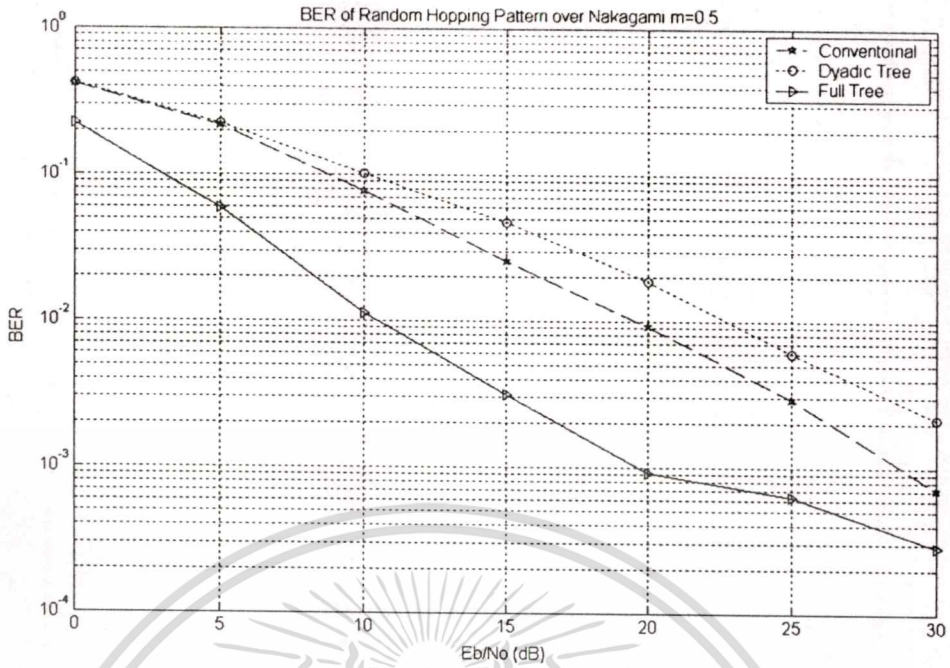


รูปที่ 5.11 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่มกัน ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซียนที่ค่าแอมพลิจูดของเส้นทางสัญญาณตรงมีค่าเป็น 0.5



รูปที่ 5.12 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่มกัน ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซียนที่ค่าแอมพลิจูดของเส้นทางสัญญาณตรงมีค่าเป็น 2

4. อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลของระบบที่ทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบนาตากามีที่ค่า $m=0.5$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.13 ที่ค่าอัตราความผิดพลาดเป็น 10^{-3} พลังงานของบิตข้อมูลต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ใช้เวฟเล็ด โครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตร ระบบที่ใช้เวฟเล็ด โครงสร้างต้นไม้แบบไม่สมมาตร และระบบที่ใช้การมอดูเลตแบบเดิมมีค่าเป็น 10 dB, 23 dB และ 20 dB ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าระบบที่ใช้เวฟเล็ด โครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตรมีประสิทธิภาพดีที่สุด แต่ในระบบที่ใช้เวฟเล็ด โครงสร้างต้นไม้แบบไม่สมมาตรระบบจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าระบบที่มีการมอดูเลตแบบเดิม



รูปที่ 5.13 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่มกัน ซึ่งทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบนาคากามิที่มีค่า $m=0.5$

บทที่ 6

สรุปผลการวิเคราะห์

การสื่อสารแบบเข้าถึงหลายทางแบบแยกความแตกต่างทางรหัส เป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจและมีการค้นคว้าวิจัยอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเอาเทคนิคใหม่ที่เรียกว่าการแปลงเวฟเล็ต เข้ามาใช้ในการมอดูเลตสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบฟรีควอนซ์ฮอปป์ิงซีดีเอ็มเอ โดยใช้วิธีการในการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งต้องอาศัยหลักการของฟิลเตอร์แบงก์ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตในแต่ละสเกล ซึ่งโครงสร้างของฟิลเตอร์แบงก์มีทั้งในรูปแบบ โครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตร และแบบ โครงสร้างต้นไม้แบบไม่สมมาตร รูปแบบของสัญญาณที่ได้จากโครงสร้างต้นไม้ที่มีความเป็นเชิงตั้งฉากกันมีความเหมาะสมในการนำไปมอดูเลตสัญญาณในระบบการสื่อสาร

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการจำลองแบบการทำงานของระบบฟรีควอนซ์ฮอปป์ิงซีดีเอ็มเอ โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบด้วยค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งใช้การมอดูเลตใน 3 รูปแบบคือ การมอดูเลตด้วยเวฟเล็ตแบบ โครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตร การมอดูเลตด้วยเวฟเล็ตแบบ โครงสร้างต้นไม้แบบไม่สมมาตร และการมอดูเลตด้วยสัญญาณไซน์ซึ่งเป็นการมอดูเลตแบบเดิมที่ใช้กันทั่วไป โดยได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองกรณีคือ กรณีที่ผู้ใช้ทุกคนมีรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่ตั้งฉากกัน และกรณีที่ผู้ใช้ทุกคนมีรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่มซึ่งผู้ใช้ทุกคนสามารถส่งข้อมูลในย่านความถี่กันได้ โดยได้ทำการจำลองแบบการทำงานของระบบบนช่องสัญญาณในสี่รูปแบบ คือ ช่องสัญญาณ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก ที่มีการเพิ่มสัญญาณการแทรกสอดแถบแคบ ช่องสัญญาณการจางหายแบบเรย์ลี ช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซียน และช่องสัญญาณการจางหายแบบนาคากามิ ซึ่งผลที่ได้จากกรณีที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่ตั้งฉากกันแสดงดังรูปที่ 5.2 ถึง 5.7 เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลของระบบที่ทำงานบนช่องสัญญาณแบบ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวกและทำการเพิ่มสัญญาณการแทรกสอดแถบแคบ ลงลาของบิตข้อมูลของทุกระบบจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น และผลจากการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณการจางหายแบบเรย์ลี ไรเซียน และนาคากามิจะพบว่า การมอดูเลตที่ใช้เวฟเล็ตที่มีโครงสร้างต้นไม้แบบสมมาตรให้ประสิทธิภาพของระบบดีที่สุด และเวฟเล็ตที่มีโครงสร้างต้นไม้แบบไม่สมมาตรให้ประสิทธิภาพดีกว่าระบบการมอดูเลตที่ใช้สัญญาณไซน์ในการมอดูเลต

ในกรณีที่ผู้ใช้ทุกคนใช้รูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่เป็นแบบสุ่มซึ่งจะเกิดการชนกันของบิตข้อมูลที่มีการกระโดดเปลี่ยนความถี่ไปที่แถบความถี่เดียวกัน ผลที่ได้จากการจำลองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 5.8 ถึง 5.13 ซึ่งจะพบว่าการมอดูเลตที่ใช้เวฟเล็ดโครงสร้างแบบต้นไม้แบบสมมาตรมีประสิทธิภาพในการทำงานดีที่สุด แต่ในกรณีที่ใช้เวฟเล็ดโครงสร้างแบบต้นไม้แบบไม่สมมาตรจะทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการมอดูเลตแบบเดิมที่ใช้สัญญาณไซน์ในการมอดูเลต ทั้งในการทำงานบนช่องสัญญาณแบบ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก และช่องสัญญาณการจางหายแบบเรย์ลี ช่องสัญญาณการจางหายแบบไรเซเชน และช่องสัญญาณการจางหายแบบนาคากามิ

ผลที่ได้ทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าการใช้เวฟเล็ดในการมอดูเลตสัญญาณในระบบฟรีควอนซิ้อปป์ิงซีดีเอ็มเออนั้น เวฟเล็ดที่ได้จากโครงสร้างต้นไม้ของฟิลเตอร์แบงก์แบบสมมาตรให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นกว่าการมอดูเลตแบบเดิม แต่ในกรณีของเวฟเล็ดที่ได้จากโครงสร้างต้นไม้ของฟิลเตอร์แบงก์แบบไม่สมมาตรจะมีผลของความไม่เท่ากันของพัลส์ในแต่ละสเกลซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของระบบไม่ดีนัก และมีประสิทธิภาพต่ำกว่าระบบการมอดูเลตแบบเดิมเมื่อผู้ใช้ทุกคนมีรูปแบบการกระโดดเปลี่ยนความถี่แบบสุ่มหรือเกิดการใช้แถบความถี่ซ้ำกันในการส่งบิตข้อมูลของผู้ใช้แต่ละคน เวฟเล็ดจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจและนำไปพัฒนาใช้ในการมอดูเลตการสื่อสาร



บรรณานุกรม

- [1] M. Pätzold, *Mobile Fading Channel* , John Willey & Sons, 2002
- [2] Jonh G. Proakis, *Digital communications* , third edition , McGraw Hill,1995.
- [3] Saroja Srinidhi, Jonh G. Proakis , “ Wavelet Based Modulation For Frequency Hopped Spread Spectrum Communications” IEEE,1999
- [4] Kenneth Hetling, Michael Medley, Gary Saulnier and P. Das, “A PR-QMF (Wavelet) Based Spread Spectrum Communications System”
- [5] Sanjit K. Mitra, *Digital Signal Processing : A Computer-Based Approach*, New York, Mc Graw Hill, 2002.
- [6] John G.Proakis and Masoud Salehi, *Contemporary communication systems using Matlab*, Boston, PWS Publishing Company, 1998.
- [7] Ali N. Akansu, M.V. Tazebay, M.J. Medley and P.K. Das, “Wavelet & Subband Transforms : Fundamentals & Communication Applications,” *Communications Magazine*, Dec 1997
- [8] Jaideva C,Goswami, “Fundamentals of Wavelets” , Texas A&M University , A Wiley interscience Publcation .
- [9] Dauglas Cochran and Chao Wei, “A Wavelet-Based Mutiple-Access Spread Spectrum Modulation Scheme”
- [10] N. Erdol, F. Bao and Z. Chen, “Wavelet Modulation: A Prototype for Digital Communication Systems”
- [11] Ali N. Akansu, “Wavelet and Subband Transform Fundametal and Communication Applications”
- [12] V. K. Jain, “Hybrid Wavelet/Spread-Spectrum System for Broadband Wireless LANs”
- [13] Hiroshi Harada, Ramjee Orasad,”Simulation and Software Radio for Mobile Communication” Artech House, Boston, London

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

1. วรณภา ภูนิลามัย, เกรียงไกร วงศ์โรจนภรณ์, สุวิพล สิทธีชีวะภาค “ การแสดงผลการจำลองแบบช่องสัญญาณควมเทียมที่ได้รับความเสียหายโดยใช้หลักการของโคเรคชันเอ็นวีเอสเปรดสปีดเดอโคโลฮา ” การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า(EECON24) ครั้งที่ 24 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 22-23 พฤศจิกายน 2544, หน้า 903-908, vol.2 .
2. Wannapha Phoonilamai and Suvepon Sittichivapak “Monte Carlo Simulation of Wavelet Modulation in Frequency Hopped Spread Spectrum” The 2003 International Conference on Information and Communication Technologies, Assumption University, Thailand. April 8-10 2003 , pp.306-309.
3. วรณภา ภูนิลามัย, เกรียงไกร วงศ์โรจนภรณ์, สุวิพล สิทธีชีวะภาค “การใช้เวฟเล็ตในระบบการขยายสเปกตรัมด้วยวิธีการกระโดดเปลี่ยนความถี่ที่ทำงานบนช่องสัญญาณการจางหายแบบเจคส์” การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า(EECON26) ครั้งที่ 26 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 6-7 พฤศจิกายน 2546, หน้า 1529-1534.

ประวัติผู้เขียน

นางสาววรรณภา ภูนิลามัย เกิดเมื่อวันที่ 6 ธันวาคม 2522 ที่จังหวัดกาฬสินธุ์
สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2544



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้