

สมรรถนะการมอดูเลตแบบ MPSK ในช่องสัญญาณผสมจากการขึ้นทึบเลขนัน
และการจางหายจากคลื่นในหลายเส้นทางสำหรับระบบสื่อสารเคลื่อนที่
ผ่านดาวเทียม

PERFORMANCE OF MPSK MODULATION IN JOINT SCINTILLATION
AND MULTIPATH FADING CHANNELS FOR MOBILE SATELLITE
COMMUNICATION SYSTEM

นพดล บุญส่งกุศลจิต
NOPPADOL BOONSONGKUSOLJIT

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สมรรถนะการมอดูเลตแบบ MPSK ในช่องสัญญาณผสมจากการซินทิลเลชัน
และการจางหายจากคลื่นในหลายเส้นทางสำหรับระบบสื่อสารเคลื่อนที่
ผ่านดาวเทียม

PERFORMANCE OF MPSK MODULATION IN JOINT SCINTILLATION
AND MULTIPATH FADING CHANNELS FOR MOBILE SATELLITE
COMMUNICATION SYSTEM



นพดล บุญส่งกุศลจิต

NOPPADOL BOONSONGKUSOLJIT

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 74884
วัน,เดือน,ปี..... 15 ต.ค. 2550

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

**PERFORMANCE OF MPSK MODULATION IN JOINT SCINTILLATION
AND MULTIPATH FADING CHANNELS FOR MOBILE SATELLITE
COMMUNICATION SYSTEM**

NOPPADOL BOONSONGKUSOLJIT

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

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมรรถนะการมอดูเลตแบบ MPSK ในช่องสัญญาณผสมจากการซินทิลเลชัน และ
การจางหายจากคลื่นในหลายเส้นทางสำหรับระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียม
Performance of MPSK Modulation in Joint Scintillation and Multipath Fading
Channels for Mobile Satellite Communication System

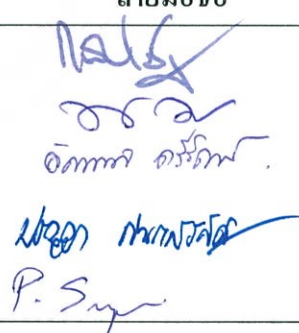
นักศึกษา นายนพดล บุญส่งกุศลจิต

รหัสประจำตัว 48060910

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.กอบชัย	เดชหาญ	
ผศ.ดร.พิเชฐ	ม่วงนวล	
ผศ.อักรพล	ตรีรัตน์	
ผศ.ดร.ปริญญา	ต้นตสวัสดิ์	
ผศ.ดร.พรชัย	ทรัพย์นิธิ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 23 พฤษภาคม 2550 เวลา 14.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว
(รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....1.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ.....๒๕๕๐.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมรรถนะการมอดูเลตแบบ MPSK ในช่องสัญญาณผสมจากการ ซินทิลเลชันและการจางหายจากคลื่นในหลายเส้นทางสำหรับ ระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียม
นักศึกษา	นาย นพดล บุญส่งกุศลจิต
รหัสประจำตัว	48060910
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. พรชัย ทรัพย์นิธิ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาสมรรถนะของระบบสื่อสารที่ทำการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเค ซึ่งทำการส่งผ่านช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายหลายเส้นทาง โดยทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะอัตราความผิดพลาดของบิต เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เรียกว่าการจางหายซินทิลเลชัน จากนั้นทำการวิเคราะห์ร่วมกับผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่มีการจางหายหลายเส้นทางแบบราบ ซึ่งพบว่าเมื่อค่าดัชนีซินทิลเลชัน S_4 มีค่าเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้สมรรถนะอัตราความผิดพลาดของบิตลดลงอย่างมาก ดังนั้นถ้าต้องการส่งข้อมูลบนช่องสัญญาณนี้ในกรณีที่เกิดซินทิลเลชันนั้น จำเป็นที่จะต้องเพิ่มสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้นเพื่อให้สามารถสื่อสารข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นจึงได้นำการเข้ารหัสข้อมูลมาใช้กับระบบโดยในที่นี้ได้เลือกใช้การเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและใช้ตัวถอดรหัสแบบวิเทอร์บี นอกจากนี้ยังทำการศึกษาสมรรถนะของระบบในกรณีของช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายหลายเส้นทางแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่อีกด้วย

Thesis Title	Performance of MPSK modulation in joint scintillation and multipath fading channels for mobile satellite communication system
Student	Mr. Noppadol Boonsongkusoljit
Student ID.	48060910
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunication Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Pornchai Supnithi

ABSTRACT

This thesis presents the performance of MPSK modulation in joint scintillation and multipath fading system. The performance in terms of bit error rate is analyzed due to ionospheric irregularities, called Scintillation fading and flat multipath fading channels. When Scintillation index increases, the system degrades. To increase performance of the system, error correction techniques can be applied to the system. We focus as Convolutional code and Viterbi decoder. In addition, we study the performance of joint scintillation and frequency selective multipath fading channels.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยเพราะคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ผศ.ดร. พรชัย ทรัพย์นิธิ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้เขียนจึงใคร่ขอใช้โอกาสนี้ในการ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์สำหรับคำปรึกษาและการดูแลเอาใจใส่อย่างสม่ำเสมอ

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ. ณรงค์ เหมกรณ์ และ รศ.นิภา ลีลารุจิ สำหรับคำปรึกษาและการดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี รวมถึงการอำนวยความสะดวกต่างๆในห้องวิจัย

ขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ที่ห้องวิจัยทุกคน สำหรับความช่วยเหลือต่างๆ โดยเฉพาะ พี่ปู๋ย ขอขอบคุณมากๆครับ สำหรับคำแนะนำต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ๆ จนทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นพดล บุญส่งกุศลจิต

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	II
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สิ่งที่น่าสนใจใหม่ในวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการจำลองระบบสื่อสาร.....	5
2.1 พื้นฐานระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียม.....	5
2.2 การมอดูเลตและการดีมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเค.....	6
2.2.1 การมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเค.....	7
2.3.2 การดีมอดูเลตสัญญาณเอ็มพีเอสเค.....	9
2.3.3 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตสำหรับสัญญาณเอ็มพีเอสเค.....	9
2.3 การจางหายของสัญญาณในระบบสื่อสาร.....	10
2.3.1 ชนิดของการจางหาย.....	11
2.3.1.1 การจางหายที่เกิดจากการแพร่กระจายของเวลาคลื่นหลายเส้นทาง.....	11
2.3.1.2 การจางหายที่เกิดจากการกระจายของคอปเพลอร์.....	12
2.3.2 การเลื่อนคอปเพลอร์.....	12
2.3.3 การกระจายของคลื่นแบบเรย์ลีและไรเซียน.....	13
2.3.3.1 การจางหายที่มีการกระจายแบบเรย์ลี.....	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3.2 การจางหายที่มีการกระจายแบบไรเซียน.....	14
2.3.4 การเกิดคิเลียสเปรด.....	16
2.4 แบบจำลองและมาตรฐาน COST207.....	17
2.5 การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน.....	20
2.5.1 ดัชนีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน.....	22
2.6 การเข้ารหัสและการถอดรหัส.....	23
2.6.1 รหัสบล็อกเชิงเส้น.....	24
2.6.2 รหัสคอนโวลูชัน.....	25
2.6.3 แผนภาพสถานะ.....	26
2.6.4 แผนภาพเทรลลิส.....	27
2.6.5 แผนภาพต้นไม้.....	28
2.6.6 การถอดรหัสคอนโวลูชันด้วยวิธีวิเทอร์บี.....	29
บทที่ 3 แบบจำลองช่องสัญญาณ.....	35
3.1 แบบจำลองช่องสัญญาณซินทิลเลชัน.....	35
3.2 แบบจำลองช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีแบบราบ.....	39
3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่.....	41
บทที่ 4 ผลการจำลองระบบและการวิเคราะห์.....	42
4.1 แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองระบบ.....	42
4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ.....	43
4.3 ผลการจำลองระบบและการวิเคราะห์ผล.....	44
4.3.1 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณรบกวนเกาส์ขาว แบบบวก.....	44
4.3.2 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณจางหายแบบราบ.....	44
4.3.3 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณจางหายแบบ เปลี่ยนแปลงตามความถี่.....	46
4.3.4 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณจางหาย ซินทิลเลชัน.....	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.5 สมรรถนะการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชัน และการจางหายหลายวิธีแบบราบ.....	49
4.3.6 สมรรถนะการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชัน และการจางหายหลายวิธีแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่.....	49
4.3.7 สมรรถนะการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชัน และการจางหายหลายวิธีแบบราบเมื่อมีการเข้ารหัสช่องสัญญาณ ด้วยรหัสคอนโวลูชันและใช้ตัวถอดรหัสแบบวิเทอร์บี.....	51
4.3.8 ความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหาย (Outage probability).....	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและแนวทางในการพิจารณาต่อไป.....	56
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป.....	57
เอกสารอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	66

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณลักษณะดีเลย์และกำลังงานในสภาพภูมิประเทศแบบเมืองตามที่ระบุใน COST207.....	17
2.2 คุณลักษณะดีเลย์และกำลังงานในสภาพภูมิประเทศแบบทุ่งหญ้าที่ระบุใน COST207.....	18
2.3 คุณลักษณะดีเลย์และกำลังงานในสภาพภูมิประเทศแบบเมืองที่มีความแออัดที่ระบุ ใน COST207.....	18
2.4 คุณลักษณะดีเลย์และกำลังงานในสภาพภูมิประเทศพื้นที่แบบภูเขาที่ระบุใน COST207.....	18
4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบ.....	43
4.2 ค่าเอสเอ็นอาร์เฉลี่ยต่ำสุดที่ทำให้ลิงก์การสื่อสารสามารถใช้งานการสื่อสารได้ 99.8% สำหรับช่องสัญญาณซินทิลเลชัน กรณีที่ $\gamma_1 = 3.75 \text{ dB}$	55

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 บล็อกการทำงานของระบบสื่อสาร.....	6
2.2 คอนสเทลเลชันของสัญญาณพีเอสเค.....	8
2.3 ตัวอย่างของสัญญาณคิวพีเอสเค.....	9
2.4 วงจรตรวจวัดสัญญาณพีเอสเคด้วยเฟส.....	9
2.5 ทิศทางของคลื่นในทิศทางตรงและคลื่นสะท้อนที่เดินทางไปยังเครื่องรับ.....	10
2.6 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่มีการกระจายแบบเรย์ลี.....	14
2.7 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่มีการกระจายแบบไรเซียน.....	16
2.8 คอปเพลอร์สเปกตรัมของแบบจำลองช่องสัญญาณตามที่กำหนดใน COST207.....	19
2.9 การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณความถี่.....	21
2.10 การเข้ารหัสคอนไวลูชันด้วยอัตรารหัสเท่ากับ 1/2 และความยาวคอนสเตรนต์เท่ากับ 3.....	24
2.11 ขั้นตอนการเข้ารหัสคอนไวลูชันด้วยอัตรารหัส $R=1/2$ และความยาวคอนสเตรนต์ $K=3$	26
2.12 แผนภาพสถานะของการเข้ารหัสคอนไวลูชันด้วยอัตรารหัส 1/2 และ $K = 3$	27
2.13 แผนภาพทรานซิสของของการเข้ารหัสคอนไวลูชัน โดยอัตรารหัสเท่ากับ 1/2 และ K เท่ากับ 3.....	27
2.14 แผนภาพต้นไม้ของการเข้ารหัสคอนไวลูชันด้วยอัตรารหัสเท่ากับ 1/2 และ K เท่ากับ 3.....	28
2.15 การถอดรหัสโดยใช้แผนภาพทรานซิสของการเข้ารหัสแบบคอนไวลูชัน ด้วยอัตรารหัสเท่ากับ 1/2 และ K เท่ากับ 3.....	29
2.16 เมตริกเส้นทางสองเส้นทางที่มาพบกัน.....	30
2.17 การเลือกเส้นทางที่เหลืออยู่ (ก) เส้นทางที่เหลือเมื่อเวลา t_2 (ข) เส้นทางที่เหลือเมื่อเวลา t_3 (ค) การเปรียบเทียบเมตริกเมื่อเวลา t_4 (ง) เส้นทางที่เหลือเมื่อเวลา t_4 (จ) การเปรียบเทียบเมตริกเมื่อเวลา t_5 (ฉ) เส้นทางที่เหลือเมื่อเวลา t_5 (ช) การเปรียบเทียบเมตริกเมื่อเวลา t_6 (ซ) เส้นทางที่เหลือเมื่อเวลา t_6	31
3.1 แบบจำลองระบบสื่อสารผ่านช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายหลายวิถี.....	35
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนี S_4 และค่าไรเซียนแฟคเตอร์ γ	36
3.3 แบบจำลองโมเดลของสัมประสิทธิ์ซินทิลเลชัน.....	37
3.4 โครงสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีตามแบบของเจ็ค.....	39
3.5 โครงสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีแบบแถบกว้าง.....	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก กรณีที่มีค่าเท่ากับ 2, 4, 8, 16, 32 และ 64.....	44
4.2 ระดับสัญญาณที่รับได้เมื่อทำการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณจางหายแบบราบ กรณีที่ค่าไครเซ็นแฟคเตอร์(K) เท่ากับ 5dB.....	45
4.3 สมรรถนะการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเคบนช่องสัญญาณการจางหายแบบราบ กรณีที่ค่าไครเซ็นแฟคเตอร์มีค่าเท่ากับ 0 dB, 5dB, 10 dB, 15 dB และ 20 dB.....	45
4.4 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณจางหายแบบราบ กรณีที่มีค่าเท่ากับ 2, 4, 8, 16, 32 และ 64 และค่าไครเซ็นแฟคเตอร์มีค่าเท่ากับ 15 dB.....	46
4.5 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณจางหายแบบเปลี่ยนแปลง ตามความถี่.....	47
4.6 สมรรถนะการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเคบนช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบซินทิลเลชัน กรณีที่ค่า S_4 มีค่าเท่ากับ 0, 0.3, 0.6, 0.9 และ 1.....	47
4.7 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณซินทิลเลชัน กรณีที่มีค่าเท่ากับ 2, 4, 8, 16, 32 และ 64 และ S_4 มีค่าเท่ากับ 0.6.....	48
4.8 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณซินทิลเลชัน กรณีที่ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-5}	48
4.9 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหาย แบบราบ กรณีที่มีค่า S_4 มีค่าเท่ากับ 0.6 และค่าไครเซ็นแฟคเตอร์มีค่าเท่ากับ 15 dB.....	49
4.10 สมรรถนะการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหาย แบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่ กรณีที่มีค่า S_4 มีค่าเท่ากับ 0, 0.3, 0.6 และ 0.9.....	50
4.11 สมรรถนะการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหาย แบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่ กรณีที่ใช้ตัวตรวจจับสัญญาณแบบวิทอร์บีโดยมีค่า S_4 เท่ากับ 0, 0.3, 0.6 และ 0.9.....	50
4.12 สมรรถนะการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหาย แบบราบเมื่อมีการเข้ารหัสคอนไวลูชันและใช้การถอดรหัสแบบวิทอร์บีที่มีการตัดสินใจ แบบฮาร์ด.....	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 สมรรถนะการมอดูเลตแบบคิวิพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายแบบราบเมื่อมีการเข้ารหัสคอนโวลูชันและใช้การถอดรหัสแบบวิเทอร์บีที่มีการตัดสินใจแบบซอฟต์แวร์.....	52
4.14 ความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหายของช่องสัญญาณจางหายแบบราบกรณีที่ค่าไริเซียนแฟคเตอร์มีค่าเท่ากับ 0, 5, 10, 15 และ 20 dB.....	53
4.15 ความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหายของช่องสัญญาณซินทิลเลชันกรณีที่ค่า S_4 มีค่าเท่ากับ 0, 0.3, 0.6 และ 0.9.....	53
4.16 ความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหายของช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายหลายวิธี กรณีที่ค่า S_4 มีค่าเท่ากับ 0.6.....	54
4.17 ความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหายตามฟังก์ชันของค่าเอสเอ็นอาร์เฉลี่ย ในกรณีของช่องสัญญาณซินทิลเลชันที่ $S_4 = 0.3, 0.6, 0.9$ และในกรณีของช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายแบบราบที่ $S_4 = 0.6$ และ $K = 15 \text{ dB}$ โดยที่ $\gamma_1 = 3.75 \text{ dB}$	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบสื่อสาร การส่งข่าวสารจากแหล่งกำเนิดสัญญาณไปยังอุปกรณ์ภาครับนั้น จะต้องทำการส่งผ่านช่องสัญญาณ ซึ่งผลกระทบที่เกิดจากช่องสัญญาณการสื่อสารนั้นมักจะทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลที่รับได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของการรับส่งข่าวสาร โดยในการสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านระบบดาวเทียมนั้นสัญญาณจะถูกทำการส่งผ่านชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ (Troposphere) และไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ในส่วนของชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์นั้นจะมีฝุ่น ไอน้ำ และเมฆฝนกระจายอยู่ทั่วไป ทำให้เมื่อสัญญาณเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์จะถูกดูดกลืนและเกิดการกระเจิง โดยผลกระทบที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์นั้นจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณดาวเทียมในย่านความถี่ C, Ku และ Ka ในขณะที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้น จะส่งผลกระทบต่อสัญญาณดาวเทียมในย่านความถี่ VHF และ UHF โดยที่ความแปรปรวนของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของสัญญาณอย่างกะทันหันหรือที่เรียกว่า ชินทิลเลชัน (Scintillation) โดยระดับของสัญญาณจะเกิดการแกว่งขึ้นลงอย่างรวดเร็วจากระดับปกติ ซึ่งเมื่อพิจารณาในกรณีของระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียมนั้น เครื่องรับและเครื่องส่งที่ใช้ที่ภาคพื้นดินนั้นจะเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนที่ไปยังจุดต่างๆ ในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน ซึ่งผลของการเคลื่อนที่ไปในสภาพแวดล้อมที่ต่างกันก็จะทำให้ระดับของสัญญาณที่รับได้มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากเครื่องรับจะรับสัญญาณได้จากหลายทิศทาง โดยมีขนาดและเฟสที่ต่างกันและเหมือนกัน ซึ่งจะเป็นการหักล้างหรือเสริมกันทำให้สัญญาณที่รับได้รับอิทธิพลจากการจางหายหลายวิถี (Multipath fading)

จากที่กล่าวข้างต้นจะเห็นว่าในกรณีของระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียมในย่านความถี่ VHF และ UHF นั้น จะได้รับผลกระทบที่เกิดจากชินทิลเลชันในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และผลกระทบที่เกิดจากการจางหายหลายวิถีที่เกิดขึ้นที่ภาคพื้นดิน วิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบร่วมที่เกิดขึ้นจากช่องสัญญาณชินทิลเลชันและการจางหายหลายเส้นทาง เพื่อหาสมรรถนะอัตราความผิดพลาดของบิตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ และสมรรถนะอัตราความผิดพลาดของบิตเมื่อมีการเพิ่มสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้นด้วยการเข้ารหัสช่องสัญญาณด้วยรหัสคอนวอลูชันและการถอดรหัสแบบวิเทอร์บี

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เนื่องจากการสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียมนั้นจะต้องทำการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณซินทิลเลชันและช่องสัญญาณจางหายหลายวิธี ทำให้สมรรถนะอัตราความผิดพลาดของบิตของระบบเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณทั้งระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน อันเนื่องมาจากความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และระดับการจางหายหลายวิธีที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเครื่องรับมีการเคลื่อนที่ไปในสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไป เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่บ่งชี้ถึงระดับของสัญญาณที่เหมาะสมที่จะทำให้ระบบมีสมรรถนะอัตราความผิดพลาดของบิตที่ต้องการได้ ดังนั้นการรู้สมรรถนะอัตราความผิดพลาดของบิตจึงเป็นสิ่งสำคัญมากในการสื่อสาร อีกทั้งการทำให้สมรรถนะอัตราความผิดพลาดของบิตดีขึ้นด้วยการเข้ารหัสช่องสัญญาณนั้นจะทำให้ข้อมูลที่รับได้มีความถูกต้องเพิ่มมากขึ้นด้วย

1.3 สิ่งที่น่าสนใจใหม่ในวิทยานิพนธ์

หลักการใหม่ที่น่าสนใจในบทความนี้เป็นการจำลองระบบที่ใช้การมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายหลายวิธีแบบราบที่มีการกระจายตัวแบบไรเซียน เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณในรูปของสมรรถนะอัตราความผิดพลาดของบิต จากนั้นทำการหาสมรรถนะอัตราความผิดพลาดของบิตเมื่อข้อมูลที่จะทำการส่งผ่านช่องสัญญาณดังกล่าวมีการเข้ารหัสช่องสัญญาณด้วยรหัสคอนวอลูชันและใช้การถอดรหัสแบบวิเทอร์บี นอกจากนี้ยังทำการหาสมรรถนะอัตราความผิดพลาดของบิตของระบบในกรณีที่เป็นช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายหลายวิธีแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่อีกด้วย

1.4 สมมติฐานของการศึกษา

ในการหาสมรรถนะของระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียม เมื่อทำการพิจารณาร่วมกันระหว่างผลกระทบที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และผลกระทบที่เกิดจากการจางหายที่ภาคพื้นดินนั้นจะทำให้สมรรถนะอัตราความผิดพลาดของบิตในการส่งข้อมูลลดลง ซึ่งผลสมรรถนะของระบบที่ได้จากช่องสัญญาณผสมดังกล่าวจะให้ผลที่ได้ใกล้เคียงกับผลกระทบที่เกิดจากช่องสัญญาณจริง และการนำรหัสคอนวอลูชันและตัวถอดรหัสแบบวิเทอร์บีมาใช้กับระบบก็จะช่วยทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้นได้

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

ในส่วนของหลักการเดิมที่มีอยู่นั้นยังไม่มีการศึกษาสมรรถนะอัตราความผิดพลาดของบิตของระบบที่มีการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคที่ทำการส่งผ่านช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและช่องสัญญาณการจางหายหลายวิถี และในหลักการเดิมที่มีอยู่นั้นยังไม่มีการศึกษาถึงสมรรถนะอัตราความผิดพลาดของบิตเมื่อมีการเข้ารหัสข้อมูลแบบคอนโวลูชันและการถอดรหัสด้วยการถอดรหัสแบบวิเทอร์บีในช่องสัญญาณผสมดังกล่าว

1.6 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับสมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคในช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายหลายวิถีสำหรับระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียม โดยทำการจำลองช่องสัญญาณซินทิลเลชันและช่องสัญญาณการจางหายหลายวิถีแบบราบและแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่ จากนั้นทำการหาสมรรถนะอัตราความผิดพลาดของบิตของระบบในกรณีที่มีระดับการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่ต่างกัน นอกจากนี้ได้ทำการหาค่าความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหาย (Outage probability) ของช่องสัญญาณดังกล่าว และได้ทำการหาสมรรถนะอัตราความผิดพลาดของบิตเมื่อนำการเข้ารหัสคอนโวลูชันและการถอดรหัสแบบวิเทอร์บีมาใช้กับระบบ โดยการจำลองการทำงานของระบบทั้งหมดนั้นสร้างขึ้นโดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สิ่งที่น่าสนใจใหม่ในวิทยานิพนธ์ สมมติฐานของการศึกษา การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการจำลองระบบสื่อสาร พื้นฐานระบบสื่อสารดาวเทียมเคลื่อนที่ หลักการการมอดูเลตและการดีมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเค ทฤษฎีเกี่ยวกับสัญญาณการจางหายและช่องสัญญาณในระบบสื่อสารดาวเทียมเคลื่อนที่ที่มีการนำมาสร้างเป็นแบบจำลองเพื่อใช้ในระบบ รวมถึงวิธีการเข้ารหัสคอนโวลูชันและการถอดรหัสแบบวิเทอร์บี

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองช่องสัญญาณของระบบซึ่งแบ่งเป็น แบบจำลองช่องสัญญาณซินทิลเลชัน แบบจำลองช่องสัญญาณการจางหายหลายวิถีแบบราบ และแบบจำลองช่องสัญญาณการจางหายหลายวิถีแบบเลือกความถี่

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการจำลองระบบและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบ ซึ่งผลการจำลองระบบได้ทำการแสดงและเปรียบเทียบสมรรถนะให้เห็นถึงผลกระทบที่เกิดจากช่องสัญญาณที่กล่าวไว้ข้างต้น นอกจากนี้ได้ทำการจำลองสมรรถนะของระบบเมื่อมีการเข้ารหัสช่องสัญญาณด้วยรหัสคอนโวลูชันและตัวถอดรหัสวิเทอร์บี รวมถึงได้ทำการแสดงผลค่าความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหายของช่องสัญญาณอีกด้วย

บทที่ 5 เป็นบทสรุปของการวิจัยและแนวทางในการนำงานวิจัยนี้ไปพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการจำลองระบบสื่อสาร

2.1 พื้นฐานระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียม

การสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียมเป็นเป็นการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับเครื่องรับ-ส่งที่เคลื่อนที่ได้หรือระหว่างเครื่องรับ-ส่งที่เป็นอุปกรณ์เคลื่อนที่ด้วยตนเอง โดยใช้ดาวเทียมเป็นลิงค์ในการเชื่อมต่อสื่อสาร ระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียมโดยทั่วไปแล้วจะประกอบไปด้วย ดาวเทียม สถานีฐานที่ภาคพื้นดิน และสถานีเคลื่อนที่ต่างๆ ที่ภาคพื้นดิน เช่น ในยานพาหนะและเครื่องรับ-ส่งที่สามารถพกพาได้ โดยที่เส้นทางในการสื่อสารจากโลกไปยังดาวเทียมนั้นจะเรียกว่า ระบบเชื่อมโยงขาขึ้น(uplink) และจากดาวเทียมมายังโลกจะถูกเรียกว่าระบบเชื่อมโยงขาลง (downlink) ระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียมนั้นมีการนำไปใช้งานกันอย่างกว้างขวางในหลายช่วงความถี่ โดยในงานวิจัยได้ทำการพิจารณาในช่วงความถี่ 225-400 MHz ซึ่งในช่วงความถี่ดังกล่าวส่วนใหญ่นำไปใช้ในระบบสื่อสารทางการทหาร โดยเหตุผลที่ทำการพิจารณาสมรรถนะของระบบในช่วงความถี่นี้เนื่องจากช่องสัญญาณการสื่อสารในช่วงความถี่ดังกล่าวจะได้รับผลกระทบที่เกิดจากการจางหายซินทิลเลชันในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ การจางหายหลายเส้นทางที่เกิดขึ้นที่ภาคพื้นดิน และการแทรกสอดเกิดขึ้น [1]

ในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมนั้นมีพัฒนาอย่างต่อเนื่องซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นช่วงยุคสมัยของการพัฒนาระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมได้ออกเป็น 3 ยุค [2] โดยมีคุณลักษณะหลักๆ ที่สำคัญดังนี้

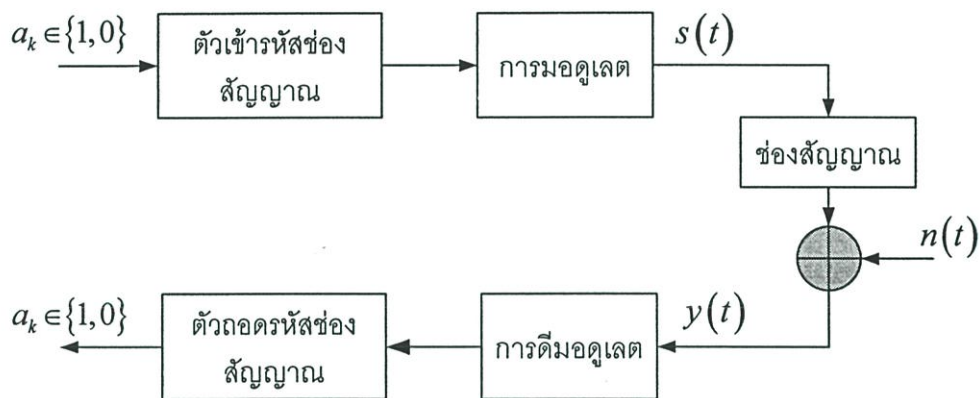
1). ยุคแรกของการสื่อสารผ่านดาวเทียม นั้นเรียกว่าเป็นระบบสื่อสารดาวเทียมแบบอยู่กับที่ (fixed satellite communication systems) ซึ่งเป็นการให้บริการสื่อสารผ่านดาวเทียมระหว่างสถานีฐานที่อยู่กับที่ด้วยกัน โดยระบบจะประกอบด้วยดาวเทียมและสถานีฐาน ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้จะมีขนาดใหญ่ และใช้ดาวเทียมแบบค้างฟ้าในการสื่อสารเท่านั้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วระบบสื่อสารดาวเทียมแบบอยู่กับที่จะใช้ระบบ INTELSAT.

2). ยุคที่สองของการสื่อสารผ่านดาวเทียม นั้นเป็นยุคของของระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียม (mobile satellite communication systems) ซึ่งระบบดังกล่าวนั้นเป็นการให้บริการสื่อสารผ่านดาวเทียมระหว่างเครื่องรับ-ส่งที่สามารถเคลื่อนที่ได้ กับสถานีฐานที่ภาคพื้นดิน ซึ่งระบบจะประกอบด้วยดาวเทียม สถานีฐานที่ภาคพื้นดิน และเครื่องรับ-ส่งที่เคลื่อนที่ได้ เช่น ในยานพาหนะต่างๆ โดยในยุคนี้ยังไม่สามารถทำการสื่อสารโดยตรงจากดาวเทียมไปยังเครื่องรับได้ เนื่องจากความสามารถของดาวเทียมเช่น ในเรื่องของกำลังงานที่ใช้ส่ง และฟังก์ชันในการสวิตช์

การใช้งานช่องสัญญาณ โดยทั่วไปแล้วระบบที่ใช้จะเป็นระบบ INMARSAT ซึ่งมีการจัดการเกี่ยวกับการให้บริการเชิงพาณิชย์

3). ยุคที่สามของการสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นยุคของการสื่อสารดาวเทียมส่วนบุคคล (personal satellite communication systems) เป็นการให้บริการการสื่อสารระหว่างเครื่องรับ-ส่งมือถือขนาดเล็กส่วนบุคคลกับดาวเทียมหนึ่งดวงหรือมากกว่านั้น โดยระบบจะประกอบด้วยดาวเทียมและเครื่องรับ-ส่งมือถือซึ่งมีขนาดเล็กสามารถพกพาสำหรับการใช้งานส่วนตัว โดยเครื่องรับ-ส่งขนาดมือถือนั้นสามารถทำการสื่อสารผ่านดาวเทียมได้โดยตรง โดยไม่ต้องผ่านการเชื่อมต่อจากสถานีฐานที่ภาคพื้นดิน ดังนั้นดาวเทียมจะมีฟังก์ชันการทำงานที่เพิ่มขึ้นเช่น การสวิตช์ช่องสัญญาณการทำงานในระบบโครงข่าย และการประมวลผลสัญญาณ

โดยในส่วนของระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียมที่ทำการพิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้การมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเค โดยทำการพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากการแพร่กระจายของคลื่นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เรียกว่าการจางหายซินทิลเลชัน และผลกระทบที่เกิดจากการจางหายของคลื่นหลายเส้นทางที่ภาคพื้นดิน ซึ่งบล็อกการทำงานของระบบสื่อสารในส่วนที่ทำการพิจารณาสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 บล็อกการทำงานของระบบสื่อสาร

2.2 การมอดูเลตและการดีมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเค

การมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเค (MPSK) เป็นการมอดูเลตแถบผ่าน (bandpass modulation) ชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นการมอดูเลตเฟสในระบบเอ็มเอรี (M-ary) โดยที่สัญลักษณ์หนึ่งๆ ของระบบจะบรรจุข้อมูลได้สูงเป็นจำนวน $\log_2 M$ เท่า ของจำนวนข้อมูลที่มีอยู่ในสัญลักษณ์ ซึ่งการส่งแบบเอ็มเอรีนี้จะทำให้อัตราในการส่งข้อมูลสูงขึ้น แต่ทั้งนี้อาจจะต้องใช้แบนด์วิดท์หรือกำลังในการส่งสัญญาณนั้นเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

2.2.1 การมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเค

สำหรับการมอดูเลตแบบพีเอสเค นั้น แอมพลิจูดและความถี่ของคลื่นพาห้จะกำหนดให้เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ โดยที่ส่วนที่เปลี่ยนไปตามข้อมูลดิจิทัล 0 หรือ 1 นั้นคือเฟส คั้งกรณิของบีพีเอสเค (BPSK: Binary phase shift keying) สัญญาณที่ใช้แทนข้อมูล 1 และ 0 จะมีเฟสต่างกัน π เรเดียน หรือ 180° .

ในส่วนนี้จะอธิบายกรรมวิธีการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเค ที่ครอบคลุมในกรณีทั่วไป กล่าวคือในการส่งสัญญาณของแต่ละช่วงเวลา T จะใช้สัญญาณมากถึง M รูปแบบคือ $S_1(t)$, $S_2(t), \dots, S_M(t)$ ในการแทนข้อมูลดิจิทัล สัญญาณแต่ละตัวมีแอมพลิจูดและความถี่เท่ากันหมด แต่ต่างกันที่ต้องมีเฟสห่างจากเฟสข้างเคียง $\frac{2\pi i}{M}$ เรเดียน และจากคุณสมบัติที่ว่าเฟสของสัญญาณที่ใช้แทนสัญลักษณ์ที่ใกล้เคียงกันจะมีเฟสต่างกัน $\frac{2\pi i}{M}$ เรเดียน ดังนั้นถ้าเฟสเกิดการเปลี่ยนแปลงเกินกว่า $\frac{\pi i}{M}$ เรเดียนแล้ว จะทำให้การตัดสินใจสัญญาณจากพัลส์นั้นเกิดความผิดพลาดขึ้น สำหรับสมการการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเค [3] สามารถเขียนได้ดังนี้

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi(i-1)}{M}\right) \quad i=1,2,\dots,M \quad (2.1)$$

$$= \sqrt{E_s} \cos\left(\frac{2\pi(i-1)}{M}\right) \psi_1(t) + \sqrt{E_s} \sin\left(\frac{2\pi(i-1)}{M}\right) \psi_2(t) \quad (2.2)$$

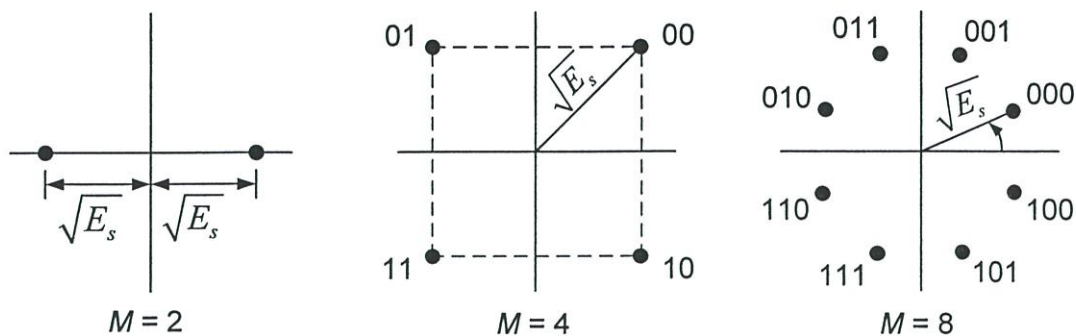
เมื่อให้ฟังก์ชันเบสิส

$$\psi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t < T_s \quad (2.3)$$

$$\psi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t < T_s \quad (2.4)$$

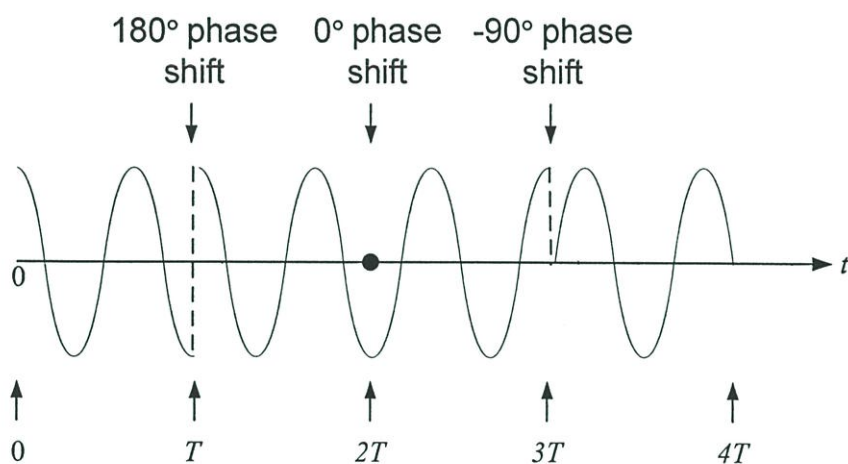
เมื่อกำหนดสัมประสิทธิ์การคูณของฟังก์ชันเบสิสของสัญญาณ $S_i(t)$ แต่ละตัวและนำสัญญาณแต่ละตัวมาเขียนในรูปของเวกเตอร์จะได้ผลดังนี้

$$S_i = \begin{bmatrix} \sqrt{E_s} \cos\frac{2\pi(i-1)}{M} \\ \sqrt{E_s} \sin\frac{2\pi(i-1)}{M} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.2 คอนสเทลเลชันของสัญญาณพีเอสเค

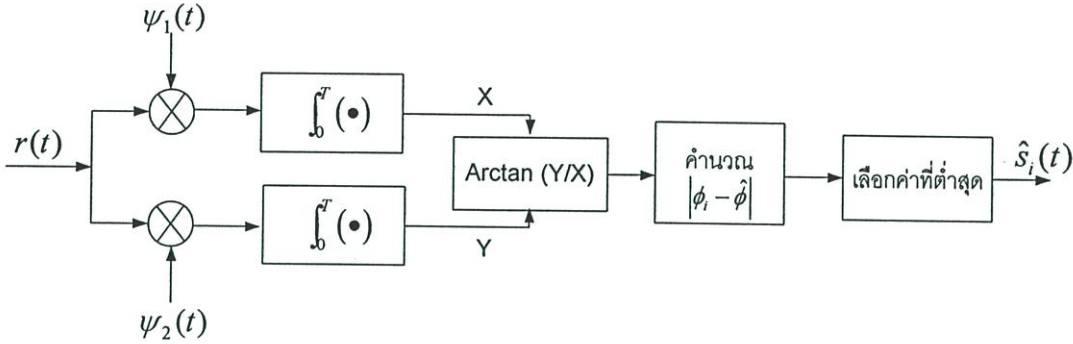
กรณีที่ควรสนใจ คือกรณีที่มีค่าเท่ากับ 4 โดยมีชื่อเรียกเฉพาะว่า คิวพีเอสเค (QPSK: quadrature phase shift keying) ซึ่งเป็นกรณีที่นิยมใช้มากในระบบสื่อสารดาวเทียม ระบบนี้อาจจะมองในอีกมุมหนึ่งได้ว่า เกิดจากการใช้บีพีเอสเคสองระบบที่ใช้คลื่นพาหะที่มีเฟสต่างกัน $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน $\{\cos(2\pi f_c t), \sin(2\pi f_c t)\}$ มาส่งรวมกันไปในช่องสัญญาณเดียวกัน สัญญาณจากทั้งสองระบบนี้เมื่อรวมกันแล้ว จะสามารถนำมาแยกจากกันและกันได้อย่างสมบูรณ์ทางเครื่องรับตามหลักการมัลติเพลกซ์แบบควอดเรเจอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อสัญญาณจากระบบบีพีเอสเคทั้งสองมารวมกัน จะทำให้เกิดลักษณะของสัญญาณขึ้น 4 รูปแบบคือ $\pm \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi f_c t \pm \frac{\pi}{4}\right)$ ระบบคิวพีเอสเคสามารถเพิ่มอัตราการส่งสัญญาณขึ้นเป็นสองเท่าของระบบบีพีเอสเค โดยไม่ต้องเพิ่มแบนด์วิดท์และกำลังส่งที่ใช้ในการส่งสัญญาณเลย



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างของสัญญาณคิวพีเอสเค

2.2.2 การคิมอดูเลตสัญญาณเอ็มพีเอสเค

การตรวจวัดสัญญาณเอ็มพีเอสเคสามารถทำได้ด้วยการใช้เฟส เนื่องจากสัญลักษณ์แต่ละค่ามีพลังงานที่เท่ากันต่างกันเพียงเฟสเท่านั้น โดยสัญญาณที่รับได้ $r(t)$ ก่อนอื่นจะต้องคูณด้วยฟังก์ชันเบสิสในที่นี้คือสัญญาณ โคไซน์และไซน์ ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4 จากนั้นผ่านตัวอินทิเกรทหามุมที่ได้รับ $\hat{\phi}$ หาผลต่างเมื่อเทียบกับมุมของสัญลักษณ์ของสัญญาณเอ็มพีเอสเค ϕ_i สุดท้ายตัวตัดสินใจจะทำการเลือกสัญลักษณ์ที่ให้ผลต่างของมุมที่ต่ำที่สุด [4] แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรตรวจวัดสัญญาณพีเอสเคด้วยเฟส

2.2.3 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตสำหรับสัญญาณเอ็มพีเอสเค

สัญญาณเอ็มพีเอสเคนั้นเมื่อค่า M มีค่ามากขึ้น จำนวนเวกเตอร์สัญญาณที่มากขึ้นจะทำให้ในการตัดสินใจสัญญาณนั้นได้รับความผิดพลาดมากขึ้น เนื่องจากระยะห่างของเวกเตอร์จะใกล้กันมากขึ้น สำหรับค่าอัตราความผิดพลาดของบิตของเอ็มพีเอสเค ในกรณีที่ค่าเอสเอ็นอาร์ (SNR) มีค่าในระดับสูง $SNR \gg 1$ สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการได้ดังสมการที่ 2.6 [5]

$$P_B = 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}} \sin \frac{\pi}{M}\right); \quad \text{สำหรับกรณีที่ } M > 4 \quad (2.6)$$

โดยที่ $E_s = (\log_2 M) \cdot E_b$

สำหรับกรณีของบีพีเอสเคนั้นสามารถเขียนสมการความน่าจะเป็นความผิดพลาดของสัญญาณได้ดังสมการที่ 2.7

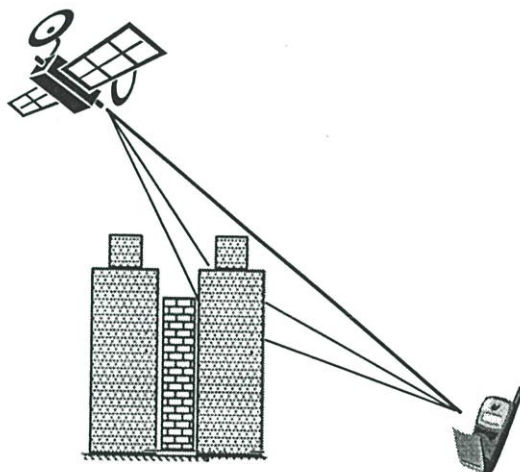
$$P_B = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (2.7)$$

โดยที่ N_0 คือ ค่าความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณรบกวน และ $Q(x)$ คือ คิวฟังก์ชัน (Q-Function) ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ 2.8

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-u^2/2} du \quad (2.8)$$

2.3 การจางหายของสัญญาณในระบบสื่อสาร

ในการสื่อสารด้วยระบบสื่อสารไร้สายนั้น เมื่อทำการส่งสัญญาณจากเครื่องส่งออกไปยังเครื่องรับจะต้องทำการส่งผ่านช่องสัญญาณสื่อสารต่างๆ ซึ่งจะเกิดการแทรกสอด สะท้อนและลดทอนสัญญาณที่มาถึงที่เครื่องรับ ซึ่งในแต่ละพื้นที่นั้นจะมีคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่ออุปกรณ์เครื่องรับมีการเคลื่อนที่ไปยังจุดต่างๆ สภาพแวดล้อมก็จะเปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้ระดับสัญญาณที่รับได้มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เป็นสาเหตุให้ระดับสัญญาณในแต่ละจุดไม่คงที่ เราสามารถแยกคลื่นที่เดินทางมายังเครื่องรับ ได้ 2 ประเภท คือ คลื่นตรงและคลื่นสะท้อน เครื่องรับจะได้รับคลื่นตรงจากทิศทางเดียวและเป็นคลื่นที่มีสัญญาณแรงที่สุด ส่วนคลื่นสะท้อน จะได้รับจากทุกทิศทางที่เข้ามาแต่จะมีสัญญาณที่อ่อนกว่า มีเฟสของคลื่นที่แตกต่างกันและเหมือนกัน ซึ่งจะเป็นการเสริมหรือหักล้างกับคลื่นตรง ทำให้สัญญาณที่รับได้มีการเปลี่ยนแปลง เราเรียกลักษณะการเกิดแบบนี้ว่า “การจางหายของสัญญาณ” [6]



รูปที่ 2.5 ทิศทางของคลื่นในทิศทางตรงและคลื่นสะท้อนที่เดินทางไปยังเครื่องรับ

2.3.1 ชนิดของการจางหาย

ในการจางหายของสัญญาณนั้นจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น รากของกำลังสองเฉลี่ยของเวลาเฉลี่ยที่แพร่กระจาย (RMS Delay Spread) การกระจายของคอปเพลตอร์ (Doppler Spread) ซึ่งจะทำให้สัญญาณที่ถูกส่งออกไปนั้นมีลักษณะการจางหายที่ต่างกัน การแพร่กระจายทางเวลา (Time Dispersion) และการแพร่กระจายทางความถี่ (Frequency Dispersion) ของช่องสัญญาณ ซึ่งผลกระทบเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณที่ส่งผ่านช่องสัญญาณและความเร็ว

2.3.1.1 การจางหายที่เกิดจากการแพร่กระจายของเวลาดีเลย์หลายเส้นทาง

สัญญาณจางหายแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ (Frequency Non-Selective Fading หรือ Flat Fading) ถ้าให้ช่องสัญญาณมีอัตราการขยายคงที่ และมีการตอบสนองทางเฟสเป็นเชิงเส้น โดยที่ความกว้างของแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณมีค่ามากกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ส่งจะมีผลให้สัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับนั้นเกิดการจางหายแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ การจางหายชนิดนี้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของช่องสัญญาณ เพราะคุณสมบัติของช่องสัญญาณที่รับได้จะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา การมัลติพาทเป็นสาเหตุทำให้อัตราการขยายของช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งถ้าอัตราการขยายของช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาแอมพลิจูดของสัญญาณที่รับได้ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลง ถ้าเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่รับได้ก็จะเปลี่ยนแปลงตามอัตราการขยาย แต่สเปกตรัมของการส่งยังคงเดิม

$$B_S < B_C \quad \text{และ} \quad T_S > \sigma_\tau \quad (2.9)$$

โดยที่ B_S คือ แบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ส่ง, B_C คือ แบนด์วิดท์แบบร่วมนัยของสัญญาณ (coherent bandwidth), T_S คือ ช่วงความกว้างทางเวลา (คาบเวลาของสัญลักษณ์) และ σ_τ คือ รากของกำลังสองเฉลี่ยของเวลาดีเลย์ที่แพร่กระจาย

สัญญาณจางหายแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่ (Frequency Selective Fading) ถ้าช่องสัญญาณมีอัตราการขยายที่คงที่ การตอบสนองของเฟสเป็นเชิงเส้นตลอดทั้งแบนด์วิดท์ และแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณน้อยกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ส่ง ช่องสัญญาณนั้นก็就会产生การจางหายแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่ขึ้นที่ช่องสัญญาณ ภายใต้เงื่อนไขที่การตอบสนองของพัลส์ของช่องสัญญาณมีการกระจายดีเลย์หลายวิธีมากกว่าคาบเวลาของสัญลักษณ์ของสัญญาณที่ส่ง ดังนั้นสัญญาณที่รับได้จึงเป็นสัญญาณรวมของสัญญาณในวิธีต่างๆ เข้าด้วยกัน ทำให้สัญญาณมีการลดทอนและเกิดดีเลย์ รูปร่างของสัญญาณที่รับได้จึงมีการผิดเพี้ยนไป การที่สัญญาณมีการจางหายแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่จะมีผลทำให้ช่วงเวลาของรูปคลื่นที่ส่งมีการแผ่กว้างออกไป ดังนั้นในช่องสัญญาณจึงเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Intersymbol Interference)

สำหรับการจางหายแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่นั้น สเปกตรัมของสัญญาณที่ส่งจะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างกว่าแบนด์วิดท์แบบร่วมนัยของช่องสัญญาณ ถ้าพิจารณาในเชิงความถี่ช่องสัญญาณจะกลายเป็นช่องสัญญาณแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่ โดยที่การเปลี่ยนแปลงความถี่จะทำให้อัตราการขยายมีการเปลี่ยนแปลง การเกิดการจางหายแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่นั้นมีสาเหตุมาจากค่าเวลาดีเลย์แบบหลายวิธีมีค่าใกล้เคียงหรือมากกว่าคาบเวลาของสัญลักษณ์ที่ช่องสัญญาณช่องสัญญาณจึงคล้ายกับช่องสัญญาณแบนด์กว้าง (Wideband Channels) เพราะแบนด์วิดท์ของ

สัญญาณกว้างกว่าแบนด์วิธของช่องสัญญาณ เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปก็จะเกิดอัตราการขยายและการข้ามเฟส ทำให้สเปกตรัมของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลง ผลของการเปลี่ยนแปลงเวลานี้ทำให้สัญญาณที่รับได้ผิดเพี้ยนไป สรุปก็คือสัญญาณจะเกิดการจางหายแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่ต่อเมื่อ

$$B_S > B_C \quad \text{และ} \quad T_S < \sigma_r \quad (2.10)$$

2.3.1.2 การจางหายที่เกิดจากการกระจายของดอปเพลอร์

การจางหายแบบเร็ว (Fast Fading) คือช่องสัญญาณที่เมื่อมีการตอบสนองของพัลส์แล้วมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วภายในช่วงเวลาของสัญลักษณ์ หมายความว่าเวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณน้อยกว่าคาบเวลาสัญลักษณ์ของสัญญาณที่ส่ง เป็นสาเหตุให้ความถี่มีการแผ่กว้างออก จึงทำให้เกิดการกระจายของดอปเพลอร์ สัญญาณจึงเกิดการผิดเพี้ยนไป ซึ่งเกิดการจางหายของสัญญาณแบบเร็วนี้มีเงื่อนไขดังนี้

$$B_S > B_D \quad \text{และ} \quad T_S > T_C \quad (2.11)$$

โดยที่ T_C คือ เวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณ

โดยในทางปฏิบัติแล้วการจางหายแบบเร็วจะเกิดขึ้นเฉพาะกับการส่งข้อมูลด้วยอัตราการส่งที่ต่ำเท่านั้น

การจางหายแบบช้า (Slow Fading) คือ ช่องสัญญาณที่มีผลตอบสนองต่อพัลส์จะช้ากว่าสัญญาณที่ถูกส่งออกไปภายในช่วงเวลาของสัญลักษณ์ ถ้าพิจารณาในทางความถี่แล้วจะพบความถี่ที่เกิดจากการกระจายของดอปเพลอร์ของช่องสัญญาณจะน้อยกว่าแบนด์วิธของสัญญาณเบสแบนด์อยู่มาก ดังนั้นสัญญาณที่เกิดการจางหายแบบช้าจะมีเงื่อนไขดังสมการที่ 2.12

$$B_S \gg B_D \quad \text{และ} \quad T_S \ll T_C \quad (2.12)$$

2.3.2 การเลื่อนดอปเพลอร์

การเลื่อนดอปเพลอร์ (Doppler shift) เกิดจากการที่อุปกรณ์ภาครับสัญญาณมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วในระดับหนึ่งซึ่งมีผลทำให้ สัญญาณที่รับได้มีความถี่ที่เปลี่ยนไปจากความถี่ของสัญญาณที่ส่งออกจากต้นกำเนิด โดยความถี่ที่เลื่อนไป หรือดอปเพลอร์ชิฟต์ f_i จะมีค่าเท่ากับ

$$f_i = f_d \cos \theta \quad (2.13)$$

โดยที่ $f_d = \frac{v}{\lambda}$ และเรียก f_d ว่าเป็นค่าคอปเพลอร์ชิฟต์สูงสุด ซึ่งเป็นการคำนวณจากความเร็วของ
โทรศัพท์เคลื่อนที่เทียบกับความยาวคลื่นของสัญญาณ

ซึ่งจะพบว่าหากเครื่องรับมีการเคลื่อนที่เข้าหาเครื่องส่งในทิศทางที่คลื่นเดินทางมาถึง การ
เลื่อนของคอปเพลอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเครื่องรับมีการเคลื่อนที่ออกจากเครื่องส่ง การเลื่อนของ
คอปเพลอร์ก็จะมีค่าลดลง

2.3.3 การกระจายของคลื่นแบบเรย์ลีและไรเซียน (Rayleigh and Rician Distribution)

ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้น ลักษณะของคลื่นที่รับได้จะประกอบไปด้วยคลื่นที่รับได้
จากในทิศทางตรงและคลื่นสะท้อนที่ทำให้เกิดรูปแบบของคลื่นระนาบต่างๆ มากมาย คลื่นระนาบ
เหล่านี้จะรวมกันและทำให้เกิดรูปแบบโครงสร้างที่ไม่แน่นอนของคลื่นจางหาย (Fading Wave)

สัญญาณในระดับแนวสายตาหรือสัญญาณในทิศทางตรง คือเส้นทางที่คลื่นเดินทางตรง
มายังเครื่องรับได้โดยไม่มีสิ่งกีดขวางหรือบดบัง ในสภาวะนี้ค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้ที่
เครื่องรับก็จะสูงกว่าเดิม และเรียกสัญญาณจางหายที่มีสัญญาณในแนวระดับสายตารวมอยู่ด้วยนี้ว่า
การจางหายแบบไรเซียน(Rician Fading) ซึ่งเป็นผลจากการรวมกันของคลื่นในแนวระดับสายตากับ
คลื่นที่สะท้อนจากจุดต่างๆ แต่เมื่ออยู่ในสภาวะที่ปราศจากสัญญาณในแนวระดับสายตาแล้วนั้น
สัญญาณจางหายที่เกิดขึ้นก็จะเกิดจากการรวมกันของคลื่นที่สะท้อนจากจุดต่างๆ ซึ่งสัญญาณจาง
หายในลักษณะนี้จะเรียกว่า การจางหายแบบเรย์ลี (Rayleigh Fading) ซึ่งเป็นการจางหายของ
สัญญาณที่รุนแรงที่สุด

2.3.3.1 การจางหายที่มีการกระจายแบบเรย์ลี

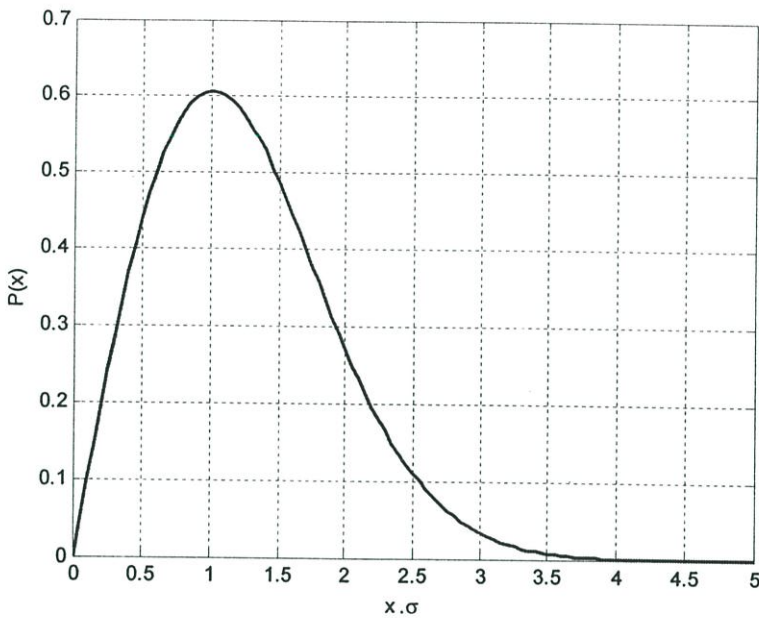
สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับซึ่งเกิดจากผลรวมของสัญญาณที่มีสะท้อนจากจุดต่างๆ ที่ส่งมา
จากภาคส่งในช่องสัญญาณแบบไม่เปลี่ยนแปลงความถี่ ซึ่งในกระบวนการแบบเรย์ลี $\zeta(t)$ นั้นจะ
หาค่าได้จากสมการ

$$\zeta(t) = |\mu(t)| = |\mu_1(t) + j\mu_2(t)| \quad (2.14)$$

เมื่อ $\mu_1(t)$ และ $\mu_2(t)$ เป็นกระบวนการสุ่มแบบเกาส์ กระบวนการทั้งสองมีค่าทางสถิติที่ไม่
สหสัมพันธ์กัน การกระจายแบบเรย์ลีมีฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability
Density Function: PDF) ดังนี้

$$P(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma_0^2} e^{\left(-\frac{x^2}{2\sigma_0^2}\right)} & ; x \geq 0 \\ 0 & ; x < 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

โดยที่ x คือ ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันสัญญาณที่รับได้ และ σ_0^2 คือค่ากำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้ตลอดเส้นทางและมีค่าเท่ากับ $\frac{E_0^2}{2}$ ในรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของค่าความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่มีการกระจายแบบเรย์ลี



รูปที่ 2.6 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่มีการกระจายแบบเรย์ลี

2.3.3.2 การจางหายที่มีการกระจายแบบไรเซียน

การกระจายแบบไรเซียนเกิดจากรวมกันของสัญญาณที่มีส่วนของสัญญาณในแนวระดับสายตารวมอยู่ด้วย สัญญาณหลายวิธีที่มาถึงนั้นแต่ละสัญญาณจะมีทิศทางที่แตกต่างกันและมารวมกับสัญญาณในแนวตรง ถ้าสัญญาณในแนวตรงกลายเป็นสัญญาณที่อ่อนลงเนื่องจากการรบกวนต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการเดินทางทำให้สัญญาณมีลักษณะคล้ายคลึงกับสัญญาณรบกวน ก็จะทำให้การกระจายของสัญญาณมีลักษณะเหมือนกับการกระจายแบบเรย์ลีได้ ดังนั้นการกระจายแบบเรย์ลีจึงเกิดขึ้นจากการกระจายแบบไรเซียนที่สัญญาณในแนวตรงมีค่าอ่อนมากๆ นั่นเอง

ส่วนประกอบของสัญญาณในแนวระดับสายตาที่รับได้นั้นสามารถอธิบายจากสมการที่แปรผันตามเวลา

$$m(t) = m_1(t) + m_2(t) = \rho e^{j(2\pi f_p t + \theta_p)} \quad (2.16)$$

เมื่อ ρ คือแอมพลิจูด, f_p คือความถี่คอปเพลอร์ และ θ_p คือเฟสในส่วนของสัญญาณในแนวระดับสายตา กระบวนการแบบโรเซียน $\zeta(t)$ นั้นจะหาได้จากสมการ

$$\zeta(t) = |\mu(t) + m(t)| \quad (2.17)$$

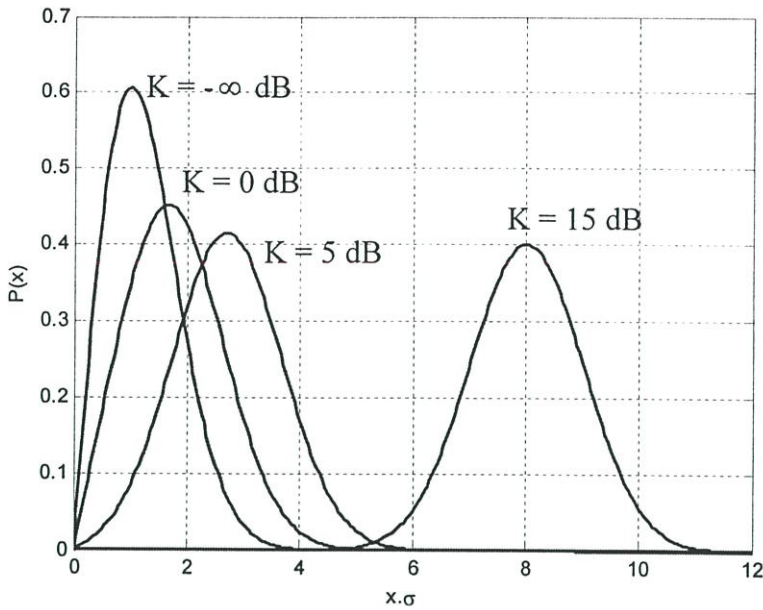
ซึ่งเป็นการรวมกันของสัญญาณในส่วนของเรย์ลี และ $\zeta(t) = |\mu(t) + m(t)|$ ในแนวระดับสายตาเข้าด้วยกันนั่นเอง การกระจายแบบโรเซียนสามารถหาฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นได้ดังสมการ

$$P(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma_0^2} e^{\left(\frac{-x^2 + \rho^2}{2\sigma_0^2}\right)} I_0\left(\frac{x\rho}{\sigma_0^2}\right) & ; i \geq 0 \\ 0 & ; i < 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

โดยที่ $I_0(\bullet)$ คือฟังก์ชันเบสเซลแบบดัดแปลงชนิดที่ 1 อันดับที่ 0 (0th order modified Bessel function of the first kind) ในกระบวนการแบบโรเซียนนั้น บ่อยครั้งที่มีการกล่าวถึงค่าโรเซียนแฟคเตอร์ (Rician Factor) โดยใช้พารามิเตอร์ K ซึ่งหาได้จากสัดส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณที่วัดได้ต่อค่าความแปรปรวนของส่วนมัลติพาตังสมการ [18]

$$K(\text{dB}) = 10 \log \frac{\rho^2}{2\sigma_0^2} \quad (2.19)$$

จากสมการที่ 2.19 จะพบว่าเมื่อค่า ρ มีค่าเข้าใกล้ 0 ก็จะทำให้ค่า K มีค่าเข้าใกล้ $-\infty$ จะเห็นว่าในกรณีนี้การกระจายแบบโรเซียนจะมีลักษณะเหมือนการกระจายแบบเรย์ลี และถ้า K มีค่ามาก รูปแบบของการกระจายก็จะใกล้เคียงกับการกระจายแบบเกาส์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่มีการกระจายแบบไรเซียน

2.3.4 ดีเลย์สเปรด

สัญญาณที่ทำการส่งผ่านช่องสัญญาณนั้นจะมีการแพร่กระจายได้หลายทิศทางและสัญญาณแต่ละส่วนมักจะส่งผ่านในเส้นทางที่มีระยะทางที่ไม่เท่ากัน สัญญาณที่เดินทางในทิศทางตรงไปยังเครื่องรับก็จะเดินทางถึงเครื่องรับได้เร็ว ในขณะที่สัญญาณส่วนอื่นที่เดินทางคดกระทบและสะท้อนจากวัตถุก็จะใช้เวลาในการแพร่กระจายที่ยาวนานกว่า ซึ่งความล่าช้าในการเดินทางของสัญญาณแต่ละส่วนก่อให้เกิดปัญหาที่เรียกว่า ดีเลย์สเปรด (delay spread) [7] นั่นคือสัญญาณแต่ละส่วนจะเดินทางมาถึงที่เครื่องรับโดยใช้เวลาในการเดินทางไม่เท่ากัน ซึ่งแน่นอนว่าเวลาการมาถึงของสัญญาณที่แตกต่างกันย่อมจะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของสัญญาณที่รับได้ โดยทั่วไปผลกระทบของดีเลย์สเปรดจะมีมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ส่งเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนกลับของค่าความแตกต่างของเวลาการมาถึงระหว่างคลื่นสัญญาณแต่ละเส้นทาง กล่าวคือถ้าสัญญาณที่ส่งมีแบนด์วิดท์ที่แคบมากเมื่อเทียบกับส่วนกลับของค่าความแตกต่างของเวลาการมาถึง เราสามารถละทิ้งผลกระทบของดีเลย์สเปรดได้ แต่หากสัญญาณที่ส่งมีแบนด์วิดท์ที่สูงมากขึ้น ในการวิเคราะห์แบบจำลองช่องสัญญาณจางหลายวิธีนั้นจำเป็นที่จะต้องนำปัญหาของดีเลย์สเปรดมารวมคิดด้วย

หากพื้นที่การให้บริการครอบคลุมบริเวณที่กว้างขึ้น เช่น ในบริเวณชายเมืองหรือในชนบท ดีเลย์สเปรดก็จะมีค่ามากขึ้น ปัญหาการซ้อนกันของสัญญาณระหว่างบิตหรือสัญลักษณ์ก็จะรุนแรงมากขึ้น ดังนั้นหากต้องการลดผลกระทบของการซ้อนทับกันของบิตหรือสัญลักษณ์ที่ติดกันก็จำเป็นต้องชะลอการส่งบิตแต่ละบิตให้ห่างกันมากขึ้นซึ่งหมายถึงการลดอัตราการส่งบิตข้อมูลลง

ซึ่งจากที่กล่าวมาจะเห็นว่าการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ที่เกิดจากปัญหาการจางหายหลายวิธีสามารถเกิดขึ้นได้ และเป็นปัญหาที่มีความสำคัญต้องนำมาพิจารณาประกอบในการออกแบบวงจรรับสัญญาณ เช่น หากไม่ต้องการลดอัตราการส่งข้อมูลลงก็อาจจะต้องมีการนำอีควอไลเซอร์ (equalizer) มาช่วยแก้ปัญหา

2.4 แบบจำลองและมาตรฐาน COST207

ในส่วนของการจำลองช่องสัญญาณจางหายหลายเส้นทางแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่นั้น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้คุณลักษณะของช่องสัญญาณที่มีการกำหนดอยู่ในมาตรฐาน COST 207 โมเดล COST 207 นั้นเป็นแบบจำลองที่มีการนำไปประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง โดยใช้สำหรับการจำลองระบบสื่อสารเคลื่อนที่ ครอบคลุมการใช้งานถึงความถี่ 2 GHz โดยในแบบจำลองที่ระบุไว้นั้นจะบอกถึงผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณในรูปของกลุ่มคุณลักษณะของคอปเพลอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามคิเลย์เวลาที่ระบุ

แบบจำลองที่มีการกำหนดอยู่ในมาตรฐาน COST207 มีด้วยกัน 4 ชนิด [8] โดยกำหนดตามสภาพภูมิประเทศดังนี้

- 1) สภาพภูมิประเทศแบบเมือง (Typical Urban : TU)
- 2) สภาพภูมิประเทศแบบทุ่งหญ้า (Rural areas : RA)
- 3) สภาพภูมิประเทศแบบเมืองที่มีความแออัด (Bad urban : BU)
- 4) สภาพภูมิประเทศที่มีลักษณะเป็นภูเขา (Hilly terrain : HT)

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะคิเลย์และกำลังงานในสภาพภูมิประเทศแบบเมืองที่ระบุใน COST207

Typical Urban (TU)		
delay(us)	Fractional Power	Doppler Category
0.0	0.092	CLASS
0.1	0.115	CLASS
0.3	0.231	CLASS
0.5	0.127	CLASS
0.8	0.115	GAUS1
1.1	0.074	GAUS1
1.3	0.046	GAUS1
1.7	0.074	GAUS1
2.3	0.051	GAUS2
3.1	0.032	GAUS2
3.2	0.018	GAUS2
5.0	0.025	GAUS2

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะดีเลย์และกำลังงานในสภาพภูมิประเทศแบบทุ่งหญ้าที่ระบุใน COST207

Typical rural area (RA)		
delay(us)	Fractional Power	Doppler Category
0.0	0.602	RICE
0.1	0.241	CLASS
0.2	0.096	CLASS
0.3	0.036	CLASS
0.4	0.018	CLASS
0.5	0.006	CLASS

ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะดีเลย์และกำลังงานในสภาพภูมิประเทศแบบเมืองที่มีความแออัดที่ระบุใน COST207

Bad Urban (BU)		
delay(us)	Fractional Power	Doppler Category
0.0	0.033	CLASS
0.1	0.089	CLASS
0.3	0.141	CLASS
0.7	0.194	GAUS1
1.6	0.114	GAUS1
2.2	0.052	GAUS2
3.1	0.035	GAUS2
5.0	0.14	GAUS2
6.0	0.136	GAUS2
7.2	0.041	GAUS2
8.1	0.019	GAUS2
10.0	0.006	GAUS2

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะดีเลย์และกำลังงานในสภาพภูมิประเทศพื้นที่แบบภูเขาที่ระบุใน COST207

Typical hilly terrain (HT)		
delay(us)	Fractional Power	Doppler Category
0.0	0.026	CLASS
0.1	0.042	CLASS
0.2	0.066	CLASS
0.3	0.105	CLASS
0.4	0.263	GAUS1
0.5	0.263	GAUS1
0.0	0.105	GAUS1
0.1	0.042	GAUS2
0.2	0.034	GAUS2
0.3	0.026	GAUS2
0.4	0.016	GAUS2
0.5	0.011	GAUS2

จากตารางด้านบนจะพบว่ามอดูเลชันแบบ Doppler spectrum) $S_{gg}(f)$ ทั้งหมด 4 ชนิด ที่กำหนดอยู่ในโมเดล COST207 โดยเริ่มจากการกำหนดให้

$$G(f) = A \cdot \exp\left\{-\frac{(f - f_1)^2}{2f_2^2}\right\} \quad (2.20)$$

1). CLASS นั้นมีมอดูเลชันแบบ Doppler spectrum ที่มีลักษณะรูปร่างเหมือนของ Jake และใช้สำหรับเส้นทางที่มีดีเลย์ไม่เกิน 500 นาโนวินาที ($\tau_i \leq 0.5 \mu s$)

$$S_{gg}(f) = \frac{A}{\sqrt{1 - (f/f_{\max})^2}} \quad ; |f| \leq f_{\max} \quad (2.21)$$

2). GAUS1 เป็นผลรวมของฟังก์ชันเกาส์ 2 ฟังก์ชัน โดยกำหนดขึ้นเพื่อใช้สำหรับเส้นทางที่มีดีเลย์อยู่ในช่วง 500 นาโนวินาที ถึง 2 ไมโครวินาที ($500 ns \leq \tau_i \leq 2 \mu s$)

$$S_{gg}(f) = G(A, -0.8f_m, 0.05f_m) + G(A_1, 0.4f_m, 0.1f_m) \quad (2.22)$$

โดยที่ A_1 คือค่าที่น้อยกว่า A อยู่ 10 dB

3). GAUS2 เป็นผลรวมของฟังก์ชันเกาส์ 2 ฟังก์ชัน โดยกำหนดขึ้นเพื่อใช้สำหรับเส้นทางที่มีดีเลย์อยู่ในช่วงมากกว่า 2 ไมโครวินาที ($\tau_i \geq 2 \mu s$)

$$S_{gg}(f) = G(B, 0.7f_m, 0.1f_m) + G(B_1, -0.4f_m, 0.15f_m) \quad (2.23)$$

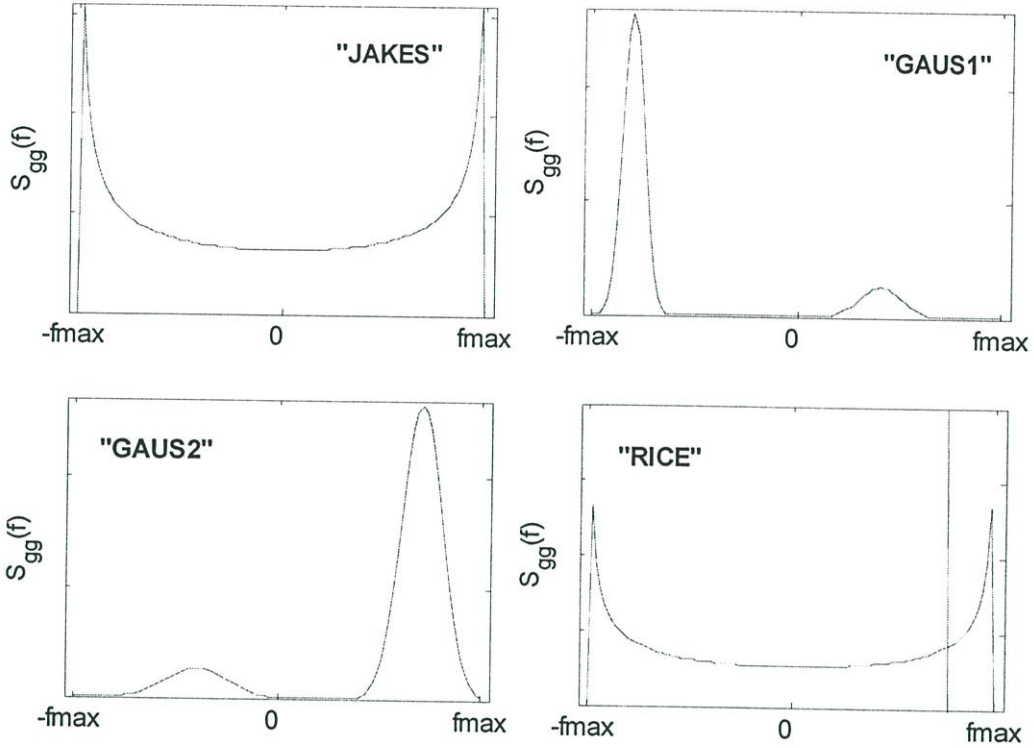
โดยที่ B_1 คือค่าที่น้อยกว่า B อยู่ 10 dB

4). RICE เป็นผลรวมของมอดูเลชันแบบ Doppler spectrum ที่มีลักษณะรูปร่างเหมือนของ Jake กับหนึ่งเส้นทางในทิศทางตรง สเปกตรัมนี้จะใช้สำหรับเส้นทางที่สั้นๆ ของแบบจำลองที่มีการแพร่กระจายในสภาพพื้นที่แบบทุ่งหญ้า

$$S_{gg}(f) = \frac{0.41}{2\pi f_{\max} \sqrt{1 - (f/f_{\max})^2}} + 0.91\delta(f - 0.7f_{\max}) \quad (2.24)$$

โดยที่ $|f| \leq f_{\max}$ และ f_{\max} แทนค่าความถี่คอปเพลอร์สูงสุดของช่องสัญญาณ
 A คือ ค่าคงที่การนอร์มัลไลซ์ ดังนั้นมีค่าเท่ากับ $\int S_{gg}(f) df = 1$

ในรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของคอปเพลอร์สเปกตรัม ทั้ง 4 ชนิด ที่มีการกำหนดอยู่ใน
 COST207 ตามสมการที่ 2.21-2.24



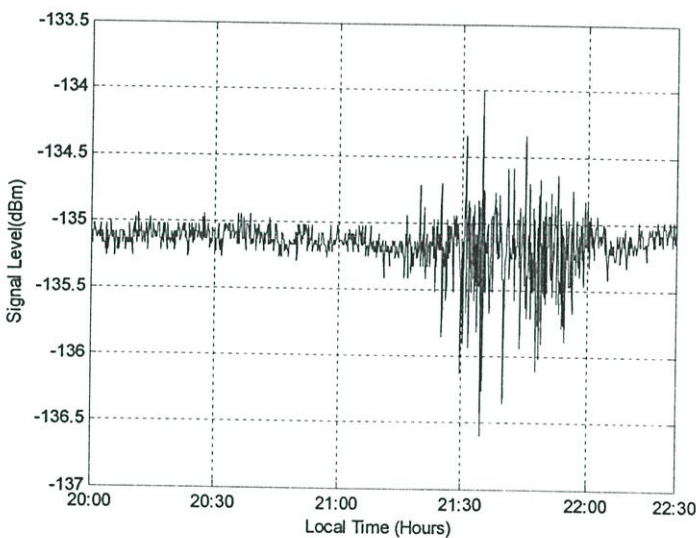
รูปที่ 2.8 คอปเพลอร์สเปกตรัมของแบบจำลองช่องสัญญาณตามที่กำหนดใน COST207

2.5 การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน

ในระบบสื่อสารจะได้รับผลกระทบเมื่อสัญญาณแพร่กระจายผ่านชั้นบรรยากาศโลก โดยชั้นบรรยากาศโลกที่มีผลกระทบเป็นส่วนใหญ่คือ ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ผลกระทบจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์นั้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห (Refractive Index), การลดทอน (Absorption), การกระเจิง (Scatter) ของคลื่นสัญญาณอันเนื่องจาก เมฆ, ฝน, หิมะ และอื่นๆ โดยผลกระทบจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เริ่มมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นที่มีความถี่สูงกว่าแถบความถี่ C (4-6 GHz) ขึ้นไป ส่วนผลกระทบที่เกิดเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นจะมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่า C (30 MHz - 3 GHz) ซึ่งจะทำให้สัญญาณเกิดการหน่วงเวลา (Time Delay) ทำให้สัญญาณมาถึงจุดที่รับสัญญาณช้ากว่าการเดินทางของคลื่นในระยะตรง, การเกิดการหมุนแบบฟาราเดย์ (Faraday Rotation) ซึ่งจะทำ

ให้มุมโพลาไรซ์ของสัญญาณนั้นเกิดการหมุนไปจากมุมเดิม และนอกจากนี้ยังเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของสัญญาณอย่างกะทันหัน (Scintillation) ซึ่งจะทำให้ระดับสัญญาณเกิดการแกว่งขึ้นๆ ลงๆ อย่างรวดเร็วจากระดับปกติ โดยผลกระทบที่เกิดจากซินทิลเลชันนั้นมีสาเหตุมาจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่แต่ละระดับความสูง (ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นอยู่ที่ระดับความสูงในช่วง 50 – 400 กิโลเมตร), ตำแหน่ง, ฤดู และเวลา โดยซินทิลเลชันในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นจะมีค่าสูงสุดใกล้กับบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก และจะมีค่าต่ำสุดในบริเวณตำแหน่งละติจูดกลาง โดยที่ซินทิลเลชันนั้นมีแบบจำลองทางสถิติเช่นเดียวกับสัญญาณจางหายไรเซชันหรือเรย์ลี

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เกิดจากการที่สัญญาณเดินทางผ่านกลุ่มความไม่สม่ำเสมออันเนื่องจากการแปรปรวนของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ทำให้สัญญาณที่ผ่านกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศนี้ถูกหักเห กระจิง ลดทอนและดีเลย์ เมื่อสัญญาณมาถึงที่เครื่องรับจากหลายทิศทางทำให้สัญญาณที่รับได้เกิดการเสริมหรือหักล้างกัน ทำให้สัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของแอมพลิจูดอย่างรวดเร็ว [9]



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม

ในรูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของสัญญาณดาวเทียมจากระดับปกติอย่างกะทันหันที่รับได้ที่เครื่องรับสัญญาณเมื่อเกิดความแปรปรวนของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

2.5.1 ดัชนีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันนั้นเป็นปรากฏการณ์ที่มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง [9] ซึ่งพบว่าจะมีผลกระทบต่อการส่งสัญญาณผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จึงได้มีการกำหนดเป็นตัวแปรหนึ่งในการออกแบบระบบ โดยมีการเผื่อค่าไว้ซึ่งคเชยกับค่าระดับสัญญาณที่อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงเกินกว่าระดับที่ต้องการเช่นเดียวกับตัวแปรอื่นๆ ในการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันนั้นวิธีการสถิติเป็นสิ่งจำเป็นในการแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณและเก็บเป็นข้อมูลทางสถิติที่ใช้อ้างอิงในการทำนายความน่าจะเป็นในการเกิดของเหตุการณ์ในอนาคตได้ระดับหนึ่ง การวัดระดับความรุนแรงของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันนั้นสามารถวัดได้หลายวิธี ซึ่งในบทความนี้จะทำการวัดจากค่าดัชนี S_4

ค่าดัชนี S_4 เป็นค่าดัชนีการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่ใช้โดยทั่วไปและให้ความถูกต้องมากที่สุด ดัชนี S_4 เป็นดัชนีที่สัมพันธ์กับเวลาที่กำหนดโดยค่ารากที่สองของความแปรปรวน (Variance) ของกำลังสัญญาณที่รับได้หารด้วยค่าเฉลี่ยของกำลังสัญญาณนั้นในหน่วยวัตต์ ซึ่งเป็นค่าออร์มอลไลซ์ (Normalize) ความแปรปรวนของความเข้มสัญญาณ

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2}{\langle A \rangle^2}} \quad (2.25)$$

โดยที่ A คือขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณ

$\langle \rangle$ คือค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ในช่วงเวลาหนึ่งที่กำหนดหรือสามารถหาค่าดัชนี S_4 ได้จาก

$$S_4 = \frac{\sigma_x}{m_x} \quad (2.26)$$

$$m_x = \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.27)$$

$$\sigma_x = s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.28)$$

โดยที่ σ_x คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

m_x คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล (Mean Value)

x คือ ข้อมูล

N คือ จำนวนข้อมูล

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในดัชนี S_4 สามารถคำนวณได้โดยทำการเฉลี่ยสัญญาณทุกๆ ช่วงเวลาใดๆ ที่กำหนด โดยปกติใช้ 1 นาที ค่าดัชนี S_4 เท่ากับ 0.5 เป็นตัวแบ่งระหว่างการเกิด เปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอย่างอ่อน (Weak Scintillation) และอย่างรุนแรง (Strong Scintillation) ซึ่งบางครั้งค่าดัชนี S_4 อาจมากกว่า 1 ได้

2.6 การเข้ารหัสและการถอดรหัส

ในระบบสื่อสารนั้น สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากช่องสัญญาณเป็นปัญหาสำคัญปัญหาหนึ่งที่ทำให้การรับส่งข้อมูลเกิดความผิดพลาด ในระบบสื่อสารจึงจำเป็นต้องได้รับการป้องกัน และแก้ไขปัญหาดังกล่าวนี้เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการรับส่งข้อมูลให้มากขึ้น โดยวิธีการในการปรับปรุงและเพิ่มสมรรถนะของระบบสื่อสารสามารถทำได้หลายวิธีเช่น

1) การใช้เทคนิคไคเวอร์ซิตี (Diversity Technique) เช่น การรวมอัตราส่วนสูงสุด (Maximal Ratio Combining) ไคเวอร์ซิตีทางความถี่ (Frequency Diversity) และไคเวอร์ซิตีทางเวลา (Time Diversity)

2) การเข้ารหัส (Coding) เช่น รหัสบล็อกเชิงเส้น รหัสคอนโวลูชัน เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเข้ารหัสสามารถแบ่งออกตามวัตถุประสงค์ได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.1 การเข้ารหัสแหล่งกำเนิด (source coding)

2.2 การเข้ารหัสช่องสัญญาณ (channel coding) โดยเข้ารหัสช่องสัญญาณสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

- การเข้ารหัสรูปคลื่น (waveform coding) เป็นการสร้างรูปคลื่นใหม่ขึ้นมาเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีกว่ารูปคลื่นเดิม เช่น การส่งสัญญาณตั้งฉากกัน (Orthogonal) สัญญาณตรงข้ามกัน (Antipodal) สัญญาณตั้งฉากกันสองขั้ว (Biorthogonal)

- การเข้ารหัสแบบการจัดลำดับโครงสร้างของข้อมูล (Structured Sequences) เป็นการเพิ่มบิตเข้าไปรวมกับบิตของข้อมูล เพื่อช่วยในการตรวจสอบความผิดพลาดของบิตข้อมูล อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณ ตัวอย่างของการเข้ารหัสแบบนี้เช่น การเข้ารหัสบล็อกเชิงเส้น (Linear block code) และการเข้ารหัสคอนโวลูชัน (Convolutional code)

จากบล็อกการทำงานของระบบตามรูปที่ 2.1 ข้อมูลที่ผ่านการเข้ารหัสช่องสัญญาณแล้วจะถูกส่งไปยังการมอดูเลตด้วยระบบดิจิทัลมอดูเลตแล้วจะส่งผ่านช่องสัญญาณสื่อสาร ซึ่งจะถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ ช่องสัญญาณสื่อสารนั้นจะเป็นตัวกลางใดๆก็ได้แล้วแต่ความต้องการของงานเช่น อากาศ สายไขว้คู่ และเส้นใยแก้ว เมื่อข้อมูลมาถึงปลายทางก็จะถูกดีมอดูเลตจากนั้นจะถูกถอดรหัสช่องสัญญาณ (Channel decoding) โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การเข้ารหัสคอนโวลูชัน (Convolution code) และการถอดรหัสแบบวิเทอร์บี การเข้ารหัสคอนโวลูชันและการ

ถอดรหัสแบบวิเทอร์บินั้นได้นำมาใช้ในงานในระบบสื่อสารแบบดิจิทัลในปัจจุบันอย่างแพร่หลาย อาทิ ระบบสื่อสารดาวเทียม ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่และระบบ Wireless LAN เป็นต้น

2.6.1 รหัสบล็อกเชิงเส้น (Linear block code)

รหัสลิเนียร์บล็อกเชิงเส้น [5] นั้นเป็นรหัสที่ประกอบด้วยเวกเตอร์ที่มีขนาดความยาวจำกัด ซึ่งจะถูกรู้จักว่า คำรหัส (code words) ความยาวของคำรหัสคือ จำนวนตัวประกอบทั้งหมดที่มีอยู่ในเวกเตอร์ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ n โดยตัวประกอบแต่ละตัวจะเรียกว่า บิต ซึ่งคำรหัสจะเลือกจากจำนวนตัวเลขทั้งหมด q หมายเลขถ้าหากตัวประกอบในเวกเตอร์ประกอบด้วยค่าเพียง 2 ค่า คือ 1 และ 0 รหัสนี้ถูกเรียกว่า รหัสไบนารี หาก $q > 2$ รหัสนี้จะถูกเรียกว่า นอนไบนารี

ในการเข้ารหัสของข้อมูลซึ่งมีความยาวเท่ากับ k บิต หลังจากผ่านการเข้ารหัสจะได้ความยาวของคำรหัสมีค่าเท่ากับ n บิต ซึ่งขนาด $n-k$ บิต เป็นบิตที่เพิ่มรวมเข้าไปกับข้อมูล จะถูกเรียกว่าพาริตีบิตหรือบิตตรวจสอบ โดยรหัสที่ได้จะถูกเรียกว่าเป็นรหัส (n, k) ซึ่งอัตราส่วนของจำนวนบิตของข้อมูลกับความยาวของคำรหัส $k/n = R_C$ เรียกว่า อัตรารหัส (code rate) พารามิเตอร์อีกค่าหนึ่งที่มีความสำคัญกับการเข้ารหัส คือ น้ำหนักแฮมมิง (Hamming weight) ซึ่งหมายถึง จำนวนบิตของรหัสซึ่งมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เช่น รหัส 101000 จะมีน้ำหนักแฮมมิงเท่ากับ 2 หากมีรหัสบล็อกเชิงเส้น 2 ค่า คือ

$$C_i = 10011010$$

$$C_j = 11110000$$

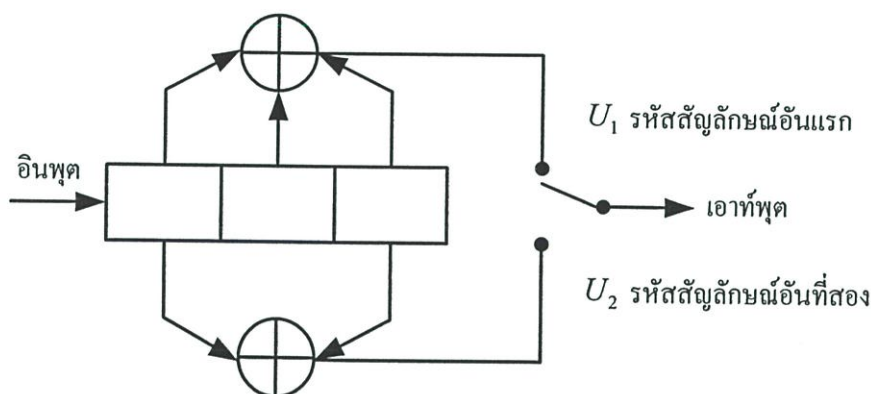
ในการหาค่าความแตกต่างระหว่างคำรหัสทั้งสองนี้สะดวกได้จากจำนวนบิตหรือตำแหน่งของบิตที่มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งจะเรียกค่าที่วัดได้ว่าระยะแฮมมิง เขียนได้เป็น d_{ij} โดยที่ $i \neq j$ จากตัวอย่างข้างต้นพบว่า ค่าระยะแฮมมิงมีค่าเท่ากับ 4 โดยที่ค่าของระยะแฮมมิงมีค่าระหว่าง $0 < d_{ij} \leq n$ ค่าที่ต่ำสุดของ d_{ij} สำหรับคำรหัสใดๆจะเรียกว่า ระยะความแตกต่างต่ำสุด (minimum distance) ของรหัส โดยเขียนแทนด้วย d_{\min} นอกจากนี้ความสามารถในการตรวจสอบและแก้ไขความผิดพลาดของรหัสสามารถหาได้จาก

$$t = \left\lfloor \frac{d_{\min} - 1}{2} \right\rfloor \quad (2.29)$$

โดยที่ $\lfloor x \rfloor$ หมายถึง ค่าจำนวนเต็มที่มากที่สุดแต่ไม่เกินค่า x เช่น ถ้ามีระยะความแตกต่างต่ำสุด (d_{\min}) เท่ากับ 6 จะสามารถแก้ไขความผิดพลาดได้ 2 ตำแหน่ง

2.6.2 รหัสคอนโวลูชัน (Convolution code)

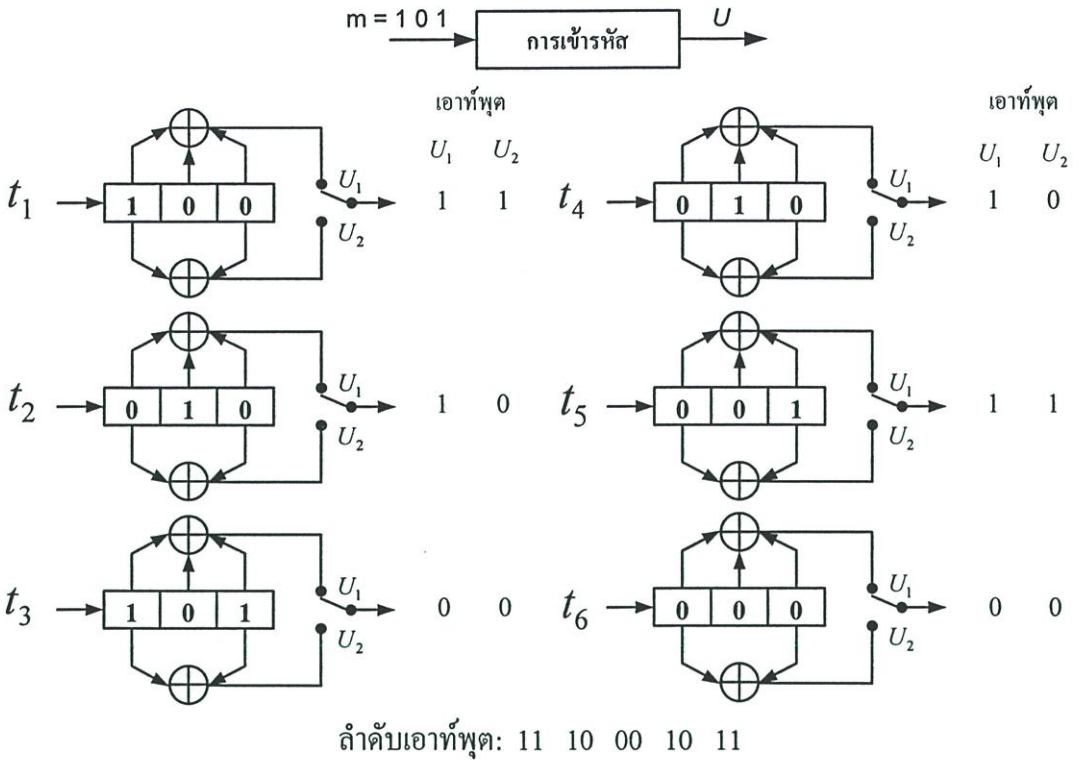
การเข้ารหัสคอนโวลูชัน [5] เป็นการหาความสัมพันธ์ของกลุ่มข้อมูลอินพุตที่เรียงลำดับอย่างต่อเนื่อง โดยจะทำงานโดยใช้หลักการของดีเลย์หรือชิฟท์รีจิสเตอร์ (Shift Register) และตัวบวกแบบมอดูโล 2 (Modulo-2 Adder) หรือ Exclusive OR โดยที่ข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากการเข้ารหัส (n) เกิดจากการนำข้อมูล (k) และข้อมูลในชิฟท์รีจิสเตอร์มาบวกแบบมอดูโล 2 ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความยาวคอนสเตรินท์ (Constraint Length : K) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงจำนวนของข้อมูลอินพุตและข้อมูลสูงสุดในชิฟท์รีจิสเตอร์ที่นำมาบวกแบบมอดูโล 2 ในการหาค่าเอาต์พุต และค่า Generator Polynomial (g) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้แสดงตำแหน่งข้อมูลอินพุตและข้อมูลในรีจิสเตอร์ที่นำมาบวกแบบมอดูโล 2 ค่า Generator Polynomial นี้นิยมเขียนในรูปแบบเลขฐานแปด ส่วนค่าอัตรารหัส (R) เป็นอัตราส่วนของจำนวนข้อมูลอินพุต (k) ต่อจำนวนเอาต์พุต (n) หรือ k/n



รูปที่ 2.10 การเข้ารหัสคอนโวลูชันด้วยอัตรารหัสเท่ากับ $1/2$ และความยาวคอนสเตรินท์เท่ากับ 3

รูปที่ 2.10 แสดงถึงแบบจำลองการเข้ารหัสคอนโวลูชัน โดยมีค่าอัตรารหัสเท่ากับ $1/2$ คืออินพุต 1 บิต ให้เอาต์พุต 2 บิต มีค่าความยาวคอนสเตรินท์เท่ากับ 3 และมีค่า Generator Polynomials g_0 เท่ากับ 7_8 และ g_1 เท่ากับ 5_8 จากรูปจะสังเกตเห็นว่านอกจากอินพุตแล้วการเชื่อมต่อระหว่างตำแหน่งของรีจิสเตอร์กับวงจรถบวมอดูโล 2 ก็มีผลกับรหัสเอาต์พุตที่ได้

หากสมมติว่าข้อมูลอินพุต $m=101$ ถูกทำการเข้ารหัสคอนโวลูชัน โดยตัวเข้ารหัสแสดงดังรูปที่ 2.10 โดยมีอินพุตบิต 3 บิต ถูกชิฟท์เข้าไปในเวลา t_1, t_2 และ t_3 ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.11 ส่วนเวลา t_4 และ t_5 เป็นการชิฟท์บิต 0 เข้าไปเพื่อให้บิตข้อมูลบิตสุดท้ายถูกชิฟท์ไปจนถึงรีจิสเตอร์ตัวสุดท้าย ส่วนเวลา t_6 เป็นการทำให้รีจิสเตอร์มีค่ากลับเป็น 0 ทั้งหมด โดยเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 1110001011 โดยสัญลักษณ์ที่อยู่ซ้ายมือสุดจะถูกส่งออกไปก่อน



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการเข้ารหัสคอนโวลูชันด้วยอัตรารหัส $R=1/2$ และความยาวคอนสเตรนต์ $K=3$

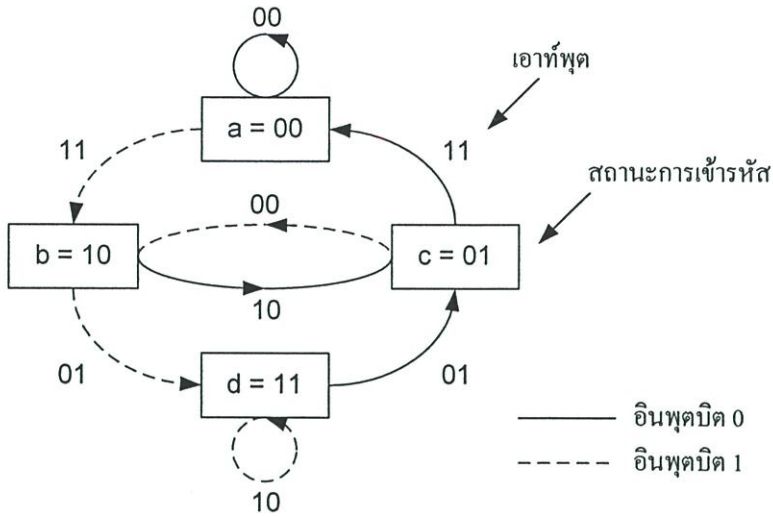
สมรรถนะของรหัสคอนโวลูชันโดยทั่วไปแล้ววิเคราะห์จากค่าระยะห่างอิสระของรหัส (d_{free}) เนื่องจากความยาวของบล็อกของคำรหัสไม่จำกัด ซึ่งเราสามารถหาค่า d_{free} ได้โดยตรงจากการจากแผนภาพเทรลลิส โดยหาจากเส้นทางที่แยกออกมาจากเส้นทางศูนย์หมดและย้อนกลับไปที่ศูนย์หมดอีกครั้งและมีค่าระยะห่างแฮมมิงระหว่างคำรหัสต่ำสุดเมื่อเทียบกับเส้นทางศูนย์หมด

ในการอธิบายการเข้ารหัสคอนโวลูชันโดยทั่วไปสามารถอธิบายได้ 3 วิธี คือ แผนภาพต้นไม้ (Tree Diagram) แผนภาพเทรลลิส (Trellis Diagram) และแผนภาพสถานะ (State Diagram) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.6.3 แผนภาพสถานะ (State Diagram)

แผนภาพสถานะ คือ ไดอะแกรมแสดงค่าของข้อมูลในชิฟต์รีจิสเตอร์และเอาต์พุตของตัวเข้ารหัส ซึ่งแผนภาพสถานะของวงจรเข้ารหัสในรูปที่ 2.10 แสดงดังรูปที่ 2.12 ตัวเลขที่อยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมแต่ละอันนั้น หมายถึงสถานะต่างๆ ของข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ในชิฟต์รีจิสเตอร์ ซึ่งในกรณีของวงจรเข้ารหัสที่ K เท่ากับ 3 จะมีจำนวนสถานะ (State) เท่ากับ $2^{(K-1)}$ หรือ 4 สถานะ และสำหรับลูกศรที่ถูกแสดงไว้ในรูปนั้นจะแสดงถึงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงการทำงานจากสถานะหนึ่งไป

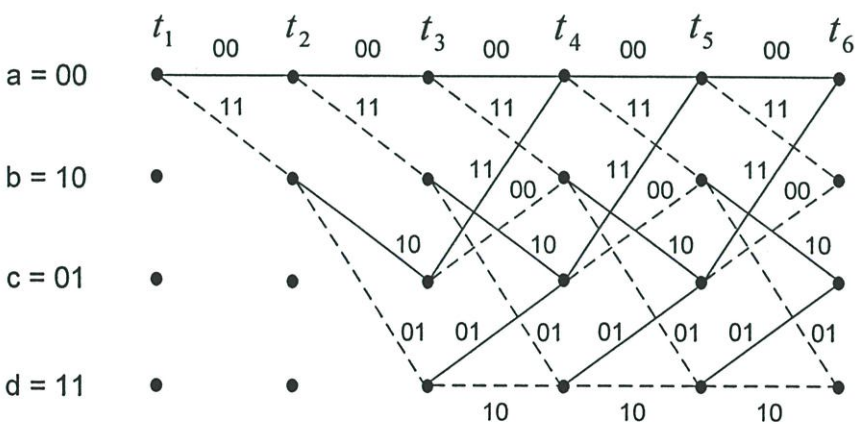
เป็นอีกสถานะหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ป้อนเข้ามา ณ เวลานั้นๆ จากรูปกรณ์ที่เป็นเส้นปะ หมายถึง อินพุต 0 ส่วนที่เป็นเส้นทึบ หมายถึง อินพุต 1



รูปที่ 2.12 แผนภาพสถานะของการเข้ารหัสคอนโวลูชันด้วยอัตรารหัส 1/2 และ K = 3

2.6.4 แผนภาพเทรลลิส (Trellis Diagram)

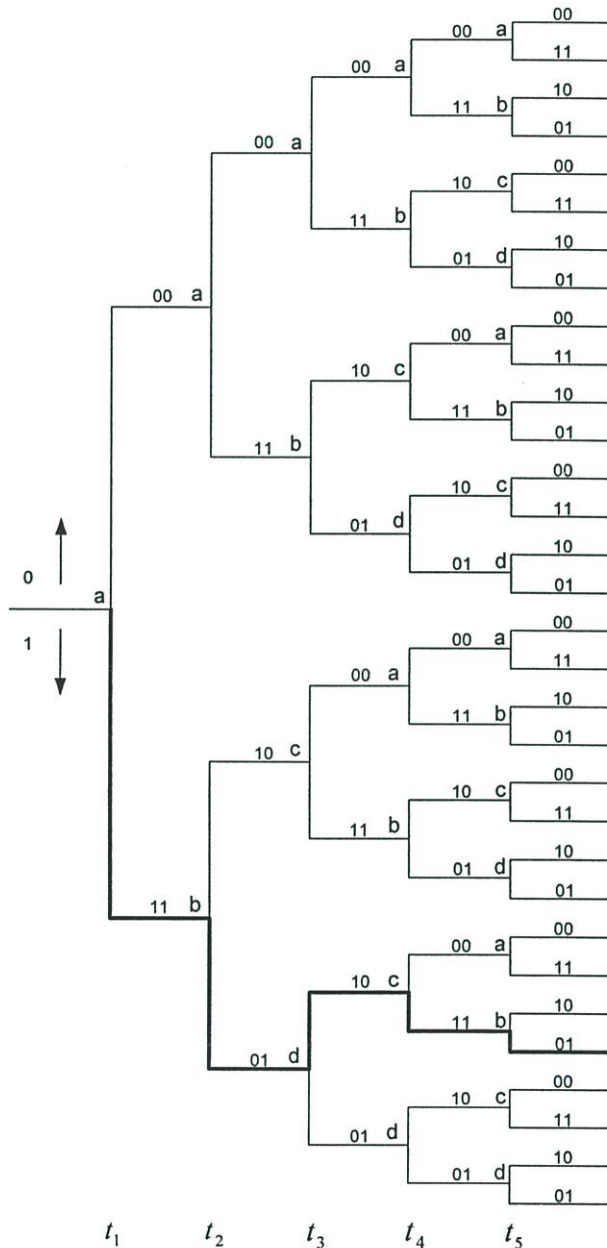
แผนภาพเทรลลิสเป็นการแสดงการเปลี่ยนสถานะ โดยมีการแสดงสถานะของระบบทั้งหมดในแต่ละเวลาอย่างเป็นระบบ ผลที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.13 จากรูปเส้นทึบหมายถึง เอาต์พุตที่เกิดจากอินพุตที่มีค่า 0 และเส้นปะหมายถึงเอาต์พุตที่เกิดจากอินพุตบิตที่มีค่า 1 โดยเทรลลิสจะมีโหนดทั้งหมด $2^{(K-1)}$ โหนด แต่ละโหนดของเทรลลิส หมายถึง สถานะต่างๆ เช่น $a=00, b=10, c=01$ และ $d=11$ รูปแผนภาพเทรลลิสจะมีโครงสร้างที่ซ้ำเดิมหลังจากผ่านไป 3 สาขา (branch) นั่นคือที่เวลา เอาต์พุตในแต่ละสาขา คือ การเปลี่ยนสถานะหนึ่งเป็นอีกสถานะหนึ่ง ซึ่งแสดงได้ตามสาขาของเทรลลิสตามรูป



รูปที่ 2.13 แผนภาพเทรลลิสของการเข้ารหัสคอนโวลูชัน โดยอัตรารหัสเท่ากับ 1/2 และ K เท่ากับ 3

2.6.5 แผนภาพต้นไม้ (Tree Diagram)

ถึงแม้ว่าแผนภาพเสด็จจะสามารถอธิบายถึงการเข้ารหัสคอนโวลูชันได้ดี แต่เนื่องจากแผนภาพเสด็จไม่สามารถอธิบายสถานะในแต่ละเวลาที่เปลี่ยนไป ดังนั้นจึงมีการนำเสนอแผนภาพต้นไม้ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยเมื่ออินพุตมีค่าเป็น 0 สาขาของค่าจะอยู่ที่สาขาทางขวามือด้านบน แต่เมื่ออินพุตมีค่าเป็น 1 สาขาของค่าจะอยู่ที่สาขาทางขวามือด้านล่าง โดยสมมติว่าในสถานะเริ่มต้นค่าเป็น 0 หากเมื่ออินพุตมีค่าเป็น 0 เข้ามา เอาท์พุตค่าสาขาที่ได้มีค่าเป็น 00 แต่หากอินพุตมีค่าเป็น 1 เอาท์พุตค่าสาขาจะมีค่าเป็น 11 ซึ่งจากรูป อินพุตบิตมีค่า 1 1 0 1 1 โดยเอาท์พุตที่ได้ แสดงได้คั้งเส้นทึบ ซึ่งทำให้ลำดับรหัสมีค่าเป็น 1 1 0 1 0 1 0 0 0 1

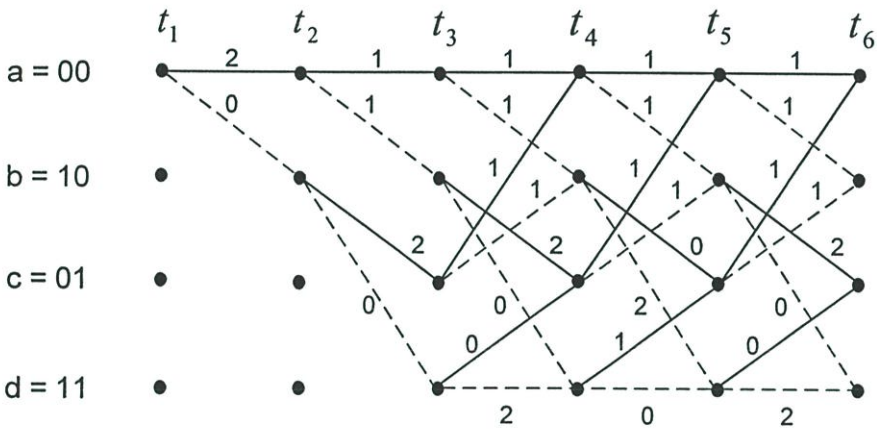


รูปที่ 2.14 แผนภาพต้นไม้ของการเข้ารหัสคอนโวลูชันด้วยอัตรารหัสเท่ากับ $1/2$ และ K เท่ากับ 3

2.6.6 การถอดรหัสคอนโวลูชันด้วยวิธีวิเทอร์บี

การถอดรหัสคอนโวลูชันนั้นมีขั้นตอนที่ซับซ้อนกว่าวิธีการเข้ารหัสมาก ซึ่งการถอดรหัสมีหลายวิธีแต่การถอดรหัสด้วยอัลกอริทึมของวิเทอร์บี (Viterbi Algorithm) นั้นเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพสูง ซึ่งลักษณะการทำงานของ ตัวถอดรหัสแบบวิเทอร์บินั้นเป็นแบบ Maximum Likelihood Decoding โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการถอดรหัสจะเป็นเส้นทางเพียงเส้นทางเดียวที่มีความน่าจะเป็นสูงสุดจากเส้นทางทั้งหมดในในแผนภาพเทรลลิส [5] โดยเส้นทางที่ดีที่สุดที่ถูกเหลือจะถูกเรียกว่า เส้นทางที่เหลืออยู่ (surviving path) ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับข้อมูลที่ถูกส่งมากที่สุด จากรูปที่ 2.12 สามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพเทรลลิส ได้ดังรูปที่ 2.15 โดยหมายเลขที่เขียนบนสาขาเทรลลิส ในแต่ละเวลา t_i จะเป็นระยะห่างแฮมมิงระหว่างรหัสสัญลักษณ์ที่รับได้กับคำสาขาที่ได้จากการเข้ารหัสเทรลลิส จากรูป m เป็นลำดับบิตอินพุต U เป็นลำดับคำรหัสที่ส่งจากด้านส่ง และ Z แทนลำดับที่รับได้

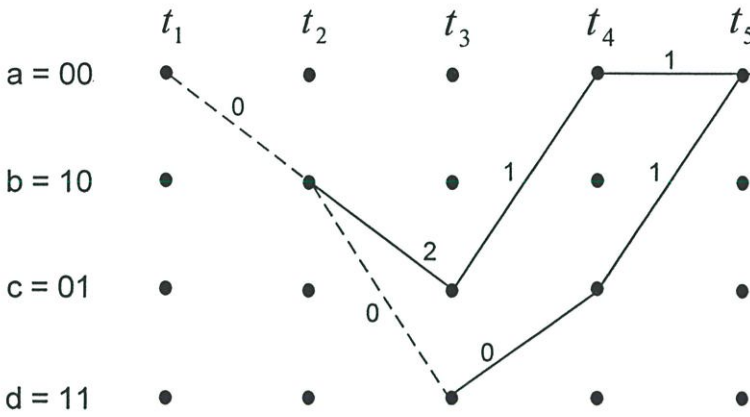
ข้อมูลอินพุต	m : 1 1 0 1 1 ...
ลำดับคำรหัสที่ส่ง	U : 11 01 01 00 01 ...
ลำดับที่รับได้	Z : 11 01 01 10 01 ...



รูปที่ 2.15 การถอดรหัสโดยใช้แผนภาพเทรลลิสของการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันด้วยอัตรารหัสเท่ากับ $1/2$ และ K เท่ากับ 3

จากรูปที่ 2.15 ลำดับที่รับได้ Z ณ.เวลา t_1 มีค่าเป็น 11 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.13 ซึ่งเปลี่ยนจากสถานะ $00 \rightarrow 00$ จะได้อาที่พุดคำสาขา 00 ซึ่งทำให้มีความแตกต่างระยะแฮมมิงเท่ากับ 2 และการเปลี่ยนสถานะจาก $00 \rightarrow 10$ ณ.เวลา t_1 ได้อาที่พุดคำสาขา 11 ซึ่งจะสอดคล้องกับรหัสที่รับได้ นั่นคือมีความแตกต่างระยะแฮมมิงเท่ากับ 0 ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบอย่างนี้ไปเรื่อยๆ ในแต่ละช่วงเวลา t_i ในกระบวนการถอดรหัสโดยใช้เมตริกของความแตกต่างระยะแฮมมิงตลอดเส้นทางบนเทรลลิสนี้ เพื่อจะหาเส้นทางที่น่าจะเป็นไปได้มากที่สุด หรือเส้นทางที่ให้ค่าความแตกต่างของระยะแฮมมิงต่ำสุด

การถอดรหัสด้วยวิธีวิเทอร์บี เมื่อมีเส้นทางสองเส้นทางของ เทรลลิสที่มาพบกันที่สถานะเดียวกันจะมีเส้นทางหนึ่งจะไม่ถูกนำมาพิจารณา ในรูปที่ 2.16 แสดง 2 เส้นทางที่มาพบกันที่เวลา t_5 ณ.สถานะ 00 ซึ่งจะต้องทำการพิจารณาเมตริกความแตกต่างของระยะแฮมมิงโดยรวมระหว่างสองเส้นทาง ซึ่งจะเป็นผลรวมของเมตริกความแตกต่างของระยะแฮมมิงในแต่ละช่วงเวลา t_i จะพบว่าจากรูปที่ 2.16 ในเส้นทางบนจะให้ผลรวมของเมตริกความแตกต่างของระยะแฮมมิงเท่ากับ 4 และเส้นทางล่างได้ผลรวมของเมตริกความแตกต่างของระยะแฮมมิงเท่ากับ 1 แสดงว่าเส้นทางด้านบนจะไม่ถูกนำมาพิจารณาอีก เนื่องจากให้ค่าเมตริกความแตกต่างของระยะแฮมมิงมากกว่าเส้นทางด้านล่าง

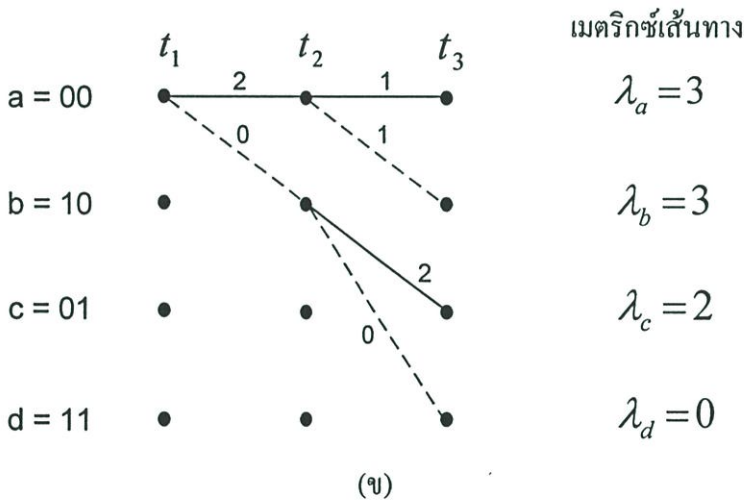
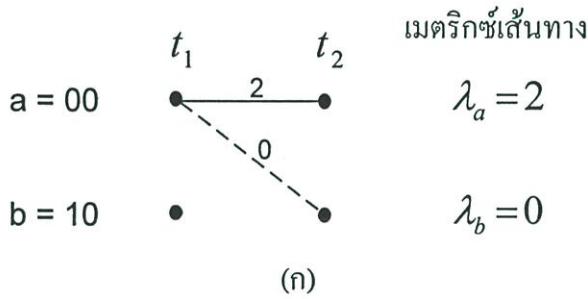


รูปที่ 2.16 เมตริกเส้นทางสองเส้นทางที่มาพบกัน

ในกระบวนการถอดรหัสด้วยวิธีวิเทอร์บี จะทำการคำนวณเมตริกระหว่างสองเส้นทางที่มาถึงสถานะเดียวกัน จากนั้นจะทำการกำจัดเส้นทางหนึ่งทิ้งไป โดยในการคำนวณดังกล่าวจะทำในแต่ละ โหนด ณ.เวลา t_i จากนั้นจึงจะถอดรหัส ณ.เวลาถัดไปซึ่งจะทำกระบวนการดังกล่าวซ้ำอีก รูปที่ 3.11 แสดงขั้นตอนการถอดรหัสด้วยวิธีวิเทอร์บี โดยสมมติให้ข้อมูลอินพุตเป็น m คาร์รหัส เป็น U และลำดับที่รับได้เช่นเดียวกับรูปที่ 3.9 เมื่อเวลา t_1 คำนับได้ 11 จากรูปที่ 2.17ก มีการเปลี่ยนสถานะจาก $00 \rightarrow 00$ และ $00 \rightarrow 10$ ซึ่งจะมีเมตริกสาขาเท่ากับ 2 และ 0 ตามลำดับ ต่อมาที่เวลา t_2 ในแต่ละสถานะจะมีสาขาย่อยอย่างละ 2 สาขา ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.17ข โดยผลรวมของเมตริกของแต่ละสาขามีค่าเป็น $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ และ λ_d ที่เวลา t_3 ในแต่ละสถานะยังคงมีอีก 2 สาขา ซึ่งแสดงได้ดังรูป 2.17ค เป็นผลทำให้แต่ละโหนดจะมีเส้นทางที่มาถึง 2 เส้นทาง จากที่กล่าวไว้ในตอนต้น เส้นทางที่ให้ค่าผลเมตริกเส้นทางมากที่สุดจะถูกกำจัดออกไป เส้นทางที่เหลืออยู่แสดงได้ดังรูป 2.17ง ซึ่งเมื่อถึงกระบวนการนี้จะพบว่าที่เวลาระหว่าง t_1 และ t_2 ตัวถอดรหัสจะเลือกเส้นทาง $00 \rightarrow 10$ เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะดังกล่าวเกิดจากอินพุตที่มีค่าบิตเป็น 1 ดังนั้นตัวถอดรหัสจึงถอดรหัสได้บิตแรก คือ 1 จะพบว่า การถอดรหัสบิตแรกนั้นจะทำได้เมื่อเวลาผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง

ในแต่ละกระบวนการถอดรหัสแต่ละโหนดจะมีเส้นทางที่มาถึง 2 เส้นทาง ซึ่งรูปที่ 2.17จ แสดงเส้นทางที่มาถึงที่โหนดเมื่อเวลา t_5 ซึ่งจะมีเส้นทางหนึ่งถูกกำจัด เส้นทางที่เหลือแสดงได้ดังรูป 2.17ค จะเห็นได้ว่ายังไม่สามารถที่จะถอดรหัสบิตที่สองได้ รูปที่ 2.17ข และรูปที่ 2.17ช แสดงเส้นทางที่มาถึงโหนดและเส้นทางที่เหลือเมื่อเวลา t_6 พบว่าสามารถทำการถอดรหัสบิตที่สองได้ ซึ่งมีค่าเป็น 1 ซึ่งจะทำให้การถอดรหัสในลักษณะเช่นนี้ไปจนกว่าจะถอดรหัสได้ครบ

ขั้นตอนการตัดสินใจหาค่าเอาต์พุต โดยใช้เส้นทางที่เหลืออยู่ (Survivor path) ในแต่ละสถานะที่บันทึกไว้มาตัดสินใจเลือกเส้นทางของข้อมูล โดยการตัดสินใจหาเส้นทางของข้อมูลจะเริ่มจากเส้นทางที่เหลืออยู่ในอดีต (Trace Back) โดยในการเริ่มต้นที่เวลาผ่านไป L (Latency) โดยในทางปฏิบัติการ L ต้องมีค่ามากกว่าห้าเท่าของค่า K (Constrain Length) จึงทำให้การถอดรหัสได้ข้อมูลที่ถูกต้องสูง

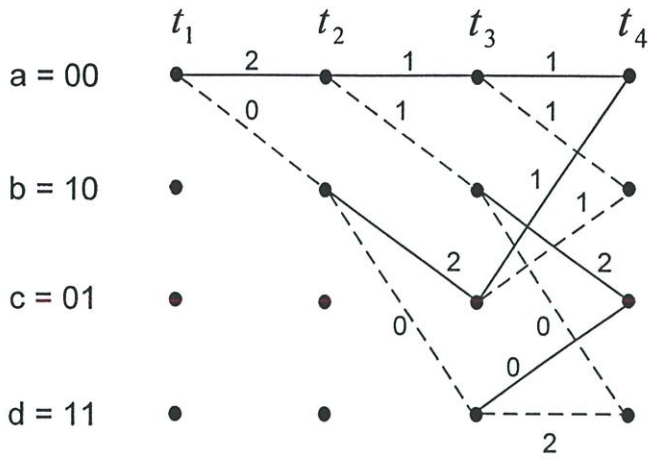


รูปที่ 2.17 การเลือกเส้นทางที่เหลืออยู่ (ก) เส้นทางที่เหลือเมื่อเวลา t_2 (ข) เส้นทางที่เหลือเมื่อเวลา t_3

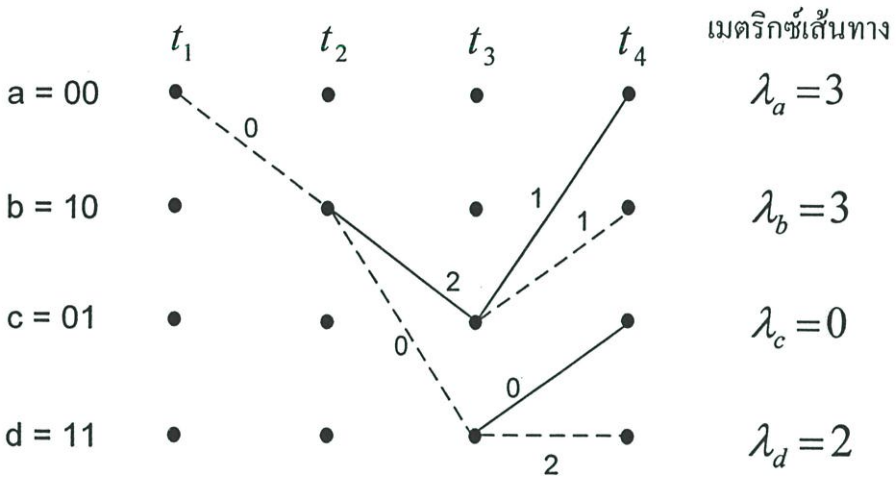
(ค) การเปรียบเทียบเมตริกซ์เมื่อเวลา t_4 (ง) เส้นทางที่เหลือเมื่อเวลา t_4

(จ) การเปรียบเทียบเมตริกซ์เมื่อเวลา t_5 (ฉ) เส้นทางที่เหลือเมื่อเวลา t_5

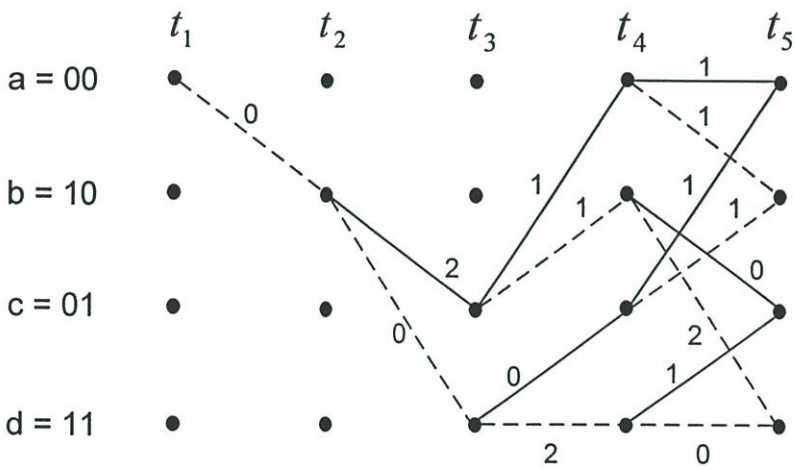
(ช) การเปรียบเทียบเมตริกซ์เมื่อเวลา t_6 (ซ) เส้นทางที่เหลือเมื่อเวลา t_6



(ก)

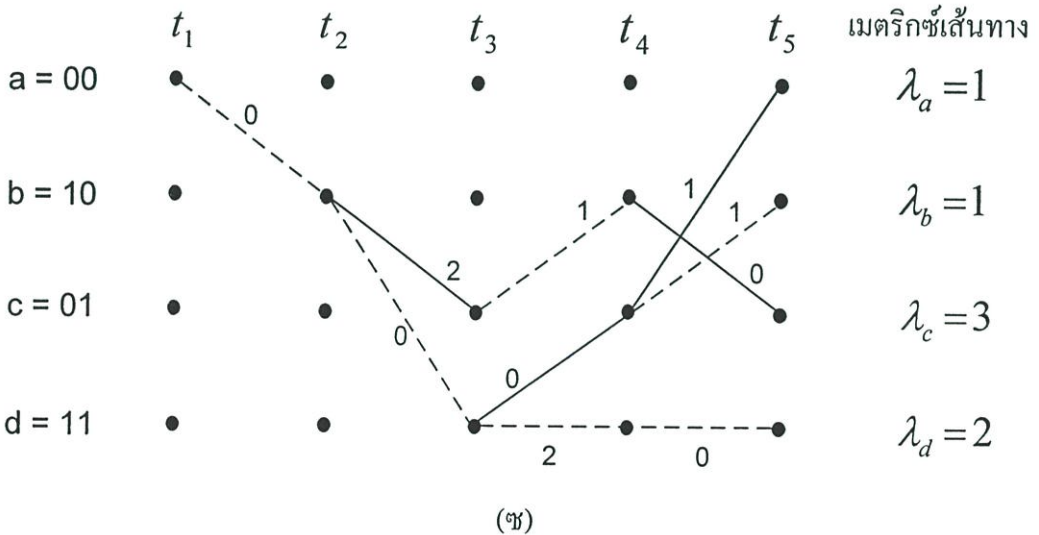
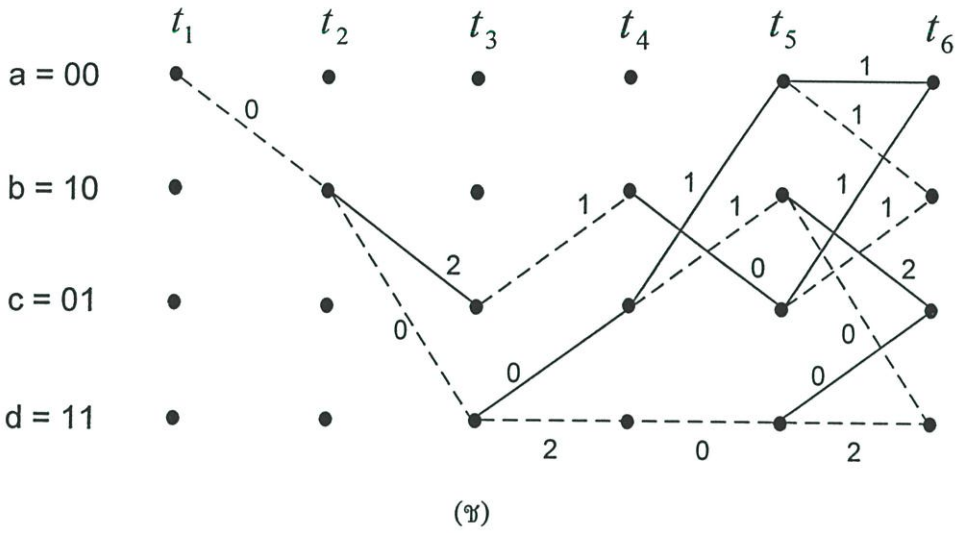
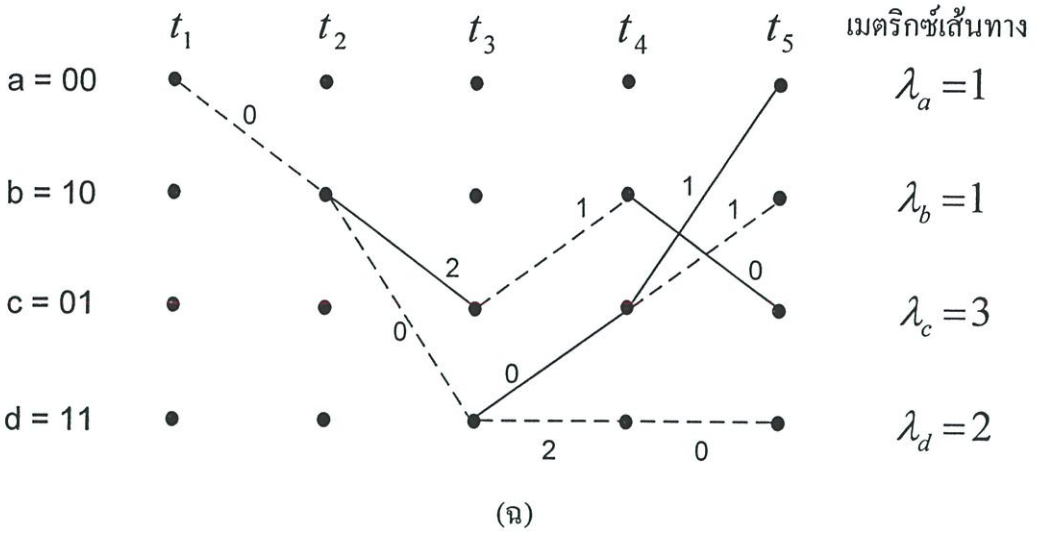


(ง)



(จ)

รูปที่ 2.17(ต่อ)



รูปที่ 2.17(ต่อ)

การถอดรหัสแบบวิเทอร์บินั้นจัดว่าเป็นการถอดรหัสที่เหมาะสมที่สุด (optimum decoding) โดยมีรูปแบบการทำงานของ การตัดสินใจในการถอดรหัสสองแบบ ได้แก่ การตัดสินใจแบบฮาร์ด (Hard decision) และการตัดสินใจแบบซอฟท์ (Soft Decision) ซึ่งอธิบายได้ดังนี้คือ การทำงานของ วงจรถอดรหัสแบบที่มีการตัดสินใจแบบฮาร์ดนั้น ข้อมูลอินพุตที่รับจากส่วนของการมอดูเลต จะถูก จัดระดับเป็นสองระดับคือ “0” และ “1” ต่ออินพุตหนึ่งบิต ดังที่อธิบายในข้างต้น ส่วนของ การทำงานของวงจรถอดรหัสแบบที่มีการตัดสินใจแบบซอฟท์นั้น ข้อมูลอินพุตที่รับได้จากส่วน ของการมอดูเลตนั้นจะถูกจัดระดับมากกว่าสองระดับต่ออินพุตหนึ่งบิต เช่น 4 ระดับ (2 บิต) หรือ 8 ระดับ (3 บิต) เป็นต้น การทำงานแบบที่มีการตัดสินใจแบบซอฟท์จะมีความซับซ้อนมากกว่าการ ตัดสินใจแบบฮาร์ด แต่ให้ค่าอัตราขยายการเข้ารหัส (Coding Gain) ที่มากกว่า โดยการทำงานแบบ การตัดสินใจแบบฮาร์ดนั้น ใช้สำหรับช่องสัญญาณแบบ Binary Symmetric หรือ Discrete Memoryless Channel ส่วนทำงานแบบการตัดสินใจแบบซอฟท์นั้นเหมาะสมกับช่องสัญญาณ รบกวนเกาส์ขาวแบบบวกแบบ (Additive White Gaussian Noise: AWGN) ซึ่งการตัดสินใจแบบ ซอฟท์นั้นจะให้ค่าอัตราขยายการเข้ารหัสที่มากกว่าการตัดสินใจแบบฮาร์ดประมาณ 2 dB [4]

ในกรณีของการตัดสินใจแบบซอฟท์นั้นจะทำการตัดสินใจเวกเตอร์สัญญาณที่ได้รับ โดย ทำการเลือกจากสัญญาณในคอนสเตรชันที่ให้ระยะยูคลิเดียน (Euclidian distance) ต่ำที่สุด หลักการในการถอดรหัสด้วยอัลกอริทึมวิเทอร์บินแบบซอฟท์นั้นใช้วิธีเดียวกันกับการตัดสินใจแบบ ฮาร์ด ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ต่างกันที่ค่าเมตริกซ์ของแต่ละสาขาจะอยู่ในรูปของค่าระยะห่างยูคลิ เดียนแทนที่ระยะห่างแฮมมิง [4] โดยค่าระยะห่างยูคลิเดียนสามารถหาได้ดังนี้

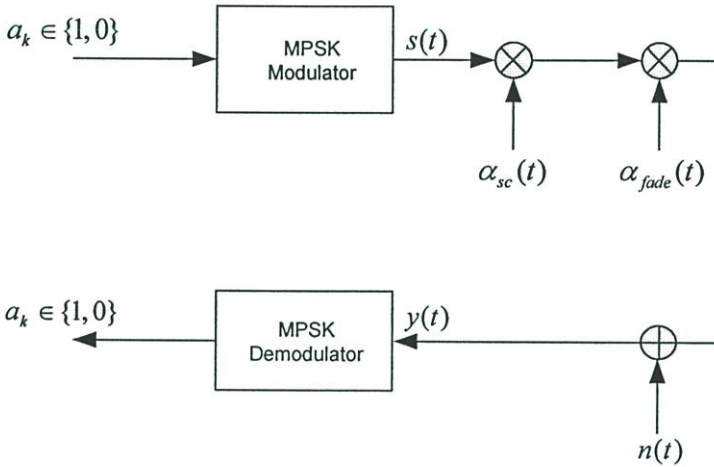
$$d(c_i, y_i) = \sum_{j=1}^n |c_{i,j} - y_{i,j}|^2 \quad (2.30)$$

โดยที่ $c_{i,j}$ คือค่ารหัส และ $y_{i,j}$ คือลำดับควอนไทซ์ความยาว n ในสาขาที่ i ตามลำดับ

บทที่ 3

แบบจำลองช่องสัญญาณ

ในการศึกษาพัฒนาและวิจัยระบบการสื่อสารนั้น มักจะอาศัยโปรแกรมจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบที่สนใจ ในส่วนของช่องสัญญาณก็เช่นกัน จำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาแบบจำลองที่สามารถนำมาใช้งานได้จริง ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณเพื่อใช้สำหรับเขียนโปรแกรมจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการจำลองช่องสัญญาณ 3 ชนิดคือ ช่องสัญญาณซินทิลเลชัน ช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีแบบราบและช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่



รูปที่ 3.1 แบบจำลองระบบสื่อสารผ่านช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายหลายวิถี

3.1 แบบจำลองช่องสัญญาณซินทิลเลชัน

ในส่วนของการจำลองช่องสัญญาณซินทิลเลชันในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองของ Satorius [10] โดยการค่าสัมประสิทธิ์ซินทิลเลชัน $\alpha_{sc}(t)$ นั้นเป็นโมเดลที่กำหนดขึ้นจากรวบรวมข้อมูลทางสถิติ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยไม่เป็นศูนย์ และมีขั้นตอนการสุ่มเชิงซ้อนแบบเกาส์ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ซินทิลเลชัน $\alpha_{sc}(t)$ นั้นจะหาได้จาก

$$\alpha_{sc}(t) = \sqrt{K_s} \cdot e^{j\phi} + n_{scint}(t) \quad (3.1)$$

โดยที่ K_s คือ ส่วนของกำลังสัญญาณที่รับได้ที่ส่งผ่านเส้นทางในระดับแนวสายตา(Line of sight) ϕ คือ ค่าเฟสที่ถูกกำหนดให้มีการกระจายเป็นแบบยูนิฟอร์ม โดยมีค่าระหว่าง $[-\pi, \pi]$

$n_{scint}(t)$ คือ สัญญาณที่มีรูปแบบเกาส์เชิงซ้อน ซึ่งเกิดขึ้นจากการแพร่กระจายของสัญญาณในทิศทางสุ่ม (Non-line of sight propagation) เนื่องจากผลกระทบของการเกิดคลื่นทิลเลชันในชั้นบรรยากาศ

โดยค่าเฉลี่ยกำลังงานของสัญญาณที่รับได้จากเส้นทางที่มีการกระเจิงคือ $\sigma_{nsc}^2 = E|n_{scint}(t)|^2$ และจากความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่รับได้จากเส้นทางในแนวระดับสายตากับเส้นทางที่มีการกระเจิงจะได้ $K_s + \sigma_{nsc}^2 = 1$ ในส่วนของเอนVELOPE ของสัมประสิทธิ์คลื่นทิลเลชัน $r_{sc} = |\alpha_{sc}(t)|$ นั้นจะมีฟังก์ชันความน่าจะเป็นของความหนาแน่นแบบไรเซียน ดังสมการที่ 3.2

$$P_{rsc}(r) = \frac{2r}{\sigma_{nsc}^2} \cdot e^{-\gamma} \cdot e^{-r^2/\sigma_{nsc}^2} \cdot I_0 \left\{ 2r\sqrt{\gamma/\sigma_{nsc}^2} \right\} \quad (3.2)$$

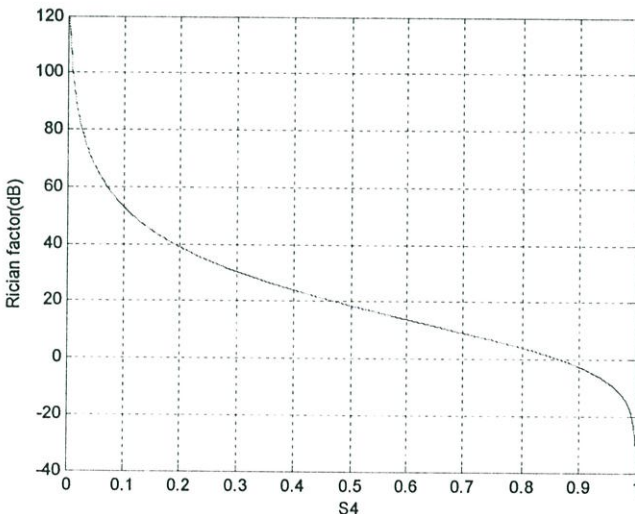
โดยที่ $\gamma \equiv K_s / \sigma_{nsc}^2$ คือ อัตราส่วนของสัญญาณที่รับได้จากเส้นทางในแนวระดับสายตากับเส้นทางที่มีการกระเจิง หรือเรียกว่าไรเซียนแฟกเตอร์ (Rician factor)

ค่าไรเซียนแฟกเตอร์ γ นั้นสามารถอยู่ในรูปของความสัมพันธ์กับค่าดัชนี S_4 [11] ได้ดังสมการที่ 3.3 และ 3.4 ซึ่งจากความสัมพันธ์สามารถแสดงดังรูปที่ 3.2

$$\gamma = \sqrt{1 - S_4^2} / (1 - \sqrt{1 - S_4^2}) \quad (3.3)$$

และ

$$S_4 = \sqrt{1 - \{\gamma / (\gamma + 1)\}^2} \quad (3.4)$$



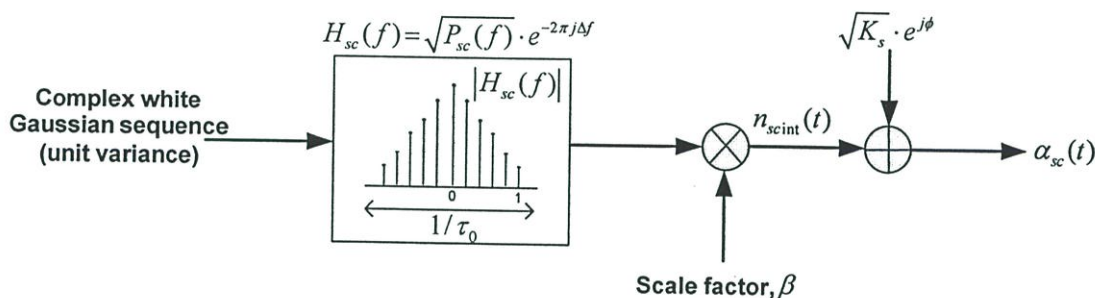
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนี S_4 และค่าไรเซียนแฟกเตอร์ γ

ค่าสเปกตรัมกำลังงานของ $n_{scint}(t)$ นั้นสามารถหาได้จากผลตอบสนองทางความถี่ขนาดกำลังสองของตัวกรอง $|H_{sc}(f)|^2$ ดังสมการที่ 3.5

$$|H_{sc}(f)|^2 = P_{sc}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \cdot R_{sc}(\tau) \cdot e^{-2\pi j f \tau} = \sigma_{nsc}^2 \tau_0 \sqrt{\pi} \cdot e^{-(\pi \tau_0 f)^2} \quad (3.5)$$

รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองโมเดลของสัมประสิทธิ์ซินทิลเลชัน เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรอง โดยจะทำการออกแบบเพื่อให้มีเฟสเชิงเส้นโดย $phase\{H_{sc}(f)\} = 2\pi \Delta f$ โดยตัวกรองนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของโดเมนเวลาได้ดังนี้

$$h_{sc} = \int_{-\infty}^{\infty} df \cdot H_{sc}(f) \cdot e^{2\pi j f \tau} \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.3 แบบจำลองโมเดลของสัมประสิทธิ์ซินทิลเลชัน

สำหรับวิธีในโดเมนเวลานั้น เริ่มจากการกำหนดผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองทางเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง $\hat{h}_{sc}(k)$, $0 \leq k \leq L-1$ โดยเลือกใช้อัตราการสุ่ม F_s ซึ่งมีค่า 2-3 เท่าของแบนด์วิดท์สูงสุดของตัวกรองเกาส์เซียน ซึ่งเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าเวลาดีคอรีเลชันต่ำสุด (minimum decorrelation time) $1/\tau_0^{\min}$ ดังเช่น $F_s \cdot \tau_0^{\min} \approx 2-3$.

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่แบบไม่ต่อเนื่อง $\hat{H}_{sc}(k)$ ของตัวกรอง ซึ่งทำการคำนวณจากสมการที่ (3.5) จะได้

$$\hat{H}_{sc}(k) = e^{-(\pi \tau_0 F_s / N)^2 / 2} \cdot e^{-(2\pi j (L/2) k / N)} \quad , 0 \leq k \leq N/2 \quad (3.7)$$

โดยที่ $N \geq L$ เป็นจำนวนของจุดที่ใช้ในการคำนวณ และเนื่องจากต้องการผลตอบสนองอิมพัลส์ที่เป็นจำนวนจริง ดังนั้น $\hat{H}_{sc}(k)$ จะมีค่าสมมาตรกันทั้งสองข้างได้โดย

$$\hat{H}_{sc}(N-k) = \hat{H}_{sc}^*(k) \quad , \quad 1 \leq k \leq N/2-1 \quad (3.8)$$

จากรูปที่ 3.3 เราจะสามารถสร้าง $n_{scint}(k/F_s)$ ได้โดยใช้ $\hat{h}_{sc}(k)$ ทำการคอนโวลูชันแบบไม่ต่อเนื่องกับลำดับของอินพุตแบบเกาส์เชิงซ้อน $\xi(k)$ โดยจะได้

$$n_{scint}(k/F_s) = \beta \cdot \sum_{l=0}^{L-1} \hat{h}_{sc}(l) \cdot \xi(k-l) \quad (3.9)$$

โดยที่ β คือค่าคงที่ที่ใช้ปรับผลที่ได้เพื่อให้ได้ผลของความเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตที่ต้องการ

$$\beta = \sqrt{\sigma_{nsc}^2 / \sum_{l=0}^{L-1} \hat{h}_{sc}^2(l)} \quad (3.10)$$

เพื่อหลีกเลี่ยงการเคลือบแฝงทางเวลา(time-aliasing) ที่จะเกิดขึ้นกับเอาต์พุตของตัวกรอง เราจะทำการเพิ่ม zero-pad จาก N แซมเปิล ของลำดับอินพุต $\xi(k)$ และ L แซมเปิล ของ $\hat{h}_{sc}(k)$ เป็น $2N$ แซมเปิล และสามารถคำนวณ DFT (Discrete Fourier Transform) ของแต่ละลำดับได้ดังนี้

$$\bar{\xi}_{zp}(k) = \sum_{l=0}^{2N-1} \xi_{zp}(l) \cdot e^{-2\pi jkl/N} \quad \hat{H}_{sc;zp}(k) = \sum_{l=0}^{2N-1} \hat{h}_{sc;zp}(l) \cdot e^{-2\pi jkl/N} \quad (3.11)$$

$$\bar{\xi}_{zp}(k) = \begin{cases} \xi(k), & 0 \leq k \leq N-1 \\ 0, & N \leq k \leq 2N-1 \end{cases} \quad \hat{h}_{sc;zp}(k) = \begin{cases} \hat{h}_{sc}(k), & 0 \leq k \leq L-1 \\ 0, & L \leq k \leq 2N-1 \end{cases}$$

โดยค่าการแปลงฟูเรียร์ดิสครีตผกผัน (IDFT) ของผลคูณ $\bar{\xi}_{zp} \cdot \hat{H}_{sc;zp}$ แสดงได้ในสมการที่ 3.12

$$y(k) = \frac{1}{2N} \sum_{l=0}^{2N-1} \bar{\xi}_{zp}(l) \cdot \hat{H}_{sc;zp}(l) e^{2\pi jkl/N}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (3.12)$$

ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของคอนโวลูชันเชิงเส้น (Linear Convolution) ระหว่าง $\xi(k)$ และ $\hat{h}_{sc}(k)$ ได้ดังนี้

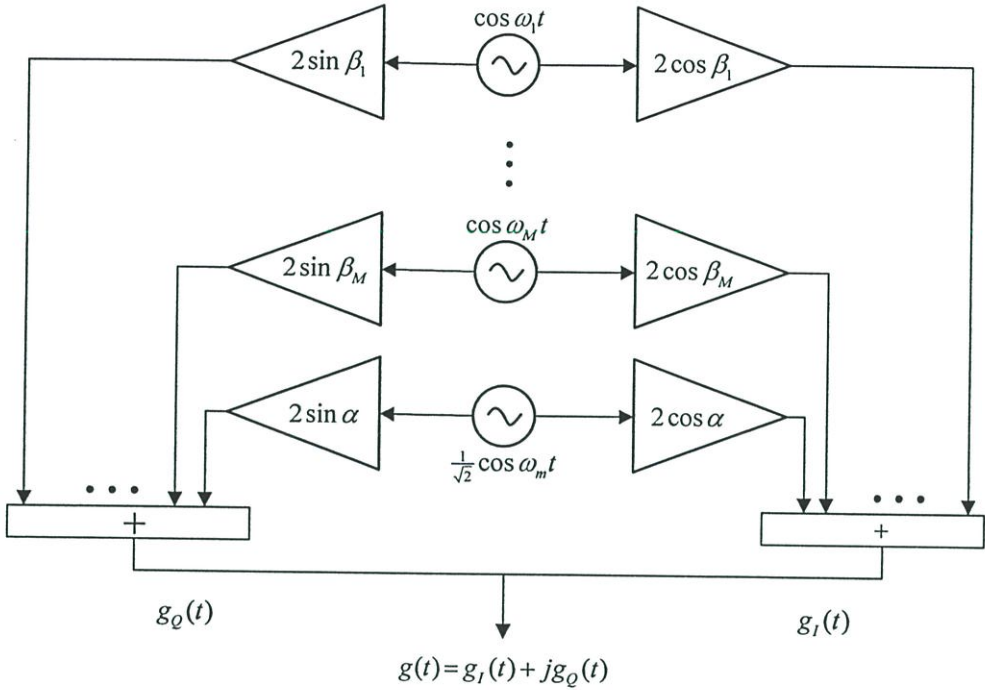
$$y(k) = \sum_{l=0}^{L-1} \hat{h}_{sc}(l) \cdot \xi(k-l), \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (3.13)$$

ซึ่งจากสมการที่ 3.9 และ 3.12 ทำให้สามารถหาค่า $n_{scint}(k/F_s)$ ได้จาก

$$n_{scint}(k/F_s) = \frac{1}{2N} \sqrt{\frac{\sigma_{nsc}^2}{\sum_{l=0}^{2N-1} |\hat{H}_{sc;zp}(l)|^2}} \cdot \sum_{l=0}^{2N-1} \bar{\xi}_{zp}(l) \cdot \hat{H}_{sc;zp}(l) e^{2\pi jkl/N}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (3.14)$$

3.2 แบบจำลองช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีแบบราบ

โดยทั่วไปแล้ววิธีการสร้างแบบจำลองของสัญญาณโดยส่วนใหญ่จะใช้หลักการมอดูเลตแบบอินเฟสและควอดเรเจอร์ โดยที่ลักษณะของสัญญาณที่จะใช้ในการสร้างแบบจำลองนั้นจะต้องมีสเปกตรัมและคุณสมบัติต่างๆ ที่ใกล้เคียงกับสัญญาณที่ได้จากการวัด โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองของเจ็ค (Jake's model) [13] ในการจำลองช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีแบบราบ โดยที่โครงสร้างแบบจำลองของเจ็คนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีตามแบบของเจ็ค

สำหรับวิธีการของเจ็คนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.4 จะเห็นว่าแบบจำลองนี้ประกอบด้วยวงจรรอซซิลเลเตอร์ ความถี่จำนวน M ชุด ที่มีค่าความถี่เท่ากับคอปเพลอร์ชิฟต์ค่าต่างๆ กัน และวงจรรอซซิลเลเตอร์ 1 ตัวที่ความถี่คอปเพลอร์ชิฟต์สูงสุดมีค่าเท่ากับ f_d องค์ประกอบทางความถี่ทั้งหมดนี้มีหน้าที่จำลองสัญญาณความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาห้ f_0 สังเกตว่าองค์ประกอบทางความถี่ของออสซิลเลเตอร์ M ชุด จะกำหนดให้มีแอมพลิจูดเป็น 1 ทั้งหมด ส่วนองค์ประกอบทางความถี่ตัวสุดท้ายจะมีแอมพลิจูดเท่ากับ $1/\sqrt{2}$

ค่าความถี่ของออสซิลเลเตอร์แต่ละตัวกำหนดให้มีค่าเท่ากับ

$$f_n = f_m \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad \text{สำหรับ } n=1,2,\dots,M \quad (3.15)$$

โดยที่ค่าคอปเพลอร์ชีพต์สูงสุดสามารถหาได้จาก $f_m = \frac{v}{\lambda}$

โดยที่ v คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องรับ

λ คือ ความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน

และ N มีความสัมพันธ์กับ M ดังนี้ คือ

$$M = \frac{1}{2} \left(\frac{N}{2} - 1 \right) \quad \text{โดยที่ } \frac{N}{2} \text{ ต้องมีค่าเป็นจำนวนเต็มคี่} \quad (3.16)$$

ในส่วนของค่าเฟส β_n ถูกกำหนดให้มีการกระจายเป็นแบบยูนิฟอร์มระหว่าง $0-2\pi$ คือมีค่าความน่าจะเป็นของการเกิดเฟสแต่ละค่าเท่าๆ กัน ดังนั้น $\beta_n = \frac{\pi n}{M}$ สำหรับ $n=1, 2, \dots, N_0$

จากโครงสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีตามแบบของเจ็คสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$g_I(t) = \sqrt{2} \left[2 \sum_{n=1}^M \cos \beta_n \cos 2\pi f_n t + \sqrt{2} \cos \alpha \cos 2\pi f_m t \right] \quad (3.17)$$

$$g_Q(t) = \sqrt{2} \left[2 \sum_{n=1}^M \sin \beta_n \cos 2\pi f_n t + \sqrt{2} \sin \alpha \cos 2\pi f_m t \right] \quad (3.18)$$

จะได้ $g(t) = g_I(t) + jg_Q(t)$

$$g(t) = \sqrt{2} \left\{ \left[2 \sum_{n=1}^M \cos \beta_n \cos 2\pi f_n t + \sqrt{2} \cos \alpha \cos 2\pi f_m t \right] + j \left[2 \sum_{n=1}^M \sin \beta_n \cos 2\pi f_n t + \sqrt{2} \sin \alpha \cos 2\pi f_m t \right] \right\} \quad (3.19)$$

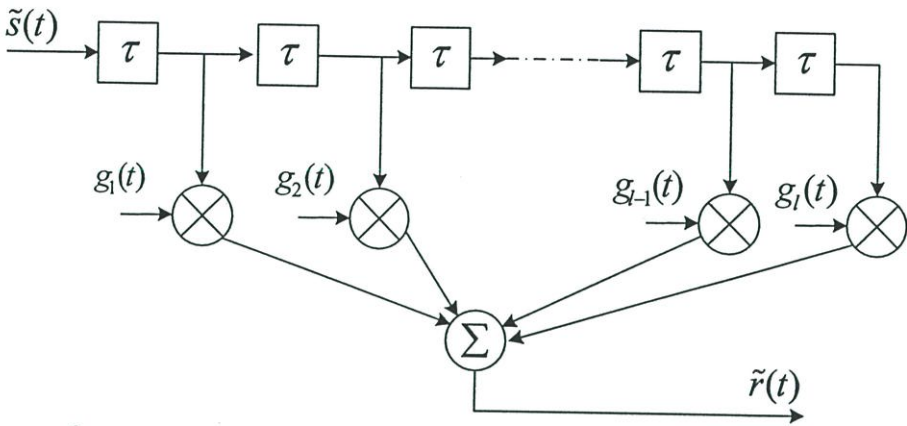
โดยทำการหาค่าเอนเวโลปของสัญญาณจางหายได้จาก

$$\alpha_{fade} = \sqrt{\frac{(g_I + \sqrt{2K})^2 + g_Q^2}{2(K+1)}} \quad (3.20)$$

โดยที่ K คือค่าไรเซ็นแฟคเตอร์

3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่

ในส่วนของการจำลองช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่นั้น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้คุณลักษณะของช่องสัญญาณที่มีการกำหนดอยู่ในมาตรฐาน COST 207 [14] โดยทำการพิจารณาในกรณีของสภาพภูมิประเทศที่เป็นแบบทุ่งหญ้า (Rural area) โดยมีคุณลักษณะของช่องสัญญาณดังตารางที่ 2.3 ในส่วนของแบบจำลองช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่นั้น ได้เลือกใช้แบบจำลองช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีแบบแถบกว้าง โดยมีส่วนประกอบของเส้นทางหลายวิถีแบบไม่ต่อเนื่อง [8] ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีแบบแถบกว้าง

จากแบบจำลองดังรูปที่ 3.5 สามารถทำการหาค่าเอนเวโลปเชิงซ้อนของสัญญาณที่รับได้ $\tilde{r}(t)$ ดังนี้

$$\tilde{r}(t) = \sum_{i=1}^L g_i(t) \cdot \tilde{s}(t - \tau_i) \quad (3.21)$$

โดยที่ $\tilde{s}(t)$ คือ เอนเวโลปเชิงซ้อนของสัญญาณที่ทำการส่ง

L คือ จำนวนของแทป (tap)

$g_i(t)$ คือ อัตราขยายเชิงซ้อน

และ τ_i คือ ค่าดีเลย์ของเส้นทางในแต่ละแทป

บทที่ 4

ผลการจำลองระบบและการวิเคราะห์

4.1 แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองระบบ

ในบทนี้จะแสดงผลการจำลองสมรรถนะของระบบและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองระบบ โดยทำการพิจารณาสมรรถนะของระบบในรูปของอัตราความผิดพลาดของบิตต่อระดับของเอสเอ็นอาร์ดิจิทัล ในกรณีที่มีระดับความรุนแรงของการจางหายและชนิดของช่องสัญญาณที่ต่างกัน โดยแบบจำลองช่องสัญญาณที่ใช้ในการจำลองระบบมีดังนี้

- กรณีของช่องสัญญาณจางหายซินทิลเลชัน ใช้แบบจำลองช่องสัญญาณของ Satorius [10] ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.1
- กรณีของช่องสัญญาณจางหายแบบราบ ใช้แบบจำลองช่องสัญญาณจางหายของ Jake [13] ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2
- กรณีของช่องสัญญาณจางหายแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.3 ใช้คุณลักษณะของช่องสัญญาณที่กำหนดอยู่ในมาตรฐาน COST207 [14] ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เลือกพิจารณาในกรณีช่องสัญญาณที่มีคุณลักษณะสภาพภูมิประเทศแบบทุ่งหญ้า

นอกจากการจำลองระบบในกรณีของช่องสัญญาณต่างๆ ที่พิจารณาแล้ว ในบทนี้ยังได้ทำการพิจารณาการเพิ่มสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้นโดยการใส่รหัสคอนวอลูชันและการถอดรหัสแบบวิเทอร์บีมาใช้กับระบบ รวมถึงยังได้ทำการหาค่าความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหาย (Outage Probability) ของช่องสัญญาณที่ทำการพิจารณาอีกด้วย

4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

ในหัวข้อนี้จะทำการแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบเพื่อหาสมรรถนะของระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียมที่ใช้การมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเค ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทั้งในส่วนของการมอดูเลตและในส่วนของช่องสัญญาณต่างๆ ที่ทำการพิจารณานั้น แสดงไว้ดังในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบ

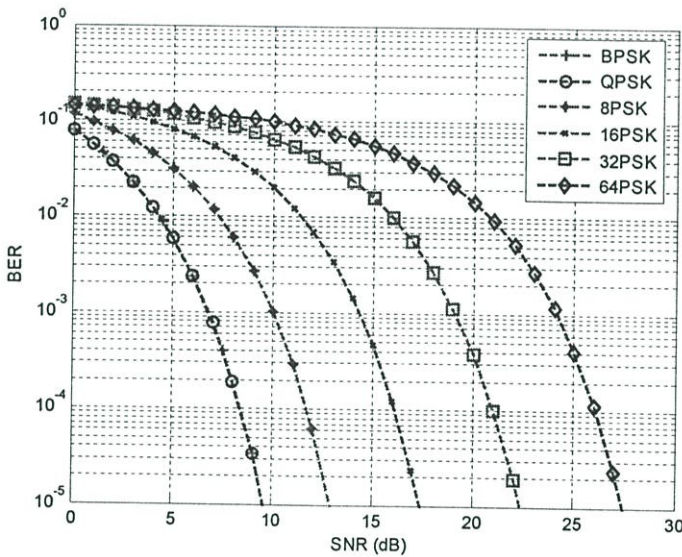
พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการจำลองระบบ
- ใช้การมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเค	กรณีที่ M มีค่าเท่ากับ 2, 4, 8, 16, 32 และ 64
- ความถี่คลื่นพาห์ (f_c)	320 MHz (<i>Range</i> : 225 – 400 MHz)
- ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องรับ สัญญาณ	10 km/hr
การเข้ารหัสคอนโวลูชันและตัวถอดรหัสแบบวิเทอร์บี	
- อัตรารหัส(R) เท่ากับ 2/3	$K=9, G=[23_8, 35_8, 0_8; 0_8, 5_8, 13_8]$
- อัตรารหัส(R) เท่ากับ 1/2	$K=7, G=[133_8, 171_8]$
- อัตรารหัส(R) เท่ากับ 1/3	$K=7, G=[133_8, 145_8, 175_8]$
- ความยาวของเส้นทางที่เหลืออยู่	64
- การตัดสัญญาณของตัวถอดรหัสแบบวิเทอร์บี	การตัดสัญญาณแบบฮาร์ดแบ่งเป็น 2 ระดับ
	การตัดสัญญาณแบบซอฟต์แบ่งเป็น 32 ระดับ (5 บิต)
ช่องสัญญาณซินทิลเลชัน	
- ค่าดัชนีซินทิลเลชัน S_4	0, 0.3, 0.6 และ 0.9
- จำนวนแซมเปิลของลำดับอินพุต $\xi(k)$ (N)	2048
- จำนวนแซมเปิลของตัวกรอง $\hat{h}_{sc}(k)$ (L)	1024 (L = N/2)
- เวลาดีคอร์เรเลชันของการเกิดซินทิลเลชัน τ_0	0.1 วินาที [12]
- อัตราการแซมเปิลต่อช่วงเวลาดีคอร์เรเลชัน	3 แซมเปิล/สัญญาณลักษณะ ($F_s \cdot \tau_0 = 3$)
ช่องสัญญาณจางหายแบบราบ	
- ค่าโรเซียนแฟคเตอร์(K)	0 dB, 5 dB, 10 dB, 15 dB และ 20 dB
- จำนวนเส้นทางของคลื่นสะท้อน(N)	198 เส้นทาง
- จำนวนออสซิลเลเตอร์ความถี่ต่ำ (M)	49
ช่องสัญญาณจางหายแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่	
- จำนวนของแทป	6
- ค่าดีเลย์ของเส้นทางในแต่ละแทป (τ_i)	$[0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5] \mu s$
- ค่าส่วนประกอบของกำลังงานในแต่ละแทป	$[0.602, 0.241, 0.096, 0.036, 0.018, 0.006]$

4.3 ผลการจำลองระบบและการวิเคราะห์ผล

สมรรถนะของระบบที่ทำการพิจารณานั้น ทำการพิจารณาอยู่ในเทอมของอัตราความผิดพลาดบิตและค่าอัตราส่วนของกำลังงานเฉลี่ยต่อบิตต่อกำลังงานของสัญญาณรบกวน(SNR) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ E_b / N_0 โดยที่ E_b คือค่ากำลังงานเฉลี่ยต่อบิต ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก $E_b = E_s / \log_2 M$ (โดยที่ M คือ ขนาดของกลุ่มสัญลักษณ์) และ N_0 คือ ค่าความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณรบกวน (Watts/Hz)

4.3.1 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก

ในส่วนนี้เราจะพิจารณานสมรรถนะของช่องสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวกและไม่มีผลที่เกิดจากการจางหาย พบว่ากรณีของบีพีเอสเคและคิวพีเอสเคที่ค่าเอสเอ็นอาร์เท่ากับ 9.6 dB จะได้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-5} เท่ากัน ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 ส่วนกรณีของ 8พีเอสเค, 16พีเอสเค, 32พีเอสเค และ 64พีเอสเค ที่ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-5} ต้องใช้ค่าเอสเอ็นอาร์เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยมีค่าเท่ากับ 13 dB, 17.5 dB, 22.3 dB และ 27.5 dB ดังรูปที่ 4.1



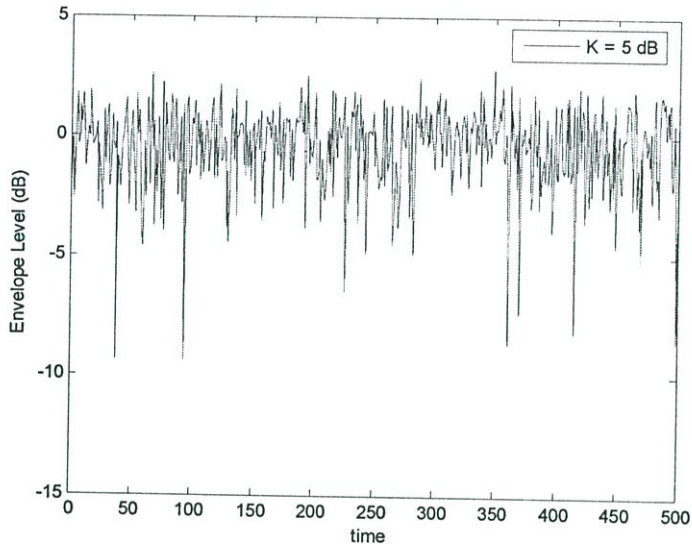
รูปที่ 4.1 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวกกรณีที่มีค่าเท่ากับ 2, 4, 8, 16, 32 และ 64

4.3.2 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณจางหลายวิธีแบบราบ

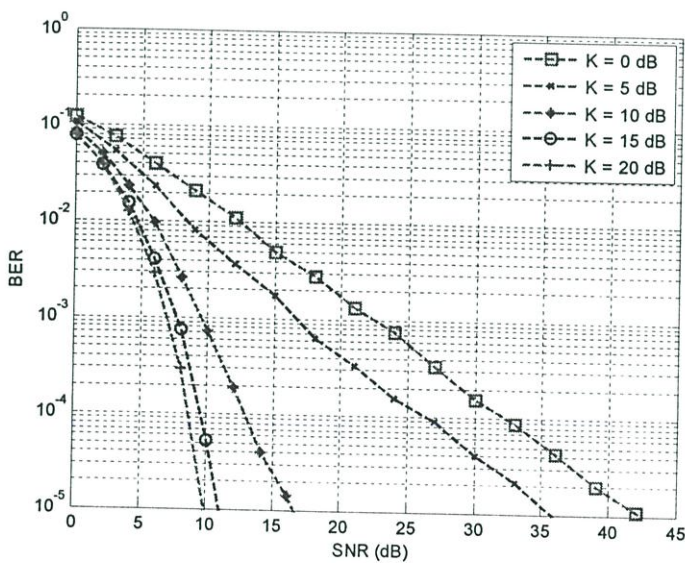
ในหัวข้อนี้ได้ทำการพิจารณาสสมรรถนะของระบบเมื่อทำการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณจางหลายแบบราบที่มีการกระจายแบบไรเซชัน โดยทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบเมื่อมีความรุนแรงของช่องสัญญาณที่ต่างกัน เมื่อทำการเปลี่ยนค่าไรเซชันแฟคเตอร์ จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อค่า

โรเซียนแฟคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตลดลง ซึ่งหมายความว่าเมื่ออัตราส่วนของสัญญาณที่รับได้จากทิศทางตรงต่อสัญญาณที่รับได้จากทิศทางกระเจิงเพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้นนั่นเอง

ตัวอย่างในรูปที่ 4.2 นั้นแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับเมื่อทำการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณจางหาย ซึ่งจากผลที่ได้จะเห็นว่าระดับสัญญาณที่รับได้นั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจากระดับปกติเมื่อเกิดการจางหายขึ้น

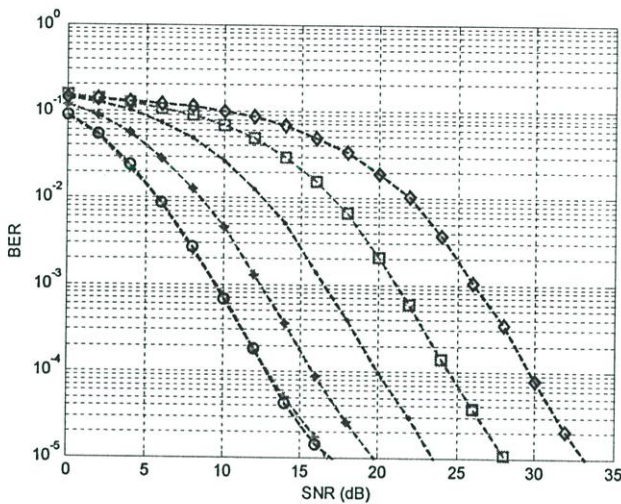


รูปที่ 4.2 ระดับสัญญาณที่รับได้เมื่อทำการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณจางหายแบบราบกรณีที่มีค่าโรเซียนแฟคเตอร์(K) เท่ากับ 5dB



รูปที่ 4.3 สมรรถนะการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเคบนช่องสัญญาณการจางหายแบบราบกรณีที่มีค่าโรเซียนแฟคเตอร์มีค่าเท่ากับ 0 dB, 5dB, 10 dB และ 20 dB

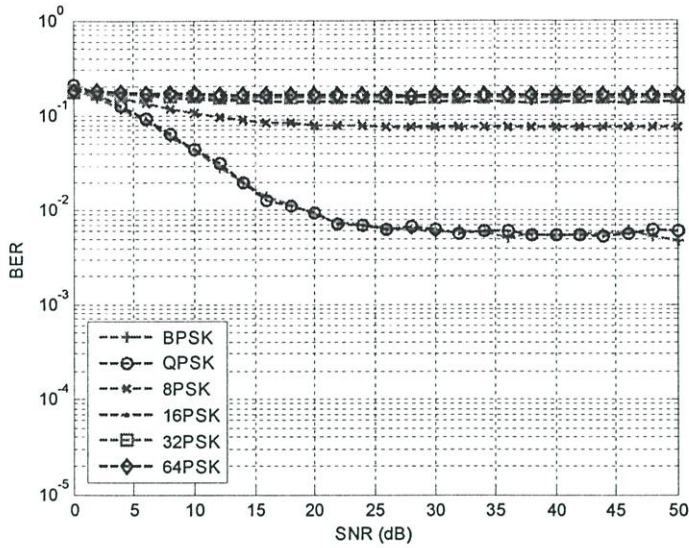
เมื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ ในกรณีที่ M มีค่าเท่ากับ 2, 4, 8, 16, 32 และ 64 นั้นจะพบว่าเมื่อใช้จำนวนเฟสที่ทำการมอดูเลตเพิ่มขึ้น จะทำให้อัตราความผิดพลาดบิตเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะห่างของเฟสใกล้เคียงกันจะแคบมากขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ ในกรณีของช่องสัญญาณจางหายแบบราบที่มีค่าโรเซชันแฟคเตอร์เท่ากับ 15 dB กับกรณีช่องสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก พบว่าที่อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-5} ในกรณีช่องสัญญาณจางหายแบบราบนั้นต้องใช้ค่าเอสเอ็นอาร์มากกว่ากรณีของช่องสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวกถึง 2.4 dB ถึงจะให้ระดับของอัตราความผิดพลาดของบิตเท่ากัน



รูปที่ 4.4 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณจางหายแบบราบ กรณีที่ M มีค่าเท่ากับ 2, 4, 8, 16, 32 และ 64 และค่าโรเซชันแฟคเตอร์มีค่าเท่ากับ 15 dB

4.3.3 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณจางหายหลายวิธีแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่

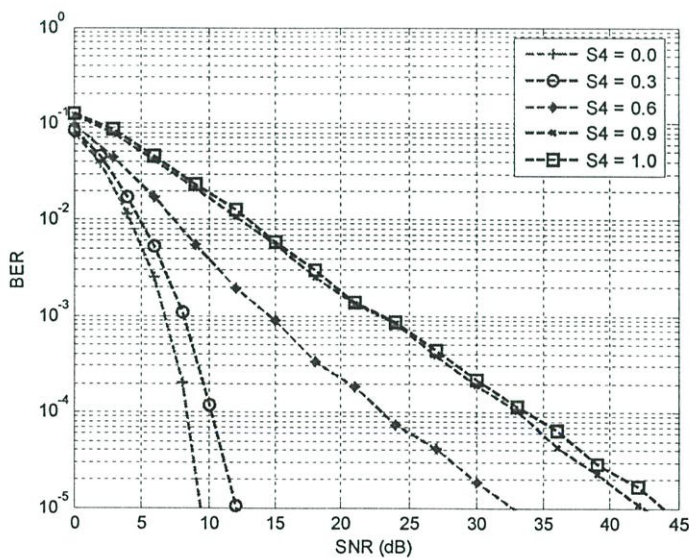
จากรูปที่ 4.5 แสดงสมรรถนะของระบบเมื่อทำการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณจางหายแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่ โดยใช้ช่องสัญญาณที่มีคุณลักษณะตามสภาพภูมิประเทศแบบทุ่งหญ้าตามที่กำหนดอยู่ใน COST207 ซึ่งมีจำนวนแทปทั้งหมด 6 แทป จากผลการจำลองระบบพบว่าในกรณีของบีพีเอสเคและคิวพีเอสเคนั้น ค่าอัตราบิตผิดพลาดจะค่อยๆ ลดลงจนถึงที่ค่าเอสเอ็นอาร์เท่ากับ 25 dB จากนั้นจะเกิด error floors ขึ้น โดยจะมีค่าอัตราบิตผิดพลาดคงที่ที่ 5×10^{-3} เมื่อค่าเอสเอ็นอาร์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีของ 8พีเอสเคนั้นจะเกิด error floors เกิดขึ้นที่ค่าเอสเอ็นอาร์มีค่าเท่ากับ 20 dB สำหรับ 16พีเอสเค 32พีเอสเค และ 64พีเอสเคนั้น จะเกิด error floors เกิดขึ้นตั้งแต่ค่าเอสเอ็นอาร์ต่ำๆ เนื่องจากในกรณีของการมอดูเลตดังกล่าวต้องใช้จำนวนของบิตต่อสัญลักษณ์ที่มากขึ้น จึงได้รับผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Intersymbol Interference: ISI) อันเนื่องมาจากผลกระทบของช่องสัญญาณมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.5 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณจางหายแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่

4.3.4 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณจางหายซินทิลเลชัน

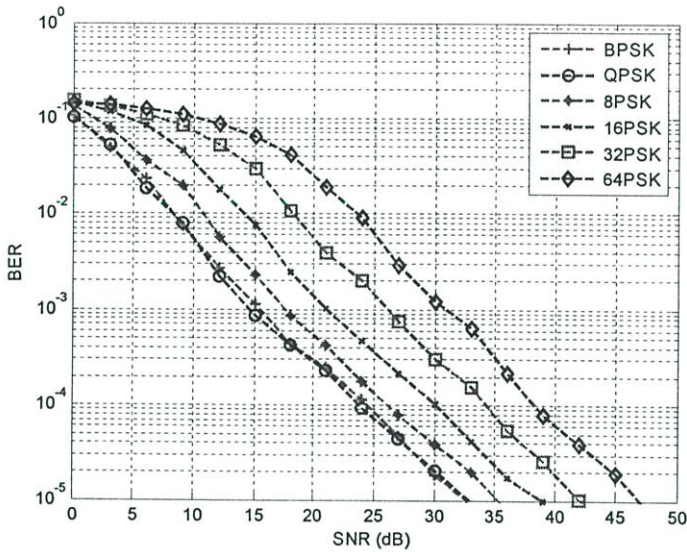
ในหัวข้อนี้ทำการวิเคราะห์ผลของระบบเมื่อทำการสื่อสารบนช่องสัญญาณซินทิลเลชัน ซึ่งพบว่าเมื่อค่าดัชนีซินทิลเลชัน S_4 มีค่าเพิ่มขึ้น จะต้องใช้ค่าเอสเอ็นอาร์เพิ่มขึ้นถึงจะให้ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตที่เท่ากัน ผลการจำลองระบบที่ได้ในรูปที่ 4.6 นั้น เป็นกรณีที่ใช้การมอดูเลตแบบคิวพีเอสเคพบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่า S_4 จาก 0.3 เปลี่ยน 0.6 นั้น จะต้องใช้ค่าเอสเอ็นอาร์เพิ่มขึ้นถึง 20.5 dB ถึงจะให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากันที่ 10^{-5}



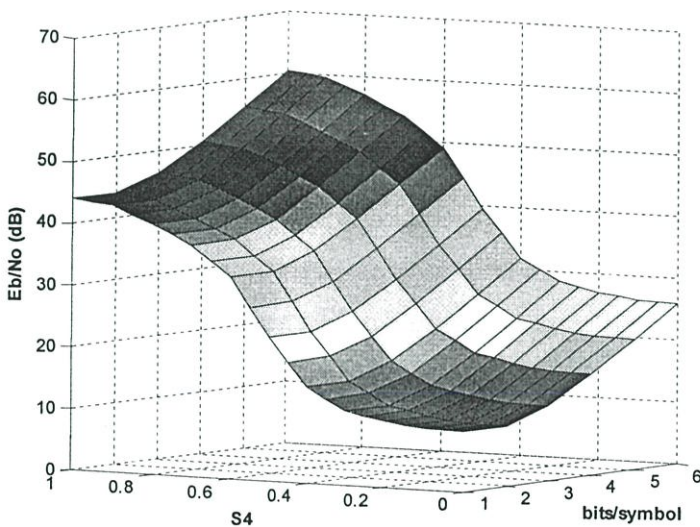
รูปที่ 4.6 สมรรถนะการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเคบนช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบซินทิลเลชัน กรณีที่ค่า S_4 มีค่าเท่ากับ 0, 0.3, 0.6, 0.9 และ 1

จากรูปที่ 4.6 จะสังเกตเห็นว่าในกรณีที่ S_4 มีค่าเท่ากับ 0 นั้น จะมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับกรณีที่ทำการส่งผ่านช่องสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก ส่วนในกรณีที่ค่า S_4 มีค่าเท่ากับ 1 นั้น ผลที่ได้จะมีค่าอัตราความผิดพลาดของบิตเท่ากับกรณีที่การสื่อสารผ่านช่องสัญญาณจางหายที่มีการกระจายแบบเรย์ลี

สมรรถนะของระบบเมื่อมีการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคในกรณีที่ค่า M ที่ต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.7 ส่วนในกรณีของรูปที่ 4.8 นั้นแสดงให้เห็นถึงระดับเอสเอ็นอาร์ที่เหมาะสมที่ให้ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตเท่ากับ 10^{-5} ในกรณีที่มีการเปลี่ยนค่า S_4 และค่า M



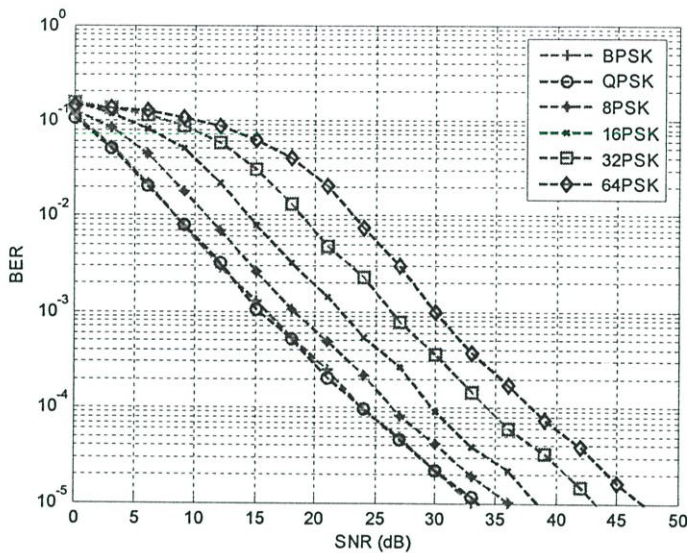
รูปที่ 4.7 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณซินทิลเลชันกรณีที่ M มีค่าเท่ากับ 2, 4, 8, 16, 32 และ 64 และ S_4 มีค่าเท่ากับ 0.6



รูปที่ 4.8 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณซินทิลเลชันกรณีที่ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตเท่ากับ 10^{-5}

4.3.5 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายหลายวิธีแบบราบ

ในหัวข้อนี้ทำการพิจารณาในกรณีช่องสัญญาณผสมแบบซินทิลเลชันและการจางหายแบบราบเข้าด้วยกัน โดยจากรูปที่ 4.9 ทำการกำหนดให้ค่า S_4 มีค่าเท่ากับ 0.6 และค่าโรเซชันแฟคเตอร์มีค่าเท่ากับ 15 dB พบว่าในกรณีของช่องสัญญาณผสมนั้นจะให้สมรรถนะของระบบที่แย่ลงเนื่องจากการรวมผลกระทบที่เกิดจากช่องสัญญาณทั้ง 2 เข้าไว้ด้วยกัน นอกจากนี้พบว่าในการพิจารณากรณีของช่องสัญญาณผสมนั้นให้ผลกระทบที่น้อยกว่าเมื่อทำการพิจารณาแยกผลกระทบจากการจางหายแต่ละช่องสัญญาณแล้วนำผลกระทบจากการจางหายที่เกิดขึ้นมารวมกัน

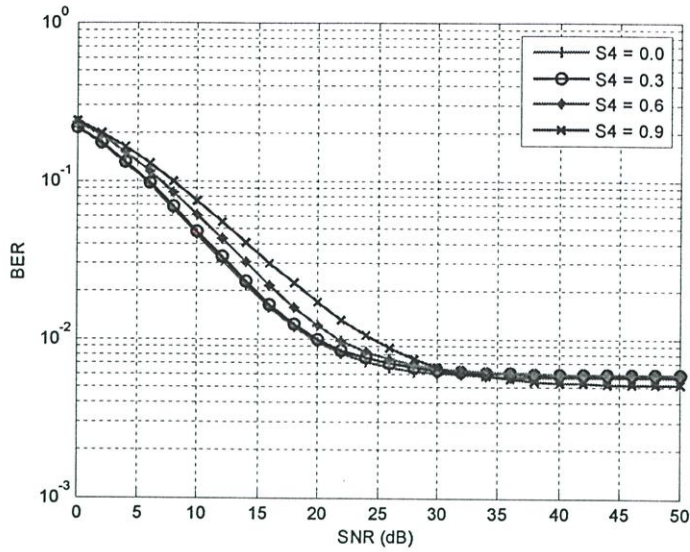


รูปที่ 4.9 สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายแบบราบ กรณีที่ค่า S_4 มีค่าเท่ากับ 0.6 และค่าโรเซชันแฟคเตอร์มีค่าเท่ากับ 15 dB

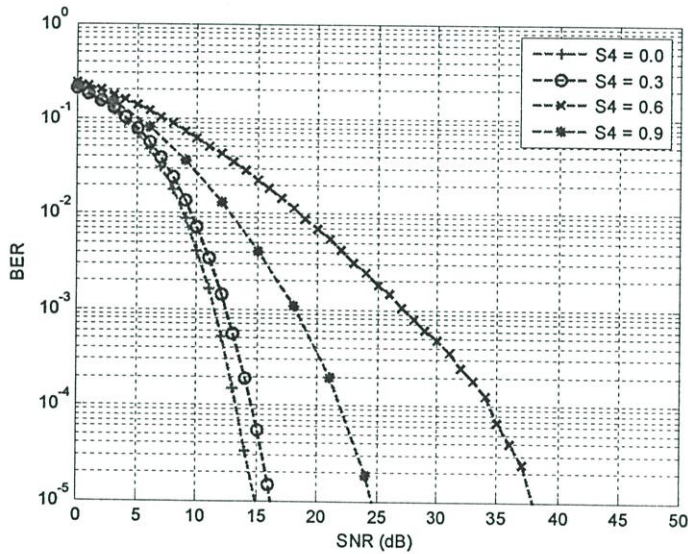
4.3.6 สมรรถนะการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายหลายวิธีแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่

จากรูปที่ 4.10 พบว่าในกรณีที่ค่า S_4 มีค่าเพิ่มขึ้นนั้น จะมีผลกระทบเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อทำการส่งผ่านช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่ และที่ค่าเอสเอ็นอาร์เท่ากับ 30 dB นั้น จะเกิด error floors เกิดขึ้น

สมรรถนะของการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ในกรณีที่น่าตัวตรวจจับสัญญาณแบบวิเทอร์บี (Viterbi Detector) มาใช้กับระบบที่ด้านรับ จากผลที่ได้ดังรูปที่ 4.11 พบว่าการนำตัวตรวจจับสัญญาณแบบวิเทอร์บีมาใช้จะช่วยลดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ได้ ซึ่งจะทำให้ error floors ที่เกิดขึ้นนั้นหายหมดไป



รูปที่ 4.10 สมรรถนะการมอดูเลตแบบควิพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่ กรณีที่มีค่า S_4 มีค่าเท่ากับ 0, 0.3, 0.6 และ 0.9

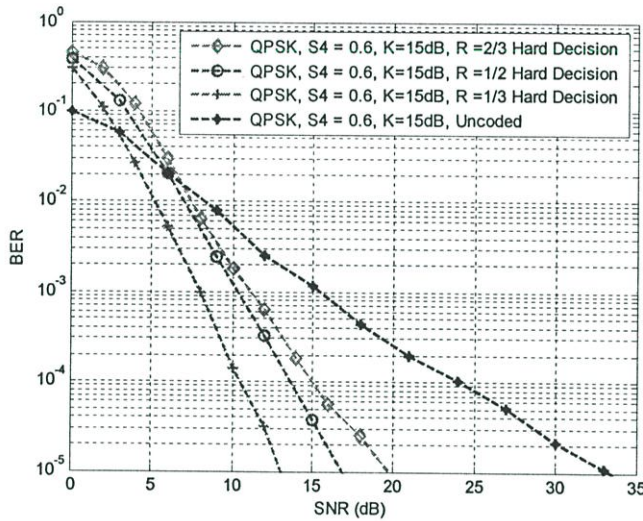


รูปที่ 4.11 สมรรถนะการมอดูเลตแบบควิพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่ กรณีที่ใช้ตัวตรวจจับสัญญาณแบบวิเทอร์บี โดยมีค่า S_4 เท่ากับ 0, 0.3, 0.6 และ 0.9

4.3.7 สมรรถนะการมอดูเลตแบบควิพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิเลชันและการจาง

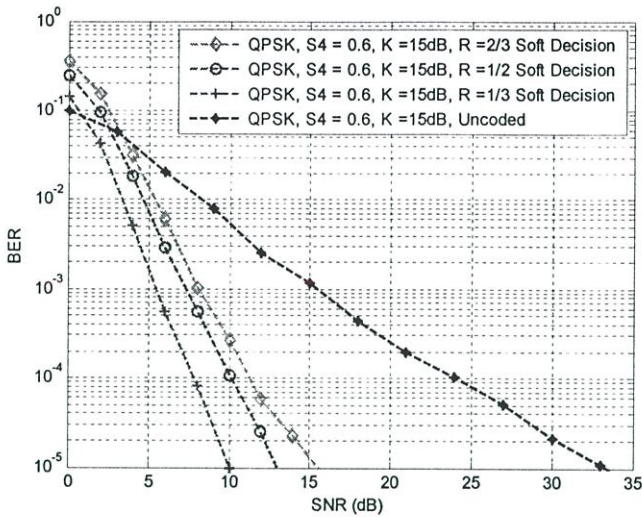
หายหลายวิธีแบบราบเมื่อมีการเข้ารหัสคอนโวลูชันและใช้ตัวถอดรหัสแบบวิเทอร์บี

ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบเมื่อมีการเข้ารหัสคอนโวลูชันด้วยอัตรารหัสที่ต่างกัน และใช้การถอดรหัสแบบวิเทอร์บีที่มีการตัดสินใจแบบฮาร์ดและการตัดสินใจแบบซอฟต์ จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในกรณีที่มีการเข้ารหัสช่องสัญญาณกับกรณีที่ไม่มีการเข้ารหัสนั้น กรณีที่มีการเข้ารหัสนั้นจะให้สมรรถนะที่ดีกว่ากรณีที่ไม่เข้ารหัสอยู่มาก และจะพบว่าเมื่ออัตราหสมีค่าที่เปลี่ยนไปนั้นก็ทำให้สมรรถนะของระบบเปลี่ยนไปด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งทั้งนี้ในการเลือกใช้อัตราหสนั้นก็ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการนำไปใช้งานดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2



รูปที่ 4.12 สมรรถนะการมอดูเลตแบบควิพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิเลชันและการจางหายแบบราบเมื่อมีการเข้ารหัสคอนโวลูชันและใช้การถอดรหัสแบบวิเทอร์บีที่มีการตัดสินใจแบบฮาร์ด

รูปที่ 4.13 นั้นแสดงสมรรถนะของระบบเมื่อใช้การถอดรหัสแบบวิเทอร์บีที่มีการตัดสินใจแบบซอฟต์ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับสมรรถนะของระบบเมื่อใช้การถอดรหัสแบบวิเทอร์บีที่มีการตัดสินใจแบบฮาร์ด ดังรูปที่ 4.12 จะพบว่าในกรณีที่มีการตัดสินใจแบบซอฟต์นั้นจะให้สมรรถนะอัตราบิดผิดพลาดที่ดีกว่ากรณีที่มีการตัดสินใจแบบฮาร์ดอยู่ 2-3 dB



รูปที่ 4.13 สมรรถนะการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเคบนช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายแบบราบ เมื่อมีการเข้ารหัสคอนไวลูชันและใช้การถอดรหัสแบบวิเทอร์บีที่มีการตัดสลิบใจแบบซอฟต์แวร์

4.3.8 ความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหาย (Outage probability)

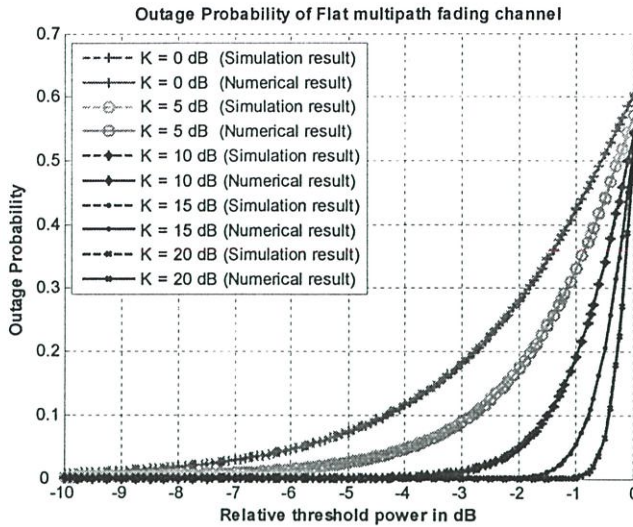
ในช่องสัญญาณจางหายนั้น สัญญาณทำการส่งจะได้รับผลกระทบที่เกิดจากการจางหายซึ่งจะทำให้สัญญาณเสียหายหรือขาดหายไป การขาดหายนั้นเกิดขึ้นเมื่อกำลังงานของสัญญาณที่รับได้มีค่าต่ำกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold) P_{th} ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการอินทิเกรตของกำลังงานสัญญาณที่รับได้ $p(t)$ ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$P_{out} = \int_0^{P_{th}} p(t) dt \quad (4.1)$$

โดยที่ P_{th} คือค่ากำลังงานที่จุดเริ่มเปลี่ยน

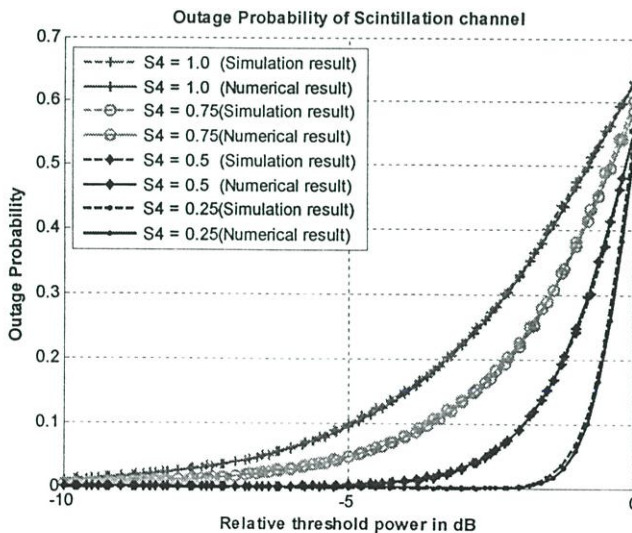
นอกจากวิธีข้างต้นแล้วค่าความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหายนั้น สามารถหาได้จากโปรแกรม MATLAB โดยการนำสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณในหัวข้อก่อนหน้ามาทำการหาค่า ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1). ทำการคำนวณกำลังงานของสัญญาณที่รับได้
- 2). กำหนดค่าระดับกำลังงานที่จุดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่รับได้ต่อกำลังงานของสัญญาณเฉลี่ย
- 3). นับจำนวนครั้งในการสุ่ม ที่มีค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่ำกว่าค่าที่จุดเริ่มเปลี่ยน
- 4). ค่าความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหายสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของค่าที่นับได้ในข้อที่ 3 ต่อกับจำนวนครั้งทั้งหมดในการสุ่ม

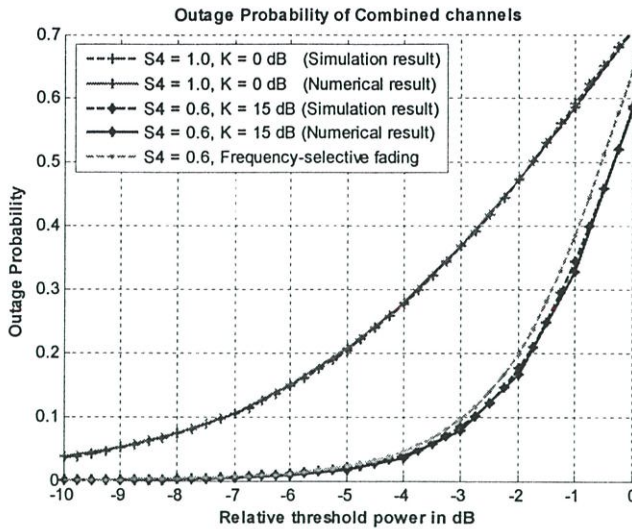


รูปที่ 4.14 ความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหายของช่องสัญญาณจางหายแบบราบกรณีที่กำลังรับสัญญาณแฟลคเตอร์มีค่าเท่ากับ 0, 5, 10, 15 และ 20 dB

รูปที่ 4.14 แสดงผลค่าความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหายของช่องสัญญาณจางหายแบบราบ พบว่าเมื่อกำลังรับสัญญาณแฟลคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของสัญญาณที่รับได้ในทิศทางตรงต่อสัญญาณในทิศทางกระเจิงมีค่าเพิ่มขึ้นนั้น จะมีความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหายลดลง และจากผลที่ได้จะพบว่าทั้งในกรณีที่จากการคำนวณดังสมการที่ 4.1 และผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมนี้ให้ผลที่เท่ากัน ในส่วนของค่าความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหายของช่องสัญญาณซินทิเลชันและช่องสัญญาณผสมซินทิเลชันและการจางหายหลายวิธี นั้นแสดงไว้ในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหายของช่องสัญญาณซินทิเลชันกรณีที่กำลังรับสัญญาณมีค่าเท่ากับ 0, 0.3, 0.6 และ 0.9



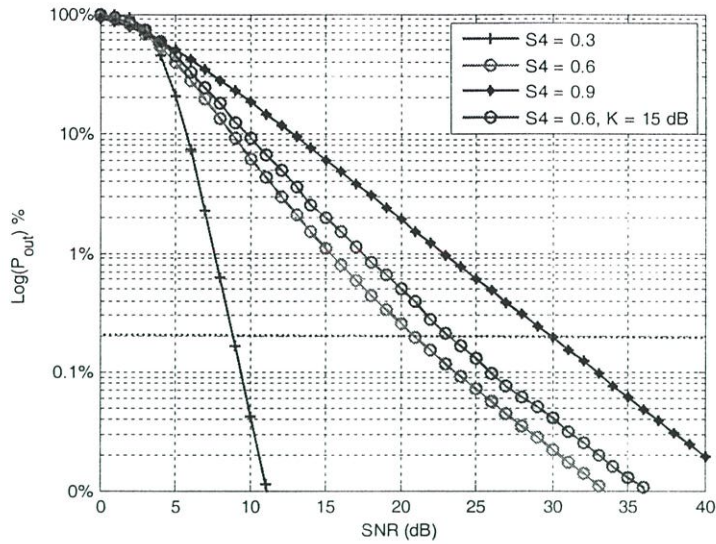
รูปที่ 4.16 ความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหายของช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายหลายวิถี กรณีที่ค่า S_4 มีค่าเท่ากับ 0.6

ในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมบางระบบนั้นจะไม่ทำการส่งข้อมูลข่าวสาร เมื่อในขณะนั้นมีค่าเอสเอ็นอาร์น้อยกว่าค่าเอสเอ็นอาร์อ้างอิงที่กำหนด โดยค่าความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหายเมื่อพิจารณาในพจน์ของเอสเอ็นอาร์นั้นสามารถหาได้ดังสมการที่ 4.2

$$P_{out} = \int_0^{\gamma_1} p_\gamma(\gamma) d\gamma = 1 - \int_{\gamma_1}^{+\infty} p_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (4.2)$$

โดยในระบบสื่อสารดาวเทียมนั้นจะมีการกำหนดค่าเอสเอ็นอาร์ที่ใช้เป็นค่าเอสเอ็นอาร์อ้างอิงต่ำสุด (γ_1) โดยในงานวิจัยนี้ใช้ค่าเอสเอ็นอาร์อ้างอิงเท่ากับ 3.75 dB โดยเป็นการชดเชยสำหรับค่าความไม่แน่นอนในการประมาณช่องสัญญาณ (2.5 dB) ชดเชยในกรณีรหัสที่ใช้งานนั้นให้ผลที่ได้ต่ำกว่าระดับมาตรฐาน (1 dB) และชดเชยผลกระทบจากดีเลย์ในช่องสัญญาณป้อนกลับ (0.25 dB) [16]

โดยจากรูปที่ 4.17 แสดงค่าความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหายตามฟังก์ชันของค่าเอสเอ็นอาร์เฉลี่ย ซึ่งหากค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของช่องสัญญาณ $p_\gamma(\gamma)$ [17] โดยกำหนดค่าเอสเอ็นอาร์อ้างอิง $\gamma_1 = 3.75 \text{ dB}$ โดยค่าเอสเอ็นอาร์เฉลี่ยต่ำสุดที่ทำให้ลิงค์การสื่อสารสามารถใช้งานการสื่อสารได้ 99.8% ในกรณีของช่องสัญญาณซินทิลเลชันที่มีค่า S_4 ที่ต่างกัน และช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายแบบราบที่มีค่า $S_4 = 0.6$ และ $K = 15 \text{ dB}$ นั้นแสดงได้ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.17 ความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหายตามฟังก์ชันของค่าเอสเอ็นอาร์เฉลี่ย ในกรณีของช่องสัญญาณซินทิลเลขันที่ $S_4 = 0.3, 0.6, 0.9$ และในกรณีของช่องสัญญาณผสมซินทิลเลขันและการจางหายแบบราบที่ $S_4 = 0.6$ และ $K = 15 \text{ dB}$ โดยที่ $\gamma_1 = 3.75 \text{ dB}$

ตารางที่ 4.2 ค่าเอสเอ็นอาร์เฉลี่ยต่ำสุดที่ทำให้ลิงก์การสื่อสารสามารถใช้งานการสื่อสารได้ 99.8% สำหรับช่องสัญญาณซินทิลเลขัน กรณีที่ $\gamma_1 = 3.75 \text{ dB}$

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ ในช่องสัญญาณ	ค่าเอสเอ็นอาร์เฉลี่ยต่ำสุด
$S_4 = 0.3$	8.9 dB
$S_4 = 0.6$	21 dB
$S_4 = 0.9$	29.9 dB
$S_4 = 0.6, K = 15 \text{ dB}$	23 dB

ค่าความน่าจะเป็นของสัญญาณขาดหาย 0.2% นั้น สามารถเปรียบได้กับเวลาการใช้งานของระบบที่จะมีปัญหาประมาณ 15 ชั่วโมงต่อ 1 เดือน

สรุปผลการวิจัยและแนวทางในการพิจารณาต่อไป

5.1 สรุปผลการวิจัย

ระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียม (Mobile Satellite Communication) เป็นระบบที่มีการพัฒนาและนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของความต้องการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งข้อดีของการสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียมนั้นคือ สามารถทำการติดต่อสื่อสารได้ในทุกสภาพพื้นที่ที่อยู่ในพื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณดาวเทียม โดยระบบที่ทำการศึกษานี้จะประกอบด้วย เครื่องส่ง ช่องสัญญาณ และเครื่องรับ ข้อมูลที่จะทำการส่งจะถูกนำไปทำการมอดูเลตเพื่อให้สามารถส่งข้อมูลให้ไ้ระยะทางไกลขึ้น และมีความปลอดภัยจากสัญญาณรบกวนแบบต่างๆ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ใช้รูปแบบการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเค จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งผ่านช่องสัญญาณซึ่งก็คืออากาศ เนื่องจากการสื่อสารจะมีสัญญาณรบกวนซึ่งกำหนดให้เป็นสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก และจากลักษณะของช่องสัญญาณในระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียมนั้นจะได้รับผลกระทบร่วมที่เกิดจากการจางหายซินทิลเลชันในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และการจางหายจากคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นที่ภาคพื้นดิน ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แบบจำลองช่องสัญญาณซินทิลเลชันตามแบบจำลองของ Satorius แบบจำลองช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีแบบราบตามแบบจำลองของ Jake และในกรณีของช่องสัญญาณจางหายหลายวิถีแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่ใช้คุณลักษณะของช่องสัญญาณที่กำหนดอยู่ในมาตรฐาน COST207

โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการทดสอบด้วยวิธีการจำลองระบบ และสามารถสรุปผลที่ได้จากการจำลองระบบเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. ผลสมรรถนะของระบบในกรณีที่ทำการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณซินทิลเลชันเมื่อเกิดการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ พบว่าจะทำให้สมรรถนะของระบบในเทอมของค่าอัตราความผิดพลาดของบิตลดลง และจากแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองช่องสัญญาณซินทิลเลชันเมื่อค่าดัชนีซินทิลเลชัน (S_4) มีค่าเท่ากับ 1 นั้น จะได้ผลสมรรถนะของระบบที่เท่ากับกรณีที่ทำการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณจางหายที่มีกระจายแบบเรย์ลี

2. เมื่อทำการพิจารณาสมรรถนะของระบบในกรณีที่ทำการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันและการจางหายหลายวิถี พบว่าสมรรถนะของระบบจะลดลงมากกว่ากรณีช่องสัญญาณซินทิลเลชันเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้พบว่าในการพิจารณากรณีของช่องสัญญาณผสมนั้นจะให้ผลกระทบที่น้อยกว่าเมื่อทำการพิจารณาแยกผลกระทบจากการจางหายแต่ละช่องสัญญาณแล้วนำผลกระทบจากการจางหายที่เกิดขึ้นมารวมกัน

3. ในกรณีผลของช่องสัญญาณจางหายหลายวิธีแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่นำมาใช้กับระบบ พบว่าผลของคิเล็ค์ที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณนั้นทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งทำให้สมรรถนะของระบบแย่ลงเป็นอย่างมาก อย่างเช่นในกรณีของคิวพีเอสเคนั้นจะเกิด error floors เกิดขึ้นที่ค่าเอสเอ็นอาร์มีค่าเท่ากับ 25 dB และเมื่อทำการพิจารณาในกรณีของช่องสัญญาณผสมซินทิลเลชันกับช่องสัญญาณจางหายหลายวิธีแบบเปลี่ยนแปลงตามความถี่ พบว่าค่าระดับความรุนแรงของการเกิดซินทิลเลชันที่ต่างกันนั้น ให้ผลสมรรถนะของระบบที่ต่างกันเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ที่เกิดขึ้นที่ช่องสัญญาณจางหายที่ภาคพื้นดินนั่นเอง ในส่วนของการจำลองระบบได้มีการนำตัวตรวจจับสัญญาณแบบวิเทอร์บีมาใช้ในการช่วยลดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ ซึ่งผลที่ได้พบว่าสามารถขจัด error floors ที่เกิดได้ทั้งหมด ซึ่งนั่นหมายถึงการนำตรวจจับสัญญาณแบบวิเทอร์บีมาใช้ในที่ภาครับนั้นสามารถแก้ไขปัญหาการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ได้

จากผลกระทบที่เกิดจากการจางหายของสัญญาณซึ่งทำให้สมรรถนะของระบบลดลง ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำการเข้ารหัสช่องสัญญาณมาใช้กับระบบเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้น โดยเลือกใช้เข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและตัวถอดรหัสแบบวิเทอร์บี ซึ่งผลที่ได้พบว่าสามารถทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเข้ารหัสช่องสัญญาณ โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าอัตรารหัสที่ใช้และประเภทการตัดสินใจของตัวถอดรหัส ซึ่งในกรณีที่ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตเท่ากันนั้นการตัดสินใจแบบซอฟต์แวร์ใช้เอสเอ็นอาร์น้อยกว่าการตัดสินใจแบบฮาร์ดถึงประมาณ 3 dB

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

ถึงแม้การนำช่องสัญญาณซินทิลเลชันและช่องสัญญาณจางหายหลายวิธีที่เกิดขึ้นที่ภาคพื้นดินมาทำการพิจารณาร่วมกันนั้นสามารถทำได้ไม่ยากมากนัก แต่ในส่วนของ การจำลองระบบนั้นมีความยุ่งยากและต้องใช้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างนานมาก ดังนั้นผู้เขียนจึงมีความคิดว่าควรที่จะมีการออกแบบแบบจำลองช่องสัญญาณสำหรับระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียม โดยเฉพาะเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานและในการจำลองระบบ นอกจากนี้ในการนำผลกระทบอื่นที่เกิดขึ้นในการสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียมมาทำการพิจารณาร่วมก็จะทำให้สมรรถนะของระบบมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Satorius E.H. and Ye Z. "Channel Modeling and Simulation for Mobile User Objective System (MUOS)--Part II: Selective Scintillation and Terrestrial Multipath Fading" **ICC 2003 - IEEE International Conference on Communications**, vol. 26, no. 1, May 2003. pp. 3511-3518.
- [2] Ohmori S. and Wakana H. **Mobile Satellite Communications**. 2nd ED. Boston : Artech house, Inc. 1998.
- [3] Proakis J.G., Salehi M. and Bauch G. **Contemporary Communication Systems using Matlab and simulink**. 2nd ED. Toronto : Thomson Learning, Inc. 2004.
- [4] พรชัย ทรัพย์นิตติ. ระบบการสื่อสารดิจิทัล. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [5] Sklar B. **Digital Communications Fundamental and Applications**. 2nd ED. New Jersey: Prentice-Hall. 2001.
- [6] วรณริย์ วงศ์ไตรรัตน์. "การจำลองแบบการทำงานของระบบเว็บเล็ดมัลติแคร์เรียร์-ซีดีเอ็มเอ" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [7] ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ. หลักการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2546.
- [8] Gordon L.Stuber. **Principles of Mobile Communication**. 2nd ED. Boston : Kluwer Academic Publishers. 2001.
- [9] ปัทมา พุ่มชูศักดิ์. "การศึกษาคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของสัญญาณดาวเทียม GPS." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [10] Ye Z. and Satorius E.H. "Channel Modeling and Simulation for Mobile User Objective System (MUOS)--Part I: Flat Scintillation and Fading" **ICC 2003 - IEEE International Conference on Communications**, vol. 26, no. 1, May 2003. pp. 3503-3510.
- [11] Shaft P. "On the Relationship Between Scintillation Index and Rician Fading" **IEEE Trans. Comm**, May 1974. pp. 731-732.

- [12] Kullstam P.A. and Keskinen M.J. "Ionospheric Scintillation Effects on UHF Satellite Communications" **MILCOM 2000 Proceedings**, vol. 2, Oct.2000. pp. 779-783.
- [13] Jakes W.C., Editors. **Microwave Mobile Communications**. New Jersey : IEEE Press. 1993.
- [14] COST 207 Management Committee. "COST 207: Digital Land Mobile Radio Communications" **Final Report, Commission of the European Communities**, 1989.
- [15] Patzold M. **Mobile Fading Channels**. West Sussex, England : John Wiley & Sons, Ltd. 2002.
- [16] Kjell J. Hole, Geir E. Øien, Bjarne Risløw, and Pål Orten "Adaptive trellis coded modulation for Ka-band fixed satellite communications – Part II: Feedback delay, outage, and multimedia communications" **BEATS seminar**, NTNU, Oct 2002.
- [17] Wongtrairat W., Leelarужи N., Hemmakorn N. and Supnithi P. "Performance of MPSK in Satellite Mobile Channel with Combined Ionospheric Scintillation and Flat Fading Channels" **IRST 2006**, July 2006. pp. 217-221.

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. นพดล บุญส่งกุศลจิต และ พรชัย ทรัพย์นิธิ “สมรรถนะการมอดูเลตแบบเอ็มพีเอสเคสำหรับระบบสื่อสารเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียม” การประชุมทางวิชาการจัดโดยสมาคมวิชาการไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ โทรคมนาคม และสารสนเทศแห่งประเทศไทย พฤษภาคม 2006 หน้า 457-460

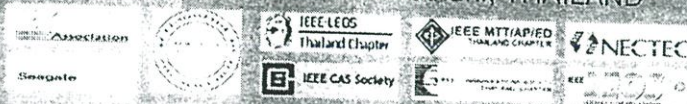
ECTI-CON 2006

THE 2006 ECTI INTERNATIONAL CONFERENCE



Proceedings of the 2006 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) International Conference

May 10-13, 2006
Ubonburi Hotel, Ubon Ratchathani, THAILAND



Performance of MPSK Modulation in Satellite Mobile Communication Systems

Noppadol Boonsongkusoljit and Pornchai Supniti

Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Bangkok, 10520, Thailand
Email: s8060910@kmutl.ac.th, pomchai@telecom.kmutl.ac.th

ABSTRACT

This paper presents the performance of MPSK modulation on joint scintillation and Rician multipath fading channel. Scintillation arises from ionospheric irregularities, called scintillation fading. As scintillation index increases, the performance of MPSK modulation in terms of bit error rate degrades. As constellation size increases, similar results are obtained. In addition, the performance of MPSK in combined fading channel is poorer than the that in a single fading channel.

1. INTRODUCTION

Satellite mobile communication in UHF band and lower frequency bands has been recently planned [1]. In the system, the scintillation effect as well as multipath fading need to be considered and accounted for during the design stage.

Fading caused by the propagation of radio signal through the ionosphere is of interest to both ionospheric physicists and communications engineers. Scintillation is an effect caused by unequal electrical charge distribution in the ionosphere layer. The phenomenon is common for UHF band and lower bands and is specifically severe in tropical and polar region [1]. It is statistically modeled as Rician or Rayleigh signal fading with finite signal decorrelation time and limited coherent bandwidth of the transmission channel [2] [3]. The methods to generate scintillation coefficients have recently been proposed [4].

The performance of QPSK on combined scintillation and fading channel have recently been studied and compared to theoretical results [5].

In this paper, we aim to simulate the satellite mobile communication system using MPSK modulation scheme. The combined channel of scintillation and flat multipath fading is generated together with additive white Gaussian noise. The performance in terms of bit error rate versus signal-to-noise (SNR) ratio is then illustrated.

The paper is organized as follows. In Section 2, the system model and basic definitions are reviewed. Section 3 describes the statistical characterization of scintillation coefficients and the generation scintillation channel model. In Section 4, simulation results for different for scintillation channel and joint scintillation and multipath fading channel are presented. The concluding remarks and future works are given in Section 5.

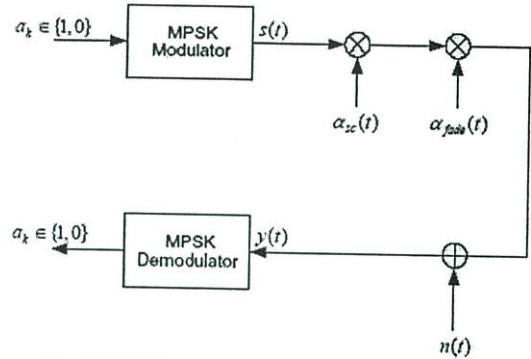


Fig.1: MPSK modulation on joint scintillation and Rician fading channels simulation model

2. THEORY AND BASIC DEFINITION

Consider a MPSK modulation scheme in Fig. 1 where each information symbol is mapped to M possible bandpass waveforms, $s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t), 0 \leq t \leq T_s$, where T_s is the symbol period. Each signal $s_i(t)$ has phase difference by $2\pi/M$ radians and is given by [6]

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left(\omega_0 t - \frac{2\pi i}{M}\right); \quad 0 \leq t \leq T_s, \quad i = 1, \dots, M \quad (1)$$

where E is the received energy over each symbol duration T_s and ω_0 is the radian frequency of the carrier. Notice that MPSK signal has constant envelope. For an additive white Gaussian noise (AWGN) channel, and assuming coherent detection, the probability of symbol error at high SNR can be expressed in terms of digital SNR, E_s/N_0 , i.e.,

$$P_s(E) |_{\text{MPSK}} \approx 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0} \sin \frac{\pi}{M}}\right) \quad (2)$$

where $Q(x)$ is a Q-function defined by

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-u^2/2} du \quad (3)$$

and N_0 is a one-sided noise power spectral density.

Let the received signal $y(t)$ be

$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha_{sc}(t) \alpha_{fade}(t) s(t - nT_s) + n(t) \quad (4)$$

where $\alpha_{sc}(t)$ and $\alpha_{fade}(t)$ are scintillation and multipath-fading coefficients, respectively, and $n(t)$ is an AWGN with variance $\sigma^2 = N_0/2$ Watts/Hz.

3. SCINTILLATION

For satellite communication system, the transmitted signal travels through the ionosphere before reaching the earth station or receiver. Scintillation is a phenomenon that signals are distorted by the fading effect due to the ionosphere. It is common for the frequency range below UHF band (300 MHz -3 GHz). The result is a specific type of fading that depends on the ionosphere condition, location (most often found in the tropical and polar regions) and time of year.

3.1 Scintillation Index

The intensity of scintillation is often measured by the scintillation index S_4 , expressed as

$$S_4 = \frac{\sigma_x}{m_x} \quad (5)$$

where m_x is the mean and σ_x is standard deviation of received signal envelope. Scintillation index S_4 can thus be computed in a window of 1-minute interval.

3.2 Scintillation Model

The scintillation coefficient $\alpha_{sc}(t)$ is statistically modelled as a non-zero mean, complex Gaussian random process

$$\alpha_{sc}(t) = \sqrt{K_s} \cdot e^{j\phi} + n_{scint}(t) \quad (6)$$

where K_s is proportional to the signal power received via the line of sight path, ϕ is a random phase shift uniformly distributed over the interval $[-\pi, \pi]$ and $n_{scint}(t)$ is a complexed Gaussian process that arises from scattered signal propagation over random over random paths due to atmospheric scintillation effects. The average signal power received over the scattered paths is proportional to $\sigma_{nsc}^2 = E |n_{scint}(t)|^2$ and assuming conservation of between specular and scattered signal components $K_s + \sigma_{nsc}^2 = 1$. The envelope of the scintillation coefficient $r_{sc} = |\alpha_{sc}(t)|$ has a Rician probability density given by:

$$P_{rsc}(r) = \frac{2r}{\sigma_{nsc}^2} \cdot e^{-r} \cdot e^{-r^2/\sigma_{nsc}^2} \cdot I_0 \left\{ 2r \sqrt{\gamma / \sigma_{nsc}^2} \right\} \quad (7)$$

where $\gamma \equiv K_s / \sigma_{nsc}^2$ is the ratio of received specular to scattered signal power (Rician factor) and Rician factor

(γ) can be related to the scintillation index S_4 [7], then can be expressed as

$$\gamma = \sqrt{1 - S_4^2} / (1 - \sqrt{1 - S_4^2}) \quad (8)$$

and

$$S_4 = \sqrt{1 - \{\gamma / (\gamma + 1)\}^2} \quad (9)$$

$\alpha_{sc}(t)$ can be generated in the time or frequency domain by the basic idea is to filter an independent complex Gaussian sequence to generate the scattered component $n_{scint}(t)$ and then combine this with the specular component to produce $\alpha_{sc}(t)$. The magnitude-squared filter frequency response $|H_{sc}(f)|^2$ is matched to the power spectrum of $n_{scint}(t)$, i.e.,

$$|H_{sc}(f)|^2 = P_{sc}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \cdot R_{sc}(\tau) \cdot e^{-2\pi j f \tau} \quad (10)$$

The process is show in Figure 2As indicated, the filter frequency response is designed to have linear phase, $phase\{H_{sc}(f)\} = 2\pi\Delta f$, where Δ is typically set to half the duration of the filter impulse response.

$$h_{sc} = \int_{-\infty}^{\infty} df \cdot H_{sc}(f) \cdot e^{2\pi j f \tau} \quad (11)$$

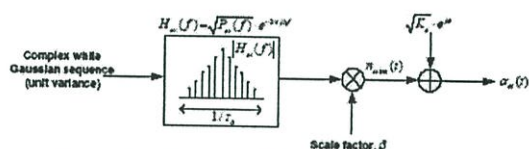


Fig.2: Scintillation coefficient simulation model

For the discrete frequency response $\bar{H}_{sc}(k)$ of the discrete-time filter \hat{h}_{sc} is computed from (11) as follows:

$$\bar{H}_{sc}(k) = e^{-\pi\sigma_{nsc}^2 k^2 / N^2} \cdot e^{-2\pi j(L/2)k/N} \quad (12)$$

where $0 \leq k \leq N/2$, F_s is a sampling rate that is two to three times the maximum bandwidth of the square-root Gaussian filter and $N \geq L$ is the number of points computed. Finally, $\hat{h}_{sc}(k)$ is computed via inverse discrete Fourier transform (IDFT)

$$\hat{h}_{sc}(k) = \frac{1}{N} \cdot w(k) \cdot \sum_{l=0}^{N-1} \bar{H}_{sc}(l) \cdot \exp(2\pi jkl/N) \quad (13)$$

where $0 \leq k \leq L-1$, $w(k)$ is a window function, L sampled in extent and symmetric about $L/2$. Normally a Hamming window is used.

Given $\hat{h}_{sc}(k)$, the sampled scattered component $n_{scint}(k/F_s)$ can be generated via discrete convolution with a white, unit variance complex Gaussian input sequence $\xi(k)$ as follows:

$$n_{scint}(k/F_s) = \beta \cdot \sum_{l=0}^{L-1} \hat{h}_{sc}(l) \cdot \xi(k-l), \quad (14)$$

where the scaling constant β is chosen to yield the desired output variance.

$$\beta = \sqrt{\sigma_{nsc}^2 / \sum_{l=0}^{L-1} \hat{h}_{sc}^2(l)} \quad (15)$$

As noted above, σ_{nsc}^2 is typically computed in terms of the desired Rician factor via $\sigma_{nsc}^2 = 1/(1+\gamma)$.

4. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSIONS

The performance of MPSK modulation in satellite mobile communication channel is simulated in this section. The channel is the product channel of scintillation and flat multipath fading. The scintillation intensity level is varied by the parameter S_4 . The flat multipath fading is generated using Jake's model and the scintillation model is generated using the method described in Section 3. The carrier frequency is at $f_c = 800$ MHz and the receiver's speed is at 10 km/hr. The number of reflected paths N used is 198. The performance is in terms of bit error rate and the signal-to-noise (SNR) ratio is defined by E_b/N_0 , where E_b is average bit energy which can be computed from $E_b = E_s / \log_2 M$ (M is the size of the symbol set) and N_0 is the noise power spectral density in Watts/Hz. For each SNR, the simulation is run until the total bit errors are at least 100.

The performance of MPSK modulation on scintillation is shown in Fig. 3 and Fig. 4, respectively. In Fig. 3, the bit error rate of QPSK is shown as the scintillation index varies from 0 to 0.9. It is evident that as the intensity level increases, the performance degrades. Similarly, as the constellation size increases with fixed $S_4 = 0.3$, the bit error rate degrades as seen in Fig. 4.

For joint scintillation and Rician multipath fading channel, the performance of MPSK modulation is shown in Fig. 5. It can be observed that the bit error rate increases due the combined fading channels as we compare Fig. 4 and Fig. 5, respectively. For example, if 8PSK is employed, the SNR loss at $BER = 10^{-5}$ is about 1 dB.

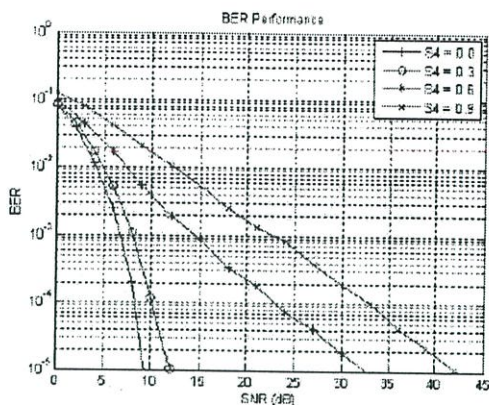


Fig.3: BER performance of QPSK modulation on Scintillation fading channel for $S_4 = 0, 0.3, 0.6$ and 0.9 .

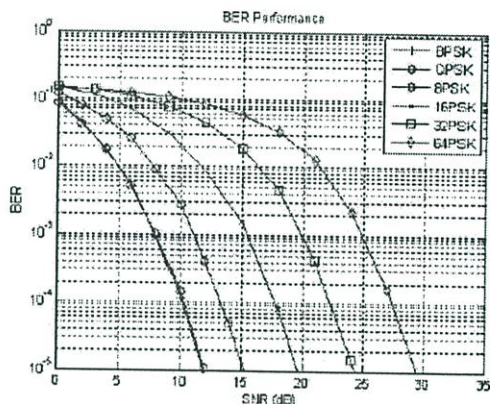


Fig.4: BER performance of MPSK modulation on Scintillation fading channel for $M = 2, 4, 8, 16, 32$ and 64 , $S_4 = 0.3$.

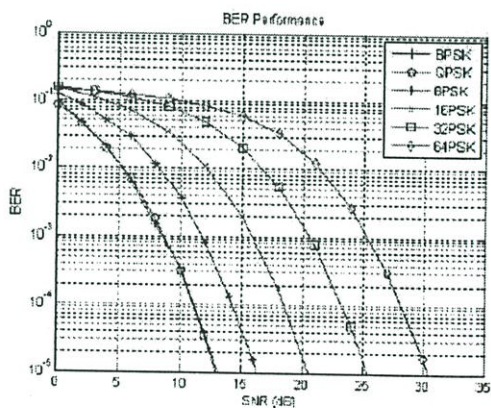


Fig.5: BER performance of MPSK modulation on joint scintillation and Rician fading channels for $M = 2, 4, 8, 16, 32$ and 64 , $S_4 = 0.3$, $K = 15$ dB.

5. CONCLUSIONS

In this paper, we have simulated the performance of MPSK modulation in satellite mobile channel which is a combined scintillation and flat multipath fading channel. Scintillation is typical in tropical region such as in Thailand and in polar region. Both scintillation and flat multipath fading can be statistically modeled, however, each is generated differently due to the spectrum requirement. The performance of MPSK communication system degrades as the scintillation intensity increases, and flattens out due to the capacity of fading channel in general. With combined fading channel, the bit error rate exhibits additional loss.

For future work, we plan introduce error correction code techniques and study the combined channel of frequency-selective scintillation and multipath channel. In addition, multiuser communication can be applied to satellite mobile communication system.

6. REFERENCES

- [1] P.A. Kullstam and M.J. Keskinen, "Ionospheric Scintillation"Effects on UHF Satellite Communications," *MILCOM 2000 Proceedings*, Vol.2, pp.779-783, Oct.2000.
- [2] Gordon L.Stuber "*Principles of Mobile Communication*" Second Edition, Kluwer Academic Publishers 2001.
- [3] M.K. Simon and M.S. Alouini, "*Digital Communication over fading channels*," Hoboken, NJ: John Wiley, 2nd ed., 2005.
- [4] Z. Ye and E.H. Satorius, "Channel Modeling and Simulation for Mobile User Objective System (MUOS)-Part I: Flat Scintillation and Fading", *ICC 2003 - IEEE International Conference on Communications*, Vol. 26, No.1, May 2003 pp. 3503-3510.
- [5] W. Wongtrairat, P. Supniti, N. Hammakorn and N. Leelaruij, "Performance of MPSK in Combined Ionospheric Scintillation and Small-Scale Fading Channels," *ISIT 2006*, July 2006, Submitted.
- [6] B. Sklar "*Digital Communications Fundamental and Applications*", Prentice-Hall, 2nd ed., 2001.
- [7] P. Shaft, "On the Relationship Between Scintillation Index and Rician Fading," *IEEE Trans. Comm.*, pp. 731-732, May 1974.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นาย นพดล บุญส่งกุศลจิต
เกิดเมื่อวันที่ 29 พฤศจิกายน พ.ศ.2523 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

- ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากคณะวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2546
- เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548

ประวัติการทำงาน

- ตำแหน่งวิศวกรซ่อมบำรุง (Maintenance Engineer)
บริษัท ฟาบริเนท จำกัด ในปี 2547-2548
- ตำแหน่งวิศวกรวิเคราะห์ความผิดพลาด (Failure Analysis Engineer)
บริษัท เวสเทิร์นดิิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ในปี 2550