

แบบจำลองของปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นในสัญญาณดาวเทียม

On Simulate of Scintillation Phenomena in Earth Satellite Link



โดย  
นายสันติ สุรินก้อน  
นายสาคร จิรรัตนโชติ

เลขหน้.....  
เลขทะเบียน..... 42239  
วัน, เดือน, ปี 15 พ.ค. 2545

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาคเทคนิคอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## แบบจำลองปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นในสัญญาณดาวเทียม

โดย นายสันติ สุรินก้อน  
นายสาคร จิรรัตนโชติ

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.อรลภ แสงอรุณ  
รศ.ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช

ปีการศึกษา 2543

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบจำลองปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นในสัญญาณดาวเทียม ซึ่งได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีของเกาส์เซียนและสื่อคนอลมอล

การวิเคราะห์จะทำการรวบรวมสัญญาณจากดาวเทียมไทยคม 2 ในย่านความถี่ C-Band และ Ku-Band โดยเก็บรวบรวมจากเครื่อง OR-100 จากนั้นจึงทำการแยกเอาเฉพาะสัญญาณในช่วงที่มีการเกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นมาวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลอง

จากผลการจำลองที่ได้ ให้ผลที่ดีในย่านความถี่ที่ศึกษาซึ่งผลการทดลองทั้งหมดได้แสดงไว้แล้วในปริญญานิพนธ์

**ON SIMULATE OF SCINTILLATION PHENOMENA  
IN EARTH SATELLITE LINK**

**BY** MR.SANTI SURINKON  
MR.SAKORN JIRARATANACHOTE

**ADVISER** ASST.PROF ORNALRP SANGARON  
ASSOC.PROF DR.KANOK JANJIRAPONGWACH

**YEAR** 2000

**ABSTRACT**

In this project, On Simulate of Scintillation Phenomena in Earth Satellite Link have been presented. It has been studied and analysis with base on Gaussian distribution and Log normal distribution theories. The method of analysis have been corrected signal form OR-100 instrument of Thaicom 2 cover frequency range in C-band and Ku-band and then separated especially scintillation signal to analysis. From the results of simulation has been good along cover frequency range that the results have been presented in this project.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เป็นผลมาจากการร่วมมือกันอย่างดีของสมาชิก  
ภายในกลุ่ม ที่ได้ช่วยเหลือซึ่งกันและกันตลอดระยะเวลาที่ทำโครงการ

ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาผู้ให้โอกาส สนับสนุน และคอยให้กำลังใจตลอดเวลา  
ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษาและเสียสละเวลาอันมีค่ามาโดยดีตลอด  
ท้ายสุด ขอขอบคุณสถาบันแห่งนี้ที่เป็นแหล่งให้ความรู้ ความเข้าใจต่างๆ

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง .....	จ
สารบัญภาพ .....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการทำปริญญานิพนธ์ .....	1
1.3 สมมติฐานในการทำปริญญานิพนธ์ .....	2
1.4 ขอบเขตของการทำปริญญานิพนธ์ .....	2
1.5 ขั้นตอนในการทำปริญญานิพนธ์ .....	2
1.6 โครงประกอบของปริญญานิพนธ์ .....	3
บทที่ 2 สถาปัตยกรรมของการสื่อสารผ่านดาวเทียม .....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 ชนิดของดาวเทียม .....	4
2.2.1 ดาวเทียมแบบขถากรรม (RANDOM SATELLITE) .....	4
2.2.2 PHASE SATELLITE .....	4
2.2.3 ดาวเทียมค้างฟ้า (GEOSTATIONARY SATELLITE) .....	4
2.3 ย่านความถี่ในการสื่อสารผ่านดาวเทียม .....	5
2.3.1 ย่าน C – BAND.....	6
2.3.2 ย่าน Ku – BAND .....	7
2.4 ส่วนประกอบของระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม .....	7
2.4.1 ทรานสปอนเดอร์ (TRANSPONDER) .....	7
2.4.2 ชนิดขั้วคลื่นสัญญาณจากดาวเทียม .....	8
2.4.3 FOOTPRINTS.....	8
2.4.4 จานดาวเทียม (SATELLITE DISH ANTENNA).....	8
2.5 ระบบดาวเทียมพื้นฐาน .....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.6 สรุป .....	11
บทที่ 3 ทฤษฎีการมอดคูเลทและคีมอดคูเลท .....	12
3.1 กล่าวนำ .....	12
3.2 การมอดคูเลทสัญญาณดิจิทัล .....	12
3.2.1 การมอดคูเลทและการคีมอดคูเลทแบบ โคฮีเรนท์ BPSK .....	13
3.2.2 การมอดคูเลทและการคีมอดคูเลทแบบ โคฮีเรนท์ QPSK .....	15
3.3 สรุป .....	18
บทที่ 4 แบบจำลองปรากฏการณ์ซินทิเลชัน (scintillation Signal) ในระบบสื่อสารผ่านคาเทียม...19	
4.1 กล่าวนำ .....	19
4.2 ทฤษฎีการสื่อสารเชิงสถิติ .....	19
4.2.1 การกระจายตัวของความน่าจะเป็น และความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ของ ตัวแปรสุ่ม .....	19
4.2.2 ความสัมพันธ์ร่วมของตัวแปรสุ่ม .....	20
4.2.3 การทรานส์ฟอร์มของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น .....	22
4.3 ค่าเฉลี่ยเชิงสถิติ .....	23
4.3.1 ค่าเฉลี่ยตัวแปรแรนดัม .....	23
4.3.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและแวนเรียน .....	24
4.3.3 ค่าเฉลี่ยกรณีมีหลายตัวแปร .....	26
4.4 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของสัญญาณรบกวนแบบ AWGN .....	27
4.4 LOG – NORMAL DISTRIBUTION.....	29
4.5 สรุป .....	30
บทที่ 5 สัญญาณแรนดัมและสัญญาณรบกวน.....	31
5.1 กระบวนการแรนดัม (Random process or stochastic process) .....	31
5.1.1 ความหมายของการกระบวนการแรนดัม .....	31
5.1.2 การคิดพหุคูณของกระบวนการแรนดัม .....	32
5.2 ค่าเฉลี่ยเอนเซมเบิลและคอรีเลชัน .....	33
5.3 คุณสมบัติเฉพาะบางประการของเอนเซมเบิลของสัญญาณแรนดัม .....	36
5.4 สรุป .....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 6 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการสื่อสารข้อมูลผ่านดาวเทียม.....	40
6.1 กล่าวนำ .....	40
6.2 ผลตอบสนองของคีมอดูเลเตอร์แบบคอรีเลชัน.....	40
6.3 การประเมินอัตราส่วนการเกิดบิตผิดพลาดในการมอดูเลทแบบโคฮีเรนท์ BPSK .....	44
6.3.1 อัตราการเกิดบิตผิดพลาดจากการตัดสินใจในระบบของการมอดูเลท แบบ BPSK .....	44
6.4 การประเมินอัตราส่วนการเกิดบิตผิดพลาดในการมอดูเลทแบบโคฮีเรนท์ QPSK .....	46
6.4.1 อัตราการเกิดบิตผิดพลาดจากสัญญาณรบกวน AWGN .....	46
6.5 สรุป .....	49
บทที่ 7 การทดลองและผลการทดลอง .....	50
7.1 กล่าวนำ .....	50
7.2 การเก็บและการบันทึกรวบรวมสัญญาณดาวเทียม .....	50
7.2.1 การเก็บรวบรวมสัญญาณดาวเทียม .....	50
7.3 ลักษณะของสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างกะทันหัน (Scintillation) ...	51
7.4 วิธีการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ซินทิเลชันในสัญญาณดาวเทียม .....	54
7.5 วิธีการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ซินทิเลชันในสัญญาณดาวเทียมโดยใช้ทฤษฎีการกระจาย แบบเกาส์เซียน .....	55
7.6 วิธีการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ซินทิเลชันในสัญญาณดาวเทียมโดยใช้ทฤษฎีการกระจาย แบบลือคนอลมอล .....	58
7.7 วิธีการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ซินทิเลชันในสัญญาณดาวเทียม C – Band และ Ku – Band .....	60
7.8 สรุป .....	63
บทที่ 8 บทสรุป .....	64
8.1 วิธีการทดลอง .....	64
8.2 ข้อสังเกตปัญหาที่พบในการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
เอกสารอ้างอิง .....	66
ภาคผนวก .....	67
โปรแกรม MATLAB สำหรับพล็อตสัญญาณ .....	68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 2.1	แสดงการจัดสรรความถี่วิทยุที่ใช้งานในย่านต่าง ๆ ในระบบดาวเทียม	5
ตารางที่ 2.2	เปรียบเทียบอัตราขยายของงานสายอากาศความถี่ย่าน C-BAND และความถี่ย่าน Ku-BAND	6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

เรื่อง		หน้า
ภาพที่ 2.1 ก	แสดง Communication payload แบบ transparent (non regenerative)	7
ภาพที่ 2.1 ข	แสดง Communication payload แบบ regenerative หรือ processing	8
ภาพที่ 2.2	แสดงลักษณะการสื่อสารผ่านดาวเทียม	10
ภาพที่ 2.3	แสดงโครงสร้างของสถานีภาคพื้นดิน	10
ภาพที่ 3.1	บล็อกไดอะแกรมการมอดูเลตและดีมอดูเลตสัญญาณ BPSK	13
ภาพที่ 3.2	คอนสเทลเลชันไดอะแกรมของสัญญาณที่มอดูเลตในแบบ BPSK	14
ภาพที่ 3.3	บล็อกไดอะแกรมการมอดูเลตแบบ QPSK	15
ภาพที่ 3.4	บล็อกไดอะแกรมการดีมอดูเลตสัญญาณแบบ QPSK	16
ภาพที่ 3.5	คอนสเทลเลชันไดอะแกรมของสัญญาณที่ถูกมอดูเลตในแบบ QPSK	17
ภาพที่ 4.1	พروبอบิลิตีเดนซิตีฟังก์ชันของตัวแปรแรนดัมที่มีความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ไม่เท่ากัน	25
ภาพที่ 4.2	ฟังก์ชันความหนาแน่นการกระจายแบบเกาส์เซียน	28
ภาพที่ 4.3	ฟังก์ชันการกระจายแบบเกาส์เซียน	29
ภาพที่ 5.1	เช็ทของสัญญาณแรนดัมที่ประกอบกันเป็นเอ็นเซมเบิล	32
ภาพที่ 5.2	ภาพแสดงการคิดค่าเฉลี่ยเชิงเวลาของสัญญาณแรนดัมอันหนึ่งในเอ็นเซมเบิล	36
ภาพที่ 6.1	บล็อกไดอะแกรมแสดงแบบจำลองการมอดูเลตและดีมอดูเลตในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนรวมเข้ามากับสัญญาณมอดูเลต	40
ภาพที่ 6.2	การกระจายตัวความน่าจะเป็นของฟังก์ชันแบบ ไคส์กีสของสัญญาณ	45
ภาพที่ 6.3	คอนสเทลเลชันไดอะแกรมของสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแบบ QPSK	47
ภาพที่ 6.4	แสดงการเปรียบเทียบของความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดของ BPSK และ QPSK	49
ภาพที่ 7.1	แสดงวิธีการเก็บรวบรวมสัญญาณดาวเทียม	50
ภาพที่ 7.2	แสดงสัญญาณที่บันทึกได้จากเครื่อง OR 100	51
ภาพที่ 7.3 ก	ลักษณะของระดับสัญญาณปกติที่รวบรวมได้	51
ภาพที่ 7.3 ข	ลักษณะของสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างกะทันหัน	52
ภาพที่ 7.3 ค	ลักษณะของสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงกะทันหัน	52
ภาพที่ 7.4 ก	แสดง Power Spectral Density ขณะท้องฟ้าแจ่มใส	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
ภาพที่ 7.4 ข แสดง Power Spectral Density ขณะฝนตก	53
ภาพที่ 7.5 แสดงการบันทึกสัญญาณดาวเทียมโดยใช้โปรแกรม ไมโครซอฟท์เอ็กซ์เซล	53
ภาพที่ 7.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (Voltage) ให้เป็นเดซิเบล	54
ภาพที่ 7.7 การหาค่า Standard Deviation โดยใช้ไมโครซอฟท์เอ็กซ์เซล	55
ภาพที่ 7.8 รูปแบบกราฟมาตรฐานของการกระจายแบบเกาส์เซียน	56
ภาพที่ 7.9 สัญญาณดาวเทียม C-BAND พล็อตด้วยการกระจายแบบเกาส์เซียน	56
ภาพที่ 7.10 สัญญาณดาวเทียม Ku-BAND พล็อตด้วยการกระจายแบบเกาส์เซียน	57
ภาพที่ 7.11 แสดงการกระจายแบบลอคนอลมอด	58
ภาพที่ 7.12 สัญญาณดาวเทียม C-BAND พล็อตด้วยการกระจายแบบลอคนอลมอด	59
ภาพที่ 7.13 สัญญาณดาวเทียม Ku-BAND พล็อตด้วยการกระจายแบบลอคนอลมอด	60
ภาพที่ 7.14 ก กราฟแสดงปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นในสัญญาณ C-BAND และ Ku-BAND	61
ภาพที่ 7.14 ข กราฟแสดงปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นในสัญญาณ C-BAND และ Ku-BAND	61
ภาพที่ 7.15 ก กราฟ 3 มิติแสดงปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นในสัญญาณ C-BAND และ Ku-BAND	62
ภาพที่ 7.15 ข กราฟ 3 มิติแสดงปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นในสัญญาณ C-BAND และ Ku-BAND	62

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการสื่อสารข้อมูลมีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก ไม่จำกัดเฉพาะหน่วยราชการและเอกชนเท่านั้น แต่ได้ขยายตัวเข้าสู่ประชาชนทุกระดับชั้นจะเห็นได้ว่าปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ กันอย่างมากและมีราคาที่ถูกลงเมื่อเทียบกับสมัยก่อน ซึ่งทำให้การสื่อสารสมัยนี้เป็น "ยุคไร้พรมแดน" สามารถติดต่อได้ง่ายขึ้นและสะดวกมากยิ่งขึ้น ซึ่งทำให้ความเป็นอยู่เปลี่ยนแปลงไปเป็นอันมาก กิจกรรมการสื่อสารเหล่านี้ได้เข้ามามีบทบาทต่อชีวิตประจำวันของเรา เช่น ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมที่งานรับส่งขนาดเล็ก (VSAT : Very Small Aperture Terminal) การใช้บริการโทรศัพท์มือถือผ่านดาวเทียม การถ่ายทอดสัญญาณโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม การประชุมสัมมนาผ่านทางโทรทัศน์ (Video conference) หรือวีดีโอออนดีมานด์ (Video-on-demand) เป็นต้น เทคโนโลยีการสื่อสารผ่านดาวเทียมก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีการพัฒนาเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่อง จึงเป็นการย่อโลกให้เล็กลง ทุกคนจึงมีโอกาสรับรู้ข่าวสารพอกๆ กัน

แต่ถึงอย่างไรการสื่อสารผ่านดาวเทียมก็ยังเป็นระบบที่มีสัญญาณรบกวนเข้ามาแทรกสอดได้เช่นเดียวกันเหมือนระบบอื่น ๆ เช่นสัญญาณรบกวนจากความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Noise temperature) สัญญาณรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม การลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนตก การลดทอนในชั้นบรรยากาศต่าง ๆ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อข้อมูลที่ทำการสื่อสารในขณะนั้น อันจะส่งผลกระทบต่อข้อมูลอันพึงที่จะได้รับ ซึ่งสิ่งเหล่านี้มีความจำเป็นที่ต้องทำการศึกษาวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของสัญญาณและรวบรวมข้อมูลทางสถิติ เพื่อหาแนวทางในการป้องกันและหลีกเลี่ยงจากปัญหาที่เกิดขึ้นดังที่กล่าวมาข้างต้น

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการทำปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแนวทางในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสัญญาณ ในการสื่อสารข้อมูลผ่านดาวเทียม ในย่าน C-BAND และในย่าน Ku-BAND จากดาวเทียมไทยคม 2 เพื่อให้เข้าใจถึงผลกระทบจากสัญญาณรบกวนซินทิลเลชัน (Scintillation) ที่เกิดจริง ในย่านความถี่ในการสื่อสารผ่านดาวเทียม จากปรากฏการณ์ธรรมชาติ ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของสัญญาณการสื่อสารผ่านดาวเทียม ในช่วงเวลาต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ค่าสัญญาณในย่านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางวิชาการไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ในการสื่อสาร จะตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ให้ย่านสัญญาณการสื่อสารประกอบไปด้วยสัญญาณรบกวนแบบแอดดิทีฟไวท์เกาส์เซียน (Additive White Gaussian Noise : AWGN) ซึ่งมีการกระจายตัวของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function : PDF)

### 1.3 สมมติฐานในการทำปริญญานิพนธ์

สมมติฐานในการทำปริญญานิพนธ์ตั้งอยู่บนความเป็นจริงในการใช้งานระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม ซึ่งในสภาพที่มีการสื่อสารอาจมีสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณที่ไม่ต้องการจากภายในและภายนอกเข้ามาแทรกสอดในระบบได้ โดยที่สามารถแบ่งแยกสัญญาณรบกวนได้จากแหล่งกำเนิดใหญ่ ๆ คือ

1. แหล่งกำเนิดจากภายในระบบ เช่น สัญญาณรบกวนเชิงความร้อน
2. แหล่งกำเนิดจากภายนอกระบบ เช่น เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมและการรบกวนจากดาวเทียมข้างเคียง

ในการทำปริญญานิพนธ์นี้ได้นำรูปแบบการกระจายตัวสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน มาใช้อธิบายถึงคุณลักษณะของสัญญาณรบกวนในย่าน C-BAND และย่าน Ku-BAND ในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม

### 1.4 ขอบเขตของการทำปริญญานิพนธ์

การปริญญานิพนธ์นี้จะกำหนดให้การมอดูเลทวิธีแบบ BPSK และ QPSK โดยใช้ทฤษฎีการกระจายแบบเกาส์เซียน (Gaussian Distribution) และการกระจายแบบลอจโนรมอล (Log-normal distribution) ในการศึกษาและวิเคราะห์รูปแบบของสัญญาณดาวเทียมที่รวบรวมไว้จริงในย่าน C-band และ Ku-band ของดาวเทียมไทยคม 2 ในช่วงเวลาต่าง ๆ กันของแต่ละวัน และแนวโน้มของความน่าจะเป็นของการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน (Scintillation) ของสัญญาณดาวเทียมและนำมาเพื่อที่จะใช้ในการออกแบบสร้างโมเดล (Model) ในอนาคต

### 1.5 ขั้นตอนในการทำปริญญานิพนธ์

ทำการเก็บรวบรวมสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจริงในย่านความถี่ C-BAND และย่านความถี่ Ku-BAND ของดาวเทียมไทยคม 2 โดยสัญญาณที่รวบรวมจะถูกเก็บบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์ค่าที่ได้จะมีหน่วยเป็นแรงดัน (Voltage) ซึ่งยากต่อการวิเคราะห์สัญญาณรบกวน จากนั้นทำการแปลงหน่วยแปลงค่าที่ได้มาเป็นหน่วยเดซิเบล (dB) ซึ่งจะง่ายต่อการวิเคราะห์สัญญาณรบกวน สัญญาณจะถูกนำมาวิเคราะห์โดยโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม STATISTICA

## 1.6 โครงประกอบของปริญญาโท

ปริญญาโทฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 8 บท โดย

- บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ สมมุติฐาน ขอบเขต ขั้นตอนในการทำปริญญาโท และส่วนประกอบทั้งหมดของปริญญาโท
- บทที่ 2 กล่าวถึงสถาปัตยกรรมของการสื่อสารผ่านดาวเทียม
- บทที่ 3 ทฤษฎีมอดูเลทและดีมอดูเลท
- บทที่ 4 แบบจำลองของสัญญาณซินทิเลชั่น (Scintillation Signal) ในระบบสื่อสารดาวเทียมในย่าน C - BAND และ Ku - BAND
- บทที่ 5 สัญญาณเรดัมและสัญญาณรบกวน
- บทที่ 6 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการสื่อสารข้อมูลผ่านดาวเทียม
- บทที่ 7 การทดลองและผลการทดลอง
- บทที่ 8 บทสรุป

## บทที่ 2

# สถาปัตยกรรมของการสื่อสารผ่านดาวเทียม

### 2.1 กล่าวนำ

การสื่อสารในระบบไมโครเวฟภาคพื้นดิน การสื่อสารผ่านทางสายเคเบิลก็ดี จะมีข้อจำกัดในเรื่องของระยะทางการรับ-ส่ง ที่ไม่คุ้มทุนต่อการติดตั้งและสิ่งกีดขวางจากสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งการสื่อสารผ่านดาวเทียมได้เข้ามาลดข้อจำกัดเหล่านั้น

จากแนวความคิดของ อาเธอร์ ซี.คลาร์ก (ARTHER C.CLARKE) ในปี ค.ศ. 1945 ที่ว่าถ้าสามารถนำเอาจานไมโครเวฟและอุปกรณ์ทวนสัญญาณขึ้นไปลอยอยู่บนอากาศได้ ก็สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ลงได้มาก ด้วยเหตุนี้เองจึงเป็นจุดเริ่มต้นในการส่งดาวเทียมขึ้นไปลอยอยู่บนท้องฟ้า ภายในบรรจุด้วยอุปกรณ์ถ่ายทอดสัญญาณ ภายนอกติดตั้งจานรับส่งสัญญาณ หันมายังพื้นผิวโลกโดยครอบคลุมพื้นที่ได้กว้าง

### 2.2 ชนิดของดาวเทียม

ดาวเทียมมีอยู่ 3 ชนิดแบ่งได้ตามลักษณะแนวโคจรของตัวดาวเทียมคือ

#### 2.2.1 ดาวเทียมโคจรแบบขยากรรม (RANDOM SATELLITE)

เป็นดาวเทียมที่โคจรแบบขยากรรม เป็นดาวเทียมรุ่นแรก ๆ ที่มนุษย์ส่งขึ้นไปโคจรเหนือผิวโลก เป็นดาวเทียมที่แต่ละดวงมีวงโคจรแตกต่างจากดวงอื่น ๆ ระดับความสูงก็มีความแตกต่างกัน เป็นดาวเทียมที่ไม่สามารถบังคับวงโคจรและความสูงได้

#### 2.2.2 PHASE SATELLITE

เป็นที่ที่ซึ่งใช้ดาวเทียมโคจรผ่านในแต่ละตำแหน่งของโลก เช่น โคจรผ่านแนวเส้นศูนย์สูตร โคจรเอียงเป็นมุม 30 องศา กับเส้นศูนย์สูตร โคจรผ่านขั้วโลก เป็นต้น ดาวเทียมแบบนี้สามารถบังคับวงโคจรได้ นิยมใช้ดาวเทียมแบบนี้ในการตรวจสอบสภาพภูมิอากาศ ภูมิประเทศ แหล่งทรัพยากรธรณี หรืองานจารกรรมทางทหาร

#### 2.2.3 ดาวเทียมค้างฟ้า (GEOSTATIONARY SATELLITE)

เป็นดาวเทียมที่นิ่งอยู่กับที่เมื่อเทียบกับโลก มีวงโคจรเป็นรูปวงกลมอยู่ในระนาบเดียวกับเส้นศูนย์สูตร (EQUATOR) ไปในทางทิศตะวันออก อยู่สูงจากพื้นผิวโลกประมาณ 35,876 กิโลเมตร วงโคจรนี้เรียกว่า GEOSYNCHRONOUS ORBIT หรือ CLARKE ORBIT ก็ได้ โดยกำหนดได้ว่าเป็นวงโคจรในระนาบเส้นศูนย์สูตร ที่มีความสูงเป็นระยะที่ทำให้ดาวเทียมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับการหมุนรอบตัวเองของโลกในทิศทางเดียวกัน ก็คือเมื่อโลกหมุนรอบตัวเอง 1 รอบในเวลา 24 ชั่วโมง ดาวเทียมก็โคจรรอบโลกพอดีเช่นกัน แล้วทำให้เกิดแรง

เหรียญศูนย์กลาง มีค่าเท่ากับแรงดึงดูดของโลกพอดี เป็นผลทำให้เสมือนกับว่าดาวเทียมนั้นลอยอยู่ในตำแหน่งเดิมตลอดเวลาเมื่อมองดูจากโลก

ดาวเทียมค้างฟ้า (GEOSTATIONARY SATELLITE) ส่วนใหญ่ใช้สำหรับเพื่อการสื่อสาร (COMMUNICATION SATELLITE : CS) เช่น การสื่อสารโทรศัพท์ผ่านดาวเทียม เพื่อการส่งวิทยุกระจายเสียง หรือที่เรียกว่า ดาวเทียมกระจายเสียง (BROADCASTING SATELLITE : BS หรือ DBS) มีจุดประสงค์เพื่อส่งสัญญาณวิทยุหรือโทรทัศน์ ไปยังผู้ชมบนภาคพื้นดินโดยตรง

### 2.3 ย่านความถี่ในการสื่อสารสัญญาณผ่านดาวเทียม

ระบบดาวเทียมเป็นระบบที่ใช้คลื่นวิทยุในการส่งและรับสัญญาณการติดต่อสื่อสาร ดังนั้นการรบกวนของสัญญาณที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารจะเกิดขึ้นง่ายและเยอะมากหากคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้บริการเหมือนกัน ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการจัดสรรคลื่นความถี่วิทยุเพื่อให้ระบบการสื่อสารมีคุณภาพและประสิทธิภาพในการใช้งานมากที่สุด โดยข้อตกลงระหว่างประเทศ (I.T.U)

ย่านความถี่วิทยุที่ใช้ในการสื่อสารผ่านดาวเทียม สำหรับส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง วิทยุโทรทัศน์ ข้อมูลการสำรวจ และอื่น ๆ มาให้สถานีภาคพื้นดิน ดังนี้

ชื่อแถบความถี่	ความถี่ (GHz)
UHF	0.3 - 1.0
L	1.0 - 2.0
S	2.0 - 4.0
C	4.0 - 8.0
X	8.0 - 12.0
Ku	12.0 - 18.0
K	18.0 - 27.0
Ka	27.0 - 40.0
V	40.0 - 75.0
W	75.0 - 110.0
mm	110.0 - 300.0

ตารางที่ 2.1 แสดงการจัดสรรความถี่วิทยุที่ใช้งานในย่านต่างๆ ในระบบสื่อสารดาวเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในระบบย่านการสื่อสารข้อมูลผ่านดาวเทียมที่เป็นนิยมนำใช้กันมากในปัจจุบัน จะอยู่ในย่าน C-BAND และ Ku-BAND เป็นส่วนใหญ่

### 2.3.1 ย่าน C-BAND

ความถี่สำหรับทางด้าน Up-link อยู่ที่ประมาณ 5.72 – 7.045 GHz เฉลี่ยแล้วประมาณ 6 GHz ส่วนทางด้าน Down-link อยู่ที่ประมาณ 3.4 – 4.8 GHz เฉลี่ยแล้วประมาณ 4 GHz ความถี่ในย่านนี้จะมีสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ได้กว้าง (FOOT PRINT) สามารถส่งสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ได้หลายประเทศ จึงเหมาะสมที่ใช้ในประเทศใหญ่ๆ แต่ก็เกิดข้อเสียคือ ความเข้มของสัญญาณจะต่ำลง การรับสัญญาณต้องใช้ขนาดของจานค่อนข้างจะใหญ่ ประมาณ 4 – 12 ฟุต สัญญาณจึงจะมีความชัดเจน

### 2.3.2 ย่าน Ku-BAND

ความถี่ที่ใช้สำหรับทางด้าน Up-link ประมาณ 12.75 – 14.80 GHz เฉลี่ยแล้วประมาณ 13 GHz และความถี่ทางด้าน Down-link มีค่าประมาณ 10.70 – 12.30 GHz เฉลี่ยแล้วประมาณ 11 GHz ความถี่ในย่านนี้จะมีสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ได้น้อยกว่าย่าน C-BAND จึงเหมาะสมกับการส่งสัญญาณเฉพาะภายในประเทศ แต่จะมีความเข้มของสัญญาณที่สูงกว่า แบบ C-BAND จานที่ใช้จึงมีขนาดเล็กกว่า ประมาณ 40 – 80 เซนติเมตร ก็สามารถรับสัญญาณได้ดี

Size	Size	C-BAND (Efficiency)		Ku-BAND (Efficiency)	
		In ft.	In ft.	55%	70%
1	0.30	19.4	20.5	29.0	30.1
2	0.61	25.4	26.5	35.1	36.1
3	0.91	29.0	30.0	38.6	39.6
4	1.22	31.5	32.5	40.7	42.1
5	1.52	33.4	34.4	43.0	44.1
7	2.13	35.0	36.0	44.6	45.6
8	2.48	37.5	38.5	47.1	48.1
9	2.74	38.5	39.5	48.1	49.2
10	3.05	39.4	40.5	49.0	50.1
11	3.35	40.2	41.3	49.9	50.9
12	3.65	41.0	42.0	50.6	51.7
13	3.96	41.7	42.7	51.3	52.4

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบอัตราขยายของจานสายอากาศความถี่ย่าน C-BAND และ Ku-BAND

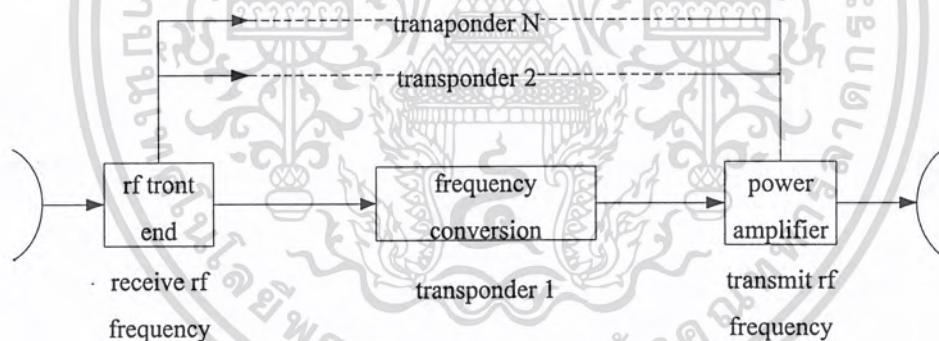
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ส่วนประกอบของระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม

ส่วนประกอบของระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ มากมาย ที่จำเป็น แต่ใน หัวข้อนี้จะกล่าวถึง ส่วนสำคัญๆ ของระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนสำคัญๆ ดังนี้

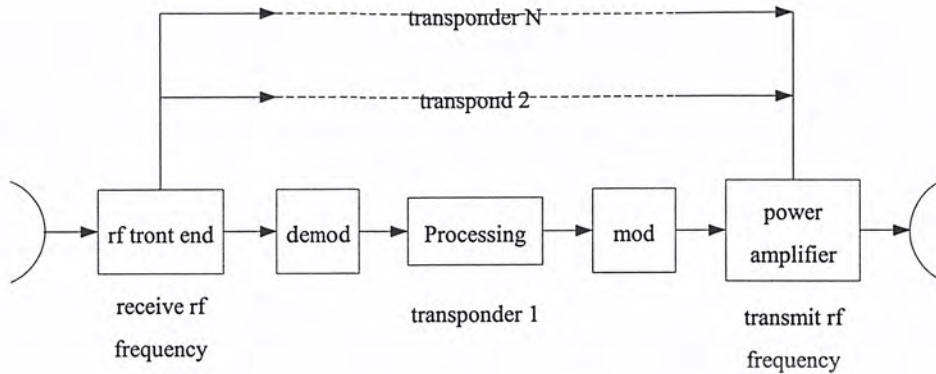
### 2.4.1 ทรานสปอนเดอร์ (TRANSPONDER)

ทรานสปอนเดอร์ คือ ชุดอุปกรณ์รับและส่งบนดาวเทียม ในดาวเทียมแต่ละดวงจะมีจำนวนทรานสปอนเดอร์หลายชุด แต่ละชุดจะมีย่านความถี่ต่างๆ กันไป จะมีความกว้างประมาณ 40 MHz โดยหนึ่งทรานสปอนเดอร์สามารถรับ - ส่งคลื่นขั้วสัญญาณ (POLARIZATION) ได้ 2 แบบ คือแบบแนวนอน (HORIZONTAL) และแบบแนวตั้ง (VERTICAL) เพื่อที่สามารถช่วยลดจำนวนช่องสัญญาณที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งาน หน้าที่ของทรานสปอนเดอร์จะทำการรับสัญญาณที่ส่งขึ้นมาจากโลก เปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณขาขึ้นให้ต่ำลงให้อยู่ในย่าน Down - link ขยายสัญญาณให้มีความแรงของสัญญาณสูงขึ้นและส่งสัญญาณกลับมาสถานีรับสัญญาณภาคพื้นดิน โดยผ่านงานสายอากาศแบบต่างๆ ตามจุดประสงค์ เช่น Globe Beam, Zone Beam, และ Spot Beam



รูป 2.1 (ก) แสดง Communication payload แบบ transparent (non regenerative)

ในรูป 2.1 (ก) แสดง payload ชนิด transparent ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องขยายสัญญาณ r.f. (r.f. amplification) และส่วนการแปลงความถี่ในอนาคต payload จะเป็นแบบ regenerative หรือ processing ซึ่งสามารถสร้าง หรือประมวลผลสัญญาณให้กลับมาเหมือนเดิมมากที่สุด และทำการมอดดูเลท (Modulate) และดีมอดดูเลท (Demodulate) สัญญาณเป็นสัญญาณเบสแบนด์ ดังแสดงดังรูป 2.1 (ข)



รูป 2.1 (ข) แสดง Communication Payload แบบมี regenerative หรือ processing

#### 2.4.2 ชนิดขั้วคลื่นสัญญาณจากดาวเทียม ที่ใช้กันจะมีอยู่ 2 แบบคือ

1. LINEAR POLARIZATION แบ่งออกเป็นแบบแนวแกนตั้ง (VERTICAL POLARIZATION) และแนวแกนนอน (HORIZONTAL POLARIZATION) เรียกโดยรวมว่า LINEAR POLARIZATION การรับสัญญาณรายการที่เป็น VERTICAL มุมโพลาไรซ์ของพีคฮอร์นต้องอยู่ในแนวตั้ง ส่วนรายการที่เป็น HORIZONTAL มุมโพลาไรซ์ของพีคฮอร์นต้องอยู่ในแนวนอน

2. CIRCULAR POLARIZATION คือการหมุนโพลาไรซ์แบบหมุน สัญญาณจะเคลื่อนที่แบบ HELICALLY ROTATING PATTERN การรับสัญญาณชนิดนี้จะต้องใช้พีคฮอร์นที่เป็น CIRCULAR ถ้าหากนำพีคฮอร์นแบบลิเนียร์มารับจะสามารถรับสัญญาณได้เพียงครั้งเดียว

#### 2.4.3 FOOTPRINTS

ฟุตพริ้นท์เป็นลักษณะของสัญญาณที่ส่งลงมาครอบคลุมพื้นโลก ดาวเทียมแต่ละดวงจะมีฟุตพริ้นท์ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับย่านความถี่ของดาวเทียมดวงนั้น ๆ โดยที่สัญญาณที่ส่งจะมีเข้มมากที่สุดตรงจุดศูนย์กลาง และจะค่อย ๆ จางลงไปเมื่อออกห่างจากจุดศูนย์กลาง

การส่งสัญญาณในย่าน C - BAND จะสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้กว้าง สามารถส่งสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ได้ถึงประมาณ 40 ประเทศ แต่มีความเข้มของสัญญาณต่ำจึงต้องใช้ขนาดจานดาวเทียมที่มีขนาดใหญ่ ประมาณ 6 ฟุตขึ้นไป ส่วนการส่งในย่าน Ku - BAND จะครอบคลุมพื้นที่ได้จำนวนจำกัด แต่ความเข้มของสัญญาณสูงจึงสามารถใช้จานขนาดเล็กได้ ประมาณ 3 ฟุตก็สามารถรับได้

#### 2.4.4 จานดาวเทียม (SATELLITE DISH ANTENNA)

ทำหน้าที่รับสัญญาณที่ส่งมาจากดาวเทียม โดยใช้หลักการสะท้อนที่พื้นผิวรูปโค้งพาราโบลิกแล้วรวมมาไว้ที่จุดรวมสัญญาณ (FOCAL POINT) วัสดุที่เหมาะสมในการผลิตจานนั้นคือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะลูมิเนียม เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและไม่ขึ้นสนิม สำหรับจานดาวเทียมในปัจจุบันนั้นเราสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ ตามลักษณะของจาน ดังนี้

1. จานทึบ (SOLID ALUMINIUM DISH) ทำจากแผ่นอะลูมิเนียมเรียบ ข้อดีคือสามารถรักษารูปทรงได้ดี ข้อเสียคือ จานจะบดบังทัศนียภาพ ด้านลม และน้ำอาจขังได้
2. จานกึ่งทึบ (PERFORATED ALUMINIUM DISH) คือจานทึบที่เจาะรูขนาดเล็กเพื่อลดผลกระทบจากการด้านลม
3. จานตะแกรง (EXPANDED ALUMINIUM MESH DISH) เป็นจานที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เพราะช่วยลดการด้านลมและน้ำขัง
4. จานไฟเบอร์กลาส (FIBERGLASS DISH) เป็นจานพลาสติกที่มีการฝังตะแกรงโลหะไว้ภายใน เพื่อช่วยในการสะท้อนสัญญาณ

อัตราขยายของจาน (ANTENNA GAIN) ตัวแปรที่ใช้วัดคุณสมบัติของจานดาวเทียมก็คือ อัตราขยาย (GAIN) โดยมีหน่วยวัดเป็นเดซิเบล (dB) และยังมีตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่เข้ามาเกี่ยวข้องคือ ประสิทธิภาพ (EFFICIENCY) ของจาน ซึ่งจะบ่งบอกถึงความสามารถของจานว่าสามารถรวบรวมสัญญาณที่สะท้อนขึ้นมาได้มากน้อยเท่าไร

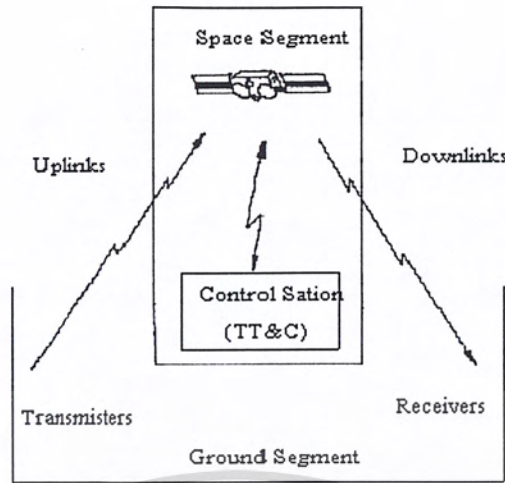
## 2.5 ระบบดาวเทียมพื้นฐาน

ระบบดาวเทียมเบื้องต้นประกอบด้วยส่วนที่อยู่บนอากาศ (SPACE) และส่วนที่อยู่ภาคพื้นดิน (GROUND) ดังแสดงในรูป 2.2 ส่วนของ Space ประกอบด้วยพัลส์ควบคุมดาวเทียมหรือระบบตรวจวัดดาวเทียม (Telemetry) สถานีควบคุมและติดตาม (TT&C) ที่ใช้ในการรักษาไว้ซึ่งวงโคจรของดาวเทียมที่ถูกต้อง เพื่อให้การทำงานของระบบดาวเทียมเป็นไปด้วยความปลอดภัยมากที่สุดด้วยการทำงานสัมพันธ์กับดาวเทียมสำรองที่พร้อมจะปฏิบัติการได้ทันทีที่ดาวเทียมหลักเกิดผิดพลาดในการทำงาน

สถานีควบคุมและติดตามถือว่าเป็นสิ่งจำเป็น ในการรักษาการทำงานของดาวเทียมในอวกาศ สถานีนี้จะทำให้ตรวจสอบระบบดาวเทียม สถานะการทำงานของดาวเทียม จัดเตรียมข้อมูล แสดงการทดสอบการทำงานและการแก้ไขลักษณะทางกายภาพของดาวเทียมผ่านเส้นทางการต่อผ่านเพื่อระบบตรวจวัดดาวเทียม รูปแบบโดยทั่วไปของการรักษาสภาพการปฏิบัติการของดาวเทียม ถือว่ามีความจำเป็นที่ต้องทำอยู่ตลอดเวลา จะเห็นได้ว่าสถานีติดตามและควบคุมถูกใช้ในการสร้างความปลอดภัยให้กับดาวเทียม สำหรับตัวดาวเทียมเองประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ

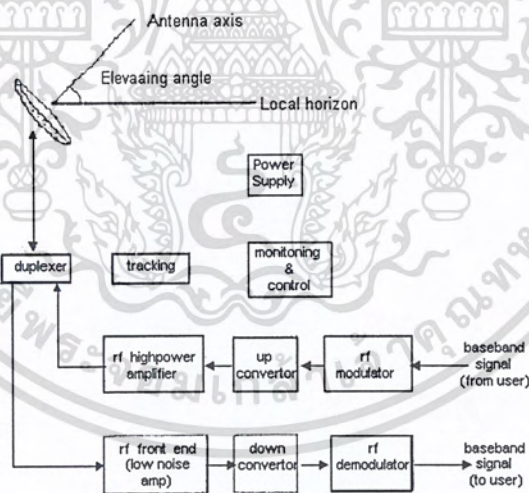
- Communication Payload
- Spacecraft Bus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการสื่อสารผ่านดาวเทียม

ส่วนภาคพื้นดินของระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมประกอบด้วยทุกส่วนที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารของสถานีภาคพื้นดินที่ทำการประมวลผล เพื่อทำให้เกิดการทำงานของดาวเทียม ดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของสถานีภาคพื้นดิน

- สายอากาศ (ระบบพัลส์สำหรับติดตามดาวเทียม)
- ระบบพีค (Polarisers, Duplexers, Ortho-mode Junction)
- ส่วนการขยายกำลังสูง (HPA'S)
- ส่วนการขยายต่ำ (LNA'S)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนการแปลงความถี่ขึ้น/ลง ระหว่างไมโครเวฟไปยัง rf.
- อุปกรณ์สื่อสารภาคพื้นดิน (GCE)
- อุปกรณ์ควบคุมและมอเตอร์การทำงานต่าง ๆ (CME)
- ส่วนไฟฟ้ากำลังสำหรับส่งให้ทุก ๆ ส่วนของระบบ (Power supply)

## 2.6 สรุป

ปริญญานิพนธ์นี้จะกล่าว พื้นฐานของสถาปัตยกรรมของการสื่อสารผ่านดาวเทียม เพื่อเป็นการปูพื้นฐานในการอธิบายถึงทฤษฎีในการมอดูเลทและดีมอดูเลท และจำลองสัญญาณรบกวนแบบชนิดเลชันในระบบดาวเทียมต่อไป



### บทที่ 3

## ทฤษฎีการมอดูเลทและดีมอดูเลท

### 3.1 กล่าวนำ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้อธิบายถึงทฤษฎีการมอดูเลทและการดีมอดูเลทตามมาตรฐานของ DOCSIS และ IEEE 802.14 เนื้อหาจะกล่าวถึงพื้นฐานการมอดูเลทสัญญาณดิจิทัล การมอดูเลทและการดีมอดูเลทแบบโคฮีเรนซ์ BPSK การมอดูเลทและการดีมอดูเลทแบบโคฮีเรนซ์ QPSK

### 3.2 การมอดูเลทสัญญาณดิจิทัล

การมอดูเลทสัญญาณดิจิทัลเป็นเทคนิคที่ถูกใช้ในการส่งข้อมูลดิจิทัลแบบเบสแบนด์ไปบนช่องสัญญาณแบบแบนพาส โดยข้อมูลดิจิทัลดังกล่าวจะถูกกำหนดให้เป็นเลขฐานสองคือ 0 และ 1 ที่มีอัตราการส่งข้อมูล 1 บิต ต่อ  $T_s$  วินาที ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สัญญาณที่มีความแตกต่างกันสองชนิดเพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูลดังกล่าว เรียกการส่งข้อมูลประเภทนี้ว่าการส่งสัญญาณแบบไบนารี นอกจากนั้นข้อมูลดิจิทัลในรูปของเลขฐานสองยังสามารถรวมกันเป็นบล็อก โดยในแต่ละบล็อกประกอบด้วยข้อมูล  $N$  บิต ดังนั้นจึงสามารถสร้างบล็อกที่ไม่ซ้ำกันได้จำนวน  $M=2^N$  บล็อก โดยเรียกบล็อกดังกล่าวว่าสัญลักษณ์ (Symbol) และเรียกการส่งข้อมูลประเภทนี้ว่าการส่งสัญญาณแบบ  $M$  แอเรีย (M-ary signaling) ซึ่งจะต้องใช้สัญญาณที่มีความแตกต่างกันสัญญาณเพื่อทำการส่งข้อมูลดังกล่าว โดยกำหนดให้กลุ่มของสัญญาณดังกล่าวแทนด้วย  $\{ s_m(t), m=1,2,3,\dots,M \}$  และเป็นสัญญาณที่มีพลังงานจำกัด

$$s_m(t) = \text{Re}[ E_m(t) e^{j\omega_c t} ] \quad m=1,2,3,\dots,M, \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (3.1)$$

โดย  $\{ E_m(t) \}$  คือ เอนเวโลปของสัญญาณ

$T_s$  คือ คาบของสัญญาณใน 1 สัญลักษณ์

กลุ่มของสัญญาณ  $s_m(t)$  สามารถแสดงในรูปของการรวมกันเชิงเส้น (Linear combination) ของฟังก์ชันฐานที่ตั้งฉากกัน  $N$  ตัว โดย  $M \leq 2^N$  และ  $s_m(t)$  เป็นอิสระเชิงเส้น (Linearly independent)

$$s_m(t) = \sum_{n=1}^N s_{mn} U_n(t) \quad m=1,2,\dots,M \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$s_{mn} = \int_{-\infty}^{\infty} s_m(t) U_n(t) dt \quad (3.3)$$

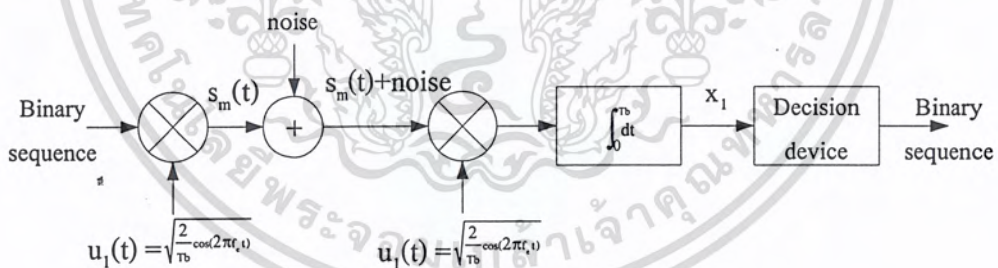
โดย  $\{ s_{mn} \}$  คือกลุ่มสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน  
 $\{ U_n(t) \}$  คือกลุ่มของฟังก์ชันฐานที่ตั้งฉาก

$$\int_{-\infty}^{\infty} U_k(t) U_n(t) dt = \begin{cases} 1 & k=n \\ 0 & k \neq n \end{cases} \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.1) – (3.4) เราสามารถนำมาออกแบบการมอดูเลทในแบบต่าง ๆ ได้หลายชนิดแต่สำหรับมาตรฐานของ DOCSIS และ IEEE 502.14 ได้กำหนดไว้ 2 รูปแบบดังได้อธิบายไว้ข้างต้น

### 3.2.1 การมอดูเลทและการดีมอดูเลทแบบโคฮีเรนซ์ BPSK (Binary Phase Shift Keying)

ในการมอดูเลทแบบโคฮีเรนซ์ BPSK เป็นการมอดูเลททางเฟสชนิดหนึ่งที่กำหนดค่าของสัญญาณ  $s_1(t)$  และ  $s_2(t)$  ด้วยเฟสที่แตกต่างกัน 180 องศา เพื่อใช้เป็นตัวแทนของบิต 1 และ 0 ตามลำดับ โดยสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบการมอดูเลท และดีมอดูเลท ได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมการมอดูเลทและดีมอดูเลทสัญญาณ BPSK

จากรูปที่ 3.1 สัญญาณ BPSK สามารถสร้างขึ้นจากอินพุทของไบนารีซีควเอนซ์ (Binary Sequence) ในรูปของโพล่าฟอร์ม (Polar Form) ซึ่งจะแทนบิต 1 และ 0 ด้วยระดับแอมปริจูดคงที่  $+E_b$  และ  $-E_b$  ตามลำดับโดยนำมาคูณกับฟังก์ชันฐาน  $U_n(t)$  ตามสมการที่ 3.2 ผลที่ได้สามารถแสดงดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T_b \quad (3.5)$$

$$s_2(t) = -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T_b \quad (3.6)$$

$$u_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T_b \quad (3.7)$$

โดย  $t$  คือ ช่วงที่มีค่าระหว่าง  $0 \leq t \leq T_b$

$T_b$  คือ คาบของสัญญาณใน 1 บิต

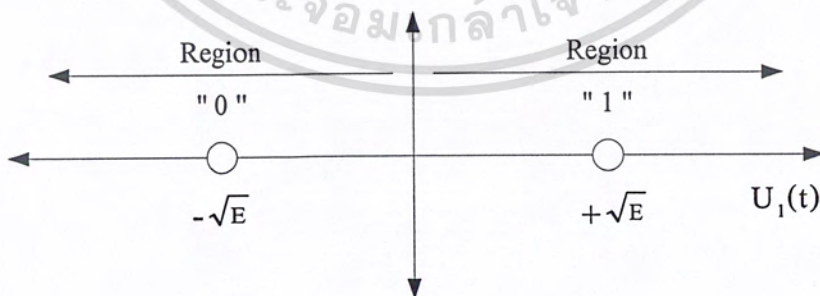
$E_b$  คือ พลังงานของสัญญาณใน 1 บิต

$f_c$  คือ ความถี่ของคลื่นพาห้

ในกรณีที่ต้องการตรวจจับสัญญาณดังกล่าวกลับมาสามารถทำได้โดยการคูณสัญญาณ  $s_m(t)$  ด้วยฟังก์ชันฐาน  $\{u_1(t)\}$  แล้วอินทิเกรตตั้งแต่ 0 ถึง  $T_b$  ดังต่อไปนี้

$$S_{11} = \int_0^{T_b} s_1(t) u_1(t) dt = +\sqrt{E_b} \quad (3.8)$$

$$S_{21} = \int_0^{T_b} s_2(t) u_1(t) dt = -\sqrt{E_b} \quad (3.9)$$

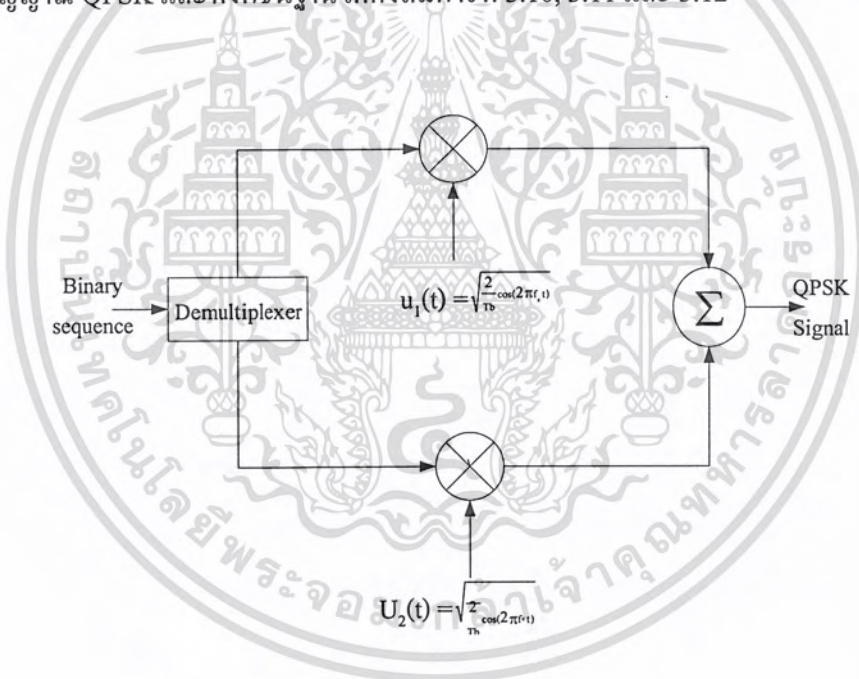


รูปที่ 3.2 คอนสเทเลชันไดอะแกรมของสัญญาณที่ถูกมอดูเลตในแบบ BPSK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.8), (3.9) และรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณ  $s_1(t)$  และ  $s_2(t)$  สามารถแยกความแตกต่างจากกันได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับค่าเทรซโวลต์ที่ค่า 0 โวลต์ และกำหนดให้สัญญาณที่มีค่ามากกว่า 0 โวลต์ แทนด้วยบิต 1 และสัญญาณที่มีค่าน้อยกว่า 0 โวลต์แทนด้วยบิต 0

**3.2.2 การมอดูเลตและดีมอดูเลตแบบโคฮีเรนซ์ QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)**  
การมอดูเลตแบบโคฮีเรนซ์ QPSK เป็นการมอดูเลตที่กำหนดให้สัญญาณ  $s_m(t)$  มีความแตกต่างกัน 4 รูปแบบ เพื่อใช้แทนบิตของเลขฐานสองที่มีขนาด 2 บิต คือ 00, 01, 10, และ 11 โดยสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมการมอดูเลตได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งอินพุทไบนารีซีแวนซ์ จะถูกส่งเข้ามาในรูปแบบของโพล่าฟอร์ม เช่นเดียวกันกับการมอดูเลตแบบ BPSK จากนั้นสัญญาณฐานสองดังกล่าวจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนโดยคิมัลติเพล็กซ์เซอร์ (Demultiplexer) และในแต่ละส่วนจะถูกนำมาคูณกับฟังก์ชันฐาน  $\{u_1(t)$  และ  $u_2(t)\}$  ก่อนที่จะนำมารวมกันเพื่อให้ได้สัญญาณ QPSK สามารถแสดงรูปแบบของสัญญาณ QPSK และฟังก์ชันฐานได้ดังสมการที่ 3.10, 3.11 และ 3.12



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมการมอดูเลตแบบ QPSK

$$s_m(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos\left[(2m-1)\frac{\pi}{4}\right] \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \sin\left[(2m-1)\frac{\pi}{4}\right] \sin(2\pi f_c t) \\ 0 \end{cases}$$

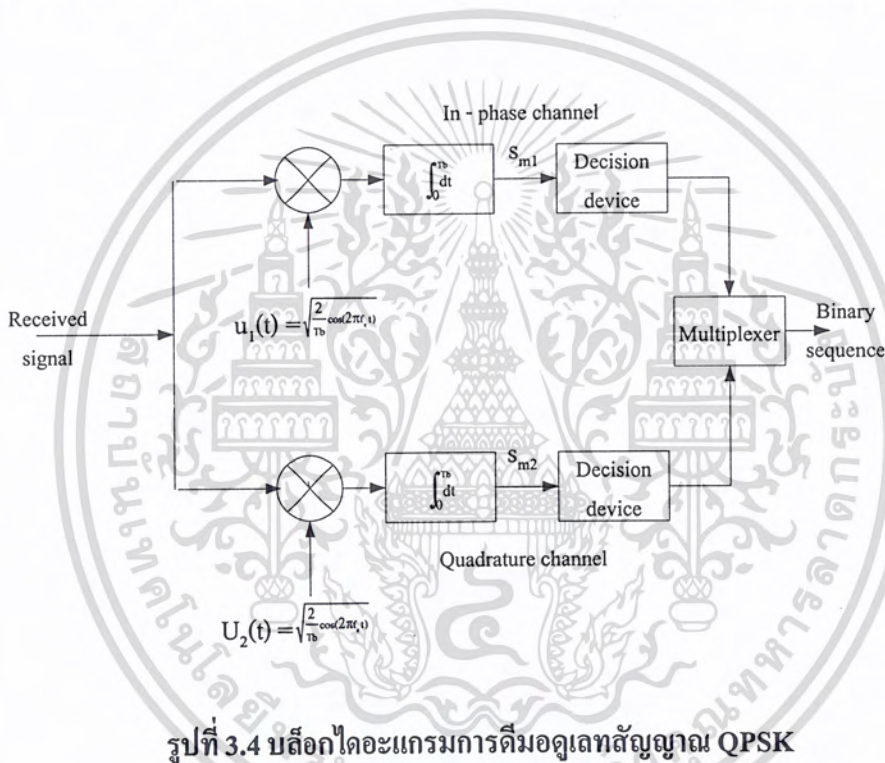
$$0 \leq t \leq T_b \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T_b \quad (3.11)$$

$$U_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \sin(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T_b \quad (3.12)$$

สมการที่ 3.10 แสดงสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแบบ QPSK โดยที่  $m = 1, 2, 3$  และ 4 แทนบิตของเลขฐานสอง 10, 00, 01 และ 11 ตามลำดับ สมการที่ 3.11 และ 3.12 แสดงฟังก์ชันฐานที่ใช้ในการมอดูเลตและดีมอดูเลต โดยสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมการดีมอดูเลตได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมการดีมอดูเลตสัญญาณ QPSK

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นว่าสัญญาณ QPSK  $\{s_m(t)\}$  จะถูกมาคูณกับฟังก์ชันฐาน และอินทิเกรตตั้งแต่ 0 ถึง  $T_b$  ซึ่งทำให้ได้  $s_{m1}$  และ  $s_{m2}$  ดังสมการต่อไปนี้

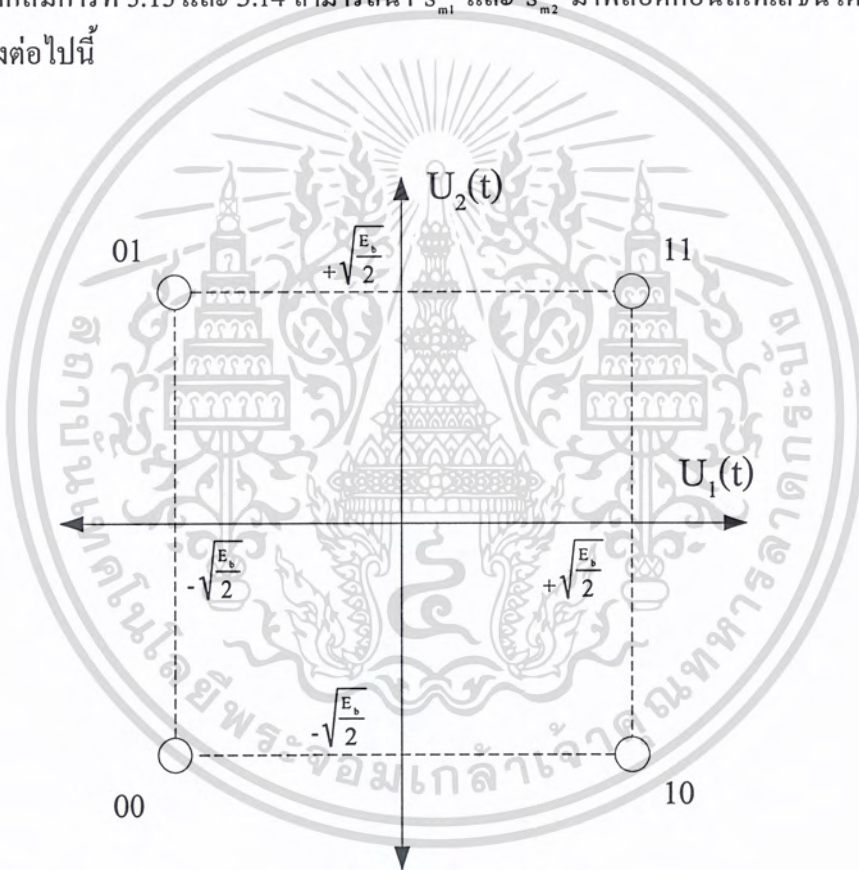
$$\begin{aligned} s_{m1} &= \int_0^{T_b} s_m(t) \cdot U_1(t) dt \\ &= \sqrt{E_b} \sin\left\{(2m-1)\frac{\pi}{4}\right\} \quad m = 1, 2, 3, 4 \end{aligned} \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 S_{m_2} &= \int_0^{T_b} S_m(t) \cdot U_1(t) dt \\
 &= -\sqrt{E_b} \sin\left\{(2m-1)\frac{\pi}{4}\right\} \quad m = 1,2,3,4
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

โดยที่  $s_{m_1}$  คือสัญญาณที่ผ่านอินทิเกรทในแกนของ I Channel  
 $s_{m_2}$  คือสัญญาณที่ผ่านอินทิเกรทในแกนของ Q Channel

จากสมการที่ 3.13 และ 3.14 สามารถนำ  $s_{m_1}$  และ  $s_{m_2}$  มาพล็อตคอนสเทเลชันไดอะแกรมได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.5 คอนสเทเลชันไดอะแกรมของสัญญาณที่ถูกมอดูเลทในแบบ QPSK

จากสมการที่ (3.13) – (3.14) และรูปที่ 3.5 สามารถแยกความแตกต่างระหว่าง  $s_{m_1}$  และ  $s_{m_2}$  ได้โดยใช้ขอบเขตของควอดแรนต์ทั้งสี่ โดยกำหนดให้ควอดแรนต์ที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็นตัวแทนของบิตข้อมูลของเลขฐานสอง 11, 01, 00 และ 10 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 สรุป

ปริยญาณิพนธ์บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการมอดูเลทและคีมอดูเลทแบบ BPSK และ QPSK โดยได้อ้างอิงตามมาตรฐาน DOCSIS IEEE และ 802.14

สำหรับบทต่อไปจะอธิบายแสดงถึงสัญญาณรบกวนแบบต่าง ๆ เพื่อแสดงประเภทของสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน ลีคอนอลมอลและฟังก์ชันความน่าจะเป็นของสัญญาณรบกวนในแบบต่าง ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# แบบจำลองของสัญญาณซินทิเลชัน (Scintillation Signal) ในระบบสื่อสารดาวเทียมในย่าน C-BAND และ Ku-BAND

### 4.1 กล่าวนำ

ในสภาพความเป็นจริง ระบบการสื่อสารดาวเทียม จะประกอบไปด้วยสัญญาณรบกวนหลายประเภทด้วยกัน โดยสัญญาณรบกวนในแต่ละประเภทจะมีรูปแบบและลักษณะการเกิดที่แตกต่างกันไป ในปริภูมิตฤษฎีการสื่อสารเชิงสถิติจะอธิบายถึงลักษณะการเกิดของ สัญญาณซินทิเลชัน (Scintillation Signal) และได้กล่าวถึงพื้นฐานของทฤษฎีการสื่อสารเชิงสถิติเพื่อใช้อธิบายถึงแบบจำลองของสัญญาณการกระจายแบบเกาส์เซียน (Normal or Gaussian distribution) และแบบจำลองของสัญญาณการกระจายแบบลอกลอการึม (Log-normal distribution)

### 4.2 ทฤษฎีการสื่อสารเชิงสถิติ

4.2.1 การกระจายตัวของความน่าจะเป็น และความหนาแน่นความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม

โดยปกติตัวแปรสุ่ม  $J$  จะสามารถอธิบายในรูปของฟังก์ชันการกระจายตัวของความน่าจะเป็น (Probability Distribution Function) และฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) ดังต่อไปนี้

$$F_j(j) = \text{Prob} \{ J \leq j \} \quad (4.1)$$

$$P_j(j) = \frac{d}{dj} F_j(j) \quad (4.2)$$

โดยที่ $J$	คือตัวแปรสุ่ม
$j$	คือค่าคงที่
$F_j(j)$	คือฟังก์ชันการกระจายตัวของความน่าจะเป็น
$P_j(j)$	คือฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น

จากสมการที่ (4.1) และ (4.2) ฟังก์ชันการกระจายตัวของความน่าจะเป็น ( $F_j(j)$ ) จึงหมายความว่าความน่าจะเป็นที่ตัวแปรสุ่ม  $J$  จะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าคงที่  $j$  และฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ( $P_j(j)$ ) จะหมายถึงความน่าจะเป็นที่ตัวแปรสุ่ม  $J$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง  $j$  และ  $j + \Delta j$  หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง  $P_j(j)$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันการกระจายตัวของความน่าจะเป็น

จากคุณสมบัติของ  $F_j(j)$  ที่ว่า  $F_j(-\infty) = 0$  และ  $F_j(\infty) = 1$  ดังนั้น

$$P_j(j) \geq 0 \quad (4.3)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} P_j(j) dj = 1 \quad (4.4)$$

โดยจากสมการที่ (4.3) และ (4.4) เป็นคุณสมบัติของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นซึ่งอธิบายได้ว่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์เสมอ และพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันดังกล่าวจะต้องมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ

#### 4.2.2 ความสัมพันธ์ร่วมของตัวแปรสุ่ม

กำหนดให้ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็นร่วมและฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นสำหรับตัวแปรสุ่มร่วม  $J$  และ  $K$  สามารถเขียนได้เป็น

$$F_{jk}(j,k) = \text{Prop}\{J \leq j \text{ และ } K \leq k\} \quad (4.5)$$

$$P_{jk}(j,k) = \frac{\partial^2}{\partial j \partial k} F_{jk}(j,k) \quad (4.6)$$

โดยที่  $J$  และ  $K$  คือตัวแปรสุ่ม

$j$  และ  $k$  คือค่าคงที่

$F_{jk}(j, k)$  คือฟังก์ชันการกระจายตัวของความน่าจะเป็นร่วม

$P_{jk}(j, k)$  คือฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นร่วม

จากคุณสมบัติพื้นฐานของฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็น และฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_{JK}(j, k) dJ dK = 1 \quad (4.7)$$

กำหนดให้ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบมาจินัลของตัวแปรสุ่ม  $J$  และ  $K$  ที่ได้จากการทดลองสุ่มสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$P_J(j) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{JK}(j, k) dK \quad (4.8)$$

$$P_K(k) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{JK}(j, k) dJ \quad (4.9)$$

จากสมการดังกล่าว จะเห็นว่าความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบมาจินัลของตัวแปรสุ่ม  $J$  คือการอธิบายฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นจะเป็นตัวแปรสุ่มร่วม  $J$  และ  $K$  โดยไม่สนใจตัวแปรสุ่ม  $K$  และกรณีกลับกันความหนาแน่นความน่าจะเป็นจะเป็นแบบมาจินัลของตัวแปรสุ่ม  $K$  คือการอธิบายฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มร่วม  $J$  และ  $K$  โดยไม่สนใจตัวแปรสุ่ม  $J$

พิจารณาความหนาแน่นความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม  $J$  ( $P_J(j)$ ) ในการทดลองสุ่มหนึ่ง ๆ ที่ทำให้เกิดผลกระทบกับความหนาแน่นความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม  $K$  ( $P_K(k)$ ) ในอีกการทดลองสุ่มหนึ่ง เรียกลักษณะดังกล่าวว่าความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปของ  $P_{J|K}(j|k)$

จากชนิดของความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นความน่าจะเป็นในรูปแบบต่าง ๆ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{J|K}(j|k) = \frac{P_{JK}(j, k)}{P_K(k)} \quad (4.10)$$

$$P_{K|J}(k|j) = \frac{P_{JK}(j, k)}{P_J(j)} \quad (4.11)$$

และจากสมการ (4.10) และ (4.11) เขียนรูปให้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{JK}(j/k) = \frac{P_{KJ}(k,j)P_J(j)}{P_K(k)} \quad (4.12)$$

เรียกสมการที่ (4.12) ว่ากฎของเบย์

ตัวแปรสุ่ม  $J$  และ  $K$  จะเรียกว่าเป็นอิสระเชิงสถิติ (Statistically Independent) ถ้าตัวแปรสุ่มทั้งคู่ไม่มีความเกี่ยวข้องกันในเชิงสถิติดังแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$P_{JK}(j/k) = P_J(j) \quad (4.13)$$

ดังนั้นเมื่อแทนลงในสมการ (4.10) จะได้

$$P_{JK}(j/k) = P_J(j) P_{KJ}(k/j) = P_J(j)P_K(k) \quad (4.14)$$

ซึ่งหมายความว่า ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นร่วมของตัวแปรสุ่มที่เป็นอิสระต่อกันจะมีค่าเท่ากับผลคูณของฟังก์ชันความหนาแน่นแบบมาจินัลของทั้งสองสมการ

#### 4.2.3 การทรานส์ฟอร์มของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น

การทรานส์ฟอร์มของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นมีความจำเป็นในการอธิบายฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ทราบค่าอยู่ก่อนแล้ว ( $P_J(j)$ ) เพื่อใช้หาฟังก์ชันใหม่ในรูปของตัวแปรสุ่มใหม่ ( $P_Z(z)$ ) โดยใช้ฟังก์ชันการทรานส์ฟอร์ม  $z = f(j)$  ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$P_Z(z) = P_J [f^{-1}(z)] \frac{dj}{dz} \quad (4.15)$$

จากสมการ (4.15) จะเห็นว่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ประกอบด้วยตัวแปรสุ่ม  $J$  ( $P_J(j)$ ) สามารถทรานส์ฟอร์มเป็นฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ประกอบด้วยตัวแปรสุ่ม  $Z$  ( $P_Z(z)$ )

ในกรณีที่ตัวแปรสุ่มร่วมสองตัว  $W$  และ  $Z$  ซึ่งมีความสัมพันธ์กับตัวแปรสุ่มอีกสองตัวคือ  $J$  และ  $K$  ดังสมการ (4.16) และ (4.17)

$$w = f(j,k) \quad (4.16)$$

$$z = g(j,k) \quad (4.17)$$

ถ้าการเทียบค่าของ  $f(j,k)$  และ  $g(j,k)$  มีลักษณะเป็นหนึ่งต่อหนึ่งและสามารถย้อนกลับได้ โดยสามารถเขียนค่าของ  $J$  และ  $K$  ในเทอมของ  $W$  และ  $Z$  ดังต่อไปนี้

$$j = f'(w,z) \quad (4.18)$$

$$k = g'(w,z) \quad (4.19)$$

จากสมการที่ (4.16) ถึง (4.19) เราสามารถทรานส์ฟอร์มฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นจากตัวแปรสุ่ม  $J$  และ  $K$  ( $P_{JK}(j,k)$ ) ไปสู่ตัวแปรสุ่ม  $W$  และ  $Z$  ( $P_{WZ}(w,z)$ ) ได้ดังต่อไปนี้

$$P_{WZ}(w, z) = \frac{\partial(w,z)}{\partial(j,k)} P_{JK}[j = f'(w,z), k = g'(w,z)] \quad (4.20)$$

### 4.3 ค่าเฉลี่ยเชิงสถิติ

ในการวิเคราะห์ตัวแปรเรณดัมในเชิงสถิติ นั้น เรามักจะใช้ค่าเฉลี่ยเชิงสถิติในการบอกคุณสมบัติของตัวแปรเรณดัมนั้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของค่าเฉลี่ยเชิงสถิติที่ใช้กันอยู่ทั่วไป

#### 4.3.1 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรเรณดัม

ในกรณีที่ตัวแปรเรณดัม  $X$  เป็นแบบมีค่าไม่ต่อเนื่อง เช่น มีค่าเป็น  $x_1, x_2, x_3, \dots$  และพหุคูณของค่าที่แต่ละค่าเป็น  $P(x_1), P(x_2), P(x_3), \dots$  ตามลำดับ ถ้าเราทำการทดลอง  $N$  ครั้ง โดยที่  $N$  มีค่าใหญ่มากเราจะพบว่าโอกาสที่  $X = x_i$  นั้นจะมี  $NP(x_i)$  ครั้ง ดังนั้นเมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดนี้มารวมกันก็จะได้เป็น

$$x_1 P(x_1)N + x_2 P(x_2)N + \dots = N \sum_i x_i P(x_i) \quad (4.21)$$

และเมื่อนำจำนวนครั้งของการทดลองคือ  $N$  มาหารสมการ (4.21) ก็จะได้ค่าเฉลี่ยของผลที่ได้จากการทดลองออกมา ค่าเฉลี่ยที่ได้นี้บางครั้งเราเรียกว่า ค่าคาดคะเนของ  $X$  (expectation of  $X$ ) และมักจะใช้สัญลักษณ์เป็น  $\bar{x}$  หรือ  $E[X]$  ดังนั้นถ้าให้ค่าเฉลี่ยที่ได้ออกมาเป็น  $m$  ก็จะเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{x} = E[X] = m = \sum_i x_i P(x_i) \quad (4.22)$$

ในกรณีที่ตัวแปรแรนดัมเป็นแบบที่มีค่าต่อเนื่องและมีพหุคูณบะบิลิตีเดนซิตีฟังก์ชันเป็น  $p_x(x)$  เราจะสามารถหาค่าเฉลี่ยได้โดยคำนึงถึงว่า  $P(x_i)$  ในสมการ (4.22) มีค่าเท่ากับ  $p_x(x_i) \Delta x$  จากนั้นจึงเปลี่ยนรูปจากการหาผลบวกเป็นการอินทิเกรตดังนี้

$$\bar{x} = E[X] = m = \int_{-\infty}^{\infty} x p_x(x) dx \quad (4.23)$$

$$\text{ในกรณีที่ทั่วไปที่ } \overline{g(X)} = E[g(X)] = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) p_x(x) dx \quad (4.24)$$

ในกรณีพิเศษที่  $g(X) = X^n$  ผลที่ได้ในสมการ (4.24) จะถูกเรียกว่าโมเมนต์อันดับที่  $n$  ของตัวแปรแรนดัม ( $n$ th moment of the random variable) กรณีที่  $n = 1$  หรือ โมเมนต์อันดับที่ 1 ของตัวแปรแรนดัมก็คือค่าเฉลี่ย กรณีที่  $n = 2$  หรือ โมเมนต์อันดับ 2 ของตัวแปรแรนดัมก็คือค่าเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย (mean square value) จัดว่าเป็นค่าที่มีความสำคัญมากเพราะจะเชื่อมโยงกับกำลังงานของสัญญาณแรนดัม ซึ่งจะเห็นได้ชัดขึ้นและมีประโยชน์มากในกรณีที่สัญญาณแรนดัมนั้นเป็นสัญญาณรบกวน

เนื่องจากตามนิยามของค่าเฉลี่ยตามสมการ (4.24) จะเห็นได้ว่าเป็นการจัดการกับตัวแปรแรนดัมแบบเชิงเส้น ดังนั้นถ้า  $g(X) = aX+b$  โดยที่  $a, b$  เป็นค่าคงที่จากสมการ (4.24) จะได้

$$E[aX+b] = a\bar{x}+b \quad (4.25)$$

และถ้า  $a = \bar{x}, b = 0$  จะได้

$$E[\bar{x}X] = \bar{x}E[X] = \bar{x}^2 = E^2[X] \quad (4.26)$$

ค่าที่ได้ในสมการที่ (4.26) นี้ก็คือค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง ข้อสังเกตที่สำคัญประการหนึ่งก็คือค่าเฉลี่ยกำลังสองนี้จะแตกต่างจากค่ากำลังสองเฉลี่ยกล่าวคือ  $E^2[X] \neq E[X^2]$  โดยที่  $E[X^2]$  จะมากกว่า  $E^2[X]$  เสมอ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในหัวข้อต่อไป

### 4.3.2 ความเบี่ยงเบนมาตรฐานและแวนเรียน (Standard deviation and Variance)

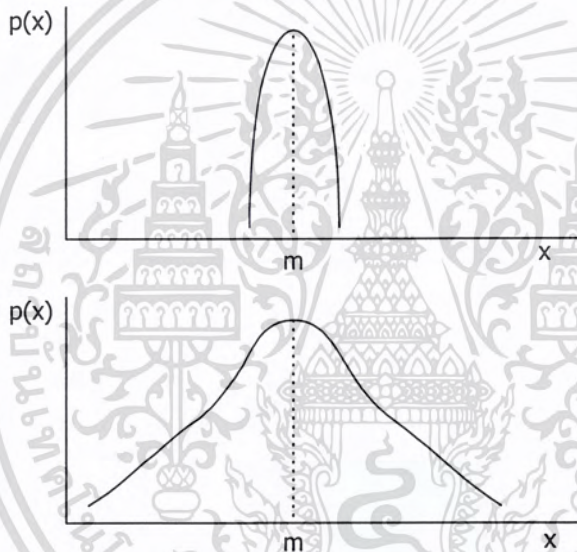
ความเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นค่าที่ใช้แสดงการกระจายของตัวแปรแรนดัม ว่าจะมีการกระจายกว้างหรือเกาะกลุ่มแคบ รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างการกระจายของพหุคูณบะบิลิตีเดนซิตี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันของตัวแปรแรมดัม 2 ชุด ซึ่งเราจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ชุดแรกที่มีการเกาะกลุ่มมากเมื่อเทียบกับชุดหลังความเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งเรามักใช้สัญลักษณ์  $\sigma$  นั้นจะมีนิยามดังนี้

$$\sigma^2 \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} (x-m)^2 p(x) dx = E[(X-m)^2] \quad (4.27)$$

กำลังสองของ  $\sigma$  ที่นิยามตามสมการ (4.17) นี้เราเรียกว่าแวนเรียน (variance) จากนิยามในสมการ (4.27) นี้เราเห็นได้ชัดว่า ถ้า  $X$  กระจายห่างออกจากค่าเฉลี่ย  $m$  มากเท่าใดแวนเรียนหรือความเบี่ยงเบนมาตรฐานก็จะสูงตามไปด้วย ดังนั้นถ้ากล่าวได้ว่าตัวแปรแรมดัมชุดหนึ่งมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือแวนเรียนต่ำกว่าอีกชุดหนึ่ง ก็แสดงว่าตัวแปรแรมดัมชุดแรกมีการกระจายออกจากค่าเฉลี่ยน้อยกว่าชุดหลัง



รูปที่ 4.1 พรอบบะบิลิตีเดนซิตีฟังก์ชันของตัวแปรแรมดัมที่มีความเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เท่ากัน

เมื่อเราทำการพิจารณาแวนเรียนในสมการ (4.27) โดยแตกเทอมทางขวามือของสมการจะได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= E[X^2 - 2mX + m^2] \\ &= E[X^2] - m^2 = \bar{X}^2 - m^2 \end{aligned} \quad (4.28)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าแวนเรียนจะหาได้จากค่ากำลังสองเฉลี่ยลบด้วยค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง และในกรณีที่ค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์  $\sigma^2$  จะเท่ากับ  $E[X^2]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ตัวแปรแรนดัมเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ค่าเฉลี่ยที่นิยามไว้ในสมการ (4.27) ก็จะเปลี่ยนรูปเป็นบวกดังนี้คือ

$$\sigma_x^2 = \sum_i (x_i - m)^2 P(x_i) \quad (4.29)$$

### 4.3.3 ค่าเฉลี่ยกรณีที่มีหลายตัวแปร

ในกรณีที่ตัวแปรแรนดัมมากกว่าหนึ่งตัวแปรขึ้นไป การนิยามค่าเฉลี่ยเชิงสถิติก็จะทำได้เช่นเดียวกัน โดยใช้จอยนท์พหุคูณแบบบิลิตีเดนซิตีฟังก์ชันของตัวแปรแรนดัมที่เกี่ยวข้อง ในกรณีที่มีตัวแปรแรนดัม 2 ตัวแปรคือ  $X$  และ  $Y$  และ  $g(X,Y)$  เป็นฟังก์ชันของ  $X,Y$  ที่เราต้องการหาค่าเฉลี่ยเชิงสถิติก็จะนิยามดังนี้

$$E[g(X,Y)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x,y) p_{xy}(x,y) dx dy \quad (4.30)$$

ในกรณีพิเศษที่  $X$  และ  $Y$  เป็นอิสระจากกัน ซึ่งทำให้  $p_{xy}(x,y) = p_x(x)p_y(y)$  และถ้า  $g(X,Y)$  สามารถเขียนได้เป็นผลคูณของ  $g_1(X)$  และ  $g_2(Y)$  ในกรณีเช่นนี้สมการ (4.30) ก็จะเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E[g(X,Y)] &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_1(x)g_2(y)p_x(x)p_y(y) dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g_1(x)p_x(x) dx \int_{-\infty}^{\infty} g_2(y)p_y(y) dy \\ &= E[g_1(X)]E[g_2(Y)] \end{aligned} \quad (4.31)$$

ตัวอย่างที่น่าสนใจบางอันของ  $g(X,Y)$  ก็คือ กรณีที่  $g(X,Y) = XY$  ในกรณีนี้สมการ (4.31) จะเขียนได้เป็น

$$E[XY] = E[X]E[Y] = m_x m_y \quad (4.32)$$

นั่นคือค่าเฉลี่ยของผลคูณจะเท่ากับผลคูณของค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที  $g(X,Y)$  เขียนได้เป็นผลบวกของ  $X$  และ  $Y$  คือ  $g(X,Y) = X+Y$  ในกรณีนี้จะไม่จำเป็นต้องมีเงื่อนไขที่  $X$  และ  $Y$  เป็นอิสระจากกัน ค่าเฉลี่ยที่นิยามตามสมการ (4.30) นี้ เมื่อใช้สมการ (4.32) และ (4.33) จะเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E[X+Y] &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x+y)p_{xy}(x,y)dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} xp_x(x)dx + \int_{-\infty}^{\infty} yp_y(y)dy \\ &= E[X]+E[Y] = m_x+m_y \end{aligned} \quad (4.33)$$

นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของผลบวกจะเท่ากับผลบวกของค่าเฉลี่ย ในกรณีเดียวกันนี้ถ้าเราจะดูว่าค่าแวนเรียนเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรจากตัวแปรแรนดัมตัวเดียว เราจะได้โดยใช้สมการ (4.28) ดังนี้

$$\begin{aligned} \sigma_{xy}^2 &= E[(X+Y)^2] - (m_x+m_y)^2 \\ &= E[X^2 + 2XY + Y^2] - (m_x+m_y)^2 \\ &= E[X^2] - m_x^2 + E[Y^2] - m_y^2 + 2\{E[XY] - m_x m_y\} \\ &= \sigma_x^2 + \sigma_y^2 \end{aligned} \quad (4.34)$$

ผลที่ได้ในสมการ (4.34) นี้แสดงให้เห็นว่าแวนเรียนของ  $X+Y$  จะเท่ากับผลบวกของแวนเรียนของ  $X$  กับแวนเรียนของ  $Y$  ซึ่งก็หมายความว่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  $X+Y$  จะสูงกว่าของ  $X$  หรือของ  $Y$  ใด ๆ

#### 4.4 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

##### (AWGN)

ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของสัญญาณรบกวนแบบ AWGN จะมีการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน โดยปกติจะใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ในเชิงสถิติของสัญญาณรบกวนโดยทั่วไป ซึ่งจะเป็นรูปแบบการกระจายตัวที่เกิดขึ้นได้มากที่สุดเพราะมีทฤษฎีทางสถิติได้สนับสนุนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่เรียกว่า ทฤษฎีเซ็นทรัลลิมิต(Central Linmit Theorem) โดยสามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

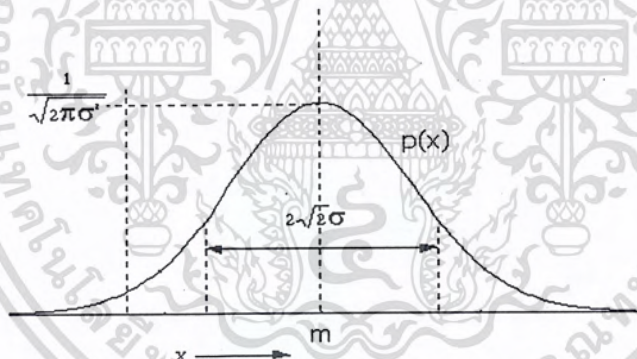
$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_n^2}\right] \quad (4.35)$$

โดยที่  $x$  คือตัวแปรสุ่มแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณรบกวน

$m$  คือค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม  $x$

$\sigma_n^2$  คือค่าแวนเรียนของตัวแปรสุ่ม  $x$

ฟังก์ชัน  $P(x)$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นว่าฟังก์ชันดังกล่าวเป็นฟังก์ชันชนิดต่อเนื่องและมีความสมมาตร โดยมีจุดกึ่งกลางอยู่ที่ค่าเฉลี่ย  $m$



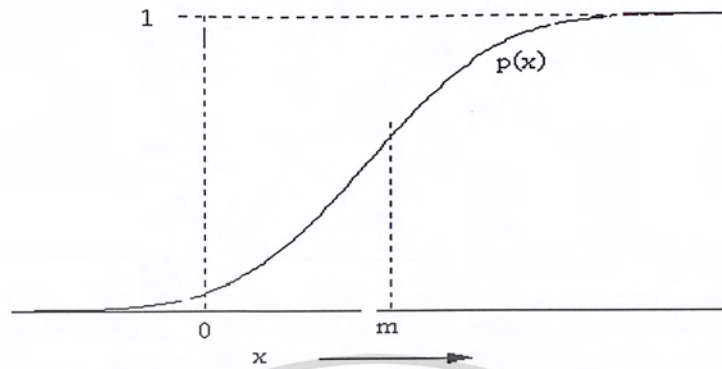
รูปที่ 4.2 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียน

จากสมการที่ (4.35) และ (4.2) สามารถอธิบายฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนได้ดังต่อไปนี้

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(y-m)^2}{2\sigma_n^2}\right] dy \quad (4.36)$$

จากสมการ (4.35) สามารถแสดงฟังก์ชัน  $F(x)$  ได้ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน

จากรูปจะเห็นว่าค่าความน่าจะเป็นจะเป็นค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องไปจนถึงค่าสูงสุดคือหนึ่งแล้วจึงคงที่โดยค่าเฉลี่ย  $m$  จะมีความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.5 ซึ่งจะอยู่ตรงกลางของกราฟพอดี

#### 4.5 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของสัญญาณรบกวนแบบล็อกนอร์มอล

##### (Log - normal distribution)

เป็นการกระจายของค่าการเปลี่ยนแปลงทางด้านบวกของ ลอการิทึมของการกระจายแบบ Gaussain ที่อาจเป็นไปได้ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่น โดยตรงและความน่าจะเป็นของความหนาแน่น เขียนได้โดย

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - m}{\sigma}\right)^2\right] \quad (4.37)$$

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{t} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - m}{\sigma}\right)^2\right] dt$$

$$= \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \frac{\ln x - m}{\sigma\sqrt{2\pi}} \right] \quad (4.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของ  $m$  และ  $\sigma$  เป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่ใช่การเปลี่ยนแปลงของ  $x$  แต่เป็นการเปลี่ยนแปลงของลอการิทึม ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของ  $x$  หาได้ยากจากภายนอกเราหาจาก

- ความน่าจะเป็นมากที่สุด :  $\exp(m - \sigma^2)$
- ค่ากลาง :  $\exp(m)$
- ค่าเฉลี่ย :  $\exp(m + \frac{\sigma^2}{2})$
- ค่ารากเฉลี่ย :  $\exp(m + \frac{\sigma^2}{2})\sqrt{\exp(\sigma^2) - 1}$

ซึ่งจะไม่เหมือนการกระจายแบบ Gaussian การกระจายแบบ log-normal จะเป็นแบบที่ไม่มีส่วนที่แน่นอนในส่วนของคุณค่าย่อยต่าง ๆ เช่นค่าเฉลี่ย, ค่ากลาง และค่าความน่าจะเป็นมากที่สุดจะไม่เหมือนกัน

การกระจายแบบ log-normal จะพบบ่อยในการติดต่อด้วยการแพร่ สำหรับปริมาณมีความสัมพันธ์กับกำลังงานหรือช่วง field-strength หรือเวลา กำลังงานหรือช่วง field-strength จะเป็นเดซิเบล ดังนั้นการเปรียบเทียบการกระจายแบบ normal จะอยู่ในรูปแบบของเวลา (เฉพาะตัวอย่าง fading ในช่วงระยะเวลา) การกระจายแบบ log-normal จะนิยมใช้กันทั่วไปจากการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติ เป็นวินาที หรือ นาทีแต่ไม่ใช่ของลอการิทึม

ดังนั้นในการทำงานเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงด้วยการกระจายแบบ log-normal บางครั้งการกระจายแบบ log-normal จะพบในรูปแบบของอัตราส่วนกลับของเวลา จากตัวอย่างนี้เป็นการแสดงอัตราส่วนของการกระจายเมื่อมีอัตราส่วนของฝนตกมากและน้อย

ในการเปลี่ยนแปลงการกระจายแบบ Gaussian เราสามารถพิจารณาการกระจายแบบ log-normal ที่ค่าเฉลี่ยที่ตัวเลขของการเปลี่ยนแปลงที่แสดงผลลัพธ์มาจากหลาย ๆ สาเหตุที่มีความสำคัญน้อยมาก

#### 4.6 สรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีสื่อสารเชิงสถิติ ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของสัญญาณแบบ AWGN และการกระจายแบบถือคนอลมอด เพื่อเป็นพื้นฐานในการจำลองสัญญาณรบกวนในสัญญาณดาวเทียมในย่าน C-BAND และ Ku-BAND

## บทที่ 5

### สัญญาณเรณดัมและสัญญาณรบกวน

สัญญาณในระบบสื่อสารนั้น โดยทั่วไปจะต้องมีลักษณะที่มีความไม่แน่นอนอน จึงจะให้ ปริมาณข่าวสารมาก ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมและคุณสมบัติของสัญญาณเรณดัม จึงจัดว่าเป็น พื้นฐานที่สำคัญในการวิเคราะห์สัญญาณในระบบสื่อสาร และพื้นฐานอันเดียวกันนี้ก็สามารถใช้ อธิบายสัญญาณรบกวนหลาย ๆ แบบที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสาร เพราะสัญญาณรบกวนนั้น โดยเนื้อ แท้ก็เป็นสัญญาณเรณดัม แต่เป็นสัญญาณเรณดัมที่เราไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้เท่ากัน ในบทนี้ จะกล่าวถึงการวิเคราะห์สัญญาณเรณดัมทั้งแบบที่ใช้งานได้ และแบบที่เป็นสัญญาณรบกวน

#### 5.1 กระบวนการเรณดัม (Random process or stochastic process)

##### 5.1.1 ความหมายของการกระบวนการเรณดัม

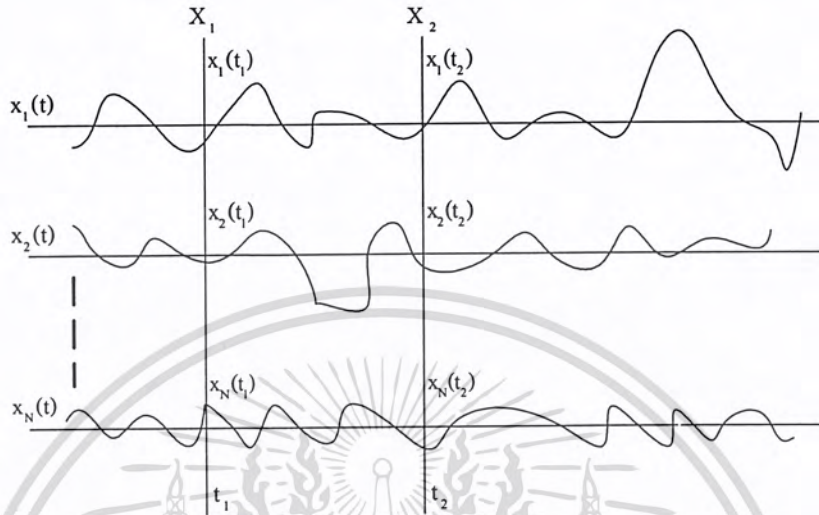
อันที่จริงสัญญาณเรณดัมในระบบไฟฟ้าสื่อสารก็คือ หรือปรากฏการณ์เรณดัมต่างๆ ใน ธรรมชาติก็ดี พรอบบะบิลิตีที่จะเกิดตัวแปรเรณดัมตัวหนึ่งนั้นมันจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เสมอ ลักษณะดังกล่าวนี้เราเรียกว่ากระบวนการเรณดัมหรือกระบวนการสโตแคสติก กระบวนการ เรณดัมจะเป็นการแปลงเหตุการณ์ทางสถิติให้เป็นฟังก์ชันของเวลาที่มีค่าจริง และเซต (set) ของฟังก์ชันของเวลาที่เป็นไปได้ทั้งหมดนี้เรียกว่า "เอนเซมเบิล" (ensemble) ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.1 โดยที่  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)$  อาจจะได้มาจากสังเกตการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของสัญญาณรบกวน แบบความร้อน (thermal noise) ที่ปรากฏที่ขั้วของความต้านทาน  $N$  ตัว ที่เหมือนกันทุกประการ ตัวอย่างของเอนเซมเบิลที่จะเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนต่อไปในภายหลัง ได้แก่เซตของ ฟังก์ชันที่มี  $x(t)$  เขียนได้เป็น

$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi) \quad (5.1)$$

โดยที่  $A$  และ  $\omega$  มีค่าคงที่ และ  $\phi$  เป็นตัวแปรเรณดัมที่มีค่าอยู่ระหว่าง  $0-2\pi$  rad โดย เกิดขึ้นได้ด้วยพรอบบะบิลิตีที่เท่ากันตลอดช่วง ตัวอย่างอีกอันหนึ่งก็ได้แก่เซตของฟังก์ชัน  $x(t)$  ที่มี ค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x(t) = \sum_{n=-N}^N [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (5.2)$$



รูปที่ 5.1 เซตของสัญญาณแรนดัมที่ประกอบกันเป็นเอ็นเซมเบิล

โดยที่  $a_n, b_n$  เป็นตัวแปรแรนดัมที่เป็นอิสระจากกัน มีการกระจายแบบเกาส์เซียน โดยที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ สมการ (5.2) นี้เราจะใช้อีกครั้งหนึ่งในการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนในระบบในภายหลัง ตัวอย่างของเอ็นเซมเบิลในสมการ (5.1) ก็ดี ในสมการที่ (5.2) ก็ดี จะเห็นได้ว่าถ้าเรากำหนดเป็น  $t_1$  ค่าที่เกิดขึ้นนั้นก็ยังไม่สามารถกำหนดตายตัวลงไปได้ว่าเป็นอะไร ทั้งนี้เพราะเราไม่สามารถรู้แน่นอนว่า  $\phi$  หรือ  $a_n, b_n$  ที่ถูกต้องได้ สัญญาณนั้นก็จะเป็นสัญญาณที่รู้ค่า และหมดความเป็นแรนดัมไป

### 5.1.2 การคิดพหุคูณของกระบวนการแรนดัม

การคิดพหุคูณของกระบวนการแรนดัมนั้นอาจกล่าวได้ว่าเป็นการขยายความคิดต่อจากการคิดพหุคูณของตัวแปรแรนดัมที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยที่ตัวแปรด้านเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นถ้าให้  $x(t)$  เป็นตัวแทนของฟังก์ชันในเอ็นเซมเบิล เมื่อเราทำการสังเกตตรงเวลา  $t = t_1$  พหุคูณของบิลิตีที่  $x(t_1)$  จะอยู่ในช่วง  $x_1$  และ  $x_1 + \Delta x_1$  หรือ  $P(x_1 < x(t_1) < x_1 + \Delta x_1)$  จะเขียนได้ดังนี้

$$\lim_{\Delta x_1 \rightarrow 0} P(x_1 < x(t_1) < x_1 + \Delta x_1) = p_1(x_1, t_1) dx_1 \quad (5.3)$$

ในขั้นต่อไปนี้ถ้าเราทำการสังเกตที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  แล้วหาพหุคูณของบิลิตีที่จะเกิด  $x_1$  และ  $x_2$  ว่าเป็นเท่าใด ผลที่ได้ก็จะเป็นเท่าใด ผลที่ได้ก็จะจอยนที่พหุคูณของบิลิตีเคเนซิติฟังก์ชันของเหตุ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การณ์ 2 อัน จะเขียนสัญลักษณ์เป็น  $p_2(x_1, t_1; x_2, t_2)$  ซึ่งเป็นพหุคูณแบบบิลิตีที่เกิด  $x_1$  ที่  $t_1$  และเกิด  $x_2$  ที่  $t_2$  ในทำนองเดียวกันถ้าเราขยายจำนวนของเวลาที่ทำการสังเกตเป็น  $n$  โดยที่  $t_1 < t_{1+1}$  จอชนที่พหุคูณแบบบิลิตีที่เกิดขึ้นก็จะเขียนได้เป็น  $p_2(x_1, t_1; x_2, t_2; \dots; x_n, t_n)$

เมื่อเราพิจารณาต่อไปถึงพหุคูณแบบบิลิตีแบบมีเงื่อนไขกล่าวคือพหุคูณแบบบิลิตีที่จะเกิด  $x_2$  ที่เวลา  $t_2$  หลังจากเกิด  $x_1$  ที่เวลา  $t_1$  ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์เป็น  $p_c(x_2, t_2|x_1, t_1)$  นั้นก็จะมีความหมายว่า เราจะพิจารณาว่าในชั่วเชืท ของเอ็นเซมเบิลที่เกิด  $x_1$  ที่เวลา  $t_1$  จะมีโอกาสไปเกิด  $x_2$  ถึง  $x_2 + \Delta x_2$  ที่เวลา  $t_2$  ได้เท่ากัน และในทำนองเดียวกันกับกรณีของตัวแปรแรนดัม เราจะได้ความสัมพันธ์ของพหุคูณแบบบิลิตีแบบมีเงื่อนไขกับจอชนที่พหุคูณแบบบิลิตีในรูปต่อไปนี้

$$p_c(x_2, t_2|x_1, t_1) = \frac{p_2(x_1, t_1; x_2, t_2)}{p_1(x_1, t_1)} \quad (5.4)$$

ในทำนองเดียวกันกับที่กล่าวมานี้ถ้าพิจารณาพหุคูณแบบบิลิตีแบบมีเงื่อนไขที่เวลา  $t_n$  ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์เป็น  $p_c(x_n, t_n|x_1, t_1; x_2, t_2; \dots; x_{n-1}, t_{n-1})$  ก็หมายความว่า ในขณะที่รู้ค่า  $x(t)$  ที่เวลา  $t_1, t_2, \dots, t_{n-1}$  จะมีโอกาสเกิด  $x_n$  ที่เวลา  $t_n$  เป็นเท่าใดลักษณะที่กล่าวมานี้เหมือนกับพหุคูณแบบบิลิตีของการเปลี่ยนแปลงค่าจากค่าหนึ่งไปยังอีกค่าหนึ่งตามเวลา ดังนั้นจึงเรียกว่าทรานสิชันพหุคูณแบบบิลิตีเดนซิตีฟังก์ชัน (transition PDF)

## 5.2 ค่าเฉลี่ยของเอ็นเซมเบิลและคอรัลเลชันฟังก์ชัน

ค่าเฉลี่ยของเอ็นเซมเบิลนั้นหมายถึงการหาค่าเฉลี่ยของเอ็นเซมเบิลที่เวลา  $t$  ใด ๆ ดังนั้นถ้าให้  $p_1(x, t)$  เป็นพหุคูณแบบบิลิตีฟังก์ชันที่เวลา  $t$  เราจะสามารถหาค่าเฉลี่ยของเอ็นเซมเบิลได้ในทำนองเดียวกันกับการหาค่าเฉลี่ยของตัวแปรแรนดัมดังนี้คือ

$$\overline{x(t)} = E[x(t)] \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} x p_1(x, t) dt \quad (5.5)$$

ในกระบวนการแรนดัมทั่วไปไม่มีคุณสมบัติเฉพาะที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไปค่าเฉลี่ยของเอ็นเซมเบิลตามสมการ (5.5) นี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลากล่าวคือ ถ้าใช้รูปที่ 5.1 ประกอบค่าเฉลี่ยเอ็นเซมเบิลที่เวลา  $t_1$  จะไม่เท่ากับที่เวลา  $t$  อื่น ๆ ในทำนองเดียวกันกับการคิดค่าเฉลี่ยของตัวแปรแรนดัมหลายตัวถ้าให้  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  เป็นฟังก์ชันของค่า  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ซึ่งเกิดขึ้นที่เวลา  $t_1, t_2, \dots, t_n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับเราจะสามารถหาค่าเฉลี่ยเอ็นเซมเบิลของกรณีได้โดยใช้จอยนท์พروبอบะบิลิตีเดนซิตีฟังก์ชัน  $p_n(x_1, t_1, x_2, t_2; \dots; x_n, t_n)$  ดังนี้คือ

$$E[f(x_1, x_2, \dots, x_n)] = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1, x_2, \dots, x_n) p_n(x_1, t_1; x_2, t_2; \dots; x_n, t_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (5.6)$$

ในลำดับต่อไปเราจะพิจารณาค่าแวนเรียนของค่า  $x$  ที่เกิดที่เวลา  $t$  ซึ่งจะสามารถนิยามได้แบบเดียวกับกรณีตัวแปรแรนดัมดังนี้

$$\sigma^2(t) \triangleq E\left\{x(t) - \overline{x(t)}\right\}^2 = E[x^2(t)] - \overline{x(t)}^2 \quad (5.7)$$

ในขั้นต่อไปเราจะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $x_1$  ที่เกิดขึ้นที่เวลา  $t_1$  กับ  $x_2$  ที่เกิดขึ้นที่เวลา  $t_2$  กล่าวคือเราให้  $m_1$  และ  $m_2$  เป็นค่าเฉลี่ยเอ็นเซมเบิลของ  $(x_1 - m_1)(x_2 - m_2)$  จะถูกเรียกว่า โคแวนเรียนฟังก์ชัน (covariance function) โดยใช้สัญลักษณ์เป็น  $C(t_1, t_2)$  และเขียนได้ดังนี้

$$C(t_1, t_2) \triangleq E[(x_1 - m_1)(x_2 - m_2)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x_1 - m_1)(x_2 - m_2) p_2(x_1, t_1; x_2, t_2) dx_1 dx_2 \quad (5.8)$$

ในทำนองเดียวกันเราอาจนิยามออโตคอร์รีเลชันฟังก์ชันได้ในรูปต่อไปนี้

$$R(t_1, t_2) \triangleq E[x_1 x_2] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_1 x_2 p_2(x_1, t_1; x_2, t_2) dx_1 dx_2 \quad (5.9)$$

ในความหมายของสมการ (5.8) นี้เป็นการพิจารณาว่าการกระจายตัวของตัวแปรแรนดัมที่เวลา  $t_1$  มีความสัมพันธ์กับการกระจายของของตัวแปรที่เวลา  $t_2$  เป็นอย่างไร คือถ้าการกระจายต่างกันมากสมการ (5.8) ก็จะมีค่าต่ำ ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้จะเป็นการพิจารณาว่าค่าเอ็นเซมเบิลที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  มีความคล้ายคลึงกันมากน้อยแค่ไหนจึงถูกเรียกว่าโคแวนเรียนฟังก์ชันในทำนองเดียวกันสมการที่ (5.9) ก็จะเป็นการบอกว่าสัญญาณแรนดัมนั้นมีความคล้ายคลึงในตัวเองเป็นอย่างไร ออโตคอร์รีเลชันฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันที่มีค่าขึ้นอยู่กับเวลา  $t_1$  และ  $t_2$  ในกรณีที่มีกระบวนการแรนดัมมีคุณสมบัติเป็นแบบสแตชันนารี (stationary random process) ดังที่กล่าวในหัวข้อต่อไป ค่าออโตคอร์รีเลชันนี้จะขึ้นอยู่กับผลต่างระหว่างที่  $t_1$  และ  $t_2$  เท่านั้น ในกรณีเฉพาะที่  $t_1 = t_2 = t$  นั้น โควเอนเรียนนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียนฟังก์ชันและอโตคอร์รีเลชันฟังก์ชันในสมการ (5.8) และสมการ (5.9) ก็จะกลายเป็นแวนเรียน และค่ากำลังสองเฉลี่ยของเอ็นเซมเบิลไป และค่าทั้งสองนี้จะสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยของเอ็นเซมเบิล กำลังสองดังที่แสดงไว้ในสมการที่ (5.7)

ในทำนองเดียวกันกับอโตคอร์รีเลชันฟังก์ชัน เราจะสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการเรณดัม 2 อันได้ในรูปของครอสคอร์รีเลชันฟังก์ชัน ถ้า  $x(t)$  และ  $y(t)$  เป็นสัญญาณเรณดัมในกระบวนการเรณดัม 2 อัน ครอสคอร์รีเลชันจะมีนิยามดังนี้

$$R_{xy}(t_1, t_2) \triangleq E[x_1 y_2] \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_1 y_2 p_2(x_1, t_1; y_2, t_2) dx_1 dy_2 \quad (5.10)$$

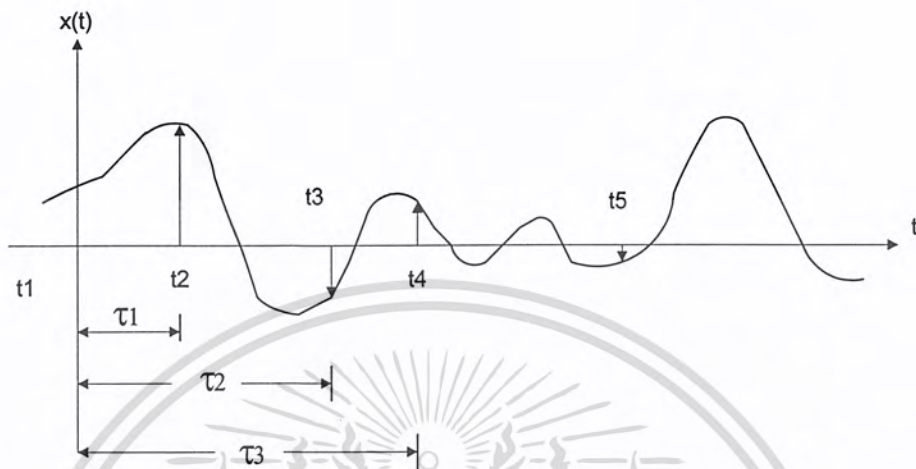
ในกรณีที่  $x(t)$  กับ  $y(t)$  ไม่มีส่วนสัมพันธ์ในเชิงสถิติจะได้  $p_2(x_1, t_1; y_2, t_2) = p_x(x_1, t_1)p_y(y_2, t_2)$  ซึ่งจะทำให้สมการ (5.10) เขียนได้เป็น

$$R_{xy}(t_1, t_2) = E[x_1]E[y_2] \quad (5.11)$$

ในลำดับต่อไปจะเป็นการพิจารณาค่าเฉลี่ยเชิงเวลาของ  $x(t)$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันตัวอย่างอันหนึ่งในเอ็นเซมเบิล ถ้าให้  $x_1, x_2, \dots, x_n$  เป็นค่า  $x(t)$  ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา  $t_1, t_2, \dots, t_n$  ตามลำดับ เราจะสามารถหาค่าเฉลี่ยเชิงเวลาของ  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  ได้โดยการรักษาระยะห่างระหว่าง  $t_1, t_2, \dots, t_n$  ดังนี้

$$\langle f(x_1, x_2, \dots, x_n) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x(t), x(t+\tau_1), \dots, x(t+\tau_{n-1})) dt \quad (5.12)$$

รูปที่ 5.2 แสดงตัวอย่างภาพการคิดค่าเฉลี่ยเชิงเวลาของสัญญาณเรณดัมอันหนึ่งในเอ็นเซมเบิล สำหรับฟังก์ชัน  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  นั้นอาจจะเป็น  $x$ ,  $x^2$ ,  $x_1 x_2$  หรือฟังก์ชันอื่น ๆ ก็ได้กรณีที่  $f(x) = x < x >$  ก็จะเป็นค่าเฉลี่ยเชิงเวลาของสัญญาณและถ้า  $f(x) = x^2 < x^2 >$  ก็จะเป็นค่าเฉลี่ยเชิงเวลาของกำลังของสัญญาณเรณดัมนั้น



รูปที่ 5.2 ภาพแสดงการคิดค่าเฉลี่ยเชิงเวลาของสัญญาณแรนดัมอันหนึ่งในเอ็นเซมเบิล

### 5.3 คุณสมบัติเฉพาะบางประการของเอ็นเซมเบิลของสัญญาณแรนดัม

จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าในกรณีของเอ็นเซมเบิลที่ไม่มีคุณสมบัติบางประการที่จะกล่าวต่อไปนี้ พรอบะบิลิตีฟังก์ชันก็ดี ค่าเฉลี่ยของเอ็นเซมเบิลในรูปต่าง ๆ ก็ดีจะเป็นฟังก์ชันของเวลาหมด ซึ่งในสภาพเช่นนี้การจัดการสัญญาณแรนดัมทำได้ลำบากมาก อย่างไรก็ตามสัญญาณแรนดัมที่เราใช้ในการสื่อสาร หรือสัญญาณที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสารนั้นมักจะสร้างเอ็นเซมเบิลที่มีคุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญ 2 ประการคือ เป็นสเตชันนารี (stationary) และเป็นเออร์กอดิก (ergodic) ซึ่งคุณสมบัติทั้ง 2 ประการนี้มีความหมายต่อไปนี้ ก่อนอื่นคุณสมบัติของเอ็นเซมเบิลที่เป็นแบบสเตชันนารีนั้นเมื่อพิจารณาที่พรอบะบิลิตีเคนซิติฟังก์ชัน ถ้าเราให้  $x_1, x_2, \dots, x_n$  เป็นสัญญาณแรนดัมที่เกิดขึ้นที่เวลา  $t_1, t_2, \dots, t_n$  ตามลำดับ จอณฑ์พรอบะบิลิตีฟังก์ชัน  $p_n(x_1, t_1; x_2, t_2; \dots; x_n, t_n)$  จะขึ้นกับผลต่างของ  $t$  เท่านั้นซึ่งจะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$p_n(x_1, t_1; x_2, t_2; \dots; x_n, t_n) = p_n(x_1, 0; x_2, t_2 - t_1; \dots; x_n, t_n - t_1) \quad (5.13)$$

กระบวนการแรนดัมที่มีคุณสมบัติตามสมการ (5.13) นี้เรียกว่าคุณสมบัติสเตชันนารี จอณฑ์พรอบะบิลิตีเคนซิติฟังก์ชันทางขวามือของสมการ (5.13) อาจเขียนได้เป็น  $p_n(x_1; x_2, t_2 - t_1; x_3, t_3 - t_1; \dots; x_n, t_n - t_1)$  และกรณีที่  $n = 1$   $p_1(x, t) = p(x)$  เพราะพรอบะบิลิตีเคนซิติฟังก์ชันจะไม่ขึ้นกับค่าสัมบูรณ์ของ  $t$  แต่จะขึ้นกับค่าผลต่างของ  $t$  เท่านั้นในเอ็นเซมเบิลของกระบวนการแรนดัมแบบนี้ ถ้าเราเปลี่ยนเวลาจาก  $t$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น  $t + \tau$  คือเลื่อนเวลาออกไป  $\tau$  สัญญาแรนดัมอันหนึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นสัญญาแรนดัมอีกอันหนึ่งในเอ็นเซมเบิลเดียวกัน ถึงแม้การเลื่อนเวลาจะทำให้สัญญาแรนดัมเปลี่ยนไปมาแต่เมื่อมองจากเอ็นเซมเบิลโดยรวมแล้ว จะเห็นได้ว่าไม่มีความเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ซึ่งในลักษณะดังกล่าวนี้ก็คือความหมายที่แท้จริงของคุณสมบัติที่เป็นสแตชันนารีของกระบวนการแรนดัม

ในกรณีของกระบวนการแรนดัมที่เป็นสแตชันนารี ค่าเฉลี่ยของเอ็นเซมเบิลที่นิยามไว้ในสมการที่ (5.5) ก็จะไม่ขึ้นกับเวลาและเขียนได้เป็น

$$\overline{x(t)} = E[x(t)] = \bar{x} = m_1 \quad (5.14)$$

นอกจากนี้ออโตคอร์รีเลชันฟังก์ชันที่นิยามไว้ในสมการ (6) ก็จะขึ้นอยู่กับผลต่างของ  $t_2$  กับ  $t_1$  เท่านั้นถ้าให้  $\tau = t_2 - t_1$  สมการ (9) เขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_1 x_2 p_2(x_1; x_2, \tau) dx_1 dx_2 \\ &= E[x(t)x(t+\tau)] \end{aligned} \quad (5.15)$$

สมการ (5.15) นี้คล้ายคลึงกับออโตคอร์รีเลชันของสัญญาที่นิยามไว้ในสมการ (5.12) หัวข้อที่ผ่านมามากกว่าในกรณีที่  $x(t)$  เป็นค่าไม่ต่อเนื่องการอินทิเกรตก็จะเปลี่ยนไปเป็นผลบวกไป ในกรณีที่  $\tau = 0$   $R(0)$  ก็จะแสดงค่ากำลังสองเฉลี่ยของเอ็นเซมเบิล ออโตคอร์รีเลชันฟังก์ชันจะมีคุณสมบัติทำนองเดียวกับออโตคอร์รีเลชันที่กล่าวมาดังนี้

$$R(0) = E[x^2(t)] \quad (5.16a)$$

$$|R(\tau)| \leq R(0) \quad (5.16b)$$

$$R(-\tau) = R(\tau) \quad (5.16c)$$

ในกรณีของครอสคอร์รีเลชันที่นิยามไว้ในสมการที่ (5.10) นั้นเงื่อนไขของสแตชันนารีก็จะเป็นฟังก์ชันของผลต่างระหว่าง  $t_2$  กับ  $t_1$  เช่นเดียวกันถ้าให้  $t_2 - t_1 = \dots R_{xy}(t_1, t_2)$  จะเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{xy} = E[\{x(t)y(t+\tau)\}] \quad (5.17)$$

อนึ่ง ถ้ากระบวนการเรณดัมนั้นมีเฉพาะค่าเฉลี่ยเอ็นเซ็มเบิล และค่าอโตคอรรัเลชันไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเราจะเรียกว่า มีคุณสมบัติเป็นสเดชันนารีในมมกว้าง (wide-sense stationary)

ในลำดับต่อไปจะกล่าวถึงคุณสมบัติเฉพาะของกระบวนการเรณดัมที่สำคัญประการที่สอง คือคุณสมบัติที่เป็นเออร์กอดิก คุณสมบัติที่เป็นเออร์กอดิกนี้เป็นคุณสมบัติที่ค่าเฉลี่ยของเอ็นเซ็มเบิลเท่ากับค่าเฉลี่ยเชิงเวลาของสัญญาณเรณดัมใด ๆ ในเอ็นเซ็มเบิลนั้นหรือเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\langle x(t) \rangle = E[x(t)] \quad (5.18)$$

คุณสมบัติที่เป็นเออร์กอดิกนี้อาจอธิบายได้โดยใช้รูปที่ 5.1 ได้ดังนี้ สัญญาณเรณดัม  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ , ...,  $x_n(t)$  เป็นเซทของสัญญาณเรณดัมที่ประกอบกันเป็นเอ็นเซ็มเบิล การที่ค่าเฉลี่ยเชิงเวลาของสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งเช่น  $x_1(t)$  มีค่าเฉลี่ยเอ็นเซ็มเบิลที่เวลา  $t$  ใด ๆ ก็หมายความว่า สัญญาณเรณดัม  $x_1(t)$  นั้นจะเป็นตัวแทนของเอ็นเซ็มเบิลนั้นได้ คุณสมบัติที่เป็นเออร์กอดิกจึงให้ความสะดวกอย่างยิ่งในการวิเคราะห์สัญญาณเรณดัม

เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติที่เป็นสเดชันนารี กับคุณสมบัติที่เป็นเออร์กอดิก จะพบว่าเอ็นเซ็มเบิลที่เป็นเออร์กอดิกจะต้องเป็นสเดชันนารีด้วย แต่เอ็นเซ็มเบิลที่เป็นสเดชันนารีไม่ได้รับประกันการเป็นเออร์กอดิกเสมอไป

คุณสมบัติที่เป็นเออร์กอดิกนี้นอกจากจะทำให้ค่าเฉลี่ยเอ็นเซ็มเบิลและค่าเฉลี่ยเชิงเวลาเท่ากันดังสมการ (18) แล้ว ยังทำให้ค่าเฉลี่ยอื่น ๆ ที่นิยามไว้ตอนต้นเท่ากันดังนี้

$$\langle x^2(t) \rangle = E[x^2(t)] \quad (5.19ก)$$

$$\langle (x(t)-m)^2 \rangle = E[(x-m)^2] = \sigma^2 \quad (5.19ข)$$

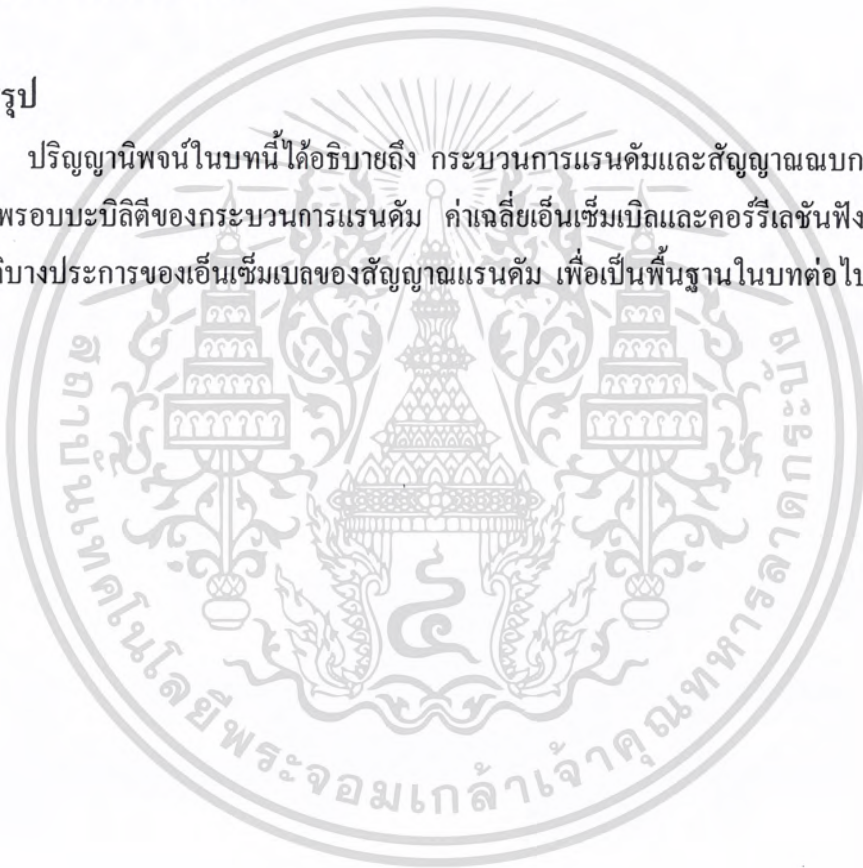
$$\langle (x_1-m)(x_2-m) \rangle = E[\{x(t)-m\}\{x(t+\tau)-m\}] = C(\tau) \quad (5.19ค)$$

$$\langle x_1x_2 \rangle = E[x(t)x(t+\tau)] = R(\tau) \quad (5.19ง)$$

ตัวอย่างของสัญญาแรมคัมที่มีคุณสมบัติเออร์กอติกก็ได้แก่ สัญญารูปโฉนที่มีเฟสไม่แน่นอนที่นิยามไว้ สัญญาในกระบวนการเกาส์เซียนแบบสเตชันนารี และสัญญารบกวนแบบช็อคนอยส์ซึ่งอยู่ในข่ายของกระบวนการพัชองเป็นต้นอย่างไรก็ตามไม่มีวิธีการทดสอบแบบง่าย ๆ ที่บ่งบอกได้ว่ากระบวนการแรมคัมใด ๆ มีคุณสมบัติเออร์กอติกหรือไม่ ดังนั้นโดยทั่วไปเราจะถือว่ากระบวนการแรมคัมที่มีคุณสมบัติสเตชันนารีจะมีคุณสมบัติเออร์กอติกด้วย หรือถ้าเราสามารถอ้างได้ว่าสัญญาแรมคัมตัวอย่างสามารถเป็นตัวแทนของเอ็นเซมเบิลได้ก็จะถือว่ากระบวนการแรมคัมนั้นเป็นเออร์กอติกได้

#### 5.4 สรุป

ปริปัญหานี้พจน์ในบทนี้ได้อธิบายถึง กระบวนการแรมคัมและสัญญาณบวกรต่าง ๆ การคิดค่าพหุคูณบิลิตีของกระบวนการแรมคัม ค่าเฉลี่ยเอ็นเซมเบิลและคอรีเลชันฟังก์ชัน และคุณสมบัติบางประการของเอ็นเซมเบิลของสัญญาแรมคัม เพื่อเป็นพื้นฐานในบทต่อไป



## บทที่ 6

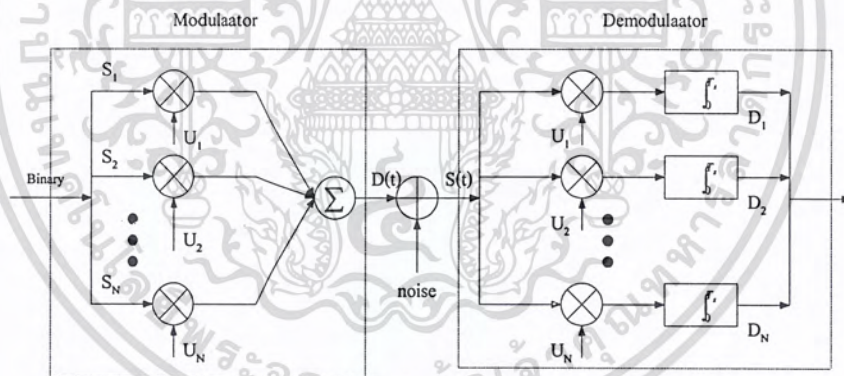
# การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการสื่อสารข้อมูลผ่านดาวเทียม

### 6.1 กล่าวนำ

ปริญญานิพนธ์ในบทนี้ได้กล่าวถึง การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการสื่อสารข้อมูลผ่านดาวเทียม โดยอธิบายถึงผลตอบสนองของการคิโมอคูเลทเตอร์แบบคอร์รีเลชัน ในกรณีที่มีสัญญาณคิโมอคูเลท ที่เข้ามาที่มีสัญญาณรบกวนมาด้วย จากนั้นจึงอธิบายถึงวิธีการประเมินอัตราการผิดพลาดในระบบการมอดูเลทแบบ BPSK และ QPSK ในกรณีสัญญาณรบกวนเป็นแบบเกาส์เซียน และ ลีคอนอลมอล

### 6.2 ผลตอบสนองของคิโมอคูเลทเตอร์แบบคอร์รีเลชัน

จากทฤษฎีการมอดูเลทและคิโมอคูเลทพื้นฐานที่ได้อธิบายไปแล้วบทที่ 3 สามารถแสดงแบบจำลองการมอดูเลทและคิโมอคูเลทในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วยดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงแบบจำลองการมอดูเลทและคิโมอคูเลทในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนรวมเข้ามาทั้งสัญญาณมอดูเลท

จากรูปที่ 6.1 พิจารณาสัญญาณที่ได้รับทางคิโมอคูเลทเตอร์ ในช่วง  $0 \leq t \leq T$

$$D(t) = s(t) + W(t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (6.1)$$

โดยที่  $D(t)$  คือฟังก์ชันของสัญญาณที่คิโมอคูเลทได้รับ

$s(t)$  คือฟังก์ชันของสัญญาณมอดูเลทที่ออกจากมอดูเลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$W(t)$  คือฟังก์ชันของสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณ  
จากพื้นฐานของสัญญาณที่รับได้ตามสมการที่ (6.1) เมื่ออุปกรณ์รับเป็นวงจรมอดูเลทแบบคอร์รีเลชัน ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2 จะได้ว่า

$$D_n = \int_0^{T_s} D(t) U_n(t) dt \quad (6.2)$$

$$= \int_0^{T_s} [s(t) + W(t)] U_n(t) dt \quad (6.3)$$

$$= \int_0^{T_s} s(t) U_n(t) dt + \int_0^{T_s} W(t) U_n(t) dt \quad (6.4)$$

$$= s_n + W_n \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (6.5)$$

โดยที่  $U_n(t)$  คือฟังก์ชันฐานของวงจรมอดูเลท  
 $s_n$  คือระดับของสัญญาณ  $s(t)$  เมื่อผ่านวงจรมอดูเลทแบบคอร์รีเลชันที่มีฟังก์ชันฐานเป็น  $U_n(t)$   
 $W_n$  คือระดับของสัญญาณรบกวน  $W(t)$  เมื่อผ่านวงจรมอดูเลทแบบคอร์รีเลชันที่มีฟังก์ชันฐานเป็น  $U_n(t)$   
 $T_s$  คือคาบของสัญญาณในหนึ่งรูปคลื่น

ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของ  $s_n$  และ  $W_n$  ได้ดังนี้

$$s_n = \int_0^{T_s} s(t) U_n(t) dt \quad (6.6)$$

$$W_n = \int_0^{T_s} W(t) U_n(t) dt \quad (6.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (6.1) - (6.7) จะเห็นว่าเมื่อรวมฟังก์ชันของสัญญาณรบกวน ( $W(t)$ ) กับสัญญาณมอดูเลต ( $s(t)$ ) แล้ว ฟังก์ชันดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงตามฟังก์ชันของสัญญาณรบกวนไปด้วย ดังนั้นเมื่อนำ  $D(t)$  มาตีมอดูเลตแบบคอรีเลชันระดับสัญญาณเอาท์พุทของคิมอดูเลต  $D_n$  จึงกลายเป็นตัวแปรสุ่มซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตาม  $W_n$

ถ้ากำหนดให้สัญญาณรบกวน  $W(t)$  เป็นสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ทำให้  $W_n$  ตามสมการที่ (6.7) ย่อมมีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย ดังนั้นการหาค่าเฉลี่ยเอาท์พุทของคิมอดูเลตเทอร์แบบคอรีเลชันจึงขึ้นอยู่กับค่า  $s_n$  เท่านั้น

$$E[D_n] = E[s_n + W_n] \quad (6.8)$$

$$= s_n + E[W_n] \quad (6.9)$$

$$= s_n \quad (6.10)$$

และสามารถหาค่าแวนรียวนของ  $D_n$  ได้ดังนี้

$$\sigma_{D_n}^2 = E[(D_n - s_n)^2] \quad (6.11)$$

$$= E[W_n^2] \quad (6.12)$$

แทนค่าสมการที่ (6.7) ลงในสมการที่ (6.12) จะได้

$$\sigma_{D_n}^2 = E \left[ \int_0^{T_b} W(t) U_n(t) dt \int_0^{T_b} W(t') U_n(t') dt' \right] \quad (6.13)$$

$$= E \left[ \int_0^{T_b} \int_0^{T_b} U_n(t) U_n(t') W(t) W(t') dt dt' \right] \quad (6.14)$$

$$= \int_0^{T_b} \int_0^{T_b} U_n(t) U_n(t') E[W(t) W(t')] dt dt' \quad (6.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} U_n(t) U_n(t') R_w(t, t') dt dt' \quad (6.16)$$

โดยที่  $R_w(t, t')$  คือค่าฟังก์ชันออร์โทกอร์รัลเลชันของสัญญาณรบกวน

เมื่อสัญญาณรบกวน  $(W(t))$  เป็นกระบวนการสุ่มแบบเกาส์เซียน ดังนั้นความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังจะมีค่าเท่ากับ  $N_0/2$  และสามารถแสดง  $R_w(t, t')$  ได้ดังนี้

$$R_w(t, t') = \frac{N_0}{2} \delta(t - t') \quad (6.17)$$

โดยที่  $\delta(t - t')$  คือเดลต้าฟังก์ชัน

เมื่อแทนค่าสมการ (6.17) ลงใน (6.16) จะได้

$$\sigma_{D_n}^2 = \frac{N_0}{2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} U_n(t) U_n(t') \delta(t - t') dt dt' \quad (6.18)$$

$$= \frac{N_0}{2} \int_0^{T_s} U_n^2(t) dt \quad (6.19)$$

$$= \frac{N_0}{2} \quad (6.20)$$

จากสมการที่ (6.20) แสดงให้เห็นว่าเอาต์พุตของคีมอดูเลทแบบคอร์รัลเลชัน  $D_n$  จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง  $N_0/2$  ของ AWGN

กำหนดให้  $\mathbf{D}$  คือเวกเตอร์ของสัญญาณเอาต์พุตของคอร์รัลเลเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรสุ่ม  $N$  ตัว  $\{D_1, D_2, \dots, D_N\}$  โดยที่ตัวแปรสุ่มแต่ละตัวจะมีความเป็นอิสระเชิงสถิติต่อกัน และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $s_n$  และเวรียนมีค่าเท่ากับ  $N_0/2$  ซึ่งจากข้อกำหนดนี้สามารถแสดงฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขของเวกเตอร์  $\mathbf{D}$  ที่ได้รับเนื่องจากการส่งสัญญาณ  $B$  ได้ดังต่อไปนี้

$$P_D(\mathbf{D} | B) = \prod_{n=1}^N P_{D_n}(D_n | B) \quad (6.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $D$  คือเวกเตอร์ของสัญญาณเอาต์พุตของคอร์รีเลเตอร์

$B$  คือสัญญาณที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิด

จากสมการที่ (6.21) เรียกฟังก์ชัน  $P_D(D | B)$  ว่าฟังก์ชันแบบไลค์ลิฮูด (Likelihood Function) และเรียกช่องสัญญาณที่ทำให้สมการที่ (6.21) เป็นจริงว่าช่องสัญญาณแบบไม่มีหน่วยความจำ (Memoryless Channel) จากข้อกำหนดที่ให้  $D_n$  เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบเกาส์เซียนที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $s_n$  และแวนเรียนเท่ากับ  $N_0/2$  จะได้ว่า

$$P_{D_n}(D_n|B) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp \left[ -\frac{(D_n - s_n)^2}{N_0} \right] \quad (6.22)$$

โดยที่  $n = 1, 2, \dots, N$

แทนค่าสมการที่ (6.22) ลงในสมการที่ (6.21) จะได้

$$P_D(D | B) = (\pi N_0)^{-N/2} \exp \left[ -\frac{\sum_{n=1}^N (D_n - s_n)^2}{N_0} \right] \quad (6.23)$$

### 6.3 การประเมินอัตราส่วนการเกิดผิดพลาดในการมอดูเลตแบบโคฮีเรนท์ BPSK

#### 6.3.1 อัตราการเกิดผิดพลาดจากการตัดสินใจในระบบของการมอดูเลตแบบ BPSK

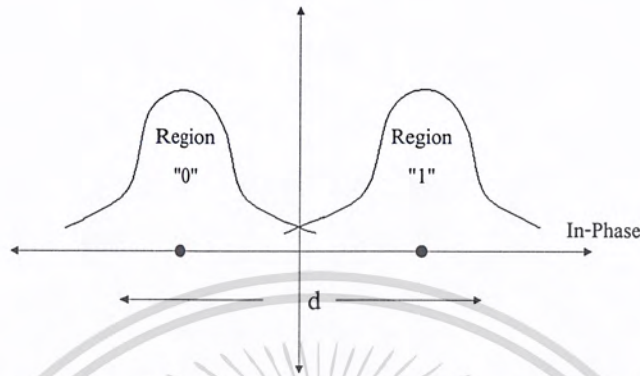
จะต้องทราบถึงความน่าจะเป็นของการเกิดสัญญาณดิจิทัลแบบเบสแบนด์ ซึ่งความน่าจะเป็นจะเป็นในการเกิดบิต "0" และบิต "1" จะมีค่าเท่ากันคือ 0.5 และฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ค่าแวนเรียนเท่ากับ  $N_0/2$  จากสมการที่ (6.22) สามารถอธิบายถึงฟังก์ชันแบบไลค์ลิฮูดเมื่อสัญญาณบิต "0" ถูกส่งได้ดังนี้

$$P_e = 1 - \frac{1}{2} \left[ \int_{-d/2}^{\infty} P_{D_1}(D_1 | "1") dx + \int_{-\infty}^{d/2} P_{D_1}(D_1 | "0") dx \right] \quad (6.24)$$

$$= 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \int_{-d/2}^{\infty} \exp \left( \frac{-D_1^2}{N_0} \right) dD_1 \quad (6.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (6.24) และ (6.25) สามารถแสดงการกระจายตัวของฟังก์ชันแบบโลคัลลิสต์ของทั้งสองสัญญาณได้ดังรูป



รูป 6.2 การกระจายตัวความน่าจะเป็นของฟังก์ชันแบบโลคัลลิสต์ ของสัญญาณ

จากรูปที่ 6.2 สามารถหาค่ากำลังของกำลังสัญญาณเฉลี่ยได้ โดยใช้ความสัมพันธ์

$$P_{av} = \frac{S^2}{2} \quad (6.26)$$

$$= \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} = \frac{d^2}{8} \quad (6.27)$$

โดยที่  $P_{av}$  คือกำลังของสัญญาณพาหะเฉลี่ย

$S$  คือระดับสัญญาณของคลื่นพาหะ (ในกรณีนี้ มีค่าเท่ากับ  $d/2$ )

$D$  คือระยะห่างที่สั้นที่สุดระหว่างสัญญาณ

จากรูปที่ 6.2 จะเห็นว่าการตัดสินใจจะใช้ขอบเขตระยะทางเป็นหลัก โดยค่าเทรชโฮลด์ ( $T_h$ ) ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการแบ่งพื้นที่ เพื่อการตัดสินใจจะมีค่าเท่ากับ  $d/2$  โดยถ้า  $T_h \geq d/2$  จะตัดสินใจเป็นสัญญาณบิต “1” และถ้า  $T_h \leq d/2$  จะตัดสินใจเป็นสัญญาณบิต “0” ดังนั้นความผิดพลาดในการตัดสินใจจึงสามารถเกิดได้เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่แทรกสอดเข้ามา จนทำให้ระดับสัญญาณ  $D_1$  ตกอยู่ในพื้นที่ๆ ผิดพลาดไป เรียกความผิดพลาดดังกล่าวว่า “ความผิดพลาดของการตรวจจับสัญญาณ” โดยสามารถแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_c = 1 - \frac{1}{2} \left[ \int_{-d/2}^{\infty} P_{D_1}(D_1 | "1") dx + \int_{-\infty}^{d/2} P_{D_1}(D_1 | "0") dx \right] \quad (6.28)$$

$$= 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \int_{-d/2}^{\infty} \exp\left(\frac{-D_1^2}{N_0}\right) dD_1 \quad (6.29)$$

กำหนดให้  $Z = \frac{D_1}{\sqrt{N_0}}$  และ  $\text{erfc}(D_1) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{D_1}^{\infty} \exp(-Z^2) dt$

$$= 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-d/2\sqrt{N_0}}^{\infty} \exp(Z^2) dZ \quad (6.30)$$

$$= 1 - \frac{1}{2} \text{erfc}\left(-\frac{d}{2\sqrt{N_0}}\right) \quad (6.31)$$

จากสมการที่ (6.23) จะได้ว่า

$$= 1 - \frac{1}{2} \text{erfc}\left(-\sqrt{\frac{P_{av}}{2N_0}}\right) \quad (6.32)$$

$$= 1 - \frac{1}{2} \text{erfc}\left(-\sqrt{\frac{\text{CNR}}{2}}\right) \quad (6.33)$$

โดยที่  $\text{CNR} = P_{av}/N_0$

จากสมการที่ (6.33) เนื่องจากการมอดูเลตแบบ BPSK ดังนั้นอัตราการเกิดสัญญาณผิดพลาดจึงมีค่าเท่ากับอัตราการเกิดบิตผิดพลาด

## 6.4 การประเมินอัตราการเกิดบิตผิดพลาดในระบบการมอดูเลตแบบโคฮีเรนซ์ QPSK

### 6.4.1 อัตราการเกิดบิตผิดพลาดจากสัญญาณรบกวน AWGN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณมอดูเลตแบบ QPSK สามารถเขียนสมการดังกล่าวได้ดังนี้

$$S(t) = A_1 \cos 2\pi f_c t + A_0 \sin 2\pi f_c t \quad (6.34)$$

โดยที่  $A_1$  และ  $A_0$  มีค่าเท่ากับ  $\pm 1$

สามารถแสดงคอนสเทเลชันไดอะแกรมได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.3 คอนสเทเลชันไดอะแกรมของสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแบบ QPSK

จากรูปที่ 6.2 สามารถหาค่ากำลังของสัญญาณเฉลี่ยได้โดยใช้ความสัมพันธ์

$$P_{av} = \frac{S^2}{2} \quad (6.35)$$

$$= \left[ \left[ \frac{d}{2} \right]^2 + \left[ \frac{d}{2} \right]^2 \right] \cdot \frac{1}{2} \quad (6.36)$$

$$= \frac{d^2}{4} \quad (6.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $P_{av}$  คือกำลังของสัญญาณพาหะเฉลี่ย  
 $S$  คือเอนเวโลปของสัญญาณพาหะ  
 $d$  คือระยะห่างที่สั้นที่สุดระหว่างสัญลักษณ์

และในกรณีที่ความน่าจะเป็นในการส่งสัญลักษณ์ทั้งสี่แบบมีค่าเท่ากัน จะสามารถประเมินอัตราการเกิดสัญลักษณ์ผิดพลาดได้ดังต่อไปนี้

$$P_e = 1 - \int_{-d/2}^{\infty} P_{D_1}(D_1 | "00") dx \int_{-d/2}^{\infty} P_{D_2}(D_2 | "00") dy \quad (6.38)$$

$$= 1 - \frac{1}{\pi N_0} \int_{-d/2}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{N_0}\right) dx \int_{-d/2}^{\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{N_0}\right) dy \quad (6.39)$$

$$= 1 - \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-d/2\sqrt{N_0}}^{\infty} \exp(-z^2) dz \right] \quad (6.40)$$

$$= 1 - \frac{1}{4} \operatorname{erfc}^2\left(-\frac{d}{2\sqrt{N_0}}\right) \quad (6.41)$$

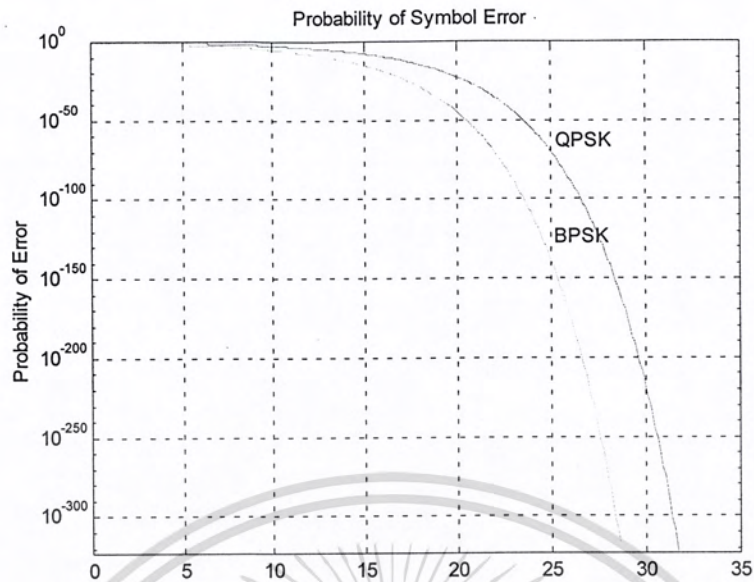
จากสมการที่ (3.37) จะเห็นว่า

$$= 1 - \frac{1}{4} \operatorname{erfc}^2\left(-\sqrt{\frac{P_{av}}{N_0}}\right) \quad (6.42)$$

$$= 1 - \frac{1}{4} \operatorname{erfc}^2(-\sqrt{\text{CNR}}) \quad (6.43)$$

โดยที่  $\text{CNR} = P_{av}/N_0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 เปรียบเทียบของความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาด ของ BPSK และ QPSK

จากรูปที่ 6.4 จะเห็นว่ากำลังในส่งสัญญาณเท่ากันและย่านความถี่เท่ากัน อัตราการผิดพลาดในกรณี QPSK จะสูงกว่ากรณี BPSK แต่จำนวนข่าวสารที่ส่งในกรณีจะมากกว่ากรณี BPSK ถึงสองเท่า

## 6.5 สรุป

ปฏิญานี้ฉบับนี้ได้อธิบายถึง การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและเปรียบเทียบของการสื่อสารข้อมูลผ่านดาวเทียม ซึ่งจะกำหนดให้ใช้เทคนิคการมอดูเลตสองแบบ BPSK และ QPSK ในสถานะแวดล้อมที่ประกอบด้วยสัญญาณรบกวนซินเทเลชั่น แบบ AWGN

## บทที่ 7

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 7.1 กล่าวนำ

ในบทต่าง ๆ ที่ผ่านมาได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการสื่อสารผ่านดาวเทียมทั้งแบบ C-Band และ Ku - Band และแบบจำลองของการเกิดปรากฏการณ์ ซินทิเลชั่น มาบ้างพอสมควรแล้ว สำหรับในบทนี้จะนำทฤษฎีต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นมาใช้ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพและผลกระทบของการเกิดปรากฏการณ์ ซินทิเลชั่น ที่กับสัญญาณจริง โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

ส่วนที่ 1. ขั้นตอนการเก็บรวบรวมสัญญาณดาวเทียม

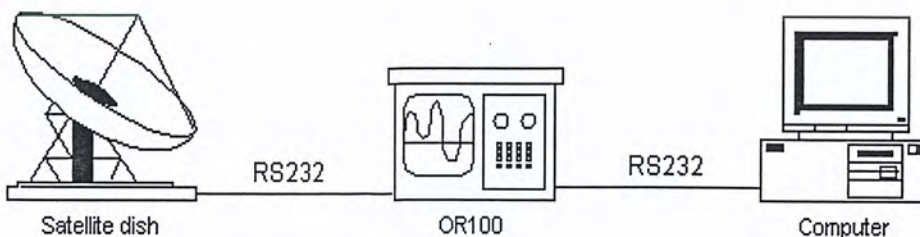
ส่วนที่ 2. วิธีการและรูปแบบในการวิเคราะห์สัญญาณที่เกิดปรากฏการณ์ ซินทิเลชั่น

#### 7.2 การเก็บและการบันทึกรวบรวมสัญญาณดาวเทียม

การเก็บและการรวบรวมสัญญาณดาวเทียมเป็น การเก็บรวบรวมสัญญาณในส่วนของสัญญาณดาวเทียมแบบ C - Band และ Ku - Band พร้อมกัน โดยจะเก็บรวบรวมสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบของ แรงดัน (โวลท์) ก่อนแล้วจึงนำมาเปลี่ยนเป็น เดซิเบล ในภายหลังจากนั้นจึงทำการเก็บรวบรวมสัญญาณดาวเทียมในรูปแบบของเดซิเบลเพื่อนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาการเกิดปรากฏการณ์ ซินทิเลชั่น ในสัญญาณดาวเทียมต่อไป

##### 7.2.1 การเก็บรวบรวมสัญญาณดาวเทียม

การเก็บและรวบรวมสัญญาณดาวเทียมจะทำการเก็บและรวบรวม สัญญาณดาวเทียมจากดาวเทียม THAICOM 2 ซึ่งเป็นสัญญาณดาวเทียมซึ่งได้จากจานรับ สัญญาณดาวเทียมเป็นสัญญาณช่วง ขาลง ( Downlinks ) โดยสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



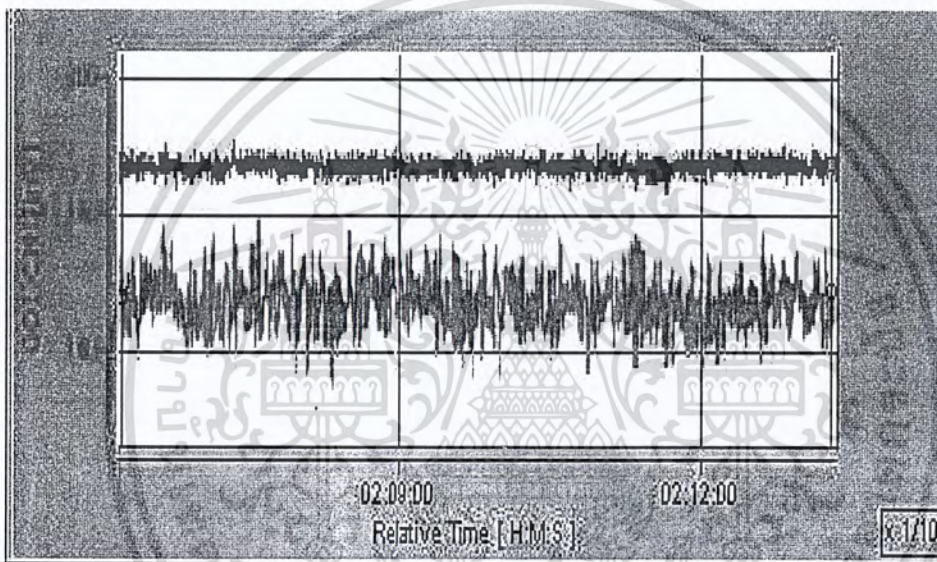
รูปที่ 7.1 แสดงวิธีการเก็บรวบรวมสัญญาณดาวเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ที่ใช้การรวบรวมประกอบด้วย

1. เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม
2. เครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียม OR100
3. คอมพิวเตอร์

สำหรับการเก็บข้อมูลในช่วง C – Band และ Ku – Band จะเก็บรวบรวมข้อมูลตลอด 24 ชั่วโมงของทุกวันโดยเครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียม OR100 หลังจากนั้นจะสามารถคัดเลือกสัญญาณดาวเทียมที่เกิดปรากฏการณ์ ซินทิเลชั่น แล้วจึงนำสัญญาณที่เกิดปรากฏการณ์ ซินทิเลชั่น ที่เครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียม OR100 ซึ่งสัญญาณจะอยู่ในรูปของแรงดัน (Voltage) ดังรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 แสดงสัญญาณที่บันทึกได้จากเครื่อง OR100

### 7.3 ลักษณะของสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างกะทันหัน (Scintillation)

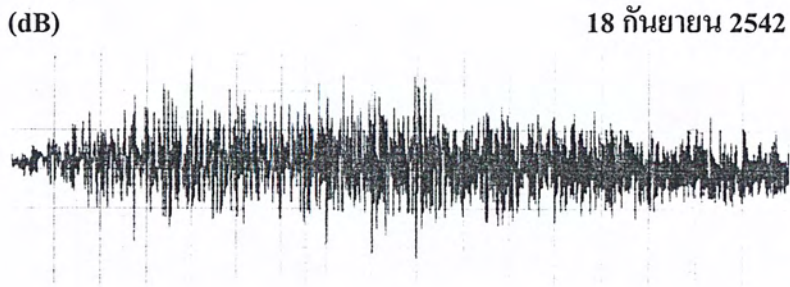
(dB)

16 กันยายน 2542



รูปที่ 7.3 (ก) ลักษณะของระดับสัญญาณปกติที่รวบรวมได้

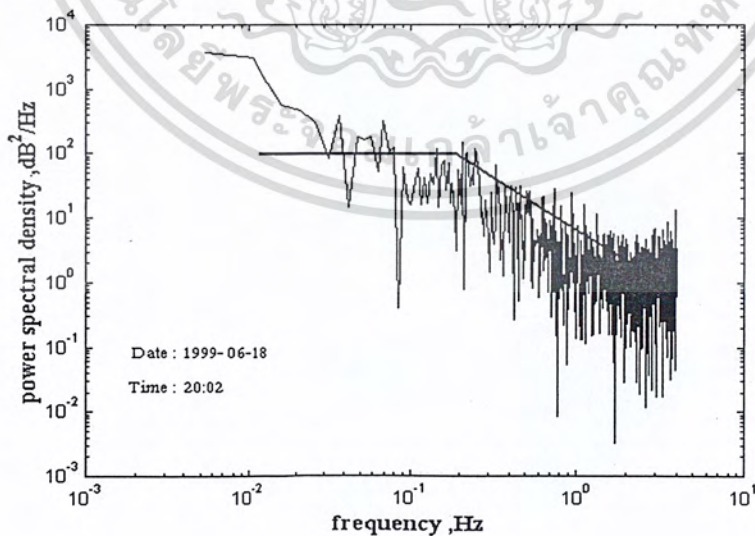
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.3 (ข) ลักษณะของสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างกะทันหัน (Scintillation)

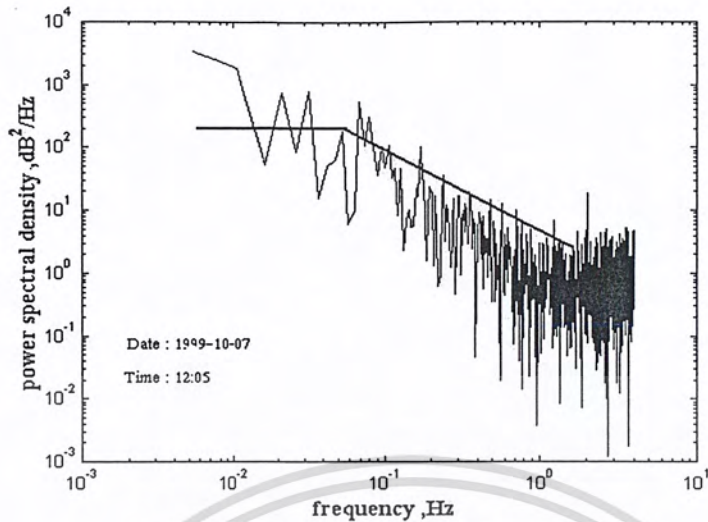


รูปที่ 7.3 (ค) ลักษณะของสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน (Scintillation) ในขณะที่ฝนตก



รูปที่ 7.4 (ก) แสดง Power Spectral Density ขณะท้องฟ้าแจ่มใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.4 (ข) แสดง Power Spectral Density ขณะฝนตก

Model	OR-Series	
Sample Rate	95/s	
Data Length	64000	
Trigger Point	0	
Trigger Time	2000-03-18 01:20:18	
Tag	CH1	CH3
Unit	mV	mV
0	139.6	196.9
1	138.3	197.7
2	141.0	195.0
3	140.6	195.9
4	141.7	197.3
5	141.3	196.4
6	140.9	197.4

รูปที่ 7.5 แสดงการบันทึกสัญญาณดาวเทียมโดยใช้โปรแกรม ไมโครซอฟท์เอกซ์เซล

หลังจากนั้นจะนำสัญญาณที่ทรานส์เฟอร์มาจากเครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียม OR100 ในรูปของแรงดัน (โวลต์) มาเปลี่ยนจากโวลต์ให้เป็นเดซิเบล (dB) โดยใช้สูตร

$$\text{dB} = 20 \log \frac{V_0}{V_{in}} \quad (7.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 7.5 ซึ่งข้อมูลของสัญญาณดาวเทียมที่อยู่ในรูปของหน่วยเดซิเบลที่ได้นี้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์การเกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชันต่อไป

Model	OR-Series				
Sample Rate	85/s				
Data Length	84000				
Trigger Point	0				
Trigger Time	2000-05-15 10:34:43				
Tag	CH1	CH3			
Unit	mV	mV	C - Band	Ku - Band	
0	142.7	175.0	43.0893486	44.860761	
1	142.3	174.7	43.0832284	44.846568	
2	142.6	172.4	43.0806499	44.7321847	
3	143.1	174.3	43.1153934	44.8252361	
4	143.4	175.8	43.1327136	44.8890767	
5	143.1	176.7	43.1153934	44.9454329	
6	144.1	175.3	43.1758823	44.8749308	

รูปที่ 7.6 แสดงการเปลี่ยนแรงดัน (Voltage) ให้เป็นเดซิเบล

#### 7.4 วิธีการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ซินทิเลชันในสัญญาณดาวเทียม

ขั้นตอนการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ซินทิเลชัน ในสัญญาณดาวเทียมเพื่อวิเคราะห์ปรากฏการณ์ซินทิเลชันในสัญญาณดาวเทียมต้องคัดเลือกสัญญาณดาวเทียมที่เกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชัน โดยเราจะมีวิธีการคัดเลือกมาบันทึกและเก็บรวบรวมไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งเก็บไว้ในโปรแกรม ไมโครซอฟท์เอ็กเซล มาทำให้เป็นสัญญาณในรูปของค่า Standard Deviation (STD) โดยใช้สมการ เพื่อความสะดวกและรวดเร็วจะใช้ไมโครซอฟท์เอ็กเซลในการหาค่า Standard Deviation ซึ่งแสดงดังรูปที่ 7.7 เมื่อได้ค่า Standard Deviation จึงนำค่าที่ได้มาทำการพล็อตกราฟต่อไปซึ่งจะอยู่ในรูปของหน่วยเดซิเบลต่อไป

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1		CB	Ku		CB (dB)	Ku (dB)	wp-p (CB)	std (CB)	Vp_p (Ku)	std (Ku)		0.6471
2					44.3872	45.5161	1.57948	0.110731	0.264633	0.038609		
3					44.37221	45.50294	1.177899	0.18586	0.238711	0.040778		
4					44.4171	45.41025	1.161818	0.109948	0.252553	0.045138		
5					44.81811	45.50294	1.344673	0.109357	0.285899	0.043816		
6					44.4914	45.48635	1.18577	0.080931	0.292437	0.046136		
7					44.48918	45.48975	0.4227	0.079983	0.265442	0.047455		
8					44.48918	45.48995	0.440257	0.085636	0.283942	0.044993		
9					44.4469	45.48975	0.514979	0.090858	0.30295	0.050999		
10					44.45433	45.43019	0.589184	0.091477	0.322346	0.055009		
11					44.40216	45.45672	0.774576	0.139692	0.275974	0.05548		
12					44.43201	45.45009	0.90737	0.095109	0.348139	0.054109		
13					44.4469	45.52924	0.856737	0.11543	0.263429	0.045911		
14					44.48918	45.59184	0.79849	0.090865	0.258745	0.044339		

### รูปที่ 7.7 การหาค่า Standard Deviation โดยใช้ไมโครซอฟท์เอ็กเซล

## 7.5 วิธีการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นในสัญญาณดาวเทียมโดยใช้ทฤษฎีการกระจายเกาส์เซียน

จากสมการ

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_n^2}\right]$$

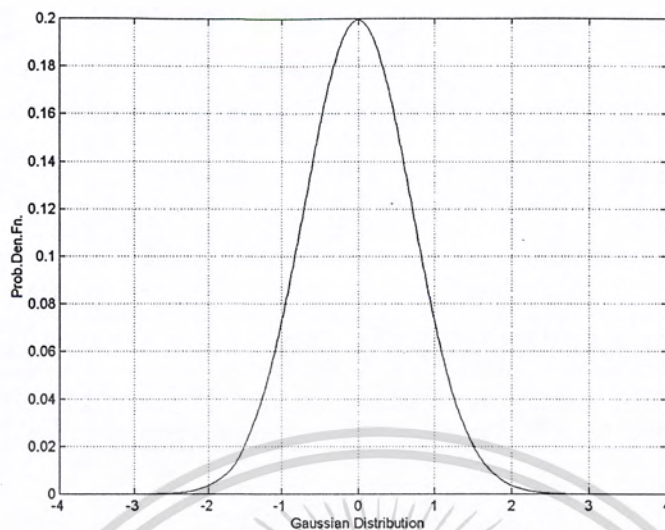
โดยที่  $m$  = ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม  $x$

$\sigma_n^2$  = ค่าแวนเรียนของตัวแปรสุ่ม  $x$

$x$  = คือตัวแปรสุ่มแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณรบกวน

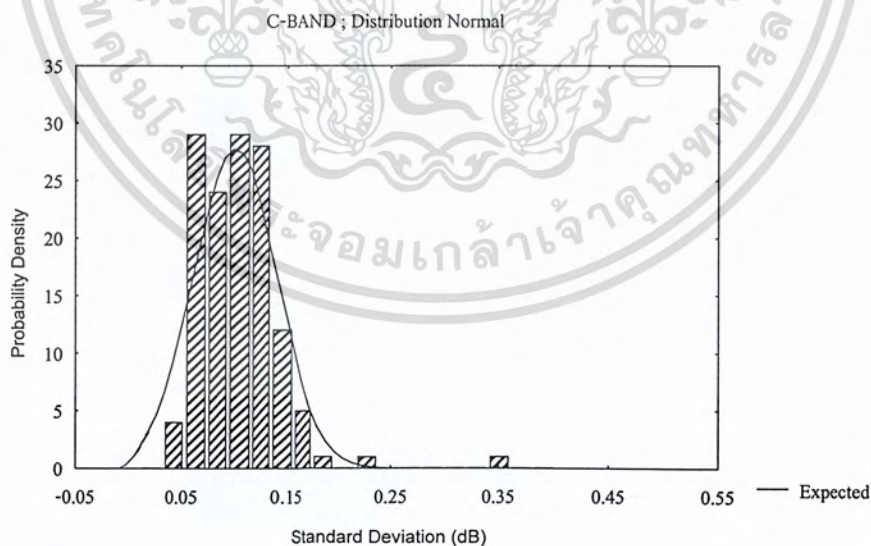
จากสมการมาตรฐานของเกาส์เซียนให้  $m=0$ ,  $\sigma=1$  ได้สัญญาณดังรูปที่ 7.8 และสัญญาณที่แปลงเป็นเดซิเบลจากไมโครซอฟท์เอ็กเซลมาทำการพล็อตกราฟโดยใช้สมการของเกาส์เซียนโดยสัญญาณที่ใช้พล็อตเป็นสัญญาณที่เกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นแสดงดังรูปที่ 7.9 เป็นสัญญาณดาวเทียม C - Band และรูปที่ 7.10 เป็นสัญญาณดาวเทียม Ku - Band

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.8 รูปแบบกราฟมาตรฐานของการกระจายแบบเกาส์เซียน

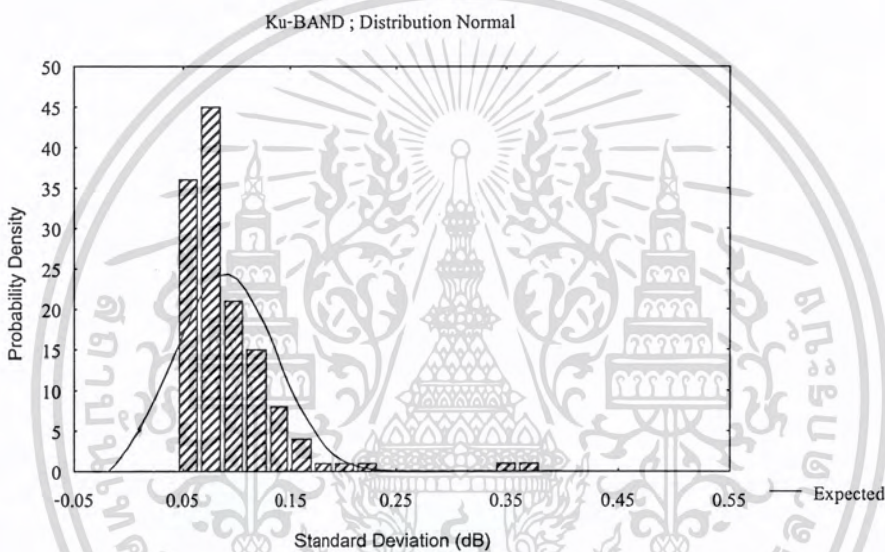
จากรูปที่ 7.8 จะเห็นว่ากราฟมาตรฐานของเกาส์เซียนเป็นรูปสมมาตรทั้งด้านบวกและด้านลบ โดยมีรูปทรงเหมือนระฆังคว่ำเมื่อสังเกตพบว่าคุณสมบัติที่สมมาตรทั้งด้านบวกและด้านลบของระดับแรงดันของสัญญาณ



รูปที่ 7.9 สัญญาณดาวเทียม C - Band พล็อตด้วยการกระจายแบบเกาส์เซียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 7.9 จากกราฟจะเห็นว่าสัญญาณที่พล็อตด้วยการกระจายแบบเกาส์เซียนในสัญญาณ C-Band จะมีความใกล้เคียงกับสัญญาณที่พล็อตได้จริงจากกราฟของฮิสโตแกรม (Histogram) ซึ่งเป็นผลจากสัญญาณจริงเมื่อพิจารณาในส่วนของ Probability Density จะเห็นว่าค่อนข้างมีความใกล้เคียงกัน เนื่องจากความถี่ในช่วง C - Band ซึ่งอยู่ในช่วง 4 - 6 GHz มีความถี่ที่ยังไม่สูงมาก และจะเห็นว่าค่ากลางของสัญญาณได้มีการเปลี่ยนแปลงจากที่มีค่าเท่ากับ 0 แต่ในสัญญาณจริงค่ากลางจะไม่เท่ากับ 0 ดังสมการ และค่าแอมพลิจูดก็จะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณที่รับมาได้



รูปที่ 7.10 สัญญาณดาวเทียม Ku - Band พล็อตด้วยการกระจายแบบเกาส์เซียน

จากรูปที่ 7.10 จากกราฟจะเห็นว่าสัญญาณที่พล็อตด้วยการกระจายแบบเกาส์เซียนในสัญญาณ Ku - Band จะให้รูปสัญญาณที่พล็อต ได้จริงจากกราฟของฮิสโตแกรม (Histogram) จะให้ผลที่ไม่ใกล้เคียงกันสัญญาณที่ได้มาจากรูปจะเห็นว่าค่ากลางจะมีการเปลี่ยนแปลงเหมือนกันกับในสัญญาณ C - Band แต่ในส่วนของค่า Probability Density ของสัญญาณ Ku - Band จะมีค่าสูงและไม่ค่อยสม่ำเสมอเนื่องจากสัญญาณ Ku - Band อยู่ในช่วงความถี่สูงกว่าสัญญาณ C - Band

#### สรุปผลการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าสัญญาณดาวเทียมในช่วง C - Band และ Ku - Band เมื่อเกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นในสัญญาณ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 7.8 และรูปที่ 7.9 จะทำให้ทราบว่าทฤษฎีการกระจายแบบเกาส์เซียนเหมาะที่จะใช้กับการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ C – Band มากกว่า Ku – band เนื่องจากให้ผลความน่าจะเป็นของ การเกิดปรากฏการณ์ซินทิสิชั่นในสัญญาณดาวเทียมได้ใกล้เคียงกว่า

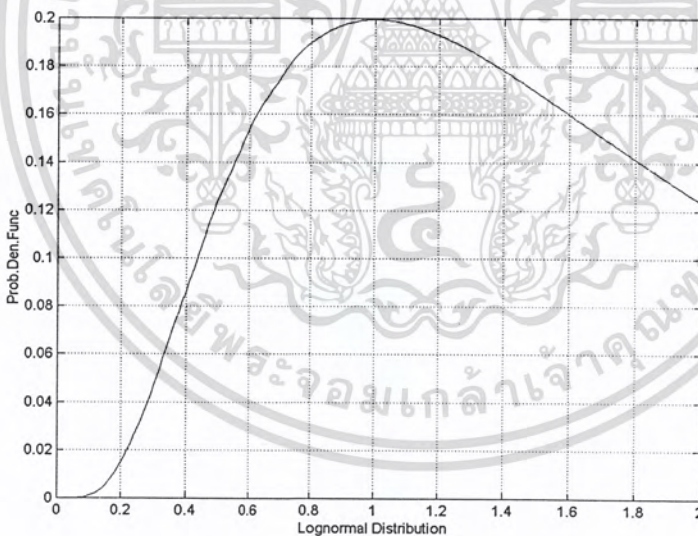
## 7.6 วิธีการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ซินทิสิชั่นในสัญญาณดาวเทียมโดยใช้ทฤษฎี

### การกระจายล็อกคอนออลมอล

จากสมการของล็อกคอนออลมอล

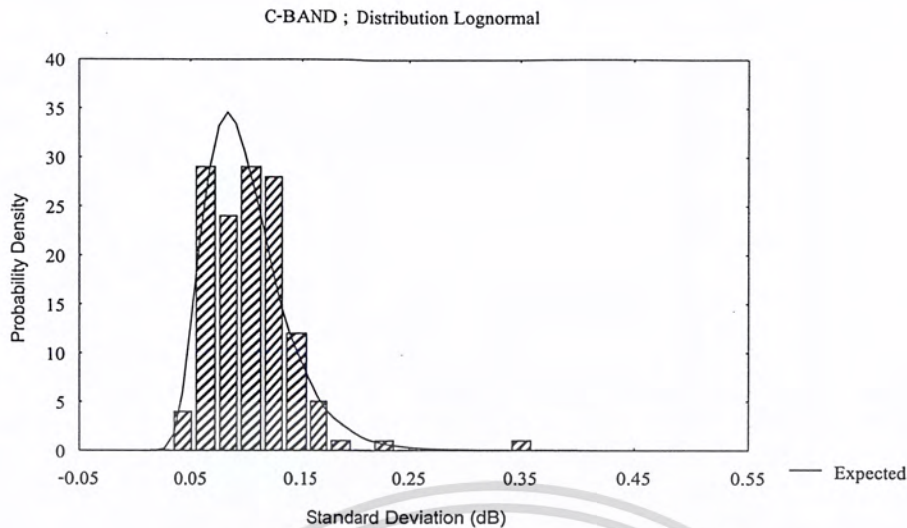
$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \frac{1}{x} \exp \left[ -\frac{(\ln(x) - m)^2}{2\sigma_n^2} \right]$$

จากสมการมาตรฐานของล็อกคอนออลมอลให้  $m=0$ ,  $\sigma=1$  ได้สัญญาณดังรูปที่ 7.11 และสัญญาณที่แปลงเป็นเดซิเบลจากไมโครซีเอฟเอ็กซ์เซลมาทำการพล็อตกราฟโดยใช้สมการของล็อกคอนออลมอลโดยสัญญาณที่ใช้พล็อตเป็นสัญญาณที่เกิดปรากฏการณ์ซินทิสิชั่นแสดงดังรูปที่ 7.12 เป็นสัญญาณดาวเทียม C – Band และรูปที่ 7.13 เป็นสัญญาณดาวเทียม Ku - Band



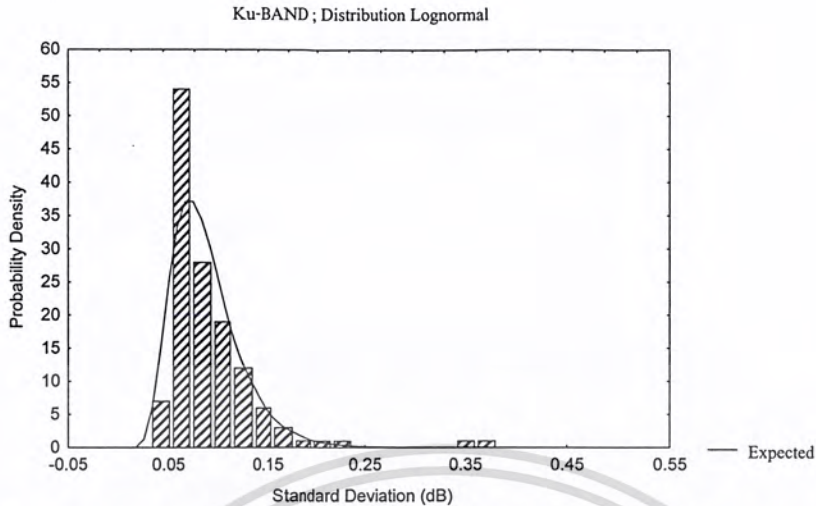
รูปที่ 7.11 แสดงการกระจายแบบล็อกคอนออลมอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงที่ 7.12 สัญญาณดาวเทียม C – Band พล็อตด้วยการกระจายแบบล็อกนออลมอล

จากรูปที่ 7.12 จากกราฟจะเห็นว่าสัญญาณที่พล็อตด้วยการกระจายแบบล็อกนออลมอลในสัญญาณ C – Band จะมีความใกล้เคียงกับสัญญาณที่พล็อตได้จริงจากกราฟของฮิสโตแกรม (Histogram) ได้พอสมควรแต่ถ้านำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณที่พล็อตด้วยสัญญาณ Ku – Band แล้วก็ยังใกล้เคียงน้อยกว่าซึ่งเป็นผลจากสัญญาณจริงเมื่อพิจารณาในส่วนของ Probability Density จะเห็นว่าค่อนข้างมีความแตกต่างกันพอสมควรกันเนื่องจากความถี่ในช่วง C – Band ซึ่งอยู่ในช่วง 4 – 6 GHz มีความถี่ที่ยังไม่สูงมาก แต่กราฟที่พล็อตด้วยการกระจายแบบล็อกนออลมอลจะให้ค่า Probability Density ที่สูงกว่าสัญญาณจริงและจะเห็นว่าค่ากลางของสัญญาณได้มีการเปลี่ยนแปลงจากที่มีค่าเท่ากับ 0 แต่ในสัญญาณจริงค่ากลางจะไม่เท่ากับ 0 ดังสมการ และค่าแอมพลิจูดก็จะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณที่รับมาได้



รูปที่ 7.13 สัญญาณดาวเทียม Ku - Band พล็อตด้วยการกระจายแบบล็อกนออลมอด

จากรูปที่ 7.13 จากกราฟจะเห็นว่าสัญญาณที่พล็อตด้วย การกระจายแบบล็อกนออลมอด ในสัญญาณ Ku - Band จะให้รูปสัญญาณที่พล็อต ได้จริงจากกราฟของฮิสโตแกรม (Histogram) จะให้ผลที่ได้จากกราฟมีความใกล้เคียงกันสัญญาณที่ได้มาจากการที่พล็อตด้วยการกระจายแบบล็อกนออลมอดจากรูปจะเห็นว่าค่ากลางจะมีการเปลี่ยนแปลงเหมือนกันกับในสัญญาณ C - Band แต่ในส่วน of ค่า Probability Density ของสัญญาณ Ku - Band จะมีค่าสูงและไม่ค่อยสม่ำเสมอเนื่องจากสัญญาณ Ku - Band อยู่ในช่วงความถี่สูงกว่าสัญญาณ C - Band

#### สรุปผลการวิเคราะห์

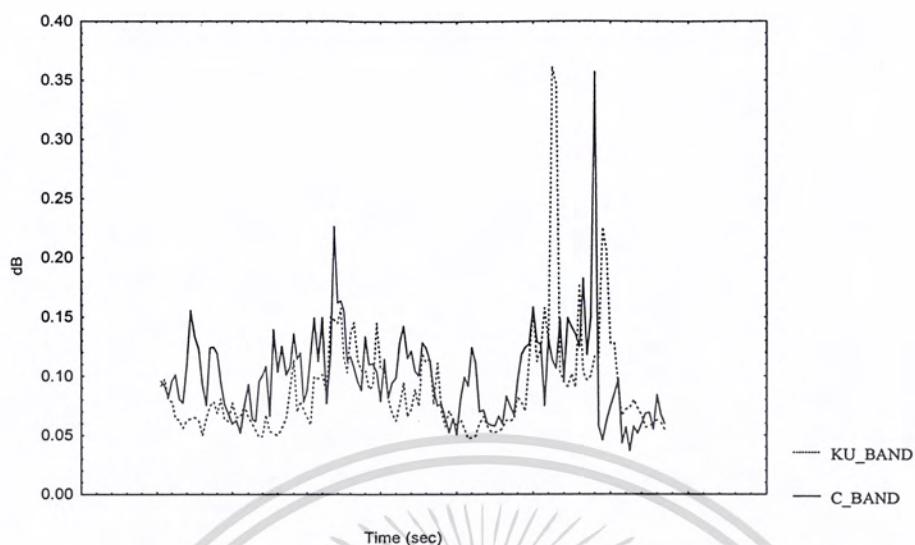
จากการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าสัญญาณดาวเทียมในช่วง C - Band และ Ku - Band เมื่อเกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นในสัญญาณ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 10 และรูปที่ 11 จะทำให้ทราบว่าทฤษฎีการกระจายแบบล็อกนออลมอดเหมาะที่จะใช้กับการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นในสัญญาณ Ku - band มากกว่า C - Band เนื่องจากให้ผลความน่าจะเป็นของการเกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นในสัญญาณดาวเทียมได้ใกล้เคียงกว่า

## 7.7 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นในสัญญาณดาวเทียม C - Band

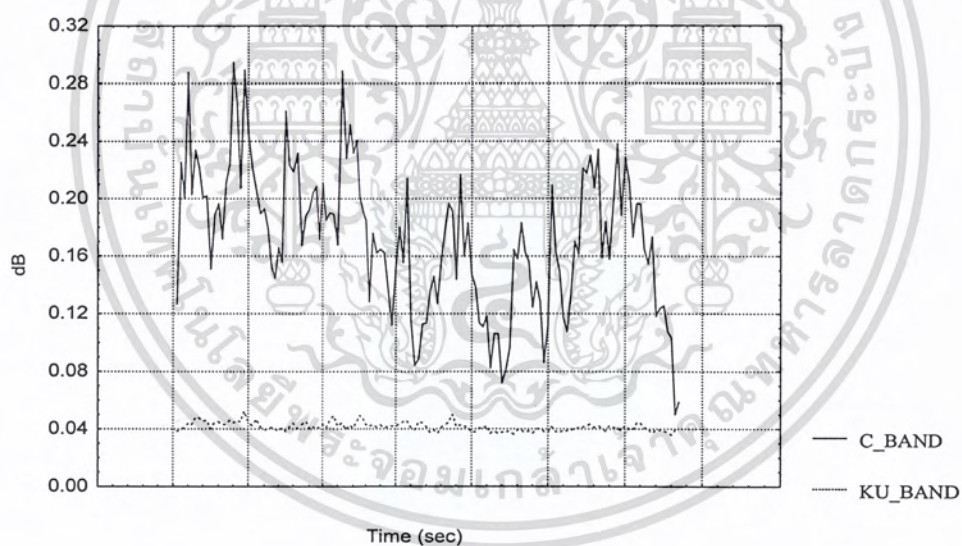
### และ Ku - Band

จากการทดลองเมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ และทำการนำมาทำเป็นสถิติ เราจะสามารถทราบถึงความน่าจะเป็น ของการเกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่น นั้นในสัญญาณ C - Band และ Ku - Band นั้นมีความแตกต่างกันซึ่งจะแสดงดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

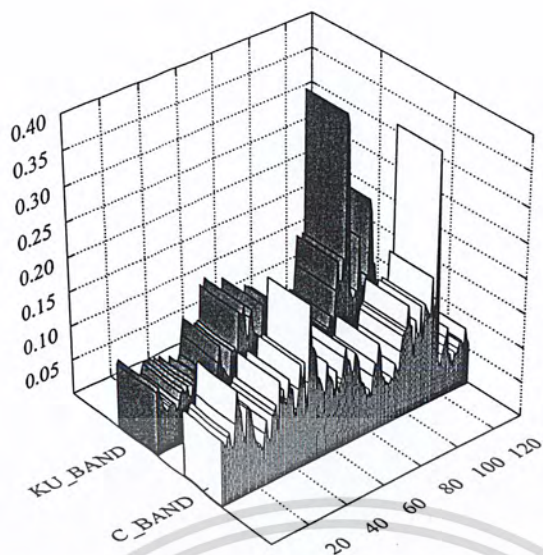


รูปที่ 7.14 (ก) กราฟแสดงปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นนั้นในสัญญาณ C – Band และ Ku – Band

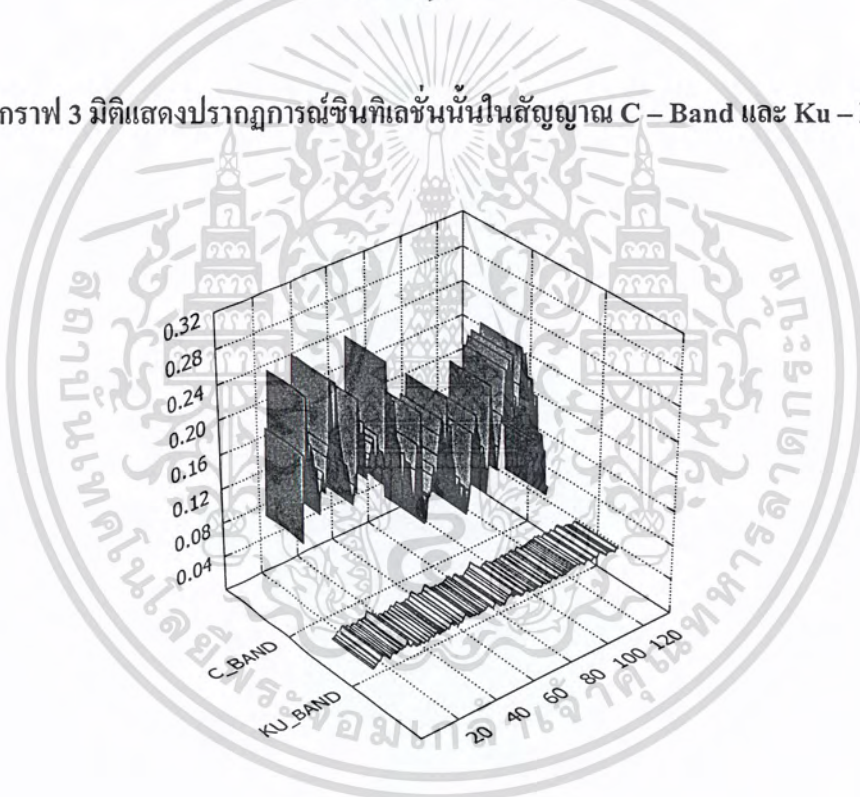


รูปที่ 7.14 (ข) กราฟแสดงปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นนั้นในสัญญาณ C – Band และ Ku – Band

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.15 (ก) กราฟ 3 มิติแสดงปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นนั้นในสัญญาณ C – Band และ Ku – Band



รูปที่ 7.15 (ข) กราฟ 3 มิติแสดงปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นนั้นในสัญญาณ C – Band และ Ku – Band

จากรูปที่ 7.14 และรูปที่ 7.15 จะเห็น ความแตกต่างระหว่าง ปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นนั้น ในสัญญาณ C – Band และ Ku – Band ได้อย่างชัดเจนซึ่งทั้งสัญญาณ C – Band และ Ku – Band ที่นำมาพล็อตกราฟเป็นสัญญาณในเวลาเดียวกันแต่เนื่องจากเป็นสัญญาณคนละความถี่จึงทำให้เกิดความแตกต่างกันของทั้งสองสัญญาณ ซึ่งบางครั้งอาจเกิดความแตกต่างกันของ ทั้งสองสัญญาณ มากบ้างน้อยบ้างจากรูปที่ 7.13 (ก), (ข) และรูปที่ 7.14 (ก), (ข) บางครั้งสัญญาณ C – Band เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปรากฏการณ์ ซินทิเลชั่นแต่สัญญาณ Ku – Band อาจเกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นหรือไม่เกิดก็ได้

## 7.8 สรุป

สามารถที่จะสรุป ได้ว่าความถี่ของสัญญาณที่ส่งจะมีผล ต่อความน่าจะเป็น ของการเกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นสัญญาณดาวเทียม โดยปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นจะส่งผลกระทบต่อระดับแรงดันของสัญญาณดาวเทียมทั้งด้านขาลงและขาขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 8

### บทสรุป

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแนวทางในการวิเคราะห์การเกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นในสัญญาณดาวเทียม และสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่อการรับสัญญาณดาวเทียม โดยใช้ทฤษฎีการกระจายแบบเกาส์เซียน (Additive White Gaussian Noise : AWGN) และทฤษฎีการกระจายแบบล็อกนอร์มอล (Log - Normal) เป็นแนวทางในศึกษาและวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม

#### 8.1 วิธีการทดลอง การทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน

##### 8.1.1 การเก็บและรวบรวมสัญญาณดาวเทียม

การเก็บรวบรวมสัญญาณดาวเทียมจะทำการเก็บสัญญาณดาวเทียมจากดาวเทียม THAICOM2 ตลอด 24 ชั่วโมงของทุกวันเพื่อเก็บรวบรวมสัญญาณดาวเทียมโดยใช้เครื่องบันทึกสัญญาณ OR100 แล้วทำการคัดเลือกสัญญาณที่เกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นหลาย ๆ สัญญาณ จากนั้นจึงนำสัญญาณที่เกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นมาเก็บรวบรวมแล้วนำมาเปลี่ยนระดับแรงดันของสัญญาณจากโวลท์ ให้เป็นเดซิเบลเพื่อทำการวิเคราะห์ในขั้นต่อไป

##### 8.1.2 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นในสัญญาณดาวเทียม

การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นในสัญญาณดาวเทียมจะนำเอาสัญญาณเทียมที่เกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นมาทำการวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม MATLAB, STATISTICA และโปรแกรมช่วยพล็อตกราฟที่เหมาะสม

การวิเคราะห์สัญญาณที่เกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่น ภายในช่วง 24 ชั่วโมงและของทุกวัน การวิเคราะห์ดังกล่าวมีจุดประสงค์เพื่อสังเกตความแตกต่างของการเกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นว่าภายในหนึ่งวันและของแต่ละวันความน่าจะเป็นของการเกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่น ช่วงไหนมีความน่าจะเป็นของการเกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่น ของสัญญาณเทียม C - Band และ Ku - Band โดยใช้ทฤษฎีการกระจายแบบเกาส์เซียน (Additive White Gaussian Noise : AWGN) และทฤษฎีการกระจายแบบล็อกนอร์มอล (Log - Normal) มากที่สุดและเหมาะสมที่จะใช้ทฤษฎีใดจึงจะเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าในสัญญาณ C – Band เหมาะที่จะใช้ใช้ทฤษฎีการกระจายแบบเกาส์เซียน (Additive White Gaussian Noise : AWGN) มากที่สุดในการจำลองปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นและสัญญาณ Ku – Band เหมาะที่จะใช้ทฤษฎีการกระจายแบบล็อกนอร์มอล (Log – Normal) มากที่สุดในการจำลองปรากฏการณ์ซินทิเลชั่น และจากการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าช่วงที่เกิดฝนตกจะเกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นมากที่สุด

## 8.2 ข้อสังเกต ปัญหาที่พบในการทดลองและข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้พยายามอธิบายถึงคุณลักษณะของปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นที่เกิดขึ้นกับสัญญาณดาวเทียม C – Band และ Ku – Band ว่าสัญญาณใดน่าจะเกิดของปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นและส่งผลกระทบต่อระดับแรงดันของสัญญาณดาวเทียมทางเครื่องรับ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสัญญาณดาวเทียม และนำมาเปรียบกับการพล็อตด้วยการพล็อตด้วยทฤษฎีการกระจายแบบเกาส์เซียนและทฤษฎีการกระจายแบบล็อกนอร์มอล จากการวิเคราะห์พบสัญญาณ C – Band และ Ku – Band ต่างมีความเหมาะสมที่จะใช้การสร้างแบบจำลองของปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นคนละแบบกัน แต่บางครั้งสัญญาณ C – Band ซึ่งมีความถี่ในช่วงต่ำกว่า Ku – Band เกิดปรากฏการณ์ซินทิเลชั่นมากจนเมื่อนำมาพล็อตด้วยทฤษฎีการกระจายแล้วรูปกราฟออกมาสูงกว่ารูปอื่นจนไม่สามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบกันได้

## เอกสารอ้างอิง

1. การสื่อสารผ่านดาวเทียม รัชชัย อินทุไล,โครงการตำราเรียน Physics Center
2. การสื่อสารผ่านดาวเทียม ณรงค์ เหมกรณ์,ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. REPORT OF CCIR,1999(ALSO DECISIONS),ANNEX TO VOLUME V. PROPAGATION IN NON-IONIZEDITION,CCIR INTERNATION RADIO CONSULATATIVE COMMITTEE GENERA,1999
4. Proakis J.G ., Digital Communications. Singapore : McGraw-Hill, Inc1983
5. Biran A., Breiner M.,MATLAB for Engineers. Great Britain: Addison-Wesley Publishing Company Inc.1995
6. Jong soo S., “Impact of Non – Gaussian Impulsive Noise on the Performance of High – Level QAM,” IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, VOL. 31, NO.2, pp177 – 180, May 1989
7. Hwei P.Hsu. , Digital Communications. New York : McGraw-Hill, Inc. 1996
8. พิเศษฐ์ ฤทธิสุนทร การสื่อสารด้วยระบบอนาล็อกและดิจิตอล. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล. 2542
9. ภูษณะ ปรีรัมย์โนช , “แผนแม่บทการพัฒนากิจการโทรคมนาคม “วารสารทางวิชาการสื่อสารโทรคมนาคม ปีที่ 2 ฉบับที่ 7 มิถุนายน 2538
10. ภัทธา โรจน์ไพบูลย์. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข. พิมพ์ครั้งที่ 2 เชียงใหม่ : โครงการตำราภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

โปรแกรม MATLAB สำหรับพล็อตสัญญาณจริงและสมการเกาส์เซียนและสมการลือคอนอลมอล

```
%%%%%%%%%% PROGRAM#1%%%%%%%%%%
x=0:0.002:2.5;
m=0;
var=0.02549167530246;
y=(1/sqrt(2*pi)*var)*exp(-(x-m).^2)/(2*var);
x3=0:0.002:2.5;
m3=0;
var3=0.02549167530246;
y3=(1/sqrt(2*pi)*var3)*exp(-(log(x3)-m3).^2)/(2*var3);
x1=0.136.*x;
y1=y.*5;
x4=0.136.*x3;
y4=y3.*5;
load x2.txt;
load y2.txt;
figure(1)
plot(x2,y2),...
figure(2)
plot(x4,y4),...
figure(3)
plot(x1,y1,x2,y2,x4,y4),...
axis([0 0.35 0 1]),...
    xlabel('Standard Deviation(dB)');
    ylabel('Exceedance %');
grid
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%PROGRAM#2%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Gaussian
```

```
x=-2.5:0.002:2.5;  
m=0;  
var=1;  
y=(1/sqrt(2*pi)*var)*exp(-(x-m).^2)/(2*var);  
plot(x,y),...  
grid
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%PROGRAM#3%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%log - normal
```

```
x=0:0.02:2.5;  
m=0;  
var=1;  
y=(1/sqrt(2*pi)*var)*exp(-(log(x)-m).^2)/(2*var);  
plot(x,y),...  
grid
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%%PROGRAM#4%%

%Comparing BPSK and QPSK

```
snrdb=[0:0.1:50];  
snr=10.^(snrdb/10);  
Pe_BPSK=0.5*erfc(sqrt(snr));  
Pe_QPSK=erfc((sqrt(snr))*sin(pi/4));  
semilogy(snrdb,Pe_BPSK,'g',snrdb,Pe_QPSK,'r');  
grid;  
ylabel('Probability of Error');  
xlabel('Es/No(dB)');  
title('Probability of Symbol Error');  
gtext('BPSK');  
gtext('QPSK');
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้