

การปรับปรุงสมรรถนะระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมโดยใช้เทคนิคมอดูเลต  
แบบปรับตัวได้

PERFORMANCE IMPROVEMENT FOR SATELLITE  
COMMUNICATION SYSTEM USING ADAPTIVE MODULATION

ธีรพล มีอรุณ  
TEERAPON MEEARUN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-010-149

การปรับปรุงสมรรถนะระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมโดยใช้เทคนิคมอดูเลต  
แบบปรับตัวได้

PERFORMANCE IMPROVEMENT FOR SATELLITE  
COMMUNICATION SYSTEM USING ADAPTIVE MODULATION

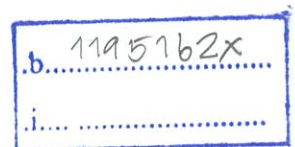


ธีรพล มีอรุณ

TEERAPON MEEARUN

กท.  
ท6337  
2551

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 82735  
วัน,เดือน,ปี..... 22 . 0. 2551



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-010-143

**PERFORMANCE IMPROVEMENT FOR SATELLITE  
COMMUNICATION SYSTEM USING ADAPTIVE MODULATION**

**TEERAPON MEEARUN**

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

**2008**

**KMITL-2008-EN-M-010-143**

**COPYRIGHT 2008**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมรรถนะระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยใช้เทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้
นักศึกษา	นายธีรพล มีอรุณ
รหัสประจำตัว	48060969
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. พิเชฐ ม่วงนวล

### บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอเทคนิคในการปรับปรุงประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยใช้เทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้ ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่เกิดการจางหายแบบซินทิลเลชั่นและมัลติพาทเฟดดิ้ง แล้วทำการวิเคราะห์เชิงเลขความน่าจะเป็นเอท์เดจ ประสิทธิภาพสเปกตรัม และค่าเฉลี่ยความน่าจะเป็นบิตผิดพลาดที่เกิดจากช่องสัญญาณแบบซินทิลเลชั่นและมัลติพาทเฟดดิ้งจากการทดลองจะเห็นได้ว่า เทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้สามารถรักษาความน่าจะเป็นบิตผิดพลาดให้อยู่ในระดับที่ต้องการ ในส่วนของประสิทธิภาพสเปกตรัม ถ้าเพิ่มจำนวนการมอดูเลตจะยิ่งทำให้ค่าสูงขึ้น และค่าดัชนี  $S_4$  มีค่าน้อยจะทำให้ความน่าจะเป็นเอท์เดจดีขึ้น

<b>Thesis Title</b>	Performance Improvement for Satellite Communication system using Adaptive Modulation
<b>Student</b>	Mr. Teerapon Meearun
<b>Student ID.</b>	48060969
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Telecommunication Engineering
<b>Year</b>	2008
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Phichet Moungnoul

### **ABSTRACT**

This paper analyzes the performance of the adaptive modulation in combined scintillation and multipath fading channel, which utilizing PDF of combined scintillation and small scale fading channel. The numerical results are shown impact of scintillation and small scale fading channel, by focus on average bit error rate, average spectral efficiency and outage probability in adaptive modulation.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีอย่างดี ผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. พิเชฐ ม่วงนวล ซึ่งเป็นผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำงาน ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดาของข้าพเจ้าที่ให้โอกาสและสนับสนุนให้โอกาสเล่าเรียนจนถึงระดับปริญญาโทบัณฑิต พร้อมทั้งเป็นกำลังใจในการเล่าเรียนและทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้อง Mobile Communication Laboratory ทุกคนที่ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ด้วยดีเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธีรพล มีอรุณ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	4
2.1 พื้นฐานระบบการสื่อสารดาวเทียม.....	4
2.1.1 ระบบการสื่อสารดาวเทียม.....	4
2.1.2 รูปแบบการให้บริการดาวเทียม.....	5
2.1.2.1 ดาวเทียมสำหรับผู้ให้บริการประจำที่.....	5
2.1.2.2 ดาวเทียมสำหรับผู้ให้บริการเคลื่อนที่.....	6
2.1.3 ความถี่ที่ใช้ในระบบสื่อสารดาวเทียม.....	6
2.2 กลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กทรอนิกส์.....	7
2.3 ปฏิกิริยาการแผ่รังสีซินทิลเลชั่น.....	8
2.3.1 เกิดซินทิลเลชั่นจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	9
2.3.2 เกิดซินทิลเลชั่นจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์.....	9
2.3.3 การแสดงระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ซินทิลเลชั่น.....	10
2.3.3.1 ดัชนีซินทิลเลชั่น.....	10
2.3.3.2 ดัชนี $S_4$ .....	10
2.4 การเกิดเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในระบบการสื่อสาร.....	11

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 คุณลักษณะของสัญญาณที่ผ่านช่องสัญญาณที่เกิดเฟดดิ้ง.....	11
2.4.2 รูปแบบของมัลติพาธเฟดดิ้ง.....	12
2.4.2.1 มัลติพาธเฟดดิ้งที่เกิดจากการแพร่กระจายของเวลาดีเลย์.....	12
2.4.2.1.1 เฟดดิ้งแบบราบเรียบ.....	12
2.4.2.1.2 เฟดดิ้งแบบเจาะจงความถี่.....	12
2.4.2.2 มัลติพาธเฟดดิ้งที่เกิดจากการกระจายคอปเปอร์.....	14
2.4.2.2.1 เฟดดิ้งแบบเร็ว.....	14
2.4.2.2.2 เฟดดิ้งแบบช้า.....	15
2.4.3 แบบจำลองช่องสัญญาณและเฟดดิ้งทางสถิติ.....	16
2.4.3.1 แบบจำลองของช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบราบเรียบ.....	16
2.4.3.1.1 แบบจำลองของเรย์ลี.....	16
2.4.3.1.2 แบบจำลองนาคากามิ-ฮอยท์.....	17
2.4.3.1.3 แบบจำลองนาคากามิ-ไรซ์.....	18
2.4.3.1.4 แบบจำลองนาคากามิ-เอ็ม.....	20
2.4.3.2 แบบจำลองของช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเจาะจงความถี่.....	21
2.5 เทคนิคการมอดูเลตแบบปรับตัวได้.....	22
2.5.1 แบบจำลองการทำงานของระบบ.....	22
2.5.2 เทอร์ชโวลต์ในการสับเปลี่ยนการมอดูเลต.....	24
2.5.3 เทคนิคการปรับตัว.....	25
2.5.3.1 เทคนิคการปรับอัตราข้อมูล.....	25
2.5.3.2 เทคนิคการปรับพลังงาน.....	25
บทที่ 3 แบบจำลองระบบและการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ.....	27
3.1 รายละเอียดของระบบ.....	27
3.2 แบบจำลองซิงทิลเลขชั้น.....	28
3.3 แบบจำลองซิงทิลเลขชั้นร่วมกับมัลติพาธเฟดดิ้ง.....	31
3.4 เทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้.....	35
3.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ.....	36
3.5.1 ความน่าจะเป็นเอ้าท์เดจ.....	37

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.2 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม.....	37
3.5.3 ค่าเฉลี่ยอัตราบิดผิดพลาด.....	37
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์.....	39
4.1 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการมอดูเลตแบบ MPSK .....	39
4.2 วิเคราะห์ความน่าจะเป็นเออร์เรจ.....	40
4.3 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม.....	41
4.4 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยบิดผิดพลาด.....	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์.....	47
บรรณานุกรม.....	49
ภาคผนวก.....	51
คำย่อ.....	52
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	53
ประวัติผู้เขียน.....	59

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงความถี่ที่ใช้ในดาวเทียม.....	6
2.2 ย่านการปรับการมอดูเลต.....	25
3.1 The Modulation Switching Levels .....	36

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1. การสื่อสารควมเทียบเบื้องต้น.....	5
2.2 สัญญาณควมเทียบเมื่อผ่านกลุ่มไม่สม่ำเสมอของอิล็กตรอน.....	8
2.3 สัญญาณที่มาจากหลายเส้นทาง.....	12
2.4 PDF ของแบบจำลองของเรย์ลี.....	17
2.5 PDF ของแบบจำลองนาคากามิ-ฮอยท์.....	18
2.6 PDF ของแบบจำลองนาคากามิ-ไรซ์.....	19
2.7 PDF ของแบบจำลองนาคากามิ-เอ็ม.....	20
2.8 แบบจำลองระบบมอดูเลตแบบปรับตัวได้.....	23
3.1 แบบจำลองซินทิลเลชั่น.....	28
3.2 PDF ของช่องสัญญาณซินทิลเลชั่น.....	30
3.3 แบบจำลองของช่องสัญญาณซินทิลเลชั่นร่วมกับมัลติพาทเฟดดิ้ง.....	31
3.4 PDF ของช่องสัญญาณซินทิลเลชั่นและมัลติพาทเฟดดิ้งที่ $K_{ssf} = 10$ .....	36
3.5 PDF ของช่องสัญญาณซินทิลเลชั่นและมัลติพาทเฟดดิ้งที่ $K_{ssf} = 0$ .....	37
3.6 BER ของ MPSK.....	40
4.1 อัตราบิดผิพลาตในช่องสัญญาณซินทิลเลชั่น โดยเปรียบเทียบการมอดูเลตชั้นแบบ MPSK.....	39
4.2 อัตราบิดผิพลาตในช่องสัญญาณซินทิลเลชั่นและมัลติพาทเฟดดิ้ง โดยเปรียบเทียบการมอดูเลตชั้นแบบ MPSK.....	40
4.3 ความน่าจะเป็นเอาท์เตจในช่องสัญญาณซินทิลเลชั่น โดยเปรียบเทียบ $S_4$ .....	41
4.4 ความน่าจะเป็นเอาท์เตจในช่องสัญญาณซินทิลเลชั่นและมัลติพาทเฟดดิ้ง โดยเปรียบเทียบ $S_4$ .....	41
4.5 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม ในช่องสัญญาณซินทิลเลชั่น โดยเปรียบเทียบ $S_4$ .....	42
4.6 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม ในช่องสัญญาณซินทิลเลชั่นและมัลติพาทเฟดดิ้ง โดยเปรียบเทียบ $S_4$ .....	43
4.7 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม ในช่องสัญญาณซินทิลเลชั่น โดย เปรียบเทียบ N.....	47
4.8 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม ในช่องสัญญาณซินทิลเลชั่นและมัลติพาทเฟดดิ้ง โดยเปรียบเทียบ N.....	44

## สารบัญรูป (ต่อ)

4.9 ค่าเฉลี่ยค่าเฉลี่ยบิตผิดพลาด ในช่องสัญญาณซินทิลเลชั่น โดยเปรียบเทียบ $S_4$ .....	45
4.10 ค่าเฉลี่ยค่าเฉลี่ยบิตผิดพลาด ในช่องสัญญาณซินทิลเลชั่นและมัลติพาทเฟดดิ้ง โดยเปรียบเทียบ $S_4$ .....	46

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสื่อสารดาวเทียมนับว่าเป็นวิธีการในการส่งข้อมูลข่าวสารในปัจจุบันที่นิยมกันมาก ซึ่งอำนวยความสะดวกในการใช้งานได้อย่างกว้างขวาง และรวดเร็ว เป็นการสื่อสารที่มีวิวัฒนาการมาจากการสื่อสารแบบไมโครเวฟ ในช่วงแรกๆ ดาวเทียมได้ประดิษฐ์ขึ้นมาใช้ประโยชน์ในด้านการทหาร และได้พัฒนามาใช้ทางด้านการพยากรณ์อากาศ การค้นหาทรัพยากรธรณี และการสื่อสาร ความนิยมการสื่อสารผ่านดาวเทียมเนื่องจากการส่งสัญญาณมีลักษณะเป็น LOS (line of sight) สามารถส่งสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ได้ไกลแม้กระทั่งในทะเลหรือชนบทที่อยู่ห่างไกล ในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมยังได้รับผลกระทบจากตัวแปรในชั้นบรรยากาศ โดยในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) จะมีผลกระทบจากฝุ่น ไออน้ำ และฝนทำให้สัญญาณถูกดูดกลืนสัญญาณ (absorption) การกระเจิง (scattering) อันเนื่องมาจากอนุภาคของเม็ดฝน และการดีโพลาไรซ์ (depolarization) เป็นผลทำให้เกิดครอสโพลาไรซ์ (cross polarization) ที่ภาครับ โดยผลกระทบที่เกิดจากชั้นบรรยากาศนี้จะส่งผลกระทบต่อสัญญาณดาวเทียมความถี่มากกว่า C-Band ขึ้นไป ส่วนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) จะส่งผลกระทบต่อสัญญาณดาวเทียมความถี่ต่ำกว่า C-Band หรือในย่านความถี่ VHF และ UHF โดยชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ประกอบไปด้วยกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาซึ่งเรียกว่า “กลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอน (Irregularities)” ซึ่งมักถูกพบในชั้น F และ E ซึ่งเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณดาวเทียม

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรจะพบปัญหาหนึ่งที่ไม่สามารถแก้ไขได้คือการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันหรือที่เรียกว่าปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน (Scintillation) ซึ่งจากการที่สัญญาณผ่านตัวกลางที่มีองค์ประกอบภายในแตกต่างกันเช่น ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะมีฝนเป็นส่วนประกอบ ส่วนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้รับผลกระทบจากความแปรปรวนของอิเล็กตรอนที่เกิดจากสนามแม่เหล็กโลกทำให้มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเป็นต้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งเฟส และแอมพลิจูดของสัญญาณได้ ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นเป็นชั้นที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันในระดับที่รุนแรงและเกิดเป็นเวลานาน ในวิทยานิพนธ์นี้จึงให้ความสำคัญกับปรากฏการณ์ซินทิลเลชันในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ นอกจากนี้การที่เครื่องส่งและเครื่องรับทางภาคพื้นดิน จะได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่อยู่ใกล้พื้นดินและมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้สัญญาณมาถึงเครื่องรับมีหลายวิถี ซึ่งทำให้ขนาดและเฟสของสัญญาณแตกต่างกันหรือที่เรียกว่ามัลติพาทเฟดดิ้ง (Multipath fading)

การสื่อสารผ่านดาวเทียมเป็นการสื่อสารระยะทางไกล ในการวัดประสิทธิภาพของระบบที่ดีที่สุดก็คือการวัดค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสเปกตรัม ในการสื่อสารผ่านดาวเทียมแบบเดิมจะใช้การมอดูเลตแบบคงที่ ถ้าใช้การมอดูเลตที่ขนาดเล็กเช่น BPSK หรือ QPSK จะให้ประสิทธิภาพต่ำ แต่ในกรณีกลับกันที่ใช้การมอดูเลตที่ขนาดใหญ่เช่น 16PSK หรือ 32PSK จะให้ประสิทธิภาพที่สูงแต่โอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดของบิตข้อมูลก็สูงตามไปด้วย ดังนั้นในมาตรฐาน DVB-S2 ซึ่งเป็นมาตรฐานการให้บริการสื่อสารผ่านดาวเทียม Broadband ในยุคที่ 2 ได้มีการใช้งานเทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้ (Adaptive modulation) ซึ่งมีคุณสมบัติเพิ่มประสิทธิภาพของสเปกตรัมและลดอัตราบิตผิดพลาดของการสื่อสาร โดยใช้การมอดูเลตแบบ QPSK, 8PSK, 16PSK และ 32PSK โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้เทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้วิเคราะห์ร่วมกับผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสัญญาณในย่านความถี่ VHF และ UHF ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่มีการใช้งานเป็นอย่างมาก และได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ซินทิลเลชันและผลกระทบจากมลติพาทเฟดดิ้งที่เครื่องรับ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาดังต่อไปนี้

1.2.1. ศึกษาผลกระทบจากปรากฏการณ์ซินทิลเลชันในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และมลติพาทเฟดดิ้งในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม

1.2.2. ศึกษาเทคนิคต่างๆที่ใช้ในการปรับปรุงสมรรถนะเมื่อได้รับจากปรากฏการณ์ซินทิลเลชันและมลติพาทเฟดดิ้ง

1.2.3. เสนอการปรับปรุงสมรรถนะ โดยใช้เทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเมื่อได้รับจากปรากฏการณ์ซินทิลเลชันและมลติพาทเฟดดิ้ง

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

มอดูเลตแบบปรับตัวได้มีความสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสเปกตรัมได้ดีกว่าการมอดูเลตแบบคงที่ โดยสามารถวัดได้จากค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสเปกตรัม เมื่อผ่านช่องสัญญาณที่เกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันและมลติพาทเฟดดิ้งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของสเปกตรัมลดลง เมื่อนำเทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้จะทำให้ประสิทธิภาพของสเปกตรัมเพิ่มขึ้น จากการที่ประสิทธิภาพของสเปกตรัมเพิ่มขึ้นนี้จะทำให้อัตราบิตผิดพลาดและเอท้ตจลดลงด้วย

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยใช้งานมอดูเลตแบบปรับตัวได้กับช่องสัญญาณที่เกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันและมลติพาทเฟดดิ้ง โดยการปรับพารามิเตอร์ที่

ใช้การประมาณ CSI (Channel state information) ที่เครื่องรับ โดยทำการรักษาอัตราบิดผิดพลาดให้อยู่ในระดับที่ต้องการ ในขณะที่มีการเปลี่ยนการมอดูเลตซึ่งจะนำหลักการวิเคราะห์เชิงเลขมาวิเคราะห์ โดยจะกำหนดการกระจายเป็นแบบไรเซียน เมื่อนำเทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้มาใช้ จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสเปกตรัม

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยใช้งานมอดูเลตแบบปรับตัวได้กับช่องสัญญาณที่เกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชั่นและมัลติพาทเฟดดิ้ง โดยกำหนดให้การประมาณ CSI สมบูรณ์แบบไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ใช้ช่องสัญญาณที่มีการกระจายแบบไรเซียนหรือเรียกว่าการกระจายนาคาอามิ-ไรซ์ และช่องสัญญาณแต่ละช่องมีความเป็นอิสระต่อกัน โดยหาความน่าจะเป็นเอาท์เดจ (Probability of Outage) ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม (Average Spectral Efficiency) และค่าเฉลี่ยอัตราบิดผิดพลาด (Average BER) แล้วเปรียบเทียบกับ  $S_4$  ซึ่งเป็นค่าแสดงการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชั่นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เท่านั้น

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 บทคือ

บทที่ 1 กล่าวความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตการศึกษาและขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยประกอบด้วยพื้นฐานการสื่อสารผ่านดาวเทียม ปรากฏการณ์ซินทิลเลชั่น แบบจำลองช่องสัญญาณและเฟดดิ้งทางสถิติ เทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองของระบบและการหาสมรรถนะของระบบ โดยประกอบด้วยรายละเอียดแบบจำลอง แบบจำลองซินทิลเลชั่น แบบจำลองซินทิลเลชั่นร่วมกับมัลติพาทเฟดดิ้งและการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ

บทที่ 4 จะแสดงผลการวิเคราะห์การทำงานของระบบ

บทที่ 5 เป็นการสรุปผลการวิจัย

## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งเป็นเนื้อหาเกี่ยวกับพื้นฐานการสื่อสารผ่านดาวเทียม กลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาการชนกันของอนุภาค แบบจำลองช่องสัญญาณและเฟดดิ้งทางสถิติ เทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้ โดยจะกล่าวเกี่ยวกับเนื้อหาบางส่วนที่จำเป็นในการจำลองและวิเคราะห์ระบบ

### 2.1 พื้นฐานระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม

ดาวเทียมที่โคจรอยู่นอกโลกนั้นบ่อยครั้งนั้นมีการยิงสัญญาณต่างๆมายังพื้นโลก และยิงสัญญาณจากพื้นโลกไปยังดาวเทียม โดยมีวัตถุประสงค์หลายอย่างเช่น การตรวจสอบสภาพอากาศ ส่งสัญญาณโทรศัพท์ โทรทัศน์ และสัญญาณวิทยุ เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งวงโคจรของดาวเทียม (Satellite Orbit) ได้ดังนี้ [1]

ดาวเทียมแบ่งตามเส้นทางวงโคจรได้ 3 แบบ คือ วงโคจรตามแนวเส้นศูนย์สูตร (Equatorial Orbit), วงโคจรเอียง (Inclined Orbit) ทำมุมกับเส้นศูนย์สูตรและวงโคจรขั้วโลก (Polar Orbit) ตามแนวขั้วโลกเหนือได้

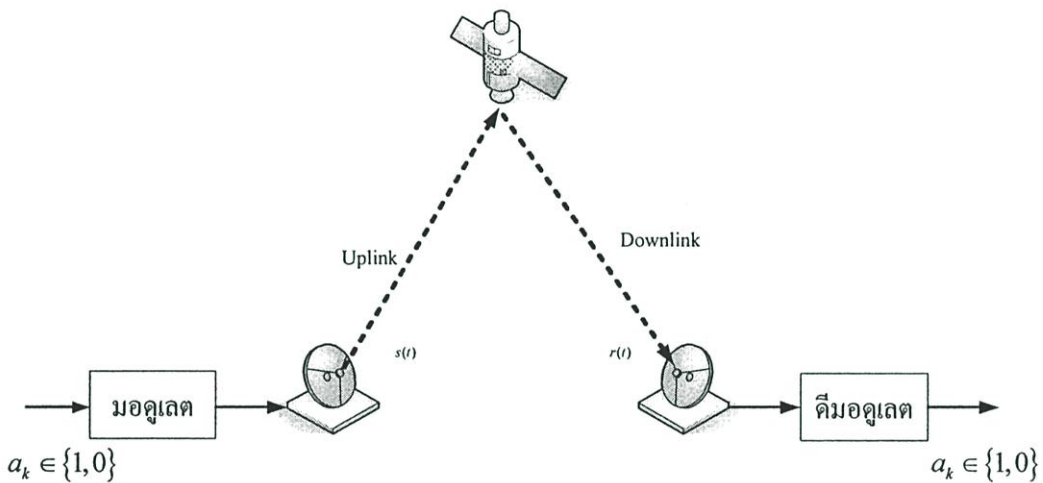
การแบ่งประเภทตามรูปร่างตามลักษณะวงโคจร ยังแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ วงโคจรวงกลม (Circular Orbit) ซึ่งระยะความสูงจากพื้นโลกใกล้เคียงกันโดยตลอด และวงโคจรรี (Elliptical Orbit) ซึ่งความสูงจากพื้นโลกต่างกันมากโดยระยะห่างจากโลกมากที่สุด เรียก Apogee และระยะห่างจากโลกใกล้สุดเรียก Perigee

แบ่งประเภทตามความสูงของวงโคจร ได้ 3 แบบ คือ ดาวเทียมวงโคจรค้างฟ้า (GEO Synchronous หรือ GEO Stationary Orbit: GEO) อยู่สูงจากพื้นโลกประมาณ 35,784 กิโลเมตร, ดาวเทียมวงโคจรปานกลาง (Medium Earth Satellite: MEO) ซึ่งโคจรอยู่ที่ความสูงระหว่าง 5,000-15,000 กิโลเมตร, ส่วนดาวเทียมวงโคจรต่ำ (Low Earth Satellite: LEO) โคจรอยู่ที่ความสูงตั้งแต่ 100-1,000 กิโลเมตร

#### 2.1.1 ระบบการสื่อสารดาวเทียม

ระบบสื่อสารดาวเทียมมีส่วนประกอบพื้นฐาน คือดาวเทียมที่ลอยอยู่ในอวกาศซึ่งดาวเทียมนี้จะสื่อสารเชื่อมโยงกับสถานีภาคพื้นดิน โดยผู้ใช้ทำการส่งสัญญาณเบสแบนด์ สัญญาณนี้จะถูกส่งไปยังสถานีภาคพื้นดินโดยเครือข่ายการสื่อสารภาคพื้นดินอาจจะเป็นสายสัญญาณหรือเป็นการสื่อสารแบบไร้สาย เมื่อมาถึงสถานีภาคพื้นดินสัญญาณก็จะได้อมอดูเลต จากนั้นจึงส่งออกขึ้นไปยังตัว

ดาวเทียม เมื่อดาวเทียมรับสัญญาณแล้วก็จะกรองเอาสัญญาณเฉพาะในช่วงความถี่ที่ต้องการ แล้วขยายสัญญาณและส่งกลับลงมายังพื้นโลกอีกครั้งหนึ่ง สถานีภาคพื้นดินที่รับสัญญาณจากดาวเทียมก็จะทำการในกระบวนการที่ย้อนกลับกับตอนที่ส่งไปดังดาวเทียม คือทำการตีมอดูเลตกลับไปเป็นสัญญาณแบบสแควร์และส่งต่อไปยังผู้ใช้โดยผ่านทางเครือข่ายการสื่อสารภาคพื้นดิน จากการทำงานดังกล่าวดาวเทียมก็คือ "สถานีทวนสัญญาณ (Repeater station) ที่ลอยอยู่บนอวกาศนั่นเอง ปกติจะนิยมเรียกสัญญาณที่ส่งจากสถานีภาคพื้นดินไปยังดาวเทียมว่า "ความถี่ขาขึ้น (uplink frequency)" และเรียกสัญญาณที่ส่งจากดาวเทียมไปยังสถานีภาคพื้นดินว่า "ความถี่ขาลง (downlink frequency)" ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1. การสื่อสารดาวเทียมเบื้องต้น

ซึ่งปัญหาที่พบเกี่ยวกับวงโคจรดาวเทียมนั้นเกิดจาก ในปัจจุบันมีดาวเทียมเป็นจำนวนมากในอวกาศ ทำให้ตำแหน่งอาจทับซ้อนกัน โดยเฉพาะดาวเทียมวงโคจรค้างฟ้า (GEO Synchronous หรือ GEO Stationary Orbit: GEO) ดังนั้น ITU (International Telecommunication Union) จึงกำหนดให้ดาวเทียมประเภทนี้มีตำแหน่งในวงโคจรให้ห่างกันอย่างน้อย 2 องศา เพื่อไม่ให้สัญญาณรบกวนกัน

## 2.1.2 รูปแบบการให้บริการดาวเทียม

ITU ได้กำหนดรูปแบบการให้บริการดาวเทียมเป็น 2 แบบ ได้แก่

### 2.1.2.1 ดาวเทียมสำหรับผู้ให้บริการประจำที่ (Fixed Satellite Service: FSS)

ได้แก่ สถานีภาคพื้นดินที่งานดาวเทียมติดตั้งประจำที่ สามารถพบเห็นได้ในกิจการทั่วไป ดาวเทียมหลักที่ให้บริการแบบนี้ เช่น INTELSAT, EUTELSAT, THAICOM เป็นต้น

### 2.1.2.2 ดาวเทียมสำหรับผู้ใช้บริการเคลื่อนที่ (Mobile Satellite Service: MSS)

ได้แก่ ดาวเทียมที่ใช้สถานีดาวเทียมภาคพื้นดินติดตั้งอยู่บนยานพาหนะบนบก เรียกดาวเทียม LMS (Land Mobile Satellite), ติดตั้งอยู่บนเครื่องบินเรียกดาวเทียม AMS (Airborne Mobile Satellite) หรือติดตั้งบนเรือดาวเทียมที่ให้บริการแบบนี้เช่น INMARSAT เป็นต้น

### 2.1.3 ความถี่ที่ใช้ในระบบสื่อสารดาวเทียม

นอกจากนี้ ITU ได้จัดสรรและควบคุมการใช้ความถี่ในกิจการต่างๆทั้งในประเทศ และระหว่างประเทศ เพื่อไม่ให้เกิดการขัดข้องและรบกวนกัน ความถี่ที่ใช้กับดาวเทียมจะใช้หลักการเรียกชื่อคล้ายกับที่ใช้ในเรดาร์และไมโครเวฟ แต่ความถี่ใช้งานอาจแตกต่างกันบ้างตามภารกิจและวิธีการใช้ความถี่ เช่น L-band, C-band, Ku-band, X-band, Ka -band เป็นต้น ความถี่ที่นิยมใช้กันมากคือย่าน C-band สัญญาณขาขึ้น (Uplink) ใช้ย่านความถี่ 6 GHz และสัญญาณขาลง (Downlink) ใช้ย่านความถี่ 4 GHz จึงนิยมเรียกว่า 6/4 GHz ความถี่ C-band นี้อาจรบกวนกับการสื่อสารผ่านคลื่นไมโครเวฟบนภาคพื้นดินได้ง่าย อีกความถี่ที่ใช้งานมากคือ Ku-band ใช้ความถี่ขาขึ้น 12 - 14 GHz

ตารางที่ 2.1 แสดงความถี่ที่ใช้ในดาวเทียม [2]

ชื่อแถบความถี่	ช่วงความถี่	การใช้บริการดาวเทียม
VHF	30-300 MHz	Messaging
UHF	300-1000 MHz	Military, navigator, mobile
L	1-2 GHz	Mobile, audio broadcast radiolocation
S	2-4 GHz	Mobile, navigator
C	4-6 GHz	Fixed
X	7-12 GHz	Military Communication Satellite
Ku	12-18 GHz	Fixed, video broadcast
K	18-27 GHz	Fixed
Ka	27-40 GHz	Fixed, video broadcast, International Communication Satellite
V	40-75 GHz	International Communication Satellite
W	75-100 GHz	International Communication Satellite
Mn	100-300 GHz	International Communication Satellite

และความถี่ช่วง 11 – 12 GHz โดยประมาณซึ่งนิยมใช้ในกิจการส่งสัญญาณโทรทัศน์โดยตรง (Direct Broadcast System: DBS) แต่มีข้อเสียหลักคือ สัญญาณจะถูกลดทอนกำลังจากเมฆฝนค่อนข้างมาก ความถี่ย่าน X-band (8/7 GHz) ใช้ในกิจการทหารส่วนความถี่ย่าน Ka-band (40/20 GHz) มีแนวโน้มจะนำมาใช้มากในอนาคตเพื่อแก้ปัญหาความแออัดของความถี่ใช้งาน เช่น โครงการ IP-Star ของบริษัท ไทยคม แสดงตาม ตารางที่ 2.1

## 2.2 กลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอน (Irregularities)

กลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนจะรบกวนสัญญาณดาวเทียมในเวลาที่เคลื่อนที่ผ่านแนวการสื่อสาร ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องทำความเข้าใจลักษณะทางกายภาพของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนนี้ โดย Aaron ได้แสดงให้เห็นว่ากลุ่มอิเล็กตรอนที่มีขนาดเล็ก (Small-scale) หลายๆกลุ่ม จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ที่มีความหนาแน่นไม่เท่ากัน (Large-Scale Pathes) เมื่อเคลื่อนที่ขวางเส้นทางการเดินทางของคลื่นก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณดาวเทียมแล้วส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม โดยกลุ่มอิเล็กตรอนนี้จะเริ่มเกิดขึ้นหลังจากพระอาทิตย์ตกดินไปแล้ว โดยกระบวนการเกิดสามารถอธิบายได้จากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ประกอบไปด้วยกลุ่มพลาสมา (Plasma) ที่รวมตัวกันจนมีความหนาแน่นพอที่จะสะท้อนคลื่นวิทยุในความถี่ย่าน HF [3] โดยอิเล็กตรอนอิสระในกลุ่มพลาสมาที่เกิดจากการที่อะตอมของก๊าซในธรรมชาติ เช่น อะตอมของก๊าซออกซิเจนที่ทำปฏิกิริยากับแสงอาทิตย์ (Solar EUV Flux) แล้วเกิดการแยกตัวระหว่างไอออนบวก (Positive ion) กับอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่าการไอโอไนสจากแสงอาทิตย์ (Photo Ionization) และจะกลับคืนสู่สถานะก๊าซธรรมชาติอีกครั้งซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า การกลับคืนสู่สถานะเดิม (Recombination) ด้วยเหตุนี้ทำให้ช่วงที่วัฏจักรสุริยะมีค่าสูงสุด (Solar Maximum) นั้นส่งผลให้ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในเวลากลางวันมากจึงเกิดกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในเวลากลางคืนมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งกลุ่มความไม่สม่ำเสมอนี้จะเคลื่อนที่ตัดผ่านเส้นทางการเดินทางของคลื่นในระยะเวลา 20 นาทีถึงหลายชั่วโมง โดยลักษณะของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนนี้มีลักษณะเหมือนกล้วย หรือกล้วยส้ม มีขนาดในทิศตะวันออกถึงทิศตะวันตก 100 – 200 กิโลเมตร มีความหนาประมาณ 50 กิโลเมตร และมีขนาดจากทิศเหนือถึงทิศใต้มากกว่า 1000 กิโลเมตร

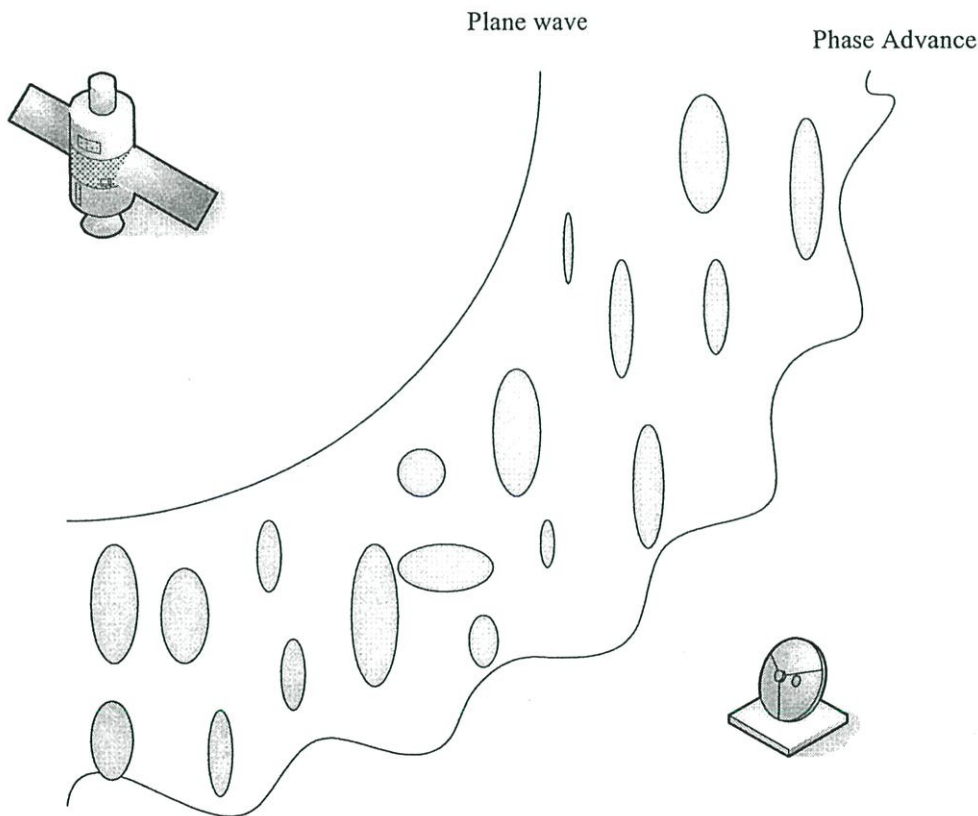
คุณลักษณะของการเกิดกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนและการสลายตัว (Decay) รวมถึงลักษณะการเคลื่อนที่ที่สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. กลุ่มความไม่สม่ำเสมอนี้เกิดขึ้นหลังจากพระอาทิตย์ตกโดยแผ่กว้างไปทิศตะวันตกโดยมีขนาดจากทิศตะวันออกถึงทิศตะวันตกประมาณ 100 กิโลเมตรถึงหลายร้อยกิโลเมตร และมีความหนาประมาณ 50 กิโลเมตรถึงหลายร้อยกิโลเมตร อยู่สูงจากพื้นดิน 225 - 450 กิโลเมตร
2. กลุ่มความไม่สม่ำเสมอนี้จะลอยไปในทิศตะวันออกด้วยความเร็วจาก 100 – 200 เมตรต่อ

วินาที และภายหลังเที่ยงคืนการเคลื่อนที่ของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอจะหยุดลงและเคลื่อนที่กลับไป  
ในทิศตะวันตก

3. กลุ่มความไม่สม่ำเสมอจะมีอยู่ประมาณ 2 ชั่วโมงหรือบางครั้งอาจพบได้ถึง 8 ชั่วโมง  
โดยการวัดเวลานี้ใช้วิธีการศึกษาจากสัญญาณดาวเทียมที่ได้รับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงแอม  
พลิจูดอย่างกะทันหัน ตามการศึกษาผลกระทบจากสัญญาณดาวเทียมในช่วงวัฏจักรสุริยะต่ำและไม่  
รุนแรง (Low Sunspot Activity) กลุ่มความไม่สม่ำเสมอนี้จะสลายตัวภายหลังเที่ยงคืนในช่วง  
ประมาณ 1 ชั่วโมง

### 2.3 ปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน



รูปที่ 2.2. สัญญาณดาวเทียมเมื่อผ่านกลุ่มไม่สม่ำเสมอของอิเล็คตรอน

ในการสื่อสารผ่านดาวเทียมสำหรับประเทศที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร จะพบปัญหาหนึ่งคือ การ  
เปลี่ยนแปลงระดับกำลังงานหรือการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม

ในช่วงเวลาที่เกิดปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน (Scintillation) ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากการแทรกสอดของสัญญาณ (Interference Effects) โดยถ้าเป็นการสื่อสารภาคพื้นเช่น ระบบสัญญาณเอฟเอ็ม สาเหตุการแทรกสอดอาจมาจากสถานีวิทยุข้างเคียงที่ใช้ค่าความถี่ของคลื่นพาห์ (Carrier) ที่ใกล้เคียงหรือใช้ความถี่ทับกัน [4] แต่ในปรากฏการณ์นี้สัญญาณที่มาแทรกสอดก็คือสัญญาณของตัวเองโดยเกิดจากการเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศที่มีความหนาแน่นไม่เท่ากันดังรูปที่ 2.2 ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Phase Advance ซึ่งจะทำให้ความเร็วของคลื่นระนาบ (Plane wave) เพิ่มขึ้น ดังนั้นสัญญาณดาวเทียมที่รับได้จะมีเฟสแตกต่างกันซึ่งเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับแอมพลิจูดและเฟสอย่างกะทันหัน การเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันสามารถแบ่งได้ 2 แบบตามชั้นบรรยากาศที่มีผลกระทบ

### 2.3.1 เกิดซินทิลเลชันจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

การเกิดซินทิลเลชันที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เกิดจากความหนาแน่นอิเล็กตรอน โดยจะมีค่ามากที่สุดที่ชั้น F อยู่ที่ความสูง 200 ถึง 400 กิโลเมตร เมื่อสัญญาณเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันได้ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ประกอบด้วย 3 ชั้นคือ D, E และ F ตามความสูงจากพื้นโลก โดยค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนแต่ละชั้นจะค่าเพิ่มขึ้นไปตามความสูงที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดของแต่ละชั้น และที่ขอบระหว่างชั้นจะมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนคงที่ค่าหนึ่งและอาจลดลงในบางช่วง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นต่างๆนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามรอบของดวงอาทิตย์ ใน [5] ได้แสดงการเกิดซินทิลเลชัน โดยใช้ความถี่จาก 20 MHz – 6 GHz ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในย่าน VHF และการเกิดซินทิลเลชันสามารถพบมากในย่านความถี่ต่ำกว่า 300 MHz โดยพบว่าปรากฏการณ์นี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ความน่าเชื่อถือในการทำงานในย่าน VHF ลดลง จึงสามารถเรียกได้เป็น dry scintillation

### 2.3.2 เกิดซินทิลเลชันจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

การเกิดซินทิลเลชันที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เกิดจากการสวิง ของค่าดัชนีการหักเห (Reflection index) ใน 2 – 3 กิโลเมตรแรกของความสูงที่มีการเปลี่ยนแปลงในค่าอุณหภูมิ ความดัน ความชื้น และการกระจายออกไปในแนวตั้งของชั้นบรรยากาศนั่นเอง ซึ่งตัวแปรทั้งหมดนี้จะมีผลมากต่อการเดินทางของคลื่นวิทยุ โดยสิ่งที่มีผลต่อการเดินทางของคลื่นวิทยุในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงแบบตรงข้ามของอุณหภูมิ คือปกติอุณหภูมิจะลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น แต่บางครั้งเกิดปรากฏการณ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นตามความสูงที่เพิ่มขึ้น อันเกิดจากการกระจายความร้อนของผิวโลก การเปลี่ยนแปลงในชั้นนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงตามวัน ฤดูกาลและตามเขตภูมิอากาศที่ตั้งอยู่ของเครื่องรับสัญญาณ [5] โดยพบว่าฤดูฝนจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดเมื่อเทียบกับฤดูกาลอื่น

เนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการหักเหอยู่ตลอดเวลาไปตามช่วงเวลา ฤดูกาล ภูมิภาค ภูมิประเทศ ทำให้สัญญาณที่เดินทางผ่านมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาไปตามตัวแปรต่างๆที่มีการเปลี่ยนแปลงและชั้นบรรยากาศนี้จะมีผลกระทบค่อนข้างมากต่อย่านความถี่ VHF และ UHF ที่เป็น LOS ส่วนย่านความถี่ C และ Ku ที่ใช้ระบบสื่อสารเชื่อมโยงตัดผ่านชั้นบรรยากาศนี้จะพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับแอมพลิจูดของสัญญาณที่เดินทางผ่านด้วย แล้ว  $S_4$  จะแสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่ความถี่สูงจะได้รับผลกระทบจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์มากกว่าชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และสามารถสรุปได้ว่าการเกิดซินทิลเลชันในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์มีสาเหตุสำคัญ 2 ประการคือการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศ และการกระจัดกระจายของคลื่นขณะเคลื่อนที่ผ่านเมฆฝน โดยสามารถเรียกการเกิดซินทิลเลชันแบบนี้ว่า wet scintillation

### 2.3.3 การแสดงระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน

ค่าที่แสดงถึงระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ซินทิลเลชันที่นิยมใช้กันมาก คือ การอ่านค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของระดับสัญญาณที่รับได้ (Peak-to-peak) แต่เนื่องจากค่านี้ไม่เหมาะกับการอธิบายความรุนแรงที่เกิดเป็นช่วงเวลาและเป็นตัวแปรสุ่ม จึงมีการกำหนดวิธีการหาค่าที่ละเอียดยิ่งขึ้นที่เรียกว่า ดัชนีซินทิลเลชัน (Scintillation Index) สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้คือ

#### 2.3.3.1 ดัชนีซินทิลเลชัน (Scintillation Index)

ค่าดัชนีซินทิลเลชัน (SI) เป็นการประมาณค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดที่ง่าย ๆ โดยมักใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันดับหนึ่ง (First-Order Analysis) กำหนดโดยสมการที่ (2.1) [6]

$$SI = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \quad (2.1)$$

โดยที่  $P$  แทนค่ากำลังของสัญญาณ และเพื่อหลีกเลี่ยงสภาวะ ปรากฏการณ์ที่เกินจริง จึงพิจารณาค่ายอดที่สามจากค่าสูงสุดและต่ำสุด

$P_{\max}$  คือ ระดับกำลังของค่ายอดที่สามจากค่ายอดที่สูงสุดในช่วงเวลาหนึ่งที่กำหนด

$P_{\min}$  คือ ระดับกำลังของค่ายอดที่สามจากค่ายอดที่ต่ำสุดในช่วงเวลาหนึ่งที่กำหนด

#### 2.3.3.2 ดัชนี $S_4$

Briggs และ Parkin (1963) ได้นำเสนอชุดของดัชนีในเทอมของ  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  และ  $S_4$  โดยเฉพาะดัชนี  $S_4$  เป็นดัชนีซึ่งมีความสัมพันธ์กับช่วงเวลา หลักการนี้แยกผลการเกิดซินทิลเลชันว่า เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์หรือชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยสามารถหาได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของกำลังสัญญาณที่รับได้หารด้วยค่าเฉลี่ย (Mean) ของกำลัง

สัญญาณนั้นในหน่วยวัตต์ ซึ่งสมการที่ใช้หาค่าปริมาณการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แสดงได้ดังนี้ [7]

$$S_4 = \frac{\sigma_x}{m_x} \quad (2.2)$$

โดยที่  $\sigma_x$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$m_x$  คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล (Mean Value)

โดยค่าเฉลี่ยของข้อมูลและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถหาได้จากสมการ (2.3) และสมการ (2.4) ตามลำดับ

$$m_x = \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.3)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.4)$$

โดยที่  $x_i$  คือ ระดับสัญญาณที่รับได้ (Receive Signal)

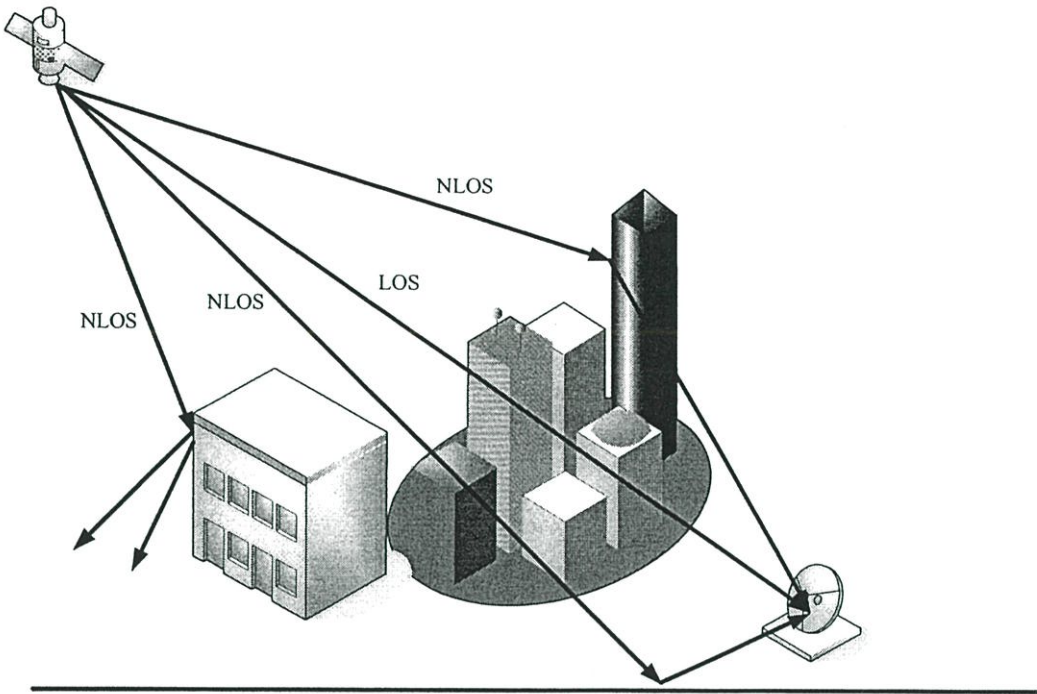
$N$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด (Whole Number)

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในดัชนี  $S_4$  สามารถคำนวณได้โดยทำการเฉลี่ยสัญญาณในช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งค่าดัชนี  $S_4$  ที่เท่ากับ 0.5 [6] จะเป็นตัวแบ่งระหว่างการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่ไม่รุนแรง (Weak Scintillation) กับการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรง (Strong Scintillation) ซึ่งบางครั้งค่าดัชนี  $S_4$  อาจมากกว่า 1 ก็ได้

## 2.4 การเกิดเฟดดิ้งของช่องสัญญาณในระบบการสื่อสาร

### 2.4.1 คุณลักษณะของสัญญาณที่ผ่านช่องสัญญาณที่เกิดเฟดดิ้ง

ในการสื่อสารด้วยเทคโนโลยีไร้สาย ทางด้านเครื่องส่งเมื่อมีการส่งสัญญาณออกไปผ่านช่องสัญญาณต่างๆจะเกิดการแทรกสอดหรือหักล้างกันของสัญญาณ หรือการสะท้อนและการลดทอนของสัญญาณ ดังนั้นสัญญาณที่มาถึงทางด้านเครื่องรับจะเกิดการรวมกันของสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทางซึ่งมีรูปแบบที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสัญญาณนั้นมีการเสริมกันหรือหักล้างกันอย่างไร สะท้อนหรือลดทอนของสัญญาณกันอย่างไร



รูปที่ 2.3. สัญญาณที่มาจากหลายเส้นทาง

#### 2.4.2 รูปแบบของมัลติพาทเฟดดิ้ง

ประเภทของการจางหายสามารถแบ่งได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆของสัญญาณเช่น ความกว้างของแถบความถี่ คาบของสัญญาณเป็นต้น และค่าพารามิเตอร์ๆของช่องสัญญาณเช่น ค่า RMS ของการกระจายการหน่วงเวลา การกระจายคอปเปอร์เป็นต้น สัญญาณที่ส่งออกไปโดยใช้พารามิเตอร์ต่างกันจะได้รับอิทธิพลของสัญญาณที่ต่างกันด้วย การกระจายทางเวลาและการกระจายทางความถี่ของช่องสัญญาณทำให้แบ่งอิทธิพลหรือกระทบจากช่องสัญญาณได้เป็น 4 รูปแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับสัญญาณที่ส่ง ช่องสัญญาณและความเร็วของเครื่องส่งและเครื่องรับ

##### 2.4.2.1 มัลติพาทเฟดดิ้งที่เกิดจากการแพร่กระจายของเวลาดีเลย์ (Multipath fading based on multipath time delay spread)

เฟดดิ้งที่เกิดจากการแพร่กระจายของเวลาดีเลย์เป็นสาเหตุให้สัญญาณที่ส่งออกไปตกอยู่ในอิทธิพลของสัญญาณได้ 2 แบบ คือเฟดดิ้งแบบไม่เจาะจงความถี่ (Frequency Non-Selective Fading) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เฟดดิ้งแบบราบเรียบ (Flat fading) และอีกแบบเรียกว่า การจางหายแบบเจาะจงความถี่ (Frequency Selective Fading)

##### 2.4.2.1.1 เฟดดิ้งแบบราบเรียบ (Flat fading)

ถ้าช่องสัญญาณมีอัตราขยาย (Gain) คงที่และมีการเปลี่ยนแปลงเฟสแบบเชิงเส้นภายในช่วงความกว้างแถบความถี่ที่มีค่ามากกว่าความกว้างของแถบสัญญาณที่ส่งมาแล้ว สัญญาณที่รับได้จะเรียกได้ว่าได้รับผลกระทบจากเฟดดิ้งแบบราบเรียบ สัญญาณที่ได้รับผลกระทบแบบนี้โดยมากจะ

ยังคงมีสัญญาณที่ไม่เปลี่ยนไปมากนัก แต่ขนาดของสัญญาณที่ได้รับอาจจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเนื่องจากอัตราขยายของช่องสัญญาณเกิดการผันแปรไปตามการจางหาย

โดยลักษณะของเฟดดิ้งแบบราบเรียบ ถ้าอัตราขยายของช่องสัญญาณเมื่อเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาแล้วขนาดของสัญญาณที่รับได้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน เพราะฉะนั้นตลอดเวลาที่ทำการรับสัญญาณที่รับได้จะมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราขยายของช่องสัญญาณ แต่สิ่งหนึ่งที่ไม่เปลี่ยนแปลงคือลักษณะสเปกตรัมของสัญญาณจะยังคงเหมือนเดิม ในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบราบเรียบนั้น ค่าส่วนกลับของความกว้างแถบของสัญญาณที่ส่งผ่าน จะมีค่ามากกว่าค่ากระจายการหน่วงเวลาของช่องสัญญาณ และผลตอบสนองของช่องสัญญาณสามารถประมาณเป็นฟังก์ชันเดลต้า (Delta Function) ได้โดยทั่วไป ช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบราบเรียบนี้สามารถจะเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณได้เป็นอย่างมาก ดังนั้นในการส่งสัญญาณจะต้องใช้กำลังส่งสูงๆ เพื่อให้มีอัตราบิดผิดพลาดที่ต่ำ ซึ่งอาจจะอยู่สูงกว่าการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณธรรมดาถึง 20-30 dB การแจกแจงของอัตราขยายของช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบราบเรียบที่เวลาใดๆเป็นส่วนสำคัญมากในการออกแบบระบบ โดยมากแล้วจะมีการแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh)

โดยสรุปแล้วสัญญาณจะได้รับผลกระทบจากเฟดดิ้งแบบราบเรียบก็ต่อเมื่อ

$$B_s \ll (\Delta f)_c \quad (2.5)$$

และ

$$T_s \gg \sigma_r \quad (2.6)$$

เมื่อ  $T_s$  คือส่วนกลับความกว้างของแถบสัญญาณหรือคาบของสัญญาณและ  $B_s$  คือความกว้างของแถบสัญญาณ ซึ่งทั้งสองค่านี้จะขึ้นอยู่กับมอดูเลตของสัญญาณ และ  $\sigma_r$  คือค่า RMS ของการกระจายการหน่วงเวลาของช่องสัญญาณ และ  $(\Delta f)_c$  คือค่าแบนด์วิดท์รวมนัยของช่องสัญญาณ

#### 2.4.2.1.2 เฟดดิ้งแบบเจาะจงความถี่ (Frequency Selective Fading)

ถ้าช่องสัญญาณมีอัตราขยายคงที่และมีการเปลี่ยนแปลงเฟสแบบเชิงเส้น ภายในช่วงความกว้างแถบที่มีค่าน้อยกว่าความกว้างแถบของช่องสัญญาณแล้ว เมื่อนั้นผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสัญญาณที่รับได้จะเป็นการจางหายแบบเลือกความถี่ ภายใต้สภาวะเฟดดิ้งแบบนี้จะพบว่าผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของช่องสัญญาณจะมีค่ากระจายการหน่วงเวลามากกว่าส่วนกลับของความกว้างแถบของสัญญาณที่ส่งมา เมื่อเกิดเฟดดิ้งแบบนี้ขึ้นสัญญาณที่รับได้จะรวมถึงสัญญาณที่มีเส้นทางเดินทางต่างกันหลายเส้นทาง ซึ่งแต่ละเส้นทางจะมีการลดทอนและ-การหน่วงเวลาที่ต่างกัน ทำให้สัญญาณที่รับได้เกิดความเพี้ยนไปจากเดิมการจางหายแบบเจาะจงความถี่นี้ จะเกิดการกระจายของสัญญาณ

(Symbol) ที่ส่งมากับสัญญาณในโดเมนของเวลาขึ้นทำให้เป็นสาเหตุให้เกิดการแทรกสอดของสัญญาณขึ้น (Inter Symbol Interference: ISI) เมื่อมองในโดเมนของความถี่แล้ว จะพบว่าเฉพาะบางส่วนของสเปกตรัมของสัญญาณที่ส่งมาจะได้รับการขยายจากช่องสัญญาณไม่ใช่สเปกตรัมทั้งหมด

ช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเจาะจงความถี่จะทำการจำลองได้ยากกว่าแบบราบเรียบ เพราะว่าต้องจำลองสัญญาณนั้นมีเส้นทางและช่องสัญญาณจะต้องถูกพิจารณาว่าเป็นฟิลเตอร์แบบเชิงเส้น ในการวิเคราะห์บางครั้งอาจจะจำลองเป็นผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ เช่น แบบจำลองเรย์ลีที่มีสองเส้นทาง หรือบางครั้งอาจจะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองก็ได้

สำหรับเฟดดิ้งแบบเจาะจงความถี่ สเปกตรัมของสัญญาณที่ส่งมาจะมีค่าความกว้างแถบมากกว่าค่าแบนด์วิคท์รวมนัยของช่องสัญญาณ เมื่อมองในโดเมนของความถี่จะพบว่าช่องสัญญาณเป็นแบบเจาะจงความถี่ เพราะว่าจะมีช่วงความถี่บางส่วนเท่านั้นที่ได้รับการขยาย ดังนั้นเฟดดิ้งแบบนี้จะเป็นสาเหตุให้ค่าการกระจายการหน่วงเวลามีค่ามากกว่าเฟดดิ้งแบบราบเรียบ บางครั้งอาจมีค่าเท่ากับคาบเวลาของสัญลักษณ์ของข้อมูลที่ส่งมาหลายๆคาบเลขก็ได้ เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปอัตราขยายแอมพลิจูดและเฟสของช่องสัญญาณที่ล้อมสเปกตรัมของสัญญาณที่ส่งมาจะเกิดการผันแปร ผลที่ตามมาก็คือ สัญญาณที่รับได้เกิดการผิดเพี้ยนขึ้น โดยสรุปแล้วสัญญาณจะตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของเฟดดิ้งแบบเจาะจงความถี่ก็ต่อเมื่อ

$$B_s > (\Delta f)_c \quad (2.7)$$

และ

$$T_s < \sigma_r \quad (2.8)$$

#### 2.4.2.2 มัลติพาทเฟดดิ้งที่เกิดจากการกระจายดอปเปลอร์ (Multipath fading base on Doppler spread)

ผลกระทบที่เกิดขึ้นแบบนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ส่งมา เมื่อเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ดังนั้นช่องสัญญาณอาจจะถูกแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ เฟดดิ้งแบบเร็ว (Fast fading) และเฟดดิ้งแบบช้า (slow fading)

##### 2.4.2.2.1 เฟดดิ้งแบบเร็ว (Fast fading)

เฟดดิ้งแบบเร็วนี้ผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของช่องสัญญาณจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงเร็วกว่าคาบเวลาของสัญลักษณ์ นั่นคือค่าเฉลี่ยรวมนัยของช่องสัญญาณจะมีค่าน้อยกว่าคาบเวลาของสัญลักษณ์ ที่ส่งมา เป็นสาเหตุทำให้เกิดการกระจายทางความถี่ขึ้น (Frequency Dispersion)

เนื่องจากการกระจายคอปเปอร์ ซึ่งผลที่ตามมาคือการบิดเบี้ยวของสัญญาณ (Signal Distortion) เมื่อมองในโดเมนของความถี่ ความบิดเบี้ยวของสัญญาณจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่ากระจายคอปเปอร์ที่สัมพันธ์กับความกว้างแถบของสัญญาณที่ส่งมามีค่ามากขึ้น เพราะฉะนั้นกล่าวโดยสรุปก็คือ สัญญาณจะตกอยู่ภายใต้เฟดดิ้งแบบเร็วก็ต่อเมื่อ

$$T_s > (\Delta f)_c \quad (2.9)$$

และ

$$B_s < B_d \quad (2.10)$$

จะสังเกตว่า เมื่อช่องสัญญาณถูกระบุว่าเป็นเฟดดิ้งแบบเร็วหรือแบบช้าแล้ว จะไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นช่องสัญญาณที่เกิดเฟดดิ้งเป็นแบบราบเรียบหรือแบบเจาะจงความถี่ เฟดดิ้งแบบเร็วเป็นการบอถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณและอัตราเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ส่งมาเท่านั้น ในกรณีของการจางหายแบบราบเรียบจะสามารถประมาณได้ว่า ผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของช่องสัญญาณเป็นฟังก์ชันเคลต้า อย่างไรก็ตามช่องสัญญาณสามารถที่จะเป็นแบบราบเรียบที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วก็ได้ ซึ่งก็คือช่องสัญญาณที่ขนาดของฟังก์ชันเคลต้า มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเร็วกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแถบฐานที่ส่งมา ในกรณีของช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเจาะจงความถี่ที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วก็เช่นกัน เป็นการบอกขนาดหรือเฟสและการหน่วงเวลาของช่องสัญญาณ ณ เส้นทางใดๆมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เร็วกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เร็วกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ส่งมา ในทางปฏิบัติแล้วเฟดดิ้งอย่างรวดเร็วจะเกิดขึ้นเมื่อส่งสัญญาณที่ความเร็วต่ำ

#### 2.4.2.2.2 เฟดดิ้งแบบช้า (Slow fading)

ในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบช้า นั้นผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของช่องสัญญาณจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ช้ากว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแถบฐานที่ส่ง ในกรณีนี้ช่องสัญญาณอาจจะสมมุติว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งอาจจะมีค่าหลายๆเท่าของส่วนกลับของความกว้างแถบของสัญญาณที่ส่งมา เมื่อมองในโมเดลของความถี่จะเป็นการบอกเป็นนัยๆว่าการกระจายคอปเปอร์ของช่องสัญญาณ จะมีค่าน้อยกว่าความกว้างแถบของสัญญาณแถบฐาน ดังนั้นสัญญาณจะตกอยู่ภายใต้สภาวะการจางหายแบบช้าก็ต่อเมื่อ

$$T_s < (\Delta f)_c \quad (2.11)$$

และ

$$B_s > B_d \quad (2.12)$$

### 2.4.3 แบบจำลองช่องสัญญาณและเฟดดิ้งทางสถิติ (Channel Model and Fading Statistics)

การศึกษาผลกระทบจากปรากฏการณ์ธรรมชาติที่มีต่อสัญญาณควมเทียบนั้น ไม่ว่าจะเป็นฝน หรือการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันนั้น ตัวแปรสำคัญมักจะมีลักษณะเป็นตัวแปรสุ่มซึ่ง จะมีการเปลี่ยนอยู่ตลอดจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขทางอุณหภูมิตามวิทยา ดังนั้นการวิเคราะห์ทางสถิติจะทำให้ เราทราบลักษณะของตัวแปรสุ่มนี้ซึ่งก็คือระดับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอิทธิพลของ ปรากฏการณ์ต่างๆ

#### 2.4.3.1 แบบจำลองของช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบราบเรียบ (Model of flat fading channels)

เมื่อผลกระทบของเฟดดิ้งที่เครื่องรับสัญญาณที่รับได้ถูกมอดูเลตด้วยขนาดของการจางหาย  $\alpha$  เมื่อ  $\alpha$  คือตัวแปรสุ่มที่มีค่ากำลังสองเฉลี่ยเป็น  $\Omega = \overline{\alpha^2}$  และค่าฟังก์ชันหนาแน่นของความน่าจะเป็น (PDF: Probability Density Function)  $p_\alpha(\alpha)$  ซึ่งค่า PDF นี้จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของการ แพร่กระจายคลื่นวิทยุ หลังจากสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่เกิดเฟดดิ้ง แล้วที่เครื่องรับจะถูกรบกวน ด้วยสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนขาวบวก (additive white Gaussian noise; AWGN) ซึ่งในทางปฏิบัติ แล้วจะพิจารณาให้เป็นอิสระจากกัน ส่วนในทางสถิติค่า Instantaneous Signal to Noise Ratio (SNR) คือ  $\gamma = \alpha^2 E_s / N_0$  และค่าเฉลี่ย SNR คือ  $\bar{\gamma} = \Omega E_s / N_0$  เมื่อ  $E_s$  คือพลังงานต่อสัญลักษณ์ ในที่นี้ PDF ของ  $\gamma$  หาได้โดยการเปลี่ยนตัวแปรการกระจายใน PDF ของ  $\alpha$  ได้ดังนี้ [8]

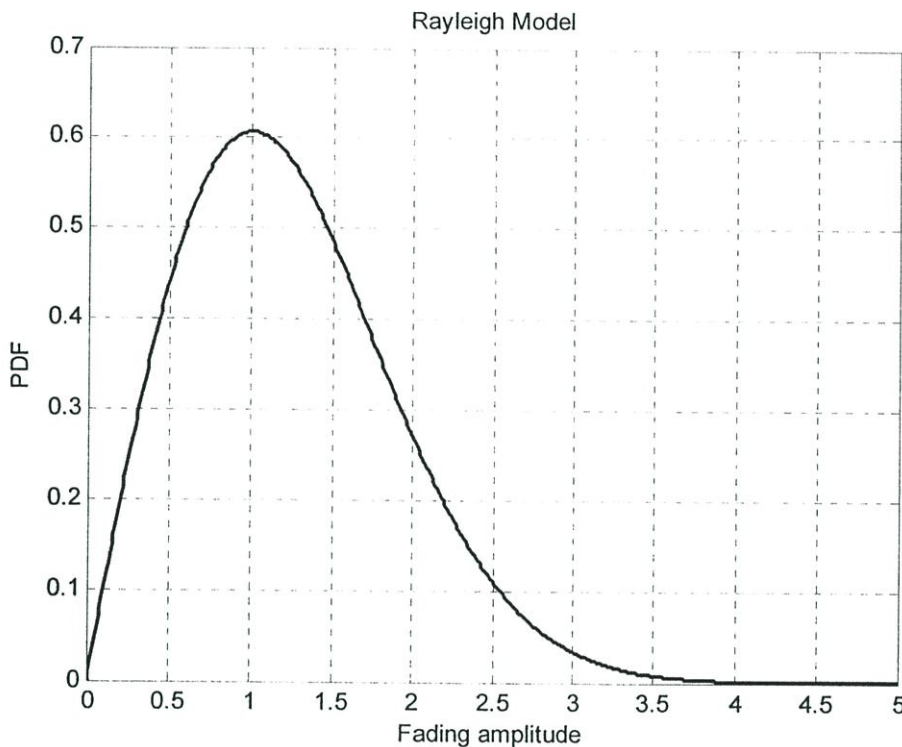
$$p_\gamma(\gamma) = \frac{p_\alpha(\sqrt{\Omega\gamma/\bar{\gamma}})}{2\sqrt{\gamma\bar{\gamma}/\Omega}} \quad (2.13)$$

โดยมีวิธีการกระจายทางสถิติแบบต่างๆดังนี้ [8]

##### 2.4.3.1.1 แบบจำลองของเรย์ลี (Rayleigh Model)

การกระจายแบบเรย์ลี ใช้อธิบายสัญญาณมัลติพาทเฟดดิ้งในเชิงสถิติ สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ ซึ่งเกิดจากผลรวมของสัญญาณที่มีการสะท้อนจากจุดต่างๆ ซึ่งในกรณีนี้จะไม่มีการ LOS ที่ส่งมาจาก ภาครับในช่องสัญญาณแบบไม่เปลี่ยนแปลงความถี่ แล้วการกระจายแบบเรย์ลีมีฟังก์ชันหนาแน่น ของความน่าจะเป็น

$$p_\alpha(\alpha) = \begin{cases} \frac{2\alpha}{\Omega} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{\Omega}\right) & (0 \leq \alpha \leq \infty) \\ 0 & (\alpha < 0) \end{cases} \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.4. PDF ของแบบจำลองของเรย์ลี

อาศัยความสัมพันธ์ใน (2.13) และ (2.14) จะสามารถหา PDF ของ  $\gamma$  ได้ดังนี้

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma}\right), \quad \gamma \geq 0 \quad (2.15)$$

#### 2.4.3.1.2 แบบจำลองนาคากามิ-ฮอยท์ (Nakagami-q (Hoyt) Model)

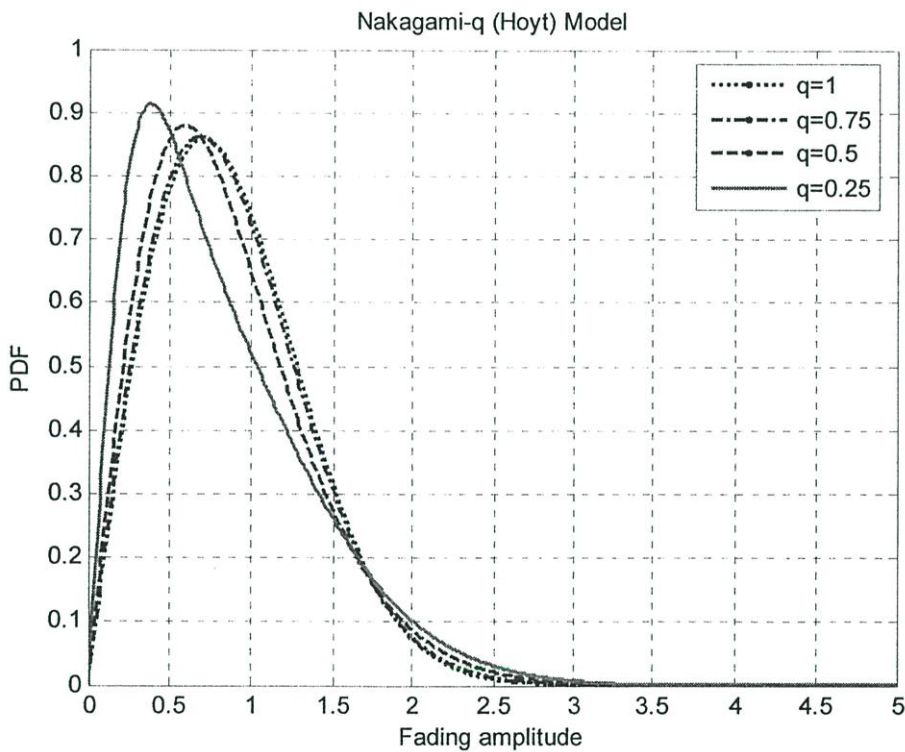
การกระจายนาคากามิ-ฮอยท์จะอ้างอิงจากการกระจายตัวของฮอยท์แสดงดังสมการ

$$p_\alpha(\alpha) = \frac{(1+q^2)\alpha}{q\Omega} \exp\left[-\frac{(1+q^2)\alpha^2}{4q^2\Omega}\right] I_0\left(\frac{(1-q^4)\alpha^2}{4q^2\Omega}\right), \quad \alpha \geq 0 \quad (2.16)$$

โดยที่  $I_0(\cdot)$  คือฟังก์ชันเบสเซล (Bessel function) แบบดัดแปลงชนิดที่ 1 อันดับที่ 0 และ  $q$  คือตัวแปรเสริมเฟดดิ้งมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 อาศัยความสัมพันธ์ใน (2.13) จะสามารถหา PDF ของ  $\gamma$  ได้ดังนี้

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{1+q^2}{2q\gamma} \exp\left[-\frac{(1+q^2)^2 \gamma}{4q^2 \gamma}\right] I_0\left(\frac{(1-q^4)\gamma}{4q^2 \gamma}\right), \quad \gamma \geq 0 \quad (2.17)$$

ถ้า  $q=0$  เป็นเฟดดิ้งแบบเกาส์เซียนข้างเดียวและ  $q=1$  เป็นเรย์ลีเฟดดิ้ง ในทางปฏิบัติแบบจำลองนี้ได้นำไปใช้กับการสื่อสารผ่านดาวเทียมของช่องสัญญาณเฟดดิ้งเกาส์เซียนข้างเดียว ซึ่งเป็นกรณีที่เลวร้ายที่สุดของการสื่อสาร



รูปที่ 2.5. PDF ของแบบจำลองนาคากามิ-ฮอยท์

#### 2.4.3.1.3 แบบจำลองนาคากามิ-ไรซ์ (Nakagami-n (Rice) Model)

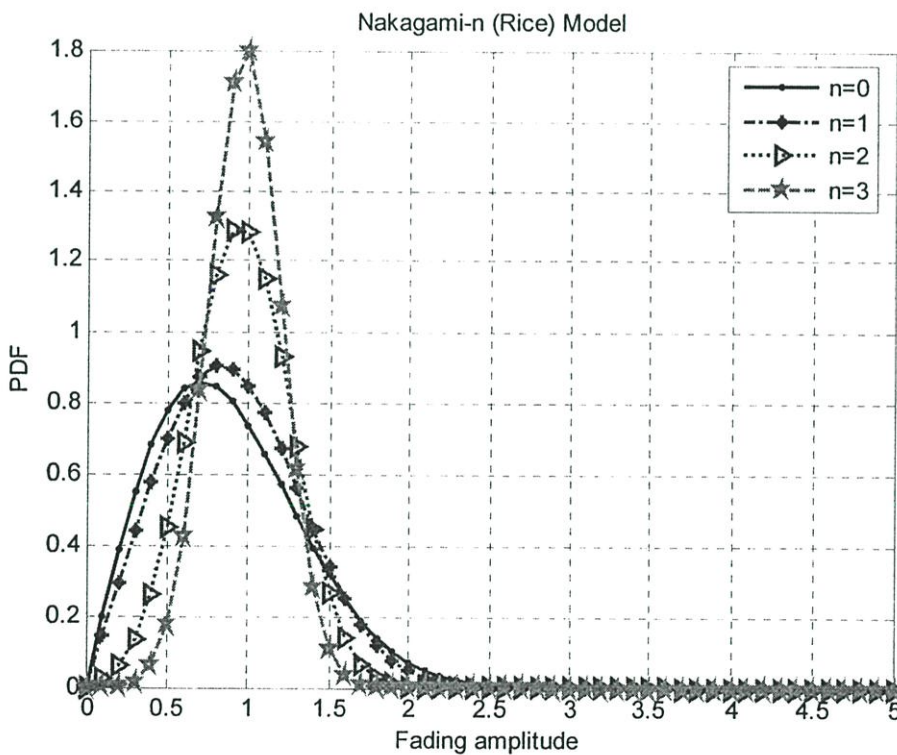
การกระจายนาคากามิ-ไรซ์จะอ้างอิงจากการกระจายแบบไรเซียน ที่เกิดจากการรวมตัวกันของสัญญาณที่มีส่วนของสัญญาณ LOS รวมอยู่ด้วย สัญญาณหลายวิธีที่มาถึงนั้นแต่ละสัญญาณจะมีทิศทางที่แตกต่างกันและมารวมกับสัญญาณ LOS ทำให้สัญญาณที่เหลือเป็นสัญญาณอ่อนลง การกระจายตัวสามารถแสดงได้ดังนี้

$$p_\alpha(\alpha) = \frac{2(1+n^2)e^{-n^2}\alpha}{\Omega} \exp\left[-\frac{(1+n^2)\alpha^2}{\Omega}\right] I_0\left(2n\alpha\sqrt{\frac{1+n^2}{\Omega}}\right), \quad \alpha \geq 0 \quad (2.18)$$

เมื่อ  $n$  คือตัวแปรเสริมเฟดดิ้งซึ่งมีค่า 0 ถึง  $\infty$  ซึ่งมีความสัมพันธ์กับไรเซียนแฟคเตอร์ (Ricean Factor)  $K = n^2$  และสามารถแสดงในรูป PDF ของ  $\gamma$  ที่เป็นการกระจายแบบ Non Central Chi-Square แสดงได้ดังนี้

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{(1+n^2)e^{-n^2}}{\bar{\gamma}} \exp\left[-\frac{(1+n^2)\gamma}{\bar{\gamma}}\right] I_0\left(2n\sqrt{\frac{(1+n^2)\gamma}{\bar{\gamma}}}\right), \quad \gamma \geq 0 \quad (2.19)$$

ถ้า  $n = \infty$  จะไม่เกิดเฟดดิ้งถึง  $n = 0$  จะเป็นเรย์ลีเฟดดิ้ง รูปแบบการกระจายแบบนี้นำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านโทรศัพท์เคลื่อนที่ทั้งภายในอาคารและนอกอาคาร



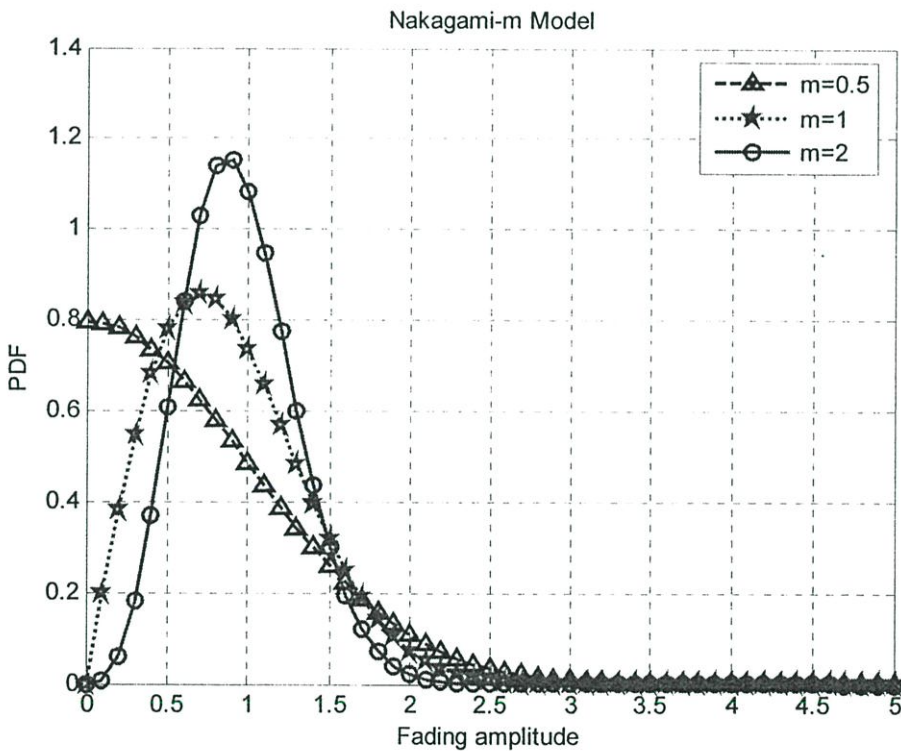
รูปที่ 2.6. PDF ของแบบจำลองนาคากามิ-ไรซ์

#### 2.4.3.1.4 แบบจำลองนาคากามิ-เอ็ม (Nakagami-m Model)

แบบจำลองของนาคากามิ-เอ็ม (Nakagami-m) อธิบายการกระจายแบบ Central Chi-Square แล้ว มีฟังก์ชันหนาแน่นของความน่าจะเป็นดังนี้

$$p_\alpha(\alpha) = \frac{2m^m \alpha^{2m-1}}{\Omega^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\alpha^2}{\Omega}\right); \quad \alpha \geq 0 \quad (2.20)$$

เมื่อ  $m$  เป็นพารามิเตอร์นาคากามิ-เอ็มเฟดคิงซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง  $0.5 - \infty$   
 $\Gamma(\cdot)$  เป็นแกมมาฟังก์ชัน



รูปที่ 2.7. PDF ของแบบจำลองนาคากามิ-เอ็ม

โดยสามารถหาค่าฟังก์ชันหนาแน่นของความน่าจะเป็นของ  $\gamma$  ได้ดังนี้

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{m^m \gamma^{m-1}}{\gamma^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\gamma}\right); \quad \gamma \geq 0 \quad (2.21)$$

### 2.4.3.2 แบบจำลองของช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเจาะจงความถี่ (Model of frequency selective fading channels)

เมื่อสัญญาณแบนด์กว้างถูกส่งผ่านช่องสัญญาณแบบเลือกความถี่ สเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้จะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปผลลัพธ์ก็คือ เกิดการกระจายของสัญญาณขึ้น ลักษณะของเฟดดิ้งแบบนี้จะถูกจำลองในลักษณะฟิลเตอร์ที่มีผลตอบสนองแถบฐานต่ออิมพัลส์แบบเชิงซ้อน (Complex-valued equivalent impulse response) ซึ่งแสดงได้ตามสมการ

$$h(t) = \sum_{l=1}^{L_p} \alpha_l e^{-j\theta_l} \delta(t - \tau_l) \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\delta(\cdot)$  คือฟังก์ชันเดลต้า

$l$  คือค่าที่ใช้ในการระบุเส้นทาง

$\alpha_l$  เซตของขนาดตัวแปรสุ่มเส้นทางที่  $l$

$\theta_l$  เซตของเฟสเส้นทางที่  $l$

$\tau_l$  เซตของการหน่วงเวลาเส้นทางที่  $l$

$L_p$  จำนวนเส้นทางทั้งหมดของสัญญาณที่เดินเข้ามาที่เครื่องรับและเครื่องรับสามารถ

แยกแยะได้ (Resolvable Paths) โดยจะอ้างอิงจากเส้นทางแรกที่เข้ามา และจะสัมพันธ์กับอัตราส่วนระหว่างการกระจายการหน่วงเวลาสูงสุดกับคาบของสัญญาณ ภายใต้เฟดดิ้งแบบช้า และ  $L_p$  จะถูกสมมุติว่ามีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาใดเวลาหนึ่ง และ  $\alpha_l, \theta_l, \tau_l$  ที่  $l = 1, \dots, L_p$  จะมีค่าคงที่ ตลอดเวลาภายในแต่ละคาบของสัญญาณ ถ้าเส้นทางต่างๆของสัญญาณมีผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ที่ถูกสร้างขึ้นมาจากแหล่งกำเนิดคนละแหล่งแล้ว แต่ละเส้นทางจะสามารถประมาณได้ว่ามีคุณสมบัติอิสระจากกัน แอมพลิจูดของเส้นทางใดๆจะถูกสมมุติว่าเป็นตัวแปรสุ่มและมีค่าเฉลี่ยกำลังสองเท่ากับ  $\Omega$  โดยที่การแจกแจงจะสามารถจำลองได้เป็นแบบต่างๆเช่นเดียวกับในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบราบเรียบหลังจากสัญญาณถูกส่งผ่านช่องสัญญาณแล้ว จะถูกรบกวนโดยสัญญาณรบกวน AWGN ซึ่งจะอิสระจากตัวแปรสุ่มแอมพลิจูดของเฟดดิ้ง นอกจากนี้แล้วค่า SNR ต่อสัญญาณ ณ เวลาใดๆของช่องสัญญาณที่  $l$  จะมีค่าเท่ากับ  $\alpha^2 E_s / N_0$  และค่า SNR เฉลี่ยต่อสัญญาณของช่องสัญญาณที่ 1 เท่ากับ  $\Omega E_s / N_0$

สัญญาณของเส้นทางแรกที่เข้ามาจะเกิดเฟดดิ้งที่น้อยกว่าสัญญาณของเส้นทางหลังๆที่เข้ามาต่อกันที่เข้ามา เพราะว่าเส้นทางแรกนี้จะเส้นทางที่เป็น LOS นอกจากนี้แล้ว โดยมากสัญญาณที่ต่อๆเข้ามาที่เครื่องรับจะมีกำลังงานของสัญญาณลดลงเรื่อยๆตามเวลาที่หน่วงออกไปสัญญาณจากเส้นทางสุดท้ายที่เข้ามาจะเกิดเฟดดิ้งมากที่สุด ซึ่งกำลังงานแต่ละเส้นทางนี้จะใช้ในการคำนวณหาหน้าตัดข้างของการหน่วงเวลาของกำลังงาน (Power Density Profile) ซึ่งเป็นแบบจำลองนี้สามารถ

สมมุติให้เป็นแบบต่างๆ ได้หลายแบบขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมโดยรอบและลักษณะการแพร่ของสัญญาณ ดังตัวอย่างเช่น จากการวัดจริงในช่องสัญญาณภายในตัวอาคารและบริเวณในตัวเมืองของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

## 2.5 ทฤษฎีของเทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงรายละเอียดของแบบจำลองการทำงานของมอดูเลตแบบปรับตัวได้ เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารบนช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเวลา (time-varying channels) ให้เหมาะสมกับช่องสัญญาณ พื้นฐานของเทคนิคนี้จะใช้การประมาณช่องสัญญาณที่ภาครับ แล้วส่งค่าที่ประมาณได้กลับไปยังภาคส่งเพื่อทำการเปลี่ยนการมอดูเลต ดังนั้นการสื่อสารแบบนี้จะเปรียบเสมือนการปรับพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่เกิดการเฟดดิ้งในช่องสัญญาณ โดยทั่วไปแล้วระบบการสื่อสารในปัจจุบันจะใช้การมอดูเลตแบบคงที่ (Fix Modulation) ที่ไม่มีการปรับพารามิเตอร์ตามช่องสัญญาณ

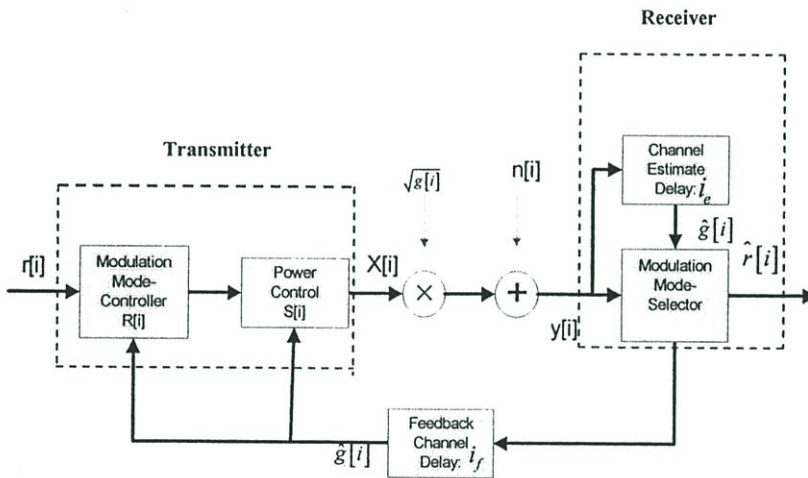
โดยทั่วไปเมื่อสัญญาณที่ภาครับมีค่า SNR ต่ำเนื่องจากเฟดดิ้งในช่องสัญญาณของการสื่อสารทำให้อัตราบิตผิดพลาด (BER) มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ข้อมูลที่รับได้ไม่สามารถนำไปใช้งานตามที่ต้องการได้ ถ้าเป็นในกรณีที่ใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบปรับตัวได้ เมื่อภาครับได้รับสัญญาณเข้ามาก็จะทำการพิจารณาค่า SNR ถ้าค่า SNR ที่ได้รับมีค่าต่ำระบบจะทำการส่งสัญญาณกลับไปที่ภาคส่งให้ทำการปรับการมอดูเลตในระดับที่ต่ำลง เพื่อรักษาอัตราบิตผิดพลาดให้อยู่ต่ำกว่าอัตราบิตผิดพลาดที่ต้องการ (Target BER:  $B_0$ ) ในกรณีกลับกันถ้าค่า SNR ที่ได้รับมีค่าสูง ระบบจะทำการส่งสัญญาณกลับไปที่ภาคส่งให้ทำการปรับการมอดูเลตในระดับที่สูงขึ้น เพื่อให้ค่าทราฟฟิค (Throughput) สูงที่สุดในอัตราบิตผิดพลาดตามที่ต้องการ ถ้าในกรณีที่ค่า SNR ที่ได้รับต่ำกว่าค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) ที่ต่ำที่สุด ระบบจะไม่ทำการส่งสัญญาณได้หรือเรียกว่าเกิดการเอาท์เจจ (Outage)

### 2.5.1 แบบจำลองการทำงานของระบบ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการสื่อสารแบบปรับตัวได้ ในแบบจำลองจะกำหนดความจุ (capacity) ช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบราบเรียบ (flat fading channels) โดยที่แต่ละช่องสัญญาณจะตอบสนองหนึ่งหน่วยเวลาสัญลักษณ์  $T_s$  แล้วสมมุติให้เป็นมอดูเลตเชิงเส้นที่มีการปรับอัตราสัญลักษณ์ (symbol rate)  $R_s = 1/T_s$  ช่องสัญญาณจะเป็นสเตชันนารี (stationary) และ ergodic time-varying gain  $\sqrt{g[i]}$  แล้วจะได้การกระจายเป็น  $p(g)$  ที่มีสัญญาณรบกวนสีขาวววกแบบเกาส์  $n(i)$  (AWGN) พลังงานสะสมสเปกตรัม  $N_0/2$  ค่าเฉลี่ยของพลังงานที่ส่ง  $\bar{S}$  แบนด์วิดท์ของสัญญาณค่านับ  $B = 1/T_s$  และ  $\bar{g}$  เป็นเกนเฉลี่ยของช่องสัญญาณ แล้ว instantaneous SNR เป็น  $\gamma[i] = \bar{S}g[i]/(N_0B)$ ,  $0 \leq \gamma[i] < \infty$  และค่าเฉลี่ย SNR ของเวลาทั้งหมดเป็น  $\bar{\gamma} = \bar{S}\bar{g}/(N_0B)$

และถ้ากำหนดให้  $g[i]$  คงที่ แล้วการกระจายตัวของ  $\gamma[i]$  เป็นอิสระจาก  $i$  จะได้การกระจายเป็น  $p(\gamma)$

ในระบบการสื่อสารที่ปรับตัวได้จะทำการประมาณค่า SNR ที่รับได้ที่เวลา  $i$  แล้วทำการปรับการมอดูเลตตามนั้น โดยทั่วไปแล้วพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจะเป็นอัตราข้อมูล  $R[i]$  และพลังงานที่ใช้ในการส่ง  $S[i]$  แล้วสำหรับอัตราข้อมูลของ  $M$ -ary มอดูเลตจะได้  $R[i] = B \log_2 M[i] = \log_2 M[i] / T_s$  bps และประสิทธิภาพของสเปกตรัมเป็น  $R[i] / B = \log_2 M[i]$  bps/Hz หลังจากนั้นจะสามารถแสดงค่า SNR ที่ได้จากการประมาณเป็น  $\hat{\gamma}[i] = \bar{S} \hat{g}[i] / (N_0 B)$  โดยที่  $g[i]$  เป็นแกนพลังงานที่ได้จากการประมาณ ถ้าหากต้องการปรับพลังงานที่ใช้ในการส่งแล้วจะสามารถแสดงความสัมพันธ์กับค่า  $\hat{\gamma}[i]$  ที่เวลา  $i$  ได้เป็น  $S(\hat{\gamma}[i]) = S(i)$  และจะได้พลังงานที่สามารถรับได้ที่เวลา  $i$  เป็น  $\gamma[i] \frac{S(\hat{\gamma}[i])}{\bar{S}}$  จะเหมือนกันกับการปรับอัตราข้อมูลของการมอดูเลต  $R(\hat{\gamma}[i]) = R[i]$  และจะได้  $S(\gamma)$  และ  $R(\gamma)$



รูปที่ 2.8. แบบจำลองระบบมอดูเลตแบบปรับตัวได้

แบบจำลองของระบบจะแสดงในรูปที่ 2.8 โดยมีหลักการทำงานดังนี้ เมื่อสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตผ่านช่องสัญญาณที่มีแกนของพลังงานช่องสัญญาณเป็น  $g[i]$  และสัญญาณรบกวนสีขาวบวกแบบเกาส์เป็น  $n(i)$  ไปยังภาครับ ที่ภาครับจะมีตัวประมาณช่องสัญญาณ (channel estimation) ที่ทำหน้าที่ในการเปรียบเทียบค่า SNR ว่ามีค่าอยู่ในช่วงใดแล้วจะมีแกนของพลังงานช่องสัญญาณที่ประมาณแล้วเป็น  $\hat{g}[i]$  ค่าที่รับได้ที่ภาครับหลังจากได้ประมาณค่าแล้วจะมีค่าประวิงเวลา (delay) เป็น  $i_c$  และเมื่อได้ช่วงที่ต้องการแล้วก็จะสามารถกำหนดรูปแบบและระดับของการมอดูเลตได้ หลังจากนั้นส่งกลับไปภาคส่งผ่านช่องสัญญาณ feedback path เพื่อทำการสับเปลี่ยนการมอดูเลต (Modulation Switching) เพื่อทำการส่งในครั้งต่อไป แล้วค่าประวิงเวลาที่ภาคส่งจะเป็นการรวมกันระหว่างการประมาณค่าประวิงเวลาที่ภาครับและค่าประวิงเวลาของ feedback path จะได้เป็น

$i_d = i_e + i_f$  การมอดูเลตแบบปรับตัวได้สามารถเปลี่ยนรูปแบบและระดับของการมอดูเลตได้ตามความแปรปรวนของช่องสัญญาณได้ โดยอาจตั้งเงื่อนไขในการทำงานให้มีอัตราหรือกำลังส่งคงที่ เงื่อนไขที่กล่าวมาตอนต้นจะขึ้นกับค่า SNR ที่รับได้ในเวลานั้นจะเป็นตัวกำหนดในการเปลี่ยนการมอดูเลต เช่น ถ้าสัญญาณที่รับได้มีค่า SNR ที่ได้ตกอยู่ในช่วง  $\gamma_1 - \gamma_2$  ให้เลือกการมอดูเลตแบบ QPSK ถ้าเวลาผ่านไปค่า SNR ที่รับได้ตกอยู่ในช่วง  $\gamma_2 - \gamma_3$  ให้เลือกการมอดูเลตแบบ 8PSK เป็นต้น โดยระบบจะทำการส่งข้อมูลไปยังภาคส่ง เพื่อเปลี่ยนรูปแบบหรือระดับการมอดูเลต ส่วนในกรณีที่ค่า SNR มีค่าน้อยกว่าค่าเทรชโฮลด์เริ่มต้นที่กำหนด ระบบจะไม่มี การสื่อสารเกิดขึ้น

### 2.5.2 เทรชโฮลด์ในการสับเปลี่ยนการมอดูเลต (Switching Threshold)

ในปัจจุบันได้มีหลายวิธีที่ใช้ในการกำหนดค่าเทรชโฮลด์ของการมอดูเลตแบบปรับตัวได้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาวิธีสับเปลี่ยนเทรชโฮลด์แบบคงที่ (Fixed Switching Threshold) ซึ่งเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนไม่มากเท่าไร เหมาะสมในการสร้างใช้งานจริง ที่มีเงื่อนไขของขีดจำกัดในการออกแบบวงจรและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

ในการพิจารณาระดับการเปลี่ยนการมอดูเลต จะให้ค่าของอัตราบิตผิดพลาด (BER) และกำลังงานในการสื่อสารคงที่ ซึ่งสามารถแบ่งการปรับตัวเป็น  $d$  รูปแบบ โดยที่  $d = \{1, 2, 3, \dots, N\}$  และ  $N$  เป็นจำนวนการมอดูเลตทั้งหมดที่ใช้สื่อสาร แล้วสามารถกำหนดขอบเขตได้เป็น  $\{\gamma_d\}_{d=0}^{N+1}$  โดยที่การปรับค่า  $d$  ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของค่า SNR ที่รับได้โดยกำหนดเงื่อนไขได้ดังนี้

$$\text{การเลือกโหมดที่ } d \text{ เมื่อ } \gamma \in [\gamma_d, \gamma_{d+1}) \quad (2.23)$$

และในกรณีที่ข้อมูลไม่มีการส่งเกิดขึ้นเมื่อ  $\gamma_0 \leq \gamma < \gamma_1$  เปรียบเสมือนว่าเป็นรูปแบบที่  $d=0$  และ  $R_0 = 0$

การกำหนดค่าเทรชโฮลด์ของการมอดูเลตแบบปรับตัวได้ โดยกำหนดอัตราบิตผิดพลาดเป้าหมายคงที่ทุกการมอดูเลตจะแสดงได้ดังสมการ

$$B_0 = QPSK(\gamma) = 8PSK(\gamma) = 16PSK(\gamma) = 32PSK(\gamma) \quad (2.24)$$

ดังนั้นจะได้ว่าการปรับการมอดูเลตสามารถแสดงได้ดังตาราง

ตารางที่ 2.2 ขบวนการปรับการมอดูเลต

Mode( $d$ )	SNR( $\gamma$ )	Modulation
0	$\gamma_0 \leq \gamma < \gamma_1$	Outage
1	$\gamma_1 \leq \gamma < \gamma_2$	QPSK
2	$\gamma_2 \leq \gamma < \gamma_3$	8PSK
3	$\gamma_3 \leq \gamma < \gamma_4$	16PSK
4	$\gamma_4 \leq \gamma < \infty$	32PSK

### 2.5.3 เทคนิคการปรับตัว (Adaptive Techniques)

ที่ภาคส่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจะมีความสัมพันธ์กับค่า SNR ซึ่งในส่วนนี้จะยกตัวอย่างเทคนิคการปรับตัวที่นิยมใช้เช่น อัตราข้อมูล พลังงาน เป็นต้น

#### 2.5.3.1 เทคนิคการปรับอัตราข้อมูล (Variable-Rate Techniques)

ในการปรับอัตราการมอดูเลตจะมีอัตราข้อมูล (data rate) เป็น  $R[\gamma]$  ในการปรับอัตราข้อมูลมีอยู่หลายวิธี เช่นกำหนดอัตราสัญลักษณ์ (symbol rate) ของการมอดูเลต  $R_s = 1/T_s$  ให้คงที่แล้วใช้การมอดูเลตหลายๆแบบหรือทำการกำหนดให้ขนาดของกลุ่มสัญญาณ (constellation sizes) ให้แตกต่างกัน หรืออีกวิธีคือการกำหนดให้การมอดูเลตเหมือนกันแล้วเปลี่ยนอัตราสัญลักษณ์ ในการปรับอัตราสัญลักษณ์จะยากในการใช้งานจริง ตั้งแต่การปรับแบนด์วิดท์ซึ่งจะไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติและมีความยุ่งยากในการแบ่งแบนด์วิดท์ แต่ในทางตรงข้ามถ้าทำการเปลี่ยนขนาดของกลุ่มสัญญาณหรือชนิดของการมอดูเลตแล้วกำหนดอัตราสัญลักษณ์จะง่ายกว่าและเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้ในปัจจุบัน เช่นการใช้ใน EGPRS สำหรับการสื่อสารข้อมูล GSM cellular จะทำการปรับระหว่าง 8PSK และ GMSK และการใช้ GPRS สำหรับการสื่อสารข้อมูลใน IS-136 TDMA cellular จะปรับระหว่าง 4, 8 และ 16PSK เป็นต้น

#### 2.5.3.2 เทคนิคการปรับพลังงาน (Variable-Power Techniques)

การปรับพลังงานที่ใช้ส่งเป็นการชดเชยค่า SNR ที่มีความเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเฟดดิ้ง โดยจุดมุ่งหมายก็คือการรักษา BER ให้คงที่หรือเหมือนกับการทำให้ค่า SNR คงที่ การปรับพลังงานจะตรงข้ามกับการเกิดเฟดดิ้งในช่องสัญญาณแล้วจะได้

$$\frac{S(\gamma)}{\bar{S}} = \frac{\sigma}{\gamma} \quad (2.25)$$

โดยที่  $\sigma$  จะเท่ากับค่าคงที่ของ SNR ที่รับได้ แล้วข้อจำกัดของค่า  $\bar{S}$  จะสามารถแสดงได้เป็น

$$\int \frac{S(\gamma)}{S} p(\gamma) d\gamma = \int \frac{\sigma}{\gamma} p(\gamma) d\gamma = 1 \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.35) จะได้ว่า  $\sigma = 1/E[1/\gamma]$  ซึ่งจะถูกกำหนดโดย  $p(\gamma)$  ในขณะที่ส่งค่า  $\bar{S}$  จะทำให้ได้  $\bar{\gamma}$  เช่นนี้ผลกระทบของช่องสัญญาณจะส่งผลในทางตรงกันข้ามกับการปรับพลังงาน แล้วจะได้

$$\frac{S(\gamma)}{S} = \begin{cases} \frac{\sigma}{\gamma} & \gamma \geq \gamma_0 \\ 0 & \gamma < \gamma_0 \end{cases} \quad (2.27)$$

ค่า Cutoff  $\gamma_0$  จะขึ้นอยู่กับความต้องการของความน่าจะเป็นเอาต์เดจ (outage probability)  $P_{out} = p(\gamma < \gamma_0)$  หรือขึ้นอยู่กับอัตราบิดผิดผิดพลาดเป้าหมาย ดังนั้นจะใช้ช่องสัญญาณในกรณีที่  $\gamma \geq \gamma_0$  ซึ่งจะให้ค่าเป็น  $\bar{S}$  จะได้  $\sigma = 1/E_{\gamma_0}[1/\gamma]$  แล้วจะได้

$$E_{\gamma_0}[1/\gamma] \triangleq \int_{\gamma_0}^{\infty} \frac{1}{\gamma} p(\gamma) d\gamma \quad (2.28)$$

นอกจากนี้ยังมีหลายเทคนิคที่มีการใช้งานแต่ไม่เป็นที่นิยมเช่น variable error probability, variable-coding techniques และ Hybrid techniques เป็นต้น [9], [10]

### บทที่ 3

## แบบจำลองระบบและการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ

### 3.1 รายละเอียดของระบบ

จาก [11] ทำการวิจัยสัญญาณของการสื่อสารผ่านดาวเทียมที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ซินทิลเลชันที่ความถี่ย่าน UHF โดยได้วิจัยเกี่ยวกับรูปแบบที่ไม่แน่นอนของการกระจายประจุไฟฟ้าในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยจะสามารถกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ซินทิลเลชัน  $\alpha_{sc}(t)$  ซึ่งเป็นโมเดลที่ได้จากการรวบรวมทางสถิติจะมีค่าเฉลี่ยไม่เป็นศูนย์ และมีกระบวนการสุ่มเชิงซ้อนแบบเกาส์ จะสามารถแสดงได้ดังนี้ [12]

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

โดยที่  $K_s$  คือส่วนของกำลังสัญญาณที่รับได้ที่ส่งผ่านเส้นทาง LOS

$\phi$  คือค่าเฟสที่ถูกกำหนดให้มีการกระจายแบบยูนิฟอร์มโดยมีค่าระหว่าง  $[-\pi, \pi]$

$n_{scint}(t)$  เป็นกระบวนการเชิงซ้อนแบบเกาส์ที่ได้จากการแพร่กระจายของสัญญาณในทิศทางสุ่มที่เป็นการแพร่แบบ NLOS เนื่องจากปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน

โดยที่ค่าเฉลี่ยของพลังงานที่รับได้ที่มีพาหะการกระเจิงเป็น  $\sigma_{nsc}^2 \equiv E|n_{scint}(t)|^2$  พลังงานรวมของสัญญาณที่รับได้เป็น  $S = (K_s + \sigma_{nsc}^2)P_s$  โดยที่  $P_s \equiv E|s(t)|^2 = E\{A(t)^2\}$  เป็นพลังงานของสัญญาณที่ใช้ส่งและถ้าสมมุติว่าไม่มีการสูญเสียสัญญาณที่รับได้จาก LOS กับเส้นทางที่กระเจิงแล้วจะได้ความสัมพันธ์เป็น  $K_s + \sigma_{nsc}^2 = 1$  ส่วนความรุนแรงของเฟดดิ้งสามารถแสดงได้ในรูปของดัชนี  $S_4$  ได้เป็น [122]

$$S_4 = \sqrt{\text{var}\{|\alpha_{sc}|^2\} / E\{|\alpha_{sc}|^2\}} \quad (3.2)$$

สามารถแสดงในรูปของ  $K_s$  และ  $\sigma_{nsc}^2$  เป็น

$$S_4 = \sqrt{1 - (K_s \cdot P_s / S)^2} \quad (3.3)$$

ดัชนี  $S_4$  ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าไรเซชันแฟคเตอร์ของการจางหายซินทิลเลชัน ( $K_{sc}$ ) ดังแสดงในสมการที่ (3.4)

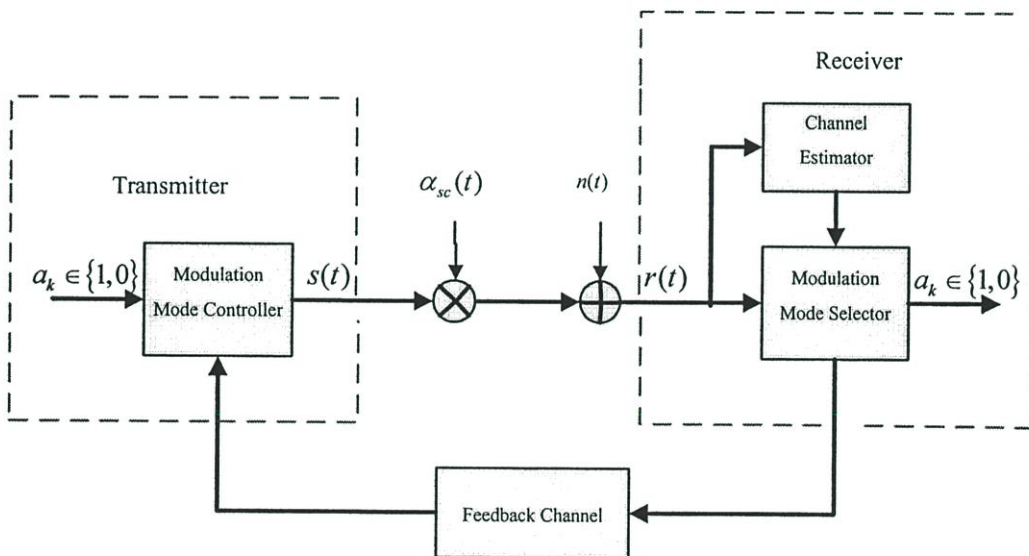
$$S_4 = \sqrt{1 - \left( \frac{K_{sc}}{K_{sc} + 1} \right)^2}. \quad (3.4)$$

โดยที่  $K_{sc} \equiv K_s / \sigma_{nsc}^2$  ดังนั้น  $S_4$  ปกติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้า  $S_4 = 0$  จะเป็นช่องสัญญาณที่ไม่เกิดการเฟดดิ้ง แต่ถ้า  $0 < S_4 < 1$  จะเป็นช่องสัญญาณที่เกิดโรเซียนเฟดดิ้ง และถ้า  $S_4 = 1$  จะเป็นช่องสัญญาณเรย์ลีเฟดดิ้ง

ซินทิลเลชั่นเฟดดิ้งสามารถแบ่งได้เป็น ซินทิลเลชั่นเฟดดิ้งแบบไม่เจาะจงความถี่ (non frequency selective scintillation fading) และซินทิลเลชั่นเฟดดิ้งแบบเจาะจงความถี่ (frequency selective scintillation fading) ในที่นี้จะทำการวิเคราะห์ซินทิลเลชั่นเฟดดิ้งแบบไม่เจาะจงความถี่

### 3.2 แบบจำลองซินทิลเลชั่น

ในวิทยานิพนธ์นี้จะจำลองการทำงานของการทำงานของการสื่อสารผ่านดาวเทียมเป็น 2 รูปแบบ แบบแรกที่จะศึกษาคือแบบจำลองระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารจะผ่านชั้นบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดการจางหายแบบซินทิลเลชั่น



รูปที่ 3.1 แบบจำลองซินทิลเลชั่น

จากรูปที่ 3.1 จะสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อข้อมูลบรรจุเข้าไปในตัวควบคุมมอดูเลต (Modulation mode controller) ที่เครื่องส่งแล้วส่งสัญญาณ  $s(t)$  ผ่านช่องสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันและสัญญาณรบกวน AWGN โดยจะไม่ได้รับผลกระทบจากมัลติพาทเฟดดิ้ง เมื่อสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับจะหาค่า SNR ที่ตัวประมาณช่องสัญญาณ (Channel estimator) แล้ว

เลือกการมอดูเลตที่เหมาะสมกับช่องสัญญาณที่ตัวเลือกมอดูเลต (Modulation mode selector) แล้ว  
 แจงให้ทางเครื่องส่งเปลี่ยนการมอดูเลตผ่านทาง Feedback channel โดยสัญญาณที่รับได้  $r(t)$  เป็น

$$r(t) = \alpha_{sc}(t)s(t) + n(t) \quad (3.5)$$

โดยที่  $s(t)$  เป็นสัญญาณจากภาคส่ง,

$n(t)$  เป็นสัญญาณรบกวนขาวววกแบบเกาส์ (AWGN),

$\alpha_{sc}(t)$  เป็นสัมประสิทธิ์ซีซีทีลเลชัน

แล้วจะสามารถแสดงในส่วนของเอนเวโลป (Envelope) ของสัมประสิทธิ์ซีซีทีลเลชัน  $r_{sc} \equiv |\alpha_{sc}(t)|$   
 มีความน่าจะเป็นหนาแน่นแบบไรเซียน (PDF) เป็น

$$p(r_{sc}) = \frac{2r_{sc}(1+K_{sc})}{\Omega_{sc}} \exp\left[-\frac{(1+K_{sc})r_{sc}^2}{\Omega_{sc}} - K_{sc}\right] \cdot I_0\left(2r_{sc}\sqrt{\frac{K_{sc}(1+K_{sc})}{\Omega_{sc}}}\right), \quad r_{sc} \geq 0 \quad (3.6)$$

โดยที่  $\Omega_{sc}$  เป็นค่าเฉลี่ยเอนเวโลปของพลังงานแสดงได้เป็น

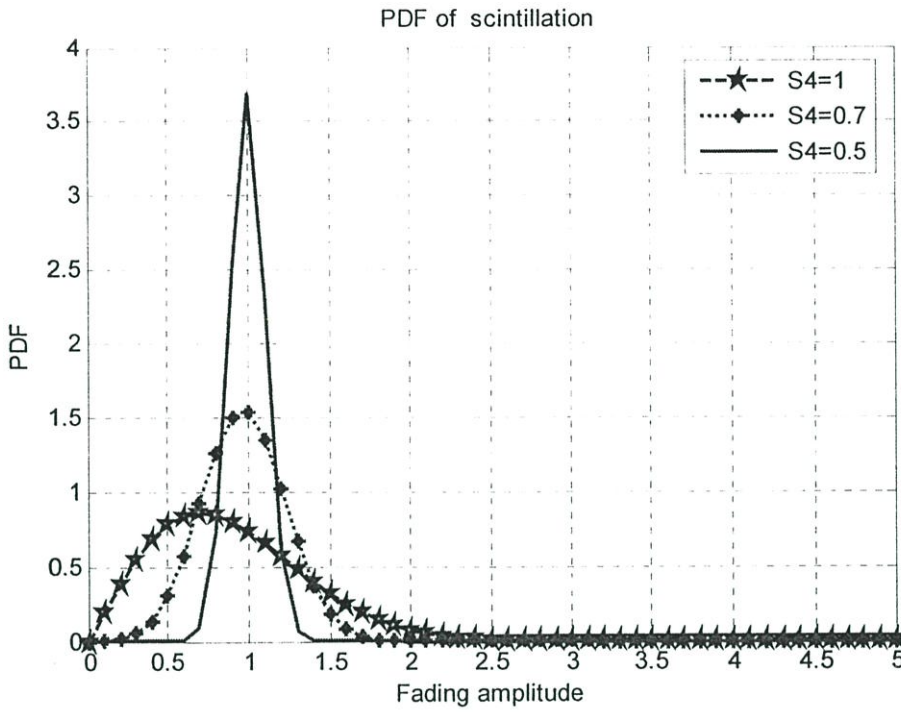
$$\Omega_{sc} = a_{sc}^2 + 2\sigma_{sc}^2 \quad (3.7)$$

เมื่อ  $K_{sc} \rightarrow 0$  จะไม่มี LOS ซึ่งก็คือเป็นการกระจายแบบเรย์ลี แล้ว PDF ของ  $r_{sc}$  จะได้เป็น

$$p_{sc}(r_{sc}) = \frac{2r_{sc}}{\Omega_{sc}} \exp\left[-\frac{r_{sc}^2}{\Omega_{sc}}\right] \quad (3.8)$$

และจากความสัมพันธ์ของดัชนี  $S_4$  และโรเซียนแฟคเตอร์จะสามารถแสดงให้อยู่ในรูป  $S_4$  ได้ดังนี้

$$p(r_{sc}) = \frac{2r_{sc}}{\Omega_{sc}(1-\sqrt{1-S_4^2})} \exp\left[-\frac{r_{sc}^2}{\Omega_{sc}(1-\sqrt{1-S_4^2})} - \frac{\sqrt{1-S_4^2}}{1-\sqrt{1-S_4^2}}\right] \cdot I_0\left(\frac{2r_{sc}}{1-\sqrt{1-S_4^2}} \sqrt{\frac{\sqrt{1-S_4^2}}{\Omega_{sc}}}\right), \quad 0 < S_4 \leq 1 \quad (3.9)$$



รูปที่ 3.2 PDF ของช่องสัญญาณซินทิลเลชั่น

เมื่อ  $S_4 \rightarrow 1$  แล้ว PDF ของ  $r_{sc}$  จะได้เป็น

$$p_{sc}(r_{sc}) = \frac{2r_{sc}}{\Omega_{sc}} \exp\left(-\frac{r_{sc}^2}{\Omega_{sc}}\right) \quad (3.10)$$

แล้ว  $\Omega_{sc} = 2\sigma_{sc}^2$  และเมื่อ instantaneous SNR ที่รับได้เป็น

$$\gamma_{sc} = \frac{E_b}{N_0} |\alpha_{sc}|^2 \quad (3.11)$$

และค่าเฉลี่ย SNR สามารถแสดงได้เป็น

$$\bar{\gamma}_{sc} = \frac{E_b}{N_0} E\{|\alpha_{sc}|^2\} = \frac{E_b}{N_0} (a_{sc}^2 + 2\sigma_{sc}^2) \quad (3.12)$$

แล้วจาก (2.13) และ (3.9) จะสามารถหาค่า PDF ของ SNR ได้ดังนี้

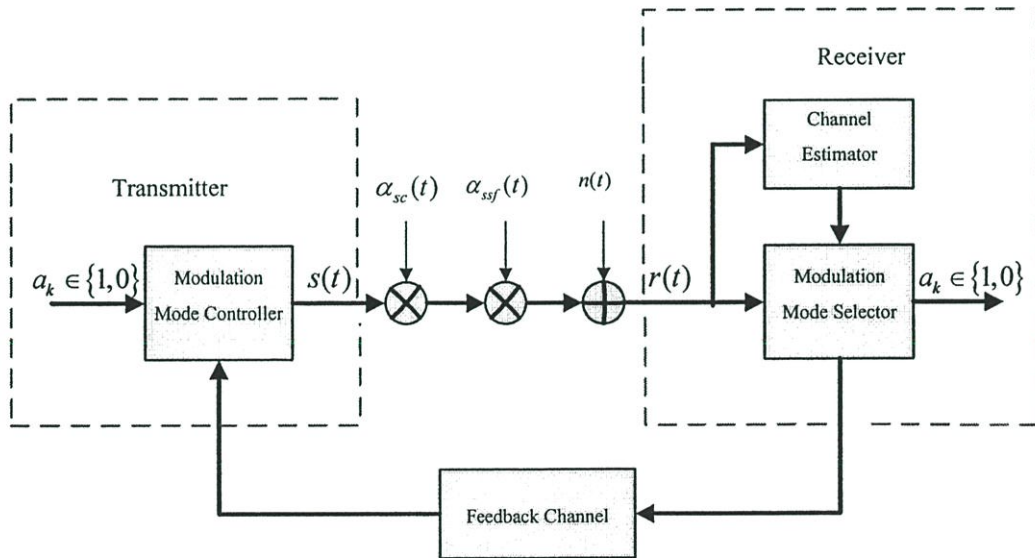
$$p_{sc}(\gamma_{sc}) = \frac{1}{\gamma_{sc}(1-\sqrt{1-S_4^2})} \exp\left(-\frac{1}{1-\sqrt{1-S_4^2}} \left[\frac{\gamma_{sc}}{\gamma_{sc}} + \sqrt{1-S_4^2}\right]\right) \cdot J_0\left\{\frac{2}{1-\sqrt{1-S_4^2}} \sqrt{\frac{\gamma_{sc}\sqrt{1-S_4^2}}{\gamma_{sc}}}\right\} \quad \gamma_{sc} \geq 0, \quad 0 < S_4 \leq 1 \quad (3.13)$$

เมื่อ  $S_4 \rightarrow 1$  แล้ว PDF ของ  $\gamma_{sc}$  จะได้เป็น

$$p_{sc}(\gamma_{sc}) = \frac{1}{\gamma_{sc}} \exp\left(-\frac{\gamma_{sc}}{\gamma_{sc}}\right) \quad \gamma_{sc} \geq 0 \quad (3.14)$$

### 3.3 แบบจำลองซิงทิลเลขันร่วมกับมัลติพาทเฟดดิ้ง

แบบจำลองระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารจะผ่านชั้นบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดการจางหายแบบซิงทิลเลขัน และหลังจากนั้นจะเกิดมัลติพาทเฟดดิ้งก่อนที่จะส่งถึงตัวรับ



รูปที่ 3.3 แบบจำลองของช่องสัญญาณซิงทิลเลขันร่วมกับมัลติพาทเฟดดิ้ง

จากรูปที่ 3.3 จะสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อข้อมูลบรรจุเข้าไปในตัวควบคุมมอดูเลต (Modulation mode controller) ที่เครื่องส่งแล้วส่งสัญญาณ  $s(t)$  ผ่านช่องสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน มัลติพาทเฟดดิ้ง และสัญญาณรบกวน AWGN เมื่อสัญญาณที่รับได้ที่

เครื่องรับจะหาค่า SNR ที่ตัวประมาณช่องสัญญาณ (Channel estimator) แล้วเลือกการมอดูเลตที่เหมาะสมกับช่องสัญญาณที่ตัวเลือกมอดูเลต (Modulation mode selector) แล้วแจ้งให้ทางเครื่องส่งเปลี่ยนการมอดูเลตผ่านทาง Feedback channel ซึ่งสัญญาณที่รับได้แสดงได้ดังสมการ

$$r(t) = \alpha_{ssf} \alpha_{sc} s(t) + n(t) \quad (3.15)$$

โดยที่  $\alpha_{ssf}(t)$  เป็นสัมประสิทธิ์มัลติพาทเฟดดิ้ง

กำหนดให้  $r_{sc} = |\alpha_{sc}(t)|$  และ  $r_{ssf} = |\alpha_{ssf}(t)|$  เป็นอิสระจากกัน แล้วการกระจายของทั้งสองช่องสัญญาณสามารถหาได้จาก

$$p(z) = \int p_{ssf}(z/r_{sc}) p_{sc}(r_{sc}) \frac{dr_{sc}}{r_{sc}} \quad (3.16)$$

โดยที่  $z = r_{sc} \times r_{ssf} = |\alpha_{sc}(t) \cdot \alpha_{ssf}(t)|$  ถ้าทั้งการจางหายซินทิสิสและมัลติพาทเฟดดิ้งแล้วจะสามารถหาค่า PDF ของ  $z$  ได้ดังนี้ [13],[14],[15]

$$\begin{aligned} p(z) &= \frac{4z}{\Omega_{comb}} \left( \frac{K_{ssf} + 1}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right) \exp \left( -\frac{\sqrt{1 - S_4^2}}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} - K_{ssf} \right) \\ &\cdot \sum_{i,l=0}^{\infty} \left( \frac{\sqrt{1 - S_4^2}}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right)^i \frac{K_{ssf}^l}{(i!)^2 (l!)^2} \left( \sqrt{\frac{z^2}{\Omega_{comb}} \left[ \frac{K_{ssf} + 1}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right]} \right)^{i+l} \\ &\cdot K_{i-l} \left\{ \sqrt{\frac{4z^2}{\Omega_{comb}} \left[ \frac{K_{ssf} + 1}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right]} \right\} \end{aligned} \quad (3.17)$$

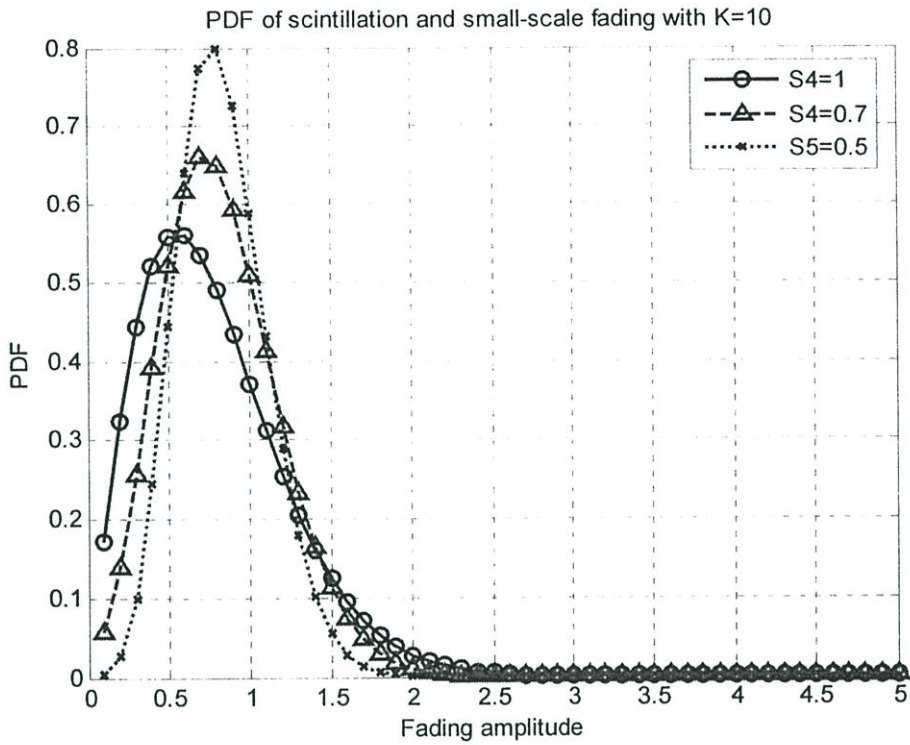
โดยที่  $\Omega_{comb}$  เป็นค่าเฉลี่ยเอนเวโลปของพลังงานแสดงได้เป็น

$$\begin{aligned} \Omega_{comb} &= (a_{sc}^2 + 2\sigma_{sc}^2)(a_{ssf}^2 + 2\sigma_{ssf}^2) \\ &= a_{sc}^2 a_{ssf}^2 + a_{sc}^2 2\sigma_{ssf}^2 + a_{ssf}^2 2\sigma_{sc}^2 + 4\sigma_{sc}^2 \sigma_{ssf}^2 \end{aligned} \quad (3.18)$$

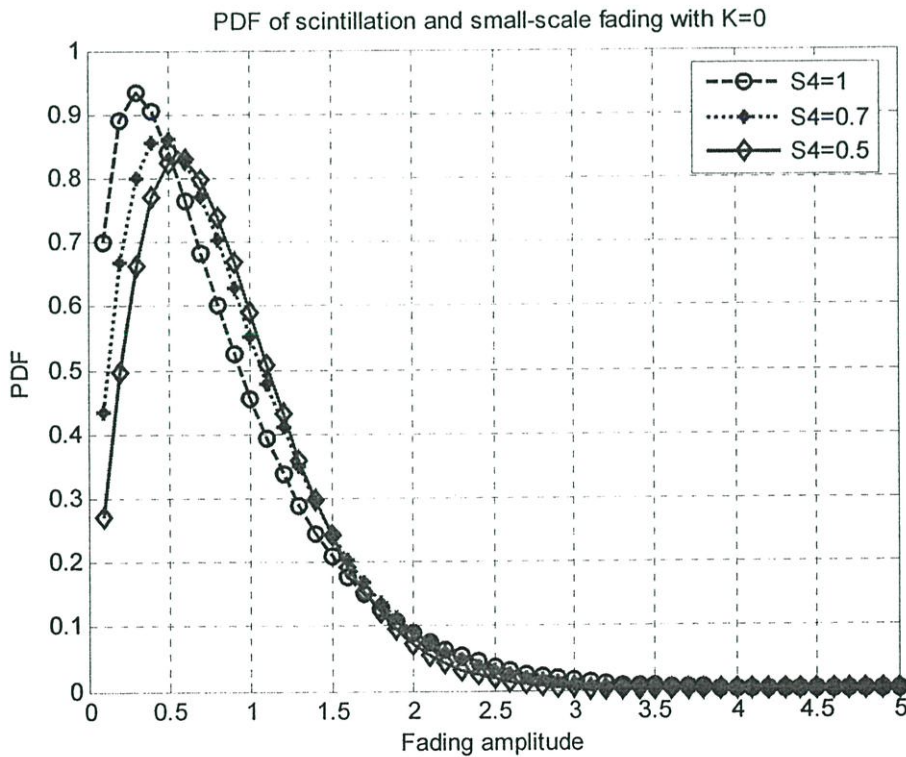
โดยที่  $a_{ssf}^2$  เป็นพลังงานของพาท LOS

$2\sigma_{ssf}^2$  เป็นพาทการกระเจิงของมัลติพาทเฟดดิ้ง

$K_a \{ \cdot \}$  เป็น  $a$  th order modified Bessel function of the second kind



รูปที่ 3.4 PDF ของช่องสัญญาณซินทิลเลชันและมัลติพาทเฟดดิ้งที่  $K_{ssf} = 10$



รูปที่ 3.5 PDF ของช่องสัญญาณซินทิลเลชันและมัลติพาทเฟดดิ้งที่  $K_{ssf} = 0$

และเมื่อ  $K_{ssf} \rightarrow 0$  แล้ว PDF ของ  $z$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 p_{comb}(z) &= \frac{4z}{\Omega_{comb}} \left( \frac{1}{1-\sqrt{1-S_4^2}} \right) \exp \left( -\frac{\sqrt{1-S_4^2}}{1-\sqrt{1-S_4^2}} \right) \\
 &\cdot \sum_{i=0}^{\infty} \left( \frac{\sqrt{1-S_4^2}}{1-\sqrt{1-S_4^2}} \right)^i \frac{1}{(i!)^2} \left( \sqrt{\frac{z^2}{\Omega_{comb}(1-\sqrt{1-S_4^2})}} \right) \\
 &\cdot K_i \left\{ \sqrt{\frac{4z^2}{\Omega_{comb}(1-\sqrt{1-S_4^2})}} \right\}
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

เมื่อ  $S_4 \rightarrow 1$  แล้ว PDF ของ  $z$  จะได้ว่า

$$p_{comb}(z) = \frac{4z}{\Omega_{comb}} K_0 \left\{ \sqrt{\frac{4z^2}{\Omega_{comb}}} \right\} \tag{3.20}$$

มัลติพาทเฟดดิ้งจะได้ค่า instantaneous SNR เป็น

$$\gamma_{comb} = \frac{E_b}{N_0} \left\{ |\alpha_{sc}|^2 |\alpha_{ssf}|^2 \right\} \tag{3.21}$$

และมีค่าเฉลี่ย SNR เป็น

$$\bar{\gamma}_{comb} = \frac{E_b}{N_0} E \left\{ |\alpha_{sc}|^2 |\alpha_{ssf}|^2 \right\} = \frac{E_b}{N_0} \Omega_{comb} \tag{3.22}$$

แล้วจาก (2.13) และ (3.17) จะสามารถหาค่า PDF ของ SNR ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 p_\gamma(\gamma_{comb}) &= \frac{2}{\gamma_{comb}} \left( \frac{K_{ssf} + 1}{1-\sqrt{1-S_4^2}} \right) \exp \left( -\frac{\sqrt{1-S_4^2}}{1-\sqrt{1-S_4^2}} - K_{ssf} \right) \\
 &\cdot \sum_{i,l=0}^{\infty} \left( \frac{\sqrt{1-S_4^2}}{1-\sqrt{1-S_4^2}} \right)^i \frac{K_{ssf}^l}{(i!)^2 (l!)^2} \left( \sqrt{\frac{\gamma_{comb}}{\gamma_{comb}} \cdot \left[ \frac{K_{ssf} + 1}{1-\sqrt{1-S_4^2}} \right]} \right)^{i+l}
 \end{aligned}$$

$$\bullet K_{i-l} \left\{ \sqrt{\frac{4\gamma_{comb}}{\gamma_{comb}} \left[ \frac{K_{ssf} + 1}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right]} \right\} \quad (3.23)$$

เมื่อ  $K_{ssf} \rightarrow 0$  แล้ว PDF ของ  $\gamma_{comb}$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_\gamma(\gamma_{comb}) &= \frac{2}{\gamma_{comb}} \left( \frac{1}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right) \exp\left( -\frac{\sqrt{1 - S_4^2}}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right) \\ &\bullet \sum_{i=0}^{\infty} \left( \frac{\sqrt{1 - S_4^2}}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right)^i \frac{1}{(i!)^2} \left( \sqrt{\frac{\gamma_{comb}}{\gamma_{comb}} \left[ \frac{1}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right]} \right)^i \\ &\bullet K_i \left\{ \sqrt{\frac{4\gamma_{comb}}{\gamma_{comb}} \left[ \frac{1}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right]} \right\} \end{aligned} \quad (3.24)$$

เมื่อ  $S_4 \rightarrow 1$  แล้ว PDF ของ  $\gamma_{comb}$  ได้ดังนี้

$$P_\gamma(\gamma_{comb}) = \frac{2}{\gamma_{comb}} K_0 \left\{ \sqrt{\frac{4\gamma_{comb}}{\gamma_{comb}}} \right\} \quad (3.25)$$

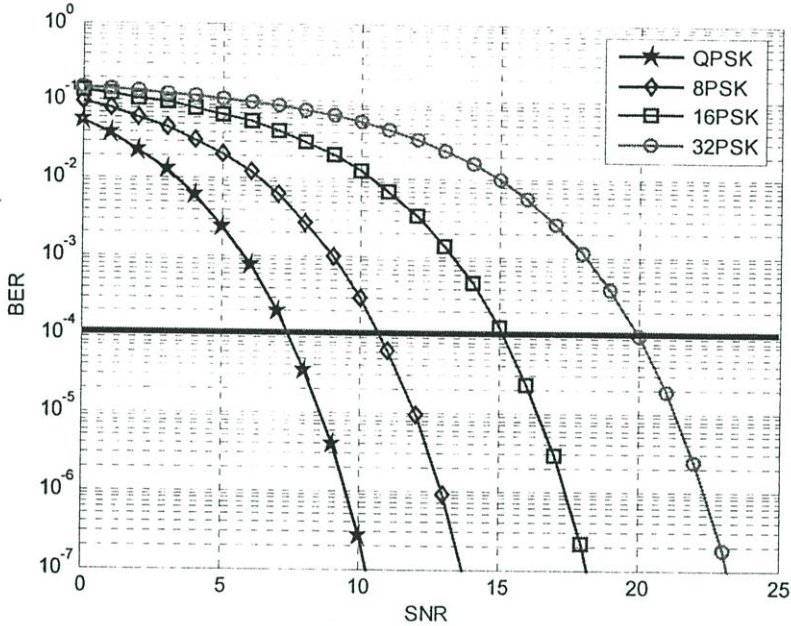
### 3.4. เทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้

จุดมุ่งหมายของมอดูเลตแบบปรับตัวได้คือการทำให้อัตราข้อมูลสูง โดยทำการปรับพารามิเตอร์ในการสื่อสารโดยใช้ CSI ประมาณที่ภาครับเพื่อรักษาอัตราบิตผิดพลาดที่ต้องการ (Target BER;  $B_0$ ) ให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ และกำหนดให้  $N$  เป็นจำนวนโหมดทั้งหมดในการปรับมอดูเลต โดยกำหนดให้พลังงานในการสื่อสารคงที่ แล้วจะได้ขอบเขตของการปรับมอดูเลต (rate region) เป็น  $\{\gamma\}_{d=0}^{N+1}$  [16]

เมื่อรู้ค่า SNR ล่วงหน้าจะสามารถกำหนดขอบเขตของการปรับมอดูเลตได้ โดยที่โหมด  $n$  จะมีขอบเขตเป็น  $\gamma(d) \in [\gamma_d, \gamma_{d+1})$  แล้วถ้า  $\gamma(d) < \gamma_0$  จะไม่มีการสื่อสารเกิดขึ้นโดยที่  $\gamma_0$  เป็น cutoff SNR และหลังจากนั้นจะสามารถประมาณอัตราบิตผิดพลาด (BER) ที่มีสัญญาณรบกวน AWGN ได้ ดังนี้ ที่ใช้การมอดูเลชันแบบ MPSK แสดงได้ดังนี้ [10]

$$BER_{MPSK}(\gamma) \approx \frac{2}{\log_2 M} Q\left( \sqrt{2\gamma \log_2 M} \sin \frac{\pi}{M} \right) \quad (3.26)$$

ในระบบอะแดพทีฟมอดูเลชัน การที่ภาครับจะสามารถตัดสินใจเลือกการมอดูเลชันจะขึ้นอยู่กับค่า SNR ที่ได้รับว่าอยู่ในช่วงของการมอดูเลชันโหมดไหน ในการกำหนดขอบเขตของการมอดูเลชันจะใช้ switching level เป็นตัวกำหนด โดยสามารถหาค่า switching level ได้จากค่า BER ที่ต้องการ รูปที่ 3.2 แสดงผลการวิเคราะห์ BER จากสมการที่ (3.26) ในวิทยานิพนธ์นี้สมมุติให้ค่า BER ที่ต้องการ ( $B_0$ ) เป็น  $10^{-4}$  แล้วจะสามารถหาค่า switching level ได้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.6. BER ของ MPSK

ตารางที่ 3.1. The Modulation Switching levels

Region (d)	0	1	2	3	4
บิตต่อสัญลักษณ์ ( $R_d$ )	0	2	3	4	5
Modulation	No Transmission	QPSK	8PSK	16PSK	32PSK
Switching levels (dB)	0	7.37	10.7	15.13	20

### 3.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์เชิงเลข (Numerical method) ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ ในการวิเคราะห์ระบบที่ใช้เทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้นิยมวัดความน่าจะเป็นเอาท์เดจ (Probability of Outage) ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม (Average Spectral Efficiency) และค่าเฉลี่ยอัตราบิตเกิดผิดพลาด (Average BER) ซึ่งจะแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้ [16]

### 3.5.1 ความน่าจะเป็นเอาต์เตจ (Probability of Outage)

ในกรณีที่สัญญาณไม่สามารถส่งได้เมื่อค่า SNR ที่รับได้มีค่าต่ำกว่าค่าเทรชโฮลด์  $\gamma_1$  จึงเรียกโอกาสนี้ว่า “ความน่าจะเป็นเอาต์เตจ ( $P_{out}$ )” ถ้าเป็นการใช้งานเทคนิคการมอดูเลตแบบปรับตัวได้ของ MPSK แล้วจะได้เป็น

$$P_{out}(\gamma_1) = \int_0^{\gamma_1} p_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (3.27)$$

### 3.5.2 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม (Average Spectral Efficiency)

การวัดประสิทธิภาพของระบบหาได้จาก การวัดประสิทธิภาพของสเปกตรัมซึ่งเท่ากับค่าเฉลี่ยอัตราข้อมูลต่อแบนด์วิธ  $E[R/W]$  จะเป็นการรวมอัตราข้อมูล ( $\log_2 M_d = R_d$ ) และขอบเขตของโหมด  $d$  ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังนี้

$$E\left[\frac{R}{W}\right] = \sum_{d=1}^N R_d \Pr(d) \quad (3.28)$$

โดยที่  $\Pr(d)$  สามารถแสดงได้เป็น

$$\Pr(d) = \int_{\gamma_d}^{\gamma_{d+1}} p_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (3.29)$$

### 3.5.3 ค่าเฉลี่ยอัตราบิตผิดพลาด (Average BER)

ในการทำงานของระบบมอดูเลตแบบปรับตัวได้จะทำงานเมื่อมีค่าเฉลี่ย BER น้อยกว่า BER ที่ต้องการ ข้อควรระวังของเทคนิคนี้ก็คือความไวในการปรับตัว โดยในการเลือกการมอดูเลตที่ทำให้ค่า BER มีค่าน้อยกว่า BER ที่ต้องการ ในการคำนวณค่าเฉลี่ย BER ในขั้นแรกต้องหาค่าความน่าจะเป็นของกลุ่มสัญญาณขนาด  $M_d = 2^d$  ที่ใช้ในการมอดูเลต หลังจากเมื่อทำการเลือกการมอดูเลตแล้วจะสามารถหาค่าค่าเฉลี่ยอัตราบิตผิดพลาด โดยกำหนดให้  $\overline{BER}_d$  เป็น Closed-form ของค่าเฉลี่ยอัตราบิตผิดพลาดโหมดที่  $n$  แล้วจะได้

$$\overline{BER}_d = \int_{\gamma_d}^{\gamma_{d+1}} BER_d p_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (3.30)$$

สำหรับการหาค่าเฉลี่ยอัตราบิตผิดพลาดของการมอดูเลตแบบปรับตัวได้สามารถหาได้จากจำนวนอัตราส่วนของบิตผิดพลาดต่อการสื่อสารกับจำนวนบิตต่อการสื่อสารคำนวณได้ดังนี้

$$\overline{BER} = \frac{E[\text{number of error bits per transmission}]}{E[\text{number of bits per transmission}]} \quad (3.31)$$

และเมื่อประยุกต์ให้งานการปรับตัวแบบไม่ต่อเนื่องได้ดังนี้

$$\overline{BER} = \frac{\sum_{d=1}^N R_d \overline{BER}_d}{\sum_{d=1}^N R_d \Pr(n)} \quad (3.32)$$

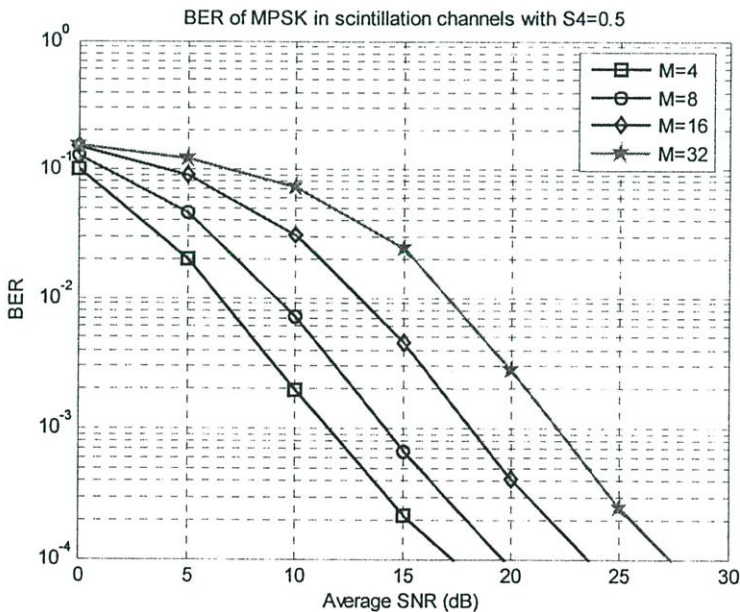
## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบของเทคนิคมอดูเลชันแบบปรับตัวได้ในช่องสัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากซินทิลเลชันเท่านั้น และช่องสัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากซินทิลเลชันและมัลติพาทเฟดดิ้ง โดยจะทำการมอดูเลตทั้งหมด 4 โหมดคือ QPSK, 8PSK, 16PSK และ 32PSK โดยจะทำการคำนวณหาความน่าจะเป็นเอาต์เตจ (Probability of Outage) ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม (Average Spectral Efficiency) และค่าเฉลี่ยอัตราบิตผิดพลาด (Average BER)

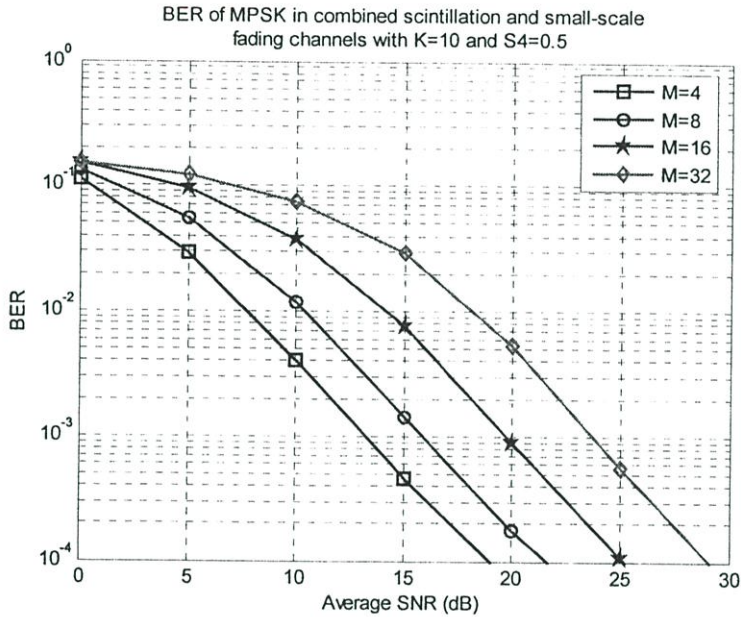
#### 4.1 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการมอดูเลตแบบ MPSK

ในรูปที่ 4.1 แสดงอัตราบิตผิดพลาดในช่องสัญญาณซินทิลเลชัน โดยกำหนดให้  $S_4 = 0.5$  จากรูปจะเห็นว่าเมื่อขนาดของการมอดูเลตเพิ่มขึ้นมากขึ้นทำให้อัตราบิตผิดพลาดมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ส่วนในการวิเคราะห์กรณีที่ได้รับผลกระทบซินทิลเลชันจะสามารถสังเกตได้ว่า การที่ได้รับผลกระทบซินทิลเลชันจะทำให้อัตราบิตผิดพลาดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไม่ได้รับผลกระทบจากซินทิลเลชันในรูปที่ 3.2



รูปที่ 4.1 อัตราบิตผิดพลาดในช่องสัญญาณซินทิลเลชัน โดยเปรียบเทียบการมอดูเลตแบบ MPSK

ส่วนในรูปที่ 4.2 แสดงอัตราบิดผิดพลาดในช่องสัญญาณซินทิลเลชันและมัลติพาทเฟดดิ้ง กำหนดให้  $K_{ssf} = 10$  และ  $S_4 = 0.5$  จากรูปจะเห็นว่าเมื่อขนาดของการมอดูเลตชันเพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราบิดผิดพลาดมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.1 ที่ได้รับเฉพาะผลกระทบจากซินทิลเลชันอย่างเดียว จะเห็นว่าเมื่อต้องการอัตราบิดผิดพลาดที่เท่ากันที่เครื่องรับต้องได้รับค่า SNR สูงกว่า

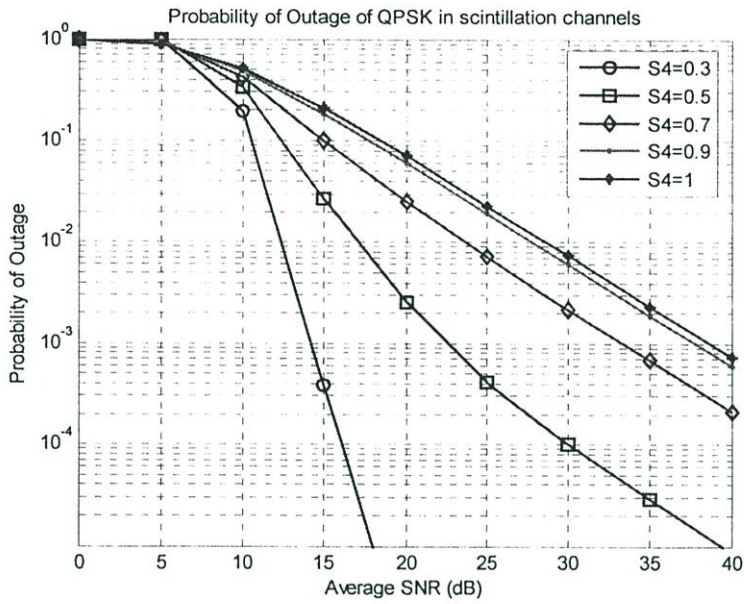


รูปที่ 4.2 อัตราบิดผิดพลาดในช่องสัญญาณซินทิลเลชันและมัลติพาทเฟดดิ้ง โดยเปรียบเทียบการมอดูเลตชันแบบ MPSK

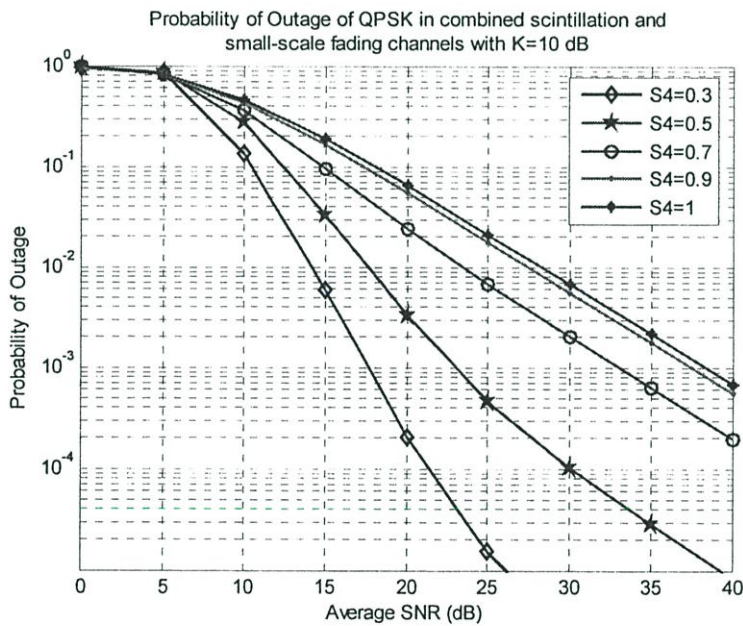
#### 4.2 วิเคราะห์ความน่าจะเป็นเอท้ตจ

ในช่องสัญญาณที่เกิดเฟดดิ้ง สัญญาณที่ส่งจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับนั้น ผลกระทบที่เกิดจากเฟดดิ้งถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะส่งผลให้สัญญาณเกิดขาดหายไม่สามารถสื่อสารได้หรือเรียกว่า “เอท้ตจ” โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะวิเคราะห์ความน่าจะเป็นเอท้ตจของเทรซโซลด์ที่ต่ำที่สุด ในที่นี้ก็คือการมอดูเลต QPSK ที่  $B_0 = 10^{-4}$  ที่มีค่าเท่ากับ 7.37 dB

รูปที่ 4.3 เป็นการแสดงการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นเอท้ตจในช่องสัญญาณซินทิลเลชัน โดยเปรียบเทียบ  $S_4$  เมื่อสังเกตจากแนวโน้มของรูปจะเห็นว่าเมื่อค่าเฉลี่ย SNR มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความน่าจะเป็นเอท้ตจลดน้อยลง และเมื่อ  $S_4 = 1$  ซึ่งเป็นกรณีที่เลวร้ายที่สุดจะมีโอกาสเอท้ตจมากที่สุด ถ้า  $0 < S_4 < 1$  จะมีโอกาสเอท้ตจลดลงตามลำดับ ซึ่งในรูปที่ 4.4 ก็เช่นกันที่เป็นการแสดงการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นเอท้ตจในช่องสัญญาณซินทิลเลชันและมัลติพาทเฟดดิ้ง



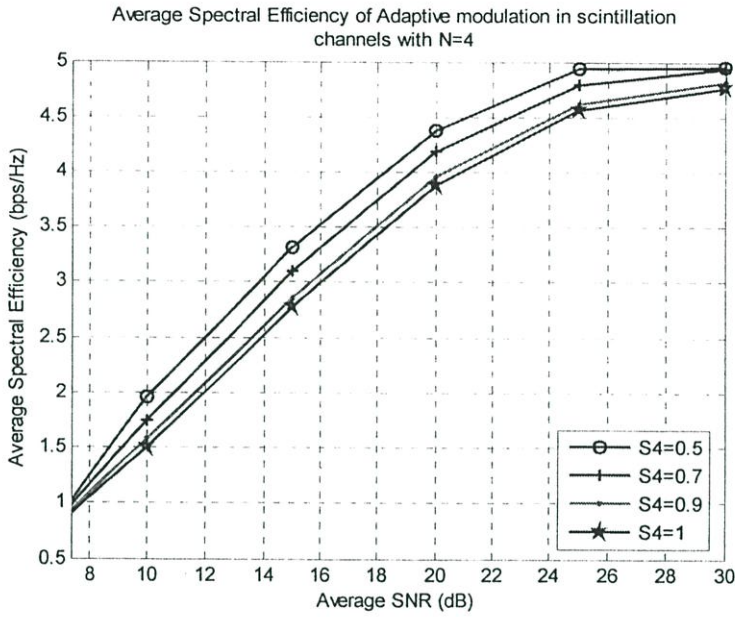
รูปที่ 4.3 ความน่าจะเป็นเอาต์เตจในช่องสัญญาณซินทิลเลชัน โดยเปรียบเทียบ  $S_4$



รูปที่ 4.4 ความน่าจะเป็นเอาต์เตจในช่องสัญญาณซินทิลเลชันและมัลติพาธเฟดดิ้ง โดยเปรียบเทียบ  $S_4$

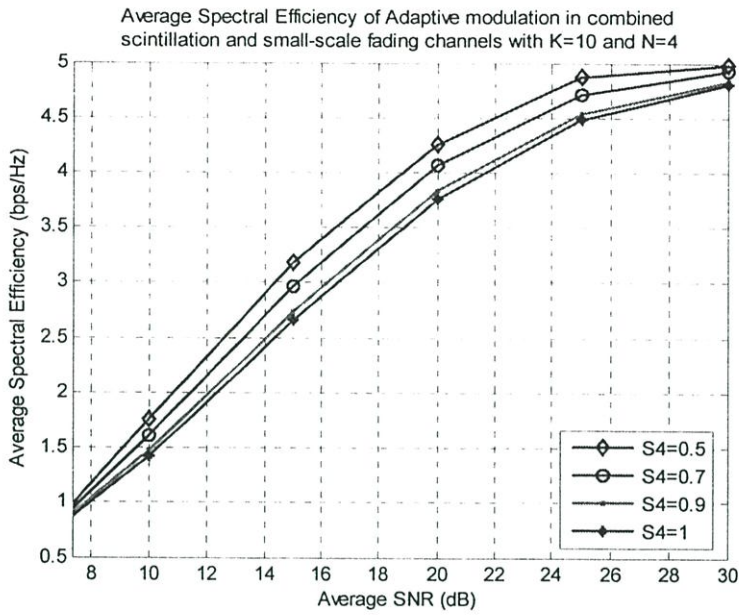
### 4.3 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม

ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัมบางครั้งอาจเรียกว่าค่าเฉลี่ยทราฟฟิค (Average throughput) เมื่อพิจารณาในเทอมของการปรับตัวมอดูเลชัน โดยกำหนดให้กำลังส่งคงที่



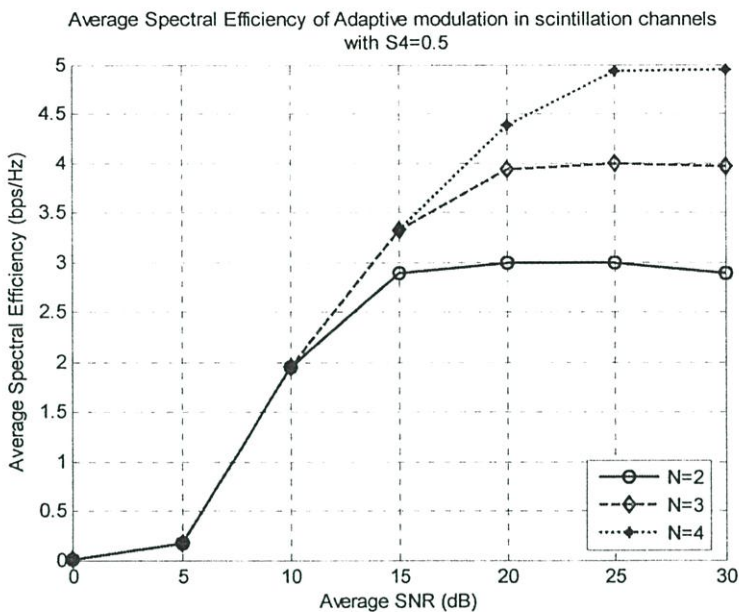
รูปที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม ในช่องสัญญาณซินทิลเลชัน โดยเปรียบเทียบ  $S_4$

ในรูปที่ 4.5 แสดงค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสเปกตรัมในช่องสัญญาณซินทิลเลชัน โดยเปรียบเทียบ  $S_4$  แล้วใช้จำนวนการมอดูเลตชั้นทั้งหมด ( $N$ ) = 4 คือ QPSK, 8PSK, 16PSK และ 32PSK มีอัตราข้อมูล ( $\log_2 M_n = R_n$ ) เท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 (บิต/สัญลักษณ์) ตามลำดับ ให้  $B_0 = 10^{-4}$  จากรูปจะเห็นว่าเมื่อค่าเฉลี่ย SNR สูงขึ้นระบบจะปรับการมอดูเลตตามค่าเทรชโฮลด์ของแต่ละการมอดูเลต ทำให้ประสิทธิภาพของสเปกตรัมสูงขึ้น และเมื่อพิจารณา  $S_4$  จะเห็นว่า ถ้า  $S_4 = 1$  จะได้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสเปกตรัมต่ำที่สุด และ  $S_4$  เท่ากับ 0.9, 0.7 และ 0.5 จะให้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสเปกตรัมสูงขึ้นตามลำดับ

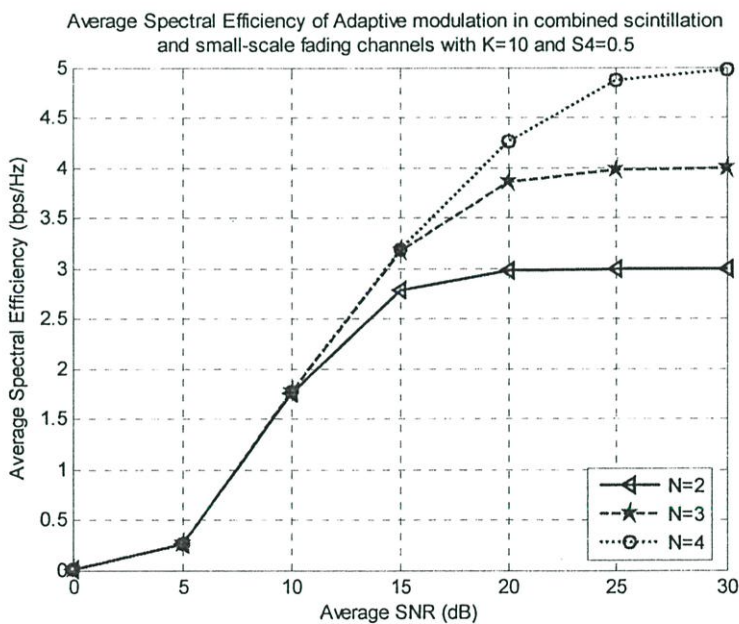


รูปที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม ในช่องสัญญาณซินทิลเลชันและมัลติพาทเฟดดิ้ง โดยเปรียบเทียบ  $S_4$

รูปที่ 4.6 แสดงค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสเปกตรัมในช่องสัญญาณซินทิลเลชันและมัลติพาทเฟดดิ้ง โดยเปรียบเทียบ  $S_4$  แล้วใช้จำนวนการมอดูเลตชั้นทั้งหมด ( $N$ ) = 4 และ  $K_{ssf} = 10$  dB จากรูปจะเห็นว่าเมื่อค่าเฉลี่ย SNR สูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของสเปกตรัมสูงขึ้น และเมื่อพิจารณา  $S_4$  จะเห็นว่า ถ้า  $S_4 = 1$  จะได้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสเปกตรัมต่ำที่สุด และ  $S_4$  เท่ากับ 0.9, 0.7 และ 0.5 จะให้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสเปกตรัมสูงขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม ในช่องสัญญาณซินทิลเลชั่น โดย เปรียบเทียบ N



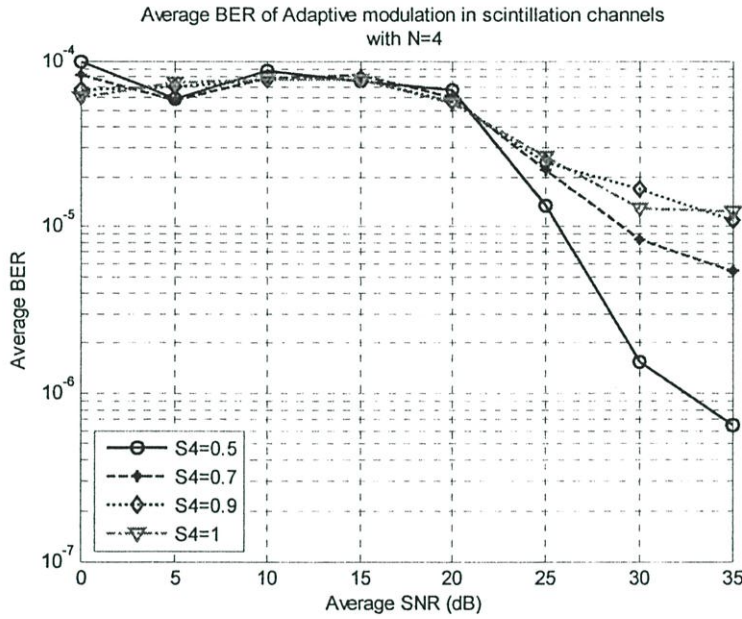
รูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม ในช่องสัญญาณซินทิลเลชั่นและมัลติพาทเฟดดิ้ง โดย เปรียบเทียบ N

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัมจะเห็นว่า เมื่อเพิ่มจำนวนโหมดของการมอดูเลตทั้งหมดจะทำให้ประสิทธิภาพสเปกตรัมเพิ่มมากขึ้นในกรณีที่ค่า SNR มีค่าสูง เช่นที่

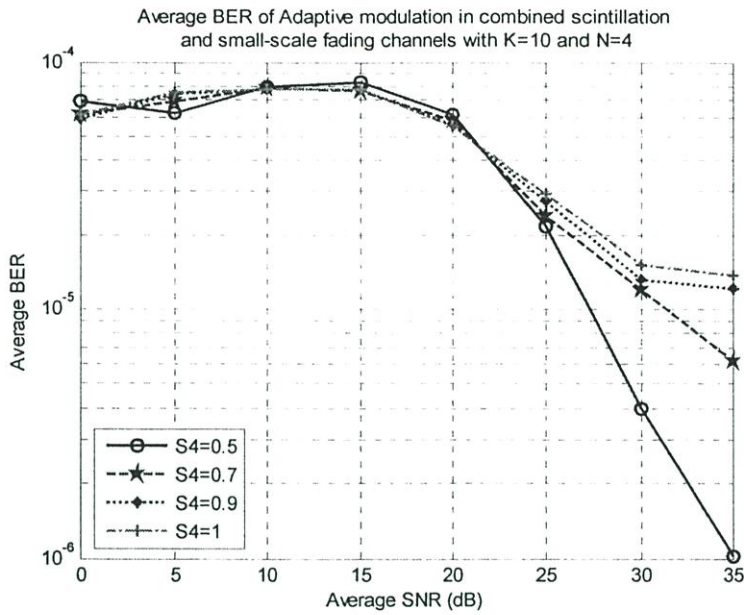
ค่าเฉลี่ย SNR=30 dB ถ้าใช้โหมดในการมอดูเลตทั้งหมด  $N=2$  โหมดจะให้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม 3 bps/Hz แต่ถ้าใช้  $N=4$  จะให้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม 5 bps/Hz เป็นต้น

#### 4.4 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยบิตผิดพลาด

ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยบิตผิดพลาด จะเป็นการวิเคราะห์เทรชโฮลด์ของแต่ละการมอดูเลชันว่ามีความเหมาะสมในการใช้งานในสภาวะที่ช่องสัญญาณเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันอย่างเดี่ยว และช่องสัญญาณซินทิลเลชันและมัลติพาทเฟดดิ้ง



รูปที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยบิตผิดพลาด ในช่องสัญญาณซินทิลเลชัน โดยเปรียบเทียบ  $S_4$



รูปที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยค่าเฉลี่ยบิตผิดพลาด ในช่วงสัญญาณซินทิลเลชันและมัลติพาธเฟดดิ้ง โดยเปรียบเทียบ  $S_4$

จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อคุณภาพของช่องสัญญาณดีขึ้นหรือลด  $S_4$  จะทำให้ค่าเฉลี่ยอัตราบิตผิดพลาดซึ่งในช่วงแรกจะเป็นผลของการมอดูเลตแบบปรับตัวได้จะไม่สามารถเห็นความแตกต่างกันมาก แต่หลังจาก  $\gamma_N$  จนถึง  $\gamma_{N+1}$  จะเห็นได้ว่าเมื่อ  $S_4$  ลดลงจะทำให้ค่าเฉลี่ยอัตราบิตผิดพลาดมีค่าสูงขึ้น

จากรูปค่าเฉลี่ยอัตราบิตผิดพลาดทั้งหมดจะสามารถสังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยอัตราบิตผิดพลาดของการมอดูเลตแบบปรับตัวได้จะมีค่าต่ำกว่าค่าอัตราบิตผิดพลาดที่ต้องการ (Target BER:  $B_0$ ) เสมอ ซึ่งเป็นเพราะเทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้จะทำงานได้เมื่ออัตราบิตผิดพลาดมีค่าน้อยกว่าอัตราบิตผิดพลาดที่ต้องการ ถ้าเราสังเกตจากการประมาณในสมการ 3.26 ในการใช้งานจริงมีบ่อยครั้งที่ค่า SNR ที่ได้มีค่าต่ำกว่าขอบเขตล่างของการมอดูเลตแบบปรับตัวได้นั้นก็คือ QPSK ซึ่ง Close-form ที่ประมาณค่าเฉลี่ยอัตราบิตผิดพลาดนี้จะคิดในกรณีที่ค่าเฉลี่ย SNR มีค่ามากกว่าขอบเขตบนของการประมาณในสมการ 3.26 หรือจะหมายถึงระบบจะไม่มีโอกาสเอาต์เดจ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิเคราะห์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จะนำเทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้ที่กำหนดพลังงานให้คงที่ มีคุณสมบัติในการปรับอัตราการส่งให้เหมาะสมกับสภาพช่องสัญญาณ ซึ่งมีข้อดีกว่าเทคนิคแบบอื่นคือไม่เกิดการรบกวนกับระบบสื่อสารข้างเคียง และประหยัดแถบความถี่ โดยประยุกต์ใช้งานกับการสื่อสารสื่อสารผ่านดาวเทียม ซึ่งข้อดีของการสื่อสารผ่านดาวเทียมคือสามารถทำการติดต่อสื่อสารได้ทุกสภาพพื้นที่ ทั้งที่อยู่ในชนบทที่อยู่ห่างไกลการสื่อสาร กลางทะเลและที่อื่นที่อยู่ในพื้นที่ครอบคลุมของการสัญญาณดาวเทียม แม้กระนั้นการสื่อสารผ่านดาวเทียมจะได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมในชั้นบรรยากาศ เช่นในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) จะมีผลกระทบจากฝุ่น ไออน่า และฝน ส่วนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) จะได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กโลก เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการปรับปรุงและวิเคราะห์กระทบจากปรากฏการณ์ซินทิลเลชันในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จากผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสัญญาณในย่านความถี่ VHF และ UHF ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่มีการใช้งานเป็นอย่างมากจะได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ซินทิลเลชันและผลกระทบจากมัลติพาทเฟดดิ้งที่เครื่องรับ ในงานวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบโดยใช้เทคนิคมอดูเลตแบบปรับตัวได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสเปกตรัมและลดอัตราบิตผิดพลาด โดยจะทำการคำนวณหาความน่าจะเป็นเอาต์เดจ (Probability of Outage) ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม (Average Spectral Efficiency) และค่าเฉลี่ยอัตราบิตเกิดผิดพลาด (Average BER) ทั้งที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ซินทิลเลชันอย่างเดียว และรวมผลกระทบจากมัลติพาทเฟดดิ้งด้วย

ความน่าจะเป็นเอาต์เดจเมื่อค่าเฉลี่ย SNR มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความน่าจะเป็นเอาต์เดจลดน้อยลง และเมื่อ  $S_4 = 1$  ซึ่งเป็นกรณีที่เลวร้ายที่สุดจะมีโอกาสเอาต์เดจมากที่สุด ถ้า  $0 < S_4 < 1$  จะมีโอกาสเอาต์เดจลดลงตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อสัญญาณดาวเทียมได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ซินทิลเลชันมากจะทำให้มีโอกาสเอาต์เดจมากขึ้น

ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัม ถ้า  $S_4 = 1$  จะได้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสเปกตรัมต่ำที่สุด และ  $S_4$  เท่ากับ 0.9, 0.7 และ 0.5 จะให้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสเปกตรัมสูงขึ้นตามลำดับ และเมื่อเพิ่มจำนวนของการมอดูเลตจะทำให้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสเปกตรัมสูงขึ้น

ค่าเฉลี่ยอัตราบิตเกิดผิดพลาด เมื่อคุณภาพของช่องสัญญาณดีขึ้นหรือลด  $S_4$  จะทำให้ค่าเฉลี่ยอัตราบิตเกิดผิดพลาดลดลง โดยวิธีการนี้เป็นการทดสอบย่านการปรับตัวในการใช้งานว่าสามารถใช้งานได้เหมาะสมหรือไม่ ซึ่งย่านการปรับตัวในวิทยานิพนธ์นี้มีความเหมาะสมในการใช้งาน สังเกต

ได้จากค่าเฉลี่ยอัตราบิดผดพลาดของการมอดูเลตแบบปรับตัวได้จะมีค่าต่ำกว่าค่าอัตราบิดผดพลาด  
ที่ต้องการ

## บรรณานุกรม

- [1] สุขสันต์ เรือนแก้ว, เทคโนโลยีไร้สายทำงานอย่างไร, กรุงเทพมหานคร, ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2548
- [2] สุรศักดิ์ กฤดาภาณิชย์, การศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณดาวเทียมย่าน Ku, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] Tadanori Ondoh & Katsuhide Marubashi eds, *Science of Space Environment*, Japan: IOS Press. 2000.
- [4] วิวัฒน์ กิรานนท์, วิศวกรรมการสื่อสาร, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : อักษรสยามการพิมพ์, 2540.
- [5] J. Louis and Jr. Ippolit, *Radiowave Propagation in Satellite Communication*, New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1986.
- [6] Allnutt J. E., *Satellite to Ground Radiowave Propagation Theory, Practice and System Impact at Frequencies above GHz*, London: Peter Peregrines Ltd. 1989.
- [7] P. D. Shaft, "On the relationship Between Scintillation Index and Rician Fading," *IEEE Trans. On Communication*, May 1974, pp. 731-732.
- [8] M. K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital communication over fading channels*, Hoboken, NJ: John Wiley, 2nd ed., 2005.
- [9] S. T. Chung and A. Goldsmith, "Degree of Freedom in Adaptive Modulation: A Unified View," *IEEE Trans on Communication*, Vol. 49, No. 9, Sept. 2001, pp. 1561-1571.
- [10] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.
- [11] P.A. Kullstam, "Communications Diversity Advantages for the Mobile User Objective System," *Milcom 2000*.
- [12] W. Wongtrairat, P. Supnithi, N. Hemmakorn† and N. Leelaruji, "Performance of MPSK in Satellite Mobile Channels with Combined Ionospheric Scintillation and Flat Fading Channels," *IRST 2006*, July 2006, pp. 217-221.
- [13] Z. Ye and E. H. Satorius, "Channel Modeling and Simulation for Mobile User Objective System (MUOS) Part I : Flat Scintillation and Fading," *ICC'03 IEEE International Conferences*, vol.5, May 2003, pp. 3503-3510.
- [14] M. K. Simon, *Probability Distributions Involving Gaussian Random Variables: A handbook for Engineers and Scientists*, Boston: Kluwer Academic, 2002.

[15] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, **Table of Integrals, Series, and Products**, San Diego, CA: Academic Press, 5th ed., 1994.

[16] M. S. Alouini and A. J. Goldsmith, "Adaptive modulation over Nakagami fading channels," **J. Wireless Commun.**, Vol. 13, No. 1-2., May. 2000, pp. 119-143.

ภาคผนวก

## คำย่อ

SI	ค่าดัชนีซินทิลเลชั่น
$S_4$	ดัชนีแสดงระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ซินทิลเลชั่นซึ่งมีความสัมพันธ์กับช่วงเวลา
$B_s$	ความกว้างของแถบสัญญาณ
$\sigma_\tau$	ค่า RMS ของการกระจายการหน่วงเวลาของช่องสัญญาณ
$(\Delta f)_c$	ค่าแบนด์วิดท์รวมนัยของช่องสัญญาณ
$T_s$	ส่วนกลับความกว้างของแถบสัญญาณหรือคาบของสัญญาณ
$\alpha$	ขนาดของการจางหาย
$p_\alpha(\alpha)$	ค่าฟังก์ชันหนาแน่นของความน่าจะเป็น (PDF: Probability Density Function)
$\gamma$	Instantaneous Signal to Noise Ratio (SNR)
$\bar{\gamma}$	Average SNR
$E_s$	พลังงานต่อสัญลักษณ์
$I_0$	ฟังก์ชันเบสเซล (Bessel function) แบบดัดแปลงชนิดที่ 1 อันดับที่ 0
$q$	ตัวแปรเสริมเฟดดิ้งหายของแบบจำลองนาคากามิ-ฮอยท์
$n$	ตัวแปรเสริมเฟดดิ้งหายของแบบจำลองนาคากามิ-ไรซ์
$K$	ไรเซียนแฟกเตอร์ (Ricean Factor)
$m$	ตัวแปรเสริมเฟดดิ้งหายของแบบจำลองของนาคากามิ-เอ็ม
$\Gamma(\cdot)$	เป็นแกมมาฟังก์ชัน
$N$	จำนวนการมอดูเลตทั้งหมด
$d$	โหมดการปรับตัว
$K_s$	ส่วนของกำลังสัญญาณที่รับได้ที่ส่งผ่านเส้นทาง LOS
$K_{sc}$	ค่าไรเซียนแฟกเตอร์ของการจางหายซินทิลเลชั่น
$\alpha_{sc}(t)$	สัมประสิทธิ์ซินทิลเลชั่น
$\alpha_{ssf}(t)$	สัมประสิทธิ์มัลติพาทเฟดดิ้ง
$K_a\{\cdot\}$	$a$ th order modified Bessel function of the second kind
$K_{ssf}$	ค่าไรเซียนแฟกเตอร์ของมัลติพาทเฟดดิ้ง
$\gamma_{sc}$	instantaneous SNR ของซินทิลเลชั่น
$\bar{\gamma}_{sc}$	Average SNR ของซินทิลเลชั่น
$\gamma_{comb}$	instantaneous SNR ของซินทิลเลชั่นรวมกับมัลติพาทเฟดดิ้ง
$\bar{\gamma}_{comb}$	Average SNR ของซินทิลเลชั่นรวมกับมัลติพาทเฟดดิ้ง

## ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. วีรพล มีอรุณ, ธารธร กิ่งมาคย์ และ พิเชฐ ม่วงนวล, “การปรับปรุงสมรรถนะระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยใช้เทคนิคอะแดปทีฟมอดูเลชัน” การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี 25-26 ตุลาคม 2550



The EECON-30 Conference Joins the Eightieth Birthday Anniversary

Celebration of His Majesty the King Bhumibol Adulyadej

# 30<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference

## การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30

หนังสือรวมบทความที่นำเสนอในการประชุม เล่ม 2

- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

# Volume II



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI

โดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม  
ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ณ โรงแรมเพล็กซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท กาญจนบุรี  
25 - 26 ตุลาคม 2550



FACULTY OF ENGINEERING  
**KMUT**  
**EECON - 30**

# การปรับปรุงสมรรถนะระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมโดยใช้เทคนิคอะแดปทีฟมอดูเลชัน Performance Improvement for Satellite Communication system using Adaptive Modulation

จิรพล มิ่งรุ่ย รรารร กิ่งนาถย์ และ พิเชฐ ม่วงนวก  
คณะวิศวกรรมศาสตร์และสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT)  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
E-mail: phichet@telecom.kmitl.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอเทคนิคในการปรับปรุงประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยใช้เทคนิคอะแดปทีฟมอดูเลชัน ซึ่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่เกิดจากจางหายแบบซินทิเลชันและมัลติพาทเฟดดิ้ง แล้วทำการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีความน่าจะเป็นเชิงเลข ประสิทธิภาพเพกเทอริม และค่าเฉลี่ยความน่าจะเป็นผิดพลาดที่เกิดจากช่องสัญญาณแบบซินทิเลชันและมัลติพาทเฟดดิ้ง จากการทดลองจะเห็นได้ว่า เทคนิคอะแดปทีฟมอดูเลชันสามารถรักษาความน่าจะเป็นผิดพลาดให้อยู่ในระดับที่ต้องการ ในส่วนของประสิทธิภาพเพกเทอริมสัมพันธ์กับการมอดูเลชันจะยิ่งทำให้ค่าสูงขึ้น และค่าดัชนีการจางหายแบบซินทิเลชันมีค่าป้อยจะทำให้ความน่าจะเป็นผิดพลาดดีขึ้น

คำสำคัญ: ซินทิเลชัน, มัลติพาทเฟดดิ้ง, อะแดปทีฟมอดูเลชัน

### Abstract

This paper analyzes the performance of the adaptive modulation in combined scintillation and multipath fading channel, which utilizing pdf of combined scintillation and small scale fading channel. The numerical results are shown impact of scintillation and small scale fading channel, by focus on average bit error rate, average spectral efficiency and outage probability in Adaptive Modulation.

Keywords: scintillation, multipath fading, adaptive modulation

### 1. คำนำ

ในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม (satellite communication) สัญญาณจะได้รับผลกระทบที่เกิดจางขึ้นบรรยากาศและเครื่องรับที่ภาคพื้นดินซึ่งมีสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทำให้สัญญาณที่ได้รับเกิดการเปลี่ยนแปลงไปมา บทความนี้ทำการศึกษาดูหาผลกระทบของสัญญาณจางขึ้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere) และผลกระทบที่เกิดจากมัลติพาทเฟดดิ้ง (multipath fading) ในชั้น

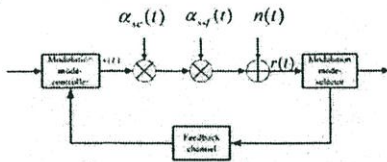
บรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีความแปรปรวนของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของช่องสัญญาณอย่างกะทันหันหรือที่เรียกว่า "ซินทิเลชัน" (Scintillation) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณดาวเทียมในย่านความถี่ VHF และ UHF ส่วนมัลติพาทเฟดดิ้งเกิดจากการที่สายอากาศของเครื่องรับอยู่ใกล้พื้นผิวมาก ทำให้เกิดการหักเหและสะท้อนของสัญญาณในหลายทิศทาง

ใน [1] ได้มีการศึกษาผลกระทบของมอดูเลชันที่เกิดจากการจางหายซินทิเลชันร่วมกับมัลติพาทเฟดดิ้ง (multipath fading) และชาโดว์อิง (Shadowing) หลังจากนั้นใน [2] ได้ใช้การมอดูเลชันแบบ MPSK วิเคราะห์ร่วมกับการจางหายซินทิเลชันและมัลติพาทเฟดดิ้ง การสื่อสารผ่านดาวเทียมในอนาคตที่ใช้มาตรฐาน DVB-S2 (3) ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับการให้บริการดาวเทียมบรอดแบนด์ (satellite broadband services) มาตรฐานนี้จะสามารถรองรับการทำงานของเทคนิคอะแดปทีฟมอดูเลชัน (Adaptive Modulation) ได้ ทำให้ประสิทธิภาพของการสื่อสารเพิ่มขึ้น

เทคนิคอะแดปทีฟมอดูเลชันเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่มีความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพของเพกเทอริม หลักการทำงานของเทคนิคนี้ คือการปรับการมอดูเลชันให้เหมาะสมกับสภาพช่องสัญญาณในขณะนั้น ถ้าช่องสัญญาณมีคุณภาพดีระบบจะทำการเลือกการมอดูเลชันในระดับที่สูงขึ้น ในทางกลับกันถ้าช่องสัญญาณมีคุณภาพไม่ดีก็จะทำการเปลี่ยนการมอดูเลชันในระดับที่ต่ำลง เพื่อรักษาอัตราผิดพลาด (bit error rate: BER) ให้อยู่ในระดับที่ต้องการ [4][5]

ในบทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีความน่าจะเป็นเอทเจลจ ประสิทธิภาพเพกเทอริม และค่าเฉลี่ยความน่าจะเป็นผิดพลาดที่เกิดจากช่องสัญญาณแบบซินทิเลชันและมัลติพาทเฟดดิ้ง แล้วปรับปรุงประสิทธิภาพการสื่อสารของระบบ โดยนำเทคนิคอะแดปทีฟมอดูเลชันมาประยุกต์ใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเพกเทอริมและรักษามัลติพาทเฟดดิ้งที่เกิดจากช่องสัญญาณ





รูปที่ 1. แบบจำลองระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม

2. ช่องสัญญาณซินเทสกับมัลติพาทฟีดลิง

จากรูปที่ 1 แสดงแบบจำลองระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม สำหรับการส่งสัญญาณผ่านชั้นบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดการจางหายแบบซินเทสและเกิดมัลติพาทฟีดลิงจนถึงเครื่องรับสัญญาณที่รับได้สามารถหาได้จาก

$$r(t) = \alpha_{sf} \alpha_{sc} s(t) + n(t) \tag{1}$$

โดย  $s(t)$  คือสัญญาณส่ง,  $n(t)$  คือสัญญาณรบกวนขาวกวนบนกาลส์ (AWGN),  $\alpha_{sc}(t)$  คือสัมประสิทธิ์การจางหายแบบซินเทสและ  $\alpha_{sf}(t)$  คือสัมประสิทธิ์มัลติพาทฟีดลิง กำหนดให้  $r_{sc} = \alpha_{sc}(t)$  และ  $r_{sf} = |\alpha_{sf}(t)|^2$  เป็นอิสระต่อกันแล้วการแจกแจงของช่องสัญญาณทั้งสองสามารถหาได้จาก

$$p(z) = \int p_{sc}(z/r_{sc}) p_{sf}(r_{sc}) \frac{dr_{sc}}{r_{sc}} \tag{2}$$

โดย  $p_{sc}(z/r_{sc}) = \alpha_{sc}(t) \alpha_{sf}(t)$  ถ้าทั้งการจางหายแบบซินเทสและมัลติพาทฟีดลิงเป็นโรเซียนเฟดดิ้ง (Rician fading) แล้วจะสามารถหาค่า pdf (probability density function) ของ  $z$  ได้ดังนี้

$$p(z) = \frac{4z}{\Omega} \left( \frac{K_{sf} + 1}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right) \exp \left( -\frac{\sqrt{1 - S_4^2}}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} - K_{sf} \right) \sum_{l=0}^{\infty} \left( \frac{\sqrt{1 - S_4^2}}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right)^l \frac{K_{sf}^l}{(l!)^2 (l!)^2} \left( \frac{z^2}{\Omega} \left[ \frac{K_{sf} + 1}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right] \right)^{l+1/2} \cdot K_{sf} \left\{ \frac{4z^2}{\Omega} \left[ \frac{K_{sf} + 1}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right] \right\} \tag{3}$$

โดย  $\Omega$  เป็นค่าเฉลี่ยเอนVELOPE ของพลังงาน,  $K_{sf}\{\}$  เป็น  $a$ -th order modified Bessel function of the second kind แล้วจาก (3) จะสามารถหาค่า pdf ของ SNR ได้ดังนี้

$$p_r(\gamma) = \frac{2}{\gamma} \left( \frac{K_{sf} + 1}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right) \exp \left( -\frac{\sqrt{1 - S_4^2}}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} - K_{sf} \right) \sum_{l=0}^{\infty} \left( \frac{\sqrt{1 - S_4^2}}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right)^l \frac{K_{sf}^l}{(l!)^2 (l!)^2} \left( \frac{\gamma}{\gamma} \left[ \frac{K_{sf} + 1}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right] \right)^{l+1/2} \cdot K_{sf} \left\{ \frac{4\gamma}{\gamma} \left[ \frac{K_{sf} + 1}{1 - \sqrt{1 - S_4^2}} \right] \right\} \tag{4}$$

โดย  $\gamma = \frac{E_b}{N_0} |\alpha_{sc}|^2 |\alpha_{sf}|^2$ ,  $\bar{\gamma} = \frac{E_b}{N_0} E \{ |\alpha_{sc}|^2 |\alpha_{sf}|^2 \} = \frac{E_b}{N_0} \Omega$ ,  $K_{sf}$  คือโรเซียนแฟคเตอร์ของช่องสัญญาณมัลติพาทฟีดลิงและ  $S_4$  เป็นดัชนีการจางหายซินเทส (scintillation index) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าโรเซียนแฟคเตอร์ของการจางหายแบบซินเทส ( $K_{sc}$ ) ดังนี้

$$S_4 = \sqrt{1 - \left( \frac{K_{sc}}{K_{sc} - 1} \right)^2} \tag{5}$$

ดัชนีการจางหายแบบซินเทสที่เลือกขึ้นปกติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้า  $S_4 = 0$  ช่องสัญญาณจะไม่เกิดการเฟดดิ้ง ถ้า  $0 < S_4 < 1$  ช่องสัญญาณจะเกิดโรเซียนเฟดดิ้ง และถ้า  $S_4 = 1$  จะเป็นช่องสัญญาณเกิดเรซีทีฟเฟดดิ้ง

3. เทคนิคอะแดปทีฟมอดูเลชัน

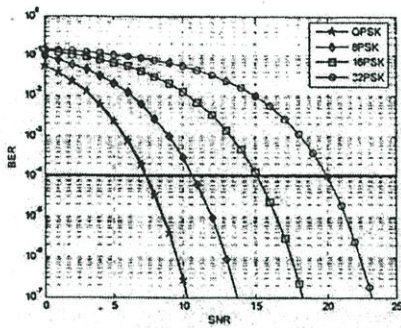
เทคนิคอะแดปทีฟมอดูเลชัน เป็นเทคนิคที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสเปกตรัม (spectrum efficiency) โดยการใช้พารามิเตอร์ที่ใช้เครื่องรับเครื่องรับแบบ CSI (Channel state information) เพื่อรักษาอัตราการผิดพลาด (bit error rate: BER) ให้อยู่ในระดับที่ต้องการ โดยใช้น้ำหนักมอดูเลชันทั้งหมด  $M$  โหมดในบทความนี้กำหนดพลังงานบิตให้คงที่ ดังนั้นจะสามารถกำหนดขอบเขตได้คือ  $\{\gamma_n\}_{n=0}^{M-1}$  ในการปรับค่า  $m$  จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของค่า SNR ที่รับได้ซึ่งจะกำหนดเงื่อนไขดังนี้

$$\text{การเลือกโหมด } m \text{ เมื่อ } \gamma \in \{\gamma_n, \gamma_{n+1}\} \tag{6}$$

ในกรณีที่  $\gamma_0 \leq \gamma < \gamma_1$  จะไม่มีการสื่อสารเกิดขึ้นซึ่งคล้ายกับการใช้โหมดรูปแบบที่  $m=0$

จากสมการที่ (6) จะได้ว่าที่เครื่องรับสามารถวัดค่า SNR ที่ได้จากมอดูเลชันแต่ละโหมด ดังนั้นความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดจะสัมพันธ์กับค่า SNR โดยตรงแล้วสามารถประมาณค่า BER ใน AWGN ที่ใช้การมอดูเลชันแบบ MPSK ได้ดังนี้

$$BER_{MPSK}(\gamma) \approx \frac{2}{\log_2 M} Q \left( \sqrt{2\gamma \log_2 M} \sin \frac{\pi}{M} \right) \tag{7}$$



รูปที่ 2. BER ของ MPSK

ตารางที่ 1. The Modulation Switching levels

Region (n)	0	1	2	3	4
Modulation	No Transmission	QPSK	8PSK	16PSK	32PSK
SNR (dB)	0	7.37	10.7	15.13	20

สำหรับเทคนิคแอดแอดที่พ่นดูเกิน การที่เครื่องรับจะสามารถตัดสินใจเลือกการถอดรหัสจะขึ้นอยู่กับค่า SNR ที่ได้รับไป ผลคือต้องมีการกำหนดการถอดรหัส ในกรณีกำหนดขอบเขตของการถอดรหัสจะใช้ switching level เป็นตัวกำหนด โดยสามารถหา switching level ได้จากค่า BER ที่ต้องการ ในรูปที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์การประมาณ BER จากสมการที่ (7) ซึ่งในบทความนี้สมมติให้ค่า BER ที่ต้องการเป็น  $10^{-4}$  แล้วจะสามารถหา switching level ได้ในตารางที่ 1

4. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ

ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ สามารถแสดงรายละเอียดในการวิเคราะห์ได้ดังนี้ [4][5]

4.1 ความน่าจะเป็นที่ขาด (Outage probability)

เมื่อค่า SNR ที่ได้จากเครื่องรับต่ำกว่า  $\gamma_c$  ทำให้เกิดโอกาสที่สัญญาณไม่สามารถรับได้ที่เครื่องรับ แล้วสามารถเรียกโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์นี้ว่าความน่าจะเป็นที่ขาด ( $P_{out}$ ) แสดงได้ดังนี้

$$P_{out} = \int_{\gamma_c}^{\infty} p_r(\gamma) d\gamma \tag{8}$$

4.2 ประสิทธิภาพของสเปกตรัม (Spectral efficiency)

การวัดประสิทธิภาพของระบบหาได้จากอัตราการประสิทธิภาพของสเปกตรัมซึ่งเท่ากับค่าเฉลี่ยอัตราข้อมูลต่อแบนด์วิดธ์  $E\left[\frac{R}{W}\right]$  สามารถแสดงได้ดังนี้

$$E\left[\frac{R}{W}\right] = \sum_{m=1}^N k(m) \int_{\gamma_c}^{\infty} p_r(\gamma) d\gamma \tag{9}$$

โดย  $k(\gamma) = \log_2[M(\gamma)]$  (บิต/สัญลักษณ์)

4.3 ค่าเฉลี่ยความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาด (Average bit error rate)

ค่าเฉลี่ย BER ของแอดแอดที่พ่นดูเกิน สามารถหาได้จากอัตราส่วนของบิตที่ผิดพลาดต่อจำนวนบิตเฉลี่ยที่ใช้ในการส่ง สามารถแสดงได้ดังนี้

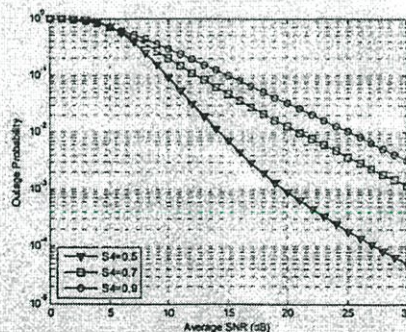
$$\overline{BER} = \frac{\sum_{m=1}^N k(m) \overline{BER}_m}{E\left[\frac{R}{W}\right]} \tag{10}$$

โดย

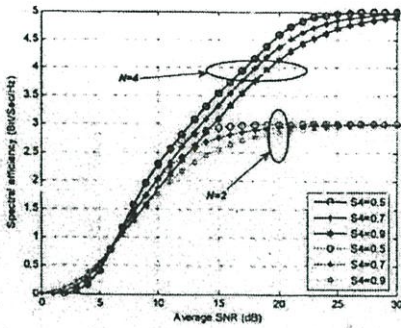
$$\overline{BER}_m = \int_{\gamma_c}^{\infty} BER_{MPSK}(\gamma) p_r(\gamma) d\gamma \tag{11}$$

5. ผลการวิเคราะห์

ในส่วนนี้จะแสดงผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical results) ของส่วนที่ 4 โดยใช้ช่องสัญญาณแบบซินติเกชั่นและมีการผิดพลาดหลังจากนั้นเปรียบเทียบกับที่ได้จากการคำนวณซินติเกชั่น ( $S_c$ ) เมื่อ  $K_{eff} = 11$  dB และ switching levels เป็นไปตามตารางที่ 1 จากการจำลองได้ผลดังรูปที่ 3, 4, 5 และ 6 ในรูปที่ 3 แสดงความน่าจะเป็นที่ขาด กำหนดให้การถอดรหัสของ  $\gamma_c$  เป็นการถอดรหัสแบบ QPSK จากรูปแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่า  $S_c$  มีค่าของสูงทำให้ความน่าจะเป็นที่ขาดจะลดลง

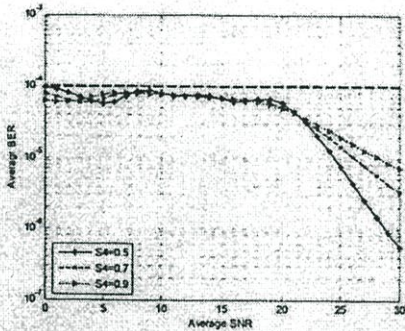


รูปที่ 3. ความน่าจะเป็นที่ขาด



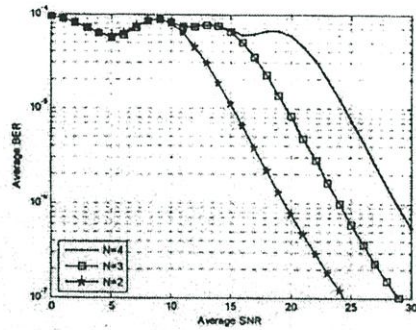
รูปที่ 4. ประสิทธิภาพของสเปกตรัม

ในรูปที่ 4 แสดงผลของประสิทธิภาพของสเปกตรัม โดยเปรียบเทียบจำนวนโหนดทั้งหมด (N) ของการมอดูเลชันระหว่าง 2 และ 4 โหนด โดยกำหนดให้ 2 โหนดใช้การมอดูเลชันแบบ QPSK และ 8PSK ส่วนของ 4 โหนดใช้การมอดูเลชันแบบ QPSK, 8PSK, 16PSK และ 32PSK จากรูปแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนโหนดของการมอดูเลชันทำให้ประสิทธิภาพของสเปกตรัมของระบบ 4 โหนดสูงกว่าระบบ 2 โหนด



รูปที่ 5. ค่าเฉลี่ยความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดเปรียบเทียบกับ  $S_4$

ในรูปที่ 5 แสดงผลของค่าเฉลี่ยความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาด เมื่อให้ค่า BER ที่ต้องการเป็น  $10^{-4}$  จะแสดงให้เห็นว่าสามารถลดค่า BER ให้อยู่ในระดับที่ต้องการ และในรูปที่ 6 แสดงผลของค่าเฉลี่ยความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาด เมื่อให้ค่า  $S_4 = 0.5$  โดยเปรียบเทียบจำนวนโหนดทั้งหมด (N) ของการมอดูเลชันระหว่าง 2, 3 และ 4 โหนด โดยกำหนดให้ 2 โหนดใช้การมอดูเลชันแบบ QPSK และ 8PSK ส่วนของ 3 โหนดใช้การมอดูเลชันแบบ QPSK, 8PSK, 16PSK และส่วนของ 4 โหนดใช้การมอดูเลชันแบบ QPSK, 8PSK, 16PSK และ 32PSK จากรูปแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนโหนดของการมอดูเลชันทำให้ความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดลดลง



รูปที่ 6. ค่าเฉลี่ยความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดเปรียบเทียบกับ N

6. สรุป

ในบทความนี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงเลขในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเทคนิคแอดแอดที่มอดูเลชันในช่องสัญญาณแบบซินเทิลเลชั่นและมีคิพหาค่าเฟดดิ้ง โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเทคนิคแอดแอดที่มอดูเลชันสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสเปกตรัมและลดความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาด เมื่อจำนวนโหนดของการมอดูเลชันเพิ่มมากขึ้น ในส่วนของค่าเฉลี่ยความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาด เทคนิคแอดแอดที่พิจารณาสามารถควบคุม BER ให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ และเมื่อค่าดัชนีซินเทิลเลชั่น ( $S_4$ ) ลดลงจะทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดอาร์ทเจก และค่าเฉลี่ยความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดลดลง ส่วนประสิทธิภาพของสเปกตรัมจะเพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. A. Kullstrom and M. J. Keskinen, "Ionospheric scintillation effects on UHF satellite communications," MILCOM 2000 Proceedings, vol.2, pp. 779-783, Oct. 2000.
- [2] W. Wongtrairat, P. Supnithi, N. Hemmakorn and N. Leelarujit, "Performance of MPSK in satellite channels with combined ionospheric scintillation and fading channels," Ionospheric Radio System & Techniques, 10<sup>th</sup> Int. Conf., July 2006.
- [3] A. Morello and V. Mignone, "DVB-S2: The second generation standard for satellite broad-band services," IEEE Proceeding, Vol. 94, No. 1, pp. 210-227, January 2006.
- [4] M. S. Alouini and A. Goldsmith, "Adaptive modulation over nakagami fading channels," J. Wireless Commun., vol. 13, no. 1-2, pp. 119-143, May 2000.
- [5] P. Moungnoul and T. Kungmat, "Performance Analysis of Adaptive Modulation System over Fading Channel Model," in proc. Fourth IASTED conference on Communication Systems and Network 2007, Phuket, Thailand, pp.40-43, April 2007.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายธีรพล มีอรุณ
วัน เดือน ปีเกิด	23 มิถุนายน 2524 ที่จังหวัดราชบุรี
ประวัติการศึกษา	2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปัจจุบัน วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง