

การวิเคราะห์สมรรถนะของวิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์  
สำหรับระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้างในช่องสัญญาณเฟดดิ้งนาคาгами

PERFORMANCE ANALYSIS OF SPACE-TIME SPREADING SCHEME  
FOR W-CDMA SYSTEM IN NAKAGAMI FADING CHANNEL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

รพ.

๑๓๔๗

๒๐๔๗

๑๖/

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๔๗

ISBN 974-324-996-6

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

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 50945

วัน,เดือน,ปี 26 พ.ค. 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้หรือเผยแพร่  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PERFORMANCE ANALYSIS OF SPACE-TIME SPREADING SCHEME  
FOR W-CDMA SYSTEM IN NAKAGAMI FADING CHANNEL**



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

**2004**

**ISBN 974-324-996-6**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2004**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์           | การวิเคราะห์สมรรถนะของวิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์<br>สำหรับระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้างในช่องสัญญาณเฟดดิ้งนาคากามิ |
| นักศึกษา                    | นายอรจร จันทรบাত্র  |
| รหัสประจำตัว                | 43061048  |
| ปริญญา                      | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  |
| สาขาวิชา                    | วิศวกรรมไฟฟ้า   |
| พ.ศ.                        | 2547  |
| อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร.สุวิพล สิทธีชีวะภาค   |

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้าง (Wideband Code Division Multiple Access : W-CDMA) โดยใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ (Space-Time Spreading : STS) ในการส่งสัญญาณจากสถานีฐานผ่านช่องสัญญาณเฟดดิ้งหลายวิถีแบบนาคากามิที่มีสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อื่นและมีสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวกในระบบ ซึ่งผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ โดยพิจารณาจากแนวโน้มจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดของบิตแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของระบบดีขึ้นเนื่องจากการใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์มาปรับปรุง นอกจากนี้เงื่อนไขและปัจจัยต่างๆ ก็มีผลต่อระบบอย่างไม่สามารถละเลยได้ ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงเงื่อนไขและปัจจัยเหล่านี้เพื่อให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีตามความต้องการได้

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>Thesis Title</b>   | Performance Analysis of Space-Time Spreading Scheme<br>for W-CDMA System in Nakagami Fading Channel |
| <b>Student</b>        | Mr. Utt Chantharabart   |
| <b>Student ID.</b>    | 43061048  |
| <b>Degree</b>         | Master of Engineering   |
| <b>Programme</b>      | Electrical Engineering  |
| <b>Year</b>           | 2004  |
| <b>Thesis Advisor</b> | Assoc. Prof. Dr. Suvepon Sittichivapak  |

### ABSTRACT

This thesis presents the performance analysis of wideband code division multiple access (W-CDMA) system using space-time spreading (STS) based transmit diversity at the base stations. The transmission is considered in Nakagami multipath fading channels, multiuser interference, and additive white Gaussian noise (AWGN). The performance analysis result by the bit error probability (BEP) indicated that the performance of the system is increased under the improvement of space-time spreading scheme. In addition, other factors and conditions inevitably have the effects on the system. Accordingly, they must be taken into consideration intending to achieve the better performance as desired.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีจากการให้คำแนะนำและความช่วยเหลือจาก รศ.ดร.สุวิพล  
สิทธิชีวกภาค ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้เขียนจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ  
ที่นี้  
ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ ซึ่งเป็นพื้นฐานและเป็น  
ประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือ อีกทั้งยังเป็นกำลังใจในการทำ  
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายขอขอบคุณทุกคนในครอบครัวที่ทำให้ผู้เขียนประสบความสำเร็จจนมาถึงทุกวันนี้

อรจร จันทรบาศ



# สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย .....  | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....   | II   |
| กิตติกรรมประกาศ .....  | III  |
| สารบัญ .....   | IV   |
| สารบัญตาราง .....  | VII  |
| สารบัญรูป .....  | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....  | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ .....   | 1    |
| 1.3 สมมติฐาน .....   | 2    |
| 1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....   | 2    |
| 1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....   | 2    |
| บทที่ 2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส .....   | 3    |
| 2.1 การเข้าถึงหลายทาง (Multiple Access).....   | 3    |
| 2.1.1 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่<br>(Frequency Division Multiple Access : FDMA) .....                         | 5    |
| 2.1.2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา<br>(Time Division Multiple Access : TDMA).....                                  | 7    |
| 2.1.3 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส<br>(Code Division Multiple Access : CDMA) .....                                 | 10   |
| 2.2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access : CDMA).....                                       | 10   |
| 2.3 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสโดยวิธีลำดับตรง<br>(Direct Sequence Code Division Multiple Access : DS-CDMA) ..... | 15   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|  |    |
|--|----|
| บทที่ 3 ระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้างและวิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ .....  | 20 |
| 3.1 ระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้าง<br>(Wideband Code Division Multiple Access : W-CDMA).....   | 20 |
| 3.1.1 ระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้างในเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 .....  | 20 |
| 3.1.2 ความแตกต่างของการสื่อสารทางคลื่นวิทยุระหว่างระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้าง<br>กับระบบในเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 ..... | 21 |
| 3.1.3 คุณสมบัติของระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้าง .....   | 25 |
| 3.2 วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ (Space-Time Spreading : STS) .....  | 27 |
| 3.2.1 รูปแบบของโคเวอเรจซีดี .....  | 27 |
| 3.2.2 วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ .....   | 29 |
| 3.2.3 วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์<br>โดยใช้สายอากาศส่ง 2 ชุดและสายอากาศรับ 1 ชุด.....   | 29 |
| บทที่ 4 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ .....   | 32 |
| 4.1 แบบจำลองระบบ .....   | 32 |
| 4.1.1 ภาคลส่ง .....  | 32 |
| 4.1.2 แบบจำลองช่องสัญญาณ .....   | 34 |
| 4.1.3 ภาครับ .....   | 36 |
| 4.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ .....   | 38 |
| 4.2.1 การตีเทคต์สัญญาณ .....   | 38 |
| 4.2.2 อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน.....  | 41 |
| 4.2.3 ความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดของบิต.....  | 44 |
| 4.2.4 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบที่ไม่ใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ .....  | 48 |
| บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ .....   | 50 |
| 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit ( $E_b/N_0$ ) กับ Bit Error Probability .....                                      | 51 |
| 5.1.1 กรณีที่ระบบไม่ใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ .....  | 51 |
| 5.1.2 กรณีที่ระบบใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ .....   | 52 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะในพิธีกรรมาธิการเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นว่าเป็นประโยชน์จึงได้เผยแพร่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability..... | 60   |
| 5.2.1 กรณีที่ระบบไม่ใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ .....                    | 60   |
| 5.2.2 กรณีที่ระบบใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ .....                       | 61   |
| <br>   |      |
| บทที่ 6 สรุปผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ.....                          | 69   |
| 6.1 สรุปและวิจารณ์.....  | 69   |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ .....   | 70   |
| <br>   |      |
| เอกสารอ้างอิง .....  | 71   |
| <br>   |      |
| ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....  | 73   |
| <br>   |      |
| ประวัติผู้เขียน.....   | 74   |

# สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 3.1 ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างระบบ W-CDMA และ GSM.....   | 22   |
| 3.2 ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างระบบ W-CDMA และ IS-95..... | 23   |
| 3.3 พารามิเตอร์ในระบบ W-CDMA.....                       | 25   |



# สารบัญรูป

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 (ก) การดูเฟลทซ์แบบแบ่งความถี่.....  | 4    |
| 2.1 (ข) การดูเฟลทซ์แบบแบ่งเวลา.....   | 4    |
| 2.2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access : FDMA).....  | 6    |
| 2.3 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access : TDMA).....  | 7    |
| 2.4 โครงสร้างเฟรมของการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา.....   | 8    |
| 2.5 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access : CDMA).....  | 10   |
| 2.6 หลักการเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่.....  | 12   |
| 2.7 การขจัดสัญญาณแทรกสอด.....   | 13   |
| 2.8 ประเภทของการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส.....  | 14   |
| 2.9 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งแบบ DS-SS.....  | 15   |
| 2.10 บล็อกไดอะแกรมแบบคัดแปลงของเครื่องส่งแบบ DS-SS.....   | 16   |
| 2.11 สัญญาณต่างๆ ของระบบ DS-SS ที่ใช้การมอดูเลตรหัสแบบ BPSK.....  | 16   |
| 2.12 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับแบบ DS-SS.....   | 17   |
| 3.1 การจัดสรรแบนด์วิดท์ในระบบ W-SS.....   | 27   |
| 3.2 บล็อกไดอะแกรมของการแผ่แบบสเปซ-ไทม์โดยใช้สายอากาศส่ง 2 ชุด.....  | 30   |
| 4.1 แบบจำลองระบบ.....   | 32   |
| 4.2 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งในระบบ W-SS ที่ใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์.....   | 33   |
| 4.3 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับในระบบ W-SS ที่ใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์.....   | 37   |
| 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability<br>โดยมีสายอากาศส่ง $U = 1$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0$ และมีผู้ใช้ 10 ราย..... | 51   |
| 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability<br>โดยมีสายอากาศส่ง $U = 2$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0$ และมีผู้ใช้ 10 ราย..... | 52   |
| 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability<br>โดยมีสายอากาศส่ง $U = 4$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0$ และมีผู้ใช้ 10 ราย..... | 53   |
| 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability<br>โดยมีสายอากาศส่ง $U = 8$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0$ และมีผู้ใช้ 10 ราย..... | 54   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

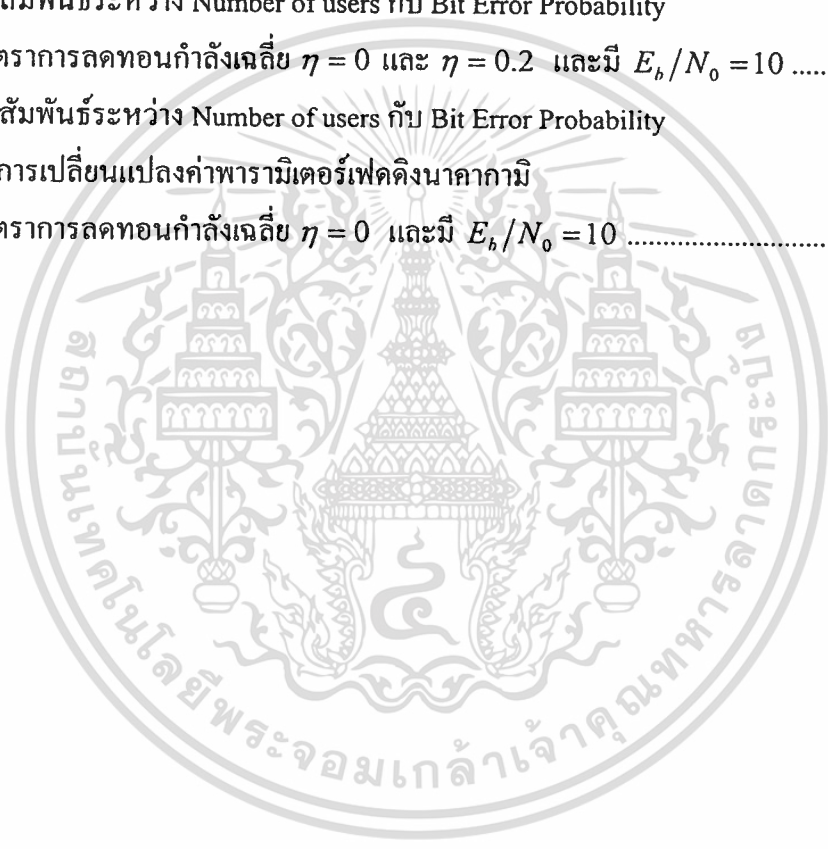
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability<br>โดยมีจำนวนวิถี $L = 1$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0$ และมีผู้ใช้ 10 ราย.....                                    | 55   |
| 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability<br>โดยมีอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0$ และมีผู้ใช้ 10 ราย .....   | 56   |
| 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability<br>โดยมีอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0.2$ และมีผู้ใช้ 10 ราย.....  | 57   |
| 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability<br>โดยมีอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0$ และ $\eta = 0.2$ และมีผู้ใช้ 10 ราย .....                                      | 58   |
| 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability<br>เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์เฟดดิ้งนาคากามิ<br>โดยมีอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0$ และมีผู้ใช้ 10 ราย ..... | 59   |
| 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability<br>โดยมีสายอากาศส่ง $U = 1$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0$<br>และมี $E_b/N_0 = 10$ .....                               | 60   |
| 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability<br>โดยมีสายอากาศส่ง $U = 2$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0$<br>และมี $E_b/N_0 = 10$ .....                               | 61   |
| 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability<br>โดยมีสายอากาศส่ง $U = 4$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0$<br>และมี $E_b/N_0 = 10$ .....                               | 62   |
| 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability<br>โดยมีสายอากาศส่ง $U = 8$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0$<br>และมี $E_b/N_0 = 10$ .....                               | 63   |
| 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability<br>โดยมีจำนวนวิถี $L = 1$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0$<br>และมี $E_b/N_0 = 10$ .....                                 | 64   |

# สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability<br>โดยมีอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0$ และมี $E_b/N_0 = 10$ .....   | 65   |
| 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability<br>โดยมีอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0.2$ และมี $E_b/N_0 = 10$ .....   | 66   |
| 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability<br>โดยอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0$ และ $\eta = 0.2$ และมี $E_b/N_0 = 10$ .....                                    | 67   |
| 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability<br>เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์เฟดดิ้งนาคามี<br>โดยอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย $\eta = 0$ และมี $E_b/N_0 = 10$ ..... | 68   |



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารโทรคมนาคมนับว่ามีบทบาทสำคัญต่อชีวิตความเป็นอยู่ของประชากรโลกเป็นอย่างยิ่ง การสื่อสารไร้สายผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ก็เป็นเทคโนโลยีหนึ่งในนั้นที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก จึงได้มีการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีของโทรศัพท์เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่อง โดยในช่วงแรกการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่จะเป็นการใช้งานด้านเสียงเท่านั้น แต่ต่อมามีความต้องการในการสื่อสารด้านข้อมูลมากขึ้น จึงได้มีการพัฒนาให้โทรศัพท์เคลื่อนที่สามารถรองรับการใช้งานในส่วนของการสื่อสารด้านข้อมูลด้วย อีกทั้งยังได้พัฒนาเทคนิคและอุปกรณ์ของการสื่อสารให้ดีขึ้น ทำให้ปัจจุบันประสิทธิภาพของการสื่อสารไร้สายผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นที่น่าพอใจเป็นอย่างมาก แต่ก็ยังคงมีการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีของโทรศัพท์เคลื่อนที่ให้ดีขึ้นอีก เพื่อที่จะสามารถรองรับความต้องการของผู้ใช้ให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้าง (Wideband Code Division Multiple Access : W-CDMA) [1]-[4] เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ที่หน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้ศึกษาและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นเพื่อที่จะทำให้สามารถรองรับความต้องการของผู้ใช้ได้มากขึ้น โดยเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้างนี้ได้รับการคาดหมายว่าจะเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าไปใช้กันอย่างกว้างขวางในอนาคต

วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ (Space-Time Spreading : STS) [5]-[7] ก็เป็นเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้เพิ่มสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้น โดยเป็นโคเวอเรจซีทีภาคส่งที่สถานีฐานซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพของการเชื่อมโยงขาลงของระบบ และวิธีการนี้ยังไม่ใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดโดยสิ้นเปลืองอีกด้วย

ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเทคโนโลยีทั้งสองมาใช้ร่วมกัน เพื่อต้องการให้ระบบที่ได้มีสมรรถนะที่ดีขึ้นและสามารถนำไปใช้เพื่อรองรับความต้องการของผู้ใช้ได้มากขึ้น โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบตามเงื่อนไขต่างๆ ที่เหมาะสมและพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ

### 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อนำเสนอการพัฒนาสมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้างโดยใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ในการส่งสัญญาณ ซึ่งในระบบเป็นการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณเฟดดิ้งนาคามีที่มีสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อื่นและมีสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก แล้วพิจารณาความน่าจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นของการเกิดความผิดพลาดของบิต (Bit Error Probability : BEP) ที่ได้จากระบบ และแสดงผลการวิเคราะห์ระบบในรูปแบบของกราฟ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ทำการวิเคราะห์เชิงเลขแล้วพิจารณาถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆ ในระบบ

### 1.3 สมมติฐาน

สมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้างที่ใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์จะดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้างที่ไม่ใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ โดยสมรรถนะของระบบจะพิจารณาจากความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดของบิต และปัจจัยต่างๆ ในระบบจะมีผลต่อสมรรถนะแตกต่างกัน

### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ศึกษาสมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้างที่ใช้และไม่ใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ กำหนดสภาพแวดล้อมของระบบโดยทำการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณเฟดดิ้งนาคากามิ ซึ่งมีสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อื่นและมีสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก จากนั้นวิเคราะห์สมการตามเงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนดแล้วเขียน โปรแกรมวิเคราะห์ระบบตามสมการที่ได้ พิจารณาระบบจากความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดของบิตเทียบกับตัวแปรอื่นๆ โดยแสดงในรูปของกราฟสุดท้ายสรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์ระบบ

### 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้าง โดยเฉพาะในส่วนของการวิเคราะห์ระบบที่พิจารณาความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดของบิตซึ่งเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ รวมถึงศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโคเวออร์ซิตีแบบต่างๆ โดยเฉพาะโคเวออร์ซิตีภาคส่งโดยวิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ซึ่งเป็นวิธีการที่นำมาปรับปรุงสมรรถนะของระบบ แล้วจึงรวบรวมแนวความคิดและทฤษฎีจากการศึกษาทั้งหมดมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ระบบภายใต้เงื่อนไขและปัจจัยต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งการวิเคราะห์ระบบใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงเลข แล้วจึงนำผลการวิเคราะห์เชิงเลขที่ได้มาแสดงในรูปของกราฟโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อทำการวิเคราะห์และสรุปผล

## บทที่ 2

# การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส

การสื่อสารภายในเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้น ใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นตัวกลางในการรับส่งข้อมูลและสัญญาณควบคุมต่างๆ และเนื่องจากข้อจำกัดในด้านทรัพยากรของการสื่อสารหรือแถบความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารมีอยู่อย่างจำกัด จึงทำให้มีการศึกษาและพัฒนาเทคนิคต่างๆ เพื่อช่วยในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

### 2.1 การเข้าถึงหลายทาง (Multiple Access)

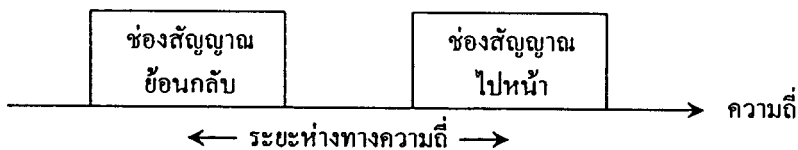
วิธีการหนึ่งที่เป็นที่ยอมรับและนำมาใช้งานในเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ก็คือ การเข้าถึงหลายทาง (Multiple Access) [1], [8] และ [9] ซึ่งเป็นวิธีการจัดสรรทรัพยากรความถี่ที่มีอยู่จำกัดให้รองรับการใช้งานให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยวิธีการนี้จะทำให้โทรศัพท์เคลื่อนที่จำนวนมากสามารถใช้สเปกตรัมคลื่นวิทยุ (radio spectrum) ที่มีจำนวนจำกัดในเวลาเดียวกันได้ และเพื่อคุณภาพที่ดีของการสื่อสาร วิธีการนี้จะต้องไม่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงมากด้วย

ระบบการสื่อสารไร้สายนั้นมีความต้องการให้ผู้ใช้ (subscriber) สามารถรับและส่งข่าวสารข้อมูลกับสถานีฐาน (base station) ได้พร้อมๆ กัน ดังตัวอย่างในโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคแรกๆ ที่สามารถพูดและฟังได้ในเวลาเดียวกันซึ่งเรียกว่า การดูเพลกซ์ (duplexing) โดยมีอุปกรณ์ที่อยู่ในโทรศัพท์เคลื่อนที่และสถานีฐานเพื่อให้การรับและส่งข้อมูลเกิดขึ้นพร้อมๆ กันซึ่งเรียกว่า ดูเพลกซ์เซอร์ (duplexer) โดยการดูเพลกซ์นี้เป็นการใช้เทคนิคของโดเมนทางความถี่และโดเมนทางเวลา

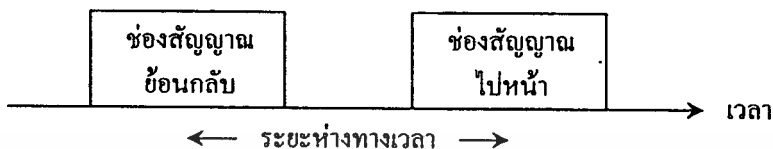
การดูเพลกซ์แบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Duplex : FDD) [9] จะใช้แถบความถี่ที่แตกต่างกัน 2 แถบความถี่ในการส่งสัญญาณในเวลาเดียวกันสำหรับผู้ใช้แต่ละราย โดยแถบความถี่ไปหน้า (forward band) จะใช้ในการสื่อสารจากสถานีฐานไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่ ส่วนแถบความถี่ย้อนกลับ (reverse band) จะใช้ในการสื่อสารจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังสถานีฐาน ซึ่งจะเรียกแถบความถี่ทั้งสองนี้ว่า ช่องสัญญาณดูเพลกซ์ (duplex channel) โดยแต่ละแถบความถี่นี้จะเรียกช่องสัญญาณซิมเพลกซ์ (simplex channel) การแบ่งความถี่นั้นความกว้างระหว่างความถี่ของช่องสัญญาณไปหน้าและย้อนกลับจะคงที่ตลอดทั้งระบบ โดยความถี่ทั้งสองจะเป็นความถี่คู่ควบกัน

การดูเพลกซ์แบบแบ่งเวลา (Time Division Duplex : TDD) [9] โดยการส่งสัญญาณจะเกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกัน แต่จะใช้เวลาในการแบ่งระหว่างการเชื่อมโยงไปหน้าและย้อนกลับ โดยหาระยะห่างของช่องเวลา (time slot) ของการเชื่อมโยงทั้งสองขี้น้อยเท่าใดการส่งและรับข้อมูลที่เกิดขึ้นก็ยิ่งเกิดในเวลาใกล้เคียงกันมากขึ้นเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

### รูปที่ 2.1 (ก) การดูเพลกซ์แบบแบ่งความถี่

### (ข) การดูเพลกซ์แบบแบ่งเวลา

จากรูปที่ 2.1 (ก) แสดงเทคนิคการดูเพลกซ์แบบแบ่งความถี่ โดยจะเป็นระบบการสื่อสารที่ใช้เทคนิคทางความถี่ซึ่งเป็นการส่งและรับข้อมูลที่ใช้ความถี่คู่เฉพาะสำหรับผู้ใช้แต่ละรายในเวลาเดียวกัน ส่วนรูปที่ 2.1 (ข) แสดงเทคนิคการดูเพลกซ์แบบแบ่งเวลา โดยจะเป็นระบบการสื่อสารที่ใช้เทคนิคทางเวลาซึ่งจะเป็นการทำงานบนความถี่เดียวกันแต่ส่งและรับข้อมูลคนละช่วงเวลา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการเข้าถึงหลายทางพื้นฐานที่ใช้ในระบบสื่อสารไร้สายมี 3 ประเภท แต่ยังมีรูปแบบการเข้าถึงหลายทางอีก 2 แบบ คือ การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งตำแหน่ง (Space Division Multiple Access : SDMA) และการเข้าถึงแบบคลื่นวิทยุกลุ่มข้อมูล (Packet Radio : PR) ส่วนเทคนิคการเข้าถึงหลายทางพื้นฐานมีดังนี้ [9]

- 1) การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access : FDMA)
- 2) การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access : TDMA)
- 3) การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access : CDMA)

โดยแต่ละเทคนิคสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตามระบบของการสื่อสาร คือ ระบบแถบแคบ (narrowband systems) และระบบแถบกว้าง (wideband systems) ซึ่งแต่ละระบบจะขึ้นอยู่กับแบนด์วิดท์ (bandwidth) ที่ใช้ในระบบ

- ระบบแถบแคบ (narrowband systems)

ระบบแถบแคบนี้เป็นระบบที่แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณช่องสัญญาณเดียวแคบกว่าแบนด์วิดท์รวมนับ (coherence bandwidth) ของช่องสัญญาณ ในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแถบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคบนั้นสเปกตรัมคลื่นวิทยุจะถูกแบ่งออกเป็นช่องสัญญาณแถบแคบจำนวนมาก ซึ่งโดยปกติช่องสัญญาณนี้จะถูกใช้กับเทคนิคการดูเพลกซ์แบบแบ่งความถี่ และเพื่อให้เกิดสัญญาณแทรกสอด (interference) น้อยที่สุดระหว่างการเชื่อมโยงไปหน้าและย้อนกลับในแต่ละช่องสัญญาณ ช่วงความถี่คู่ควมจึงต้องกว้างที่สุดเท่าที่จะทำได้ในสเปกตรัมความถี่ ขณะที่ยังใช้ดูเพลกซ์เซอร์ที่ไม่แพงและในโทรศัพท์เคลื่อนที่ก็ยังใช้สายอากาศรับส่งแบบเดิม

ในการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ของระบบแถบแคบ ผู้ใช้จะถูกกำหนดให้ใช้ช่องสัญญาณเฉพาะที่มีความถี่ไม่เหมือนกับความถี่ของช่องสัญญาณของผู้ใช้ที่อยู่ใกล้เคียง และเมื่อใช้การดูเพลกซ์แบบแบ่งความถี่ (โดยแต่ละช่องสัญญาณมีการเชื่อมโยงไปหน้าและย้อนกลับ) จะเรียกระบบแบบนี้ว่า ระบบ FDMA/FDD

ในการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลาของระบบแถบแคบ ผู้ใช้สามารถใช้ช่องสัญญาณที่มีความถี่เดียวกันได้แต่คนละช่วงเวลา ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เทคนิคการดูเพลกซ์ทั้งแบบแบ่งความถี่และแบบแบ่งเวลา ดังนั้นจึงเรียกระบบแบบนี้ว่า ระบบ TDMA/FDD และระบบ TDMA/TDD ตามลำดับ

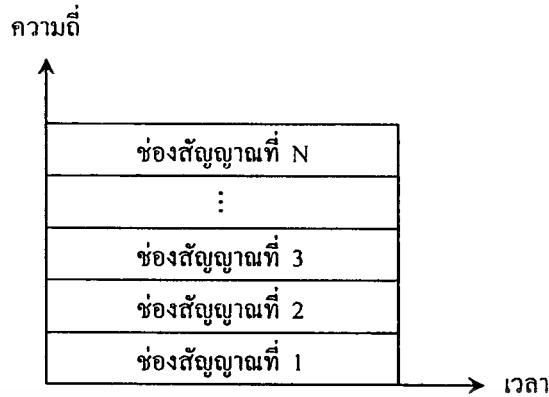
- ระบบแถบกว้าง (wideband systems)

ระบบแถบกว้างนี้เป็นระบบที่แบนด์วิธของช่องสัญญาณช่องสัญญาณเดี่ยวกว้างกว่าแบนด์วิธรวมกันของช่องสัญญาณ ดังนั้นการเฟดดิ้งหลายวิถี (multipath fading) จะไม่มีผลกระทบมากนักต่อสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณแถบกว้าง ในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแถบกว้างนี้ผู้ใช้สามารถส่งสัญญาณในสเปกตรัมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นผู้ใช้งานจำนวนมากจึงสามารถส่งสัญญาณในช่องสัญญาณเดียวกันได้

ในการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลาของระบบแถบกว้างนั้นจะกำหนดช่วงเวลาให้ผู้ใช้ในช่องสัญญาณที่มีความถี่เดียวกัน และจะอนุญาตให้ผู้ใช้เพียงรายเดียวใช้ช่องสัญญาณได้ในเวลาที่กำหนด แต่ในขณะที่เมื่อใช้การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสนั้นจะอนุญาตให้ผู้ใช้ทุกรายใช้ช่องสัญญาณได้ในเวลาเดียวกัน โดยทั้งระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลาและระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสนั้นสามารถใช้เทคนิคการดูเพลกซ์ได้ทั้งแบบแบ่งความถี่และแบบแบ่งเวลา

### 2.1.1 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access : FDMA)

การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่จะกำหนดช่องสัญญาณให้ผู้ใช้แต่ละราย ซึ่งช่องสัญญาณนี้จะถูกแบ่งมาจากแถบความถี่ โดยรูปที่ 2.2 แสดงการกำหนดแถบความถี่หรือช่องสัญญาณเฉพาะเพื่อจัดสรรให้ผู้ใช้แต่ละราย ซึ่งการจัดสรรช่องสัญญาณจะเกิดขึ้นตามการขอใช้บริการของผู้ใช้ และระหว่างช่วงเวลาของการสื่อสารผู้ใช้รายอื่นจะไม่สามารถใช้แถบความถี่เดียวกันนี้ได้ ในระบบการดูเพลกซ์แบบแบ่งความถี่ผู้ใช้จะถูกกำหนดช่องสัญญาณเป็นความถี่คู่ควม โดยความถี่หนึ่งจะใช้ในช่องสัญญาณไปหน้า ส่วนอีกความถี่หนึ่งจะใช้ในช่องสัญญาณย้อนกลับ



## รูปที่ 2.2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access : FDMA)

คุณสมบัติของการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่มีดังนี้

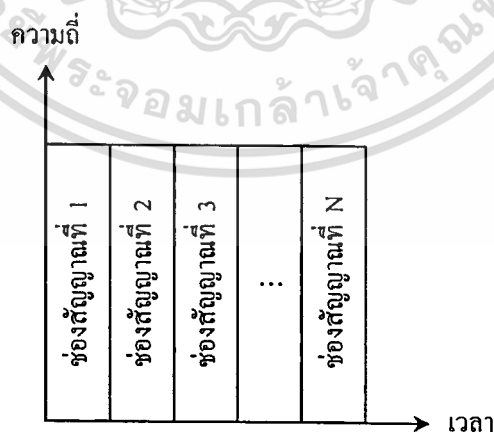
- ช่องสัญญาณของการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ 1 ช่องสัญญาณจะใช้กับการเชื่อมต่อของการเรียกเพียง 1 การเรียกในแต่ละครั้งเท่านั้น
- หากช่องสัญญาณของการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ ช่องสัญญาณนั้นก็ยังคงว่างอยู่ ซึ่งผู้ใช้คนอื่นจะไม่สามารถนำไปใช้เพื่อเพิ่มหรือใช้ความจุรวมได้ โดยวิธีการนี้จำเป็นต้องปล่อยให้ทรัพยากรสูญเปล่าไป
- หลังจากมีการกำหนดช่องสัญญาณเสียง สถานีฐานและโทรศัพท์เคลื่อนที่จะส่งสัญญาณไปในเวลาเดียวกันและเป็นไปอย่างต่อเนื่อง
- ช่องสัญญาณของการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่จะใช้แบนด์วิดท์ค่อนข้างแคบ (30 กิโลเฮิร์ตซ์) โดยแต่ละช่องสัญญาณจะใช้กับ 1 การเชื่อมโยงต่อคลื่นพาห์ ดังนั้นโดยทั่วไปการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่จะใช้ในระบบแถบแคบ
- ช่วงเวลาของสัญลักษณ์ (symbol time) จะมากเมื่อเทียบกับการแผ่ของการดีเลย์เฉลี่ย ดังนั้นจึงทำให้จำนวนการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (intersymbol interference) ต่ำ เพราะฉะนั้นในระบบแถบแคบที่ใช้การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่จึงต้องการการปรับเท่า (equalization) น้อยหรือไม่ต้องการเลย
- ความซับซ้อนของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่จะน้อยเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา
- เมื่อใช้รูปแบบการสื่อสารที่ต่อเนื่องโดยใช้การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ มีความจำเป็นต้องใช้บิตเสริมตรงส่วนต้น (overhead) ของสัญญาณ (เช่น บิตของการซิงโครไนซ์ และ บิตของการจัดเฟรม) แต่จำนวนบิตจะใช้น้อยกว่าระบบที่ใช้การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่จะมีค่าใช้จ่ายของระบบที่ใช้ในการตั้งเซลล์สูงกว่าระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา เพราะการออกแบบช่องสัญญาณเคียวต์อคลื่นพาห์ และความต้องการที่จะใช้วงจรกรองผ่านแถบความถี่ (bandpass filter) ที่มีราคาสูงเพื่อขจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการที่สถานีฐานออก
- ในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่จะใช้คูเพลกซ์เซอร์เพื่อให้การรับและส่งสัญญาณเป็นไปในเวลาเดียวกัน ดังนั้นจึงทำให้ค่าใช้จ่ายในส่วนของต้นทุนของโทรศัพท์เคลื่อนที่และสถานีฐานเพิ่มขึ้น
- ในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ต้องการการกรองความถี่คลื่นวิทยุที่ดีเพื่อลดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากช่องสัญญาณข้างเคียงให้เหลือน้อยที่สุด

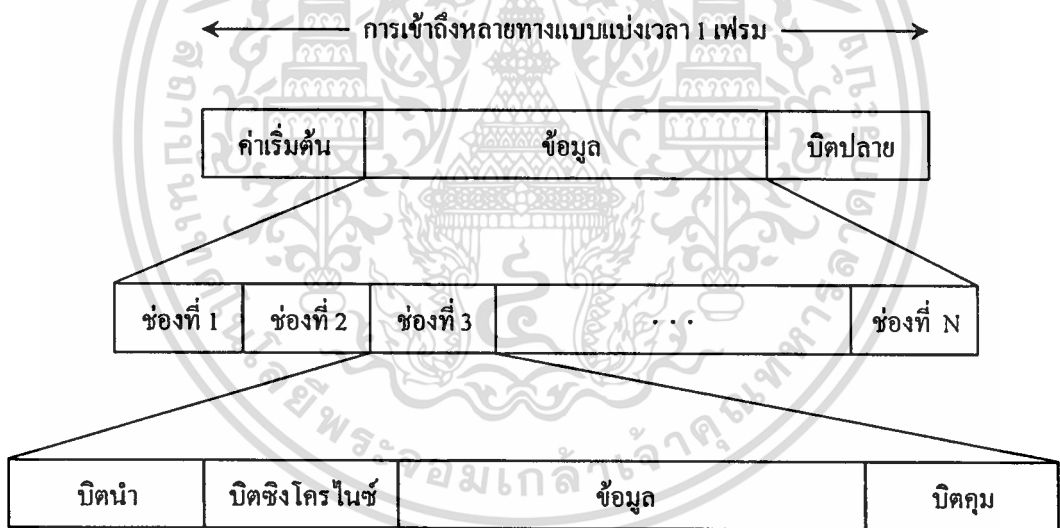
### 2.1.2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access : TDMA)

การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลาเป็นการแบ่งสเปกตรัมคลื่นวิทยุให้เป็นช่วงเวลา และแต่ละช่องเวลานี้จะถูกกำหนดให้ผู้ใช้เพียงรายเดียวในการส่งหรือรับสัญญาณ โดยในรูปที่ 2.3 ผู้ใช้แต่ละรายจะใช้ช่วงเวลาซึ่งวนซ้ำๆ ดังนั้นบางครั้งจึงคิดว่าเป็นช่วงเวลาเฉพาะที่เกิดขึ้นซ้ำทุกเฟรม โดยช่วงเวลาจำนวน  $N$  จะประกอบกันเป็น 1 เฟรม ระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลาจะส่งข้อมูลด้วยวิธีบัฟเฟอร์และเบิร์สต์ (buffer-and-burst) ดังนั้นการส่งข้อมูลสำหรับผู้ใช้ใดๆ จะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง โดยต่างจากระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ซึ่งเป็นการมอดูเลตความถี่ (Frequency Modulation : FM) แบบแอนะล็อก ฉะนั้นการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลาจึงใช้ข้อมูลและการมอดูเลตแบบดิจิทัล



รูปที่ 2.3 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access : TDMA)

การส่งข้อมูลจากผู้ใช้แต่ละรายจะถูกจัดให้เป็นไปตามโครงสร้างของเฟรมดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแต่ละเฟรมนั้นจะมีช่อง (slot) จำนวนหนึ่ง และในแต่ละเฟรมจะประกอบด้วยค่าเริ่มต้น (preamble) ข้อมูล (information message) และบิตปลาย (tail bits) ในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลาซึ่งใช้เทคนิคการดูเพลกซ์แบบแบ่งเวลา ครั้งหนึ่งของช่องเวลาในส่วนที่ใช้ส่งข้อมูล จะถูกใช้สำหรับช่องสัญญาณการเชื่อมโยงไปหน้า ส่วนอีกครั้งหนึ่งจะถูกใช้สำหรับช่องสัญญาณการเชื่อมโยงย้อนกลับ ส่วนในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลาซึ่งใช้เทคนิคการดูเพลกซ์แบบแบ่งความถี่ โครงสร้างเฟรมที่เหมือนหรือคล้ายกันนี้จะถูกใช้สำหรับการส่งสัญญาณไปหน้าหรือย้อนกลับ แต่ความถี่คลื่นพาห์สำหรับการเชื่อมโยงไปหน้าและการเชื่อมโยงย้อนกลับจะต่างกัน โดยทั่วไประบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลาซึ่งใช้เทคนิคการดูเพลกซ์แบบแบ่งความถี่นั้นมีจุดมุ่งหมายที่จะทำให้ช่องเวลาของการคิดเลขระหว่างช่องเวลาของการเชื่อมโยงไปหน้าและการเชื่อมโยงย้อนกลับของผู้ใช้แต่ละรายมีจำนวนมากอยู่แล้ว ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้ดูเพลกซ์เซอร์ในเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่



รูปที่ 2.4 โครงสร้างเฟรมของการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา

ในเฟรมของการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา ค่าเริ่มต้นจะบรรจุข้อมูลของที่อยู่และการซิงโครไนซ์ ซึ่งทั้งสถานีฐานและผู้ใช้จะใช้ในการระบุคู่สื่อสาร ส่วนเวลาคุม (guard time) ถูกใช้เพื่อทำให้เกิดการซิงโครไนซ์ของเครื่องรับเมื่อมีความแตกต่างที่ช่องและเฟรม ซึ่งหากใช้มาตรฐานของการสื่อสารไร้สายโดยการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลาที่แตกต่างกันก็จะทำให้มีโครงสร้างเฟรมที่แตกต่างกันด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

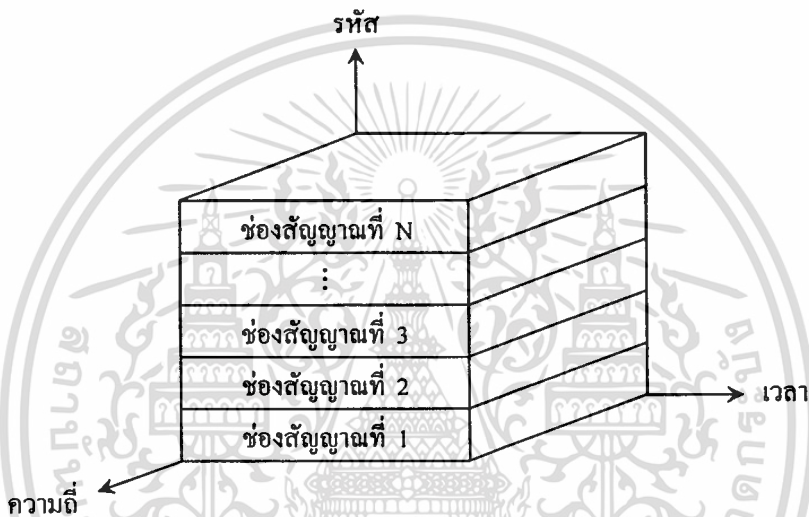
คุณสมบัติของการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลามีดังนี้

- ระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลาจะใช้ความถี่คลื่นพาห์เดียวกันต่อผู้ใช้หลายราย โดยผู้ใช้แต่ละรายนี้จะต้องใช้ช่องเวลาที่ไม่ว่างกัน จำนวนของช่องเวลาที่ต่อเฟรมจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น เทคนิคการมอดูเลต แบบคิวิตที่ที่ใช้ เป็นต้น
- การส่งข้อมูลของผู้ใช้ในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลาจะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง โดยจะเกิดในรูปแบบของเบิร์สต์ (burst) ซึ่งเป็นประโยชน์ในด้านการประหยัดพลังงานของแบตเตอรี่ โดยเครื่องส่งในโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สามารถปิดได้เมื่อไม่ถูกใช้งาน ซึ่งก็เป็นเวลาส่วนมากในการสื่อสาร
- เนื่องจากการส่งข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่องในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา กระบวนการแฮนด์ออฟ (handoff) จึงง่ายสำหรับการใช้งาน โดยสามารถเทียบสัญญาณจากสถานีฐานอื่น ขณะที่ช่องเวลาว่าง การควบคุมการเชื่อมโยงพิเศษ เช่น Mobile Assisted Handoff (MAHO) สามารถทำได้โดยผู้ใช้ โดยการใช้ช่องที่ว่างในเฟรมของการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา
- ระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลาจะใช้ช่องเวลาสำหรับการส่งและรับข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้คูเพลกซ์เซอร์ โดยระบบที่ใช้การคูเพลกซ์แบบแบ่งความถี่จะใช้สวิตช์แทนคูเพลกซ์เซอร์ซึ่งอยู่ในเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อใช้สำหรับเปลี่ยนสถานะการทำงานระหว่างขณะทำงานเป็นเครื่องส่งและขณะทำงานเป็นเครื่องรับ
- ระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลามักจำเป็นต้องใช้การปรับเท่าแบบปรับตัว (adaptive equalization) เนื่องจากอัตราการใช้สื่อสารจะสูงมากเมื่อเทียบกับในช่องสัญญาณการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่
- เวลาควมในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลาควรจะลดให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้เท่านั้น เพราะหากการส่งสัญญาณที่ขอบของช่องเวลาถูกระงับลงอย่างมากเพื่อลดเวลาควมแล้ว สเปกตรัมที่ถูกส่งจะขยายและเป็นสาเหตุให้เกิดการแทรกสอดต่อของสัญญาณที่อยู่ติดกัน
- ระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลาต้องการส่วนต้นของสัญญาณที่มากเพื่อการซิงโครไนซ์ เพราะการส่งสัญญาณที่เป็นแบบเบิร์สต์ โดยการส่งสัญญาณจะถูกแบ่งเป็นช่อง และระบบยังต้องการเครื่องรับที่ซิงโครไนซ์สำหรับเบิร์สต์ของข้อมูลแต่ละเบิร์สต์ด้วย อีกทั้งระบบยังต้องมีช่องคุม (guard slot) เพื่อใช้ในการแยกแยะผู้ใช้ ดังนั้นในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา จึงมีส่วนต้นของสัญญาณมากกว่าในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่
- ระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลามีข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งคือสามารถกำหนดจำนวนช่องเวลาให้แตกต่างกันได้ในหนึ่งเฟรมเมื่อเป็นผู้ใช้ที่ต่างกัน ดังนั้นแบบคิวิตจึงสามารถรองรับความต้องการของผู้ใช้ที่ต่างกันได้โดยการนำช่องเวลามาเชื่อมเข้าด้วยกันหรือกำหนดขึ้นใหม่ตามลำดับความสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access : CDMA)

ในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสนั้นสัญญาณข้อมูลแถบแคบจะถูกคูณด้วยสัญญาณที่มีแบนด์วิธที่กว้างมากเรียกว่า สัญญาณแผ่ (spreading signal) โดยสัญญาณแผ่นี้คือ ลำดับรหัส ซึ่งลำดับรหัสจะมีอัตราชีพมากกว่าอัตราข้อมูลของสัญญาณที่ต้องการส่ง จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้ทุกรายใช้ความถี่พาหะที่เหมือนกันและส่งสัญญาณไปในเวลาเดียวกัน ผู้ใช้แต่ละรายจะมีคำรหัส (codeword) ซึ่งคล้ายสัญญาณสุ่มเป็นของตนเอง โดยคำรหัสนี้จะประมาณให้ตั้งฉากกับคำรหัสอื่นๆ แล้วเมื่อสัญญาณถูกส่งออกไปเครื่องรับจะพิจารณาเฉพาะสัญญาณที่มีคำรหัสเหมือนกัน ส่วนสัญญาณที่มีคำรหัสอื่นจะถูกพิจารณาให้เป็นสัญญาณรบกวน



รูปที่ 2.5 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access : CDMA)

### 2.2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access : CDMA)

การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสเป็นการเข้าถึงหลายทางแบบที่ใช้วิธีการเข้ารหัส (coding) โดยผู้ใช้จะถูกกำหนดลำดับรหัส (code sequence) เฉพาะของแต่ละรายเพื่อใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลที่ต้องการจะส่งออกไปในระบบ ซึ่งหากเครื่องรับใดที่รู้ลำดับรหัสนี้ก็สามารถถอดรหัสจากสัญญาณที่รับมาเพื่อให้ได้ข้อมูลเดิมกลับคืนมา และเนื่องจากแบนด์วิธของสัญญาณรหัสดังกล่าวมากกว่าแบนด์วิธของสัญญาณข้อมูลก่อนเข้ารหัสมาก ฉะนั้นกระบวนการเข้ารหัสจึงเป็นการแผ่ (spread) สเปกตรัมของสัญญาณ ดังนั้นจึงเรียกกระบวนการนี้ว่าการมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่ (Spread-Spectrum (SS) modulation) โดยสัญญาณที่ถูกเข้ารหัสจะเรียกว่าสัญญาณสเปกตรัมแผ่ (spread-spectrum signal) เพราะฉะนั้นการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสนี้จึงมักถูกกล่าวถึงว่าเป็นการเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่ (Spread-Spectrum Multiple Access : SSMA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เดิมนั้นเทคนิคการมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในระบบเรดาร์และการสื่อสารทางทหารเนื่องจากเทคนิคการมอดูเลตแบบนี้สามารถทนต่อสัญญาณกวน (jamming signal) ได้ดีและมีความน่าจะเป็นในการถูกดักจับสัญญาณต่ำ ต่อมาจึงได้มีการศึกษาและพัฒนาเทคนิคนี้เพื่อใช้ในระบบการสื่อสารทั่วไป

หลักการของเทคนิคการมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่มี 2 ข้อ คือ

- 1) แบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ถูกส่งออกไปต้องมากกว่าแบนด์วิดท์ของข้อมูลที่ยังไม่ได้เข้ารหัส
- 2) แบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ถูกส่งออกไปจะพิจารณาจากฟังก์ชันอื่นๆ มากกว่าข้อมูลที่จะถูกส่ง ดังนั้นแบนด์วิดท์จะไม่ขึ้นอยู่กับวิธีการทางสถิติของสัญญาณข้อมูล

ฉะนั้นการมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่จึงเป็นการแปลงสัญญาณข้อมูลไปเป็นสัญญาณที่จะถูกส่งที่มีแบนด์วิดท์มากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งการแปลงนี้ทำได้โดยการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลด้วยสัญญาณรหัสซึ่งจะไม่ขึ้นกับข้อมูลและจะมีความกว้างสเปกตรัมมากกว่าสัญญาณข้อมูล การแผ่จะทำให้กำลังของสัญญาณข้อมูลแผ่ออกไปตลอดช่วงแบนด์วิดท์ของสัญญาณสเปกตรัมแผ่ เป็นผลทำให้ความหนาแน่นกำลัง (power density) ลดลง

อัตราส่วนแบนด์วิดท์ของสัญญาณสเปกตรัมแผ่ต่อแบนด์วิดท์ของข้อมูลเรียกว่า อัตราขยายการประมวลผล (processing gain :  $G_p$ ) ของระบบสเปกตรัมแผ่

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

เมื่อ  $B_f$  คือ แบนด์วิดท์ของสัญญาณสเปกตรัมแผ่  
 $B_i$  คือ แบนด์วิดท์ของข้อมูลที่ยังไม่ได้เข้ารหัส

เครื่องรับจะทำการสหสัมพันธ์ (correlation) สัญญาณที่ได้รับด้วยสัญญาณรหัสที่เหมือนกับทางภาคส่งซึ่งถูกสร้างขึ้นอย่างซิงโครไนซ์กันจากสัญญาณที่ได้รับเพื่อจะทำให้ได้สัญญาณข้อมูลเดิมกลับคืนมา นั่นแสดงว่าเครื่องรับจะต้องรู้สัญญาณรหัสที่ใช้ในการมอดูเลตข้อมูลทางภาคส่งนั่นเอง

เนื่องจากการเข้ารหัสทำให้แบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ถูกส่งออกไปมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นสัญญาณสเปกตรัมแผ่จึงมีคุณสมบัติแตกต่างจากสัญญาณแถบแคบ (narrowband signal) อยู่หลายประการ ซึ่งคุณสมบัติของสัญญาณสเปกตรัมแผ่มีดังนี้

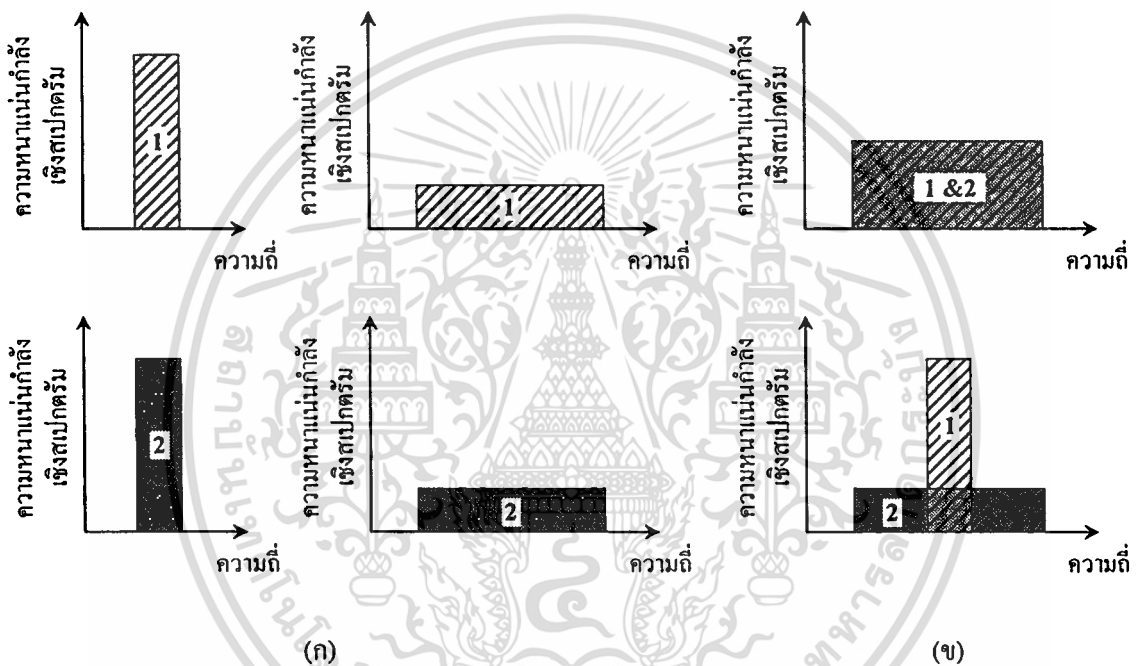
- 1) ความสามารถในการเข้าถึงหลายทาง (Multiple access capability)

เมื่อมีผู้ใช้หลายรายส่งสัญญาณสเปกตรัมแผ่ออกไปในเวลาเดียวกัน เครื่องรับก็ยังสามารถรู้ว่าเป็นผู้ใช้รายใดได้เพราะผู้ใช้แต่ละรายจะมีรหัสเฉพาะ ซึ่งรหัสนี้ต้องมีค่าสหสัมพันธ์ไขว้ (cross-correlation) ระหว่างรหัสของผู้ใช้ที่พิจารณากับรหัสของผู้ใช้คนที่ต่ำพอ ฉะนั้นเมื่อทำการสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้รับกับสัญญาณรหัสของผู้ใช้ที่พิจารณาแล้วจะมีการตีสเปก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(despread) เฉพาะสัญญาณของผู้ใช้ที่ต้องการเท่านั้น ส่วนสัญญาณสเปกตรัมแผ่อื่นๆ ก็ยังคงแผ่อยู่บนแบนด์วิดท์ที่กว้างดั้งเดิม ส่วนภายในแบนด์วิดท์ของสัญญาณข้อมูลจะต้องมีกำลังของผู้ใช้ที่พิจารณามากกว่ากำลังของสัญญาณแทรกสอดและต้องมีสัญญาณแทรกสอดไม่มากจึงจะสามารถแยกสัญญาณที่ต้องการออกมาได้ โดยความสามารถของการเข้าถึงหลายทางแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อรูปที่ 2.6 (ก) แสดงผู้ใช้ 2 รายสร้างสัญญาณสเปกตรัมแผ่จากสัญญาณข้อมูลแถบแคบ ส่วนรูปที่ 2.6 (ข) แสดงผู้ใช้ทั้ง 2 รายส่งสัญญาณสเปกตรัมแผ่ของตนออกไปในเวลาเดียวกัน แต่ที่เครื่องรับที่สื่อสารกับผู้ใช้ที่ 1 จะมีเพียงสัญญาณจากผู้ใช้ที่ 1 เท่านั้นที่ถูกดีสเปรดและได้ข้อมูลเดิมกลับคืนมา



รูปที่ 2.6 หลักการเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่

## 2) การป้องกันจากสัญญาณแทรกสอดหลายวิถี (Protection against multipath interference)

ในช่องสัญญาณวิทยุนั้น ไม่ได้มีวิถีของสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับเพียงวิถีเดียวเท่านั้น เนื่องจากการสะท้อน (และการหักเห) สัญญาณที่รับได้จะมาจากวิถีต่างๆ หลายวิถี สัญญาณจากวิถีต่างๆ นั้นมาจากเครื่องส่งเดียวกันแต่จะต่างกันที่แอมพลิจูด เฟส คีเลย์ และมุมที่รับได้ ซึ่งที่เครื่องรับนั้นสัญญาณจะเสริมกันในบางความถี่และจะหักล้างกันที่ความถี่อื่นๆ ในทางโดเมนเวลา ผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปสัญญาณที่กระจายตามความถี่ การมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่นี้สามารถแก้ปัญหาสัญญาณแทรกสอดหลายวิถีได้ แต่อย่างไรก็ตามก็จะขึ้นอยู่กับประเภทของการมอดูเลตที่ใช้ด้วย

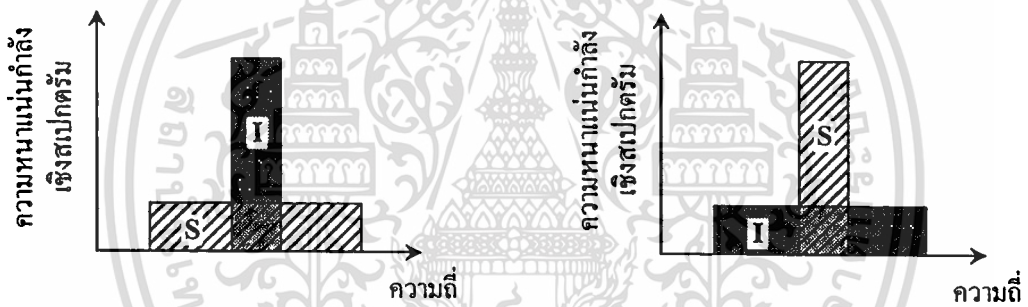
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) ความเป็นส่วนบุคคล (Private)

ที่เครื่องรับนั้นสัญญาณที่รับได้จะสามารถตีสเปกและได้ข้อมูลเดิมกลับมาเฉพาะเครื่องรับที่รู้รหัสเท่านั้น

### 4) การขจัดสัญญาณแทรกสอด (Interference rejection)

การสหสัมพันธ์ไขว้สัญญาณรหัสดับสัญญาณแถบแคบจะเป็นการแย่งกำลังของสัญญาณแถบแคบ นั่นคือจะทำให้กำลังของสัญญาณแทรกสอดในแบนด์วิคท์ของข้อมูลลดลง แสดงได้ดังรูปที่ 2.7 โดยเมื่อเครื่องรับได้รับสัญญาณซึ่งเป็นการรวมกันของสัญญาณสเปกตรัมแม่ (S) และสัญญาณแทรกสอดแถบแคบ (I) แล้ว เครื่องรับจะทำการตีสเปกสัญญาณสเปกตรัมแม่ ขณะที่สัญญาณแทรกสอดจะถูกแย่งสเปกตรัมจนกลายเป็นสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (background noise) เมื่อเทียบกับสัญญาณที่ถูกตีสเปก โดยการคิมอดูเลตจะสำเร็จได้หากพื้นหลังในแบนด์วิคท์ของข้อมูลที่ถูกตีสเปกมีพลังงานที่น้อยพอ



รูปที่ 2.7 การขจัดสัญญาณแทรกสอด

### 5) ความสามารถในการป้องกันการกวนของสัญญาณ โดยเฉพาะการกวนจากสัญญาณแถบแคบ (Anti-jamming capability, especially narrowband jamming)

คุณสมบัตินี้คล้ายกับการขจัดสัญญาณแทรกสอด แต่จะต่างกันที่สัญญาณในกรณีนี้เป็นการเจตนาให้เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งคุณสมบัติข้อนี้และข้อถัดไปทำให้การมอดูเลตแบบสเปกตรัมแม่ได้รับความสนใจและนำไปใช้ในงานด้านการทหาร

### 6) ความน่าจะเป็นในการถูกขัดขวางสัญญาณต่ำ (Low Probability of Interception : LPI)

เนื่องจากสัญญาณสเปกตรัมแม่มีความหนาแน่นกำลังที่ต่ำ จึงทำให้ยากที่จะถูกตรวจจับและขัดขวางจากผู้ที่ดักสัญญาณ

การแบ่งประเภทของระบบ CDMA ตามเทคนิคการมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่ นั้นสามารถแสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) วิธีลำดับตรง (Direct Sequence : DS)

สัญญาณข้อมูลจะถูกนำไปคูณ โดยตรงกับรหัสการแผ่ที่มีอัตราชิปที่สูง

2) การกระโดดทางความถี่ (Frequency Hopping : FH)

ความถี่คลื่นพาห์ของสัญญาณข้อมูลที่ถูกส่งไปจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วตามรหัสการแผ่

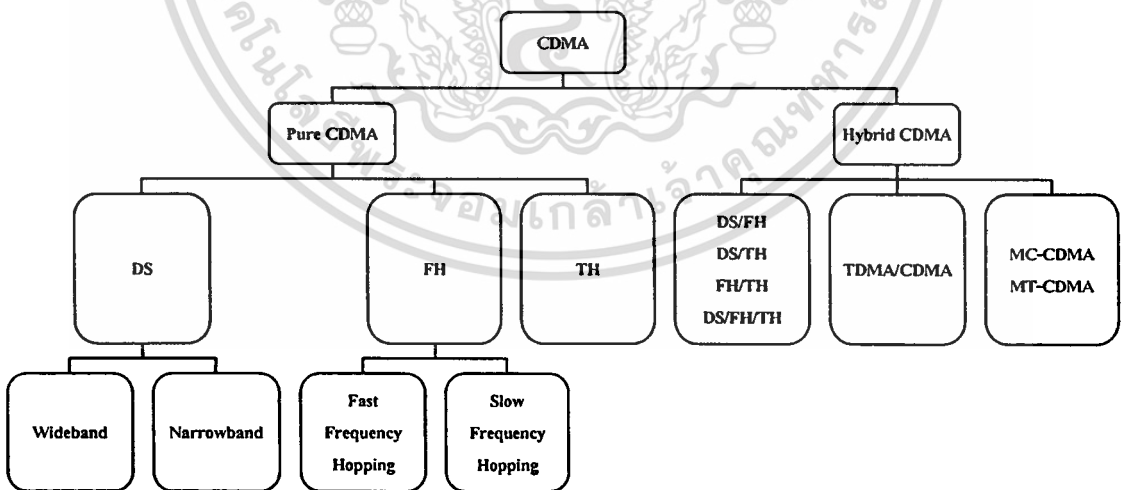
3) การกระโดดทางเวลา (Time Hopping : TH)

สัญญาณข้อมูลไม่ได้ถูกส่งไปอย่างต่อเนื่อง แต่จะถูกส่งออกไปเป็นเบิสต์สั้นๆ โดยช่วงเวลาของเบิสต์นั้นจะถูกกำหนดโดยรหัสการแผ่

4) การมอดูเลตแบบรวม (Hybrid modulation)

วิธีการนี้เป็นการรวมกันของวิธีข้างต้น 2 วิธีหรือมากกว่า เพื่อเป็นการเพิ่มข้อดีและลดข้อเสียที่เกิดขึ้น ยิ่งกว่านั้นยังสามารถรวมเทคนิค CDMA กับเทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบอื่นๆ ได้คือ การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (TDMA) การมอดูเลตแบบหลายคลื่นพาห์ (multicarrier (MC) modulation) และการมอดูเลตแบบหลายเสียงสัญญาณ (multitone (MT) modulation)

โดยในกรณีของ MC-CDMA เป็นการแผ่สัญญาณในแนวแกนความถี่ ส่วนกรณีของ MT-CDMA เป็นการแผ่สัญญาณในแนวแกนเวลา ซึ่งทั้ง MC-CDMA และ MT-CDMA อยู่บนพื้นฐานของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งฉาก (Orthogonal Frequency Division Multiplexing : OFDM)



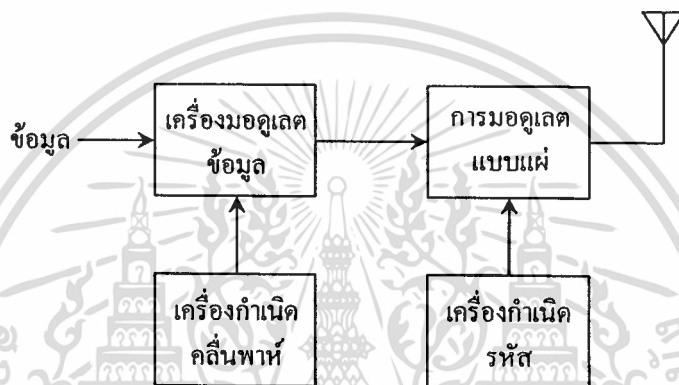
รูปที่ 2.8 ประเภทของการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส

ซึ่งระบบที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์เป็นระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้าง (Wideband Code Division Multiple Access : W-CDMA) ฉะนั้นจะกล่าวเฉพาะเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง  
เอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวันเวลาหรือปีการพิมพ์ในพจนานุกรมไทยนี้ เมื่อผู้จัดทำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสโดยวิธีลำดับตรง

### (Direct Sequence Code Division Multiple Access : DS-CDMA)

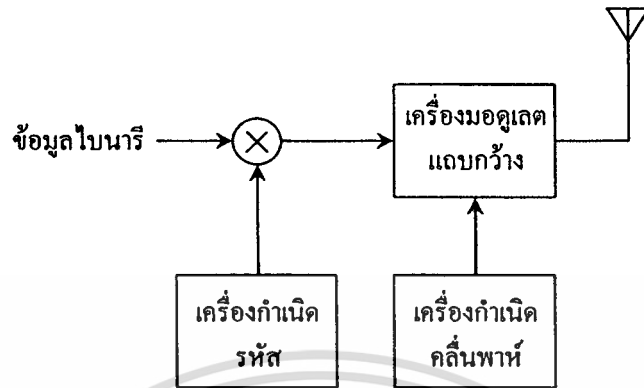
ในระบบ DS-CDMA นั้นสัญญาณข้อมูลจะถูกมอดูเลต โดยตรงกับสัญญาณรหัสแบบดิจิทัลที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาและระดับสัญญาณ โดยสัญญาณข้อมูลสามารถเป็นได้ทั้งสัญญาณแอนะล็อกหรือดิจิทัล แต่โดยทั่วไปจะเป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งในกรณีที่ เป็นสัญญาณดิจิทัลนั้นสัญญาณข้อมูลจะถูกมอดูเลตแล้วนำไปคูณ โดยตรงกับสัญญาณรหัส ฉะนั้นจึงเรียกวิธีการนี้ว่า การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสโดยวิธีลำดับตรง หรือ DS-CDMA นั่นเอง



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งแบบ DS-CDMA

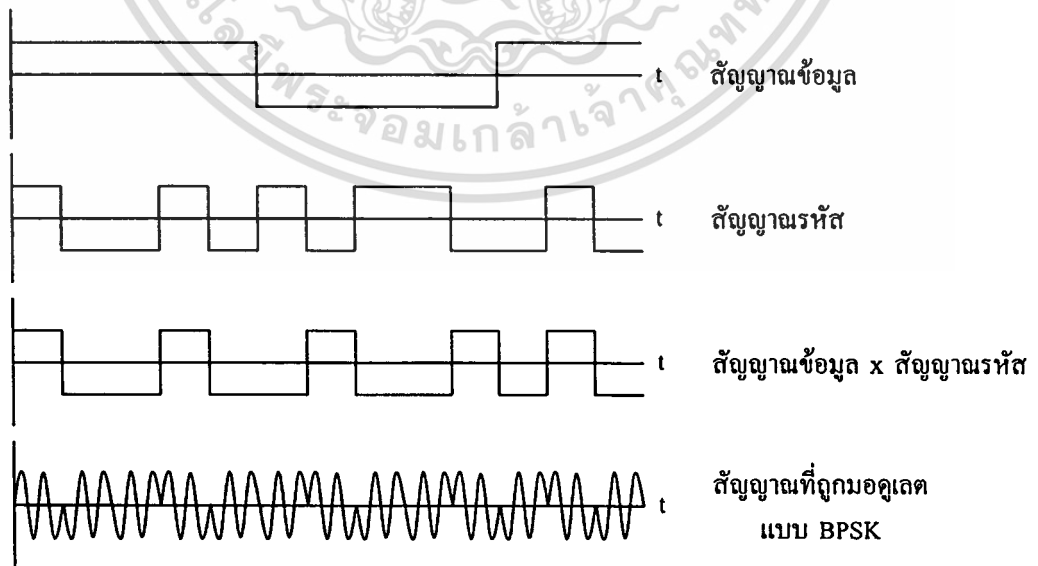
รูปที่ 2.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งแบบ DS-CDMA โดยสัญญาณข้อมูลไปนารีจะถูกมอดูเลตด้วยคลื่นพาห์แล้วจึงนำมามอดูเลตด้วยสัญญาณรหัส ซึ่งสัญญาณรหัสนี้ประกอบด้วยบิตรหัสจำนวนหนึ่งซึ่งเรียกว่า ชิป (chips) โดยระดับสัญญาณของรหัสจะเป็น +1 หรือ -1 และเพื่อที่จะให้ได้การแผ่ของสัญญาณที่ต้องการ จึงต้องใช้สัญญาณรหัสมือตราชิปสูงกว่าอัตราชิปของสัญญาณข้อมูลมากๆ สำหรับการมอดูเลตแบบแพร่นั้นสามารถใช้เทคนิคการมอดูเลตได้หลายแบบ แต่เทคนิคที่นิยมใช้คือ การมอดูเลตแบบ Phase Shift Keying (PSK) เช่น Binary Phase Shift Keying (BPSK), Differential Binary Phase Shift Keying (D-BPSK), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) หรือ การมอดูเลตแบบ Minimum Shift Keying (MSK)

หากไม่สนใจส่วนของการมอดูเลตข้อมูลและใช้วิธี BPSK ในการมอดูเลตรหัสแล้ว จะได้บล็อกไดอะแกรมซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมแบบคัดแปลงของเครื่องส่งแบบ DS-SS

ผลของสัญญาณ DS-SS ที่ได้จากเครื่องส่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 โดยอัตราของสัญญาณรหัสนี้เรียกว่า อัตราชิป (chip rate) ซึ่ง 1 ชิปรหัสคือ 1 สัญญาณรหัสนี้เมื่อกล่าวถึงสัญญาณรหัสนี้และจากรูปจะเห็นว่า มี 5 ชิปรหัสต่อ 1 สัญญาณรหัสของข้อมูลที่ถูกส่งไป (อัตราชิปรหัสเป็น 5 เท่าของอัตราข้อมูล) ดังนั้นอัตราขยายการประมวลผลคือ 5 ซึ่งในทางปฏิบัติอัตราขยายการประมวลผลจะมากกว่านี้มาก (มีค่าประมาณ  $10^2$  ถึง  $10^3$ )

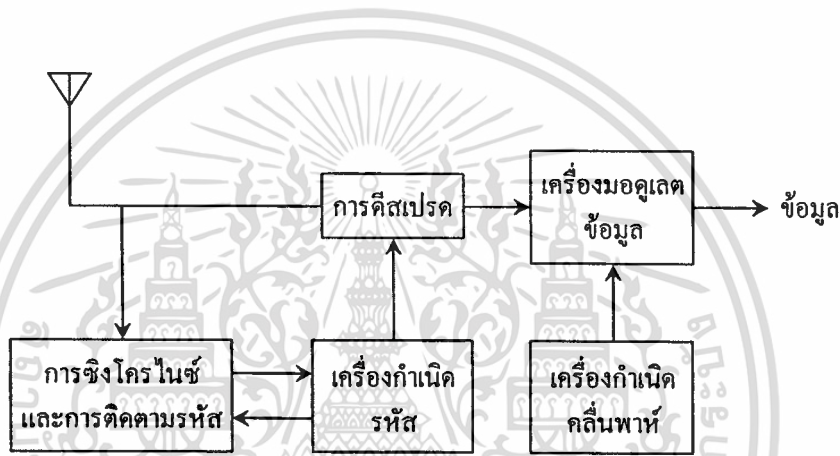


รูปที่ 2.11 สัญญาณต่างๆ ของระบบ DS-SS ที่ใช้การมอดูเลตรหัสแบบ BPSK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากการส่งสัญญาณ ที่เครื่องรับดังแสดงในรูปที่ 2.12 จะใช้การตีมอดูเลตแบบร่วมนัย (coherent demodulation) เพื่อตีสเปรคสัญญาณสเปกตรัมแผ่โดยใช้การสร้างลำดับรหัสที่เครื่องรับ การที่กระบวนการตีสเปรคจะสำเร็จได้นั้นไม่เพียงแต่เครื่องรับจะต้องรู้ลำดับรหัสที่ใช้ในการแผ่สัญญาณเท่านั้น แต่รหัสของสัญญาณที่รับได้และรหัสที่สร้างขึ้นที่เครื่องรับต้องซิงโครไนซ์กันด้วย ซึ่งการซิงโครไนซ์นี้จะต้องสมบูรณตั้งแต่เริ่มรับสัญญาณไปจนถึงสิ้นสุดการรับสัญญาณ โดยกระบวนการนี้อยู่ในบล็อกของการซิงโครไนซ์และการติดตามรหัส (code synchronization/tracking) ตามรูปที่ 2.12 และหลังจากการตีสเปรคและการตีมอดูเลตแล้วก็จะได้สัญญาณข้อมูลเดิมกลับคืนมา



รูปที่ 2.12 บล็อกโคโอะแกรมของเครื่องรับแบบ DS-SS

ในหัวข้อที่ 2.2 ได้กล่าวถึงคุณสมบัติของสัญญาณสเปกตรัมแผ่ไว้ โดยคุณสมบัติสำคัญที่ได้กล่าวไว้ คือ ความสามารถในการเข้าถึงหลายทาง การป้องกันจากสัญญาณแทรกสอดหลายวิถี ความเป็นส่วนบุคคล การขจัดสัญญาณแทรกสอด ความสามารถในการป้องกันการกวนของสัญญาณ โดยเฉพาะการกวนจากสัญญาณแถบแคบ และความน่าจะเป็นในการถูกขัดขวางสัญญาณต่ำ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงคุณสมบัติของระบบ DS-SS ดังนี้

1) การเข้าถึงหลายทาง

เมื่อผู้ใช้หลายรายใช้ช่องสัญญาณในเวลาเดียวกันจะทำให้มีสัญญาณ DS หลายสัญญาณเหลื่อม (overlap) กันอยู่ในทางเวลาและความถี่ ที่เครื่องรับจะใช้การตีมอดูเลตแบบร่วมนัยเพื่อถอดรหัสจากการมอดูเลตรหัส โดยกระบวนการนี้จะพิจารณากำลังของผู้ใช้ที่ต้องการในแบนด์วิดท์ข้อมูล หากค่าสหสัมพันธ์ไขว้ระหว่างรหัสของผู้ใช้ที่ต้องการกับรหัสของผู้ใช้อื่นๆ ที่แทรกสอดมีค่าน้อยแล้ว การตีเทคต์แบบร่วมนัยจะทำให้เกิดกำลังของสัญญาณแทรกสอดในแบนด์วิดท์ข้อมูลที่

## 2) การแทรกสอดหลายวิถี

หากลำดับรหัสเป็นฟังก์ชันอัตสหสัมพันธ์ (autocorrelation) ตามอุดมคติแล้วฟังก์ชันสหสัมพันธ์ที่อยู่นอกช่วง  $[-T_c, T_c]$  จะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อ  $T_c$  คือ ความกว้างของชิป (chip duration) ซึ่งหมายความว่าหากสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณเดียวกันนี้ที่คิดเลขไปมากกว่า  $2T_c$  ถูกรับเข้ามา การตีמודูเลตแบบร่วมนี้จะมีสัญญาณที่คิดเลขเป็นเพียงสัญญาณแทรกสอด ซึ่งก็จะมีกำลังในแบนด์วิดท์ข้อมูลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

## 3) การแทรกสอดจากสัญญาณแถบแคบ

การตีเทคต์แบบร่วมนี้ที่เครื่องรับทำได้โดยการคูณสัญญาณที่รับได้ด้วยลำดับรหัสที่สร้างขึ้นที่เครื่องรับซึ่งเหมือนกับที่เครื่องส่ง โดยที่เครื่องส่งจะทำการคูณสัญญาณแถบแคบด้วยลำดับรหัสแถบกว้างซึ่งจะเป็นการแผ่สเปกตรัมของสัญญาณแถบแคบ ดังนั้นกำลังในแบนด์วิดท์ข้อมูลจะลดลงโดยแฟกเตอร์ที่มีค่าเท่ากับอัตราขยายการประมวลผล

## 4) ความน่าจะเป็นในการถูกขัดขวางสัญญาณต่ำ

เนื่องจากสัญญาณ DS ใช้สเปกตรัมของสัญญาณทั้งหมดตลอดเวลา จึงมีการใช้กำลังส่งต่อเฮิรตซ์ที่ต่ำมาก ทำให้ยากต่อการดักสัญญาณ DS

นอกจากคุณสมบัติข้างต้นนี้แล้วยังมีคุณสมบัติอื่นๆ ของระบบ DS-CDMA ซึ่งสามารถแยกเป็นข้อดีและข้อเสียได้ดังนี้

### • ข้อดีของระบบ DS-CDMA

- 1) การสร้างสัญญาณที่ถูกเข้ารหัสสามารถทำได้ง่ายโดยใช้กระบวนการคูณธรรมดา
- 2) ใช้ความถี่คลื่นพาห်เพียงความถี่เดียวทำให้การสังเคราะห์ความถี่ทำได้ง่าย ดังนั้นจึงสามารถใช้เครื่องสังเคราะห์ความถี่ (เครื่องกำเนิดคลื่นพาห်) แบบง่ายได้
- 3) การตีמודูเลตสัญญาณ DS สามารถใช้การตีמודูเลตแบบร่วมนี้ได้
- 4) ไม่จำเป็นต้องซิงโครไนซ์ระหว่างผู้ใช้

### • ข้อเสียของระบบ DS-CDMA

- 1) การเริ่มต้นและรักษาการซิงโครไนซ์ระหว่างสัญญาณรหัสที่สร้างขึ้นกับสัญญาณที่รับได้ทำได้ยาก เนื่องจากการซิงโครไนซ์ต้องทำในช่วงชิปซึ่งมีขนาดเล็ก
- 2) ความผิดพลาดของการซิงโครไนซ์ของลำดับรหัสที่รับมากับลำดับรหัสที่สร้างขึ้นต้องมีค่าที่น้อยมากในช่วงชิปซึ่งมีขนาดเล็กจึงจะทำให้สัญญาณที่ได้ถูกต้องมากที่สุด อีกทั้งแถบความถี่ติดกันที่มีขนาดใหญ่มีไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้ ซึ่งในทางปฏิบัติแบนด์วิดท์ถูกจำกัดไว้ที่ 10 ถึง 20 เมกะเฮิรตซ์

- 3) กำลังที่รับได้จากผู้ใช้ที่อยู่ใกล้สถานีฐานมีค่ามากกว่ากำลังที่รับได้จากผู้ใช้ที่อยู่ไกลออกไป และเนื่องจากผู้ส่งสัญญาณอย่างต่อเนื่องไปบนแบนด์วิดท์ที่มีทั้งหมด ผู้ใช้ที่อยู่ใกล้สถานีฐานจึงเปรียบเสมือนผู้ส่งสัญญาณแทรกสอดจำนวนมากไปรบกวนผู้ใช้ที่อยู่ไกลออกไป ทำให้ผู้ใช้ที่อยู่ไกลออกไปไม่สามารถรับสัญญาณได้ โดยผลกระทบจากความใกล้-ไกล (near-far effect) สามารถแก้ไขได้โดยใช้การควบคุมกำลัง (power control) ซึ่งจะทำให้สถานีฐานรับสัญญาณที่มีกำลังเฉลี่ยเท่ากันจากผู้ใช้ทุกราย อย่างไรก็ตามการควบคุมกำลังนี้ก็ทำได้ยากเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น การดีเลย์ป้อนกลับ (feedback delay) การประมาณกำลังที่ไม่สมบูรณ์ (imperfect power estimate) ความผิดพลาดในช่องสัญญาณป้อนกลับ (error in the feedback channel) และเงื่อนไขของทราฟฟิก (traffic condition)



## บทที่ 3

# ระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้างและวิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์

### 3.1 ระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้าง

#### (Wideband Code Division Multiple Access : W-CDMA)

##### 3.1.1 ระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้างในเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3

ในยุคแรกของเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นระบบที่ใช้จะเป็นแบบแอนะล็อก แต่ต่อมาเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 ได้พัฒนาให้ระบบเป็นแบบดิจิทัลทำให้เพิ่มความสามารถในการใช้งานได้มากขึ้น โดยมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่มากขึ้นทำให้สามารถสร้างบริการเสริมรูปแบบต่างๆ และเพิ่มคุณภาพของสัญญาณให้ดีขึ้นด้วย และต่อมาความต้องการในการสื่อสารทางโทรศัพท์เคลื่อนที่มีรูปแบบที่มากและซับซ้อนขึ้น จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ให้เข้าสู่ยุคที่ 3 ซึ่งเป็นการพัฒนาครั้งสำคัญทางด้านเทคนิค โดยระบบจะมีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงขึ้นและมีความสามารถในการสื่อสารที่ซับซ้อนขึ้น ซึ่งถือว่าเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 นี้เป็นยุคของการสื่อสารแบบมัลติมีเดียอย่างแท้จริง

การพัฒนาเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 [2] และ [4] เริ่มขึ้นจากการประชุมการจัดการคลื่นวิทยุโลก (World Administrative Radio Conference : WARC) ของสหพันธ์โทรคมนาคมนานาชาติ (International Telecommunications Union : ITU) โดยมีการประกาศแผนการศึกษาวิจัยและพัฒนาภายใต้ชื่อโครงการว่า ระบบสื่อสาร โทรคมนาคมนานาชาติผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุค 2000 (International Mobile Telecommunications-2000 : IMT-2000) ซึ่งเป็นการวางข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 โดยระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้าง (Wideband Code Division Multiple Access : W-CDMA) เป็นระบบหนึ่งในเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ภายใต้มาตรฐานระบบ โทรศัพท์เคลื่อนที่ UMTS หรือ Universal Mobile Telecommunications System ซึ่งเป็นผลจากโครงการ IMT-2000 นั่นเอง

เพื่อเป็นการวางแผนและกำหนดคุณสมบัติต่างๆ สำหรับการใช้งานในระดับนานาชาติให้แก่ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 คณะกรรมาธิการแห่งสหภาพยุโรป (European Commission) จึงได้ก่อตั้งโครงการที่ชื่อว่า ACTS (Advanced Communication Technologies and Services) เพื่อศึกษาและพัฒนาาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ขึ้น และภายใต้โครงการ ACTS นี้ก็มีโครงการย่อยอีกหลายโครงการ ซึ่งในจำนวนนั้นก็มีโครงการหนึ่งที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับข้อกำหนดทางเทคนิคของการเชื่อมต่อทางอากาศของมาตรฐาน UMTS โดยโครงการดังกล่าวมีชื่อว่า FRAMES (Future Radio Wideband Multiple Access System) ซึ่งคณะทำงานของโครงการประกอบด้วยผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์โทรคมนาคม ผู้ให้บริการระบบเครือข่าย ผู้ประกอบการขนาดย่อย (Small Medium Enterprises : SME) และสถาบันวิจัยด้านโทรคมนาคม จุดประสงค์หลักของโครงการ FRAMES คือ การศึกษาและพัฒนามาตรฐานและความต้องการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยี โทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ดังนั้นโครงการ FRAMES จึงสร้างมาตรฐาน FMA (FRAMES Multiple Access Scheme) ขึ้นเพื่อรองรับความต้องการดังกล่าว โดยมาตรฐาน FMA ประกอบด้วย FMA1 ซึ่งเป็น wideband TDMA แบบแฉ่และแบบไม่แฉ่แถบความถี่ และ FMA2 ซึ่งเป็น wideband CDMA

ในช่วงต้นปี พ.ศ.2541 โครงการ FRAMES ได้นำแนวคิด UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access) ของสถาบันมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป (European Telecommunications Standards Institute : ETSI) มาประกอบการพิจารณาเพื่อกำหนดมาตรฐานด้านต่างๆ โดยให้ความสำคัญต่อการเข้ารหัสช่องสัญญาณ การมอดูเลตสัญญาณ อัลกอริทึมที่ใช้ในเครื่องรับ ฮาร์ดแวร์ และระบบเครือข่าย รวมถึงพิจารณาเทคนิคการดูเพลกซ์สัญญาณทั้งแบบ FDD (Frequency Division Duplex) และ TDD (Time Division Duplex) เพื่อหาความเหมาะสมในการนำเทคนิคดังกล่าวไปใช้งาน

ภายหลังหน่วยงาน ETSI ได้จัดตั้งโครงการ IMT-2000/UMTS เพื่อรับผิดชอบเรื่องการกำหนดมาตรฐานเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 แต่ต่อมาระบบ W-CDMA ถูกนำมาใช้ในเทคโนโลยี โทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 อย่างกว้างขวาง ดังนั้นคุณสมบัติต่างๆ จึงได้ถูกศึกษาและพัฒนาในโครงการ 3GPP (Third Generation Partnership Project) ซึ่งเป็นโครงการร่วมในการกำหนดมาตรฐานต่างๆ จากยุโรป ญี่ปุ่น เกาหลี สหรัฐอเมริกา และจีน ภายใต้โครงการ 3GPP นี้มีการกำหนดทางเทคนิคของมาตรฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ UMTS โดยเรียกเป็น UTRA FDD และ UTRA TDD ซึ่งสัมพันธ์กับมาตรฐาน FMA

### 3.1.2 ความแตกต่างของการสื่อสารทางคลื่นวิทยุระหว่างระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้างกับระบบในเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2

เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบความแตกต่างหลักระหว่างการสื่อสารทางคลื่นวิทยุของเทคโนโลยี โทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 และยุคที่ 3 จึงได้พิจารณาระบบ W-CDMA เทียบกับระบบ GSM และระบบ IS-95 (มาตรฐานของระบบ cdmaOne) ซึ่งเป็นการสื่อสารทางคลื่นวิทยุของเทคโนโลยี โทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 ส่วนระบบอื่นในเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 นั้นจะไม่กล่าวถึง เพราะคล้ายกับระบบที่จะกล่าวถึงนี้ และเพื่อให้เข้าใจถึงความแตกต่างระหว่างการสื่อสารทางคลื่นวิทยุของเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 และยุคที่ 3 อย่างชัดเจนจึงพิจารณาถึงความ ต้องการปัจจัยต่างๆ ของระบบเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ดังนี้

- มีอัตราบิตสูงถึง 2 เมกะบิตต่อวินาที
- อัตราบิตสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามแบนด์วิดท์
- มีการมัลติเพล็กซ์ของบริการต่างๆ ที่มีลักษณะที่แตกต่างกันบนการเชื่อมต่อเดียว เช่น เสียง วิดีโอ และกลุ่มข้อมูล
- ต้องการดีเลย์ตั้งแต่การสื่อสารแบบเวลาจริงที่ไวต่อการดีเลย์จนถึงข้อมูลแบบแพ็กเก็ตที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้
- ต้องการคุณภาพในช่วงอัตราความผิดพลาดเฟรม 10 % ถึงความผิดพลาดบิต  $10^{-6}$
- สามารถรองรับการใช้งานร่วมกันของเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 และยุคที่ 3 ได้ โดยมีการแฮนด์โอเวอร์ระหว่างระบบ ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ให้บริการและทำให้โหลดสมดุล
- สนับสนุนการสื่อสารที่ไม่สมดุลระหว่างการเชื่อมโยงขาขึ้นและการเชื่อมโยงขาลง เช่น ในเว็บไซต์ ซึ่งมีการโหลดข้อมูลมากกว่าการส่งข้อมูล
- มีประสิทธิภาพของสเปกตรัมสูง
- สามารถรองรับการใช้งานร่วมกันของ FDD และ TDD

จากตารางที่ 3.1 แสดงข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างระบบ W-CDMA และระบบ GSM ส่วนตารางที่ 3.2 แสดงข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างระบบ W-CDMA และระบบ IS-95 โดยในการเปรียบเทียบนี้จะพิจารณาเฉพาะการสื่อสารทางคลื่นวิทยุ

ตารางที่ 3.1 ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างระบบ W-CDMA และ GSM [2]

|                             | W-CDMA  | GSM  |
|-----------------------------|---|--|
| ความกว้างแถบความถี่         | 5 เมกะเฮิร์ตซ์  | 200 กิโลเฮิร์ตซ์   |
| แพ็คเกจการใช้ความถี่ซ้ำ     | 1   | 1 – 18   |
| ความถี่ที่ใช้ควบคุมกำลังส่ง | 1500 เฮิร์ตซ์   | 2 เฮิร์ตซ์ หรือต่ำกว่า                                   |
| การควบคุมคุณภาพ             | ใช้อัลกอริทึม<br>การบริหารทรัพยากร<br>คลื่นวิทยุ                                  | ใช้การออกแบบ<br>วางแผนเครือข่าย<br>(ออกแบบวางแผนความถี่) |
| ไดเวอร์ซิตีทางความถี่       | แบนด์วิดท์ 5 เมกะเฮิร์ตซ์<br>จะให้ไดเวอร์ซิตีหลายวิถี<br>โดยใช้เครื่องรับแบบ Rake | ใช้เทคนิค<br>การกระโดดทางความถี่                         |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

|  | W-CDMA                                    | GSM   |
|--|---|---|
| ข้อมูลแบบแพ็กเกต                           | ส่งข้อมูลแบบแพ็กเกตที่กำหนดไว้            | ส่งข้อมูลไปในเวลาที่กำหนดไว้ โดยใช้เทคโนโลยี GPRS |
| ไคเวอร์ซิตีการส่งสัญญาณของการเชื่อมโยงขาลง | สนับสนุนการปรับปรุงความจุการเชื่อมโยงขาลง | ไม่สนับสนุน แต่สามารถประยุกต์ใช้ได้               |

ตารางที่ 3.2 ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างระบบ W-CDMA และ IS-95 [2]

|   | W-CDMA   | IS-95   |
|---|--|---|
| ความกว้างแถบความถี่                                   | 5 เมกะเฮิร์ตซ์   | 1.25 เมกะเฮิร์ตซ์   |
| อัตราชิป  | 3.84 เมกะชิปต่อวินาที                                      | 1.2288 เมกะชิปต่อวินาที   |
| ความถี่ในการควบคุมกำลัง                               | 1500 เฮิร์ตซ์<br>ทั้งการเชื่อมโยงขาขึ้นและการเชื่อมโยงขาลง | 800 เฮิร์ตซ์<br>ในการเชื่อมโยงขาขึ้น ส่วนการเชื่อมโยงขาลงเป็นการควบคุมกำลังแบบซ้ำ |
| การซิงโครไนซ์ที่สถานีฐาน                              | ไม่ต้องการ   | ปกติได้มาโดยใช้ GPS   |
| การแฮนด์โอเวอร์ระหว่างความถี่                         | ใช่<br>ใช้โหมดแบบช่องในการวัด                              | เป็นไปได้ แต่ไม่กำหนดวิธีการวัด   |
| อัลกอริทึมการบริหารทรัพยากรคลื่นวิทยุที่มีประสิทธิภาพ | ใช่<br>เพื่อให้ได้คุณภาพของบริการที่ต้องการ                | ไม่ต้องการสำหรับการสนทนา<br>ต้องการเพียงในเครือข่าย                               |
| ข้อมูลแบบแพ็กเกต                                      | ส่งข้อมูลแบบแพ็กเกตที่กำหนดไว้                             | ข้อมูลแบบแพ็กเกตจะถูกส่งเป็นการเรียกแบบสวิตช์วงจร                                 |
| ไคเวอร์ซิตีการส่งสัญญาณของการเชื่อมโยงขาลง            | สนับสนุนการปรับปรุงความจุการเชื่อมโยงขาลง                  | ตามมาตรฐาน<br>ไม่สนับสนุน   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของการสื่อสารทางคลื่นวิทยุซึ่งเป็นผลมาจากความต้องการใหม่ๆ ในระบบเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 เช่น มีความต้องการแบนด์วิดท์ที่กว้างขึ้นเป็น 5 เมกะเฮิรตซ์เพื่อสนับสนุนอัตราบิตที่สูงขึ้น มีโคเวอรัจจิตีทางภาคส่งในระบบ W-CDMA โดยเป็นการปรับปรุงความจุในการเชื่อมโยงขาลงเพื่อสนับสนุนความต้องการความจุแบบไม่สมมาตรระหว่างการเชื่อมโยงขาลงและการเชื่อมโยงขาขึ้น ซึ่งโคเวอรัจจิตีทางภาคส่งนี้จะไม่มีความมาตรฐานของเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 มีการผสมของอัตราบิตที่แตกต่างกัน เนื่องจากความต้องการบริการและคุณภาพในระบบเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ต้องการอัลกอริทึมการบริหารทรัพยากรคลื่นวิทยุที่ดีขึ้นเพื่อรับรองคุณภาพของบริการและทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีที่สุด และมีการสนับสนุนความสามารถในข้อมูลแบบแพ็คเกจที่ไม่ใช่เวลาจริง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในบริการใหม่

แม้ว่าระบบ W-CDMA และระบบ IS-95 จะใช้หลักการของ DS-SS แต่ในด้านอื่นๆ นั้นจะแตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างหลักๆ ระหว่างระบบ W-CDMA และระบบ IS-95 คือ ในระบบ W-CDMA มีอัตราชิป 3.84 เมกะชิปต่อวินาที ซึ่งมากกว่าอัตราชิปในระบบ IS-95 ที่มี 1.2288 เมกะชิปต่อวินาที ทำให้ในระบบ W-CDMA มีโคเวอรัจจิตีหลายวิถี (multipath diversity) มากกว่า โดยเฉพาะในเซลล์แบบในเมืองขนาดเล็ก โดยการเพิ่มขึ้นของโคเวอรัจจิตีหลายวิถีจะเป็นการปรับปรุงพื้นที่ให้บริการ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในระบบที่ต้องการ และโดยเฉพาะในอัตราบิตที่มากขึ้น อัตราชิปที่มากขึ้นจะทำให้อัตราขยายการส่งผ่าน (trunking gain) มากขึ้นกว่าในระบบเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 ซึ่งมีแถบความถี่ที่แคบ

ในระบบ W-CDMA มีการควบคุมกำลังวงปิดแบบเร็ว (fast closed-loop power control) ทั้งในการเชื่อมโยงขาขึ้นและการเชื่อมโยงขาลง ขณะที่ระบบ IS-95 จะใช้การควบคุมกำลังแบบเร็วในการเชื่อมโยงขาขึ้นเท่านั้น ในการเชื่อมโยงขาลงนั้นการควบคุมกำลังแบบเร็วจะปรับปรุงสมรรถนะของการเชื่อมโยงและทำให้ความจุของการเชื่อมโยงขาลงมากขึ้น และในระบบ W-CDMA นั้นต้องการฟังก์ชันใหม่ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ เช่น การประมาณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (Signal to Interference Ratio : SIR) และการควบคุมกำลังวงนอก (outer loop power control) ขณะที่ในระบบ IS-95 นั้นจะไม่ต้องการ

เป้าหมายหลักของระบบ IS-95 จะใช้กับระบบเซลล์ขนาดใหญ่ ซึ่งเซลล์ขนาดใหญ่ (macro cell) นั้นจะมีสถานีฐานอยู่ที่เสาวิทยุหรือหลังคาที่รับสัญญาณ GPS (Global Positioning System) ได้ง่าย โดยสถานีฐานของระบบ IS-95 จำเป็นต้องทำการซิงโครไนซ์ และการซิงโครไนซ์นี้ปกติจะได้จากการใช้ GPS ซึ่งความต้องการสัญญาณ GPS นี้เป็นปัญหาอย่างมากในการพัฒนาเซลล์ในอาคารและเซลล์ขนาดเล็ก (micro cell) เพราะการรับสัญญาณ GPS นั้นจะทำได้ยากหากไม่มีการมองเห็นในแนวสายตา (line-of-sight) ต่อดาวเทียมของ GPS ดังนั้นในระบบ W-CDMA จึงถูกออกแบบมาให้ทำงานแบบอะซิงโครไนซ์ที่สถานีฐาน ซึ่งจะไม่ต้องการการซิงโครไนซ์จาก GPS และการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะซิงโครนัสที่สถานีฐานของระบบ W-CDMA นี้จะทำให้การแฮนด์โอเวอร์นั้นแตกต่างจากระบบ IS-95 เล็กน้อย

การแฮนด์โอเวอร์ระหว่างความถี่นั้นมีความสำคัญในระบบ W-CDMA เพราะทำให้มีการใช้คลื่นพาห်มากที่สุดในสถานีฐานหนึ่ง ซึ่งในระบบ IS-95 นั้นการวัดระหว่างความถี่จะไม่มีรูปแบบที่แน่นอนทำให้ยากในการแฮนด์โอเวอร์ระหว่างความถี่

จะเห็นได้ว่าประสบการณ์ต่างๆ จากเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 นั้นมีความสำคัญในการพัฒนาไปเป็นเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 เป็นอย่างมาก แต่ก็มีข้อแตกต่างหลายประการระหว่างเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ทั้งสองยุคดังตัวอย่างที่กล่าวไว้ข้างต้น

### 3.1.3 คุณสมบัติของระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้าง

พารามิเตอร์หลักที่ใช้ในระบบ W-CDMA เป็นไปตามตารางที่ 3.3 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ในระบบ W-CDMA [2]

|  |   |
|--|---|
| วิธีการเข้าถึงหลายทาง                        | DS-SS-SSMA  |
| วิธีการดูเพลกซ์                              | การดูเพลกซ์แบบแบ่งความถี่ / การดูเพลกซ์แบบแบ่งเวลา  |
| การซิงโครไนซ์ที่สถานีฐาน                     | อะซิงโครนัส   |
| อัตราชิป                                     | 3.84 เมกะชิปต่อวินาที   |
| ความยาวเฟรม                                  | 10 มิลลิวินาที  |
| การมัลติเพลกซ์บริการ                         | มีบริการที่หลากหลาย โดยการมัลติเพลกซ์บริการซึ่งต้องการคุณภาพของบริการที่แตกต่างกันในการเชื่อมต่อเดียว |
| หลักการหลายอัตรา                             | ใช้แฟกเตอร์การแผ่ที่เปลี่ยนค่าได้และใช้รหัสหลายรหัส   |
| การดิเทกต์                                   | การร่วมนัย (coherent) โดยใช้สัญลักษณ์นำ (pilot symbols) หรือสัญลักษณ์ร่วม (common pilot)              |
| การดิเทกต์ผู้ใช้หลายราย<br>สายอากาศแบบสมาร์ต | มีมาตรฐานสนับสนุน และมีเครื่องมือเสริมอื่นๆ เป็นทางเลือก  |

### คุณสมบัติของระบบ W-CDMA

- W-CDMA หรือ ระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสโดยวิธีลำดับตรง (DS-SS) ในความถี่แถบกว้าง คือ บิตข้อมูลของผู้ใช้ที่ถูกแผ่บนแบนด์วิดท์ที่กว้าง โดยการคูณข้อมูลของผู้ใช้กับบิตรหัสกึ่งสุ่ม (เรียกว่า ชิป) ซึ่งได้มาจากรหัสการแผ่แบบ CDMA และเพื่อให้สนับสนุนอัตราบิตที่

สูงมากๆ (ถึง 2 เมกะบิตต่อวินาที) จึงใช้แพ็คเกจการแพ็คเกจที่เปลี่ยนค่าได้และใช้การเชื่อมต่อแบบรหัสหลายรหัส โดยตัวอย่างการจัดสรรแบนด์วิดท์แสดงดังรูปที่ 3.1

- ใช้อัตราชิป 3.84 เมกะชิปต่อวินาทีในแบนด์วิดท์ประมาณ 5 เมกะเฮิร์ตซ์ ในขณะที่ระบบ DS-CDMA ที่มีแบนด์วิดท์ประมาณ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ หรือ IS-95 จะเป็นระบบ CDMA แถบแคบ โดยแบนด์วิดท์ที่กว้างของ W-CDMA นี้สามารถสนับสนุนอัตราข้อมูลของผู้ใช้ที่มีค่ามากและทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้นด้วย เช่น การเพิ่มขึ้นของโคเวอรัจจี้หลายวิถี โดยวัตถุประสงค์ของการทำงาน คือ ผู้ควบคุมเครือข่ายสามารถใช้แบนด์วิดท์ที่กว้างเพื่อเพิ่มความจุของระบบ ซึ่งเป็นไปได้ตามรูปแบบลำดับชั้นของเซลล์ โดยจากรูปที่ 3.1 ได้แสดงคุณสมบัตินี้ ซึ่งแบนด์วิดท์ที่ใช้สามารถเลือกใช้ความกว้างระหว่าง 4.4 ถึง 5 เมกะเฮิร์ตซ์โดยประมาณ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสัญญาณแทรกสอดระหว่างคลื่นพาห์

- ระบบ W-CDMA สนับสนุนอัตราข้อมูลของผู้ใช้ที่มีค่ามาก หรือกล่าวในอีกนัยหนึ่งว่าระบบ W-CDMA สนับสนุนแนวคิดของการใช้แบนด์วิดท์ตามความต้องการ (Bandwidth on Demand : BoD) เป็นอย่างดี โดยกำหนดให้ผู้ใช้แต่ละรายมีความกว้างของเฟรมเป็น 10 มิลลิวินาที ขณะที่อัตราข้อมูลของผู้ใช้คงที่ อย่างไรก็ตามความจุข้อมูลของผู้ใช้สามารถเปลี่ยนไปได้เป็นเฟรมต่อเฟรม โดยจากรูปที่ 3.1 ได้แสดงคุณสมบัตินี้ ซึ่งการจัดสรรความจุคลื่นวิทยุแบบเร็วนี้ โดยปกติจะถูกควบคุมโดยเครือข่ายเพื่อให้ได้ความสามารถสูงสุดสำหรับการให้บริการข้อมูลแบบแพ็คเกจ

- ระบบ W-CDMA สนับสนุนรูปแบบการทำงานพื้นฐาน 2 รูปแบบ คือ การดูเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Duplex : FDD) และการดูเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา (Time Division Duplex : TDD) โดยรูปแบบ FDD จะแบ่งความถี่แบนด์วิดท์ 5 เมกะเฮิร์ตซ์ที่ใช้ไปใช้เป็นความถี่ของการเชื่อมโยงขาขึ้นและขาลงตามลำดับ ในขณะที่รูปแบบ TDD จะใช้เวลาในการแยกการเชื่อมโยงขาขึ้นและขาลงที่ใช้ความถี่แบนด์วิดท์ทั้ง 5 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยการเชื่อมโยงขาขึ้นจะเป็นการสื่อสารจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังสถานีฐาน ส่วนการเชื่อมโยงขาลงจะเป็นการสื่อสารจากสถานีฐานไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่

- ระบบ W-CDMA สนับสนุนการทำงานแบบอะซิงโครนัสที่สถานีฐาน ซึ่งต่างจากระบบ IS-95 ที่ทำงานแบบซิงโครนัส โดยระบบ W-CDMA จะไม่ต้องการเวลาอ้างอิง เช่นในระบบ GPS ทำให้ง่ายต่อการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่เป็นแบบภายในอาคารและสถานีฐานขนาดเล็ก

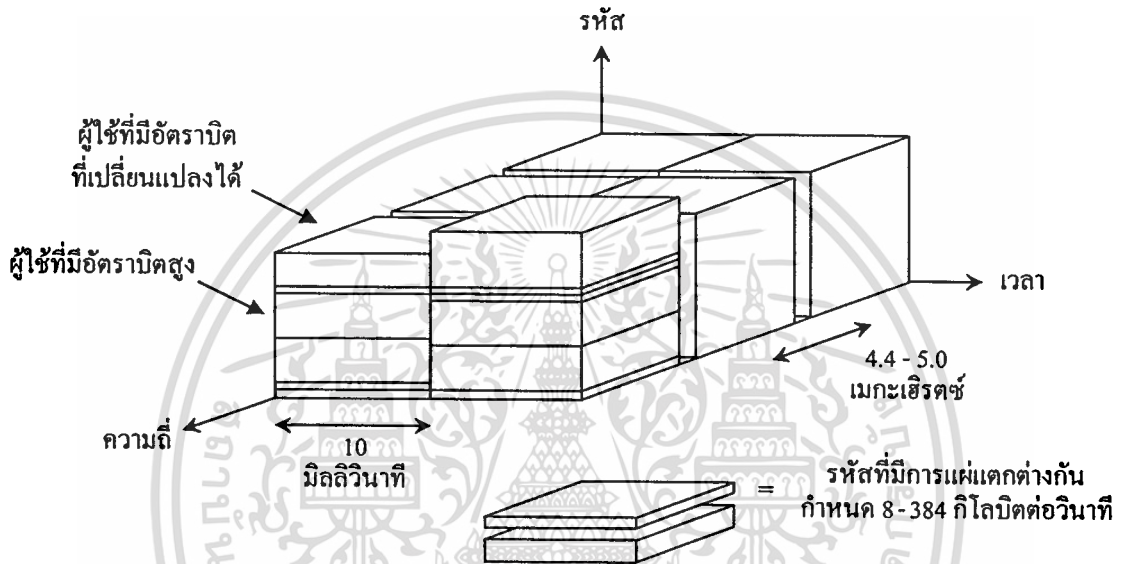
- ระบบ W-CDMA ใช้การตีเทคต์แบบร่วมนัยในการเชื่อมโยงขาขึ้นและขาลง โดยใช้สัญลักษณ์นำ (pilot symbols) หรือสัญญาณนำร่วม (common pilot) ซึ่งได้มีการใช้ในการเชื่อมโยงขาลงของระบบ IS-95 อยู่ก่อนแล้ว แต่การตีเทคต์แบบร่วมนัยในการเชื่อมโยงขาขึ้นนี้เพิ่งเริ่มนำมาใช้ในระบบ CDMA ซึ่งวิธีการนี้ทำให้พื้นที่การให้บริการและความจุในการเชื่อมโยงขาขึ้น โดยรวมนั้นเพิ่มขึ้น

- ระบบ W-CDMA ได้มีการพัฒนาแนวคิดของเครื่องรับ เช่น การตีเทคต์ผู้ใช้หลายราย และใช้สายอากาศแบบสมาร์ต ทำให้พื้นที่การให้บริการและ/หรือความจุเพิ่มขึ้น ซึ่งในระบบของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 ส่วนมากไม่มีการให้ความสำคัญกับแนวคิดของเครื่องรับ ดังนั้นผลที่ได้จึงแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของระบบยังเพิ่มขึ้นอย่างจำกัด

- ระบบ W-CDMA ถูกออกแบบให้สามารถใช้งานเชื่อมต่อกับระบบ GSM ที่ใช้อยู่ได้ ดังนั้นการทำงานจึงรองรับการแฮนด์โอเวอร์ระหว่างระบบ GSM และ W-CDMA เพื่อให้สามารถเปลี่ยนระบบการทำงานจากพื้นที่การให้บริการที่เป็นระบบ GSM ไปสู่ระบบ W-CDMA ได้



รูปที่ 3.1 การจัดสรรแบนด์วิดท์ในระบบ W-CDMA

### 3.2 วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ (Space-Time Spreading : STS)

#### 3.2.1 รูปแบบของไดเวอร์ซิตี

การเพิ่มความจุและอัตราข้อมูลของระบบการสื่อสารเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่ง ปัจจุบันมีการให้ความสนใจในการเพิ่มความจุและอัตราข้อมูลนี้ของระบบการสื่อสารแบบ CDMA ที่ใช้กันอยู่โดยการใช้สายอากาศหลายชุดที่สถานีฐาน [5]-[7] ซึ่งความต้องการในการเพิ่มอัตราข้อมูลขณะที่มีผู้ใช้จำนวนมากในระบบเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งในการเชื่อมโยงขาขึ้นและขาลงของเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ระบบ W-CDMA ฉะนั้นจึงมีการเสนอวิธีการแก้ปัญหาโดยใช้สายอากาศแถวลำดับ (array antenna) เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของการเชื่อมโยงทั้ง 2 แบบของระบบ โดยในการเชื่อมโยงขาขึ้นนั้นวิธีการนี้สามารถใช้ที่สถานีฐานเพื่อเพิ่มอัตราขยายแถวลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยายไควเวอร์ซิตี และลดสัญญาณแทรกสอด ซึ่งทำให้คุณภาพและความจุของการเชื่อมโยงขาขึ้นของระบบดีขึ้น โดยวิธีการนี้สถานีฐานสามารถรองรับอุปกรณ์ ขนาด และความต้องการต่างๆ ของสายอากาศแถวลำดับได้ ดังนั้นเทคนิคไควเวอร์ซิตีภาครับจึงเหมาะที่จะใช้ที่สถานีฐาน แต่การแก้ปัญหาด้วยวิธีนี้ในการเชื่อมโยงขาลงจะยากกว่าเพราะปัญหาทางกายภาพของอุปกรณ์ โดยขนาดที่เล็กของโทรศัพท์เคลื่อนที่จะทำให้การติดตั้งอุปกรณ์ของสายอากาศมีข้อจำกัด ดังนั้นจึงมีการเสนอวิธีแก้ปัญหาโดยใช้เทคนิคในการส่งสัญญาณที่สถานีฐาน

วิธีหนึ่งที่ใช้ในการส่งสัญญาณที่สถานีฐานก็คือ transmit beamforming โดยวิธีการนี้เครื่องส่งจะทำงานแบบวงปิด (closed loop) คือ จะใช้ข้อมูลช่องสัญญาณ (channel information) ซึ่งได้จากเครื่องรับผ่านการเชื่อมโยงขาขึ้นเพื่อกำหนดรูปแบบของลำ (beam) ในการเชื่อมโยงขาลง โดยที่วิธีการ transmit beamforming นี้จะประสบผลสำเร็จได้นั้นจะขึ้นอยู่กับการประมาณคุณภาพของช่องสัญญาณ ช่องสัญญาณป้อนกลับ การแมป (mapping) ระหว่างการเชื่อมโยงทั้ง 2 แบบ และการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณและสัญญาณแทรกสอด แต่ปกติเทคนิคแบบวงปิดนี้จะทำให้ความจุของการเชื่อมโยงขาขึ้นลดลงเพราะมีการส่งข้อมูลช่องสัญญาณพิเศษมาด้วย

วิธีการอื่นในการส่งสัญญาณที่สถานีฐานคือ การทำไควเวอร์ซิตีภาคส่งที่สถานีฐาน ซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อจะทำให้เกิดอัตราขยายไควเวอร์ซิตีต่อโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่นั่นเอง โดยวิธีการนี้ทำงานแบบวงเปิด (open loop) ซึ่งไม่มีการส่งข้อมูลช่องสัญญาณพิเศษ จึงไม่มีผลเสียต่อความจุของการเชื่อมโยงขาขึ้นเหมือนการทำงานแบบวงปิด อีกทั้งการทำงานแบบวงเปิดนี้ยังใช้งานได้ดีในกรณีที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงจนทำให้การประมาณของช่องสัญญาณและการติดตามเป็นไปได้ยาก ด้วยเหตุนี้วิธีการไควเวอร์ซิตีภาคส่งแบบวงเปิดโดยใช้สายอากาศหลายชุดจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ปรับปรุงสมรรถนะของระบบในปัจจุบัน

เทคนิคของไควเวอร์ซิตีภาคส่งแบบวงเปิดโดยใช้สายอากาศหลายชุดสำหรับระบบ CDMA ในการเชื่อมโยงขาลงนั้นมีการนำเสนอหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละเทคนิคก็จะมีความต้องการทรัพยากรที่มากกว่าปกติ เช่น ต้องการแบนด์วิดท์มากขึ้น หรือต้องการรหัสการแผ่ต่อผู้ใช้งานมากขึ้น โดยความต้องการทรัพยากรที่มากขึ้นนี้จะจำกัดประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ ซึ่งจากข้อจำกัดดังกล่าวจึงมีการพัฒนาเทคนิคการส่งสัญญาณแบบวงเปิดโดยใช้สายอากาศหลายชุดในการเชื่อมโยงขาลงขึ้น โดยเทคนิคดังกล่าวจะไม่ใช้ทรัพยากรพิเศษข้างต้น ซึ่งรายละเอียดมีดังนี้

- 1) เป็นการทำงานแบบวงเปิด จึงไม่ต้องการข้อมูลช่องสัญญาณ
- 2) ใช้เพียง 1 รหัสการแผ่ต่อผู้ใช้ 1 ราย (ไม่มีส่วนต้นของรหัสการแผ่)
- 3) ใช้กำลังส่งรวมเท่ากับกำลังส่งที่ใช้ในการส่งโดยสายอากาศ 1 ชุด

โดยคุณสมบัติเหล่านี้สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ ซึ่งได้รับการยืนยัน โดยปัจจุบันวิธีการนี้ถูกบรรจุอยู่ในมาตรฐาน IS-2000 โดยระบบพื้นฐานจะใช้สายอากาศส่ง 2 ชุดและสายอากาศรับ 1 ชุด แล้วเรียกเทคนิคดังกล่าวนี้ว่าวิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ (Space-Time Spreading : STS) [5]-[7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์

การส่งสัญญาณโดยใช้การแผ่แบบสเปซ-ไทม์ [6] และ [7] เมื่อสัญญาณข้อมูลของผู้ใช้ที่  $k$  เป็น  $\{b_k(i)\}$  โดยสัญลักษณ์ที่  $i$  ในผู้ใช้แต่ละราย หรือ  $b_k(i)$  จะถูกแผ่โดยรหัสการแผ่  $P \times 1$  รหัสใน  $\mathbf{c}_k$  ของผู้ใช้แต่ละราย โดยสมมติให้รหัสการแผ่เป็นแบบตั้งฉากและ  $\mathbf{c}_k^\dagger \mathbf{c}_l = \delta_{kl}$  เมื่อ  $\dagger$  คือ การทรานส์โพสของสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate transpose) และ  $\delta_{kl}$  คือ Kronecker Delta-function ส่วนความยาว  $P$  ของ  $\mathbf{c}_k$  คือ อัตราขยายการแผ่ (spreading gain) และสมาชิกแต่ละตัวของ  $\mathbf{c}_k$  จะถูกส่งที่อัตราชีพ

เมื่อใช้สายอากาศส่ง 1 ชุดที่สถานีฐาน สัญญาณที่รับได้โดยผู้ใช้รายที่  $k$  คือ

$$\mathbf{r}_k = h_k \sum_n b_n(i) \mathbf{c}_n + \mathbf{n}_k \quad \text{เมื่อ } k = 1, 2, \dots \quad (3.1)$$

โดย  $h_k$  คือ สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณเชิงซ้อน (complex channel coefficient) ระหว่างสายอากาศส่งกับผู้ใช้ที่  $k$

$\mathbf{n}_k$  คือ เวกเตอร์ขนาด  $P \times 1$  ของสัญญาณรบกวนเกาส์เชิงซ้อนแบบวอกที่มีค่ากลางเป็นศูนย์ที่เครื่องรับ

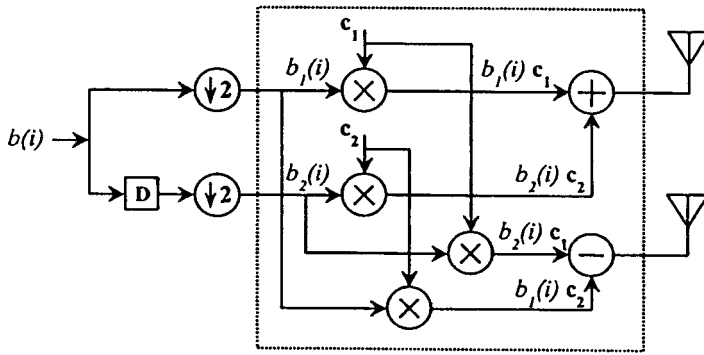
หลังจากการคิสมปรดที่เครื่องรับสัญญาณที่ได้จะเป็นดังสมการ

$$d_k = \mathbf{c}_k^\dagger \mathbf{r}_k = h_k b_k + v_k \quad \text{เมื่อ } k = 1, 2, \dots \quad (3.2)$$

โดย  $v_k = \mathbf{c}_k^\dagger \mathbf{n}_k$

### 3.2.3 วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์โดยใช้สายอากาศส่ง 2 ชุดและสายอากาศรับ 1 ชุด

การส่งสัญญาณโดยใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ [6] และ [7] เมื่อใช้สายอากาศส่งจำนวน 2 ชุดและสายอากาศรับจำนวน 1 ชุดนี้เป็นระบบพื้นฐานที่อยู่ในมาตรฐาน IS-2000 โดยวิธีการดังกล่าวจะไม่ใช้ทรัพยากรพิเศษใดๆ เช่น รหัสหรือกำลังส่งที่สิ้นเปลืองกว่าปกติ ซึ่งวิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์จะแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 บล็อกโคแอดโมเดชันของการแผ่แบบสเปซ-ไทม์โดยใช้สายอากาศส่ง 2 ชุด

จากรูปที่ 3.2 แบ่งสัญญาณข้อมูลของผู้ใช้ออกเป็น 2 ทาง โดยเป็นข้อมูล  $b_1(i)$  และ  $b_2(i)$  ซึ่งสามารถแสดงสัญญาณที่ถูกส่งออกจากสายอากาศส่งที่ 1 ดังนี้

$$s_1(i) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)(b_1(i)c_1 + b_2(i)c_2) \quad (3.3)$$

สัญญาณที่ถูกส่งออกจากสายอากาศส่งที่ 2 แสดงได้ดังนี้

$$s_2(i) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)(b_2(i)c_1 - b_1(i)c_2) \quad (3.4)$$

สัญญาณที่ถูกส่งออกจากสายอากาศส่งทั้งสองถูกนอร์มอลไลซ์กำลังเฉลี่ยในการส่งรวมด้วย  $\sqrt{2}$  และเมื่อ  $c_1$  และ  $c_2$  เป็นเซตใดๆ ของลำดับการแผ่ตั้งฉากโดย  $c_1^T c_2 = 0$

สมมติการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่มีการแพร่กระจายวิถีเดียว โดยช่องสัญญาณจากสายอากาศส่งที่  $m$  ไปยังสายอากาศรับ 1 ชุดแสดงอยู่ในรูปของสเกลาร์เชิงซ้อน  $h_m$  ดังนั้นสัญญาณที่รับได้คือ

$$\mathbf{r}(i) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)(h_1(b_1(i)c_1 + b_2(i)c_2) + h_2(b_2(i)c_1 - b_1(i)c_2)) + \mathbf{n}(i) \quad (3.5)$$

โดย  $\mathbf{n}^T(i) = [n_1(i) \ n_2(i)]$  เป็นเวกเตอร์ของสัญญาณรบกวนแบบบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากรับสัญญาณเครื่องรับจะคืสเปรคสัญญาณที่รับได้ด้วย  $c_1$  และ  $c_2$  ฉะนั้นจะได้สมการ

$$d_1(i) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)(h_1 b_1(i) + h_2 b_2(i)) + c_1^\dagger n \quad (3.6)$$

และ

$$d_2(i) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)(-h_2 b_1(i) + h_1 b_2(i)) + c_2^\dagger n \quad (3.7)$$

กำหนดให้  $\mathbf{d} = [d_1, d_2]^T$  จะได้

$$\mathbf{d}(i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{H} \mathbf{b}(i) + \mathbf{v}(i) \quad (3.8)$$

เมื่อ  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ -h_2 & h_1 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{b}(i) = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{v}(i) = \begin{bmatrix} c_1^\dagger n \\ c_2^\dagger n \end{bmatrix}$

คูณ  $\mathbf{d}(i)$  ด้วย  $\mathbf{H}^\dagger$  จะได้สมการ

$$\mathbf{H}^\dagger \mathbf{d}(i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} |h_1|^2 + |h_2|^2 & h_1^* h_2 - h_2^* h_1 \\ h_2^* h_1 - h_1^* h_2 & |h_1|^2 + |h_2|^2 \end{bmatrix} \mathbf{b}(i) + \mathbf{H}^\dagger \mathbf{v}(i) \quad (3.9)$$

ได้ส่วนจริงซึ่งเป็นผลจากการผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์ คือ

$$\begin{aligned} \text{Re}\{\mathbf{H}^\dagger \mathbf{d}(i)\} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} |h_1|^2 + |h_2|^2 & 0 \\ 0 & |h_1|^2 + |h_2|^2 \end{bmatrix} \mathbf{b}(i) + \text{Re}\{\mathbf{H}^\dagger \mathbf{v}(i)\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} (|h_1|^2 + |h_2|^2) b_1(i) \\ (|h_1|^2 + |h_2|^2) b_2(i) \end{bmatrix} + \text{Re}\{\mathbf{H}^\dagger \mathbf{v}(i)\} \end{aligned} \quad (3.10)$$

ให้  $\mathbf{h}_q$  คือ หลักที่  $q$  ของ  $\mathbf{H}$  ดังนั้นจึงได้สมการของสัญญาณเป็น

$$\text{Re}\{\mathbf{h}_q^\dagger \mathbf{d}(i)\} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) [|h_1|^2 + |h_2|^2] b_q(i) + \text{Re}\{\mathbf{h}_q^\dagger \mathbf{v}(i)\} \quad (3.11)$$

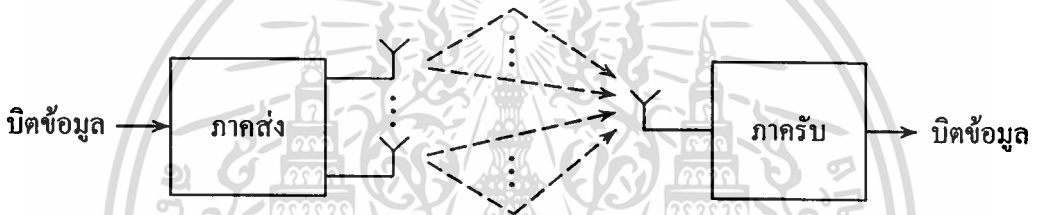
จากนั้นจึงนำพื้นฐานดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในระบบที่มีเงื่อนไขและปัจจัยอื่นๆ ต่อไป  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ

### 4.1 แบบจำลองระบบ

แบบจำลองระบบ W-CDMA ที่ใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ (Space-Time Spreading : STS) ประกอบด้วยสายอากาศส่งจำนวน  $U$  ชุดและสายอากาศรับ 1 ชุด มีจำนวนผู้ใช้ทั้งหมดเป็น  $K$  ซึ่งสัญญาณที่ส่งผ่านช่องสัญญาณของผู้ใช้แต่ละรายในแต่ละสายอากาศมีจำนวนวิธีเป็น  $L_p$  วิธี โดยทำการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณเฟดดิ้งนาคามี



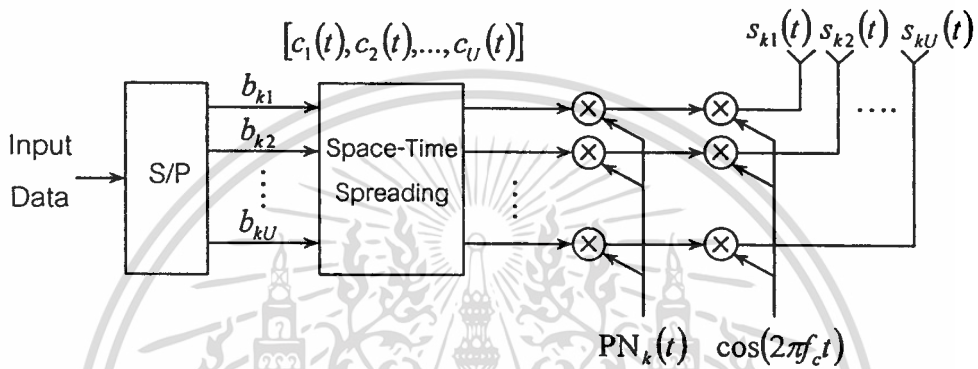
รูปที่ 4.1 แบบจำลองระบบ

#### 4.1.1 ภาคส่ง

ภาคส่งของระบบจากรูปที่ 4.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งในระบบ W-CDMA ที่ใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ [10] ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศส่งจำนวน  $U$  ชุด โดยเริ่มแรกข้อมูลอินพุตแบบไบนารีที่มีความกว้างบิต (bit duration) เป็น  $T_b$  เข้าสู่เครื่องส่ง โดยผ่านเครื่องแปลงสัญญาณจากสัญญาณแบบอนุกรมไปเป็นสัญญาณแบบขนาน (serial-to-parallel (S/P) converter) สัญญาณที่ได้จะมีจำนวน  $U$  สัญญาณย่อยแบบขนาน ซึ่งจะมีความกว้างบิตของแต่ละสัญญาณย่อยหรือเรียกว่า ความกว้างสัญลักษณ์ (symbol duration) เป็น  $T_s$  โดย  $T_s = UT_b$  หลังจากนั้นสัญญาณย่อยแบบขนานทั้ง  $U$  ชุดจะถูกแผ่แบบลำดับตรง (DS) โดยวิธี STS [6] ซึ่งจะใช้ลำดับการแผ่ตั้งฉาก (orthogonal spreading sequence) จำนวน  $U$  ชุดในการแผ่สัญญาณ ยกตัวอย่างเช่น รหัสวอล์ช (Walsh code) ซึ่งมีคาบเป็น  $UG_p$  เมื่อ  $G_p = T_b / T_c$  แสดงจำนวนชิปต่อบิต โดย  $T_c$  คือ ความกว้างชิปของลำดับการแผ่ตั้งฉาก

หลังจากผ่านกระบวนการ STS สัญญาณแบบขนานจำนวน  $U$  จะถูกเข้ารหัสด้วยลำดับ PN (Pseudo-Noise sequence) จำนวน  $k$  ผู้ใช้หรือ  $PN_k(t)$  เพื่อจะทำให้สัญญาณที่จะทำการส่งเป็นสัญญาณสุ่มและเพื่อให้แน่ใจว่าลำดับการแผ่ตั้งฉากที่ถูกใช้ไปในกระบวนการ STS สามารถนำมาใช้ใหม่โดยผู้ใช้อื่นได้

สุดท้ายหลังจากกระบวนการเข้ารหัสด้วยลำดับ PN แล้ว สัญญาณแบบขนานจำนวน  $U$  นี้จะถูกมอดูเลตด้วยคลื่นพาห์ แล้วจึงถูกส่งไปตามสายอากาศจำนวน  $U$  ชุด



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งในระบบ W-CDMA ที่ใช้การแผ่แบบสเปซ-ไทม์

ตามหลักการใน [5]-[7] และจากรูปที่ 4.2 สัญญาณที่ถูกส่งจากผู้ใช้ที่  $k$  จะเป็นไปตามสมการ

$$s_k(t) = \sqrt{\frac{2P}{U^2}} \mathbf{c}(t) \mathbf{B}_U(t) \times PN_k(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (4.1)$$

เมื่อ  $s_k(t)$  คือ เวกเตอร์ของสัญญาณที่ถูกส่งจากผู้ใช้ที่  $k$

$$\text{โดย } s_k(t) = [s_{k1}(t) \ s_{k2}(t) \ \dots \ s_{kU}(t)]$$

เมื่อ  $s$  คือ สัญญาณที่ถูกส่งจากผู้ใช้ที่  $k$  สายอากาศส่งที่  $u$

$P$  คือ กำลังส่งของผู้ใช้แต่ละราย

$f_c$  คือ ความถี่คลื่นพาห์

$PN_k(t)$  คือ รหัสของการแผ่ด้วยวิธีลำดับตรง (DS)

$$\text{โดย } PN_k(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} p_{kj} P_{T_c}(t - jT_c)$$

เมื่อ  $p_{kj}$  คือ ค่า +1 หรือ -1 ซึ่งมีค่าความน่าจะเป็นเท่ากัน

$P_{T_c}(t)$  คือ พัลส์สี่เหลี่ยมซึ่งมีความกว้าง  $[0, T_c)$

$\mathbf{c}(t)$  คือ เวกเตอร์ของสัญญาณตั้งฉาก

$$\text{โดย } \mathbf{c}(t) = [c_1(t) \ c_2(t) \ \dots \ c_U(t)]$$

เมื่อ  $c$  คือ สัญญาณตั้งฉากของสายอากาศส่งที่  $u$

$$\text{และ } c_i(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} c_{ij} P_{T_c}(t - jT_c) \quad \text{เมื่อ } i=1, 2, \dots, U$$

โดย  $c_{ij}$  คือ ลำดับตั้งฉากที่มีคาบเป็น  $UG_p$  สำหรับแต่ละ  $i$

$\mathbf{B}_U(t)$  คือ เมทริกซ์ของข้อมูลที่ถูกลง

เมทริกซ์ของข้อมูลที่ถูกลง หรือ  $\mathbf{B}_U(t)$  นั้นจะมีมิติเป็น  $U \times U$  ซึ่งได้มาจากวิธีการที่ทำให้บิดข้อมูลอินพุตจำนวน  $U$  เปลี่ยนเป็นสัญญาณย่อยแบบขนานจำนวน  $U$  ตามวิธีการออกแบบใน [6] โดยจะใช้โคเวอริจันซ์ที่ส่งมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ขณะที่ใช้รูปแบบการตีเทคต์สัญญาณที่มีความซับซ้อนน้อย ซึ่ง  $\mathbf{B}_U(t)$  แสดงได้ดังสมการ

$$\mathbf{B}_U(t) = \begin{pmatrix} a_{11}b_{k,11} & a_{12}b_{k,12} & \dots & a_{1U}b_{k,1U} \\ a_{21}b_{k,21} & a_{22}b_{k,22} & \dots & a_{2U}b_{k,2U} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{U1}b_{k,U1} & a_{U2}b_{k,U2} & \dots & a_{UU}b_{k,UU} \end{pmatrix} (t) \quad (4.2)$$

เมื่อ  $a_{ij}$  คือ เครื่องหมายของแต่ละตำแหน่งในแถวที่  $i$  หลักที่  $j$

$b_{k,ij}$  คือ บิดข้อมูล ซึ่งได้จากหนึ่งในบิดข้อมูลอินพุตทั้งหมดจำนวน  $U$

จาก  $\{b_{k,1}, b_{k,2}, \dots, b_{k,U}\}$  ของผู้ใช้ที่  $k$  โดยแต่ละบิดข้อมูลอินพุตจะใช้เพียงครั้งเดียวในแถวและหลักที่กำหนด

#### 4.1.2 แบบจำลองช่องสัญญาณ

สัญญาณแบบขนานจำนวน  $U$  หรือ  $\mathbf{s}_k(t) = [s_{k1}(t) \ s_{k2}(t) \ \dots \ s_{kU}(t)]$  ซึ่งถูกลงออกไปโดยสายอากาศจำนวน  $U$  ชุด ผ่านช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเลือกความถี่ (frequency-selective fading channel) โดยแต่ละสัญญาณแบบขนานจะได้รับเฟดดิ้งนาคากามิ-เอ็มแบบเลือกความถี่ (frequency-selective Nakagami- $m$  fading) [11] และ [12] ซึ่งผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของวงจรความถี่ต่ำเชิงซ้อน (complex low-pass equivalent impulse response) สำหรับสัญญาณแบบขนานที่  $u$  ของผู้ใช้ที่  $k$  แสดงได้ดังสมการ

$$h_k^{(u)}(t) = \sum_{l=1}^{L_p} \beta_{kl}^{(u)} \exp(j\phi_{kl}^{(u)}) \delta(t - \tau_{kl}^{(u)}) \quad (4.3)$$

- เมื่อ  $\beta_{kl}^{(u)}$  คือ แฟกเตอร์การลดทอนสัญญาณ  
 $\phi_{kl}^{(u)}$  คือ เฟส ซึ่งมีการกระจายแบบยูนิฟอร์ม (uniform) ในช่วง  $[0, 2\pi)$   
 $\tau_{kl}^{(u)}$  คือ ดีเลย์ ซึ่งมีการกระจายแบบยูนิฟอร์ม (uniform) ในช่วง  $[0, T_s)$   
 $L_p$  คือ จำนวนวิถี  
 $\delta(t)$  คือ Kronecker Delta-function

จำนวนวิถี  $L_p$  ในสมการที่ (4.3) มีสมการเป็น

$$L_p = \left\lceil \frac{T_m}{T_c} \right\rceil + 1 \quad (4.4)$$

- เมื่อ  $[x]$  คือ ค่ามากที่สุดที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ  $x$   
 $T_m$  คือ การดีเลย์ที่มากที่สุดของช่องสัญญาณ  
 $T_c$  คือ ความกว้างชิปของลำดับการแผ่ตั้งฉาก

การลดทอนสัญญาณ  $\beta_{kl}^{(u)}$  ในสมการที่ (4.3) เป็นตัวแปรสุ่มอิสระแบบนาคากามิ ซึ่งมีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function : PDF) เป็น

$$p(\beta_{kl}^{(u)}) = M(\beta_{kl}^{(u)}, m_{kl}^{(u)}, \Omega_{kl}^{(u)})$$

$$M(R, m, \Omega) = \frac{2m^m R^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} e^{-(m/\Omega)R^2} \quad (4.5)$$

- เมื่อ  $\Gamma(\cdot)$  คือ ฟังก์ชันแกมมา  
 $m_{kl}^{(u)}$  คือ พารามิเตอร์เฟดดิ้งแบบนาคากามิ-เอ็ม ของวิถีที่  $l$  ในผู้ใช้ที่  $k$  ของสาขาอากาศส่งที่  $u$   
 $\Omega_{kl}^{(u)}$  คือ โมเมนต์อันดับสองของ  $\beta_{kl}^{(u)}$  หรือ  $\Omega_{kl}^{(u)} = E[(\beta_{kl}^{(u)})^2]$   
 สมมติให้โครงร่างความแรงของกำลังเฉลี่ยหลายวิถี (Multipath Intensity Profile : MIP) ลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลเชิงลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $\Omega_{k,l}^{(u)} = \Omega_{k,l}^{(u)} e^{-\eta(l-1)}$  ,  $\eta \geq 0$

เมื่อ  $\Omega_{k,l}^{(u)}$  คือ ความแรงของสัญญาณเฉลี่ยที่วิถีแรกในผู้ใช้ที่  $k$   
ของสายอากาศส่งที่  $u$

$\eta$  คือ อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย

พารามิเตอร์เฟดดิ้งแบบนาคากามิ-เอ็ม  $m_{k,l}^{(u)}$  ในสมการที่ (4.5) เขียนเป็นสมการได้

$$m = \frac{E^2[(\beta_{k,l}^{(u)})^2]}{\text{Var}[(\beta_{k,l}^{(u)})^2]} \quad (4.6)$$

เมื่อ  $m$  เป็นการแจกแจงของแอมพลิจูดซึ่งแสดงถึงความรุนแรงของการเฟดดิ้งในวิถีที่  $l$

โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $m$  จะได้การแจกแจงในรูปแบบต่างๆ ดังนี้

$m = 0.5$  คือ เฟดดิ้งแบบเกาส์ข้างเดียว (one-sided Gaussian fading)

$m = 1$  คือ เฟดดิ้งแบบเรย์ลี (Rayleigh fading)

$m \rightarrow \infty$  คือ ไม่มีการเฟดดิ้ง

แต่เมื่อ  $m > 1$  จะสอดคล้องกับการแจกแจงแบบไรเซียน (Ricean) และลอการิทึม (lognormal)

โดยความสัมพันธ์ของไรซ์แฟกเตอร์ (Rice factor :  $\kappa$ ) กับพารามิเตอร์  $m$  แสดงได้ดังสมการ

$$m = \frac{1}{1 - \left(\frac{\kappa}{1 + \kappa}\right)^2} \quad (4.7)$$

เมื่อ  $\kappa$  คือ อัตราส่วนของกำลังของสัญญาณจากวิถีตรงเฉลี่ย

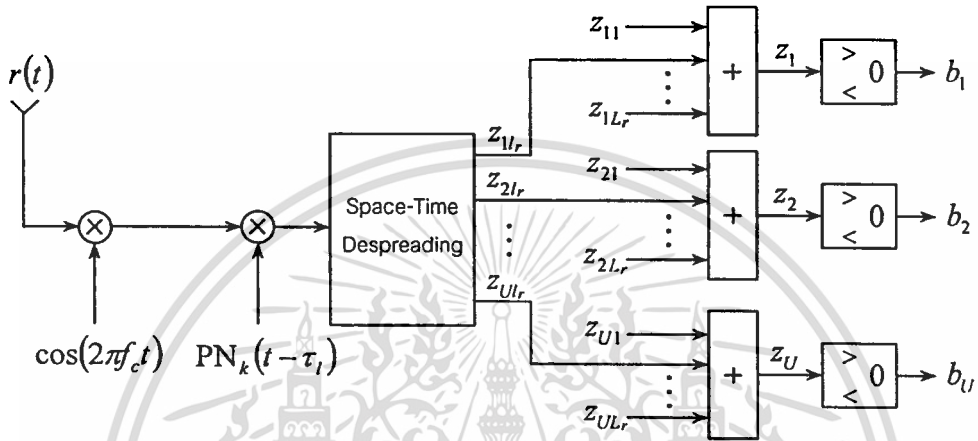
ต่อกำลังของสัญญาณจากวิถีกระจายเฉลี่ย

#### 4.1.3 ภาครับ

ที่ภาครับของระบบจากรูปที่ 4.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับในระบบ W-CDMA ที่ใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ [10] ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศรับจำนวน 1 ชุด กระบวนการที่ใช้เป็นวิธีการตรงข้ามกับภาคส่งและมีวิธีการรวมไดเวอร์ซิตีหลายวิถีเพิ่มเข้ามาด้วย โดยขั้นแรกสัญญาณที่รับมานั้นจะถูกคิมอดูเลตโดยใช้ความถี่คลื่นพาห์  $f_c$  และถูกถอดรหัสแบบ DS โดยใช้ลำดับรหัส  $PN_k(t - \tau_l)$  ที่ผู้ใช้ที่  $k$  และวิถีที่  $l$  เมื่อสมมติให้เครื่องรับสามารถทำการประมาณการดีเลย์หลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีแบบเกือบสมบูรณ์ (near-perfect multipath-delay estimation) ได้สำหรับผู้ใช้ที่พิจารณา แล้ว สัญญาณที่ได้จึงผ่านบล็อกของการดีสเปรดแบบสเปซ-ไทม์ (space-time despreading) หลังจากนั้น จึงนำสัญญาณของสายอากาศแต่ละชุดที่ได้มารวมกันทุกวิธี ซึ่งที่ภาครับนี้จะเป็นสัญญาณที่รับได้ โดยแต่ละสาขาของคอร์รีเลเตอร์ ( $L_r$ ) แล้วจึงนำไปผ่านขั้นตอนการตัดสินใจเพื่อให้ได้บิตข้อมูลเดิม กลับคืนมา



รูปที่ 4.3 บล็อกโคแอดเออเรมของเครื่องรับในระบบ W-CDMA ที่ใช้การแผ่แบบสเปซ-ไทม์

เมื่อสัญญาณของผู้ใช้จำนวน  $K$  ถูกส่งจากภาคส่งโดยสมมติให้มีการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์ และส่งผ่านช่องสัญญาณเฟดดิ้งนาคามี สัญญาณจากวงจรกรองความถี่ต่ำเชิงซ้อนที่รับได้ ณ เครื่องรับ คือ

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_p} \sqrt{\frac{2P}{U^2}} \mathbf{c}(t - \tau_{kl}) \mathbf{B}_U(t - \tau_{kl}) \mathbf{h}_{kl} \times PN_k(t - \tau_{kl}) + N(t) \quad (4.8)$$

- เมื่อ  $N(t)$  คือ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก (Additive White Gaussian Noise : AWGN) จากวงจรกรองความถี่ต่ำเชิงซ้อน  
โดย  $N(t)$  มีความหนาแน่นสเปกตรัม 2 ด้านเป็น  $N_0$   
 $\mathbf{h}_{kl}$  คือ เมตริกซ์ของผลตอบสนองอิมพัลส์เชิงซ้อนของช่องสัญญาณ  
ในผู้ใช้ที่  $k$  และวิถีที่  $l$

ซึ่งเมตริกซ์ของผลตอบสนองอิมพัลส์เชิงซ้อนของช่องสัญญาณนั้นสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\mathbf{h}_{kl} = \begin{pmatrix} \beta_{kl}^{(1)} \exp(j\psi_{kl}^{(1)}) \\ \beta_{kl}^{(2)} \exp(j\psi_{kl}^{(2)}) \\ \vdots \\ \beta_{kl}^{(U)} \exp(j\psi_{kl}^{(U)}) \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \text{เมื่อ} & k = 1, 2, \dots, K \\ & l = 1, 2, \dots, L_p \end{matrix} \quad (4.9)$$

โดย  $\psi_{kl}^{(u)} = \phi_{kl}^{(u)} - 2\pi f_c \tau_{kl}$

จากรูปที่ 4.3 หลังจากทีสัญญาณได้ผ่านบล็อกของการดีสเปรดแบบสเปซ-ไทม์แล้ว สัญญาณที่ได้ออกมาจะอยู่ในรูปของ  $z_u$  เมื่อได้รับสัญญาณของสายอากาศส่งที่  $u$  คอร์รีเลเตอร์สาขาที่  $l$  จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้จากทุกสาขาของคอร์รีเลเตอร์มารวมกัน ซึ่งจะได้สัญญาณของสายอากาศแต่ละชุดดังสมการ

$$z_u = \sum_{l=1}^{L_p} z_{ul} \quad \text{เมื่อ } u = 1, 2, \dots, U \quad (4.10)$$

แล้วจึงนำ  $z_u$  ทั้งหมดหรือ  $\{z_u\}_{u=1}^U$  ไปผ่านการตัดสินใจตามกฎการตัดสินใจของการคีมอดูเลตเพื่อให้ได้บิตข้อมูล  $\{b_1, b_2, \dots, b_U\}$  กลับคืนมา

## 4.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ

### 4.2.1 การดีเทกต์สัญญาณ

วิเคราะห์การดีเทกต์สัญญาณในระบบ W-CDMA ที่ใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ [5]-[7] โดยกำหนดเวกเตอร์ตัวแปรเอาต์พุตของคอร์รีเลเตอร์สาขาที่  $l$ , หรือ  $\mathbf{d}_l = [d_{1l} \quad d_{2l} \quad \dots \quad d_{U,l}]^T$  เมื่อ  $l = 1, 2, \dots, L_p$  โดย  $L_p$  คือ สาขาของคอร์รีเลเตอร์ และ  $T$  คือ การทรานส์โพสเวกเตอร์ (vector transpose) โดย

$$d_{ul} = \int_{\tau_l}^{U\tau_b + \tau_l} r(t) c_u(t - \tau_l) PN(t - \tau_l) dt \quad (4.11)$$

เมื่อแทนสมการที่ (4.8) ในสมการที่ (4.11) จะได้ตัวแปรเอาต์พุตของคอร์รีเลเตอร์ที่สาขาที่  $l_r$  ของสายอากาศที่  $u$  ดังสมการ

$$d_{u,l_r} = \sqrt{2P} T_b \left[ a_{u1} b_{u1} \beta_1^{(1)} \exp(j\psi_1^{(1)}) + a_{u2} b_{u2} \beta_1^{(2)} \exp(j\psi_1^{(2)}) + \dots + a_{uU} b_{uU} \beta_1^{(U)} \exp(j\psi_1^{(U)}) \right] + I_u(l_r) \quad (4.12)$$

เมื่อ  $u = 1, 2, \dots, U$  และ  $I_u(l_r)$  คือ สัญญาณแทรกสอด ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$I_u(l_r) = I_{S_u}(l_r) + I_{M_u}(l_r) + N_u(l_r) \quad \text{เมื่อ } u = 1, 2, \dots, U \quad (4.13)$$

โดย  $I_{S_u}(l_r)$  คือ สัญญาณแทรกสอดจากวิถีอื่นของสัญญาณที่พิจารณาที่สาขาที่  $l_r$  ซึ่งมีสมการดังนี้

$$I_{S_u}(l_r) = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq l_r}}^{L_p} \sqrt{\frac{2P}{U^2}} \int_{\tau_{l_r}}^{UT_b + \tau_{l_r}} \mathbf{c}(t - \tau_l) \mathbf{B}_U(t - \tau_l) \mathbf{h}_l \times PN(t - \tau_l) c_u(t - \tau_l) PN(t - \tau_l) dt \quad (4.14)$$

ส่วน  $I_{M_u}(l_r)$  คือ สัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อื่น อันเนื่องมาจากการส่งสัญญาณในเวลาเดียวกันกับสัญญาณที่พิจารณา ซึ่งมีสมการดังนี้

$$I_{M_u}(l_r) = \sum_{k=2}^K \sum_{l=1}^{L_p} \sqrt{\frac{2P}{U^2}} \int_{\tau_{l_r}}^{UT_b + \tau_{l_r}} \mathbf{c}(t - \tau_{kl}) \mathbf{B}_U(t - \tau_{kl}) \mathbf{h}_{kl} \times PN_k(t - \tau_{kl}) c_u(t - \tau_{l_r}) PN(t - \tau_{l_r}) dt \quad (4.15)$$

และ  $N_u(l_r)$  คือ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก หรือ AWGN ซึ่งมีสมการดังนี้

$$N_u(l_r) = \int_{\tau_{l_r}}^{UT_b + \tau_{l_r}} N(t) c_u(t - \tau_{l_r}) PN(t - \tau_{l_r}) dt \quad (4.16)$$

เมื่อให้  $\mathbf{I}(l_r) = [I_1(l_r) \ I_2(l_r) \ \dots \ I_U(l_r)]^T$  เวกเตอร์ตัวแปรเอาต์พุตของคอร์รีเลเตอร์ หรือ  $\mathbf{d}_{l_r}$  [6] และ [7] จะแสดงได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{d}_{l_r} = \sqrt{2P} T_b \mathbf{B}_U \mathbf{h}_l + \mathbf{I}(l_r) \quad \text{เมื่อ } l_r = 1, 2, \dots, L_r \quad (4.17)$$

โดย  $\mathbf{B}_U$  คือ เมตริกซ์ของข้อมูลที่ถูกส่ง ซึ่งมีมิติเป็น  $U \times U$  ตามสมการที่ (4.2) แต่จะไม่ขึ้นกับเวลา

$\mathbf{h}_l$  คือ ผลตอบสนองอิมพัลส์เชิงซ้อนของช่องสัญญาณ ซึ่งอยู่ระหว่าง สถานีฐานและผู้ใช้ที่พิจารณา ตามสมการที่ (4.9)

เนื่องจากคุณสมบัติของวิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ตาม [6] ที่ว่า  $\mathbf{B}\mathbf{h} = \mathbf{H}\mathbf{b}$  ฉะนั้นจากสมการที่ (4.17) จะได้สมการ

$$\mathbf{d}_{l_r} = \sqrt{2P} T_b \mathbf{H}_U \mathbf{b} + \mathbf{I}(l_r) \quad \text{เมื่อ } l_r = 1, 2, \dots, L_r \quad (4.18)$$

โดย  $\mathbf{b}$  คือ บิตข้อมูลที่ถูกส่ง ซึ่งมีจำนวนเป็น  $U$

$$\text{โดย } \mathbf{b} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_U]^T$$

$\mathbf{H}_U$  คือ เมตริกซ์ซึ่งมีสมาชิกมาจาก  $\mathbf{h}_l$  โดยมีมิติเป็น  $U \times U$  ซึ่งสมาชิกแต่ละตัวของ  $\mathbf{h}_l$  จะใช้เพียงครั้งเดียวในแถวและหลักที่กำหนด

ซึ่งเมตริกซ์  $\mathbf{H}_U$  สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\mathbf{H}_U(l) = \begin{pmatrix} \alpha_{11}(l) & \alpha_{12}(l) & \dots & \alpha_{1U}(l) \\ \alpha_{21}(l) & \alpha_{22}(l) & \dots & \alpha_{2U}(l) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{U1}(l) & \alpha_{U2}(l) & \dots & \alpha_{UU}(l) \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

เมื่อ  $\alpha_{ij}(l_r)$  คือ  $q_{ij} \beta_i^{(m)} \exp(j\psi_i^{(m)})$

เมื่อ  $q_{ij}$  คือ เครื่องหมายของสมาชิกแถวที่  $i$  หลักที่  $j$  ของเมตริกซ์  $\mathbf{H}_U$

$$\text{โดย } q_{ij} \in \{+1, -1\}$$

และ  $\beta_i^{(m)} \exp(j\psi_i^{(m)})$  เป็นสมาชิกที่  $m$  ของ  $\mathbf{h}_l$

จากการวิเคราะห์ใน [6] นั้นแสดงให้เห็นว่าเมตริกซ์  $\mathbf{H}_U(l)$  จะมีคุณสมบัติอย่างหนึ่ง คือ  $\text{Re}\{\mathbf{H}_U^\dagger(l)\mathbf{H}_U(l)\} = \mathbf{h}_l^\dagger \mathbf{h}_l \cdot \mathbf{I}_{\text{unity}}$  เมื่อ  $\dagger$  คือ การทรานส์โพสของสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate transpose) และ  $\mathbf{I}_{\text{unity}}$  คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์ (unity matrix) ซึ่งมีมิติเป็น  $U \times U$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้  $\mathbf{h}_u(l)$  คือ หลักที่  $u$  ของ  $\mathbf{H}_u(l)$  ฉะนั้นตัวแปร  $z_{u,l}$  ในสมการที่ (4.10) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} z_{u,l} &= \text{Re} \{ \mathbf{h}_u^\dagger(l) \mathbf{d}_l \} \\ &= \sqrt{2PT_b} b_u \sum_{u=1}^U |h_l^{(u)}|^2 + \text{Re} \{ \mathbf{h}_u^\dagger(l) \mathbf{I}(l_r) \} \quad \text{เมื่อ } u = 1, 2, \dots, U \end{aligned} \quad (4.20)$$

สุดท้ายจากสมการที่ (4.10) จะได้สัญญาณของสายอากาศแต่ละชุดก่อนนำไปผ่านการตัดสินใจ ตามกฎการตัดสินใจของการติมอดูเลต เพื่อให้ได้บิตข้อมูล  $\{b_1, b_2, \dots, b_U\}$  ของผู้ใช้ที่พิจารณา กลับคืนมา ซึ่งจะเป็นไปตามสมการ

$$z_u = \sqrt{2PT_b} b_u \sum_{l_r=1}^{L_r} \sum_{u=1}^U |h_l^{(u)}|^2 + \sum_{l_r=1}^{L_r} \text{Re} \{ \mathbf{h}_u^\dagger(l) \mathbf{I}(l_r) \} \quad (4.21)$$

#### 4.2.2 อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio : SNR) แสดงดังสมการ [5]

$$SNR = \frac{P_S^2}{\sigma_{tot}^2} \quad (4.22)$$

เมื่อ  $P_S^2$  คือ กำลังของสัญญาณ  
 $\sigma_{tot}^2$  คือ กำลังของสัญญาณแทรกสอดรวม

ทำการหากำลังของสัญญาณแทรกสอดรวม โดยการหาค่าความแปรปรวนของ  $I_{tot}$  [11] และ [12]

$$\sigma_{tot}^2 = \text{Var}(I_{tot}) = E[I_{tot}^2] - E^2[I_{tot}] \quad (4.23)$$

เมื่อพิจารณาให้มีการแจกแจงแบบเกาส์ ฉะนั้นค่า  $E^2[I_{tot}] = 0$  จึงได้

$$\sigma_{tot}^2 = E[I_{tot}^2] \quad (4.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$$\sigma_{tot}^2 = \sum_{l_r=1}^{L_r} (\sigma_S^2 + \sigma_M^2 + \sigma_N^2) \quad (4.25)$$

- เมื่อ  $\sigma_S^2$  คือ กำลังของสัญญาณแทรกสอดจากวิธีอื่นของตัวเอง  
 $\sigma_M^2$  คือ กำลังของสัญญาณแทรกสอดจากจากผู้ใช้อื่น  
 $\sigma_N^2$  คือ กำลังของสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก หรือ AWGN

เพื่อหา  $\sigma_{tot}^2$  กำหนดให้  $\Omega_{kl}^{(u)}$  คือ โมเมนต์อันดับสองของ  $\beta_{kl}^{(u)}$  หรือ  $\Omega_{kl}^{(u)} = E[(\beta_{kl}^{(u)})^2]$  และ  $E_b = PT_b$  หรือพลังงานของสัญญาณต่อบิต โดย  $G_p$  คือ อัตราขยายการประมวลผล (processing gain)

หา  $\sigma_S^2$  จากสมการที่ (4.14) และ (4.24) ได้

$$\begin{aligned} \sigma_S^2 &= E \left[ \left( \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq l_r}}^{L_p} \sqrt{\frac{2P}{U^2}} \int_{\tau_{l_r}}^{U\tau_b + \tau_{l_r}} \mathbf{c}(t - \tau_l) \mathbf{B}_U(t - \tau_l) \mathbf{h}_l \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times PN(t - \tau_l) c_u(t - \tau_{l_r}) PN(t - \tau_{l_r}) dt \right)^2 \right] \\ &= \frac{UE_b T_b}{4G_p} (\beta_{kl_r}^{(u)})^2 \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq l_r}}^{L_p} \Omega_{1l}^{(u)} \end{aligned} \quad (4.26)$$

หา  $\sigma_M^2$  จากสมการที่ (4.15) และ (4.24) ได้

$$\begin{aligned} \sigma_M^2 &= E \left[ \left( \sum_{k=2}^K \sum_{l=1}^{L_p} \sqrt{\frac{2P}{U^2}} \int_{\tau_{l_r}}^{U\tau_b + \tau_{l_r}} \mathbf{c}(t - \tau_{kl}) \mathbf{B}_U(t - \tau_{kl}) \mathbf{h}_{kl} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times PN_k(t - \tau_{kl}) c_u(t - \tau_{l_r}) PN(t - \tau_{l_r}) dt \right)^2 \right] \\ &= \frac{UE_b T_b}{6G_p} (\beta_{kl_r}^{(u)})^2 \sum_{k=2}^K \sum_{l=1}^{L_p} \Omega_{kl}^{(u)} \end{aligned} \quad (4.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หา  $\sigma_N^2$  จากสมการที่ (4.16) และ (4.24) ได้

$$\begin{aligned}\sigma_N^2 &= E \left[ \left( \int_{\tau_r}^{UT_b + \tau_r} N(t) c_u(t - \tau_r) PN(t - \tau_r) dt \right)^2 \right] \\ &= \frac{UT_b N_0}{4} (\beta_{kl}^{(u)})^2\end{aligned}\quad (4.28)$$

ฉะนั้นได้  $\sigma_{tot}^2$  โดยแทนสมการที่ (4.26) (4.27) และ (4.28) ในสมการที่ (4.25)

$$\sigma_{tot}^2 = (UE_b T_b) \sum_{l_r=1}^{L_r} \left( \frac{1}{4G_p} (\beta_{kl}^{(u)})^2 \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq l_r}}^{L_p} \Omega_{l}^{(u)} + \frac{1}{6G_p} (\beta_{kl}^{(u)})^2 \sum_{k=2}^K \sum_{l=1}^{L_p} \Omega_{kl}^{(u)} + \frac{N_0}{4E_b} (\beta_{kl}^{(u)})^2 \right) \quad (4.29)$$

สมมติให้โครงร่างความแรงของกำลังเฉลี่ยหลายวิถี (Multipath Intensity Profile : MIP) ลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลเชิงลบโดย [12] และ [13]

$$\Omega_{kl}^{(u)} = \Omega_1 e^{-\eta(l-1)} \quad \text{เมื่อ } \eta \geq 0 \quad (4.30)$$

โดย  $\Omega_1$  คือ ความแรงของสัญญาณเฉลี่ยที่วิถีแรก  
 $\eta$  คือ อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย

และจากสมการที่ (4.29) เมื่อให้  $\Omega_{l'}^{(u)} = \frac{q(L_p, \eta) \Omega_1}{L_p}$  [13] ฉะนั้นได้  $\sigma_{tot}^2$  ดังสมการ

$$\sigma_{tot}^2 = (UE_b T_b \Omega_1) \sum_{l_r=1}^{L_r} (\beta_{kl}^{(u)})^2 \left[ \frac{q(L_p, \eta)}{4G_p} \cdot \left( \frac{L_p - 1}{L_p} \right) + \frac{(K-1) \cdot q(L_p, \eta)}{6G_p} + \frac{N_0}{4\Omega_1 E_b} \right] \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned}\text{เมื่อ } q(L_p, \eta) &= \sum_{l=1}^{L_p} e^{-\eta(l-1)} \\ &= \frac{(1 - e^{-\eta L_p})}{(1 - e^{-\eta})} \quad \text{เมื่อ } \eta \neq 0\end{aligned}$$

$$\text{และ } q(L_p, \eta) = L_p \quad \text{เมื่อ } \eta = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนกำลังของสัญญาณหาได้จาก  $P_s$  ที่รับได้ [12] คือ

$$P_s = \sqrt{\frac{E_b T_b}{2}} \sum_{l_r=1}^{L_r} (\beta_{kl_r}^{(u)})^2 \quad (4.32)$$

ฉะนั้นอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio : SNR) ที่รับได้คือ

$$\begin{aligned} SNR &= \frac{P_s^2}{\sigma_{tot}^2} \\ &= \frac{\left( \sqrt{\frac{E_b T_b}{2}} \sum_{l_r=1}^{L_r} (\beta_{kl_r}^{(u)})^2 \right)^2}{(UE_b T_b \Omega_1) \sum_{l_r=1}^{L_r} (\beta_{kl_r}^{(u)})^2 \left[ \frac{q(L_p, \eta)}{4G_p} \cdot \left( \frac{L_p - 1}{L_p} \right) + \frac{(K-1) \cdot q(L_p, \eta)}{6G_p} + \frac{N_0}{4\Omega_1 E_b} \right]} \end{aligned} \quad (4.33)$$

กำหนดให้จำนวนสาขาของคอร์ริเลเตอร์ที่ภาครับเท่ากับจำนวนวิถีทั้งหมดของสัญญาณที่ถูกส่งมาจากสายอากาศส่งแต่ละชุด โดย  $L = L_p = L_r$  แล้วจัดสมการให้อยู่ในรูป  $SNR = \sigma_0 S$  จะได้

$$S = \frac{1}{\Omega_1} \sum_{l=1}^L (\beta_{kl}^{(u)})^2 \quad (4.34)$$

และ

$$\sigma_0 = \frac{1}{U} \left[ \frac{q(L, \eta)}{2G_p} \cdot \left( \frac{L-1}{L} \right) + \frac{(K-1) \cdot q(L, \eta)}{3G_p} + \left( \frac{2\Omega_1 E_b}{N_0} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (4.35)$$

#### 4.2.3 ความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดของบิต

ความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดของบิต (Bit Error Probability : BEP) เมื่อสัญญาณผ่านช่องสัญญาณหลายช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ [13] และ [14]

$$P_b(E) = \underbrace{\int_0^\infty \int_0^\infty \cdots \int_0^\infty}_{L\text{-fold}} P_b(K, \{S_l\}_{l=1}^L) p_{S_1, S_2, \dots, S_L}(S_1, S_2, \dots, S_L) ds_1 ds_2 \cdots ds_L \quad (4.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเงื่อนไขของความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดของบิตแสดงได้ดังสมการ

$$P_b(K, \{S_i\}_{i=1}^L) = Q\left(\sqrt{\bar{\gamma} \sum_{i=1}^L S_i}\right) \quad (4.37)$$

เมื่อ  $Q(\cdot)$  คือ Q-function

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt \quad (4.38)$$

ซึ่งเพื่อให้สามารถหา Q-function ได้ง่าย จึงแปลงสมการตามขั้นตอนดังนี้ [14]

$$J(a) \triangleq \int_x^\infty e^{-a^2 x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2a} \quad \text{เมื่อ } a > 0 \quad (4.39)$$

พิจารณาอินทิเกรตสองชั้น

$$\int_0^\infty \int_x^\infty e^{-\frac{u^2+v^2}{2}} du dv \quad \text{เมื่อ } x \geq 0 \quad (4.40)$$

ทำการแยกพจน์จะได้

$$\underbrace{\int_0^\infty e^{-u^2/2} du}_{J(\sqrt{2})} \underbrace{\int_x^\infty e^{-v^2/2} dv}_{\sqrt{2\pi} Q(x)} = \pi Q(x) \quad (4.41)$$

การแปลงเป็นระบบพิกัดเชิงขั้วโดย  $u = r \cos \theta$ ,  $v = r \sin \theta$  และ  $du dv = r dr d\theta$  เมื่อนำไปใช้ในสมการที่ (4.40) จะได้

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \int_x^\infty e^{-\frac{u^2+v^2}{2}} du dv &= \int_0^{\pi/2} \int_{x/\sin \theta}^\infty e^{-r^2/2} r dr d\theta \\ &= \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sin^2 \theta}\right) d\theta \end{aligned} \quad (4.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.41) และ (4.42) จะได้ว่า

$$Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sin^2\theta}\right) d\theta \quad \text{เมื่อ } x \geq 0 \quad (4.43)$$

จากสมการที่ (4.37)  $\bar{\gamma}$  คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio : SNR) ที่รับได้เฉลี่ย สามารถแสดงได้ตามสมการที่ (4.35) เป็น

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{U} \left[ \frac{q(L, \eta)}{2G_p} \cdot \left(\frac{L-1}{L}\right) + \frac{(K-1) \cdot q(L, \eta)}{3G_p} + \left(\frac{2\Omega_1 E_b}{N_0}\right)^{-1} \right]^{-1} \quad (4.44)$$

ขณะที่  $S_l$  คือ การลดทอนสัญญาณหลายวิถีที่มีการกระจายแบบนาคากามิกกำลังสองและถูกนอร์มอลไลซ์ สามารถแสดงได้เป็น

$$S_l = \frac{\beta_l^2}{\Omega_l} \quad \text{เมื่อ } l = 1, 2, \dots, L \quad (4.45)$$

โดย  $S_l$  มี PDF เป็น [13]

$$p_{S_l}(S_l) = \frac{S_l^{m-1}}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\lambda_l}\right)^m e^{-(m/\lambda_l)S_l} \quad \text{เมื่อ } S_l \geq 0 \quad (4.46)$$

เมื่อ  $\lambda_l = \Omega_l/\Omega_1 = e^{-\eta(l-1)}$

$\Gamma(\cdot)$  คือ ฟังก์ชันแกมมา

$$\text{โดย } \Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt \quad \text{เมื่อ } x > 0$$

และเมื่อสมมติให้ตัวแปรสุ่ม  $\{S_l\}_{l=1}^L$  ไม่ขึ้นกับค่าทางสถิติ ฉะนั้นจะได้ [14]

$$p_{S_1, S_2, \dots, S_L}(S_1, S_2, \dots, S_L) = \prod_{l=1}^L p_{S_l}(S_l) \quad (4.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจากสมการที่ (4.36) จะได้สมการ BEP เป็น

$$\begin{aligned}
 P_b(E) &= \underbrace{\int_0^\infty \int_0^\infty \cdots \int_0^\infty}_{L\text{-fold}} \mathcal{Q} \left( \sqrt{\bar{\gamma} \sum_{l=1}^L S_l} \right) \cdot \prod_{l=1}^L p_{S_l}(S_l) ds_1 ds_2 \dots ds_L \\
 &= \underbrace{\int_0^\infty \int_0^\infty \cdots \int_0^\infty}_{L\text{-fold}} \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp \left( -\frac{\bar{\gamma} \sum_{l=1}^L S_l}{2 \sin^2 \theta} \right) d\theta \cdot \prod_{l=1}^L p_{S_l}(S_l) ds_1 ds_2 \dots ds_L \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \prod_{l=1}^L I_l(\bar{\gamma}_l, \theta) d\theta
 \end{aligned} \tag{4.48}$$

เมื่อ [13]

$$I_l(\bar{\gamma}_l, \theta) = \int_0^\infty \exp \left( -\frac{\bar{\gamma} S_l}{2 \sin^2 \theta} \right) p_{S_l}(S_l) dS_l \tag{4.49}$$

แทนสมการที่ (4.46) ใน (4.49) จะได้

$$I_l(\bar{\gamma}_l, \theta) = \left( \frac{2m \sin^2 \theta}{\bar{\gamma}_l + 2m \sin^2 \theta} \right)^m \tag{4.50}$$

เมื่อ  $\bar{\gamma}_l = \bar{\gamma} \lambda_l = \bar{\gamma} e^{-\eta(l-1)}$   
 ฉะนั้นจากสมการที่ (4.44) จะได้

$$\bar{\gamma}_l = \frac{1}{U} \left[ \frac{q(L, \eta)}{2G_p} \cdot \left( \frac{L-1}{L} \right) + \frac{(K-1) \cdot q(L, \eta)}{3G_p} + \left( \frac{2\Omega_1 E_b}{N_0} \right)^{-1} \right]^{-1} \cdot e^{-\eta(l-1)} \tag{4.51}$$

แทนสมการที่ (4.50) ในสมการที่ (4.48) จะได้

$$P_b(E) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \prod_{l=1}^L \left( \frac{2m \sin^2 \theta}{\bar{\gamma}_l + 2m \sin^2 \theta} \right)^m d\theta \tag{4.52}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้นสามารถหาความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดของบิตเมื่อใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ โดยการอินทิเกรตตามวิธีการในสมการที่ (4.36) จึงได้สมการ

$$P_b(E)_{STS} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \prod_{l=1}^L \prod_{u=1}^U \left( \frac{2m_l^{(u)} \sin^2 \theta}{\bar{\gamma}_l^{(u)} + 2m_l^{(u)} \sin^2 \theta} \right)^{m_l^{(u)}} d\theta \quad (4.53)$$

แทนสมการที่ (4.51) และตัวแปรต่างๆ ลงในสมการที่ (4.53) เพื่อนำไปวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อระบบมีเงื่อนไขต่างๆ โดยใช้วิธีทางกราฟในการพิจารณา

#### 4.2.4 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบที่ไม่ใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์

เมื่อทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบที่ไม่ใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ โดยใช้หลักการดังที่กล่าวในหัวข้อข้างต้น จึงได้สมการต่างๆ ดังนี้

จากสมการที่ (4.33) อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio : SNR) ที่รับได้คือ

$$\begin{aligned} SNR &= \frac{P_S^2}{\sigma_{tot}^2} \\ &= \frac{\left( \sqrt{\frac{E_b T_b}{2}} \sum_{l_r=1}^{L_r} (\beta_{k l_r}^{(u)})^2 \right)^2}{(E_b T_b \Omega_1) \sum_{l_r=1}^{L_r} (\beta_{k l_r}^{(u)})^2 \left[ \frac{q(L_p, \eta)}{4G_p} \cdot \left( \frac{L_p - 1}{L_p} \right) + \frac{(K-1) \cdot q(L_p, \eta)}{6G_p} + \frac{N_0}{4\Omega_1 E_b} \right]} \end{aligned} \quad (4.54)$$

กำหนดให้จำนวนสาขาของคอร์รีเลเตอร์ที่ภาครับเท่ากับจำนวนวิถีทั้งหมดของสัญญาณที่ถูกส่งมาจากสายอากาศส่งแต่ละชุด โดย  $L = L_p = L_r$  แล้วจัดสมการให้อยู่ในรูป  $SNR = \sigma_0 S$  จะได้

$$S = \frac{1}{\Omega_1} \sum_{l=1}^L (\beta_{k l}^{(u)})^2 \quad (4.55)$$

และ

$$\sigma_0 = \left[ \frac{q(L, \eta)}{2G_p} \cdot \left( \frac{L-1}{L} \right) + \frac{(K-1) \cdot q(L, \eta)}{3G_p} + \left( \frac{2\Omega_1 E_b}{N_0} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (4.56)$$

จากสมการที่ (4.52) ความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดของบิตแสดงได้ดังสมการ

$$P_b(E) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \prod_{l=1}^L \left( \frac{2m \sin^2 \theta}{\bar{\gamma}_l + 2m \sin^2 \theta} \right)^m d\theta \quad (4.57)$$

โดย  $\bar{\gamma}_l$  แสดงได้ดังสมการ

$$\bar{\gamma}_l = \left[ \frac{q(L,\eta)}{2G_p} \cdot \left( \frac{L-1}{L} \right) + \frac{(K-1) \cdot q(L,\eta)}{3G_p} + \left( \frac{2\Omega_l E_b}{N_0} \right)^{-1} \right]^{-1} \cdot e^{-\eta(l-1)} \quad (4.58)$$

แทนสมการที่ (4.58) และตัวแปรต่างๆ ลงในสมการที่ (4.57) เพื่อนำไปวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อระบบมีเงื่อนไขต่างๆ โดยใช้วิธีทางกราฟในการพิจารณา



## บทที่ 5

### ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ

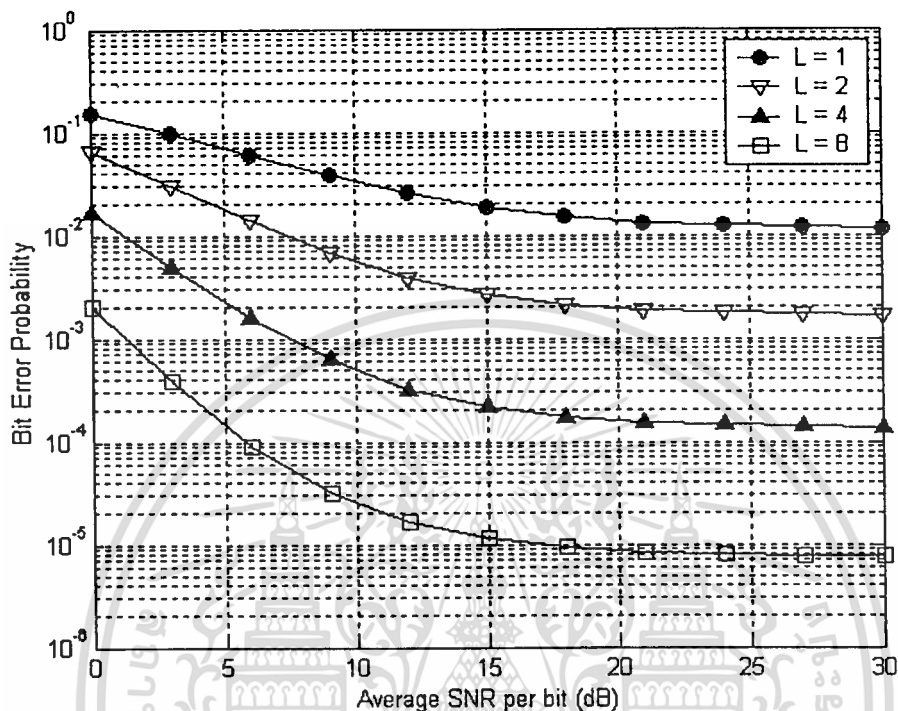
จากการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ ผลที่ได้นำมาแสดงในรูปของกราฟ ซึ่งเป็นการพิจารณาความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดของบิต (Bit Error Probability : BEP) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวแปรต่างๆ ของระบบ โดยที่ปัจจัยต่างๆ เปลี่ยนไปตามเงื่อนไขของระบบที่กำหนด

ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลง คือ ค่า Average SNR per bit หรือ  $E_b/N_0$  จำนวนผู้ใช้ ( $K$ ) จำนวนวิถี ( $L$ ) จำนวนสายอากาศส่ง ( $U$ ) อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย ( $\eta$ ) และพารามิเตอร์เฟดดิ้งนาคากามิ ( $m$ )

โดยผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบจะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit ( $E_b/N_0$ ) กับ Bit Error Probability ในกรณีที่ระบบไม่ใช้และใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ และในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability ในกรณีที่ระบบไม่ใช้และใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์

## 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit ( $E_b/N_0$ ) กับ Bit Error Probability

### 5.1.1 กรณีที่ระบบไม่ใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์

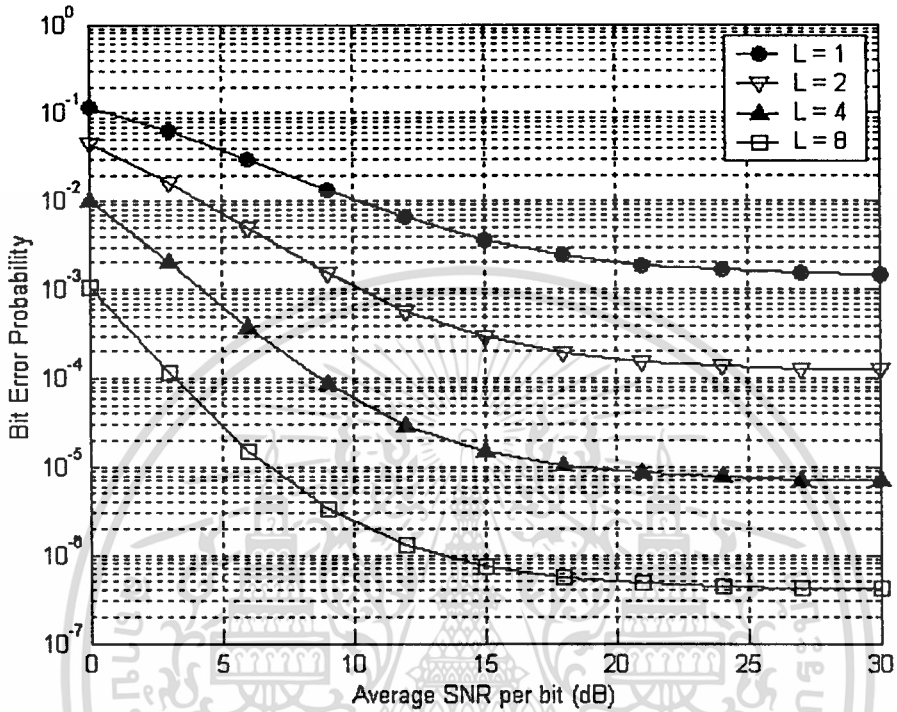


รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability

โดยมีสายอากาศส่ง  $U = 1$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0$  และมีผู้รับ 10 ราย

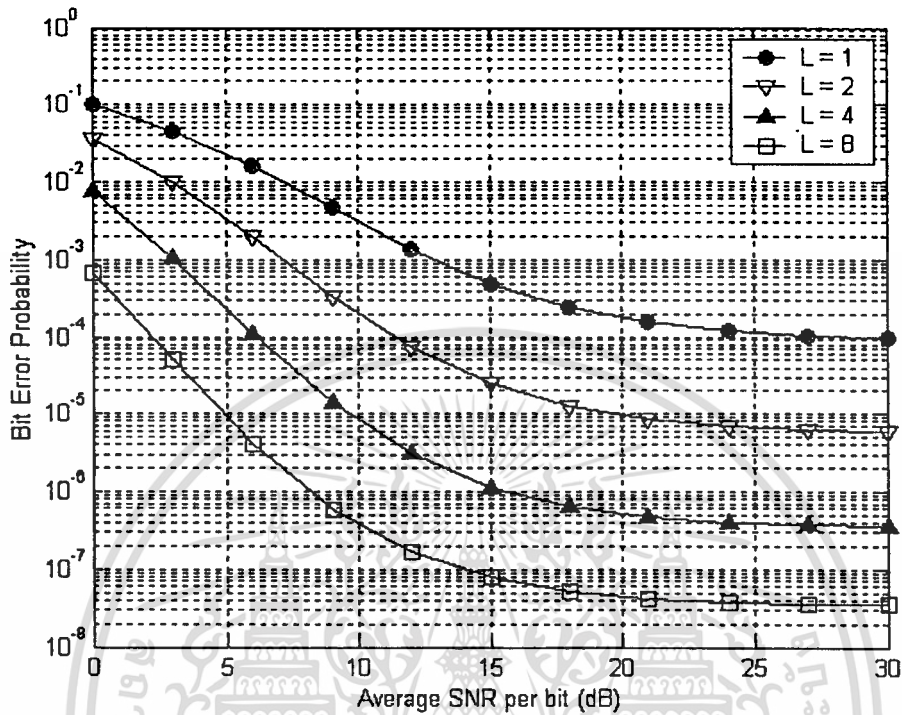
จากรูปที่ 5.1 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อ Average SNR per bit หรือ  $E_b/N_0$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า BEP ลดลง และเมื่อจำนวนวิถีที่รับได้เพิ่มขึ้นค่า BEP ก็จะลดลง ซึ่งก็หมายถึงสมรรถนะของระบบดีขึ้นนั่นเอง

### 5.1.2 กรณีที่ระบบใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์

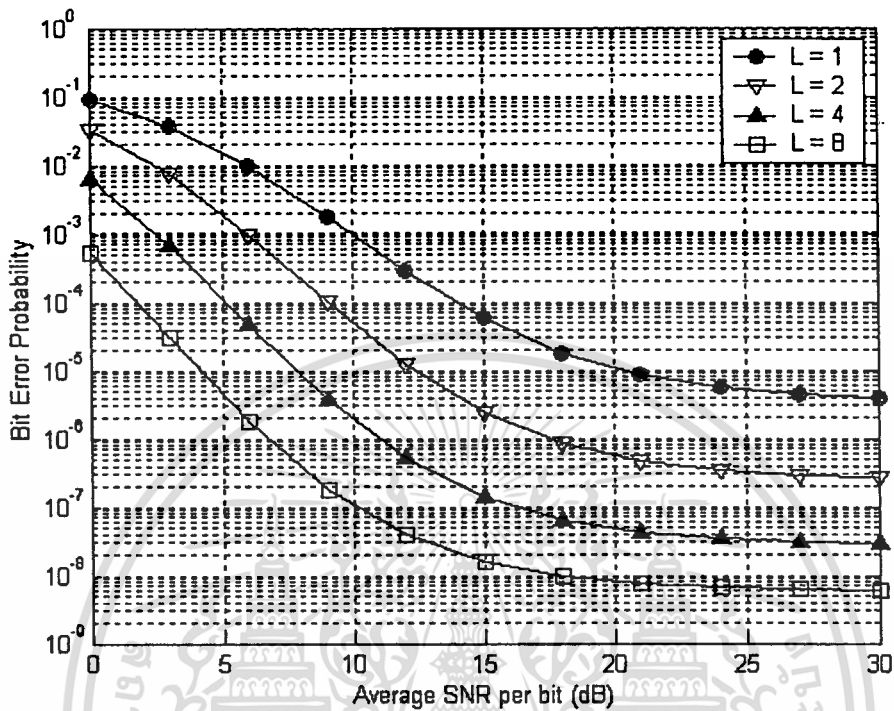


รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability

โดยมีสายอากาศส่ง  $U = 2$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0$  และมีผู้ใช้ 10 ราย



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability โดยมีสายอากาศส่ง  $U = 4$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0$  และมีผู้ใช้ 10 ราย

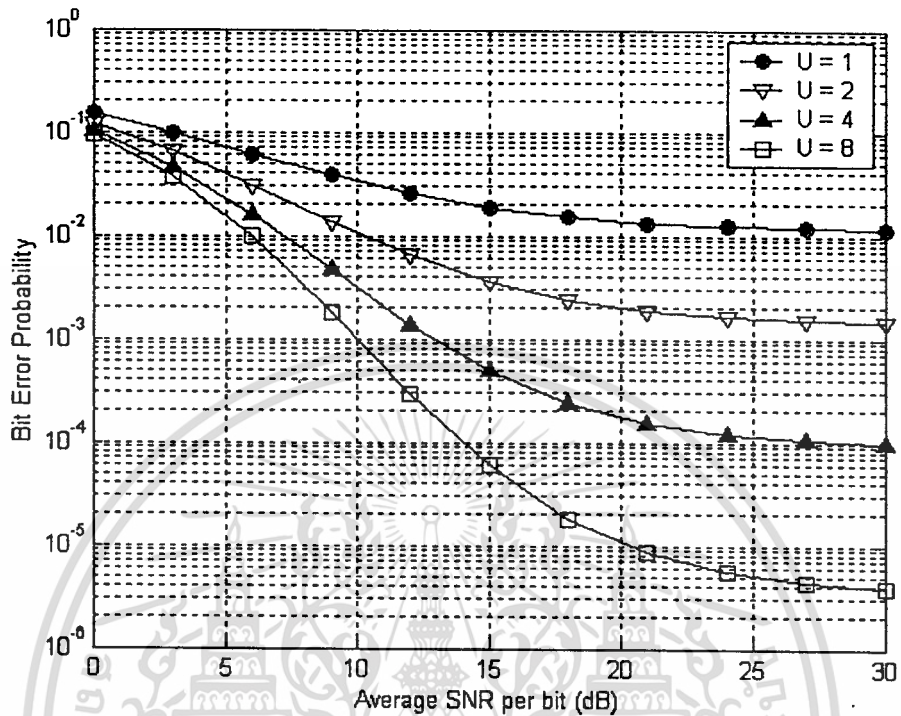


รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability

โดยมีสายอากาศส่ง  $U = 8$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0$  และมีผู้ใช้ 10 ราย

จากรูปที่ 5.2 – 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability เมื่อระบบใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์โดยมีสายอากาศส่ง  $U = 2, 4$  และ 8 ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละรูปกำหนดให้จำนวนวิถีที่รับได้เพิ่มขึ้น

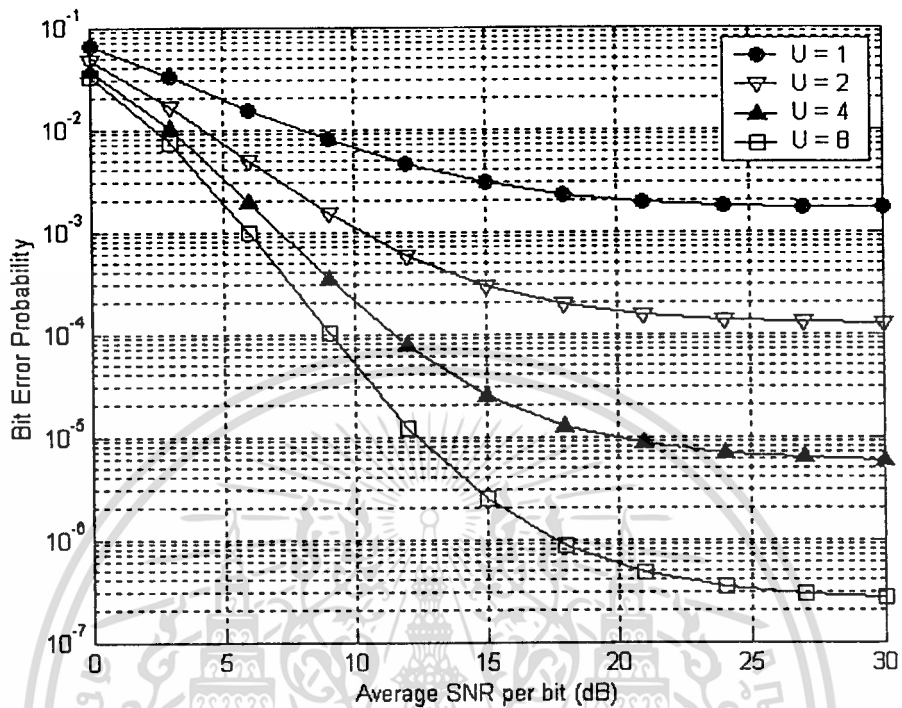
ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อ Average SNR per bit หรือ  $E_b/N_0$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า BEP ลดลง และเมื่อจำนวนวิถีที่รับได้เพิ่มขึ้นค่า BEP ก็จะลดลง ซึ่งหมายถึงสมรรถนะของระบบดีขึ้น และเมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศส่งให้แก่ระบบสมรรถนะของระบบจะดีขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability โดยมีจำนวนวิถี  $L = 1$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0$  และมีผู้ใช้ 10 ราย

จากรูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability โดยนำผลการวิเคราะห์สมรรถนะเมื่อสายอากาศส่งมีจำนวน  $U = 1, 2, 4$  และ 8 มาแสดงในรูปเดียวกัน โดยจำนวนวิถีที่รับได้เป็น 1 วิถี

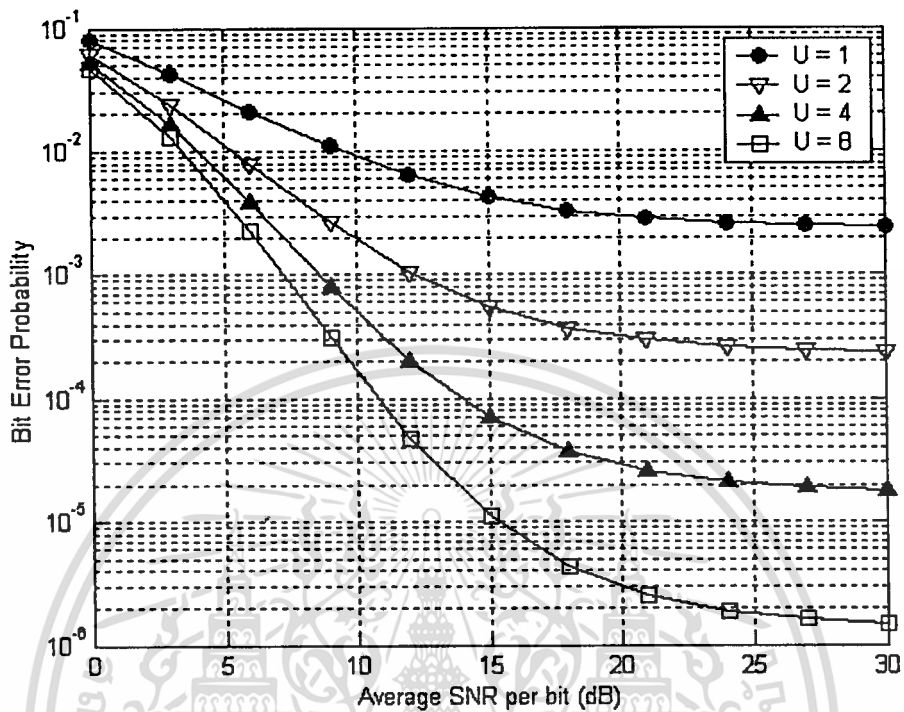
ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อ Average SNR per bit หรือ  $E_b/N_0$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า BEP ลดลง และเมื่อจำนวนสายอากาศส่งเพิ่มขึ้นค่า BEP ก็จะลดลง ซึ่งหมายถึงสมรรถนะของระบบดีขึ้น โดยเมื่อพิจารณาสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นของระบบจะเห็นว่าสมรรถนะของระบบที่เพิ่มขึ้นนี้มีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อ Average SNR per bit หรือ  $E_b/N_0$  เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability โดยมีอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0$  และมีผู้ใช้ 10 ราย

จากรูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability โดยแสดงผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อสายอากาศส่งมีจำนวน  $U = 1, 2, 4$  และ 8 โดยอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ยเป็น 0

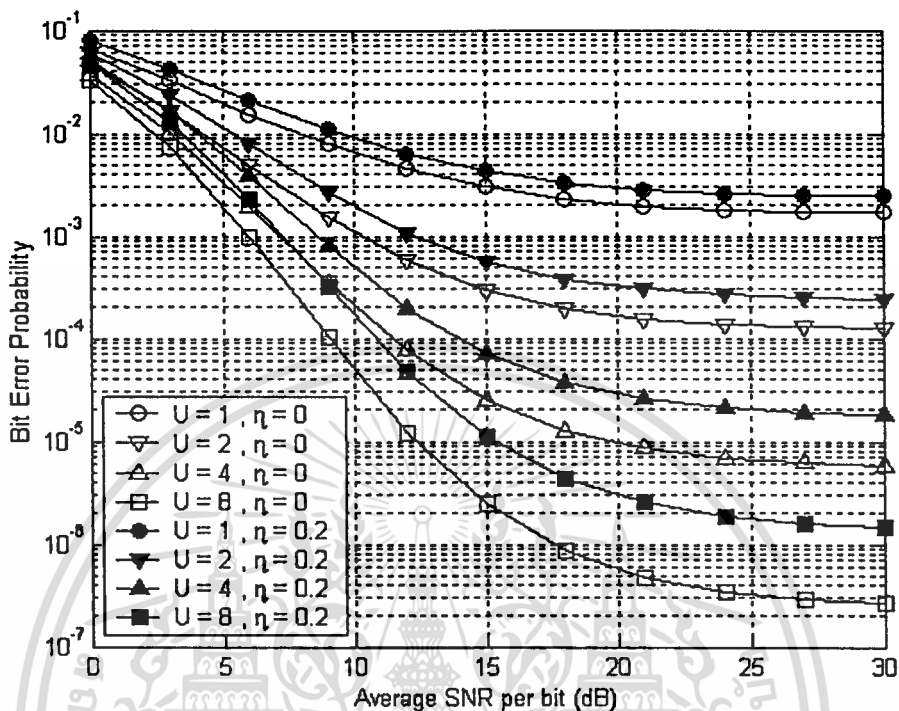
ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อ Average SNR per bit หรือ  $E_b/N_0$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า BEP ลดลง และเมื่อจำนวนสายอากาศส่งเพิ่มขึ้นค่า BEP ก็จะลดลง ซึ่งหมายถึงสมรรถนะของระบบดีขึ้น โดยเมื่อพิจารณาสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นของระบบจะเห็นว่าสมรรถนะของระบบที่เพิ่มขึ้นนี้มีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อ Average SNR per bit หรือ  $E_b/N_0$  เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability โดยมีอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0.2$  และมีผู้ใช้ 10 ราย

จากรูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability โดยแสดงผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อสายอากาศส่งมีจำนวน  $U = 1, 2, 4$  และ 8 โดยอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ยเป็น 0.2

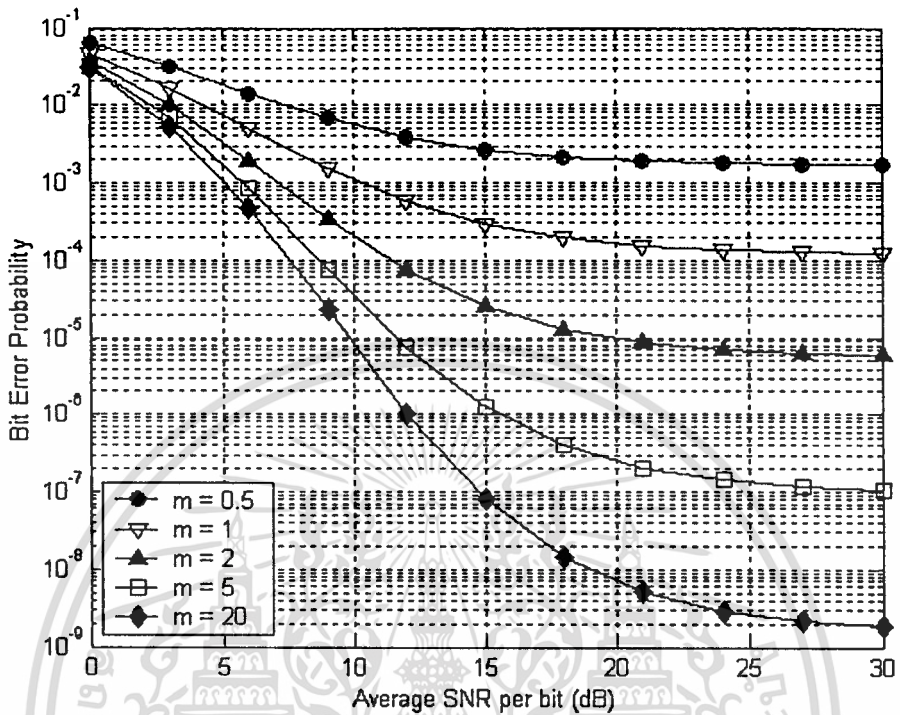
ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อ Average SNR per bit หรือ  $E_b/N_0$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า BEP ลดลง และเมื่อจำนวนสายอากาศส่งเพิ่มขึ้นค่า BEP ก็จะลดลง ซึ่งหมายถึงสมรรถนะของระบบดีขึ้น โดยเมื่อพิจารณาสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นของระบบจะเห็นว่าสมรรถนะของระบบที่เพิ่มขึ้นนี้มีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อ Average SNR per bit หรือ  $E_b/N_0$  เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability โดยมีอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0$  และ  $\eta = 0.2$  และมีผู้ใช้ 10 ราย

จากรูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability โดยนำผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบจากรูปที่ 5.6 และ 5.7 เมื่ออัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ยเป็น 0 และ 0.2 ตามลำดับมาแสดงในรูปเดียวกัน โดยมีสายอากาศส่ง  $U = 1, 2, 4$  และ 8

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อ Average SNR per bit หรือ  $E_b/N_0$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า BEP ลดลง และเมื่อจำนวนสายอากาศส่งเพิ่มขึ้นค่า BEP ก็จะลดลง ซึ่งหมายถึงสมรรถนะของระบบดีขึ้น และเมื่ออัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจะทำให้สมรรถนะของระบบลดลง



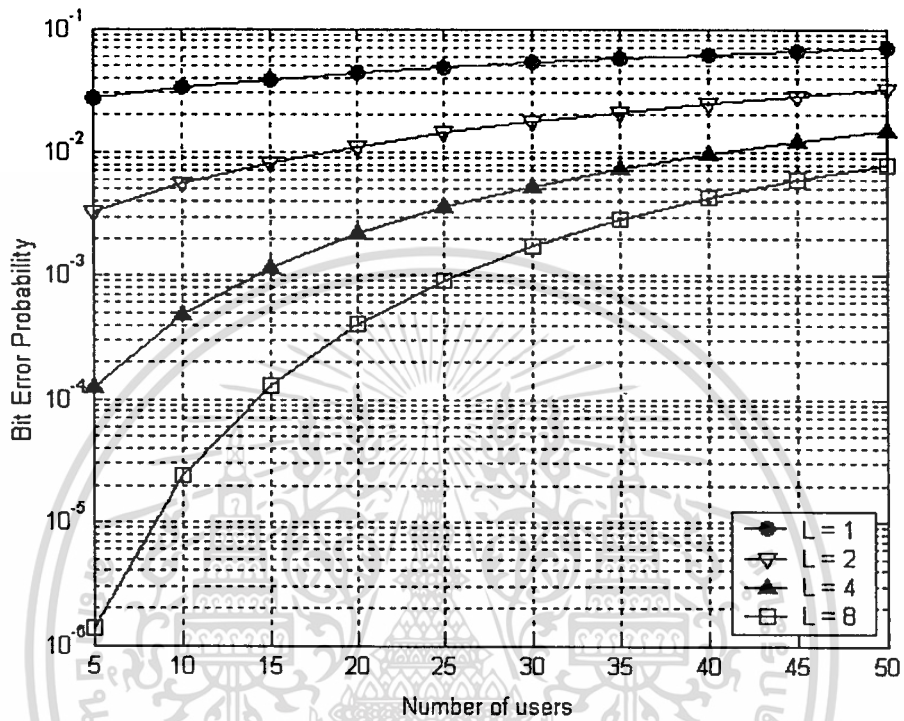
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์เฟดดิ้งนาคากามิ โดยมีอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0$  และมีผู้ใช้ 10 ราย

จากรูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Average SNR per bit กับ Bit Error Probability โดยแสดงผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อพารามิเตอร์เฟดดิ้งนาคากามิมีค่า  $m = 0.5, 1, 2, 5$  และ 20 โดยอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ยเป็น 0

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อ Average SNR per bit หรือ  $E_b/N_0$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า BEP ลดลง ซึ่งหมายถึงสมรรถนะของระบบดีขึ้น โดยเมื่อพารามิเตอร์เฟดดิ้งนาคากามิมีค่าเพิ่มขึ้นสมรรถนะของระบบก็จะดีขึ้นด้วย

## 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability

### 5.2.1 กรณีที่ระบบไม่ใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์

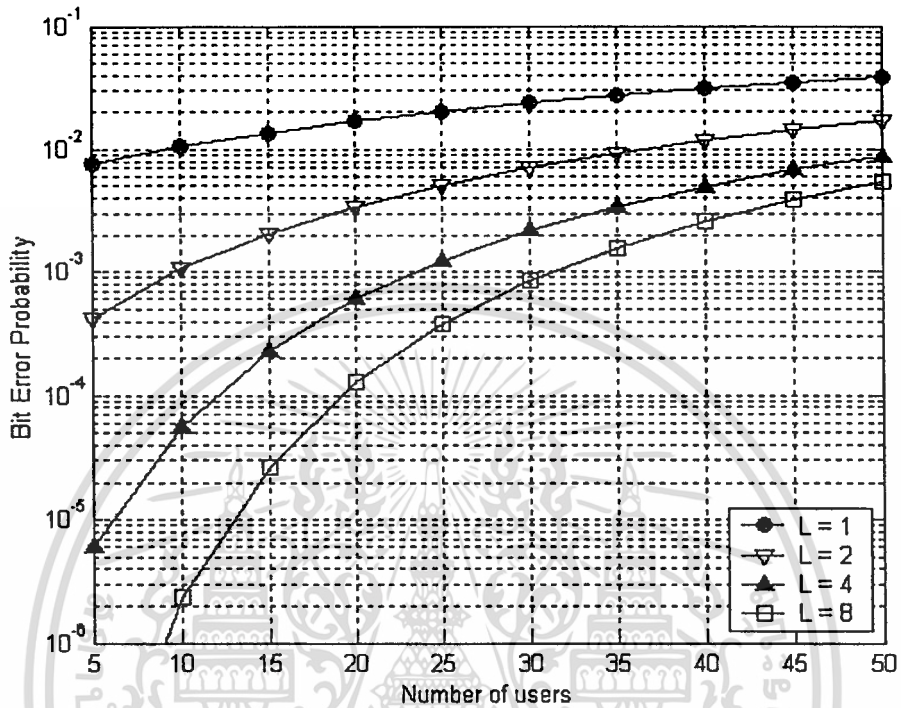


รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability

โดยมีสายอากาศส่ง  $U = 1$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0$  และมี  $E_b/N_0 = 10$

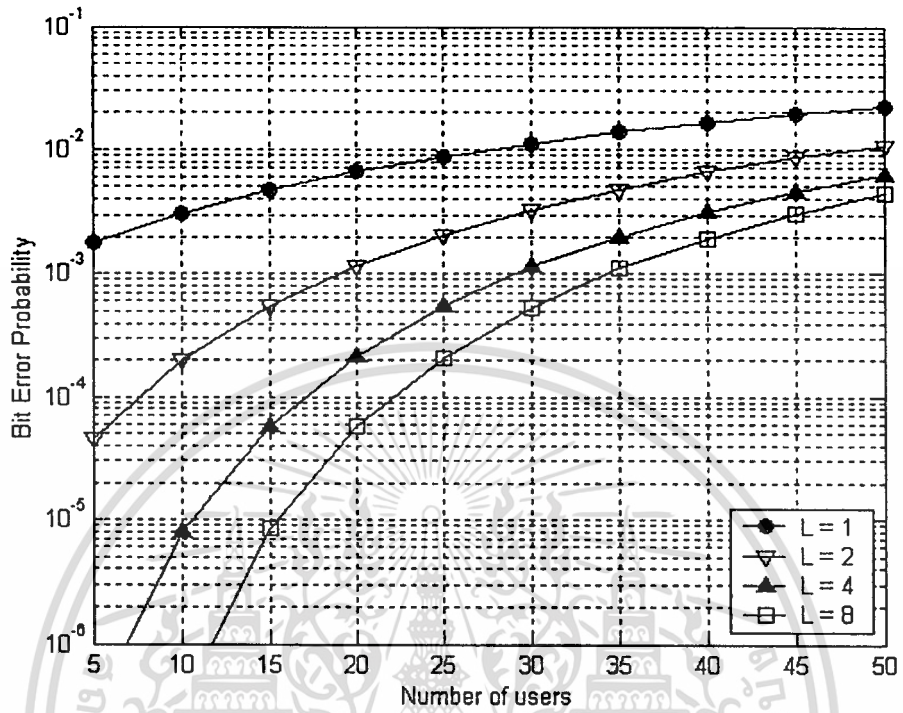
จากรูปที่ 5.10 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนผู้ใช้ลดลงจะทำให้ค่า BEP ลดลง และเมื่อจำนวนวิถีที่รับได้เพิ่มขึ้นค่า BEP ก็จะลดลง ซึ่งหมายถึงสมรรถนะของระบบดีขึ้นนั่นเอง

### 5.2.2 กรณีที่ระบบใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์



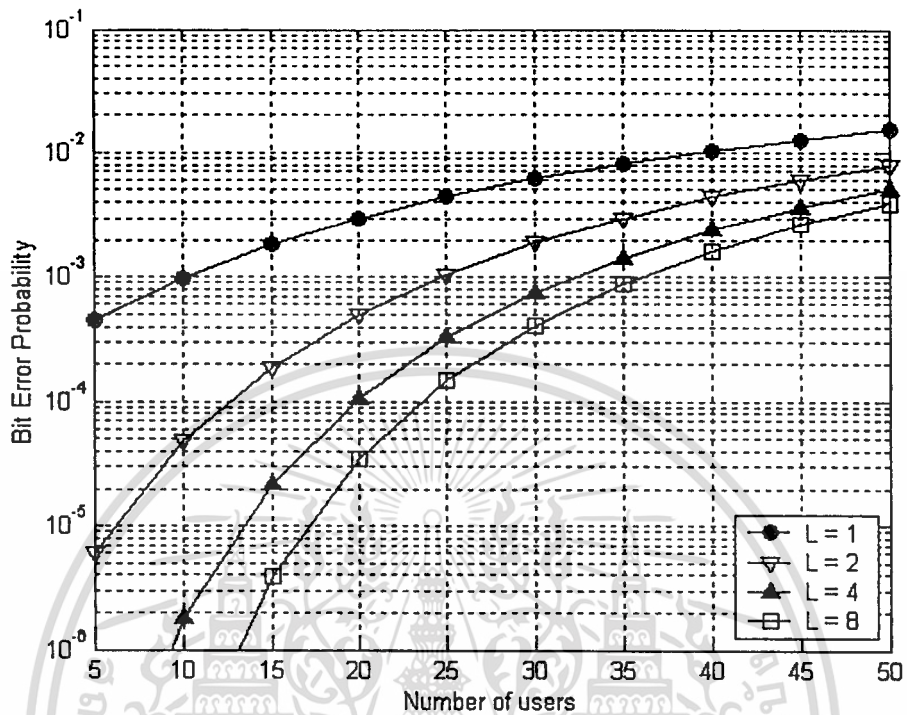
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability

โดยมีสายอากาศส่ง  $U = 2$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0$  และมี  $E_b/N_0 = 10$



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability

โดยมีสายอากาศส่ง  $U = 4$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0$  และมี  $E_b/N_0 = 10$

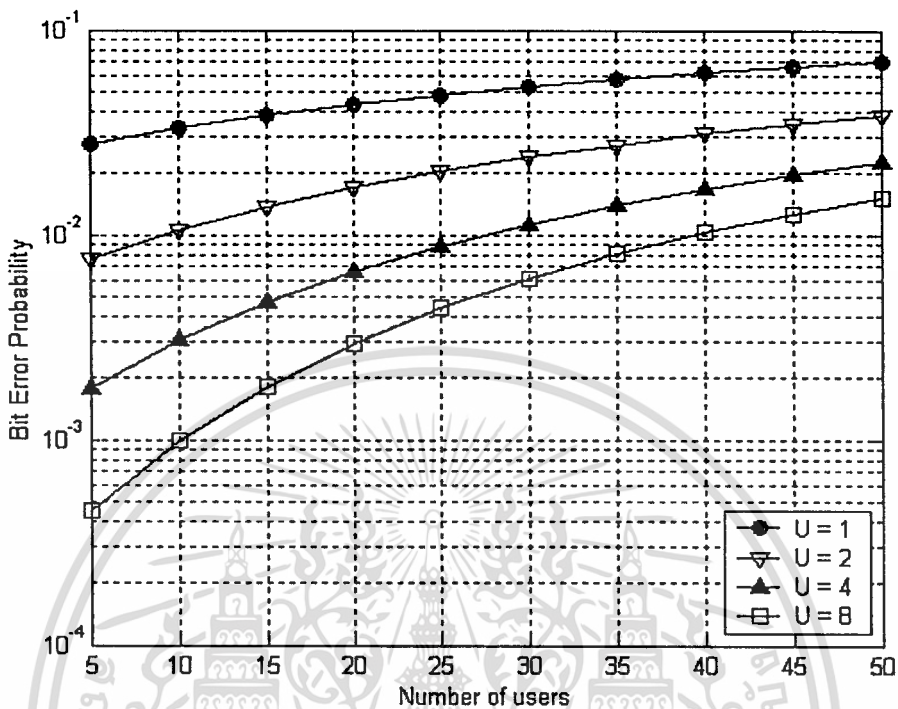


รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability

โดยมีสายอากาศส่ง  $U = 8$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0$  และมี  $E_b/N_0 = 10$

จากรูปที่ 5.11 – 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability เมื่อระบบใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์โดยมีสายอากาศส่ง  $U = 2, 4$  และ  $8$  ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละรูปกำหนดให้จำนวนวิถีที่รับได้เพิ่มขึ้น

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนผู้ใช้ลดลงจะทำให้ค่า BEP ลดลง และเมื่อจำนวนวิถีที่รับได้เพิ่มขึ้นค่า BEP ก็จะลดลง ซึ่งหมายถึงสมรรถนะของระบบดีขึ้นนั่นเอง

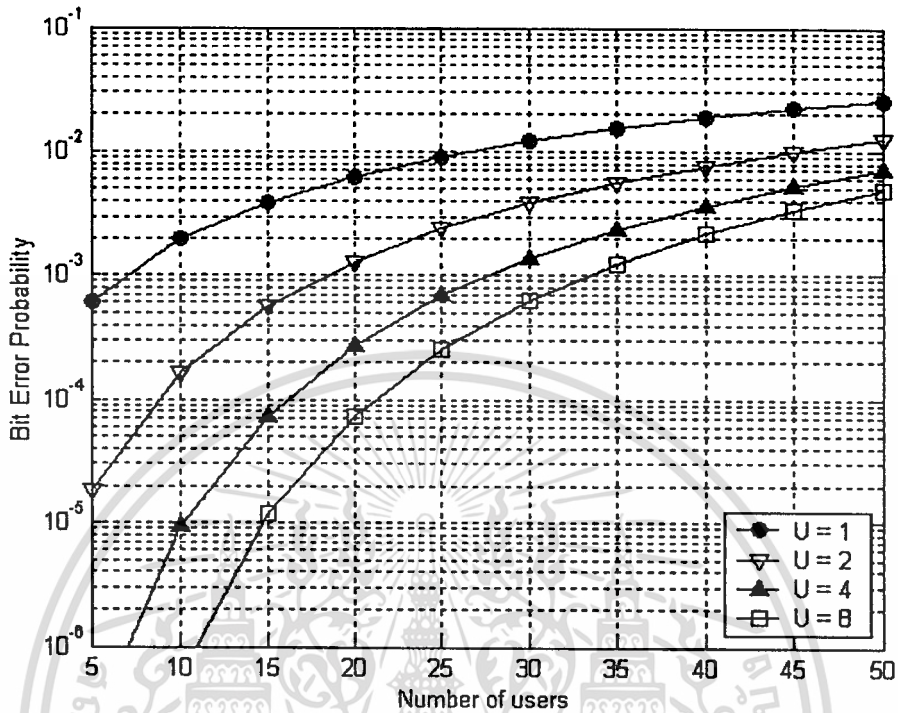


รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability

โดยมีจำนวนวิถี  $L=1$ , อัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta=0$  และมี  $E_b/N_0=10$

จากรูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability โดยนำผลการวิเคราะห์สมรรถนะเมื่อสายอากาศส่งมีจำนวน  $U=1, 2, 4$  และ 8 มาแสดงในรูปเดียวกัน โดยจำนวนวิถีที่รับได้เป็น 1 วิถี

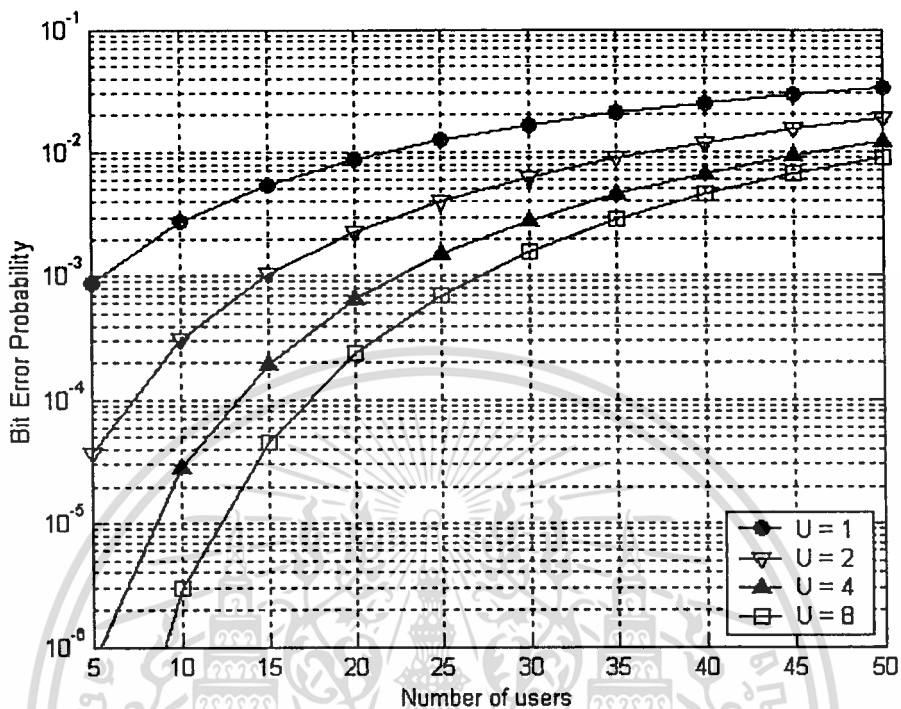
ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนผู้ใช้ลดลงจะทำให้ค่า BEP ลดลง และเมื่อจำนวนสายอากาศส่งเพิ่มขึ้นค่า BEP ก็จะลดลง ซึ่งหมายถึงสมรรถนะของระบบดีขึ้น โดยเมื่อพิจารณาสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นของระบบจะเห็นว่าสมรรถนะของระบบที่เพิ่มขึ้นนี้มีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อยๆ เมื่อจำนวนผู้ใช้เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability โดยมีอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0$  และมี  $E_b/N_0 = 10$

จากรูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability โดยแสดงผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อสายอากาศส่งมีจำนวน  $U = 1, 2, 4$  และ 8 โดยอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ยเป็น 0

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนผู้ใช้ลดลงจะทำให้ค่า BEP ลดลง และเมื่อจำนวนสายอากาศส่งเพิ่มขึ้นค่า BEP ก็จะลดลง ซึ่งหมายถึงสมรรถนะของระบบดีขึ้น โดยเมื่อพิจารณาสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นของระบบจะเห็นว่าสมรรถนะของระบบที่เพิ่มขึ้นนี้มีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อยๆ เมื่อจำนวนผู้ใช้เพิ่มมากขึ้น

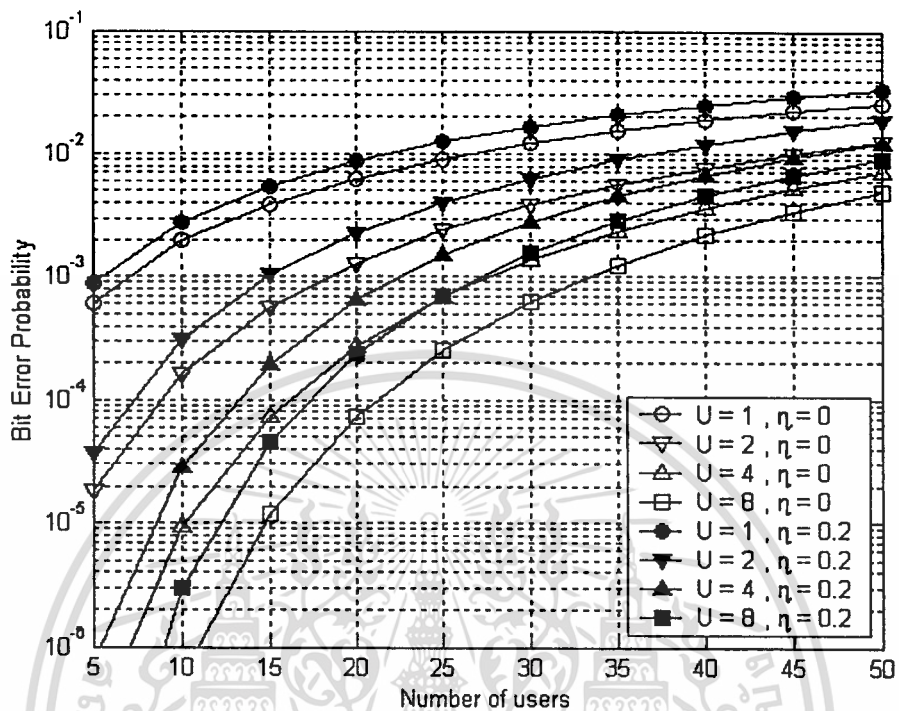


รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability

โดยมีอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0.2$  และมี  $E_b/N_0 = 10$

จากรูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability โดยแสดงผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อสายอากาศส่งมีจำนวน  $U = 1, 2, 4$  และ 8 โดยอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ยเป็น 0.2

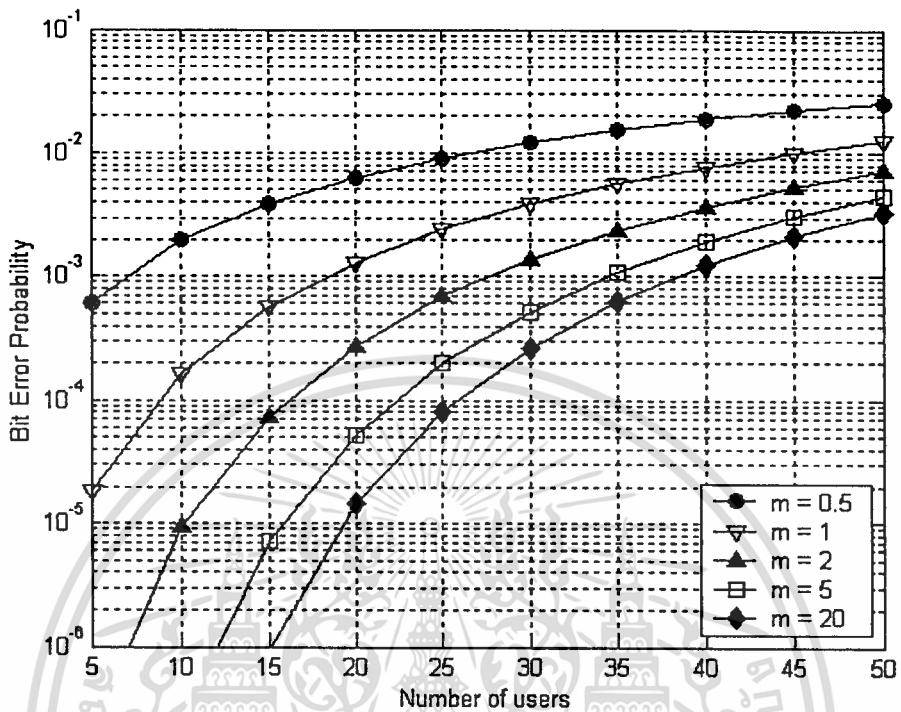
ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนผู้ใช้ลดลงจะทำให้ค่า BEP ลดลง และเมื่อจำนวนสายอากาศส่งเพิ่มขึ้นค่า BEP ก็จะลดลง ซึ่งหมายถึงสมรรถนะของระบบดีขึ้น โดยเมื่อพิจารณาสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นของระบบจะเห็นว่าสมรรถนะของระบบที่เพิ่มขึ้นนี้มีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อยๆ เมื่อจำนวนผู้ใช้เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability โดยมีอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0$  และ  $\eta = 0.2$  และมี  $E_b/N_0 = 10$

จากรูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability โดยนำผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบจากรูปที่ 5.15 และ 5.16 เมื่ออัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ยเป็น 0 และ 0.2 ตามลำดับมาแสดงในรูปเดียวกัน โดยมีสายอากาศส่ง  $U = 1, 2, 4$  และ 8

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนผู้ใช้ลดลงจะทำให้ค่า BEP ลดลง และเมื่อจำนวนสายอากาศส่งเพิ่มขึ้นค่า BEP ก็ลดลง ซึ่งหมายถึงสมรรถนะของระบบดีขึ้น และเมื่ออัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจะทำให้สมรรถนะของระบบลดลง



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์เฟดดิ้งนาคากามิ โดยมีอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย  $\eta = 0$  และมี  $E_b/N_0 = 10$

จากรูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Number of users กับ Bit Error Probability โดยแสดงผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อพารามิเตอร์เฟดดิ้งนาคากามิมีค่า  $m = 0.5, 1, 2, 5$  และ 20 โดยอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ยเป็น 0

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนผู้ใช้ลดลงจะทำให้ค่า BEP ลดลง ซึ่งหมายถึงสมรรถนะของระบบดีขึ้น โดยเมื่อพารามิเตอร์เฟดดิ้งนาคากามิมีค่าเพิ่มขึ้นสมรรถนะของระบบก็จะดีขึ้นด้วย

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ

### 6.1 สรุปและวิจารณ์

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้าง (Wideband Code Division Multiple Access : W-CDMA) ที่มีการใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ (Space-Time Spreading : STS) ในการส่งสัญญาณที่สถานีฐาน โดยทำการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณเฟดดิ้งนาคากามิ ซึ่งมีสัญญาณแทรกสอดจากผู้อื่นและมีสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวกในระบบ แล้วพิจารณาความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดของบิต (Bit Error Probability : BEP) ตามเงื่อนไขและข้อกำหนดต่างๆ ของระบบ

จากผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบแสดงให้เห็นว่าเมื่อ Average SNR per bit หรือ  $E_b/N_0$  ที่เพิ่มขึ้น จำนวนผู้ใช้ ( $K$ ) ที่ลดลง หรือจำนวนวิถีของสัญญาณที่รับได้ ( $L$ ) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า BEP ลดลง ซึ่งก็หมายถึงสมรรถนะของระบบดีขึ้น ส่วนอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ย ( $\eta$ ) ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สมรรถนะของระบบลดลงต่ำกว่าสมรรถนะของระบบที่มีอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ยที่น้อยกว่า แต่เมื่อพารามิเตอร์เฟดดิ้งนาคากามิ ( $m$ ) เพิ่มขึ้นจะทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้น ซึ่งบางครั้งเมื่อต้องการเพิ่มสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้นก็มีข้อจำกัดในทางปฏิบัติของการปรับปรุงสมรรถนะจากปัจจัยต่างๆ เหล่านี้

ดังนั้นวิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ที่นำเสนอนี้ก็จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มสมรรถนะของระบบ โดยวิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์นี้เป็นการทำไดเวอร์ซิตีภาคส่งที่สถานีฐาน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์แล้วจะทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้น ส่วนอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สมรรถนะของระบบลดลงต่ำกว่าสมรรถนะของระบบที่มีอัตราการลดทอนกำลังเฉลี่ยที่น้อยกว่า ส่วนการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เฟดดิ้งนาคากามิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สมรรถนะของระบบดีขึ้น เพราะพารามิเตอร์เฟดดิ้งนาคากามิที่เพิ่มขึ้นจะเกิดจากฟังก์ชันของอัตราส่วนของกำลังของสัญญาณจากวิถีตรงเฉลี่ยต่อกำลังของสัญญาณจากวิถีกระจายเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากฟังก์ชันของการลดทอนสัญญาณลดลง ดังนั้นจึงทำให้ภาครับสามารถรับสัญญาณได้ดีขึ้น ฉะนั้นสมรรถนะของระบบจึงดีขึ้นด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Tero Ojanperä, Ramjee Prasad, Editors. **Wideband CDMA for Third Generation Mobile Communications**. Boston-London : Artech House. 1998.
- [2] Harri Holma and Antti Toskala. **WCDMA FOR UMTS : Radio Access For Third Generation Mobile Communications**. Chichester : John Wiley & Sons, Ltd. 2000.
- [3] M.R. Karim and M.Sarraf. **W-CDMA and cdma2000 for 3G Mobile Networks**. New York : McGraw-Hill. 2002.
- [4] Ramjee Prasad, Werner Mohr and Walter Konhäuser. **Third Generation Mobile Communication Systems**. Boston-London : Artech House. 2000.
- [5] Pieter Van Rooyen, Michiel Lötter and Danie Van Wyk. **SPACE-TIME PROCESSING FOR CDMA MOBILE COMMUNICATIONS**. Boston : Kluwer Academic Publishers. 2000.
- [6] Bertrand Hochwald, Thomas L. Marzetta and Constantinos B. Papadias. "A Transmitter Diversity Scheme for Wideband CDMA Systems Based on Space-Time Spreading." *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 19, no. 1, Jan. 2001. pp. 48-59.
- [7] Constantinos B. Papadias. "On the Spectral Efficiency of Space-Time Spreading Schemes for Multiple Antenna CDMA Systems." [Online]. Available : <http://www.bell-labs.com/org/wireless/1131k0/wcdma-pub/asilomar99paper.pdf>. 2000.
- [8] Ramjee Prasad. **CDMA for Wireless Personal Communications**. Boston-London : Artech House. 1996.
- [9] Theodore S. Rappaport. **WIRELESS COMMUNICATIONS : Principles and Practice**. New Jersey : Prentice Hall, Inc. 1996.
- [10] Lie-Liang Yang and Lajos Hanzo. "Performance of Wideband CDMA Using Adaptive Space-Time Spreading over Multipath Nakagami Fading Channels." *IEEE 55<sup>th</sup> Veh. Techno. Conference (VCT' 2002)*, Spring 2002. pp. 615-619.
- [11] Thomas Eng and Laurence B. Milstein. "Coherent DS-SS Performance in Nakagami Multipath Fading." *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 43, no. 2/3/4, Feb./Mar./Apr. 1995. pp. 1134-1143.

- [12] George P. Efthymoglou, Valentine A. Aalo and Henry Helmken. "Performance Analysis of Coherent DS-CDMA Systems in a Nakagami Fading Channel with Arbitrary Parameters." IEEE Trans. on Veh. Techno., vol. 46, no. 2, May 1997. pp. 289-297.
- [13] Lie-Liang Yang and Lajos Hanzo. "Slow Frequency-Hopping Multicarrier DS-CDMA for Transmission over Nakagami Multipath Fading Channels." IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 19, no. 7, Jul. 2001. pp. 1211-1221.
- [14] Mohamed-Slim Alouini and Andrea J. Goldsmith. "A Unified Approach for Calculating Error Rates of Linearly Modulated Signals over Generalized Fading Channels." IEEE Trans. on Commun., vol. 47, no. 9, Sep. 1999. pp. 1324-1334.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] อรรถ จันทรบাত্র, สุวิพล สิริทธิชีวกภาค และเกรียงไกร วงศ์โรจนภรณ์. “การอภิปรายสมรรถนะของวิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์ สำหรับระบบซีดีเอ็มเอแถบกว้างในช่องสัญญาณเฟดดิ้งนาคากามิ.” การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41, สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์, หน้า 211-220.



## ประวัติผู้เขียน

นายอรรถ จันทรบาตร เกิดเมื่อวันที่ 20 พฤศจิกายน 2520 ที่จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2542



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์ระบบดังกล่าวมาจะเห็นได้ว่าวิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์จะช่วยเพิ่มสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้น แต่ก็มีปัจจัยอื่นที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบ ฉะนั้นในการใช้วิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์จึงต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ เหล่านั้นด้วย อีกทั้งหากนำวิธีการนี้ไปใช้ในระบบจริงนั้นยังต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าในการนำมาใช้งานด้วย

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

การแผ่แบบสเปซ-ไทม์เป็นวิธีการที่สามารถเพิ่มสมรรถนะให้แก่ระบบได้วิธีหนึ่ง แต่หากมีการศึกษาและพัฒนาาระบบการสื่อสารด้วยวิธีการอื่นๆ อีกเช่น การทำโคเวอรัจติกาครบที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งหากสามารถทำให้สอดคล้องกับวิธีการแผ่แบบสเปซ-ไทม์นี้ได้ก็จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้ในระบบจริง

