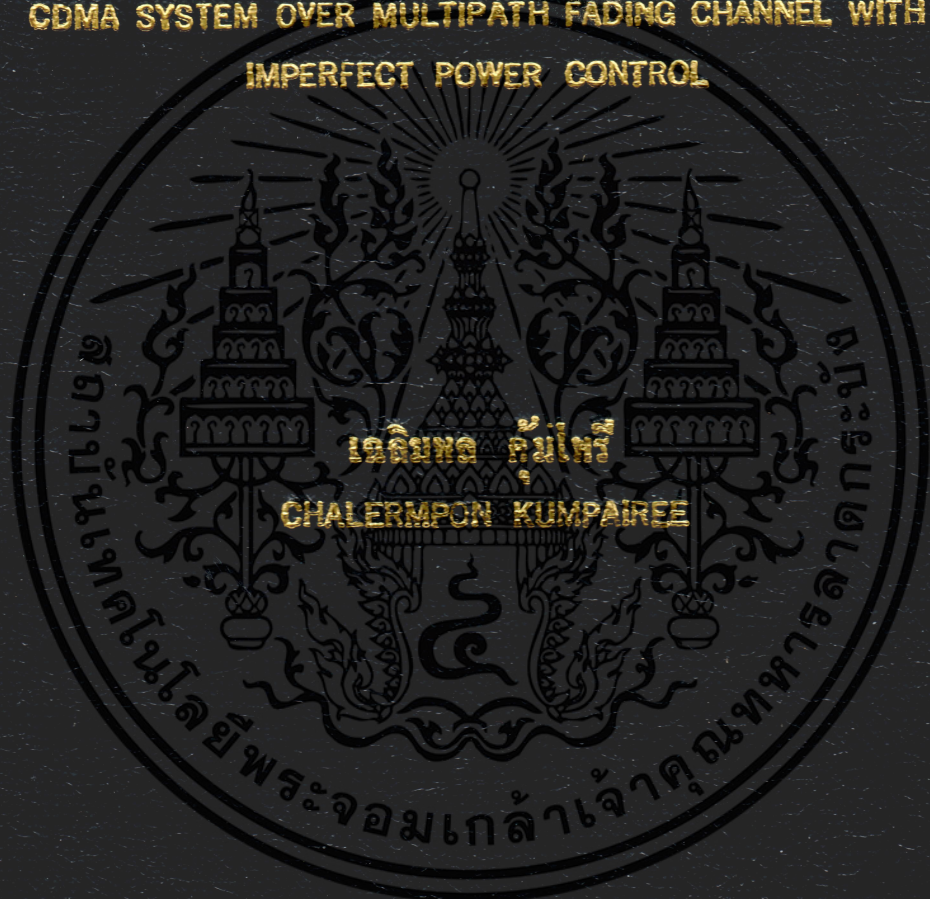


ความน่าจะเป็นของการติดขัดและอัตราความผิดพลาดบิตของการเชื่อมโยงขาขึ้น
ในระบบเซลล์ลาร์ ซีดีเอ็มเอ บนช่องสัญญาณการเฟดดิ้งหลายวิถี
ที่มีการควบคุมกำลังส่งที่ไม่สมบูรณ์

BLOCKING PROBABILITY AND BER OF REVERSE-LINK CELLULAR
CDMA SYSTEM OVER MULTIPATH FADING CHANNEL WITH
IMPERFECT POWER CONTROL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรม ไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-340-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ความน่าจะเป็นของการติดขัดและอัตราความผิดพลาดบิต
ของการเชื่อมโยงขาขึ้นในระบบเซลลูลาร์ซีดีเอ็มเอบนช่องสัญญาณ
การเฟดดิ้งหลายวิถีที่มีการควบคุมกำลังส่งที่ไม่สมบูรณ์

BLOCKING PROBABILITY AND BER OF REVERSE-LINK CELLULAR CDMA
SYSTEM OVER MULTIPATH FADING CHANNEL WITH IMPERFECT
POWER CONTROL



เลขที่.....
เลขทะเบียน 47536
วัน, เดือน, ปี 19 ส.ค. 2546

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-340-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BLOCKING PROBABILITY AND BER OF REVERSE-LINK CELLULAR CDMA
SYSTEM OVER MULTIPATH FADING CHANNEL WITH IMPERFECT
POWER CONTROL



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
2003
ISBN 974-324-340-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความน่าจะเป็นของการติดขัดและอัตราความผิดพลาดบิตของการเชื่อมโยงขาขึ้นในระบบเซลลูลาร์ซีดีเอ็มเอบนช่องสัญญาณการเฟดดิ้งหลายวิถีที่มีการควบคุมกำลังส่งที่ไม่สมบูรณ์
นักศึกษา	นาย เฉลิมพล คุ่มไพบรี
รหัสประจำตัว	43061050
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. สุทธิชัย นพนาศิพงษ์

บทคัดย่อ

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอถึงการวิเคราะห์สมรรถนะของการสื่อสารทางด้านการเชื่อมโยงขาขึ้นของระบบเซลลูลาร์ซีดีเอ็มเอ ที่เกิดขึ้นบนช่องสัญญาณการเฟดดิ้งแบบเรย์ลีหลายวิถีที่เจาะจงความถี่และมีการจายอย่างซ้าๆ และพิจารณาในกรณีของการควบคุมกำลังส่งของเครื่องลูกข่ายที่ไม่สมบูรณ์ ส่วนทางภาครับที่สถานีฐานใช้แบบจำลองเครื่องรับแบบเรด และทำการวิเคราะห์หาค่าความจุของระบบซึ่งแสดงโดยค่าความน่าจะเป็นของการติดขัด(BLOCKING PROBABILITY) ซึ่งมีอยู่สองวิธีที่นำมาใช้หาค่าความจูดังกล่าวคือ การประมาณค่าความจุแบบเกาส์ และการประมาณค่าความจุแบบลิอิกนอร์มอล นอกจากนี้ยังได้ทำการหาค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของระบบอีกด้วย โดยในการวิเคราะห์สมรรถนะดังกล่าวนี้ได้มีการแสดงพจน์ของตัวแปรในเทอมของจำนวนของเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้หรือจำนวนสาขาของเครื่องรับแบบเรด และผลจากการควบคุมของกำลังส่งที่ไม่สมบูรณ์ไว้ในสมการของการวิเคราะห์ด้วย ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนของเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้ที่มากขึ้น หรือค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการควบคุมกำลังส่งที่ไม่สมบูรณ์มีค่าลดลง จะส่งผลให้ค่าความจุของระบบเพิ่มขึ้น และความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตก็จะมีค่าลดลง ซึ่งจากผลดังกล่าวนี้เป็น การทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title Blocking Probability and BER of Reverse-Link Cellular CDMA System over Multipath Fading Channel with Imperfect Power Control

Student Mr. Chalermpon Kumpaiee

Student ID. 43061050

Degree Master of Engineering

Programme Electrical Engineering

Year 2003

Thesis Advisor Asst. Prof. Dr. Suthichai Noppanakeepong



ABSTRACT

This thesis proposes the performance analysis of the reverse link Cellular CDMA system over Rayleigh multipath frequency-selective, slowly fading channel with imperfect power control. The base station receiver uses the RAKE receiver. The analytical results show the system capacity in term blocking probability. The Gaussian and Lognormal approximation are the methods of blocking probability for analyzing CDMA capacity. The thesis also shows the probability of bit error (BER). An analysis in this thesis, the parameters in the number of resolvable paths of multipath signal and effect of imperfect power control are expressed. The performance results indicate that the improvement of performance can be achieved along with increment the number of resolvable paths or the standard deviation of imperfect power control that decrement.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสและให้ความช่วยเหลือ จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่ ผู้เป็นที่เคารพรักยิ่ง ที่ได้ให้ความรัก ความเข้าใจ ให้กำลังใจ ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณท่าน รศ.ดร.เอื้อน ปิ่นเงิน และ รศ.ดร.ชม กิมปาน ที่ให้โอกาส และสนับสนุนทรัพยากรต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ Information Science, ReCCIT ให้การชี้แนะ ตลอดจนความอนุเคราะห์ต่างๆ จากท่าน ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ปัญญา ฐิติมัทธมา ที่ให้คำปรึกษาและสนับสนุนในทุกๆ ด้าน ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ตลอดจนข้อคิดต่างๆ อันก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้า และเป็นแนวทางในการจัดทำวิทยานิพนธ์จนประสบความสำเร็จ

ขอขอบคุณพี่หวาน พี่แวน พี่พัฒน์ พี่เป็ยก พี่บิง พี่ชนม์ พี่ตุ พี่อำนาจ สมชาย สัน ยา ที่ให้กำลังใจและคอยช่วยเหลือสนับสนุนต่างๆ แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณ คุณนา ที่คอยให้กำลังใจและสิ่งดีๆ แก่ผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และบุคคลที่ผู้วิจัยไม่ได้กล่าวไว้ในที่นี้ ที่ให้การสนับสนุน ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยมาโดยตลอด

คุณค่า และประโยชน์ใดๆ ที่เป็นผลมาจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอผู้มีพระคุณทุกท่าน ด้วยความเคารพยิ่ง

เฉลิมพล คุ่มไฟรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญสัญลักษณ์	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 คุณลักษณะของการแพร่ผ่านของคลื่นความถี่วิทยุ.....	3
2.1 การจางหายในช่องสัญญาณ.....	3
2.1.1 การสูญเสียตามระยะทาง	3
2.1.2 การบดบัง.....	4
2.1.3 การรับสัญญาณจากหลายวิถี.....	6
2.2 แบบจำลองของช่องสัญญาณ.....	6
2.2.1 แบบจำลองการแจกแจงเรย์ลี.....	9
2.2.2 แบบจำลองการแจกแจงโรเซียน	9
2.2.3 แบบจำลองการแจกแจงนาคากามิ	9
2.3 ฟังก์ชันการสหสัมพันธ์ของช่องสัญญาณและสเปกตรัมกำลัง	10
2.4 ผลของคุณลักษณะของสัญญาณต่อแบบจำลองของช่องสัญญาณ.....	14
2.5 สัญญาณดิจิทัลบนช่องสัญญาณที่เจาะจงความถี่และมีการจางหายแบบช้า.....	15
2.6 เทคนิคของการใช้ไคเวอร์ซิตีสำหรับช่องสัญญาณการจางหายแบบหลายเส้นทาง..	16
2.6.1 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบสายการประวิงเวลาแบบจุดต่อแยก.....	17
2.6.2 เครื่องรับแบบ RAKE บนช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเจาะจงความถี่	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 หลักการของระบบเซลลูลาร์ซีดีเอ็มเอ	23
3.1 หลักการพื้นฐานของซีดีเอ็มเอ	23
3.1.1 หลักการทั่วไปของการเข้าถึงหลายทาง	23
3.1.1.1 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางความถี่ (FDMA)	23
3.1.1.2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางเวลา (TDMA)	23
3.1.1.3 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางเวลา (CDMA)	23
3.1.2 เทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางรหัส	25
3.2 ระบบเซลลูลาร์ซีดีเอ็มเอ	27
3.2.1 การแทรกสอดของการเชื่อมโยงขากลับ	28
3.2.3.1 การแทรกสอดอันเนื่องมาจากภายในเซลล์เดียวกัน (Same-Cell Interference)	28
3.2.3.2 การแทรกสอดอันเนื่องมาจากภายนอกเซลล์ (Other-cell Interference)	29
3.3 ความจุของระบบเซลลูลาร์ซีดีเอ็มเอ	29
3.3.1 การควบคุมกำลังแบบลูเปิด	31
3.3.2 การควบคุมกำลังแบบลูปิด	33
3.3.3 การเปลี่ยนถ่ายเซลล์	35
3.3.4 ความจุของระบบซีดีเอ็มเอ	36
บทที่ 4 การวิเคราะห์สมรรถนะการเชื่อมโยงขาขึ้นของระบบเซลลูลาร์ซีดีเอ็มเอ	41
4.1 แบบจำลองของระบบที่พิจารณา	41
4.2 การหาค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดของระบบที่ทำการวิเคราะห์	42
4.2.1 ความน่าจะเป็นของการติดขัดโดยการประมาณแบบเกาส์	43
4.2.2 ความน่าจะเป็นของการติดขัดโดยการประมาณแบบล็อกนอร์มอล	46
4.3 การหาค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบ	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์เชิงเลขของระบบ	50
5.1 ค่าความน่าจะเป็นของการติดขัด.....	51
5.1.1 การประมาณค่าแบบเกาส์	51
5.1.1.1 ผลของค่า $(E_b/N_o)_{required}$ ของระบบ.....	51
5.1.1.2 ผลของค่า X_0 ต่อความน่าจะเป็นของความติดขัดของระบบ.....	52
5.1.1.3 ผลของการควบคุมกำลังต่อความน่าจะเป็นของความติดขัดของระบบ.....	53
5.1.1.4 ผลของจำนวนของเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้หรือจำนวนสาขาของ เครื่องรับแบบเรดต่อความน่าจะเป็นของความติดขัดของระบบ.....	54
5.1.2 การประมาณค่าแบบล็อกนอร์มอล	55
5.1.2.1 ผลของค่า $(E_b/N_o)_{required}$ ของระบบ.....	55
5.1.2.2 ผลของค่า X_0 ต่อความน่าจะเป็นของความติดขัดของระบบ	56
5.1.2.3 ผลของการควบคุมกำลังต่อความน่าจะเป็นของความติดขัดของระบบ.....	57
5.1.2.4 ผลของจำนวนของเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้หรือจำนวนสาขาของ เครื่องรับแบบเรดต่อความน่าจะเป็นของความติดขัดของระบบ.....	58
5.2 ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบ	59
5.2.1 ผลของการควบคุมกำลัง.....	59
5.2.2 ผลของจำนวนจำนวนเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้.....	60
บทที่ 6 สรุปและวิเคราะห์ผล	61
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	64
ประวัติผู้เขียน.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการสูญเสียตามระยะทาง การบดบัง และการรับสัญญาณหลายวิถี.....	3
2.2 แสดงตัวอย่างการตอบสนองทางเวลาของช่องสัญญาณหลายวิถี.....	7
2.3 แสดง Multipath Intensity Profile ที่เป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform MIP).....	11
2.4 แสดงถึงแบบจำลองของ Uniform MIP ในการเชื่อมโยงขากลับของระบบ.....	12
2.5 แสดงช่องสัญญาณเจาะจงความถี่แบบจำลองสายการประวิงเวลาแบบจุดต่อแยก (Tap Delay Line)	20
2.6 แสดงเครื่องรับแบบ RAKE.....	22
3.1 แสดงวิธีการเข้าถึงหลายทางแบบการแบ่งทางความถี่ (FDMA)	24
3.2 แสดงวิธีการเข้าถึงหลายทางแบบการแบ่งทางเวลา (TDMA)	24
3.3 แสดงวิธีการเข้าถึงหลายทางแบบการแบ่งทางรหัส (CDMA)	24
3.4 แสดงสเปคตรัมที่เปรียบเทียบกันของระบบ FDMA TDMA และ CDMA	25
3.5 แสดงภาคส่งของระบบไควร์ซีเคิร์ฟที่ซีดีเอ็มเอที่มีการมอดูเลตแบบ BPSK.....	26
3.6 แสดงภาครับของระบบไควร์ซีเคิร์ฟที่ซีดีเอ็มเอที่มีการมอดูเลตแบบ BPSK.....	27
3.7 แสดงรูปแบบของการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ของระบบ CDMA และ ระบบ FDMA.....	27
3.8 แสดงถึงกำลังจาก 2 ผู้ใช้งานในสถานีฐานโดยผู้ใช้งานที่ 2 มีค่า SNR มากกว่าผู้ใช้งาน 1..	30
3.9 แสดงการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์.....	31
3.10 แสดงความจุที่ได้สูงสุดเมื่อกำลังที่รับได้ของผู้ใช้งานทั้งหมดมีค่าเท่ากันที่สถานีฐาน	31
3.11 แสดงถึงกำลังของสัญญาณในระบบซีดีเอ็มเอ.....	37
4.1 แสดงแบบจำลองระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	41
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่ $\sigma = 1$ dB L = 4 เส้นทาง ค่า PG =128, $X_0=0.9$, โดยการเปรียบเทียบกันในค่าของ $(E_b/N_o)_{required}$ เป็น 5 6 และ 7 dB ตามลำดับ.....	51
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่ $\sigma = 1$ dB L = 4 เส้นทาง ค่า PG =128, $(E_b/N_o)_{required}$ เป็น 5 dB โดยการเปรียบเทียบกันในค่าของ X_0 เป็น 0.66 0.75 และ 0.9 ตามลำดับ.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

<p>5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่ L = 4 เส้นทาง ค่า PG = 128, $(E_b/N_o)_{required} = 5$ dB, $X_0 = 0.9$ โดยแสดงการเปรียบเทียบของระบบที่มีการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์ ($\sigma = 0$ dB) และระบบที่มีการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์ $\sigma = 1$ 2 และ 4 dB ตามลำดับ</p>	53
<p>5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัดกับจำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่ ค่า PG = 128, $(E_b/N_o)_{required} = 5$ dB, $X_0 = 0.9$ $\sigma = 1$ dB โดยแสดงการเปรียบเทียบเมื่อ L = 1 2 และ 4 ตามลำดับ</p>	54
<p>5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่ $\sigma = 1$ dB L = 4 เส้นทาง ค่า PG = 128, $X_0 = 0.9$, โดยการเปรียบเทียบกันในค่าของ $(E_b/N_o)_{required}$ เป็น 5 6 และ 7 dB ตามลำดับ</p>	55
<p>5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่ $\sigma = 1$ dB L = 4 เส้นทาง ค่า PG = 128, $(E_b/N_o)_{required}$ เป็น 5 dB โดยการเปรียบเทียบกันในค่าของ X_0 เป็น 0.66 0.75 และ 0.9 ตามลำดับ</p>	56
<p>5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่ L = 4 เส้นทาง ค่า PG = 128, $(E_b/N_o)_{required} = 5$ dB, $X_0 = 0.9$ โดยแสดงการเปรียบเทียบของระบบที่มีการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์ ($\sigma = 0$ dB) และระบบที่มีการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์ $\sigma = 1$ 2 และ 4 dB ตามลำดับ</p>	57
<p>5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่ ค่า PG = 128, $(E_b/N_o)_{required} = 5$ dB, $X_0 = 0.9$ $\sigma = 1$ dB โดยแสดงการเปรียบเทียบเมื่อ L = 1 2 และ 4 ตามลำดับ</p>	58
<p>5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่ค่า PG = 128, $(E_b/N_o)_{required} = 5$ dB, $X_0 = 0.9$ L = 4 เส้นทาง โดย $\sigma = 0$ 1 2 และ 4 dB</p>	59
<p>5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่ค่า PG = 256, $(E_b/N_o)_{required} = 5$ dB, $X_0 = 0.9$ $\sigma = 0$ 1 dB L = 1 2 และ 4 เส้นทาง</p>	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

n	ตัวที่กำลังของการสูญเสียเชิงระยะทาง
m	ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่มแบบเกาส์
σ	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มแบบเกาส์
σ^2	ค่าความแปรปรวนของตัวแปรสุ่มแบบเกาส์
β	$\ln(10)/10$
τ	ค่าประวิงเวลา
L	จำนวนแสดงถึงเส้นทางที่ได้จากเครื่องรับแบบเรด (Resolvable Path)
T	คาบเวลาบิต
W	แบนด์วิดท์
R	อัตราบิตของข้อมูล
E_b	พลังงานต่อบิตสำหรับสัญญาณที่ต้องการ
N_0	ความหนาแน่นกำลังของสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนผสมมุล
$(S/N)_{required}$ หรือ $(E_b/N_0)_{required}$	ค่า SNR ที่ระบบ ต้องการ
η	ค่าโหลดดิ้งแฟคเตอร์
X_0	ค่าโหลดแฟคเตอร์ที่สัมพันธ์กับค่าโหลดดิ้งแฟคเตอร์
α	แอมพลิจูดของสัญญาณที่ได้จากสาขาของเครื่องรับแบบเรด
M	จำนวนผู้ใช้งานที่ระบบสามารถรองรับได้
Z_N	ตัวแปรสุ่มแบบเกาส์
ξ	ตัวแปรสุ่มแบบลือกนอร์มอล
Z_0	ค่าจุดเปลี่ยน
ρ	ตัวแปรสุ่มแบบลือกนอร์มอลที่สัมพันธ์กับตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ย m_{dB} และค่าความเบี่ยงเบน σ_{dB}
m_N	ค่าเฉลี่ย
σ_N	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
η_0	ค่าผลรวมของเทอร์มอลนอยส์และกำลังของสัญญาณรบกวนทั้งหมด
γ	ตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ย m_r และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ_r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

การสื่อสารได้มีการพัฒนานับตั้งแต่อดีตจนมาถึงปัจจุบัน การสื่อสารได้เข้ามามีบทบาท มากขึ้นในการพัฒนาในด้านต่างๆ โดยเฉพาะทางธุรกิจและการอุตสาหกรรม โดยผู้ที่มีประสิทธิภาพในการสื่อสารที่ดีกว่าย่อมมีโอกาสที่ดีกว่าในการประสบความสำเร็จ เพราะการที่มีข้อมูลข่าวสารที่แม่นยำและถูกต้องกว่าจะทำให้มีข้อมูลในการตัดสินใจที่ดีกว่า

เริ่มจากในยุคแรกๆ การสื่อสารจะเป็นระบบอนาล็อก ต่อมาเมื่อมีผู้ใช้งานในระบบมากขึ้น จึงมีการพัฒนาระบบดิจิทัลขึ้นมาทำให้สามารถรองรับผู้ใช้งานได้มากขึ้น และเป็นการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณในระบบให้ดีขึ้นด้วย ในการเข้าถึงหลายทางของระบบนั้นเริ่มจากการที่ผู้ใช้งานเข้าใช้ช่องสัญญาณโดยการเข้าถึงหลายทางโดยแบ่งทางความถี่นั่นคือระบบ (Frequency Division Multiple Access หรือ FDMA) ต่อมาเมื่อทรัพยากรทางความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดจึงทำให้มีการพัฒนาการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางช่วงเวลา (Time Division Multiple Access หรือ TDMA) เมื่อความต้องการในการรับ-ส่งของปริมาณของข้อมูลทั้งทางเสียงและข้อมูลที่มีมากขึ้นทำให้เกิดความจำกัดในระบบ TDMA จึงได้มีการนำระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางรหัส (Code Division Multiple Access หรือ CDMA) ซึ่งเป็นระบบที่พัฒนาขึ้นมาใช้เริ่มแรกในทางทหารได้ถูกนำมาใช้ในทางการพาณิชย์ ในระบบซีดีเอ็มเอ้นั้นมีการใช้รหัสสุ่มแบบเทียม (PN Code) เป็นตัวมอดูเลตสัญญาณของผู้ใช้งานแต่ละรายส่งไปในช่องสัญญาณ เนื่องจากในระบบซีดีเอ็มเอ้นั้นผู้ใช้งานเข้าใช้งานได้พร้อมๆกันหลายผู้ใช้งานโดยแต่ละผู้ใช้งานสามารถครอบครองความถี่ได้ตลอดทั้งแถบความถี่ จึงสามารถรับส่งข้อมูลได้ในปริมาณที่สูง และนอกจากที่ระบบซีดีเอ็มเอ้นั้นจะมีความปลอดภัยของข้อมูลสูงแล้ว ระบบซีดีเอ็มเอยังสามารถที่จะแก้ไขปัญหาการหลายเส้นทางที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณได้อีกด้วย

ความจุของระบบซีดีเอ็มเอ้นั้นเป็นคุณสมบัติที่โดดเด่นเหนือระบบอื่นๆ ซึ่งปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาค่าความจุในระบบซีดีเอ็มเอ้นั้น มีการพิจารณากำลังของสัญญาณการแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบ โดยในระบบซีดีเอ็มเอ้นั้นผู้ใช้งานใดๆ จะมองเห็นผู้ใช้งานรายอื่นเป็นสัญญาณการแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นในสภาวะระบบมีความสามารถรองรับที่ผู้ใช้งานที่เข้ามาร้องขอใช้งานในระบบมากขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มขึ้นของการแทรกสอดไปด้วยนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความจุของระบบซีดีเอ็มเออีกประการหนึ่งคือ ปัญหาการใกล้-ไกล (Near-Far Effect) จะทำให้กำลังของสัญญาณของเครื่องลูกข่ายที่อยู่ใกล้มีความแรงมากกว่ากำลังของเครื่องลูกข่ายที่อยู่ไกลกว่า ทำให้เกิดการรบกวนกันขึ้นแล้วจะส่งผลกระทบต่อความจุของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ จึงได้มีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยมีการควบคุมกำลังของระบบขึ้นมา ซึ่งวิธีนี้จะทำให้กำลังของเครื่องลูกข่ายที่รับได้ที่สถานีมีค่าเท่ากันเป็นการทำให้ความจุมีค่าสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการพิจารณาถึงความน่าจะเป็นของการติดขัดของระบบ (Blocking Probability) ซึ่งเป็นความน่าจะเป็นที่ระบบจะปฏิเสธการร้องขอเข้าใช้ช่องสัญญาณของเครื่องลูกข่าย อันเนื่องมาจากกำลังของสัญญาณแทรกสอดทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบขณะนั้นมีค่ามากกว่าค่าจุดเปลี่ยนของระบบ (Threshold) ซึ่งเราสามารถหาค่าความจุของระบบได้โดยการพิจารณาค่าของผู้ใช้งานที่ระบบสามารถรองรับได้ ณ จุดที่ค่าความน่าจะเป็นในการติดขัดค่าหนึ่ง โดยทั่วไปได้มีการพิจารณาค่าความจุของระบบที่ความน่าจะเป็นของการติดขัดที่ค่า 10^{-1} หรือ 10^{-2} ซึ่งได้มีการนำเอาพารามิเตอร์ที่แสดงถึงจำนวนของเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้จากเครื่องรับแบบเรดมาพิจารณาถึงความน่าจะเป็นของการติดขัดของระบบ นอกจากนี้ยังได้นำตัวแปรที่แสดงถึงการควบคุมกำลังที่ผิดพลาดมาพิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อค่าความน่าจะเป็นดังกล่าวอีกด้วย นอกจากนี้ได้พิจารณาในค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดแล้ว ยังได้มีการพิจารณาถึงค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตเฉลี่ยอีกด้วย ซึ่งในการหาค่าดังกล่าวนี้ได้มีการวิเคราะห์ในระบบเซลล์ลูลาร์แบบเซลล์เดี่ยว

1.3 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 คุณลักษณะการแพร่ผ่านของคลื่นความถี่วิทยุ

กล่าวถึงหลักการทั่วไปของการเคลื่อนผ่านของคลื่นที่ผ่านช่องสัญญาณที่มีการเฟดดิ้ง

บทที่ 3 หลักการของระบบเซลล์ลูลาร์ซีดีเอ็มเอ

กล่าวถึงหลักการของระบบเซลล์ลูลาร์ซีดีเอ็มเอ โดยพิจารณาการแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบ หลักการของการควบคุมกำลัง และความจุของระบบ

บทที่ 4 การวิเคราะห์สมรรถนะการเชื่อมโยงขาขึ้นของระบบเซลล์ลูลาร์ซีดีเอ็มเอ

กล่าวถึงการวิเคราะห์ในความน่าจะเป็นของการติดขัดและความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของระบบ

บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์เชิงเลขของระบบ

กล่าวถึงผลการวิเคราะห์เชิงเลขที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 4

บทที่ 6 สรุป

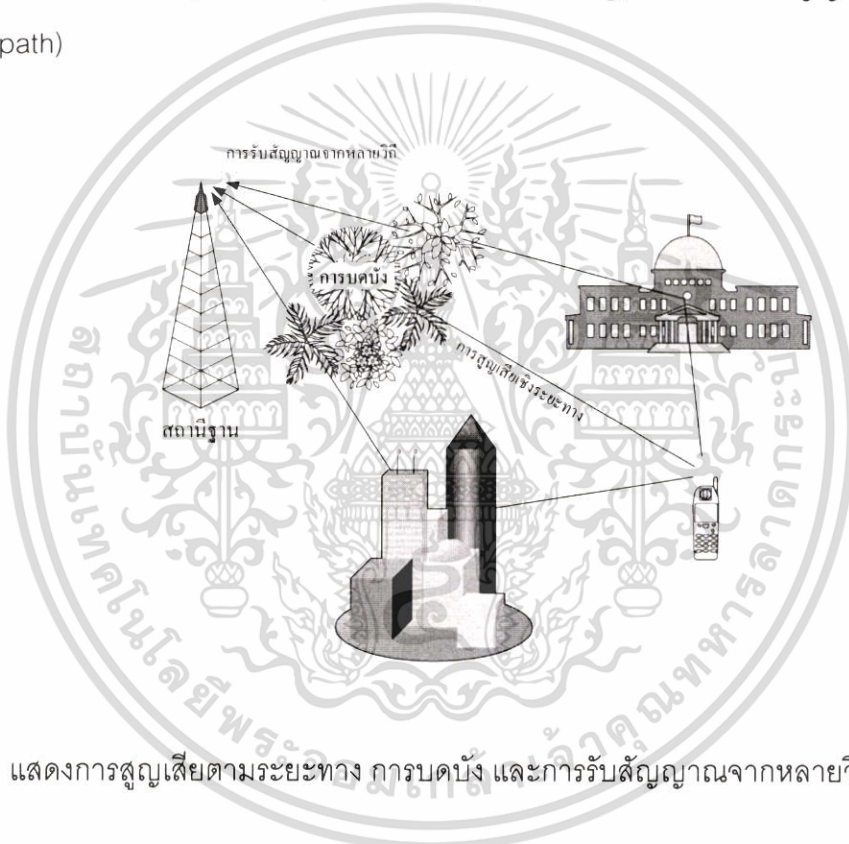
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

คุณลักษณะของการแพร่ผ่านของคลื่นความถี่วิทยุ

2.1 การจางหายในช่องสัญญาณ

ในการสื่อสารไร้สายนั้นเมื่อสัญญาณถูกส่งผ่านช่องสัญญาณ สัญญาณนั้นจะได้รับผลกระทบจากการเดินทางผ่านช่องสัญญาณอันเนื่องมาจากทั้ง ต้นไม้ ตึกอาคาร และสิ่งแวดล้อมภูมิประเทศต่างๆ จะส่งผลให้เกิดการจางหาย (Fading) ของสัญญาณ ซึ่งจะพิจารณาเป็น 3 ประเภท การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss) การบดบัง (Shadowing) และการรับสัญญาณจากหลายวิถี (Multipath)



รูปที่ 2.1. แสดงการสูญเสียตามระยะทาง การบดบัง และการรับสัญญาณจากหลายวิถี

2.1.1 การสูญเสียเชิงระยะทาง (Path Loss)

การสูญเสียเชิงระยะทางนั้นเมื่อพิจารณาในกำลังเฉลี่ยของสัญญาณ P_0 ที่มีระยะห่าง d จากเครื่องส่ง พบว่ากำลังเฉลี่ยนั้นจะลดลงเป็นฟังก์ชันของระยะ d นั้น และฟังก์ชันนี้จะแสดงโดย กฎของกำลังการสูญเสียตามระยะทาง (Path-loss-power law) ตามสมการ

$$P_0 \approx d^{-n} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ n เป็นตัวที่กำลังของการสูญเสียเชิงระยะทาง ค่าของ n จะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของการแพร่ผ่าน เมื่อสภาวะแวดล้อมเป็นอากาศว่าง (Free space) n จะค่าเป็น 2 และในสภาพแวดล้อมของระบบเซลลูลาร์ในเมืองที่มีทั้งตึก และเกิดการถูกบดบังค่าของ n มีค่าอยู่ในช่วง 3 - 6 โดยจะเห็นได้จากสมการว่าเมื่อระยะ d มากขึ้น จะส่งผลให้กำลังเฉลี่ยของสัญญาณลดลงไปตามกฎการสูญเสียตามระยะทาง จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ใกล้-ไกล (Near-Far effect) ขึ้นในระบบซีดีเอ็มเอ เป็นปรากฏการณ์ที่กำลังเฉลี่ยที่ถูกรับได้ที่สถานีฐานที่ถูกส่งจากเครื่องลูกข่ายที่อยู่ใกล้สถานีฐาน จะมีค่าสูงกว่ากำลังเฉลี่ยที่ถูกรับได้จากเครื่องลูกข่ายที่อยู่ในระยะทางไกลกว่าซึ่งจะส่งผลให้เกิดการรบกวนกันของสัญญาณที่ใช้ช่องสัญญาณร่วมกันในระบบซีดีเอ็มเอ

2.1.2 การบดบัง (Shadowing)

เมื่อมีการแพร่ผ่านของสัญญาณผ่านบริเวณที่มีพื้นที่ใหญ่ๆ ปรากฏการณ์ที่ได้รับผล กระทบจากสภาพภูมิประเทศ เช่น เนิน ต้นไม้ ไร่ ไม้ เป็นต้น ซึ่งอยู่ในช่วงจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับซึ่งส่งผลให้กำลังเฉลี่ยของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงอย่างซ้ำๆ จะได้ว่าทางภาครับจะถูกแสดงออกถึงการถูกบดบัง (Shadowing) จากสภาพภูมิประเทศดังกล่าว โดยการแจกแจงแบบล็อกนอร์มอล จะอธิบายถึงปรากฏการณ์บดบัง (Shadowing) แบบสุ่มซึ่งเกิดขึ้นเหนือตำแหน่งต่างๆ ที่ทำการวัด โดยมีช่วงของภาครับ-ภาคส่งเดียวกันแต่หลายเส้นทางของการแพร่ผ่าน เมื่อกำหนดให้ X เป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ย m และความแปรปรวน σ^2 จะนิยามตัวแปรสุ่ม R ที่มีการแจกแจงแบบล็อกนอร์มอล โดยมีความสัมพันธ์ $R = e^X$ หรือ $X = \ln R$ เพราะฉะนั้นจะได้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของ R ซึ่งมีความน่าจะเป็นที่มีการแจกแจงเป็นล็อกนอร์มอล

$$p(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma r}} \exp\left(-\frac{(\ln r - m)^2}{2\sigma^2}\right), \quad r \geq 0 \quad (2.2)$$

จากความสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่มแบบล็อกนอร์มอล $R = e^X$ หรือ $X = \ln R$ เมื่อ X เป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ย m และความแปรปรวน σ^2 , $X = G(m, \sigma^2)$ เมื่อพิจารณาในการสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนผ่านที่วัดได้จากภาครับในหน่วย dB ซึ่งจะได้เป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ [1] $L(dB) = L_0(dB) + \sigma_c(dB) \times G(0,1) = G(L_0, \sigma_c^2)(dB)$ เมื่อ $L_0(dB)$ เป็นค่ามัธยฐาน (Median value) ของการสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนผ่าน $\sigma_c(dB)$ เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $G(0,1)$ เป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าความแปรปรวนเป็น 1 จากความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถเขียนได้เป็น $L(dB) = L_0(dB) + \sigma_c(dB) \times X$ เมื่อ เพราะฉะนั้นสามารถแสดงการสูญเสียที่เป็นตัวแปรสุ่ม L_a เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_a = 10^{L(dB)/10} = 10^{[L_0(dB) - \sigma_c(dB)X]/10} = L_{0a} * 10^{\sigma_c X/10} \quad (2.3)$$

$$= L_{0a} * V$$

เมื่อนิยามให้ V เป็น $10^{\sigma_c X/10}$ เป็นตัวแปรสุ่มแบบล็อกนอร์มอลและให้ L_{0a} มีค่าเป็น $10^{L_0(dB)/10}$ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าของ L_a นั้นเกิดขึ้นเนื่องมาจากหลายปัจจัยรวมถึงการบิดบังด้วย จาก pdf ของตัวแปรสุ่ม X ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าความแปรปรวนเป็น 1 เพราะฉะนั้นได้ตัวแปรสุ่มแบบล็อกนอร์มอล V เป็น

$$V = 10^{\sigma_c X/10} = e^{\beta \sigma_c X} \quad (2.4)$$

โดย $\beta = (\ln 10)/10 = 0.2303$ เมื่อต้องการหาค่าโมเมนต์ของตัวแปรสุ่มแบบล็อกนอร์มอลที่แสดงถึงการสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนผ่าน (L_{0a}) ได้เป็น

$$L_a = L_{0a} V = L_{0a} e^{\beta \sigma_c X} = e^{\beta(L_0 + \sigma_c X)} \quad (2.5)$$

จะได้โมเมนต์อันดับ k ของ L_a เป็น $E[L_a^k] = \exp\left(k\beta L_0 + \frac{1}{2}k^2\beta^2\sigma_c^2\right)$ เพราะฉะนั้น

$$E[L_a] = L_{0a} e^{\beta^2\sigma_c^2/2} \quad (2.6)$$

$$E[L_a^2] = L_{0a}^2 e^{2\beta^2\sigma_c^2} \quad (2.7)$$

$$\text{Var}\{L_a\} = E[L_a^2] - \{E[L_a]\}^2 = L_{0a}^2 e^{\beta^2\sigma_c^2} \left(e^{\beta^2\sigma_c^2} - 1 \right) \quad (2.8)$$

สมการที่ (2.6) (2.7) และ (2.8) เป็นโมเมนต์อันดับ 1 โมเมนต์อันดับ 2 และความแปรปรวนของ L_a ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การรับสัญญาณจากหลายวิถี (Multipath)

ในการแพร่ผ่านของสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่เป็นสภาวะแวดล้อมที่มีวัตถุที่ทำให้เกิดการสะท้อน การหักเห และการกระเจิง ทำให้สัญญาณเกิดการหลายเส้นทาง และเมื่อมีการหลายเส้นทางดังกล่าวโดยอาจจะมีเฟสของสัญญาณที่ต่างกัน เมื่อรวมสัญญาณหลายวิถีที่มีการเลื่อนเฟสต่างกัดังกล่าวส่งผลให้สัญญาณที่ได้รับรวมมีการลดทอน โดยในกรณีที่มีการหลายเส้นทางดังกล่าวนี้เป็นเส้นทางเหล่าที่เกิดจากการรับสัญญาณจากหลายวิถีทั้งสิ้น โดยไม่ได้มีเส้นทางที่เป็น Line-of-Sight จะได้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่มีการแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh distribution) ส่วนในกรณีที่จำนวนของเส้นทางเหล่านี้มีเส้นทางที่เป็น Line-of-Sight แสดงอยู่ด้วยจะแสดงได้ด้วยค่าฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่มีการแจกแจงแบบโรเซียน (Rician distribution)

ในการลดทอนของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นจะสามารถพิจารณาเป็น 2 ลักษณะ คือ Large-scale fading และ Small-scale fading เมื่อมีการลดทอนกำลังของสัญญาณเฉลี่ย หรือ Path Loss เนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่านบริเวณใหญ่ ๆ จะเป็นในลักษณะที่รับผลกระทบจากสภาพภูมิประเทศระหว่างภาคส่งและภาครับ แล้วจะส่งผลให้เกิด Large-scale fading จะให้การลดทอนของกำลังเฉลี่ยที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง ดังนั้นในลักษณะนี้จะเป็นการอธิบายโดยการสูญเสียเฉลี่ยตามระยะทาง (Mean-path-loss) และมีการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยที่มีการแจกแจงแบบล็อกนอร์มอล การเปลี่ยนแปลงในแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณที่ได้รับจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการรับสัญญาณจากหลายวิถีที่มีการจางหายแบบเร็ว นั้นจะส่งผลให้เกิดการเพดดิ้งแบบ Small-scale fading [2]

2.2 แบบจำลองของช่องสัญญาณ

ในการสื่อสารไร้สายเมื่อส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่มีการเพดดิ้งหลายวิถี จะเกิดการหลายวิถีของสัญญาณ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นดังในรูปที่ 2.2 เมื่อทำการส่งสัญญาณพัลส์เล็กๆ ไปบนช่องสัญญาณแบบหลายวิถีที่มีการแปรผันทางเวลา (Time-varying multipath channel) สัญญาณที่รับได้จะเป็นชบวนพัลส์ ซึ่งแสดงดังในรูป 2.2 จะเห็นได้ว่าเกิดการแผ่กว้างทางเวลา (Time spread) ของสัญญาณที่ถูกส่งผ่านช่องสัญญาณ และอีกคุณสมบัติของช่องสัญญาณแบบหลายวิถีจะขึ้นกับการแปรผันทางเวลาในโครงสร้างของตัวกลางจากผลอันเนื่องมาจากความแปรผันทางเวลานี้เองที่ทำให้คุณลักษณะของช่องสัญญาณแบบหลายวิถีมีการแปรผันทางเวลา นั่นคือถ้าส่งพัลส์ซ้ำไปเรื่อยๆ จะสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงในชบวนพัลส์ที่รับได้ซึ่งมีทั้งการเปลี่ยนแปลงขนาดของแต่ละพัลส์ การเปลี่ยนแปลงทางเวลา (Delay time) ระหว่างพัลส์และที่พบบ่อยที่สุดคือการเปลี่ยนแปลงจำนวนพัลส์ที่สังเกตได้จากชบวนพัลส์ที่รับได้ แสดงดังรูปที่ 2.2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นการแปรผันของเวลาที่เกิดขึ้นกับผู้ใช้ช่องสัญญาณอย่างที่ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าได้ ดังนั้นจึงเป็นการสมเหตุสมผลที่จะกำหนดคุณลักษณะของช่องสัญญาณแบบหลายวิถีที่แปรผันตามเวลาในเชิงสถิติ

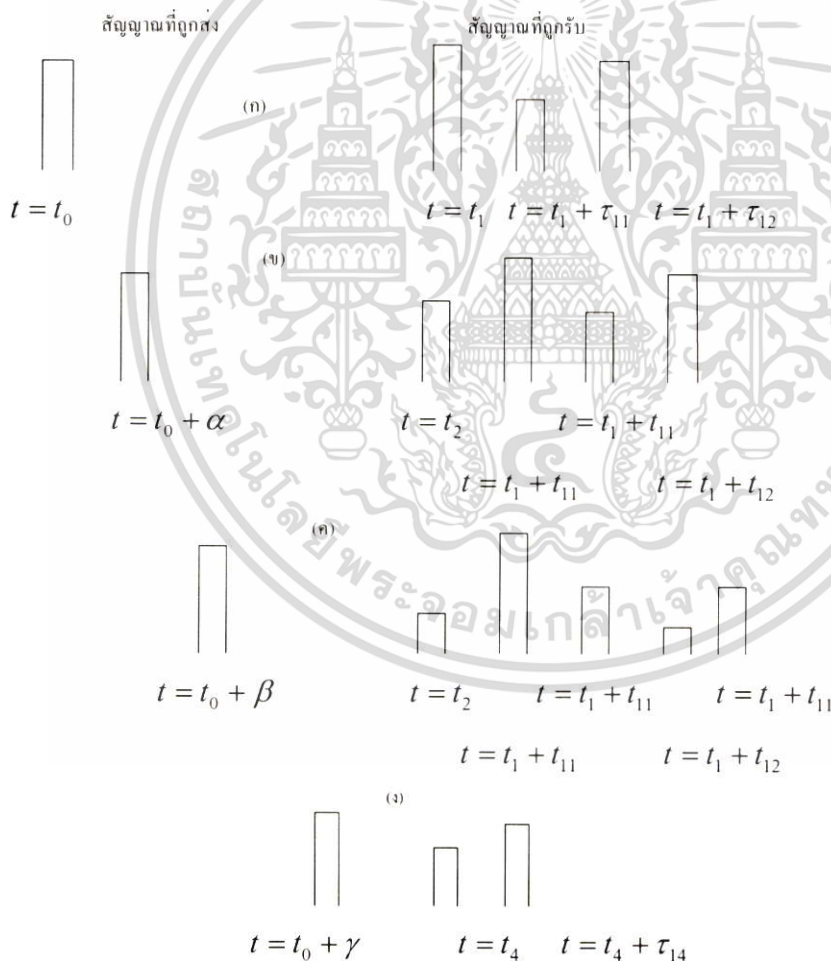
ต่อไปจะพิจารณาถึงผลกระทบของช่องสัญญาณต่อสัญญาณที่ถูกส่งไปซึ่งสัญญาณที่ถูกส่งไป ซึ่งสัญญาณที่ถูกส่งออกไปนั้นสามารถแสดงได้ในสมการ (2.3)

$$S(t) = \text{Re}[S_I(t)e^{j2\pi f_c t}] \quad (2.9)$$

$S(t)$ เป็นสัญญาณที่จะทำการส่งออกไป

$S_I(t)$ เป็นสัญญาณแถบความถี่ต่ำสมมูล (Equivalent low-pass signal)

f_c เป็นความถี่ของสัญญาณพาห้



รูปที่ 2.2. แสดงตัวอย่างการตอบสนองทางเวลาของช่องสัญญาณหลายวิถี

กำหนดให้มีเส้นทางในการแพร่กระจายหลายเส้นทาง แต่ละเส้นสอดคล้องกับเวลาหน่วงของการแพร่กระจาย (Propagation delay) และตัวประกอบการลดทอน (Attenuation factor) โดยทั้งเอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สองตัวประกอบนี้จะมีการแปรผันตามเวลา ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวกลาง ซึ่งสัญญาณแถบผ่าน (Band-pass signal) ที่รับได้ แสดงได้ดังสมการ

$$x(t) = \sum_l \alpha_l(t) s_l[t - \tau_l(t)] \quad (2.10)$$

โดย $\alpha_l(t)$ คือ ตัวประกอบการลดทอนบนเส้นทางที่ l

$\tau_l(t)$ คือ เวลาประวิงการแพร่กระจายในเส้นทางที่ l

เมื่อแทนค่า $s(t)$ จากสมการ (2.9) ลงในสมการ (2.10) จะได้

$$x(t) = \text{Re} \left\{ \left[\sum_l \alpha_l(t) e^{-j2\pi f_c t} s_l[t - \tau_l(t)] \right] e^{j2\pi f_c t} \right\} \quad (2.11)$$

และจากสมการที่ (2.11) จะแสดงได้ว่าสัญญาณแบบผ่านต่ำสมมูลทางด้านรับ (Equivalent low-pass signal) แสดงได้ดังสมการ

$$r_L(t) = \sum_l \alpha_l(t) e^{-j2\pi f_c t} s_l[t - \tau_l(t)] \quad (2.12)$$

โดยที่ $r_L(t)$ คือ ผลตอบสนองของช่องสัญญาณแบบผ่านต่ำสมมูล ต่อสัญญาณแบบผ่านต่ำสมมูล $s_l(t)$ ดังนั้นในช่องสัญญาณแบบผ่านต่ำสมมูล (Equivalent low-pass channel) แสดงได้ดังรูปของผลตอบสนองอิมพัลส์ที่มีการแปรผันตามเวลาดังแสดงในสมการ

$$c(\tau; t) = \sum_l \alpha_l(t) e^{-j2\pi f_c t} \delta[t - \tau_l(t)] \quad (2.13)$$

เมื่อการตอบสนองอิมพัลส์ $c(\tau; t)$ เป็นการถูกจำลองเป็น กระบวนการสุ่มเชิงซ้อนแบบเกาส์ (Complex-valued Gaussian random process) แล้วแอมพลิจูด $|c(\tau; t)|$ ที่เวลา t ใด ๆ สามารถจำลองได้ด้วยแบบจำลองช่องสัญญาณต่างๆ ซึ่งฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability density function: PDF) มีหลายลักษณะดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การแจกแจงเรย์ลี (Rayleigh distribution)

เมื่อสัญญาณเฟดดิ้งหลายวิถีมีแต่เส้นทางที่ไม่ได้เป็น Line-Of-Sight ซึ่งจำลองการสื่อสารไร้สายกับสภาพแวดล้อมในชนบท การสื่อสารวิทยุแบบรังผึ้ง (Cellular radio) จะแสดงด้วยค่าฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นในสมการ

$$p_R(r) = \frac{2r}{\Omega} e^{-r^2/\Omega} \quad (2.14)$$

โดย $\Omega = E[R^2]$ เมื่อ $E[x]$ เป็น Expectation ของ x

2.2.2 การแจกแจงไรเซียน (Rician distribution)

เมื่อสัญญาณหลายวิถีมีเส้นทางที่เป็น Line-of-Sight รวมอยู่ด้วย ซึ่งเป็นการจำลองกับสภาพแวดล้อมในการสื่อสารการสื่อสารเคลื่อนที่ภาคพื้นดินไมโครเซลลูลาร์ (Microcellular land mobile) การสื่อสารไร้สายภายในอาคาร และสภาพแวดล้อมภายในอาคาร จะแสดงด้วยค่าฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นในสมการ

$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-(r^2+s^2)/2\sigma^2} I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right) \quad (2.15)$$

2.2.3 การแจกแจงนาคากามิ (Nakagami distribution)

เป็นแบบจำลองที่สอดคล้องกับทั้งในชนบทและในเมืองเหมาะสำหรับการแพร่กระจายของการสื่อสารเคลื่อนที่ภาคพื้นดินและการสื่อสารเคลื่อนที่ภายในอาคาร ซึ่งแสดงได้ด้วยค่าฟังก์ชันความหนาแน่นจะเป็นในสมการ

$$p_R(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m r^{2m-1} e^{-mr^2/\Omega} \quad (2.16)$$

โดย $m = \frac{\Omega^2}{E[(R^2 - \Omega)^2]}$ และ $\Omega = E(R^2)$

ในแบบจำลองนาคากามินี้ยังสามารถอธิบายแบบจำลองอื่นๆ ได้ด้วย ถ้าพารามิเตอร์ m ของสมการในแบบจำลองนาคากามินี้มีค่าเป็น $m = 1$ แสดงว่าเป็นการแจกแจงแบบเรย์ลี และถ้า $m = 0.5$ แสดงว่าเป็นการแจกแจงแบบเกาส์ซ้างเดี่ยว ส่วนถ้า $m \rightarrow \infty$ แสดงว่าเป็นกรณีในอุดมคติที่ไม่มีการผิดเพี้ยนของสัญญาณ

2.3 ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ของช่องสัญญาณและสเปกตรัมกำลัง

ได้มีการหาฟังก์ชันเหล่านี้เพื่อใช้นิยามคุณลักษณะของช่องสัญญาณการจางหายหลายวิถี จากสมการผลตอบสนองอิมพัลส์ที่มีการแปรผันตามเวลาในสมการที่ (2.13)

$$c(\tau; t) = \sum_l \alpha_l(t) e^{-j2\pi f_l \tau} \delta[t - \tau_l(t)] \quad (2.17)$$

ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Correlation function) และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (Power spectral density) สามารถใช้เป็นตัวกำหนดคุณลักษณะของช่องสัญญาณเฟดดิ้งหลายวิถีได้เมื่อพิจารณาผลตอบสนองต่ออิมพัลส์แบบผ่านต่ำสมมูล $c(\tau; t)$ ซึ่งเป็นกระบวนการสุ่มเชิงซ้อนแบบเกาส์ (Complex-valued Gaussian random process) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และสมมติให้ $c(\tau; t)$ มีลักษณะคงที่แบบกว้าง (Wide-sense stationary) ดังนั้นฟังก์ชันอัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function) ของ $c(\tau; t)$ แสดงได้ดังสมการ (2.18)

$$\phi_c(\tau_1, \tau_2, \Delta t) = \frac{1}{2} E[c(\tau_1; t) c(\tau_2; t + \Delta t)] \quad (2.18)$$

สำหรับตัวกลางในการรับส่งสัญญาณวิทยุส่วนมากนั้น การลดทอน (Attenuation) และการเลื่อนเฟส (Phase shift) ของช่องสัญญาณที่สัมพันธ์กับการประวิง τ_1 นั้น จะไม่สัมพันธ์กับการลดทอนและการเลื่อนเฟสที่สัมพันธ์กับการหน่วง τ_2 ซึ่งกรณีนี้เรียกว่า การกระจัดกระจายแบบไม่สหสัมพันธ์ (Uncorrelated scattering) เขียนได้เป็น

$$\frac{1}{2} E[c(\tau_1; t) c(\tau_2; t + \Delta t)] = \phi_c(\tau_1; \Delta t) \delta(\tau_1 - \tau_2) \quad (2.19)$$

พิจารณาที่ $\Delta t = 0$ ผลของฟังก์ชันอัตสหสัมพันธ์ $\phi_c(\tau_1; \Delta t) = \phi_c(\tau)$ ซึ่งก็คือ กำลังงานเอทพุทเฉลี่ยของช่องสัญญาณ ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาประวิง τ แล้ว $\phi_c(\tau)$ จึงถูกเรียกว่ารูปร่างความเข้มของการรับสัญญาณจากหลายวิถี (Multipath Intensity Profile: MIP) ของช่องสัญญาณ โดย

ทั่วไปแล้ว $\phi_c(\tau, \Delta t)$ จะแสดงกำลังงานเอทพุทเฉลี่ยในรูปฟังก์ชันของเวลาหน่วง τ และความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการสังเกต Δt

ในการพิจารณาถึง MIP เมื่อช่องสัญญาณที่ใช้ในการพิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นแบบ การจางหายช้าแบบเรย์ลีและเป็นช่องสัญญาณที่เจาะจงความถี่ (Slowly-varying Frequency - Selective Rayleigh Fading Channel) ที่มีการตอบสนองของช่องสัญญาณตามสมการ (2.20) [3]

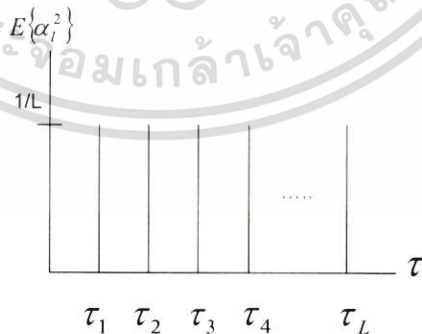
$$c(\tau; t) = \sum_{l=1}^L \alpha_l(t) e^{-j2\pi f_c \tau} \delta[t - \tau_l(t)] \quad (2.20)$$

โดยกำหนดให้ได้จำนวนของเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้เป็น L เส้นทาง (L-Resolvable Paths) เมื่อกำหนดให้สถิติของการเฟดดิ้ง (Fading statistics) แต่ละผู้ใช้งานของช่องสัญญาณเหมือนกัน ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของกำลังที่รับได้ในแต่ละเส้นทางที่แก้ไขได้จะเท่ากันและกำหนดให้เท่ากันสำหรับผู้ใช้งานทั้งหมด สามารถเรียกได้ว่า MIP นั้นเป็นแบบ Uniform MIP ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อกำหนดให้ไม่มีการสูญเสียของกำลังงานส่วนใหญ่ เพราะฉะนั้น

$$\sum_{l=1}^L E\{\alpha_l^2\} = 1 \quad (2.21)$$

จากคุณสมบัติเป็น Uniform MIP โดยค่าเฉลี่ยของกำลังที่รับได้ในแต่ละเส้นทางที่แก้ไขได้จะเท่ากันในแต่ละเส้นทาง เพราะฉะนั้น

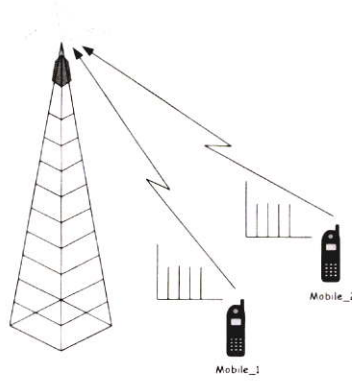
$$E\{\alpha_l^2\} = \frac{1}{L} \quad (2.22)$$



รูปที่ 2.3 แสดง Multipath Intensity Profile ที่เป็นแบบ Uniform, (Uniform MIP)

โดยในแบบจำลองที่แสดงถึง Uniform MIP ในการเชื่อมโยงขากลับจะสามารถแสดงได้ดังรูป 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงถึงแบบจำลองของ Uniform MIP ในการเชื่อมโยงส่วนUplinkของระบบ

ในทางปฏิบัติฟังก์ชัน $\phi_c(\tau, \Delta t)$ จะวัดได้โดยการส่งพัลส์ช่วงแคบมากๆ หรือสัญญาณแบนด์กว้าง (Wideband signal) และทำการสหสัมพันธ์ข้าม (Cross-correlation) สัญญาณที่รับได้ด้วยตัวสัญญาณนั่นเองที่ถูกประวิงเวลาออกไป โดยปกติแล้วฟังก์ชัน $\phi_c(\tau)$ ที่วัดได้จะปรากฏเป็นลักษณะเอ็กโพเนนเชียล นั่นคือขนาดของ $\phi_c(\tau)$ จะมีค่าลดลงในลักษณะเอ็กโพเนนเชียลเมื่อค่า τ มีค่าเพิ่มขึ้นช่วงของค่า τ ซึ่ง $\phi_c(\tau)$ มีค่าไม่เป็นศูนย์จะเรียกว่า การแผ่กระจายสัญญาณจากหลายวิถี (Multipath spread) ของช่องสัญญาณ แทนด้วย T_m

การแสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณแบบหลายวิถีที่แปรผันตามเวลาในโดเมนของความถี่ก็สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ของ $c(\tau; t)$ จะได้ฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer function) ที่แปรผันตามเวลา $c(f; t)$ เมื่อ f เป็นตัวแปรของความถี่ดังนี้

$$c(f; t) = \int_{-\infty}^{\infty} c(\tau; t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2.23)$$

เนื่องจาก $c(\tau; t)$ เป็นกระบวนการสุ่มเชิงซ้อนแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ในตัวแปร t ดังนั้น $c(f; t)$ ก็จะมีคุณลักษณะทางสถิติที่เหมือนกันด้วย ด้วยเหตุนี้ภายใต้การสมมติว่าช่องสัญญาณมีลักษณะคงที่ในแนวกว้าง (Wide-sense stationary) จึงสามารถหาฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์ (Autocorrelation) ได้เป็น

$$\phi_c(f_1, f_2; \Delta t) = \frac{1}{2} E[C^*(f_1; t)C(f_2; t + \Delta t)] \quad (2.24)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก $c(f;t)$ เป็นการแปลงฟูเรียร์ของ $c(\tau;t)$ แล้วก็พบว่า $\phi_c(f_1, f_2; \Delta t)$ ก็จะสัมพันธ์กับ $\phi_c(\tau, \Delta t)$ โดยการแปลงฟูเรียร์เช่นกัน ดังนั้นเมื่อแทนสมการที่ (2.23) ลงในสมการที่ 2.24 จะได้

$$\begin{aligned}\phi_c(f_1, f_2; \Delta t) &= \frac{1}{2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int E[c^*(\tau_1; t)c(\tau_2; t + \Delta t)] e^{j2\pi(f_1\tau_1 - f_2\tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 \\ &= \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int \phi_c(\tau_1; \Delta t) \delta(\tau_1 - \tau_2) e^{j2\pi(f_1\tau_1 - f_2\tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \phi_c(\tau_1; \Delta t) e^{j2\pi(f_1 - f_2)\tau_1} d\tau_1 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \phi_c(\tau_1; \Delta t) e^{j2\pi\Delta f\tau_1} d\tau_1 \equiv \phi_c(\Delta f; \Delta t)\end{aligned}\quad (2.25)$$

เมื่อ $\Delta f = f_1 - f_2$ จากสมการที่ (2.25) สังเกตว่า $\phi_c(\Delta f; \Delta t)$ เป็นการแปลงฟูเรียร์ของ MIP นอกจากนั้นจากการสมมติว่าเป็นการกระเจิงแบบไม่สัมพันธ์กันแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันอัตโนมัติสัมพันธ์ของ $C(f;t)$ เป็นเพียงฟังก์ชันของความแตกต่างทางความถี่ $\Delta f = f_1 - f_2$ ดังนั้นจึงเป็นการเหมาะสมที่จะเรียก $\phi_c(\Delta f; \Delta t)$ ว่าเป็นฟังก์ชันสหสัมพันธ์สเปซทางความถี่-สเปซทางเวลา (Space-Frequency correlation) ของช่องสัญญาณ

สมมติว่า $\Delta t = 0$ ในสมการ (2.25) รวมทั้ง $\phi_c(\Delta f; 0) \equiv \phi_c(\Delta f)$ และ $\phi_c(\tau; 0) \equiv \phi_c(\tau)$ จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\phi_c(\Delta f) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_c(\tau) e^{j2\pi\Delta f\tau} d\tau \quad (2.26)$$

ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.24) เนื่องจาก $\phi_c(\Delta f)$ เป็นฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวแปรของความถี่ จึงเป็นการแสดงให้เห็นถึงการวัดความถี่ร่วมนัย (Coherence frequency) ของช่องสัญญาณ จากผลของความสัมพันธ์ในการแปลงฟูเรียร์ระหว่าง $\phi_c(\Delta f)$ และ $\phi_c(\tau)$ จะให้ผลในทำนองเดียวกันว่า การแผ่ออกרבสัญญาณจากหลายวิถี (Multipath spread) นั้นเป็นการวัดแบนด์วิดท์ร่วมนัย (Coherence bandwidth) ของช่องสัญญาณนั้นคือ

$$(\Delta f)_c \approx \frac{1}{T_m} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $(\Delta f)_c$ แสดงแบนด์วิดท์รวมนัย ด้วยเหตุนี้สัญญาณไชน์ 2 สัญญาณที่มีความถี่ต่างกันมากกว่า $(\Delta f)_c$ จะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณต่างกัน เมื่อทำการส่งสัญญาณข่าวสารผ่านช่องสัญญาณ ถ้า $(\Delta f)_c$ มีค่าน้อยกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ถูกส่งออกไปจะเรียกช่องสัญญาณนั้นว่าช่องสัญญาณแบบเจาะจงความถี่ (Frequency selective channel) สำหรับกรณีนี้ช่องสัญญาณจะทำให้สัญญาณที่ส่งออกไปนั้นมีความผิดเพี้ยนอย่างรุนแรง แต่ถ้า $(\Delta f)_c$ มีค่ามากกว่าแบนด์วิดท์ที่ถูกส่งออกไปจะเรียกช่องสัญญาณนั้นว่า ช่องสัญญาณไม่เจาะจงความถี่ (Frequency-nonselective)

2.4 ผลของคุณลักษณะของสัญญาณต่อแบบจำลองของช่องสัญญาณ

ต่อไปจะพิจารณาถึงผลกระทบของคุณลักษณะของสัญญาณต่อการเลือกแบบจำลองของสัญญาณให้เหมาะสมกับสัญญาณที่ต้องการส่งออกไป ให้ $u(t)$ เป็นสัญญาณความถี่ต่ำต่ำสมมูล (Equivalent low-pass signal) ที่ถูกส่งออกไปในช่องสัญญาณและให้ $U(f)$ แสดงสัญญาณ $u(t)$ ในโดเมนความถี่ ดังนั้นสัญญาณแถบความถี่ต่ำสมมูลของสัญญาณที่รับได้ (ในที่นี้จะไม่พิจารณาถึงส่วนของสัญญาณรบกวนที่เพิ่มเข้ามา)

$$r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} c(\tau; t) u(t - \tau) d\tau \quad (2.28)$$

หรือในฟังก์ชันของความถี่ $C(f; t)$ และ $U(f)$ ดังนี้

$$r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} C(f; t) U(f) e^{j2\pi ft} df \quad (2.29)$$

สมมติว่าทำการส่งสัญญาณข้อมูลดิจิทัลไปบนช่องสัญญาณโดยการมอดูเลต (อาจเป็นการมอดูเลตทางแอมพลิจูด ทางเฟส หรือมอดูเลตทั้งทางแอมพลิจูดและเฟส) พัลส์ $u(t)$ ด้วยอัตรา $\frac{1}{T}$ เมื่อ T เป็นช่วงเวลาของสัญญาณ จากสมการที่ (2.29) จะเห็นได้ว่าช่องสัญญาณที่แปรผันตามเวลาซึ่งแสดงด้วยฟังก์ชันถ่ายโอน $C(f; t)$ จะทำให้สัญญาณ $U(f)$ เกิดความผิดเพี้ยน ถ้า $U(f)$ มีแบนด์วิดท์ W ที่มีค่ามากกว่าแบนด์วิดท์รวมนัย $(\Delta f)_c$ ของช่องสัญญาณ $U(f)$ จะได้รับอัตราขยายและการเลื่อนเฟสจากช่องสัญญาณต่างๆกันตลอดย่านความถี่ ซึ่งกรณีนี้เรียกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่อง สัญญาณดังกล่าวว่าช่องสัญญาณแบบเจาะจงความถี่ ความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นอีกชนิดหนึ่งคือ การแปรผันความแรงของช่องสัญญาณ ที่รับได้ซึ่งเรียกว่าการจางหายของสัญญาณ

ผลกระทบของช่องสัญญาณต่อสัญญาณที่ส่งออกไป $u(t)$ จะเป็นฟังก์ชันของแบนด์วิดท์ของ สัญญาณและช่วงกว้างของสัญญาณ (Signal duration) ตัวอย่างเช่น ถ้าเลือกช่วงกว้างให้ได้ เงื่อนไข $T \gg T_m$ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Intersymbol Interference) ถ้าแบนด์วิดท์ของสัญญาณพัลส์ $u(t)$ เป็น $W \approx \frac{1}{T}$ จะได้ว่า

$$W \ll \frac{1}{T_m} \approx (\Delta f)_c \quad (2.30)$$

นั่นคือแบนด์วิดท์ของสัญญาณ W มีค่าน้อยกว่าแบนด์วิดท์รวมนัยของช่องสัญญาณมากๆ ดังนั้นจะเป็นช่องสัญญาณแบบไม่เจาะจงความถี่ สำหรับกรณีนี้องค์ประกอบทางความถี่ทั้งหมด ใน $U(f)$ จะถูกลดทอนและมีการเลื่อนเฟสที่เหมือนกันในการส่งผ่านช่องสัญญาณ นั่นหมายความว่าองค์ประกอบของสัญญาณจากหลายเส้นทางนั้นไม่สามารถถูกพิจารณาแยกออกเป็นพีคที่ต่าง กันได้เพราะ $W \ll (\Delta f)_c$

เนื่องจากองค์ประกอบของสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทางในสัญญาณที่รับได้ จะไม่สามารถ แยกกันได้เมื่อแบนด์วิดท์ของสัญญาณ W มีค่าน้อยกว่าแบนด์วิดท์รวมนัย $(\Delta f)_c$ ของช่อง สัญญาณ สัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับจะปรากฏเป็นสัญญาณที่เดินทางผ่านเส้นทางจางหาย เพียงเส้นทางเดียว แต่ในทางกลับกันเมื่อทำให้ $W \gg (\Delta f)_c$ นั่นคือเป็นช่องสัญญาณแบบ เจาะจงความถี่ ภายใต้เงื่อนไของค์ประกอบของสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทางในสัญญาณที่ รับได้สามารถจะปรากฏเป็นพีคของสัญญาณต่างๆ กัน ถ้าสัญญาณในแต่ละเส้นทางนั้นมีเวลา ประวิงมากกว่าหรือเท่ากับ $\frac{1}{W}$ ดังนั้นช่องสัญญาณแบบเจาะจงความถี่นี้สามารถจำลองได้เป็น ช่องสัญญาณแบบสายการประวิงเวลาแบบจุดต่อแยก (Tapped Delay Line) โดยมีสัมประสิทธิ์ ของแต่ละจุดต่อแยกแปรผันตามเวลา ซึ่งจะได้ทำการพิสูจน์สมรรถนะของช่องสัญญาณไบนารี ผ่านแบบจำลองช่องสัญญาณแบบเจาะจงความถี่

2.5 สัญญาณดิจิทัลบนช่องสัญญาณที่เจาะจงความถี่และมีการจางหายแบบช้า

เมื่อองค์ประกอบของการกระจาย (Spread factor) ของช่องสัญญาณสอดคล้องกับเงื่อนไข $T_m B_d \ll 1$ ก็จะมีความเป็นไปได้ที่จะเลือกแบนด์วิดท์ของสัญญาณให้ $W \ll (\Delta f)_c$ และ ระยะเวลา ของสัญญาณ (signal duration) $T \ll (\Delta t)_c$ ดังนั้นช่องสัญญาณแบบนี้จึงเป็นช่อง สัญญาณที่ไม่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจาะจงความถี่และมีการเฟดดิ้งแบบช้า ในช่องสัญญาณดังกล่าวนี้การใช้เทคนิคของไดเวอร์ซิตีในการแก้ปัญหาการเฟดดิ้งได้

เมื่อแบนด์วิดท์ของสัญญาณของผู้ใช้ $W \gg (\Delta f)_c$ ช่องสัญญาณสามารถถูกแบ่งเป็นการมัลติเพล็กซ์ของช่องสัญญาณย่อยที่มีการแยกกันของระหว่างความถี่กลางอย่างน้อยที่สุด $(\Delta f)_c$ ดังนั้นสัญญาณเดียวกันสามารถจะถูกส่งผ่านบนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งทางความถี่ (Frequency division multiplexed (FDM) subchannel) ของช่องสัญญาณย่อยได้ และนั่นก็เป็นการใช้ไดเวอร์ซิตีทางความถี่

2.6 เทคนิคของการใช้ไดเวอร์ซิตีสำหรับช่องสัญญาณการกระจายแบบหลายเส้นทาง

เทคนิคของไดเวอร์ซิตีได้ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงเรื่องความผิดพลาดในการรับสัญญาณเมื่อการลดทอนของช่องสัญญาณมีค่ามากเช่น เมื่อช่องสัญญาณมีการกระจายของสัญญาณอย่างรุนแรง ถ้าสามารถใช้แบบจำลองของช่องสัญญาณข้อมูลหลายๆแบบจำลองที่ถูกส่งผ่านช่องสัญญาณที่มีการกระจายของสัญญาณอย่างเป็นอิสระต่อกันที่เครื่องรับ ความน่าจะเป็นที่องค์ประกอบของสัญญาณทั้งหมดจะมีการกระจายในเวลาเดียวกันนั้นสามารถลดลงได้ นั่นคือถ้า p เป็นความน่าจะเป็นที่สัญญาณใด สัญญาณหนึ่งจะเกิดการกระจายภายใต้ค่าวิกฤตค่าหนึ่ง ดังนั้น p^L จะเป็นความน่าจะเป็นที่ L แบบจำลองของสัญญาณเดียวกันนั้นเกิดการกระจายโดยเป็นอิสระต่อกันภายใต้ค่าวิกฤตค่าดังกล่าว วิธีการที่จะทำให้ได้ L แบบจำลองของสัญญาณที่เหมือนกันนั้นเกิดการกระจายเป็นอิสระต่อกันที่เครื่องรับสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทำไดเวอร์ซิตีทางความถี่ (frequency diversity) ทำได้โดยการส่งสัญญาณเดียวกันไปบนความถี่พาห้ทั้งหมด L ความถี่ โดยที่แต่ละความถี่แยกจากกันเท่ากับหรือมากกว่าแบนด์วิดท์รวมกัน (coherent bandwidth, $(\Delta f)_c$) ของช่องสัญญาณ วิธีต่อมาเป็นการส่งสัญญาณเดียวกันไปในไทม์สล็อต (time slot) ต่างๆ จำนวน L ไทม์สล็อต โดยแต่ละไทม์สล็อตแยกจากกันเท่ากับหรือมากกว่าเวลารวมกัน (coherent time, $(\Delta t)_c$) ของช่องสัญญาณ วิธีนี้เรียกว่า การทำไดเวอร์ซิตีทางเวลา (time diversity) มีอีกวิธีหนึ่งที่มีการใช้กันโดยทั่วไปคือการใส่สายอากาศหลายๆ อัน ตัวอย่างเช่น ใช้สายอากาศส่งเพียงอันเดียวแต่ใช้สายอากาศรับหลายๆอัน โดยที่สายอากาศรับจะต้องมีระยะห่างกันมากเพียงพอที่องค์ประกอบจากหลายเส้นทางในสัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศมีเวลาการหน่วงในการแพร่กระจาย (propagation delay) ต่างกัน โดยทั่วไประยะห่างระหว่างสายอากาศสองอันต้องแยกห่างกันอย่างน้อย 10 เท่าของความยาวคลื่นเพื่อที่จะให้ได้สัญญาณที่เกิดการกระจายที่เป็นอิสระต่อกันและอีกวิธีในการใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตี คือ จะอาศัยหลักการใช้สัญญาณที่มีแบนด์วิดท์มากกว่าแบนด์วิดท์รวมกัน $(\Delta f)_c$ ของช่องสัญญาณมากๆ สัญญาณดังกล่าวซึ่งมีแบนด์วิดท์ W สามารถจะมีองค์ประกอบจากหลายเส้นทางต่างๆ กันได้ ด้วยเหตุนี้ทำให้เครื่องรับสามารถรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณซึ่งมีเส้นทางของสัญญาณการจางหายหลาย ๆ เส้นทางโดยมีการจางที่เป็นอิสระต่อกัน และมีเวลาที่สามารถแยกความแตกต่างของสัญญาณในแต่ละเส้นทาง (time resolution) ได้เป็น $1/W$ ดังนั้นถ้าการกระจายหลายเส้นทาง (Multipath spread) เป็น T_m วินาที จะมีองค์ประกอบของสัญญาณต่างๆ ซึ่งแยกออกจากกันเป็น $T_m W$ องค์ประกอบ เนื่องจาก $T_m \approx 1/(\Delta f)_c$ จำนวนองค์ประกอบของสัญญาณต่างๆ ซึ่งแยกออกจากกันสามารถแสดงได้เป็น $W/(\Delta f)_c$ ด้วยเหตุนี้การใช้สัญญาณแบนด์กว้างจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งในการที่จะทำให้ได้ไวด์แบนด์ที่ทางความถี่ซึ่งมีค่า $L \approx W/(\Delta f)_c$ เครื่องรับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประมวลผลสัญญาณแบนด์กว้างนี้ เรียกว่า เครื่องรับแบบเรค (RAKE Receiver) ซึ่งนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง

2.6.1 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบสายการประวิงเวลาแบบจุดต่อแยก (Tapped Delay Line)

เมื่อแบนด์วิดท์ของสัญญาณมีค่า W และช่องสัญญาณยังคงสมมติฐานให้เป็นการเฟดดิ้งแบบช้า โดย $T \ll (\Delta t)_c$ สมมติให้ W เป็นแบนด์วิดท์ของสัญญาณแถบผ่าน (Band-pass Signal) ดังนั้นแถบที่ใช้ของสัญญาณผ่านต่ำสมมูล $s_l(t)$ เป็น $|f| \leq \frac{1}{2}W$ เมื่อ $s_l(t)$ ถูกจำกัดแถบโดย $|f| \leq \frac{1}{2}W$ การประยุกต์ใช้ทฤษฎีการสุ่ม (sampling theory) ส่งผลให้สัญญาณแสดงดังสมการ [3]

$$s_l(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_l\left(\frac{n}{W}\right) \frac{\sin[\pi W(t - n/W)]}{\pi W(t - n/W)} \tag{2.31}$$

แล้วการแปลงฟูเรียร์ของ $s_l(t)$ จะเป็น

$$S_l(f) = \begin{cases} \frac{1}{W} \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_l\left(\frac{n}{W}\right) e^{j2\pi n/W} & (|f| \leq \frac{1}{2}W) \\ 0 & (|f| > \frac{1}{2}W) \end{cases} \tag{2.32}$$

สัญญาณที่ถูกรับโดยไม่มีสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณแบบเจาะจงความถี่จะอยู่ในรูปของ

$$r_l(t) = \int_{-\infty}^{\infty} C(f;t) S_l(f) e^{j2\pi f t} df \tag{2.33}$$

โดย $C(f;t)$ เป็นฟังก์ชันการถ่ายโอนที่มีการแปรผันตามเวลา เพราะฉะนั้นจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 r_i(t) &= \frac{1}{W} \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_i\left(\frac{n}{W}\right) \int_{-\infty}^{\infty} C(f;t) e^{j2\pi ft} df \\
 &= \frac{1}{W} \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_i\left(\frac{n}{W}\right) c(t - n/W; t)
 \end{aligned} \tag{2.34}$$

โดย $C(f;t)$ เป็นการตอบสนองของอิมพัลส์ที่มีการแปรผันตามเวลา สังเกตได้ว่าสมการมีรูปแบบของผลรวมของการประสาน(Convolution) ดังนั้นสามารถที่จะแสดงในอีกรูปแบบหนึ่งได้เป็น

$$r_i(t) = \frac{1}{W} \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_i(t - n/W) c(n/W; t) \tag{2.35}$$

เป็นการสะดวกที่จะกำหนดให้ค่าของสัมประสิทธิ์ของการแปรผันตามเวลาของช่องสัญญาณเป็น

$$c_n(t) = \frac{1}{W} c\left(\frac{n}{W}; t\right) \tag{2.36}$$

ดังนั้นสามารถแสดงในเทอมของสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณได้เป็น

$$r_i(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n(t) s_i(t - n/W) \tag{2.37}$$

ในการที่จะแสดงสมการของสัญญาณที่รับได้นั้นจะบ่งชี้ว่าช่องสัญญาณที่เจาะจงความถี่สามารถที่จะจำลองเป็นสายการประวิงเวลาแบบจุดต่อแยกช่วงกว้างของจุดต่อแยกเป็น $1/W$ และมีสัมประสิทธิ์ของการถ่วงน้ำหนักของจุดต่อแยก (Tap weight coefficient) เป็น $\{c_n(t)\}$ ในความเป็นจริง สามารถลดรูปเป็นการตอบสนองอิมพัลส์แบบแถบความถี่ต่ำผ่านสำหรับช่องสัญญาณเป็น

$$c_n(f;t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n(t) \delta(t - n/W) \tag{2.38}$$

และสอดคล้องกับฟังก์ชันการถ่ายโอนที่มีการแปรผันตามเวลาเป็น

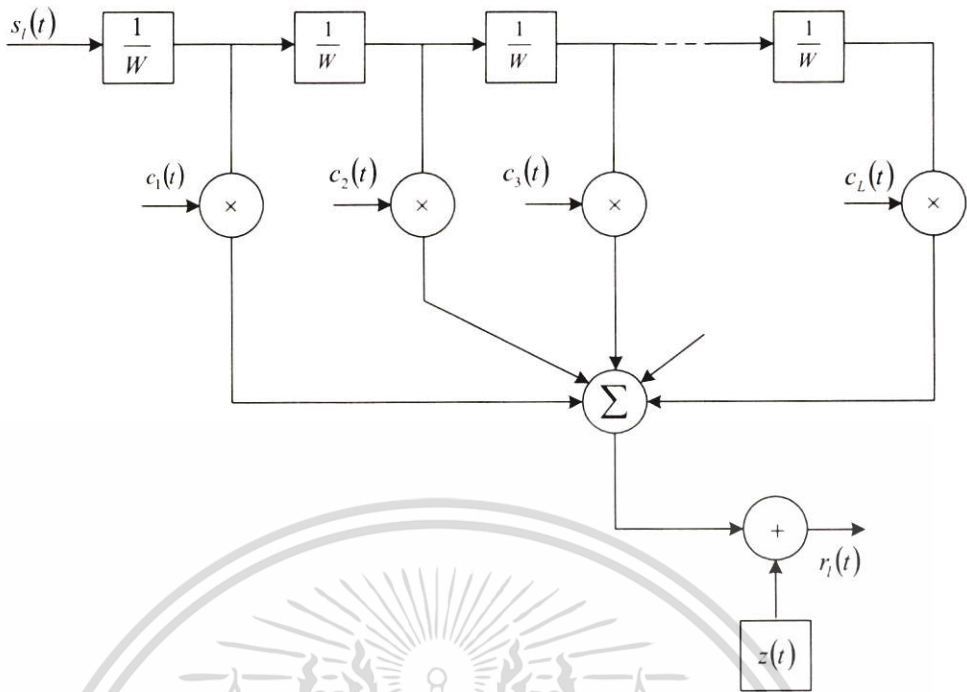
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C(f;t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n(t) e^{-j2\pi fn/W} \quad (2.39)$$

ดังนั้น ด้วยสัญญาณผ่านต่ำสมมูล (Equivalent low-pass signal) ที่มีแบนด์วิดท์ $\frac{1}{2}W$ โดย $W \gg (\Delta f)_c$ จะได้รับการแยกชัด (resolution) ของรูปร่างความหนาแน่นของการหลายเส้นทาง (Multipath Intensity Profile, MIP) เป็น $1/W$ ดังนั้นการกระจายการหลายเส้นทางทั้งหมดเป็น T_m ดังนั้นในทางปฏิบัติของแบบจำลองสายการประวิงเวลาแบบจุดต่อแยกสำหรับช่องสัญญาณนั้น จะมีจำนวนจุดต่อแยก (tap) จำกัดอยู่ที่ $L = \lfloor T_m W \rfloor + 1$ ดังนั้นสัญญาณที่ถูกรับโดยไม่มีสัญญาณรบกวนสามารถจะถูกแสดงในรูปของ

$$r_l(t) = \sum_{n=1}^L c_n(t) s_l\left(t - \frac{n}{W}\right) \quad (2.40)$$

แบบจำลองสายการประวิงเวลาแบบจุดต่อแยก แสดงดังรูป 2.6 ที่ถูกต้องตามคุณลักษณะทางสถิติของช่องสัญญาณแสดงดังรูป จากที่กล่าวข้างต้น ค่าถ่วงน้ำหนักจุดต่อแยกที่แปรผันตามเวลา $\{c_n(t)\}$ จะเป็นกระบวนการสุ่มเชิงซ้อนแบบเกาส์ (complex-value stationary Gaussian random process) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ขนาดของ $\{c_n(t)\}$ คือ $|c_n(t)| \equiv \alpha_n(t)$ มีการแจกแจงเป็นแบบเรย์ลีย์และเฟส $\phi_n(t)$ มีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ เนื่องจาก $\{c_n(t)\}$ เป็นค่าถ่วงน้ำหนักจุดต่อแยกซึ่งสอดคล้องกับเวลาประวิง $\tau = n/W$ ของเส้นทางต่างๆทั้งหมด L เส้นทาง เมื่อ $n = 1, 2, \dots, L$ จากการสมมติว่าเป็นการกระเจิงแบบไม่สัมพันธ์กัน แสดงให้เห็นว่า $\{c_n(t)\}$ ของแต่ละเส้นทางจะไม่สัมพันธ์กันด้วย แต่เนื่องจาก $\{c_n(t)\}$ เป็นกระบวนการสุ่มแบบเกาส์ (Gaussian random process) ดังนั้น $\{c_n(t)\}$ ของแต่ละเส้นทางจึงมีความเป็นอิสระทางสถิติต่อกัน



รูปที่ 2.5 แสดงช่องสัญญาณเจาะจงความถี่แบบจำลองสายการประวิงเวลาแบบจุดต่อแยก (Tap delay line)

2.6.2 เครื่องรับแบบ RAKE บนช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเจาะจงความถี่

ในการพิจารณาปัญหาของการส่งสัญญาณดิจิทัลไปบนช่องสัญญาณแบบเจาะจงความถี่ที่ถูกจำลองเป็นแบบสายการประวิงเวลาแบบจุดต่อแยก (tapped delay line) โดยมีค่าถ่วงน้ำหนักของจุดต่อแยกเป็น $\{c_n(t)\}$ ที่แปรผันตามเวลาโดยมีความอิสระต่อกันทางสถิติ การที่แบบจำลองดังกล่าวนี้มีค่าถ่วงน้ำหนักของจุดต่อแยกที่เป็นอิสระต่อกันทางสถิตินี้จะทำให้เครื่องรับทำการรับสัญญาณที่ถูกส่งมาจากเครื่องส่งโดยแยกเป็น L สัญญาณตามจำนวนของจุดต่อแยก ด้วยเหตุที่เครื่องรับสามารถทำการประมวลได้อย่างเหมาะสมจะทำให้ได้ระบบสื่อสารที่สมมูลกับระบบโดเวอร์ซิตีที่มีจำนวนสาขา L สาขา สมมติว่ามีสัญญาณไบนารีที่มีพลังงานเท่ากัน 2 สัญญาณคือ $u_1(t)$ และ $u_2(t)$ ซึ่งอาจจะเป็นสัญญาณแอนติพอดอล (Antipodal) หรือ สัญญาณออร์ทอกอนอล (Orthogonal) ก็ได้ ทั้งสองสัญญาณนี้มีคาบเวลา T ที่สอดคล้องกับเงื่อนไข $T \gg T_m$ มากๆ เพื่อไม่ให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Intersymbol Interference, ISI) อันเนื่องมาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณหลายเส้นทาง เนื่องจากแบนด์วิดท์ของสัญญาณมีค่ามากกว่าแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณ ดังนั้นสัญญาณที่รับได้จะเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} r(t) &= \sum_{k=1}^L c_k(t) u_i \left(t - \frac{k}{W} \right) + z(t) \\ &= v_i(t) + z(t) \quad , 0 \leq t \leq T \text{ และ } i=1,2 \end{aligned} \quad (2.41)$$

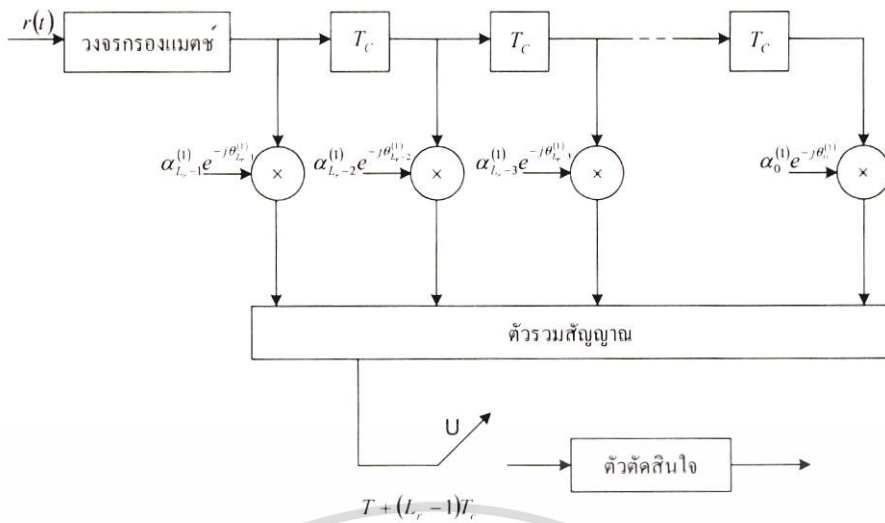
เมื่อ L เป็นจำนวนเส้นทางทั้งหมดที่แก้ไขได้ และ

$$v_i(t) = \sum_{k=1}^L c_k(t) u_i \left(t - \frac{k}{W} \right) \quad (2.42)$$

เมื่อ $z(t)$ เป็นการสุ่มเชิงซ้อนของสัญญาณรบกวนขาวแบบเกาส์ (complex-valued white Gaussian noise process) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ สมมติว่ารู้ค่าถ่วงน้ำหนักจุดต่อแยกของช่องสัญญาณที่เครื่องรับ ดังนั้นเครื่องรับที่เหมาะสมจะประกอบด้วย วงจรกรองความถี่ 2 วงจรที่แมตช์กับ $v_1(t)$ และ $v_2(t)$ ตามด้วยวงจรสุ่ม (sampler circuit) และวงจรทำการตัดสินใจ (decision circuit) ซึ่งจะเลือกสัญญาณที่ทำให้ได้ค่าเอาต์พุตสูงสุด เครื่องรับที่เหมาะสมอาจจะใช้การทำสหสัมพันธ์ข้ามแทนการใช้วงจรแมตช์ฟิลเตอร์ ตัวแปรที่ใช้ในการตัดสินใจ (decision variable) สำหรับการดีเทคสัญญาณไบนารีแบบรวมนัยแสดงได้เป็น

$$\begin{aligned} U_m &= \operatorname{Re} \int_0^T r(t) v_m^*(t) dt \\ &= \operatorname{Re} \sum_{k=1}^L \int_0^T r(t) c_k^*(t) u_m^* \left(t - \frac{k}{W} \right) dt \end{aligned} \quad (2.43)$$

รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของเครื่องรับ จากรูปสัญญาณที่รับได้จะถูกส่งผ่านไปยังสายการประวิงเวลา สัญญาณที่ได้จากแต่ละจุดต่อแยกจะถูกนำมาสหสัมพันธ์ (Correlate) กับ $c_k(t) u_m^*(t)$ เมื่อ $k = 1, 2, \dots, L$ และ $m = 1, 2$



รูปที่ 2.6 แสดงเครื่องรับแบบ RAKE

จากการทำงานของเครื่องรับที่เป็นแบบสายการประวิงเวลาแบบจุดต่อแยกนี้เป็นการสะสมพลังงานของสัญญาณจากทุกเส้นทางของสัญญาณที่รับได้ที่อยู่ในแต่ละช่วงทางเวลาของสายการประวิงเวลา ซึ่งนำพาสัญญาณข้อมูลเดียวกันมาจึงเรียกเครื่องรับที่มีลักษณะการทำงานดังกล่าวนี้ว่าเครื่องรับแบบ RAKE

บทที่ 3

หลักการของระบบเซลลูลาร์ซีดีเอ็มเอ

3.1 หลักการพื้นฐานของซีดีเอ็มเอ

เทคนิคของการมอดูเลตและการดีมอดูเลตนั้นได้รับการออกแบบเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการสื่อสารผ่านสภาวะแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนเกาส์แบบวงคงที่(AWGN) สัญญาณที่ถูกส่งจะถูกเลือกให้มีประสิทธิภาพที่สัมพันธ์กับการใช้ทรัพยากรทางแบนด์วิดท์และกำลังของมัน ส่วนการดีมอดูเลตจะถูกออกแบบให้มีความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตน้อยที่สุดในการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณ AWGN ดังกล่าว

3.1.1 หลักการทั่วไปของการเข้าถึงหลายทาง

โดยทั่วไปในระบบการสื่อสารพื้นฐานในการเข้าถึงหลายทางนั้นมีอยู่ 3 รูปแบบใหญ่ ๆ คือ

3.1.1.1 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางความถี่ (FDMA)

ผู้ใช้งานจะถูกกำหนดให้เข้าถึงในความถี่ที่จัดสรรไว้ให้ ดังนั้นผู้ใช้งานแต่ละรายจะครอบครองช่วงความถี่ดังกล่าว ดังในรูป 3.1 จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาหนึ่งๆ ผู้ใช้งานจะส่งสัญญาณเต็มที่อยู่ในช่องสัญญาณของช่วงความถี่ดังกล่าว นั่นคือ 100 Duty Cycle

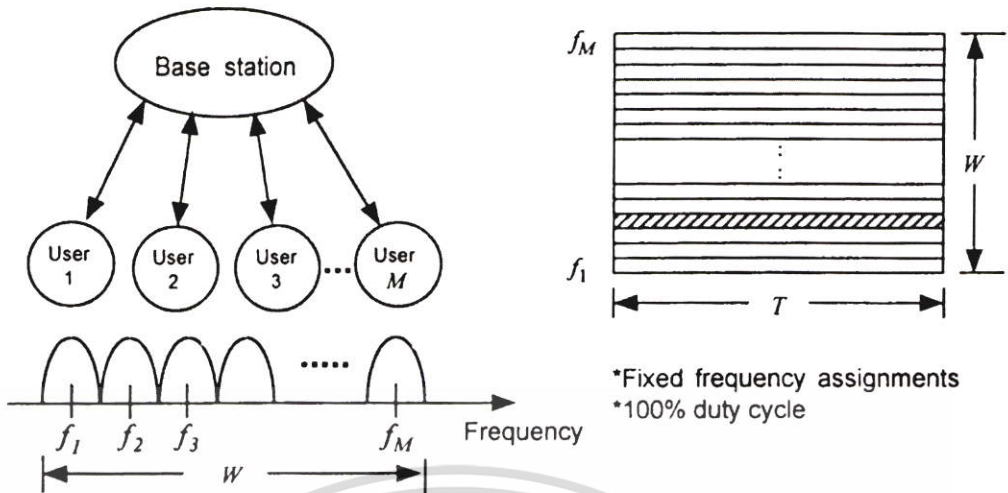
3.1.1.2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางเวลา (TDMA)

ผู้ใช้งานจะถูกกำหนดให้สามารถใช้ช่องสัญญาณในช่วงความถี่หนึ่งๆที่กำหนดให้ โดยสามารถใช้ได้ตลอดเวลาในไทม์สล็อตที่กำหนดให้นั่นเอง ดังรูป 3.2 จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาหนึ่งสัญญาณจะถูกส่งในไทม์สล็อตด้วย duty cycle ที่ค่าต่ำๆ

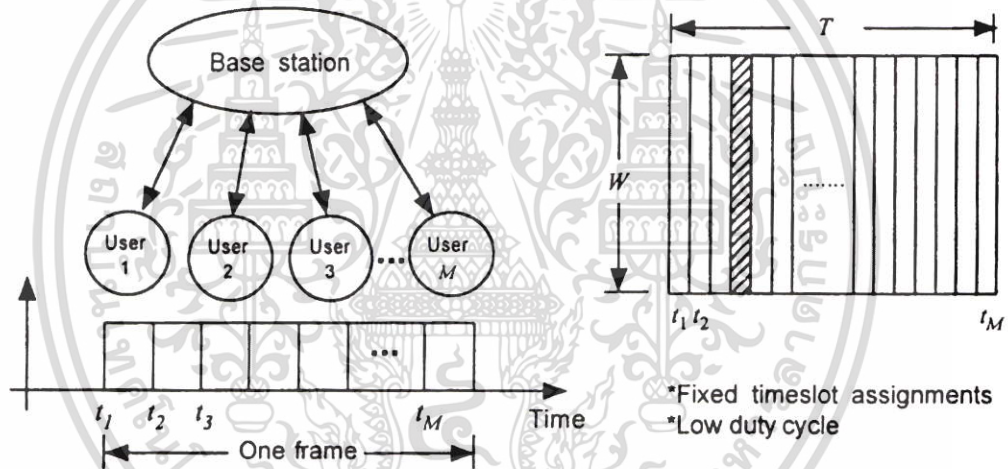
3.1.1.3 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางรหัส (CDMA)

ผู้ใช้งานนั้นสามารถที่จะส่งสัญญาณได้อย่างต่อเนื่องและทั่วถึงทั้งในระนาบของเวลาและความถี่ ดังในรูป 3.3 จะเห็นได้ว่าในรูปแบบนี้ผู้ใช้งานจะไม่ถูกแบ่งทรัพยากรทางเวลาหรือความถี่ แต่สามารถใช้ร่วมกันได้ทั้งหมดโดยในรูปแบบการเข้าถึงหลายทางแบบนี้ผู้ใช้งานจะถูกกำหนดรหัสให้แต่ละผู้ใช้งาน ซึ่งจะได้กล่าว ถึงต่อไป

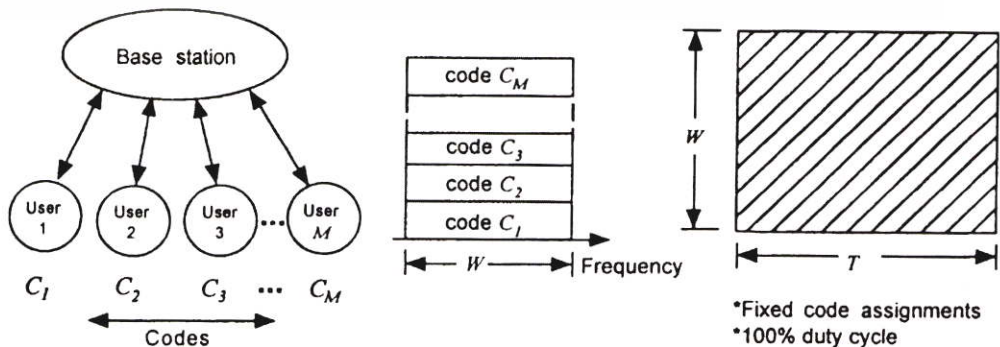
โดยการเข้าถึงหลายทางเหล่านี้เป็นเทคนิคที่แข่งขันกันในปัจจุบันมุ่งหมายอยู่ที่การแจกแจงของพลังงานของสัญญาณต่อเทคนิคการเข้าถึง ที่สามารถจะใช้ได้ภายในระนาบของทรัพยากรทางเวลา – ความถี่



รูปที่ 3.1 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางความถี่ (FDMA)

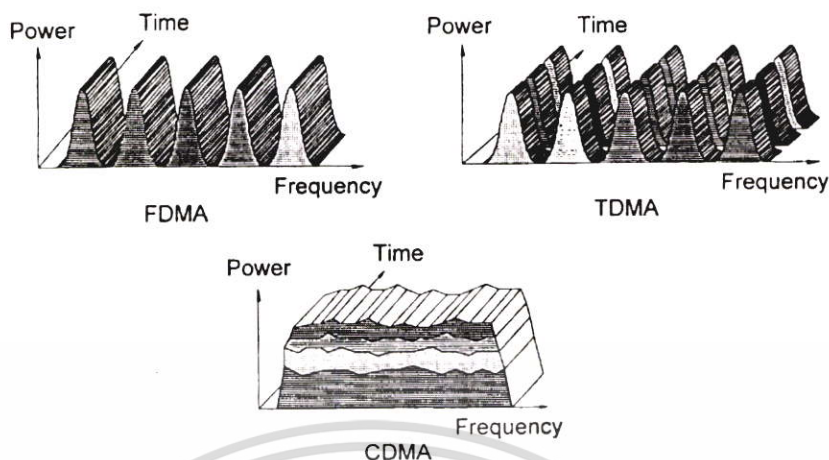


รูปที่ 3.2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางช่วงเวลา (TDMA)



รูปที่ 3.3 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางรหัส (CDMA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงสเปกตรัมที่เปรียบเทียบกันของระบบ FDMA TDMA และ CDMA

3.1.2 เทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางรหัส (CDMA)

หลักการของระบบซีดีเอ็มเอเกี่ยวข้องกับการส่งสัญญาณของสัญญาณวิทยุที่มีความถี่มากกว่าแบนด์วิดท์ของข้อมูล—โดยเมื่อก่อนนั้นได้รับความสนใจเฉพาะในวงการทหาร เทคนิคการกระจายสเปกตรัมนั้นได้มีการปรับเพื่อให้ออกไปใช้กับทางพาณิชย์ในเวลาต่อมา เพราะในเทคนิคดังกล่าวนี้มีข้อดีหลายประการ

วิธีในกระบวนการของการกระจายสเปกตรัมของสัญญาณเป็นกระบวนการที่ได้ผลประโยชน์จากการแจ่มมิงที่ถูกหักล้างออกไป โดยพิจารณาได้จากตัวแปรซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

S = กำลังของสัญญาณที่รับได้สำหรับสัญญาณที่ต้องการในแบนด์วิดท์ W

J = กำลังของสัญญาณที่รับได้สำหรับสัญญาณที่ไม่ต้องการในแบนด์วิดท์ W (เป็นสัญญาณการแจ่มมิง ผู้ใช้งานรายอื่นหรือการหลายเส้นทาง เป็นต้น)

$R = 1/T_b$ = อัตราข้อมูล

W = แบนด์วิดท์ที่กระจาย

E_b = พลังงานต่อบิตสำหรับสัญญาณที่ต้องการ

N_0 = ความหนาแน่นกำลังของสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนรวม

ดังนั้นจะได้อัตราส่วนของกำลังของสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณที่ต้องการรวม J ต่อ S

เป็น

$$\frac{J}{S} = \frac{N_0 W}{E_b / T_b} = \frac{W T_b}{E_b / N_0} = \frac{W / R_b}{E_b / N_0} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

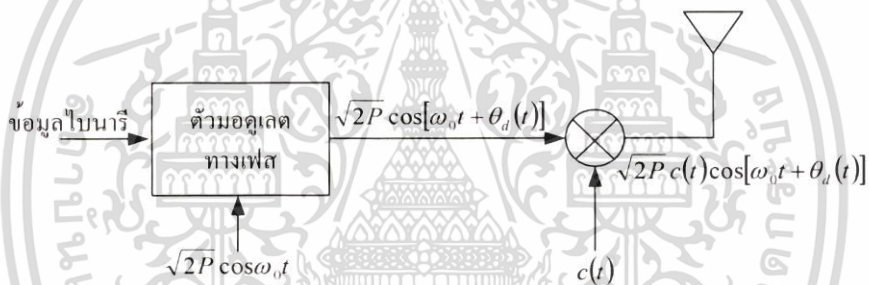
เมื่อให้ E_b/N_0 เป็นค่าที่ต้องการเพื่อให้สมรรถนะของระบบยังคงสามารถยอมรับได้อยู่ ดังนั้น J/S จึงแสดงเป็น Jamming margin

$$\frac{J}{S} = \frac{W/R}{(E_b/N_0)_{req}} \quad (3.2)$$

หรือ

$$Margin(dB) = \frac{W}{R}(dB) - \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req} (dB) \quad (3.3)$$

ปริมาณของ W/R จะถูกเรียกว่าอัตราขยายการประมวลผลของการกระจายสเปกตรัม จะเห็นได้ว่าในกรณีของระบบที่ไม่มีการกระจายแบนด์วิดท์ ($W = R$) นั้นค่าของ E_b/N_0 จะมีค่าเท่ากับ อัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR)



รูปที่ 3.5 แสดงภาคส่งของระบบโคเรเคซีเคว้นซีซีดีเอ็มเอทีที่มีการมอดูเลตแบบ BPSK

กระบวนการของการกระจายสเปกตรัมนั้นเป็นการนำเอาสัญญาณข้อมูลที่มีอัตราข้อมูล R_b ไปทำการคูณด้วยขบวนชิปที่มีอัตราเร็ว R_c โดย R_c ได้สัญญาณที่มีการกระจายสเปกตรัมที่มีอัตรา $R = R_b * R_c$

ในกระบวนการทางภาคส่งของสัญญาณที่มีรูปแบบการมอดูเลตทางเฟสเชิงเลขฐานสอง (Binary Phase-Shift Keying) ในรูป 3.5 แสดงสัญญาณที่ถูกมอดูเลตดังสมการ

$$s_d(t) = \sqrt{2P} \cos[\omega_0 t + \theta_d(t)] \quad (3.4)$$

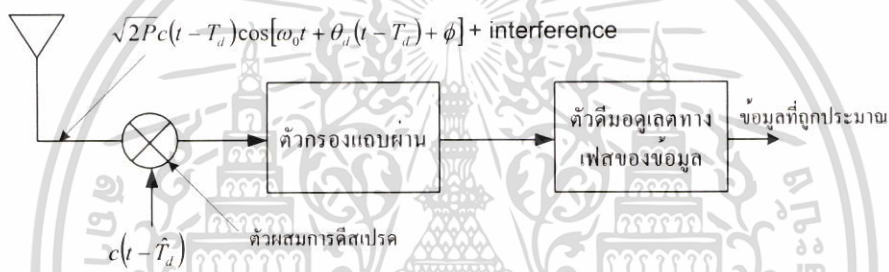
เมื่อค่า $\sqrt{2P}$ เป็นค่า peak ของ $s_d(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย P เป็น กำลังของเอลเวรโลปของคลื่นพาห้ที่ถูกมอดูเลต เมื่อสัญญาณที่ถูกมอดูเลตนั้น ผ่านการกระจายสเปคตรัม(Spread spectrum) โดยคูณด้วยขบวนชิป, $c(t)$ ทำให้สัญญาณที่ถูก ส่งออกไปในระบบโคเร็คซีแคว้นซีดีเอ็มเอแสดงได้เป็น

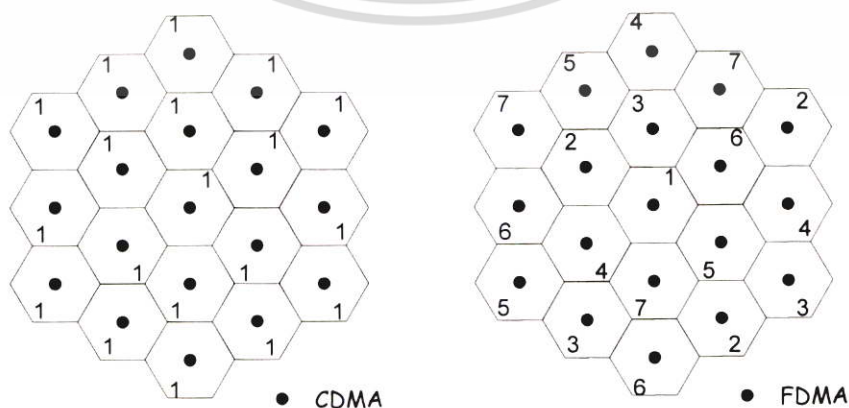
$$s_r(t) = \sqrt{2P}c(t)\cos[\omega_0 t + \theta_d(t)] \quad (3.5)$$

เมื่อทางภาครับของระบบที่แสดงได้ดังรูป 3.6 จากรูปทางภาครับนั้น การดีมอดูเลตจะเป็น กระบวนการเสมือนการกระจายสเปคตรัมอีกครั้ง(Despreading) จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้จะ ประกอบด้วยสัญญาณที่ถูกส่งที่มีการหน่วงของเวลารวมกับสัญญาณรบกวนเกาส์ ดังนั้นจะได้ สัญญาณทางออกที่ส่วนของตัวผสมการดีสเปรด (Despreading mixer) เป็น



รูปที่ 3.6 แสดงภาครับของระบบโคเร็คซีแคว้นซีดีเอ็มเอที่มีการมอดูเลตแบบ BPSK เมื่อ T_d เป็นการประมาณค่าการหน่วงเวลาที่เหมาะสม

3.2 ระบบเซลลูลาร์ซีดีเอ็มเอ



รูปที่ 3.7 แสดงรูปแบบของการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ของระบบ CDMA และ ระบบ FDMA

ในการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางความถี่(FDMA) นั้นจะมีค่าตัวแปรที่แสดงถึงการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่เท่ากับ 7 (Frequency Reuse = 7) แต่เนื่องจากในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางรัศมีนั้น ในเซลล์ที่อยู่ติดกันสามารถที่จะใช้ความถี่เดียวกันได้ ดังนั้นการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่เท่ากับ 1 ซึ่งจะแสดงได้ดังในรูป 3.7 ในการพิจารณาจำนวนผู้ใช้งานที่ระบบสามารถที่จะรองรับได้นั้น จะมีปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อจำนวนความจุของระบบ เช่น ปริมาณการแทรกสอดในระหว่างผู้ใช้งานด้วยกันเอง ความถูกต้องของการการควบคุมกำลังของเครื่องลูกข่ายอันเนื่องจากปัญหาความใกล้-ไกล

3.2.1 การแทรกสอดของการเชื่อมโยงขากลับ (Reverse Link Interference)

ในการพิจารณาความจุของระบบเซลล์ลูตารีซีดีเอ็มเออนั้น ปัจจัยสำคัญที่นำมาพิจารณาเพื่อหาค่าความจุดังกล่าวจะเป็นปริมาณการแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งการแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบพิจารณาเป็น 2 รูปแบบคือ การแทรกสอดที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เดียวกัน และการแทรกสอดจากภายนอกเซลล์หรือเรียกว่าการแทรกสอดจากเซลล์อื่น

3.2.3.1 การแทรกสอดอันเนื่องมาจากภายในเซลล์เดียวกัน (Same-Cell Interference)

ในการแทรกสอดที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้จะประกอบด้วยการรวมของสัญญาณจากผู้ใช้งานรายอื่นๆ ที่ภาครับในสถานีฐานเดียวกัน สำหรับระบบซีดีเอ็มเอเมื่อสัญญาณดังกล่าวเหล่านี้มีการใช้แบนด์วิดท์เดียวกันในเวลาเดียวกัน ดังนั้นการแทรกสอดทั้งหมดจึงเป็นแบบจำลองที่วิเคราะห์เป็นสัญญาณรบกวนขาวที่มีแถบจำกัด โดยเกือบทั้งหมดของสัญญาณรบกวนที่ภาครับของสถานีฐานจะเกิดขึ้นเนื่องมาจากการแทรกสอดของสัญญาณจากเครื่องลูกข่าย จำนวนของผู้ใช้งานที่เข้ามาใช้งานขณะใดขณะหนึ่งในการส่งของการเรียก(Call) จะถูกทำให้มีจำนวนสูงสุดได้โดยการทำให้กำลังที่รับได้ของแต่ละผู้ใช้ที่สถานีฐานนั้นมีค่าเท่ากัน และให้มีค่าต่ำเท่าที่เป็นไปได้ในขณะที่ยังสอดคล้องกับสมรรถนะของการเชื่อมโยง การควบคุมแบบพลวัตของกำลังที่ส่งของเครื่องลูกข่ายจึงเป็นส่วนที่จำเป็นต่อการออกแบบส่วนการเชื่อมโยงขากลับ เพราะเมื่อมีการใช้ของการควบคุมกำลัง สำหรับ M ของผู้ใช้งานในเซลล์ แล้วปริมาณของกำลังของการแทรกสอดที่ภาครับของสถานีฐานเนื่องจากเซลล์เดียวกันจะถูกสมมติโดย

$$I_{sc} = (M - 1)Sv \quad (3.6)$$

เมื่อ S เป็นกำลังของแต่ละเครื่องลูกข่ายที่ภาครับ และ v เป็นค่าเฉลี่ยของแฟคเตอร์ของ Voice activity ของการเชื่อมโยงขากลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.2 การแทรกสอดอันเนื่องมาจากภายนอกเซลล์ (Other-cell Interference)

เมื่อการแทรกสอดจากเซลล์อื่นบนการเชื่อมโยงขากลับ สมมติให้เซลล์มีขนาดเท่ากัน มีการใช้การควบคุมกำลังและกฎการแพร่ผ่านด้วยกำลัง 4 แล้วกำลังที่ส่งของเครื่องลูกข่ายในเซลล์ที่แทรกสอดซึ่งเป็นสถานีฐาน B เป็นสัดส่วนกับ

$$\text{ระดับกำลังที่ต้องการที่สถานีฐาน B} * \text{อัตราขยายที่ชดเชยการสูญเสียจากการแพร่ผ่าน} = S * r^4$$

เมื่อ r คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องลูกข่ายที่อยู่ในสถานีฐาน B ดังนั้นกำลังของสัญญาณแทรกสอดจากเครื่องลูกข่ายนี้ที่ไปรบกวนสถานีฐาน B_0 จะมีค่าเป็น

$$P_0 = \alpha_r S \left(\frac{r^4}{r_0} \right) \quad (3.7)$$

ปริมาณสัญญาณแทรกสอดจะขึ้นอยู่กับจำนวนเครื่องลูกข่ายที่ใช้งานภายในเซลล์ B โดยจะมีค่าเป็นค่าผลรวมของกำลังสัญญาณแทรกสอดของเครื่องลูกข่ายจำนวน M เครื่อง

3.3 ความจุของระบบเซลลูลาร์ซีดีเอ็มเอ

ในการสื่อสารระบบซีดีเอ็มเอเน้นการควบคุมกำลังมีความจำเป็นต่อระบบมาก เนื่องจากผู้ใช้งานทั้งหมดนั้นใช้แบนด์วิดท์ทั้งหมดร่วมกันโดยผ่านทางรหัสสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียม (PN Code) ดังนั้นผู้ใช้แต่ละรายจึงดูเหมือนเป็นสัญญาณรบกวนต่อผู้ใช้งานอื่น ดังนั้นกำลังของผู้ใช้แต่ละรายจะต้องมีการควบคุมเพื่อไม่ให้มีผู้ใช้งานรายใดรายหนึ่งเป็นสัญญาณที่ไปรบกวนต่อผู้ใช้งานอื่นๆที่ใช้แบนด์วิดท์ร่วมกันอยู่

ในการแสดงถึงว่าการควบคุมกำลังนั้นมีความจำเป็นต่อระบบซีดีเอ็มเออย่างไร จะทำการพิจารณาในเซลล์เดียวที่มีการสมมติให้มีผู้ใช้งานอยู่สองราย โดยจะมีการอธิบายในการเชื่อมโยงขาขึ้นซึ่งเป็นส่วนการเชื่อมโยงที่เป็นตัวจำกัดของระบบซีดีเอ็มเอ ผู้ใช้งานที่ 2 เป็นผู้ใช้งานที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากกว่าผู้ใช้งานที่ 1 ถ้าในกรณีที่ไม่มีการควบคุมกำลัง ผู้ใช้งานทั้งคู่จะมีกำลังส่งที่มีค่าแน่นอนซึ่งเท่ากับ p อย่างไรก็ตามเพราะว่าความแตกต่างของระยะทางจะส่งผลให้กำลังที่รับได้จากผู้ใช้งาน 2 จะมีค่ามากกว่ากำลังที่รับได้จากผู้ใช้งาน 1 ถ้าสมมติให้ความแตกต่างของระยะทางของผู้ใช้งาน 2 มากกว่าผู้ใช้งาน 1 เป็น 10 เท่า ดังนั้นผู้ใช้งาน 1 จะทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรง [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

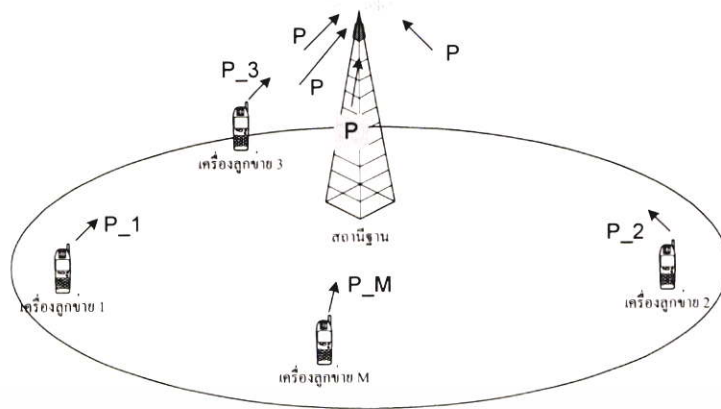
ถ้า SNR ที่ต้องการ, $(S/N)_{required}$ เป็น 1/10 ดังนั้นสามารถจะเห็นความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างค่าของ SNRs ของทั้งสองผู้ใช้งาน จากรูป 3.8 แสดงให้เห็นในจุดนี้ ถ้าไม่ได้คิดสัญญาณรบกวนทางความร้อน(Thermal Noise) ดังนั้น SNR ของผู้ใช้งาน 2, $(S/N)_2$ จะมีค่าเป็น 10 และ SNR ของผู้ใช้งาน 1, $(S/N)_1$ จะมีค่าเป็น (1/10) นั่นคือผู้ใช้งาน 2 จะมี SNR ที่สูงกว่า ก็จะส่งผลให้คุณภาพสัญญาณก็ดีกว่า แล้วความไม่เท่ากันนี้จะถูกเรียกว่าเป็น ปัญหาความใกล้-ไกล (near-far problem) ของระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางรหัส

ระบบในจุดดังกล่าวนี้จะเป็นการกล่าวถึงของเขตของความจุของมัน เพราะเนื่องจากเหตุผลที่ว่าพยายามที่จะเพิ่มผู้ใช้งานที่ 3 เข้าไปซึ่งส่งด้วยกำลัง p_3 ณ ตำแหน่งใดๆ ในเซลล์ ดังนั้น SNR ของผู้ใช้งานที่ 3 ไม่สามารถจะถึง $(S/N)_{required}$ ได้ ยิ่งไปกว่านั้นถ้าบังคับให้ผู้ใช้งาน 3 เข้าไปใช้งาน ไม่เพียงแต่ที่ผู้ใช้ที่ 3 ใช้งานไม่ได้เพราะว่า SNR ไม่ถึง $(S/N)_{required}$ แต่จะส่งผลถึง SNR ของผู้ใช้ที่ 2 ให้ลดลงต่ำกว่า $(S/N)_{required}$ อีกด้วย



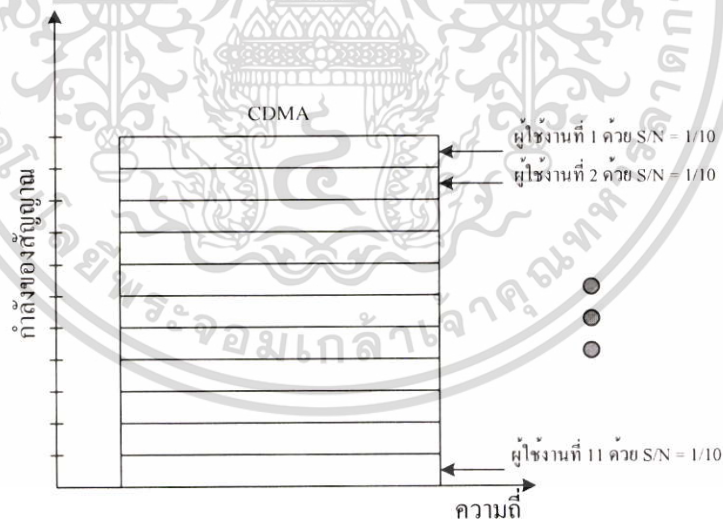
รูปที่ 3.8 แสดงกำลังจาก 2 ผู้ใช้งานในสถานีฐาน โดยผู้ใช้งานที่ 2 มีค่า SNR มากกว่า ผู้ใช้งาน 1

การควบคุมกำลังนั้นถูกสร้างขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาความใกล้-ไกลและเพื่อให้ได้ความจุที่สูงสุด การควบคุมกำลังจะกระทำโดยให้กำลังที่ถูกส่งมาจากแต่ละผู้ใช้จะถูกควบคุมให้มีการรับได้ของกำลังดังกล่าวที่สถานีฐานมีค่าเท่ากัน ดังในรูปที่ 3.9 แสดงแนวความคิดดังกล่าว เมื่อ $P_1, P_2, P_3 \dots P_M$ เป็นกำลังที่ส่งมาจากเครื่องลูกข่ายที่ 1, 2, 3... M เมื่อมีการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์ จะส่งผลให้กำลังที่รับได้ที่สถานีฐานของเครื่องลูกข่ายแต่ละตัวมีค่าเท่ากันคือ P



รูปที่ 3.9 แสดงการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์

ภายในเซลล์ถ้ากำลังที่ส่งของแต่ละผู้ใช้งานถูกควบคุม จะทำให้กำลังที่รับได้ที่สถานีฐานของแต่ละผู้ใช้นั้นมีค่าเท่ากันคือ p ดังนั้นจะทำให้สามารถมีผู้ใช้ใช้งานได้มากขึ้น จากตัวอย่างที่ผ่านมา ถ้า $(S/N)_{required}$ ยังคงเป็น $(1/10)$ ดังนั้นจำนวนของผู้ใช้งานทั้งหมดจะเท่ากับ 11 ที่สามารถรองรับได้โดยระบบซีดีเอ็มเอ แล้วความจุจะถูกทำให้ได้มากที่สุดจากการใช้การควบคุมกำลัง



รูปที่ 3.10 แสดงความจุที่ได้สูงสุดเมื่อกำลังที่รับได้ของผู้ใช้งานทั้งหมดมีค่าเท่ากันที่สถานีฐาน

3.3.1 การควบคุมกำลังแบบลูเปิด (Open Loop Power Control)

ในรูปแบบของการควบคุมกำลังแบบนี้ ตัวเครื่องถูกขายจะเป็นตัวจัดการกระบวนการเองทั้งสิ้น ไม่ได้เกี่ยวข้องกับสถานีฐานเลย กระบวนการของการควบคุมแบบลูเปิดจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการที่กระทำอย่างต่อเนื่องหลังจากที่ทางสถานีฐานนั้นรับรู้การร้องขอเข้าใช้งานของสัญญาณของเครื่องลูกข่าย และหลังจากที่เครื่องลูกข่ายเริ่มส่งในช่องสัญญาณทราฟฟิก

หลังจากที่การเรียก (Call) ได้ทำการติดตั้งขึ้น เมื่อเครื่องลูกข่ายเคลื่อนที่ไปรอบๆ ภายในเซลล์ แล้วการสูญเสียเชิงระยะทางระหว่างเครื่องลูกข่ายกับสถานีฐานจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง จากผลดังกล่าว กำลังที่ถูกรับได้ที่เครื่องลูกข่ายจะมีการเปลี่ยนแปลงและการควบคุมกำลังแบบลูเปิดจะทำการตรวจสัญญาณกำลังที่ถูกรับที่เครื่องลูกข่ายอย่างต่อเนื่อง และจะมีการปรับกำลังของสัญญาณที่ถูกส่งออกไป

กล่าวได้ว่าการควบคุมกำลังแบบเปิดจะอยู่บนพื้นฐานของการประมาณการสูญเสียเชิงระยะทางในทิศทางไปยังสถานีฐาน การควบคุมกำลังนี้เป็นการชดเชยในส่วนของปรากฏการถูกบดบังแบบลึกลับหรือมอดและการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ โดยเป็นการสลับพันธะระหว่างการจางหายในส่วนการเชื่อมโยงไปข้างหน้ากับส่วนการเชื่อมโยงย้อนกลับ อย่างไรก็ตามความถี่ของการเชื่อมโยงขาไปและขากลับนั้นก็ใช้ความถี่ที่ต่างกัน การควบคุมกำลังแบบเปิดจึงไม่เพียงพอและมีความซ้ำเกินไปที่จะสามารถชดเชยการจางหายเร็วแบบเรย์ลีได้ หรือในอีกแง่หนึ่งเมื่อมีการจางหายเร็วแบบเรย์ลี จะไม่สามารถใช้การควบคุมกำลังแบบเปิดมาชดเชยการจางหายเร็วแบบเรย์ลีได้

เนื่องจากการควบคุมกำลังแบบลูเปิดนั้นได้ทำการวัดความแรงของสัญญาณที่รับได้ นั่นคือการหาค่าของการสูญเสียในการเชื่อมโยงขาไป แล้วมีการสมมติให้มีค่าการสูญเสียดังกล่าวเกิดขึ้นที่ทิศทางการเชื่อมโยงขากลับที่คล้ายๆกัน จึงได้ยกตัวอย่างของสมการแสดง Link budget ของการเชื่อมโยงขากลับ [1]

$$SNR_r (dB) = P_m (dBm) - L_r (dB) - I_r (dBm) \quad (3.8)$$

เมื่อ SNR_r เป็นค่าของ SNR ที่รับได้ P_m เป็นกำลังของเครื่องลูกข่ายที่ส่งมา L_r เป็นการสูญเสียในทิศทางกลับสู่หิ I_r เป็นการแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของทิศทางขากลับทั้งหมด ดังนั้นกำลังของเครื่องลูกข่ายที่จะถูกส่งจึงสามารถหาได้โดย

$$P_m (dBm) = SNR_r (dB) + L_r (dB) + I_r (dBm) \quad (3.9)$$

โดย L_r จะคิดรวมถึงค่าของการสูญเสียเชิงระยะทางและการสูญเสียอื่นที่ถูกชดเชยจากอัตราขยายของสายอากาศ สำหรับการเชื่อมโยงขาไปแล้ว กำลังที่รับได้ที่สถานีฐานนั้นสามารถแสดงได้เป็น

$$P_R(dBm) = P_B(dBm) - L_f(dB) \quad (3.10)$$

เมื่อ P_R คือกำลังที่ถูกรับได้ P_B คือกำลังถูกส่งจากสถานีฐาน L_f การสูญเสียในทิศทางไปข้างหน้าสุทธิ ดังนั้นสามารถหาค่าของการสูญเสียสุทธิในทิศทางไปข้างหน้า

$$L_f(dB) = P_B(dBm) - P_R(dBm) \quad (3.11)$$

จากสมการดังกล่าวไม่ได้คำนึงถึงความเป็นจริงที่ว่า การวัดค่ากำลังของสถานีฐานที่รับได้ของเครื่องลูกข่ายนั้นถูกทำให้ลดลงได้โดยการแทรกสอดและสัญญาณรบกวนในทิศทางไปข้างหน้า สุดท้ายจะได้ค่าของกำลังของเครื่องลูกข่ายที่ส่งออกไปเป็น

$$P_m(dBm) = SNR_{target}(dB) + P_B(dB) + I_r(dBm) - P_r(dBm) \\ C = C(dB) - P_r(dBm) \quad (3.12)$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่โดย $C(dB) = SNR_{target}(dB) + P_B(dB) + I_r(dBm)$

3.3.2 การควบคุมกำลังแบบลูปปิด (Close Loop Power Control)

การควบคุมกำลังแบบลูปปิดนั้นถูกใช้สำหรับการชดเชยสำหรับการเปลี่ยนแปลงของกำลัง เนื่องจากการเปิดดับแบบเรย์ลีแบบรวดเร็ว โดยกระบวนการควบคุมจะเป็นลูปปิดเพราะว่ากระบวนการจะเกี่ยวข้องกับทั้งสถานีฐานและเครื่องลูกข่าย เมื่อเครื่องลูกข่ายได้รับช่องสัญญาณทราบพิกัดและเริ่มการสื่อสารกับสถานีฐาน กระบวนการของการควบคุมกำลังแบบปิดจะกระทำร่วมกันไปกับการควบคุมกำลังแบบลูปเปิด ในการควบคุมกำลังแบบลูปปิด ทางสถานีฐานจะทำการตรวจวัดทั้งสัญญาณของทางการเชื่อมโยงขากลับ (Reverse Link) และคุณภาพของการเชื่อมโยง ถ้าคุณภาพการเชื่อมโยงเริ่มที่จะไม่ดี ทางสถานีฐานจะมีคำสั่งไปยังเครื่องลูกข่ายผ่านการเชื่อมโยงขาไปข้างหน้า (Forward Link) ให้ทำการเพิ่มกำลังของสัญญาณขึ้น ถ้าในกรณีที่คุณภาพของสัญญาณดีเกินไป นั่นคือการที่มีกำลังของสัญญาณเกินไปในการเชื่อมโยงขากลับ ในกรณีนี้ทางสถานีฐานจะสั่งให้ทางเครื่องลูกข่ายลดกำลังที่ส่งลงมา ในอุดมคติ อัตราความผิดพลาดต่อเฟรมนั้นจะเป็นตัววัดคุณภาพของการเชื่อมโยงที่ดี แต่เพราะว่าจะทำให้ใช้เวลานานสำหรับสถานีฐานที่จะใช้จำนวนบิตที่จะมาคำนวณให้ถูกต้อง ดังนั้น E_b/N_0 จึงถูกใช้เป็นตัวชี้วัดของคุณภาพการเชื่อมโยงขากลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมกำลังแบบลูปิดมีกระบวนการในการกระทำดังนี้

- 1) สถานีฐานจะทำการตรวจวัด E_b/N_0 อย่างต่อเนื่องในการเชื่อมโยงขากลับ
- 2) ถ้า E_b/N_0 นั้นมีค่าสูงไป(เช่นเป็นการเกินค่า Threshold) ดังนั้นสถานีฐานจะมีคำสั่งให้เครื่องลูกข่ายลดกำลังส่งลงมา
- 3) ถ้า E_b/N_0 นั้นมีค่าต่ำไป(เช่นเป็นการต่ำกว่าค่า Threshold) ดังนั้นสถานีฐานจะมีคำสั่งให้เครื่องลูกข่ายเพิ่มกำลังส่งขึ้นไป

สถานีฐานจะส่งคำสั่งของการควบคุมกำลังไปยังเครื่องลูกข่ายโดยใช้การเชื่อมโยงขาไป โดยคำสั่งในการควบคุมกำลังจะเรียกว่าเป็น บิตของการควบคุมกำลัง (Power Control Bit, PCBs) ปริมาณของกำลังของเครื่องลูกข่ายที่ถูกสั่งให้เพิ่มหรือลดลงนั้นโดยทั่วไปจะมีค่า 1dB และ -1dB

เนื่องจากการควบคุมกำลังแบบลูปิดนั้นหมายความว่า จะเป็นการชดเชยการเฟดดิ้งแบบเรย์ลีอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการตอบสนองของเครื่องลูกข่ายต่อคำสั่งในการควบคุมกำลังจึงต้องมีความเร็วมาก จากเหตุผลดังกล่าวบิตของ PCBs เหล่านี้จะถูกส่งตรงผ่านช่องสัญญาณทราฟฟิก แต่เมื่อมีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับบิตเหล่านี้ก็จะมีผลกระทบต่อ การควบคุมกำลังเกิดขึ้นเช่นกัน

ในการควบคุมกำลังแบบลูปิดนั้นจะมีอยู่ 3 จุดที่ต้องกล่าวถึงเพิ่มเติมดังนี้

- 1) บิตของการควบคุมกำลังนั้นไม่ได้ถูกป้องกันจากความผิดพลาด

ดังนั้น PCBs นั้นถูกมัลติเพล็กซ์ไปบนช่องสัญญาณไปข้างหน้าหลังจากตัวเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน ดังนั้นจึงไม่ได้มีการป้องกันความผิดพลาดให้แก่บิตดังกล่าว ซึ่งเป็นการกระทำเพื่อลดการหน่วงเวลาในการถอดรหัสและดึงเอาออกมาของบิตที่ป้องกันความผิดพลาด และเนื่องจากการควบคุมกำลังแบบลูปิดนั้นถูกใช้ชดเชยการเฟดดิ้งแบบเรย์ลีอย่างรวดเร็ว ทำให้ PCBs จึงไม่ได้ป้องกันความผิดพลาดเพื่อที่จะให้เครื่องลูกข่ายสามารถนำบิตดังกล่าวมาให้เร็วและทำการปรับกำลังที่ส่งให้ได้ตามนั้น จากเหตุผลดังกล่าว ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตสำหรับช่องสัญญาณย่อยของการควบคุมกำลังอาจจะสูงกว่าช่องสัญญาณทราฟฟิกถ้าไม่มีการจัดการเป็นพิเศษ

- 2) การควบคุมกำลังแบบลูปิดจะมีลูภายใน (Inner loop) และลูภายนอก (Outer loop)

ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะลูภายในของกระบวนการควบคุมกำลังแบบลูปิด การมีอยู่ของลูภายในคือการมีของตัว Predetermined SNR threshold โดยการตัดสินใจให้มีการเพิ่มขึ้นและลดของกำลังเมื่อพยายามที่จะรักษาให้มีค่าของอัตราความผิดพลาดต่อเฟรมนั้นคงที่ไว้ที่ค่าที่สามารถยอมรับได้ และเมื่อสิ่งแวดล้อมของตัวเครื่องลูกข่ายไม่ได้เป็นความสัมพันธ์แบบ 1 ต่อ 1 ระหว่าง FER และ E_b/N_0 ดังนั้น ค่า Threshold ของ E_b/N_0 จะมีการปรับแบบไดนามิกเพื่อรักษาให้ค่า FER มีค่าคงที่ซึ่งสามารถยอมรับได้ การปรับของค่า threshold ของ E_b/N_0 นี้จะกระทำโดยอ้างอิง

จากลูภายนอกของ การควบคุมกำลังแบบลูปิด โดยกระบวนการภายนอกของการควบคุมกำลังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบลูปปิดนั้นไม่ได้นิยามสำหรับมาตรฐาน IS-95 โดยกระบวนการผลิตที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานจะมีอิสระที่จะสร้างอัลกอริธึมของลูปภายนอกได้เอง

3) การควบคุมกำลังแบบลูปปิดในระหว่าง Soft handoff

ระบบ IS-95 ซีดีเอ็มเอ จะมีการใช้ soft handoff เมื่อเครื่องลูกข่ายมีการเคลื่อนที่ระหว่าง 2 หรือ 3 เซลล์ โดย soft handoff เป็นกระบวนการโดยที่เครื่องลูกข่ายยังคงรักษาการติดต่ออยู่กับสถานีฐาน 2 หรือ 3 สถานีที่เครื่องลูกข่ายนั้นมีการเคลื่อนที่อยู่ ในระหว่าง soft handoff เครื่องลูกข่ายจะรับเฟรมของช่องสัญญาณโทรภาพฟิค จาก 2 หรือ 3 สถานี และบนช่องสัญญาณโทรภาพฟิคดังกล่าวนี้อาจจะมี ความขัดแย้งกันเองในส่วนของบิต PCBs ในสถานการณ์เหล่านี้ ตัวเครื่องลูกข่ายจะกระทำตามกฎต่อไปนี้ ถ้าเพียงสถานีใดสถานีหนึ่งมีคำสั่งให้ลดในกำลังลงมา เครื่องลูกข่ายก็จะลดกำลังลงมา และเครื่องลูกข่ายจะเพิ่มกำลังเมื่อสถานีฐานทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการทำ soft handoff มีคำสั่งจากทุกสถานีให้เพิ่มในกำลังเท่านั้น

3.3.3 การเปลี่ยนถ่ายเซลล์ (Handoff)

การเปลี่ยนถ่ายเซลล์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการสื่อสารของโทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบบเซลลูลาร์ เพราะว่าการเคลื่อนที่ของเครื่องลูกข่ายในเครือข่ายจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพและปริมาณรบกวนที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับโครงข่าย ซึ่งบางครั้งการเคลื่อนที่นี้อาจจะเปลี่ยนสถานีฐานที่ให้บริการอยู่เลยทีเดียว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่รู้จักกันในนามของการถ่ายโอน (Handoff) โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของการเปลี่ยนถ่ายเซลล์แบบนุ่มนวล หรือซอฟต์แฮนด์ออฟ เพื่อให้เข้าใจถึงข้อดี ข้อเสีย และการนำซอฟต์แฮนด์ออฟมาใช้งานในระบบเซลลูลาร์ซีดีเอ็มเอ

ใน Soft handoff นั้นจะใช้เพื่อบ่งบอกให้แตกต่างไปจาก ฮาร์ดแฮนด์ออฟ ซึ่งเป็นกระบวนการแฮนด์ออฟแบบเก่า โดยในฮาร์ดแฮนด์ออฟนั้นจะมีการตัดสินใจว่าจะทำการแฮนด์ออฟหรือไม่เท่านั้น ถ้าตัดสินใจทำการแฮนด์ออฟกระบวนการแฮนด์ออฟจะทำภายในระบบโดยที่ไม่มีการพยายามทำให้เครื่องลูกข่ายสามารถติดต่อกับสองสถานีได้พร้อมกัน สำหรับซอฟต์แฮนด์ออฟนั้น การตัดสินใจว่าจะแฮนด์ออฟหรือไม่นั้นจะเป็นการตัดสินใจแบบมีข้อแม้ที่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มของสัญญาณนำร่อง (pilot signal) จากสถานีฐานสองสถานีหรือมากกว่าที่รายล้อมผู้ใช้นั้นๆอยู่

3.3.4 ความจุของระบบซีดีเอ็มเอ

ความจริงของระบบนั้นขึ้นกับหลายๆ ปัจจัย เช่น การดีมอดูเลตของภาครับ ความถูกต้องของการควบคุมกำลัง กำลังของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นจริง อันเนื่องมาจากผู้ใช้งานอื่นทั้งจากภายในเซลล์เดียวกัน และจากเซลล์อื่นข้างเคียง

ในการสื่อสารดิจิทัล ได้มีความสนใจในค่าของ E_b/N_0 หรือ พลังงานต่อบิต ต่อ ความหนาแน่นกำลังของสัญญาณรบกวน โดย E_b/N_0 สามารถเรียกเป็น อัตราส่วนของสัญญาณ ต่อ สัญญาณรบกวน Signal-to-Noise Ratio (SNR) โดย พลังงานต่อบิตจะเท่ากับ กำลังเฉลี่ยของสัญญาณ มอดูเลตในช่วงเวลาคาบิตดังสมการ

$$E_b = ST \quad (3.13)$$

เมื่อ S เป็นของกำลังเฉลี่ยของสัญญาณมอดูเลต และ T เป็นคาบเวลาบิตของข้อมูล สามารถแทนค่าอัตราบิต R ได้ในสมการข้างต้นเป็น

$$E_b = \frac{S}{R} \quad (3.14)$$

เพราะฉะนั้น

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{RN_0} \quad (3.15)$$

ซึ่งเมื่อนำไปแสดงความสัมพันธ์กับความหนาแน่นกำลังของสัญญาณรบกวน N_0 กำลังของสัญญาณรบกวนทั้งหมด และแบนด์วิดท์ W เป็นดังสมการ

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S W}{N R} \quad (3.16)$$

จะได้ว่า $\frac{E_b}{N_0}$ นั้นจะสัมพันธ์กับ อัตราส่วนของ สัญญาณต่อสัญญาณรบกวน S/N ของการเชื่อมโยงและอัตราส่วนของแบนด์วิดท์ที่ใช้ส่ง W และอัตราข้อมูล R โดยเรียกอัตราส่วนนี้ว่า อัตราการขยายของกระบวนการ (Processing Gain) ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาในส่วนของการเชื่อมโยงขากลับ (Reverse Link) ของระบบ CDMA ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงส่วนที่จำกัดในเทอมของความจุ การเชื่อมโยงขากลับนี้เป็นการเชื่อมโยงจากเครื่องลูกข่ายที่ติดต่อไปยังสถานีฐาน สมมติให้ระบบนั้นเป็นการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์ก่อนในการพิจารณา ซึ่งหมายความว่ากำลังที่ถูกส่งจากเครื่องลูกข่ายทั้งหมดจะถูกควบคุมได้อย่างสมบูรณ์ที่ภาครับของสถานีฐาน โดยกำลังที่รับได้ของเครื่องลูกข่ายทั้งหมดจะมีค่าเท่ากัน ภายใต้สมมติฐานดังกล่าว ค่าอัตราส่วน SNR ของแต่ละผู้ใช้จะมีค่า

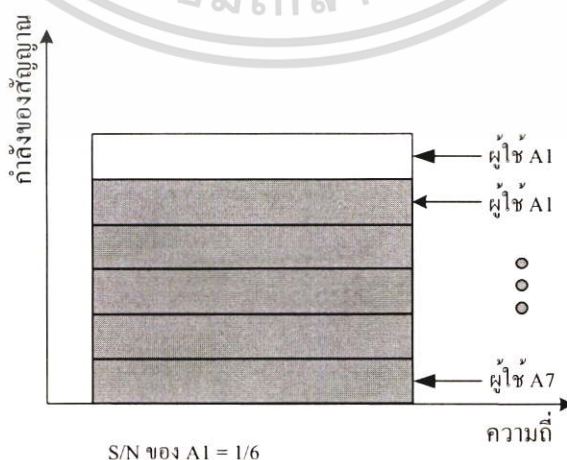
$$\frac{S}{N} = \frac{1}{M-1} \quad (3.17)$$

โดย M เป็นจำนวนของผู้ใช้ทั้งหมดในขณะนั้น ที่ได้ค่าดังกล่าวเนื่องจากว่ากำลังของสัญญาณรบกวนทั้งหมดจะเท่ากับผลรวมของกำลังจากแต่ละผู้ใช้นั้นเองมีค่าเท่ากับ $M-1$ ซึ่งในรูป 3.8 จะแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว จากสมการข้างบนจะไม่ได้คิดค่าของ Thermal Noise เมื่อแทนสมการ (3.17) ในสมการ (3.16) จะได้

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{M-1} \frac{W}{R} \quad (3.18)$$

จากสมการ 3.18 จะได้

$$M-1 = \frac{(W/R)}{(E_b/N_0)} \quad (3.19)$$



รูปที่ 3.11 แสดงถึงกำลังของสัญญาณในระบบซีดีเอ็มเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ M มีค่ามากๆ เพราะฉะนั้น

$$M \approx \frac{(W/R)}{(E_b/N_0)} \quad (3.20)$$

ผลของการไหลตติงที่มีต่อความจุ

จากสมการข้างบน สามารถจะใช้เป็นแบบจำลองในการอธิบายความสามารถในการรองรับผู้ใช้ในเซลล์เดียว โดยเซลล์เดียวนั้นเป็นลักษณะรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว(Omnidirectional) และไม่ได้คิดเซลล์ข้างเคียง และใช้การส่งเต็ม 100 % ของเวลา ในความเป็นจริงจะมีเซลล์อยู่หลายเซลล์มากในระบบของการสื่อสารส่วนบุคคล (PCS) หรือ ระบบเซลลูลาร์ซีดีเอ็มเอ เมื่อพิจารณาในผลของผู้ใช้ในเซลล์อื่น แม้ว่าผู้ใช้จากเซลล์อื่นดังกล่าวเหล่านี้จะถูกควบคุมกำลังโดยเซลล์ของมันเองแต่กำลังของสัญญาณจากผู้ใช้ดังกล่าวก็ยังคงเกิดการแทรกสอดต่อเซลล์ข้างอิง ดังนั้นเซลล์ข้างอิงจะถูกไหลตติงโดยผู้ใช้จากเซลล์อื่นๆโดยสมการ (3.18) จะสามารถแสดงผลของการถูกไหลตติงได้เป็น

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{M-1} \frac{W}{R} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) \quad (3.21)$$

เมื่อ η เป็นแฟคเตอร์ของการไหลตติง โดยค่าของ η จะอยู่ในช่วง 0 % ถึง 100% ในตัวอย่างแสดงดังรูปนั้น แฟคเตอร์การไหลตติงมีค่า 0.5 ซึ่ง $(1 + 0.5)$ หรือ 150 % ที่มีการเพิ่มขึ้นของการแทรกสอดที่เกิดขึ้นที่เซลล์ข้างอิง

โดยส่วนกลับของแฟคเตอร์ $(1 + \eta)$ นั้น บางครั้งเรียกว่าเป็น แฟคเตอร์ของการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ (frequency reuse factor) โดยจะมีค่าเป็น

$$F = \frac{1}{1+\eta} \quad (3.22)$$

จะเห็นได้ว่าแฟคเตอร์ของการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่นั้นจะมีค่าอุดมคติเป็น 1 ในเซลล์เดียว ($\eta = 0$) ส่วนในแบบหลายเซลล์นั้นค่าของ η จะมีค่าเพิ่มขึ้น แล้วจะส่งผลให้ F มีค่าลดลงตามความสัมพันธ์ดังกล่าว

ผลของการแบ่งเซกเตอร์ที่มีต่อความจุ

การแทรกสอดจากผู้ใช้อื่นในเซลล์อื่นที่เกิดขึ้นที่เซลล์อ้างอิงสามารถจะถูกลดลงได้ เมื่อเซลล์อ้างอิงดังกล่าวถูกทำการเซกเตอร์ แทนที่จะใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (omnidirectional antenna) ซึ่งมีแพทเทิร์นของสายอากาศเป็น 360 องศา เซลล์อ้างอิงสามารถจะ ถูกแบ่งเป็น 3 เซกเตอร์ ดังนั้นแต่ละเซกเตอร์จะมีการรับสัญญาณ 120 องศา (ดังรูป) ใน ปรากฏการณ์นี้ สายอากาศที่เซกเตอร์จะปฏิเสธการแทรกสอดจากผู้ใช้ที่ไม่ได้อยู่ในแพทเทิร์น ของสายอากาศ การจัดดังกล่าวนี้จะลดผลของการไหลดิ่งโดยแฟคเตอร์ประมาณค่าเท่ากับ 3 ถ้า เซลล์ที่ถูกแบ่งเซกเตอร์เป็น 6 เซกเตอร์จะส่งผลให้ผลของการไหลดิ่งลดลงโดยแฟคเตอร์ ประมาณ 6 โดยแฟคเตอร์ดังกล่าวนี้จะถูกเรียกว่าเป็น sectorization gain λ โดย

$$\lambda = \frac{\int_0^{2\pi} I(\theta) d\theta}{\int_0^{2\pi} \left(\frac{G(\theta)}{G(0)} \right) I(\theta) d\theta} \quad (3.23)$$

โดย $G(\theta)$ เป็นแพทเทิร์นของสายอากาศแบบระนาบของสายอากาศเซกเตอร์ และ $G(0)$ เป็น อัตราขยายของสายอากาศสูงสุด ซึ่งสมมติให้เกิดขึ้นที่แนวเล็ง (bore sight, $\theta = 0$) และ $I(\theta)$ เป็นกำลังของการแทรกสอดที่รับได้จากผู้ใช้ในเซลล์อื่นโดยเป็นฟังก์ชันของ θ การอินทิเกรทใน สมการข้างบนนั้นกระทำในช่วง 0 ถึง 360 องศา จากสมการดังกล่าวสามารถคำนวณค่า อัตราขยายของการเซกเตอร์ออกมาตรงๆนั้น ซึ่งขึ้นโดยตรงกับอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้ เช่นเดียวกับการแจกแจงในระยะและระยะทางของผู้ใช้ที่เป็นการแทรกสอดจากเซลล์อื่น จะเห็นได้ ว่าในสมการดังกล่าวไม่ได้พิจารณาในแพทเทิร์นทางแนวเส้นตรงขึ้นไป ในความเป็นจริง λ นั้นมีค่า โดยทั่วไปเป็น 2.5 สำหรับระบบที่มีการแบ่งเป็น 3 เซกเตอร์ และมีค่าเป็น 5 สำหรับระบบที่มีการ แบ่งเป็น 6 เซกเตอร์

โดยสามารถปรับสมการโดยมีผลจากการเซกเตอร์ได้เป็น

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{M-1} \frac{W}{R} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) \lambda \quad (3.24)$$

ผลของ Voice activities ที่มีต่อความจุ

จากสมการข้างบนได้สมมติให้ผู้ใช้งานส่งในเวลาเต็มที่ 100 % คือ ส่งตลอดเวลา แต่ในทาง ปฏิบัติตัวเข้ารหัสทางเสียงที่ระบบ IS-95 ใช้นั้นจะให้เป็น อัตราที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายความว่าอัตราของทางออกของตัวเข้ารหัสทางเสียงจะถูกปรับได้ให้สอดคล้องกับแพทเทิร์นในการพูดของผู้ใช้งาน ตัวอย่างเช่น ถ้าผู้ใช้งานไม่ได้พูดในช่วงของการสนทนา แล้วอัตราการเข้ารหัสของตัวเข้ารหัสทางเสียงจะถูกทำให้ต่ำลง เป็นการป้องกันกำลังงานจากการส่งที่ไม่สำเร็จ ผลจากอัตราการเข้ารหัสทางเสียงที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้นี้ สามารถลดในกำลังงานที่ถูกส่งออกไปได้และนั่นก็เป็นการลดลงของการแทรกสอด ในทางสถิติของการพูดนั้น โดยทั่วไปการสนทนาจะเกิดขึ้นอยู่ในระหว่าง 40 % ถึง 50% ของเวลาทั้งหมดโดยการใช้อัตราการเข้ารหัสเสียงที่มีอัตราเปลี่ยนแปลงได้ ระบบจะสามารถลดกำลังของการแทรกสอดโดย แพคเตอร์ของ voice activity นี้ ดังนั้น จึงมีการแสดงสมการที่มีการ voice activity เป็น

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{M-1} \frac{W}{R} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) \lambda \frac{1}{\nu} \quad (3.25)$$

โดย ν เป็นแพคเตอร์ของ Voice activity จะเห็นได้ว่าผลของ voice activity จะเป็นการทำให้ส่วนของการแทรกสอดลดลง

เพราะฉะนั้นจะแสดงค่าของ M ได้เป็นดังสมการ

$$M = 1 + \frac{(W/R)}{(E_b/N_0)} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) \lambda \frac{1}{\nu} \quad (3.26)$$

ซึ่งเมื่อ M มีค่ามากๆ ดังนั้น

$$M \approx \frac{(W/R)}{(E_b/N_0)} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) \lambda \frac{1}{\nu} \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

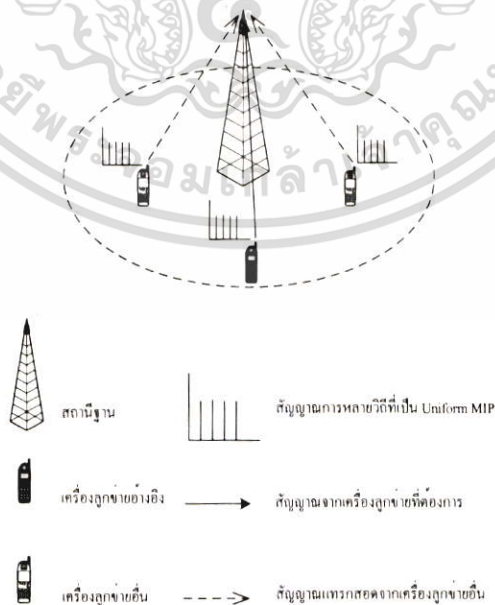
บทที่ 4

การวิเคราะห์สมรรถนะการเชื่อมโยงขาขึ้นของ ระบบเซลลูลาร์ซีดีเอ็มเอ

4.1 แบบจำลองของระบบที่พิจารณา

เมื่อระบบที่พิจารณาคือระบบซีดีเอ็มเอแบบเซลล์เดี่ยว สัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในการเชื่อมโยงขาขึ้นของระบบจะพิจารณาเป็นแบบการแทรกสอดในเซลล์เดียวกัน (Same-Cell Interference) โดยสัญญาณแทรกสอดเหล่านี้จะประกอบไปด้วยการรวมเอาสัญญาณที่มาจากผู้ใช้งานรายอื่นๆที่อยู่ในเซลล์ที่พิจารณานั้น และเมื่อในระบบมีการรับสัญญาณจากหลายวิธีของสัญญาณเกิดขึ้นด้วย ดังนั้นสัญญาณแทรกสอดยังรวมไปถึงสัญญาณรับสัญญาณจากหลายวิธีอีกด้วย เพราะฉะนั้นสัญญาณแทรกสอดทั้งหมดในระบบเป็นสัญญาณที่มาจากเครื่องลูกข่าย เครื่องอื่นที่อยู่ในเซลล์ รวมทั้งสัญญาณการรับสัญญาณจากหลายวิธีที่เกิดขึ้น ดังในรูป 4.1

จำนวนของเครื่องลูกข่ายในระบบที่สามารถรองรับได้จะมีจำนวนมากที่สุดเกิดขึ้นเมื่อ กำลังของสัญญาณของสัญญาณแต่ละเครื่องลูกข่ายมีค่าเท่ากันในสถานีฐาน นั่นคือสามารถควบคุมกำลังของสัญญาณเครื่องลูกข่ายได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การหาค่าความน่าจะเป็นของการติดขัด (BLOCKING PROBABILITY) ของระบบที่ทำการวิเคราะห์

เมื่อพิจารณากำลังของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นที่สถานีฐานในช่วงการเชื่อมโยงขากลับ(Reverse Link) ในระบบเซลล์เดี่ยวนั้นเมื่อให้ผู้ใช้งานที่ $k = 1$ เป็นผู้ใช้งานอ้างอิง จะได้กำลังของสัญญาณแทรกสอดทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่สาขาที่ i^{th} ของเครื่องรับแบบเรดเป็นดังสมการ [5]

$$I_0 W = \sum_{k=2}^M \sum_{l=1}^{L_k} \alpha_{lk}^2 E_{blk} R + \sum_{j=0, j \neq i}^{L_1-1} \alpha_j^2 E_{bj} R + N_0 W \quad (4.1)$$

โดยผู้ใช้งานที่ $k = 2, 3, \dots, M$ เป็นผู้ใช้งานรายอื่นซึ่งคิดเป็นสัญญาณรบกวน และเมื่อเครื่องรับแบบเรดมีทั้งหมด L สาขา และเมื่อแอมพลิจูดของสัญญาณที่สาขาใด ๆ α มีค่าเท่ากันในทุกสาขา เพราะฉะนั้นกำลังของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นของสาขาใดๆ จะมีค่าเท่ากับของสาขาอื่นๆ และมีค่าเท่ากับกำลังของสัญญาณแทรกสอดของเครื่องรับแบบเรดด้วย จึงสามารถพิจารณาสมการที่ (4.1) เป็นกำลังของสัญญาณแทรกสอดทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ภาครับของสถานีฐานได้ ต่อมาจะมีการจัดรูปแบบสมการใหม่เพื่อการพิจารณาในเหตุการณ์ที่ระบบเกิดการติดขัดเกิดขึ้นโดยเป็นดังสมการ

$$\sum_{k=2}^M \sum_{l=1}^{L_k} \alpha_{lk}^2 E_{blk} R + \sum_{j=0, j \neq i}^{L_1-1} \alpha_j^2 E_{bj} R + N_0 W \leq I_0 W \quad (4.2)$$

$$\sum_{k=2}^M \sum_{l=1}^{L_k} \alpha_{lk}^2 \frac{E_{blk}}{I_0} + \sum_{j=0, j \neq i}^{L_1-1} \alpha_j^2 \frac{E_{bj}}{I_0} \leq \frac{W}{R} (1 - \eta) \quad (4.3)$$

จากสมการที่ 2 นิยามให้ตัวแปรสุ่ม $Z \equiv \sum_{k=2}^M \sum_{l=1}^{L_k} \alpha_{lk}^2 \frac{E_{blk}}{I_0} + \sum_{j=0, j \neq i}^{L_1-1} \alpha_j^2 \frac{E_{bj}}{I_0}$ เพราะฉะนั้นจะได้

$$Z \equiv \sum_{k=2}^M \sum_{l=1}^{L_k} \alpha_{lk}^2 \rho_{lk} + \sum_{j=0, j \neq i}^{L_1-1} \alpha_j^2 \rho_j \leq \frac{W}{R} (1 - \eta) \quad (4.4)$$

เมื่อความน่าจะเป็นของการติดขัดคือ ความน่าจะเป็นที่กำลังของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นทั้งหมดซึ่งนิยามเป็นตัวแปรสุ่ม Z มีค่ามากกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) จากสถานการณ์ดังกล่าวจะส่งให้ผู้ใช้งานรายใหม่ที่จะเข้ามาร้องขอใช้ช่องสัญญาณในระบบจะถูกปฏิเสธจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบซึ่งทำให้ผู้ใช้ดังกล่าวไม่สามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณได้ ซึ่งจะแสดงความน่าจะเป็นดังกล่าวได้ดังสมการ[6]

$$P_{Blocking} = P_r \left[Z > Z_0 = \frac{W}{R}(1-\eta) \right] \quad (4.5)$$

เมื่อ ค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) มีค่า $Z_0 = \frac{W}{R}(1-\eta)$

เมื่อต้องการหาค่าความน่าจะเป็นของการติดขัด ซึ่งเป็นดังสมการที่ 5 จะต้องการหาค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่ม Z เนื่องจากตัวแปรสุ่ม Z นี้เป็นผลรวมของกำลังของสัญญาณแทรกสอดดังในสมการที่ (4.4) จึงได้มีการหาค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่ม Z โดยนิยามให้ผลรวม Z ดังกล่าวที่ได้นั้นได้เป็น 2 รูปแบบ 1. เมื่อได้มีการนำทฤษฎีเข้าสู่ศูนย์กลาง (Central Limit Theorem) มาใช้ตัวแปรสุ่ม Z ที่ได้จะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเกาส์ [7] ให้เป็นตัวแปร Z_N 2. โดยผลรวมดังกล่าวยังคงเป็นตัวแปรสุ่มแบบล็อกนอร์มอล ดังนั้นผลรวม Z ดังกล่าวจึงเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบล็อกนอร์มอล [7] ซึ่งให้เป็นตัวแปร ξ

4.2.1 ความน่าจะเป็นของการติดขัดโดยการประมาณแบบเกาส์ (Gaussian Approximation)

เมื่อตัวแปรสุ่ม Z_N นั้นเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเกาส์ จึงมีการหาค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของ Z_N ดังสมการที่ (4.6) และ (4.7)

$$E[Z_N] = \sum_{k=2}^M \sum_{l=1}^{L_k} E[\alpha_{lk}^2 \rho_{lk}] + \sum_{j=0, j \neq i}^{L_1-1} E[\varepsilon_j^2 \rho_j] \quad (4.6)$$

$$Var(Z_N) = \sum_{k=2}^M \sum_{l=1}^{L_k} Var(\alpha_{lk}^2 \rho_{lk}) + \sum_{j=0, j \neq i}^{L_1-1} Var(\alpha_j^2 \rho_j) \quad (4.7)$$

จากสมการที่ (4.6) จะหาค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่มเกาส์ Z_N

$$E[Z_N] = \sum_{k=2}^M \sum_{l=1}^{L_k} E[\alpha_{lk}^2] E[\rho_{lk}] + \sum_{j=0, j \neq i}^{L_1-1} E[\alpha_j^2] E[\rho_j] \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวมาแล้วเมื่อเกิดสัญญาณที่เคลื่อนผ่านในสภาวะแวดล้อมที่ได้รับผลกระทบจากการบดบัง ส่งผลให้ตัวแปรสุ่มที่แสดงถึงกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่สถานีฐาน $\frac{E_{bi}}{I_0} = \rho_i$ เมื่อถูกวัดเป็น dB จะเป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ด้วยค่าเฉลี่ย m_{dB} และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ_{dB} โดย

$$\rho_i(dB) = 10 \log \rho_i = m_{dB} + \sigma_{dB} G_i, \quad G_i = G(0,1) \quad (4.9)$$

ดังนั้น ตัวแปรสุ่ม ρ_i จะเป็นล็อกนอร์มอลเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \rho_i &= 10^{(m_{dB} + \sigma_{dB} G_i)/10} = (e^{\ln 10})^{(m_{dB} + \sigma_{dB} G_i)/10} \\ &= e^{\beta(m_{dB} + \sigma_{dB} G_i)}, \quad \beta = (\ln 10)/10 \end{aligned} \quad (4.10)$$

ในสมการที่ (4.8) จะหาค่าของพจน์ต่างๆ เมื่อการควบคุมกำลังไม่สมบูรณ์ เมื่อ ρ เป็นกำลังที่รับได้ต่อบิต ทำให้ ρ เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบล็อกนอร์มอล [8], [9] ด้วยค่าเฉลี่ยและค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ m และ σ ตามลำดับ ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของ ρ เป็นดังสมการที่ (4.11)

$$E[\rho_{ik}] = E[\rho_j] = e^{\beta m + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma^2} \quad (4.11)$$

เมื่อรูปร่างของความเข้มของการรับสัญญาณจากหลายวิถี (Multipath Intensity Profile, MIP) มีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ (Uniform MIP) จะทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของ α^2 เป็น [3]

$$E[\alpha_k^2] = E[\alpha_j^2] = E[\alpha^2] = \frac{1}{L} \quad (4.12)$$

โดย L เป็นจำนวนของเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้จากเครื่องรับแบบเรด เพราะฉะนั้นจากสมการ (4.11) และ (4.12) จะได้สมการที่ (4.8) เป็น

$$E[Z_N] = (M-1) \left(\frac{1}{L} \right) \left\{ e^{\beta m + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma^2} \right\} + (L-1) \left(\frac{1}{L} \right) \left\{ e^{\beta m + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma^2} \right\} \quad (4.13)$$

จัดรูปใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E[Z_N] = (M - 1/L) \left\{ e^{\beta m + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma^2} \right\} \quad (4.14)$$

จากสมการ (4.7) เมื่อค่าของ $Var(\alpha_{ik}^2 \rho_{ik}) = Var(\alpha_j^2 \rho_j) = Var(\alpha^2 \rho)$ ดังนั้น [7]

$$Var(\alpha^2 \rho) = E[\alpha^2] Var(\rho) + Var(\alpha^2) (E[\rho])^2 \quad (4.15)$$

โดย

$$(E[\rho])^2 = e^{2\beta m + \beta^2 \sigma^2} \quad (4.16)$$

$$Var(\rho) = e^{2\beta m_{ik} + \beta^2 \sigma_{ik}^2} (e^{\beta^2 \sigma_{ik}^2} - 1) \quad (4.17)$$

และจาก [11]

$$Var(\alpha^2) = E[(\alpha^2)^2] - (E[\alpha^2])^2 = 2(E[\alpha^2])^2 - (E[\alpha^2])^2$$

$$= 2 \left(\frac{1}{L} \right)^2 - \left(\frac{1}{L} \right)^2$$

$$Var(\alpha^2) = \frac{1}{L^2}$$

$$(E[\rho])^2 = e^{2\beta m + \beta^2 \sigma^2}$$

$$(4.18)$$

$$(4.19)$$

จากสมการที่ (4.16) (4.17) (4.18) และ (4.19) แทนในสมการที่ (4.15) จะได้

$$Var(\alpha^2 \rho) = \frac{1}{L} e^{2\beta m + \beta^2 \sigma^2} \left\{ (e^{\beta^2 \sigma^2} - 1) + \frac{1}{L} \right\} \quad (4.20)$$

เพราะฉะนั้นจากสมการ (4.20) แทนลงในสมการที่ (4.7) ได้ตัวแปรสุ่ม Z_N ที่มีการแจกแจงแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเป็น

$$Var(Z) = (M - 1)(L) \left\{ \frac{1}{L} e^{2\beta m + \beta^2 \sigma^2} \left\{ (e^{\beta^2 \sigma^2} - 1) + \frac{1}{L} \right\} \right\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ (L-1) \left\{ \frac{1}{L} e^{2\beta m + \beta^2 \sigma^2} \left\{ e^{\beta^2 \sigma^2} - 1 \right\} + \frac{1}{L} \right\} \quad (4.21)$$

เพราะฉะนั้นจะได้ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของตัวแปรสุ่ม Z_N ได้เป็นดังสมการที่ (4.22) และ (4.23)

$$E[Z_N] = \left(M - \frac{1}{L} \right) \left\{ e^{\beta m + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma^2} \right\} \quad (4.22)$$

$$Var(Z_N) = \left(M - \frac{1}{L} \right) \left\{ e^{2\beta m + \beta^2 \sigma^2} \left\{ e^{\beta^2 \sigma^2} - 1 \right\} + \frac{1}{L} \right\} \quad (4.23)$$

เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (4.5) จะได้สมการแสดงความน่าจะเป็นของการติดขัด (Blocking Probability) โดยแทนค่าจากสมการ (4.22) และ (4.23) ได้สมการ (4.24)

$$P_{blocking} = Q \left(\frac{Z_0 - E[Z_N]}{\sqrt{Var(Z_N)}} \right) \quad (4.24)$$

4.2.2 ความน่าจะเป็นของการติดขัดโดยการประมาณแบบล็อกนอร์มอล (Lognormal Approximation)

เมื่อให้ตัวแปรสุ่ม ξ เป็นตัวแปรที่แทนถึงตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบล็อกนอร์มอล ภายใต้การประมาณแบบล็อกนอร์มอลจะได้ว่าค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของตัวแปรสุ่มเกาส์ Z_N จะมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของตัวแปรสุ่มล็อกนอร์มอล ξ โดยเมื่อค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของตัวแปรสุ่ม ξ เป็นดังสมการ [11]

$$E[\xi] = e^{m_N + \frac{1}{2} \sigma_N^2} \quad (4.25)$$

$$Var(\xi) = e^{2m_N + \sigma_N^2} (e^{\sigma_N^2} - 1) \quad (4.26)$$

เมื่อให้ $E[Z_N] = E[\xi]$ และ $Var(Z_N) = Var(\xi)$ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(M - \frac{1}{L}\right) \left\{ e^{\beta m + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma^2} \right\} = e^{m_N + \frac{1}{2} \sigma_N^2} \quad (4.27)$$

$$\left(M - \frac{1}{L}\right) \left\{ e^{2\beta m + \beta^2 \sigma^2} \left\{ e^{\beta^2 \sigma^2} - 1 \right\} + \frac{1}{L} \right\} = e^{2m_N + \sigma_N^2} \left(e^{\sigma_N^2} - 1 \right) \quad (4.28)$$

แก้สมการที่ (4.27) และ (4.28) จะได้ค่าของความแปรปรวน และ ค่าเฉลี่ย

$$\sigma_N^2 = \ln \left\{ \frac{\left(e^{\beta^2 \sigma^2} - 1 \right) + \frac{1}{L}}{\left(M - \frac{1}{L} \right) + 1} \right\} \quad (4.29)$$

$$m_N = \ln \left\{ \left(M - \frac{1}{L} \right) \left[e^{\beta m + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma^2} \right] \right\} - \frac{1}{2} \sigma_N^2 \quad (4.30)$$

เพราะฉะนั้นจะได้ความน่าจะเป็นของการติดขัด (Blocking Probability) ในการประมาณค่าแบบลือกนอร์มอลเป็นดังสมการ

$$P_{Blocking} = Q \left(\frac{\ln(Z_0) - m_N}{\sigma_N} \right) \quad (4.31)$$

เมื่อ m_N และ σ_N จากสมการที่ (4.30) และ (4.29)

4.3 การหาค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบ (Probability of Bit Error Rate)

เมื่อใช้การมอดูเลตแบบ BPSK จะได้ความน่าจะเป็นของอัตราความผิดพลาดบิตเป็น

$$P_e = Q \left(\sqrt{2 \frac{E_b}{\eta_0}} \right) \quad (4.32)$$

โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{E_b}{\eta_0} = \frac{S_{s0} R_b}{N_0 + \frac{1}{W} I} \quad (4.33)$$

เมื่อ I เป็น กำลังของสัญญาณแทรกสอดทั้งหมด Z ตามสมการที่ (4.4) โดยไม่คิด และเมื่อไม่คิด Thermal Noise, N_0 จะได้

$$\frac{E_b}{\eta_0} = \frac{W S_{s0}}{R I} \quad (4.34)$$

เมื่อ S_{s0} เป็น กำลังของสัญญาณที่ถูกรับได้จาก ผู้ใช้งานที่ต้องการ ในหน่วย Watts ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มแบบล็อกนอร์มอล ดังนั้น สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$S_{s0} = 10^{x/10} = e^{\beta x} \quad (4.35)$$

เมื่อ x เป็นกำลังของสัญญาณที่รับได้จากผู้ใช้งานที่ต้องการในหน่วยของ dB ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ ด้วยค่าเฉลี่ยศูนย์ และค่าการเบี่ยงเบน σ_x

ใน [12] เมื่อให้ I เป็นตัวแปรสุ่มแบบล็อกนอร์มอล ดังนั้นสามารถเขียนได้ว่า

$$I = e^z \quad (4.36)$$

เมื่อ z เป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ย m_N และค่าความเบี่ยงเบน σ_N

$$\begin{aligned} P_c &= Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{\eta_0}}\right) = Q\left(\sqrt{2\frac{W S_{s0}}{R I}}\right) = Q\left(\sqrt{2\frac{W e^{\beta x}}{R e^z}}\right) = Q\left(\sqrt{2\frac{W}{R} e^{\beta x - z}}\right) \\ &= Q\left(\sqrt{e^{\ln 2\frac{W}{R} + \beta x - z}}\right) = Q\left(e^{\frac{1}{2}\left(\ln 2\frac{W}{R} + \beta x - z\right)}\right) = Q(e^\gamma) \end{aligned} \quad (4.37)$$

เมื่อให้

$$\gamma = \frac{1}{2}\left(\ln 2\frac{W}{R} + \beta x - z\right) \quad (4.38)$$

เพราะฉะนั้น จะได้ ค่าเฉลี่ยของ และค่าความแปรปรวนของ γ ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m_r = \frac{1}{2} \left\{ \ln \left(2 \frac{W}{R} \right) - m_N \right\} \quad (4.39)$$

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{4} (\beta^2 \sigma^2 + \sigma_N^2) \quad (4.40)$$

โดย σ_N^2 และ m_N มีค่าดังในสมการที่ (4.29) และ (4.30) ต่อมาเมื่อต้องการหาอัตรา
ผิดพลาดบิตเฉลี่ย จะทำการหาค่าดังสมการ

$$\bar{P}_e = \int_{-\infty}^{+\infty} Q(e^r) g(r) dr \quad (4.41)$$

และจากการประมาณใน ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยจะสามารถประมาณได้เป็นดัง
สมการ

$$\bar{P}_e \approx \frac{2}{3} Q(e^{m_r}) + \frac{1}{6} Q(e^{m_r + \sqrt{3}\sigma_r}) + \frac{1}{6} Q(e^{m_r - \sqrt{3}\sigma_r}) \quad (4.42)$$

เพราะฉะนั้นจะได้สมการที่ (4.42) เป็นสมการที่แสดงถึงความน่าจะเป็นของความผิดพลาด
บิตเฉลี่ยโดยค่าเฉลี่ยและความแปรปรวน ตามสมการ (4.39) และ (4.40) มาแทนค่าในสมการที่
(4.42)

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์เชิงเลขของระบบ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการติดขัด (Blocking Probability) และความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต (Bit Error Probability) ของระบบ ด้วยการใช้โปรแกรม Matlab เพื่อเลียนแบบการทำงาน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาผลของตัวแปรที่แสดงถึงค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งบ่งชี้ถึงระดับการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์ จำนวนของเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้ในการหลายเส้นทางของช่องสัญญาณ (หรือจำนวนสาขาของเครื่องรับแบบเรด) โดยได้แบ่งเป็นหัวข้อของการวิเคราะห์ได้ดังนี้

5.1 ค่าความน่าจะเป็นของการติดขัด (Blocking Probability) ของระบบ

5.1.1 การประมาณค่าแบบเกาส์

5.1.2 การประมาณค่าแบบล็อกนอร์มอล

5.2 ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบ (Bit Error Rate) ของระบบ

5.2.1 ผลของการควบคุมกำลัง

5.2.2 ผลของจำนวนสาขาของเครื่องรับแบบเรด

5.1 ค่าความน่าจะเป็นของการติดขัด (Blocking Probability) ของระบบ

5.1.1 การประมาณค่าแบบเกาส์

5.1.1.1 ผลของค่า $(E_b/N_o)_{required}$ ของระบบ

รูปที่ 5.1 แสดงค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดของระบบซีดีเอ็มเอ โดยมีค่าอัตราการขยายการประมวลผลเท่ากับ 128 จำนวนสาขาของเครื่องรับแบบเรดเท่ากับ 4 โดยเปรียบเทียบกันเมื่อค่า $(E_b/N_o)_{required}$ ของระบบเป็น 5 6 และ 7 dB ค่าของ $(E_b/N_o)_{required}$ นี้เป็นค่าที่ต้องการให้ระบบยังคงสามารถยอมรับได้ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่า $(E_b/N_o)_{required}$ ที่ค่าน้อยกว่าแสดงถึงระบบที่มีประสิทธิภาพดีกว่าจะให้จำนวนของผู้ใช้งานในระบบที่มากกว่า เมื่อพิจารณาที่ค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดที่เท่ากัน



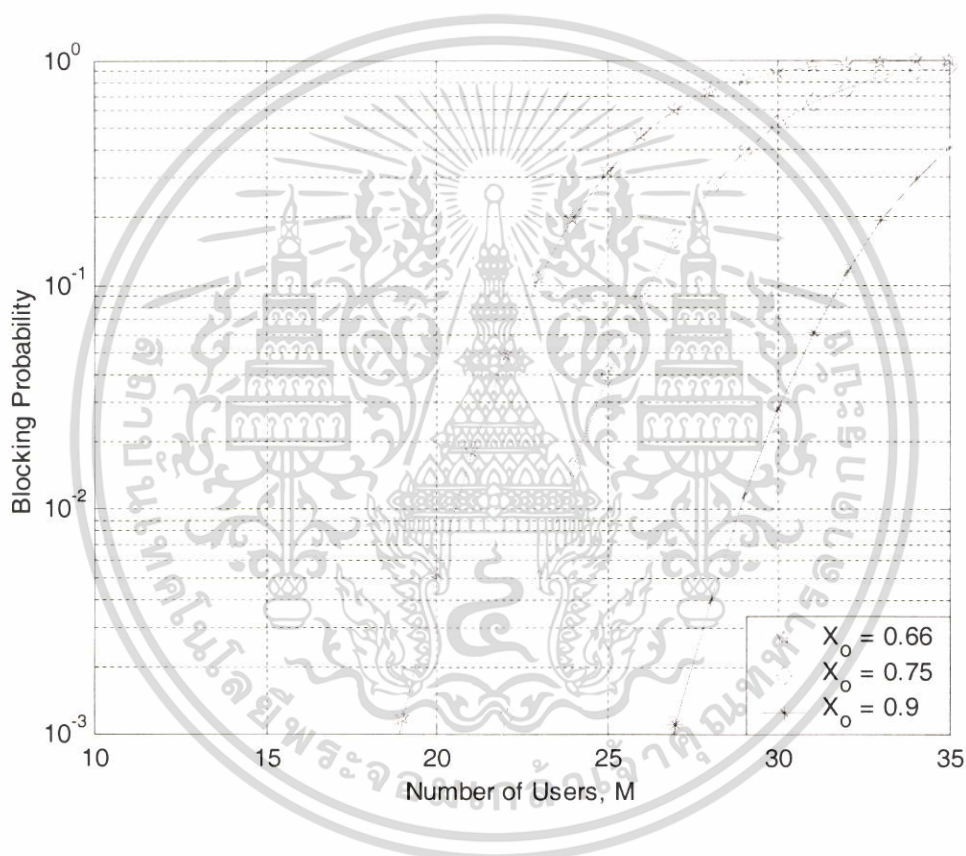
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่

$\sigma = 1$ dB $L = 4$ เส้นทาง ค่า PG = 128, $X_0 = 0.9$, โดยการเปรียบเทียบกันในค่าของ $(E_b/N_o)_{required}$ เป็น 5 6 และ 7 dB ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1.2 ผลของค่า X_0 ต่อความน่าจะเป็นของการติดขัดของระบบ

รูปที่ 5.2 แสดงค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดของระบบซีดีเอ็มเอ โดยมีค่าอัตราการขยายการประมวลผลเท่ากับ 128 จำนวนสาขาของเครื่องรับแบบเรดเท่ากับ 4 โดยเปรียบเทียบกันเมื่อค่า X_0 ของระบบเป็น 0.66 0.75 และ 0.9 ค่าจุดเปลี่ยนของโหลด>Loading Threshold) X_0 นี้เป็นค่าที่แสดงถึงการโหลดของระบบจากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่า X_0 ที่ค่าสูงกว่าแสดงถึงระบบที่มีประสิทธิภาพดีกว่าจะให้จำนวนของผู้ใช้งานในระบบที่มากกว่า เมื่อพิจารณาที่ค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดที่เท่ากัน

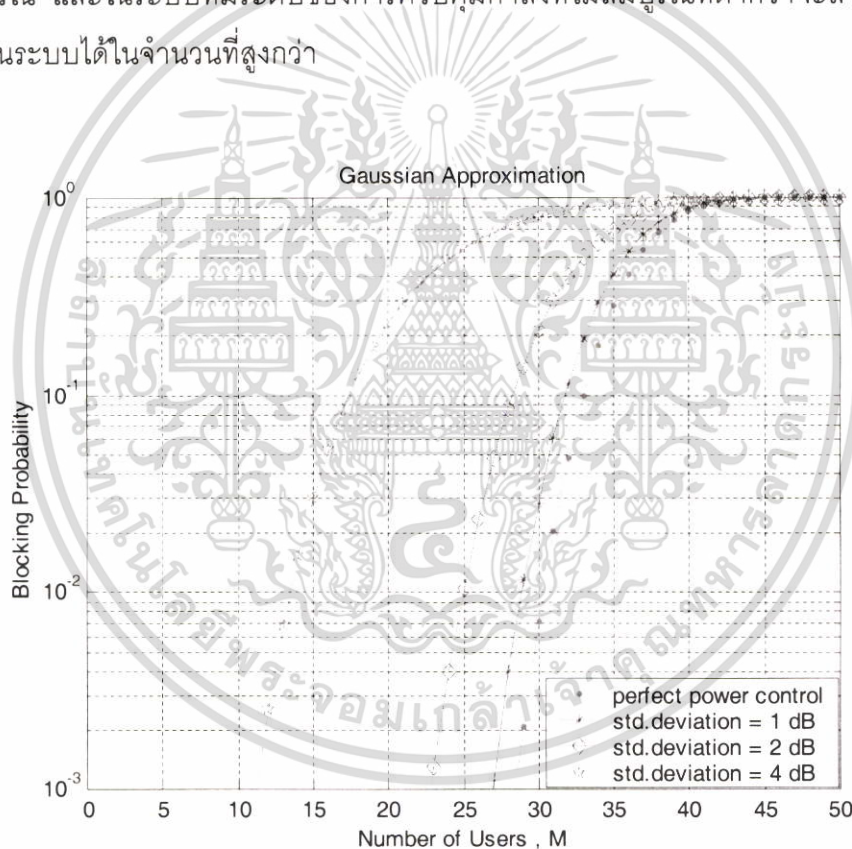


รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่

$\sigma = 1$ dB $L = 4$ เส้นทาง ค่า PG = 128, $(E_b/N_o)_{required}$ เป็น 5 dB โดยการเปรียบเทียบกันในค่าของ X_0 เป็น 0.66 0.75 และ 0.9 ตามลำดับ

5.1.1.3 ผลของการควบคุมกำลังต่อความน่าจะเป็นของความติดขัดของระบบ

รูปที่ 5.3 แสดงค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดของระบบซีดีเอ็มเอ โดยมีค่าอัตราการขยายการประมวลผล เท่ากับ 128 จำนวนสาขาของเครื่องรับแบบเรคเท่ากับ 4 โดยเปรียบเทียบกันเมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 0 1 2 และ 4 dB โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0 dB จะแสดงถึงระบบที่มีการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์ ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 1 2 และ 4 dB แสดงถึงระดับของการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์โดยค่าที่สูงขึ้นแสดงถึงระดับการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์ที่มากขึ้น จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าที่ค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดที่เท่ากัน จำนวนผู้ใช้งานจากระบบที่มีการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์จะให้จำนวนผู้ใช้งานมากกว่าระบบที่มีการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์ และในระบบที่มีระดับของการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์ที่ต่ำกว่าจะสามารถรองรับผู้ใช้งานในระบบได้ในจำนวนที่สูงกว่า

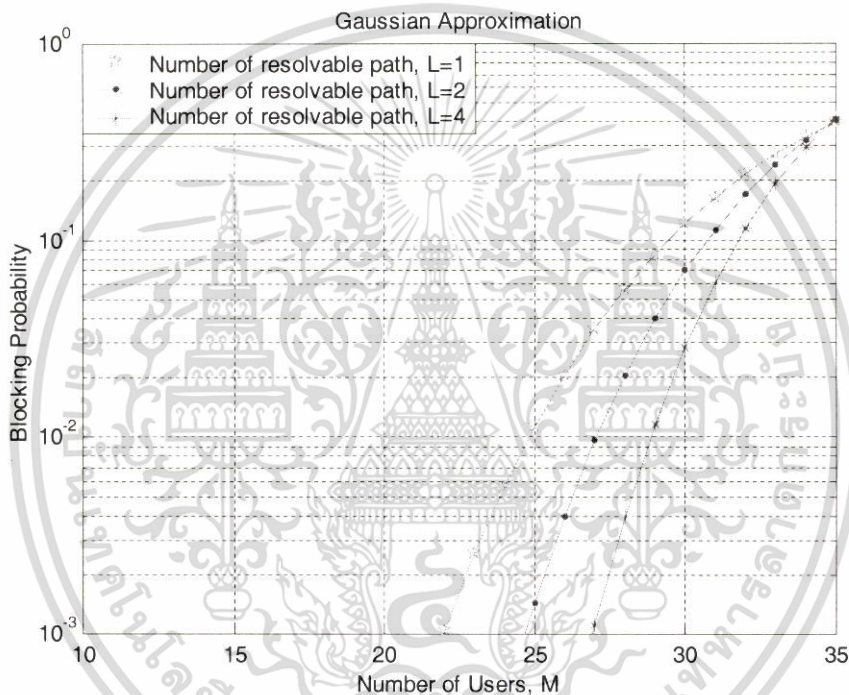


รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่ $L = 4$ เส้นทาง ค่า $PG = 128$, $(E_b/N_o)_{required} = 5$ dB, $X_0 = 0.9$ โดยแสดงการ เปรียบเทียบของระบบที่มีการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์ ($\sigma = 0$ dB) และระบบที่มีการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์ $\sigma = 1$ 2 และ 4 dB ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1.4 ผลของจำนวนของเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้หรือจำนวนสาขาของเครื่องรับแบบเรคต่อความน่าจะเป็นของความติดขัดของระบบ

รูปที่ 5.4 แสดงค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดของระบบซีดีเอ็มเอ โดยมีค่าอัตราการขยายการประมวลผล เท่ากับ 128 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 1 dB โดยเปรียบเทียบกันเมื่อจำนวนสาขาของเครื่องรับแบบเรคเท่ากับ 1 2 และ 4 จากผลการวิเคราะห์ ในการพิจารณาที่ค่าความน่าจะเป็นในการติดขัดที่ค่าๆหนึ่ง เมื่อจำนวนของเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้หรือจำนวนของสาขาเครื่องรับแบบเรคมีค่าสูงขึ้น ทำให้ระบบสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานในระบบได้มากขึ้น

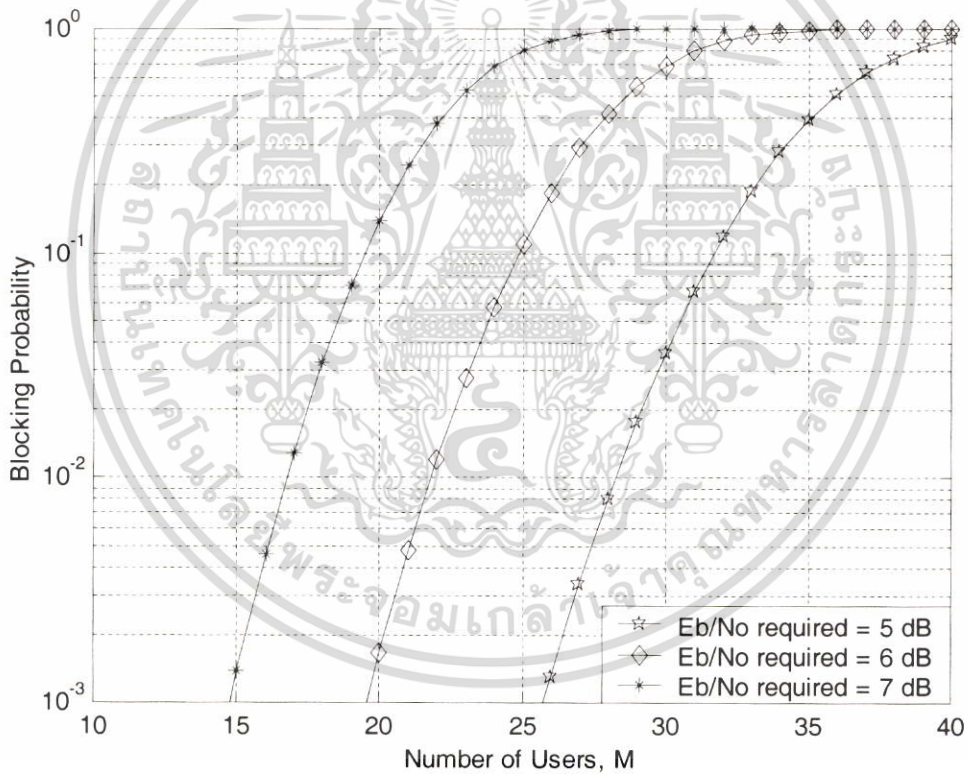


รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่ค่า $PG = 128$, $(E_b/N_o)_{required} = 5$ dB, $X_0 = 0.9$ $\sigma = 1$ dB โดยแสดงการเปรียบเทียบเมื่อ $L = 1$ 2 และ 4 ตามลำดับ

5.1.2 การประมาณค่าแบบลือกนอร์มอล

5.1.2.1 ผลของค่า $(E_b/N_o)_{required}$ ที่ต้องการของระบบ

รูปที่ 5.5 แสดงค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดของระบบซีดีเอ็มเอ โดยมีค่าอัตราการขยายการประมวลผล เท่ากับ 128 จำนวนสาขาของเครื่องรับแบบเรคเท่ากับ 4 โดยเปรียบเทียบกันเมื่อค่า $(E_b/N_o)_{required}$ ระบบเป็น 5 6 และ 7 dB ค่าของ $(E_b/N_o)_{required}$ นี้เป็นค่าที่ต้องการให้ระบบยังคงยอมรับได้ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่า $(E_b/N_o)_{required}$ ที่ค่าน้อยกว่าแสดงถึงระบบที่มีประสิทธิภาพดีกว่าจะให้จำนวนของผู้ใช้งานในระบบที่มากกว่า เมื่อพิจารณาที่ค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดที่เท่ากัน



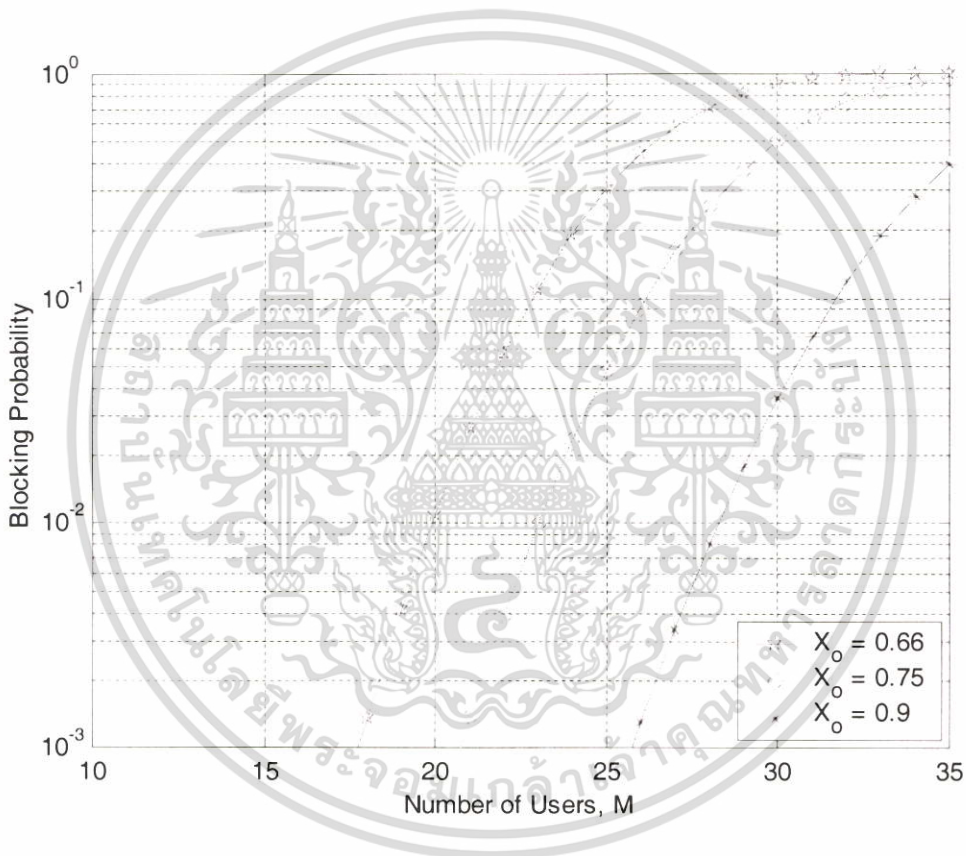
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่

$\sigma = 1$ dB $L = 4$ เส้นทาง ค่า PG = 128, $X_0 = 0.9$, โดยการเปรียบเทียบกันในค่าของ $(E_b/N_o)_{required}$ เป็น 5 6 และ 7 dB ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2.2 ผลของค่า X_0 ต่อความน่าจะเป็นของการติดขัดของระบบ

รูปที่ 5.6 แสดงค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดของระบบซีดีเอ็มเอ โดยมีค่าอัตราการขยายการประมวลผล เท่ากับ 128 จำนวนสาขาของเครื่องรับแบบเรคเท่ากับ 4 โดยเปรียบเทียบกันเมื่อค่า X_0 ของระบบเป็น 0.66 0.75 และ 0.9 ค่าจุดเปลี่ยนของโหลด(Loading Threshold) X_0 นี้เป็นค่าที่แสดงถึงโหลดของระบบ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่า X_0 ที่ค่าสูงกว่าแสดงถึงระบบที่มีประสิทธิภาพดีกว่าจะให้จำนวนของผู้ใช้งานในระบบที่มากกว่า เมื่อพิจารณาที่ค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดที่เท่ากัน

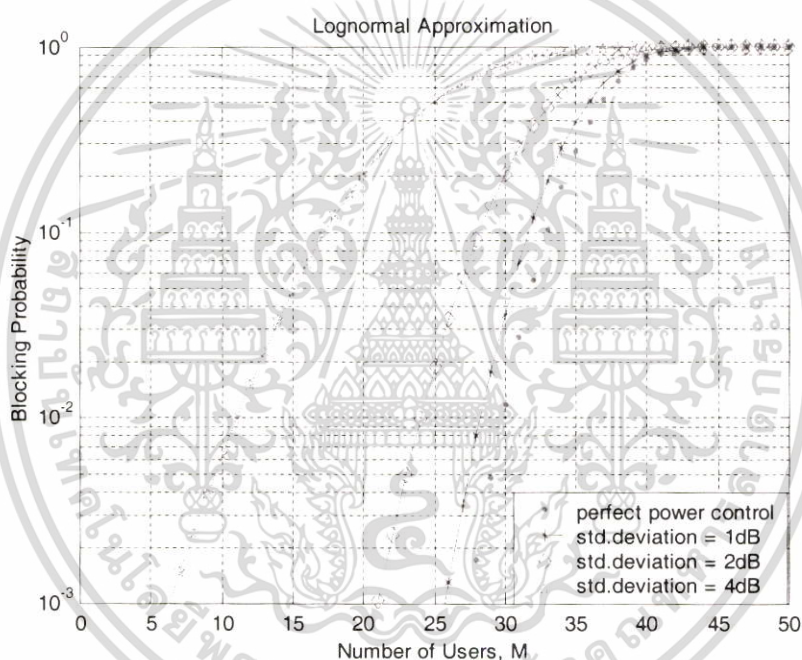


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่

$\sigma = 1$ dB $L = 4$ เส้นทาง ค่า PG = 128, $(E_b/N_o)_{required}$ เป็น 5 dB โดยการเปรียบเทียบกันในค่าของ X_0 เป็น 0.66 0.75 และ 0.9 ตามลำดับ

5.1.2.3 ผลของการควบคุมกำลังต่อความน่าจะเป็นของความติดขัดของระบบ

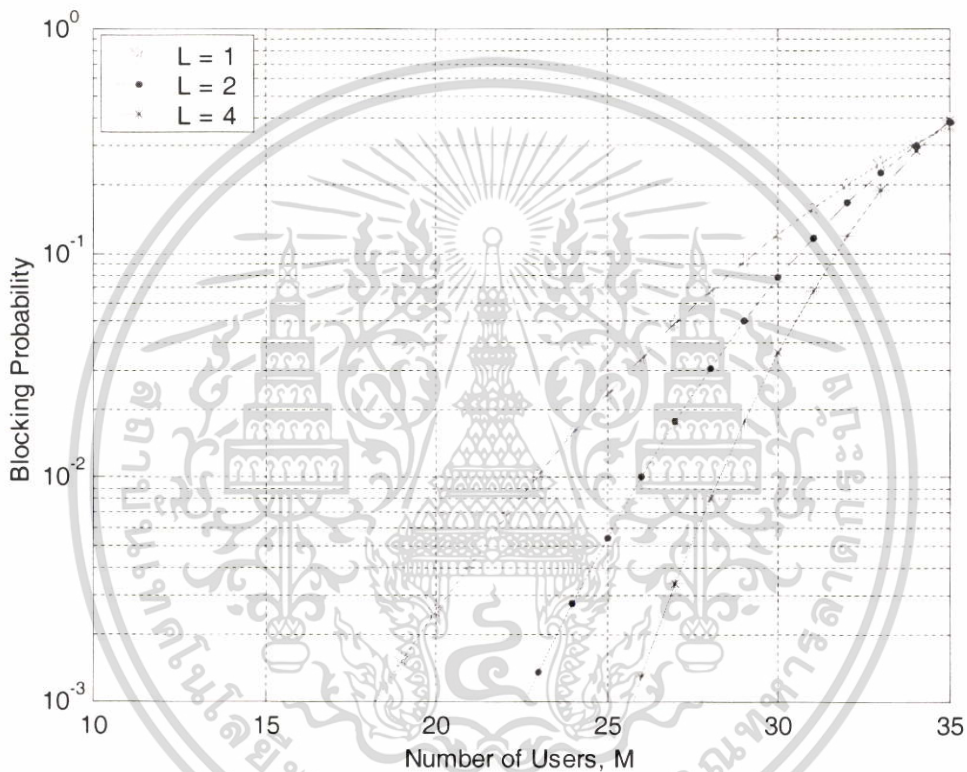
รูปที่ 5.7 แสดงค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดของระบบซีดีเอ็มเอ โดยมีค่าอัตราการขยายการประมวลผล เท่ากับ 128 จำนวนสาขาของเครื่องรับแบบเรคเท่ากับ 4 โดยเปรียบเทียบกันเมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 0 1 2 และ 4 dB โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0 dB จะแสดงถึงระบบที่มีการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์ ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 1 2 และ 4 dB แสดงถึงระดับของการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าที่ค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดที่เท่ากัน จำนวนผู้ใช้งานจากระบบที่มีการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์จะให้จำนวนผู้ใช้งานมากกว่าระบบที่มีการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์ และในระบบที่มีระดับของการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์ที่ต่ำกว่าจะทำให้รองรับผู้ใช้งานในระบบได้ในจำนวนที่สูงกว่า



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่ $L = 4$ เส้นทาง ค่า $PG = 128$, $(E_b/N_o)_{required} = 5$ dB, $X_0 = 0.9$ โดยแสดงการเปรียบเทียบของระบบที่มีการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์ ($\sigma = 0$ dB) และระบบที่มีการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์ $\sigma = 1$ 2 และ 4 dB ตามลำดับ

5.1.2.8 ผลของจำนวนของเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้หรือจำนวนสาขาของเครื่องรับแบบเรคต่อความน่าจะเป็นของความติดขัดของระบบ

รูปที่ 5.8 แสดงค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดของระบบซีดีเอ็มเอ โดยมีค่าอัตราการขยายการประมวลผล เท่ากับ 128 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 1 dB โดยเปรียบเทียบกันเมื่อจำนวนสาขาของเครื่องรับแบบเรคเท่ากับ 1 2 และ 4 จากผลการวิเคราะห์ ในการพิจารณาที่ค่าความน่าจะเป็นในการติดขัดที่ค่าๆหนึ่ง เมื่อจำนวนของเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้หรือจำนวนของสาขาเครื่องรับแบบเรคมีค่าสูงขึ้น ทำให้ระบบสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานในระบบได้มากขึ้น

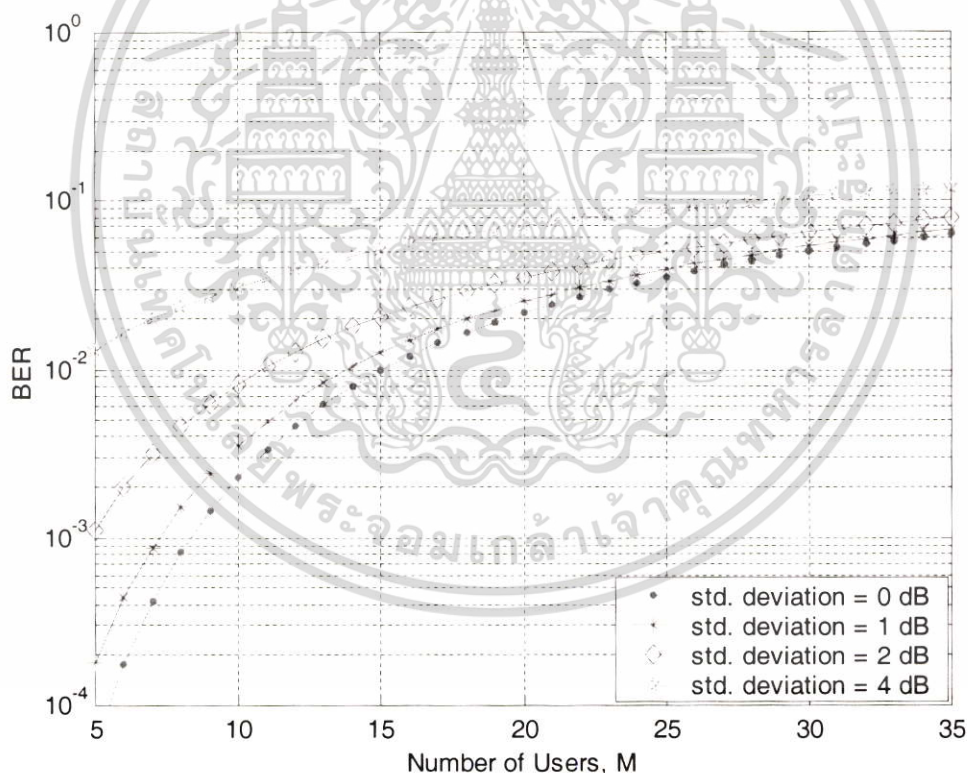


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่ค่า $PG = 128$, $(E_b/N_o)_{required} = 5$ dB, $X_0 = 0.9$ $\sigma = 1$ dB โดยแสดงการเปรียบเทียบเมื่อ $L = 1$ 2 และ 4 ตามลำดับ

5.2 ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของระบบ (Bit Error Rate) ของระบบ

5.2.1 ผลของการควบคุมกำลังต่อความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบ

รูปที่ 5.9 แสดงค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบ ด้วยอัตราขยายการประมวลผลเท่ากับ 128 (E_b/N_o)_{required} = 5 dB, $X_0 = 0.9$ จำนวนเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้ $L = 4$ เส้นทาง โดยเปรียบเทียบกันที่การควบคุมกำลังที่สมบูรณ์ กับ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการควบคุมกำลังที่ผิดพลาด เป็น 1 2 และ 4 dB เห็นได้ว่า ในระบบที่มีการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์จะให้ค่าความน่าจะเป็นของการผิดพลาดบิตที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่มีการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์ ส่วนในกรณีที่ระดับการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์ที่ผิดพลาดมากขึ้น(ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สูงขึ้น)จะส่งผลให้ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตมีค่าสูงขึ้น

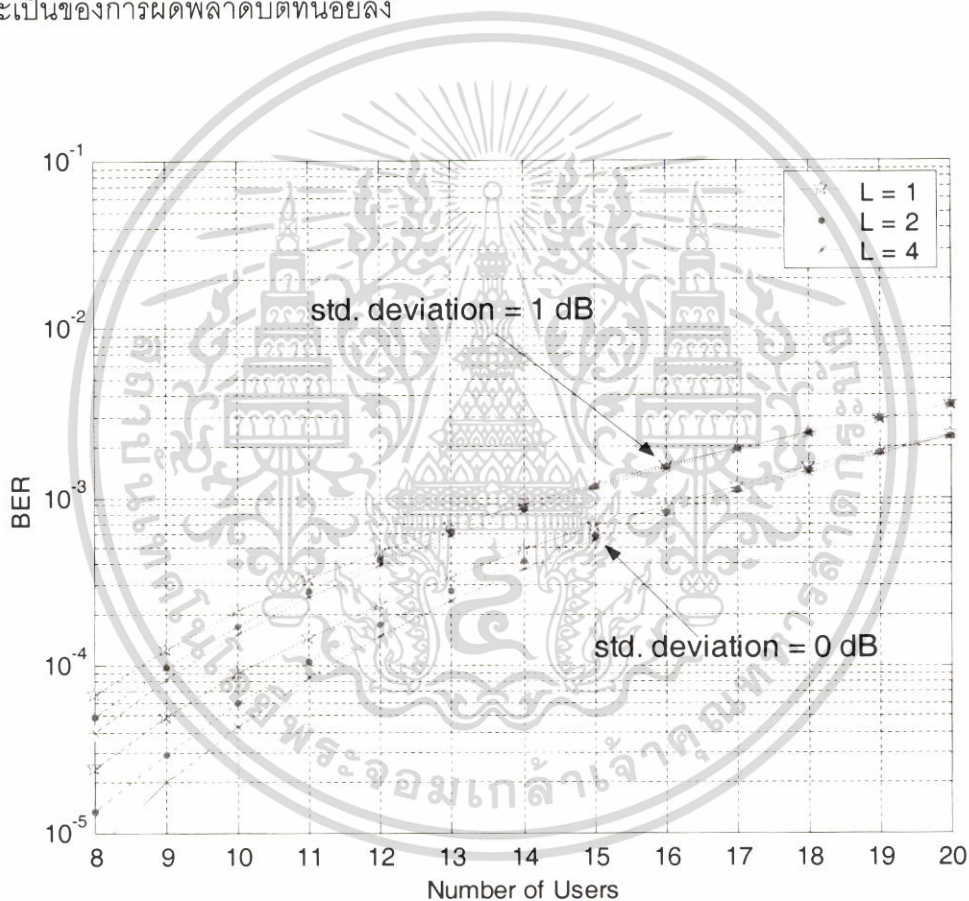


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่ค่า $PG = 128$, (E_b/N_o)_{required} = 5 dB, $X_0 = 0.9$ $L = 4$ โดย $\sigma = 0.1, 2$ และ 4 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ผลของจำนวนของเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้หรือจำนวนสาขาของเครื่องรับแบบเรดต่อความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบ

รูปที่ 5.10 แสดงค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบ ด้วยอัตราการขยายการประมวลผลเท่ากับ 256 $(E_b/N_o)_{required} = 5$ dB, $X_0 = 0.9$ โดยเปรียบเทียบกันที่การควบคุมกำลังที่สมบูรณ์ ($\sigma = 0$ dB) กับ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการควบคุมกำลังที่ผิดพลาดเป็น 1 dB โดยในแต่ละค่าของความเบี่ยงเบนมาตรฐานจะให้เส้นทางที่สามารถแก้ไขได้ที่ 1 2 และ 4 เส้นทาง จะเห็นได้ว่าในกรณีที่จำนวนของเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้มีค่าสูงขึ้นจะให้ค่าความน่าจะเป็นของการผิดพลาดบิตที่น้อยลง



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต กับ จำนวนของผู้ใช้งาน M โดยที่ค่า $P_G = 256$, $(E_b/N_o)_{required} = 5$ dB, $X_0 = 0.9$, $\sigma = 0.1$ dB, $L = 1, 2$ และ 4 เส้นทาง

บทที่ 6

สรุปผลการวิเคราะห์

ในระบบการสื่อสารไร้สายแบบการเข้าถึงหลายทางโดยการแบ่งทางรหัส(CDMA) นั้นสามารถให้การรองรับการใช้งานของผู้ใช้ได้หลายคนพร้อมๆ กัน และผู้ใช้งานทั้งหมดนั้นจะสามารถเข้าไปใช้งานของช่องสัญญาณได้เต็มช่วงความถี่ของแบนด์วิดท์ในเวลาเดียวกัน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาในการสื่อสารไร้สายในระบบเซลล์ลูลาร์ที่มีการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางรหัส โดยได้พิจารณาในช่องสัญญาณที่มีการเฟดดิ้ง ซึ่งเกิดการรับสัญญาณจากหลายวิถีของเส้นทางเกิดขึ้นโดยในช่องสัญญาณที่เกิดการรับสัญญาณจากหลายวิถีดังกล่าวได้กำหนดให้แอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละเส้นทางที่เกิดการรับสัญญาณจากหลายวิถี มีฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่มีการแจกแจงแบบเรย์ลี และช่องสัญญาณที่ใช้พิจารณาจะเป็นแบบเจาะจงความถี่ตั้งต้นทางภาครับที่สถานีฐานจึงได้มีการพิจารณาให้มีการใช้เครื่องรับแบบเรค นอกจากการเกิดรับสัญญาณจากหลายวิถีแล้วสัญญาณยังจะได้รับผลกระทบจากการบดบัง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์ของสถานีฐานที่มีต่อเครื่องลูกข่ายอีกด้วย ดังนั้นจึงได้ทำการพิจารณาในค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดของระบบซึ่งเป็นความน่าจะเป็นที่เครื่องลูกข่ายรายใหม่ร้องขอใช้ช่องสัญญาณจะถูกปฏิเสธจากช่องสัญญาณ และนอกจากนี้ยังได้พิจารณาส่วนของค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบอีกด้วย

จากผลการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการติดขัดของระบบซึ่งได้มี 2 วิธีในการประมาณค่าความน่าจะเป็นดังกล่าวคือ การประมาณแบบเกาส์และการประมาณแบบลิอิกนอร์มอล โดยในการประมาณแบบเกาส์เมื่อระดับของความผิดพลาดของการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์มีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ความน่าจะเป็นของการติดขัดมีค่าสูงขึ้นหรือในขณะเดียวกันสามารถกล่าวได้ว่าเมื่อพิจารณาที่ความน่าจะเป็นของการติดขัดที่ค่าเท่ากันจำนวนผู้ใช้งานที่ระบบสามารถรองรับได้จะมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาในผลของจำนวนเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้จากเครื่องรับแบบเรคที่มีต่อความน่าจะเป็นของการติดขัด พบว่าเมื่อจำนวนเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ความน่าจะเป็นของการติดขัดของระบบลดลง ทำนองเดียวกันก็สามารถกล่าวได้ว่าจำนวนของผู้ใช้งานที่ระบบจะสามารถรองรับได้จะมีค่าสูงขึ้นด้วยนั่นเอง นอกจากนี้ค่าอัตราส่วนของพลังงานบิตของสัญญาณต่อความหนาแน่นเชิงพลังงานของสัญญาณรบกวนพลังงานบิตต่อความหนาแน่นของกำลังของสัญญาณรบกวน (E_b/N_0) ที่ต้องการของระบบที่ค่าน้อยกว่าจะส่งผลให้ค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดลดลงและค่าจุดเปลี่ยนของโหลด(Loading Threshold) X_0 ที่สูงขึ้นจะให้ค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดในระบบที่ลดลง ส่วนการประมาณแบบลิอิกนอร์มอลก็ยังคงให้ค่าที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับการประมาณแบบเกาส์ แต่มีข้อแตกต่างกันตรงที่เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานในเชิงวิชาการเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์จากเอกสารฉบับนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาในบริเวณที่มีผู้ใช้ต่ำๆ การประมาณแบบล็อกนอร์มอลจะให้ความน่าจะเป็นของการติดขัดที่สูงกว่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าที่ค่าความน่าจะเป็นของการติดขัดต่ำๆ การประมาณแบบล็อกนอร์มอลจะให้การรองรับผู้ใช้งานได้น้อยกว่าแบบเกาส์ แต่เมื่อจำนวนผู้ใช้งานมีจำนวนสูงขึ้น ผลที่ได้จากการประมาณทั้ง 2 วิธีจะให้ค่าการประมาณที่ใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาในค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบจะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนของเส้นทางที่สามารถแก้ไขได้มีค่าสูงขึ้นจะให้ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตที่ลดลง ส่วนในกรณีของการควบคุมกำลังก็เช่นเดียวกัน เมื่อระดับของความผิดพลาดของการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์มีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตมีค่าสูงขึ้นด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lee J. S. and Miller L. E. **CDMA Systems Engineering Handbook**. Boston, Artech House, 1998.
- [2] Sklar B. **Digital Communications: Fundamental and Applications**. New Jersey, Prentice-Hall, Inc. 2001.
- [3] Proakis J. G. **Digital Communications**. Boston, McGraw Hill, 2001.
- [4] Young C. S. **CDMA RF System Engineering**. Boston, Artech House, 1998.
- [5] Pahlavan K and Levesque A.H. **Wireless Information Network**. New York, John Wiley, 1995.
- [6] Viterbi A.M., **CDMA Principles of Spread Spectrum Communication**. Addison-Wesley Publishing Company
- [7] Viterbi A.M., Viterbi A.J. "Erlang Capacity of a Power Controlled CDMA System." IEEE Journal on Selected Area in Communications, Vol. 11, No. 6, August 1993, pp. 892-899,
- [8] Ariyavisitakul S. and Chang L. "Signal and Interference Statistics of a CDMA System with Feedback Power Control," IEEE Trans. Commun., vol. 41, No. 11, Nov. 1993. pp. 1626-1634,
- [9] Padovani R., "Reverse Link Performance of IS-95 base Cellular System." IEEE Personal Communications, Vol. 1, No. 3, Third Quarter 1994, pp. 28-34.
- [10] Shen Q. and Krzymien W.A. " The effect of fading on the Erlang capacity of the IS-95 CDMA cellular system." IEEE International Conference on Communication, Vol.3, 1996.
- [11] Jerez, J. M. R., Garcia M. R. and Estrella A. D. " Performance Analysis of a Cellular Slotted CDMA System with Imperfect Power Control over a Rayleigh Fading Channel," Multiaccess, Mobility and Teletraffic in Wireless Communications, E. Biglieri, L. Fratta, B. Jabbari, Eds., Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 253-262
- [12] Jerez, J. M. R., Garcia M. R. and Estrella A. D. "Effects of Power Control Errors and Multipath Fading on BER in a Cellular CDMA System" Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, Boston, USA, October 2000.

ภาคผนวก

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] C. Kumparee, C. Kimpan, O. Pin-Ngern, N. Hemmakorn and S. Noppanakeepong
 "Blocking Probability of the Reverse Link Cellular CDMA System," IEEE Asia Pacific
 Conference on Circuits and System 2002., Bali Indonesia.
- [2] C. Kumparee, C. Kimpan, O. Pin-ngern and S.Noppanakeepong. "Outage
 Probability of the Reverse Link CDMA System with Imperfect Power Control
 over Multipath Fading channel," International Conference on Telecommunications
 2002, Beijing China



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายเฉลิมพล คุ่มไพบรี เกิดเมื่อวันที่ 5 ธันวาคม 2520 ที่จังหวัดกระบี่ สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
จังหวัดนครราชสีมา ปีการศึกษา 2541



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้