

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์ความจุเออร์แลงบนการเชื่อมโยงขากลับของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ
ซึ่งรองรับผู้ใช้บริการเสียงและเว็ลด์วายเว็บ

ERLANG CAPACITY ANALYSIS ON THE REVERSE LINK OF W-CDMA
SYSTEMS WITH SUPPORTING VOICE AND WWW USERS



เสรี อรุณรุ่งรัตน์

SEREE ARUNRUNGRAT

กพ.
ศ ๑๓๑
๑๕๑๘

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 60884
วัน,เดือน,ปี..... - 6 ก.ค. 2549

b. 11๕4303๖
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1847-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ERLANG CAPACITY ANALYSIS ON THE REVERSE LINK OF W-CDMA
SYSTEMS WITH SUPPORTING VOICE AND WWW USERS**



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

2005

ISBN 974-15-1847-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่พิมพ์และจัดจำหน่ายเพื่อประโยชน์แก่สถาบันฯ เท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้ประโยชน์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ความจุเออร์เลงบนการเชื่อมโยงจากกลับของระบบ วายแบนด์-ซีดีเอ็มเอซึ่งรองรับผู้ใช้บริการเสียงและวิดีโอด้วยวีบี
นักศึกษา	นายเสรี อรุณรุ่งรัตน์
รหัสประจำตัว	44061802
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ชวลิต เบนญางคประเสริฐ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การวิเคราะห์ความจุเออร์เลงของการสื่อสารทางด้านการเชื่อมโยงจากเครื่องลูกข่ายไปยังสถานีฐานในระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ (W-CDMA) ซึ่งรองรับผู้ใช้บริการเสียงและวิดีโอด้วยวีบี ผลการวิเคราะห์จะแสดงค่าความจุเออร์เลงของระบบสัมพันธ์กับค่าความน่าจะเป็นของการสูญหาย (Outage Probability) โดยใช้การประมาณค่าแบบเกาส์ (Gaussian Approximation) ในการวิเคราะห์ดังกล่าวจะคำนึงถึงความต้องการของการให้บริการทางเสียงควบคู่ไปกับทางวิดีโอด้วย นอกจากนี้ยังพิจารณากราฟฟิคของวิดีโอที่มี การส่งข้อมูลหลายอัตรา รวมทั้งผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงด้วย ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การรวมกราฟฟิคของเสียงและวิดีโอเข้าด้วยกันนั้น จะมีผลกระทบซึ่งกันและกันต่อคุณภาพของการให้บริการทั้งทางเสียงและทางวิดีโอด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการส่งข้อมูลของวิดีโอที่มีอัตราต่ำจะส่งผลทำให้ค่าความจุเออร์เลงของการบริการวิดีโอสูงขึ้น เมื่อพิจารณาที่กราฟฟิคของการบริการเสียงและความน่าจะเป็นของการสูญหายที่เท่ากัน

Thesis Title	Erlang Capacity Analysis on the Reverse Link of W-CDMA Systems with Supporting Voice and WWW Users
Student	Mr. Seree Arunrungrat
Student ID	44061802
Degree	Master of Engineering
Programme	Information Engineering
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Chawalit Benjangkprasert

ABSTRACT

This thesis proposes the Erlang capacity analysis of the reverse link W-CDMA system with supporting voice and WWW users. The analytical results show the Erlang capacity in terms of outage probability. The Gaussian approximation is the method of outage probability for capacity analysis. The conditions of an analysis in this thesis are the voice service requirement and WWW service requirement. Furthermore, we also consider in the multirate of WWW traffic and impact of other cell interference. The numerical results indicate with integrated voice and WWW traffic is mutually affected to its individual service. It was also shown that the lower bit rate of WWW traffic to cause the higher WWW traffic Erlang capacity, for the same voice traffic and outage probability.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ชวลิต เบญจางคประเสริฐ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. กนก เจริญพงศ์เวช และ รศ. อรตาก แสงอรุณ กรรมการสอบหัวข้อและ โครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ. มยุรี เลิศเวชกุล ที่คอยให้คำที่ปรึกษาและชี้แนะข้อคิดต่าง ๆ อันก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้า และเป็นแนวทางในการจัดทำวิทยานิพนธ์จนประสบความสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเล็ก และ คุณแม่สุนันท์ ผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ที่ได้ให้ความรักความเข้าใจ ให้กำลังใจ ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณอำนวยการ เตโชติชวาล และ ครอบครัว ที่ให้กำลังใจและคอยช่วยเหลือสนับสนุนต่าง ๆ แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และบุคคลต่าง ๆ ที่ผู้วิจัยไม่ได้กล่าวไว้ในที่นี้ ที่ให้การสนับสนุนตลอดจนให้ความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ และเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยมาโดยตลอด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

เสรี อรุณรุ่งรัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สารบัญสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	I
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.3 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 หลักการของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ.....	4
2.1 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่น.....	4
2.1.1 การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss).....	4
2.1.2 การบดบัง (Shadowing).....	5
2.1.3 คลื่นหลายวิถี (Multipath).....	5
2.2 หลักการพื้นฐานของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ.....	6
2.2.1 หลักการทั่วไปการเข้าถึงหลายทาง.....	7
2.2.1.1 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางความถี่.....	7
2.2.1.2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางเวลา.....	7
2.2.1.3 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางรหัส.....	8
2.2.2 เทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางรหัส (CDMA).....	9
2.2.2.1 การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่ใช้วิธีการจัดลำดับ โดยตรง (DS-SS).....	10
2.2.2.2 การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่ใช้วิธีการกระโดดของความถี่ (FH-SS).....	12
2.2.2.3 การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่ใช้วิธีการกระโดดของเวลา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
(TH-CDMA).....	15
2.2.2.4 การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่ใช้วิธีการไฮบริดจ์.....	16
2.3 ระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ.....	17
2.3.1 สัญญาณแทรกสอดในการสื่อสารเชื่อมโยงขาไป.....	18
2.3.1.1 สัญญาณแทรกสอดภายในเซลล์.....	18
2.3.1.2 สัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่น.....	19
2.3.2 สัญญาณแทรกสอดในการสื่อสารเชื่อมโยงขากลับ.....	23
2.3.2.1 สัญญาณแทรกสอดภายในเซลล์.....	23
2.3.2.2 สัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่น.....	24
2.4 ความจุของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ.....	24
2.4.1 การควบคุมกำลังแบบลูปเปิด (Open Loop Power Control).....	27
2.4.2 การควบคุมกำลังแบบลูปปิด (Close Loop Power Control).....	29
2.4.3 การเปลี่ยนถ่ายเซลล์ (Hand-Off).....	30
2.4.4 ความจุของระบบซีดีเอ็มเอ.....	31
บทที่ 3 หลักการพื้นฐานทราฟฟิกของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ.....	37
3.1 หลักการพื้นฐานของทราฟฟิกในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่.....	37
3.2 ระดับการบริการ (Grade of Service).....	40
3.2.1 เออร์แลง-บี (Erlang-B).....	40
3.2.2 เออร์แลง-ซี (Erlang-C).....	43
3.3 ความจุเออร์แลงของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ.....	46
บทที่ 4 การวิเคราะห์ความจุเออร์แลงของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ.....	53
4.1 แบบจำลองระบบ.....	53
4.2 ค่าความน่าจะเป็นของการสูญหาย (Outage Probability).....	54
4.3 ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต (Probability of BER).....	58
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์เชิงเลข.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.1 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการสูญหาย (Outage Probability)	63
5.1.1 ผลของปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง.....	63
5.1.1.1 ผลของปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง เมื่อโหลดสัญญาณ แทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเป็น 0%.....	63
5.1.1.2 ผลของปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง เมื่อโหลดสัญญาณ แทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเป็น 100%.....	64
5.1.2 ผลของการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง.....	65
5.1.2.1 ผลของโหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง.....	65
5.1.2.2 ผลของความใกล้เคียงของการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง.....	66
5.1.3 ผลของการควบคุมกำลังส่ง.....	67
5.1.4 ผลของค่า E_b/N_0	68
5.2 การวิเคราะห์ปริมาณทราฟฟิกระหว่างการบริการเสียงและ WWW.....	69
5.2.1 ผลของอัตราบิตส่งข้อมูลการบริการ WWW.....	69
5.3 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate)	70
5.3.1 ผลของปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง.....	70
5.3.2 ผลของการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง.....	71
5.3.3 ผลของการควบคุมกำลังส่ง.....	72
5.3.4 ผลของค่า E_b/N_0	73
บทที่ 6 สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ.....	74
เอกสารอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	77
ภาคผนวก ก.	78
ประวัติผู้เขียน.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ระยะห่างของเซลล์วงแหวนในระบบเซลล์สุริยะ.....	30
4.1 คุณสมบัติของ f_i	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การสูญเสียตามระยะทาง การบดบัง และคลื่นหลายวิถี.....	4
2.2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางความถี่.....	7
2.3 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางเวลา.....	8
2.4 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางรหัส.....	8
2.5 สเปกตรัมเปรียบเทียบของระบบ FDMA TDMA และ CDMA.....	9
2.6 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่ง DS-SS แบบเดิม.....	10
2.7 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่ง DS-SS แบบประยุกต์.....	11
2.8 การสร้างสัญญาณสเปกตรัมแผ่โดยการมอดูเลตรหัสแบบ BPSK.....	12
2.9 เครื่องรับสัญญาณ DS-SS.....	12
2.10 การครอบครองเวลา/ย่านความถี่ของสัญญาณ FH และสัญญาณ DS.....	13
2.11 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งและเครื่องรับ FH-SS.....	14
2.12 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งและเครื่องรับ TH-SS.....	15
2.13 การพล็อตระหว่างเวลาและความถี่ของระบบ TH-SS.....	16
2.14 เครื่องส่งไฮบริด DS/FH-SS.....	17
2.15 รูปแบบของการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ของระบบ FDMA และระบบ W-SS.....	18
2.16 ระยะทางของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง.....	21
2.17 ลักษณะและรัศมีเซลล์.....	22
2.18 สัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง (Forward Link).....	22
2.19 ลักษณะทางกายภาพของสัญญาณรบกวนแทรกสอดในการสื่อสารการ เชื่อม โยงจากกลับ.....	24
2.20 กำลังจากผู้ให้บริการสองรายในสถานีฐาน โดยผู้ให้บริการที่สองมีค่า SNR มากกว่า ผู้ให้บริการที่หนึ่ง.....	26
2.21 การควบคุมกำลังส่งที่สมบูรณ์.....	26
2.22 ความจุที่ได้สูงสุดเมื่อกำลังที่รับได้ของผู้ให้บริการทั้งหมดมีค่าเท่ากันที่สถานีฐาน.....	27
2.23 กำลังของสัญญาณในระบบวาย์แบนด์-ซีดีเอ็มเอ.....	33
3.1 สถานะของห่วงโซ่-Markov สำหรับเออร์แลง-บี.....	41
3.2 สถานะของห่วงโซ่-Markov สำหรับเออร์แลง-บี ที่สภาวะคงตัว.....	42
3.3 สถานะของห่วงโซ่-Markov สำหรับเออร์แลง-ซี.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 รูปแบบของเซลล์ที่ทำการวิเคราะห์.....	53
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการสูญหายกับปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW เมื่อโหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเป็น 0% โดยเปรียบเทียบ ที่ทราฟฟิกการบริการเสียง 10, 30 และ 90 เฮอร์แลง ตามลำดับ.....	63
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการสูญหายกับปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW เมื่อโหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเป็น 100% โดย ที่ทราฟฟิกการบริการเสียง 10, 30 และ 90 เฮอร์แลง ตามลำดับ.....	64
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการสูญหายกับปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW เมื่อทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เฮอร์แลง โดยเปรียบเทียบที่โหลดสัญญาณ แทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเป็น 0%, 50% และ 100% ตามลำดับ.....	65
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการสูญหายกับปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW เมื่อทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เฮอร์แลง โดยเปรียบเทียบที่โหลดสัญญาณ แทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเป็น กรณีที่ 1 (วงที่ 1 = 100% วงที่ 2 = 0 %) กรณีที่ 2 (วงที่ 1 = 0% วงที่ 2 = 100 %) และกรณีที่ 3 (วงที่ 1 = 100% วงที่ 2 = 100 %) ตามลำดับ.....	66
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการสูญหายกับปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW เมื่อปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เฮอร์แลง โดยเปรียบเทียบระบบ ที่มีการควบคุมกำลังส่งที่สมบรูณ์ ($\sigma_v = \sigma_w = 0$ dB) และระบบที่มีการควบคุม กำลังส่งที่ไม่สมบรูณ์ ($\sigma_v = \sigma_w = 2$ และ 4 dB) ตามลำดับ.....	67
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการสูญหายกับปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW เมื่อปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เฮอร์แลง และโหลดสัญญาณแทรก สอดจากเซลล์ข้างเคียง 100% โดยเปรียบเทียบที่ค่า $(E_b/N_o) = (E_b/N_o)_v = (E_b/N_o)_w = 5,$ 6 และ 7 dB ตามลำดับ.....	68
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงและ WWW เมื่อโหลด สัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง 100 % โดยเปรียบเทียบที่ค่า R_p เท่ากับ 32, 64 และ 128 kbps ตามลำดับ.....	69
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตกับปริมาณทราฟฟิก การบริการ WWW เมื่อโหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง 100 % โดย เปรียบเทียบที่ทราฟฟิกการบริการเสียง 10, 30 และ 90 เฮอร์แลง ตามลำดับ.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตกับปริมาณกราฟฟิก
การบริการ WWW เมื่อปริมาณกราฟฟิกการบริการเสียง 30 เฮอร์แรง โดยเปรียบเทียบ
ที่โหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเป็น 0%, 50% และ 100 % ตามลำดับ.....71
- 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตกับปริมาณกราฟฟิก
การบริการ WWW เมื่อปริมาณกราฟฟิกการบริการเสียง 30 เฮอร์แรง โดยเปรียบเทียบ
ระบบที่มีการควบคุมกำลังส่งที่สมบูรณ์ ($\sigma_v = \sigma_w = 0$ dB) และระบบที่มีการควบคุม
กำลังส่งที่ไม่สมบูรณ์ ($\sigma_v = \sigma_w = 2$ และ 4 dB) ตามลำดับ.....72
- 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตกับปริมาณกราฟฟิก
การบริการ WWW เมื่อปริมาณกราฟฟิกการบริการเสียง 30 เฮอร์แรงและโหลด
สัญญาณ แทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง 100% โดยเปรียบเทียบที่ค่า
 $(E_b/N_o) = (E_b/N_o)_v = (E_b/N_o)_w = 3, 5$ และ 7 dB ตามลำดับ.....73

สารบัญสัญลักษณ์

P_i	กำลังที่ส่งจากสถานีฐาน	[วัตต์]
P_{total}	กำลังของสัญญาณแทรกสอดที่รับได้ทั้งหมดที่สถานีฐาน	[วัตต์]
P_d	กำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่รับ โดยกฎการสูญเสียตามระยะทาง	[วัตต์]
P_{sd}	กำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่รับ โดยกฎการสูญเสียจากการบดบัง	[วัตต์]
P_m	กำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่รับ โดยกฎการสูญเสียจากคลื่นหลายวิถี	[วัตต์]
$P_{i_1}^v$	กำลังของสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายที่ให้บริการเสียงในเซลล์ที่ 1	[วัตต์]
$P_{i_1}^w$	กำลังของสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายที่ให้บริการ WWW ในเซลล์ที่ 1	[วัตต์]
$P_{i_j}^v$	กำลังของสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายที่ให้บริการเสียงในเซลล์ที่ j	[วัตต์]
$P_{i_j}^w$	กำลังของสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายที่ให้บริการ WWW ในเซลล์ที่ j	[วัตต์]
P_{0_i}	กำลังของสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายที่ 0	[วัตต์]
D	รัศมีเซลล์จากศูนย์กลางถึงมุม	[เมตร]
D_c	รัศมีเซลล์จากศูนย์กลางถึงด้าน	[เมตร]
d	ระยะห่างระหว่างเครื่องรับกับเครื่องส่ง	[เมตร]
d_i	ระยะห่างระหว่างเซลล์อ้างอิงกับเซลล์ที่ i	[เมตร]
r	ระยะห่างระหว่างเครื่องลูกข่ายกับสถานีฐาน	[เมตร]
r_0	ระยะห่างระหว่างเครื่องลูกข่ายในเซลล์ข้างเคียงกับเซลล์อ้างอิง	[เมตร]
r_i	ระยะห่างระหว่างเครื่องลูกข่ายกับเซลล์ที่ i	[เมตร]
α	อัตราการสิ้นไหลของเสียง (Voice Activity)	
$\alpha_{i_1}^v$	อัตราการสิ้นไหลของเสียงของผู้ให้บริการเสียงในเซลล์ที่ 1	
$\alpha_{i_j}^v$	อัตราการสิ้นไหลของเสียงของผู้ให้บริการเสียงแต่ละคน ในเซลล์ที่ j	
E_b	พลังงานต่อบิต	[วัตต์/บิต]
$E_{i_1}^v$	พลังงานต่อบิตของผู้ให้บริการเสียงในเซลล์ที่ 1	[วัตต์/บิต]
$E_{i_1}^w$	พลังงานต่อบิตของผู้ให้บริการ WWW ในเซลล์ที่ 1	[วัตต์/บิต]
$E_{i_j}^v$	พลังงานต่อบิตของผู้ให้บริการเสียงในเซลล์ที่ j	[วัตต์/บิต]
$E_{i_j}^w$	พลังงานต่อบิตของผู้ให้บริการ WWW ในเซลล์ที่ j	[วัตต์/บิต]
R	อัตราบิตข้อมูล	[บิต/วินาที]
R_p	อัตราการส่งข้อมูลของ Page Request	[บิต/วินาที]
R_v	อัตราบิตข้อมูลของผู้ให้บริการเสียง	[บิต/วินาที]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญสัญลักษณ์ (ต่อ)

R_w	อัตราบิตข้อมูลของผู้ใช้บริการ WWW	[บิต/วินาที]
I_0	ความหนาแน่นของสัญญาณแทรกสอดสูงสุดที่ยอมรับได้	[วัตต์/เฮิรตซ์]
I_{total}	ความหนาแน่นของสัญญาณแทรกสอดทั้งหมดที่เซลล์อ้างอิง	[วัตต์/เฮิรตซ์]
N_o	ความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนทั้งหมด	[วัตต์/เฮิรตซ์]
N_t	ความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน	[วัตต์/เฮิรตซ์]
W	สเปกตรัมแบนด์วิดท์	[เฮิรตซ์]
K	จำนวนผู้ใช้บริการ	[ราย]
K_p	จำนวนเฉลี่ยของ Page Request ต่อเซสชัน (Session)	[ครั้ง]
K_1^v	จำนวนผู้ใช้บริการเสี่ยงในเซลล์ที่ 1	[ราย]
K_j^v	จำนวนผู้ใช้บริการเสี่ยงในเซลล์ที่ j	[ราย]
K_1^w	จำนวนผู้ใช้บริการ WWW ในเซลล์ที่ 1	[ราย]
K_j^w	จำนวนผู้ใช้บริการ WWW ในเซลล์ที่ j	[ราย]
k_p	จำนวนเฉลี่ยของ Page Request ต่อเซสชัน (Session)	
ρ	ตัวแปรสำหรับ โหลดกราฟฟิกของเซลล์ข้างเคียง	
ρ_j	ตัวแปรสำหรับ โหลดกราฟฟิกของเซลล์ที่ j	
G	อัตราการขยายการประมวลผลของการกระจายสเปกตรัม	
G_v	อัตราการขยายการประมวลผลของการกระจายสเปกตรัมของการบริการเสี่ยง	
G_w	อัตราการขยายการประมวลผลของการกระจายสเปกตรัมของการบริการ WWW	
E_i	อัตราส่วนพลังงานต่อบิตต่อความหนาแน่นของสัญญาณแทรกสอดทั้งหมด	
η	อัตราส่วนความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนเชิงความร้อนต่อความหนาแน่นของสัญญาณแทรกสอดทั้งหมด	
P_{outage}	ความน่าจะเป็นของการสูญหาย	
f	อัตราส่วนของการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงต่อการแทรกสอดภายในเซลล์	
$f_{i,j}$	ตัวแปรเศษส่วนของพลังงานต่อบิตของสัญญาณแทรกสอดจากผู้ให้บริการเสี่ยงและ WWW ในเซลล์ที่ j	
m_v	ค่ามัธยฐานของพลังงานต่อบิตต่อสัญญาณแทรกสอดของการบริการเสี่ยง	[เดซิเบล]
m_w	ค่ามัธยฐานของพลังงานต่อบิตต่อสัญญาณแทรกสอดของการบริการ WWW	[เดซิเบล]
σ	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานการควบคุมกำลังส่ง	[เดซิเบล]
σ_v	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานการควบคุมกำลังส่งของการบริการเสี่ยง	[เดซิเบล]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญสัญลักษณ์ (ต่อ)

σ_w	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานการควบคุมกำลังส่งของการบริการ WWW	[เดซิเบล]
σ_0	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานการควบคุมกำลังส่งของผู้ใช้บริการที่ 0	[เดซิเบล]
σ_s	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานการบดบัง	[เดซิเบล]
$(\lambda\mu)_v$	ปริมาณทราฟฟิกของการบริการเสียง	[เออร์แลง]
$(\lambda\mu)_p$	ปริมาณทราฟฟิกของการบริการ WWW	[เออร์แลง]
λ	อัตราการเข้ามาเฉลี่ยของผู้ใช้บริการที่ร้องขอรับบริการ	[ครั้ง/วินาที]
λ_p	อัตราการเข้ามาเฉลี่ยของ Page Request	[ครั้ง/วินาที]
λ_w	อัตราการเข้ามาเฉลี่ยของผู้ใช้บริการ WWW	[ครั้ง/วินาที]
μ_p	อัตราการให้บริการ Page Request ต่อวินาที	
P_{req}	จำนวนไบต์เฉลี่ยของ Page Request	[ไบต์]
HT	อัตราเฉลี่ยของระยะเวลาที่ผู้ใช้บริการต้องการใช้บริการ	[วินาที/ครั้ง]
$E[.]$	ค่าเฉลี่ยของการประมาณค่าแบบเกาส์	
$Var(.)$	ค่าความแปรปรวนของการประมาณค่าแบบเกาส์	
m_N	ค่าเฉลี่ยของการประมาณค่าแบบลีนอร์มอล	
σ_N^2	ค่าความแปรปรวนของการประมาณค่าแบบลีนอร์มอล	
E_{o_1}/η_0	อัตราส่วนพลังงานต่อบิตต่อความหนาแน่นของสัญญาณแทรกสอดทั้งหมดของผู้ใช้บริการที่ 0	
T	ตัวชี้กำลังของกฎของการสูญเสียตามระยะทาง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ระบบเซลลูลาร์ซีดีเอ็มเอ (Cellular CDMA) ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยบริษัท Qualcomm และถูกกำหนดขึ้นเป็นมาตรฐานโดย TIA 45.5 Sub-committee ซึ่งเป็นระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access หรือ CDMA) แต่ละช่องสัญญาณจะใช้แบนด์วิดท์เดียวกัน และใช้ในเวลาเดียวกัน โดยมีรหัสแตกต่างกัน ในการวิจัยและพัฒนา ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบ CDMA เริ่มขึ้นเมื่อประมาณต้นปี ค.ศ. 1989 และเพียงไม่กี่ปีต่อมาได้เริ่มนำมาใช้งานกันในหลายประเทศทั่วโลก สำหรับการใช้งานในประเทศไทยนั้น การสื่อสารแห่งประเทศไทยได้นำระบบนี้เข้ามาให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ในราวเดือนเมษายนปี ค.ศ. 1998 ซึ่งปัจจุบันดำเนินการโดยบริษัท Hutchison ในเฟสแรก ส่วนในเฟสต่อมานั้น เพิ่งจะประมูลได้โดยบริษัทหัวเหว่ยในปี ค.ศ. 2005

เนื่องจากระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่โทรคมนาคมในยุคที่สาม (Third Generation Mobile Systems) นั้น วยแบนด์-ซีดีเอ็มเอ (W-CDMA) เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐาน เพื่อให้รองรับความต้องการให้บริการสื่อสารที่มีรูปแบบหลากหลายมากขึ้น นอกเหนือจากการให้บริการสื่อสารทางเสียงเพียงอย่างเดียว หนึ่งในบริการบริการนั้น คือการเข้าสู่เว็ลด์วายเว็บ (WWW) ของผู้ใช้บริการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งการให้บริการด้านเว็ลด์วายเว็บนี้ย่อมมีผลกระทบโดยตรงกับการให้บริการด้านเสียงอย่างแน่นอน และในปัจจุบันระบบสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่มีปริมาณการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้เกิด การแทรกสอด(Interference) การจางหาย(Fading) และการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง ในส่วนของอาการจางหาย อาทิเช่น ปรากฏการณ์คลื่นหลายวิถี (Multipath) การบดบัง(Shadowing) และปรากฏการณ์ใกล้-ไกล(Near/Far effect) เมื่อปรากฏการณ์ดังกล่าวเหล่านี้เกิดขึ้นจะมีผลกระทบต่อความจุและสมรรถนะของระบบ ดังนั้นเพื่อให้ระบบสามารถรองรับการให้บริการด้านเสียง และการให้บริการด้านเว็ลด์วายเว็บได้เพียงพอในปัจจุบัน และรองรับการขยายตัวในอนาคต จึงต้องทำการวิเคราะห์ค่าความจุเออร์แลงของการบริการของระบบเพื่อให้เกิดความเหมาะสมและได้รับประโยชน์สูงสุดในการใช้งาน สำหรับการวิเคราะห์แบบเดิม [3] นั้น จะทำการวิเคราะห์ค่าความจุเออร์แลงของการบริการเสียงและเว็ลด์วายเว็บ โดยพิจารณาที่การแทรกสอดภายในเซลล์ที่เกิดจากเซลล์เพียงหนึ่งเซลล์เท่านั้น ซึ่งในการใช้งานจริงนั้นจะพบว่าไม่ได้มีเพียงเซลล์เดียวเท่านั้น แต่จะประกอบไปด้วยเซลล์ข้างเคียงอีกหลายเซลล์ ซึ่งล้วนแต่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าความจุเออร์แลงของการบริการด้านเสียงและเว็ลด์วายเว็บ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าความจุเออร์แลงของการบริการเสียงและเว็ลด์วายเว็บเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วายเว็บ โดยพิจารณาทั้งการแทรกสอดภายในเซลล์และการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง ตลอดจนหาค่าอัตราความผิดพลาดบิต(BER)ของระบบ ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับความ เป็นจริงมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ การวิเคราะห์ค่าความจุเออร์แลงของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ ซึ่งรองรับผู้ใช้บริการเสียงและวิดีโอด้วยเว็บ โดยวิเคราะห์ในส่วนการเชื่อมโยงสัญญาณ ขากลับ(Reverse link) จากเครื่องลูกข่ายไปยังสถานีฐาน เพื่อศึกษาผลกระทบระหว่างความจุเออร์แลงของการให้บริการด้านเสียงและบริการด้านวิดีโอด้วยเว็บ ในขณะที่มีสัญญาณแทรกสอดภายใน เซลล์และสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง นอกจากนี้ยังพิจารณาขณะอัตราบิตของสัญญาณ ข้อมูลส่งที่ค่าต่างกัน การควบคุมกำลังส่งของเครื่องลูกข่ายที่ไม่สมบูรณ์ รวมถึงหาค่าอัตราความ ผิดพลาดบิตของระบบ ในการวิเคราะห์ดังกล่าวเป็นการจำลองค่าตัวแปรเพื่อหาความจุเออร์แลง ของระบบซึ่งจะสัมพันธ์กับสมการของความน่าจะเป็นของการสูญหาย โดยใช้การประมาณค่าแบบ เกาส์ (Gaussian Approximation)

1.3 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของการวิเคราะห์ค่าความจุเออร์แลง ของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ ที่รองรับผู้ใช้บริการเสียงและบริการด้านวิดีโอด้วยเว็บ รวมทั้ง วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

บทที่ 2 หลักการพื้นฐานของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ กล่าวถึงลักษณะทั่ว ๆ ไปของ ระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอที่น่าสนใจในการทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 3 หลักการพื้นฐานทราฟฟิกของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ กล่าวถึงหลักการพื้นฐาน ของทราฟฟิก และความจุเออร์แลงของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอที่จะนำไปทำการวิเคราะห์ต่อไป ในบทที่ 4

บทที่ 4 การวิเคราะห์ความจุเออร์แลงของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ กล่าวถึงรายละเอียด ของการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการสูญหาย ซึ่งจะพิจารณาผลกระทบจากสัญญาณการแทรก สอดภายในเซลล์ และสัญญาณการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง ตลอดจนวิเคราะห์หาค่าอัตรา ความผิดพลาดบิตของระบบ

บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์เชิงเลข กล่าวถึงผลการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการ วิเคราะห์ในบทที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ เป็นการสรุปผลการดำเนินงานทั้งหมดและข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ

2.1 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่น

ในการสื่อสารไร้สายนั้น เมื่อสัญญาณถูกส่งผ่านช่องสัญญาณ สัญญาณนั้นจะได้รับผลกระทบจากการเดินทางผ่านช่องสัญญาณอันเนื่องมาจากทั้ง ต้นไม้ ตึกอาคาร และสิ่งแวดล้อมภูมิประเทศต่าง ๆ จะส่งผลให้เกิดการจางหาย (Fading) ของสัญญาณ ซึ่งจะพิจารณาเป็น 3 ประเภทคือ การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss) การบดบัง (Shadowing) และคลื่นหลายวิถี (Multipath)



รูปที่ 2.1 การสูญเสียตามระยะทาง การบดบัง และคลื่นหลายวิถี

2.1.1 การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss)

การสูญเสียตามระยะทางนั้น เมื่อพิจารณาในกำลังเฉลี่ยของสัญญาณ P_d ที่มีระยะห่าง d จากเครื่องส่ง ซึ่งจะพบว่ากำลังเฉลี่ยนั้นจะลดลงเป็นฟังก์ชันของระยะ d และฟังก์ชันนี้จะแสดงโดยกฎของกำลังการสูญเสียตามระยะทาง (Path-Loss-Power Law) ตามสมการ

$$P_d \approx d^{-\tau} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ τ เป็นตัวชี้กำลังของกฎของการสูญเสียตามระยะทาง ค่าของ τ จะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของการแพร่ผ่าน เมื่อสภาวะแวดล้อมเป็นอวกาศ (Free Space) τ จะมีค่าเป็น 2 และในสภาพแวดล้อมในเมืองที่มีตึก และเกิดการกบฏบ่งค่าของ τ มีค่าอยู่ในช่วง 3 - 6 โดยจะเห็นได้จากสมการ (2.1) ว่าเมื่อระยะ d มากขึ้น จะส่งผลให้กำลังเฉลี่ยของสัญญาณลดลงไปตามกฎการสูญเสียตามระยะทาง จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ใกล้-ไกล (Near-Far Effect) ขึ้นในระบบซีดีเอ็มเอ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่กำลังเฉลี่ยที่ถูกรับได้ที่สถานีฐานที่ถูกส่งจากเครื่องลูกข่ายที่อยู่ใกล้สถานีฐาน จะมีค่าสูงกว่ากำลังเฉลี่ยที่ถูกรับได้จากเครื่องลูกข่ายที่อยู่ในระยะทางไกลกว่า ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการรบกวนกันของสัญญาณที่ใช้ช่องสัญญาณร่วมกันในระบบซีดีเอ็มเอ

2.1.2 การบดบัง (Shadowing)

การสูญเสียตามระยะทางที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น เป็นการคำนวณหาค่าของสัญญาณที่คาดว่าจะรับได้ตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่า ณ ตำแหน่งที่ห่างจากภาคส่งสัญญาณเท่า ๆ กันก็ จะได้รับสัญญาณที่มีกำลังเท่ากันด้วย แต่ในทางปฏิบัติสัญญาณที่รับได้ในแต่ละบริเวณอาจจะมีกำลังที่ไม่เท่ากันก็ได้ถึงแม้ว่าจะอยู่ห่างจากสถานีส่งด้วยระยะที่เท่ากัน ทั้งนี้เพราะเมื่อมีการส่งสัญญาณผ่านบริเวณที่มีพื้นที่ใหญ่ ๆ อาจได้รับผลกระทบจากสภาพภูมิประเทศ เช่น เนิน ดันไม้ ไบไม้ เป็นต้น ดังนั้นในสภาพความเป็นจริงสัญญาณเหล่านี้จะมีการกระเพื่อมขึ้นและลงอยู่บนค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้จากการสูญเสียตามระยะทาง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในลักษณะนี้สามารถจำลองได้ด้วยการใช้ตัวแปรแรนดอมที่มีการแจกแจงแบบล็อกนอร์มอล (Lognormal Distribution) โดยมีฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) ดังนี้

$$P_r(P_{sd}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(P_{sd} - P_{sm})^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (2.2)$$

โดย P_{sd} คือ ค่า $10\log(P_{sw})$ โดยมีหน่วยเป็น dBm

P_{sm} คือ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณ หน่วยเป็น dBm

P_{sw} คือ ค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้ หน่วยเป็น mW

σ_s คือ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานการบดบัง หน่วยเป็น dBm

ค่าของ σ_s มีขนาดอยู่ระหว่าง 6 - 10 dB ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่สัญญาณส่งผ่าน

2.1.3 คลื่นหลายวิถี (Multipath)

ในการแพร่ผ่านของสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่เป็นสภาวะแวดล้อม ที่มีวัตถุที่ทำให้เกิดการสะท้อน การหักเห และการกระเจิง ของสัญญาณในหลายทิศทาง ซึ่งส่งผลให้สัญญาณที่รับได้ประกอบด้วยสัญญาณหลาย ๆ สัญญาณที่เดินทางมาจากทิศทางที่แตกต่างกัน โดยมีทั้งขนาดและเฟสต่างกันเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟสที่แตกต่างกัน ผลกระทบทำให้ระดับสัญญาณที่รับได้มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างบ่อยครั้งมาก และการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณโดยทั่วไป จะอยู่ในช่วงเดียวกันกับขนาดของความยาวคลื่น โดยกำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่ถูกรับได้นั้น จะแสดงได้ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่มีการแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh Distribution) ดังในสมการ

$$p_r(P_m) = \begin{cases} \frac{P_m}{\sigma_m^2} \exp\left[-\frac{P_m^2}{2\sigma_m^2}\right], & P_m \geq 0 \\ 0, & P_m < 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

โดย σ_m คือ แรงดัน rms ของสัญญาณ

σ_m^2 คือ กำลังเฉลี่ยทางเวลาของสัญญาณ

2.2 หลักการพื้นฐานของวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ

วายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ (Wideband-Code Division Multiple Access: W-CDMA) มีความหมายคือ ในระบบเดิมที่ใช้พื้นฐานของซีดีเอ็มเอ (Code Division Multiple Access: CDMA) จะมีความกว้างของแถบความถี่เท่ากับ 1.25 MHz เมื่อมีการพัฒนาไปสู่ระบบในรุ่นที่ 3 จึงเพิ่มความกว้างของแถบความถี่เป็น 5 MHz ซึ่งทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในประเทศต่าง ๆ ได้มีการจัดตั้งระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นที่ 3 ขึ้น เช่น ประเทศแถบยุโรปได้จัดตั้งระบบที่ชื่อว่า UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) โดยใช้เทคโนโลยีทางด้าน W-CDMA ซึ่งมีมาตรฐานที่กำหนดอยู่ใน IMT-2000 (International Mobile Telecommunications 2000) เพื่อให้เกิดความมั่นใจได้ว่าไม่ว่าผู้ใช้บริการจะเดินทางไปที่ใดก็สามารถใช้โทรศัพท์ของตนได้ทั่วโลกโดยไม่ต้องกังวลกับระบบที่แตกต่างกัน

เนื่องจากวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอมีการใช้เทคโนโลยีซีดีเอ็มเอเป็นพื้นฐานในการเชื่อมต่อดังนั้นจะขอกกล่าวถึงหลักการเบื้องต้นของระบบซีดีเอ็มเอในมาตรฐาน IS-95 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ในยุคที่ 2 - 2.5 ซึ่งความแตกต่างระหว่างการสื่อสารยุคที่หนึ่งและสองคือรูปแบบของการสื่อสารข้อมูล โดยการสื่อสารระบบเซลลูลาร์ในยุคที่สองนั้นจะเป็นการสื่อสารด้วยระบบดิจิทัล ซึ่งแตกต่างกับยุคที่หนึ่งที่เป็นการสื่อสารแบบอนาล็อก ตัวอย่างของระบบการสื่อสารในยุคที่หนึ่งคือ ระบบ Advanced Mobile Telephone System (AMPS) ที่ใช้การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access: FDMA) ส่วนระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ในยุคที่สองดังในมาตรฐาน IS-54 นั้น จะใช้การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access: TDMA) ซึ่งเปลี่ยนรูปแบบการสื่อสารข้อมูลเสียงจากระบบอนาล็อกเดิมเป็นระบบดิจิทัล ซึ่งต่อมาได้มีการนำเสนอมติมาตรฐาน IS-95 ที่ใช้การเข้าถึงหลายทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

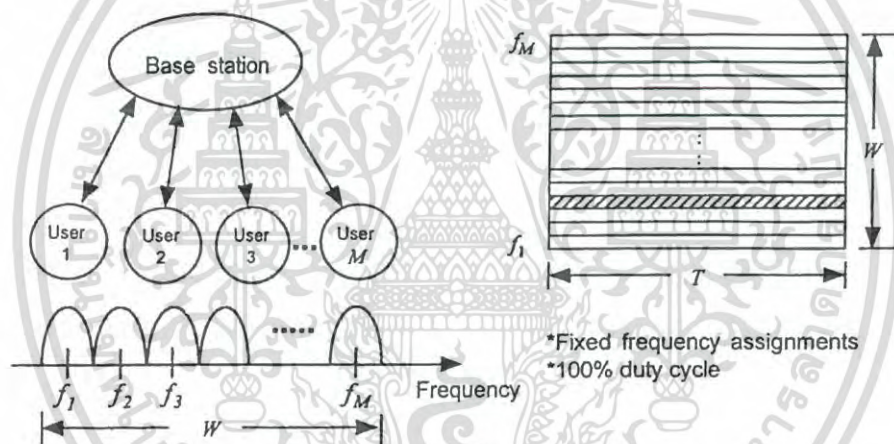
แบบแบ่งรหัส (CDMA) โดยใช้เทคนิคการขยายสเปกตรัม (Spread Spectrum) ที่ทำให้ความจุของผู้ใช้ในหนึ่งเซลล์เพิ่มขึ้นและสามารถส่งข้อมูลข่าวสารได้มากกว่าการสื่อสารในยุคที่ 1 และ 2 ซึ่งในหนังสือหรือเอกสารบางเล่ม [1] จะเรียกระบบซีดีเอ็มเอว่า เป็นระบบการสื่อสารไร้สายยุคที่ 2.5

2.2.1 หลักการทั่วไปการเข้าถึงหลายทาง

ระบบการสื่อสารเซลลูลาร์ตามมาตรฐานของระบบ AMPS, IS-54 และ IS-95 จะมีวิธีการจัดสรรการเข้าถึงพื้นฐานที่แตกต่างกันสามชนิดคือ

2.2.1.1 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางความถี่ (FDMA)

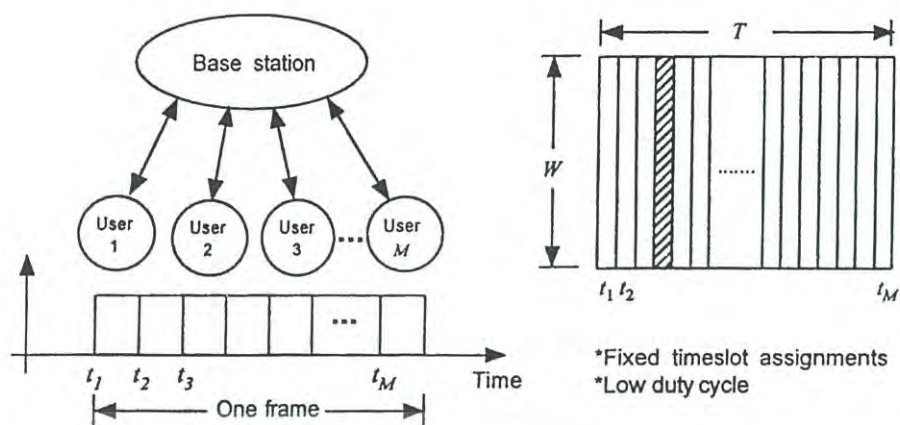
ผู้ใช้งานจะถูกกำหนดให้เข้าถึงในความถี่ที่จัดสรรไว้ให้ ดังนั้นผู้ใช้งานแต่ละรายจะครอบครองช่วงความถี่ดังกล่าว ดังในรูป 2.2 จะเห็นได้ว่า ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ผู้ใช้งานจะส่งสัญญาณเต็มในช่องสัญญาณของช่วงความถี่ดังกล่าว นั่นคือ 100 Duty Cycle



รูปที่ 2.2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางความถี่

2.2.1.2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางเวลา (TDMA)

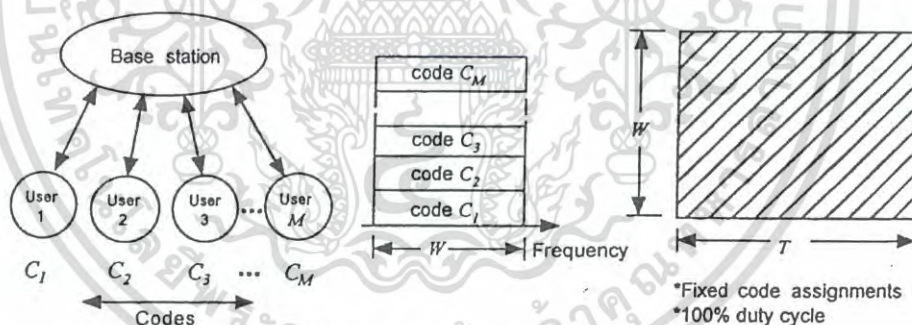
ผู้ใช้งานจะถูกกำหนดให้สามารถใช้ช่องสัญญาณในช่วงความถี่หนึ่ง ๆ ที่กำหนดให้ โดยสามารถใช้ได้ตลอดเวลาใน Timeslot ที่กำหนดให้นั่นเอง ดังรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า ในช่วงเวลาหนึ่งสัญญาณจะถูกส่งใน Timeslot ด้วย Duty cycle ที่ค่าต่ำ ๆ



รูปที่ 2.3 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางเวลา

2.2.1.3 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางรหัส (CDMA)

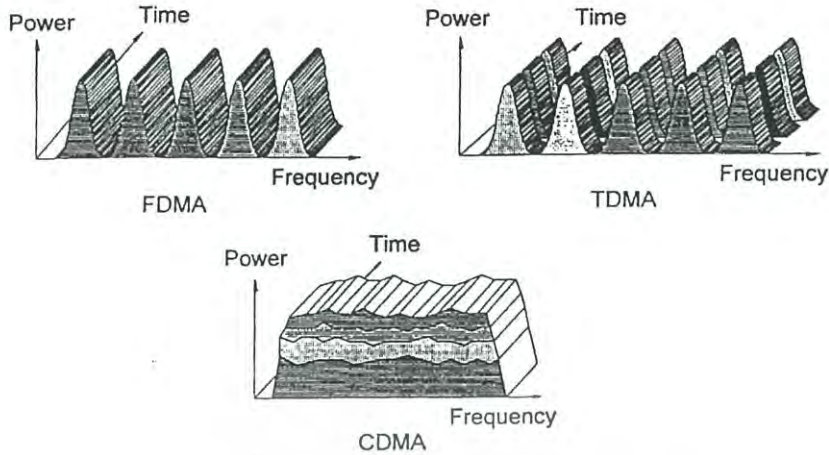
ผู้ใช้งานนั้นสามารถที่จะส่งสัญญาณได้อย่างต่อเนื่องและทั่วถึงทั้งในระนาบของเวลาและความถี่ ดังในรูป 2.4 จะเห็นได้ว่า ในรูปแบบนี้ผู้ใช้งานจะไม่ถูกแบ่งทรัพยากรทางเวลา หรือความถี่ แต่สามารถใช้ร่วมกันได้ทั้งหมด โดยในรูปแบบการเข้าถึงหลายทางแบบนี้ผู้ใช้งานจะถูกกำหนดรหัสให้แต่ละผู้ใช้งาน ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 2.4 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางรหัส

โดยการเข้าถึงหลายทางเหล่านี้เป็นเทคนิคที่แข่งขันกันในอุดมมุ่งหมายอยู่ที่การแจกแจงของพลังงานของสัญญาณต่อเทคนิคการเข้าถึงที่สามารถจะใช้ได้ภายในระนาบของทรัพยากรทางเวลา - ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมเปรียบเทียบของระบบ FDMA TDMA และ CDMA

2.2.2 เทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางรหัส (CDMA)

คุณสมบัติของการเข้าถึงหลายทางสามารถทำได้โดยการเข้ารหัส ซึ่งผู้ใช้แต่ละคนจะถูกกำหนดรหัส (Code Sequence) ให้เครื่องรับที่รู้ลำดับรหัสของผู้ใช้แต่ละคนเท่านั้น จึงจะสามารถรับสัญญาณและทำการถอดรหัสเพื่อให้ได้ข้อมูลเดิมกลับมา เนื่องจากแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของสัญญาณรหัสดังกล่าวมีค่ามากกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณข้อมูลมาก ๆ ทำให้กระบวนการเข้ารหัสนั้นมีผลทำให้เกิดการแผ่กว้างของสเปกตรัมของสัญญาณ ดังนั้นจึงเรียกกระบวนการนี้ว่าการมอดูเลต (Modulate) แบบแผ่กว้างทางสเปกตรัม (Spread-Spectrum Modulation) นอกจากนี้ยังเรียกสัญญาณที่ถูกเข้ารหัสว่า สัญญาณสเปกตรัมแผ่ (Spread-Spectrum Signal) และมักจะเรียกการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสนี้ว่า การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่ (Spread-Spectrum Multiple Access)

การมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่จะทำการเข้ารหัสสัญญาณข่าวสารด้วยสัญญาณรหัสที่มีความเป็นอิสระไม่ขึ้นกับสัญญาณข้อมูล และมีความกว้างของสเปกตรัมมากกว่าสัญญาณข้อมูลมาก การทำเช่นนี้ จะเป็นผลทำให้กำลังของสัญญาณข้อมูลมีการแผ่กว้างออกไปตลอดช่วงของแบนด์วิดท์ของสัญญาณสเปกตรัมแผ่นั้น เป็นผลทำให้สัญญาณสเปกตรัมแผ่มีความหนาแน่น (Density) ของกำลังงานลดลง อัตราส่วนของแบนด์วิดท์ของสัญญาณสเปกตรัมแผ่ต่ออัตราบิตของสัญญาณข้อมูลจะถูกเรียกว่า อัตราขยายการประมวลผล (Processing Gain: G) ของระบบสเปกตรัมแผ่

$$G = \frac{W}{R} \quad (2.4)$$

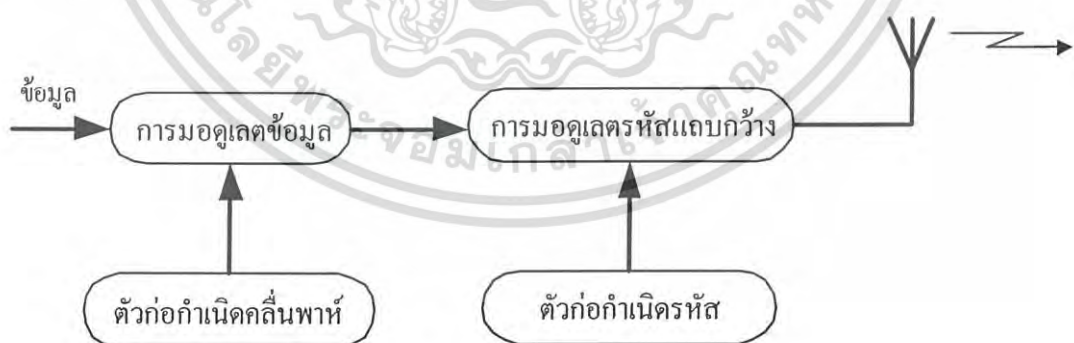
เมื่อ W เป็นแบนด์วิคท์ของการส่งสัญญาณ
 R เป็นอัตราบิตของสัญญาณข้อมูล

เครื่องรับจะทำการสหสัมพันธ์ (Correlation) สัญญาณที่รับได้ด้วยสัญญาณรหัสที่เหมือนกับทางด้านส่ง ซึ่งถูกสร้างขึ้นอย่างซิงโครไนซ์ (Synchronize) กับรหัสของสัญญาณที่รับได้ เพื่อให้ได้สัญญาณข้อมูลเดิมกลับคืนมา ซึ่งแสดงว่าเครื่องรับจะต้องรู้สัญญาณรหัสที่ถูกใช้ในการมอดูเลตข้อมูลจากทางด้านส่ง

การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่สามารถแบ่งตามวิธีการมอดูเลตได้ดังนี้ วิธีการจัดลำดับโดยตรง (Direct-Sequence: DS) วิธีการกระโดดของความถี่ (Frequency Hopping: FH) วิธีการกระโดดของเวลา (Time Hopping: TH) และวิธีการไฮบริดจ์ (Hybrid) โดยมีรายละเอียดของแต่ละวิธีดังนี้

2.2.2.1 การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่ใช้วิธีการจัดลำดับโดยตรง (DS-SS)

สำหรับการเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่โดยใช้วิธีการจัดลำดับโดยตรงนั้น สัญญาณข้อมูลที่ผ่านการมอดูเลตกับคลื่นพาห์ (Carrier) มาแล้ว จะถูกมอดูเลตโดยตรงกับสัญญาณรหัสดิจิตอล โดยที่สัญญาณข้อมูลดังกล่าวอาจจะเป็นได้ทั้งสัญญาณอนาล็อกหรือสัญญาณดิจิตอล แต่โดยส่วนใหญ่จะเป็นสัญญาณดิจิตอล ซึ่งกรณีที่สัญญาณข้อมูลเป็นแบบดิจิตอลนี้มักจะทำการคูณสัญญาณดิจิตอลนั้นด้วยสัญญาณรหัสโดยตรง แล้วจึงนำสัญญาณที่ได้ไปมอดูเลตกับคลื่นพาห์แบบกว้าง ด้วยเหตุผลจากการคูณสัญญาณข้อมูลด้วยสัญญาณรหัสโดยตรงนี้เองจึงเรียกว่า การเข้าถึงหลายทางแบบแผ่รหัสโดยใช้วิธีการจัดลำดับโดยตรง

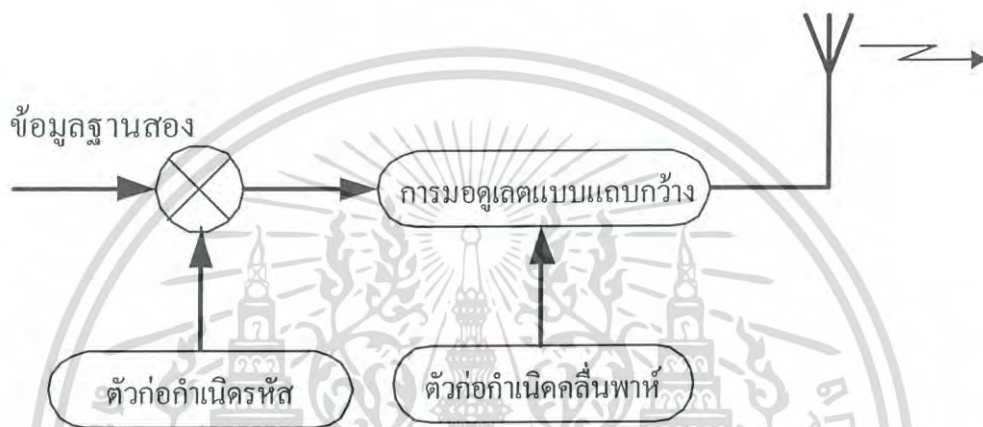


รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่ง DS-SS แบบเดิม

ในรูปที่ 2.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่ง DS-SS สัญญาณข้อมูลไบนารีจะถูกมอดูเลตกับคลื่นพาห์ หลังจากนั้นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วนี้จะถูกนำไปมอดูเลตด้วยสัญญาณรหัส สัญญาณรหัสนี้ประกอบด้วยบิตต่าง ๆ ของรหัสหรือเรียกว่าชิพ (Chip) ซึ่งจะมีค่าเป็น +1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับราคาเห็นไปเซประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ -1 และเพื่อให้ได้การแผ่ของสัญญาณตามต้องการอัตราชีพ (Chip Rate) ของสัญญาณรหัส จะต้องสูงกว่าอัตราบิตของสัญญาณข้อมูลมาก ๆ สำหรับวิธีการมอดูเลตรหัส (Code Modulation) นั้นสามารถใช้เทคนิคการมอดูเลตได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันคือการมอดูเลตแบบ PSK (Phase Shift Keying) อย่างเช่น BPSK, DBPSK, QPSK หรือ MSK (Minimum Shift Keying)

ถ้าทำการคูณสัญญาณข้อมูลด้วยสัญญาณรหัสโดยตรงโดยไม่ได้ทำการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลนั้นก่อน และใช้วิธีการมอดูเลตรหัสแบบ BPSK จะสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.7

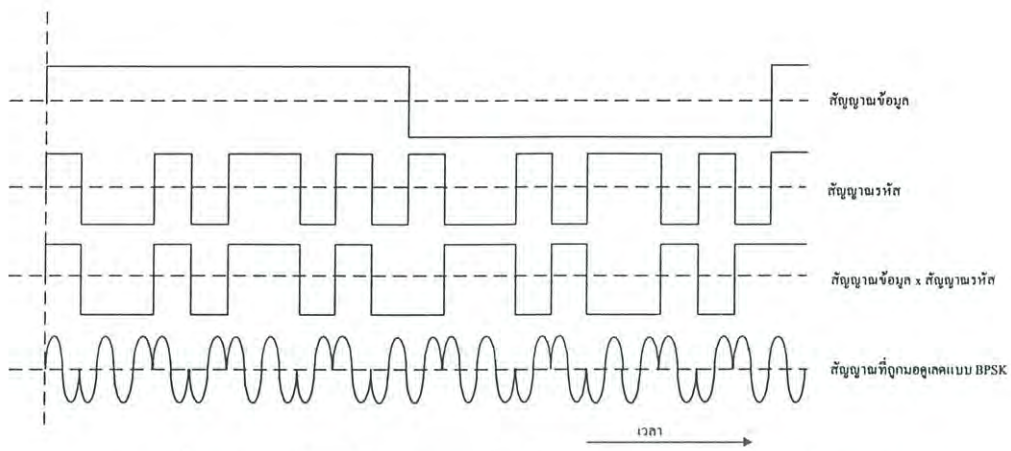


รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่ง DS-SS แบบประยุกต์

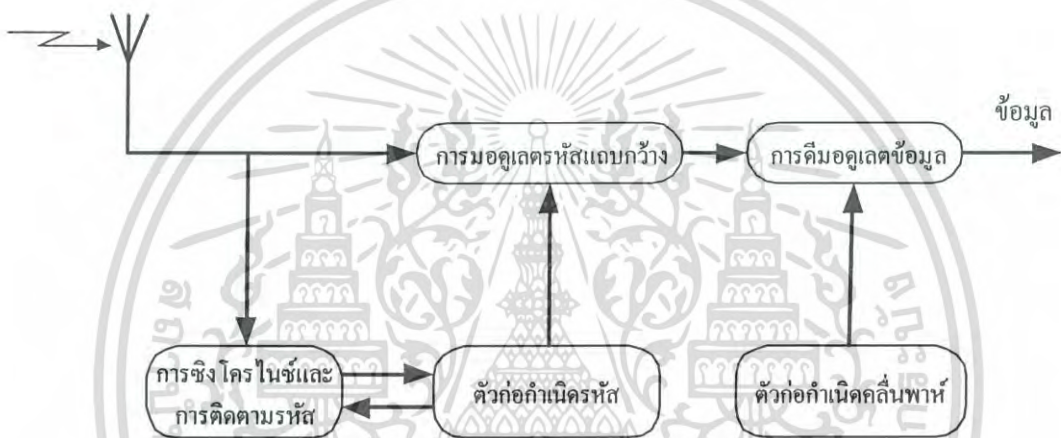
สัญญาณ DS-SS ที่ได้จากเครื่องส่งนี้แสดงดังรูปที่ 2.8 จากรูป จะเห็นได้ว่าเป็นการส่งสัญญาณรหัส 10 บิตต่อสัญญาณข้อมูล 1 บิต (อัตราชีพของรหัสเป็น 10 เท่าของอัตราบิตของข้อมูล) ดังนั้นจะได้อัตราขยายการประมวลผลเป็น 10 ในทางปฏิบัติอัตราขยายการประมวลผลจะมีค่ามากกว่านี้มาก (จะมีค่าเป็น 10^2 ถึง 10^3)

เครื่องรับสัญญาณ DS-SS แสดงดังรูปที่ 2.9 จะใช้การดีมอดูเลตแบบร่วมนัย และใช้ลำดับรหัสที่สร้างขึ้นทางด้านรับในการดีสเปคต์สัญญาณสเปกตรัมแผ่ การที่กระบวนการดีสเปคต์จะทำให้สำเร็จนั้นไม่เพียงแต่เครื่องรับจะต้องรู้ลำดับรหัสที่ถูกใช้ในการสร้างสัญญาณสเปกตรัมแผ่ทางด้านส่งเท่านั้น แต่ยังต้องทำให้รหัสของสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องมีการซิงโครไนซ์กับสัญญาณรหัสที่ถูกสร้างขึ้นที่เครื่องรับด้วย ซึ่งการซิงโครไนซ์นี้จะต้องทำได้สำเร็จตั้งแต่เริ่มต้นการรับสัญญาณและต้องรักษาการซิงโครไนซ์ไปจนกระทั่งรับสัญญาณได้ทั้งหมดจากรูปที่ 2.9 ส่วนของการซิงโครไนซ์ดังกล่าวแสดงด้วยบล็อกไดอะแกรมของการซิงโครไนซ์/การติดตาม (Tracking) ภายหลังจากทำการดีสเปคต์สัญญาณข้อมูลและทำการดีมอดูเลตก็จะได้สัญญาณข้อมูลเดิมกลับคืนมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การสร้างสัญญาณสเปกตรัมแผ่โดยการมอดูเลตรหัสแบบ BPSK



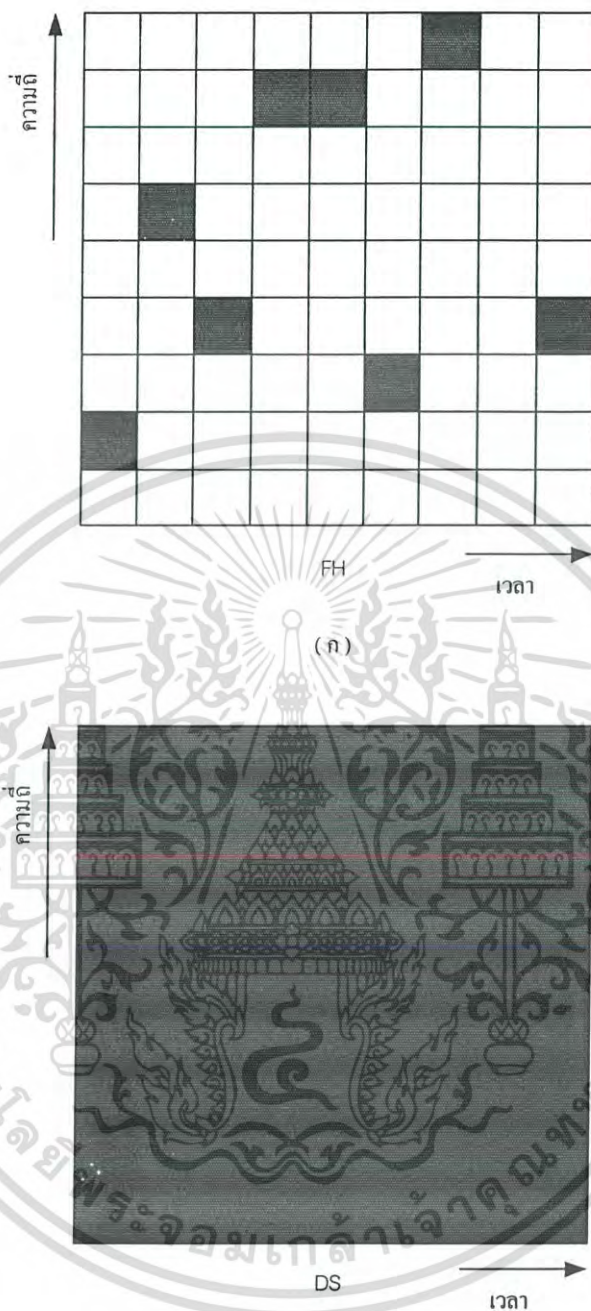
รูปที่ 2.9 เครื่องรับสัญญาณ DS-SS

2.2.2.2 การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่ใช้วิธีการกระโดดของความถี่ (FH-CDMA)

สำหรับระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้วิธีการกระโดดของความถี่นั้น ความถี่พาหะของสัญญาณข้อมูลที่ถูกมอดูเลตจะมีค่าไม่คงที่แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นคาบเวลา นั่นคือในช่วงเวลา T ความถี่พาหะจะมีค่าคงที่แต่ในช่วงเวลา T ต่อมาความถี่พาหะจะกระโดดไปยังความถี่อื่นหรืออาจจะเป็นความถี่เดิมก็ได้ รูปแบบ (Pattern) ของการกระโดดจะเป็นไปตามการควบคุมจากสัญญาณรหัส กลุ่มของความถี่พาหะ ที่มีทั้งหมดเรียกว่า เซตของการกระโดด (Hop Set)

การใช้ย่านความถี่ของระบบ FH จะแตกต่างจากระบบ DS สำหรับระบบ DS นั้นเมื่อทำการส่งสัญญาณจะใช้ย่านความถี่ทั้งหมด ในขณะที่ระบบ FH จะใช้ย่านความถี่เพียงส่วนเล็กๆ ของแบนด์วิดท์เท่านั้นเมื่อมีการส่งสัญญาณ แต่จะมีตำแหน่งของย่านความถี่ดังกล่าวแตกต่างกันในแต่ละเวลา บล็อกไดอะแกรมของระบบ FH-CDMA แสดงดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 2.10 การครอบครองเวลา/ย่านความถี่ของสัญญาณ FH และสัญญาณ DS

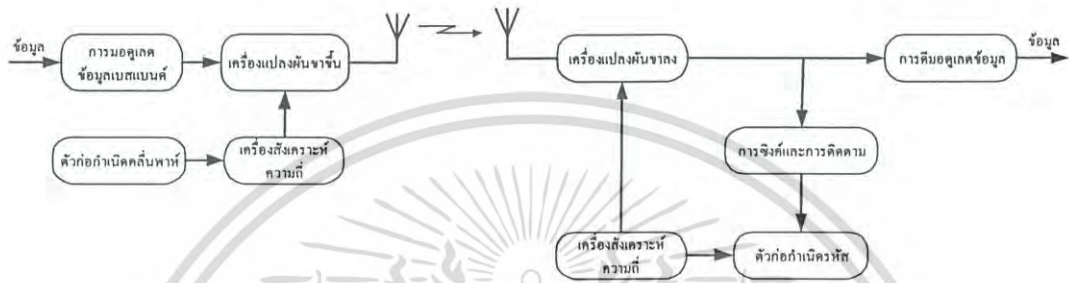
สมมติว่าระบบ FH ทำการส่งสัญญาณด้วยความถี่ในย่านความถี่แบนด์ 2 ในคาบเวลาแรก (ดูรูปที่ 2.10) แต่ระบบ DS จะทำการส่งสัญญาณในคาบเวลาเดียวกันด้วยการแผ่กำลังของสัญญาณไปน้อยกว่าระบบ FH มาก แต่อย่างไรก็ดีระบบ DS นั้น จะทำการส่งสัญญาณในย่านความถี่แบนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 ในช่วงเวลาทั้งหมดของคาบเวลา ในขณะที่ระบบ FH จะใช้ย่านความถี่นี้เพียงช่วงหนึ่งของเวลาเท่านั้น ดังนั้นโดยเฉลี่ยแล้ว ทั้ง 2 ระบบจะทำการส่งสัญญาณด้วยกำลังงานที่เท่ากันในย่านความถี่ใช้งานทั้งหมด

ข้อแตกต่างระหว่างการครอบครองย่านความถี่ของระบบ FH และระบบ DS แสดงดังรูปที่

2.10



รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งและเครื่องรับ FH-CDMA

สัญญาณข้อมูลจะเป็นสัญญาณเบสแบนด์ (Base band) ที่ถูกมอดูเลตกับคลื่นพาห์โดยสามารถใช้เทคนิคการมอดูเลตได้หลายวิธี แต่ในการประยุกต์ใช้งานระบบ FH จริง ๆ ไม่สามารถใช้ได้ทุกวิธี โดยมักจะใช้การมอดูเลตแบบ FM สำหรับสัญญาณอนาล็อก และใช้การมอดูเลตแบบ GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) สำหรับสัญญาณดิจิทัล จากรูปที่ 2.11 จะใช้วงจรสังเคราะห์ความถี่ที่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้อย่างรวดเร็วโดยการควบคุมจากสัญญาณรหัส ดังนั้นความถี่พาห์จะถูกแปลงความถี่ให้สูงขึ้นเป็นความถี่ในการส่งสัญญาณ (Transmission Frequency)

ที่เครื่องรับก็จะใช้วิธีกลับกับทางด้านส่ง โดยใช้วงจรกำเนิดขบวนรหัสเพื่อนำมาใช้ในการแปลงความถี่ของสัญญาณที่รับได้ให้ต่ำลงมาเป็นความถี่พาห์ ซึ่งใช้ในการมอดูเลตสัญญาณเบสแบนด์ทางด้านส่ง หลังจากนั้นก็จะทำการดีมอดูเลตจึงได้สัญญาณข้อมูลเดิมกลับคืนมา วงจรซิงโครไนซ์/การติดตาม (Synchronize/Tracking) จะถูกนำมาใช้ในการทำให้การกระโดดของความถี่พาห์ที่สร้างขึ้นทางด้านรับเป็นไปอย่างซิงโครไนซ์กับรูปแบบการกระโดดของคลื่นพาห์ที่รับได้ ดังนั้นจึงสามารถทำการดีสแปดสัญญาณได้อย่างถูกต้อง

ระบบ FH-CDMA นี้สามารถจำแนกความแตกต่างโดยใช้อัตราการกระโดดของความถี่พาห์ได้ดังนี้ ถ้าจำนวนของการกระโดดมีค่ามากกว่าอัตราข้อมูลมาก ๆ จะเรียกว่าเป็นการเข้าถึงหลายทางแบบแอมป์รหัส โดยใช้วิธีการกระโดดของความถี่อย่างรวดเร็ว (Fast Frequency Hopping

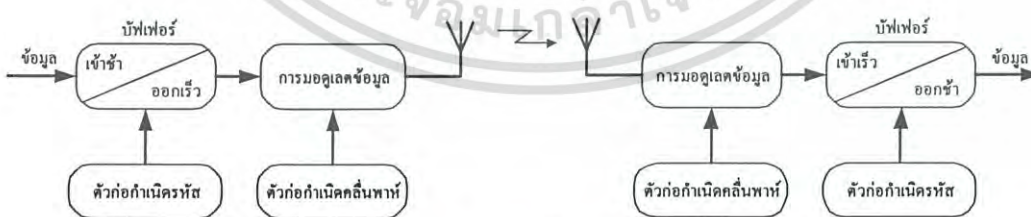
(F-FH) CDMA) สำหรับกรณีนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่พาห์หลายครั้งในช่วงเวลาของการส่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูล 1 บิต นั่นคือข้อมูล 1 บิตจะถูกส่งออกไปในหลาย ๆ ความถี่ แต่ถ้าจำนวนของการกระโดดมีค่าน้อยกว่าอัตราข้อมูลมาก ๆ จะเรียกว่า การเข้าถึงหลายทางแบบแบริ่งรหัส โดยใช้วิธีการกระโดดของความถี่อย่างช้า (Slow Frequency Hopping (S-FH) CDMA) สำหรับกรณีนี้จะมีบิตข้อมูลหลายบิตถูกส่งที่ความถี่เดียวกัน

การครอบครองย่านความถี่ที่แต่ละความถี่ในการกระโดดใด ๆ ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับแบนด์วิดท์ของสัญญาณข้อมูลเท่านั้น ยังขึ้นอยู่กับรูปร่างของสัญญาณที่มีการกระโดดและความถี่ในการกระโดดอีกด้วย ถ้าความถี่ในการกระโดดมีค่าน้อยกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณข้อมูลมาก ๆ (กรณี S-FH) ปัจจัยสำคัญที่จะควบคุมการครอบครองย่านความถี่คือแบนด์วิดท์ของข้อมูล แต่ถ้าความถี่ในการกระโดดมีค่ามากกว่าแบนด์วิดท์ของข้อมูลมาก ๆ รูปร่างพัลส์ของสัญญาณที่มีการกระโดดจะเป็นปัจจัยในการควบคุมการครอบครองย่านความถี่ ที่แต่ละความถี่ในการกระโดดใด ๆ ถ้ารูปร่างพัลส์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด เป็นผลให้มีการเปลี่ยนแปลงความถี่อย่างรวดเร็ว ย่านความถี่ที่ครอบครองจะมีแบนด์วิดท์ที่แผ่กว้างออกมาก เป็นผลทำให้จำกัดจำนวนความถี่ในการกระโดด ถ้าทำให้การเปลี่ยนแปลงความถี่เป็นไปอย่างราบเรียบ (Smooth) แบนด์วิดท์ของสัญญาณที่แต่ละความถี่ในการกระโดด จะมีค่าประมาณ $1/T_h$ เท่าของแบนด์วิดท์ของความถี่ที่ใช้งานทั้งหมด เมื่อ T_h มีค่าเท่ากับความถี่ในการกระโดด การจะทำให้การเปลี่ยนแปลงความถี่เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ นั้น ทำได้โดยการลดกำลังก่อนที่จะมีการกระโดดของความถี่แล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เมื่อความถี่ในการกระโดดได้เปลี่ยนแปลงไปแล้ว

2.2.2.3 การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่ใช้วิธีการกระโดดของเวลา (TH-CDMA)

ในระบบที่มีการเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่ใช้วิธีการกระโดดของเวลา สัญญาณข้อมูลจะถูกส่งไปใน Burst ภายในช่วงเวลาที่กำหนดรหัสของผู้ใช้แต่ละคน

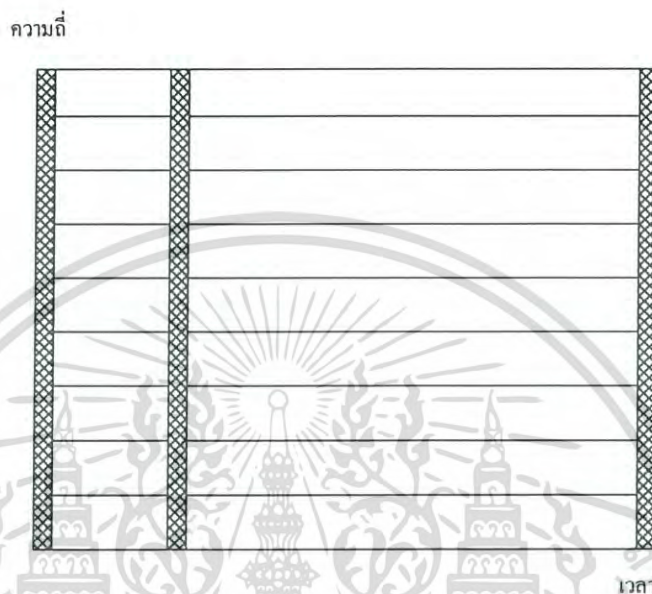


รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งและเครื่องรับ TH-CDMA

ในแกนของเวลาจะถูกแบ่งออกเป็นเฟรมและแต่ละเฟรมจะถูกแบ่งออกเป็นไทม์สล็อตจำนวน M ไทม์สล็อต ในช่วงเวลาของแต่ละเฟรมผู้ใช้ระบบสามารถจะส่งสัญญาณไปในไทม์สล็อตใดไทม์สล็อตหนึ่งจากทั้งหมด M ไทม์สล็อตและแต่ละไทม์สล็อตก็จะถูกส่งออกไปโดยขึ้นอยู่กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรหัสที่กำหนดให้แก่ผู้ใช้งานระบบแต่ละคน เนื่องจากผู้ใช้งานหนึ่งจะทำการส่งข้อมูลทั้งหมดภายใน 1 ไทม์สล็อตแทนที่จะทำการส่งข้อมูลไปในทั้งหมด M ไทม์สล็อต ดังนั้นความถี่ที่ใช้ในการส่งจะเพิ่มขึ้นด้วยค่าแฟลคเตอร์เป็น M บล็อกโคโอะแกรมของระบบ TH-CDMA แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การพล็อตระหว่างเวลาและความถี่ของระบบ TH-CDMA

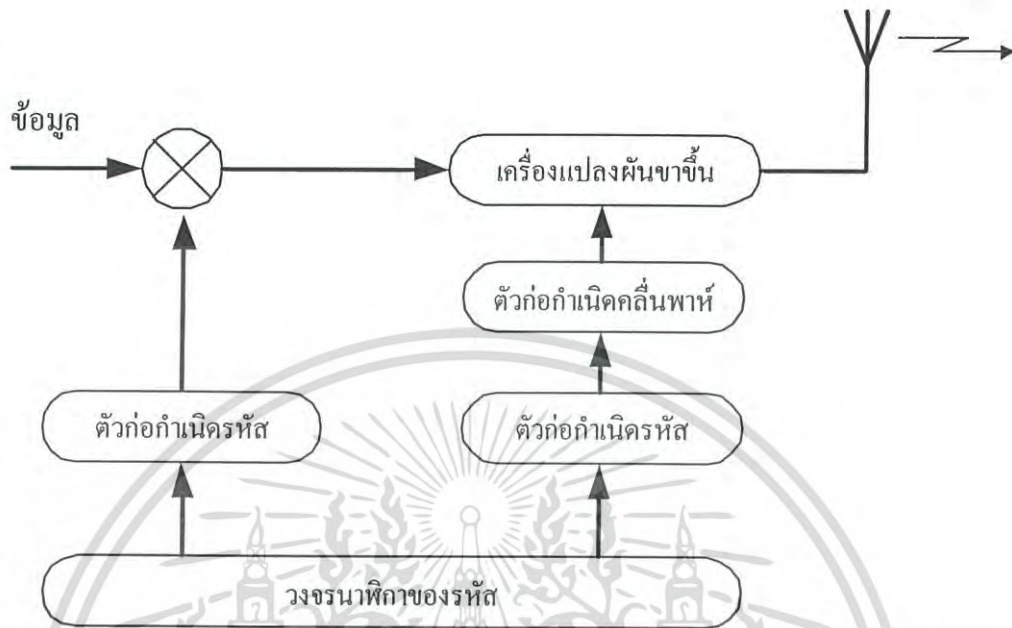
รูปที่ 2.13 แสดงการพล็อตระหว่างเวลาและความถี่ของระบบ TH-CDMA เมื่อทำการเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.13 กับรูปที่ 2.10 จะเห็นว่า ระบบ TH-CDMA นั้นใช้สเปกตรัมแบนด์กว้างทั้งหมดสำหรับในช่วงเวลาสั้น ๆ แทนที่จะใช้ส่วนหนึ่งของสเปกตรัมตลอดช่วงเวลาทั้งหมด และเช่นเดียวกับระบบ DS-CDMA และระบบ FH-CDMA

2.2.2.4 การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่ใช้วิธีการไฮบริดจ์

ระบบการเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่ใช้วิธีการไฮบริดจ์จะรวมถึงระบบ CDMA ทั้งหมดที่ใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่ตั้งแต่ 2 วิธีขึ้นไปร่วมกัน จากเทคนิคการมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่ทั้ง 3 วิธีที่อธิบายไว้ข้างต้นได้แก่ การมอดูเลตแบบ DS การมอดูเลตแบบ FH และการมอดูเลตแบบ TH ทำให้สามารถสร้างระบบไฮบริดจ์ที่อาจเป็นได้ดังนี้ DS/FH, DS/TH, FH/TH และ DS/FH/TH

แนวคิดของระบบไฮบริดจ์ คือ เพื่อรวมข้อดีของเทคนิคการมอดูเลตแต่ละเทคนิคเข้าด้วยกัน ตัวอย่างเช่น ระบบ DS/FH จะได้ข้อดีในเรื่องของการต่อต้านผลกระทบจากสัญญาณหลายเส้นทางของระบบ DS ร่วมกับคุณสมบัติในเรื่องผลกระทบจากความถี่-ไกลของสัญญาณของ

ระบบ FH แต่ข้อเสียของระบบไฮบริดจ์ ก็คือ เรื่องของเครื่องส่งและเครื่องรับที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น ตัวอย่างบล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่ง DS/FH CDMA แสดงดังรูปที่ 2.14

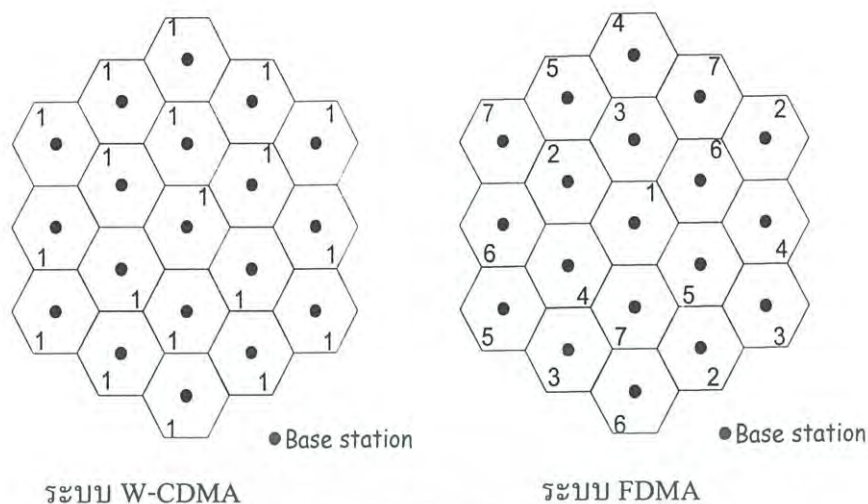


รูปที่ 2.14 เครื่องส่งไฮบริดจ์ DS/FH-CDMA

จากรูปที่ 2.14 สัญญาณข้อมูลจะถูกทำให้เป็นสัญญาณสเปกตรัมแผ่ โดยใช้สัญญาณรหัส DS หลังจากนั้นสัญญาณสเปกตรัมแผ่จะถูกนำไปใช้มอดูเลตกับคลื่นพาห้ ที่มีการกระโดดของความถี่สอดคล้องกับลำดับรหัสอีกอันหนึ่ง โดยใช้สัญญาณนาฬิกาควบคุมรหัส (Code Clock) เพื่อให้รหัสทั้งสองมีความสัมพันธ์ที่คงที่ต่อกัน

2.3 ระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ

ในการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางความถี่นั้นจะมีค่าตัวแปรที่แสดงถึงการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่เท่ากับ 7 (Frequency Reuse = 7) แต่เนื่องจากในระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางรหัสนั้น ในเซลล์ที่อยู่ติดกันสามารถใช้ความถี่เดียวกันได้ ดังนั้นการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่เท่ากับ 1 ซึ่งจะแสดงได้ดังในรูปที่ 2.15 ในการพิจารณาจำนวนผู้ใช้งานที่ระบบสามารถที่จะรองรับได้นั้น จะมีปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อจำนวนความจุของระบบ เช่น ปริมาณการแทรกสอดในระหว่างผู้ใช้งานด้วยกันเอง ความถูกต้องของการควบคุมกำลังของเครื่องลูกข่ายอื่นเนื่องจากปัญหาใกล้-ไกล



รูปที่ 2.15 รูปแบบของการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ของระบบ FDMA และระบบ W-CDMA

2.3.1 สัญญาณแทรกสอดในการสื่อสารเชื่อมโยงขาไป (Forward Link Interference)

2.3.1.1 สัญญาณแทรกสอดภายในเซลล์ (Same-Cell Interference)

ทางอุดมคติแล้วจะ ไม่มีสัญญาณแทรกสอดภายในเซลล์ในการสื่อสารเชื่อมโยงขาไป เนื่องจากแต่ละช่องสัญญาณในการสื่อสารเชื่อมโยงขาไปนั้นออร์โธกอนอลซึ่งกันและกันทุก ๆ ช่องสัญญาณรวมทั้งช่องสัญญาณนำร่องในการสื่อสารเชื่อมโยงขาไปนั้น จะสามารถแยกแยะออกจากกันได้โดยการคูณสัญญาณที่รับเข้ามาด้วยขบวนชิปที่พอเหมาะ แล้วทำการรวมหรืออินทิเกรตชิปในช่วง 64 ชิปของวอลซ์ฟังก์ชัน (Walsh Function) ซึ่งผลที่ได้จากกระบวนการนี้คือ สัญญาณขบวนข้อมูลเบสแบนด์ของช่องสัญญาณที่ต้องการ โดยปราศจากสัญญาณแทรกสอดใด ๆ จากการสื่อสารในทิศทาง การสื่อสารเชื่อมโยงขาไป แต่อย่างไรก็ตามการแพร่กระจายคลื่นในโทรศัพท์เคลื่อนที่จะทำให้เกิดการแทรกสอดในทิศทาง การสื่อสารเชื่อมโยงขาไปเนื่องจากการเกิดคลื่นหลายวิธีนั่นเอง

สมมติว่า $I_{0,f}$ คือความหนาแน่นของสัญญาณทั้งหมดที่รับได้ที่เครื่องรับจากสถานีฐานที่ใช้บริการอยู่ ซึ่งสัญญาณนี้ประกอบด้วยสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดอันเนื่องมาจากคลื่นหลายวิธี ซึ่งกำลังของสัญญาณในเส้นทางที่ k กำหนดให้เป็น β_k เมื่อ $0 \leq \beta_k \leq 1$ ซึ่งสัดส่วนของสัญญาณ $I_{0,f}$ อันเนื่องมาจากเส้นทางที่ k คือ

$$I_{0,k} \triangleq \text{ความหนาแน่นสเปกตรัมของเส้นทาง } k = \beta_k I_{0,f} \quad (2.5)$$

และถ้าในการแพร่กระจายประกอบด้วยสัญญาณจำนวน K เส้นทาง จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{0,f} = \sum_{k=1}^K I_{0,j} = I_{0,f} \sum_{k=1}^K \beta_j \quad (2.6)$$

$$\text{หรือ } \sum_{k=1}^K \beta_j = 1$$

หากสมมติว่าที่เครื่องรับมีวงจรรับสัญญาณจำนวน K วงจร โดยแต่ละวงจรตั้งค่าไว้สำหรับรับสัญญาณแต่ละเส้นทางใน K เส้นทาง ถ้าให้ E_{b0} เป็นพลังงานต่อบิตของข้อมูลทั้งหมดที่รับได้จากสถานีฐานแล้วพลังงานต่อบิตของข้อมูลอินพุตของวงจรรับสัญญาณอันดับที่ j จะมีค่าเป็น

$$E_{bj} \triangleq \text{พลังงานต่อบิตของข้อมูลจากเส้นทางที่ } j = \beta_j E_{b0} \quad (2.7)$$

กำหนดให้ I_{scj} เป็นความหนาแน่นของสัญญาณแทรกสอดจากภายในเซลล์ต่อเส้นทางอันดับ j ซึ่งหาได้จาก

$$I_{scj} = \sum_{k \neq j} I_{0,k} = I_{0,f} \sum_{k \neq j} \beta_k = I_{0,f} (1 - \beta_j) \quad (2.8)$$

ซึ่งจะได้อัตราส่วนความสัมพันธ์ของพลังงานต่อบิตของข้อมูลต่อความหนาแน่นของสัญญาณรบกวน (ที่รวมทั้งสัญญาณแทรกสอดด้วย) ของวงจรดีมอดูเลเตอร์ที่ตั้งค่าไว้สำหรับรับสัญญาณจากเส้นทาง j เป็น

$$\frac{E_{bj}}{(N_{0,T})_j} = \frac{E_{b0} \beta_j}{N_t + I_{0,\infty} + I_{0,f} (1 - \beta_j)} \quad (2.9)$$

เมื่อ N_t คือ ความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (Thermal Noise Density)

$I_{0,oc}$ คือ ความหนาแน่นของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง

$I_{0,f}$ คือ ความหนาแน่นของสัญญาณที่รับได้จากเซลล์ภายใน

$(N_{0,T})_j$ คือ ความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนทั้งหมดซึ่งรวมทั้งสัญญาณแทรกสอดในการสื่อสารเชื่อมโยงขาไป หากที่เครื่องลูกข่ายใช้การรวมสัญญาณแบบ Maximum Ratio Combining จากเส้นทางทั้ง K เส้นทางแล้ว จะได้ว่า

$$\frac{E_b}{N_{0,T}} = \sum_{k=1}^K \frac{E_{bk}}{(N_{0,T})_k} = \sum_{k=1}^K \frac{E_{b0} \beta_k}{N_t + I_{0,oc} + I_{0,f} (1 - \beta_k)} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเครื่องลูกข่ายที่อยู่ใกล้กับสถานีฐาน สัญญาณแทรกสอดภายในเซลล์จะมีค่ามากกว่าสัญญาณรบกวนชนิดอื่น ๆ ซึ่งจะสามารถตัดสัญญาณรบกวนอื่น ๆ ที่ทิ้งไปได้สมการ (2.10) จึงสามารถประมาณได้เป็น

$$\frac{E_b}{N_{0,T}} \approx \sum_{k=1}^K \frac{E_{b0}\beta_k}{I_{0,f}(1-\beta_k)} = \frac{E_{b0}}{I_{0,f}} \sum_{k=1}^K \frac{\beta_k}{1-\beta_k} = \frac{E_{b0}}{I_{0,sc}} \quad (2.11)$$

เมื่อ $I_{0,sc}$ คือ ความหนาแน่นของสัญญาณแทรกสอดภายในเซลล์อ้างอิง ของการเชื่อมโยงขาไป ซึ่งจะมีนิยามเป็น

$$I_{0,sc} = \frac{I_{0,f}}{\sum_{k=1}^K \frac{\beta_k}{1-\beta_k}} \quad (2.12)$$

2.3.1.2 สัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่น (Other-Cell Interference)

ในระบบซีดีเอ็มเอ นั้น สัญญาณที่รับได้จากเซลล์อื่น ๆ จะมีลักษณะเป็นสัญญาณแทรกสอดต่อสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องลูกข่าย ซึ่งกำลังของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งสามารถกำหนดได้ว่าเป็นตัวแปรสุ่มแบบลือกนอร์มอล นั่นคือ กำลังของสัญญาณแทรกสอดจะเป็นตัวแปรสุ่มชนิดเกาส์

กำลังของสัญญาณแทรกสอด (dBm) = ค่าเฉลี่ย (dBm) + ค่าศูนย์-เกาส์ (ตัวแปรสุ่มชนิดเกาส์)

ค่าเฉลี่ยกำลังสัญญาณแทรกสอดจะสามารถคาดเดาได้โดยการใช้โมเดลของการลดทอนในการแพร่กระจายคลื่น ตัวอย่างเช่น การลดทอนสัญญาณในการแพร่กระจายจะเป็นสัดส่วนกับกำลังอันดับที่ T ของระยะทาง เป็นต้น ซึ่งในการคำนวณทางคณิตศาสตร์แล้ว สัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่นในทิศทาง การสื่อสารเชื่อมโยงขาไป สามารถหาค่าได้ในรูปตัวแปรสุ่มแบบลือกนอร์มอล ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{กำลังของสัญญาณแทรกสอด (dB)} &= 10 \log_{10} I_i \\ &= 10 \log_{10} \bar{I}_i + \sigma_{dB} w_i \end{aligned}$$

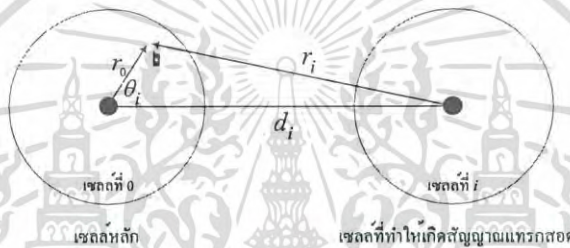
เมื่อ w_i ตัวแปรสุ่มเกาส์ หรือ

$$I_i = \bar{I}_i \times 10^{\sigma_{dB} w_i / 10} = \text{Constant} \times \frac{1}{r_i^T} \times 10^{\sigma_{dB} w_i / 10} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ \bar{I}_i = ค่าเฉลี่ยของกำลังสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ที่ i
 r_i = ระยะทางจากเครื่องลูกข่ายถึงเซลล์ที่ i
 τ = ตัวชี้กำลังของกฎของการสูญเสียตามระยะทาง
 w_i = ค่าศูนย์-เฉลี่ย หน่วยความแปรปรวนของตัวแปรสุ่มเกาส์
 σ_{dB} = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแปรปรวนข้อมูลในช่วง 6 ถึง 13 เดซิเบล

พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบมากที่สุดสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง คือ ค่ากลางของกำลังสัญญาณแทรกสอด \bar{I}_i ในสมการที่ (2.13) และตำแหน่งของเครื่องลูกข่าย หรือพารามิเตอร์ r_i เพราะตำแหน่งของเครื่องลูกข่ายจะเป็นตัวกำหนดปริมาณสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้น



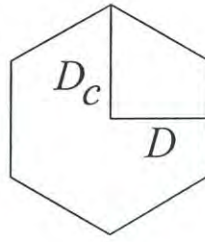
รูปที่ 2.16 ระยะทางของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง

หากสมมติว่ามีเซลล์สมมาตรดังแสดงในรูปที่ 2.16 เพื่อใช้ในการหาปริมาณสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นกับเครื่องลูกข่ายที่ตำแหน่ง (r, θ_i) ในเซลล์หลัก ซึ่งจากรูปที่ 2.16 จะสามารถหาระยะทางของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ i ได้เป็น

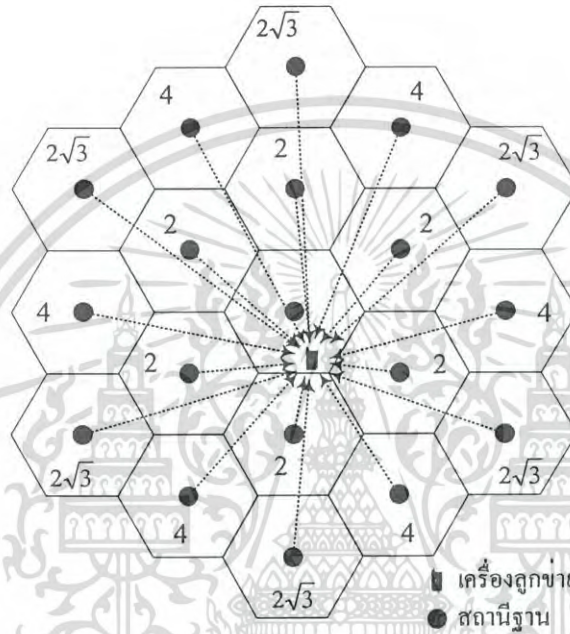
$$r_i(r, d_i, \theta_i) = \sqrt{r^2 + d_i^2 - 2rd_i \cos \theta_i} \quad (2.14)$$

เมื่อ d_i คือ ระยะห่างระหว่างเซลล์หลักกับเซลล์ที่ทำให้เกิดสัญญาณแทรกสอด ซึ่งรูปที่ 2.16 จะเป็นรูปแสดงการวางเซลล์อย่างง่าย และรูปที่ 2.17 จะแสดงการหาระยะทางทั้งในเทอมของรัศมีเซลล์จากศูนย์กลางถึงมุม (D_c) หรือรัศมีเซลล์จากศูนย์กลางถึงด้าน D โดย $D = \sqrt{3}D_c/2$ เพื่อความสะดวกในการหาระยะห่างระหว่างเซลล์ แต่ทว่าในระบบเซลล์ดูตานั้นจะมีการวางเซลล์แบบรวงผึ้งที่มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยจะมีเซลล์ที่ก่อให้เกิดสัญญาณแทรกสอดในลักษณะ “วงแหวน” รอบเซลล์หลัก ซึ่งระยะห่างระหว่างเซลล์หลักกับวงแหวนเหล่านี้จะแสดงในตารางที่ 2.1 และเมื่อนำค่าระยะห่างเซลล์ที่ได้จากตารางที่ 2.1 มาวาดเป็นระบบเซลล์ดูตาร์แล้ว จะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ที่แสดงให้เห็นถึงการเกิดสัญญาณแทรกสอดที่เครื่องลูกข่ายที่ตำแหน่ง (r, θ_i)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ลักษณะและรัศมีเซลล์



รูปที่ 2.18 สัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง (Forward Link)

ตารางที่ 2.1 ระยะห่างของเซลล์วงแหวนในระบบเซลล์สตาร์

วง ที่	ตำแหน่ง ที่	ระยะห่าง	จำนวน	วง ที่	ตำแหน่ง ที่	ระยะห่าง	จำนวน
1	1	$2D = D_c\sqrt{3}$	6	4	1	$2D\sqrt{13} = D_c\sqrt{39}$	6
2	1	$2D\sqrt{3} = 3D_c$	6	2	2	$4D\sqrt{3} = 6D_c$	6
	2	$4D = 2D_c\sqrt{3}$	6		3	$2D\sqrt{13} = D_c\sqrt{39}$	6
3	1	$2D\sqrt{7} = D_c\sqrt{21}$	6	4	4	$8D = 4D_c\sqrt{3}$	6
	2	$2D\sqrt{7} = D_c\sqrt{21}$	6		:	:	:
	3	$6D = 3D_c\sqrt{3}$	6		n	i	$2D\sqrt{n^2 + i^2 - ni}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากสมมติว่าการแพร่กระจายคลื่นเป็นสัดส่วนกับกำลัง T นั่นคือการลดทอนจากการแพร่กระจายคือ

$$L(r_i) = \frac{I_i}{P_i} = \text{Constant} \times r_i^{-\tau} \quad (2.15)$$

เมื่อ P_i คือ กำลังส่งของเซลล์ข้างเคียง ซึ่งสมมติให้มีค่าเท่ากันทุกเซลล์
 r_i คือ ระยะห่างจากเครื่องลูกข่ายไปยังเซลล์ที่ i ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.14) แล้วจะได้ค่าเฉลี่ยของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงทั้งหมดในรูปของผลรวมของค่าเฉลี่ยจากเซลล์ข้างเคียงทั้งหมดนั้นคือ

$$I_{oc} = \sum_i I_i = \sum_i P_i \times L(r_i) = P_i \sum_i L(r_i) = \text{Constant} \times P_i \sum_i [r_i(r, d_i, \theta_i)]^{-\tau} \quad (2.16)$$

2.3.2 สัญญาณแทรกสอดในการสื่อสารเชื่อมโยงขากลับ (Reverse Link Interference)

2.3.2.1 การแทรกสอดภายในเซลล์ (Same-Cell Interference)

ในการแทรกสอดที่เกิดขึ้นนี้ จะประกอบด้วยผลรวมของสัญญาณจากผู้ให้บริการรายอื่นๆ ที่ภาครับในสถานีฐานเดียวกัน สำหรับระบบซีดีเอ็มเอเมื่อสัญญาณดังกล่าวนี้มีการใช้ความถี่เดียวกันในเวลาเดียวกัน ดังนั้นการแทรกสอดทั้งหมดจึงเป็นแบบจำลองที่เป็นจุดมุ่งหมายของการวิเคราะห์เป็นสัญญาณรบกวนขาวที่มีแถบจำกัด โดยเกือบทั้งหมดของสัญญาณรบกวนที่ภาครับของสถานีฐานจะเกิดขึ้นเนื่องมาจากการแทรกสอดของสัญญาณจากเครื่องลูกข่าย จำนวนของผู้ใช้บริการที่เข้ามาใช้งานขณะใดขณะหนึ่งในการส่งของการเรียก จะถูกทำให้มีจำนวนสูงสุดได้ โดยการทำให้กำลังที่รับได้ของแต่ละผู้ใช้ที่สถานีฐานนั้นมีค่าเท่ากัน และให้มีค่าต่ำเท่าที่เป็นไปได้ ในขณะที่ยังสอดคล้องกับสมรรถนะของการเชื่อมโยง การควบคุมแบบไดนามิกของกำลังที่ส่งของเครื่องลูกข่ายจึงเป็นส่วนที่จำเป็นต่อการออกแบบส่วนการสื่อสารเชื่อมโยงขากลับ (Reverse Link) เพราะเมื่อมีการใช้ของการควบคุมกำลังสำหรับ K ของผู้ใช้งานในเซลล์ แล้วปริมาณของกำลังของการแทรกสอดที่ภาครับของสถานีฐานเนื่องจากเซลล์เดียวกันจะถูกสมมติโดย

$$I_{sc} = (K - 1)P_i\alpha \quad (2.17)$$

เมื่อ P_i เป็นกำลังของแต่ละเครื่องลูกข่ายที่ภาครับ
 α อัตราการกลืนไหลของเสียง (Voice Activity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.2 การแทรกสอดจากเซลล์อื่น (Other-Cell Interference)

ในรูปที่ 2.19 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงในการสื่อสารการเชื่อมต่อโยงขากลับ โดยสมมติว่าแต่ละเซลล์มีขนาดเท่ากัน และมีการใช้เทคนิคในการควบคุมกำลังส่ง ซึ่งกำลังสัญญาณแทรกสอดจากเครื่องลูกข่ายที่อยู่ต่างเซลล์ (เซลล์ B) จะมีค่าเป็น

$$\text{ระดับกำลังที่ต้องการที่สถานีฐาน B} \times \text{อัตราขยายที่การชดเชยของการแพร่ผ่าน} = P_b \times r^4$$

เมื่อ r คือระยะห่างระหว่างเครื่องลูกข่ายที่อยู่ในสถานีฐาน B

ดังนั้นกำลังของสัญญาณแทรกสอดจากเครื่องลูกข่ายนี้ที่ไปรบกวนสถานีฐาน B_0 จะมีค่าเป็น

$$P_0 = \alpha P_b \left(\frac{r^4}{r_0^4} \right) \quad (2.18)$$

ปริมาณของสัญญาณแทรกสอดจะขึ้นอยู่กับจำนวนเครื่องลูกข่ายที่ใช้งานภายในเซลล์ B โดยจะมีค่าเป็นค่าผลรวมของกำลังสัญญาณแทรกสอดของเครื่องลูกข่ายจำนวน K เครื่อง



รูปที่ 2.19 ลักษณะทางกายภาพของสัญญาณแทรกสอดในการสื่อสารการเชื่อมต่อโยงขากลับ

2.4 ความจุของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ

ในการสื่อสารระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ นั้น การควบคุมกำลังส่งมีความจำเป็นต่อระบบมาก เนื่องจากผู้ใช้บริการทั้งหมดนั้นใช้ความถี่ทั้งหมดร่วมกัน โดยผ่านทางรหัส PN ดังนั้นผู้ใช้แต่ละรายจึงดูเหมือนเป็นสัญญาณรบกวนต่อผู้ใช้บริการอื่น ดังนั้นกำลังของผู้ใช้แต่ละรายจะต้องมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

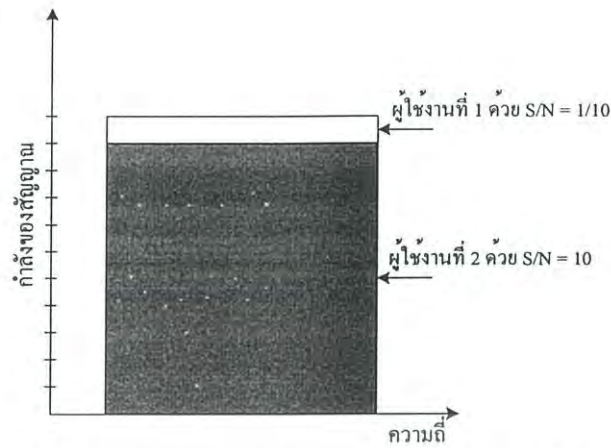
การควบคุมเพื่อไม่ให้มีผู้ใช้บริการรายใดรายหนึ่งเป็นสัญญาณที่ไปรบกวนต่อผู้ใช้บริการอื่น ๆ ที่ใช้ความถี่ร่วมกันอยู่

ในการแสดงถึงว่าการควบคุมกำลังส่งนั้น มีความจำเป็นต่อระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเออย่างไร โดยจะทำการพิจารณาในเซลล์เดียวที่มีการสมมติให้มีผู้ใช้บริการอยู่สองราย โดยจะมีการอธิบายในการเชื่อมโยงขาขึ้น ซึ่งเป็นส่วนการเชื่อมโยงที่เป็นตัวจำกัดของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ ผู้ใช้บริการที่สองเป็นผู้ใช้บริการที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากกว่าผู้ใช้บริการที่หนึ่ง ถ้าในกรณีที่ไม่มี การควบคุมกำลังผู้ใช้บริการทั้งคู่จะมีกำลังส่งที่มีค่าแน่นอนซึ่งเท่ากับ p อย่างไรก็ตามเพราะว่าความแตกต่างของระยะทางจะส่งผลให้กำลังที่รับได้จากผู้ใช้บริการที่สองจะมีค่ามากกว่ากำลังที่รับได้จากผู้ใช้บริการที่หนึ่ง ถ้าสมมติให้ความแตกต่างของระยะทางของผู้ใช้บริการที่สองมากกว่าผู้ใช้บริการที่หนึ่งเป็นสิบเท่า ดังนั้นผู้ใช้บริการที่หนึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรง

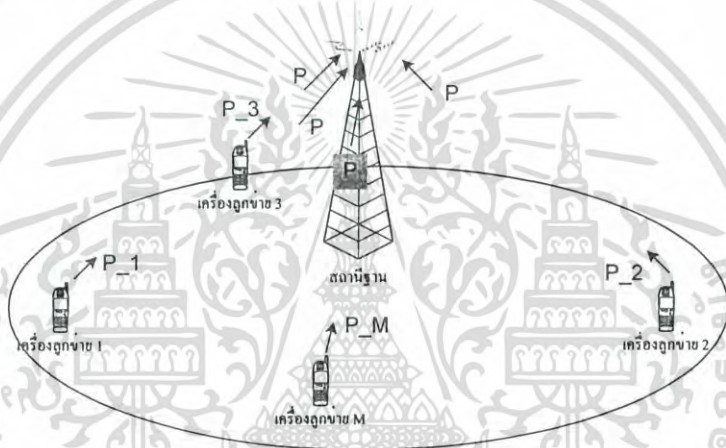
ถ้าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ต้องการ $(S/N)_{required}$ มีค่าเท่ากับ $1/10$ ดังนั้น จะสามารถเห็นความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างค่าของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของทั้งสองผู้ใช้บริการ จากรูป 2.20 แสดงให้เห็นในจุดนี้ ถ้าไม่คิดความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (Thermal Noise) ดังนั้นอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้บริการที่สอง $(S/N)_2$ จะมีค่าเท่ากับ 10 และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้บริการที่หนึ่ง $(S/N)_1$ จะมีค่าเท่ากับ $(1/10)$ นั่นคือผู้ใช้บริการที่สองจะมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สูงกว่าก็จะส่งผลให้คุณภาพสัญญาณดีกว่าผู้ใช้บริการที่หนึ่ง ซึ่งความไม่เท่ากันนี้ จะถูกเรียกว่าปัญหาความใกล้-ไกล (Near-Far Problem) ของระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งทางรหัส

ระบบดังที่ได้กล่าวมานี้จะเป็นการกล่าวถึงขอบเขตของความจุ เพราะเนื่องจากเหตุผลที่พยายามที่จะเพิ่มผู้ใช้บริการที่สามเข้าไปซึ่งส่งด้วยกำลัง p_3 ณ ตำแหน่งใด ๆ ในเซลล์ ดังนั้นอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้บริการที่สามไม่สามารถจะถึง $(S/N)_{required}$ ได้ ยิ่งไปกว่านั้นถ้าให้ผู้ใช้งานที่สามเข้าไปใช้งาน ไม่เพียงแต่ที่ผู้ใช้ที่สามใช้งานไม่ได้เพราะว่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนไม่ถึง $(S/N)_{required}$ แต่จะส่งผลถึงอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่สองให้ลดลงต่ำกว่า $(S/N)_{required}$ อีกด้วย

การควบคุมกำลังส่งนั้นถูกสร้างขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาความใกล้-ไกลและเพื่อให้ได้ความจุสูงสุด การควบคุมกำลังส่งจะกระทำโดยให้กำลังที่ถูกส่งมาจากแต่ละผู้ใช้จะถูกควบคุมให้มีการรับได้ของกำลังดังกล่าวที่สถานีฐานมีค่าเท่ากัน ดังในรูปที่ 2.21 แสดงแนวความคิดดังกล่าว

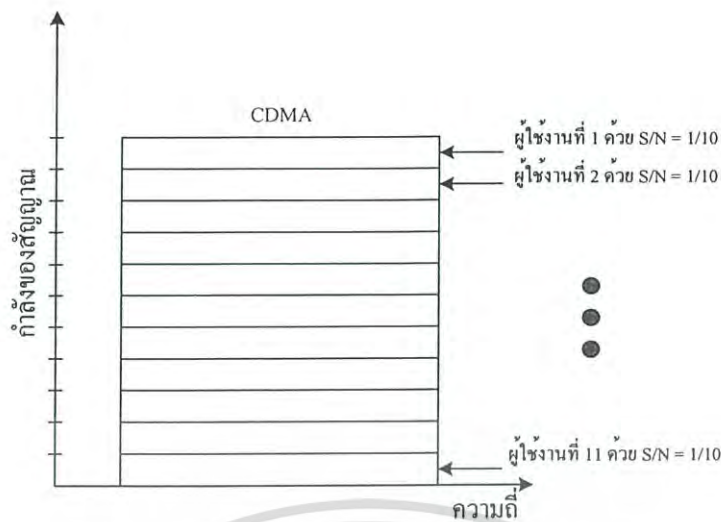


รูปที่ 2.20 กำลังจากผู้ให้บริการสองรายในสถานีฐาน โดยผู้ให้บริการที่สองมีค่า SNR มากกว่าผู้ให้บริการที่หนึ่ง



รูปที่ 2.21 การควบคุมกำลังส่งที่สมบูรณ์

ภายในเซลล์ถ้ากำลังที่ส่งของแต่ละผู้ใช้บริการถูกควบคุม จะทำให้กำลังที่รับได้ที่สถานีฐานของแต่ละผู้ใช้นั้นมีค่าเท่ากันคือ p_r ดังนั้นจะทำให้สามารถรองรับผู้ใช้บริการได้มากขึ้น จากตัวอย่างที่ผ่านมาถ้า $(S/N)_{required}$ ยังคงเป็น $(1/10)$ ดังนั้นจำนวนของผู้ใช้บริการทั้งหมดจะเท่ากับ 11 รายที่สามารถรองรับได้โดยระบบซีดีเอ็มเอ แล้วความจุจะถูกเพิ่มได้มากที่สุดจากการใช้การควบคุมกำลังส่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ความจุที่ได้สูงสุดเมื่อกำลังที่รับได้ของผู้ใช้บริการทั้งหมดมีค่าเท่ากันที่สถานีฐาน

2.4.1 การควบคุมกำลังแบบรูปเปิด (Open Loop Power Control)

รูปแบบของการควบคุมกำลังแบบนี้ ตัวเครื่องลูกข่ายจะเป็นตัวจัดการกระบวนการเอง ทั้งสิ้นไม่ได้เกี่ยวข้องกับสถานีฐานเลย กระบวนการของการควบคุมแบบเปิดจะเป็นกระบวนการที่กระทำอย่างต่อเนื่องหลังจากที่ทางสถานีฐานนั้นรับรู้การร้องขอเข้าใช้งานของสัญญาณของเครื่องลูกข่าย และหลังจากที่เครื่องลูกข่ายเริ่มส่งในช่องสัญญาณทราฟฟิก

หลังจากที่มีการเรียกเข้า เมื่อเครื่องลูกข่ายเคลื่อนที่ไปรอบๆ ภายในเซลล์แล้ว การสูญเสียเชิงระยะทางระหว่างเครื่องลูกข่ายกับสถานีฐานจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง จากผลดังกล่าว กำลังที่ถูกรับได้ที่เครื่องลูกข่ายจะมีการเปลี่ยนแปลงและการควบคุมกำลังแบบรูปเปิดจะทำการตรวจสอบสัญญาณกำลังที่ถูกรับที่เครื่องลูกข่ายอย่างต่อเนื่อง และจะมีการปรับกำลังของสัญญาณที่ลูกส่งออกไป

กล่าวได้ว่าการควบคุมกำลังแบบเปิดจะอยู่บนพื้นฐานของการประมาณการสูญเสียเชิงระยะทางในทิศทางไปยังสถานีฐาน การควบคุมกำลังนี้เป็นการชดเชยในส่วนของปรากฏการณ์ถูกบดบังแบบล็อกนอร์มอล และการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ โดยเป็นการสหสัมพันธ์ระหว่างการจางหายในส่วนการเชื่อมโยงขาไปกับส่วนการเชื่อมโยงขากลับ อย่างไรก็ตามความถี่ของการเชื่อมโยงขาไปและขากลับนั้นก็ใช้ความถี่ที่ต่างกัน การควบคุมกำลังแบบเปิดจึงไม่เพียงพอและมีความซ้ำเกินไปที่จะสามารถชดเชยการจางหายเร็วแบบเรย์ลีได้ หรือในอีกแง่หนึ่งเมื่อมีการจางหายเร็วแบบเรย์ลี จะไม่สามารถใช้การควบคุมกำลังแบบเปิดมาชดเชยการจางหายเร็วแบบเรย์ลีได้

เนื่องจากในการควบคุมกำลังแบบรูปเปิดนั้นได้ทำการวัดความแรงของสัญญาณที่รับได้นั้นคือเป็นการหาค่าของการสูญเสียในการเชื่อมโยงขาไป แล้วมีการสมมติให้มีค่าการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังกล่าวเกิดขึ้นที่ทิศทางการเชื่อมโยงจากกลับที่คล้าย ๆ กันจึงได้ยกตัวอย่างของสมการแสดง Link Budget ของการเชื่อมโยงจากกลับ

$$SNR_R(dB) = P_m(dBm) - L_r(dB) - I_t(dBm) \quad (2.19)$$

เมื่อ SNR_R เป็นค่าของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่รับได้

P_m เป็นกำลังของเครื่องลูกข่ายที่ส่งมา

L_r เป็นการสูญเสียในทิศทางกลับสุทธิ

I_t เป็นการแทรกสอดและสัญญาณรบกวนของทิศทางจากกลับทั้งหมด

ดังนั้นกำลังของเครื่องลูกข่ายที่จะถูกส่งจึงสามารถหาได้โดย

$$P_m(dBm) = SNR_R(dB) + L_r(dB) + I_t(dBm) \quad (2.20)$$

โดย L_r จะคิดรวมถึงค่าของการสูญเสียเชิงระยะทางและการสูญเสียอื่นที่ถูกขดเชยจากอัตราขยายของสายอากาศ สำหรับการเชื่อมโยงขาไปแล้ว กำลังที่รับได้จากสถานีฐานนั้นสามารถแสดงได้เป็น

$$P_R(dBm) = P_B(dBm) - L_f(dB) \quad (2.21)$$

เมื่อ P_R คือกำลังที่ถูกรับได้

P_B คือกำลังส่งจากสถานีฐาน

L_f เป็นการสูญเสียในทิศทางไปข้างหน้าสุทธิ

ดังนั้นสามารถหาค่าของการสูญเสียสุทธิในทิศทางไปข้างหน้า

$$L_f(dB) = P_B(dBm) - P_R(dBm) \quad (2.22)$$

จากสมการดังกล่าวไม่ได้คำนึงถึงความเป็นจริงที่ว่า การวัดค่ากำลังของสถานีฐานที่รับได้ของเครื่องลูกข่ายนั้น ถูกทำให้ลดลงได้โดยการแทรกสอดและสัญญาณรบกวนในทิศทางไปข้างหน้า สุดท้ายจะได้ค่าของกำลังของเครื่องลูกข่ายที่ส่งออกไปเป็น

$$\begin{aligned} P_m(dBm) &= SNR_{target}(dB) + P_B(dB) + I_r(dBm) - P_R(dBm) \\ &= C(dB) - P_R(dBm) \end{aligned} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ C เป็นค่าคงที่

$$\text{โดย } C(\text{dB}) = \text{SNR}_{\text{target}}(\text{dB}) + P_B(\text{dB}) + I_r(\text{dBm})$$

2.4.2 การควบคุมกำลังแบบลูปปิด (Close Loop Power Control)

การควบคุมกำลังแบบลูปปิดนั้น ถูกใช้สำหรับการชดเชยสำหรับการเปลี่ยนแปลงของกำลังเนื่องจากการเฟดดิ้งแบบเรย์ลีแบบรวดเร็ว โดยเป็นลูปปิดเพราะว่ากระบวนการจะเกี่ยวข้องกับทั้งสถานีฐานและเครื่องลูกข่าย เมื่อเครื่องลูกข่ายได้รับช่องสัญญาณทราฟฟิกและเริ่มการสื่อสารกับสถานีฐาน กระบวนการของการควบคุมกำลังแบบปิดจะกระทำร่วมกันไปด้วยกับการควบคุมกำลังแบบลูปเปิด ในการควบคุมกำลังแบบลูปปิด ทางสถานีฐานจะทำการตรวจวัดทั้งสัญญาณของทางสื่อสารเชื่อมโยงขากลับ และคุณภาพของการเชื่อมโยง ถ้าคุณภาพการเชื่อมโยงเริ่มที่จะไม่ดี ทางสถานีฐานจะมีคำสั่งไปยังเครื่องลูกข่ายผ่านการเชื่อมโยงขาไป ให้ทำการเพิ่มกำลังของสัญญาณขึ้น ถ้าในกรณีที่คุณภาพของสัญญาณดีเกินไป นั่นคือการที่มีกำลังของสัญญาณสูงเกินไป ในการสื่อสารเชื่อมโยงขากลับ ในกรณีนี้ทางสถานีฐานจะสั่งให้ทางเครื่องลูกข่ายลดกำลังที่ส่งลงมา ในอุดมคติอัตราความผิดพลาดต่อเฟรม(Frame Error Rate: FER) นั้น จะเป็นตัววัดคุณภาพของการเชื่อมโยงที่ดี แต่เพราะว่าจะทำให้ใช้เวลานานสำหรับสถานีฐานที่จะใช้จำนวนบิตที่จะมาคำนวณให้ถูกต้อง ดังนั้น E_b/N_0 จึงถูกใช้เป็นตัวชี้วัดของคุณภาพการสื่อสารเชื่อมโยงขากลับ

การควบคุมกำลังแบบลูปปิดมีกระบวนการในการกระทำดังนี้

1. สถานีฐานจะทำการตรวจวัด E_b/N_0 อย่างต่อเนื่องในการสื่อสารเชื่อมโยงขากลับ
2. ถ้า E_b/N_0 นั้นมีค่าสูงไป (เช่นเป็นการเกินกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยน) ดังนั้นสถานีฐานจะมีคำสั่งให้เครื่องลูกข่ายลดกำลังส่งลงมา
3. ถ้า E_b/N_0 นั้นมีค่าต่ำไป (เช่นเป็นการต่ำกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยน) ดังนั้นสถานีฐานจะมีคำสั่งให้เครื่องลูกข่ายเพิ่มกำลังส่งขึ้นไป

สถานีฐานจะส่งคำสั่งของการควบคุมกำลังไปยังเครื่องลูกข่าย โดยใช้การเชื่อมโยงขาไป โดยคำสั่งในการควบคุมกำลังจะเรียกว่าเป็น บิตของการควบคุมกำลัง (Power Control Bit: PCBs) ปริมาณของกำลังของเครื่องลูกข่ายที่ถูกสั่งให้เพิ่มหรือลดลงนั้น โดยทั่วไปจะมีค่า 1 dB และ -1 dB

เนื่องจากการควบคุมกำลังแบบลูปปิดนั้นหมายความว่า จะเป็นการชดเชยการเฟดดิ้งแบบเรย์ลีอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการตอบสนองของเครื่องลูกข่ายต่อคำสั่งในการควบคุมกำลังจึงต้องมีความเร็วมาก จากเหตุผลดังกล่าวบิตของ PCBs เหล่านี้จะถูกส่งตรงผ่านช่องสัญญาณทราฟฟิก แต่เมื่อมีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับบิตเหล่านี้ก็จะทำให้เกิดผลกระทบต่อ การควบคุมกำลังเกิดขึ้นเช่นกัน

ในการควบคุมกำลังแบบลูปปิดนั้นจะมีอยู่ 3 จุดที่จะต้องกล่าวถึงเพิ่มเติมดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บิตของการควบคุมกำลังส่งนั้นไม่ได้ถูกป้องกันจากความผิดพลาด

ดังนั้น PCBs นั้นถูกมัลติเพล็กซ์ไปบนช่องสัญญาณไปข้างหน้าหลังจากตัวเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน ดังนั้นจึงไม่ได้มีการป้องกันความผิดพลาดให้แก่บิตดังกล่าว ซึ่งเป็นการกระทำเพื่อลดการหน่วงเวลาในการถอดรหัสและดึงเอาออกมาของบิต และเนื่องจากการควบคุมกำลังส่งแบบลูปิดนั้นถูกใช้ชดเชยการเฟดดิ้งแบบเรย์ลีย์อย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้ PCBs จึงไม่ได้ใช้ระบบป้องกันความผิดพลาดเพื่อที่จะให้เครื่องลูกข่ายสามารถนำบิตดังกล่าวมาไว้เร็วและทำการปรับกำลังที่ส่งให้ได้ตามนั้น จากเหตุผลดังกล่าวความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตสำหรับช่องสัญญาณย่อยของการควบคุมกำลังอาจจะสูงกว่าช่องสัญญาณทราฟฟิกถ้าไม่มีการจัดการเป็นพิเศษ

2. การควบคุมกำลังแบบลูปิดจะมีลูปิดใน (Inner loop) และลูปิดนอก (Outer loop)

ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะลูปิดภายในของกระบวนการควบคุมกำลังแบบลูปิด การมีอยู่ของลูปิดภายในคือการกำหนด Predetermined SNR Threshold เพื่อการตัดสินใจให้กำลังมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลง เมื่อพยายามให้ค่าของอัตราความผิดพลาดต่อเฟรมนั้นลงต่ำไว้ที่ค่าที่สามารถยอมรับได้ และเมื่อถึงแวลูของตัวเครื่องลูกข่ายไม่ได้เป็นความสัมพันธ์แบบ 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 นี้จะกระทำโดยอ้างอิงจากลูปิดภายนอกของการควบคุมกำลังแบบลูปิด สำหรับกระบวนการลูปิดภายนอกของการควบคุมกำลังแบบลูปิดนั้น สามารถทำได้โดยกระบวนการผลิตที่เป็น โครงสร้างพื้นฐานจะมีอิสระที่จะสร้างอัลกอริทึมของลูปิดภายนอกได้เอง

3. การควบคุมกำลังแบบลูปิดระหว่างการเปลี่ยนถ่ายเซลล์อย่างนุ่มนวล (Soft Handoff)

ระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอจะมีการใช้การเปลี่ยนถ่ายเซลล์อย่างนุ่มนวล เมื่อเครื่องลูกข่ายมีการเคลื่อนที่ระหว่าง 2 หรือ 3 เซลล์ โดยการเปลี่ยนถ่ายเซลล์อย่างนุ่มนวลเป็นกระบวนการที่เครื่องลูกข่ายยังคงรักษาการติดต่ออยู่กับสถานีฐาน 2 หรือ 3 สถานีที่เครื่องลูกข่ายนั้นมีการเคลื่อนที่อยู่ ในระหว่างการเปลี่ยนถ่ายเซลล์อย่างนุ่มนวล เครื่องลูกข่ายจะรับเฟรมของช่องสัญญาณทราฟฟิก จาก 2 หรือ 3 สถานี และบนช่องสัญญาณทราฟฟิกดังกล่าวนี้อาจจะมีความขัดแย้งกันเองในส่วนของบิต PCBs ในสถานการณ์เหล่านี้ ตัวเครื่องลูกข่ายจะกระทำตามกฎต่อไปนี้ ถ้าเพียงสถานีฐานใดสถานีหนึ่งมีคำสั่งให้ลดในกำลังลงมา เครื่องลูกข่ายก็จะลดกำลังลงมาและเครื่องลูกข่ายจะเพิ่มกำลังเมื่อสถานีฐานทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการทำการเปลี่ยนถ่ายเซลล์อย่างนุ่มนวล มีคำสั่งจากทุกสถานีฐานให้เพิ่มในกำลังเท่านั้น

2.4.3 การเปลี่ยนถ่ายเซลล์ (Handoff)

การเปลี่ยนถ่ายเซลล์นั้นเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ในการสื่อสารของโทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบบเซลล์ลูลาร์ เพราะว่าการเคลื่อนที่ของเครื่องลูกข่ายในเครือข่ายจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณภาพและขนาดของสัญญาณรบกวนที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับโครงข่าย ซึ่งบางครั้งการเคลื่อนที่นี้อาจจะเปลี่ยนสถานะที่ให้บริการอยู่เลยทีเดียว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้รู้จักกันในนามของการถ่ายโอน โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของการเปลี่ยนถ่ายเซลล์แบบนุ่มนวล เพื่อให้เข้าใจถึงข้อดี ข้อเสีย และการนำการเปลี่ยนถ่ายเซลล์แบบนุ่มนวลมาใช้งานในระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ

ในการนำการเปลี่ยนถ่ายเซลล์แบบนุ่มนวล(Soft Handoff) นั้น จะใช้เพื่อบ่งบอกให้แตกต่างไปจากการเปลี่ยนถ่ายเซลล์แบบรุนแรง (Hard Handoff) ซึ่งเป็นกระบวนการการเปลี่ยนถ่ายเซลล์แบบเก่า โดยในการเปลี่ยนถ่ายเซลล์แบบรุนแรงนั้น จะมีการตัดสินใจว่าจะทำการเปลี่ยนถ่ายเซลล์หรือไม่เท่านั้น ถ้าตัดสินใจทำการเปลี่ยนถ่ายเซลล์ กระบวนการการเปลี่ยนถ่ายเซลล์จะทำภายในระบบโดยที่ไม่มีการพยายามที่จะทำให้เครื่องลูกข่ายสามารถติดต่อกับสองสถานีได้พร้อมกัน สำหรับการนำการเปลี่ยนถ่ายเซลล์แบบนุ่มนวลนั้น การตัดสินใจว่าจะทำการเปลี่ยนถ่ายเซลล์หรือไม่นั้น จะเป็นการตัดสินใจแบบมีข้อแม้ที่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มของสัญญาณนำร่อง (Pilot Signal) จากสถานีฐานสองสถานีหรือมากกว่าที่รัยล้อมผู้ใช้นั้น ๆ อยู่

2.4.4 ความจุของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ

ความจุจริงของระบบนั้นขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัย เช่น การคิ่มอดูเลตของภาครับ ความถูกต้องของการควบคุมกำลังส่ง กำลังของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นจริง อันเนื่องมาจากผู้ใช้งานอื่นทั้งจากภายในเซลล์เดียวกัน และจากเซลล์อื่นข้างเคียง

ในการสื่อสารดิจิทัลนั้น ได้มีความสนใจในค่าของ E_b/N_0 หรือ พลังงานต่อบิตต่อความหนาแน่นกำลังของสัญญาณรบกวน โดย E_b/N_0 สามารถที่จะเรียกว่าเป็นอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio: SNR) โดยที่พลังงานต่อบิตจะเท่ากับกำลังของสัญญาณมอดูเลตเฉลี่ยในช่วงเวลาคาบของบิตดังสมการ

$$E_b = ST \quad (2.24)$$

เมื่อ S เป็นกำลังสัญญาณมอดูเลตเฉลี่ย และ T เป็นคาบเวลาของบิตของข้อมูล ซึ่งสามารถแทนค่าอัตราบิต R ได้ในสมการข้างต้นเป็น

$$E_b = \frac{S}{R} \quad (2.25)$$

เพราะฉะนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{RN_0} \quad (2.26)$$

ซึ่งเมื่อนำไปแสดงความสัมพันธ์กับความหนาแน่นกำลังของสัญญาณรบกวน N_0 กำลังของสัญญาณรบกวนทั้งหมด และแบนด์วิดท์ W ได้ดังสมการ

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S W}{N R} \quad (2.27)$$

จะได้ว่า $\frac{E_b}{N_0}$ นั้นจะสัมพันธ์กับอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน S/N ของการเชื่อมโยงและอัตราส่วนของแบนด์วิดท์ W ที่ใช้ส่ง และอัตราข้อมูล R หรืออัตราการขยายการประมวลผลของระบบ

เมื่อพิจารณาในส่วนของ การสื่อสารเชื่อมโยงจากกลับของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงส่วนที่จำกัดในเทอมของความจุ การสื่อสารเชื่อมโยงจากกลับนี้เป็นการเชื่อมโยงจากเครื่องลูกข่ายที่ติดต่อยังสถานีฐาน ถ้าสมมติให้ระบบนั้นเป็นการควบคุมกำลังส่งที่สมบูรณ์ก่อนในการพิจารณา ซึ่งหมายความว่ากำลังที่ถูกส่งจากเครื่องลูกข่ายทั้งหมดจะถูกควบคุมได้อย่างสมบูรณ์ที่ภาครับของสถานีฐาน โดยกำลังที่รับได้ของเครื่องลูกข่ายทั้งหมดจะมีค่าเท่ากัน ภายใต้สมมติฐานดังกล่าว ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของแต่ละผู้ใช้จะมีค่าเป็นดังสมการ

$$\frac{S}{N} = \frac{1}{K-1} \quad (2.28)$$

โดย K เป็นจำนวนของผู้ใช้ทั้งหมดในขณะนั้น และกำลังของสัญญาณรบกวนทั้งหมดในกลุ่มนี้จะเท่ากับผลรวมของกำลังจากแต่ละผู้ใช้นั้นเองโดยจะมีค่าเท่ากับ $K-1$ ซึ่งในรูปที่ 2.23 จะแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว จากสมการข้างบนจะไม่ได้คิดค่าของสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน เมื่อแทนสมการที่ (2.27) ในสมการที่ (2.28) จะได้

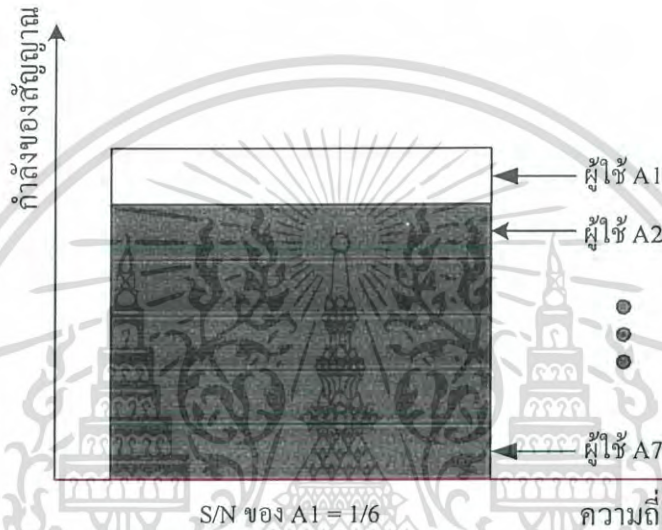
$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{K-1} \frac{W}{R} \quad (2.29)$$

จากสมการที่ (2.29) จะได้

$$K - 1 = \frac{(W/R)}{(E_b/N_0)} \quad (2.30)$$

เมื่อ K มีค่ามาก ๆ เพราะฉะนั้น

$$K \approx \frac{(W/R)}{(E_b/N_0)} \quad (2.31)$$



รูปที่ 2.23 กำลังของสัญญาณในระบบหลายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ

ผลของการโหลดคิง (Loading) ที่มีต่อความจุ

จากสมการที่(2.31) สามารถจะใช้เป็นแบบจำลองในการอธิบายความสามารถในการรองรับผู้ใช้ในเซลล์เดียว โดยเซลล์เดียวนี้อาจเป็นลักษณะรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omni-Directional) และไม่ได้คิดเซลล์ข้างเคียง และใช้การส่งเต็ม 100 % ของเวลา ในความเป็นจริงจะมีเซลล์อยู่หลายเซลล์มากในระบบของการสื่อสารส่วนบุคคลหรือระบบหลายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ เมื่อพิจารณาผลของผู้ใช้ในเซลล์อื่น แม้ว่าผู้ใช้จากเซลล์อื่นดังกล่าวเหล่านี้จะถูกควบคุมกำลังโดยเซลล์ของมันเอง แต่กำลังของสัญญาณจากผู้ใช้นี้ดังกล่าวก็ยังคงเกิดการแทรกสอดต่อเซลล์ข้างเคียง ดังนั้นเซลล์ข้างเคียงจะถูกโหลดโดยผู้ใช้จากเซลล์อื่น ๆ จากสมการที่ (2.29) จะสามารถแสดงผลของการถูกโหลดคิงได้เป็น

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{K-1} \frac{W}{R} \left(\frac{1}{1+\rho} \right) \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ρ เป็นแฟคเตอร์ของการโหลด โดยค่าของ ρ จะอยู่ในช่วง 0 – 100 % ตัวอย่างเช่น เมื่อแฟคเตอร์การโหลดคิงมีค่า 0.5 หมายความว่า มีการเพิ่มขึ้นของการแทรกสอดที่เกิดขึ้นที่เซลล์อ้างอิง 50 %

โดยส่วนกลับของแฟคเตอร์ $(1 + \rho)$ นั้น บางครั้งเรียกว่าเป็นแฟคเตอร์ของการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ (Frequency Reuse Factor) โดยจะมีค่าเป็น

$$F = \frac{1}{1 + \rho} \quad (2.33)$$

จะเห็นได้ว่าแฟคเตอร์ของการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่นั้นจะมีค่าอุดมคติเป็น 1 ในเซลล์เดียว ($\rho = 0$) ส่วนในแบบหลายเซลล์นั้นค่าของ ρ จะมีค่าเพิ่มขึ้น แล้วจะส่งผลให้ F มีค่าลดลงตามความสัมพันธ์ดังกล่าว

ผลของการโหลดคิง Sectorization ที่มีต่อความจุ

การแทรกสอดจากผู้รัยอื่นในเซลล์อื่นที่เกิดขึ้นที่เซลล์อ้างอิงสามารถจะถูกทำให้ลดลงได้ เมื่อเซลล์อ้างอิงดังกล่าวถูกทำการเซกเตอร์ แทนที่จะใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omni Directional Antenna) ซึ่งมีเพทเทิร์นของสายอากาศเป็น 360 องศา เซลล์อ้างอิงสามารถจะถูกแบ่งเป็น 3 เซกเตอร์ ดังนั้นแต่ละเซกเตอร์จะมีการรับสัญญาณ 120 องศา ในปรากฏการณ์นี้สายอากาศที่เซกเตอร์จะปฏิเสธการแทรกสอดจากผู้รัยอื่นที่ไม่ได้อยู่ในเพทเทิร์นของสายอากาศ การจัดดังกล่าวนี้จะลดผลของการโหลดคิงโดยแฟคเตอร์ประมาณค่าเท่ากับ 3 ถ้าเซลล์ที่ถูกแบ่งเซกเตอร์เป็น 6 เซกเตอร์จะส่งผลให้ผลของการโหลดคิงลดลงโดยแฟคเตอร์ ประมาณ 6 โดยแฟคเตอร์ดังกล่าวนี้จะถูกเรียกว่าเป็น Sectorization Gain S_G โดย

$$S_G = \frac{\int_0^{2\pi} I(\theta) d\theta}{\int_0^{2\pi} \left(\frac{G(\theta)}{G(0)} \right) I(\theta) d\theta} \quad (2.34)$$

โดย $G(\theta)$ เป็นเพทเทิร์นของสายอากาศแบบระนาบของสายอากาศเซกเตอร์ $G(0)$ เป็นอัตราขยายของสายอากาศสูงสุด ซึ่งสมมติให้เกิดขึ้นที่แนวตั้ง (Bore Sight, $\theta = 0$) และ $I(\theta)$ เป็นกำลังของการแทรกสอดที่รับได้จากผู้รัยในเซลล์อื่น โดยเป็นฟังก์ชันของ θ การอินทิเกรตในสมการข้างบนนั้นกระทำในช่วง 0 ถึง 360 องศา จากสมการที่ (2.34) สามารถคำนวณค่าอัตราขยายของเซกเตอร์ออกมาตรง ๆ นั้น ซึ่งขึ้นตรงกับอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้เช่นเดียวกับการแจก

แจงในระยะและระยะทางของผู้รัยที่เป็นการแทรกสอดจากเซลล์อื่น จะเห็นได้ว่าในสมการดังกล่าว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ได้พิจารณาในแพทเทิร์นทางแนวเส้นตรงขึ้นไป ในความเป็นจริง S_G นั้นมีค่าโดยทั่วไปเป็น 2.5 [1] สำหรับระบบที่มีการแบ่งเป็น 3 เซกเตอร์ และมีค่าเป็น 5 สำหรับระบบที่มีการแบ่งเป็น 6 เซกเตอร์ โดยสามารถปรับสมการโดยมีผลจากการเซกเตอร์ได้เป็น

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{K-1} \frac{W}{R} \left(\frac{1}{1+\rho} \right) S_G \quad (2.35)$$

ผลของอัตราการสิ้นเปลืองของเสียง (Voice Activities) ที่มีต่อความจุ

จากสมการ (2.35) จะสมมติให้ผู้ใช้งานส่งในเวลาเต็มที่ 100 % คือส่งตลอดเวลา แต่ในทางปฏิบัติตัวเข้ารหัสทางเสียงที่ระบบวอยแบนด์-ซีดีเอ็มเอใช้นั้น จะใช้เป็นอัตราที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งหมายความว่าอัตราของทางออกของตัวเข้ารหัสทางเสียงจะถูกปรับได้ให้สอดคล้องกับแพทเทิร์นในการพูดของผู้ใช้บริการ ตัวอย่างเช่น ถ้าผู้ใช้บริการไม่ได้พูดในช่วงของการสนทนาแล้ว อัตราการเข้ารหัสของตัวเข้ารหัสทางเสียงจะถูกทำให้ต่ำลง ซึ่งเป็นการป้องกันกำลังงานจากการส่งที่ไม่สำเร็จ ผลจากอัตราการเข้ารหัสทางเสียงที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้นี้ สามารถลดในกำลังงานที่ถูกส่งออกไปได้ และนั่นก็เป็นการลดลงของการแทรกสอดในทางสถิติของการพูดนั้น โดยทั่วไปการสนทนาจะเกิดขึ้นอยู่ในระหว่าง 40 % ถึง 50 % [1] ของเวลาทั้งหมด โดยการใช้การเข้ารหัสเสียงที่มีอัตราเปลี่ยนแปลงได้ ระบบจะสามารถลดกำลังของการแทรกสอดโดยแฟคเตอร์ของ Voice Activity นี้

ดังนั้นจึงมีการแสดงสมการที่มีการ Voice Activity เป็น

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{K-1} \frac{W}{R} \left(\frac{1}{1+\rho} \right) S_G \frac{1}{\alpha} \quad (2.36)$$

โดย α เป็นแฟคเตอร์ของ Voice Activity จะเห็นได้ว่าผลของ Voice Activity จะทำให้ส่วนของการแทรกสอดลดลง

เพราะฉะนั้นจะแสดงค่าของ K ได้เป็นดังสมการ

$$K = 1 + \frac{(W/R)}{(E_b/N_0)} \left(\frac{1}{1+\rho} \right) S_G \frac{1}{\alpha} \quad (2.37)$$

ซึ่งเมื่อ K มีค่ามาก ๆ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K \approx \frac{(W/R)}{(E_b/N_0)} \left(\frac{1}{1+\rho} \right) S_G \frac{1}{\alpha} \quad (2.38)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการพื้นฐานทราฟฟิกของระบบสายเบนด์-ซีดีเอ็มเอ

3.1 หลักการพื้นฐานของทราฟฟิกในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

ปัญหาในการให้บริการระบบโทรศัพท์คือ จะทำอย่างไรที่จะให้ระบบการให้บริการโทรศัพท์บริการที่ดีกับผู้ใช้บริการโดยใช้ต้นทุนที่เหมาะสม สิ่งที่ต้องพิจารณาถึงคือการพัฒนา ระบบให้มีความจุสูงสุดโดยการคำนึงถึงต้นทุนต่าง ๆ และสร้างระบบให้รองรับความต้องการ ตามที่ได้ประมาณเอาไว้ได้เทคนิคนี้เรียกว่า “วิศวกรรมทราฟฟิก” (Traffic Engineering) การใช้เทคนิคดังกล่าวจะอยู่บนพื้นฐานในหลักการของหลักความน่าจะเป็นและทฤษฎีการรอ (Queuing Theory)

วิศวกรรมทราฟฟิกจะแตกต่างกันที่ระบบแต่ละระบบนั้น จะจัดการกับความหนาแน่นของ ปริมาณทราฟฟิกอย่างไร ซึ่งมีวิธีการอยู่ 2 วิธีด้วยกัน อย่างแรกคือ ระบบการเรียกที่ไม่มีการรอคอย ซึ่งจะทำการตัดสายทิ้งโดยไม่ให้บริการ วิธีนี้เรียกว่า Block-Call-Cleared (BCC) อย่างที่สองคือ ระบบการเรียกที่มีการรอคอย ซึ่งจะทำการจัดคิวสายที่ใช้และให้บริการเมื่อสามารถทำได้ วิธีนี้ เรียกว่า Block-Call-Delay (BCD) ระบบเครือข่ายโทรศัพท์แบบ Circuit Switching ทั่วไปนั้น จะใช้ ระบบการเรียกที่ไม่มีการรอคอย เช่น เครือข่ายระบบโทรศัพท์ที่มีการใช้อย่างหนาแน่นจะใช้ สัญญาณสายไม่ว่างเป็นการปฏิเสธไม่ให้บริการ ในทางตรงข้ามเครือข่ายข้อมูลหลายเครือข่ายจะ ใช้ระบบการเรียกที่มีการรอคอย

ในสถานการณ์ใด ๆ ที่การรอรับบริการซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนในกระบวนการ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ความต้องการของผู้ใช้บริการในระบบซึ่งเรียกว่า “โหลดขอบริการ” (Offered Load) หรือความต้องการของผู้ใช้บริการ และสามารถอยู่ในรูปของการเรียกของโทรศัพท์ โหลดขอ บริการ จะถูกนิยามโดยสองกระบวนการที่เกิดขึ้นแบบสุ่มดังนี้ (1) อัตราการเข้ามาเฉลี่ยของผู้ใช้บริการที่ร้องขอรับบริการ λ (Average Arrival) และ (2) อัตราเฉลี่ยของระยะเวลาที่ผู้ใช้บริการ ต้องการใช้บริการ (Average Holding Time) HT

ระบบที่สมบูรณ์จะต้องไม่มีการรอคอย (Delay) ถ้าจำนวนผู้ใช้บริการ K ราย ต่อเชื่อมเข้า ระบบการทำระบบไม่มีการรอคอยจะต้องมีการเชื่อมต่อโดยตรงโดยใช้สูตร $K(K-1)/2$ ซึ่งเป็นไป ไม่ได้อย่างแน่นอน ดังนั้นระบบโทรศัพท์จึงได้รับการออกแบบเพื่อให้มีการรอคอยที่เหมาะสมใน ระหว่างช่วงทราฟฟิกเป็นปกติ และตัดสายในช่วงเวลาที่มีทราฟฟิกมาก

สำหรับระบบการให้บริการใด ๆ ก็ตามที่มีผู้บริการ (Servers) เพียงพอที่จะสามารถ ให้บริการผู้ใช้บริการได้ทันทีที่ร้องขอ ค่าเฉลี่ยจำนวนผู้บริการที่ไม่ว่างได้มาจากผลคูณของ λ

และ HT เสมอ โดยความสัมพันธ์นี้จะอิสระจากการเข้ามาและเวลาที่ให้บริการ (Holding Time) จากผลของการตั้งสมมุติฐาน Offered Load (a) (จำนวนสายที่ขอใช้บริการ) ถูกกำหนดจาก

$$a = \lambda \times HT \quad (3.1)$$

โดยทั่วไปค่าเฉลี่ยการเข้ามา และค่าเฉลี่ยเวลาที่ให้บริการนั้นจะแสดงหน่วยของเวลา ซึ่งจำนวนปริมาณจะแสดงในหน่วยของเออร์แลง (Erlang)

ตัวอย่างเช่น สมมติว่าผู้ใช้โทรศัพท์ทั้งหมด 200 ราย ทำให้เกิดการโทร 60 ครั้ง ระหว่างชั่วโมงใช้สูงสุด (Busy Hour) ค่าเฉลี่ยเวลาที่ให้บริการคือ 240 วินาที ดังนั้นค่าเฉลี่ยการได้รับบริการ (Arrival Rate) คือ

$$60/3600 = 1 \text{ request} / 60 \text{ วินาที}$$

เออร์แลงคำนวณได้จาก

$$\frac{60 \text{ calls}}{3600 \text{ second}} \times \frac{240 \text{ second}}{\text{call}} = 4 \text{ เออร์แลง}$$

นอกจากเออร์แลงแล้วระบบโทรศัพท์จะวัดค่าหน่วยเป็น CCS ต่อชั่วโมง (ปริมาณการใช้สายเป็นเวลา 100 วินาที) โดย CCS คำนวณจาก

$$CCS = NCBH \times HT / 100$$

$NCBH$ = จำนวนการโทรใน 1 ชั่วโมงที่ชั่วโมงใช้สูงสุด

HT = ค่าเฉลี่ยเวลาที่ให้บริการ

1 ชั่วโมง มี 3600 วินาที ดังนั้นกราฟฟิกขอบริการ (Traffic load) ที่ต่อเนื่องกันใน 1 ชั่วโมง จะมีค่าเท่ากับ 36 CCS หรือหนึ่งเออร์แลง โดยหน่วย CCS เป็นหน่วยที่ใช้ทั่วไปสำหรับการวัดกราฟฟิกของระบบโทรศัพท์ ซึ่งจากตัวอย่างปริมาณการใช้สายเป็นเวลา 100 วินาทีคือ

$$(60 \times 240) / 100 = 144 \text{ CCS}$$

กราฟฟิกต่อผู้โทร 1 ราย คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 เอร์แลง / 200 ราย = 0.02 เอร์แลง / ผู้โทร 1 ราย

หรือคิดเป็น

$144 / 200 = 0.72$ CCS / ผู้โทร 1 ราย

จากตัวอย่างจะเห็นว่า เป็นการหาค่าความจุเอร์แลงของการบริการทางเสียง สำหรับการหาค่าความจุเอร์แลงของการบริการเว็ดยุคเว็บในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้น เมื่อผู้ใช้บริการเว็ดยุคเว็บต้องการจะดาวน์โหลดเว็บเพจจะส่งข้อมูล Page Request มายังสถานีฐาน จากนั้นสถานีฐานจะส่งข้อมูลนี้ต่อไปยังเซิร์ฟเวอร์จึงจะสามารถดาวน์โหลดเว็บเพจได้ ในระหว่างดาวน์โหลดเว็บเพจนั้นผู้ใช้บริการจะสามารถส่งข้อมูล Page Request เพื่อดาวน์โหลดเว็บเพจอื่น ๆ ได้อีก ดังนั้นเมื่อจำนวนผู้ใช้บริการเว็ดยุคเว็บเพิ่มมากขึ้นจำนวน Page Request ก็จะมีจำนวนมากขึ้นด้วยเช่นกัน การเพิ่มของ Page Request มายังสถานีฐานจะใช้การกระจายแบบปัวส์ซอง ในการคำนวณหาค่าอัตราการเข้ามาเฉลี่ยของ Page Request นั้นจะหาได้จาก [3]

$$\lambda_p = \lambda_w K_p \quad (3.2)$$

โดยที่ λ_w = อัตราการเข้ามาเฉลี่ยของผู้ใช้บริการ WWW
 K_p = จำนวนเฉลี่ยของ Page Request ต่อเซสชัน (Session)

ทุก Page Request กำหนดให้มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 2600 ไบต์ สำหรับเวลาเฉลี่ยในการส่ง Page Request นั้นจะเป็น

$$\frac{1}{\mu_p} = \frac{8P_{req}}{R_p} \quad (3.3)$$

โดยที่ P_{req} คือ จำนวนไบต์เฉลี่ยของ Page Request
 R_p คือ อัตราการส่งข้อมูลของ Page Request

ดังนั้นจะได้ $(\lambda\mu)_p$ คือ ค่าความจุเอร์แลงของการบริการเว็ดยุคเว็บ ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ จากการเชื่อมโยงของเครื่องลูกข่ายไปยังสถานีฐาน

3.2 ระดับการบริการ (Grade of Service)

อัตราการติดขัด และความน่าจะเป็นของการติดขัดนั้นจะมีลักษณะที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งอัตราการติดขัดหาได้จากการคำนวณปริมาณซึ่งเกิดขึ้นที่สถานีฐาน ในส่วนของความน่าจะเป็นของการติดขัดเป็นความน่าจะเป็นที่การเรียกเกิดการบล็อกเนื่องจากช่องสัญญาณไม่ว่าง โดยจะขึ้นอยู่กับโหลดขอบริการและจำนวนของช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณหาความน่าจะเป็นของการติดขัด ดังนั้นระดับการบริการ สามารถพิจารณาได้จากทอมของความน่าจะเป็นของการติดขัด

ความน่าจะเป็นของการติดขัดที่เกิดจากโหลดขอบริการในระหว่างชั่วโมงใช้โทรศัพท์สูงสุด ซึ่งเกิดขึ้นจากโหลดให้บริการ (Carried Load) สูงสุดในระหว่างหนึ่งชั่วโมงซึ่งเกิดขึ้นที่สถานีฐาน ดังนั้นการกำหนดช่องสัญญาณสำหรับชั่วโมงใช้สูงสุดจะต้องให้อัตราการติดขัดที่ต้องการในระหว่างเวลาที่ใช้สูงสุดสัมพันธ์กับในระหว่างเวลาที่ใช้ต่ำสุด

เออร์แลง-บี และเออร์แลง-ซีเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด โหลดขอบริการและจำนวนของช่องสัญญาณ

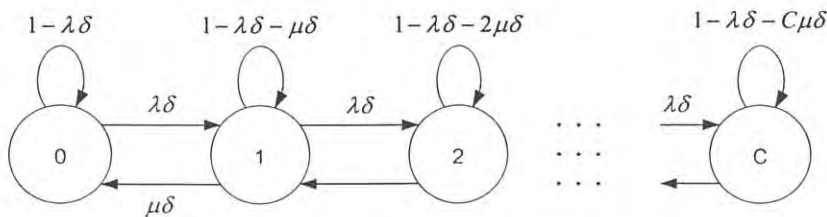
3.2.1 เออร์แลง-บี (Erlang-B)

ในรูปแบบของเออร์แลง-บี โดยกำหนดให้ความน่าจะเป็นของการเรียกจะถูกบล็อก (Blocked) และใช้วัฏระดับของการให้บริการของระบบโดยที่การเรียกที่ถูกบล็อกจะไม่มี การรอเข้าคิว (Block-Call-Cleared) ซึ่งมีเงื่อนไขดังนี้

- การเรียกจะเป็นแบบ ไม่มีความจำ ทุก ๆ ผู้ใช้บริการ และผู้ให้บริการที่ถูกบล็อกจะสามารถเรียกขอใช้ช่องสัญญาณได้ตลอดเวลา
- ทุกช่องสัญญาณที่ว่างสามารถให้บริการได้ทุกช่องสัญญาณ
- ความน่าจะเป็นของการใช้ช่องสัญญาณหรือเวลาในการบริการจะมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential)
- ช่องสัญญาณที่สามารถให้บริการได้มีจำนวนจำกัด
- ทราฟฟิกที่ต้องการอธิบายโดยความสัมพันธ์ของการเข้าใช้บริการที่มีการแจกแจงแบบปัวส์ซงและระยะเวลาในการใช้บริการที่เป็นการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล
- ระยะเวลาของการใช้ช่องสัญญาณของผู้ใช้งานจะเป็นอิสระต่อกัน

เมื่อพิจารณาเออร์แลง-บีในระบบของการเข้าคิวจะเป็นระบบคิวแบบ $M/M/C/C$ โดยที่ M ตัวแรกจะหมายถึงการเรียกเข้าซึ่งมีลักษณะการแจกแจงปัวส์ซง M ตัวที่สองจะหมายถึงอัตราการบริการซึ่งมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล C ตัวแรกหมายถึงจำนวนของช่องสัญญาณที่สามารถให้บริการได้ C ตัวที่สองหมายถึงจำนวนสูงสุดของการให้บริการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 สถานะของห่วงโซ่-Markov สำหรับเออร์แลง-บี

จากรูปที่ 3.1 จะเป็นห่วงโซ่ของ Markov (Markov Chain) ซึ่งสามารถใช้อธิบายเออร์แลง-บีได้ โดยพิจารณาสถานะให้อยู่ในรูปแบบของกระบวนการสุ่ม $\{X_n | n = 0, 1, 2, \dots\}$ ดังนั้นสถานะของกระบวนการที่จะเป็นไปได้คือ $i = 0, 1, 2, \dots$ และถ้ามีการเปลี่ยนสถานะจาก i ไปเป็น $i+1$ โดยที่สถานะ $i+1$ จะขึ้นอยู่กับสถานะ i และจะไม่ขึ้นอยู่กับสถานะก่อนหน้านี้นี้ เมื่อพิจารณาช่วงเวลาสั้น ๆ δ ถ้า N_k คือจำนวนการเรียกที่เวลา $k\delta$ จะได้

$$N_k = N(k\delta) \quad (3.4)$$

โดยที่ N คือจำนวนช่องสัญญาณที่ถูกใช้งานซึ่งได้จากกระบวนการสุ่มแบบดิสครีต (Discrete Random Process) และ N_k เป็น Discrete Time Markov Chain ด้วยความน่าจะเป็นที่สถานะคงตัวโดยลำดับของสถานะเป็น $0, 1, 2, \dots, C$

โดยลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของ $P_{i,j}$ คือ

$$P_{i,j} = P_r \{N_{k+1} = j | N_k = i\} \quad (3.5)$$

$$P_{00} = 1 - \lambda\delta + o(\delta) \quad (3.6)$$

$$P_{ii} = 1 - \lambda\delta - \mu\delta + o(\delta) \quad , i \geq 1 \quad (3.7)$$

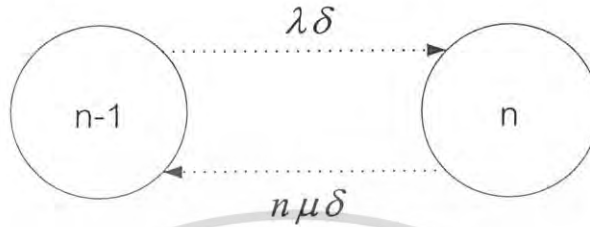
$$P_{i,i+1} = \lambda\delta + o(\delta) \quad , i \geq 0 \quad (3.8)$$

$$P_{i,i-1} = \mu\delta + o(\delta) \quad , i \geq 1 \quad (3.9)$$

$$P_{i,j} = o(\delta) \quad , j \neq i, j \neq i+1, j \neq i-1 \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.1 จะได้ว่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะจากสถานะ 0 ไปเป็นสถานะ 1 เป็น $\lambda\delta$ และในทำนองเดียวกันความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะจากสถานะ 1 กลับไปเป็น 0 จะเป็น $\mu\delta$ และความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะที่ยังคงเป็นสถานะ 1 เหมือนเดิมคือ $1 - \lambda\delta - \mu\delta$ และความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะทั้งหมดมีค่ารวมกันเท่ากับ 1



รูปที่ 3.2 สถานะของห่วงโซ่-Markov สำหรับเออร์แลง-บี ที่สภาวะคงตัว

เมื่อพิจารณาระยะเวลานานพอ ระบบจะอยู่ในสถานะคงตัว (Steady State) และมีจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ n ดังในรูปที่ 3.2 ความน่าจะเป็นของสถานะ n จะมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนสถานะไปเป็นสถานะ $n-1$ จะได้

$$\lambda\delta P_{n-1} = n\mu\delta P_n, n \leq C \quad (3.11)$$

จากสมการที่ (3.11) จะเป็น Global Balance Equation [8] และจาก

$$\sum_{n=0}^C P_n = 1 \quad (3.12)$$

$$\lambda\delta P_{n-1} = P_n n\mu\delta, n = 1, 2, 3, \dots, C \quad (3.13)$$

$$\lambda P_{n-1} = P_n n\mu \quad (3.14)$$

$$P_1 = \frac{\lambda P_0}{\mu} \quad (3.15)$$

จากสมการที่ (3.13) จะได้ว่าความน่าจะเป็นที่สถานะ n ใดๆ เป็น

$$P_n = P_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \frac{1}{n!} \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$P_0 = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_n, n! = 1 - \sum_{i=1}^c P_i \quad (3.17)$$

แทนค่าสมการ

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^c \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \frac{1}{n!}} \quad (3.18)$$

จากสมการที่ (3.16) ความน่าจะเป็นของการติดขัด สำหรับจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ C

$$P_c = P_0 \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c \frac{1}{C!} \quad (3.19)$$

แทนค่าสมการที่ (3.18) ลงในสมการที่ (3.19) จะได้

$$P_c = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c \frac{1}{C!}}{\sum_{n=0}^c \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \frac{1}{n!}} \quad (3.20)$$

3.2.2 เออร์แลง-ซี (Erlang-C)

ในรูปแบบของเออร์แลง-ซี จะกำหนดให้ผู้ใช้ที่ถูกบล็อก เกิดการรอคอยในกรณีที่มีผู้ใช้บริการช่องสัญญาณจนเต็ม โดยความน่าจะเป็นของการรอคอยจะเป็น [1]

$$P_r[\text{call delayed}] = \frac{A^C}{A^C + C! \left(1 - \frac{A}{C}\right) \sum_{k=0}^{C-1} \frac{A^k}{k!}} \quad (3.21)$$

เมื่อไม่มีช่องสัญญาณใคว่างพอที่จะใช้งานได้ การเรียกจะถูกจัดให้รอคอยอยู่ในระบบคิว ความน่าจะเป็นที่การเรียกที่ต้องรอคอยในคิวในเวลาที่มากกว่า t วินาที คือ

$$P_r[\text{wait} > t | \text{delayed}] = e^{-\frac{(C-A)t}{H}} \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

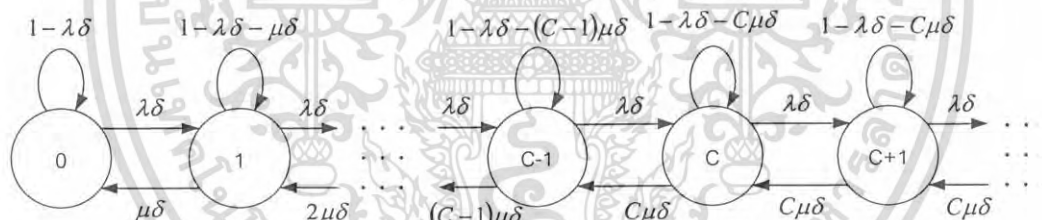
โดยที่ C คือจำนวนของช่องสัญญาณทั้งหมดที่สามารถใช้งานได้ τ คือเวลารอคอยที่สนใจ และ H คือค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาของการเรียก ความน่าจะเป็นของทุกการเรียกที่เข้ามาต้องรอคอยในคิวเป็นเวลาที่ยาวกว่า τ วินาทีเป็น

$$\begin{aligned} P_r[\text{wait} > t] &= P_r[\text{call delayed}]P_r[\text{wait} > t | \text{delayed}] \\ &= P_r[\text{call delayed}]e^{-\frac{(C-A)t}{H}} \end{aligned} \quad (3.23)$$

ค่าเฉลี่ย D ในการรอคอยในคิวของระบบจะเป็น

$$D = \int_0^{\infty} P_r[\text{call delayed}]e^{-\frac{(C-A)t}{H}} dt \quad (3.24)$$

$$D = P_r[\text{call delayed}]\frac{H}{(C-A)} \quad (3.25)$$



รูปที่ 3.3 สถานะของห่วงโซ่-Markov สำหรับเออร์แลง-ซี

เออร์แลง-ซีสามารถที่จะอธิบายได้ในระบบคิวแบบ $M/M/C/D$ โดย C คือจำนวนสูงสุดของผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้พร้อมกัน D คือจำนวนของการเรียกที่อยู่ในระบบการรอคิว เมื่อสมมติให้ D มีค่าเป็นอนันต์ระบบคิวจะเป็นแบบ $M/M/C/\infty$ หรือในรูปแบบทั่วไปคือ $M/M/C$ ถ้า D เป็นอนันต์ ดังนั้น P_k คือความน่าจะเป็นของสถานะ k ที่สภาวะคงตัว

$$P_k = \lim_{k \rightarrow \infty} P_r\{N_t = k\} \quad (3.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ N_t คือจำนวนของการเรียกหรือการรอคอยทั้งหมดในระบบที่เวลา t ที่สภาวะคงตัวความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะจาก k ไปเป็นสถานะ $k-1$ จะมีค่าเท่ากับค่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะจาก $k-1$ ไปเป็นสถานะ k และจากรูปที่ 3.3

$$\lambda \delta P_{k-1} = k \mu \delta P_k, k \leq C \quad (3.27)$$

โดยที่

$$P_k = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right) \frac{1}{k} P_{k-1}, k \leq C \quad (3.28)$$

และ

$$\lambda \delta P_{k-1} = C \mu \delta P_k, k \leq C \quad (3.29)$$

$$P_k = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right) \frac{1}{C} P_{k-1}, k \geq C \quad (3.30)$$

$$P_k = \begin{cases} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!} P_0, & k \leq C \\ \frac{1}{C!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{C^{k-C}} P_0, & k \geq C \end{cases} \quad (3.31)$$

ในเมื่อ $\sum_{k=0}^{\infty} P_k = 1$ จะได้

$$P_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right) + \dots + \frac{1}{C!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{C+1} \frac{1}{C^{(C+1)-C}} + \dots \right] = 1 \quad (3.32)$$

$$P_0 \left[1 + \sum_{k=1}^{C-1} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!} + \sum_{k=C}^{\infty} \frac{1}{C!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{C^{k-C}} \right] = 1 \quad (3.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=1}^{C-1} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!} + \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^C \frac{1}{\left(1 - \frac{\lambda}{\mu C}\right)}} \quad (3.34)$$

ความน่าจะเป็นของการเรียกเข้ามาเมื่อทุกช่องสัญญาณ C ถูกใช้งานจนเต็ม ซึ่งการเรียกในครั้งนี้จะต้องเข้าระบบการรอคิวจะเป็น

$$\begin{aligned} P_r[C \text{ ch. are busy}] &= \sum_{k=C}^{\infty} P_k = \sum_{k=C}^{\infty} \frac{1}{C!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{C^{k-C}} P_0 \\ &= P_0 \frac{1}{C!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^C \sum_{k=C}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{k-C} \frac{1}{C^{k-C}} \\ &= P_0 \frac{1}{C!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^C \frac{1}{\left(1 - \frac{\lambda}{\mu C}\right)} \end{aligned} \quad (3.35)$$

สำหรับสมการ (3.35) จะใช้ได้สำหรับ $\frac{\lambda}{\mu C} < 1$ ซึ่ง P_0 เป็นไปตามสมการ (3.34)

$$\begin{aligned} P_r[C \text{ ch. are busy}] &= \frac{\frac{1}{C!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^C}{\left(1 - \frac{\lambda}{\mu C}\right) \left[\sum_{k=0}^{C-1} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!} + \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^C \frac{1}{\left(1 - \frac{\lambda}{\mu C}\right)} \right]} \\ &= \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^C}{\left[\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^C + C! \left(1 - \frac{\lambda}{\mu C}\right) \sum_{k=0}^{C-1} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \left(\frac{1}{k!}\right) \right]} \end{aligned} \quad (3.36)$$

3.3 ความจุเออร์แลงของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ

ในหัวข้อนี้อธิบายหลักการพื้นฐานในการหาค่าความจุเออร์แลงของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ และการวิเคราะห์ความจุเออร์แลงในแบบเดิม [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพิจารณาการเชื่อมโยงจากกลับของระบบวาย์แบนด์-ซีดีเอ็มเอ ซึ่งเป็นส่วนของการเชื่อมโยงที่จำกัดความจุของระบบ การคิดขีดจะถูกนิยามว่าเกิดขึ้นเมื่อการสะสมทั้งหมดของผู้ใช้บริการทั้งภายในเซกเตอร์หรือเซลล์และเซลล์อื่น ๆ นำเข้าไปสู่ปริมาณของความหนาแน่นของการแทรกสอด I_0 ที่มากกว่าระดับของสัญญาณรบกวนพื้นฐาน โดยปริมาณของ $1/\eta$ เริ่มมีค่าเป็น 10 dB ถ้าเป็นไปตามข้อสมมติฐานดังนี้

1. จำนวนของผู้ใช้บริการ K ในเซกเตอร์มีค่าคงที่
2. ผู้ใช้บริการในแต่ละรายได้ถูกควบคุมกำลังส่งแบบสมบูรณ์
3. ผู้ใช้บริการในแต่ละรายต้องการค่าของ E_b/I_0 ค่าเดียวกัน

ดังนั้นสัญญาณแทรกสอดทั้งหมดจะหาได้จาก

$$\text{สัญญาณแทรกสอดทั้งหมด} = \text{สัญญาณแทรกสอดภายในเซลล์} + \text{สัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง} + \text{สัญญาณรบกวนเชิงความร้อน} \quad (3.37)$$

ในเทอมของพารามิเตอร์วาย์แบนด์-ซีดีเอ็มเอจะได้

$$I_{total} = K(E_b R) + fK(E_b R) + N_t \quad (3.38)$$

เมื่อ K = จำนวนผู้ให้บริการในเซกเตอร์เดียวกัน
 E_b = พลังงานต่อบิตของสัญญาณ
 R = อัตราบิตข้อมูล
 N_t = กำลังของสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (Thermal noise)
 f = อัตราส่วนของการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงต่อการแทรกสอดภายในเซลล์ของเซกเตอร์นั้น

ดังนั้นจากสมการที่ (3.38) สามารถเขียนได้เป็น

$$I_{total} = KE_b R(1 + f) + N_t \quad (3.39)$$

โดยที่เงื่อนไขของการไม่คิดขีดจะเป็น

$$I_0 W \geq KE_b R(1 + f) + N_t W \quad (3.40)$$

ซึ่งจะเป็นไปตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K \leq \left(\frac{W/R}{E_b/I_o} \right) \frac{(1-\eta)}{(1+f)} \quad (3.41)$$

โดยที่ $\eta = N_t/I_o = 0.1$

ในความเป็นจริงข้อสมมติฐานดังที่กล่าวไว้ข้างต้นนั้นจะไม่เป็นจริงเนื่องจาก

1. จำนวนของการเรียกจะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปัวส์ซองด้วยค่าเฉลี่ย $(\lambda\mu)_v$
2. เนื่องจากค่า Voice Activity ผู้ใช้บริการแต่ละรายจะเข้ามาที่ระบบด้วยความน่าจะเป็น v และออกจากระบบด้วยความน่าจะเป็น $(1-v)$
3. ผู้ใช้บริการในแต่ละรายจะมีความต้องการ E_b/I_o ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าตามสภาวะของสภาพแวดล้อมในการเคลื่อนที่เพื่อที่จะยังคงให้อัตราความผิดพลาดต่อเฟรมที่ยอมรับได้

ดังนั้นจากสมมติฐานทั้งสามข้อนี้จะได้เงื่อนไขของการไม่ติดขัดเป็น

$$I_o W \geq \sum_{i=1}^K \alpha_i E_{bi} R + \sum_j \sum_{i=1}^K \alpha_i(j) E_{bi}(j) R + N_t W \quad (3.42)$$

เมื่อ K เป็นจำนวนผู้ใช้บริการต่อเซกเตอร์ ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปัวส์ซองที่มีค่าเฉลี่ย $(\lambda\mu)_v$ และ α เป็นตัวแปรสุ่มแบบไบเนรีที่มีค่า 0 กับ 1 ซึ่งแสดงถึง Voice Activity ด้วย

$$P(\alpha=1) = \rho$$

ดังนั้นจะได้สมการของเงื่อนไขการไม่ติดขัดเป็น

$$Z = \sum_{i=1}^k \alpha_i \varepsilon_i + \sum_j \sum_{i=1}^k \alpha_i(j) \varepsilon_i(j) \leq \frac{W}{R} (1-\eta) \quad (3.43)$$

เพราะฉะนั้นความน่าจะเป็นของการติดขัดสำหรับระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอจะเป็น

$$P_{outage} = P[Z > W/R(1-\eta)] \quad (3.44)$$

จากสมการที่ (3.44) สามารถที่จะประมาณค่าที่แสดงในเทอมของ $(\lambda\mu)_v$ ซึ่งการประมาณค่าแบบนี้จะกำหนดโดย

$$\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)_v = \frac{(W/R)(1-\eta)}{(E_b/I_o)\alpha(1+f)} F(B, \sigma) \quad (3.45)$$

เมื่อ α = อัตราการเลื่อนไหลของเสียง (Voice Activity)

$$F(B, \sigma) = \frac{1}{Y} \left[1 + \frac{Y^3 B}{2} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4}{Y^3 B}} \right) \right] \text{ ที่ซึ่ง}$$

$$Y = \exp(\beta^2 \sigma^2 / 2)$$

$$\beta = \ln(10) / 10$$

σ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการควบคุมกำลัง

$$B = \frac{(E_b / I_o) [Q^{-1}(P_{outage})]^2}{(W/R)(1-\eta)}$$

การวิเคราะห์แบบเดิมนั้น [3] เนื่องจากการวิเคราะห์ในระบบเซลล์เดียวที่พิจารณาการรวมจำนวนผู้ใช้บริการเสียงและเว็บเพจเข้าด้วยกัน เพราะฉะนั้นกำลังที่รับได้ทั้งหมดที่สถานีฐานจะเป็น

$$P_{total} = \sum_{i=1}^{K_1^v} \alpha P_{i_1}^v + \sum_{i=1}^{K_1^w} P_{i_1}^w + N_f W \quad (3.46)$$

โดยที่

$P_{i_1}^v$ = กำลังของสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายที่ใช้บริการเสียง

$P_{i_1}^w$ = กำลังของสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายที่ใช้บริการ WWW

α = อัตราการเลื่อนไหลของเสียง (Voice Activity)

เมื่อพิจารณากำลังของสัญญาณรบกวนแทรกสอดที่เกิดขึ้นที่สถานีฐาน ในช่วงการเชื่อมโยงขากลับ (Reverse Link) ในระบบเซลล์เดียวนั้น กำลังของสัญญาณแทรกสอดทั้งหมดจะเกิดจาก [3]

$$P_{total} = \sum_{i=1}^{K_1^v} \alpha E_{i_1}^v R_v + \sum_{i=1}^{K_1^w} E_{i_1}^w R_w + N_f W \quad (3.47)$$

โดยที่

$E_{i_1}^v$ = พลังงานต่อบิตของผู้ใช้บริการเสียง

$E_{i_1}^w$ = พลังงานต่อบิตของผู้ใช้บริการเว็บเพจ

R = อัตราบิตข้อมูลของผู้ใช้บริการเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_w = อัตราบิตข้อมูลของผู้ใช้บริการ WWW

I_0 = ความหนาแน่นของสัญญาณแทรกสอดสูงสุดที่ยอมรับได้

N_t = กำลังของสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน

W = สเปกตรัมแบนด์วิดท์

K_v^v = เป็นจำนวนผู้ใช้บริการเสียง ซึ่งจะเป็นตัวแปรสุ่มแบบปัวส์ซองด้วยค่าเฉลี่ย $(\lambda\mu)_v$

K_v^w = เป็นจำนวนผู้ใช้บริการเว็บเพจ ซึ่งจะเป็นตัวแปรสุ่มแบบปัวส์ซองด้วยค่าเฉลี่ย $(\lambda\mu)_p$

ซึ่งจากสมการ (3.47) เมื่อพิจารณาในเหตุการณ์ที่ระบบไม่เกิดการสูญหาย จะได้ดังสมการ

$$\sum_{i=1}^{K_v^v} \alpha E_{i_1}^v R_v + \sum_{i=1}^{K_v^w} E_{i_1}^w R_w + N_t W \leq I_0 W \quad (3.48)$$

จากสมการที่ (3.48) จะนิยามให้ตัวแปรสุ่ม Z เป็นผลรวมของกำลังของสัญญาณแทรกสอด ดังนั้นจะได้

$$Z = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^{K_v^v} \alpha \varepsilon_{i_1}^v + \frac{1}{G} \sum_{i=1}^{K_v^w} \varepsilon_{i_1}^w \leq (1 - \eta) \quad (3.49)$$

โดยที่

G = ค่าอัตราการขยายการประมวลผลของการกระจายสเปกตรัม (W/R)

ε_i = อัตราส่วนของพลังงานต่อบิตต่อกำลังของสัญญาณแทรกสอด (E_i/I_0)

η = อัตราส่วนของสัญญาณรบกวนต่อกำลังของสัญญาณแทรกสอด (N_t/I_0)

เมื่อความน่าจะเป็นของการสูญหายคือ ความน่าจะเป็นที่กำลังของสัญญาณรบกวนแทรกสอดที่เกิดขึ้นทั้งหมดซึ่งนิยามเป็นตัวแปรสุ่ม Z มีค่ามากกว่าจุดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) จากสถานการณ์ดังกล่าวจะส่งผลให้ผู้ให้บริการรายใหม่ที่จะเข้ามาร้องขอใช้ช่องสัญญาณในระบบจะถูกปฏิเสธจากระบบ ซึ่งสามารถแสดงความน่าจะเป็นดังกล่าวได้ดังสมการ

$$P_{outage} = P_r [Z > Z_o = (1 - \eta)] \quad (3.50)$$

เมื่อ Z_o เป็นค่าจุดเริ่มเปลี่ยน มีค่าเป็น $(1 - \eta)$

จากสมการที่ (3.50) หาค่าเฉลี่ย $E[Z]$ และค่าความแปรปรวน $Var(Z)$ ได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E[Z] = \frac{1}{G_v} \sum_{i_1=1}^{K_1^v} \alpha E[\varepsilon_{i_1}^v] + \frac{1}{G_w} \sum_{i_1=1}^{K_1^w} E[\varepsilon_{i_1}^w] \quad (3.51)$$

$$\text{Var}(Z) = \frac{1}{G_v^2} \sum_{i_1=1}^{K_1^v} \alpha \text{Var}(\varepsilon_{i_1}^v) + \frac{1}{G_w^2} \sum_{i_1=1}^{K_1^w} \text{Var}(\varepsilon_{i_1}^w) \quad (3.52)$$

เนื่องจาก K_1^v และ K_1^w เป็นจำนวนผู้ใช้บริการเสียงและเว็บเพจนี้ เป็นตัวแปรสุ่มแบบปัวส์ซงซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็น $(\lambda\mu)_v$ และ $(\lambda\mu)_p$ ตามลำดับ ดังนั้นจะได้

$$E[Z] = \frac{\alpha}{G_v} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)_v E[\varepsilon_{i_1}^v] + \frac{1}{G_w} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)_p E[\varepsilon_{i_1}^w] \quad (3.53)$$

$$\text{Var}(Z) = \frac{\alpha}{G_v^2} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)_v \text{Var}(\varepsilon_{i_1}^v) + \frac{1}{G_w^2} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)_p \text{Var}(\varepsilon_{i_1}^w) \quad (3.54)$$

เมื่อให้ ε_i มีหน่วยเป็น dB จะทำให้มีการแจกแจงแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ย m และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ เป็น [1, 2]

$$\varepsilon_i(\text{dB}) = 10 \log_{10} \varepsilon_i \quad (3.55)$$

ดังนั้นเมื่อ $\varepsilon_i = \varepsilon_{i_1}^v = \varepsilon_{i_1}^w$ เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบล็อกนอร์มอลด้วยค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนเป็น

$$E[\varepsilon_i] = \exp[(\beta\sigma)^2/2] \exp(\beta m) \quad (3.56)$$

$$\text{Var}(\varepsilon_i) = \exp[2(\beta\sigma)^2] \exp(2\beta m) \quad (3.57)$$

เนื่องจากตัวแปรสุ่ม Z นี้เป็นผลรวมของกำลังของสัญญาณแทรกสอด เมื่อนำทฤษฎีเข้าสู่ศูนย์กลาง (Central Limit Theorem) มาใช้ ตัวแปรสุ่ม Z ที่ได้จะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเกาส์ ดังนั้นความน่าจะเป็นของการสูญหายที่เกิดสัญญาณแทรกสอดจะเป็น

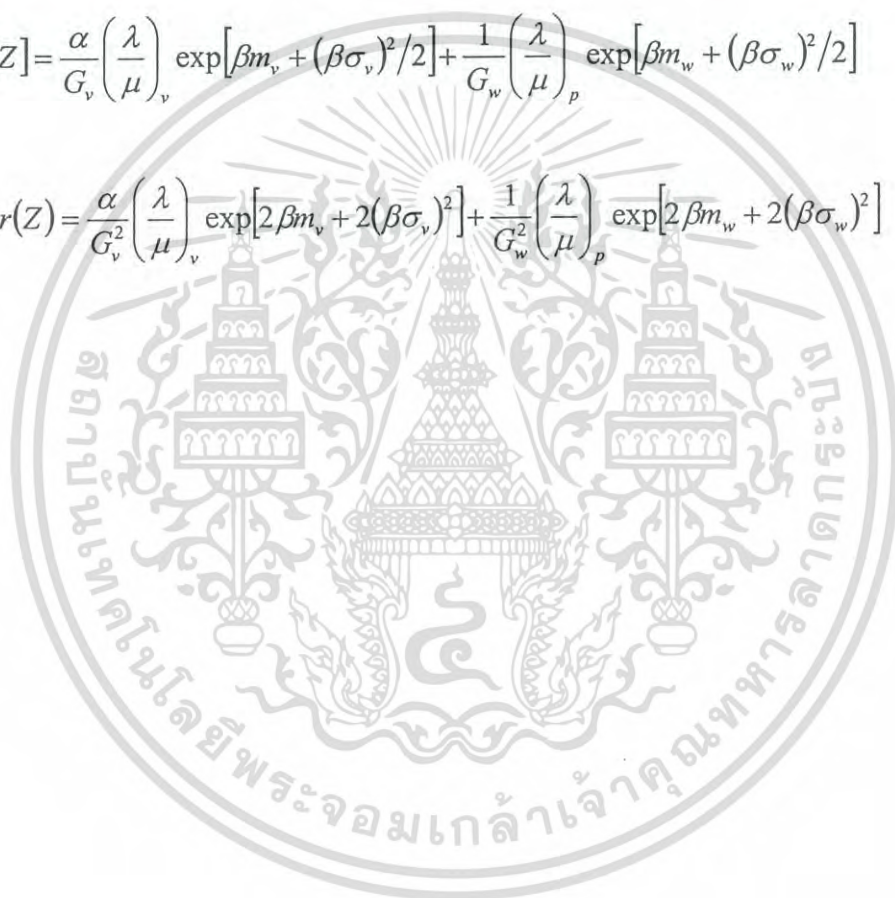
$$P_{\text{outage}} \approx Q\left(\frac{Z_o - E(Z)}{\sqrt{\text{Var}(Z)}}\right) \quad (3.58)$$

โดยที่ $Q(x) = 0.5 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)$

เมื่อ Z เป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์สามารถหาค่าเฉลี่ย $E[Z]$ และค่าความแปรปรวน $\text{Var}(Z)$ ได้จาก

$$E[Z] = \frac{\alpha}{G_v} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)_v \exp[\beta m_v + (\beta \sigma_v)^2 / 2] + \frac{1}{G_w} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)_p \exp[\beta m_w + (\beta \sigma_w)^2 / 2] \quad (3.59)$$

$$\text{Var}(Z) = \frac{\alpha}{G_v^2} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)_v \exp[2\beta m_v + 2(\beta \sigma_v)^2] + \frac{1}{G_w^2} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)_p \exp[2\beta m_w + 2(\beta \sigma_w)^2] \quad (3.60)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การวิเคราะห์ความจุเออร์แลงของระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ

4.1 แบบจำลองระบบ

การวิเคราะห์นี้จะใช้รูปแบบการแบ่งเซลล์ข้างเคียงออกเป็นสองวง ซึ่งเซลล์ที่อยู่รอบ ๆ เซลล์ศูนย์กลาง (เซลล์ที่ 1) ที่ทำการวิเคราะห์จะมีผลต่อความจุของเซลล์ศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าเซลล์ข้างเคียงวงที่ 1 นั้นจะประกอบไปด้วยเซลล์ที่ 2 ถึงเซลล์ที่ 7 และเซลล์ข้างเคียงวงที่ 2 นั้นจะประกอบไปด้วยเซลล์ที่ 8 ถึงเซลล์ที่ 19 ซึ่งในการวิเคราะห์จะแสดงให้เห็นว่าผลกระทบดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับปริมาณ โทลด์และความใกล้เคียงของเซลล์ข้างเคียง



รูปที่ 4.1 รูปแบบของเซลล์ที่ทำการวิเคราะห์

เนื่องจากระบบที่พิจารณานั้นจะเป็นการรวมจำนวนผู้ใช้บริการเสียงและ WWW ซึ่งการบริการของแต่ละชนิดนั้นต้องการคุณภาพของการบริการที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณากำลังของสัญญาณแทรกสอดทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่สถานีฐานในช่วงการเชื่อมโยงขากลับ (Reverse Link) ในระบบหลายเซลล์นั้น จะสามารถหาได้ตามสมการ

$$P_{total} = \left[\sum_{i_1=1}^{K_1^v} \alpha_{i_1}^v P_{i_1}^v + \sum_{i_1=1}^{K_1^w} P_{i_1}^w \right] + \left[\sum_j \sum_{i_j=1}^{K_j^v} \alpha_{i_j}^v P_{i_j}^v + \sum_j \sum_{i_j=1}^{K_j^w} P_{i_j}^w \right] + N_t W \quad (4.1)$$

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$P_{i_1}^v$ และ $P_{i_1}^w$ = กำลังของสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายที่ใช้บริการเสียงและ WWW ใน
เซลล์ที่ 1

$P_{i_j}^v$ และ $P_{i_j}^w$ = กำลังของสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายที่ใช้บริการเสียงและ WWW ใน
เซลล์ที่ j

$\alpha_{i_1}^v$ และ $\alpha_{i_1}^w$ = อัตราการเลื่อนไหลของเสียง (Voice Activity) ของผู้ใช้บริการเสียงใน
เซลล์ที่ 1 และเซลล์ที่ j

4.2 ค่าความน่าจะเป็นของการสูญหาย (Outage Probability)

กำลังของสัญญาณแทรกสอดทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่สถานีฐานเมื่อมีผู้ใช้บริการเสียงและ WWW จากสมการที่ (4.1) เมื่อนำมาพิจารณาในเหตุการณ์ที่ระบบไม่เกิดการสูญหาย (Non Outage) นั้น จะพิจารณาภายใต้เงื่อนไขที่ว่า กำลังของสัญญาณแทรกสอดทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่สถานีฐานนั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกำลังของสัญญาณแทรกสอดสูงสุดที่ระบบยอมรับได้ ซึ่งจะได้ดังสมการ

$$\left[\sum_{i_1=1}^{K_1^v} \alpha_{i_1}^v E_{i_1}^v R_v + \sum_{i_1=1}^{K_1^w} E_{i_1}^w R_w \right] + \left[\sum_j^{\text{othercells}} \sum_{i_j=1}^{K_j^v} \alpha_{i_j}^v E_{i_j}^v R_v + \sum_j^{\text{othercells}} \sum_{i_j=1}^{K_j^w} E_{i_j}^w R_w \right] + N_t W \leq I_0 W \quad (4.2)$$

โดยที่

$E_{i_1}^v$ และ $E_{i_1}^w$ = พลังงานต่อบิตของผู้ใช้บริการเสียงและ WWW ในเซลล์ที่ 1

$E_{i_j}^v$ และ $E_{i_j}^w$ = พลังงานต่อบิตของผู้ใช้บริการเสียงและ WWW ในเซลล์ที่ j

R_v = อัตราบิตข้อมูลของผู้ใช้บริการเสียง

R_w = อัตราบิตข้อมูลของผู้ใช้บริการ WWW

I_0 = ความหนาแน่นของสัญญาณแทรกสอดสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Total Acceptable Interference Density)

N_t = ความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (Thermal Noise Density)

W = สเปกตรัมแบนด์วิดท์ (Spread Spectrum Bandwidth)

K_1^v = เป็นจำนวนผู้ใช้บริการเสียงในเซลล์ที่ 1 ซึ่งจะเป็นตัวแปรสุ่มแบบปัวส์ซอง ด้วย
ค่าเฉลี่ย $(\lambda\mu)_v$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- K_j^v = จำนวนผู้ใช้บริการเสียงในเซลล์ที่ j ซึ่งจะเป็นตัวแปรสุ่มแบบปัวส์ซองด้วยค่าเฉลี่ย $\rho_j(\lambda\mu)$,
- K_j^w = จำนวนผู้ใช้บริการ WWW ของเซลล์ที่ 1 ซึ่งจะเป็นแบบตัวแปรสุ่มแบบปัวส์ซอง ด้วยค่าเฉลี่ย $(\lambda\mu)$,
- K_j^w = จำนวนผู้ใช้บริการ WWW ของเซลล์ที่ j ซึ่งจะเป็นแบบตัวแปรสุ่มแบบปัวส์ซอง ด้วยค่าเฉลี่ย $\rho_j(\lambda\mu)$,
- ρ_j = ตัวแปรสำหรับโหลดทราฟฟิกของเซลล์ที่ j มีค่าตั้งแต่ 0 ไปถึง 1

จากสมการที่ (4.2) เมื่อแทนค่า $E_{i_j}^v$ และ $E_{i_j}^w$ ด้วย $f_{i_j} E_{i_j}^{v(i)}$ และ $f_{i_j} E_{i_j}^{w(i)}$ โดยที่ $E_{i_j}^{v(i)}$ และ $E_{i_j}^{w(i)}$ คือ พลังงานต่อบิตที่ได้รับจากผู้ให้บริการเสียงและ WWW ที่เซลล์ที่ 1 โดยจัดรูปแบบสมการใหม่ และกำหนดให้ f_{i_j} (Fraction of Interference Bit Energy) เป็นตัวแปรเศษส่วนของพลังงานต่อบิตของสัญญาณแทรกสอดจากผู้ให้บริการเสียงและ WWW ที่เซลล์ที่ j เมื่อนิยามให้ตัวแปรสุ่ม Z เป็นผลรวมของกำลังของสัญญาณแทรกสอด ดังนั้นจะได้

$$Z = \left[\frac{1}{G_v} \sum_{i=1}^{K_1^v} \alpha_{i_1}^v \varepsilon_{i_1}^v + \frac{1}{G_w} \sum_{i=1}^{K_1^w} \varepsilon_{i_1}^w \right] + \left[\frac{1}{G_v} \sum_j \sum_{i_j=1}^{K_j^v} \alpha_{i_j}^v f_{i_j} \varepsilon_{i_j}^{v(j)} + \frac{1}{G_w} \sum_j \sum_{i_j=1}^{K_j^w} f_{i_j} \varepsilon_{i_j}^{w(j)} \right] \leq (1-\eta) \quad (4.3)$$

โดยที่

G = ค่าอัตราการขยายการประมวลผลของการกระจายสเปกตรัม (W/R)

ε_i = อัตราส่วนพลังงานต่อบิตต่อความหนาแน่นของสัญญาณแทรกสอดทั้งหมด (E_i/I_0)

η = อัตราส่วนความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนเชิงความร้อนต่อความหนาแน่นของสัญญาณแทรกสอดทั้งหมด (N_i/I_0)

เมื่อความน่าจะเป็นของการสูญหายคือ ความน่าจะเป็นที่กำลังของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งนิยามเป็นตัวแปรสุ่ม Z มีค่ามากกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) จากสถานการณ์ดังกล่าวจะส่งผลให้ผู้ให้บริการรายใหม่ที่จะเข้ามาร้องขอใช้ช่องสัญญาณในระบบจะถูกปฏิเสธจากระบบ ซึ่งทำให้ผู้ใช้ดังกล่าวไม่สามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณได้ โดยจะแสดงความน่าจะเป็นดังกล่าวได้ดังสมการ

$$P_{outage} = P_r[Z > Z_0 = (1-\eta)] \quad (4.4)$$

เมื่อค่าจุดเริ่มเปลี่ยนมีค่าเป็น $Z_0 = (1-\eta)$

เมื่อต้องการหาค่าความน่าจะเป็นของการสูญหาย ซึ่งเป็นดังสมการที่ (4.4) จะต้องหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่ม Z เนื่องจากตัวแปรสุ่ม Z นี้เป็นผลรวมของกำลังสัญญาณแทรกสอด ดังในสมการที่ (4.3) เมื่อให้ตัวแปรสุ่ม Z นี้เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการประมาณค่าแบบเกาส์ (Gaussian Approximation) จะหาค่าเฉลี่ย $E[Z]$ และความแปรปรวน $Var(Z)$ ได้ดังสมการที่ (4.5) และ (4.6) ตามลำดับ

$$E[Z] = \left[\frac{1}{G_v} \sum_{i=1}^{K_v^y} \alpha_i^y E[\varepsilon_i^y] + \frac{1}{G_w} \sum_{i=1}^{K_w^y} E[\varepsilon_i^w] \right] + \left[\frac{1}{G_v} \sum_j \sum_{i_j=1}^{K_j^y} \alpha_{i_j}^y f_{i_j} E[\varepsilon_{i_j}^{y(j)}] + \frac{1}{G_w} \sum_j \sum_{i_j=1}^{K_j^w} f_{i_j} E[\varepsilon_{i_j}^{w(j)}] \right] \quad (4.5)$$

$$Var[Z] = \left[\frac{1}{G_v^2} \sum_{i=1}^{K_v^y} \alpha_i^y Var[\varepsilon_i^y] + \frac{1}{G_w^2} \sum_{i=1}^{K_w^y} Var[\varepsilon_i^w] \right] + \left[\frac{1}{G_v^2} \sum_j \sum_{i_j=1}^{K_j^y} \alpha_{i_j}^y f_{i_j} Var[\varepsilon_{i_j}^{y(j)}] + \frac{1}{G_w^2} \sum_j \sum_{i_j=1}^{K_j^w} f_{i_j} Var[\varepsilon_{i_j}^{w(j)}] \right] \quad (4.6)$$

เมื่อให้ $\alpha = \alpha_{i_j}^y = \alpha_{i_j}^w$, $\varepsilon_i^y = \varepsilon_i^{y(j)}$ และ $\varepsilon_i^w = \varepsilon_i^{w(j)}$ และจัดรูปสมการใหม่แทนคุณสมบัติของ f_i ตาม [4] จะได้

$$E[Z] = \left[\frac{1}{G_v} \sum_{i=1}^{K_v^y} \alpha E[\varepsilon_i^y] + \frac{1}{G_w} \sum_{i=1}^{K_w^y} E[\varepsilon_i^w] \right] (1+a) \quad (4.7)$$

$$Var[Z] = \left[\frac{1}{G_v^2} \sum_{i=1}^{K_v^y} \alpha Var[\varepsilon_i^y] + \frac{1}{G_w^2} \sum_{i=1}^{K_w^y} Var[\varepsilon_i^w] \right] (1+b) \quad (4.8)$$

เมื่อ

$$a = 6\rho_1 E[f_1] + 12\rho_2 E[f_2] \quad (4.9)$$

$$b = 6\rho_1 E[f_1^2] + 12\rho_2 E[f_2^2] \quad (4.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่าของ $E[f_1]$, $E[f_2]$, $E[f_1^2]$ และ $E[f_2^2]$ หาได้จากตารางที่ 1

เมื่อกำหนดให้ ϵ_i มีหน่วยเป็น dB จะทำให้มีการแจกแจงแบบเกาส์ ที่มีค่ามัธยฐาน m และ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ เป็น [1, 2]

$$\epsilon_i(\text{dB}) = 10 \log_{10} \epsilon_i \quad (4.11)$$

ดังนั้นจะได้ ϵ_i เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบล็อกนอร์มอลด้วยค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวน เป็น

$$E[\epsilon_i] = \exp[(\beta\sigma)^2/2] \exp(\beta m) \quad (4.12)$$

$$\text{Var}(\epsilon_i) = \exp[2(\beta\sigma)^2] \exp(2\beta m) \quad (4.13)$$

เมื่อ $\beta = \ln(10)/10$

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของ f_i [7]

T	σ_i	$E[f_1]$	$E[f_1^2]$	$E[f_2]$	$E[f_2^2]$
3	6	.1123	.0469	.0214	.0028
3	8	.1034	.0443	.0342	.0099
3	10	.0737	.0310	.0424	.0161
4	6	.0779	.0335	.0064	.0005
4	8	.0767	.0328	.0123	.0025
4	10	.0637	.0276	.0241	.0087
5	6	.0585	.0264	.0019	.0001
5	8	.0594	.0263	.0043	.0007
5	10	.0536	.0121	.0121	.0041

ดังนั้นจากสมการที่ (4.12) และ (4.13) สามารถใช้ในการหาค่าค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของ ϵ_i และ ϵ_i^2 ได้ เมื่อแทนค่า K_1 และ K_2 ด้วย $(\lambda/\mu)_1$ และ $(\lambda/\mu)_2$ ตามลำดับในสมการที่ (4.7) และ (4.8) จัดรูปแบบสมการใหม่จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E[Z] = \left[\frac{\alpha}{G_v} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)_v f(m_v, \sigma_v) + \frac{1}{G_w} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)_p f(m_w, \sigma_w) \right] (1+a) \quad (4.14)$$

$$Var(Z) = \left[\frac{\alpha}{G_v^2} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)_v g(m_v, \sigma_v) + \frac{1}{G_w^2} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)_p g(m_w, \sigma_w) \right] (1+b) \quad (4.15)$$

โดยที่

$$f(m, \sigma) = \exp\left(\beta m + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma^2\right) \quad (4.16)$$

$$g(m, \sigma) = \exp(2\beta m + 2\beta^2 \sigma^2) \quad (4.17)$$

ดังนั้นจะได้ความน่าจะเป็นของการสูญหายคังสมการ

$$P_{outage} \approx Q\left(\frac{Z_o - E[Z]}{\sqrt{Var(Z)}}\right) \quad (4.18)$$

โดยที่ $Q(x) = 0.5 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)$

$E[Z]$ และ $Var(Z)$ แทนค่าจากสมการที่ (4.16) และ (4.17) ตามลำดับ

4.3 ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต (Probability of BER)

เมื่อให้ตัวแปรสุ่ม ξ เป็นตัวแปรที่แทนถึงตัวแปรสุ่มที่มีการประมาณค่าแบบล็อกนอร์มอล (Lognormal Approximation) จะได้ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของตัวแปรสุ่ม ξ เป็นดังสมการ

$$E[\xi] = \exp\left(m_N + \frac{1}{2} \sigma_N^2\right) \quad (4.19)$$

$$Var(\xi) = \exp(2m_N + \sigma_N^2) \left[\exp(\sigma_N^2) - 1\right] \quad (4.20)$$

จากสมการที่ (4.14) และ (4.15) เมื่อกำหนดให้ $E[Z] = E[\xi]$ และ $Var(Z) = Var(\xi)$ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left[\frac{\alpha}{G_v} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)_v f(m_v, \sigma_v) + \frac{1}{G_w} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)_p f(m_w, \sigma_w) \right] (1+a) = \exp\left(m_N + \frac{1}{2} \sigma_N^2\right) \quad (4.21)$$

$$\left[\frac{\alpha}{G_v^2} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)_v g(m_v, \sigma_v) + \frac{1}{G_w^2} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)_p g(m_w, \sigma_w) \right] (1+b) = \exp(2m_N + \sigma_N^2) [\exp(\sigma_N^2) - 1] \quad (4.22)$$

แก้สมการที่ (4.21) และ (4.22) จะได้ค่าของความแปรปรวนและค่าเฉลี่ยเป็นดังสมการ [1]

$$\sigma_N^2 = \ln\left(\frac{\text{Var}(Z)}{E^2[Z]} + 1\right) \quad (4.23)$$

$$m_N = \ln(E[Z]) - \frac{1}{2} \sigma_N^2 \quad (4.24)$$

สมมติให้ผู้ใช้บริการที่ 0 แทนผู้ใช้บริการใด ๆ ภายในเซลล์ที่ 1 ที่ต้องการหาค่าความน่าจะเป็นของอัตราความผิดพลาดบิต เมื่อใช้การมอดูเลตแบบ BPSK จะได้ว่าความน่าจะเป็นของอัตราความผิดพลาดบิตเป็น [7]

$$P_e = Q\left(\sqrt{2 \frac{E_{0_1}}{\eta_0}}\right) \quad (4.25)$$

เมื่อ E_{0_1}/η_0 คือ อัตราส่วนพลังงานต่อบิตต่อความหนาแน่นของสัญญาณแทรกสอดทั้งหมดของผู้ใช้บริการที่ 0

ในการหาค่า E_{0_1}/η_0 จะใช้การประมาณค่าแบบลือกนอร์มอลดังนั้นจะได้ [7]

$$\frac{E_{0_1}}{\eta_0} = \frac{P_{0_1}}{N_t + \xi} \quad (4.26)$$

เนื่องจากกำหนดให้ตัวแปรสุ่ม ξ มีค่าเท่ากับตัวแปรสุ่ม Z ที่รวมค่า N_t ของระบบอยู่แล้ว ดังนั้นจึงตัดค่า N_t ในสมการที่ (4.26) ออก จะได้

$$\frac{E_{0_1}}{\eta_0} = \frac{P_{0_1}}{\xi} \quad (4.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ P_{0_1} เป็นกำลังของสัญญาณที่รับได้จากผู้ใช้บริการที่ 0 ในหน่วยวัตต์ ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มแบบล็อกนอร์มอล ดังนั้นสามารถเขียน P_{0_1} ใหม่ได้เป็น

$$P_{0_1} = 10^{x/10} = e^{\beta x} \quad (4.28)$$

เมื่อ x เป็นกำลังของสัญญาณที่รับได้จากผู้ใช้บริการที่ 0 ในหน่วยของเดซิเบล ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ด้วยค่าเฉลี่ยศูนย์และค่าการเบี่ยงเบน σ_0

ในอีกทางหนึ่งเมื่อ ξ เป็นตัวแปรสุ่มแบบล็อกนอร์มอล ดังนั้นสามารถเขียนได้ว่า

$$\xi = e^z \quad (4.29)$$

เมื่อ Z เป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ย m_N และค่าความเบี่ยงเบน σ_N

จากสมการที่ (4.25) เมื่อแทนค่าด้วยสมการที่ (4.27) (4.28) และ (4.29) ตามลำดับ สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} P_e &= Q\left(\sqrt{2\frac{E_{0_1}}{\eta_0}}\right) = Q\left(\sqrt{2\frac{P_{0_1}}{\xi}}\right) = Q\left(\sqrt{2\frac{e^{\beta x}}{e^z}}\right) = Q\left(\sqrt{2e^{\beta x - z}}\right) \\ &= Q\left(\sqrt{e^{\ln 2 + \beta x - z}}\right) = Q\left(e^{\frac{1}{2}(\ln 2 + \beta x - z)}\right) = Q(e^\gamma) \end{aligned} \quad (4.30)$$

โดยที่

$$\gamma = \frac{1}{2}(\ln 2 + \beta x - z) \quad (4.31)$$

เพราะฉะนั้นจะได้ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของ γ ดังสมการ [1]

$$m_r = \frac{1}{2}\{(\ln 2) - m_N\} \quad (4.32)$$

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{4}(\beta^2 \sigma_0^2 + \sigma_N^2) \quad (4.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย σ_N^2 และ m_N มีค่าคงในสมการที่ (4.23) และ (4.24) เมื่อต้องการหาอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ย จะหาค่าได้จากสมการ

$$\overline{P_e} = \int_{-\infty}^{+\infty} Q(e^r) g(r) dr \quad (4.34)$$

จากการประมาณใน [7] ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยจะสามารถประมาณได้ดังสมการ

$$\overline{P_e} \approx \frac{2}{3} Q(e^{m_r}) + \frac{1}{6} Q(e^{m_r + \sqrt{3}\sigma_r}) + \frac{1}{6} Q(e^{m_r - \sqrt{3}\sigma_r}) \quad (4.35)$$

โดยแทนค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนตามสมการที่ (4.32) และ (4.33) ลงในสมการที่ (4.35) เพราะฉะนั้นจะได้สมการที่แสดงถึงความน่าจะเป็นของอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์เชิงเลข

ในบทนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์ ความน่าจะเป็นของการสูญหาย (Outage Probability) ปริมาณทราฟฟิกระหว่างการบริการเสียงและ WWW รวมทั้งความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate) ของระบบวอยเบนด์-ซีดีเอ็มเอ บนการเชื่อมโยงจากเครื่องลูกข่ายไปยังสถานีฐาน ด้วยการใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองแบบการทำงาน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาผลของตัวแปรที่แสดงถึงค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งบ่งชี้ถึงระดับการควบคุมกำลังส่งที่ไม่สมบูรณ์ อัตราความเร็วบิตข้อมูลที่แสดงถึงความเร็วในการส่งข้อมูลของการบริการ WWW ที่มีผลต่อปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงและ WWW โดยแบ่งเป็นหัวข้อของการวิเคราะห์ได้ดังนี้

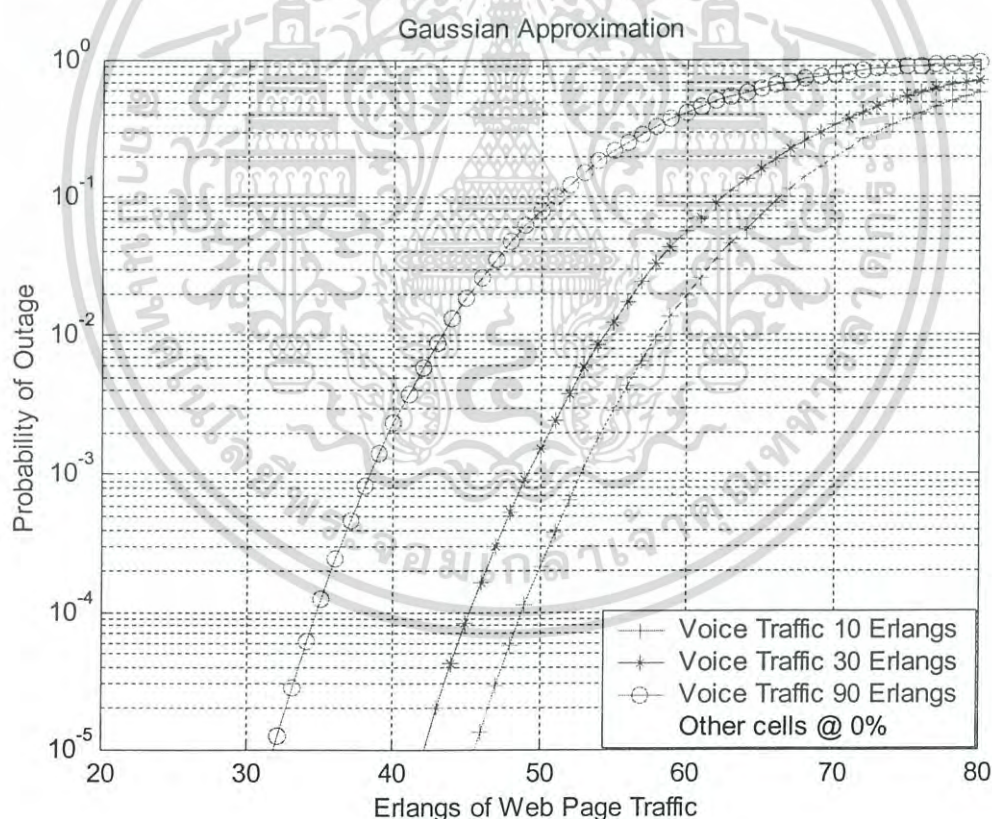
- 5.1 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการสูญหาย
 - 5.1.1 ผลของปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง
 - 5.1.2 ผลของการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง
 - 5.1.3 ผลของการควบคุมกำลังส่ง
 - 5.1.4 ผลของค่า E_b/N_0
- 5.2 การวิเคราะห์ปริมาณทราฟฟิกระหว่างการบริการเสียงและ WWW
 - 5.2.1 ผลของอัตราบิตส่งข้อมูลการบริการ WWW
- 5.3 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของอัตราความผิดพลาดบิต
 - 5.3.1 ผลของปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง
 - 5.3.2 ผลของการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง
 - 5.3.3 ผลของการควบคุมกำลังส่ง
 - 5.3.4 ผลของค่า E_b/N_0

5.1 การวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็นของการสูญหาย (Outage Probability)

5.1.1 ผลของปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง

5.1.1.1 ผลของปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง เมื่อโหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเป็น 0 %

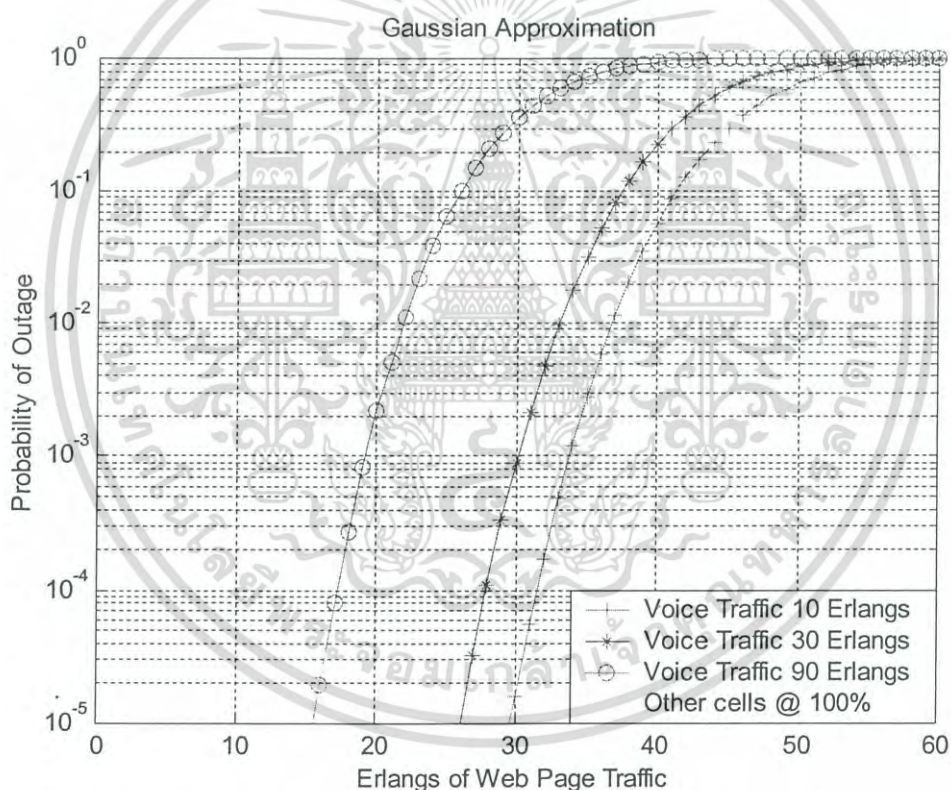
รูปที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการสูญหาย เมื่อกำหนดปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงมีค่าเท่ากับ 10, 30 และ 90 เฮอร์แลง โดยที่ $W = 5.0$ MHz, $R_v = 8.0$ kbps, $R_p = 16.0$ kbps, $m_v = 5.0$ dB, $m_w = 5.0$ dB, $\sigma_v = 2.0$ dB, $\sigma_w = 2.0$ dB, $\alpha = 0.4$, $\eta = 0.1$ จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงให้เห็นว่า ที่ค่าความน่าจะเป็นของการสูญหายเดียวกัน เมื่อปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW ลดลง และเมื่อปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW ที่เท่ากัน ปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงที่ลดลง จะมีผลให้ความน่าจะเป็นของการสูญหายของระบบลดลงทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการสูญหายกับปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW เมื่อโหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเป็น 0% โดยเปรียบเทียบที่ปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 10, 30 และ 90 เฮอร์แลง ตามลำดับ

5.1.1.2 ผลของปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง เมื่อสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเป็น 100 %

รูปที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการสูญหาย เมื่อกำหนดปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงมีค่าเท่ากับ 10, 30 และ 90 เอร์แลง โดยที่ $W = 5.0$ MHz, $R_v = 8.0$ kbps, $R_p = 16.0$ kbps, $m_v = 5.0$ dB, $m_w = 5.0$ dB, $\sigma_v = 2.0$ dB, $\sigma_w = 2.0$ dB, $\alpha = 0.4$, $\eta = 0.1$ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ที่ค่าความน่าจะเป็นของการสูญหายเดียวกัน เมื่อปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW ลดลง และเมื่อปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW ที่เท่ากัน ปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงที่ลดลง จะมีผลให้ความน่าจะเป็นของการสูญหายของระบบลดลงทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น ซึ่งจะให้ผลเหมือนกับรูปที่ 5.1 ต่างกันที่ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบจะต่ำกว่า

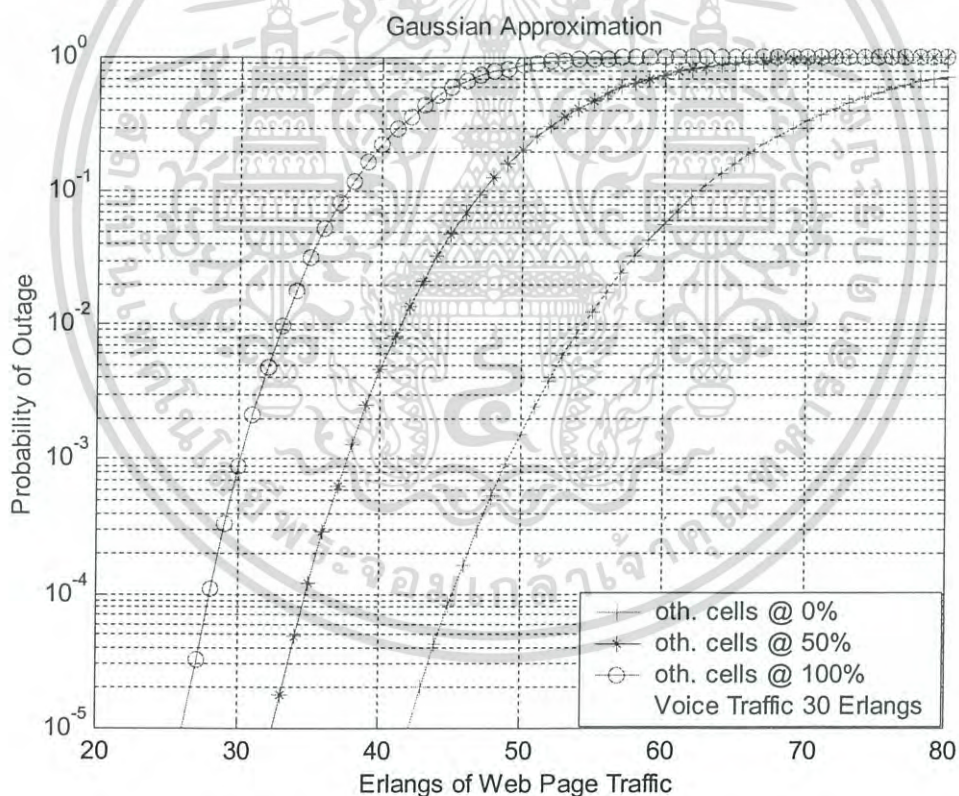


รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการสูญหายกับปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW เมื่อโหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเป็น 100% โดยเปรียบเทียบที่ปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 10, 30 และ 90 เอร์แลง ตามลำดับ

5.1.2 ผลของการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง

5.1.2.1 ผลของโหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงต่างกัน

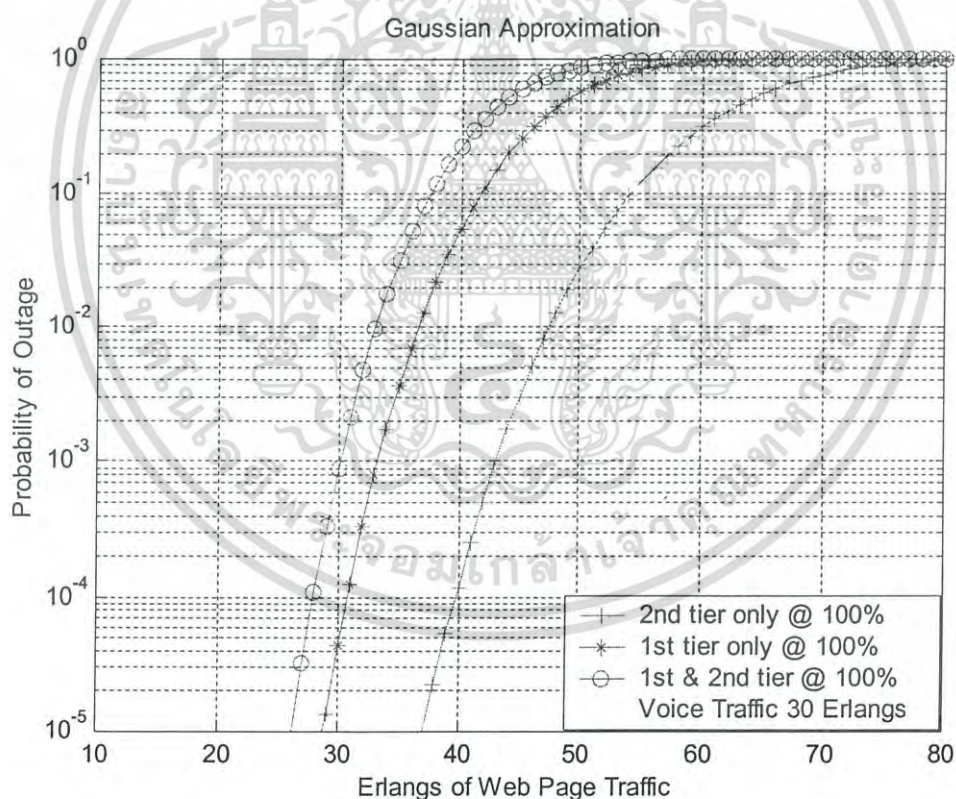
รูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการสูญหายของระบบ เมื่อกำหนดปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เออร์แลง โหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเป็น 0% 50% และ 100% โดยที่ $W = 5.0$ MHz, $R_v = 8.0$ kbps, $R_p = 16.0$ kbps, $m_v = 5.0$ dB, $m_w = 5.0$ dB, $\sigma_v = 2.0$ dB, $\sigma_w = 2.0$ dB, $\alpha = 0.4$, $\eta = 0.1$ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ค่าความน่าจะเป็นของการสูญหายที่เท่ากันและที่ปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงเดียวกัน เมื่อโหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW ลดลง หรือกล่าวได้ว่าการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงมีผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง โดยประสิทธิภาพของระบบจะลดลงมากที่สุด เมื่อโหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงมีค่ามากที่สุด



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการสูญหายกับปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW เมื่อปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เออร์แลง โดยเปรียบเทียบที่โหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเป็น 0%, 50% และ 100% ตามลำดับ

5.1.2.2 ผลของความถี่ใกล้เคียงของการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง

รูปที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการสูญหาย เมื่อกำหนดปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เออร์แลง แบ่งการวิเคราะห์เป็น 3 กรณีคือ กรณีแรก โหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงวงที่ 1 เป็น 100% และวงที่ 2 เป็น 0 % กรณีที่สอง โหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงวงที่ 1 เป็น 0% และวงที่ 2 เป็น 100% กรณีสุดท้าย โหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงทั้ง 2 วงเป็น 100% โดยที่ $W = 5.0$ MHz, $R_v = 8.0$ kbps, $R_p = 16.0$ kbps, $m_v = 5.0$ dB, $m_w = 5.0$ dB, $\sigma_v = 2.0$ dB, $\sigma_w = 2.0$ dB, $\alpha = 0.4$, $\eta = 0.1$ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ค่าความน่าจะเป็นของการสูญหายที่เท่ากันและที่ปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงเดียวกัน กรณีที่หนึ่งจะมีผลทำให้ปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW ลดลง มากกว่ากรณีที่สอง และกรณีที่สามจะมีผลทำให้ปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW ลดลงมากที่สุด หรือกล่าวได้ว่า การแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงที่ใกล้กว่าจะมีผลกระทบทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง มากกว่าการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงที่ไกลกว่า

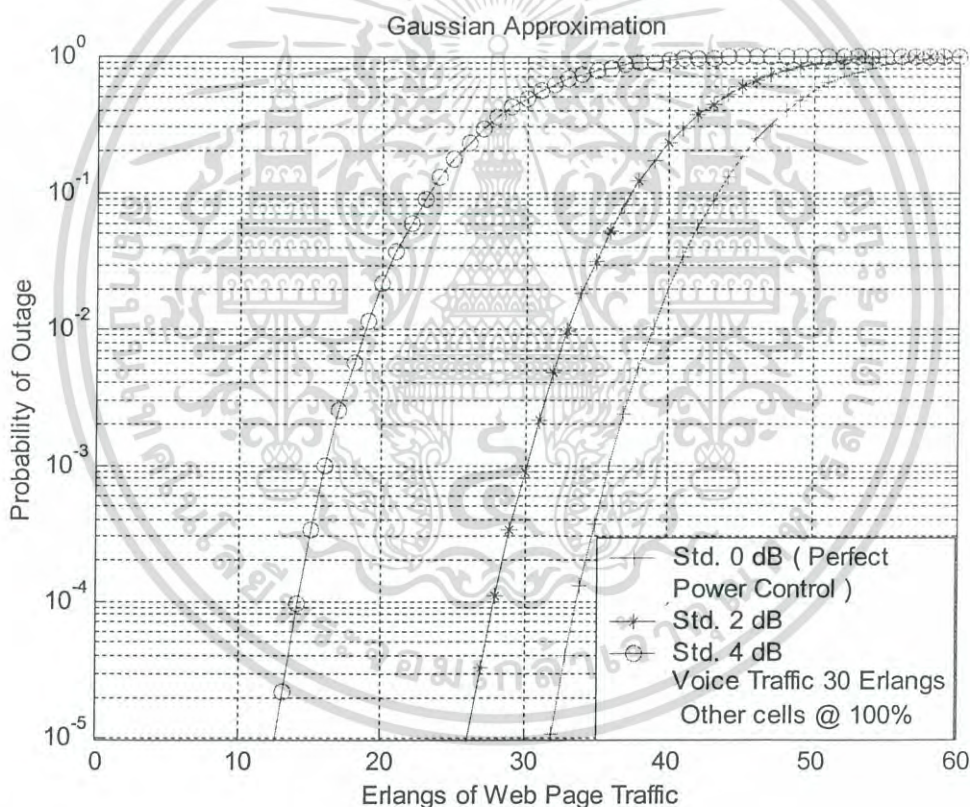


รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการสูญหายกับปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW เมื่อปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เออร์แลง โดยเปรียบเทียบที่โหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเป็น กรณีที่ 1 (วงที่ 1 = 100% วงที่ 2 = 0 %) กรณีที่ 2 (วงที่ 1 = 0% วงที่ 2 = 100 %) และกรณีที่ 3 (วงที่ 1 = 100% วงที่ 2 = 100 %) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ผลของการควบคุมกำลังส่ง

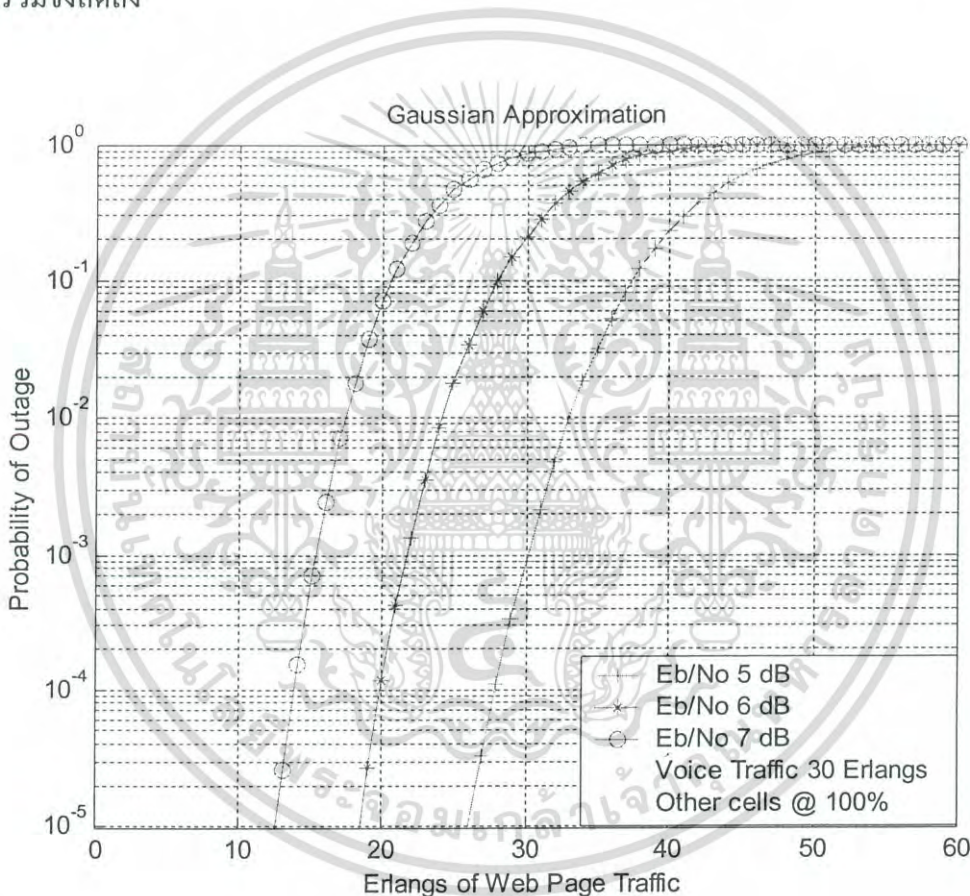
รูปที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของการสูญหาย เมื่อกำหนดปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เออร์แลง พิจารณาเมื่อระบบที่มีการควบคุมกำลังส่งที่สมบรูณ์ ($\sigma_v = \sigma_w = 0$ dB) และระบบที่มีการควบคุมกำลังส่งที่ไม่สมบรูณ์ ($\sigma_v = \sigma_w = 2$ และ 4 dB) โดยที่ $W = 5.0$ MHz, $R_v = 8.0$ kbps, $R_p = 16.0$ kbps, $m_v = 5.0$ dB, $m_w = 5.0$ dB, $\alpha = 0.4$, $\eta = 0.1$ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ที่ค่าความน่าจะเป็นของการสูญหายและปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงเดียวกัน เมื่อระบบมีการควบคุมกำลังส่งไม่สมบรูณ์ จะมีผลทำให้ปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW ลดลง เมื่อเทียบกับระบบที่มีการควบคุมกำลังส่งที่สมบรูณ์ และระบบที่มีระดับการควบคุมกำลังส่งไม่สมบรูณ์ที่มากกว่า จะมีผลทำให้ปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW ลดลงมากกว่า หรือกล่าวได้ว่าการควบคุมกำลังส่งที่ไม่สมบรูณ์จะมีผลกระทบทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการสูญหายกับปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW เมื่อปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เออร์แลง โดยเปรียบเทียบระบบที่มีการควบคุมกำลังส่งที่สมบรูณ์ ($\sigma_v = \sigma_w = 0$ dB) และระบบที่มีการควบคุมกำลังส่งที่ไม่สมบรูณ์ ($\sigma_v = \sigma_w = 2$ และ 4 dB) ตามลำดับ

5.1.4 ผลของค่า E_b/N_o

รูปที่ 5.6 แสดงค่าความน่าจะเป็นของการสูญหาย เมื่อกำหนดปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เออร์แลง โดยเปรียบเทียบที่ค่า $E_b/N_o = (E_b/N_o)_v = (E_b/N_o)_w = 5, 6$ และ 7 dB โดยที่ $W = 5.0$ MHz, $R_v = 8.0$ kbps, $R_p = 16.0$ kbps, $\sigma_v = 2.0$ dB, $\sigma_w = 2.0$ dB, $\alpha = 0.4$, $\eta = 0.1$ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ที่ค่าความน่าจะเป็นของการสูญหายและปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงเดียวกัน เมื่อค่า E_b/N_o ของผู้ใช้บริการในระบบทั้งหมดเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW ลดลง เนื่องจากการเพิ่มค่า E_b/N_o ของผู้ใช้บริการในระบบทั้งหมดนั้น จะส่งผลให้การแทรกสอดภายในเซลล์และจากเซลล์ข้างเคียงในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมจึงลดลง

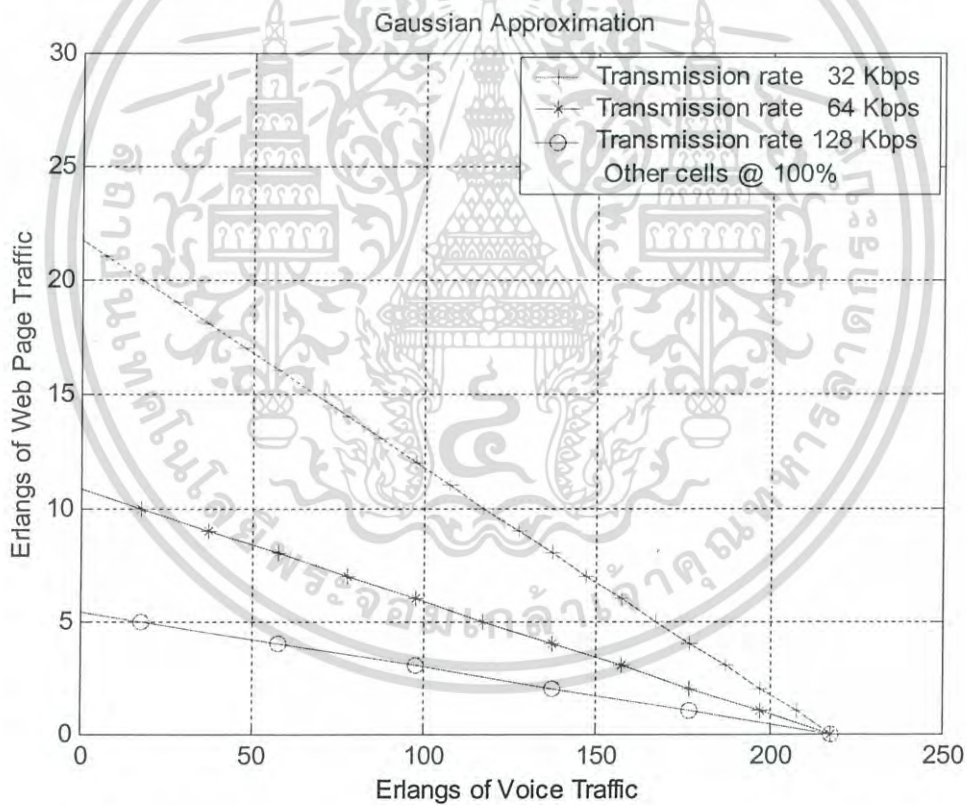


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการสูญหายกับปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW เมื่อปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เออร์แลง และโหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง 100% โดยเปรียบเทียบที่ค่า $E_b/N_o = (E_b/N_o)_v = (E_b/N_o)_w = 5, 6$ และ 7 dB ตามลำดับ

5.2 การวิเคราะห์ปริมาณทราฟฟิกระหว่างการบริการเสียงและ WWW

5.2.1 ผลของอัตราบิตส่งข้อมูลการบริการ WWW

รูปที่ 5.7 แสดงปริมาณทราฟฟิกระหว่างการบริการเสียงและ WWW โดยเปรียบเทียบค่า Page Request (R_p) ที่ 32, 64 และ 128 kbps ตามลำดับ โดยที่ $W = 5.0$ MHz, $R_v = 8.0$ kbps, $m_v = 5.0$ dB, $m_w = 5.0$ dB, $\sigma_v = 2.0$ dB, $\sigma_w = 2.0$ dB, $\alpha = 0.4$, $\eta = 0.1$, $P_{\text{outage}} = 0.01$ จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงให้เห็นว่า ปริมาณทราฟฟิกของการบริการเสียงที่เท่ากัน อัตราการส่งข้อมูลของ Page Request ที่ต่ำกว่า จะมีผลทำให้ปริมาณทราฟฟิกของการบริการ WWW สูงกว่า และที่ปริมาณทราฟฟิกของการบริการ WWW ที่เท่ากัน อัตราการส่งข้อมูลของ Page Request ที่ต่ำกว่า จะมีผลทำให้ปริมาณทราฟฟิกของการบริการเสียงสูงกว่า

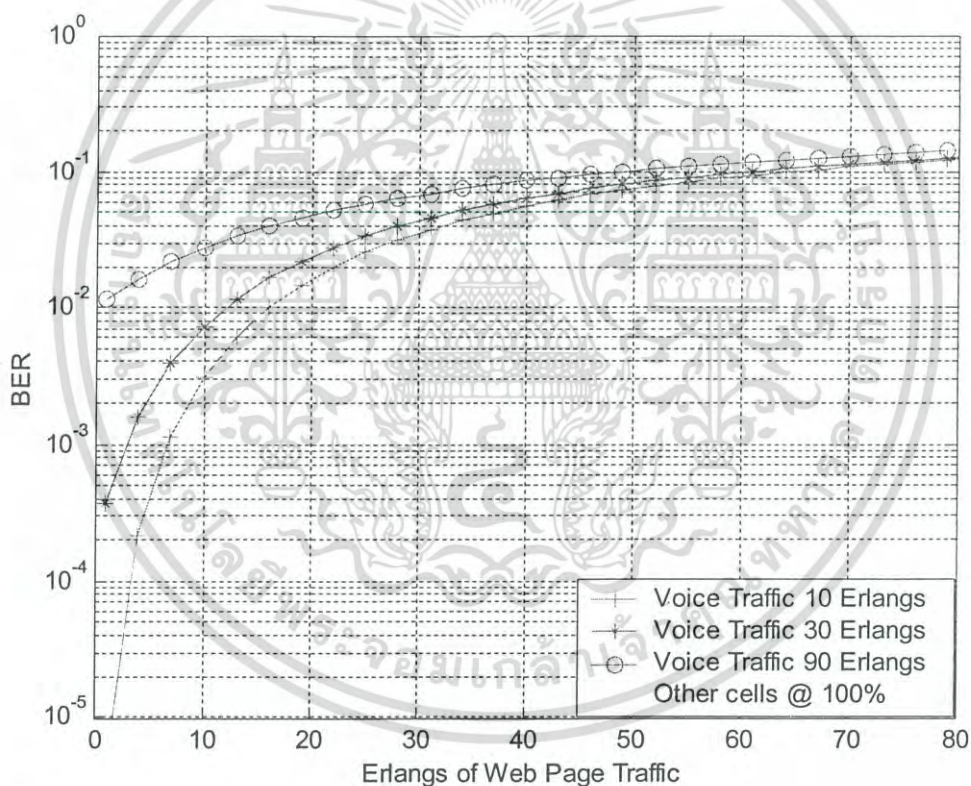


รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงและ WWW เมื่อโหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง 100 % โดยเปรียบเทียบที่ค่า R_p เท่ากับ 32, 64 และ 128 kbps ตามลำดับ

5.3 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate)

5.3.1 ผลของปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง

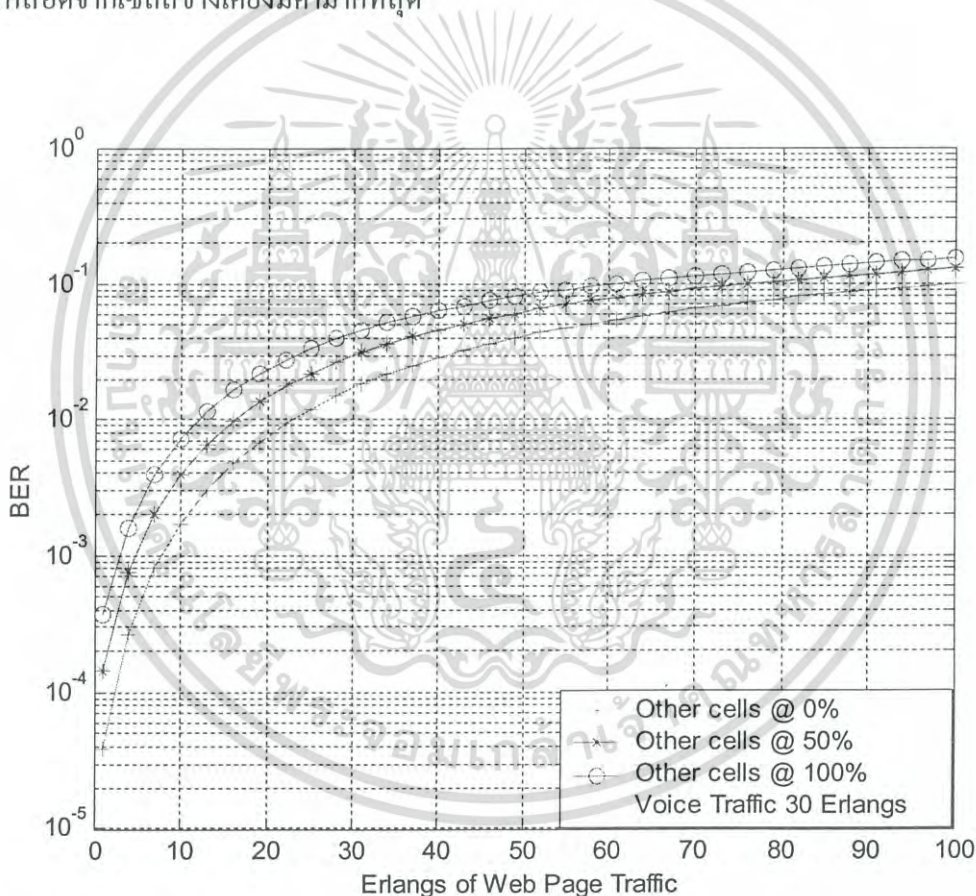
รูปที่ 5.8 แสดงค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบ โดยเปรียบเทียบกันเมื่อ กำหนดปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงมีค่าเท่ากับ 10, 30 และ 90 เฮอร์เลงตามลำดับ โดยที่ $W = 5.0$ MHz, $R_v = 8.0$ kbps, $R_p = 16.0$ kbps, $m_v = 5.0$ dB, $m_w = 5.0$ dB, $\sigma_v = 2.0$ dB, $\sigma_w = 2.0$ dB, $\alpha = 0.4$, $\eta = 0.1$ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตที่เท่ากัน ปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงที่มีค่าเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW มีค่าลดลง และเมื่อปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW ที่เท่ากัน ปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงที่น้อยกว่าจะมีผลให้ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบต่ำกว่า ทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีกว่า



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตกับปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW เมื่อโหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง 100 % โดยเปรียบเทียบที่ทราฟฟิกการบริการเสียง 10, 30 และ 90 เฮอร์เลง ตามลำดับ

5.3.2 ผลของการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง

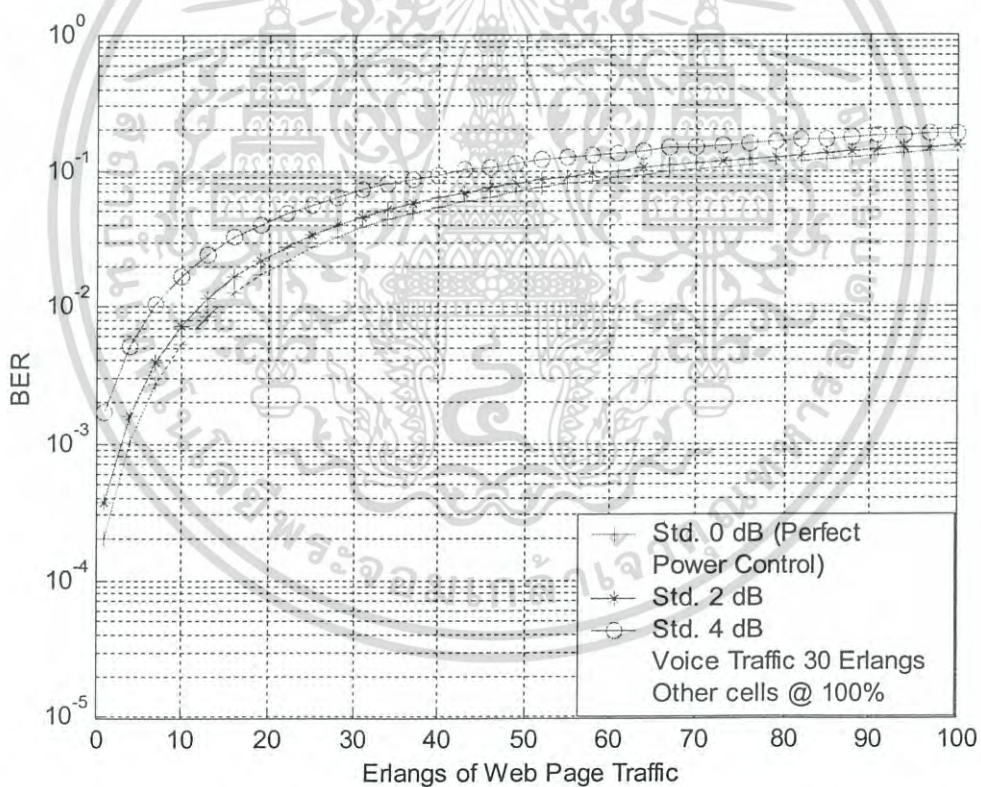
รูปที่ 5.9 แสดงค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบ โดยเปรียบเทียบกันเมื่อ กำหนดปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เออร์แลง โหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง เป็น 0% 50 % และ 100 % ตามลำดับ โดยที่ $W = 5.0$ MHz, $R_v = 8.0$ kbps, $R_p = 16.0$ kbps, $m_v = 5.0$ dB, $m_w = 5.0$ dB, $\sigma_v = 2.0$ dB, $\sigma_w = 2.0$ dB, $\alpha = 0.4$, $\eta = 0.1$ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตที่เท่ากันและปริมาณทราฟฟิกการบริการ เสียงเดียวกัน เมื่อโหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW ลดลง หรือกล่าวได้ว่าการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงมีผลทำให้ ประสิทธิภาพของระบบลดลง โดยประสิทธิภาพของระบบจะลดลงมากที่สุด เมื่อโหลดสัญญาณ แทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงมีค่ามากที่สุด



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตกับปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW เมื่อปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เออร์แลง โดยเปรียบเทียบที่ โหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงเป็น 0%, 50% และ 100 % ตามลำดับ

5.3.3 ผลของการควบคุมกำลังส่ง

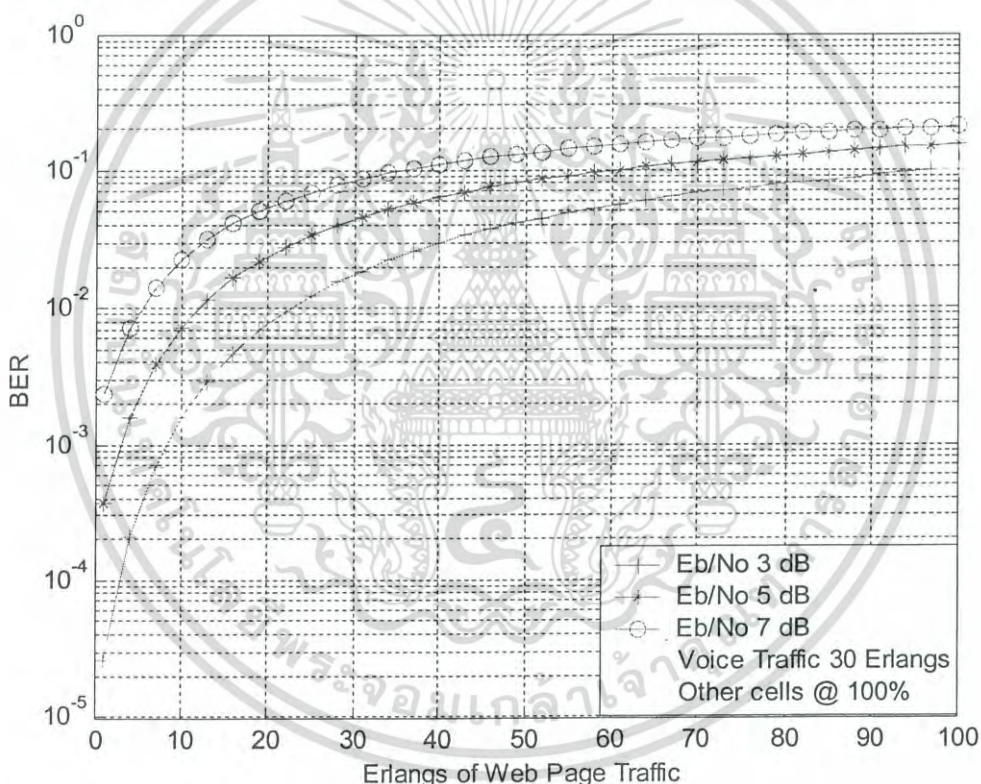
รูปที่ 5.10 แสดงค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบ โดยเปรียบเทียบกันเมื่อกำหนดปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เอร์แลง พิจารณาเมื่อระบบมีการควบคุมกำลังส่งที่สมบรูณ์ ($\sigma_v = \sigma_w = 0$ dB) และระบบที่มีการควบคุมกำลังส่งที่ไม่สมบรูณ์ ($\sigma_v = \sigma_w = 2$ และ 4 dB) โดยที่ $W = 5.0$ MHz, $R_v = 8.0$ kbps, $R_p = 16.0$ kbps, $m_v = 5.0$ dB, $m_w = 5.0$ dB, $\alpha = 0.4$, $\eta = 0.1$ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตที่เท่ากันและปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงเดียวกัน เมื่อระบบมีการควบคุมกำลังส่งที่ไม่สมบรูณ์ จะมีผลทำให้ปริมาณ ทราฟฟิกการบริการ WWW ลดลง เมื่อเทียบกับระบบที่มีการควบคุมกำลังส่งที่สมบรูณ์ และระบบที่มีระดับการควบคุมกำลังส่งไม่สมบรูณ์ที่มากกว่า จะมีผลทำให้ปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW ลดลงมากกว่า หรือกล่าวได้ว่าการควบคุมกำลังส่งที่ไม่สมบรูณ์จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบลดลง



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตกับปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW เมื่อปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เอร์แลง โดยเปรียบเทียบระบบที่มีการควบคุมกำลังส่งที่สมบรูณ์ ($\sigma_v = \sigma_w = 0$ dB) และระบบที่มีการควบคุมกำลังส่งที่ไม่สมบรูณ์ ($\sigma_v = \sigma_w = 2$ และ 4 dB) ตามลำดับ

5.3.4 ผลของค่า E_b/N_o

รูปที่ 5.11 แสดงค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบ เมื่อกำหนดปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เอร์แลง โดยการเปรียบเทียบที่ค่า $E_b/N_o = (E_b/N_o)_v = (E_b/N_o)_w = 3, 5$ และ 7 dB ตามลำดับ โดยที่ $W = 5.0$ MHz, $R_v = 8.0$ kbps, $R_p = 16.0$ kbps, $\sigma_v = 2.0$ dB, $\sigma_w = 2.0$ dB, $\alpha = 0.4$, $\eta = 0.1$ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตที่เท่ากันและที่ปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงเดียวกัน เมื่อค่า E_b/N_o ของผู้ใช้บริการในระบบทั้งหมดเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW น้อยกว่า เนื่องจากการเพิ่มค่า E_b/N_o ของผู้ใช้บริการในระบบทั้งหมดนั้น จะส่งผลให้การแทรกสอดภายในเซลล์และจากเซลล์ข้างเคียงในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้อัตราความผิดพลาดบิตของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบจึงลดลง



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตกับปริมาณทราฟฟิกการบริการ WWW เมื่อปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียง 30 เอร์แลง และโหลดสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง 100% โดยเปรียบเทียบที่ค่า $E_b/N_o = (E_b/N_o)_v = (E_b/N_o)_w = 3, 5$ และ 7 dB ตามลำดับ

บทที่ 6

สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ

ในระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ ผู้ใช้สามารถส่งสัญญาณไปในแบนด์วิดท์เดียวกันในเวลาเดียวกัน โดยใช้ Pseudo-Noise[PN]Code ที่ต่างกัน ซึ่งค่าความจุของระบบจะขึ้นอยู่กับสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ใช้ที่อยู่ในเซลล์เดียวกันและในเซลล์ข้างเคียง โดยปกติถ้าไม่มีการควบคุมกำลังส่ง จะทำให้สัญญาณที่มาถึงเครื่องรับที่สถานีฐานของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากปรากฏการณ์ใกล้-ไกล ซึ่งเกิดจากการรับกำลังของสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายที่อยู่ใกล้สูงกว่ากำลังของสัญญาณจากเครื่องส่งที่อยู่ไกลกว่า นอกจากนี้ยังเกิดจากผลของการบดบังซึ่งเกิดจากการที่สัญญาณบางส่วนถูกบดบังไปจากสภาพแวดล้อมรอบข้าง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาระบบวิเคราะห์หาค่าความจุเออร์แลงในระบบวายแบนด์-ซีดีเอ็มเอ จากเครื่องลูกข่ายไปยังสถานีฐานที่มีผู้ใช้บริการทางเสียงและเว็ลด์วายเว็บ โดยพิจารณากระบวนการควบคุมกำลังส่งของระบบเป็นแบบไม่สมบูรณ์ ซึ่งการหาค่าความจุดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กับค่าความน่าจะเป็นของการสูญหาย นอกจากนี้ยังได้พิจารณาส่วนของค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบอีกด้วย

จากผลการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการสูญหายของระบบ โดยการประมาณค่าความน่าจะเป็นแบบเกาส์จะพบว่า เมื่อปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงหรือปริมาณทราฟฟิกการบริการเว็ลด์วายเว็บเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความน่าจะเป็นของการสูญหายของระบบเพิ่มขึ้น หรือประสิทธิภาพของระบบลดลง นอกจากนี้ การแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง การควบคุมกำลังส่งของเครื่องลูกข่ายที่ไม่สมบูรณ์ และค่า E_b/N_0 ที่เพิ่มขึ้นล้วนทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงทั้งสิ้น

เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ปริมาณทราฟฟิกระหว่างการบริการทางเสียงและเว็ลด์วายเว็บ โดยพิจารณาที่ค่าความน่าจะเป็นของการสูญหายเท่ากับ 1% พบว่า เมื่อค่าอัตราบิตข้อมูล (R_p) มีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงและเว็ลด์วายเว็บของระบบลดลง

การวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบพบว่า เมื่อปริมาณทราฟฟิกการบริการเสียงหรือปริมาณทราฟฟิกการบริการเว็ลด์วายเว็บเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของระบบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง นอกจากนี้ การแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง การควบคุมกำลังส่งของเครื่องลูกข่ายที่ไม่สมบูรณ์ และค่า E_b/N_0 ที่เพิ่มขึ้นล้วนทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงทั้งสิ้น

สำหรับข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อนั้น จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการวิเคราะห์ที่เกิดจากการเชื่อมโยงจากเครื่องลูกข่ายไปยังสถานีฐาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือการเชื่อมโยงจากฉบับเท่านั้น ดังนั้นจึงยังสามารถวิเคราะห์เพิ่มเติมในส่วนการเชื่อมโยงเข้าไปหรือจากสถานีฐานไปยังเครื่องลูกข่าย ซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์ความจุเออร์ແงทั้งหมดทั้งระบบได้ ทำให้สามารถออกแบบระบบให้รองรับกับความต้องการของผู้ใช้บริการได้สมบูรณ์มากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. S. Lee and L. E. Miller, *CDMA Systems Engineering Handbook*, Boston, Artech House, 1998.
- [2] A. M. Viterbi and A. J. Viterbi, "Erlang Capacity of a Power Controlled CDMA System," *IEEE Journal on Selected Area in Communications*, Vol. 11, No. 6, August 1993, pp. 892-900.
- [3] A. Golaup and A. H. Aghvami, "Reverse Link Erlang Capacity of a W-CDMA System Supporting Voice and WWW Users", *VTC 2001 Fall IEEE VTS 54th*, Vol.2, Oct. 2001, pp. 605-609.
- [4] M. A. Landolsi, V. V. Veeravalli and N. Jain, "New Results on the Reverse Link Capacity of CDMA Cellular Networks", *IEEE 46th Vehicular Technology Conference*, May 1996, pp. 1462-1466.
- [5] Andrew J. Viterbi, *CDMA Principles of Spread Spectrum Communication*, Addison-Wesley Publishing Company, June 1995.
- [6] Proakis J. G., *Digital Communications*, Boston, McGraw Hill, 2001.
- [7] J. M. Romero-Jerez, M. Ruiz-Garcia, and A. Diaz-Estrella, "Effects of Multipath Fading on BER Statistics in Cellular CDMA Networks with Fast Power Control", *IEEE Communications Letters*, Vol. 4, No. 11, November 2000, pp. 349-351.
- [8] T. S. Rappaport, *Wireless Communication*, New Jersey, Prentice Hall PRT, 1996.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

- [1] S. Arunrungrat, A. Techotchawan, M. Lertwatechakul and C. Benjangkprasert, "Outage Probability on the Reverse Link Erlang Capacity of W-CDMA Systems with Integrated Voice/WEB Traffic", IEEE TENCON 2004, November 21-24, 2004, Chiangmai, Thailand, pp. 517-520.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TENCON 2004

Conference Proceedings
Analog and Digital Techniques in Electrical Engineering

21 – 24 November 2004, Chiang Mai, THAILAND

Organizer: IEEE Thailand Section

Sponsored by: IEEE Region 10

Venue: Lotus Hotel Pang Suan Kaew

IEEE Catalog Number: 04CH37582C

ISBN: 0-7803-8561-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้ทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

seen that only $E[Z]$ and $Var(Z)$ are required to evaluate $P_{blocking}$, and subsequently the Erlang capacity $(\lambda/\mu)_v$ and $(\lambda/\mu)_p$ of the center cell. These will depend on the radio environment (propagation path loss and shadow fading), and on the degree of soft handoff available to the mobile.

We will specialize the analysis to the case of similar traffic in all cells belonging to the first tier (cells 2 to 7) and second tier (cells 8 to 19), with an average number of users per cell equal to $\rho_1[(\lambda/\mu)_v + (\lambda/\mu)_p]$ and to $\rho_2[(\lambda/\mu)_v + (\lambda/\mu)_p]$ for the first and second tier, respectively. We also note that, by symmetry, the f_i -factors of different mobiles belonging to the same tier can be assumed independent, identically distributed (i.i.d); and therefore, each of the tier can be characterized by pair of parameters (ρ_i, f_i) , $i = 1$ or 2 , where ρ_i represents the fraction of loading relative to the center cell, and f_i represent fraction of other-cell interference (per mobile) relative to interference caused by a center-cell mobile. So that, the mean and variance of RV Z , $E[Z]$ and $Var(Z)$ to the case of non-uniform traffic of interest here [1, 2]. We obtain

$$E[Z] = \left[\frac{1}{G_v} \left(\frac{\alpha\lambda}{\mu} \right)_v f(m_v, \sigma_v) + \frac{1}{G_w} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)_p f(m_w, \sigma_w) \right] (1+a) \quad (8)$$

$$Var(Z) = \left[\frac{1}{G_v^2} \left(\frac{\alpha\lambda}{\mu} \right)_v g(m_v, \sigma_v) + \frac{1}{G_w^2} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)_p g(m_w, \sigma_w) \right] (1+b) \quad (9)$$

where

$$f(m, \sigma) = \exp\left(\beta m + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma^2\right)$$

$$g(m, \sigma) = \exp(2\beta m + 2\beta^2 \sigma^2)$$

$$a = 6\rho_1 E[f_1] + 12\rho_2 E[f_2]$$

$$b = 6\rho_1 E[f_1^2] + 12\rho_2 E[f_2^2]$$

We note in particular that, for the analysis carried out here, both the first and second moments of the interference factors play a role. This observation will have an impact on the center-cell capacity.

Table 1 gives several numerical values for these moments obtained by simulations a correlation coefficient of 0.5 is used among the random variables modeling the shadowing between a given mobile and each of the difference base station [1]. It is also assumed that soft handoff with all cells is available to the mobiles, which are then controlled by the cell with least attenuation (from combined path loss and shadow fading). Another assumption is that the received bit energies of the center cell. Since we are interest in the case when the other cells have less traffic than the center cell, the f_i factors calculated with the equal bit energy assumption will give us a conservative estimate of the capacity of the center cell.

μ	σ_s	$E[f_1]$	$E[f_1^2]$	$E[f_2]$	$E[f_2^2]$
3	6	.1123	.0469	.0214	.0028
3	8	.1034	.0443	.0342	.0099
3	10	.0737	.0310	.0424	.0161
4	6	.0779	.0335	.0064	.0005
4	8	.0767	.0328	.0123	.0025
4	10	.0637	.0276	.0241	.0087
5	6	.0585	.0264	.0019	.0001
5	8	.0594	.0263	.0043	.0007
5	10	.0536	.0121	.0121	.0041

Table 1. Statistics of the f_i factors. The parameter μ is the propagation path loss exponent and σ_s is the standard deviation of the shadow fading in dB.

4. NUMERICAL RESULTS

In this section, we presented the curves that show the results obtained for the Gaussian approximation. Outage Probability is the selected performance parameter measured. For all following figures we assume bandwidth of W-CDMA 5 MHz, $R_v = 8.0$ kbps, $R_p = 16.0$ kbps, m_v and m_w are 5 dB, σ_v and $\sigma_w = 2$ dB, α_v is 0.4. All figures presented in this section are valid for the reverse link.

In Fig. 2 and Fig. 3, we compare outage probability of web user with different voice user and other cells loading 0% and 100%, respectively. For the parameter chosen, when voice traffic in this graph are varying by 10, 30 and 90 Erlangs, we have the voice traffic that corresponding to these values. At 10 Erlangs of voice traffic, when web traffic increase, the probability of outage is highly. When the voice traffic are 30 and 90 Erlangs, from those graph we can see that at probability of outage = 0.01, the web traffic service is decrease with increasing of voice traffic from 10 to 30 and 90 respectively. And the degradation of performance has occurred with increase other cells loading. Fig. 4 shows outage probability versus offer web page traffic load for other cells loading are 0%, 50% and 100%. We can seen that at the higher other cells loading, performance is decreased. In Fig. 5, shows the comparison of outage probability the case of 1st tier only, 2nd tier only and 1st & 2nd tiers loading 100%. As expected, it is also observed that the first tier traffic accounts for most of the capacity variation in the center cell, with a very small contribution from the second tier.

Finally, Fig. 6 shows outage probability of web traffic when fixed voice traffic and vary path loss exponent. It is seen that, for lower of path loss exponent, there is decrease of the web traffic.

5. CONCLUSIONS

In this paper we have analyzed the reverse link of a W-CDMA system with integrated voice/web traffic under non-uniform cell loading, with Gaussian approximation. We first characterized the page request process on the reverse link. Outage Probability was evaluated and the system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

performance was measured. From the results, we found that the voice traffic capacity was severely affected by the data traffic, which consisted mainly of page requests, on the reverse link. And the degradation of performance has occurred with increase other cells loading. In addition, the higher performance can be achieved with increasing path loss exponent.

6. REFERENCES

- [1] M. A. Landolsi, V. V. Veeravalli and N. Jain, "New Results on the Reverse Link Capacity of CDMA Cellular Networks", *IEEE 46th Vehicular Technology Conference*, pp. 1462-1466, 28 Apr.-1 May 1996.
- [2] A. Golaup and A. H. Aghvami, "Reverse Link Erlang Capacity of a W-CDMA system supporting Voice and WWW Users", *VTC 2001 Fall IEEE VTS 54th*, Vol.2, pp. 605-609, 7-11 Oct. 2001.
- [3] A. M. Viterbi and A. J. Viterbi, "Erlang Capacity of a Power Controlled CDMA System," *IEEE Journal on Selected Area in Communications*, Vol. 11, No. 6, pp. 892-900, August 1993.
- [4] J. S. Lee and L. E. Miller, *CDMA Systems Engineering Handbook*, Boston, Artech House, 1998.

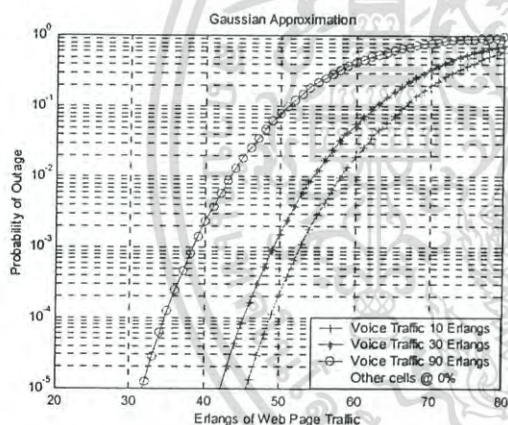


Fig. 2 Outage Probability versus web traffic in Erlangs under other cells loading 0%.

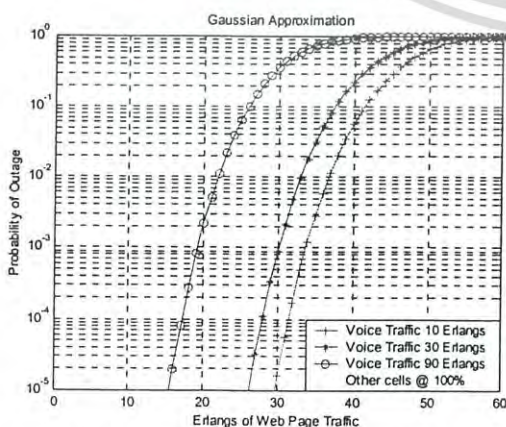


Fig. 3 Outage Probability versus web traffic in Erlangs under other cells loading 100%.

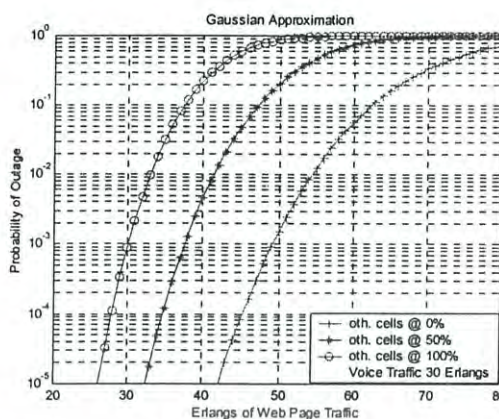


Fig. 4 Outage Probability versus web traffic in Erlangs under different other cells loading.

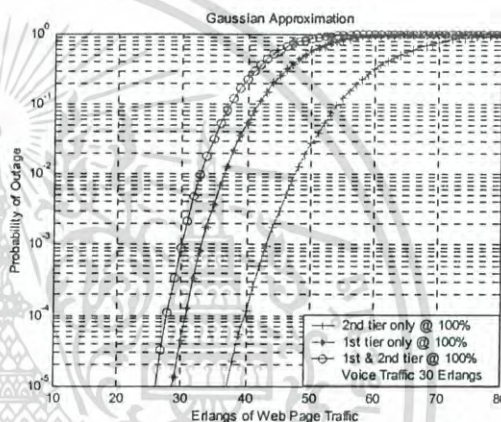


Fig. 5 Outage Probability versus web traffic in Erlangs compared to the case of 1st tier only, 2nd tier only and 1st & 2nd tiers loading 100%.

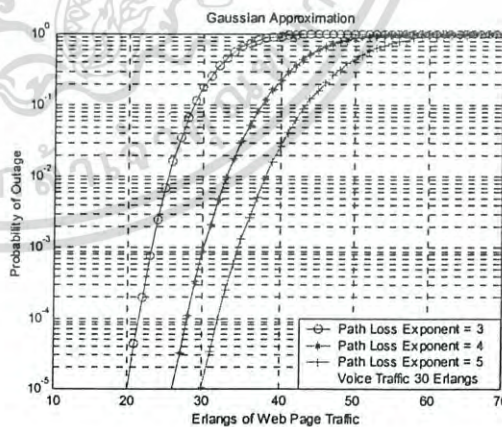


Fig. 6 Outage Probability versus web traffic in Erlangs under other cells loading 100% for different path loss exponent.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายเสรี อรุณรุ่งรัตน์
วัน เดือน ปีเกิด	17 ตุลาคม 2516 ที่กรุงเทพฯ
ที่อยู่	156 ม.7 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
ประวัติการศึกษา	2539 อดิศาสตร์ศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) ระบบโทรคมนาคม 2.) ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์
ประสบการณ์ทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2539-2541	ตำแหน่งวิศวกรบริษัทพีบีลิกเรดิโอเน็ตเวิร์ค จำกัด - ติดตั้งและทดสอบระบบวิทยุสื่อสารเฉพาะกลุ่ม (Trunk Radio Network)
พ.ศ.2541-2543	ตำแหน่งวิศวกรบริษัทเทเลแซทคอร์ปอเรชั่น จำกัด - ดูแลระบบ Video Conference - ดูแลระบบโทรทัศน์วงจรปิด (CCTV)
ปัจจุบัน	ตำแหน่งเจ้าหน้าที่ขายสื่อสารข้อมูลอาวุโสบริษัทเงินทุนธนชาติจำกัด (มหาชน) - ดูแลระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ (LAN/WAN) ในองค์กร

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์นอกเหนือจากวิทยานิพนธ์

- [1] S. Arunrungrat, C. Benjangkaprasert, M. Lertwatechakul and A. Techotchawan, "Outage Probability of W-CDMA Systems with Integrated Voice/WEB Traffic", The 1st KMITL International Conference on Integration of Science & Technology for Sustainable Development, August 25-26, 2004, Bangkok, Thailand, pp. 243-246.