



**การวิเคราะห์ความไวในระบบ CDMA
(Sensitivity Analysis in CDMA Systems)**

โดย

นายเอกพล พลเยี่ยม รหัสนักศึกษา B4705901

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษารายวิชา 427 499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม
ประจำภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2550
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ.2546
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หัวข้อโครงการ	Sensitivity Analysis in CDMA Systems
(ภาษาไทย)	การวิเคราะห์ความไวในระบบซีดีเอ็มเอ
นักศึกษา	นายเอกพล พลเยี่ยม รหัสนักศึกษา B4705901
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม)
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity) ในระบบ CDMA โดยนำเอาทฤษฎีทางความจุระบบ (System Capacity) มาใช้ในการวิเคราะห์ความไว ซึ่งพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และทำการหาสมการความไว จากนั้นนำมาแปรผลเพื่อการทำนายการเปลี่ยนแปลงของระบบ แล้วจึงทำการเปรียบเทียบผลที่ได้เพื่อหาข้อสรุป

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้จะสำเร็จไม่ได้เลย ถ้าหากไม่ได้รับสิ่งเหล่านี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดดีๆ ชี้แนะแนวทางสู่สิ่งใหม่และกำลังใจในการทำโครงการตั้งแต่ต้นจนจบ

กราบขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ที่เป็นเสมือนเกราะคุ้มครอง และหาที่สุดไม่ได้คือการให้อภัยในการกระทำที่ไม่สมควรของข้าพเจ้า

กราบขอบพระคุณคณาจารย์ต่างสาขาวิชา เจ้าหน้าที่มหาวิทยาลัย สรรพวิทยากรทั้งหลาย ที่ให้ทางให้แสงสว่างในการศึกษาจนข้าพเจ้าก้าวมาถึงจุดนี้ได้

กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ สำหรับกำลังใจและคำปลอบโยนในรูปแบบต่างๆ รวมทั้งการสนับสนุนทุกๆ กิจกรรมในชีวิตและรักข้าพเจ้าเหนือสิ่งใดในโลก

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมรุ่นสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำหรับการเปิดโอกาสให้ได้ทำงานที่ท้าทาย ได้ทนต่อสภาวะกดดันทางสังคมที่หลากหลาย การเรียนรู้อยู่กับคนหมู่มาก ชีวิตนี้คงไม่มีวันลืม

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาของข้าพเจ้า เลือดแดดทองจะไหลเวียนหล่อเลี้ยงร่างกายข้าพเจ้าจนวันตาย

คุณความดีอันใดที่เกิดจากโครงการฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายเอกพล พลเยี่ยม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูป	ง
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตการทำงาน	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 หลักการพื้นฐานของระบบซีดีเอ็มเอ	3
2.1 กลไกพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อลักษณะการแพร่กระจายของคลื่น	3
2.1.1 การสะท้อน (Reflection)	3
2.1.2 การเลี้ยวเบน (Diffraction)	3
2.1.3 การกระเจิง (Scattering)	3
2.2 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่น	3
2.2.1 การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss)	3
2.2.2 การถูกบดบัง (Shadowing หรือ Large-Scale Fading)	4
2.2.3 การหลายวิถี (Multipath Fading หรือ Small-Scale Fading)	6
2.3 หลักการพื้นฐานของ CDMA (Code Division Multiple Access)	6
2.3.1 สัญญาณแทรกสอดในการสื่อสารเชื่อมโยงขาไป (Forward Link Interference)	7
2.3.1.1 สัญญาณแทรกสอดภายในเซลล์ (Same-Cell Interference)	7
2.3.1.2 สัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่น (Other-Cell Interference)	9
2.3.2 สัญญาณแทรกสอดในการสื่อสารเชื่อมโยงกลับ (Reverse Link Interference)	12
2.3.2.1 การแทรกสอดภายในเซลล์ (Same-Cell Interference)	12
2.3.2.2 การแทรกสอดจากเซลล์อื่น (Other-Cell Interference)	12
2.3.3 ความจุในระบบเซลล์ลู่ลาร์ซีดีเอ็มเอ	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3.1 การควบคุมกำลังแบบลูปเปิด (Open Loop Power Control)	21
2.3.3.2 การควบคุมกำลังแบบลูปปิด (Close Loop Power Control)	22
บทที่ 3 หลักการพื้นฐานของกราฟฟิกของระบบซีดีเอ็มเอ	24
3.1 หลักการพื้นฐานของกราฟฟิกในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่	24
3.2 ระดับการบริการ (Grade of Service)	26
3.2.1 เออร์แลง-บี (Erlang-B)	26
3.2.2 เออร์แลง-ซี (Erlang-C)	29
3.3 ความจุเออร์แลงของระบบซีดีเอ็มเอ	32
บทที่ 4 การวิเคราะห์ความจุของระบบซีดีเอ็มเอ สำหรับการสื่อสารด้านเสียง	35
4.1 แบบจำลองของระบบและการวิเคราะห์	35
4.2 ความจุของระบบซีดีเอ็มเอแบบเซลล์เดี่ยว (Single Cell CDMA Capacity)	37
4.3 ความจุของระบบซีดีเอ็มเอแบบหลายเซลล์ (Multiple Cell CDMA Capacity)	38
บทที่ 5 การวิเคราะห์ความไวในระบบ CDMA	43
5.1 ความเป็นมา	43
5.2 แบบจำลองระบบและความจุระบบ	44
5.3 ลักษณะสำคัญและนิยามของการวิเคราะห์ความไว	46
5.3.1 ลักษณะสำคัญในการวิเคราะห์ความไว	47
5.3.2 นิยามพื้นฐานของความไว	47
5.4 ความไวในระบบ CDMA โดยวิเคราะห์ความจุระบบ	48
5.4.1 ความไวภายใต้อิทธิพลความน่าเชื่อถือของระบบ	49
5.4.2 ความไวภายใต้อิทธิพลของค่าความคลาดเคลื่อนในการรับสัญญาณ	52
5.4.3 ความไวภายใต้อิทธิพลของพารามิเตอร์อื่นๆ	56
5.4.4 เปรียบเทียบผล	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	58
6.1 บทสรุป	58
6.2 ปัญหาและอุปสรรค	59
6.3 จุดจำกัดของโครงการ	59
6.4 ประโยชน์ที่ได้จากการทำโครงการ	59
6.5 การนำไปใช้งานของโครงการ	59
6.6 ข้อเสนอแนะ	59
บรรณานุกรม	60
ประวัติผู้เขียน	61

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงระยะทางของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง	10
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะและรัศมีเซลล์ในระบบเซลลูลาร์	10
รูปที่ 2.3 สัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง (Forward link) ในระบบเซลลูลาร์CDMA	11
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะทางกายภาพของสัญญาณรบกวนแทรกสอดในการสื่อสาร เชิงโอบงขากลับ	13
รูปที่ 2.5 แสดงกำลังของสัญญาณในระบบCDMA	16
รูปที่ 2.6 แสดงกำลังจากผู้ให้บริการสองรายในสถานีฐาน โดยผู้ให้บริการที่สองมีค่า SNR มากกว่าผู้ให้บริการที่หนึ่ง	20
รูปที่ 2.7 แสดงการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์	20
รูปที่ 2.8 แสดงความจุที่ได้สูงสุดเมื่อกำลังที่รับได้ของผู้ให้บริการ ทั้งหมดมีค่าเท่ากันที่สถานีฐาน	21
รูปที่ 3.1 แสดงสถานะของห่วงโซ่มาร์โควสำหรับเออร์แลง-บี	27
รูปที่ 3.2 แสดงสถานะของห่วงโซ่มาร์โควสำหรับเออร์แลง-บี ที่สภาวะคงตัว	28
รูปที่ 3.3 แสดงสถานะของห่วงโซ่มาร์โควสำหรับเออร์แลง-ซี	30
รูปที่ 4.1 แบบจำลองของโครงข่ายเซลลูลาร์	41
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์จากฟังก์ชันความไว ภายใต้อิทธิพลของค่าความน่าเชื่อถือของระบบ	50
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความเปลี่ยนแปลงความจุระบบ (1)	51
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์จากฟังก์ชันความไว ภายใต้อิทธิพลของค่าความคาดเคลื่อนในการรับสัญญาณ	53
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความเปลี่ยนแปลงความจุระบบ (2)	55

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ระยะห่างของเซลล์วงแหวนในระบบเซลลูลาร์	11
ตารางที่ 4.1 แสดงพารามิเตอร์ของระบบ CDMA ที่รองรับการบริการด้านเสียง IS-95	37
ตารางที่ 4.2 รายละเอียดของ CDMA ชนิดแถบความถี่กว้าง (3 G)	38

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ระบบ CDMA (Code Division Multiple Access) ได้ถูกจัดให้เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 3 (3G; The Third Generation Wireless System) ซึ่งถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่สามารถตอบสนองความต้องการของมนุษย์ในปัจจุบันได้ เนื่องจากระบบ CDMA สามารถให้บริการในหลายๆ ด้าน เช่น บริการด้านเสียง (Voice) การสื่อสารข้อมูล (Data) และสื่อผสม (Multimedia) ความโดดเด่นของระบบนี้ที่มีมากกว่าระบบ FDMA (Frequency Division Multiple Access) และ TDMA (Time Division Multiple Access) คือการรองรับบริการได้เต็มรูปแบบ รวมทั้งยังรองรับจำนวนผู้ใช้ได้มากขึ้น ซึ่งในประเทศไทยนั้น ระบบ CDMA ได้ถูกนำมาเข้ามาให้บริการแล้วในบางพื้นที่และผู้ใช้ที่หันมาสนใจในระบบ CDMA ก็มีมากขึ้นทุกวัน

ระบบ CDMA นั้นมีการทำงานต่างจากระบบ FDMA และ TDMA ซึ่งเป็นการทำงานแบบแผ่กว้างสเปกตรัม (Spread Spectrum) โดยผู้ใช้จะมีรหัสที่ต่างกันออกไป (Code Sequence) อันทำให้ทราบกันว่าระบบนี้ผู้ใช้สามารถใช้ช่องสัญญาณความถี่ร่วมกันในเวลาเดียวกันได้ แต่ข้อจำกัดของระบบ CDMA คือ สัญญาณแทรกสอดอันเนื่องมาจากปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น จำนวนผู้ใช้ สภาพแวดล้อม อันเป็นผลทำให้ความจุของระบบลดลง ส่งผลไปถึงความไวของระบบ (Sensitivity) ซึ่งจัดได้ว่าเป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญของระบบที่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ เพื่อนำไปสู่การพิจารณาความน่าเชื่อถือของระบบ

ดังนั้น การวิเคราะห์ความไวของระบบ CDMA (Sensitivity Analysis in CDMA Systems) จึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจในการทำโครงการระดับปริญญาตรีอย่างยิ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการทำงานของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายระบบ CDMA
2. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ความไวในระบบ CDMA โดยพิจารณาจากความจุระบบ
3. เพื่อนำความรู้จากภาคทฤษฎีมาแปรผลและหาข้อสรุป

1.3 ขอบเขตการทำงาน

สำหรับการศึกษาของโครงการนี้ เราจะศึกษาการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity) ในระบบ CDMA โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความจุระบบ ทำให้ได้สมการความไวในรูปแบบต่างๆ จากนั้นทำการแปรผลและเปรียบเทียบ ขั้นตอนสุดท้ายคือการหาข้อสรุป

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายระบบ CDMA
2. ศึกษาทฤษฎีความจระบบ CDMA
3. ศึกษาหลักการวิเคราะห์ความไวของระบบต่างๆ
4. นำหลักการวิเคราะห์ความไวมาใช้กับทฤษฎีความจระบบ
5. แปรผลและเปรียบเทียบผล
6. สรุปผล

บทที่ 2

หลักการพื้นฐานของระบบ CDMA

2.1 กลไกพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อลักษณะการแพร่กระจายของคลื่น

กลไกพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อลักษณะการแพร่กระจายของคลื่น คือการสะท้อน (Reflection) การเลี้ยวเบน (Diffraction) และการกระเจิง (Scattering)

2.1.1 การสะท้อน (Reflection) ของคลื่นสัญญาณเกิดขึ้นเมื่อคลื่นมีการเคลื่อนที่จากสื่อกลางหนึ่งไปสู่สื่อกลางอีกสื่อกลางหนึ่ง โดยสื่อกลางชนิดที่สองจะต้องมีพื้นผิวที่ใหญ่กว่า (ความยาวคลื่นมากกว่า) เมื่อเทียบกับความยาวของคลื่นที่มาตกกระทบ สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ คลื่นบางส่วนจะมีการสะท้อนออก และส่วนที่เหลือก็เคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่สื่อกลางชนิดที่สอง ตัวอย่างวัตถุ เช่น กระจก กำแพง และพื้นผิวของขอบโลก เป็นต้น

2.1.2 การเลี้ยวเบน (Diffraction) ของคลื่นเกิดขึ้นในกรณีที่มีวัตถุบางอย่างที่มีขอบกีดขวาง (Sharp Edge) อยู่ระหว่างอุปกรณ์รับและอุปกรณ์ส่งสัญญาณ ทำให้ไม่มีเส้นทางตรง (Line of Sight) ระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองที่คลื่นสามารถผ่านไปได้ สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ คลื่นสัญญาณจะเลี้ยวอ้อมวัตถุ นั้น ๆ การเลี้ยวเบนของสัญญาณนี้เองที่ทำให้สามารถรับสัญญาณได้บางส่วนถึงแม้ว่าเครื่องรับสัญญาณจะถูกบังด้วยสิ่งกีดขวาง ด้วยเหตุนี้การเลี้ยวเบนของคลื่นจึงมีประโยชน์ต่อการส่งผ่านสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

2.1.3 การกระเจิง (Scattering) เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปตกกระทบกับวัตถุหรือพื้นผิวที่มีขนาดเล็ก (ความยาวคลื่นน้อยกว่า) เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของสัญญาณ ทำให้คลื่นสัญญาณเกิดการกระเจิงไปในทุกทิศทาง ตัวอย่างวัตถุเช่น ป้ายจราจร เสา โคมไฟตามถนน ใบไม้ และพื้นผิวที่ขรุขระ เป็นต้น

2.2 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่น

ในการสื่อสารไร้สายนั้นเมื่อสัญญาณถูกส่งผ่านช่องสัญญาณ สัญญาณนั้นจะได้รับผลกระทบจากการเดินทางผ่านช่องสัญญาณอันเนื่องมาจากทั้ง ต้นไม้ กระจก อาคาร และสิ่งแวดล้อม จากภูมิประเทศต่าง ๆ จะส่งผลให้เกิดการจางหาย (Fading) ของสัญญาณ ซึ่งจะพิจารณาได้ 3 ประเภท คือ การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss) การบดบัง (Shadowing) และการหลายวิถี (Multipath)

2.2.1 การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss) เป็นการลดทอนของสัญญาณที่แปรตามระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ โดยที่ค่าเฉลี่ยกำลังของสัญญาณจะลดลงตามค่า d^{-n} หรือ กฎของกำลังการสูญเสียตามระยะทางโดยที่ d คือ ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ ส่วน n เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งที่มีขนาดแตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อมของบริเวณที่

สัญญาณส่งผ่าน หรือ n คือตัวชี้กำลังของกฎการสูญเสียตามระยะทาง เมื่อสภาพแวดล้อมเป็นอวกาศว่าง (Free Space) n จะมีค่าเท่ากับ 2 และในสภาพแวดล้อมของระบบเซลลูลาร์ในเมืองที่มีตึก และเกิดการกบฏบังค่าของ n จะมีค่าอยู่ในช่วง 3-6 โดยจะเห็นได้จากสมการว่าเมื่อระยะ d มากขึ้นจะส่งผลให้กำลังเฉลี่ยของสัญญาณลดลงไปตามกฎการสูญเสียตามระยะทางจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ใกล้-ไกล (Near-Far effect) ขึ้นในระบบ CDMA ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่กำลังเฉลี่ยที่ถูกรับได้ที่สถานีฐานที่ถูกส่งจากเครื่องลูกข่ายอยู่ใกล้สถานีฐานจะมีค่าสูงกว่ากำลังเฉลี่ยที่ถูกรับได้จากเครื่องลูกข่ายที่อยู่ในระยะทางที่ไกลกว่า ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการรบกวนกันของสัญญาณที่ใช้ช่องสัญญาณร่วมกันในระบบซีดีเอ็มเอ

2.2.2 การกบฏบัง (Shadowing หรือ Large-Scale Fading) เกิดจากการที่สัญญาณบางส่วนกบฏบังไปชั่วขณะจากสภาพแวดล้อมรอบข้าง เช่น อาคาร และเนินเขาเป็นต้น ส่งผลให้กำลังเฉลี่ยของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างช้า ๆ เมื่อผู้ใช้บริการเคลื่อนที่ออกจากบริเวณนั้นสัญญาณที่รับได้ก็จะมีกำลังแรงคั้งเดิม ดังนั้นระดับของสัญญาณที่รับได้มักจะเปลี่ยนแปลงในช่วงระยะเท่า ๆ กับขนาดของสิ่งกีดขวาง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ประมาณหลายสิบลเมตร

จากการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากการสูญเสียตามระยะทาง ในทางทฤษฎีนั้นพบว่า ณ ตำแหน่งที่ห่างจากเครื่องส่งสัญญาณเท่า ๆ กันก็จะได้รับสัญญาณที่มีกำลังเท่ากันด้วย แต่ในทางปฏิบัตินั้นสัญญาณที่รับได้ในแต่ละบริเวณอาจจะมีกำลังที่ไม่เท่ากันก็ได้ ถึงแม้ว่าจะอยู่ห่างจากสถานีส่งด้วยระยะทางที่เท่ากัน ทั้งนี้เพราะกำลังของสัญญาณที่รับได้นั้นขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในบริเวณที่สัญญาณส่งผ่านด้วย ดังนั้นในสภาพความเป็นจริงสัญญาณเหล่านี้จะมีการกระเพื่อมขึ้นและลงบนค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้จากการสูญเสียตามระยะทาง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในลักษณะนี้ สามารถจำลองได้ด้วยการใช้ตัวแปรแรนดอมที่มีการกระจายแบบล็อกนอร์มอล (Lognormal Distribution) ซึ่งอธิบายถึงปรากฏการณ์บดบัง (Shadowing) แบบสุ่มที่เกิดขึ้นเหนือตำแหน่งต่าง ๆ ที่ทำการวัด โดยมีช่วงของเครื่องรับ-เครื่องส่งเดียวกัน แต่หลายเส้นทางของการแพร่ผ่าน เมื่อกำหนดให้ X เป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ย m และความแปรปรวน σ^2 จะนิยามตัวแปรสุ่ม R ที่มีการแจกแจงแบบล็อกนอร์มอล โดยที่มีความสัมพันธ์ $R = e^X$ หรือ $X = \ln R$ เพราะฉะนั้นจะได้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของ R ซึ่งมีความน่าจะเป็นที่มีการแจกแจงเป็นล็อกนอร์มอล

$$p(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma r} \exp\left(-\frac{(\ln r - m)^2}{2\sigma^2}\right), \quad r \geq 0 \quad (2.1)$$

จากความสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่มแบบล็อกนอร์มอล $R = e^X$ เมื่อ X เป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ย m และความแปรปรวน σ^2 โดย $X = G(m, \sigma^2)$ เมื่อพิจารณาการสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่านที่วัดได้จากเครื่องรับในหน่วย dB ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ [H/B]
 $L(\text{dB}) = L_0(\text{dB}) + \sigma_c(\text{dB})G(0,1) = G(L_0, \sigma_c^2)(\text{dB})$ เมื่อ $L_0(\text{dB})$ เป็นค่ามัธยฐาน (Median

Value) ของการสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่าน $\sigma_c (dB)$ เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถเขียนได้เป็น $L(dB) = L_0(dB) + \sigma_c(dB)X$ เมื่อ X เป็นตัวแปรสุ่มเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีความแปรปรวนเป็นหนึ่ง เพราะฉะนั้นสามารถเขียนการสูญเสียที่เป็นตัวแปรสุ่ม L_a เป็น

$$\begin{aligned} L_a &= 10^{L(dB)/10} = 10^{[L_0(dB) + \sigma_c(dB)X]/10} = L_{0a} 10^{\sigma_c X/10} \\ &= L_{0a} V \end{aligned} \quad (2.2)$$

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

$$V = 10^{\sigma_c X/10} = e^{\beta \sigma_c X} \quad (2.3)$$

โดย $\beta = (\ln 10)/10 = 0.2303$

เมื่อต้องการหาค่าโมเมนต์ของตัวแปรสุ่มแบบล็อกนอร์มอล ที่แสดงถึงการสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่าน L_{0a} ได้เป็น

$$L_0 = L_{0a} V = L_{0a} e^{\beta \sigma_c X} = e^{\beta(L_0 + \sigma_c X)} \quad (2.4)$$

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

$$E\{L_a\} = L_{0a} e^{\beta^2\sigma_c^2/2} \quad (2.5)$$

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

$$\text{Var}\{L_a\} = E\{L_a^2\} - [E\{L_a\}]^2 = L_{0a}^2 e^{\beta^2\sigma_c^2} (e^{\beta^2\sigma_c^2} - 1) \quad (2.7)$$

เป็นโคเนตอันดับหนึ่ง โนเนตอันดับสอง และความแปรปรวนของ L_a ตามลำดับ

2.2.3 การหลายวิถี (Multipath Fading หรือ Small-Scale Fading) เกิดจากการที่สายอากาศของเครื่องรับสัญญาณอยู่ใกล้พื้นผิวมาก เช่น การใช้งานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้ใช้บริการมักจะอยู่สูงจากพื้นผิวประมาณไม่เกิน 3 เมตร ดังนั้นในการแพร่ของสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่เป็นสถานะแวดล้อมที่มีวัตถุต่าง ๆ ที่เป็นสิ่งกีดขวางรอบข้างจึงส่งผลให้เกิดการสะท้อน การหักเห และการกระเจิง ของสัญญาณในหลายทิศทาง ส่งผลให้สัญญาณที่รับได้ประกอบด้วยจำนวนสัญญาณหลาย ๆ สัญญาณเดินทางมาจากทิศทางที่ต่างกันและโดยทั่วไปแล้วสัญญาณเหล่านี้มักจะ

เดินทางมาถึงเรื่องรับด้วยเวลาที่แตกต่างกัน และมีทั้งขนาดและเฟสที่ต่างกันแปรเปลี่ยนตามระยะทาง ซึ่งในบางระยะทางสัญญาณที่มาจากหลายทิศทางอาจจะมีเฟสที่ทำให้สัญญาณที่รับได้มีการหักล้างกัน แต่ในบางช่วงการรวมกันของสัญญาณที่รับได้ก็จะเป็นแบบเสริมกัน จึงส่งผลให้สัญญาณที่รับได้มีการลดทอนของสัญญาณและเมื่อสัญญาณเหล่านี้มารวมเข้าด้วยกันจะได้สัญญาณที่มีแอมพลิจูดแปรเปลี่ยนได้มาก รวมถึงทำให้ระดับของสัญญาณที่รับได้มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างบ่อยครั้ง (ระดับของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างรวดเร็ว) เพียงเครื่องโทรศัพท์ที่มีการเคลื่อนที่ด้วยระยะทางสั้น ๆ ไม่ก็ความยาวคลื่น

ในการลดทอนของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นจะสามารถพิจารณาเป็น 2 ลักษณะ คือ Large-Scale Fading และ Small-Scale Fading เมื่อมีการลดทอนกำลังของสัญญาณเฉลี่ย หรือ Path Loss เนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ใหญ่ ๆ จะเป็นในลักษณะที่รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมตามภูมิประเทศระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ แล้วจะส่งผลให้เกิด Large-Scale Fading จะให้ผลการลดทอนของกำลังเฉลี่ยที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง (d^{-n}) ดังนั้นในลักษณะนี้จะเป็นการอธิบายโดยการสูญเสียเฉลี่ยตามระยะทาง (Mean- Path Loss) และการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยที่มีการแจกแจงแบบล็อกนอร์มอล ส่วนการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการหลายวิถีที่มีการจางหายแบบเร็ว นั้นจะส่งผลให้เกิดการเฟดดิ้งแบบ Small-Scale Fading

2.3 หลักการพื้นฐานของ CDMA (Code Division Multiple Access)

หลักการเบื้องต้นของระบบ CDMA ได้จัดแบ่งความถี่ที่มีอยู่ทั้งหมดออกเป็นช่วง โดยแต่ละช่วงมีความกว้างเท่ากับ 1.25 MHz โดยวิธี CDMA สังเกตว่าคลื่นพาห์หนึ่งความถี่มีขนาดแบนด์วิดท์ที่กว้างกว่าของระบบอื่น ๆ เช่น GSM (200 kHz) มาก ด้วยขนาดแบนด์วิดท์ที่กว้างขนาดนี้ CDMA จึงอนุญาตให้ผู้ใช้โทรศัพท์จำนวนมากจำนวนหนึ่งส่งสัญญาณเสียงลงบนคลื่นความถี่เดียวกันได้ ซึ่งหมายความว่าผู้ใช้ทุกๆ คนที่ใช้คลื่นพาห์เดียวกันจะรบกวนกันในเชิงความถี่ตลอดเวลาการใช้งาน หากแต่ว่าโทรศัพท์แต่ละเครื่องจะสามารถแยกแยะว่าสัญญาณส่วนใดที่เป็นของตนเองได้โดยอาศัยชุดรหัสที่แตกต่างกันในการรับและส่งข้อมูล ด้วยเหตุนี้จึงเรียกระบบนี้ว่า Code Division Multiple Access (CDMA) ชุดรหัสที่ใช้การทำสเปกตรัมเหล่านี้มีชื่อว่า PN (Pseudorandom Noise) ซึ่งชุดรหัสแต่ละชุดที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติที่เรียกว่า Orthogonal กับชุดรหัสอื่น ๆ ทั้งหมด

ขั้นตอนการสร้างสัญญาณสำหรับการส่งออกเริ่มด้วยการนำสัญญาณเสียงที่มีอยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัลซึ่งมีอัตราบิตข้อมูลค่อนข้างต่ำ (เช่น 9600 bps) มาคูณกับสัญญาณ PN ซึ่งมีอัตราบิตข้อมูลที่สูงอย่างมาก (1.228 Mcps) ผลลัพธ์ที่ได้ก็คือ ข้อมูลที่อัตราการส่งสูงกว่าสัญญาณเสียงที่ต้องการจะส่งมาก ด้วยเหตุนี้จึงเรียกว่ามีการสเปกตรัม (Spread Spectrum) เกิดขึ้นและแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งข้อมูลนี้ก็มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยคือ 1.25 MHz (สัญญาณที่ผ่าน

กระบวนการสเปกตรัมแล้วมักจะใช้ Mcps แทน Mbps) ส่วนที่เครื่องรับสัญญาณที่ปลายทางก็จะทำการดีสเปรด (Despread) สัญญาณที่รับได้เพียงถึงสัญญาณเสียงกลับคืนมา

ในระบบซีดีเอ็มเอนั้น ในเซลล์ที่อยู่ติดกันสามารถที่จะใช้ความถี่เดียวกันได้ หากพิจารณาจำนวนของผู้ใช้บริการของระบบที่จะรองรับได้นั้น จะมีปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อความจุของระบบ เช่น ปริมาณการแทรกสอดระหว่างผู้ใช้งานด้วยกันเอง ความถูกต้องของการควบคุมกำลังของเครื่องดูข่ายอันเนื่องมาจากปัญหาความใกล้-ไกล

2.3.1 สัญญาณแทรกสอดในการสื่อสารเชื่อมโยงขาไป (Forward Link Interference)

2.3.1.1 สัญญาณแทรกสอดภายในเซลล์ (Same-Cell Interference) ในทางอุดมคติแล้วจะไม่มีสัญญาณแทรกสอดภายในเซลล์ในการสื่อสารเชื่อมโยงขาไป เนื่องจากแต่ละช่องสัญญาณในการสื่อสารเชื่อมโยงขาไปนั้นออร์โธกอนอลซึ่งกันและกันทุก ๆ ช่องสัญญาณรวมทั้งช่องสัญญาณนำร่องในการสื่อสารเชื่อมโยงขาไปนั้นจะสามารถแยกแยะสัญญาณออกจากกันได้ โดยการคูณสัญญาณที่รับเข้ามาด้วยขบวนการชิปที่พอเหมาะ แล้วทำการรวมหรืออินทิเกรตชิปในช่วง 64 ชิปของวอลซ์ฟังก์ชัน (Walsh function) ซึ่งผลที่ได้จากขบวนการนี้คือสัญญาณขบวนข้อมูลเบสแบนด์ของช่องสัญญาณที่ต้องการโดยปราศจากสัญญาณแทรกสอดใด ๆ จากการสื่อสารในทิศทางสื่อสารเชื่อมโยงขาไป แต่อย่างไรก็ตามการแพร่กระจายคลื่นในโทรศัพท์เคลื่อนที่จะทำให้เกิดการแทรกสอดในทิศทางสื่อสารเชื่อมโยงขาไปเนื่องจากการเกิดการหลายวิถี (Multipath) นั้นเอง

สมมติว่า $I_{o,f}$ คือความหนาแน่นกำลังสัญญาณทั้งหมดที่รับได้ที่เครื่องรับจากสถานีฐานที่ให้บริการอยู่ ซึ่งสัญญาณนี้ประกอบด้วยสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดอันเนื่องมาจากหลายวิถี (Multipath) ซึ่งกำลังของสัญญาณในเส้นทาง k กำหนดให้เป็น β_k เมื่อ $0 \leq \beta_k \leq 1$ ซึ่งส่วนของสัญญาณ อันเนื่องมาจากเส้นทางที่ k คือ

$$I_{o,f} = \text{ความหนาแน่นสเปกตรัมของเส้นทางที่ } k = \beta_k I_{o,f} \quad (2.8)$$

และถ้าในการแพร่กระจายประกอบด้วยสัญญาณจำนวน k เส้นทาง จะได้ว่า

$$I_{o,f} = \sum_{k=1}^k I_{o,k} = I_{o,f} \sum_{k=1}^k \beta_k \quad (2.9)$$

หรือ
$$\sum_{k=1}^k \beta_k = 1$$

หากสมมติว่าที่เครื่องรับมีวงจรรับสัญญาณจำนวน k วงจร โดยแต่ละวงจรตั้งค่าไว้สำหรับรับสัญญาณแต่ละเส้นทางใน k เส้นทาง ให้ E_{bj} เป็นพลังงานบิตข้อมูลทั้งหมดที่รับได้ที่สถานีฐานแล้วพลังงานบิตข้อมูลอินพุตของวงจรรับสัญญาณอันดับที่ j จะมีค่าเป็น

$$E_{bj} = \text{พลังงานบิตข้อมูลจากเส้นทางที่ } k = \beta_k E_{b0} \quad (2.10)$$

กำหนดให้ I_{scj} เป็นความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณแทรกสอดจากภายในเซลล์ต่อเส้นทางอันดับ j ซึ่งหาได้จาก

$$I_{scj} = \sum_{k \neq j} I_{0,k} = I_{o,f} \sum_{k \neq j} \beta_k = I_{o,f} (1 - \beta_j) \quad (2.11)$$

ซึ่งจะได้อัตราส่วนความสัมพันธ์ของพลังงานบิตข้อมูลข่าวสารต่อสัญญาณรบกวน (ที่รวมทั้งสัญญาณแทรกสอดด้วย) ของวงจรดีโมดูเลเตอร์ที่ตั้งค่าไว้สำหรับสัญญาณจากเส้นทาง j เป็น

$$\frac{E_{bj}}{(N_{0,T})_j} = \frac{E_{b0} \beta_j}{N_0 + I_{0,\infty} + I_{o,f} (1 - \beta_j)} \quad (2.12)$$

เมื่อ N_0 คือ กำลังสเปกตรัมของเทอร์มอลนอยซ์

$I_{0,\infty}$ คือ กำลังสเปกตรัมของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง

$I_{o,f}$ คือ กำลังสเปกตรัมรวมของสัญญาณที่รับได้จากเซลล์ภายใน

$(N_{0,T})_j$ คือความหนาแน่นรวมสัญญาณรบกวนซึ่งรวมทั้งสัญญาณแทรกสอดในการสื่อสารเชื่อมโยงขาไปหากเครื่องลูกข่ายใช้การรวมสัญญาณแบบ Maximum Ratio Combining จากเส้นทางทั้ง k เส้นทาง จะได้ว่า

$$\frac{E_b}{N_{0,T}} = \sum_{k=1}^k \frac{E_b}{(N_{0,T})_j} = \sum_{k=1}^k \frac{E_{b0} \beta_j}{N_0 + I_{0,\infty} + I_{o,f} (1 - \beta_j)} \quad (2.13)$$

สำหรับเครื่องลูกข่ายที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานแล้ว สัญญาณแทรกสอดภายในเซลล์จะมีค่ามากกว่าสัญญาณรบกวนชนิดอื่น ๆ ซึ่งจะสามารถตัดสัญญาณรบกวนอื่น ๆ ทิ้งไปได้ สมการ (2.13) จึงสามารถประมาณได้เป็น

$$\frac{E_b}{N_{0,T}} \approx \sum_{k=1}^k \frac{E_{b0} \beta_j}{I_{o,f} (1 - \beta_j)} = \frac{E_{b0}}{I_{o,f}} \sum_{k=1}^k \frac{\beta_j}{1 - \beta_j} = \frac{E_{b0}}{I_{0,sc}} \quad (2.14)$$

เมื่อ $I_{0,sc}$ คือส่วนที่เป็นสัญญาณแทรกสอดของความหนาแน่นสัญญาณรวมที่รับได้ในเซลล์ ($I_{o,f}$) ดังนั้นความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมที่มีผลกระทบต่อเครื่องรับของสัญญาณแทรกสอดภายในเซลล์จะนิยามเป็น

$$I_{0,sc} = \frac{I_{o,f}}{\sum_{j=1}^j \frac{\beta_j}{1 - \beta_j}} \quad (2.15)$$

2.3.1.2 สัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่น (Other-Cell Interference) ในระบบ CDMA นั้น สัญญาณที่รับได้จากเซลล์อื่น ๆ จะมีลักษณะเป็นสัญญาณแทรกสอดต่อสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องลูกข่าย ซึ่งกำลังของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาซึ่งสามารถกำหนดได้ว่าเป็นสัญญาณสุ่มแบบลือกนอร์มอล นั่นคือกำลังของสัญญาณแทรกสอดจะเป็นตัวแปรสุ่มชนิดเกาส์ (Gaussian)

กำลังของสัญญาณแทรกสอด (dBm) = ค่าเฉลี่ย(dBm) + ค่าศูนย์-เฉลี่ยตัวแปรสุ่มชนิดเกาส์

ค่าเฉลี่ยกำลังสัญญาณแทรกสอดจะสามารถคาดเดาได้โดยการใช้โมเดลของการลดทอนในการแพร่กระจายคลื่น ตัวอย่างเช่น การลดทอนสัญญาณในการแพร่กระจายจะเป็นสัดส่วนกับกำลังอันดับที่ n ของระยะทางเป็นต้น ซึ่งในการคำนวณทางคณิตศาสตร์แล้ว สัญญาณจากเซลล์อื่นในทิศทาง การสื่อสารเชื่อมโยงขาไปจะสามารถหาค่าได้ในรูปของตัวแปรสุ่มแบบลือกนอร์มอล (Lognormal) 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 เป็นตัวแปรสุ่มเกาส์เซียน

หรือ

$$I_i = \bar{I}_i 10^{\sigma_{dB} W_i / 10} = \text{Const} \frac{1}{r_i^n} 10^{\sigma_{dB} W_i / 10} \quad (2.16)$$

เมื่อ \bar{I}_i = ค่ากลางของกำลังสัญญาณแทรกสอดจากสถานีฐาน i

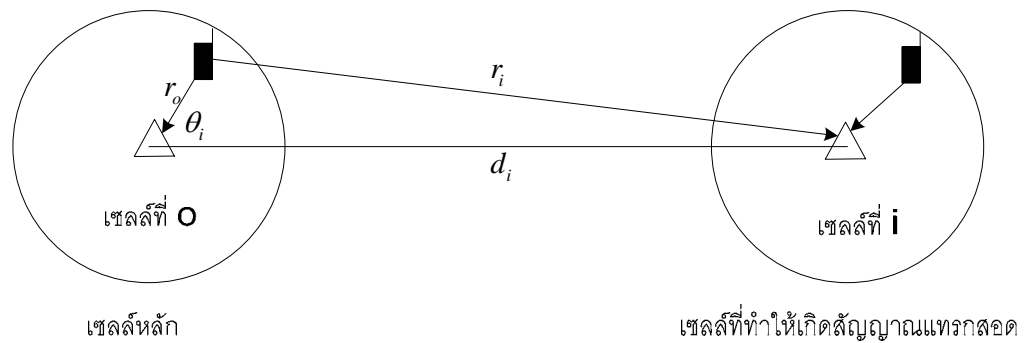
r_i = ระยะทางจากเครื่องลูกข่ายถึงสถานีฐาน i

n = กฎของกำลังการลดทอนจากการแพร่กระจายคลื่น

W_i = ค่าศูนย์-เฉลี่ย หน่วยความแปรปรวนของตัวแปรสุ่มเกาส์

σ_{dB} = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแปรปรวนข้อมูลในช่วง 6 ถึง 13 เดซิเบล

พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบมากที่สุดสำหรับวิเคราะห์สัญญาณรบกวนจากเซลล์ข้างเคียง คือ ค่ากลางของกำลังสัญญาณแทรกสอด \bar{I}_i ในสมการที่ (2.10) และตำแหน่งของเครื่องลูกข่าย หรือ พารามิเตอร์ r_i เพราะตำแหน่งของเครื่องลูกข่ายจะเป็นตัวกำหนดปริมาณสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้น

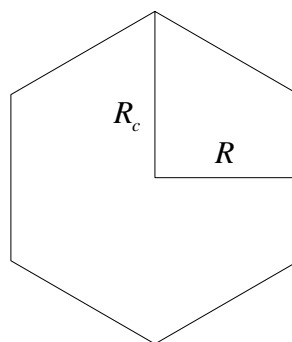


รูปที่ 2.1 แสดงระยะทางของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง

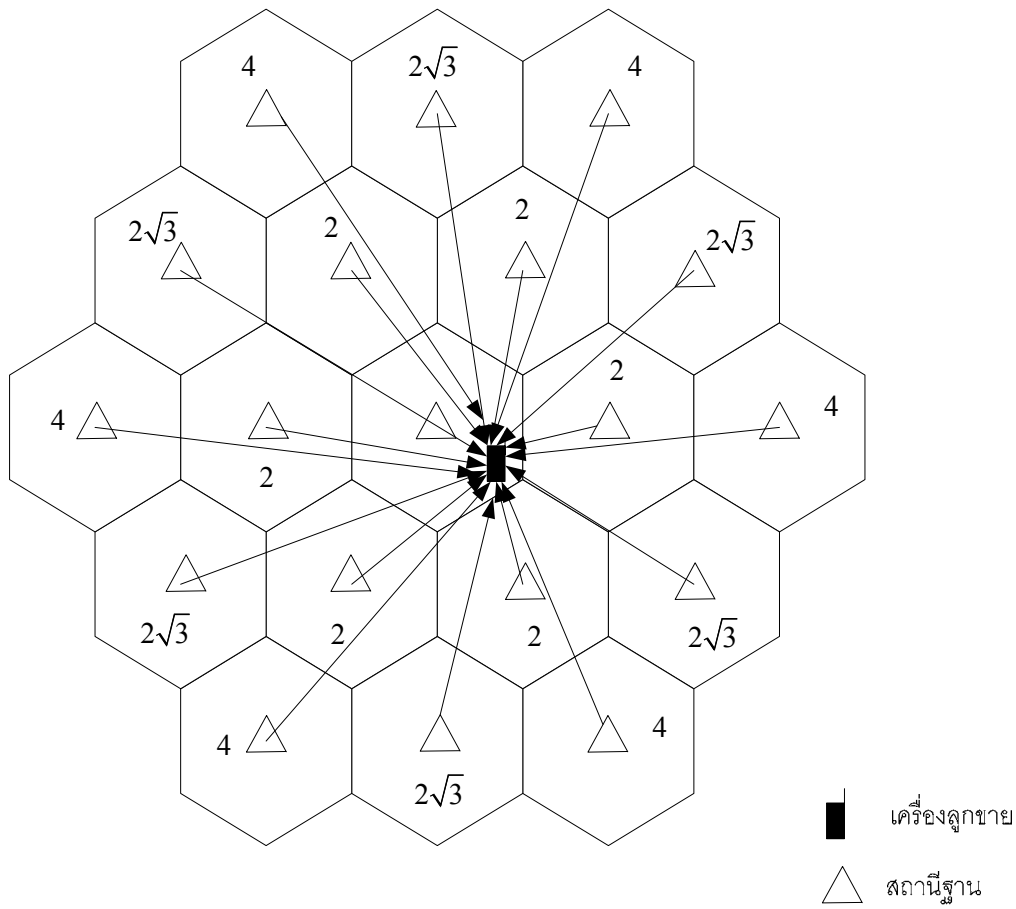
หากสมมติว่ามีเซลล์สมมาตรดังแสดงในรูปที่ (2.1) เพื่อใช้ในการหาปริมาณสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นกับเครื่องลูกข่ายที่ตำแหน่ง (r, θ_i) ในเซลล์หลัก (Home Cell) ซึ่งจากรูป (2.1) จะสามารถหาระยะทางของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ i ได้เป็น

$$r_i(r, d_i, \theta_i) = \sqrt{r^2 + d_i^2 - 2rd_i \cos \theta_i} \quad (2.17)$$

เมื่อ d คือระยะห่างระหว่างเซลล์หลักกับเซลล์ที่ทำให้เกิดสัญญาณแทรกสอด ซึ่งรูปที่ (2.1) จะเป็นรูปแสดงการวางเซลล์อย่างง่าย และรูปที่ (2.2) จะแสดงการหาระยะทางทั้งในทอมของรัศมีเซลล์จากมุมถึง-มุม (R_c) หรือรัศมีจากจุดศูนย์กลางถึงด้าน R โดยที่ $R = \sqrt{3} \frac{R_c}{2}$ เพื่อความสะดวกในการหาระยะทางระหว่างเซลล์ แต่ทว่าในระบบเซลล์ลูนาร์นั้นจะมีการวางเซลล์แบบรวงผึ้งที่มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยจะมีเซลล์ที่ก่อให้เกิดสัญญาณแทรกสอดในลักษณะวงแหวนรอบเซลล์ ซึ่งระยะห่างเซลล์หลักกับวงแหวนเหล่านี้จะแสดงในตารางที่ (2.1) และเมื่อนำค่าระยะห่างเซลล์ที่ได้จากตารางที่ (2.1) มาวาดเป็นระบบเซลล์ลูนาร์แล้ว จะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ (2.3) ที่แสดงให้เห็นถึงการเกิดสัญญาณแทรกสอดที่เครื่องลูกข่ายที่ตำแหน่ง (r, θ_i)



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะและรัศมีเซลล์ในระบบเซลล์ลูนาร์



รูปที่ 2.3 สัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง (Forward Link) ในระบบเซลล์ลาร์ CDMA ตารางที่ 2.1 ระยะห่างของเซลล์วงแหวนในระบบเซลล์ลาร์

วงที่	ตำแหน่งที่	ระยะห่าง	จำนวน
1	1	$2R = R_c \sqrt{3}$	6
2	1	$2R\sqrt{3} = 3R_c$	6
	2	$4R = 2R_c \sqrt{3}$	6
3	1	$2R\sqrt{7} = R_c \sqrt{21}$	6
	2	$2R\sqrt{7} = R_c \sqrt{21}$	6
	3	$6R = 3R_c \sqrt{3}$	6
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
m	I	$2R\sqrt{m^2 + i^2 - mi}$	6

หากสมมติว่าการแพร่กระจายคลื่นเป็นสัดส่วนกับกำลัง n นั่นคือ

$$\begin{aligned} \text{การลดทอนจากการแพร่กระจาย, } L(r_i) &= \text{กำลังสัญญาณแทรกสอดที่รับได้} / \text{กำลังส่ง} \\ &= \frac{I_i}{P_i} = \text{const } r_i^{-n} \end{aligned}$$

เมื่อ P_i คือกำลังส่งของสถานีฐาน i และ r_i คือระยะห่างจากสถานีฐาน i ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.14) แล้วจะได้ค่ากลางของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงทั้งหมดในรูปของผลรวมของค่ากลางจากเซลล์ข้างเคียงทั้งหมด นั่นคือ

$$I_{oc} = \sum_i I_i = \sum_i P_i L(r_i) = P_i \sum_i L(r_i) = \text{const} P_i \sum_i [r_i(r, d_i, \theta_i)]^{-n} \quad (2.18)$$

2.3.2 สัญญาณแทรกสอดในการสื่อสารเชื่อมโยงขากลับ (Reverse Link Interference)

2.3.2.1 การแทรกสอดภายในเซลล์ (Same-Cell Interference) ในการแทรกสอดที่เกิดขึ้นนี้จะประกอบด้วยการรวมของสัญญาณจากผู้ให้บริการรายอื่น ๆ ที่ภาครับในสถานีฐานเดียวกัน สำหรับระบบซีดีเอ็มเอสัญญาณที่ใช้โดยเครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่องที่ทำการสื่อสารจะใช้ย่านความถี่เดียวกัน ในเวลาเดียวกัน ซึ่งสัญญาณรบกวนแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะสามารถจัดอยู่ในรูปของสัญญาณรบกวนชนิดไวท์นอยส์ที่มีย่านความถี่จำกัดได้ (Band-Limited White Noise) โดยเกือบทั้งหมดของสัญญาณรบกวนที่ภาครับของสถานีฐานจะเกิดขึ้นเนื่องมาจากการแทรกสอดของสัญญาณจากเครื่องลูกข่าย จำนวนของผู้ให้บริการที่เข้ามาใช้งานขณะใดขณะหนึ่งจะถูกทำให้มีจำนวนสูงสุดได้ โดยการทำให้กำลังที่รับได้ของแต่ละผู้ใช้งานในสถานีฐานนั้นมีค่าเท่ากัน และมีค่าต่ำเท่าที่จะเป็นไปได้ในขณะที่สอดคล้องกับสมรรถนะของการเชื่อมโยง การควบคุมแบบไดนามิกของกำลังที่ส่งของเครื่องลูกข่ายจึงเป็นส่วนที่จำเป็นต่อการออกแบบส่วนการสื่อสารเชื่อมโยงขากลับ เพราะเมื่อมีการใช้การควบคุมกำลังสำหรับ N ของผู้ใช้งานในเซลล์ แล้วปริมาณของกำลังของการแทรกสอดที่ภาครับของสถานีฐานเนื่องจากเซลล์เดียวกันจะถูกสมมติโดย

$$I_{sc} = (N-1)S\alpha_r \quad (2.19)$$

เมื่อ S เป็นกำลังของแต่ละเครื่องลูกข่ายที่ภาครับ และ α_r เป็นค่าเฉลี่ยของแฟกเตอร์ของ Voice Activity ของการสื่อสารเชื่อมโยงขากลับ

2.3.2.2 การแทรกสอดจากเซลล์อื่น (Other-Cell Interference)

ในรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงในการสื่อสารเชื่อมโยงขากลับโดยสมมติว่าแต่ละเซลล์มีขนาดเท่ากัน และมีการใช้เทคนิคในการควบคุมกำลังส่ง ซึ่งกำลังสัญญาณแทรกสอดจากเครื่องลูกข่ายที่อยู่ในเซลล์ข้างเคียง (เซลล์ B) จะมีค่าเป็น

ระดับกำลังของสัญญาณที่ต้องการที่สถานีฐาน \times การลดทอนสัญญาณจากการแพร่กระจาย $= S \times r^4$

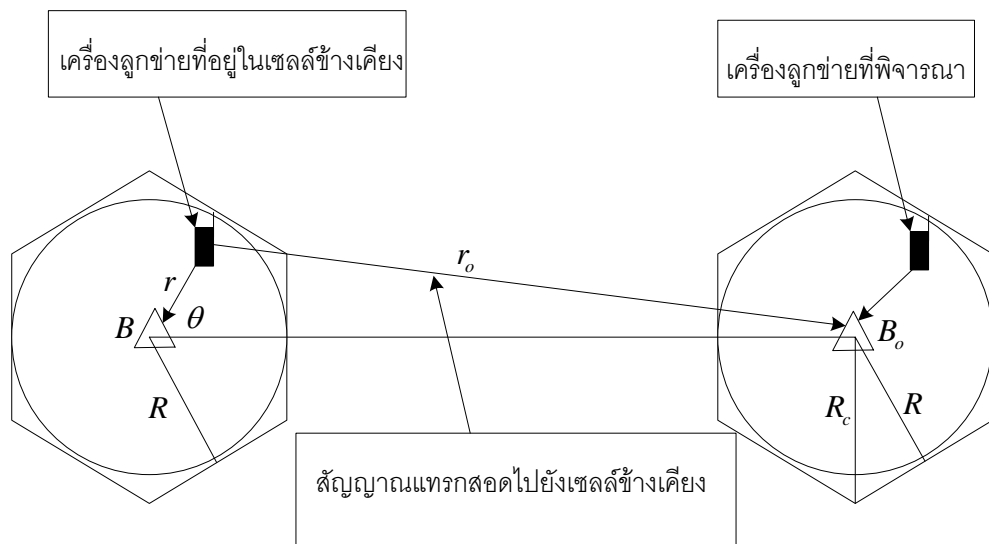
เมื่อ r คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องลูกข่ายไปยังสถานีฐาน B (เซลล์ข้างเคียง)

ดังนั้นกำลังของสัญญาณแทรกสอดจากเครื่องลูกข่ายนี้ที่ไปรบกวนสถานีฐาน B_o ที่พิจารณาจะมีค่าเป็น

$$P_o = \alpha_r S \left(\frac{r}{r_o} \right)^4 \quad (2.20)$$

โดยระยะทาง r_o เป็นระยะทางระหว่างเครื่องลูกข่ายในเซลล์ข้างเคียงไปยังสถานีฐานที่พิจารณา

ปริมาณของสัญญาณแทรกสอดจะขึ้นอยู่กับจำนวนเครื่องลูกข่ายที่ใช้งานภายในเซลล์ B โดยจะมีค่าเป็นผลรวมของกำลังสัญญาณแทรกสอดของเครื่องลูกข่ายจำนวน N เครื่อง



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะทางกายภาพของสัญญาณรบกวนแทรกสอดในการสื่อสารเชิงโยงซากลับ

2.3.3 ความจุในระบบเซลล์คู่ดาร์ซีดี CDMA

เมื่อพิจารณาระบบที่มีเซลล์เดียวโดยไม่พิจารณาผลกระทบจากสัญญาณรบกวนต่าง ๆ จะพบว่า ความจุ N_c ของระบบในเทอมของปริมาณผู้ใช้ที่แยกที่ฟ จะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบดังนี้

$$\left(\frac{C}{I} \right)_{req} = SNR_{req} = \frac{\alpha_r S}{(N_c - 1)\alpha_r S} = \frac{1}{N_c - 1} \quad (2.21)$$

หากพิจารณาระบบที่มีหลายเซลล์แล้ว ความจุ N ของแต่ละเซลล์จะมีค่าน้อยกว่าความจุ N_c ที่สามารถให้บริการได้ เนื่องจากสัญญาณรบกวนการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง ดังนั้นเมื่อไม่พิจารณาค่า

การลดทอดจากสัญญาณรบกวนชนิดต่าง ๆ จะสามารถหาอัตราส่วนกำลังสัญญาณคลื่นพาห้ต่อกำลังสัญญาณแทรกสอดในระบบหลายเซลล์ ในเทอมของความจุ N ได้เป็น

$$SNR_{req} = \frac{\alpha_r S}{(N-1)\alpha_r S + \beta N \alpha_r S} = \frac{1}{(N-1) + \beta N} \quad (2.22)$$

เมื่อ β คือ แฟกเตอร์ของการแทรกสอดของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียง

ความจริงของระบบนั้นขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัย เช่น การตีโมดูลของภาครับ ความถูกต้องของการควบคุมกำลัง กำลังของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นจริง อันเนื่องมาจากผู้ใช้บริการอื่นทั้งจากภายในเซลล์เดียวกัน และจากเซลล์อื่นข้างเคียง

ในการสื่อสารดิจิทัล เรามีความสนใจค่าของ $\frac{E_b}{N_o}$ หรือพลังงานต่อบิตต่อความหนาแน่นกำลังของสัญญาณรบกวน โดย $\frac{E_b}{N_o}$ สามารถที่จะเรียกเป็นอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน SNR (Signal to Noise Ratio) โดยที่พลังงานต่อบิตจะเท่ากับกำลังของสัญญาณโมดูลเฉลี่ยในช่วงเวลาคาบบิตดังสมการ

$$E_b = ST \quad (2.23)$$

เมื่อ S เป็นกำลังสัญญาณโมดูลเฉลี่ย และ T เป็นเวลาบิตของข้อมูล เราสามารถแทนค่าบิต R ได้ในสมการข้างต้นเป็น

$$E_b = \frac{S}{R} \quad (2.24)$$

เพราะฉะนั้น

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

ซึ่งเมื่อนำไปแสดงความสัมพันธ์กับความหนาแน่นกำลังของสัญญาณรบกวน N_o กำลังของสัญญาณรบกวนทั้งหมด และความถี่ W เป็นดังสมการ

$$\frac{E_b}{N_o} = SNR \frac{W}{R} \quad (2.26)$$

จะได้ว่า $\frac{E_b}{N_o}$ นั้นจะสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน SNR ของการเชื่อมโยงและอัตราส่วนของแบนด์วิดท์ที่ใช้ส่ง W และอัตราบิต R โดยเราเรียกอัตราส่วนนี้ว่า อัตราส่วนขยายการประมวลผล (Processing Gain) ของระบบ

เมื่อพิจารณาในส่วนของการสื่อสารเชื่อมโยงขากลับ (Reverse Line) ของระบบ CDMA ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงส่วนที่จำกัดในเทอมของความจุ การสื่อสารเชื่อมโยงขากลับนี้เป็นการเชื่อมโยงจากเครื่องลูกข่ายที่ติดต่อกับยังสถานีฐาน เราสมมติให้ระบบนั้นเป็นการควบคุมกำลังส่งที่สมบูรณ์ก่อนในการพิจารณา ซึ่งหมายความว่ากำลังที่ส่งจากเครื่องลูกข่ายทั้งหมดจะถูกควบคุมได้อย่างสมบูรณ์ที่ภาครับของสถานีฐาน โดยกำลังที่รับได้ของเครื่องลูกข่ายทั้งหมดจะมีค่าเท่ากันภายใต้สมมติฐานดังกล่าว ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของแต่ละผู้ใช้บริการจะมีค่าเป็นดังสมการ

$$\text{SNR} = \frac{1}{N-1} \quad (2.27)$$

โดย N เป็นจำนวนของผู้ใช้บริการทั้งหมดในขณะนั้น ที่ได้ค่าดังกล่าวเนื่องจากว่ากำลังของสัญญาณรบกวนทั้งหมดในกลุ่มนี้จะเท่ากับผลรวมของกำลังจากแต่ละผู้ใช้บริการนั่นเองมีค่าเท่ากับ $N-1$ จากสมการข้างบนเราจะไม่ได้คิดค่าของสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (Thermal Noise) เมื่อเราแทนสมการที่ (2.27) ในสมการที่ (2.26) จะได้

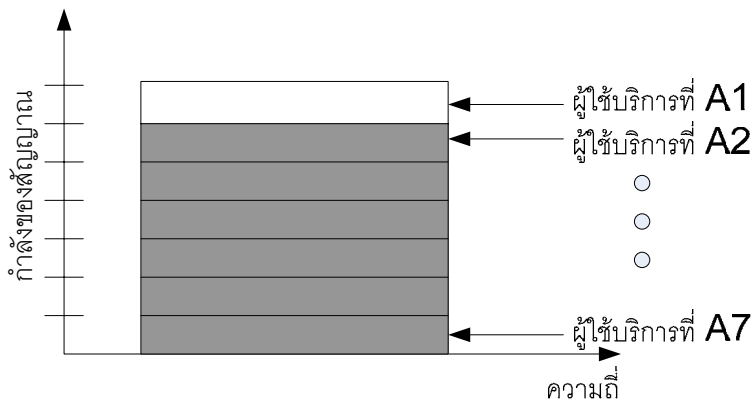
$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{1}{(N-1)} \frac{W}{R} \quad (2.28)$$

จากสมการที่ (2.28) จะได้

$$N-1 = \frac{\left(\frac{W}{R}\right)}{\left(\frac{E_b}{N_o}\right)} \quad (2.29)$$

เมื่อ N มีค่ามาก ๆ เพราะฉะนั้น

$$N \approx \frac{\left(\frac{W}{R}\right)}{\left(\frac{E_b}{N_o}\right)} \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.5 แสดงกำลังของสัญญาณในระบบ CDMA

ผลของโหลดคิง Loading ที่มีผลต่อความจุ

จากสมการข้างบน เราสามารถจะใช้เป็นแบบจำลองในการอธิบายความสามารถในการรองรับผู้ใช้บริการในเซลล์เดียว โดยเซลล์นี้เป็นลักษณะรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omni-Directional) และไม่ได้คิดเซลล์ข้างเคียง และใช้การส่งเต็ม 100 % ของเวลา ในความเป็นจริงจะมีเซลล์อยู่หลายเซลล์มากในระบบการสื่อสารส่วนบุคคล หรือระบบเซลล์ลู่ดาร์ CDMA เมื่อพิจารณาในผลของผู้ใช้บริการในเซลล์อื่น แม้ว่าผู้ใช้บริการจากเซลล์อื่นดังกล่าวเหล่านี้จะถูกควบคุมกำลังโดยเซลล์ของตนเองแต่กำลังของสัญญาณจากผู้ใช้บริการดังกล่าวก็จะยังคงเกิดสัญญาณแทรกสอดต่อเซลล์อ้างอิง ดังนั้นเซลล์อ้างอิงจะถูกโหลดโดยผู้ใช้บริการจากเซลล์อื่น ๆ โดยสมการข้างบนจะสามารถแสดงผลของการถูกโหลดคิงได้เป็น

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{1}{(N-1)} \frac{W}{R} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) \quad (2.31)$$

เมื่อ η เป็นแฟคเตอร์ของการโหลด โดยค่าของ η จะอยู่ในช่วง 0-100% ในตัวอย่างแสดงดังรูป นั้น แฟคเตอร์การโหลดคิงมีค่า 0.5 ซึ่ง (1+0.5) หรือ 150% ที่มีการเพิ่มขึ้นของการแทรกสอดที่เกิดขึ้นที่เซลล์อ้างอิง

โดยส่วนกลับของแฟคเตอร์ (1+ η) นั้น บางครั้งเราเรียกว่าเป็นแฟคเตอร์ของการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ (Frequency Reuse Factor) โดยจะมีค่าเป็น

$$F = \frac{1}{1+\eta} \quad (2.32)$$

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

ผลของการโหลดคิง

การแบ่งเซลล์ออกเป็นเซกเตอร์ย่อย (Sectorization) ที่มีผลต่อความจุ การแทรกสอดจากผู้ใช้บริการอื่นในเซลล์อื่นที่เกิดขึ้นที่เซลล์อ้างอิงสามารถจะถูกทำให้ลดลงได้ เมื่อเซลล์อ้างอิงดังกล่าวถูกทำการแบ่งเซกเตอร์ แทนที่จะใช้สายอากาศรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omni-Directional Antenna) ซึ่งมีแพทเทิร์นของสายอากาศเป็น 360 องศา เซลล์สามารถจะถูกแบ่งเป็น 3 เซกเตอร์ ดังนั้นแต่ละเซกเตอร์จะมีการรับสัญญาณ 120 องศา ในการทำเช่นนี้ สายอากาศที่เป็นเซกเตอร์จะปฏิเสธสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้บริการอื่นที่ไม่ได้อยู่ในแพทเทิร์นของสายอากาศ การจัดการดังกล่าวนี้จะลดผลของการโหลดคิงโดยแฟกเตอร์ประมาณค่าเท่ากับ 3 ถ้าเซลล์ที่ถูกแบ่งเซกเตอร์เป็น 6 เซกเตอร์จะส่งผลให้การโหลดคิงลดลงโดยแฟกเตอร์ ประมาณ 6 โดยแฟกเตอร์ดังกล่าวนี้จะถูกเรียกว่าเป็น Sectorization gain λ โดย

$$\lambda = \frac{\int_0^{2\pi} I(\theta) d\theta}{\int_0^{2\pi} \left(\frac{G(\theta)}{G(0)} \right) I(\theta) d\theta} \quad (2.33)$$

โดย $G(\theta)$ เป็นแพทเทิร์นของสายอากาศแบบระนาบของสายอากาศเซกเตอร์ $G(0)$ เป็นอัตราขยายของสายอากาศสูงสุด ซึ่งสมมติให้เกิดขึ้นที่แนวตั้ง (Boresight, $\theta = 0$) และ $I(\theta)$ เป็นกำลังของสัญญาณแทรกสอดที่รับได้จากผู้ใช้บริการในเซลล์อื่น โดยเป็นฟังก์ชันของการอินทิเกรตในสมการข้างบนนั้นกระทำในช่วง 0 ถึง 360 องศา จากสมการดังกล่าวสามารถคำนวณค่าอัตราขยายของเซกเตอร์ออกมาตรง ๆ นั้นซึ่งขึ้นโดยตรงกับอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้เช่นเดียวกับการแจกแจงในระยะทางของผู้ใช้บริการที่เป็นการแทรกสอดจากเซลล์อื่น จะเห็นได้ว่าสมการดังกล่าวไม่ได้พิจารณาแพทเทิร์นทางแนวเส้นตรงขึ้นไป ในความเป็นจริง λ นั้นมีค่าเป็น 2.5 สำหรับระบบที่มีการแบ่งเป็น 3 เซกเตอร์ และมีค่าเป็น 5 สำหรับระบบที่มีการแบ่งเป็น 6 เซกเตอร์ โดยสามารถปรับสมการ โดยมีผลจากเซกเตอร์ได้เป็น

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{1}{(N-1)} \frac{W}{R} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) \lambda \quad (2.34)$$

ผลของ Voice Activity ที่มีผลต่อความจุ

จากสมการข้างบนเราได้สมมติให้ผู้ใช้บริการส่งในเวลาเต็มที่เต็ม 100 % คือส่งตลอดเวลา แต่ในทางปฏิบัติตัวเข้ารหัสเสียงที่ระบบ IS-95 ใช้ นั้นจะใช้เป็นอัตราที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งหมายความว่า อัตราของทางออกของตัวเข้ารหัสทางเสียงจะถูกปรับได้ให้สอดคล้องกับแพทเทิร์นในการพูดของผู้ใช้บริการ ตัวอย่างเช่น ถ้าผู้ใช้บริการไม่ได้พูดในช่วงของการสนทนา แล้วอัตราการเข้ารหัสของตัวเข้ารหัสทางเสียงจะถูกทำให้ต่ำลง เป็นการป้องกันกำลังงานจากการส่งที่ไม่สำเร็จผล

จากอัตราการเข้ารหัสเสียงที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้นี้ เราสามารถลดกำลังงานที่ถูกส่งออกไปได้ และนั่นก็เป็นการลดสัญญาณแทรกสอด ในทางสถิติของการพูดนั้น โดยทั่วไปการสนทนาจะเกิดขึ้นอยู่ในระหว่าง 40 % ถึง 50 % ของเวลาทั้งหมดโดยการเข้าใช้การเข้ารหัสเสียงที่มีอัตราเปลี่ยนแปลงได้ ระบบจะสามารถลดกำลังของการแทรกสอดโดยแฟคเตอร์ของ Voice Activity นี้ ดังนั้นจึงมีการแสดงสมการที่มีการ Voice Activity เป็น

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{1}{(N-1)} \frac{W}{R} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) \lambda \frac{1}{\alpha} \quad (2.35)$$

โดย α เป็นแฟคเตอร์ของ Voice Activity จะเห็นได้ว่าผลของ Voice Activity จะเป็นการทำให้ส่วนของสัญญาณแทรกสอดลดลง เพราะฉะนั้นเราจะได้แสดงค่าของ N ได้เป็นดังสมการ

$$N = 1 + \frac{\left(\frac{W}{R} \right)}{\left(\frac{E_b}{N_o} \right)} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) \lambda \frac{1}{\alpha} \quad (2.36)$$

ซึ่งเมื่อ N มีค่ามาก ๆ ดังนั้น

$$N \approx \frac{\left(\frac{W}{R} \right)}{\left(\frac{E_b}{N_o} \right)} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) \lambda \frac{1}{\alpha} \quad (2.37)$$

ในการสื่อสารระบบ CDMA นั้นการควบคุมกำลังส่งมีความจำเป็นต่อระบบมาก เนื่องจากผู้ใช้บริการทั้งหมดนั้นใช้ความถี่ทั้งหมดร่วมกันโดยผ่านรหัส PN ดังนั้นผู้ใช้บริการแต่ละรายจึงดูเหมือนเป็นสัญญาณรบกวนต่อผู้ใช้บริการอื่น ดังนั้นกำลังของผู้ใช้บริการแต่ละรายจะต้องมีการควบคุมเพื่อไม่ให้มีผู้ใช้บริการรายใดรายหนึ่งเป็นสัญญาณที่ไปรบกวนต่อผู้ใช้บริการอื่น ๆ ที่ใช้ความถี่ร่วมกันอยู่

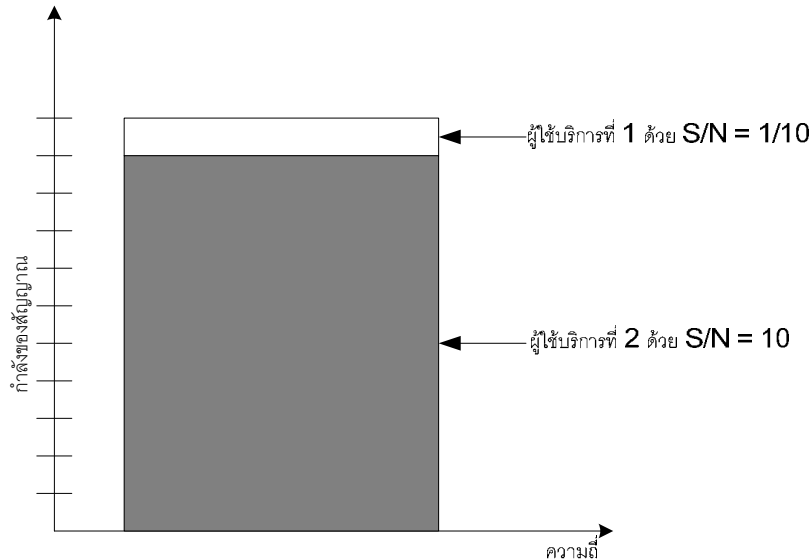
ในการแสดงถึงการควบคุมกำลังส่งนั้นมีความจำเป็นต่อระบบ CDMA อย่างไร เราจะทำการพิจารณาในเซลล์เดียวที่มีการสมมติให้มีผู้ใช้บริการอยู่สองราย โดยจะมีการอธิบายในการเชื่อมโยงขาขึ้นซึ่งเป็นส่วนการเชื่อมโยงที่เป็นตัวจำกัดของระบบ CDMA ผู้ใช้บริการที่สองเป็นผู้ใช้บริการที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากกว่าผู้ใช้บริการที่หนึ่ง ถ้าในกรณีที่ไม่มี การควบคุมกำลังส่งผู้ใช้บริการทั้งคู่จะมีกำลังที่มีค่าแน่นอนซึ่งให้เท่ากับ P อย่างไรก็ตามเพราะว่าความแตกต่างของระยะทางจะส่งผลให้กำลังที่รับได้จากผู้ใช้บริการที่สองจะมีค่ามากกว่ากำลังที่รับได้จากผู้ใช้บริการ

ที่หนึ่ง ถ้าเราสมมติให้ความแตกต่างของระยะทางของผู้ใช้บริการที่สองมากกว่าผู้ใช้บริการที่หนึ่ง เป็นสิบเท่า ดังนั้นผู้ใช้บริการที่หนึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรง

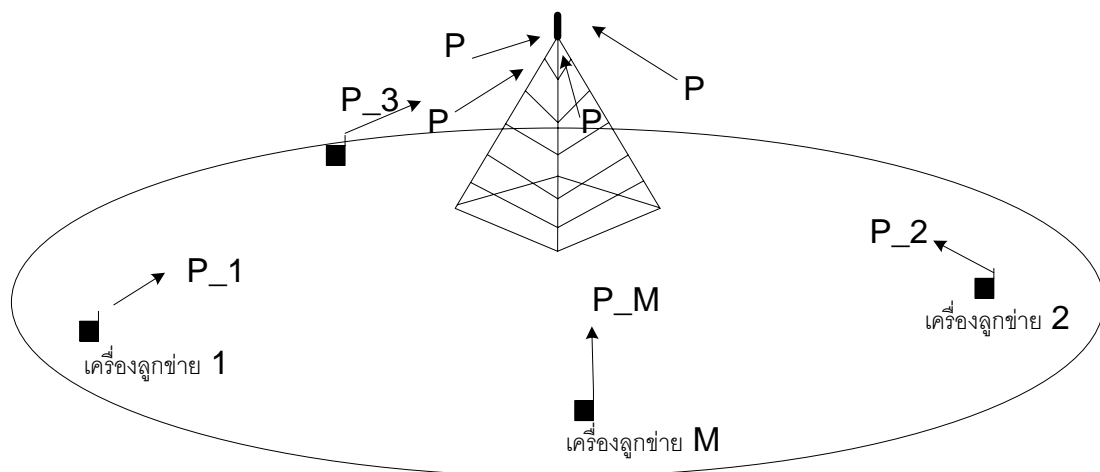
ถ้าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ต้องการ $\left(\frac{S}{N}\right)_{required}$ มีค่าเท่ากับ 1/10 ดังนั้นเราสามารถจะเห็นความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจนระหว่างค่าของอัตราส่วนต่อสัญญาณรบกวนของทั้งสองผู้ใช้บริการ ถ้าเราไม่ได้คิดสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (Thermal Noise) ดังนั้นอัตราส่วนต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้บริการที่สอง $\left(\frac{S}{N}\right)_2$ จะมีค่าเท่ากับ 10 และอัตราส่วนต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้บริการที่หนึ่ง $\left(\frac{S}{N}\right)_1$ จะมีค่าเท่ากับ 1/10 นั่นคือผู้ใช้บริการที่สองจะมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สูงกว่าก็จะส่งผลให้คุณภาพสัญญาณดีกว่าผู้ใช้บริการที่หนึ่ง ซึ่งความไม่เท่ากันนี้จะถูกเรียกว่า ปัญหาความใกล้-ไกล (Near-Far problem) ของระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส

ระบบในจุดดังกล่าวนี้จะเป็นการกล่าวถึงขอบเขตของความจุ เพราะเนื่องจากเหตุผลที่ว่าเราพยายามที่จะเพิ่มผู้ใช้บริการที่สามเข้าไปซึ่งส่งด้วยกำลัง P ณ ตำแหน่งใด ๆ ในเซลล์ ดังนั้นอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้บริการที่สามไม่สามารถจะถึง $\left(\frac{S}{N}\right)_{required}$ ได้ยิ่งไปกว่านั้นถ้าเราให้ผู้ใช้บริการที่สามเข้าใช้งานในระบบ ไม่เพียงแต่ที่ผู้ใช้บริการที่สามใช้งานไม่ได้ เพราะว่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนไม่ถึง $\left(\frac{S}{N}\right)_{required}$ แต่จะส่งผลถึงอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่สองให้ลดลงต่ำกว่า $\left(\frac{S}{N}\right)_{required}$ อีกด้วย

การควบคุมกำลังนั้นถูกสร้างขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาความใกล้-ไกล และเพื่อให้ได้ความจุที่สูงสุด การควบคุมกำลังจะกระทำโดยให้กำลังที่ถูกส่งมาจากแต่ละผู้ใช้บริการจะถูกควบคุมให้มีการรับได้ของกำลังดังกล่าวที่สถานีฐานมีค่าเท่ากัน ดังในรูปที่ (2.7) แสดงแนวคิดดังกล่าว

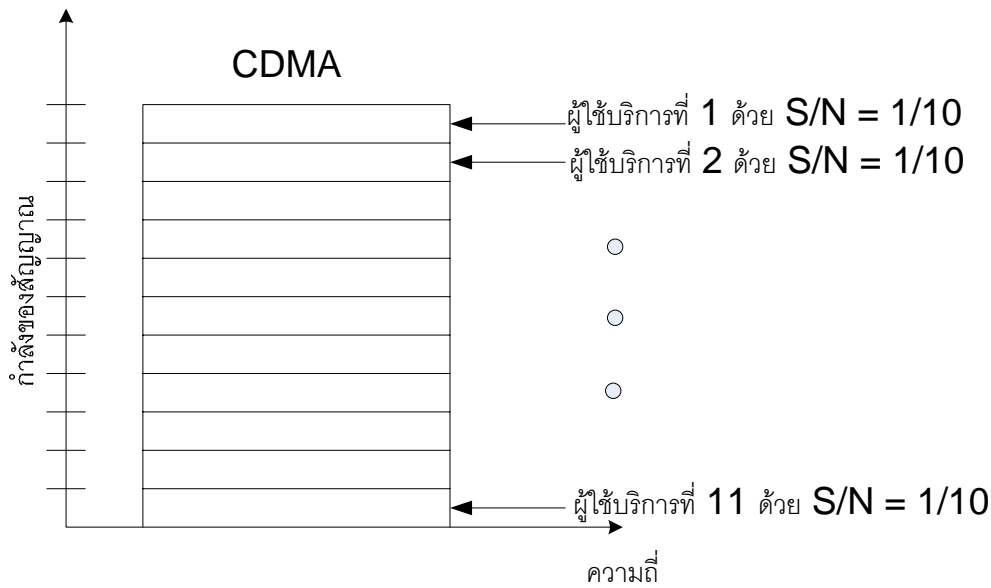


รูปที่ 2.6 แสดงกำลังจากผู้ให้บริการสองรายในสถานีฐาน โดยผู้ให้บริการที่สองมีค่า SNR มากกว่าผู้ให้บริการที่หนึ่ง



รูปที่ 2.7 แสดงการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์

ภายในเซลล์ถ้ากำลังที่ส่งของแต่ละผู้ใช้บริการถูกควบคุม จะทำให้กำลังที่รับได้ที่สถานีฐานของแต่ละผู้ใช้บริการนั้นมีค่าเท่ากันคือ P_r ดังนั้นจะทำให้สามารถรองรับผู้ใช้บริการได้มากขึ้น จากตัวอย่างที่ผ่านมาถ้า $\left(\frac{S}{N}\right)_{required}$ ยังคงเป็น 1/10 ดังนั้นจำนวนของผู้ใช้บริการทั้งหมดจะเท่ากับ 11 ที่สามารถรองรับได้โดยระบบ CDMA แล้วความจุจะเพิ่มขึ้นได้มากที่สุดจากการควบคุมกำลัง



รูปที่ 2.8 แสดงความจุที่ได้สูงสุดเมื่อกำลังที่รับได้ของผู้ใช้บริการทั้งหมดมีค่าเท่ากันที่สถานีฐาน

2.3.3.1 การควบคุมกำลังแบบลูปเปิด (Open Loop Power Control)

ในรูปแบบของการควบคุมกำลังแบบนี้ ตัวเครื่องลูกข่ายจะเป็นตัวจัดการกระบวนการเอง ทั้งสิ้นไม่ได้เกี่ยวข้องกับสถานีฐานเลย กระบวนการควบคุมแบบเปิดจะเป็นกระบวนการที่กระทำอย่างต่อเนื่องหลังจากที่สถานีฐานนั้นรับรู้การขอเข้าใช้งานช่องสัญญาณของเครื่องลูกข่าย และหลังจากที่เครื่องลูกข่ายเริ่มส่งในช่องสัญญาณโทรศัพท์

หลังจากที่มีการเรียกเข้า เมื่อเครื่องลูกข่ายเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ ภายในเซลล์ แล้วการสูญเสียเชิงระยะทางระหว่างเครื่องลูกข่ายกับสถานีฐานจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง จากผลดังกล่าว กำลังที่ถูกรับได้ที่เครื่องลูกข่ายจะมีการเปลี่ยนแปลงและการควบคุมกำลังแบบลูปเปิดจะทำการตรวจสอบสัญญาณกำลังที่ถูกรับที่เครื่องลูกข่ายอย่างต่อเนื่อง และจะมีการปรับกำลังของสัญญาณที่ถูกส่งออกไป

กล่าวได้จากการควบคุมกำลังแบบเปิดจะอยู่บนพื้นฐานของการประมาณการสูญเสียเชิงระยะทางในทิศทางไปยังสถานีฐาน การควบคุมกำลังนี้เป็นการชดเชยในส่วนของปรากฏการณ์ถูกบดบังแบบลือกอนอร์มอล และการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ โดยเป็นการสหสัมพันธ์ระหว่างการจางหายในส่วนการเชื่อมโยงไปข้างหน้ากับส่วนการเชื่อมโยงย้อนกลับ อย่างไรก็ตามความถี่ของการเชื่อมโยงขาไปและขากลับนั้นก็ใช้ความถี่ที่ต่างกัน การควบคุมกำลังแบบเปิดจึงไม่เพียงพอและมีความช้าเกินไปที่จะสามารถชดเชยการจางหายเร็วแบบเรย์ลีได้ หรือในอีกแง่หนึ่งเมื่อมีการจางหายเร็วแบบเรย์ลี จะไม่สามารถใช้การควบคุมกำลังแบบลูปเปิดมาชดเชยการจางหายเร็วแบบเรย์ลีได้

2.3.3.2 การควบคุมกำลังแบบลูปเปิด (Close Loop Power Control)

การควบคุมกำลังแบบลูปเปิดนั้นถูกใช้สำหรับการชดเชยสำหรับการเปลี่ยนแปลงของกำลังเนื่องจากเฟดดิ้งแบบเรย์ลีแบบรวดเร็ว โดยเป็นลูปปิดเพราะว่ากระบวนการจะเกี่ยวข้องกับทั้งสถานีฐานและเครื่องลูกข่าย เมื่อเครื่องลูกข่ายได้รับช่องสัญญาณทราฟฟิกและเริ่มการสื่อสารกับสถานีฐาน กระบวนการของการควบคุมกำลังแบบปิดจะกระทำร่วมกันไปด้วยการควบคุมกำลังแบบลูปเปิด ในการควบคุมกำลังแบบลูปปิด ทางสถานีฐานจะทำการตรวจวัดทั้งสัญญาณของทางการสื่อสารเชื่อมโยงขากลับ (Reverse Link) และคุณภาพของการเชื่อมโยง ถ้าคุณภาพของการเชื่อมโยงเริ่มที่จะไม่ดี ทางสถานีฐานจะมีคำสั่งไปยังเครื่องลูกข่ายผ่านการเชื่อมโยงขาไป (Forward Link) ทำให้การเพิ่มกำลังของสัญญาณเพิ่มขึ้น ถ้าในกรณีที่คุณภาพของสัญญาณดีเกินไป นั่นคือการที่มีกำลังของสัญญาณสูงเกินไปในการสื่อสารเชื่อมโยงขากลับ ในกรณีนี้ทางสถานีฐานจะสั่งให้ทางเครื่องลูกข่ายลดกำลังที่ส่งลง ในอุดมคติอัตราความผิดพลาดต่อเฟรมนั้นจะเป็นตัววัดคุณภาพของการเชื่อมโยงที่ดี แต่เพราะว่าจะทำให้ใช้เวลานาน สำหรับสถานีที่ใช้จำนวนบิตที่จะมาคำนวณให้ถูกต้อง ดังนั้น $\frac{E_b}{N_o}$ จึงถูกใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพการสื่อสารเชื่อมโยงขากลับ

การควบคุมกำลังแบบลูปปิดมีกระบวนการในการกระทำดังนี้

1. สถานีฐานจะทำการตรวจวัด $\frac{E_b}{N_o}$ อย่างต่อเนื่องในการสื่อสารเชื่อมโยงขากลับ
2. ถ้า นั้นมีค่าสูงเกินไป $\frac{E_b}{N_o}$ (เช่นเป็นการเกินกว่าจุดเริ่มเปลี่ยน) ดังนั้นสถานีฐานจะมีคำสั่งให้เครื่องลูกข่ายลดกำลังลงมา
3. ถ้า นั้นมีค่าต่ำเกินไป $\frac{E_b}{N_o}$ (เช่นเป็นการต่ำกว่าจุดเริ่มเปลี่ยน) ดังนั้นสถานีฐานจะมีคำสั่งให้เครื่องลูกข่ายเพิ่มกำลังขึ้นไป สถานีฐานจะส่งคำสั่งของการควบคุมกำลังไปยังเครื่องลูกข่ายโดยใช้การเชื่อมโยงขาไป โดยคำสั่งในการควบคุมจะเรียกว่าเป็น บิตของการควบคุมกำลัง (Power Control Bit: PCBs) ปริมาณของกำลังของเครื่องลูกข่ายที่ถูกสั่งให้เพิ่มหรือลดนั้นโดยทั่วไปจะมีค่า 1 dB และ -1 dB เนื่องจากการควบคุมกำลังแบบลูปปิด นั้นหมายความว่า จะเป็นการชดเชยเฟดดิ้งแบบเรย์ลีอย่างรวดเร็ว ดังนั้น การตอบสนองของเครื่องลูกข่ายต่อคำสั่งในการควบคุมกำลังจึงต้องมีความเร็วมาก จากเหตุผลดังกล่าวบิตของ PCBs เหล่านี้จะถูกส่งตรงผ่านช่องสัญญาณทราฟฟิก แต่เมื่อมีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับบิตเหล่านี้ก็จะทำให้เกิดผลกระทบต่อการควบคุมกำลังเกิดขึ้นเช่นกัน

ในการควบคุมกำลังแบบลูปิดนั้นจะมีอยู่ 3 จุด ที่เราต้องกล่าวถึงเพิ่มเติมดังนี้

1. บิตของการควบคุมกำลังส่งนั้นไม่ได้ถูกป้องกันจากความผิดพลาด ดังนั้น PCBs นั้นถูกมัลติเพล็กซ์ไปบนช่องสัญญาณไปข้างหน้าหลังจากตัวเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน ดังนั้นจึงไม่ได้มีการป้องกันความผิดพลาดให้แก่บิตดังกล่าว ซึ่งเป็นการกระทำเพื่อลดการหน่วงเวลาในการถอดรหัสและดึงเอาออกมาของบิตที่ป้องกันความผิดพลาด และเนื่องจากการควบคุมกำลังแบบลูปิดนั้นถูกใช้ชดเชยการเฟดดิ้งแบบเรย์ลีย์อย่างรวดเร็ว ทำให้ PCBs จึงไม่ได้ป้องกันความผิดพลาดเพื่อที่จะให้เครื่องลูกข่ายสามารถนำบิตดังกล่าวมาให้ได้เร็ว และทำการปรับกำลังที่ส่งให้ได้ตามนั้น จากเหตุผลดังกล่าวความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตสำหรับช่องสัญญาณย่อยของการควบคุมกำลังอาจจะสูงกว่าช่องสัญญาณทราฟฟิก ถ้าไม่มีการจัดการเป็นพิเศษ

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

ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะลูปิดภายในของกระบวนการควบคุมแบบลูปิด การมีอยู่ของลูปิดภายในคือการมี Predetermined SRN Threshold โดยการตัดสินใจให้มีการเพิ่มขึ้นและลดลงของกำลัง เมื่อเราพยายามที่จะรักษาให้มีค่าของอัตราความผิดพลาดต่อเฟรมนั้นคงที่ไว้ที่ค่าที่เราสามารถยอมรับได้ และเมื่อสิ่งแวดล้อมของตัวเครื่องลูกข่ายไม่ได้เป็นความสัมพันธ์แบบ 1 ต่อ 1 ระหว่าง FER และ $\frac{E_b}{N_o}$ ดังนั้น ค่า Threshold ของ $\frac{E_b}{N_o}$ จะมีการปรับแบบไดนามิกเพื่อรักษาให้ค่า FER มีค่าคงที่ซึ่งเราสามารถยอมรับได้ การปรับของค่า Threshold ของ $\frac{E_b}{N_o}$ นี้จะกระทำโดยอ้างอิงจากลูปิดภายนอกของการควบคุมกำลังแบบลูปิด โดยกระบวนการลูปิดภายนอกของการควบคุมกำลังแบบลูปิดนั้นไม่ได้นิยามสำหรับมาตรฐาน IS-95 โดยกระบวนการผลิตที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานจะอิสระที่สร้างอัลกอริทึมของลูปิดนอกได้เอง

3. การควบคุมกำลังแบบลูปิดในระหว่างการเปลี่ยนถ่ายเซลล์อย่างนุ่มนวล (Soft Handoff) ระบบ IS-95 CDMA จะมีการใช้การเปลี่ยนถ่ายเซลล์อย่างนุ่มนวล เมื่อเครื่องลูกข่ายมีการเคลื่อนที่ระหว่าง 2 หรือ 3 เซลล์ โดยการเปลี่ยนถ่ายเซลล์อย่างนุ่มนวลเป็นกระบวนการ โดยที่เครื่องลูกข่ายยังคงรักษาการติดต่ออยู่กับสถานีฐาน 2 หรือ 3 สถานีฐานที่เครื่องลูกข่ายนั้นมีการเคลื่อนที่อยู่ ในระหว่างการเปลี่ยนถ่ายเซลล์อย่างนุ่มนวล เครื่องลูกข่ายจะรับเฟรมของช่องสัญญาณทราฟฟิกจาก 2 หรือ 3 สถานีฐาน และบนช่องสัญญาณทราฟฟิกดังกล่าวนี้อาจจะมีความขัดแย้งกันเองในส่วนของบิต PCBs ในสถานการณ์เหล่านี้ ตัวเครื่องลูกข่ายจะกระทำตามกฎต่อไปนี้ ถ้าเพียงสถานีฐานใดสถานีหนึ่งมีคำสั่งให้ลดกำลังลงมา เครื่องลูกข่ายก็จะลดกำลังลงมาและเครื่องลูกข่ายจะเพิ่มกำลังเมื่อสถานีฐานทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการทำเปลี่ยนถ่ายเซลล์อย่างนุ่มนวลมีคำสั่งจากทุกสถานีฐานให้เพิ่มกำลังเท่านั้น

บทที่ 3

หลักการพื้นฐานของทราฟฟิกของระบบ CDMA

3.1 หลักการพื้นฐานของทราฟฟิกในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

ปัญหาในการให้บริการระบบโทรศัพท์ คือ จะทำอะไรที่จะให้ระบบสามารถให้บริการที่ดีกับผู้ใช้บริการโดยใช้ต้นทุนที่เหมาะสม สิ่งที่ต้องพิจารณาถึงคือการพัฒนาระบบให้มีความจุสูงสุด โดยการคำนึงถึงต้นทุนต่างๆ และสร้างระบบให้รองรับความต้องการตามที่ได้ประมาณเอาไว้ได้ เทคนิคนี้เรียกว่า “วิศวกรรมทราฟฟิก” (Traffic Engineering) การใช้เทคนิคดังกล่าวจะอยู่ในพื้นฐานในหลักการของหลักความน่าจะเป็นและทฤษฎีการรอ (Queuing Theory)

วิศวกรรมทราฟฟิก (Traffic Engineering) จะแตกต่างกันที่ระบบแต่ละระบบนั้นจะจัดการกับความหนาแน่นของปริมาณทราฟฟิกอย่างไร ซึ่งมีวิธีการอยู่ 2 วิธีด้วยกัน อย่างแรกคือ ระบบการเรียกที่ไม่มีกรรอกคอย ซึ่งจะทำการตัดสายทิ้งโดยไม่ให้บริการ วิธีนี้เรียกว่า Blocked-Call-Cleared (BCC) อย่างที่สองคือ ระบบการเรียกที่มีการกรรอกคอย ซึ่งจะทำการจัดคิวสายที่ใช้และให้บริการเมื่อสามารถทำได้ วิธีนี้เรียกว่า Blocked-Call-Delay (BCD) ระบบเครือข่ายโทรศัพท์แบบ Circuit Switching ทั่วไปนั้น จะใช้ระบบการเรียกที่ไม่มีกรรอกคอย เช่น เครือข่ายโทรศัพท์ที่มีการใช้อย่างหนาแน่นจะใช้สัญญาณสายไม่ว่างในการปฏิเสธไม่ให้บริการ ในทางตรงข้ามเครือข่ายข้อมูลหลายเครือข่ายจะใช้ระบบการเรียกที่มีการกรรอกคอย

ในสถานการณ์ใดๆ ที่การรอรับบริการซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนในกระบวนการ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ความต้องการของผู้ใช้บริการในระบบซึ่งเรียกว่า “โหลดขอบริการ” (Offered Load) หรือความต้องการของผู้ใช้บริการ และสามารถอยู่ในรูปของการเรียกของโทรศัพท์ โหลดขอบริการจะถูกนิยามโดยสองกระบวนการที่เกิดขึ้นแบบสุ่มดังนี้

1. อัตราการเข้ามาเฉลี่ยของผู้ใช้บริการที่ร้องขอรับบริการ λ (Average Arrival)
2. อัตราเฉลี่ยของระยะเวลาที่ผู้ใช้บริการต้องการใช้บริการ (Average Holding Time) T

ระบบที่สมบูรณ์จะต้องไม่มีการกรรอกคอย (Delay) ถ้าจำนวนผู้ใช้บริการ n คน ต่อเชื่อมเข้าระบบ การทำระบบไม่มีการกรรอกคอยจะต้องมีการเชื่อมต่อโดยตรงโดยใช้สูตร $n(n-1)/2$ ซึ่งเป็นไปไม่ได้แน่นอน ดังนั้นระบบโทรศัพท์จึงได้รับการออกแบบเพื่อไม่มีการกรรอกคอย (Delay) ที่เหมาะสมในระหว่างช่วงทราฟฟิกเป็นปกติ และตัดสายในช่วงเวลาที่มีทราฟฟิกมาก

สำหรับระบบการให้บริการใดๆ ก็ตามที่มีผู้บริการ (Servers) เพียงพอที่จะสามารถให้บริการผู้ใช้บริการได้ทันทีที่ร้องขอ ซึ่งค่าเฉลี่ยจำนวนผู้ใช้บริการ (Servers) ที่ไม่ว่างได้มาจากผลคูณของ λ และ T เสมอ โดยความสัมพันธ์นี้จะอิสระจากการเข้ามาและเวลาที่ให้บริการ (Holding Time) จากผลของการตั้งสมมุติฐาน Offered Load (a) (จำนวนสายที่ขอใช้บริการ) ถูกกำหนดจาก

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

โดยทั่วไปค่าเฉลี่ยการเข้ามา และค่าเฉลี่ยเวลาที่ให้บริการนั้นจะแสดงหน่วยของเวลา ซึ่งจำนวนปริมาณจะแสดงในหน่วยของเออร์แลง (Erlangs)

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

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

เออร์แลงสามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{60 \text{ Calls}}{3600 \text{ Second}} \times \frac{240 \text{ Second}}{\text{Call}} = 4 \text{ เออร์แลง}$$

นอกจากเออร์แลงแล้วระบบโทรศัพท์จะวัดค่าหน่วยเป็น CCS (Hundred-Call Seconds) ต่อชั่วโมง (ปริมาณการใช้สายเป็นเวลา 100 วินาที) โดย CCS คำนวณจาก

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

$NCBH$ = จำนวนการโทรใน 1 ชั่วโมงที่ชั่วโมงใช้สูงสุด (Busy Hour)

HT = ค่าเฉลี่ยเวลาที่ให้บริการ (Holding Time)

1 ชั่วโมง มี 3600 วินาที ดังนั้นกราฟฟิกขอบริการ (Traffic Load) ที่ต่อเนื่องกันใน 1 ชั่วโมง จะมีค่าเท่ากับ 36 CCS หรือหนึ่งเออร์แลง โดยหน่วย CCS เป็นหน่วยที่ใช้ทั่วไปสำหรับการวัด ทราฟฟิกของระบบโทรศัพท์ ซึ่งจากตัวอย่างปริมาณการใช้สายเป็นเวลา 100 วินาทีคือ

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

ทราฟฟิกต่อผู้โทร 1 คน คือ

$$4 \text{ เออร์แลง} / 200 \text{ คน} = 0.002 \text{ เออร์แลง} / \text{ผู้โทร 1 คน}$$

หรือคิดเป็น

$$144 / 200 = 0.72 \text{ CCS} / \text{ผู้โทร 1 คน}$$

3.2 ระดับการบริการ (Grade of Service)

อัตราการติดขัด และความน่าจะเป็นของการติดขัดนั้นจะมีลักษณะที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งอัตราการติดขัดหาได้จากปริมาณการคำนวณซึ่งเกิดขึ้นที่สถานีฐาน ในส่วนของความน่าจะเป็นของการติดขัดเป็นความน่าจะเป็นที่การเรียกเกิดการบล็อกเนื่องจากช่องสัญญาณไม่ว่าง โดยจะขึ้นอยู่กับโหลดขอบริการ (Offered Load) และจำนวนของช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณหาความน่าจะเป็นของการติดขัด ดังนั้นระดับการบริการ (Grade of Service) สามารถพิจารณาได้จากเทอมของความน่าจะเป็นของการติดขัด

ความน่าจะเป็นของการติดขัดที่เกิดจากโหลดขอบริการ (Offered Load) ในระหว่างชั่วโมงใช้โทรศัพท์สูงสุด ซึ่งเกิดขึ้นจากโหลดบริการ (Carried Load) สูงสุดในระหว่างหนึ่งชั่วโมงซึ่งเกิดขึ้นที่สถานีฐาน ดังนั้นการกำหนดช่องสัญญาณสำหรับชั่วโมงใช้บริการสูงสุดจะต้องให้อัตราการติดขัดที่ต้องการในระหว่างเวลาที่ให้บริการสูงสุดสัมพันธ์กับในระหว่างเวลาที่ให้บริการต่ำสุด

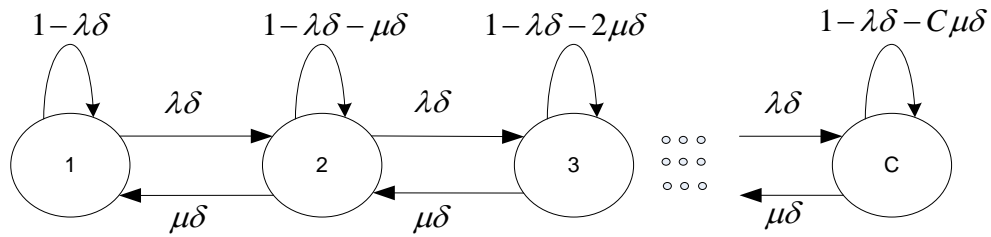
เออร์แลง-บี และเออร์แลง-ซี เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งจะเกี่ยวข้องกับระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัด โหลดขอบริการ (Offered Load) และจำนวนของช่องสัญญาณ

3.2.1 เออร์แลง-บี (Erlang-B)

ในรูปแบบของเออร์แลง-บี โดยกำหนดให้ความน่าจะเป็นของการเรียกจะถูกบล็อก (Blocked) และใช้วัฏระดับของการให้บริการของระบบ โดยที่การเรียกที่ถูกบล็อกจะไม่มีการรอเข้าคิว (Block-Call-Cleared) ซึ่งมีเงื่อนไขดังนี้

- การเรียกจะเป็นแบบไม่มีความจำ ทุก ๆ ผู้ใช้บริการ และผู้ให้บริการที่ถูกบล็อกจะสามารถเรียกขอใช้ช่องสัญญาณได้ทุกเวลา
- ทุกช่องสัญญาณที่ว่างสามารถให้บริการได้ทุกช่องสัญญาณ
- ความน่าจะเป็นของการใช้ช่องสัญญาณหรือเวลาในการบริการจะมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล
- ช่องสัญญาณที่สามารถให้บริการได้มีจำนวนจำกัด
- ทราฟฟิกที่ต้องการอธิบายโดยความสัมพันธ์ของการเข้าใช้บริการที่มีการแจกแจงแบบปัวส์ซองและระยะเวลาในการใช้บริการที่เป็นการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล
- ระยะเวลาของการใช้ช่องสัญญาณของผู้ใช้งานจะเป็นอิสระต่อกัน

เมื่อพิจารณาเออร์แลง-บีในระบบของการเข้าคิวแบบ $M/M/C/C$ โดยที่ M ตัวแรกจะหมายถึงการเรียกเข้าซึ่งมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล C ตัวแรกหมายถึงจำนวนช่องสัญญาณที่สามารถให้บริการได้ C ตัวที่สองหมายถึงจำนวนสูงสุดของการให้บริการ



รูปที่ 3.1 แสดงสถานะของห่วงโซ่มาร์โคว สำหรับเออร์แลง-บี

จากรูปที่ 3.1 จะเป็นห่วงโซ่มาร์โคว(Markov Chain) ซึ่งสามารถใช้อธิบายเออร์แลง-บีได้ โดยพิจารณาสถานะให้อยู่ในรูปของกระบวนการสุ่ม $\{ X_n | n = 0, 1, 2, \dots \}$ ดังนั้นสถานะของกระบวนการที่จะเป็นไปได้คือ $i = 0, 1, 2, \dots$ และถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสถานะจาก i ไปเป็น $i+1$ โดยที่สถานะ $i+1$ จะขึ้นอยู่กับสถานะ i และไม่ขึ้นอยู่กับสถานะก่อนหน้า เมื่อพิจารณาช่วงเวลาสั้นๆ δ ถ้า N_k คือจำนวนการเรียกที่เวลา $k\delta$ จะได้

$$N_c = N(k\delta) \quad (3.2)$$

โดยที่ N_c คือจำนวนช่องสัญญาณที่ถูกใช้งานซึ่งได้จากกระบวนการสุ่มแบบดิสคริต (Discrete Random Process) และ N_k เป็น Discrete Time Markov chain ด้วยความน่าจะเป็นที่สถานะคงตัวโดยลำดับของสถานะเป็น $0, 1, 2, \dots, C$

โดยลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของ $P_{i,j}$ คือ

$$P_{i,j} = \{N_{k+1} = j | N_k = i\} \quad (3.3)$$

$$P_{00} = 1 - \lambda\delta + 0(\delta) \quad (3.4)$$

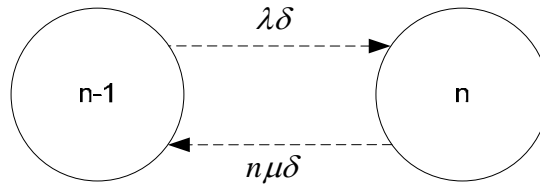
$$P_{ii} = 1 - \lambda\delta - \mu\delta + 0(\delta) \quad , i \geq 1 \quad (3.5)$$

$$P_{i,i+1} = \lambda\delta + 0(\delta) \quad , i \geq 0 \quad (3.6)$$

$$P_{i,i-1} = \mu\delta + 0(\delta) \quad , i \geq 1 \quad (3.7)$$

$$P_{i,j} = 0(\delta) \quad , j \neq i, j \neq i+1, j \neq i-1 \quad (3.8)$$

จากรูปที่ (3.1) จะได้ว่าความน่าจะเป็นจากการเปลี่ยนสถานะจากสถานะ 0 ไปเป็นสถานะ 1 เป็น $\lambda\delta$ และในทำนองเดียวกัน ความน่าจะเป็นจากการเปลี่ยนสถานะจากสถานะ 1 ไปเป็นสถานะ 0 เป็น $1 - \lambda\delta - \mu\delta$ และความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะทั้งหมดมีค่ารวมกันเท่ากับ 1



รูปที่ 3.2 แสดงสถานะของห่วงโซ่มาร์คอฟสำหรับเออร์แลง-บี ที่สถานะคงตัว

เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่นานพอระบบจะอยู่ในสถานะคงตัว (Steady State) และมีจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ n จะมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนสถานะไปเป็นสถานะ $n-1$ จะได้ว่า

$$\lambda\delta P_{n-1} = n\mu\delta P_n \quad , n \leq C \quad (3.9)$$

จากสมการที่ (3.9) จะเป็น Global Balance Equation และจาก

$$\sum_{n=0}^c P_n = 1 \quad (3.10)$$

$$\lambda\delta P_{n-1} = n\mu\delta P_n \quad , n = 1, 2, 3, \dots, C \quad (3.11)$$

$$\lambda P_{n-1} = P_n n\mu \quad (3.12)$$

$$P_i = \frac{\lambda P_0}{\mu} \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.11) จะได้ว่าความน่าจะเป็นที่สถานะ n ใดๆ เป็น

$$P_n = P_0 = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \frac{1}{n!} \quad (3.14)$$

โดยที่

$$P_0 = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_n n! = 1 - \sum_{i=1}^c P_i \quad (3.15)$$

แทนค่าสมการ

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^c \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \frac{1}{n!}} \quad (3.16)$$

จากสมการที่ (3.14) ความน่าจะเป็นของการติดขัด สำหรับจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ C

$$P_c = P_0 \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c \frac{1}{C!} \quad (3.17)$$

แทนค่าสมการที่ (3.16) ลงในสมการที่ (3.17)

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

3.2.2 เออร์แลง-ซี (Erlang-C)

ในรูปแบบของเออร์แลง-ซี จะกำหนดให้ผู้ใช้งานถูกบล็อก เกิดการรอคอยในกรณีที่ผู้ใช้บริการช่องสัญญาณจนเต็ม โดยความน่าจะเป็นของการรอคอยจะเป็น

$$P_r[\text{Calldelayed}] = \frac{A^c}{A^c + C! \left(1 - \frac{A}{C}\right) \sum_{k=0}^{c-1} \frac{A^k}{k!}} \quad (3.19)$$

เมื่อไม่มีช่องสัญญาณใดว่างพอที่จะใช้งานได้ การเรียกก็จะถูกจัดให้รอคอยอยู่ในระบบคิว ความน่าจะเป็นที่การเรียกที่ต้องรอคอยในคิวเวลาที่มากกว่า t วินาทีคือ

$$P_r[\text{Wait} > t | \text{Delayed}] = e^{-\frac{(C-A)t}{H}} \quad (3.20)$$

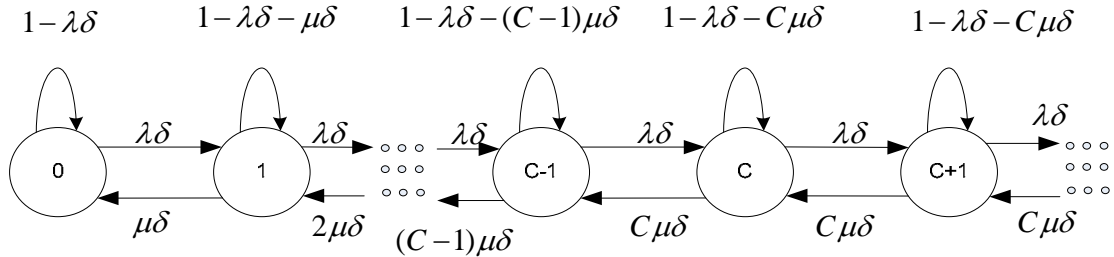
โดยที่ C คือจำนวนของช่องสัญญาณทั้งหมดที่สามารถใช้งานได้ t คือเวลารอคอยที่สนใจ และ H คือค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาของการเรียก ความน่าจะเป็นของการเรียกเข้ามาต้องรอคอยในคิวเป็นเวลาที่มากกว่า t วินาที

$$\begin{aligned} P_r[\text{Wait} > t] &= P_r[\text{Calldelayed}] P_r[\text{Wait} > t | \text{Delayed}] \\ &= P_r[\text{Calldelayed}] e^{-\frac{(C-A)t}{H}} \end{aligned} \quad (3.21)$$

ค่าเฉลี่ย D ในการรอคอยคิวของระบบจะเป็น

$$D = \int_0^{\infty} P_r[\text{Calldelayed}] e^{-\frac{(C-A)}{H}t} dt \quad (3.22)$$

$$D = P_r[\text{Calldelayed}] \frac{H}{(C-A)} \quad (3.33)$$



รูปที่ 3.3 แสดงสถานะของห่วงโซ่มาร์คอฟสำหรับเออร์แลง-ซี

เออร์แลง-ซีสามารถอธิบายได้ในระบบคิวแบบ $M/M/C/D$ โดย C คือจำนวนสูงสุดของผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้พร้อมกัน D คือ จำนวนของการเรียกที่อยู่ในระบบการรอคิว เมื่อสมมติให้ D มีค่าเป็นอนันต์ระบบคิวจะเป็นแบบ $M/M/C/\infty$ หรือในรูปแบบทั่วไปคือ $M/M/C$ ถ้า D เป็นอนันต์ ดังนั้น P_k คือความน่าจะเป็นของสถานะ k ที่สภาวะคงตัว (Steady State)

$$P_k = \lim_{k \rightarrow \infty} P_r\{N_t = k\} \quad (3.34)$$

โดยที่ N_t คือจำนวนของการเรียกหรือการรอคอยทั้งหมดในระบบที่เวลา t ที่สภาวะคงตัวความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะจาก k ไปเป็นสถานะ $k-1$ จะมีค่าเท่ากับความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะจาก $k-1$ ไปเป็นสถานะ k และจากรูปที่ (3.3)

$$\lambda \delta P_{k-1} = k \mu \delta P_k, \quad k \leq C \quad (3.35)$$

โดยที่

$$P_k = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right) \frac{1}{k} P_{k-1}, \quad k \leq C \quad (3.36)$$

และ

$$\lambda \delta P_{k-1} = C \mu \delta P_k, \quad k \geq C \quad (3.37)$$

$$P_k = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right) \frac{1}{C} P_{k-1}, \quad k \geq C \quad (3.38)$$

$$P_k = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!} P_0, \quad k \leq C \quad (3.39)$$

$$P_k = \frac{1}{C!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{C^{k-C}} P_0, \quad k \geq C \quad (3.39)$$

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

$$P_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right) + \dots + \frac{1}{C!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{C+1} \frac{1}{C^{(C+1)-C}} + \dots \right] = 1 \quad (3.40)$$

$$P_0 \left[1 + \sum_{k=1}^{C-1} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!} + \sum_{k=C}^{\infty} \frac{1}{C!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{C^{k-C}} \right] = 1 \quad (3.41)$$

$$P_{0=} \frac{1}{\sum_{k=1}^{C-1} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!} + \frac{1}{C!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^C \frac{1}{\left(1 - \frac{\lambda}{\mu C}\right)}} \quad (3.42)$$

ความน่าจะเป็นของการเรียกเข้ามาเมื่อทุกช่องสัญญาณ C ถูกใช้งานจนเต็ม ซึ่งการเรียกในครั้งนี้จะต้องเข้าระบบการรอคิวจะเป็น

$$\begin{aligned} P_r [C \text{ ch. are busy}] &= \sum_{k=C}^{\infty} P_k = \sum_{k=C}^{\infty} \frac{1}{C!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{C^{k-C}} P_0 \\ &= P_0 \frac{1}{C!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^C \sum_{k=C}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{k-C} \frac{1}{C^{k-C}} \\ &= P_0 \frac{1}{C!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^C \frac{1}{\left(1 - \frac{\lambda}{\mu C}\right)} \end{aligned} \quad (3.43)$$

สำหรับสมการที่ (3.43) จะใช้ได้สำหรับ $\frac{\lambda}{\mu C} < 1$ ซึ่ง P_0 เป็นไปตามสมการที่ (3.42)

$$\begin{aligned}
 P_r [C \text{ ch. are busy}] &= \frac{\frac{1}{C!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c}{\left(1 - \frac{\lambda}{\mu C}\right)} \frac{1}{\left[\sum_{k=1}^{C-1} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!} + \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c \frac{1}{\left(1 - \frac{\lambda}{\mu C}\right)} \right]} \\
 &= \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c}{\left[\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c + C! \left(1 - \frac{\lambda}{\mu C}\right) \sum_{k=1}^{C-1} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!} \right]} \quad (3.44)
 \end{aligned}$$

3.3 ความจุเออร์แลงของระบบ CDMA

เราจะพิจารณาในส่วนการเชื่อมโยงขากลับ CDMA ซึ่งเป็นส่วนของการเชื่อมโยงที่จำกัดความจุของระบบ การติดขัดจะถูกนิยามว่าเกิดขึ้นเมื่อการสะสมทั้งหมดของผู้ใช้บริการทั้งภายในเซกเตอร์หรือเซลล์และเซลล์อื่นๆ นำเข้าไปสู่ปริมาณของความหนาแน่นของการแทรกสอด I_0 ที่มากกว่าระดับของสัญญาณรบกวนพื้นฐาน (Background Noise) N_0 โดยปริมาณของ $1/\eta$ เริ่มมีค่าเป็น 10 dB ถ้าเป็นไปตามข้อสมมติฐานดังนี้

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

ดังนั้นสัญญาณแทรกสอดทั้งหมดจะหาได้จาก

$$\begin{aligned}
 \text{สัญญาณแทรกสอดทั้งหมด} &= \text{สัญญาณแทรกสอดภายในเซลล์} + \text{สัญญาณแทรกสอดจากเซลล์} \\
 &\quad \text{อื่น} + \text{สัญญาณรบกวนเชิงความร้อน} \quad (3.45)
 \end{aligned}$$

ในเรอของพารามิเตอร์ CDMA จะได้

$$I_{total} = M(E_0 R) + fM(E_b R) + N \quad (3.46)$$

เมื่อ M = จำนวนผู้บริการในเซกเตอร์เดียวกัน

E_b = พลังงานต่อบิตของสัญญาณ

R = อัตราข้อมูล

N = กำลังของสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (Thermal Noise)

f = อัตราส่วนของการแทรกสอดจากเซลล์อื่นต่อการแทรกสอดที่เกิดขึ้นที่เซกเตอร์นั้น

ดังนั้นจากสมการที่ (3.46) สามารถเขียนได้เป็น

$$I_{total} = ME_b R + (1 + f) + N \quad (3.47)$$

โดยที่เงื่อนไขของการไม่ติดขัดจะเป็น

$$I_0 W \geq ME_b R + (1 + f) + N W \quad (3.48)$$

ซึ่งจะเป็นไปตาม

$$M \leq (1 + f) \left(\frac{W / R}{E_b / I_0} \right) (1 - \eta) \quad (3.49)$$

โดยที่ $\eta = N_0 / I_0 = 0.1$

ในความเป็นจริงข้อสมมติฐานที่กล่าวไว้เบื้องต้นนั้นจะไม่เป็นจริงเนื่องจาก

1. จำนวนของการเรียกจะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปัวส์ซองด้วยค่าเฉลี่ย λ / μ
2. เนื่องจากค่า Voice Activity ผู้ใช้บริการแต่ละรายจะเข้าในระบบด้วยความน่าจะเป็น ρ และออกจากระบบด้วยความน่าจะเป็น $(1 - \rho)$
3. ผู้ใช้บริการแต่ละรายมีความต้องการ E_b / I_0 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าตามสถานะของสภาพแวดล้อมในการเคลื่อนที่เพื่อที่จะยังคงอัตราความผิดพลาดต่อเฟรมที่ยอมรับได้

ดังนั้นสมมติฐานทั้งสามข้อนี้จะได้เงื่อนไขการไม่ติดขัดเป็น

$$I_0 W \geq \sum_{i=1}^k v_i E_{bi} R + \sum_j^{othercells} \sum_{i=1}^k v_i(j) E_{bi}(j) R + N_0 W \quad (3.50)$$

เมื่อ k เป็นจำนวนผู้ใช้บริการต่อเซกเตอร์ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปัวส์ซองที่มีค่าเฉลี่ย λ / μ และ v เป็นตัวแปรสุ่มแบบไบนารีที่มีค่า 0 กับ 1 ซึ่งแสดงถึง Voice Activity ด้วย $P(v = 1) = P$ ดังนั้นเราจะได้สมการเงื่อนไขการไม่ติดขัดเป็น

$$Z = \sum_{i=1}^k v_i \varepsilon_i + \sum_j^{othercells} \sum_{i=1}^k v_i(j) \varepsilon_i(j) \leq \frac{W}{R} (1 - \eta) \quad (3.51)$$

เพราะฉะนั้นความน่าจะเป็นของการติดขัดสำหรับระบบ CDMA จะเป็น

$$P_{blocking} = P[Z > W / R(1 - \eta)] \quad (3.52)$$

จากสมการที่ (3.52) เราสามารถที่จะประมาณค่าที่แสดงในเทอมของ λ / μ ซึ่งการประมาณแบบนี้จะกำหนดโดย

$$\frac{\lambda}{\mu} = \frac{(W/R)(1-\eta)}{(E_b/I_0)v(1+f)} F(B, \sigma) \quad (3.53)$$

เมื่อ v = แฟกเตอร์ของ Voice Activity

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

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

$$\beta = 0.2303$$

$$\sigma = \text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการควบคุมกำลัง}$$

$$B = \frac{(E_b / I_0)[Q^{-1}(P_{\text{blocking}})]^2}{(W/R)(1-\eta)}$$

บทที่ 4

การวิเคราะห์ความจุของระบบ CDMA สำหรับการสื่อสารด้านเสียง

4.1 แบบจำลองของระบบและการวิเคราะห์

เมื่อพิจารณาด้านช่องสัญญาณการเชื่อมโยงไปขากลับ (Reverse Line) แบบเซลล์เดี่ยว (Single Cell) และแบบหลายเซลล์ (Multiple Cells) ของแบบจำลองการบริการด้านเสียง (Voice Service)

โดยให้ N_v เป็นกลุ่มของผู้ใช้บริการด้านเสียง กำหนดให้กำลังที่รับได้ที่สถานีฐานคือ $S_{v,i}$ สำหรับผู้ให้บริการในกลุ่มการบริการด้านเสียงคนที่ i และกำหนดให้อัตราการส่งข้อมูล R_v สำหรับกลุ่มผู้ให้บริการด้านเสียง

สำหรับผู้ให้บริการด้านเสียงคนที่ i ได้รับ $\frac{E_b}{N_o}$ มีค่าเท่ากับ

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{v,i} = \frac{W}{R_v} \frac{S_{v,i}}{\sum_{k=1, k \neq i}^{N_v} \alpha S_{v,k} + I + \eta_o W} \quad (4.1)$$

เมื่อ W คือ แบนด์วิทการแผ่กว้างทางสเปกตรัมของระบบ (Spreading Bandwidth)

α คือ แฟกเตอร์ของเสียงพูดของผู้ใช้บริการ (Voice Activity Factor)

I คือ สัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่น ๆ (Other Cell Interference)

η_o คือ ความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนหลังจากทางสเปกตรัม (Background Noise Power Spectral Density)

เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ จึงได้ตั้งข้อสมมติฐานไว้ 3 ข้อดังนี้

1. สถานีฐานแต่ละสถานีฐาน ถูกสมมติให้ใช้สายอากาศแบบ 3 ทิศทางในอุดมคติ (Three Ideal Direction Antennas)
2. การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียตามระยะทาง (Path Factor) ระหว่างผู้ให้บริการและสถานีฐานมีค่าเป็น $10^{10} r^{-4}$

เมื่อ r คือ ระยะทางจากผู้ให้บริการถึงสถานีฐาน

ξ คือ ตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ ที่มีค่าเฉลี่ยเท่า 0 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

(σ) เท่ากับ 8 dB

และสมมติให้ การจางหายเร็วแบบเรย์ลี (Fast Fading) ไม่มีผลต่อระดับความแรงของสัญญาณ

3. มีการควบคุมกำลังสัญญาณแบบสมบูรณ์ (Perfect Power Control) เนื่องจากการควบคุมกำลังสัญญาณแบบสมบูรณ์ ดังนั้น $S_{v,k} = S_v$ สำหรับทุก k และสัญญาณรบกวนหลังจาก (Background noise : η_o) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณแทรกสอด ดังนั้นสมการ (4.1) สามารถประมาณค่าได้ คือ

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_v \approx \frac{W}{R_v} \frac{S_v}{\alpha(N_v - 1)S_v + I} \quad (4.2)$$

สำหรับกรณีใด ๆ แล้ว $N_v \neq 0$ จากสมการ (4.2) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณที่รับได้ ทำให้ $\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_v \neq 0$

$$\{(SIR)^{-1}_v + \alpha\} S_v = 0 \quad (4.3)$$

เมื่อ

$$(SIR)_v = \frac{R_v}{W} \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_v \quad (4.4)$$

เพื่อให้สอดคล้องกับคุณภาพที่ต้องการ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งในการบริการด้านเสียง สำหรับผู้ใช้บริการทุกคนในกลุ่ม นั่นคือ $\frac{E_b}{N_o}$ ที่รับได้ควรมีค่ามากกว่า $\frac{E_b}{N_o}$ ที่ต้องการ

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_v \geq \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{v,req} \quad (4.5)$$

เพื่อให้สอดคล้องกับอัตราการส่งข้อมูลที่ต้องการสำหรับผู้ใช้บริการทุกคนในกลุ่ม ดังนั้น

$$R_v \geq R_{v,req} \quad (4.6)$$

จากสมการ (4.5) และ (4.6) ค่า $\frac{E_b}{N_o}$ ที่รับได้ ในสมการ (4.2) ถูกจำกัดค่าดังนี้

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{v,req} \leq \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_v \leq \frac{W}{R_{v,req}} \frac{S_v}{\alpha(N_v - 1)S_v + I} \quad (4.7)$$

จากสมการนี้ จำนวนของผู้ใช้บริการ N_v ที่เป็น Upper Bounded มีค่าดังนี้

$$\alpha(N_v - 1)S_v + I \leq \frac{W}{R_{v,req}} \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{v,req}^{-1} S_v = (SIR)^{-1}_{v,req} S_v \quad (4.8)$$

การประยุกต์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณที่รับได้ของกลุ่มผู้ใช้บริการ ในสมการ (4.3)-(4.8) เราสามารถแสดงที่มาของความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของผู้ใช้บริการและเอสไออาที่ ต้องการหรือเอสไออาเริ่มต้นที่สถานีฐานสามารถยอมรับได้ ได้ดังนี้

$$\alpha \frac{N_v}{(SIR)_{v_{req}}^{-1} + \alpha} \leq 1 - z \quad (4.9)$$

เมื่อ

$$z = \frac{I}{S} \frac{1}{(SIR)_{v_{req}}^{-1} + \alpha} \quad (4.10)$$

และ z เป็นตัวแปรคู่แบบเกาส์เซียน ซึ่งเป็นผลรวมของกำลังของสัญญาณแทรกสอด

4.2 ความจุของระบบCDMAแบบเซลล์เดียว (Single Cell CDMA Capacity)

สำหรับระบบแบบเซลล์เดียว สัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่น ๆ จะไม่มีผลต่อความจุ (Capacity) และเทอมของ z ในสมการ (4.9) จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสมการ (4.10) สามารถเขียนได้ใหม่สำหรับกรณีระบบแบบเซลล์เดียว (Single Cell)

$$\gamma_v N_v \leq 1 \quad (4.11)$$

เมื่อ

$$\gamma_v = \frac{\alpha}{(SIR)_{v_{req}}^{-1} + \alpha} \quad (4.12)$$

N_v แสดงจำนวนของผู้ใช้บริการที่สามารถรองรับได้สำหรับกลุ่มบริการด้านเสียงใน 1 เซกเตอร์ ในสมการที่ (4.11) γ_v คือ จำนวนทรัพยากรที่ใช้สำหรับผู้ใช้บริการด้านเสียง 1 คน และสมการที่ (4.11) หมายความว่า ทรัพยากรที่ถูกใช้โดยผู้ใช้บริการจะไม่เกินกว่าทรัพยากรของระบบที่มีอยู่

ตารางที่ 4.1 แสดงพารามิเตอร์ของระบบCDMAที่รองรับการบริการด้านเสียง IS-95

Item	Symbol	Value
Bandwidth	W	1.25 MHz
Voice activity factor	α	0.375
Information data rate for the voice group	R_v	9.6 Kbps
Quality requirement for the data group	$\left(\frac{E_b}{N_o} \right)_{v_{req}}$	5(7 dB)

ความรู้เพิ่มเติมสำหรับระบบCDMAในการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 3

ในยุคถัดไปของการสื่อสารไร้สายจะมีการปรับเปลี่ยนมาตรฐาน IS-95 ไปสู่รูปแบบของการแพร่กระจายชนิดแถบความถี่กว้าง ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับข้อกำหนดต่าง ๆ นั้นจะขึ้นอยู่กับผู้ให้บริการว่าจะเลือกรูปแบบใด แต่ในที่นี้จะขอเสนอลักษณะทั่วไปที่ได้รับการยอมรับกันแล้วว่าจะใช้ในการสื่อสารไร้สายยุคที่สาม ดังแสดงในตารางที่ 4.2 คุณสมบัติหลัก ๆ ของการสื่อสารไร้สายในยุคที่สามมีดังนี้

1. อัตราข้อมูลของผู้ใช้บริการจะสูงถึง 2 Mbps
2. สามารถให้บริการผู้ใช้บริการที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงในสภาพแวดล้อมแบบมาโครเซลล์และสามารถให้บริการอัตราข้อมูลกับเครื่องลูกข่ายในสภาพแวดล้อมแบบไมโครและพิโคเซลล์
3. สามารถให้บริการทางด้านเสียงที่มีคุณภาพสูง
4. มีความจุทางด้านรีเวอร์สลิงค์สูง โดยการใช้วงจรกำจัดสัญญาณแทรกสอด

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดของCDMAชนิดแถบความถี่กว้าง (3 G)

ความถี่คลื่นพาห์	ย่าน 2,000 MHz
แถบความถี่	1.25/5/10/20 MHz
อัตราชิป (Processing gain)	1.024/4.096/8.192/16.384 Mcps
อัตราข้อมูลผู้ใช้	2.4 Kbps ~ 2 Mbps
การควบคุมกำลังส่ง	ควบคุมโดยอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณแทรกสอด โดยใช้สัญญาณนำร่อง
การแก้การลดทอน	เครื่องรับแบบเรค และคอน โวลูชัน โคคที่อัตรา 1/3
การเพิ่มความจุ	วงจรกำจัดสัญญาณแทรกสอด

4.3 ความจุของระบบCDMAแบบหลายเซลล์ (Multiple Cell CDMA Capacity)

ในระบบแบบหลายเซลล์ ผู้ใช้บริการในเซลล์อื่น ๆ จะกำเนิดสัญญาณแทรกสอดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบแบบเซลล์เดียว คือผู้ใช้บริการคนอื่น ๆ ภายในเซลล์เดียวกันจะกำเนิดสัญญาณแทรกสอดต่อผู้ใช้บริการคนหนึ่ง ๆ ภายในเซลล์นั้น สำหรับในระบบแบบหลายเซลล์ผลกระทบของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่น ๆ ต่อความจุของระบบถูกรวมอยู่ในเทอม ของ z ใน

สมการ (4.9) ดังนั้นผู้ใช้บริการคนหนึ่ง ๆ ที่กำลังใช้งานอยู่ จะมีระดับสัญญาณแทรกสอดสูงมาก ซึ่งมาจากผู้ใช้บริการรายอื่นทั้งที่อยู่ในเซลล์เดียวกันหรือเซลล์อื่น ๆ

เนื่องจากสัญญาณแทรกสอดมีผลโดยตรงต่อความจุของระบบ กล่าวคือเมื่อสัญญาณแทรกสอดน้อยจะส่งผลให้ความจุของระบบเพิ่มสูงขึ้น สัญญาณแทรกสอดนี้จะพิจารณาจากสัญญาณแทรกสอดภายในเซลล์ของตัวเอง (Intracell Interference) และสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่น ๆ ที่นอกเหนือจากเซลล์ของตัวเอง (Intercell Interference)

สมมติให้ผู้ใช้บริการ N มีการกระจายในเซลล์และ N_v คือจำนวนของผู้บริการใช้ที่แอกทีฟ (Active Users) ในหนึ่งเซกเตอร์และถ้าสมมติให้เซลล์อยู่ติดกัน ดังนั้นความหนาแน่นของผู้ใช้บริการด้านเสียง (Voice User Density) คือ

$$\rho_v = \frac{N}{\left(\frac{3\sqrt{3}}{2}\right)} = \frac{2N}{3\sqrt{3}} \quad (4.13)$$

เนื่องจากหนึ่งเซลล์มีสามเซกเตอร์ ดังนั้น $N_v = \frac{N}{3}$ และนั่นคือ

$$\rho_v = \frac{2N_v}{\sqrt{3}} \quad (4.14)$$

พิจารณา Intra-sector Interference

ที่สถานีฐานจะได้รับสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้บริการในเซกเตอร์เดียวกัน (Intra-sector Interference) ดังนี้

$$I_{intra} = (N_v - 1)S_v \quad (4.15)$$

พิจารณา Inter-sector Interference

การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวน จะสมมติให้มีการกระจายตัวของผู้ใช้บริการเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) ในเขตพื้นที่ให้บริการ โดยใช้ระยะทางสั้นที่สุดเพื่อให้เกิดการลดทอนน้อยที่สุดในเซลล์หลัก (Home Cell) และ Spatial Whiteness สำหรับสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่น ๆ ที่มีการบริการแบบมัลติมีเดีย ก็ใช้การจำลองแบบตัวแปรสุ่มแบบเกาส์เซียน (Gaussian Random Variable) ดังนี้

$$I_{inter} = \iint (\phi S_v \rho_v) \left(\frac{r_m}{r_o}\right)^4 10^{(\xi_o - \xi_m)/10} \varphi\left(\frac{\pi}{2} \xi_o - \xi_m, \frac{r_o}{r_m}\right) dA \quad (4.16)$$

เมื่อ ϕ คือ Voice Activity Variable ที่เป็นตัวแปรสุ่มแบบไบโนเมียล (Binomial Random Variable) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็น Voice Activity Factor: α ส่วน r_o คือ ระยะทางจากผู้ให้บริการคนที่หนึ่งที่เซลล์อื่นถึงสถานีฐานที่สนใจพิจารณา r_m คือระยะทางจากผู้ให้บริการถึงสถานีฐานในเซลล์นั้น ๆ และ m คือตัวชี้บอกสถานีฐาน (BS Index)

$$\phi = \begin{cases} 1, \rightarrow \text{Probability} \alpha \\ 0, \rightarrow \text{Probability} 1 - \alpha \end{cases} \quad (4.17)$$

และ

$$\varphi \left(\xi_o - \xi_m \cdot \frac{r_o}{r_m} \right) = \begin{cases} 1, \rightarrow \text{if} \left(\frac{r_m}{r_o} \right)^4 10^{(\xi_o - \xi_m)/10} \leq 1 \\ 0, \rightarrow \text{Otherwise} \end{cases} \quad (4.18)$$

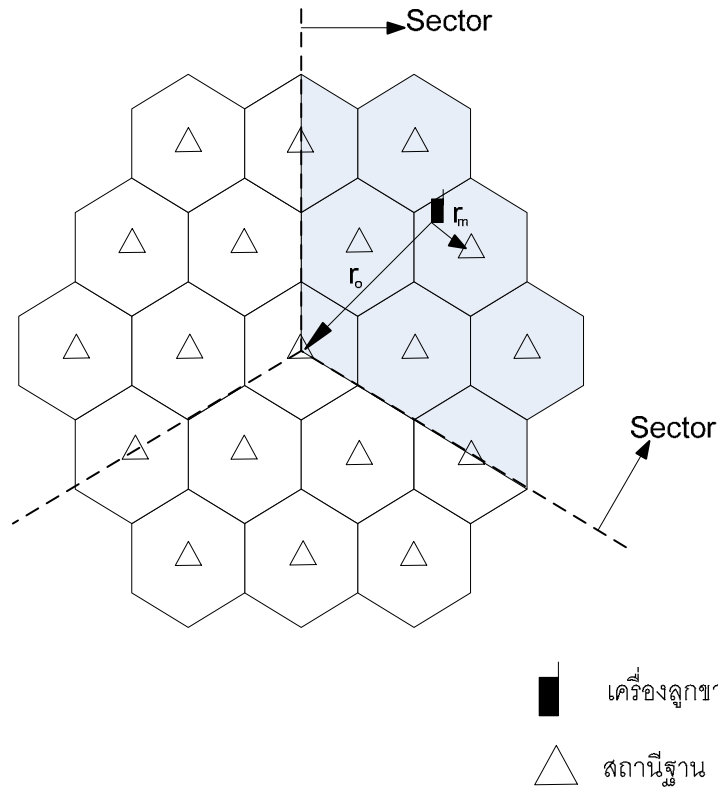
ดังนั้น Signal-to-Interference Ratio ที่สถานีฐานรับได้มีค่าเป็น

$$SIR = \frac{S_v}{\alpha(I_{intra} + I_{inter})} \quad (4.19)$$

ดังนั้นเงื่อนไขที่ใช้พิจารณาเมื่อผู้ให้บริการมีการร้องขอเพื่อเข้าใช้งานในระบบคือ

$$SIR > SIR_{req} \quad (4.20)$$

จากสมการที่ (4.20) ถ้า $SIR > SIR_{req}$ ระบบจะยอมรับผู้ให้บริการที่มีการร้องขอ (Accepted) เพื่อใช้งานในระบบ CDMA นอกเหนือจากเงื่อนไขดังกล่าวสมการที่ (4.20) ระบบจะทำการปฏิเสธการร้องขอ (Rejected) ของผู้ให้บริการเพื่อเข้าใช้งานในระบบ CDMA หรือเกิดการบล็อก (Call Blocking)



รูปที่ 4.1 แบบจำลองของโครงข่ายเซลลูลาร์

เมื่อพิจารณาพื้นที่ให้บริการ 2 เซลล์ (เซลล์ที่กำลังสนใจพิจารณากับเซลล์ที่มีผู้ใช้บริการในเซลล์นั้น ๆ) ดังรูปที่ 4.1 ค่าการอินทิเกรตในสมการ (4.16) บนพื้นที่ที่แรเงาในรูปที่ 4.1 และไม่มีจุดซ้อนทับกันของผู้ใช้บริการบนจุดสเปซเซิล (Spatial Point) เดียวกัน ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่น ๆ I หาได้จาก

$$\begin{aligned}
 E(I) &\leq 0.247N_v S_v \\
 \text{var}(I) &\leq 0.078N_v S_v^2
 \end{aligned}
 \tag{4.21}$$

ใช้สมการ (4.10) และ (4.21) ที่เป็นคุณลักษณะของ z และ z เป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์เซียน ซึ่งเป็นผลรวมของกำลังของสัญญาณแทรกสอด ที่มีค่าเฉลี่ย และค่าความแปรปรวน คือ

$$\begin{aligned}
 E(z) &\leq 0.659\gamma_v N_v \\
 \text{var}(z) &\leq 0.555\gamma_v^2 N_v
 \end{aligned}
 \tag{4.22}$$

สำหรับความจุของระบบ CDMA แบบหลายเซลล์ จะใช้สมการที่ (4.9) ที่เป็นผลรวมของสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่น ๆ

$$\gamma_v N_v \leq 1 - z
 \tag{4.23}$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (4.11) กับ (4.22) เราทราบว่าทรัพยากรของระบบทั้งหมดจะมีค่าลดลงตามค่า z ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสัญญาณแทรกสอดจากเซลล์อื่น ๆ สมมติให้สมรรถนะของระบบเป็นไปตามที่ต้องการ ดังนั้น P คือกำลังต่ำสุดที่ระบบต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปเป็น 99 % ดังนั้น

$$P = \Pr (\gamma_v N_v \leq 1-z) \geq 0.99 \quad (4.23)$$

ตัวแปรสุ่ม z เป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์เซียน ที่มีค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนตามสมการ (4.22) ดังนั้นในสมการที่ (4.24) สามารถคำนวณให้ง่ายขึ้นดังนี้

$$\gamma_v N_v + E(z) + 2.33\sqrt{\text{var}(z)} \leq 1 \quad (4.25)$$

เมื่อ $E(z)$ และ $\text{var}(z)$ เป็นฟังก์ชันของ N_v ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบระบบแบบเซลล์เดียว (Single Cell) ทรัพยากรที่ใช้โดยผู้ใช้บริการด้านเสียงหนึ่งคนจะมีค่ามากกว่า γ_v สำหรับผู้ใช้บริการด้านเสียงในระบบแบบเซลล์เดียว

บทที่ 5

การวิเคราะห์ความไวในระบบ CDMA

5.1 ความเป็นมา

ในระบบ CDMA นั้น จำนวนผู้ใช้ระบบในขณะเวลาหนึ่งจะถูกจำกัดไว้เพื่อรักษาคุณภาพของเครือข่าย ในแง่ของคุณภาพนั้นสิ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญคือส่วนควบคุมการเข้าใช้ระบบ (Call Admission Control; CAC) ซึ่งเป็นส่วนที่มีหน้าที่โดยตรงในการกำหนดจำนวนผู้ใช้ โดยที่ส่วนควบคุมการเข้าใช้ระบบนั้นมีพื้นฐานจากกลไกการประกันระดับคุณภาพเพื่อความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบ ซึ่งส่วนควบคุมการเข้าใช้ระบบของระบบ CDMA นั้นจัดได้เป็น 2 ประเภทคือ ส่วนควบคุมการเข้าใช้ระบบโดยพิจารณาสัญญาณแทรกสอด (Interference-Based CAC; ICAC) และส่วนควบคุมการเข้าใช้ระบบโดยพิจารณาจำนวนผู้ใช้ (Number-Based CAC; NCAC) ซึ่ง NCAC นั้นจะอนุญาตให้ผู้ใช้เข้าสู่ระบบในกรณีที่จำนวนผู้ใช้ยังไม่เต็มเพดานที่ตั้งไว้ ในขณะที่ ICAC จะอนุญาตผู้ใช้เข้าสู่ระบบในกรณีที่ระบบมีการแทรกสอดของสัญญาณต่ำกว่าขีดจำกัดของระบบ ซึ่งหากจะพิจารณาความจุของระบบ CDMA ส่วน ICAC ก็จะเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่น่าสนใจต่อการศึกษา

ในทางปฏิบัติอย่างไรก็ตามถ้าเราทำการกำหนดค่าย่านความถี่ที่แน่นอนให้กับแต่ละเซลล์ ความจุของระบบจะแปรไปตามภาระหรือความสามารถในการรองรับผู้ใช้ของเซลล์นั้นๆ และเซลล์ข้างเคียงด้วยเนื่องจากการแทรกสอดเมื่อมีการใช้เซลล์ร่วมกันหรือการแทรกสอดจากเซลล์ข้างเคียงมีผลต่อความสามารถในการรองรับผู้ใช้ การออกแบบเพื่อทำให้ CAC มีเสถียรภาพนั้นเป็นสิ่งสำคัญ โดยจะต้องพิจารณาผลกระทบจากสิ่งรบกวนระบบที่มาจากพารามิเตอร์ต่างๆ จากนั้นทำการแปรมาเป็นค่าเริ่มต้นของ CAC ซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับความจุระบบ

หนทางในการอธิบายค่าความเปลี่ยนแปลงความจุระบบในเชิงปริมาณนั้นคือการวิเคราะห์ความไวของระบบ ซึ่งมีผลมาจากการแปรวนแปรของพารามิเตอร์ซึ่งจากพารามิเตอร์ทั้งหลายมีความสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทำหน้าที่ของระบบ และการวิเคราะห์ความไวสามารถนำไปประยุกต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของระบบ ดังนี้

1. การกำหนดทิศทางการวิจัยระบบ โดยเน้นไปที่พารามิเตอร์ที่สำคัญ
2. การคาดคะเนพารามิเตอร์โดยการศึกษาการทำงานของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่นำมาซึ่งขีดของการดำเนินงานที่ดีที่สุดของระบบไปพร้อมกับการศึกษาปัจจัยที่เอื้อต่อการทำงาน
3. การประเมินค่าสูงสุดของผลกระทบจากข้อผิดพลาดของพารามิเตอร์ในพฤติกรรมของระบบ

ในหลายๆ กรณี ความไม่สมบูรณ์แบบของระบบ CDMA เป็นผลทำให้การควบคุมกำลังงานไม่สมบูรณ์ไปด้วย สิ่งที่เพิ่มเติมมาด้วยก็คือความน่าเชื่อถือของระบบ ซึ่งก็คือค่าความน่าจะเป็นในการรับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (Signal-to-Interference Ratio; SIR) สูงกว่าค่า SIR ที่ต้องการ ซึ่งค่าความน่าเชื่อถือของระบบนี้เป็นหนึ่งในสิ่งที่สำคัญที่สุดของระบบ โดยความจุของระบบจะถูกกำหนดโดยขีดต่ำสุดของค่าความน่าเชื่อถือ การที่จะคาดคะเนกราฟฟิคของสัญญาณภายใต้ระบบการควบคุมกำลังงานที่ไม่สมบูรณ์โดยมีการพิจารณาร่วมกับความน่าเชื่อถือของระบบ ได้ถูกนำเสนอผ่านแบบจำลองต่างๆ

ในบทที่แล้ว ความจุของระบบ CDMA สามารถอธิบายโดยการทำงานของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น E_b/N_0 ทราฟฟิคของข้อมูล อัตราขยายทางกระบวนการ และปัจจัยในการนำความถี่มาใช้ใหม่ ยิ่งไปกว่านั้นการวิเคราะห์ความไวภายใต้ปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวกับความจุระบบสามารถได้มาซึ่งข้อชี้วัดที่เหมาะสมในการออกแบบ CAC และในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความไวของระบบภายใต้ปัจจัยหรือพารามิเตอร์ต่างๆ โดยอาศัยการวิเคราะห์จากความจุระบบที่ได้กล่าวมาแล้วในบทก่อนหน้า โดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ความไว

5.2 แบบจำลองระบบและความจุระบบ

พิจารณาการส่งสัญญาณจากผู้ใช้ระบบมัลติเซลล์ CDMA ซึ่งให้บริการสื่อผสมจำนวน K กลุ่ม มีหนึ่งกลุ่มเป็นการให้บริการทางเสียง และกลุ่มอื่นๆ เป็นการให้บริการที่หลากหลาย และผู้ใช้ในกลุ่มหนึ่งๆ จะมีอัตราการส่งข้อมูลที่ต้องการเป็น R โดยที่ $R \geq R_{req}$ และค่าความน่าเชื่อถือของระบบเป็น $\beta\%$ ซึ่ง $P_r(SIR \geq SIR_{req}) = \beta\%$ ซึ่ง $SIR_{req} = (E_b / N_0)_{req} \cdot R_{req} / W$ การรับ SIR ของผู้ใช้แต่ละคนขึ้นอยู่กับกลไกการควบคุมกำลังงานที่พยายามที่ทำให้เกิดความเท่ากันในทุกๆ ผู้ใช้และเป็นที่ยอมรับกันว่าสามารถประมาณการได้อยู่ในรูปของการกระจายแบบลอการิทึม-ปกติ มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 0.5-2 dB โดยในกลุ่มผู้ใช้ทุกกลุ่มมีแบนด์วิธที่ใช้เป็น W และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการรับ SIR เป็น σ_x และค่าความน่าเชื่อถือของระบบซึ่งเป็น $\beta\%$

เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ทุกกลุ่ม จำนวนผู้ใช้ในระบบได้ถูกกำหนดโดยสมการ
ดังนี้

$$\gamma_v N_v + \sum_{i=1}^{K-1} \gamma_{d_i} N_{d_i} \leq 1 \quad (5.1)$$

ซึ่ง

$$\gamma_v = \frac{\alpha}{\frac{W}{R_{v_{req}}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{v_{req}}^{-1} \left\langle \frac{1}{1+f} \right\rangle 10^{\frac{Q^{-1}(\beta)}{10} \sigma_x - 0.012 \sigma_x^2} + \alpha}$$

$$\gamma_{d_i} = \frac{1}{\frac{W}{R_{d_i req}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{d_i req}^{-1} \left\langle \frac{1}{1+f} \right\rangle 10^{\frac{Q^{-1}(\beta)}{10} \sigma_x - 0.012 \sigma_x^2} + 1}$$

N_v และ N_{d_i} คือจำนวนผู้ใช้ในกลุ่มบริการทางเสียงและผู้ใช้ในกลุ่มบริการทางข้อมูลกลุ่ม
ที่ i ตามลำดับ โดยผูกพันกับปัจจัย γ_v และ γ_{d_i} ซึ่งเป็นแบนด์วิธอิทธิพล (Normalized Effective
Bandwidth) ของกลุ่มใช้บริการทางเสียงและของกลุ่มผู้ใช้ทางข้อมูลกลุ่มที่ i ตามลำดับ

Q^{-1} คือฟังก์ชันผกผันของของ Q ซึ่ง $Q(x) = \int_{-\infty}^x (1/\sqrt{2\pi} e^{-y^2/2}) dy$ ทำให้ทราบว่าเป็น
สมการ (5.1) หมายถึงจำนวนผู้ใช้ในระบบ ($N_v, N_{d_1}, N_{d_2}, \dots, N_{d_{K-1}}$) ได้ถูกกำหนดให้อยู่ในช่วงซึ่ง
เป็นผลรวมของแบนด์วิธอิทธิพลของผู้ใช้งานที่อยู่ในระบบนั่นเอง และยังไม่เกิดเหตุการณ์ที่ผู้ใช้
เกินเพดานที่กำหนด

จากสมการ (5.1) จะพบได้ว่ามีตัวแปรมาเกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก ในระบบ CDMA
ประกอบไปด้วย

- W คือแถบแบนด์วิธ
- $R_{i_{req}}$ เมื่อ $i = v, d_1, d_2, \dots, d_{K-1}$ คืออัตราการส่งข้อมูลที่ต้องการ
- $(E_b / N_0)_{i_{req}}$ เมื่อ $i = v, d_1, d_2, \dots, d_{K-1}$ คืออัตราส่วนความหนาแน่นสเปกตรัมของ
พลังงานส่งหนึ่งบิตต่อสัญญาณแทรกสอดที่ต้องการ
- f คือ ตัวประกอบการแทรกสอดจากเซลล์อื่น
- α คือ ตัวประกอบการส่งเสียงผ่านระบบ ถ้าหาก $\alpha = 1$ แสดงว่ามีการใช้ช่องสัญญาณ
ตลอดเวลา และถ้า $\alpha = 2/3$ แสดงว่ามีการใช้ช่องสัญญาณ 2 ใน 3 ของเวลาทั้งหมดเมื่อผู้ใช้
อยู่ในระบบ สามารถอนุมานได้ว่า หากผู้ใช้คนหนึ่งโทรศัพท์ 3 นาที จะมีการพูดต่อเนื่อง

โดยไม่หยุดเลยเป็นเวลา 2 นาที และรวมเวลาเงียบหรือเวลาที่ไม่ได้ส่งข้อมูลใดๆ ผ่านเครื่องข่าย 1 นาที

- $\beta\%$ คือค่าความน่าเชื่อถือของระบบ ซึ่งถูกกำหนดอยู่ในรูปของความน่าจะเป็นในการรับ SIR สูงกว่า SIR ที่ต้องการ
- σ_x คือผลจากการหน่วงและความคลาดเคลื่อนในการควบคุมกำลังงาน (Power-control Delays and Errors) ในระบบที่มีการควบคุมกำลังงานอย่างสมบูรณ์แบบจะมีค่า $\sigma_x = 0$ ส่วนในระบบที่มีค่า σ_x ต่ำกว่า 1 สะท้อนให้เห็นว่าระบบดังกล่าวนี้เป็นระบบที่มีการควบคุมกำลังงานอย่างไม่สมบูรณ์แบบและมีการทำงานประสิทธิภาพต่ำ ขนาดของ $10^{\frac{Q^{-1}(\beta)}{10}\sigma_x - 0.012\sigma_x^2}$ บ่งถึงผลกระทบจากข้อผิดพลาดในส่วนควบคุมกำลังงานที่ไม่สมบูรณ์ และจากเปอร์เซ็นต์ความน่าเชื่อถือของระบบ ($\beta\%$) ที่เกี่ยวข้องกับค่าความจุระบบ

ในทางปฏิบัตินั้น เพดานความจุอาจจะเปลี่ยนแปลงไปตามพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบ โดยเฉพาะเมื่อนำความจุเข้ามาพิจารณาเป็นเงื่อนไขเบื้องต้นของ CAC จะต้องพิจารณาผลของพารามิเตอร์ของระบบที่ถูกรบกวน ความไม่สมบูรณ์ของระบบ CDMA นั้นเป็นกรณีใหญ่ๆ ที่ก่อให้เกิดการควบคุมกำลังงานแบบไม่สมบูรณ์และโยงไปสู่ค่าความน่าเชื่อถือของระบบที่ลดต่ำลงไปด้วย ซึ่งในบทนี้จะเน้นการอธิบายความเปลี่ยนแปลงความจุระบบในเชิงปริมาณที่เกิดขึ้นจากการรบกวนของความผิดพลาดทางการควบคุมกำลังงาน พร้อมทั้งพิจารณาปัจจัยความน่าเชื่อถือของระบบผ่านการวิเคราะห์ความไว ซึ่งจะเป็นแบบอย่างในการวิเคราะห์ความไวในระบบ CDMA

5.3 ลักษณะสำคัญและนิยามของการวิเคราะห์ความไว

หนทางในการอธิบายค่าความเปลี่ยนแปลงความจุระบบในเชิงปริมาณนั้นคือการวิเคราะห์ความไวของระบบ ซึ่งมีผลมาจากการแปรของพารามิเตอร์ซึ่งจากพารามิเตอร์ทั้งหลายมีความสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทำหน้าที่ของระบบ และการวิเคราะห์ความไวสามารถนำไปประยุกต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของระบบ ดังนี้

1. การกำหนดทิศทางในการวิจัยระบบ โดยเน้นไปที่พารามิเตอร์ที่สำคัญ
2. การคาดคะเนพารามิเตอร์โดยการศึกษาการทำงานของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่นำมาซึ่งขีดของการดำเนินงานที่ดีที่สุดของระบบไปพร้อมกับการศึกษาปัจจัยที่เอื้อต่อการทำงาน

3. การประเมินค่าสูงสุดของผลกระทบจากข้อผิดพลาดของพารามิเตอร์ในพฤติกรรมของระบบ

5.3.1 ลักษณะสำคัญในการวิเคราะห์ความไว

ความไวของระบบในการแปรผันหรือตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในระบบนั้นๆ เป็นลักษณะหนึ่งที่สามารถนำค่ามาปรับปรุงระบบได้ ในวงการวิศวกรรมได้มีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการวิเคราะห์และสังเคราะห์ประเด็นต่างๆ การวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ก็เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่จะต้องมีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเป็นการนำไปสู่คำตอบที่หลากหลาย ปกติแล้วแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะถูกสมมติขึ้นเพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบหรือผลลัพธ์ที่แม่นยำ แต่สมมติฐานนี้ก็ไม่ได้เป็นจริงเสมอไป เพราะมักจะเกิดข้อขัดแย้งระหว่างระบบในความเป็นจริงและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมัน ด้วยเหตุผลนี้ผลลัพธ์ที่เกิดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงไม่จำเป็นที่จะต้องนำไปทำทดลอง โดยการปฏิบัติเนื่องจากอาจเกิดความคลาดเคลื่อนสูงระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองและจากระบบจริง ซึ่งถ้าหากแนวทางที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดถูกรวมไว้ เนื่องจากธรรมชาติของสิ่งที่ดีที่สุดมักจะแสดงให้เห็นถึงชุดของพารามิเตอร์พิเศษ นอกจากนี้ยังมีปัญหาอีกมากมายซึ่งเกี่ยวกับการพิจารณาความไวว่าเป็นประโยชน์หรือเป็นแค่คำสั่งยกตัวอย่างเช่น การประยุกต์วิธีการทาง gradient ระบบปรับตัวและเรียนรู้ตนเอง การออกแบบระบบควบคุมที่ตายด้าน การกำหนดความต้านทานทางการออกแบบเครือข่าย

5.3.2 นิยามพื้นฐานของความไว

มีมากมายหลายทางที่จะกำหนดปริมาณสำหรับลักษณะเฉพาะของพารามิเตอร์ในระบบ ในที่นี้ได้ทำการสรุปแล้ว ให้พฤติกรรมของระบบที่เป็นลักษณะเฉพาะอยู่ในรูปของปริมาณ $C = \zeta(\alpha)$ ให้เป็นฟังก์ชันของระบบซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ประกอบไปด้วยชุดของพารามิเตอร์ $\alpha = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_r]^T$ และกำหนดให้ $\alpha_0 = [\alpha_{10} \ \alpha_{20} \ \dots \ \alpha_{r0}]^T$ เป็นชุดพารามิเตอร์ในฟังก์ชันระบบ $C_0 = \zeta(\alpha_0)$ (Nominal System Function)

นิยาม 5.3.2-1 : Absolute Sensitivity Function

$$S_{\alpha_j}^C \equiv \frac{\partial C}{\partial \alpha_j} \Big|_{\alpha_0} = S_{\alpha_j}^C(\alpha_0) \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, r \quad (5.2)$$

เครื่องหมาย α_0 เพื่อแสดงว่าการหาอนุพันธ์ส่วนย่อยเกิดขึ้นกับฟังก์ชัน C_0

นิยาม 5.3.2-2 : *Parameter-Induced Error of the System Function*

$$\Delta\zeta \equiv \sum_{i=1}^r S_{\alpha_j}^C \Delta\alpha_j \quad (5.3)$$

นิยาม 5.3.2-3 : *Maximum Error of the System Function*

$$|\Delta\zeta| \equiv \sum_{i=1}^r |S_{\alpha_j}^C| |\Delta\alpha_j| \quad (5.4)$$

นิยาม 5.3.2-4 : *Relative (Logarithmic) Sensitivity Function*

$$\bar{S}_{\alpha_j}^C \equiv \frac{\partial \ln C}{\partial \ln \alpha_j} \Big|_{\alpha_0} = \bar{S}_{\alpha_j}^C(\alpha_0) \quad \text{for } j=1,2,\dots,r \quad (5.5)$$

หมายเหตุ : $\ln C$ คือลอการิทึมของชุดพารามิเตอร์ในฟังก์ชัน C และ $\partial \ln C = [\partial C_1 / C_1 \ \partial C_2 / C_2 \ \dots \ \partial C_n / C_n]^T$ และเราสามารถเขียนค่า $\bar{S}_{\alpha_j}^C$ ใหม่ได้ว่า

$$\bar{S}_{\alpha_j}^C = \frac{\partial C_i / C_i}{\partial \alpha_j / \alpha_j} = S_{\alpha_j}^C \frac{\alpha_{j0}}{\zeta_{i0}} \quad (5.6)$$

นิยาม 5.3.2-5 : *Relative Error of the System Function*

$$\frac{\Delta C_i}{\zeta_{i0}} \equiv \sum_{i=1}^r \bar{S}_{\alpha_j}^C \frac{\Delta \alpha_j}{\alpha_{j0}} \quad \text{for } i=1,2,\dots,n \quad (5.7)$$

นิยาม 5.3.2-6 : *Maximum Relative Error of the System Function*

$$\left| \frac{\Delta C_i}{\zeta_{i0}} \right| \equiv \sum_{i=1}^r \left| \bar{S}_{\alpha_j}^C \right| \left| \frac{\Delta \alpha_j}{\alpha_{j0}} \right| \quad \text{for } i=1,2,\dots,n \quad (5.8)$$

5.4 ความไวในระบบ CDMA โดยวิเคราะห์ความจุระบบ

เมื่อได้ทราบทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ความไวแล้ว ต่อจากนี้เราจะนำหลักการดังกล่าวเข้ามาใช้กับฟังก์ชันความจุของระบบ CDMA เพื่อวิเคราะห์ความไว และความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากสมการ (5.1) เพื่อการพิจารณาผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำให้จำนวนผู้ใช้เปลี่ยนแปลงไป กำหนดให้จำนวนผู้ใช้ในขณะนั้นๆ มีค่าสมมูลกับช่องสัญญาณใน reverse link เรียกว่า Equivalent Telephone (or voice) Capacity หรือ ETC จึงทำให้ได้ฟังก์ชันความจุระบบ

$$\hat{C}_{ETC} \equiv N_v + \sum_{i=1}^{K-1} \frac{\gamma_{d_i}}{\gamma_v} N_{d_i} \quad (5.9)$$

ในการพิจารณาความเป็นไปของระบบให้นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยอ้างอิงกับระบบ CDMA ชนิด IS-95 ดังตารางที่ 4.1 และกำหนดให้จำนวนการแทรกสอดของสัญญาณที่เกิดจากเซลล์อื่นๆ เป็น 0.45 ครั้ง แบนด์วิธเท่ากับ 1.2288 MHz ตัวประกอบการใช้ช่องสัญญาณ 3/8

5.4.1 ความไวภายใต้อิทธิพลของค่าความน่าเชื่อถือของระบบ

เพื่อการหาฟังก์ชันความไวระบบ เราจะนำสมการ (5.6) มาใช้ โดยที่ให้ฟังก์ชันความจุ (\hat{C}_{ETC}) เป็นฟังก์ชันระบบและความน่าเชื่อถือของระบบ ($\beta\%$) เป็นสิ่งที่เราจะพิจารณาประกอบ สามารถเขียนได้เป็น

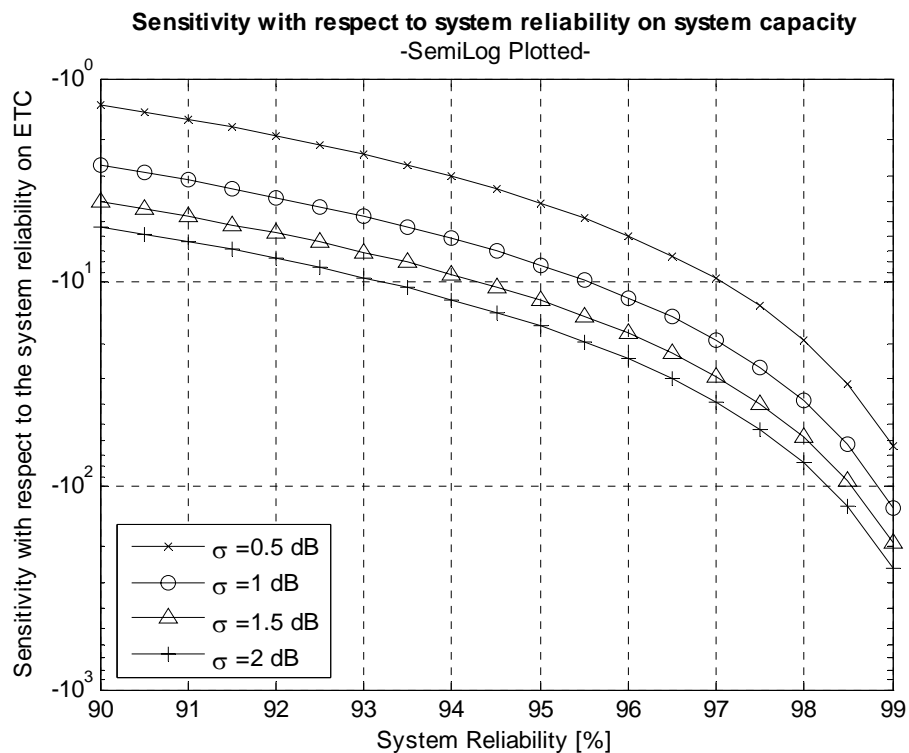
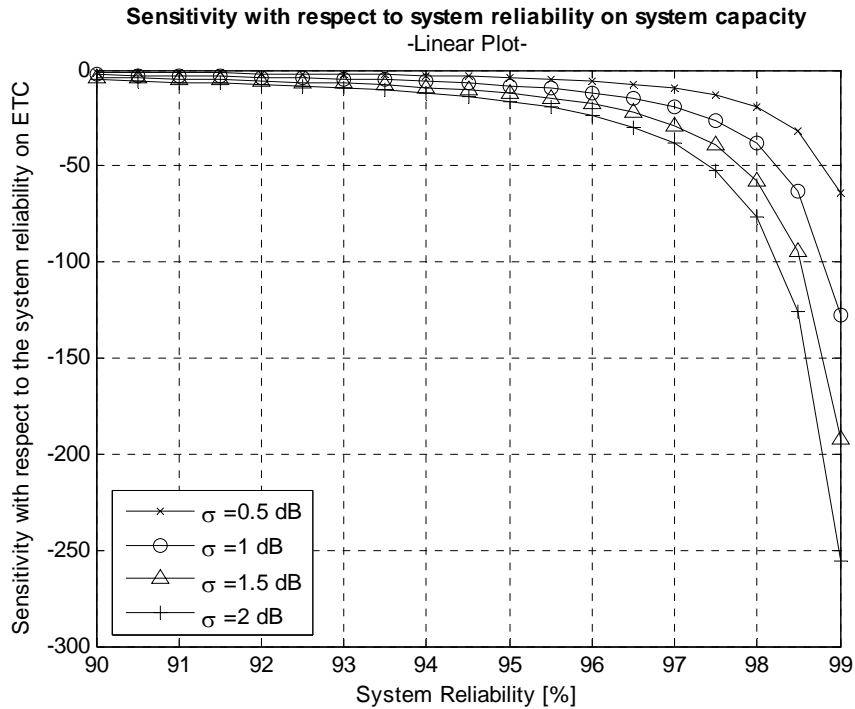
$$\begin{aligned}\bar{S}_\beta^{\hat{C}_{ETC}} &= \frac{\partial \ln \hat{C}_{ETC}}{\partial \ln \beta} \Big|_{\beta_0} \\ &= S_\beta^C \frac{\beta}{\hat{C}_{ETC}} \Big|_{\beta_0} \\ &= \frac{\partial \hat{C}_{ETC}}{\partial \beta} \frac{\beta}{\hat{C}_{ETC}} \Big|_{\beta_0} \\ \therefore \bar{S}_\beta^{\hat{C}_{ETC}} &= \frac{\ln 10 \sigma_{x_0}}{10} \beta_0 \sqrt{2\pi} \exp(Q^{-1}(\beta_0)^2)\end{aligned}\quad (5.10)$$

ตัวห้อย ‘o’ เป็นการแสดงว่าพารามิเตอร์ในระบบนั้นมีค่าปกติ

จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันความไวภายใต้อิทธิพลของค่าความน่าเชื่อถือระบบนั้นจะคงพารามิเตอร์อยู่สองตัวด้วยกัน นั่นคือค่าความน่าเชื่อถือและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการรับ SIR หากจะพิจารณาถึงความเปลี่ยนแปลงของความจุระบบ จะได้ฟังก์ชันของความจุที่เปลี่ยนไปโดย $\Delta\beta$ คือค่าความน่าเชื่อถือของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการรบกวนของระบบอื่นๆ หรือจากปัจจัยอื่นๆ ซึ่งมีผลทำให้ความจุของระบบเปลี่ยนไป

$$\Delta \hat{C}_{ETC} = \bar{S}_\beta^{\hat{C}_{ETC}} \frac{\Delta \beta}{\beta_0} \hat{C}_{ETC} \quad (5.11)$$

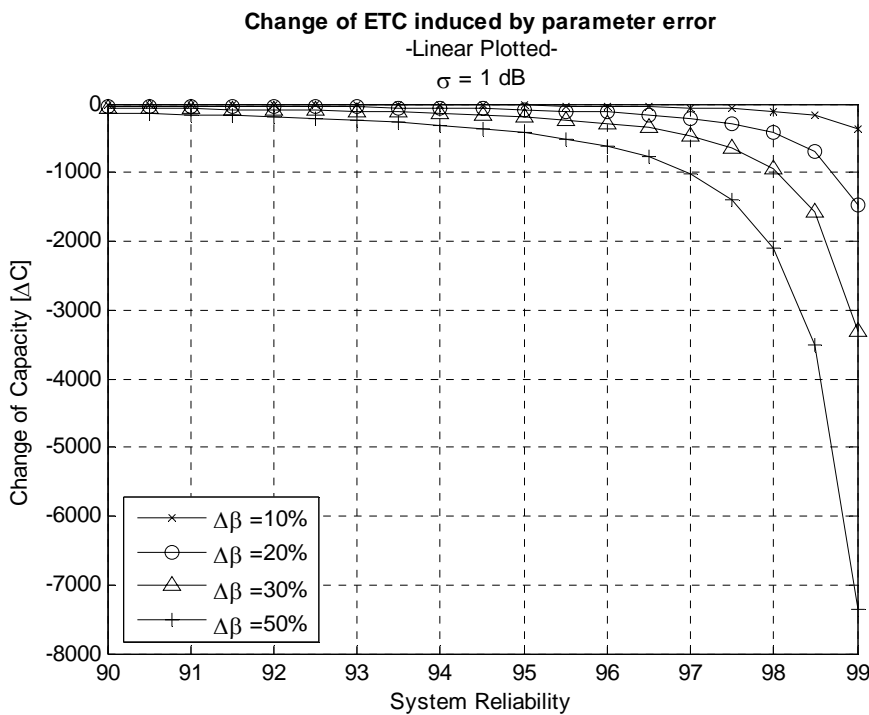
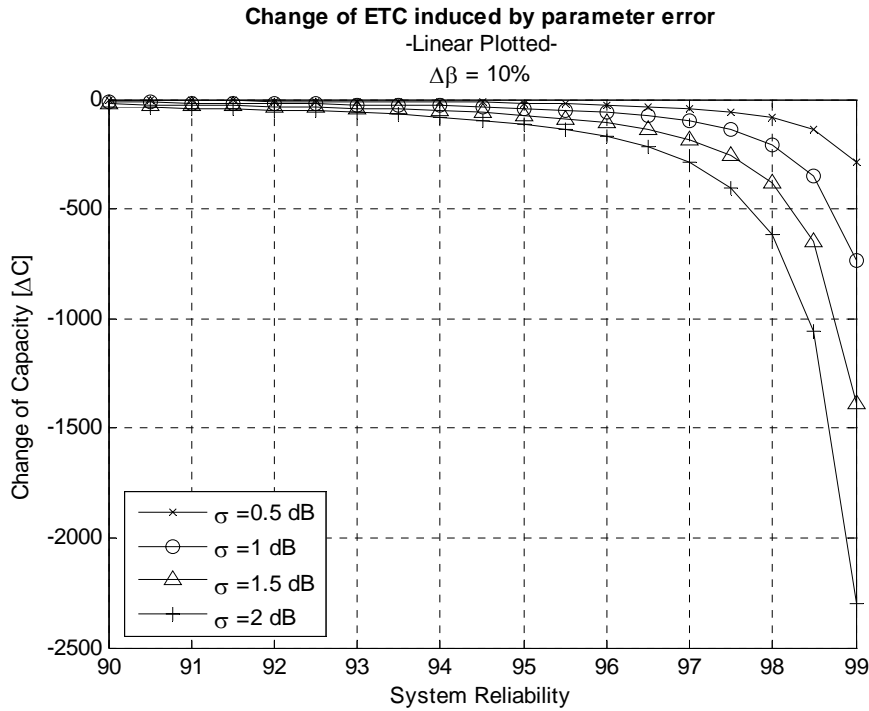
นำฟังก์ชัน (5.10) และ (5.11) ไปพล็อตเพื่อหาความสัมพันธ์โดยเลือกช่วงของค่าความน่าเชื่อถือ ในช่วง 90 – 99 เปอร์เซนต์ และค่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการรับ SIR



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์จากฟังก์ชันความไว

ภายใต้อิทธิพลของค่าความน่าเชื่อถือของระบบ

(ก) พล็อตในสเกลธรรมดา (ข) พล็อตในสเกลกราฟกึ่งลอการิทึม



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความเปลี่ยนแปลงความจุระบบ

(ก) เมื่อค่าความน่าเชื่อถือของระบบผิดพลาด 10 % ในภาวะที่ σ_x แตกต่างกัน

(ข) เมื่อค่าความน่าเชื่อถือของระบบผิดพลาดต่างกัน ในภาวะที่ σ_x เท่ากัน

5.4.2 ความไวภายใต้อิทธิพลของค่าความคลาดเคลื่อนในการรับสัญญาณ

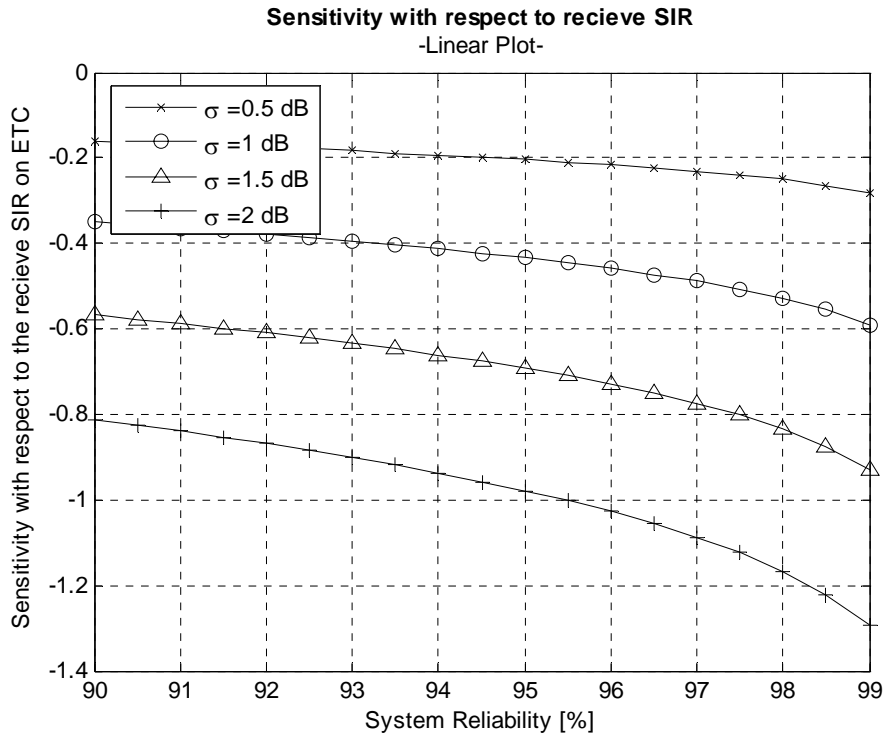
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ_x บ่งถึงความผิดพลาดในการรับข้อมูล (Standard Deviation of Received SIR) เหมือนในข้อที่ 5.4.1 นำสมการ (5.6) มาใช้ โดยที่ให้ฟังก์ชันความจุ (\hat{C}_{ETC}) เป็นฟังก์ชันระบบและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการรับข้อมูลผิดพลาดเป็นสิ่งที่เราจะพิจารณาประกอบสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \bar{S}_{\sigma_x}^{\hat{C}_{ETC}} &\equiv \frac{\partial \hat{C}_{ETC}}{\partial \sigma_x} \frac{\sigma_x}{\hat{C}_{ETC}} \Big|_{\sigma_{x_0}} \\ \therefore \bar{S}_{\sigma_x}^{\hat{C}_{ETC}} &= \ln 10 \left[\frac{Q^{-1}(\beta_0)}{10} \sigma_{x_0} - 0.024 \sigma_{x_0}^2 \right] \end{aligned} \quad (5.12)$$

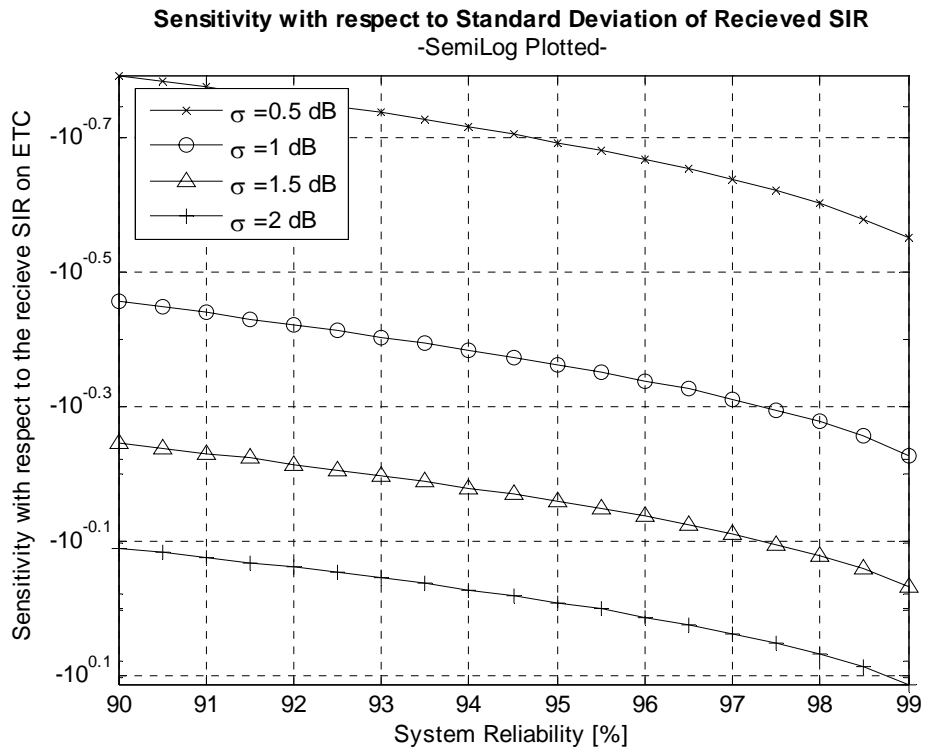
จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันความไวภายใต้อิทธิพลของค่าความคลาดเคลื่อนในการรับสัญญาณนั้น จะคงพารามิเตอร์อยู่สองตัวด้วยกัน ดังเช่นสมการที่ (5.10) นั่นคือค่าความน่าเชื่อถือและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการรับ SIR หากจะพิจารณาถึงความเปลี่ยนแปลงของความจุระบบ จะได้ฟังก์ชันของความจุที่เปลี่ยนไปโดย $\Delta\sigma$ คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าไป เนื่องจากการรบกวนของระบบอื่นๆหรือจากปัจจัยอื่นๆ ซึ่งมีผลทำให้ความจุของระบบเปลี่ยนไป

$$\Delta \hat{C}_{ETC} = \bar{S}_{\sigma_x}^{\hat{C}_{ETC}} \frac{\Delta \sigma}{\sigma_0} \hat{C}_{ETC} \quad (5.13)$$

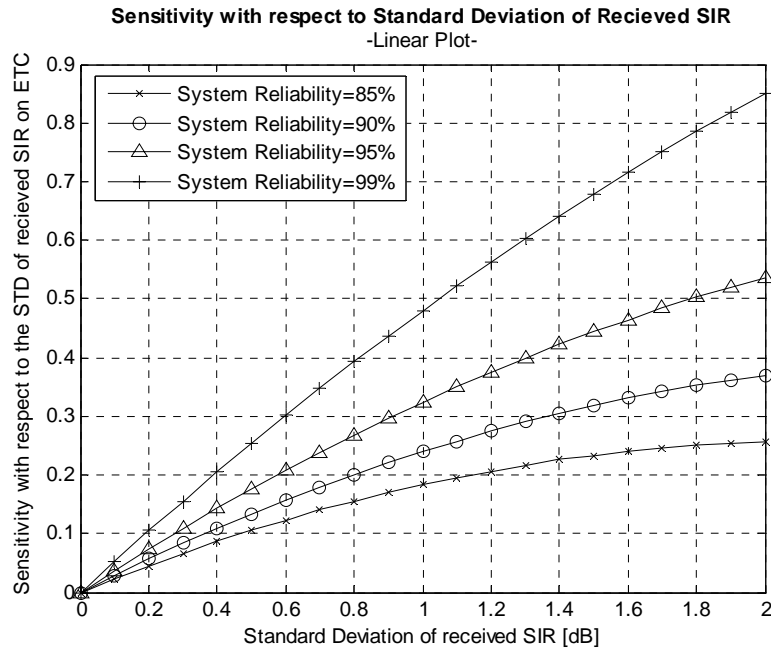
นำฟังก์ชัน (5.12) และ (5.13) ไปพล็อตเพื่อหาความสัมพันธ์โดยเลือกช่วงของค่าความน่าเชื่อถือ ในช่วง 90 – 99 เปอร์เซนต์ และค่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการรับ SIR



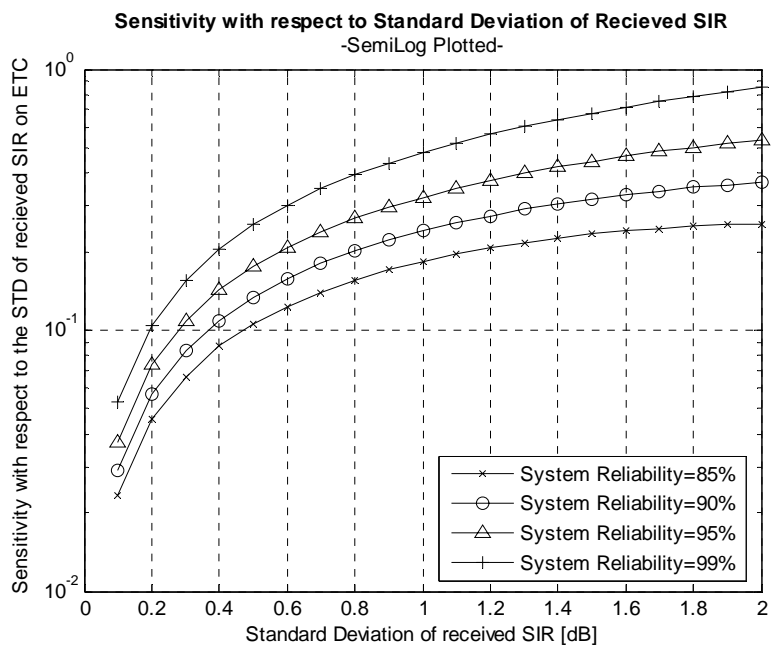
(h)



(g)



(ก)



(ง)

รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์จากฟังก์ชันความไว

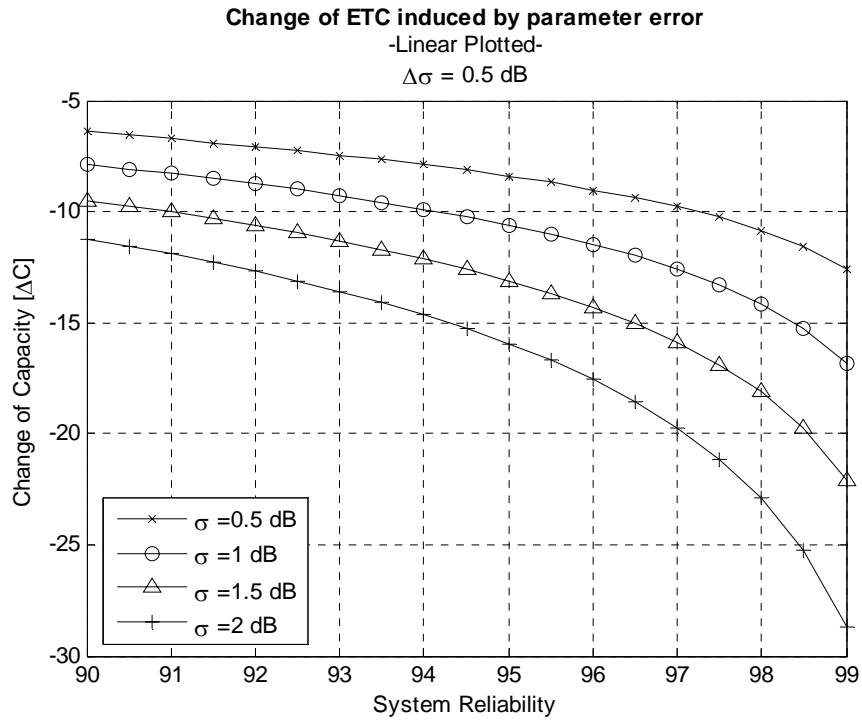
ภายใต้อิทธิพลของค่าค่าความคลาดเคลื่อนในการรับสัญญาณ

(ก) พล็อตในสเกลธรรมดาแปรตามค่าความน่าเชื่อถือของระบบ

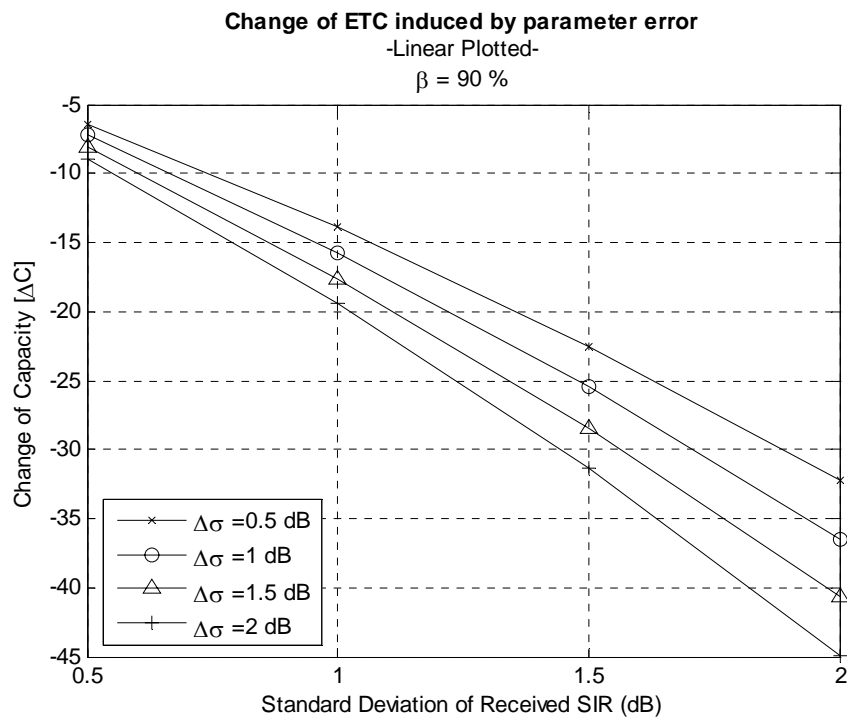
(ง) พล็อตในสเกลกราฟกึ่งล็อกแปรตามค่าความน่าเชื่อถือของระบบ

(ค) พล็อตในสเกลธรรมดาแปรตามส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการรับสัญญาณ SIR

(จ) พล็อตในสเกลกราฟกึ่งล็อกแปรตามส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการรับสัญญาณ SIR



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความเปลี่ยนแปลงความจุระบบ

(ก) เมื่อค่าความคลาดเคลื่อน $\Delta\sigma_x$ คงที่ ในภาวะที่ค่า σ_x แตกต่างกัน

(ข) เมื่อค่าความน่าเชื่อถือของระบบอยู่ที่ 90% เหมือนกัน แต่ค่าความคลาดเคลื่อน $\Delta\sigma_x$ ต่างกัน

5.4.3 ความไวภายใต้อิทธิพลของพารามิเตอร์อื่นๆ

ในหัวข้อนี้เราจะมาวิเคราะห์ความไวของระบบโดยพิจารณาพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ที่เหลือ เริ่มจากค่าความต้องการอัตราการส่งข้อมูล เมื่อนำสมการความจุระบบมาวิเคราะห์ตามหลักการแล้วพบว่า

$$\bar{S}_{R_{req}}^{\hat{C}_{ETC}} \equiv \frac{\partial \hat{C}_{ETC}}{\partial R_{req}} \bigg|_{R_0} \frac{R_{req}}{\hat{C}_{ETC}}$$

$$\therefore \bar{S}_{R_{req}}^{\hat{C}_{ETC}} = -1$$

ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าเป็น -1 นั้นทำให้เราทราบว่า ความไวภายใต้อิทธิพลของอัตราการส่งข้อมูลนั้นมีค่าคงที่ และถ้าพิจารณาต่อไปจะพบว่า การเปลี่ยนแปลงความจุระบบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นตรง

$$\Delta \hat{C}_{R_{req}} = \bar{S}_{R_{req}}^{\hat{C}_{ETC}} \frac{\Delta R_{req}}{R_{req}} \hat{C}_{ETC}$$

$$= - \frac{\Delta R_{req}}{R_{req}} \hat{C}_{ETC}$$

ลองวิเคราะห์ความไวของระบบภายใต้อัตราส่วนความหนาแน่นสเปกตรัมของพลังงานส่งหนึ่งบิตต่อสัญญาณแทรกสอดที่ต้องการ พบว่า

$$\bar{S}_{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{v_{req}}}^{\hat{C}_{ETC}} \equiv \frac{\partial \hat{C}_{ETC}}{\partial \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{v_{req}}} \bigg|_{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_0} \frac{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{v_{req}}}{\hat{C}_{ETC}}$$

$$\therefore \bar{S}_{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{v_{req}}}^{\hat{C}_{ETC}} = -1$$

ทำนองเดียวกันกับการวิเคราะห์อัตราการส่งข้อมูล ก็มีความไวคงที่ และความเปลี่ยนแปลงความจุเป็นเส้นตรง

5.4.3 การเปรียบเทียบผล

เราจะนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงเพื่อหาข้อสรุป หรือหาว่าอิทธิพลจากพารามิเตอร์ตัวใดส่งผลต่อความจุระบบมากที่สุด

- ด้านความไวของระบบ

จากกราฟคงจะสังเกตเห็นได้ว่า พารามิเตอร์ใดที่ความไวในระบบเฉลี่ยแล้วสูงที่สุด นั่นคือค่าความน่าเชื่อถือของระบบนั่นเอง ทำให้พอทำนายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความน่าเชื่อถือของระบบเพียงนิดเดียว อาจจะทำให้ระบบทั้งระบบล่มได้

- ด้านการเปลี่ยนแปลงความจุ

สังเกตเห็นว่าเมื่อค่าความน่าเชื่อถือของระบบผิดเพี้ยนไป 10 % ที่ระดับความน่าเชื่อถือของระบบ 97 % พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความจุประมาณ 700 คน (รูปที่ 5.2ข)

เมื่อเทียบกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการรับข้อมูลเมื่อมีการผิดเพี้ยนไป 50% หรือ

$\Delta\sigma_x = 1 \text{ dB}$ ที่ตำแหน่ง 2 dB พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความจุประมาณ 13 คน (รูปที่ 5.4ข)

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

โครงการนี้เป็นการศึกษาสภาพไวในระบบ CDMA โดยการนำเอาทฤษฎีความจระบบมาแปรผล เพื่อให้เห็นเป็นรูปธรรม และได้ทราบถึงพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อความจระบบ ผ่านการวิเคราะห์ความไว รูปแบบการสรุปผลหรือการได้มาซึ่งคำตอบมีสองลักษณะคือ ลักษณะที่เป็นฟังก์ชันในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ และกราฟแสดงความสัมพันธ์ สภาพไวคือคุณสมบัติของระบบทั่วไป นั่นคือหากมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ใดๆ ระบบจะมีการตอบสนองอย่างไร เป็นโจทย์ที่น่าสนใจ และสามารถนำผลที่ได้ไปปรับปรุงการทำงานได้ด้วย

เมื่อได้ฟังก์ชันตามทฤษฎีความจระบบแล้ว ก็ทำการนำเข้าสู่วิธีการวิเคราะห์สภาพไว ขั้นแรกนั้นจะต้องพิจารณาว่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับระบบมีอะไรบ้าง และพารามิเตอร์ใดเป็นสิ่งที่เราสนใจ พื้นฐานของระบบก็คือพารามิเตอร์ต่างๆ ทำหน้าที่ร่วมกัน ดังนั้นอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่อระบบจึงเป็นสิ่งที่ต้องเกิดขึ้น จากกระบวนการทางคณิตศาสตร์ทำให้ได้ฟังก์ชันความไว (Sensitivity Function) ของพารามิเตอร์นั้นๆ ในโครงการนี้ทำการหาฟังก์ชันความไวในระบบ CDMA ไว 4 ฟังก์ชัน ดังนี้

- 1) ฟังก์ชันความไวของระบบที่พิจารณาค่าความน่าเชื่อถือของระบบ
- 2) ฟังก์ชันความไวของระบบที่พิจารณาจากความคลาดเคลื่อนในการรับสัญญาณ
- 3) ฟังก์ชันความเร็วของระบบที่พิจารณาจากอัตราเร็วการส่งข้อมูลที่ต้องการ
- 4) ฟังก์ชันความเร็วของระบบที่พิจารณาความเข้มพลังงานบิตต่อสัญญาณแทรกสอด

จากการนำฟังก์ชันที่ได้ไปหาความสัมพันธ์โดยการพล็อตกราฟ ทำให้ทราบว่าความน่าเชื่อถือของระบบ (System Reliability) เป็นพารามิเตอร์ที่ทรงอิทธิพลอย่างมากกับระบบ โดยการลดค่าหรือเพิ่มค่า พบว่าความเปลี่ยนแปลงในระบบสูงมาก หากค่าของความน่าเชื่อถือลดลงแล้ว ความจระบบหรือจำนวนผู้ใช้จะลดลงอย่างมาก

ซึ่งแตกต่างจากฟังก์ชันของความคลาดเคลื่อนในการรับสัญญาณ ซึ่งมาในรูปของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แต่สิ่งที่คล้ายคลึงกันอย่างหนึ่งคือ ไม่ว่าเราจะทำการพิจารณาพารามิเตอร์ใดของฟังก์ชันก็ตาม เราจะได้กราฟความสัมพันธ์ในรูปกราฟลด คือการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้ระบบมากๆ เข้าก็จะทำให้จำนวนผู้ใช้ลดลง

พอจะสรุปได้ว่าฟังก์ชันความไวของระบบสามารถทำนายความเป็นไปของระบบได้ ซึ่งจริงๆ แล้ว ในภาคปฏิบัติอาจจะได้ผลลัพธ์แตกต่างกับภาคทฤษฎีอย่างมาก การศึกษาแค่ในตำราอย่างเดียวคงไม่เพียงพอ ผู้ศึกษาจะต้องศึกษากับแหล่งความรู้ภายนอกด้วย

6.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. ทางผู้จัดทำมีทักษะทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงน้อยมาก จึงทำให้การทำงานมีความสะดวกและใช้เวลาานพอสมควร
2. เมื่อการได้ฟังก์ชันมาแล้วจะต้องแปรผลโดยใช้โปรแกรมช่วยเหลือ และการใช้โปรแกรมนี้เองเป็นความยุ่งยาก เนื่องจากจะต้องมีทักษะการเขียนโปรแกรมด้วย
3. โครงการนี้เป็นโครงการในเชิงวิชาการทฤษฎี จึงอาจจะทำให้เข้าใจยากสำหรับผู้เริ่มต้น

6.3 ขีดจำกัดของโครงการ

1. ผลที่ได้มาจากการวิเคราะห์ตามหลักการที่ได้มีการสืบค้นด้วยตนเอง
2. ผสมการทดลองหรือผลทางทฤษฎียังมีน้อย จึงต้องอาศัยการปรับปรุงอีกพอสมควร

6.4 ประโยชน์ที่ได้จากการทำโครงการ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับระบบ CDMA
2. มีการคิดและการวางแผนการทำงานอย่างเป็นระบบคล้ายการทำงานของผู้ใหญ่ที่มีคุณภาพ
3. เสริมทักษะด้านการคำนวณทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง
4. ได้มีการทบทวนความรู้ในระหว่างการทำโครงการพอสมควร

6.5 การนำไปใช้งานของโครงการ

1. เพื่อเป็นการอ้างอิงและนำผลลัพธ์มาทำนายความเป็นไปของระบบ CDMA
2. เป็นคุณสมบัติหนึ่งของระบบ CDMA ที่มีความน่าสนใจในการศึกษา

6.6 ข้อเสนอแนะ

การนำเสนอโครงการคล้ายกับการนำเสนอทฤษฎี หรือความรู้ใหม่ๆ จึงยากที่จะจัดให้อยู่ในรูปของสิ่งประดิษฐ์หรือการทดลอง เพราะยังมีความคิดอยู่ว่าภาคทฤษฎีนั้นมีผลที่แตกต่างหรือคลาดเคลื่อนกับความเป็นจริงสูง จึงอยากที่จะนำเสนอในส่วนของวิธีการหลักการมากกว่าผลการทดลอง แต่ถ้ามีการพัฒนาให้อยู่ในรูปแบบ Graphic User Interface หรือ GUI ก็จะเห็นทฤษฎีเป็นรูปธรรมมากขึ้น ง่ายต่อการติดตามศึกษาความเปลี่ยนแปลง

บรรณานุกรม

- Gilhausen, K. S., et al., "On the Capacity of a Cellular CDMA System," IEEE Trans. On Vehicular Technol., 1991, pp. 303-312.
- J. Jiang, and R. Doraiswami. "Selection of Optimal Monitoring Locations In Real-Time Intelligent Reconfigurable Control Systems," Thunder Bay, Ont., P7B 5E1 Canada, Lakehead University
- Kiseon Kim, and Insoo Koo. *CDMA Systems Capacity Engineering*. Artech House, Inc., 2005.
- T. Nguyen, P. Dassanayake and M. Faulkner. "Capacity of CDMA Cellular System With Adaptive Sectorisation and Non-Uniform Traffic," PO Box 14428, MCMC Melbourne, VIC 8001, AUSTRALIA, Victoria University of Technology
- พงษ์ศักดิ์ สุสัมพันธ์ไพบูลย์. ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่. กรุงเทพมหานคร:
บริษัท สำนักพิมพ์ดวงกมล(2520) จำกัด, 2542.
- พีรพงษ์ อุฑารสกุล. "ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ CDMA," เอกสารประกอบการสอนวิชา 427 459 Mobile Communication Systems, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2550, หน้า 111-124.
- มนัส สังวรศิลป์ และ วรรัตน์ ภัทรอมรกุล. คู่มือการใช้ MATLAB ฉบับสมบูรณ์. นนทบุรี:
สำนักพิมพ์ อินโฟเพรส, 2543.
- ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ. เทคโนโลยีสื่อสารไร้สาย CDMA. กรุงเทพมหานคร:
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ. หลักการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่. กรุงเทพมหานคร:
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- สุนิสา จบศรี และ อำนวย ทีจันทิก. การศึกษาปริมาณทราฟฟิกของระบบโทรศัพท์. นครราชสีมา:
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม-บัณฑิตมหาวิทยาลัย.
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2549.
- อำนวย เตโชติชवाल. การวิเคราะห์ความจุแอร์แลจของระบบเซลลูลาร์ CDMA เพื่อรองรับผู้ใช้บริการเสียง
และข้อมูล. กรุงเทพมหานคร : วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรม
โทรคมนาคม-บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.

ประวัติผู้เขียน

นายเอกพล พลเยี่ยม เกิดเมื่อวันอาทิตย์ที่ 3 พฤศจิกายน พ.ศ.2528 ภูมิลำเนาอยู่ที่ อำเภอเมืองอุดรธานี จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนประจักษ์ศิลปาคาร อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี เมื่อปี พ.ศ.2546 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โทรศัพท์ 085-857-5759
อี-เมลล์ jay.sut@gmail.com
เว็บไซต์ <http://grinder.exteen.com>