

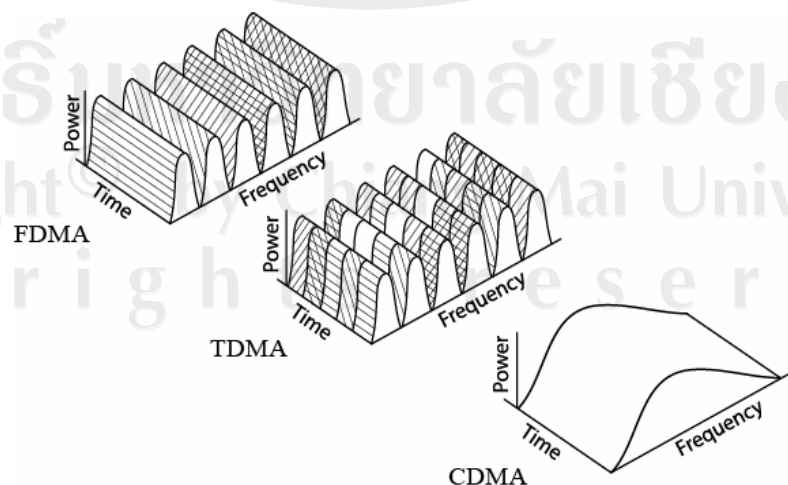
บทที่ 2

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบซีดีเอ็มเอ

ในบทนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานที่เกี่ยวกับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบซีดีเอ็มเอ การทำสเปกตรัม รหัสต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบซีดีเอ็มเอ รายละเอียดการรับส่งสัญญาณระหว่างสถานีฐานกับเครื่องลูกข่าย การควบคุมกำลังส่ง ปัญหาของการส่งสัญญาณ และความจุของช่องสัญญาณ

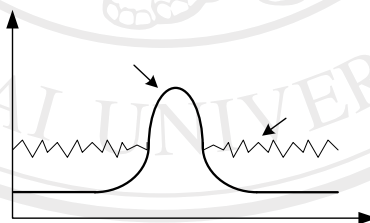
2.1 พื้นฐานระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบซีดีเอ็มเอ

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบซีดีเอ็มเอ ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อรองรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่สาม (3G) ซึ่งสามารถรองรับการสื่อสารทางเสียง สัญญาณภาพ วิดีทัศน์ และรูปแบบบริการใหม่ ๆ ในอนาคต [1,2] โดยซีดีเอ็มเอ (Code Division Multiple Access: CDMA) เป็นเทคนิคการเข้าใช้ช่องสัญญาณร่วมแบบหลายทางเพื่อรองรับผู้ใช้บริการจำนวนหลายรายในเวลาเดียวกัน และได้ยอมรับเป็นมาตรฐาน IS-95 หลักการเบื้องต้นของซีดีเอ็มเอ คือนำความถี่ที่ได้จัดสรรแบ่งออกเป็นช่วง แต่ละช่วงมีแบนด์วิดท์ประมาณ 1.25 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งจะมีขนาดแบนด์วิดท์กว้างกว่าระบบอื่นๆ และระบบจะอนุญาตให้ผู้ใช้ทุกรายใช้ช่องสื่อสารร่วมกัน ดังนั้นในช่วงความถี่เดียวกันจะเกิดการรบกวนกันในเชิงความถี่ตลอดเวลาการใช้งาน แต่ผู้ใช้แต่ละคู่จะสามารถแยกแยะคู่สนทนาของตัวเองได้โดยอาศัยชุดรหัสที่แตกต่างกันในการรับส่งข้อมูล



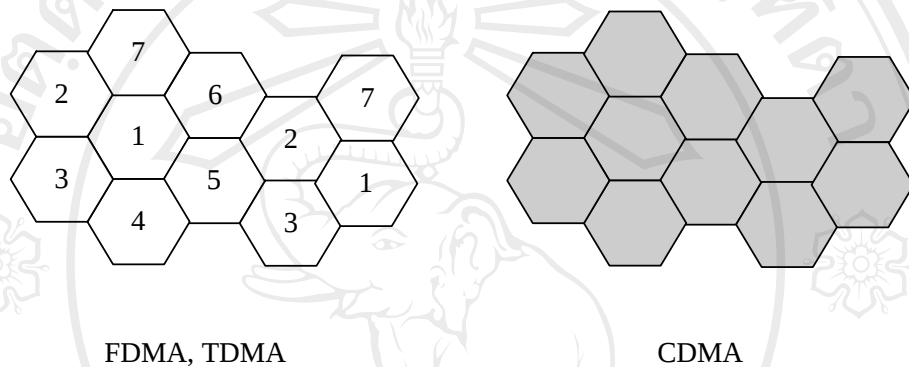
รูปที่ 2.1 การจัดสรรช่องสื่อสารในแต่ละแบบ [35]

สำหรับวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบอื่นเช่น เอฟดีเอ็มเอ (Frequency Division Multiple Access : FDMA) จะนำความถี่ทั้งหมดมาแบ่งเป็นช่วงความถี่สั้นๆ และจะกำหนดให้ผู้ใช้งานแต่ละคู่แยกใช้งานช่องสื่อสารช่องหนึ่งไปตลอดการสนทนา สำหรับทีดีเอ็มเอ (Time Division Multiple Access : TDMA) นอกจากผู้ใช้งานแต่ละคู่จะถูกกำหนดให้ใช้ช่องสื่อสารในช่วงความถี่ที่ต่างกันแล้ว จะมีการแบ่งช่วงเวลาต่างกันอีก เปรียบเหมือนกับการสลับเวลาการใช้รถยนต์ไป ดังรูปที่ 2.1 ดังนั้นจะพบว่าทั้งวิธีของเอฟดีเอ็มเอและทีดีเอ็มเอจะเป็นการนำทรัพยากรที่มีทั้งหมดมาแบ่งส่วนการใช้งาน หรือเรียกว่าเซลล์ โดยเซลล์ที่ติดกันจะใช้ความถี่ไม่เหมือนกันจึงเกิดข้อจำกัดการใช้งานในส่วน of แบนด์วิดท์ จึงเรียกได้ว่าเป็น ระบบจำกัดแบนด์วิดท์ (Bandwidth Limited System) [4] ดังรูปที่ 2.2 ในการส่งข้อมูลโดยใช้วิธีการทั้งสองแบบจะต้องใช้กำลังในการส่งมาก และการจัดสรรในส่วน of แบนด์วิดท์ต้องทำอย่างแม่นยำ เพื่อลดปัญหาการรบกวนของเซลล์ที่อยู่ติดกัน ขณะที่ซีดีเอ็มเอจะใช้ แบนด์วิดท์ที่กว้างกว่า ไม่ต้องการแบ่งช่องความถี่ โดยผู้ใช้งานทั้งหมดจะใช้ความถี่ร่วมกัน ทำให้มีความจุของระบบมากกว่า แต่ต้องมีการควบคุมกำลังที่แม่นยำ เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนกันระหว่าง ผู้ใช้ จึงเรียกได้ว่า ซีดีเอ็มเอเป็นระบบจำกัดกำลัง (Power Limited System) [4] ซึ่งในระบบซีดีเอ็มเอ จะมีวิธีการในการควบคุมกำลังส่งของเครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่อง เพื่อให้ระดับกำลังที่วัดได้ ณ สถานี ฐานมีค่าใกล้เคียงกันให้มากที่สุด [1,4,6,8,19] ดังจะได้อธิบายในหัวข้อ 2.7



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบกำลังที่ใช้ในการส่งสัญญาณ

รูปแบบการนำความถี่เดิมกลับมาใช้ซ้ำ (Frequency Reuse) นั้นเป็นการช่วยเพิ่มความจุของช่องสัญญาณในระบบให้มากขึ้น วิธีการของเอฟดีเอ็มเอและทีดีเอ็มเอจะใช้วิธีการแบ่งแถบความถี่ที่มีอยู่ออกเป็น 7 ส่วน แบ่งให้เซลล์ 7 เซลล์ โดยเซลล์ที่ใช้ความถี่เดียวกันจะอยู่ห่างกันมากที่สุด ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งหมายความว่า ความถี่ทั้ง 7 จะถูกนำมาใช้ซ้ำใหม่ในพื้นที่ที่ห่างกัน ทำให้ไม่มีการรบกวนกันทางความถี่ สำหรับซีดีเอ็มเอจะใช้ความถี่เดียวในทุกเซลล์ โดยอาศัยการเข้ารหัสเพื่อแยกแยะคู่สนทนา ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น



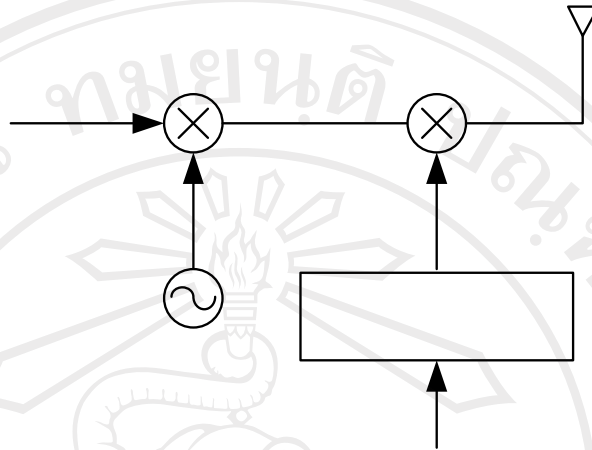
รูปที่ 2.3 รูปแบบการนำความถี่กลับมาใช้ซ้ำของเอฟดีเอ็มเอและทีดีเอ็มเอ สำหรับซีดีเอ็มเอใช้ความถี่เดียวกันทั้งหมด

2.2 สเปกตรัมแพร่กระจาย

ระบบซีดีเอ็มเอจะมีเทคนิคพิเศษที่เรียกว่าการทำสเปกตรัมแพร่กระจาย (Spread Spectrum) โดยมีจุดมุ่งหมายในยุคเริ่มแรกทางด้านการทหาร เพื่อการป้องกันการส่งสัญญาณรบกวนจากศัตรู (Enemy Jamming) และทำให้การดักฟังเป็นไปได้ยากเนื่องจากระดับความแรงของสัญญาณที่ส่งมีขนาดเล็กใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวนภายในอากาศ ต่อมาได้มีการนำมาใช้ในระบบสื่อสารไร้สายซึ่งทำให้ระบบมีความจุมากขึ้น อัตราเร็วของข้อมูลของการสนทนาเพิ่มจาก 9,600 บิตต่อวินาทีขยายเป็น 1.228 เมกะบิตต่อวินาทีซึ่งมากกว่าระบบเอฟดีเอ็มเอและทีดีเอ็มเอ ในปัจจุบันมีวิธีการทำสเปกตรัมแพร่กระจายอยู่ 2 วิธีหลัก [1] โดยทั้งสองวิธีใช้รหัสที่เรียกว่า รหัส PN (Pseudorandom Noise) ในกระบวนการทำสเปกตรัมแพร่กระจายแต่แตกต่างกันในรายละเอียดการสร้าง ดังต่อไปนี้

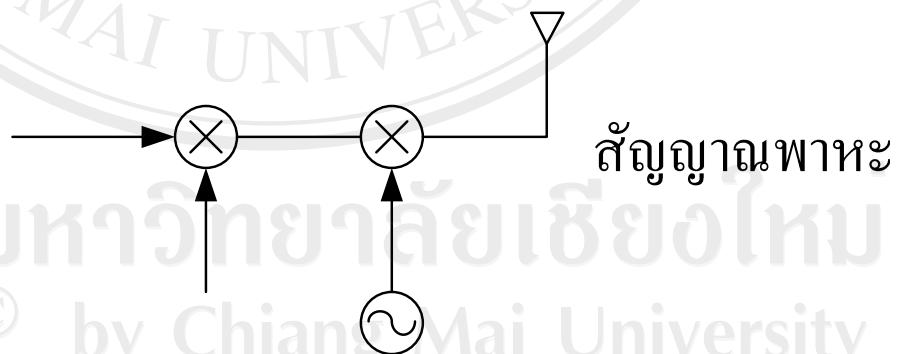
1. การทำสเปกตรัมแพร่กระจายแบบฟริควเncy ฮอปปีง (Frequency Hopping Spread Spectrum : FS-SS) จะนำบิตข้อมูลมาแบ่งเป็นแพ็คเกจ (Packet) แล้วส่งข้อมูลแต่ละแพ็คเกจด้วยความถี่พาหะที่ถูกทำให้ต่างกันด้วยวงจรสังเคราะห์ความถี่ (Frequency Synthesizer) การทำให้ความถี่พาหะเปลี่ยนไปจะเลือกตามลำดับความถี่ที่ถูกจัดไว้ (Frequency-Hopping Sequence) ซึ่งได้มาจาก

รหัส PN โดยผู้ใช้แต่ละคนจะมีลำดับความถี่ที่ต่างกัน ดังรูปที่ 2.4 การทำสเปกตรัมแบบนี้นิยมใช้กับงานระบบสื่อสารเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless LAN)



รูปที่ 2.4 วงจรภาคส่งสัญญาณซีดีเอ็มเอแบบฟรีควนซีฮอปปีง (FH-CDMA)

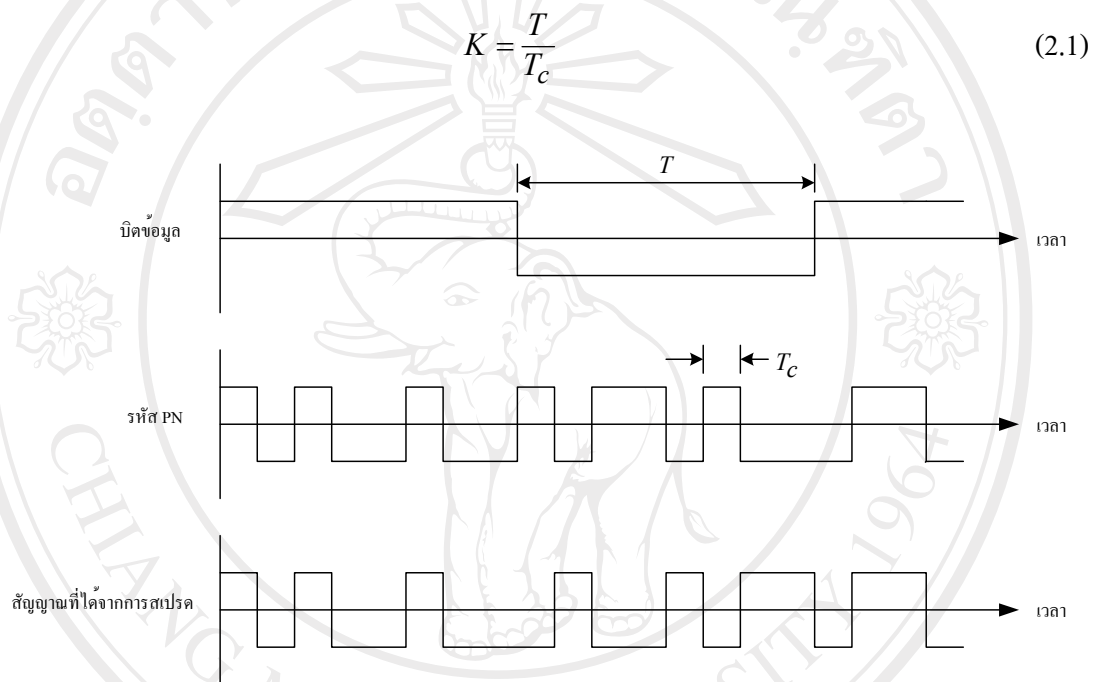
2. การทำสเปกตรัมแบบไดเรกต์ซีแควนซ์ (Direct Sequence Spread Spectrum : DS-SS) การทำสเปกตรัมแบบนี้นี้ได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบซีดีเอ็มเอ จึงเรียกระบบนี้เป็นระบบซีเอ็มเอแบบไดเรกต์ซีแควนซ์ (DS-CDMA) และสำหรับงานวิจัยนี้ก็ได้อาศัยการทำสเปกตรัมแบบไดเรกต์ซีแควนซ์เช่นกัน



รูปที่ 2.5 วงจรภาคส่งสัญญาณซีดีเอ็มเอแบบไดเรกต์ซีแควนซ์ (DS-CDMA)

เริ่มจากการพิจารณารหัส PN ซึ่งเป็นลำดับบิตที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยวิธีการที่มีลำดับขั้นตอนที่ชัดเจน รหัสที่ได้จะมีคุณสมบัติคล้ายกับบิตที่ได้จากการสุ่ม (Random) ซึ่งต่อมานำรหัส PN ที่ได้ไปคูณกับบิตข้อมูลที่มีคาบเท่ากับ T วินาที โดยกระทำทีละบิต ถ้ากำหนดให้รหัส PN มี

คาบเวลาของหนึ่งชิปส์ (Chips) เป็น T_c วินาทีซึ่งมีคาบแคบกว่าความกว้างของบิตข้อมูลมาก จึงทำให้ผลของการทำ สเปกตรัมมีอัตราบิตที่เพิ่มสูงขึ้นมาก เรียกว่า อัตราชิปส์ (Chips Rate) ดังรูปที่ 2.6 ดังนั้นการส่งลำดับสัญญาณนี้จึงต้องการแบนด์วิดท์ที่มีขนาดเพิ่มขึ้นด้วยอัตราขยายการประมวลผล (Processing Gain : K) หลังจากนั้นก็จะนำลำดับสัญญาณที่ได้ไปมอดูเลตกับสัญญาณพาหะ

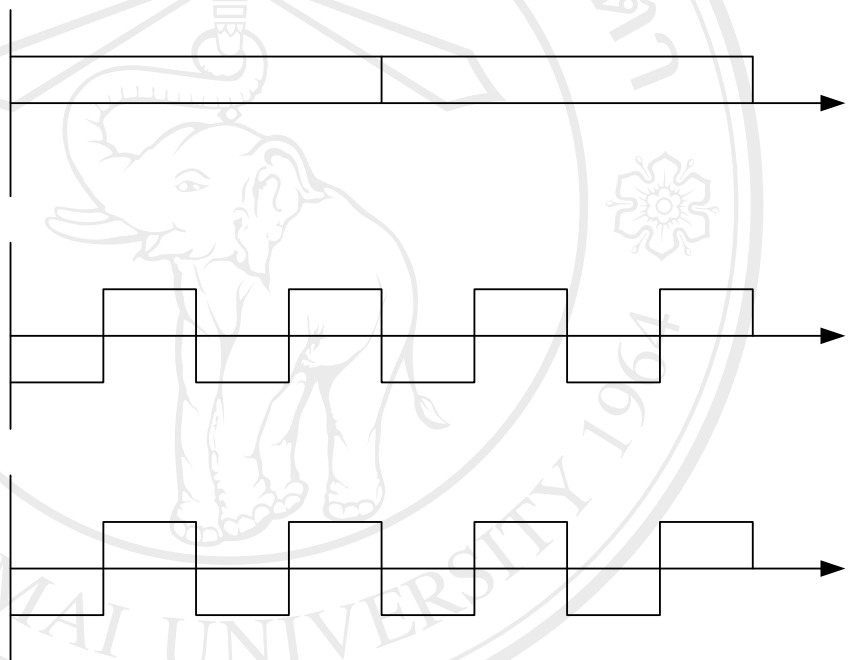


รูปที่ 2.6 ตัวอย่างสัญญาณที่ผ่านการทำสเปกตรัมแบบไคเรกต์ซีแควนซ์

ผู้ใช้แต่ละคนก็จะมีรหัส PN ที่แตกต่างกันจึงเรียกกระบวนการนี้ว่า การทำสเปกตรัม หลังจากนั้นสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายจะถูกส่งออกรวมกันไปบนคลื่นพาหะความถี่เดียวกันทำให้มีการรบกวนกันและยากต่อการแยกสัญญาณออกจากกัน และสำหรับขั้นตอนการแยกสัญญาณ สามารถทำได้โดยการนำรหัส PN ของแต่ละผู้ใช้งานกับสัญญาณรวมที่ได้รับมา เครื่องลูกข่ายก็จะแยกสัญญาณของตนเองออกมาได้ เนื่องจากสัญญาณที่ถูกสเปกตรัมออกด้วยรหัส PN ชุดหนึ่ง จะไม่สามารถดีสเปกตรัม (Despread) ออกด้วยรหัส PN ชุดอื่น จากรูปที่ 2.7 ถึง 2.9 เป็นตัวอย่างของการทำสเปกตรัมแบบไคเรกต์ซีแควนซ์ของผู้ใช้ 3 คน มีอัตราชิปส์เป็น 4 โดยผู้ใช้แต่ละคนมีบิตข้อมูลเป็น 11 10 และ 01 ตามลำดับ สังเกตได้ว่าบิตข้อมูล 1 จะแทนด้วยระดับแรงดันเป็น 1 และบิตข้อมูล 0 จะแทนด้วยระดับแรงดันเป็น -1 สัญญาณรวมที่ได้จากผู้ใช้งานทั้งสามคนเมื่อนำมา

แยกโดยผู้รับแต่ละคนที่ภาครับจะใช้หลักการตัดสินใจคือ ถ้าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าเป็น 4 แสดงว่าบิตข้อมูลเป็น 1 และถ้าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าเป็น -4 แสดงว่าบิตข้อมูลนั้นเป็น 0

จากรูปที่ 2.10 ผู้ใช้ที่ภาครับแต่ละคนจะสามารถนำบิตข้อมูลเดิมกลับคืนมาได้อย่างถูกต้อง ถ้าหากพิจารณากรณีที่ผู้ใช้หมายเลข 1 นำรหัส PN ของตนเองคูณกับสัญญาณที่ได้จากการทำสเปรดของผู้ใช้หมายเลข 2 จะพบว่าผลรวมของการคูณในทุก ๆ 4 บิตจะได้ค่าเป็น 0 ทั้งหมด นั่นหมายความว่าสัญญาณที่ถูกสเปรดออกด้วยรหัส PN ชุดหนึ่ง จะไม่สามารถดีสเปรด (Despread) ออกด้วยรหัส PN ชุดอื่นดังที่ได้กล่าวไปแล้ว



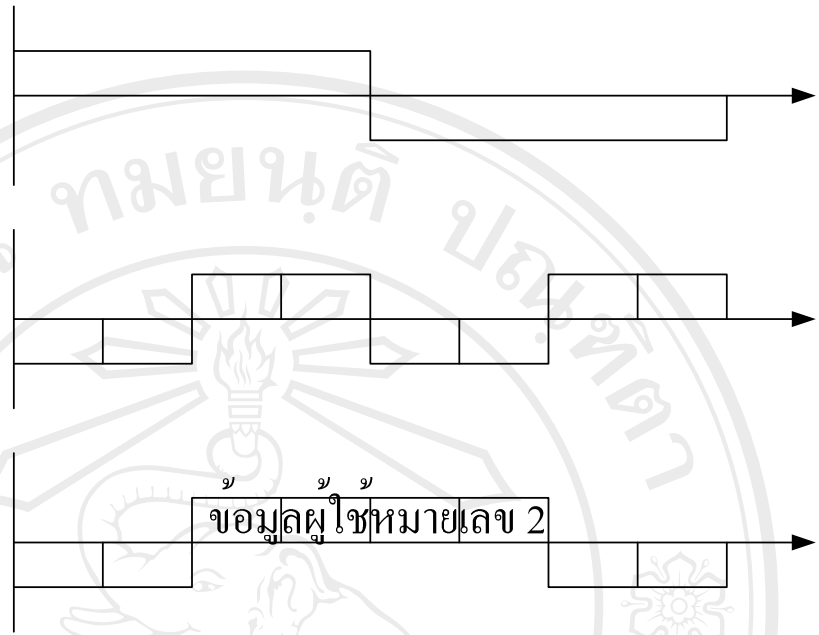
รูปที่ 2.7 รูปสัญญาณของผู้ใช้หมายเลข 1 ที่วงจรภาคส่ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

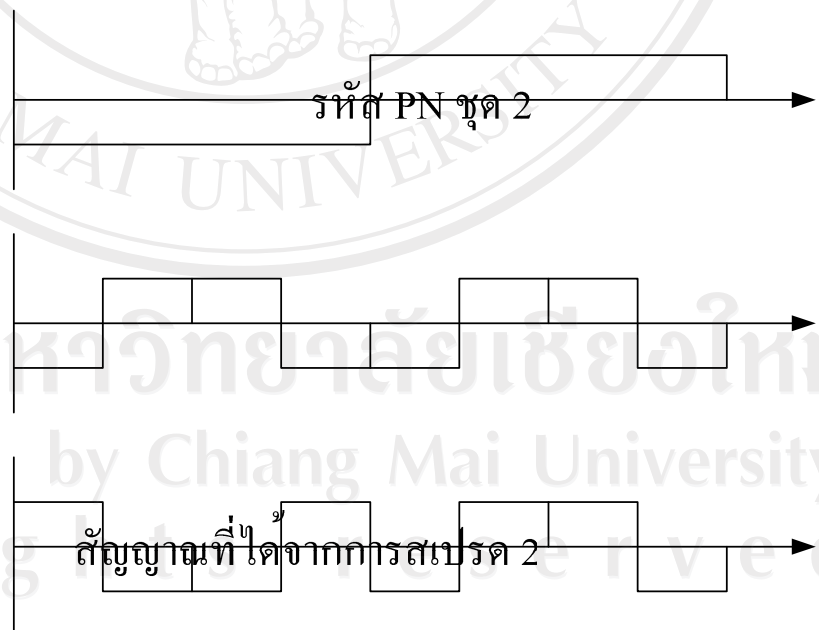
ข้อมูลผู้ใช้หมายเลข 1

1

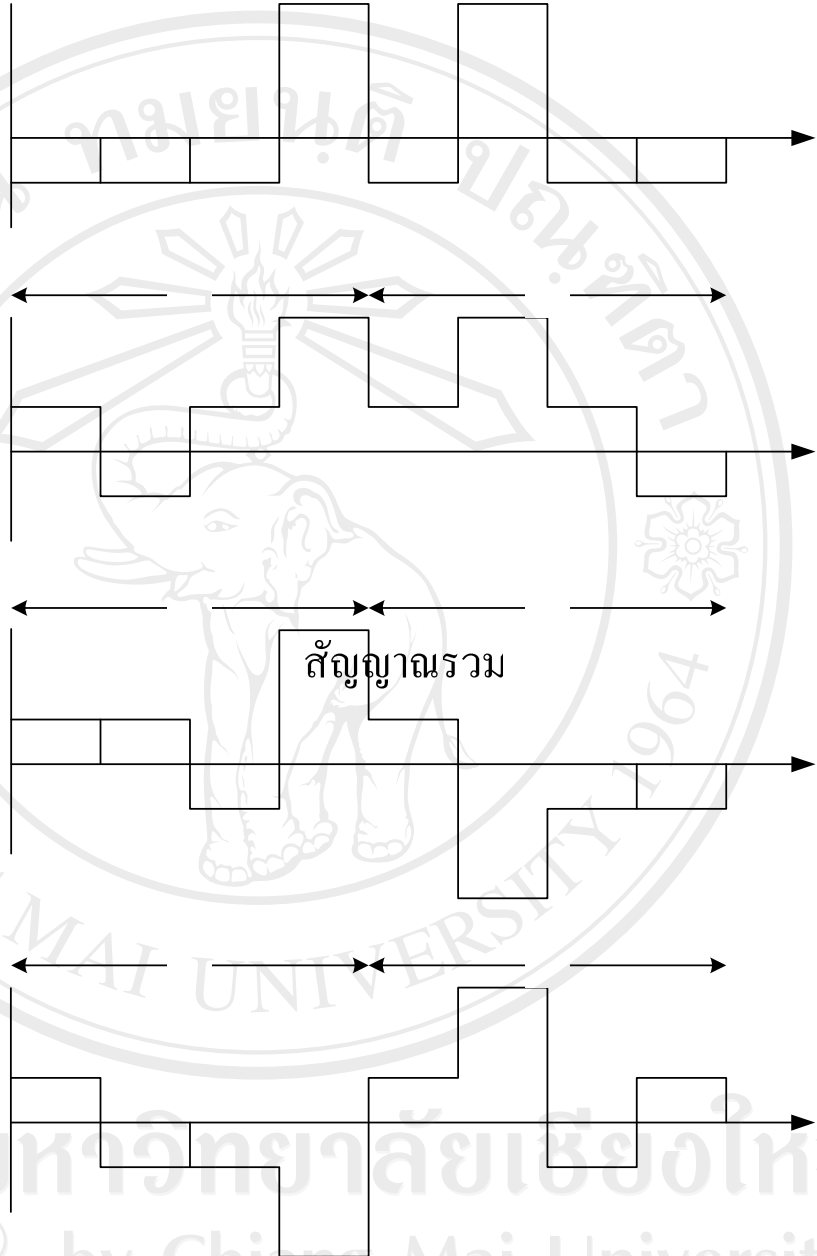
รหัส PN ชุด 1



รูปที่ 2.8 รูปสัญญาณของผู้ใช้หมายเลข 2 ที่วงจรภาคส่ง



รูปที่ 2.9 รูปสัญญาณของผู้ใช้หมายเลข 3 ที่วงจรภาคส่ง



1

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved

ภาครับคุณสัญญาณรวม
 รูปที่ 2.10 แสดงสัญญาณที่ส่งและรับ

1

ภาครับคุณสัญญาณรวม

2.3 ประเภทรหัสที่ใช้ในระบบซีดีเอ็มเอ

ในระบบซีดีเอ็มเอตามมาตรฐาน IS-95 มีการใช้รหัสทั้งหมด 3 ประเภท โดยแต่ละประเภทจะถูกนำมาใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งได้แก่ รหัส Walsh รหัส PN แบบยาว และรหัส PN แบบสั้น มีรายละเอียดดังนี้

1. รหัส Walsh (Walsh Code)

เป็นรหัสที่มีเรียกชื่อเรียกอีกอย่างว่า รหัสฮาดามาร์ด (Hadamard Code) มีความยาว 64 บิต จำนวนทั้งหมด 64 ชุดซึ่งมีคุณสมบัติตั้งฉากกัน (Orthogonal) หมายความว่ามีความสัมพันธ์ข้าม (Cross Correlation) ระหว่างกันเป็นศูนย์ ใช้สำหรับการทำสเปกตรัมที่มีอัตราการส่งข้อมูล 1.228 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps)

2. รหัส PN แบบยาว (Long PN Code)

สร้างจากวงจรเลื่อนข้อมูล (Shift Register) ขนาด 42 บิต ทำให้ได้รหัสที่มีความยาว $2^{42} - 1 = 4.398 \times 10^{12}$ และเนื่องจากอัตราการสร้างรหัสนี้มีค่าเท่ากับ 1.228 เมกะบิตต่อวินาที ดังนั้นรหัสนี้จะมีการซ้ำทุก ๆ 41.425 วัน

3. รหัส PN แบบสั้น (Short PN Code)

รหัส PN แบบสั้นมีอยู่ 2 ชุด คือ ชุด In-phase (ชุด I) และ ชุด Quadrature (ชุด Q) ตามมาตรฐานการมอดูเลตแบบ QPSK แต่ละชุดสร้างจากวงจรเลื่อนข้อมูลขนาด 15 บิต รหัสที่ได้มีความยาว $2^{15} - 1 = 32,767$ และจะมีการเพิ่มบิต 0 อีกหนึ่งบิต ทำให้ได้รหัสที่มีความยาว 32,768 รหัส นี้จะมีการซ้ำกันทุก ๆ 26.66 มิลลิวินาที

2.4 การรับส่งสัญญาณระหว่างสถานีฐานกับเครื่องลูกข่าย

การติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ให้บริการหรือเครื่องลูกข่ายจะต้องกระทำผ่านสถานีฐาน ดังนั้นการเชื่อมต่อสัญญาณจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การส่งสัญญาณจากสถานีฐานไปยังเครื่องลูกข่าย (Forward Link) และ การส่งสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายไปยังสถานีฐาน (Reverse Link) ซึ่งการส่งสัญญาณทั้งสองส่วนจะประกอบด้วยช่องสัญญาณต่าง ๆ ที่มีความสำคัญในการสื่อสารให้เป็นไปอย่างต่อเนื่อง รวมถึงข้อมูลที่ใช้ในการควบคุมกำลังของเครื่องลูกข่าย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นการทำนายค่ากำลังด้านย้อนกลับที่เกิดขึ้นจากเครื่องลูกข่าย ดังนั้นในการอธิบายรายละเอียดจึงจะเน้นไปเฉพาะในส่วนของการส่งสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายไปยังสถานีฐานซึ่งคือการส่งสัญญาณด้านย้อนกลับ ส่วนรายละเอียดการส่งสัญญาณจากสถานีฐานไปยังเครื่องลูกข่ายจะกล่าวไว้พอสังเขป

2.4.1 การส่งสัญญาณไปข้างหน้า (Forward Link)

เป็นการส่งสัญญาณจากสถานีฐานไปยังเครื่องลูกข่ายประกอบด้วยช่องสัญญาณ 4 ประเภท

1. ช่องสัญญาณไพลอต (Forward Pilot Channel)

เป็นการส่งสัญญาณไพลอต (Pilot Signal) จากสถานีฐานไปให้เครื่องลูกข่ายเพื่อใช้เป็นสัญญาณพาหะอ้างอิงสำหรับการคิ่มอดูเลตแบบโคฮีเรนซ์ ในส่วนสัญญาณนี้จะไม่มีส่วนของสัญญาณข้อมูลอยู่ สัญญาณไพลอตยังใช้สำหรับการควบคุมกำลังส่ง โดยเมื่อเครื่องลูกข่ายได้รับสัญญาณไพลอตก็จะทำการคำนวณหาค่ากำลังเฉลี่ยเพื่อใช้ประมาณค่ากำลังสูญเสียระหว่างการเดินทางของสัญญาณ ซึ่งจะนำไปใช้กำหนดขนาดกำลังที่เหมาะสมสำหรับการส่งสัญญาณออกของเครื่องลูกข่ายต่อไป

2. ช่องสัญญาณซิงโครไนเซชัน (Forward Synchronization Channel)

ใช้ส่งข้อมูลที่จำเป็นในช่วงเริ่มต้นของการติดต่อ เพื่อให้เครื่องลูกข่ายมีจังหวะเวลาที่ตรงกับสถานีฐาน (Synchronization) สัญญาณที่ส่งออกมาจะประกอบด้วย ข้อมูลจังหวะเวลา หมายเลขประจำตัวของระบบ โครงข่ายที่เครื่องลูกข่ายติดต่ออยู่และเวลาของระบบ

3. ช่องสัญญาณเพจจิง (Forward Paging Channel)

สถานีฐานจะใช้ช่องสัญญาณนี้ในการค้นหาตำแหน่งของเครื่องลูกข่ายที่ต้องการจะติดต่อด้วย และหลังจากนั้นสถานีฐานจะทำการจัดสรรช่องสัญญาณทราฟฟิก (Traffic Channel) สำหรับใช้ในการติดต่อรับส่งข้อมูลต่อไป

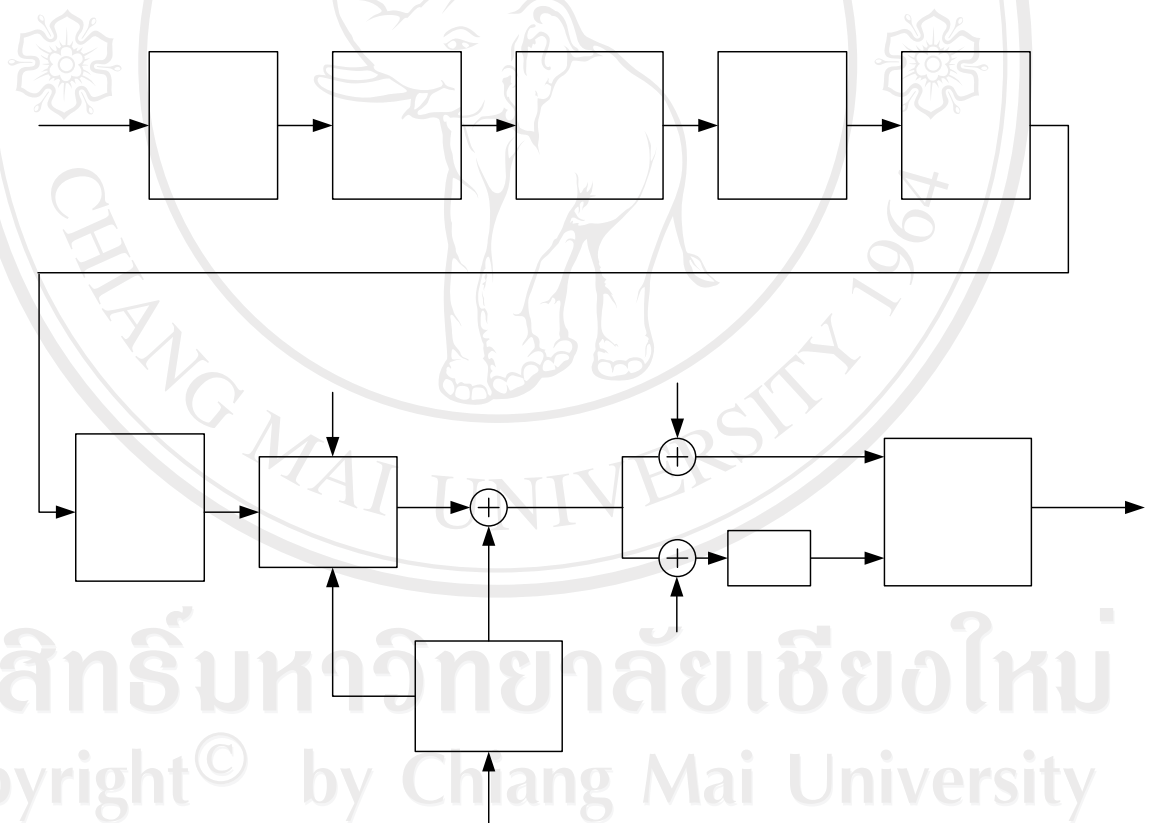
4. ช่องสัญญาณทราฟฟิก (Forward Traffic Channel)

เป็นช่องสัญญาณสำหรับส่งสัญญาณข้อมูลตลอดช่วงเวลาที่มีการติดต่อสื่อสาร

2.4.2 การส่งสัญญาณด้านย้อนกลับ (Reverse Link)

การส่งสัญญาณด้านย้อนกลับคือการส่งสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายไปยังสถานีฐาน ซึ่งมีขั้นตอนที่ซับซ้อนกว่าการส่งสัญญาณจากสถานีฐานมายังเครื่องลูกข่าย เนื่องจากเครื่องลูกข่ายมีข้อจำกัดในเรื่องแหล่งพลังงานซึ่งก็คือแบตเตอรี่ ดังนั้นกำลังที่ออกจากเครื่องลูกข่ายจะมีขนาดที่อ่อนกว่าเมื่อเทียบกับกำลังที่ส่งออกจากสถานีฐาน การส่งสัญญาณในด้านย้อนกลับมี 2 ประเภท คือ

1. ช่องสัญญาณแอกเซส (Access Channel) จะเป็นการส่งสัญญาณออกไปยังสถานีฐานเพื่อขอเริ่มการติดต่อในกรณีที่เครื่องลูกข่ายต้องการจะโทรออก
2. ช่องสัญญาณทราฟฟิกด้านย้อนกลับ (Reverse Traffic Channel) จะทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณเสียงและสัญญาณอื่นๆ หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการของช่องสัญญาณแอกเซส ซึ่งจะทำให้หน้าที่ตลอดช่วงเวลาการสนทนากัน มีขั้นตอนการสร้างสัญญาณดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการสร้างสัญญาณด้านย้อนกลับของช่องสัญญาณทราฟฟิก

Reverse Traffic

Channel

Add CRCs

Add 8-bit

Encoder

Tail

เมื่อช่องสัญญาณทราฟฟิกได้มีการส่งสัญญาณเสียง วงจรเข้ารหัสสัญญาณเสียงจะจัดข้อมูลเป็นแพ็กเก็ต (Packet) ทุก ๆ 20 วินาที โดยขนาดความยาวมีค่าไม่คงที่ขึ้นกับปริมาณการใช้งานระหว่างคู่สาย ในมาตรฐาน IS-95 มีการแบ่งชนิดของแพ็กเก็ตออกเป็น 4 แบบดังตารางที่ 2.1 หลังจากนั้นจะนำข้อมูลมาผ่านกระบวนการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันที่มีการอัตราการเข้ารหัส (R) เท่ากับ $1/3$ หมายความว่า ข้อมูลหนึ่งบิตจะแทนด้วยสัญลักษณ์ (Symbol) 3 บิต และใช้จำนวนชุดของข้อมูลที่เข้ารหัสในแต่ละรอบ (Constraint Length : K) เท่ากับ 9 ซึ่งจะมีการเพิ่มหางรหัส (Code Tail) อีก 8 บิตต่อท้าย อีกทั้งยังมีการเพิ่มรหัส CRC เพื่อใช้ตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูล ถึงขั้นตอนนี้ข้อมูลจะถูกเพิ่มขึ้นเป็นสามเท่า แล้วผ่านเข้าสู่กระบวนการซ้ำ (Symbol Repetition) ซึ่งจะทำให้เพิ่มบิตข้อมูลซ้ำเพื่อให้ได้อัตราบิตเป็น 28.8 kbps จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการอินเตอร์พัวเวอร์เพื่อลดการผิดพลาดแบบเบิร์ส โดยจะนำข้อมูลที่ละ 20 ms ซึ่งมีทั้งหมด 576 บิต มาจัดเรียงเป็น 32 แถวและ 18 คอลัมน์ โดยเขียนบิตข้อมูลลงหน่วยความจำในแนวดิ่ง แล้วนำข้อมูลออกมาใหม่โดยอ่านข้อมูลที่ละแถวในแนวนอน ต่อมาจะทำการแปลงบิตข้อมูลที่ละ 6 บิตให้กลายเป็นรหัส Walsh ที่มีความยาว 64 ชิปส์ ผลที่ได้คือข้อมูลมีอัตราส่งเป็น $(28.8/6) \times 64 = 307.2$ kcps สำหรับวงจร Data Burst Randomizer จะทำหน้าที่เปิดและปิดเกตเพื่อตัดสัญญาณที่ซ้ำซ้อนออกไปเพื่อช่วยลดปริมาณสัญญาณรบกวน ในลำดับถัดมาจะนำสัญญาณมาทำการสเปรดด้วยรหัส PN แบบยาวที่มีอัตราชิปส์เท่ากับ 1.2288 Mcps และถูกสเปรดด้วยรหัส PN แบบสั้นทั้งหมด In-phase (ชุด I) และ ชุด Quadrature (ชุด Q) โดยชุด Q จะมีการหน่วง (Delay) ข้อมูลเป็นเวลาครึ่งหนึ่งของคาบตามมาตรฐานการมอดูเลตแบบ QPSK และเมื่อทำการมอดูเลตกับสัญญาณพาหะก็จะได้สัญญาณคลื่นวิทยุ (Radio Frequency: RF) ส่งผ่านออกอากาศต่อไป

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างของแพ็กเก็ต

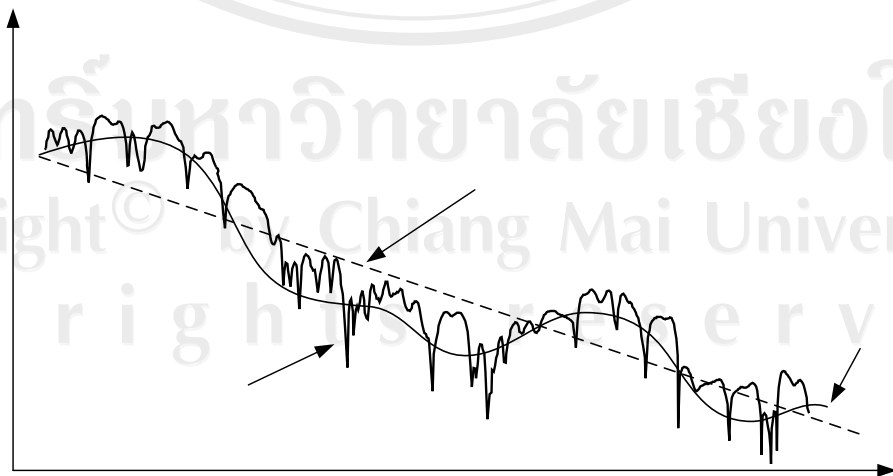
Information	Signaling	CRC	Code tail	Total	Bit Rate
(bits)	(bits)	(bits)	(bits)	(bits)	(bps)
171	1	12	8	192	9,600
80	0	8	8	96	4,800
40	0	0	8	48	2,400
16	0	0	8	24	1,200

2.5 ปัญหาของการส่งสัญญาณ



รูปที่ 2.12 การเดินทางของสัญญาณโดยตรง (Line of Sight : LOS)

การส่งสัญญาณระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นการส่งสัญญาณแบบไร้สาย มีความยุ่งยากและซับซ้อนกว่าระบบสื่อสารแบบอื่น มักจะมีผลกระทบอันเนื่องมาจากการส่งสัญญาณเสมอ (Propagation Effect) สาเหตุเป็นเพราะว่าสายอากาศของโทรศัพท์เคลื่อนที่มักอยู่สูงจากพื้นไม่มาก และสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางเช่น อาคาร ตึก ต้นไม้ เนินเขา สัตว์ต่างชนิดกันไม่ได้เกิดจากการเดินทางโดยตรงระหว่างเครื่องลูกข่ายกับสถานีฐาน ซึ่งเรียกว่า Line of Sight (LOS) ดังรูปที่ 2.12 แต่จะเกิดจากการสะท้อนผ่านสิ่งกีดขวางอื่นเรียกเส้นทางการเดินทางของสัญญาณเหล่านี้ว่า Non Line of Sight (NLOS) และอีกประการหนึ่งคือ เครื่องลูกข่ายมักมีการเคลื่อนที่ระหว่างการสนทนา อีกทั้งสิ่งแวดล้อมก็อาจมีการเคลื่อนที่ด้วย ส่งผลให้ระยะทางระหว่างเครื่องลูกข่ายกับสถานีฐานก็มีการเปลี่ยนแปลงและทำให้คุณภาพการส่งสัญญาณมีลักษณะไม่แน่นอน ด้วยเหตุนี้นี้ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จึงต้องมีเครื่องมือที่ช่วยในการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีทางสถิติ

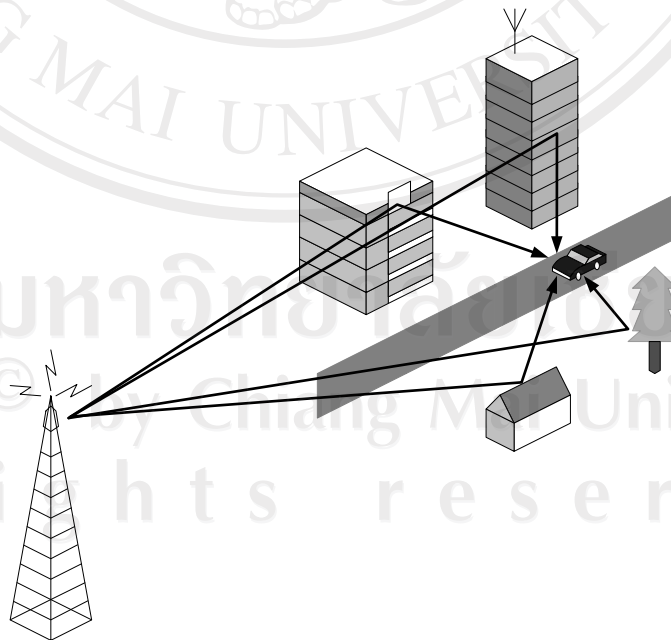


รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงสัญญาณเนื่องจากการสูญเสียแบบต่าง ๆ

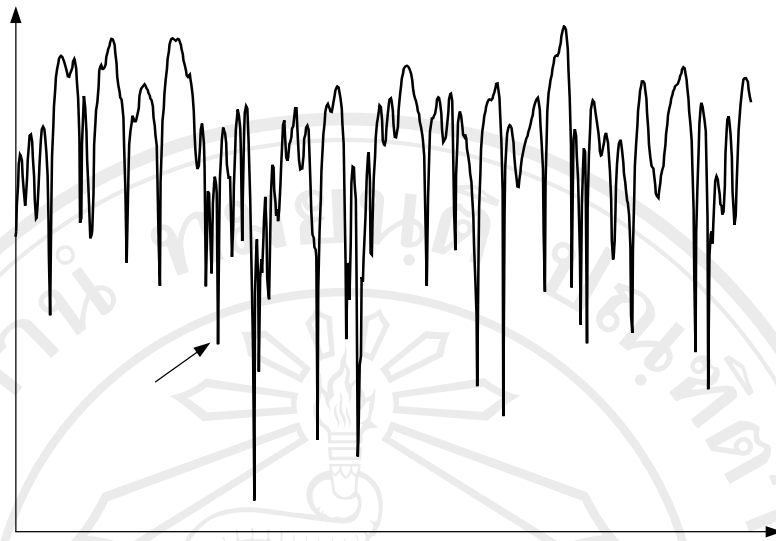
ด้วยสาเหตุดังกล่าว จึงทำให้การส่งผ่านสัญญาณระหว่างเครื่องลูกข่ายกับสถานีฐานมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม อีกทั้งเกิดการลดทอนของสัญญาณอันเนื่องมาจากสาเหตุต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทหลัก คือ

1. การสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) เป็นการลดทอนของสัญญาณอันเนื่องมาจากระยะทางระหว่างเครื่องลูกข่ายและสถานีฐาน เมื่อระยะทางมากขึ้นก็จะทำให้ภาครับได้รับสัญญาณที่อ่อนลง และการลดทอนจะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในบริเวณนั้นด้วย โดยสามารถประมาณได้ว่าสัญญาณส่งจะสูญเสียมากขึ้นตามกำลังสองของระยะทางที่เพิ่มขึ้นและกำลังสองของความถี่ที่ใช้ส่ง และถ้าเครื่องลูกข่ายอยู่ห่างจากสถานีฐานมากกว่า 2 กิโลเมตร การลดทอนจะมีมากขึ้นตามกำลังสี่ของระยะทาง

2. เฟดดิ้งระยะยาว (Long-Term Fading) หรือเฟดดิ้งขนาดใหญ่ (Large-Scale Fading) สามารถอธิบายลักษณะการกระจายสัญญาณได้แบบลอจิกปกติ (Lognormal distribution) ซึ่งเกิดจากการที่สัญญาณบางส่วนถูกบดบัง (Shadowing Effect) ไปชั่วขณะจากสิ่งแวดลอมรอบข้าง ส่งผลให้สัญญาณลดลงหรือเพิ่มขึ้นโดยขึ้นอยู่กับการวางตัวของสิ่งแวดลอมนั้น เมื่อเครื่องลูกข่ายเคลื่อนที่ผ่านออกจากบริเวณนั้น ก็จะได้รับสัญญาณเป็นปกติเหมือนเดิม ค่าต่ำสุดของสัญญาณที่ลดลงถูกเรียกว่า เฟดดิ้งดิฟส์ (Fading Dips) โดยระยะห่างระหว่างเฟดดิ้งดิฟส์สองจุดจะมีค่าประมาณ 10 ถึง 20 เมตร



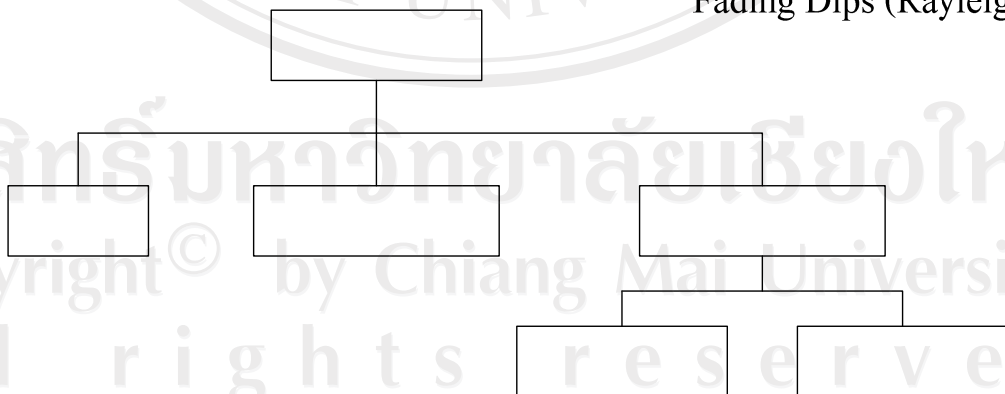
รูปที่ 2.14 การรับสัญญาณจากหลายทิศทาง



รูปที่ 2.15 สัญญาณกำลังที่เกิดจากเฟดดิ้งแบบเรย์ลีย์หลายเส้นทาง

3. เฟดดิ้งระยะสั้น (Short-Term Fading) หรือเฟดดิ้งขนาดเล็ก (Small-Scale Fading) เกิดจากการสะท้อนหรือหักเหของสัญญาณกับสิ่งแวดลอมรอบข้างในหลายทิศทาง ส่งผลให้ภาครับได้รับสัญญาณหลายๆ สัญญาณ มีทั้งขนาดและเฟสต่างกัน เมื่อสัญญาณเหล่านี้มารวมกัน ก็จะได้สัญญาณที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงอย่างมากและเปลี่ยนแปลงค่อนข้างบ่อยครั้ง และเนื่องจากลักษณะการกระจายของสัญญาณมีลักษณะคล้ายฟังก์ชันการกระจายแบบเรย์ลีย์ (Rayleigh Distribution) จึงเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า มัลติพาธเรย์ลีย์เฟดดิ้ง (Multipath Rayleigh Fading) หรือเฟดดิ้งแบบเรย์ลีย์หลายเส้นทาง สำหรับเฟดดิ้งดิฟส์ของเรย์ลีย์จะมีระยะห่างระหว่างกันประมาณครึ่งลูกคลื่น [18]

Fading Dips (Rayleigh)



รูปที่ 2.16 ภาพรวมของการลดทอนของสัญญาณ [1]

รูปที่ 2.16 เป็นภาพรวมของปัญหาการลดทอนของสัญญาณ ซึ่งจากปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เพื่อลดหรือแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยอาศัยแบบจำลองที่สร้างขึ้น ซึ่งมีอยู่หลายแบบดังจะได้กล่าวถึงในลำดับถัดไป

2.6 แบบจำลองช่องสัญญาณ

2.6.1 ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ชิฟต์ (Doppler Shift)

ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ชิฟต์ คือ ปรากฏการณ์ที่ภาครับได้รับสัญญาณที่มีความถี่ต่างไปจากความถี่ของภาคส่ง อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของภาครับหรือภาคส่ง แต่สำหรับกรณีของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ สิ่งที่มีการเคลื่อนที่จะเป็นเครื่องลูกข่าย เมื่อเครื่องลูกข่ายเคลื่อนที่เข้าหาสถานีฐาน ความถี่ของสัญญาณที่เครื่องลูกข่ายได้รับจากสถานีฐานจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันถ้าเครื่องลูกข่ายเคลื่อนที่ออกจากสถานีฐาน ความถี่ของสัญญาณที่เครื่องลูกข่ายได้รับจากสถานีฐานจะมีค่าลดลง พิจารณาเครื่องลูกข่ายมีความเร็ว v เมตรต่อวินาที และทำมุม θ กับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ให้ f_c เป็นความถี่พาหะหน่วยเฮิรตซ์ (Hz) และ c เป็นความเร็วแสงซึ่งมีค่าประมาณ 3×10^8 เมตรต่อวินาที จะได้ค่าดอปเปลอร์ชิฟต์สูงสุด (Maximum Doppler Shift) f_d ดังสมการ 2.2

$$f_d = \frac{vf_c}{c} \cos \theta \quad (2.2)$$

โดยปกติถ้าผู้ใช้ทำการใช้เครื่องลูกข่ายขณะขับรถอยู่บนถนนจะมีค่าดอปเปลอร์ชิฟต์สูงสุดประมาณ 80 เฮิรตซ์ และถ้าผู้ใช้กำลังเดินอยู่ตามถนนจะมีค่าดอปเปลอร์ชิฟต์สูงสุดประมาณ 4 เฮิรตซ์ เมื่อกำหนดให้ความถี่พาหะเป็น 900 เมกะเฮิรตซ์ [1,4,18]

2.6.2 แบบจำลองช่องสัญญาณหลายเส้นทาง (Multipath Channel Model)

แบบจำลองช่องสัญญาณแบบเรย์ลีย์หลายเส้นทางที่นิยมใช้ในงานวิจัยทั่วไปมักจะใช้ตามแบบของ Jakes [5,6,36] ซึ่งประกอบด้วยวงจรออสซิลเลเตอร์ความถี่ต่ำจำนวน N_0 ชุด ที่มีค่าเท่ากับค่าดอปเปลอร์ชิฟต์ค่าต่าง ๆ กัน โดยมีออสซิลเลเตอร์อีกหนึ่งตัวที่มีความถี่เป็นความถี่ดอปเปลอร์ชิฟต์สูงสุด (f_d) ซึ่งองค์ประกอบความถี่ต่าง ๆ เหล่านี้จะทำหน้าที่จำลองสัญญาณความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่พาหะ (f_c) และที่องค์ประกอบความถี่ของออสซิลเลเตอร์ N_0 ชุด จะกำหนดให้มีขนาดเป็น 1 ทั้งหมด ส่วนองค์ประกอบความถี่สำหรับความถี่ดอปเปลอร์ชิฟต์สูงสุดมีขนาดเป็น $1/\sqrt{2}$ สำหรับความถี่ออสซิลเลเตอร์แต่ละตัวมีความถี่ดังสมการ 2.3 เมื่อ f_d คือค่าดอปเปลอร์ชิฟต์สูงสุดจากสมการ 2.2

$$f_n = f_d \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad \text{โดยที่ } n=1,2,3,\dots,N_0 \quad (2.3)$$

$$\text{โดยที่ } N \text{ มีความสัมพันธ์กับ } N_0 \text{ คือ } N_0 = \frac{1}{2}\left(\frac{N}{2}-1\right)$$

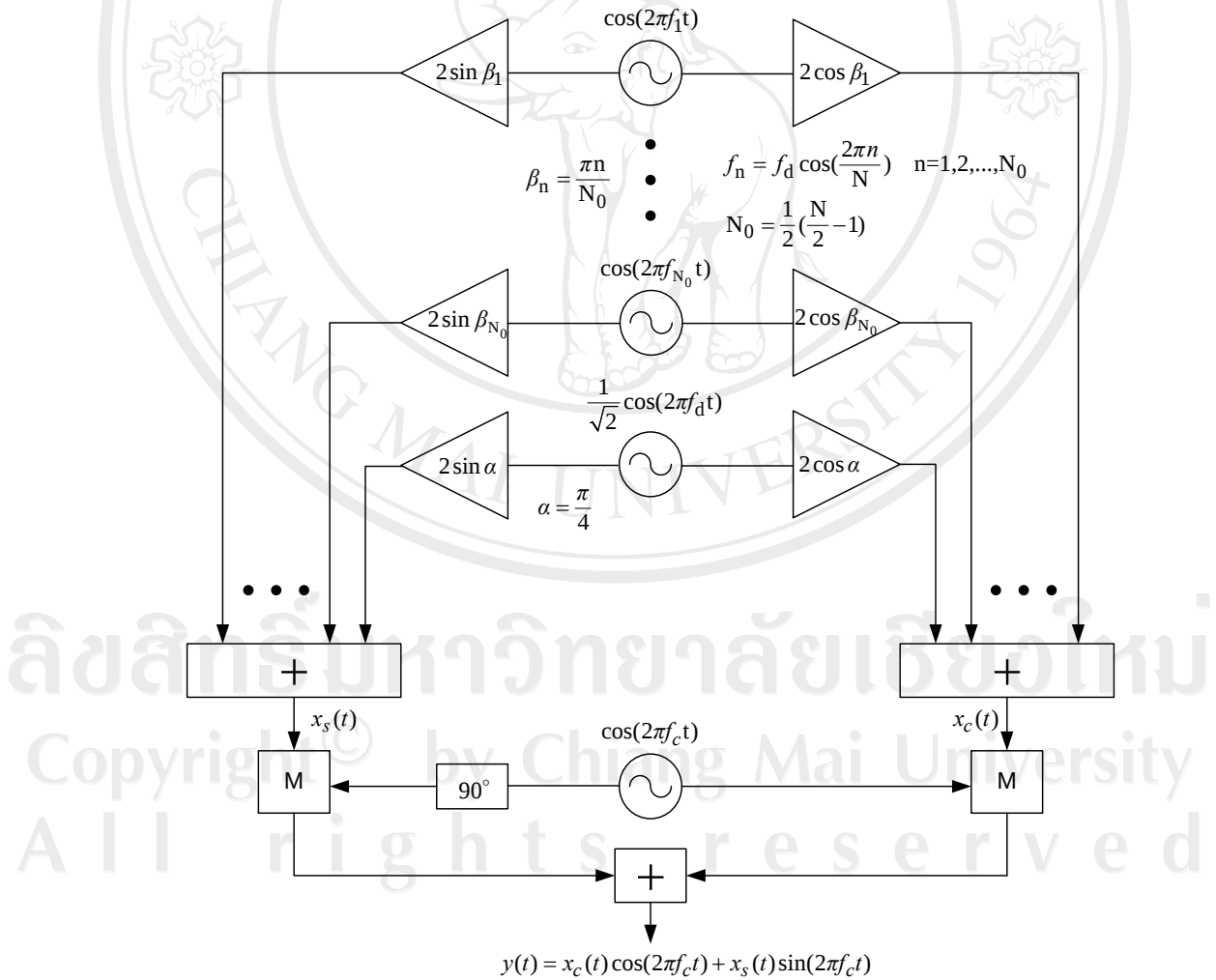
ความสำหรับค่าเฟส β_n จะกำหนดให้มีการกระจายแบบยูนิฟอร์มระหว่าง 0 ถึง 2π โดยมีความน่าจะเป็นในการเกิดของเฟสแต่ค่าเท่า ๆ กันเท่ากับ $1/2\pi$ จากกระบวนการดังรูป 2.17 จะได้

$$x_c(t) = 2 \sum_{n=1}^{N_0} \cos \beta_n \cos(2\pi f_n t) + \sqrt{2} \cos \alpha \cos(2\pi f_d t) \quad (2.4)$$

$$x_s(t) = 2 \sum_{n=1}^{N_0} \sin \beta_n \cos(2\pi f_n t) + \sqrt{2} \sin \alpha \cos(2\pi f_d t) \quad (2.5)$$

ค่าสัญญาณรวมที่ได้ออกมา จะเกิดจากองค์ประกอบของสัญญาณที่แยกออกเป็น 2 ส่วนคือ สัญญาณอินเฟส (Inphase: $x_c(t)$) และสัญญาณควอดราเจอร์ (Quadrature: $x_s(t)$) โดยที่ค่า $x_c(t)$ และ $x_s(t)$ จะสามารถประมาณได้ว่าเป็นกระบวนการสุ่มแบบเกาส์ และกรอบ (Envelope) ของสัญญาณ $y(t)$ จะมีการกระจายแบบเรย์ลีย์ (Rayleigh Distribution) [36]

$$y(t) = x_c(t) \cos(2\pi f_c t) + x_s(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.17 แบบจำลองช่องสัญญาณหลายเส้นทางของ Jakes [6,36]

2.6.3 สัญญาณรบกวนขาว

สัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารโดยทั่วไปมักจะอ้างอิงถึง สัญญาณรบกวนขาวแบบเกาส์ (White Gaussian Noise) [1,2] ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ทางความร้อนของอิเล็กตรอนในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป สัญญาณรบกวนความร้อนนี้มีรูปแบบเป็นกระบวนการสุ่มแบบเกาส์ค่าเฉลี่ยศูนย์ (Zero-mean Gaussian Random Process) มีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังคงที่ตลอดทุกความถี่ จึงเทียบได้กับแสงสีขาว (White Light) ที่ประกอบด้วยแสงทุกความถี่

2.7 การควบคุมกำลัง (Power Control)

การควบคุมกำลังส่งของเครื่องลูกข่ายจะถูกควบคุมจากสถานีฐาน โดยควบคุมให้กำลังส่งที่มาถึง ณ สถานีฐานมีค่าใกล้เคียงกัน เพื่อให้มีการรบกวนกันระหว่างเครื่องลูกข่ายน้อยที่สุด แต่เนื่องจากการใช้งานจริง เครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่องอยู่ห่างจากสถานีฐานด้วยระยะทางที่ต่างกัน ทำให้สถานีฐานได้รับระดับความแรงของสัญญาณที่ต่างกัน โดยสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายที่อยู่ใกล้สถานีฐานจะมีระดับความแรงกว่าเครื่องลูกข่ายที่อยู่ห่างออกไป เทคนิคที่ใช้ในการควบคุมกำลังส่งของเครื่องลูกข่ายมี 2 แบบด้วยกันคือ การควบคุมกำลัง แบบวงเปิด (Open Loop Power Control) และการควบคุมกำลังส่งแบบวงปิด (Closed Loop Power Control) [1]

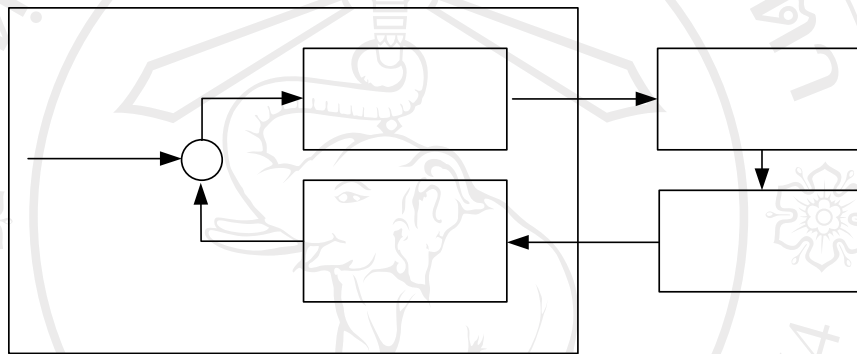
การควบคุมกำลังแบบวงเปิดกำหนดให้เครื่องลูกข่ายตรวจสอบระดับความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐาน โดยคำนวณค่ากำลังที่เหมาะสม ซึ่งถ้าเครื่องลูกข่ายอยู่ห่างจากสถานีฐานมาก ก็จะได้รับสัญญาณจากสถานีฐานน้อย จึงต้องเพิ่มระดับกำลังส่ง โดยสามารถหาค่ากำลังที่จะต้องเพิ่มจากค่าการสูญเสียของสัญญาณดังสมการ 2.7 ในทางกลับกันถ้าเครื่องลูกข่ายเคลื่อนที่เข้าหาสถานีฐาน ระดับสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานก็จะมามาก ดังนั้นเครื่องลูกข่ายก็จะลดกำลังในการส่งลง ซึ่งวิธีการนี้ให้ประสิทธิภาพไม่สูงมากนัก เนื่องจากเครื่องลูกข่ายใช้อัตราในการตรวจสอบสัญญาณไม่บ่อยนัก

$$\begin{aligned} \text{ค่าความสูญเสียของตัวกลาง (dB)} &= \text{ระดับความแรงของสัญญาณที่ส่งจากสถานีฐาน} \\ &- \text{ระดับความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (dB)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

สำหรับกรณีการควบคุมกำลังแบบวงปิด เป็นการควบคุมร่วมกันระหว่างสถานีฐานกับเครื่องลูกข่าย โดยสถานีฐานจะตรวจสอบระดับกำลังสัญญาณที่ได้รับจากเครื่องลูกข่ายทุก 1.25 มิลลิวินาที จากนั้นนำมาคำนวณเพื่อกำหนดการเพิ่มหรือลดกำลังของเครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่องโดยเปรียบเทียบกับระดับกำลังอ้างอิง (Reference Power Level) ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งสถานีฐานสามารถปรับ

เพิ่มหรือลดกำลังของเครื่องลูกข่ายโดยสั่งการผ่านบิตควบคุม (Power Bit) วิธีการนี้ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการควบคุมกำลังแบบวงเปิด และในเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่บางระบบก็ได้นำเทคนิคการควบคุมทั้งสองแบบมาใช้งานร่วมกัน

โดยทั่วไปในระบบควบคุมกำลังแบบวงปิดมักจะมีปัญหาเกี่ยวกับการล่าช้า (Delay) ของสัญญาณด้านย้อนกลับเนื่องจากการเฟดดิ้ง ดังนั้นเพื่อเป็นการชดเชยสิ่งดังกล่าวจึงต้องมีการทำนายสัญญาณด้านย้อนกลับล่วงหน้าโดยสถานีฐาน [5]



รูปที่ 2.18 การควบคุมกำลังแบบวงปิดในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบซีดีเอ็มเอ [6]

2.8 ความจุของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบซีดีเอ็มเอ

ขนาดความจุของระบบซีดีเอ็มเอจะขึ้นอยู่กับระดับสัญญาณแทรกสอด (Interference) จากเครื่องลูกข่ายอื่นที่อยู่ในบริเวณรอบข้างเป็นหลัก ระบบจะสามารถทำงานได้เป็นปกติจนกว่าจะมีปริมาณของสัญญาณแทรกสอดมากเกินไปที่กำหนด

พิจารณาการคำนวณหาความจุของระบบซีดีเอ็มเอในเซลล์หนึ่งที่มีผู้ใช้หรือเครื่องลูกข่ายอยู่ N ราย ซึ่งหมายความว่าภายในเซลล์นี้จะมีสัญญาณแทรกสอดจากเครื่องลูกข่ายอื่นเป็น $N-1$ ราย ถ้าระบบนี้มีการควบคุมกำลังนั้นหมายความว่าเครื่องลูกข่ายทุกเครื่องจะส่งด้วยกำลังเท่ากัน เมื่อ S คือกำลังของสัญญาณข้อมูล จะสามารถหาอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) โดยถือว่าสัญญาณแทรกสอดที่มาจากเครื่องลูกข่ายอื่นเป็นสัญญาณรบกวน ได้ดังสมการ 2.8 [1]

$$SNR = \frac{S}{(N-1)S} = \frac{1}{N-1} \quad (2.8)$$

สามารถพิจารณาอัตราส่วนดังกล่าวให้อยู่ในรูปพลังงานของสัญญาณข้อมูลหนึ่งบิต จะได้ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สถานีฐานในรูป E/N_0 เมื่อพลังงานของสัญญาณข้อมูลหนึ่งบิต (E) มีค่าเท่ากับ S/R โดย R คืออัตราการส่งข้อมูล (bps) และค่าความหนาแน่นของสัญญาณรบกวน (N_0) มีค่าเท่ากับ $(N-1)(S/B_t)$ โดย B_t คือค่าแบนด์วิธของช่องสัญญาณที่ใช้ จะได้รูปสมการ 2.9

$$\frac{E}{N_0} = \frac{S/R}{(N-1)(S/B_t)} = \frac{B_t}{R} \frac{1}{(N-1)} \quad (2.9)$$

จากสมการ 2.6 จะเป็นการพิจารณาเฉพาะผลที่เกิดจากสัญญาณแทรกสอดจากเครื่องลูกข่ายอื่น ซึ่งในระบบทั่วไปจะมีผลจากสัญญาณรบกวนความร้อนที่อยู่ในรูปของสัญญาณรบกวนขาวแบบเกาส์ (White Gaussian Noise) อยู่ด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการรวมผลของสัญญาณรบกวนดังกล่าว ทำให้สมการ 2.9 เปลี่ยนไปเป็นสมการ 2.10 เมื่อ η คือสัญญาณรบกวนความร้อนที่เกิดทั้งหมดในช่องสัญญาณ และถ้ากำหนดให้อัตราส่วน B_t/R เป็นอัตราขยายการประมวลผล (Processing Gain : K) ของระบบซีดีเอ็มเอ จะได้

$$\frac{E}{N_0} = \frac{K}{(N-1) + \eta/S} \quad (2.10)$$

จากสมการ 2.10 พบว่าการที่จำนวนผู้ใช้หรือเครื่องลูกข่ายในระบบจะมีจำนวนมากที่สุด นั้นจะต้องพิจารณาจากอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้มีค่าน้อยที่สุด แต่จะต้องเป็นค่าที่ระบบยังสามารถทำงานได้ดี จะได้สมการ 2.11 เมื่อ $N_{\max}$ คือ จำนวนเครื่องลูกข่ายที่มากที่สุด และ $(E/N_0)_{\min}$ คืออัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ระบบยอมรับค่าผิดพลาดได้ (Acceptable Error Rate)

$$\left(\frac{E}{N_0} \right)_{\min} = K \left(N_{\max} - 1 + \frac{\eta}{S} \right)^{-1} \quad (2.11)$$

และจาก $\eta = B_t N_0$ จะได้รูปสมการใหม่เป็น

$$\left(\frac{E}{N_0} \right)_{\min} = K \left(N_{\max} - 1 + \frac{B_t N_0}{S} \right)^{-1} \quad (2.12)$$

จากการเปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ในรูปพลังงาน $E/N_0 = S/N_0 R$ จะทำให้สมการ 2.12 สามารถเขียนให้อยู่ในกรณีที่มีการส่งสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายเพียงเครื่องเดียว จะได้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจากเครื่องลูกข่ายเครื่องเดียว $(E/N_0)_S$ เป็นดังสมการ 2.13

$$\left(\frac{E}{N_0}\right)_{\min} = K \left(N_{\max} - 1 + K \left(\frac{E}{N_0}\right)_S^{-1} \right)^{-1} \quad (2.13)$$

จัดรูปใหม่อีกครั้ง เพื่อให้สมการอยู่ในรูปของจำนวนผู้ใช้หรือเครื่องลูกข่ายที่มากที่สุดในระบบ

$$N_{\max} = 1 + K \left[\frac{1}{(E/N_0)_{\min}} - \frac{1}{(E/N_0)_S} \right] \quad (2.14)$$

หรือเขียนเป็น

$$N_{\max} = 1 + K \left[\frac{(E/N_0)_S - (E/N_0)_{\min}}{(E/N_0)_S (E/N_0)_{\min}} \right] \quad (2.15)$$

ถ้ากรณีไม่พิจารณาสัญญาณรบกวนความร้อน ค่า $(E/N_0)_S$ จะมีค่าสูงมาก และจะมีจำนวนผู้ใช้ที่มากที่สุด โดยค่ากำลังส่งของเครื่องลูกข่ายแต่ละตัวจะมีระดับกำลังที่ $(E/N_0)_{\min}$ ในทางกลับกันถ้าพิจารณาผลของสัญญาณรบกวนความร้อน จำนวนผู้ใช้ในระบบจะลดลงไปขึ้นอยู่กับปริมาณสัญญาณรบกวนรวมที่มีในระบบ