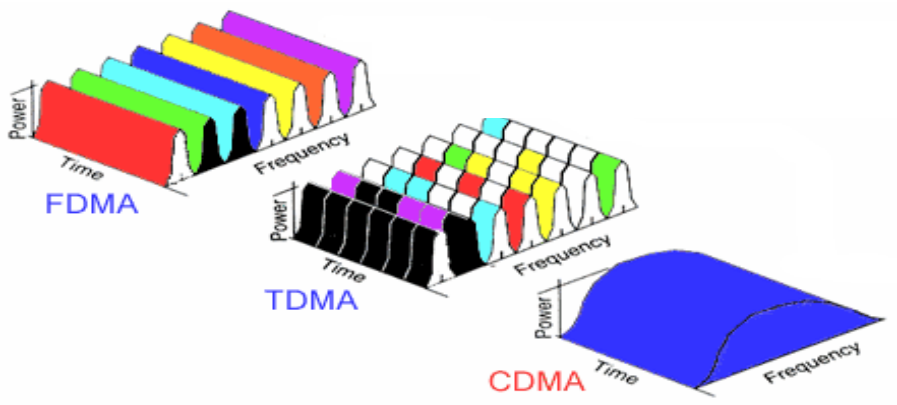
บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐานของการสื่อสารระบบดีเอสซีดีเอ็มเอ

ในบทนี้ของวิทยานิพนธ์จะกล่าวถึง ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งเนื้อหาประกอบด้วยทฤษฎีหลักๆ 4 ส่วน คือ หลักการของระบบซีดีเอ็มเอ (Code Division Multiple Access ; CDMA) ทฤษฎีสเปรดสเปกตรัม (Spread Spectrum ; SS) ทฤษฎีรหัสพีเอ็น (Pseudorandom Noise ; PN) และทฤษฎีการจางหายบนช่องสัญญาณ โดยเนื้อหาทั้งหมดนี้เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการศึกษา และการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบซีดีเอ็มเอที่นำเสนอ

2.1 หลักการของระบบซีดีเอ็มเอ

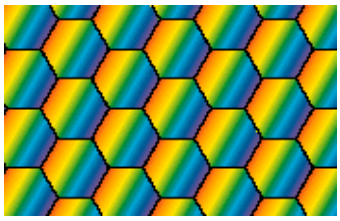
ระบบซีดีเอ็มเอเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบหนึ่ง ซึ่งข้อมูลที่ส่งออกมาจากสถานีฐานจะประกอบไปด้วยข้อมูลของผู้ใช้หลายคน ในระบบซีดีเอ็มเอนี้ผู้ใช้แต่ละคนจะได้รับรหัสชุดหนึ่งที่ไม่เหมือนกับรหัสของผู้ใช้คนอื่น เมื่อใช้รหัสดังกล่าวถอดรหัสสัญญาณจากสถานีฐานทำให้ผู้ใช้แต่ละคนได้รับข้อมูลในส่วนของตัวเองได้

เมื่อเราพิจารณาถึงหลักการจัดสรรช่องสัญญาณในระบบเอฟดีเอ็มเอ (Frequency Division Multiple Access ; FDMA) ผู้ใช้จะได้รับช่วงความถี่ที่ใช้ในการส่งข้อมูลระบบทีดีเอ็มเอ (Time Division Multiple Access ; TDMA) ผู้ใช้จะได้รับช่วงความถี่และใช้ช่วงเวลาที่กำหนดในการส่งข้อมูล และสำหรับระบบซีดีเอ็มเอ ผู้ใช้จะใช้ช่วงความถี่ทั้งหมดและไม่จำกัดเวลาโดยส่ง/รับ ข้อมูลโดยการเข้า/ถอดรหัส สำหรับระบบทีดีเอ็มเอ และเอฟดีเอ็มเอจะแบ่งพื้นที่ออกเป็นบริเวณขนาดหนึ่งหรือที่เรียกว่า เซลล์ (cell) โดยเซลล์ที่ติดกันจะใช้ความถี่ไม่เหมือนกัน ขณะที่ระบบซีดีเอ็มเอทุกเซลล์จะใช้ความถี่ทั้งหมดเหมือนกันดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ตามหลักการเข้าถึงข้อมูลแบบหลายทางที่กล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบลักษณะการส่งข้อมูลแบบต่างๆ

(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 การนำความถี่กลับมาใช้งานใหม่ (ก) ระบบทีดีเอ็มเอ และเอฟดีเอ็มเอ (ข) ระบบซีดีเอ็มเอ

ปัจจุบันผู้ใช้งานมีความต้องการที่จะใช้งานความกว้างแถบความถี่ที่เพิ่มขึ้นเพื่อใช้งานในรูปแบบอื่นๆ ที่นอกเหนือจากการสนทนา แพ็คเกจข้อมูลที่สูงขึ้นเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้ตามการให้บริการดังนี้ [4]

ตารางที่ 2.1 ประเภทของการบริการในระบบการสื่อสารไร้สายยุคที่ 3

ประเภทของข้อมูล	การสนทนา	สตรีมมิ่ง	อินเตอร์แอคทีฟ	แบ็คกราวน์
ตัวอย่างการใช้งาน	- เสียง - วีดีโอเกมส์ - วีดีโอโทรศัพท์	- สื่อบันเทิงต่างๆ	- อินเตอร์เน็ต - เกมส์ออนไลน์	- อีเมล์

2.2 สเปรดสเปกตรัม (Spread Spectrum ; SS)

การทำสเปรดสเปกตรัมซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการใช้งานในระบบซีดีเอ็มเอ ส่วนระบบทีดีเอ็มเอและเอฟดีเอ็มเอจะใช้วิธีการจัดสรรคลื่นความถี่เป็นช่วงความถี่แคบๆ สำหรับผู้ใช้แต่ละคนในขณะที่ระบบสเปรดสเปกตรัมข้อมูลจะถูกส่ง (Spread) ผ่านช่องสัญญาณแถบกว้างพร้อมๆกับผู้ใช้งานคนอื่นๆ เมื่อพิจารณาที่ผู้ใช้แต่ละคนจะถือว่าสัญญาณของผู้ใช้คนอื่นๆ เป็นสัญญาณแทรกสอด ดังนั้นจึงไม่จำกัดจำนวนเครื่องลูกข่าย (Subscriber) ขึ้นอยู่กับว่าต้องการคุณภาพในการให้บริการเท่าใด อัตราส่วนของความกว้างแถบความถี่ของสัญญาณสเปรดสเปกตรัมต่อความกว้างแถบความถี่ของสัญญาณข้อมูลจะถูกเรียกว่า อัตราขยายการประมวลผล (Processing Gain ; G_p) ของระบบสเปรดสเปกตรัมแสดงได้ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$G_p = \frac{W}{B_i} \qquad (2.1)$$

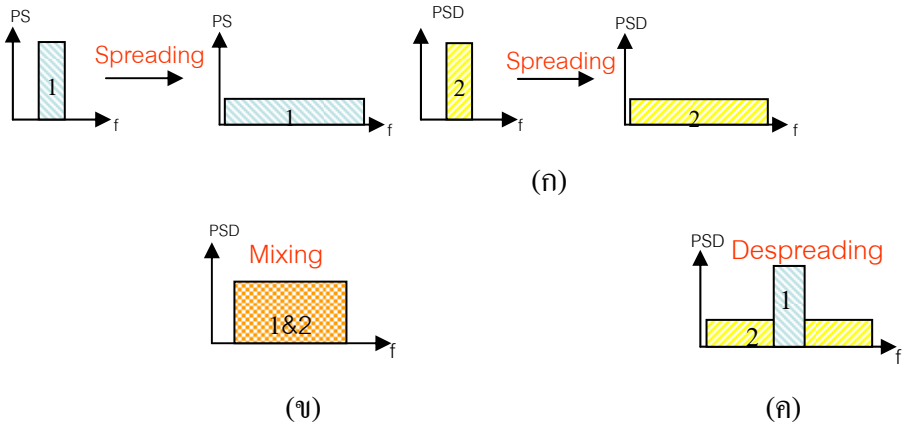
โดยที่ W คือ ความกว้างแถบความถี่ของการส่งสัญญาณ

B_i คือ ความกว้างแถบความถี่ของสัญญาณข้อมูล

คุณสมบัติที่สำคัญของเทคนิคการทำสเปรดสเปกตรัม มีดังนี้

1) ความสามารถสูงในการมัลติเพล็กซ์ (Multiple Access Capability)

ถ้ามีผู้ใช้หลายๆ คนทำการส่งสัญญาณสเปรดสเปกตรัม ในเวลาเดียวกัน เครื่องรับยังคงสามารถแยกความแตกต่างระหว่างผู้ใช้แต่ละคนได้ โดยการให้ผู้ใช้แต่ละคนใช้รหัส ซึ่งมีค่าสหสัมพันธ์ข้าม (Cross-Correlation) ที่ต่ำระดับหนึ่ง ระหว่างรหัสของผู้ใช้ที่ต้องการกับรหัสของผู้ใช้อื่นๆ ดังนั้นเมื่อทำอัตสหสัมพันธ์ (Auto-Correlation) สัญญาณที่รับได้ด้วยรหัสของผู้ใช้ที่ต้องการ ก็จะเป็นการดีสเปรด (Despread) สัญญาณของผู้ใช้คนดังกล่าวกลับคืนมา ในขณะที่สัญญาณสเปรดสเปกตรัมจากผู้ใช้อื่นๆ จะยังคงมีลักษณะเหมือนเดิม ด้วยเหตุนี้ภายในแถบความกว้างของความถี่ของสัญญาณข้อมูลจะมีกำลังของสัญญาณจากผู้ใช้ที่ต้องการมากกว่ากำลังของสัญญาณแทรกสอด (Interfering Power) จากผู้ใช้อื่นๆ ดังนั้นจึงสามารถทำการตรวจจับสัญญาณที่ต้องการออกมาได้ แสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.3 หลักการของการสื่อสารแบบสเปรดสเปกตรัม

(ก) การสร้างสัญญาณสเปรดสเปกตรัมของผู้ใช้ 2 คนจากสัญญาณข้อมูลเดิมที่เป็นสัญญาณแบนด์แคบ

(ข) การส่งสัญญาณสเปรดสเปกตรัมของผู้ใช้ทั้ง 2 คนในเวลาเดียวกัน

(ค) การดีสเปรดที่ภาครับโดยมีเพียงสัญญาณของผู้ใช้คนที่ 1 เท่านั้นที่กลับคืนมา

2) การป้องกันสัญญาณแทรกสอดแบบหลายวิธี (Multipath Interference)

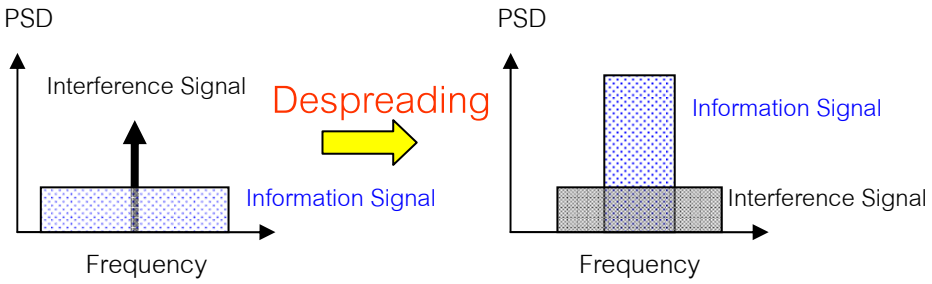
สำหรับช่องสัญญาณวิทยุนั้นเส้นทางเดินของสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับไม่ได้มีเพียงเส้นทางเดียว เนื่องมาจากการสะท้อนและการหักเห ทำให้สัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับมากจากเส้นต่างๆ กัน สัญญาณจากเส้นทางต่างๆ นั้นเป็นสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากเครื่องส่งเหมือนกัน แต่จะมีความแตกต่างกันทางขนาดและเฟส การรวมสัญญาณเหล่านี้เข้าด้วยกันที่เครื่องรับนั้นจะเป็นการรวมแบบเสริมกันที่บางความถี่และหักล้างกันที่ความถี่อื่นๆ ซึ่งการทำสเปรดสเปกตรัมนั้น สามารถแก้ปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณแทรกสอดแบบหลายเส้นทางนี้ได้

3) ความเป็นส่วนตัว (Privacy)

สัญญาณที่ถูกส่งออกไปสามารถจะถูกดีสเปรด และได้สัญญาณข้อมูลเดิมกลับคืนมาเมื่อเครื่องรับรู้รหัสเดียวกันเท่านั้น จึงทำให้มีความเป็นส่วนตัวของแต่ละผู้ใช้สูง

4) การกำจัดสัญญาณแทรกสอด (Interference Rejection)

การทำสหสัมพันธ์ข้ามของสัญญาณรหัสด้วยสัญญาณแบนด์แคบ จะทำให้แถบความถี่ของสัญญาณนั้นแผ่ออก นั่นคือจะทำให้สัญญาณแทรกสอดที่อยู่ในแถบความถี่ของสัญญาณข้อมูลมีกำลังงานลดลง แสดงดังรูปที่ 2.4 สัญญาณสเปรดสเปกตรัมซึ่งถูกรบกวนจากสัญญาณแทรกสอดแบนด์แคบจะถูกดีสเปรดที่เครื่องรับ ส่งผลให้ความถี่ของสัญญาณแทรกสอดนั้นแผ่กว้างขึ้น ทำให้สัญญาณแทรกสอดดังกล่าวปรากฏเป็นสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background Noise) เมื่อเทียบกับสัญญาณข้อมูล



รูปที่ 2.4 การกำจัดสัญญาณแทรกสอดของการสื่อสารแบบสเปรดสเปกตรัม

5) ความสามารถในการป้องกันการแทรกแซงจากผู้อื่น (Anti Jamming Capability)

โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแทรกแซงแบนด์แคบ (Narrowband Jamming) คุณสมบัตินี้คล้ายกับการกำจัดสัญญาณแทรกสอดเพียงสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในกรณีนี้เป็นไปโดยเจตนาให้เกิดแก่ระบบ จากคุณสมบัติข้อนี้ และข้อถัดไปทำให้การทำสเปรดสเปกตรัมเป็นที่น่าสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้งานทางทหาร

6) ความน่าจะเป็นในการถูกดักจับสัญญาณต่ำ (Low Probability of Intercept)

เนื่องจากสัญญาณสเปรดสเปกตรัม มีความหนาแน่นของกำลังงานที่ต่ำจึงทำให้เป็นการยากที่จะตรวจจับ

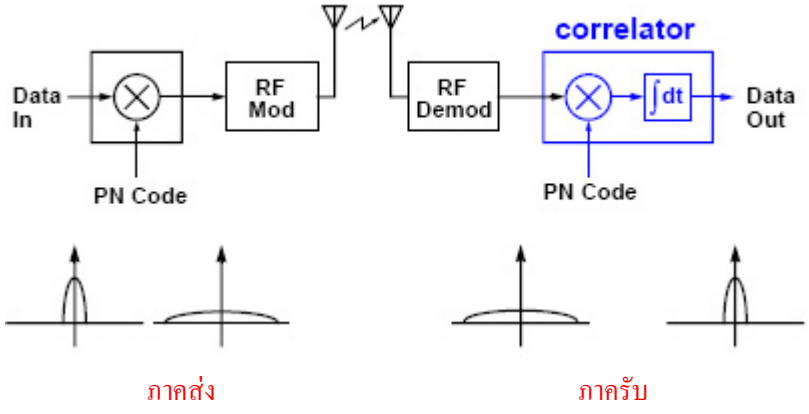
การทำสเปรดสเปกตรัมในเชิงพาณิชย์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 2 วิธีการคือ ฟรีเควันซีฮอปปิ้ง (Frequency hopping ; FH) และไดเร็คซีเควันซ์ (Direct-sequence ; DS) ทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันโดยหลักการแต่ทั้งคู่อาศัยรหัสชนิดเดียวกันที่มีชื่อเรียกว่า รหัสพีเอ็นเป็นส่วนสำคัญ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่เราจะต้องเข้าใจถึงแนวทางการสร้างและคุณลักษณะของรหัสพีเอ็นด้วยซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.2.1 ฟรีเควันซีฮอปปิ้งสเปรดสเปกตรัม (FHSS)

วิธีการทำสเปรดสเปกตรัมกับสัญญาณข้อมูลคือการเปลี่ยนความถี่ในแต่ละคาบเวลา โดยในทุกความถี่ที่เปลี่ยนจะเป็นความถี่ที่ถูกเลือกออกมาจากช่วงความถี่ 2^k เท่าของย่านความถี่สัญญาณข้อมูลที่ถูกมอดูเลตแล้ว

รหัสพีเอ็นในระยะนี้จะไม่ใช่การนำไปคูณกับสัญญาณข้อมูลโดยตรง แต่รหัสพีเอ็นจะถูกใช้ในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของความถี่พาห์ โดยสัญญาณที่ถูกส่งออกจะมีลักษณะเปลี่ยนความถี่จากความถี่หนึ่งไปสู่ความถี่ถัดไป การทำสเปรดสเปกตรัมแบบนี้จึงถูกเรียกว่าการกระโดดความถี่ (Frequency Hopping Spread Spectrum) ส่วนในภาครับ สัญญาณที่รับได้จะถูกถอดออกมาโดยใช้สัญญาณที่มีการกระโดดความถี่อย่างสอดคล้องกับรหัสพีเอ็นที่เหมือนกับในภาคส่ง

2.2.2 ไดเร็คซีเควันสเปรดสเปกตรัม (DSSS)



รูปที่ 2.5 วงจรระบบดีเอสซีดีเอ็มเอ

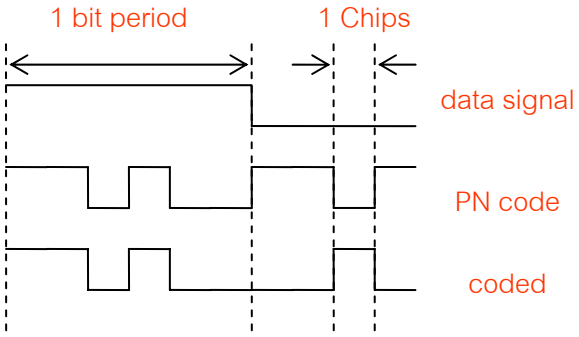
หลักการทำงานของระบบดีเอสซีดีเอ็มเอ ที่วงจรภาคส่งของระบบจะประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ คือวงจรคูณสัญญาณข้อมูลกับรหัสพีเอ็น และส่วนของวงจรโมดูเลเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.5

สัญญาณข้อมูลเข้าซึ่งมีอัตราบิตข้อมูลต่ำโดยให้สัญญาณนี้มีคาบเวลาเป็น T ถูกนำไปคูณกับรหัสพีเอ็น ที่มีคาบเวลาของหนึ่งชิปส์เท่ากับ T_c สั้นกว่า T มาก ขั้นตอนนี้เรียกว่าการสเปรดสเปกตรัมของสัญญาณข้อมูลจากเดิมที่มีอัตราบิตข้อมูลต่ำ ซึ่งใช้ความกว้างแถบความถี่ของช่องสัญญาณขนาดเล็กในการส่งมาเป็นข้อมูลที่มีอัตราชิปส์ที่สูงขึ้นกว่าเดิมมาก ซึ่งหมายถึงว่าต้องใช้ความกว้างแถบความถี่ของช่องสัญญาณในการส่งที่ใหญ่ขึ้นมากด้วย จากนั้นก็นำสัญญาณที่ผ่านการทำสเปรดสเปกตรัมที่ได้นี้ไปทำการมอดูเลตกับคลื่นพาห์ความถี่สูง ด้านวงจรภาครับจะดึงสัญญาณข้อมูลออกมาจากสัญญาณอาร์เอฟ (Radio Frequency) ที่รับได้ซึ่งโดยปกติแล้ว สัญญาณนี้จะมีการประวิงเวลาเนื่องจากการแพร่ของสัญญาณ (Propagation delay) ดังนั้น สัญญาณที่รับได้นี้จะถูกนำไปคูณกับรหัสพีเอ็น ชุดเดียวกันกับที่ใช้ในภาคส่ง หากแต่ว่าวงจรภาครับต้องสามารถประมาณหาค่าหน่วงเวลาให้ได้ใกล้เคียงมากที่สุด ในวงจรดีโมดูเลเตอร์ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ วงจรคูณและวงจรอินทิเกรต หน้าที่ของวงจรคูณ คือการถอดรหัสพีเอ็น ออกจากสัญญาณข้อมูลแล้วนำสัญญาณผ่านเข้าวงจรอินทิเกรต ที่ทำการอินทิเกรตใหม่ทุก ๆ คาบเวลา T ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีช่วงเวลายาวกว่าคาบเวลา T_c มาก เพราะฉะนั้นสัญญาณที่เหลือจากวงจรอินทิเกรตจึงมีเพียงสัญญาณข้อมูลที่มีการหน่วงของเวลา ซึ่งเมื่อนำมาเข้าวงจรเปรียบเทียบแล้วก็จะได้ข้อมูลเดิมที่มีค่าเป็น 0 และ 1 กลับคืนมา

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงแนวคิดพื้นฐานของการทำสเปรดสเปกตรัมแบบไดเร็คซีเควนซ์เพื่อการใช้งานในระบบซีดีเอ็มเอ สมมติว่าในระบบที่เราสนใจมีจำนวนผู้ใช้งาน 3 คน ซึ่งแต่ละคนก็จะได้รับชุดรหัสพีเอ็นที่แตกต่างกัน ก่อนที่ผู้ใช้แต่ละคนจะส่งข้อมูลออกจะนำบิตข้อมูลเหล่านั้นไปทำสเปรดสเปกตรัมโดยการนำบิตข้อมูลไปคูณกับชุดรหัสพีเอ็น ของตนเองซึ่งจะทำให้อัตราบิตสูงขึ้น และช่องสัญญาณก็ต้องมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งในตัวอย่างนี้อัตราชิปส์ (Chips rate) มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่าตัวของอัตราบิตข้อมูลของผู้ใช้ สำหรับตัวอย่างนี้เราสมมติให้ผู้ใช้หมายเลข 1, 2 และ 3 ต้องการส่งข้อมูล 11, 10 และ 01 ตามลำดับ สัญญาณที่ผ่านการสเปรดสเปกตรัมแล้วจะมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 สังเกตว่าสัญญาณ 1 จะแทนด้วยแรงดันเป็น 1 และสัญญาณ 0 จะแทนด้วยสัญญาณเป็น -1 สัญญาณที่ทำการสเปรดสเปกตรัมแล้วทั้งสามสัญญาณนี้จะถูกส่งออกไปพร้อมกันบนคลื่นความถี่เดียวกัน นั่นหมายความว่าที่ภาครับจะได้รับสัญญาณที่เป็นผลรวมของสามสัญญาณรวมกันซึ่งดูเหมือนว่าสัญญาณเหล่านี้รบกวนซึ่งกันและกันอยู่และยากต่อการแยกแยะออกมา

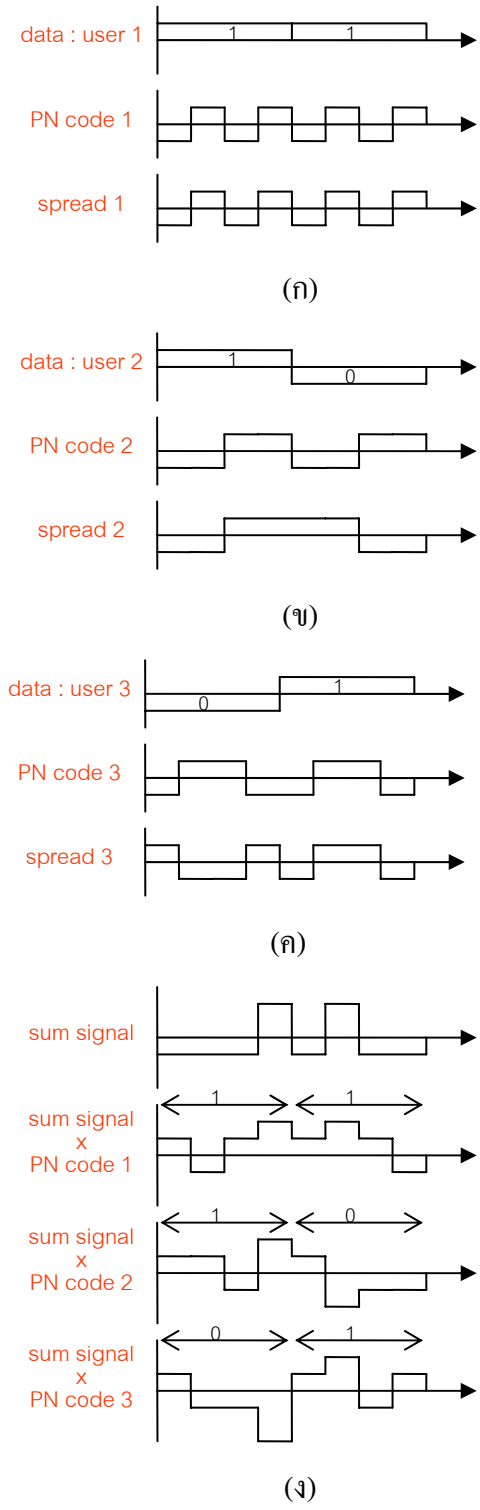
เมื่อนำข้อมูลที่มีอัตราบิตค่าหนึ่ง มาคูณกับรหัสพีเอ็น จะทำให้สัญญาณใหม่ที่ได้มีอัตราบิตที่สูงขึ้น และเรียกอัตราบิตใหม่ที่สูงขึ้นนี้ว่า อัตราชิปส์ (Chips rate) โดยที่มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\textit{อัตราชิปส์} = 1 / \textit{หนึ่งรอบของชิปส์} \qquad (2.2)$$



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของอัตราชิปส์ (Chips rate)

สำหรับขั้นตอนในการแยกสัญญาณของแต่ละคนออกมานั้น ก็สามารถทำได้โดยการนำชุดรหัสพีเอ็น ของผู้ใช้แต่ละคนไปคูณกับสัญญาณที่รับได้และทำการบวกผลคูณเหล่านั้นทีละ 4 ชิปส์ หรือเท่ากับความยาวของหนึ่งบิตข้อมูลนั่นเอง ค่าที่คำนวณได้เหล่านี้จะนำไปใช้ในการตัดสินใจต่อไป ตัวอย่างเช่นถ้าเรานำรหัสของผู้ใช้หมายเลข 1 ไปคูณกับสัญญาณรวมจะได้ผลรวมของผลคูณออกมาเป็น 4 สำหรับข้อมูลทั้งสองบิต ในขณะที่ถ้าผู้ใช้หมายเลข 2 กระทำการในลักษณะเดียวกันจะได้ผลออกมาเป็น 4 และ -4 ในขั้นตอนการตัดสินใจบิตให้กระทำดังนี้คือ ถ้าผลลัพธ์ที่ออกมามีค่าเท่ากับ 4 แสดงว่าบิตข้อมูลที่ส่งออกมามีค่าเป็น 1 และถ้าผลลัพธ์ที่ได้เป็น -4 แสดงว่าบิตข้อมูลนั้นมีค่าเป็น 0 สังเกตว่าการที่ผู้ใช้แต่ละคนสามารถจะดึงสัญญาณข้อมูลของตนเองออกมาจากสัญญาณรวมได้ก็เพราะว่า เมื่อนำรหัสพีเอ็นของผู้ใช้คนหนึ่งไปคูณกับสัญญาณที่สเปรดออกโดยผู้ใช้อีกคนหนึ่งเช่นถ้าเอาชุดรหัสพีเอ็น ของผู้ใช้หมายเลข 1 ไปคูณกับส่วนของสัญญาณที่สเปรดออกโดยผู้ใช้หมายเลข 2 จะพบว่าค่าผลรวมของการคูณในทุกๆ 4 บิตจะได้ค่าที่เป็น 0 หมด ซึ่งจริงๆแล้ว ถ้าหากทำการทดสอบกับทุกกรณีจะได้ผลที่เหมือนกันคือค่าผลรวมที่ได้มีค่าเป็น 0 เสมอตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่สเปรดออกด้วยชุดรหัสพีเอ็นชุดหนึ่งจะไม่สามารถดีสเปรดออกด้วยชุดรหัสพีเอ็นชุดอื่น ซึ่งทำให้สามารถส่งสัญญาณของผู้ใช้หลายๆคนลงบนคลื่นพาห์ความถี่เดียวกันได้ สังเกตว่าจุดสำคัญของการทำสเปรดสเปกตรัมก็คือการเลือกชุดรหัสที่มีคุณสมบัติพิเศษดังที่อธิบายไว้ในเบื้องต้นนั่นเอง



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการทำสเปรดสเปกตรัม

(ก) รูปสัญญาณของผู้ใช้หมายเลข 1 ณ วงจรภาคส่ง

(ข) รูปสัญญาณของผู้ใช้หมายเลข 2 ณ วงจรภาคส่ง

(ค) รูปสัญญาณของผู้ใช้หมายเลข 3 ณ วงจรภาคส่ง

(ง) รูปสัญญาณที่เกิดขึ้น ณ วงจรภาครับ

คุณสมบัติการเข้าถึงหลายทางแบบสเปรดสเปกตรัมโดยการจัดลำดับแบบไดเร็คซีเควนซีดีเอ็มเอ [1] มีดังต่อไปนี้

1) ความสามารถในการเข้าถึงหลายทาง

ถ้ามีผู้ใช้หลายคนส่งสัญญาณในเวลาเดียวกันจะทำให้มีสัญญาณสเปรดสเปกตรัมหลายสัญญาณที่มีความทับซ้อนกัน (Overlap) ในทางเวลาและความถี่ที่เครื่องรับจะใช้การดีมอดูเลตแบบร่วมนัยเพื่อจำกัดผลของการมอดูเลตและรหัสออกไป กระบวนการดังกล่าวเป็นการรวมกำลังงานของผู้ใช้ที่ต้องการตรวจจับให้อยู่ในช่วงความกว้างแถบความถี่ของข้อมูล ถ้าค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างรหัสของผู้ใช้ที่ต้องการและรหัสของผู้ใช้อื่นมีค่าน้อย การตรวจจับแบบร่วมนัยจะทำให้มีค่ากำลังงานของสัญญาณแทรกสอดในความกว้างแถบความถี่นั้นมีค่าเล็กน้อยเท่านั้น

2) การป้องกันการแทรกสอดแบบหลายเส้นทาง

ถ้าลำดับรหัสมีฟังก์ชันสหสัมพันธ์ตามอุดมคติแล้ว ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ที่อยู่ภายนอกช่วง $[-T_c, T_c]$ มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อ T_c เป็นคาบเวลาของชิพ แสดงว่าถ้าทำการรับสัญญาณที่ต้องการซึ่งถูกหน่วงเวลาไปมากกว่า $2T_c$ และการใช้ดีมอดูเลตแบบร่วมนัยจะทำให้สัญญาณที่ถูกหน่วงไปถูกมองว่าเป็นสัญญาณแทรกสอด และมีค่ากำลังงานของสัญญาณแทรกสอดนี้อยู่ในช่วงความกว้างแถบความถี่ของข้อมูลเพียงเล็กน้อย

3) การกำจัดสัญญาณแทรกสอดแถบแคบ

การตรวจจับแบบร่วมนัยที่เครื่องรับทำได้โดยการคูณสัญญาณที่รับได้กับรหัสที่ถูกสร้างขึ้นที่ทางด้านรับ ซึ่งจะเหมือนกับการคูณสัญญาณแถบแคบด้วยลำดับของรหัสแถบกว้างที่เครื่องส่งทำให้สเปกตรัมของสัญญาณแถบแคบมีการแผ่สเปกตรัมกว้างออกไป กำลังของสัญญาณแถบแคบซึ่งอยู่ในช่วงความกว้างแถบความถี่ของสัญญาณข้อมูลมีค่าลดลงด้วยอัตราเท่ากับอัตราขยายการประมวลผล

4) ความน่าจะเป็นในการถูกดักจับสัญญาณมีค่าต่ำ

เนื่องจากสัญญาณไดเรคซีเควนนั้นจะใช้ความกว้างแถบความถี่ของสัญญาณทั้งหมดตลอดเวลา ทำให้มีกำลังส่งต่อความถี่มีค่าต่ำมาก จึงเป็นการยากที่จะทำการดีเทคสัญญาณนี้

ข้อดีของระบบไดเร็คซีเควนซีดีเอ็มเอ

1) การเข้ารหัสสัญญาณสามารถทำได้ง่ายโดยใช้กระบวนการคูณแบบธรรมดา

2) วงจรสังเคราะห์ความถี่ทำได้ง่ายเนื่องจากใช้คลื่นพาห์เพียงความถี่เดียว

3) การดีมอดูเลตสัญญาณแบบสเปรดสเปกตรัมใช้แบบร่วมนัยได้

4) ไม่จำเป็นต้องมีการซิงโครไนซ์ระหว่างผู้ใช้แต่ละคน

ข้อเสียของระบบไดเร็คซีเควนซีดีเอ็มเอ

1) การซิงโครไนซ์ระหว่างรหัสของสัญญาณที่ได้รับกับสัญญาณรหัสที่สร้างขึ้นทางด้านรับทำได้ยากและการซิงโครไนซ์นี้จะต้องเกิดขึ้นภายในช่วงคาบเวลาของชิพ

2) การที่รหัสที่สร้างขึ้นต้องซิงโครไนซ์กันในช่วงคาบเวลาของชิพทำให้ขนาดของความกว้างแถบความถี่ถูกจำกัดในช่วง 10-20 MHz

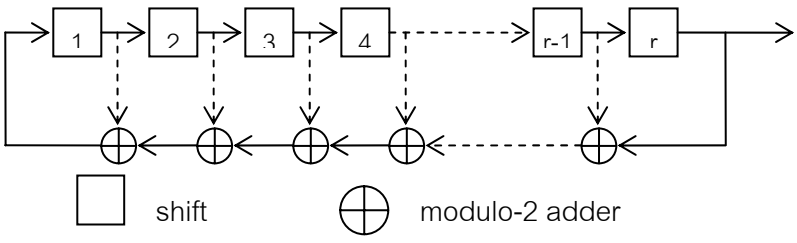
3) กำลังของสัญญาณจากผู้ใช้ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานจะมีค่ามากกว่ากำลังงานของสัญญาณของผู้ใช้ที่อยู่ไกลออกไปมาก เนื่องจากผู้ใช้แต่ละคนจะส่งสัญญาณโดยใช้ความกว้างแถบความถี่ที่มีทั้งหมด ดังนั้นผู้ใช้ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐาน จะทำให้ค่าการแทรกสอดต่อผู้ใช้ที่อยู่ไกลมีค่ามาก ทำให้ไม่สามารถทำการรับสัญญาณจากผู้ใช้ที่ไกลจากสถานีฐานได้ ผลกระทบที่เกิดอิทธิพลของความไกล–ใกล้ของสัญญาณ (Near-Far Effect) นี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้การควบคุมกำลังงาน (Power Control) จะทำให้สถานีฐานรับสัญญาณจากผู้ใช้ทุกคนด้วยกำลังงานเฉลี่ยเท่ากัน ในทางปฏิบัติกระบวนการควบคุมกำลังงานสามารถทำได้ยาก

2.3 รหัสพีเอ็น (Pseudorandom Noise Sequence ; PN)

รหัสพีเอ็น คือลำดับสัญญาณที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยวิธีการที่มีลำดับขั้นตอนที่ชัดเจน รหัสสัญญาณที่ได้มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับสัญญาณแบบสุ่ม รหัสชนิดนี้ถูกนำมาใช้งานในทางปฏิบัติอย่างกว้างขวาง เช่น นำมาใช้ในการเข้าจังหวะสัญญาณ (Signal Synchronization) การเข้ารหัสลับข้อมูล (Crytography) และการทำสเปรดสเปกตรัม (Spread Spectrum) เป็นต้น การสร้างรหัสประเภทนี้สามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น รหัสเอ็ม-ซีเควน (M-Sequence) รหัสโกลด์ (Gold Code) รหัสคาซามิ (Kasami Code) เป็นต้น รหัสชนิดที่ได้รับความสนใจมากคือ ไบนารีเม็กซิมัมเล็นท์ซีเคว็น (Binary Maximum-Length-Sequence) หรือที่เรียกกันทั่วไปในชื่อ ไบนารีเอ็มซีเคว็น (Binary m-Sequence)

2.3.1 รหัสเอ็ม-ซีเคว็น (m-sequence)

รหัสเอ็ม-ซีเคว็น เป็นรหัสที่สร้างขึ้นจากชิฟต์รีจิสเตอร์จำนวนหนึ่งที่มาต่อเชื่อมกันแบบอนุกรมโดยที่มีการป้อนกลับของสัญญาณจากชิฟต์รีจิสเตอร์อย่างน้อย 2 ตำแหน่งกลับไปยังที่ขาเข้าของชิฟต์รีจิสเตอร์ตัวแรก แสดงไว้รูปที่ 2.8 ประกอบ โดยนิยามแล้วรหัสชนิดนี้สามารถสร้างลำดับสัญญาณที่มีความยาวได้มากที่สุดคือ $2^n - 1$ เมื่อกำหนดให้ n คือจำนวนชิฟต์รีจิสเตอร์ที่ใช้ ชุดรหัสทุกชุดที่สร้างขึ้นจะมีคุณสมบัติเฉพาะที่เหมือนกันดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.8 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรสร้างรหัส m-sequence

1) ความยาวรหัสมีมากที่สุดเท่ากับ $L = 2^n - 1$

2) คุณสมบัติการสมดุล

รหัสสัญญาณที่ได้จะมีชิปส์ที่มีค่าเป็นหนึ่งมากกว่าชิปส์ที่มีค่าเป็นศูนย์อยู่หนึ่งชิปส์เสมอ เช่น ชุดรหัสที่ใช้ชิฟต์รีจิสเตอร์จำนวน 10 ตัว ให้ลำดับสัญญาณที่มีความยาวเท่ากับ $L = 2^{10} - 1 = 1{,}023$ ชิปส์ จะประกอบด้วยชิปส์ที่มีค่าเป็นหนึ่งจำนวน 512 ชิปส์ และชิปส์ที่มีค่าเป็นศูนย์จำนวน 511 ชิปส์

3) ภายในลำดับสัญญาณแต่ละชุดจะมีช่วงของชิปส์ที่มีค่าเป็นศูนย์หรือหนึ่งต่อเนื่องกันจำนวนหนึ่ง ส่วนที่ต่อเนื่องกันนี้จะเรียกว่า รัน (run) โดยความยาวของแต่ละรันจะมีขนาดที่แตกต่างกันไป สำหรับรหัสเอ็ม-ซีเควนจะมีคุณสมบัติของรันที่พิเศษคือ จะมีรันของศูนย์ และหนึ่งขนาด p ชิปส์เกิดขึ้นในลำดับสัญญาณทั้งสิ้น $2^{n-(p+2)}$ ครั้งโดย p มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง $n-2$ เมื่อ n คือ จำนวนของชิฟต์รีจิสเตอร์ที่ใช้ในการสร้างลำดับสัญญาณ นอกจากนี้จะมีรันของศูนย์ขนาด $n-1$ จำนวน 1 รัน

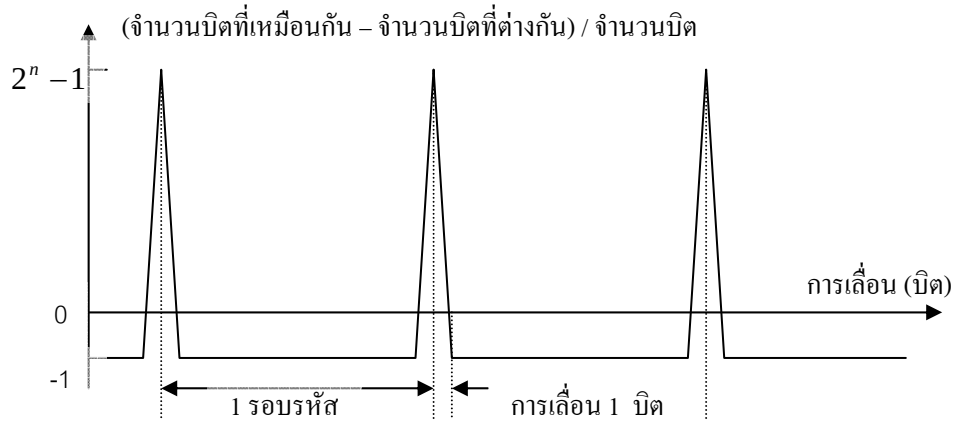
4) อัตสหสัมพันธ์ของชุดรหัสเอ็ม-ซีเควน จะมีค่าเท่ากับ -1 เสมอ หากมีการเลื่อนของชุดรหัสทั้งสองชุดที่เหมือนกันทุกประการให้มีขนาดห่างกันมากกว่า ± 1 ชิปส์ แต่ถ้าหากการเลื่อนชุดรหัสทั้งสองเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเลื่อนไปของชุดรหัสทั้งสองอย่างเชิงเส้น โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง $2^n - 1$ ดูรูปที่ 2.9 ประกอบ หมายเหตุในการหาค่าอัตสหสัมพันธ์สามารถกระทำได้โดยนำค่าของชิปส์จากลำดับสัญญาณ 2 ชุดที่ตำแหน่งเดียวกันมาคูณกันแล้วนำผลคูณที่ได้ของแต่ละตำแหน่งมาอินทิเกรตรวมกันทั้งหมด ผลที่ได้ก็คือค่าอัตสหสัมพันธ์ทั้งนี้ในการคูณกันนั้นจะกำหนดให้ใช้ -1 แทนชิปส์ที่มีคาเป็นศูนย์ และ 1 แทนชิปส์ที่มีค่าเป็นหนึ่ง ในการหาค่าอัตสหสัมพันธ์นั้นจะต้องใช้ลำดับสัญญาณ 2 ชุด เหมือนกัน แต่อาจมีการเลื่อนชิปส์ของลำดับสัญญาณชุดหนึ่งให้ต่างจากลำดับสัญญาณของอีกชุดหนึ่งด้วยระยะทางต่างๆ ตามต้องการ

5) เมื่อนำรหัสเอ็ม-ซีเควน ชุดหนึ่งมาบวกแบบมอดูโล 2 กับชุดเดิมที่มีการเลื่อนชิปส์ไปจะได้ชุดรหัสชุดใหม่ที่มีคุณลักษณะเดียวกันกับรหัสชุดเดิม แต่มีการเลื่อนของชิปส์ไปด้วยจำนวนที่แตกต่างจากรหัสเริ่มต้นทั้งสองชุด

จากรูปที่ 2.8 และคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงการสร้างรหัสโดยใช้จำนวนชิฟต์รีจิสเตอร์ 4 ตัว และกำหนดให้ตำแหน่งชิฟต์รีจิสเตอร์ตัวที่ 3 กับ 4 ทำการโมดูโล 2 แล้วป้อนกลับไปขาเข้าของชิฟต์รีจิสเตอร์ตัวที่ 1 ให้สัญญาณที่เข้ามามีค่าเท่ากับ 1000 จากตาราง 2.2 และรูปที่ 2.9 แสดงค่าอัตสหสัมพันธ์ของชุดรหัส ดังนั้นจำนวนชิฟต์รีจิสเตอร์ 4 ตัวที่ใช้จะได้เอาท์พุตเป็นจำนวน $2^n - 1$ เท่ากับ 15 ชิปส์

หากพิจารณาค่าของชิฟต์รีจิสเตอร์แต่ละตัว ณ จังหวะเวลาใดเวลาหนึ่ง จะพบว่าค่าหรือสถานะของชิฟต์รีจิสเตอร์เหล่านี้จะมีรูปแบบที่แตกต่างไปจากที่จังหวะเวลาอื่นๆ ทั้งหมด เมื่อพิจารณาภายในช่วงเวลา 1 คาบของลำดับสัญญาณ นั่นคือรูปแบบสถานะของชิฟต์รีจิสเตอร์เหล่านี้จะไม่มีการเกิดซ้ำภายใน 1 คาบสัญญาณ อีกทั้งจะไม่เกิดกรณีที่สถานะของชิฟต์รีจิสเตอร์ทุกตัวมีค่า

เป็นศูนย์หมดเพราะในสถานะดังกล่าว วงจรชิฟต์รีจิสเตอร์จะไม่สามารถสร้างลำดับสัญญาณขึ้นได้ ดังนั้นในการสร้างลำดับสัญญาณนั้นจะต้องแน่ใจว่าค่าตั้งต้นของชิฟต์รีจิสเตอร์ทุกตัวมีค่าที่ไม่เป็นศูนย์พร้อมกันหมด



รูปที่ 2.9 ค่าอัตสหสัมพันธ์ของรหัสเอ็ม-ซีเควนที่มีการเลื่อนไปของของชิปส์ที่ค่าต่างๆ

จากคุณสมบัติต่างๆ ที่กล่าวมาทำให้รหัสประเภทนี้เป็นประโยชน์อย่างมากในทางปฏิบัติ เช่น การที่รหัสมีจำนวนชิปส์เป็นศูนย์ใกล้เคียงกับชิปส์ที่เป็นหนึ่ง ทำให้เวลานำสัญญาณดังกล่าวมาใช้กับระบบสื่อสารบางประเภทเช่น ระบบที่มีการโมดูเลตสัญญาณโดยการทำ Suppress carrier นั้น ปัญหาดังกล่าวก็จะยิ่งลดลงตามไปด้วย

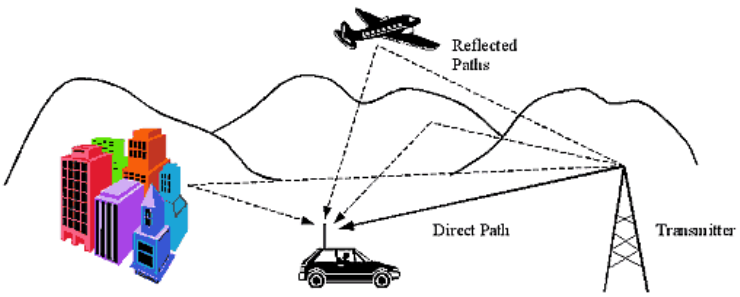
ดังนั้นรหัสเอ็ม-ซีเควนจึงมีประโยชน์อย่างมากกับระบบสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซีดีเอ็มเอ เพราะลำดับสัญญาณชุดหนึ่งที่มีคาบยาวเพียงพอสามารถนำมาใช้ในการระบุหมายเลขประจำตัวของสถานีฐานได้เป็นจำนวนมาก โดยอาศัยการเลื่อนชิปส์ของลำดับสัญญาณไปด้วยจำนวนที่แตกต่างกัน เช่น ในมาตรฐานระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซีดีเอ็มเอ (IS-95) ใช้ชิฟต์รีจิสเตอร์จำนวน 15 ตัว ในการสร้างรหัสที่มีคาบความยาวเท่ากับ $2^{15}-1=32,768$ ชิปส์ สถานีฐานแต่ละแห่งจะใช้วงจรสร้างรหัสแบบเดียวกันแต่จะมีการเลื่อนชิปส์ของลำดับสัญญาณออกไปทีละ 64 ชิปส์ เพราะฉะนั้นรหัสที่แตกต่างกันสำหรับการใช้งานได้ทั้งหมด $\frac{32,768}{64}=512$ ชุด สำหรับใช้ระบุหมายเลขประจำตัวของสถานีฐานได้มากถึง 512 สถานี หากพิจารณาสายอากาศแบบออมนิเซกเตอร์ ส่วนในกรณีตัวเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่จะมีการสร้างรหัส $2^{42}-1$ เท่ากับ 4.39×10^{12} ชิปส์โดยที่แต่ละผู้ใช้เครื่องโทรศัพท์จะมี 42 ชิปส์ ซึ่งใน 42 ชิปส์ จะมีค่าเท่าที่เราเรียก ESN (Electronic Serial Number) ในแต่ละคนจะมีค่า ESN นี้ถูกจัดเก็บไว้ในซิมการ์ดหรือเครื่องโทรศัพท์ในกรณีตัวเครื่องไม่มีซิมการ์ดใส่และจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูล (HLR) ด้วย เพื่อยืนยันตรวจสอบข้อมูลที่ถูกต้อง

ตารางที่ 2.2 ค่าอัตสหสัมพันธ์ที่มีคุณลักษณะของชุดรหัส

จำนวนชิปส์ที่เลื่อนจากกัน	ลำดับของสัญญาณ	อัตสหสัมพันธ์
0	000100110101111	15
1	100010011010111	-1
2	110001001101011	-1
3	111000100110101	-1
4	111100010011010	-1
5	011110001001101	-1
6	101111000100110	-1
7	010111100010011	-1
8	101011110001001	-1
9	110101111000100	-1
10	011010111100010	-1
11	001101011110001	-1
12	100110101111000	-1
13	010011010111100	-1
14	001001101011110	-1
15	000100110101111	15

2.4 การจางหายบนช่องสัญญาณ

ในเทคโนโลยีของระบบการสื่อสารไร้สายเมื่อพิจารณาทางด้านส่งสัญญาณที่ส่งออกไปผ่านไปยังช่องสัญญาณสื่อสารต่างๆจะเกิดการแทรกสอด การสะท้อนและการลดทอน ทำให้สัญญาณที่มาถึงทางด้านรับจะเกิดการรวมกันของสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทาง ซึ่งอาจเป็นการเสริมกันหรือหักล้างกันก็ได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การจางหายของสัญญาณในหลายวิถี

2.4.1 คุณลักษณะของสัญญาณที่ผ่านช่องสัญญาณที่มีการจางหายหลายเส้นทาง

หากทำการส่งพัลส์สัญญาณที่มีคาบสั้นๆ ไปบนช่องสัญญาณหายเส้นทางตามการเปลี่ยนแปลงเวลา สัญญาณที่ได้รับจะเป็นขบวนของพัลส์แสดงดังรูปที่ 2.11 ดังนั้นคุณลักษณะของตัวกลางแบบหลายเส้นทาง คือ การกระจายช่วงเวลาของสัญญาณที่ส่งผ่านช่องสัญญาณ เมื่อทำการส่งสัญญาณเดิมออกไปหลายๆ ครั้ง ด้านรับจะรับได้ขบวนสัญญาณที่แตกต่างกัน ซึ่งไม่สามารถจะคาดคะเนสัญญาณที่รับได้ สามารถแสดงเป็นสมการทางภาครับได้

$$x(t) = \sum_n \beta_n(t) s\left(t - \tau_n(t)\right) \tag{2.3}$$

โดย $\beta_n(t)$ คือ อัตราการลดทอนของสัญญาณในเส้นทางที่ n

$\tau_n(t)$ คือ เวลาของสัญญาณที่ถูกหน่วงของเส้นทางที่ n

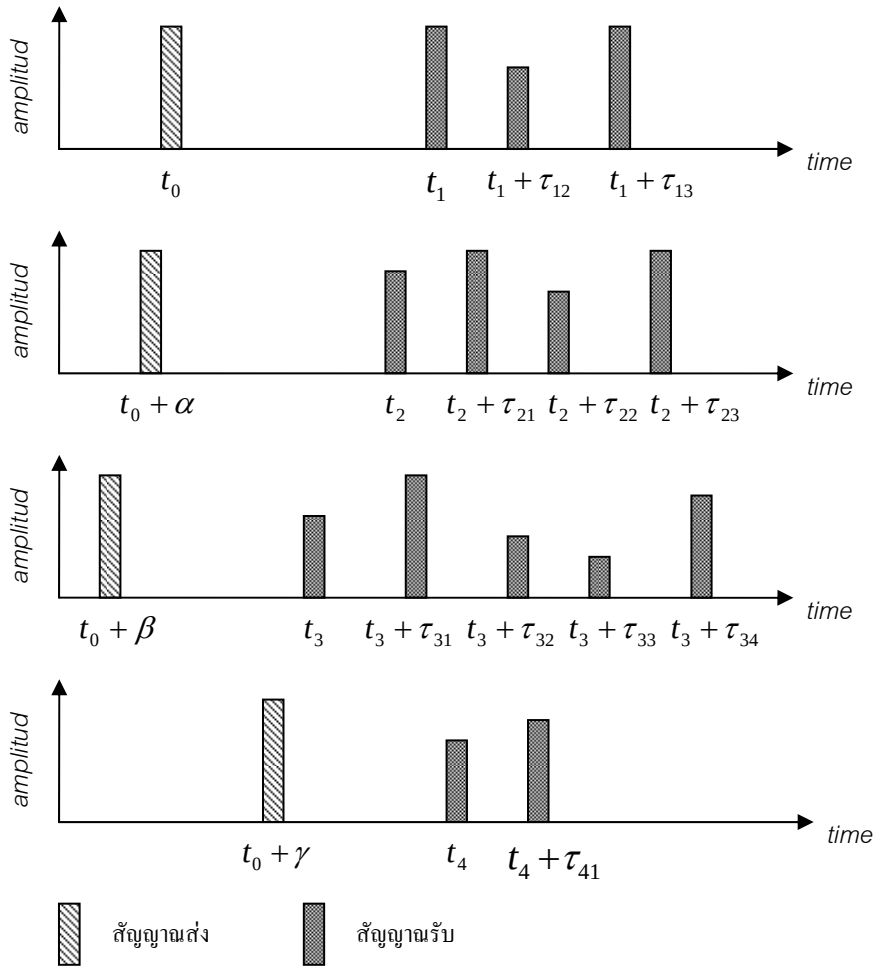
$s(t)$ คือ สัญญาณทางด้านส่ง มีค่าเท่ากับ $\mathrm{Re}[s_l(t)e^{j2\pi f_c t}]$

$x(t)$ คือ สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ

ดังนั้นสัญญาณที่รับได้หลังผ่านการกรองสัญญาณสามารถแสดงได้เป็น

$$r_l(t) = \sum_n \beta_n(t) e^{-j\gamma n} s_l\left(t - \tau_n(t)\right) \tag{2.4}$$

โดยที่ $\gamma_n = 2\pi f_c \tau_n(t)$ คือแบบจำลองของช่องสัญญาณหลายเส้นทาง ซึ่งจะมีสัญญาณที่รับได้แสดงดังสมการที่ 2.4 เรียกว่าสัญญาณเฟดดิง โดยปรากฏการณ์เฟดดิงเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงเวลาในเทอมของเฟส γ_n ในบางครั้งการเปลี่ยนแปลงของ γ_n เป็นผลทำให้สัญญาณด้านรับมีค่าลดลง แต่บางครั้งทำให้มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณด้านรับเกิดจากคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางเวลาของช่องสัญญาณหลายเส้นทาง



รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงทางเวลาของช่องสัญญาณหลายวิถีที่เกิดจากสัญญาณพัลส์ที่แคบมากๆ

2.4.2 แบบจำลองช่องสัญญาณ

ช่องสัญญาณสามารถแทนด้วยแบบจำลองของช่องสัญญาณต่างๆ ซึ่งจะมีผลตอบสนองอิมพัลส์ของวงจรกรองความถี่ต่ำเข้ามาเกี่ยวข้องดังนั้น สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$c(\tau;t)=\sum_{l=0}^{L-1}\beta_n(t)e^{-j\gamma_n}\delta\big(t-\tau_n(t)\big) \tag{2.5}$$

โดยที่ β_n คือ อัตราการลดทอนทางด้านขนาดของสัญญาณ (Amplitude distortion factor) ซึ่งมีค่าความหนาแน่นของความน่าจะเป็น แสดงด้วยการแจกแจงแบบต่างๆ

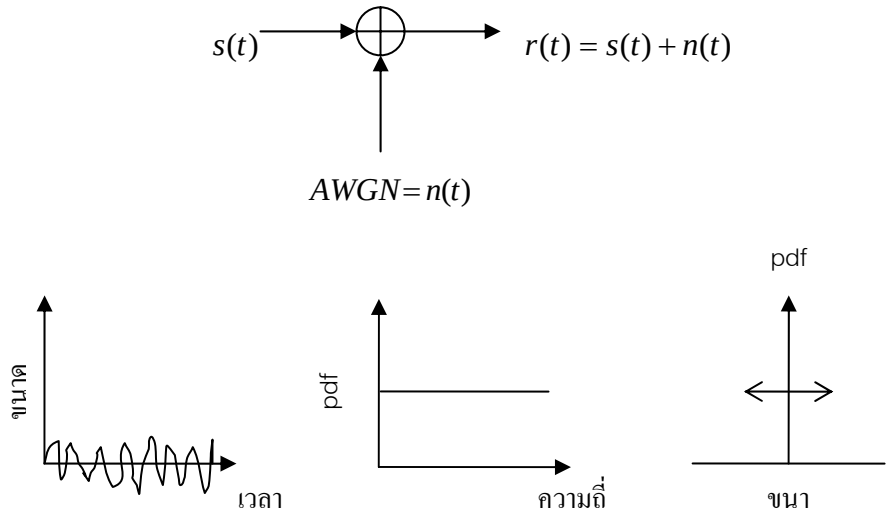
τ_n คือ เวลาหน่วง (Time delay) ในเส้นทางต่างๆ ซึ่งกำหนดให้เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มบนช่วง $[0,T]$

γ_n คือ ความหน่วงเชิงเฟส (Phase delay) ซึ่งกำหนดให้เป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มบนช่วง $[0,2\pi]$

L คือ จำนวนเส้นทาง ซึ่งจะสอดคล้องกับผลของการจางหายหลายวิถี (multipath fading) เป็นผลเนื่องมาจากการสะท้อน การหักเห และการกระเจิงของสัญญาณภายในช่องสัญญาณ เป็นต้น

ซึ่งแบบจำลองของช่องสัญญาณต่างๆ จะมีฟังก์ชันการแจกแจงของความหนาแน่นความน่าจะเป็นมีหลายรูปแบบดังต่อไปนี้

2.4.2.1 ช่องสัญญาณรบกวนขาว (AWGN)



รูปที่ 2.12 คุณสมบัติของช่องสัญญาณรบกวนเกาส์ขาว

จากรูปที่ 2.12 สัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารนั้นส่วนมากจำลองให้เป็นแบบช่องสัญญาณรบกวนขาว ซึ่งมีความหนาแน่นสเปกตรัมเป็นแบบยูนิฟอร์ม (Uniform Spectrum Density) และขนาดมีการแจกแจงแบบเกาส์ (Guassian Distribution) โดยปกติแล้วสัญญาณรบกวนทางอุณหภูมิ (Thermal Noise) และสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (Electrical Noise) ที่เกิดจากการขยายสัญญาณนั้นจะมีคุณสมบัติของสัญญาณรบกวนขาว ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าวสามารถจำลองให้เป็นสัญญาณรบกวนแบบ AWGN (Additive White Gaussian Noise) ได้ซึ่งฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) ของสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวกสามารถแสดงได้ตามสมการ

$$\Phi_{nn}(f) = \frac{1}{2} N_0 \tag{2.6}$$

2.4.2.2 การจางหายบนช่องสัญญาณแบบเรย์ลิ (Rayleigh Model)

เป็นระบบที่อธิบายการแจกแจงของความหนาแน่นกำลังของสัญญาณในชนบท ซึ่งมีบ้านเรือนที่มีขนาดไม่สูงมากนักหรือภูเขา การใช้งานในชนบทก็พบกับปัญหาซึ่งมีผลกระทบกับระดับความแรงของสัญญาณ ซึ่งเรียกว่าการจางหายในหลายเส้นทางเกิดขึ้นเมื่อสัญญาณเดินทางมากกว่าหนึ่งเส้นทางจากด้านส่งไปยังด้านรับ สัญญาณจะไม่ได้รับโดยตรงจากด้านส่ง แต่จะได้รับจากทิศทางอื่นๆ ซึ่งจะตกกระทบมาเช่น จากบ้านเรือนในชนบท จึงเป็นการยากมากที่จะมีเส้นยาว (line of sight) ระหว่างตัวส่งและตัวรับ สัญญาณอาจจะเดินทางไปถึงตัวรับโดยผ่านการสะท้อนกับบ้านเรือนหลายครั้ง ซึ่งหมายความว่าสัญญาณที่รับได้จะเป็นผลรวมของสัญญาณเดียวกันซึ่งมีความต่างเฟสกันเล็กน้อย สามารถแสดงด้วยค่าความหนาแน่นของฟังก์ชันความน่าจะเป็นได้ดังสมการ

$$p(\beta) = \frac{\beta}{\sigma^2} \exp\left[\frac{-\beta^2}{2\sigma^2}\right] \qquad \text{เมื่อ} \qquad \beta \geq 0 \tag{2.7}$$

2.4.2.3 การจางหายบนช่องสัญญาณแบบไรซ์เชียน (Rician Model)

เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมในเมือง ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ค่า และมีค่าความหนาแน่นความน่าจะเป็นได้ดังสมการ

$$p(\beta) = \frac{\beta}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{\beta^2 + a^2}{2\sigma^2}\right] I_o\left[\frac{a\beta}{\sigma^2}\right] \qquad \text{เมื่อ} \quad \beta \geq 0 \tag{2.8}$$

เมื่อ $I_0(x)$ คือ ฟังก์ชันเบสเซล (Bessel Function)

2.4.2.4 การจางหายบนช่องสัญญาณแบบนาคากามิ (Nakagami Model)

เป็นแบบจำลองที่ได้มาจากการทดลองและสามารถอธิบายปรากฏการณ์ของการเกิดการจางหายในบริเวณอื่นๆได้ดี เอาต์พุตของสัญญาณด้านรับจะเป็นผลบวกทางเวกเตอร์ของขนาดของสัญญาณ (Signal strength) แบบจำลองนาคากามิ ไม่ได้อธิบายรายละเอียดทางด้านเฟส อย่างไรก็ตามแบบจะลองนาคากามิยังสามารถอธิบายแบบจำลองอื่นๆได้ดีอีกด้วย สามารถแสดงค่าความหนาแน่นความน่าจะเป็นได้ดังสมการ

$$p(\alpha) = 2\left(\frac{m_l}{\Omega_l}\right)^{m_l} \frac{\alpha^{2m_l - 1}}{\Gamma(m_l)} \exp\left[-\frac{m_l}{\Omega_l}\alpha^2\right] \qquad \text{เมื่อ} \quad \alpha \geq 0 \tag{2.9}$$

เมื่อ m คือ ตัวแปรเสริมเฟดดิงมีค่าเท่ากับ

$$m_l = \frac{\Omega_l^2}{E\left[(\beta_l^2 - \Omega_l)^2\right]} \qquad \geq 0.5 \tag{2.10}$$

โดยจุดเด่นของแบบจำลองนาคากามิ คือ

ก) เป็นแบบจำลองที่ได้มาจากการทดลอง และสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมทั้งในชนบทและเมืองใหญ่

ข) เป็นแบบจำลองที่สอดคล้องกับการแจกแจงของขนาด (Amplitude Distribution) ซึ่งแสดงด้วยตัวแปรเสริมเฟดดิง (m) ต่างๆ ดังนี้

$m = 0.5$ คือ การแจกแจงแบบเกาส์เซียนข้างเดียว

$m = 1$ คือ การแจกแจงแบบเรย์ลิ

$m \to \infty$ คือ กรณีอุดมคติที่ไม่มีการเพี้ยนของสัญญาณ