บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย และระบบโอเอฟดีเอ็ม

ในระบบโทรคมนาคมทั้งผ่านสายหรือไร้สายการมอดูเลตชั่นเป็นการย้ายย่านความถี่เพื่อให้ข่าวสารที่เราต้องการทำการส่งผ่านมีความเหมาะสมสามารถส่งผ่านไปในย่านความถี่ต่างๆได้และสิ่งที่เราใช้ในการนำพาข่าวสารเราไปเรียกว่า คลื่นพาห์ (carrier) ซึ่งเป็นสัญญาณไซร์นูซอยด้อย (sinusoidal) และการที่เราจะนำข่าวสารของเราฝากไปกับคลื่นพาห์วิธีการที่เป็นพื้นฐานที่ดีสำหรับทำความเข้าใจและทั้งยังเป็นเทคนิควิธีแรก คือ การมอดูเลชั่นแบบแอมปริจูด (AM : amplitude modulation) ซึ่งเป็นการฝากข้อมูลข่าวสารไปกลับคลื่นพาห์ด้วยการแปลงข้อมูลข่าวสารในรูปของแอมปรีจูด อันเป็นที่รู้จักกันทั่วไปในนามของวิทยุเอเอ็ม และการมอดูเลตอีกวิธีหนึ่งที่ให้คุณเสียงที่คมชัดดียิ่งขึ้นคือ การมอดูเลชั่นแบบเฟส (FM : Frequency modulation) เป็นการฝากข้อมูลข่าวสารไปกลับคลื่นพาห์ด้วยการแปลงข้อมูลในรูปของมุม ซึ่งจะมีความอ่อนไหวต่อสภาวะแวดล้อมและคุณภาพของเครื่องรับมากกว่าการมอดูเลชั่นแบบเอเอ็ม

การมอดูเลชั่นทั้งสองวิธีนี้เป็นจุดเริ่มของการโทรคมนาคมและเมื่อผู้บริโภคต้องการทีจะส่งข้อมูลข่าวสารที่มากขึ้นและช่องสัญญาณที่เป็นเส้นทางในการส่งผ่านข่าวสารนั้นเป็นทรัพยากรที่จำกัด จึงต้องมีการพัฒนาการจัดส่งข่าวสารให้ได้ประสิทธิภาพในการส่งผ่านอย่างคุ้มค่าที่สุด เทคนิคต่างๆก็ได้มีการพัฒนาเป็นลำดับดังนี้

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งย่านความถี่ (Frequency division multiplexing) เป็นเทคนิควิธีการย้ายสเปกตรัมของสัญญาณไม่ให้ซ้อนทับกันทางความถี่ และวัตถุประสงค์นั้นเพื่อรวมสัญญาณหลายๆสัญญาณไปในช่องสัญญาณเดียวกัน

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา (Time division multiplexing) เป็นเทคนิคการส่งสัญญาณหลายๆสัญญาณไปในช่องสัญญาณเดียวด้วยวิธีการแบ่งช่วงเวลากันส่งจึงทำให้ใช้ช่องสัญญาณเดียวกันส่งสัญญาณได้หลายสัญญาณ

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งรหัส (code division multiplexing) เป็นเทคนิคการส่งสัญญาณโดยการกำหนดรหัสและเป็นการรวมหลายๆ ผู้ใช้ที่ใช้ตัวกลางเดียวกันในแถบความถี่เดียวกัน แนวคิดคือสัญญาณของแต่ละผู้ใช้จะตั้งฉากกันและข้อมูลจะกู้คืนได้โดยไม่มีการแทรกซ้อนกันในแต่ละผู้ใช้ซึ่งเทคนิควิธีนี้มีแนวคิดอยู่บนพื้นฐานการแพร่กระจายสเปกตรัม (spread spectrum) ซึ่งนำมาใช้ครั้งแรกในสงครามโลกครั้งที่สองในกองทัพทหารเป้าหมายเพื่อหลบการตรวจจับคลื่นเพื่อดักฟังของฝ่ายตรงข้าม

การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็ม (orthogonal frequency division multiplexing) ซึ่งเป็นหัวข้อวิจัยของวิทยานิพนธ์ เป็นเทคนิคที่ใช้หลายคลื่นพาห์แบบดิจิตอลจะกระจายสัญลักษณ์ที่เข้ารหัสเป็นแบบดิจิตอลในความถี่หลายๆคลื่นพาห์ย่อยเพื่อที่จะลดอัตราการใช้เวลาของแต่ละ

สัญลักษณ์ (symbol clock rate) และยังให้ผลทนทางต่อช่องสัญญาณที่มีการจายหายแบบหลายเส้นทาง ถึงแม้ว่าสเปกตรัมของแต่ละคลื่นพาห์ย่อยจะมีการเลื่อมทับกันแต่ข้อมูลข่าวสารจะกู้คืนได้อย่างสมบรูณ์โดยไม่มีการแทรกสอด(interference) จากคลื่นพาห์ย่อยที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งจะอธิบายได้ดีที่สุดด้วยสมการคณิตศาสตร์ดังที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

เนื่อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัย และพื้นฐานของระบบ โอเอฟดีเอ็ม ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบต่างๆ พื้นฐานของระบบโอเอฟเอ็มดีเอ็ม สัญญาณรบกวนแบบบวกขาวและวงจรขยายแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษา และประเมินประสิทธิภาพของระบบโอเอฟดีเอ็ม

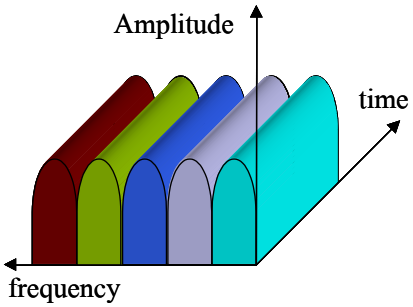
2.1 เทคนิคการมัลติเพล็กซ์

ในระบบการสื่อสารนั้น มักจะมีความจำเป็นที่จะต้องทำการจัดส่งสัญญาณต่างๆ หลายสัญญาณรวมกันไปในตัวกลางหรือสายส่งสัญญาณเดียวกัน โดยที่จะต้องสามารถที่จะทำการแยกสัญญาณแต่ละสัญญาณที่ส่งรวมกันมานั้นออกจากกันได้ทางด้านเครื่องรับ วิธีการรวมสัญญาณเข้าด้วยกันดังกล่าวมีชื่อว่าการมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing) สัญญาณ และวิธีการจัดแยกสัญญาณเหล่านั้นมีชื่อว่า การดีมัลติเพล็กซ์ (Demultiplexing) สัญญาณ ในยุคที่ผ่านมาการมัลติเพล็กซ์สัญญาณที่รู้จักกันทั่วไปมีอยู่ 3 แบบคือ การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งย่านความถี่ (Frequency Division Multiplexing) การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา (Time Division Multiplexing) และการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งรหัส (Code Division Multiplexing) ในปัจจุบันการมัลติเพล็กซ์สัญญาณอีกแบบหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจของกลุ่มนักวิจัยคือการมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็ม (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ซึ่งเป็นการมัลติเพล็กซ์ที่ทำให้สามารถใช้ย่านความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและรองรับการส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูง พื้นฐานของการมัลติเพล็กซ์แบบต่างๆ มีละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

2.1.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่หรือเอฟดีเอ็ม (FDM: Frequency Division Multiplexing) วิธีการนี้จะอาศัยการมอดูเลตสัญญาณมาช่วยในการย้ายสเปคตรัมของสัญญาณที่ต้องการจะส่งแต่ละสัญญาณรวมกันไปนั้นให้เลื่อนไปอยู่ในย่านความถี่ที่ไม่ซ้อนทับกันดังแสดงในรูปที่ 2.1 ทั้งนี้เพื่อมิให้การใช้สเปคตรัมของแต่ละสัญญาณนั้นเกิดการรบกวนซึ่งกันและกันในแกนความถี่ โดยสามารถเลือกใช้คลื่นพาหะที่มีความถี่เหมาะสมมาทำการมอดูเลตสัญญาณต่างๆ ที่ต้องการจะส่งรวมกันแต่ละสัญญาณ เพื่อทำให้สเปคตรัมของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการมอดูเลตนั้นแยกเป็นอิสระต่อกันและกันในแกนความถี่ ทำให้สามารถส่งสัญญาณเหล่านี้รวมกันไปในช่องสัญญาณเดียวกันได้ และเมื่อเราใช้วงจรกรองแถบความถี่ผ่านมาแยกสัญญาณที่รับได้ทางด้านเครื่องรับอย่างเหมาะสมแล้วจะสามารถแยกสัญญาณเหล่านั้นออกจากกันได้และเมื่อนำสัญญาณที่

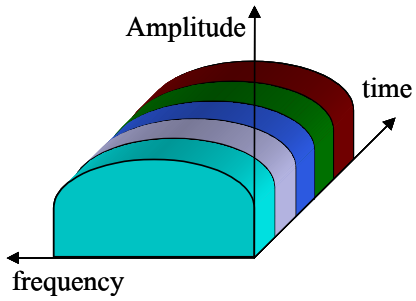
แยกออกมานี้ไปทำการดีมอดูเลต ก็จะได้ข้อมูลหรือข่าวสารกลับคืนมา ส่วนมากการมัลติเพล็กซ์แบบเอฟดีเอ็มจะนิยมใช้กับการส่งสัญญาณข้อมูลแบบอนาลอก เช่นระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคแรกๆ



รูปที่ 2.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งย่านความถี่

2.1.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลาหรือทีดีเอ็ม (TDM: Time Division Multiplexing) เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบหนึ่งที่ทำให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลจำนวนมากกว่าหนึ่งสัญญาณไปในช่องการสื่อสารช่องเดียว โดยอาศัยการแบ่งช่วงเวลา (time slot) ในการส่งสัญญาณ ซึ่งสัญญาณข้อมูลแต่ละสัญญาณจะทำการมอดูเลตที่ความถี่เดียวกันแต่ส่งคนละช่วงเวลาจึงทำให้สามารถใช้ช่องสัญญาณช่องเดียวสื่อสารกันได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลานี้นิยมใช้กับการส่งสัญญาณข้อมูลแบบดิจิตอล แต่บางครั้งก็พบได้ในระบบอนาลอก เนื่องจากว่าขั้นตอนการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล (A/D) และดิจิตอลเป็นสัญญาณอะนาลอก (D/A) นั้นมีกระบวนที่ไม่ยุ่งยากนัก

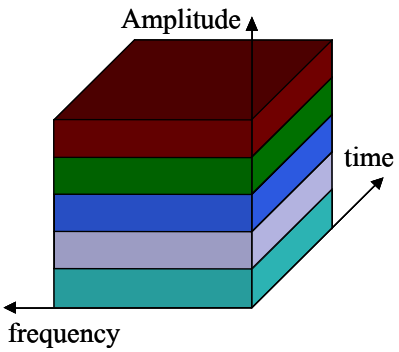


รูปที่ 2.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา

2.1.3 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งรหัส

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งรหัสหรือซีดีเอ็ม (Code Division Multiplexing: CDM) เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ที่อาศัยการแบ่งช่องสัญญาณโดยการกำหนดรหัสดังแสดงในรูปที่ 2.3 ทำให้สามารถทำการสื่อสารกันได้โดยใช้ความถี่เดียวกันพร้อมๆกันหลายช่องสัญญาณเป็นเทคนิคที่

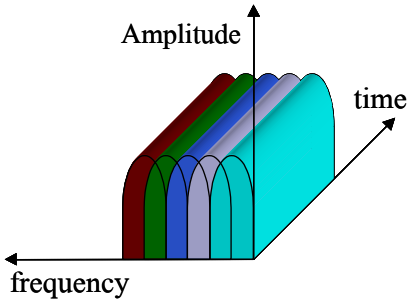
ทำให้มีความจุของช่องสัญญาณสูง แต่เมื่อมีการสื่อสารกันมากๆจะทำให้คุณภาพของสัญญาณต่ำลงอันเนื่องมาจากเกิดการแทรกสอด (Interference) ระหว่างผู้ใช้ด้วยกันเอง



รูปที่ 2.3 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งรหัส

2.1.4 การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็ม

การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็ม (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) เป็นเทคนิคที่ทำให้สามารถส่งผ่านข้อมูลด้วยความเร็วสูง โดยอาศัยหลักการการส่งผ่านแบบหลายคลื่นพาหะ (multi-carrier) อีกทั้งยังใช้ย่านความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะแต่ละคลื่นพาหะย่อยที่ใช้ในการส่งสัญญาณจะมีสเปคตรัมเลื่อมกันโดยมีคุณสมบัติของการตั้งฉาก (Orthogonal properties) ซึ่งกันและกันระหว่างคลื่นพาหะย่อยดังแสดงในรูปที่ 2.4 การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็มเป็นเทคนิคที่คาดกันว่าจะนำมาใช้ในการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 4 [1-2]



รูปที่ 2.4 การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็ม

2.2 พื้นฐานของระบบโอเอฟดีเอ็ม

การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็ม (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ที่คล้ายกับการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ (FDM: Frequency Division Multiplexing) โดยที่ระบบโอเอฟดีเอ็มนั้นจะใช้พื้นฐานของการมัลติเพล็กซ์

แบบแบ่งช่วงความถี่ที่ทำให้สามารถที่จะส่งข่าวสารได้หลายข่าวสารไปในช่องสัญญาณช่องเดียวกันซึ่งเป็นการใช้ย่านความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตัวอย่างของระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ที่ใช้กัน เช่น การส่งสัญญาณของสถานีวิทยุเอฟเอ็ม (Frequency Modulation) โดยที่แต่ละสถานีจะใช้ความถี่ที่ต่างกันทำให้แต่ละสถานีนั้นสามารถที่ส่งสัญญาณได้พร้อมๆกันโดยไม่มีการรบกวนซึ่งกันและกัน โดยในการส่งสัญญาณนั้นแต่ละสถานีจะใช้แถบความถี่ที่จำกัดและไม่เลื่อมทับกันในแกนความถี่ ทางด้านเครื่องรับเมื่อรับสัญญาณได้ก็จะเลือกแถบความความถี่หรือสถานีที่ต้องการโดยใช้วงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่าน (band-pass filter) ซึ่งจะสามารถทำการดีมอดูเลต (demodulate) สัญญาณข่าวสารที่ต้องการกลับมาได้

การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็มจะแตกต่างกับการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ในหลายๆด้านคือ ในการส่งสัญญาณแบบแบ่งช่วงความถี่จะส่งที่แถบความถี่ต่างกันโดยผลที่ได้จากการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่คือจะสูญเสียแถบความถี่ระหว่างสถานีที่มีไว้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรบกวนกันระหว่างสถานีข้างเคียง ด้วยการมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็ม เช่น ระบบการกระจายเสียงแบบดิจิตอล (DAB : Digital Audio Broadcasting) สัญญาณข่าวสารของแต่ละสถานีจะถูกมัลติเพล็กซ์รวมกันเป็นสัญญาณข่าวสารสัญญาณเดียว โดยสัญญาณข่าวสารทั้งหมดนี้จะทำการส่งโดยใช้ระบบโอเอฟดีเอ็มผ่านคลื่นพาหะย่อยๆจำนวนมาก โดยคลื่นพาหะย่อยๆเหล่านี้จะมีคุณสมบัติของการออโธโกนอล (orthogonal) ทำให้สามารถส่งสัญญาณที่มีแถบความถี่ซ้อนทับกันได้โดยไม่ทำให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน อีกทั้งยังใช้แถบความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ที่ต้องมีแถบความถี่ป้องกันเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนกันระหว่างสถานีข้างเคียง

ในระบบการสื่อสารไร้สายนั้นจะเลือกใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆที่เหมาะสมและสามารถที่จะส่งสัญญาณข่าวสารไปในช่องสัญญาณการสื่อสารที่ต้องการส่งผ่านได้ การพัฒนารูปแบบการมอดูเลตนั้นจะทำการพัฒนาให้เหมาะสมกับสัญญาณข่าวสารที่เป็นสัญญาณอนาลอกหรือดิจิตอล ในส่วนของรูปแบบการมอดูเลตสัญญาณข่าวสารที่เป็นอนาลอกแบบทั่วไปได้แก่ การมอดูเลตเชิงความถี่ (FM: Frequency Modulation) การมอดูเลตเชิงขนาด (AM: Amplitude Modulation) การมอดูเลตเชิงมุม (PM: Phase Modulation) การมอดูเลตแบบเอสเอสบี (SSB: Single Side Band) การมอดูเลตแบบวีเอสบี (VSB: Vestigial Side Band) และการมอดูเลตแบบดีเอสบีเอสซี (DSB-SC: Double Side Band Suppressed Carrier) และในส่วนการมอดูเลตสัญญาณสำหรับการสื่อสารแบบดิจิตอลทั่วไป ได้แก่ การมอดูเลตแบบเอเอสเค (ASK: Amplitude Shift Keying) การมอดูเลตแบบเอฟเอสเค (FSK: Frequency Shift Keying) การมอดูเลตแบบพีเอสเค (PSK: Phase Shift Keying) และการมอดูเลตแบบคิวเอเอ็ม (QAM: Quadrature Amplitude Modulation)

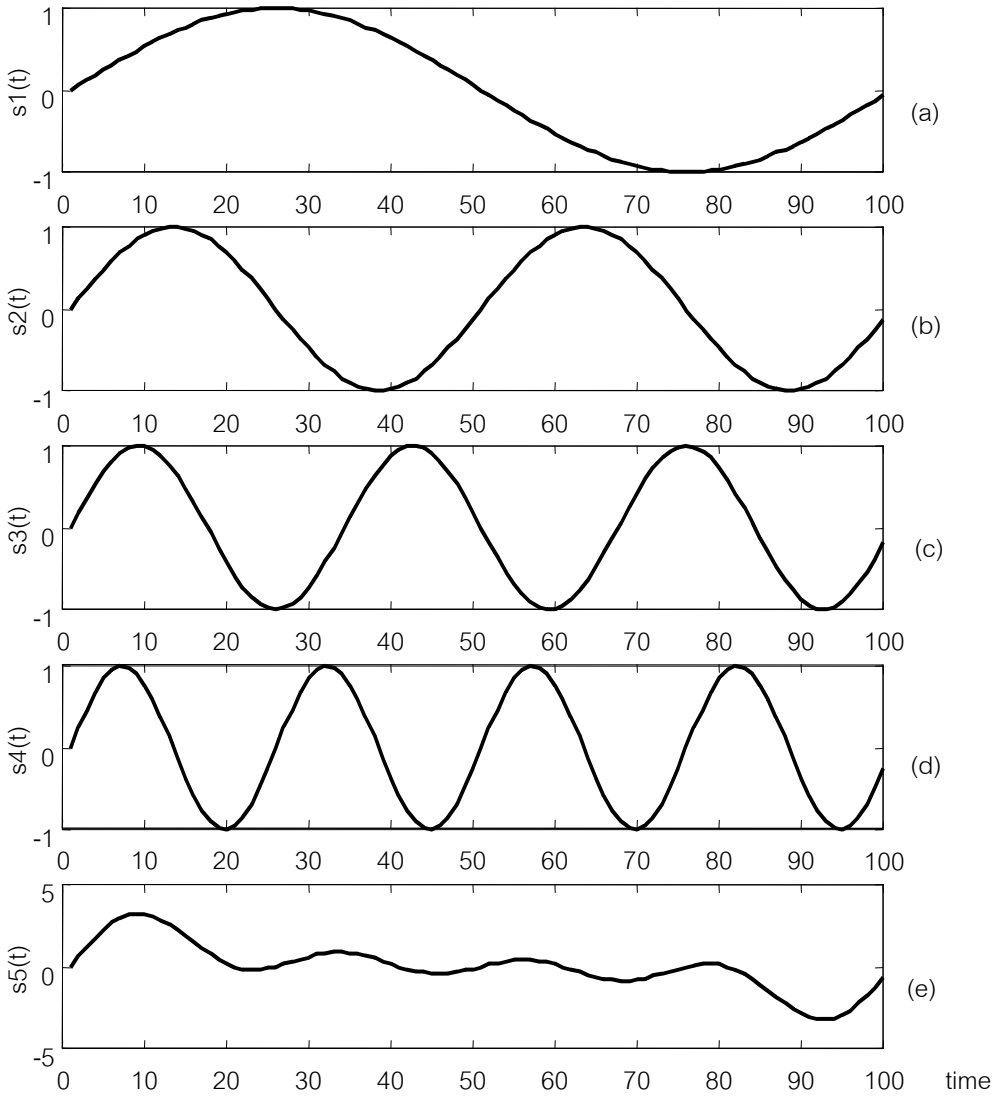
ในแต่ละคลื่นพาหะของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่นั้นสามารถที่จะทำการมอดูเลตสัญญาณข่าวสารที่จะส่งเป็นแบบอนาลอกหรือดิจิตอลก็ได้เนื่องจากการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่นั้นไม่ต้องทำการซิงโครไนซ์ (Synchronization) ระหว่างสถานีที่ส่ง ดังนั้นแต่สถานีสามารถที่จะส่งสัญญาณที่ทำการมอดูเลตแตกต่างกันได้ เช่น สถานีที่ 1 มอดูเลตแบบเอฟเอ็ม สถานีที่ 2 อาจจะมอดูเลตแบบเอฟเอสเคก็ได้ สำหรับการมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็มนั้นคลื่นพาหะย่อยๆทั้งหมดจะต้องซิงโครไนซ์กันซึ่งเป็นการจำกัดที่จะต้องทำการมอดูเลตแบบดิจิตอล ระบบโอเอฟดีเอ็มจะส่งสัญญาณเป็นสัญลักษณ์ ซึ่งสามารถส่งสัญญาณจำนวนมากที่มีความเร็วต่ำแบบขนานกันไป ในการส่งคลื่นพาหะย่อยๆนี้จะต้องทำการซิงโครไนซ์ทั้งเวลาและความถี่ และจะต้องรักษาคุณสมบัติของการออโธโกนอลเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกันระหว่างคลื่นพาหะย่อยๆ การสร้างคลื่นพาหะย่อยๆให้มีคุณสมบัติของการออโธโกนอล (orthogonality) นั้นสามารถทำได้หลายวิธีและทำไมจึงไม่มีการรบกวนกันระหว่างคลื่นพาหะย่อย

2.2.1 คุณสมบัติของการออโธโกนอล

สัญญาณจะออโธโกนอลกันถ้ามีความเป็นอิสระร่วมกัน (mutually independent) ของแต่ละสัญญาณ คุณสมบัติของการออโธโกนอลจะทำให้สามารถที่จะทำส่งสัญญาณหลายๆ สัญญาณรวมกันไปในช่องสัญญาณการสื่อสารเดียวกันและสามารถที่จะกู้สัญญาณกลับมาได้โดยไม่มีการแทรกสอด (interference) ซึ่งกันและกัน ปกติแล้วส่วนมากการมัลติเพล็กซ์รูปแบบต่างๆนั้นจะมีคุณสมบัติของการออโธโกนอลโดยธรรมชาติ ตัวอย่างเช่นการมัลมัติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา (TDM: Time Division Multiplexing) ซึ่งสามารถที่จะส่งสัญญาณข่าวสารหลายๆสัญญาณไปในช่องการสื่อสารเดียวกันโดยอาศัยการส่งคนละช่วงเวลา (time slot) คือในระหว่างที่ส่งสัญญาณข่าวสารสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งนั้นจะไม่มีการส่งสัญญาณข่าวสารสัญญาณอื่น ส่วนสัญญาณข่าวสารอื่นๆนั้นจะส่งที่ช่วงเวลาถัดไปดังนั้นจึงทำให้ไม่เกิดแทรกสอดระหว่างสัญญาณข่าวสารที่ส่งเพราะระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลานั้นมีลักษณะของการออโธโกนอล ในส่วนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ (FDM: Frequency Division Multiplexing) นั้นสัญญาณข่าวสารแต่ละสัญญาณนั้นจะออโธโกนอลกันโดยไม่เกิดการแทรกสอดซึ่งกันและกันโดยการส่งที่คลื่นพาหะคนละความถี่และแถบความถี่ที่ห่างกันเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนกันระหว่างสัญญาณที่ใช้คลื่นพาหะที่มีความถี่ใกล้กัน ถึงแม้ว่าวิธีการเหล่านี้จะมีความเป็นออโธโกนอลในส่วนของระบบโอเอฟดีเอ็มจะเป็นรูปการแบบการมัลติเพล็กซ์ของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่โดยที่คลื่นย่อยๆของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มนั้นจะมี สเปคตรัมที่ซ้อนทับกันซึ่งมีความเป็นได้ในทางทฤษฎีถ้าสามารถที่จะรักษาคุณสมบัติของการออโธโกนอลระหว่างคลื่นพาหะย่อยเหล่านั้นได้

การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็มนั้นจะมีคุณสมบัติของการออโธโกนอลในแกนความถี่โดยสามารถที่จะส่งสัญญาณข่าวสารไปในคลื่นพาหะย่อยที่ต่างกันโดยไม่เกิดการบกวนกัน สัญญาณโอเอฟดีเอ็มสามารถสร้างจากผลรวมของสัญญาณไซนูซอยด์ (sinusoid signal) หลายๆ

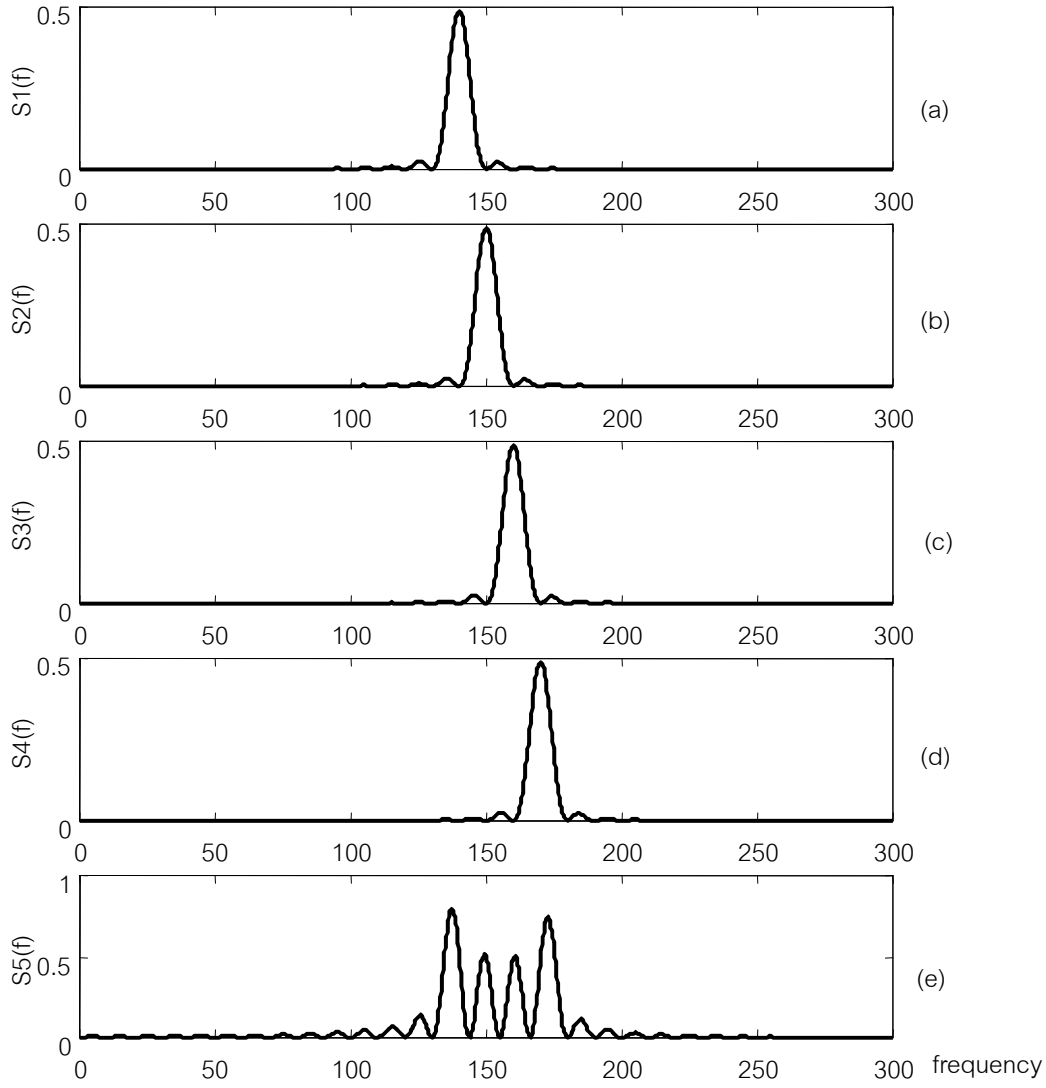
สัญญาณ ซึ่งแต่ละสัญญาณก็คือคลื่นพาหะย่อยแต่ละตัวนั่นเอง ความถี่เบสแบนด์ (baseband frequency) ของแต่คลื่นพาหะย่อยจะกำหนดให้เป็นจำนวนเต็มของส่วนกลับของช่วงเวลาของสัญลักษณ์หนึ่งสัญลักษณ์ (symbol time) โดยผลที่ได้จะทำให้แต่ละคลื่นพาหะย่อยนั้นมีจำนวนของไซเคิล (cycle) เป็นจำนวนเต็มในหนึ่งสัญลักษณ์และผลที่ตามมาก็จะทำให้แต่ละคลื่นพาหะย่อยๆนั้นจะออโธโกนอลกัน ในรูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มที่มีคลื่นพาหะย่อยจำนวน 4 คลื่นพาหะ



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มในแกนเวลา

รูปที่ 2.5(a), (b), (c) และ (d) แสดงคลื่นพาหะย่อยแต่ละสัญญาณซึ่งประกอบด้วยลูกคลื่นจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ลูกคลื่น ในช่วงเวลาหนึ่งสัญลักษณ์ตามลำดับ โดยที่คลื่นพาหะย่อยแต่ละสัญญาณนั้นจะมีเฟสเป็นศูนย์ และจะสังเกตได้ว่าแต่ละคลื่นพาหะย่อยจะมีจำนวนลูกคลื่นเป็น

จำนวนเต็มในช่วงเวลาของหนึ่งสัญลักษณ์ ในส่วนของรูปที่ 2.5(e) เป็นสัญญาณเมื่อทำการรวมคลื่นพาหะย่อยทั้ง 4 สัญญาณเข้าด้วยกัน



รูปที่ 2.6 สัญญาณในแกนความถี่ของคลื่นพาหะย่อยแต่ละสัญญาณ

รูปที่ 2.6(a), (b), (c) และ (d) จะแสดงสัญญาณในแกนความถี่ของคลื่นพาหะย่อยแต่ละสัญญาณในรูปที่ 2.5(a), (b), (c) และ (d) ตามลำดับ และในรูปที่ 2.6(e) นั้นจะแสดงสัญญาณเมื่อทำการรวมคลื่นพาหะย่อยทั้ง 4 สัญญาณเข้าด้วยกันในแกนความถี่

เซตของฟังก์ชั่นแต่ละฟังก์ชั่นนั้นจะออโธโกนอลกันก็ต่อเมื่อมีสภาวะที่เข้ากับสภาวะในสมการที่ (2.1) ถ้าฟังก์ชั่นใดๆ 2 ฟังก์ชั่นที่แตกต่างกันเมื่อนำมาคูณกันแล้วทำการอินทิเกรตในช่วงเวลาของหนึ่งสัญลักษณ์ผลที่ได้จะมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งแสดงว่า 2 ฟังก์ชั่นนั้นออโธโกนอลกัน และอีกทางหนึ่งเมื่อเรามองเครื่องรับสัญญาณที่แมตช์กับฟังก์ชั่นใดฟังก์ชั่นหนึ่ง เครื่องรับก็จะรับได้เฉพาะฟังก์ชั่นนั้น ส่วนฟังก์ชั่นอื่นเมื่อทำการอินทิเกรตแล้วจะได้ผลลัพธ์เป็นศูนย์

$$\int_0^T S_i(t)S_j(t)dt = \begin{cases} C & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \qquad (2.1)$$

สมการที่ (2.2) แสดงเซตของสัญญาณไซนูซอยด์ (sinusoid signal) ที่ออโธโกนอลกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคลื่นพาหะย่อยของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มที่ยังไม่ได้มีการมอดูเลต

$$S_k(t) = \begin{cases} \sin(2\pi k f_0 t) & 0 < t < T \quad k = 1, 2, ..., M \\ 0 & otherwise \end{cases} \qquad (2.2)$$

เมื่อ f_0 คือ ระยะห่างระหว่างคลื่นพาหะย่อย

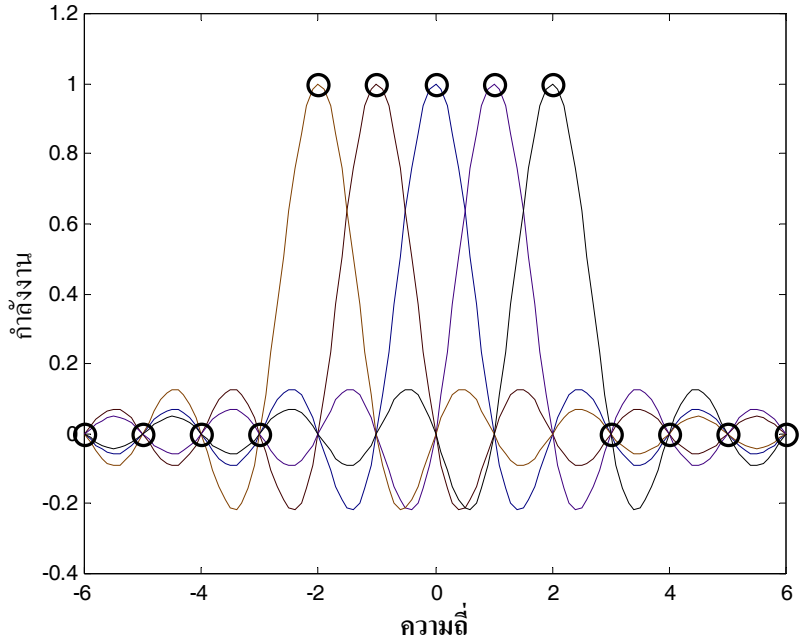
M คือ จำนวนของคลื่นพาหะย่อย

T คือ ช่วงเวลาของสัญลักษณ์หนึ่งสัญลักษณ์

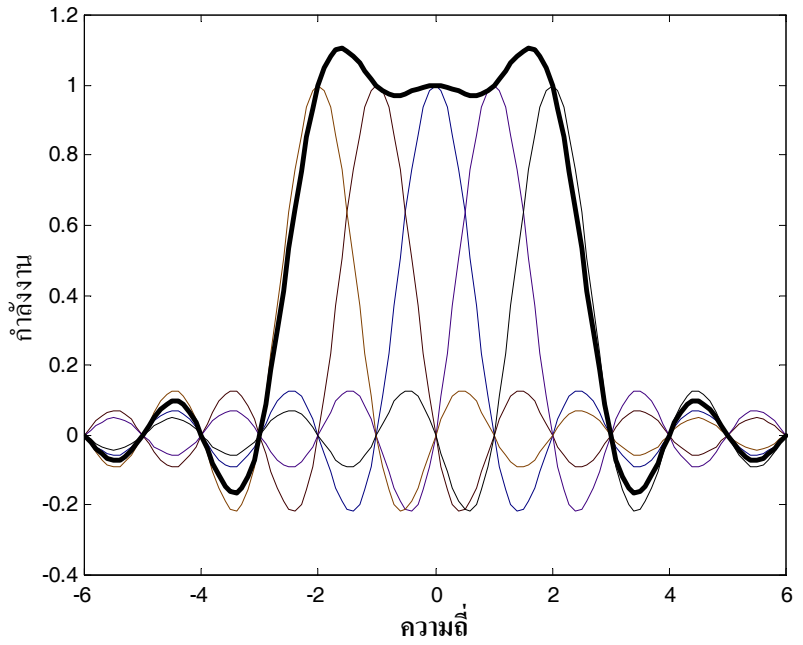
จากสมการที่ (2.2) จะเห็นได้ว่าความถี่สูงสุดของคลื่นพาหะย่อยนั้นจะมีค่าเท่ากับ Mf_0 และความกว้างของแถบความถี่ที่ใช้ในการส่งผ่านจะมีค่าเท่ากับ Mf_0 เช่นกัน

2.2.2 คุณสมบัติของการออโธโกนอลในแกนความถี่

ทางหนึ่งที่สามารถเห็นคุณสมบัติของการออโธโกนอลของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มก็คือการมองที่สเปคตรัมของสัญญาณ ในแกนความถี่นั้นแต่ละคลื่นพาหะย่อยของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มจะมีการตอบสนองความถี่ของสัญญาณลักษณะเป็นสัญญาณซิงก์ (sinc signal) แสดงในรูปที่ 2.7(ก) รูปร่างของสัญญาณซิงก์ (sinc signal) จะมีโลบหลัก (main lobe) ที่แคบและมีโลบด้านข้าง (side lobe) จำนวนมากที่มีขนาดลดลงอย่างช้าๆจากจุดกึ่งกลางของสัญญาณ แต่ละคลื่นพาหะจะมีจุดยอดที่กึ่งกลางความถี่ และมีจุดที่สัญญาณเป็นศูนย์ (null) ทุกๆจุดที่เป็นช่องว่างของความถี่ซึ่งเท่ากับระยะห่างระหว่างคลื่นพาหะ เมื่อสัญญาณแต่ละสัญญาณออโธโกนอลกันผลที่ได้ก็คือจุดยอดของสัญญาณจะมีตำแหน่งตรงกับจุดที่สัญญาณของคลื่นพาหะอื่นเป็นศูนย์ เมื่อทำการดีเทคสัญญาณโอเอฟดีเอ็มโดยใช้กระบวนการ DFT (Discrete Fourier Transform) จะได้สเปคตรัมของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องดังแสดงในรูป 2.7(ก) โดยแซมเปิลของสเปคตรัมสัญญาณที่จุด **O** แต่ละจุดในรูปจะตรงพอดีกับจุดยอดของคลื่นพาหะย่อยถ้ากระบวนการ DFT สามารถที่จะซิงโครไนซ์ (synchronize) กับสัญญาณที่รับได้ในแกนเวลา ด้วยเหตุนี้แถบความถี่ที่ซ้อนทับกันของแต่ละคลื่นพาหะย่อยจะไม่มีผลกระทบที่เครื่องรับเพราะจุดยอดของแต่ละคลื่นพาหะย่อยนั้นตรงกับจุดที่คลื่นพาหะย่อยอื่นเป็นศูนย์ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของการออโธโกนอลกันของแต่ละคลื่นพาหะย่อยนี้เอง



(ก)



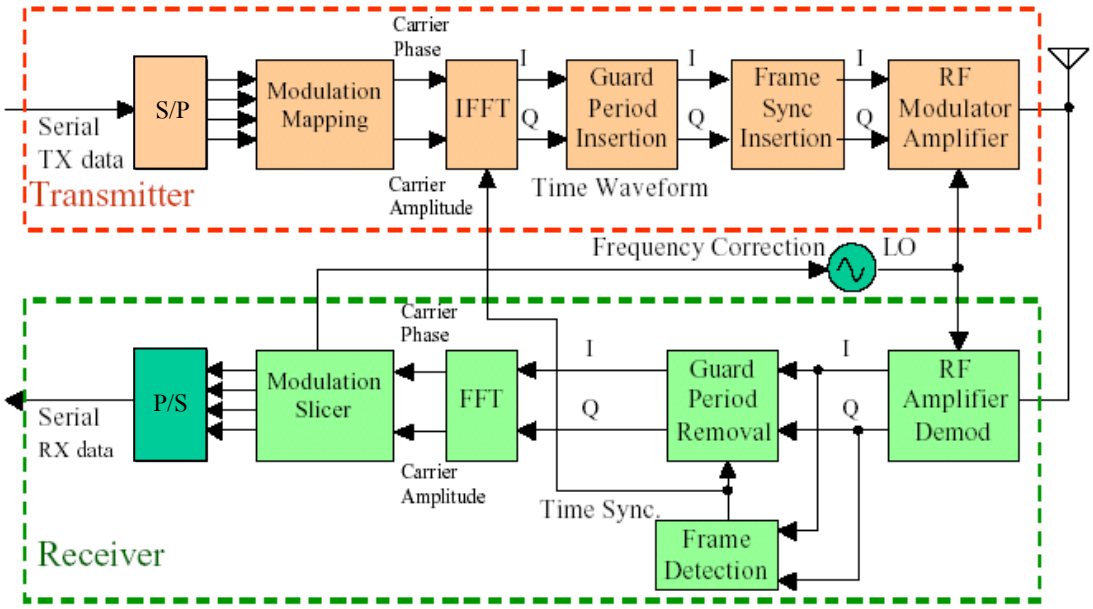
(ข)

รูปที่ 2.7 การตอบสนองความถี่ของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มในแต่ละคลื่นพาหะย่อย

ในรูปที่ 2.7(ก) แสดงสเปคตรัมของแต่ละคลื่นพาหะย่อยและแซมเปิลสัญญาณที่เครื่องรับโอเอฟดีเอ็ม จะเห็นว่าสเปคตรัมของสัญญาณจะมีรูปร่างเป็นสัญญาณซิงก์ (sinc signal) รูปที่ 2.7(ข) จะแสดงผลรวมของการตอบสนองความถี่ของคลื่นพาหะย่อยทั้ง 5 สัญญาณ

2.2.3 เครื่องรับส่งโอเอฟดีเอ็ม

สัญญาณโอเอฟดีเอ็มโดยปกติแล้วจะสร้างเป็นสัญญาณดิจิตอล (digital signal) เนื่องจากในกรณีของสัญญาณอนาลอก (analog signal) เป็นเรื่องที่ยากมากที่จะสร้างเครื่องรับหรือเครื่องส่งที่มีออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) จำนวนมากได้เพราะจะต้องใช้ออสซิลเลเตอร์จำนวนเท่ากับจำนวนของคลื่นพาหะย่อย รูปที่ 2.8 แสดงบล๊อคไดอะแกรมของเครื่องรับส่งโอเอฟดีเอ็ม ในส่วนของเครื่องส่งจะแปลงข้อมูลดิจิตอลไปเป็นคลื่นพาหะที่มีทั้งขนาดและเฟส จากนั้นก็จะแปลงสัญญาณให้อยู่ในแกนเวลา โดยใช้กระบวนการ IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) ซึ่ง IFFT เป็นกระบวนการที่เหมือนกับกระบวนการ IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform) โดยที่ IFFT จะเป็นรูปแบบที่ทำให้สามารถที่จะใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น หลังจากได้สัญญาณที่อยู่ในแกนเวลาแล้วจะทำการแปลงสัญญาณให้มีความถี่สูงขึ้นตามต้องการและเหมาะสมกับช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ



รูปที่ 2.8 บล๊อคไดอะแกรมของเครื่องรับส่งโอเอฟดีเอ็ม

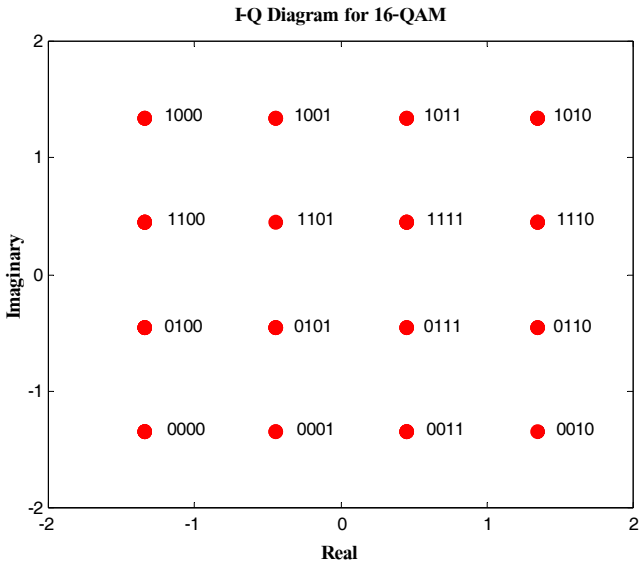
ในส่วนของเครื่องรับจะเป็นกระบวนการที่กลับกันกับทางด้านเครื่องส่งโดยสัญญาณที่รับเข้ามาจะถูกแปลงให้มีความถี่ต่ำลงอยู่ในช่วงความถี่เบสแบนด์ (baseband frequency) จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ผ่านกระบวนการ FFT (Fast Fourier Transform) จะได้สัญญาณที่อยู่ในแกนความถี่ (frequency domain signal) โดยขนาดและเฟสของสัญญาณในแต่ละคลื่นพาหะจะถูกดีเทคกลับออกมาเป็นข้อมูลดิจิตอล

2.2.4 การแปลงข้อมูลจากอนุกรมเป็นขนาน

ข้อมูลที่ส่งโดยปกติจะเป็นข้อมูลแบบอนุกรม ในระบบโอเอฟดีเอ็มแต่ละสัญลักษณ์นั้นจะสามารถส่งข้อมูลได้ 40 ถึง 400 บิตต่อหนึ่งสัญลักษณ์ ดังนั้นการแปลงข้อมูลจากอนุกรมเป็นขนานนั้นเป็นสิ่งที่จำเป็นมาก เพื่อที่จะแปลงข้อมูลที่เข้ามาแบบอนุกรมไปเป็นข้อมูลแบบขนานสำหรับส่งในแต่ละสัญลักษณ์โอเอฟดีเอ็ม (OFDM symbol) ขนาดของข้อมูลในแต่ละสัญลักษณ์จะขึ้นอยู่กับรูปแบบการมอดูเลต และจำนวนของคลื่นพาหะย่อย ตัวอย่างเช่น แต่ละคลื่นพาหะย่อยใช้การมอดูเลตแบบ 16-QAM (16-Quadrature Amplitude Modulation) ซึ่งแต่ละสัญลักษณะจะส่งข้อมูลได้ทีละ 4 บิต และถ้าส่งด้วยคลื่นพาหะย่อยจำนวน 100 คลื่นพาหะ จำนวนบิตข้อมูลที่สามารถส่งได้ในแต่ละสัญลักษณ์โอเอฟดีเอ็ม (OFDM symbol) จะเท่ากับ 400 บิตต่อสัญลักษณ์ เป็นต้น ในส่วนของทางด้านเครื่องรับเมื่อทำการดีมอดูเลตสัญญาณแล้วก็จะต้องแปลงข้อมูลจากขนานมาเป็นข้อมูลแบบอนุกรมเช่นเดียวกัน

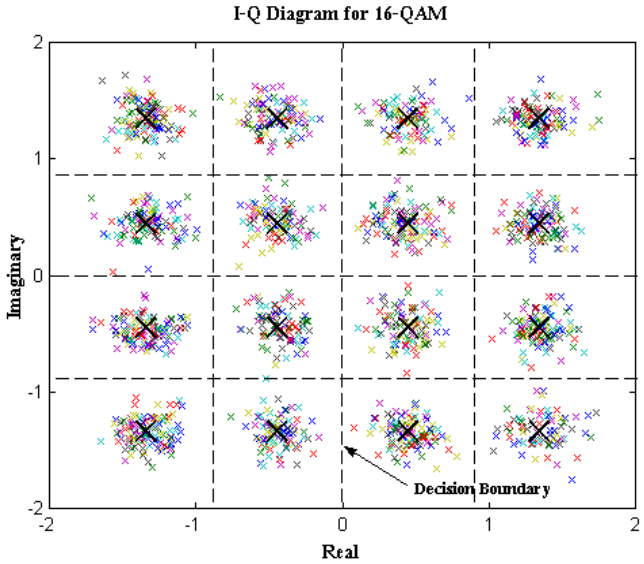
2.2.5 การมอดูเลตคลื่นพาหะย่อย

ในแต่ละคลื่นพาหะย่อยที่ใช้ในการส่งข้อมูลจะใช้การมอดูเลตในแต่ละคลื่นพาหะย่อยเป็นแบบขนาดและเฟส ซึ่งสามารถแสดงได้เป็นเวคเตอร์ I-Q ในรูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างของการมอดูเลตคลื่นพาหะแบบ 16-QAM ซึ่งแต่ละสัญลักษณ์ของการมอดูเลตแบบ 16-QAM นั้นจะสามารถส่งข้อมูลได้ 4 บิต และมีจำนวนสัญลักษณ์ 16 สัญลักษณ์ ซึ่งแต่ละสัญลักษณ์ก็จะแทนด้วยเวคเตอร์ I-Q ที่ไม่ซ้ำกัน ในการมอดูเลตของคลื่นพาหะย่อยนั้นสามารถที่จะใช้รูปแบบการมอดูเลตได้หลายรูปแบบ เช่น BPSK, QPSK, หรือ M-QAM เป็นต้น ซึ่งการมอดูเลตแต่ละวิธีจะมีความสามารถในการส่งข้อมูลต่อสัญลักษณ์ที่แตกต่างกันออกไป



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการมอดูเลตคลื่นพาหะย่อยแบบ 16-QAM

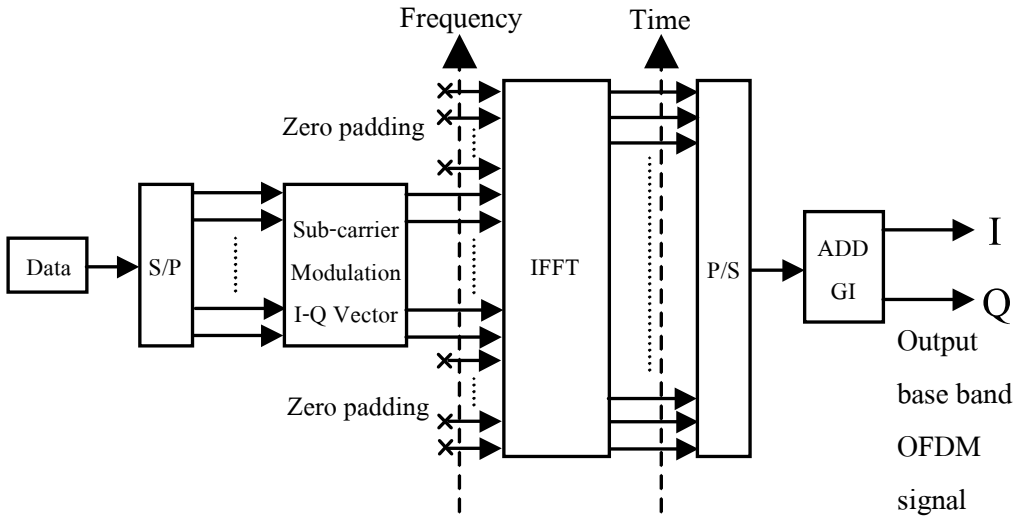
ในด้านเครื่องรับเมื่อรับสัญญาณได้ก็จะทำการดีเทคข้อมูลได้จะตำแหน่งของเวคเตอร์ I-Q ที่แตกต่างกันออกไป ในระหว่างการส่งผ่านสัญญาณไปในสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวน และเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ จะทำให้ตำแหน่งของเวคเตอร์ I-Q เกิดการแปลงเปลี่ยนดังแสดงในรูปที่ 2.10 จากรูปจะแสดงสัญญาณ 16-QAM ที่ C/N เท่ากับ 18 dB สังเกตุว่าตำแหน่งของเวคเตอร์ I-Q จะมีการกระจายที่เป็นผลมาจากสัญญาณบกวนและสภาพแวดล้อมซึ่งทำให้ความผิดพลาดในการดีเทคข้อมูล



รูปที่ 2.10 สัญญาณ 16-QAM เมื่อเกิดมีสัญญาณรบกวนเข้ามา

2.2.6 การแปลงสัญญาณในแกนความถี่ให้อยู่ในแกนเวลา

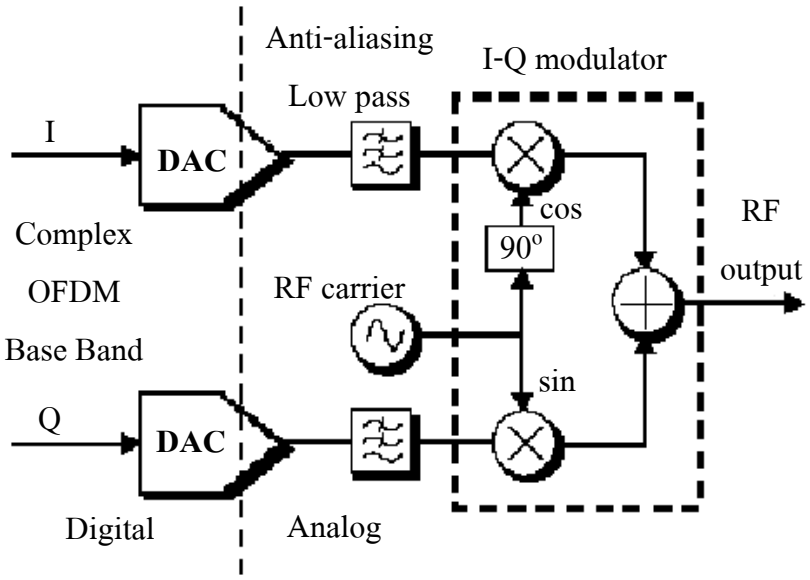
หลังจากที่ทำการมอดูเลตคลื่นพาหะย่อยโดยกำหนดขนาดและเฟสของคลื่นพาหะย่อยตาม ข้อมูลที่ส่ง โดยที่คลื่นพาหะย่อยทั้งหมดที่ไม่ได้ทำการมอดูเลตจะถูกกำหนดให้เป็นศูนย์ จากนั้นจะทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในแกนเวลาโดยกระบวนการ IFFT เพื่อที่จะใช้ในการส่งสัญญาณ รูปที่ 2.11 แสดงส่วนของกระบวนการ IFFT ของเครื่องส่งโอเอฟดีเอ็ม ในแกนความถี่สัญญาณก่อนที่ผ่านกระบวนการ IFFT แต่ละแซมเปิลของ IFFT จะต้องมีค่าตรงกันกับสัญญาณของคลื่นพาหะย่อย โดยมากคลื่นพาหะจะมอดูเลตด้วยข้อมูล ส่วนคลื่นพาหะย่อยด้านข้างจะไม่มีการมอดูเลตและถูกกำหนดขนาดให้เป็นศูนย์ คลื่นพาหะย่อยที่ถูกกำหนดขนาดเป็นศูนย์นี้จะใช้เป็นแถบความถี่ป้องกัน (frequency guard band) เพื่อป้องกันการรบกวนจากแถบความถี่ข้างเคียงและการเกิดเอเลียสซิง (aliasing) ของสัญญาณ



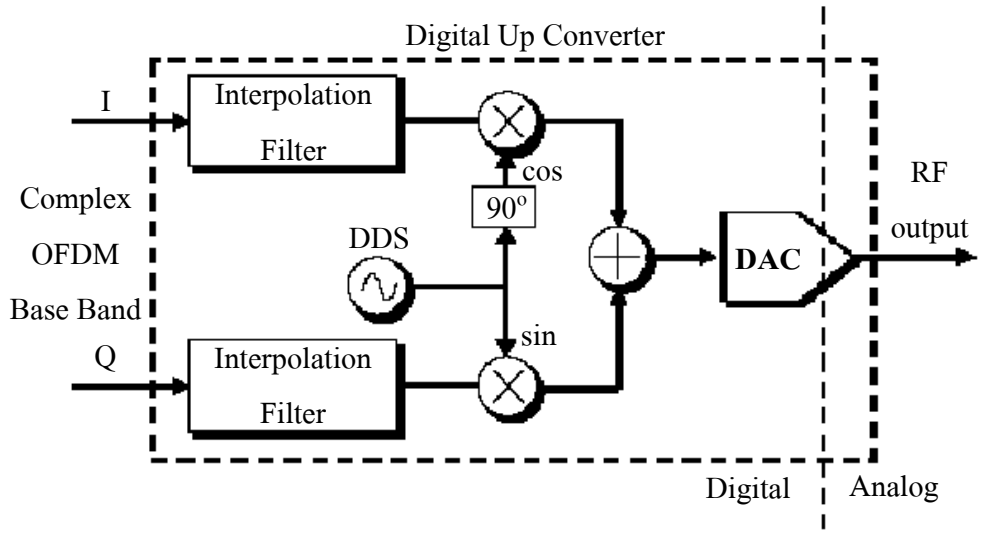
รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมในส่วนของกระบวนการ IFFT

2.2.7 การมอดูเลตสัญญาณอาร์เอฟ

สัญญาณโอเอฟดีเอ็มที่ได้นั้นจะอยู่รูปของสัญญาณเบสแบนด์ (baseband signal) ในการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณวิทยุนั้นเราจะต้องทำการผสมความถี่ให้สูงขึ้นเพื่อที่จะทำให้สามารถส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไปได้ โดยสามารถใช้เทคนิคแบบอนาลอกดังแสดงในรูปที่ 2.12 หรือเทคนิคการแปลงความถี่ให้สูงขึ้นแบบดิจิตอลดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งทั้งสองวิธีจะให้ผลการทำงานที่คล้ายกัน แต่อย่างไรก็ตามสมรรถนะของการมอดูเลตแบบดิจิตอลนั้นจะมีความแม่นยำมากกว่าแบบอนาลอก



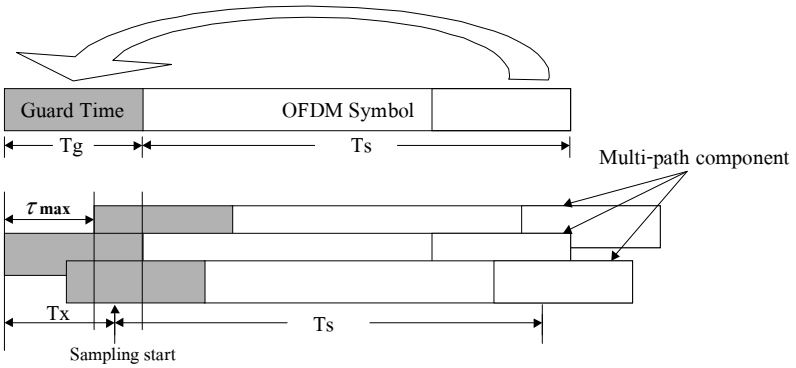
รูปที่ 2.12 การมอดูเลตสัญญาณอาร์เอฟแบบอนาลอก



รูปที่ 2.13 การมอดูเลตสัญญาณอาร์เอฟแบบดิจิตอล (DDS: Direct Digital Synthesis)

2.2.8 ช่วงเวลาป้องกัน (Guard Time)

ช่วงเวลาป้องกัน (guard time) เป็นสิ่งที่สำคัญมากในการต่อต้านการเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Inter-Symbol Interference) และการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณ (Inter-Channel Interference) ที่มีสาเหตุมาจากการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณแบบมัลติพาธเฟดดิง (multi-path fading channel) โดยการคัดลอกสัญญาณส่วนท้ายของแต่ละสัญลักษณ์มาวางไว้ที่ส่วนหน้าของสัญลักษณ์เพื่อเป็นช่วงเวลาป้องกัน (guard time) โดยที่ช่วงเวลาป้องกันนี้จะต้องมีค่ามากกว่าค่าสูงสุดของดีเลย์สเปรดของช่องสัญญาณแบบมัลติพาธ (multi-path delay spread) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การสร้างช่วงเวลาป้องกัน (guard time)

จากรูปที่ 2.14 ค่า τ_{max} คือค่าเวลาสูงสุดของดีเลย์สเปรดของช่องสัญญาณมัติพาธ (multi-path delay spread) , Ts คือช่วงเวลาของสัญลักษณ์ (symbol dulation), Tg คือค่าของช่วงเวลาป้องกัน (guard time) และ Tx คือเวลาเริ่มต้นของการสุ่ม (sampling start) โดยที่ค่าของ Tx จะต้องมีค่าอยู่ในช่วง $\tau_{max} < Tx < Tg$

2.2.9 การซิงโครไนซ์ (Synchronization)

การซิงโครไนซ์ (Synchronization) นั้นเป็นอุปสรรคที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของระบบ OFDM ที่ทำให้เครื่องรับสามารถรับข้อมูลได้อย่างถูกต้องโดยที่การซิงโครไนซ์จะประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ

1. การตรวจจับเฟรม (frame detection)
2. การประมาณค่าความถี่ออฟเซตของคลื่นพาหะและการแก้ไขให้ถูกต้อง (carrier frequency offset and correction)
3. การแก้ไขความผิดพลาดของการสุ่ม (sampling error correction)

การตรวจจับเฟรม (frame detection) ใช้สำหรับการหาจุดเชื่อมต่อของสัญญาณแต่ละสัญลักษณ์เพื่อทำให้สามารถที่จะทำการสุ่มค่าของแต่สัญลักษณ์ได้อย่างถูกต้อง

เนื่องจากความแตกต่างของความถี่คลื่นพาหะของเครื่องส่งและเครื่องรับทำให้การสุ่มสัญญาณแต่ละครั้งที่เวลา t จะประกอบด้วยค่าเฟคเตอร์ของเฟส (phase factor) ที่ไม่รู้ค่าๆหนึ่ง โดยสามารถเขียนได้เป็น $e^{j2\pi\Delta f_c t}$ โดยที่ Δf_c คือค่าของความถี่ออฟเซตของคลื่นพาหะ (carrier frequency offset) ที่ไม่รู้ค่า ฉะนั้นค่าของเฟคเตอร์ที่ไม่รู้ค่านี้จะต้องทำการประมาณค่าและชดเชยสำหรับในการสุ่มแต่ละครั้งก่อนที่จะนำสัญญาณที่ได้จากการสุ่มไปผ่านกระบวนการ FFT ไม่อย่างนั้นจะทำให้สัญญาณจะสูญเสียคุณสมบัติของการออโธโกนอล (Orthogonality) ระหว่างช่องสัญญาณย่อยๆ

2.2.10 การประมาณค่าการตอบสนองความถี่ช่องสัญญาณ

สำหรับการสื่อสารในรูปแบบของ Burst frame จะมีการใส่สัญลักษณ์ปรีเอมเบิล (preamble symbol) ไว้ที่จุดเริ่มต้นของทุกๆ Burst frame เมื่อกำหนดให้ช่องสัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา 1 Burst frame และทางด้านเครื่องรับรู้ข้อมูลที่ส่งในสัญลักษณ์ปรีเอมเบิล (preamble symbol) ดังนั้นทำให้สามารถที่จะทำการประมาณค่าการตอบสนองความถี่ช่องสัญญาณได้โดยกำหนดให้สัญญาณที่รับได้เมื่อผ่านกระบวนการ FFT สามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2.3)

$$Y(k) = H(k)a(k) + N(k) \tag{2.3}$$

โดยที่ k คือจำนวนช่องสัญญาณย่อย

$Y(k)$ คือสัญญาณที่รับได้

$H(k)$ คือค่าการตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ

$a(k)$ คือสัญญาณข้อมูลที่อยู่ในสัญลักษณ์ปรีเอมเบิล (preamble symbol)

$N(k)$ คือสัญญาณรบกวน

เมื่อเครื่องรับรู้ค่าของ $a(k)$ ดังนั้นจะสามารถทำการประมาณค่าการตอบสนองความถี่ช่องสัญญาณ (Channel Frequency Response) ได้อย่างง่ายตามสมการที่ (2.4)

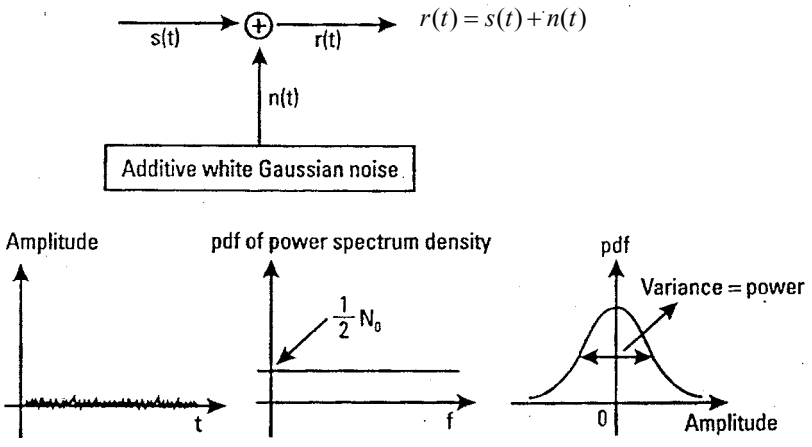
$$\hat{H}(k) = \frac{Y(k)}{a(k)} \tag{2.4}$$

จากสมการที่ (2.4) เมื่อ $\hat{H}(k)$ คือการตอบสนองความถี่ช่องสัญญาณที่ได้จากการประมาณค่า ในกรณีที่ปราศจากสัญญาณรบกวนนั้นจะสามารถที่จะทำการประมาณค่าได้อย่างถูกต้องแต่ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนเข้ามาด้วยนั้นก็อาจจะทำให้การประมาณค่าผิดพลาดได้

2.3 สัญญาณรบกวนแบบขาวบวก

จากรูปที่ 2.15 สัญญาณรบกวนในระบบการสื่อสารนั้นส่วนมากจะจำลองให้เป็นสัญญาณรบกวนแบบขาวบวก (AWGN: Additive White Gaussian Noise) ซึ่งจะมีความหนาแน่นของสเปคตรัมเป็นแบบยูนิฟอร์ม (uniform spectrum density) และแอมปลิจูดมีการแจกแจงแบบเกาส์ (Gaussian distribution) โดยปกติแล้วสัญญาณรบกวนทางอุณหภูมิ (thermal noise) และสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (electrical noise) ที่เกิดจากการขยายสัญญาณนั้นจะมีคุณสมบัติของ White Guassian Noise ซึ่งจากคุณสมดังกล่าวสามารถจำลองให้เป็นสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ได้ ซึ่งฟังก์ความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density function) ของสัญญาณรบกวนแบบ AWGN สามารถแสดงได้ตามสมการที่ (2.5)

$$\Phi_{nn}(f) = \frac{1}{2}N_0 \tag{2.5}$$



รูปที่ 2.15 คุณสมบัติของสัญญาณรบกวนแบบขาวบวก

2.4 วงจรขยายแบบไม่เป็นเชิงเส้น

ในปัจจุบันระบบโอเอฟดีเอ็มได้รับความสนใจเป็นอย่างมาสำหรับการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้าง (Broadband) ซึ่งวงจรขยายเป็นส่วนที่จำเป็นสำหรับทางด้านเครื่องส่ง ดังนั้นจึงเป็นไปได้ยากที่จะหาวงจรขยายที่มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น(linear) ตลอดย่านความถี่ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากวงจรขยายแบบไม่เป็นเชิงเส้นนี้จะเกิดสัญญาณรบกวนได้ทั้งขนาดและเฟสของสัญญาณ วงจรขยายสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆด้วยกันคือ วงจรขยายที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ (SSPA: Solid State Power Amplifier) และวงจรขยายที่เป็นแบบหลอดสูญญากาศ (TWTA: Traveling Wave Tube Amplifier) วงจรขยายทั้งสองแบบนี้สามารถที่จะอธิบายคุณสมบัติของวงจรขยายแต่ละตัวที่กล่าวข้างต้นด้วยสมการ ดังจะอธิบายดังแต่ไปนี้

กำหนดจุดการทำงานของวงจรขยาย IBO ซึ่งสามารถแสดงดังสมการได้ดังนี้

$$IBO = 10\log\frac{P_{in}}{P_o} \tag{2.6}$$

เมื่อ P_{in} เป็นพลังงานเฉลี่ยของสัญญาณอินพุทของวงจรขยายแบบไม่เป็นเชิงเส้น และ P_o เป็นพลังงานเฉลี่ยของสัญญาณเอาท์พุทของวงจรขยายแบบไม่เป็นเชิงเส้น

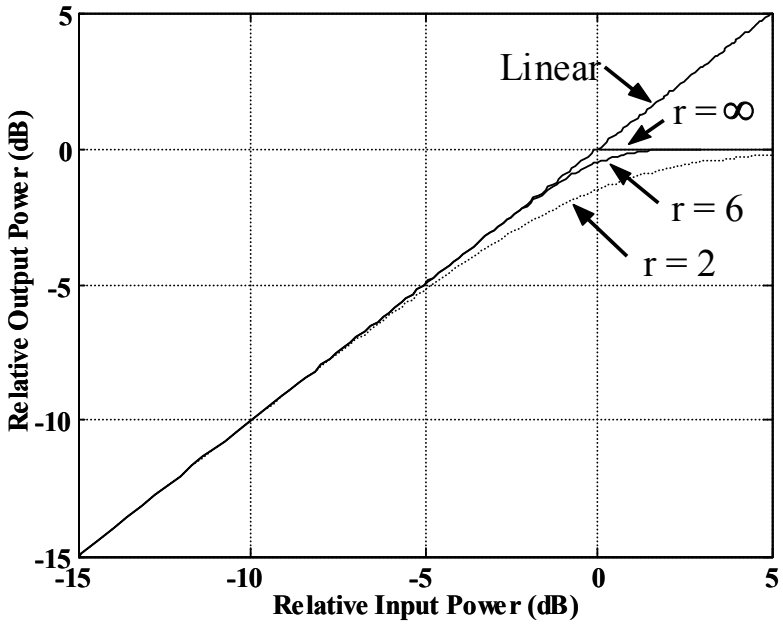
2.4.1 Solid State Power Amplifier (SSPA)

คุณสมบัติของวงจรขยายแบบไม่เป็นเชิงเส้นชนิดสารกึ่งตัวนำ (SSPA) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการของเรพพ์ (Rapp)ในสมการที่ 2.5 และ 2.6 ดังจะเห็นได้จากเอกสารอ้างอิง โดยสมการจะแยกออกเป็นอธิบายคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงทางด้านแอมปลิจูด (amplitude) และ เฟส (phase) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากวงจรขยายทั้งสองส่วนนี้อธิบายในรูปของการเปลี่ยนของแอมปลิจูดของสัญญาณทางด้านเอาท์พุท(output) ที่เกิดจากแอมปลิจูดของสัญญาณทางด้านอินพุท (input) หรือใช้ตัวย่อเป็น AM/AM และอธิบายในรูปของการเปลี่ยนแปลงของเฟสของสัญญาณเอาท์พุทที่เกิดจากแอมปลิจูดของสัญญาณทางด้านอินพุท (input) หรือใช้ตัวย่อเป็น AM/PM จากสมการของเรพพ์สามารถอธิบายการเปลี่ยนของทั้งแอมปลิจูดและเฟสได้ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

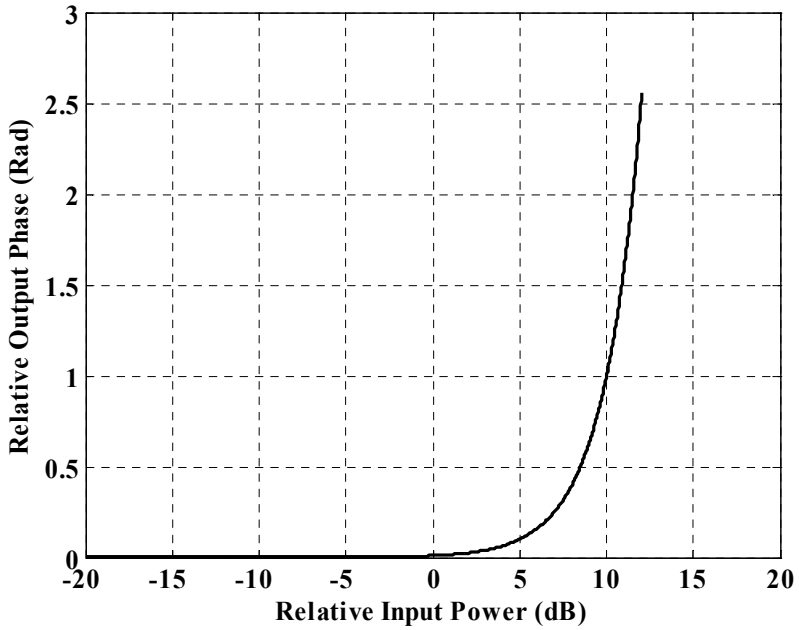
$$F_S(\rho) = \frac{v\rho}{[1+(\frac{v\rho}{A_0})^{2p}]^{1/2p}} \tag{2.7}$$

$$\Phi_S(\rho) = \alpha_\phi\left(\frac{v\rho}{A_0}\right)^4 \tag{2.8}$$

เมื่อ ρ เป็นฟังก์ชั่นของสัญญาณอินพุท A_0 เป็นระดับของสถานะเอ้าท์พุทและ p เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของความไม่เป็นเชิงเส้นและ v α_ϕ เป็นค่าคงที่



(a) AM/AM



(b) AM/PM

รูปที่ 2.16 คุณสมบัติของวงจรขยายแบบไม่เป็นเชิงเส้น SSPA

2.5 อีควอไลเซชัน (Equalization)

2.5.1 อีควอไลเซชัน

การส่งผ่านสัญญาณในระบบสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบดิจิทัลมีปัญหาสำคัญคือ Intersymbol Interference (ISI) ซึ่งเกิดจากผลกระทบของมัลติพาท (multipath) ที่เกิดขึ้นภายในสัญญาณที่สัญญาณส่งผ่าน ผลกระทบของ ISI ทำให้สัญญาณที่ส่งผ่านมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไป และ

มีผลทำให้เกิดความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่ได้รับที่ภาครับหลังจากผ่านกระบวนการดึงสัญญาณคืนกลับมา วิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการจัดการกับปัญหา ISI นี้ก็คือการใช้วงจร อีควอไลเซอร์ (equalizer) ไปติดตั้งที่ภาครับสัญญาณ วงจรอีควอไลเซอร์มีหน้าที่ปรับแก้รูปสัญญาณให้มีคุณลักษณ์ที่ดีขึ้นเพื่อให้การดึงสัญญาณเดิมกลับคืนมามีความถูกต้องมากขึ้นเนื่องจากคุณลักษณ์ของช่องสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จะต้องสามารถปรับตัวได้ (adaptive) นั่นคือคุณสมบัติหรือพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรต้องสามารถเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพของช่องสัญญาณที่มักจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ดังนั้นจึงเรียกวงจรดังกล่าวว่าวงจรอีครอไลเซอร์แบบปรับตัวได้ (adaptive equalizer)

หลักการทำงานของวงจรอีครอไลเซอร์แบบปรับตัวได้ จะแบ่งการส่งสัญญาณออกเป็น 2 ช่วงสลับกันไปตลอด ในช่วงแรกภาคส่งจะส่งชุดบิตที่เรียกว่า ชุดลำดับการฝึก (training sequence) ไปให้ภาครับ ซึ่งรูปแบบของชุดบิตที่ว่านี้ภาครับจะทราบค่าอยู่ล่วงหน้าแล้ว ชุดบิตเหล่านี้อาจจะมีรูปแบบตายตัวหรืออาจจะเป็น pseudorandom binary ก็ได้ ในช่วงที่ภาครับได้รับชุดบิตดังกล่าวภาครับจะทำการคำนวณและปรับค่าสัมประสิทธิ์ของฟิลเตอร์ในวงจรอีควอไลเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับจัดการกับสภาพของช่องสัญญาณในขณะนั้น เมื่อภาคส่งสิ้นสุดการส่งชุดลำดับการฝึกก็จะเข้าสู่ช่วงที่สอง ซึ่งเป็นช่วงที่ภาคส่งจะทำการส่งบิตข้อมูลของผู้ใช้ตามไป ในช่วงนี้ภาครับจะใช้อีควอไลเซอร์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้คำนวณไว้มาใช้ในการดึงสัญญาณข้อมูลกลับมาเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากที่สุด จะเห็นว่าคุณลักษณะของวงจรอีควอไลเซอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพของช่องสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่ง มักจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและสามารถจัดการกับปัญหาของ ISI ได้อย่างมีประสิทธิภาพจากกลไกลการทำงานของอีควอไลเซอร์ในลักษณะนี้ จึงเป็นวิธีการที่มีประโยชน์อย่างมากในระบบ TDMA (Time Division Multiple Access) ซึ่งมีการจัดแบ่งเวลาการส่งสัญญาณออกเป็นบล็อกที่ชัดเจน โดยระบบจะส่งชุดลำดับการฝึกสลับกับการส่งบิตข้อมูลของผู้ใช้

2.5.2 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรอีควอไลเซอร์

วงจรอีควอไลเซอร์ประกอบด้วยอุปกรณ์หน่วงเวลาจำนวน N ชุด วงจรคูณสัญญาณจำนวน N+1 ชุด และวงจรบวกสัญญาณ รูปที่ 7.1 แสดงโครงสร้างการทำงานของวงจรอีควอไลเซอร์ในช่วงเวลาที่อยู่ระหว่างการปรับค่าสัมประสิทธิ์การคูณ (weights) ที่ขาเข้าของวงจรจะมีสัญญาณ y_k ค่าใหม่เข้าทุกๆช่วงเวลา ค่าของ y_k นี้มีขนาดที่ไม่แน่นอนเพราะแปรเปลี่ยนไปตามสภาพของช่องสัญญาณและปริมาณของสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณในขณะนั้นๆ ดังนั้นจึงกล่าวว่า y_k เป็นกระบวนการแรนดอม (random process) โครงสร้างของวงจรที่ต่อเชื่อมในลักษณะนี้ชื่อเรียกว่า transversal filter ค่าสัมประสิทธิ์ของการคูณสัญญาณ w แต่ละตัวจะมีตัวแปรเวลา k ห้อยอยู่ด้วย เพื่อบ่งบอกว่าค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้แปรเปลี่ยนตามเวลาในช่วงที่ระบบกำลังหาค่าที่เหมาะสมค่า w เหล่านี้อาจจะมีการปรับเปลี่ยนในทุกๆ ครั้งที่มีการเพิ่มขึ้นของค่า k หรืออาจจะเปลี่ยนหลังจากที่มีข้อมูลขาเข้าจำนวนหนึ่งบล็อก

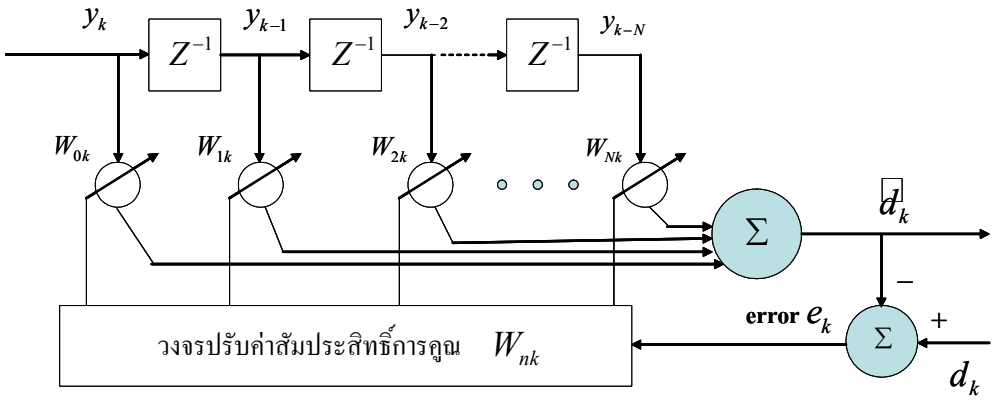
กรรมวิธีหรืออัลกอริทึมในการปรับค่าสัมประสิทธิ์จะขึ้นอยู่กับค่า e_k เป็นสำคัญ โดย e_k คือผลต่างที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่า d_k กับค่า $\hat{d}_k$ ซึ่งโดยทั่วไปอัลกอริทึมที่ใช้ก็จะพยายามปรับสัมประสิทธิ์การคูณในทิศทางที่ทำให้ค่าฟังก์ชันต้นทุน (cost function) ที่สนใจมีขนาดลดต่ำลงเรื่อยๆค่าฟังก์ชันต้นทุนที่นิยมใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์แบบหนึ่งก็คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาด (Mean Square Error: MSE) ระหว่างค่าของสัญญาณที่ต้องการกับค่าของสัญญาณที่ได้จากวงจรอีควอไลเซอร์ สำหรับตัวอย่างอัลกอริทึมชนิดหนึ่งที่ใช้งานทั่วไปในการคำนวณและปรับค่าสัมประสิทธิ์ คือ กรรมวิธี Least Mean Squares (LMS) โดยในการคำนวณและปรับค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมจะอาศัยสมการต่อไปนี้

New weights = Previous weights+(constant)x(Previous error)x(Current input) (2.9)

โดย

Previous error = Previous desired output – Previous actual output (2.10)

สำหรับค่าคงที่ (constant) ที่ใช้นั้นสามารถที่จะปรับเปลี่ยนไปได้ในการคำนวณแต่รอบเพื่อควบคุมอัตราการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ให้เหมาะสม การคำนวณปรับค่าสัมประสิทธ์ของการคูณจะทำซ้ำไปเรื่อยๆหลายรอบจนกระทั้งค่าสัมประสิทธิ์เริ่มจะอยู่ตัวและเข้าใกล้ค่าที่ดีที่สุด เมื่อเราได้ค่าที่เหมาะสมแล้วกระบวนการปรับค่าสัมประสิทธิ์ก็จะหยุดลงช่วงเวลาถัดมาก็จะใช้ในการรับส่งบิตข้อมูลของผู้ใช้ ในช่วงเวลานี้จะใช้ชุดสัมประสิทธิ์ที่หาได้ไปจนกระทั่งมีความจำเป็นที่จะต้องปรับค่าสัมประสิทธิ์ใหม่อีกครั้ง



รูปที่ 2.17 โครงสร้างพื้นฐานวงจรอีควอไลเซอร์ในช่วงเวลาที่มีการปรับชุดสัมประสิทธิ์การคูณ

จากโครงสร้างของวงจรอีควอไลเซอร์ในรูปที่แสดง เราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมได้โดยวิธีการต่อไปนี้

กำหนดให้เวกเตอร์ y_k แทนสัญญาณขาเข้าของวงจรอีควอไลเซอร์

$$y_k = [y_k y_{k-1} y_{k-2} \cdots y_{k-N}]^T \tag{2.11}$$

และให้เวกเตอร์ W_k แทนสัมประสิทธิ์การคูณของวงจรอีควอไลเซอร์

$$W_k = [W_{0k} W_{1k} W_{2k} \ldots W_{Nk}]^T \tag{2.12}$$

เราสามารถแสดงสัญญาณที่ขาออกซึ่งมีค่าเท่ากับ $\hat{d}_k = \sum_{n=0}^{N} W_{nk} y_{k-n}$ ในรูปของเวกเตอร์ได้เป็น

$$\hat{d}_k = y_k^T W_k = W_k^T y_k \tag{2.13}$$

ในช่วงที่วงจรทราบค่าของชุดข้อมูล d_k (desired response) ค่าความแตกต่างหรือความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ

$$e_k = d_k - \hat{d}_k \tag{2.14}$$

จากนั้นจะได้

$$e_k = d_k - y_k^T W_k = d_k - W_k^T y_k \tag{2.15}$$

$$|e_k|^2 = d_k^2 + W_k^T y_k y_k^T W_k - 2 d_k y_k^T W_k \tag{2.16}$$

เมื่อหาค่าเฉลี่ยเอนเซมเบิลของสมการจะได้

$$p = E[d_k y_k] = E[d_k y_k d_k y_{k-1} d_k y_{k-2} \ldots d_k y_{k-N}]^T \tag{2.17}$$

และกำหนดให้เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของขาเข้า (input correlation matrix) ที่ขนาดเท่ากับ (N+1)×(N+1) หรือบางทีจะเรียกว่า โคแวเรียนซ์เมทริกซ์ของขาเข้า (input covariance matrix)

$$R = E[y_k y_k^T] \tag{2.18}$$

ถ้าหาก x_k และ y_k มีคุณลักษณะที่เป็นสเตชันเนรี (stationary) จะเห็นได้ว่าใน p และ R จะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จากสมการข้างต้นจะได้ว่า

$$MSE = \xi = E[d_k^2] + W^T R W - 2 p^2 W \tag{2.19}$$

จากสมการนี้จะหาค่าเวกเตอร์ W ที่ทำให้ค่า Mean Square Error ที่มีขนาดต่ำที่สุด (mimimum MSE หรือ MMSE) ได้โดยการหาค่าเกรเดียนต์ของ ξ

$$\nabla = \frac{\partial \xi}{\partial W} = \left[\frac{\partial \xi}{\partial W_0} \frac{\partial \xi}{\partial W_1} \ldots \frac{\partial \xi}{\partial W_N} \right]^T \tag{2.20}$$

เมื่อหาอนุพันธ์ของ ξ โดยเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การคูณแต่ละค่าจนครบจะได้

$$\nabla = 2RW - 2p \tag{2.21}$$

กำหนดให้ค่า $\nabla = 0$ เพื่อหาค่าที่ต่ำที่สุดของ MSE ผลลัพธ์ได้เป็นชุดสัมประสิทธิ์ $\hat{W}$ ที่เหมาะสม

$$\hat{W} = R^{-1} p \tag{2.22}$$

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณและแทนค่าจะได้เป็นดังนี้

$$MMSE = \xi_{\min} = E[d_k^2] - p^T R^{-1} p = E[d_k^2] - p^T \hat{W} \tag{2.23}$$