

การส่งผ่านข่าวสารอนาลอก (Analog Transmission)

Analog transmission is a method of conveying information using a continuous signal which varies in attribute in proportion to that of a variable.

การส่งผ่านข้อมูลข่าวสารด้วยระบบดิจิทัล เป็นวิธีที่มีจุดเด่นหลายประการ อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยที่สำคัญของการส่งผ่านวิธีนี้ได้แก่ จำเป็นต้องใช้ตัวกลางประเภท Low – Pass ซึ่งมี Bandwidth กว้างมาก ซึ่งหากทรัพยากรด้าน Bandwidth มีจำกัด การส่งผ่านด้วยระบบอนาลอก ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสัญญาณ Band – Pass ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ

กระบวนการแปลงสัญญาณดิจิทัล (Low – Pass) ให้เป็นอนาลอก (Band – Pass) เรียกว่า การผสมสัญญาณ (Modulation) ในบทนี้จะกล่าวถึง วิธีการผสมสัญญาณของข้อมูลเลขฐานสอง อุปกรณ์ในการผสมสัญญาณ และ การผสมสัญญาณของสัญญาณอนาลอก ประเภท Low - Pass

การผสมสัญญาณด้วยข้อมูลดิจิทัล

การผสมสัญญาณของข้อมูลเลขฐานสอง หรือ Digital-to-Analog Modulation คือการเปลี่ยน **คุณสมบัติ** ของสัญญาณอนาลอก (สัญญาณพาหะ) ตามข่าวสารที่ปรากฏในสัญญาณดิจิทัล (ตามข้อมูลเลขฐานสอง)

เหตุผลที่ต้องมีการทำการผสมสัญญาณของข้อมูลเลขฐานสอง ที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

- ส่วนของสัญญาณดิจิทัล ที่มีนัยสำคัญอยู่ในย่านความถี่ต่ำ มีพลังงานน้อย ไม่สามารถส่งได้ไกลเท่ากับสัญญาณอนาลอก ที่มีปริมาณข่าวสารเท่ากัน
- สัญญาณดิจิทัล มีแถบความถี่ช่วงกว้างมาก (เป็นอนันต์ในทางทฤษฎี) ไม่สามารถผ่านไปในตัวกลางได้ทั้งหมด ซึ่งอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดทางด้านรับได้
- ระบบทวนสัญญาณด้วยอนาลอก สามารถออกแบบได้ง่ายกว่า
- ความถี่สัญญาณอนาลอก ที่ใช้ในการ Modulation ไม่มีเงื่อนไขขอบเขตบน ดังนั้น ยิ่งมีความถี่สูงเท่าไร ก็สามารถออกแบบสายอากาศที่มีขนาดเล็กลงได้มากเท่านั้น (มีข้อจำกัดทางเทคโนโลยีของอุปกรณ์)

จากนิยามของการผสมสัญญาณดังกล่าวข้างต้น เราเรียกสัญญาณอนาลอก ว่าสัญญาณพาหะ (Carrier Signal) ซึ่งจะต้อง **มีความถี่สูงกว่า** อัตราการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลเลขฐานสอง ในสัญญาณดิจิทัล จากสมการของ Simple Signal $s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$ องค์ประกอบ (Characteristics) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ คือ ขนาด (A) ความถี่ (f) เฟส (ϕ) หรือ ทั้งขนาดและเฟส โดยเรียกรวมการผสมสัญญาณ ซึ่งเปลี่ยนองค์ประกอบเหล่านี้ว่า ASK FSK PSK หรือ QAM ตามลำดับ ซึ่งจะได้อธิบายถึง รายละเอียดการผสมสัญญาณแต่ละวิธีต่อไป

นิยามของอัตราบิตและอัตราบอด

ในบริบทของการผสมสัญญาณมักจะมีการกล่าวถึงบิต (Bit) และบอด (Baud) อยู่เสมอ นิยามต่อไปนี้เปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่างตัวแปรทั้งสอง

อัตราบิต (Bit Rate) คือ จำนวนของ Bits ข้อมูลที่ส่งได้ใน 1 หน่วยเวลา (1 วินาที)

อัตราบอด (Baud Rate) คือ จำนวนของสัญลักษณ์ (Symbols หรือ Signal Units) ที่ส่งได้ใน 1 หน่วยเวลา (1 วินาที) โดยที่ สัญลักษณ์แต่ละหน่วย สามารถใช้นำเสนอข้อมูลได้ตั้งแต่ 1 บิตขึ้นไป ในการสื่อสารมักใช้ Baud Rate เป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพในการถ่ายโอนข้อมูลระหว่างจุดสองจุด และพิจารณา Bandwidth ที่จำเป็นในการส่งสัญญาณ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองตัว ขึ้นอยู่กับ จำนวนของบิตต่อสัญลักษณ์ ดังต่อไปนี้

ความสัมพันธ์ระหว่าง Bit Rate และ Baud Rate

$$\text{Baud Rate} = (\text{Bit Rate}) / (\text{Number of Bits per Signal Unit}) \quad (\text{Bauds})$$

$$\text{Bit Rate} = (\text{Baud Rate}) \times (\text{Number of Bits per Signal Unit}) \quad (\text{Bits per Second})$$



เพื่อให้เข้าใจมากขึ้น อาจเปรียบเทียบการสื่อสารกับการขนส่ง โดยสมมติให้ Baud คือรถโดยสาร และ Bit คือผู้โดยสาร เนื่องจากรถ 1 คันบรรทุกผู้โดยสารได้หลายคน เช่น ถ้ารถ 1 คันบรรทุกได้ 1 คน รถ 1000 คัน จะบรรทุกได้ 1000 คน แต่ถ้ารถ 1 คันบรรทุกได้ 4 คน รถ 1000 คัน จะบรรทุกได้ 4000 คน ปริมาณการจราจรขึ้นอยู่กับ **จำนวนรถ** ไม่ใช่ **จำนวนผู้โดยสาร** ขนาดของถนนจึงขึ้นอยู่กับ จำนวนรถ เท่านั้น ดังนั้น Bandwidth ของการสื่อสารจึงขึ้นอยู่กับ Baud Rate

Amplitude Shift Keying (ASK)

ASK คือการเปลี่ยนความสูง (ระดับ) ของสัญญาณ ตามบิตข้อมูล เช่น ระดับ A0 เมื่อข้อมูลเป็น 0 (ถ้า A0 = 0 เรียกว่า On/Off Keying - OOK) และ ระดับ A1 เมื่อข้อมูลเป็น 1 ตามสมการ

$$\text{ASK}(t) = \begin{cases} A_0 \sin(2\pi ft + \phi) & , \text{data}(t) = 0 \\ A_1 \sin(2\pi ft + \phi) & , \text{data}(t) = 1 \end{cases}$$

$$\text{OOK}(t) = \begin{cases} 0 & , \text{data}(t) = 0 \\ A_1 \sin(2\pi ft + \phi) & , \text{data}(t) = 1 \end{cases}$$

จุดเด่นของ ASK คือสามารถออกแบบได้ง่าย เนื่องจากเป็นการคูณกันของฟังก์ชัน 2 ชนิด ดังสมการด้านล่าง ทำให้การคำนวณคุณสมบัติไม่ซับซ้อน

จุดด้อยของ ASK คือ มีภูมิต้านทานต่อสัญญาณรบกวนต่ำ อาจเกิดความผิดพลาดในการสื่อสารได้ง่าย

ASK พบที่ใช้งานในอุปกรณ์ผสมสัญญาณความเร็วต่ำ (< 1200 Bauds) และการส่งข้อมูลด้วย LED

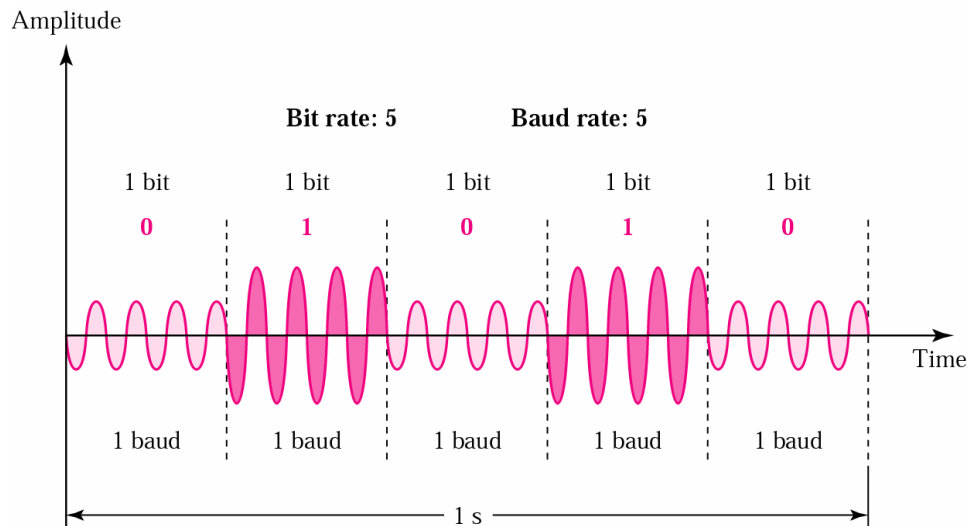


FIGURE 5.1 การผสมสัญญาณของข้อมูล 01010 ด้วยวิธีการ Amplitude Shift Keying ในกรณีนี้ Bit Rate เท่ากับ Baud Rate

แถบความถี่ (Bandwidth) ของการผสมสัญญาณแบบ ASK สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$BW_{ASK} = \left(1 + \frac{A_1 - A_0}{A_1 + A_0}\right) \times N_{baud} = (1 + d) \times N_{baud}$$

โดยที่ d คือ Modulating Factor ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

- ถ้าค่า d น้อย (A_1 ต่างจาก A_0 น้อย) แล้ว Bandwidth จะแคบ และสัญญาณมีโอกาสเสียหายจาก Noise สูง
- ถ้าค่า d มาก (A_1 ต่างจาก A_0 มาก) แล้ว Bandwidth จะกว้าง และสัญญาณมีโอกาสเสียหายจาก Noise ต่ำ

Bandwidth ของการผสมสัญญาณแบบ ASK ด้วยความถี่ของสัญญาณพาหะ f_c และอัตรา Baud N_{baud} มีความถี่อยู่ในช่วง $f_c \pm (N_{baud}/2)$ ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.2

Frequency Shift Keying (FSK)

FSK คือการเปลี่ยน ความถี่ ของสัญญาณพาหะ ตามบิตข้อมูล เช่น ความถี่ f_{c0} เมื่อข้อมูลเป็น 0 ความถี่ f_{c1} เมื่อข้อมูลเป็น 1 ตามสมการ

$$FSK(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi f_{c0}t + \phi) & , data(t) = 0 \\ A \sin(2\pi f_{c1}t + \phi) & , data(t) = 1 \end{cases}$$

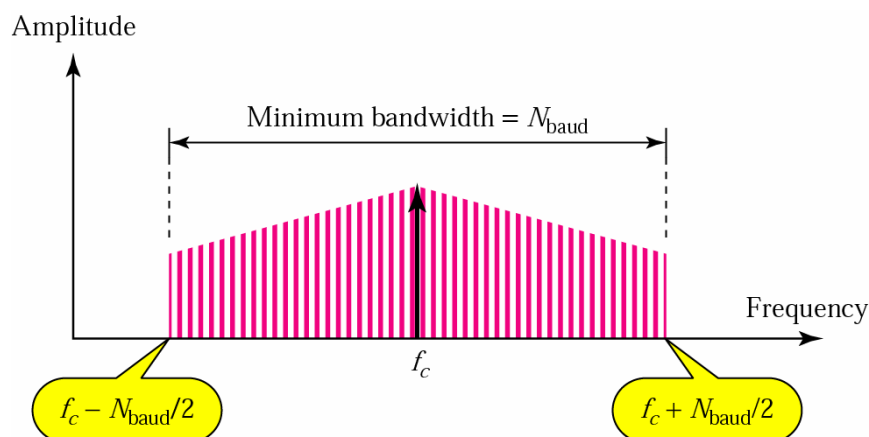


FIGURE 5.2 Spectrum ของสัญญาณ ASK ที่มีความถี่ของสัญญาณพาหะ f_c และอัตราเร็วของข้อมูล Baud (N_{baud})

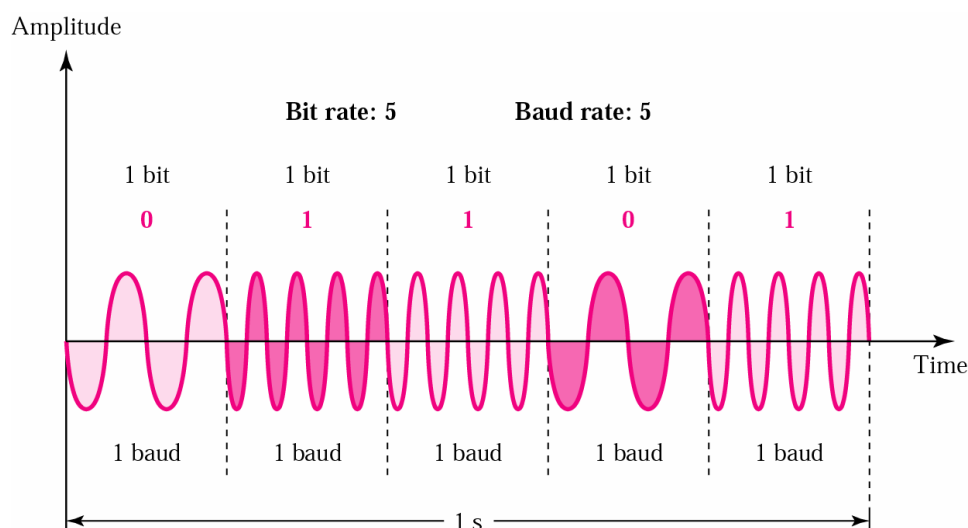


FIGURE 5.3 การผสมสัญญาณของข้อมูล 01101 ด้วยวิธีการ Frequency Shift Keying ในกรณีนี้ Bit Rate เท่ากับ Baud Rate

จุดเด่นของ FSK คือ มีภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าวิธี Modulation แบบ ASK เนื่องจากอุปกรณ์ได้รับ มองหา ความถี่เฉพาะ ที่อยู่ในช่วงเวลาหนึ่งๆ โดยไม่สนใจ Noise กระชากระยะสั้น (Transient Noise)

จุดด้อยของ FSK คือ ต้องการ Bandwidth กว้างกว่าวิธี Modulation แบบ ASK เมื่อส่งข้อมูลที่มี Baud Rate เท่ากัน

แถบความถี่ของ FSK สามารถหาได้จาก ผลรวม ระหว่าง ความแตกต่างของความถี่พาหะ และ อัตราเร็วของข้อมูล ดังสมการ

$$BW_{FSK} = (f_{c1} - f_{c0}) + N_{baud}$$

เมื่อ N_{baud} คืออัตราเร็วของข้อมูล และ f_{c1} และ f_{c0} คือความถี่สูงสุด และต่ำสุดตามลำดับ ดังรูป

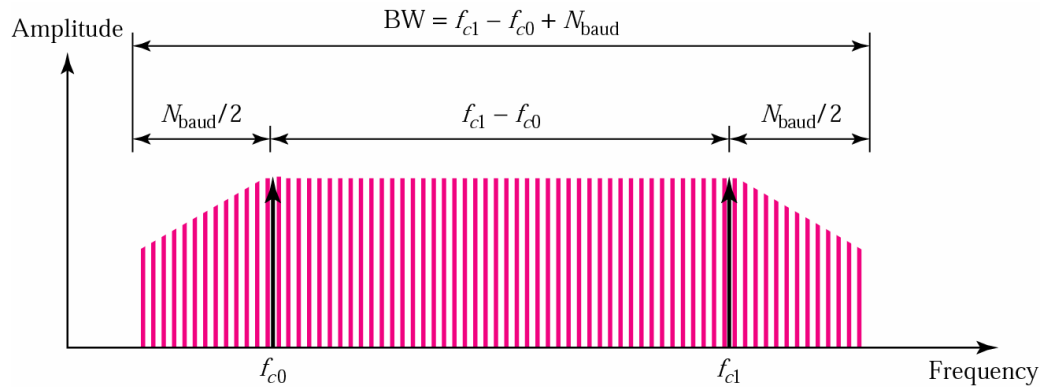


FIGURE 5.4 Spectrum ของสัญญาณ FSK ที่มีความถี่ของสัญญาณพาหะ f_{c0} และ f_{c1} และอัตราเร็วของข้อมูล Baud (N_{baud})

Phase Shift Keying (PSK)

PSK คือการเปลี่ยน เฟส (ตำแหน่งเริ่มต้น) ของสัญญาณพาหะ ตามบิตข้อมูล เช่น เฟส ϕ_0 เมื่อข้อมูล เป็น 0 เฟส ϕ_1 เมื่อข้อมูลเป็น 1 ดังสมการ

$$PSK(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi f_c t + \phi_0) & , data(t) = 0 \\ A \sin(2\pi f_c t + \phi_1) & , data(t) = 1 \end{cases}$$

จุดเด่นของ PSK คือสามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวนมากกว่า ASK ในขณะที่ใช้แถบความถี่แคบกว่า FSK และ นอกจากนี้ยังสามารถแทนสัญลักษณ์ได้มากกว่า 1 บิตต่อหน่วยสัญญาณ

จุดด้อยของ PSK คือ การออกแบบเครื่องรับ/ส่ง และวิเคราะห์ ทำได้ยากกว่า ASK และ FSK

PSK Characteristics (Constellation Diagram)

การผสมสัญญาณแบบ PSK ในรูปแบบต่างๆ สามารถแสดงโดยแผนผัง Constellation ซึ่งบอก ตำแหน่ง Phase ของสัญลักษณ์ จากตัวอย่าง 1 Symbol = 1 Bit เรียกว่า Binary PSK ดังรูป

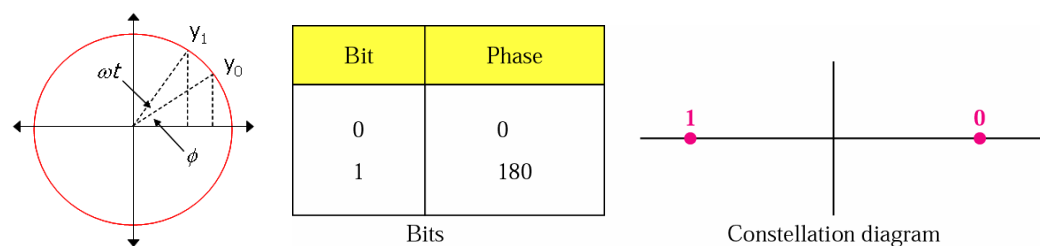


FIGURE 5.5 Constellation Diagram ของการผสมสัญญาณแบบ Phase Shift Keying แบบ Binary PSK ซึ่งใช้เฟส 2 เฟส แทน ข้อมูล 0 และ 1

ในการออกแบบ หรือ วิเคราะห์ Modulation PSK มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดจำนวนของบิต (N) ต่อ 1 สัญลักษณ์ (2 = Dibit, 3 = Tribit ...)
2. แบ่งเฟส (จากทั้งหมด 360°) ออกเป็น 2^N ช่วง เท่าๆ กัน
3. แทนค่าสัญลักษณ์แต่ละแบบด้วยค่าเฟสแต่ละช่วง
4. แสดงการจับคู่สัญลักษณ์และเฟส ด้วยตาราง หรือแผนผัง Constellation

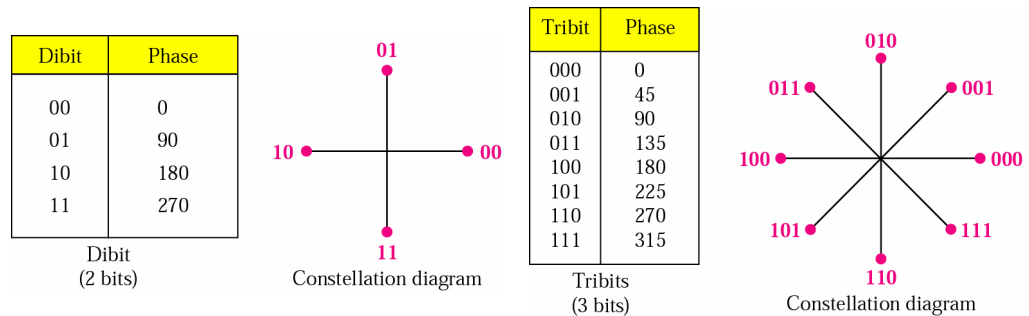


FIGURE 5.6 Constellation Diagram ของการผสมสัญญาณแบบ PSK แบบ Dibit (ซ้าย) และ Tribit (ขวา) ตามลำดับ

รูปที่ 5.7 แสดงตัวอย่างของ PSK ชนิด Dibit ซึ่งสามารถแทนสัญลักษณ์ได้ 2 บิต (4 รูปแบบ) ต่อ 1 หน่วยสัญญาณ ซึ่งจะได้ว่า Bit Rate = $2 \times$ Baud Rate

แถบความถี่ของ PSK มีค่าเท่ากับแถบความถี่ของ ASK เมื่อส่งด้วยอัตรา Baud เท่ากัน และค่าสัมประสิทธิ์ $d = 0$ นั่นคือ (แต่ Bit Rate ของ PSK จะมากกว่าหรือเท่ากับ ASK เสมอ) ดังสมการ

$$BW_{PSK} = N_{baud}$$

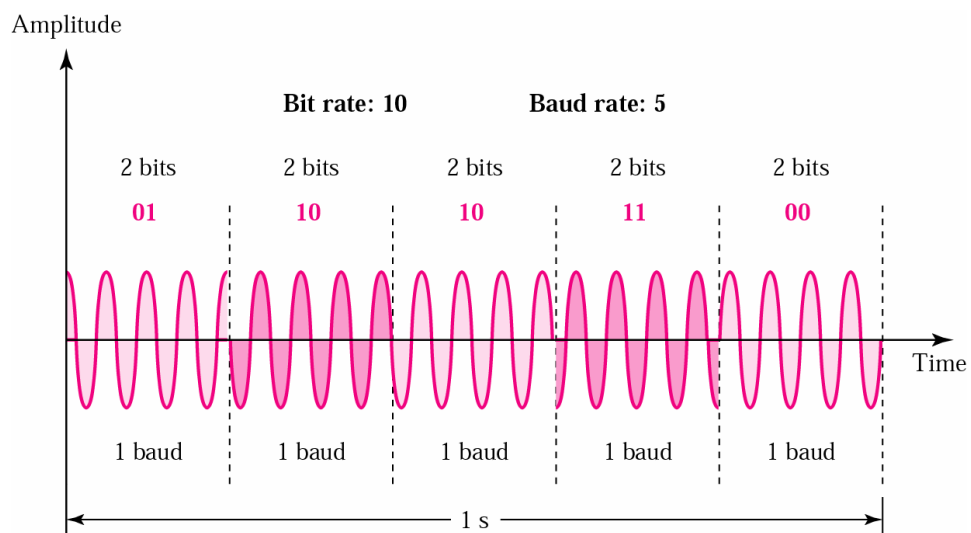


FIGURE 5.7 การผสมสัญญาณของข้อมูล 0110101100 ด้วยวิธีการ (PSK) ในกรณีนี้ Bit Rate มีค่าเป็น 2 เท่าของ Baud Rate

Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

สำหรับแต่ละวิธีการผสมสัญญาณต่างก็มีข้อเด่น—ด้อย แตกต่างกันไป อาทิเช่น ข้อด้อยของ PSK ได้แก่ การออกแบบอุปกรณ์ที่สามารถจำแนกความแตกต่างของเฟสจำนวนมาก ทำได้ลำบาก ดังนั้นจึงเป็นการเหมาะสมที่จะมีการเสนอให้ใช้ **วิธีการ Modulation หลายวิธีรวมกัน เพื่อประสิทธิภาพสูงสุด** ใดๆก็ได้ เนื่องจากเงื่อนไขข้อจำกัดทาง Bandwidth จึงทำให้ FSK ไม่สามารถใช้ร่วมกับ Modulation วิธีอื่นได้ วิธีที่เหมาะสม คือ การใช้ ASK ที่มีความแตกต่าง x กรณี ร่วมกับ PSK ที่มีความแตกต่าง y กรณี ดังนั้น ความแตกต่างทั้งหมดที่เป็นไปได้จึงเท่ากับ x คูณ y กรณี เรียกวิธีการ Modulation แบบนี้ว่า Quadrature Amplitude Modulation (QAM) ซึ่งทำให้ความแตกต่างระหว่าง Symbol มีมากที่สุด (ออกแบบอุปกรณ์แยกแยะได้ง่าย) ดังนั้นจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ที่เป็นไปได้เท่ากับ $\log_2(x \times y)$ บิต การรวม PSK กับ ASK ด้วยวิธี QAM ทำได้หลายรูปแบบ แต่วิธีที่นิยมใช้ได้แก่ QAM ที่มี จำนวน Amplitude Shift น้อยกว่า Phase Shift เนื่องจาก Phase มีความต้านทานต่อสัญญาณรบกวนมากกว่า Amplitude ดังรูป

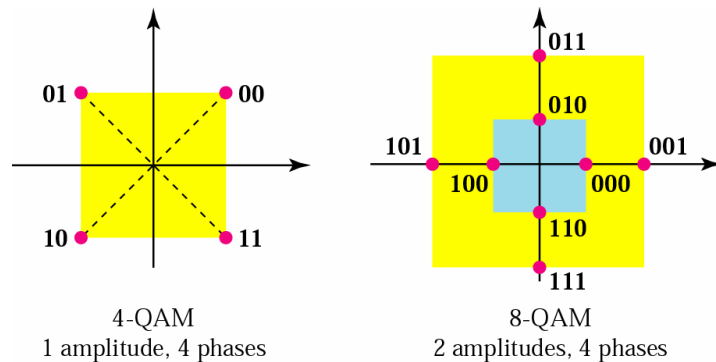


FIGURE 5.8 Constellation Diagram ของ 4-QAM (ซ้าย) และ 8-QAM (ขวา) ความแตกต่างของ Phase จะมากกว่า Amplitude

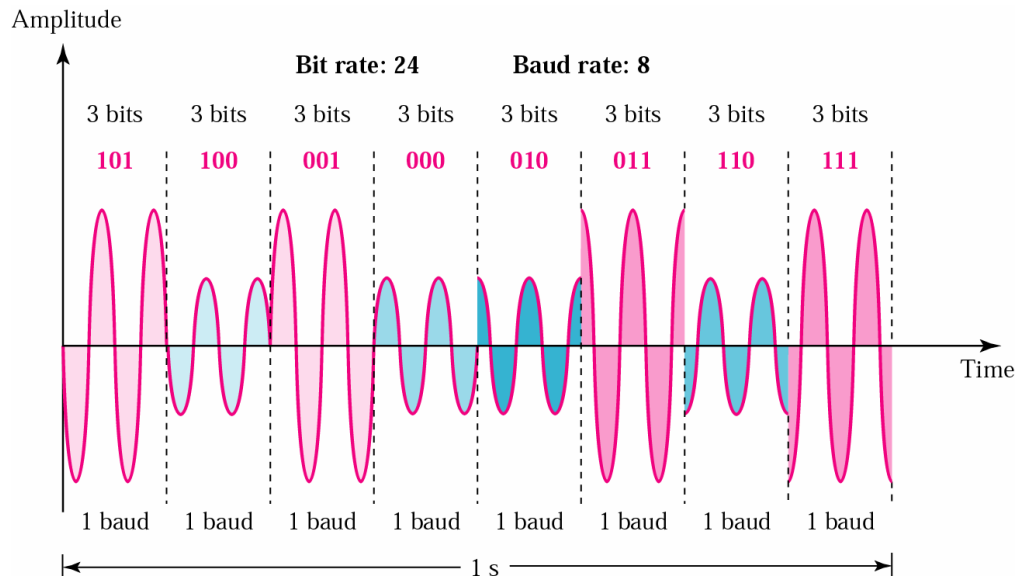


FIGURE 5.9 การผสมสัญญาณของข้อมูลจำนวน 24 บิต ด้วยวิธีการ QAM ในกรณีนี้ Bit Rate มีค่าเป็น 3 เท่าของ Baud Rate

เนื่องจาก N – QAM กำหนดเพียงแค่จำนวนของการรวมกันของ Amplitude (A) และ Phase (P) ดังนั้นการปรับโครงสร้างของ A – P Shift เมื่อ N มีค่าเท่ากัน สามารถทำได้ตามความเหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภท ดังกรณี 16 – QAM สามารถจัดโครงสร้างของ A – P Shift ได้หลายรูปแบบดังนี้

- 3A/12P ทนต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุด เพราะอัตราส่วน P/A สูง (ITU-T)
- 4A/ 8P จำแนกความแตกต่างระหว่างสัญญาณได้ดี การออกแบบอุปกรณ์จึงสามารถทำได้ง่าย เนื่องจากแต่ละค่า A มี P เพียง 4 รูปแบบ (OSI)
- 2A/ 8P QAM พื้นฐาน

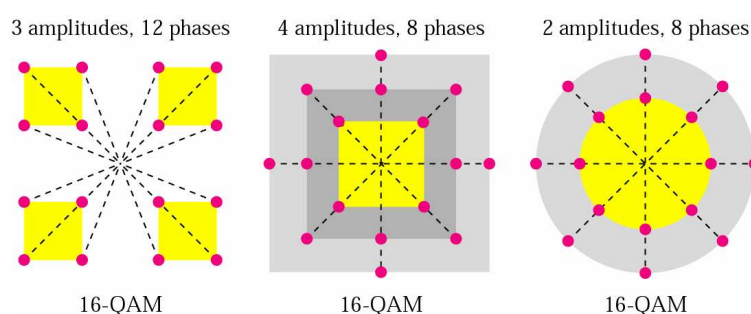


FIGURE 5.10 โครงสร้าง 16-QAM ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 3A/12P 4A/8P และ 2A/8P ตามลำดับ

แถบความถี่ของ QAM เท่ากับ PSK และเท่ากับ ASK (เมื่อส่งด้วยอัตรา Baud เท่ากัน) ดังสมการ

$$BW_{QAM} = N_{baud}$$

ตารางต่อไปนี้จะแสดงตัวอย่างการ Modulation รูปแบบต่างๆ และความสัมพันธ์ระหว่าง Bit และ Baud

Modulation	Units	Bits/Baud	Baud rate	Bit Rate
ASK, FSK*, 2-PSK	Bit	1	N	N
4-PSK, 4-QAM	Dibit	2	N	2N
8-PSK, 8-QAM	Tribit	3	N	3N
16-QAM	Quadbit	4	N	4N
32-QAM	Pentabit	5	N	5N
64-QAM	Hexabit	6	N	6N
128-QAM	Septabit	7	N	7N
256-QAM	Octabit	8	N	8N

*FSK ในที่นี้ใช้ Frequency Shift เพียงแค่ 2 ความถี่ (ดังนั้น Baud Rate = Bit Rate)

โมเด็ม

โมเด็ม (MODEM หรือ **M**odulator – **D**emodulator) ทำหน้าที่ 2 ประการ ได้แก่

- Modulation หมายถึง การสร้าง Band – Pass สัญญาณอนาลอกจากข้อมูลดิจิทัล
- Demodulation หมายถึง การกู้คืนข้อมูลดิจิทัลจากสัญญาณที่ผ่านการ Modulation

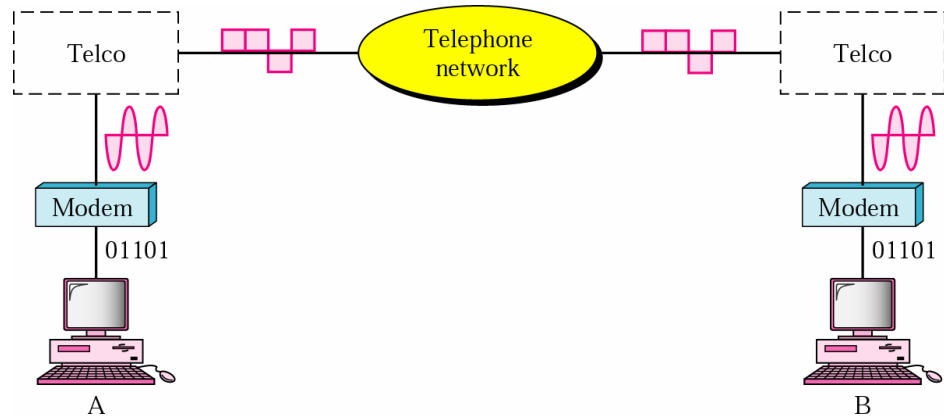


FIGURE 5.12 แสดงขั้นตอน Modulation ข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ A ให้เป็นสัญญาณอนาลอกส่งไปยัง Telco ซึ่งทำการแปลงกลับเป็นข้อมูลดิจิทัล เพื่อส่งผ่านเครือข่ายโทรศัพท์ ปลายทางด้านคอมพิวเตอร์ B จะทำการ Demodulation เพื่อกู้คืนข้อมูลต้นฉบับ

มาตรฐานของโมเด็ม

ตามข้อกำหนดของ ITU-T มาตรฐานของ MODEM อยู่บนพื้นฐานของ V-Series กล่าวคือ V.32 ใช้การเข้ารหัสแบบ Trellis Coded Modulation กล่าวคือ

- สัญลักษณ์มีขนาด 5 บิต ประกอบด้วยข้อมูล 4 บิต และ Redundant 1 บิต (Redundant Bit ใช้สำหรับลดความน่าจะเป็นในการถอดรหัสข้อมูลผิดพลาด)
- เข้ารหัสสัญญาณด้วย 32-QAM ด้วยความเร็ว 2 400 Baud (9 600 bps)

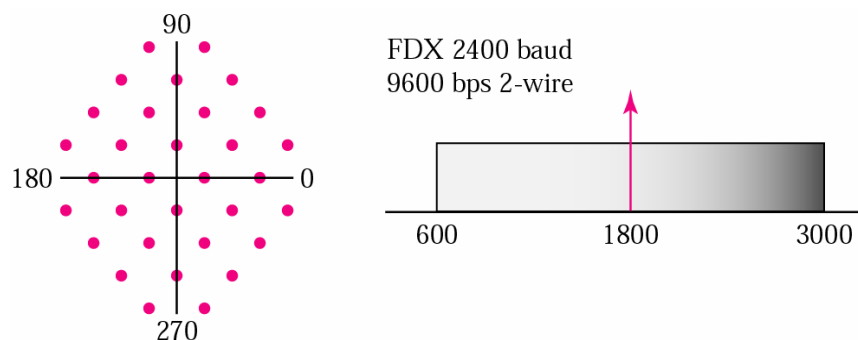


FIGURE 5.13 Constellation Diagram ของการเข้ารหัสของ MODEM มาตรฐาน V.32 (ซ้าย) และ Spectrum ของสัญญาณหลังผ่าน Modulation (ขวา)

V.32bis สามารถปรับความเร็วการส่งให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ ตามคุณภาพของตัวกลางใช้การเข้ารหัสแบบ **Trellis Coded Modulation** กล่าวคือ

- สัญญาณมีขนาด 7 บิต ประกอบด้วยข้อมูล 6 บิต และ Redundant 1 บิต
- เข้ารหัสสัญญาณด้วย 128-QAM ด้วยความเร็ว 2 400 Baud (14 400 bps)

V.34bis มีความเร็ว 28 800 bps (960-QAM) ถึง 33 600 bps (1664-QAM)

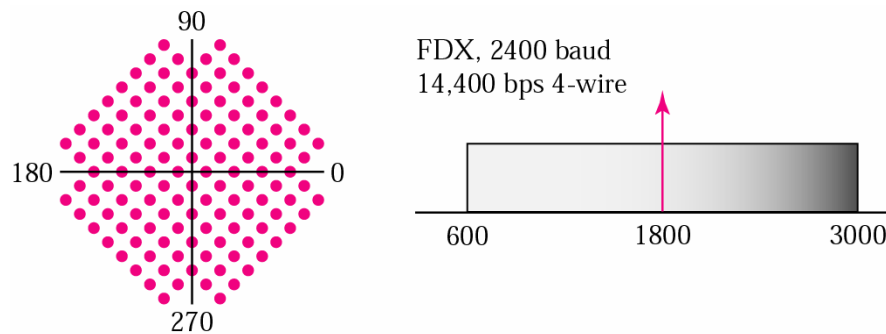


FIGURE 5.14 Constellation Diagram ของการเข้ารหัสของ MODEM มาตรฐาน V.32bis (ซ้าย) และ Spectrum ของสัญญาณหลังผ่าน Modulation (ขวา)

V.90 สำหรับ MODEM แบบดั้งเดิมข้อมูลดิจิทัลจะถูกผสม (Modulate) กับสัญญาณอนาล็อก (เสียง) ที่สถานีแยกวงจร (Switch) สัญญาณอนาล็อกจะผ่านกระบวนการ PCM เพื่อส่งผ่านเครือข่ายดิจิทัลด้วยวิธีนี้จากทฤษฎีของ Shannon MODEM ทั่วไปจะมีความเร็วสูงสุด ไม่เกิน 33.6 kbps

ในขณะที่ V.90 ใช้เทคนิคพิเศษในการผสมสัญญาณ ทำให้สามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 56 kbps ได้ ซึ่งมีเงื่อนไขที่ต้องมี อย่างน้อยด้านหนึ่งของการสื่อสาร ใช้ระบบสัญญาณดิจิทัล จึงสามารถรับ-ส่งข้อมูลแบบไม่สมมาตร (Asymmetric) ได้ กล่าวคือ Upload ด้วยความเร็ว 33.6 kbps (ผ่านระบบ PCM) และ Download ด้วยความเร็ว 56 kbps (ส่งผ่านไปยังเครือข่ายโดยตรง ไม่ผ่านระบบ PCM)

V.92 คล้ายกับ V.90 แต่สามารถปรับความเร็วในการ Upload ได้และสามารถรับสายโทรศัพท์ซ้อนได้

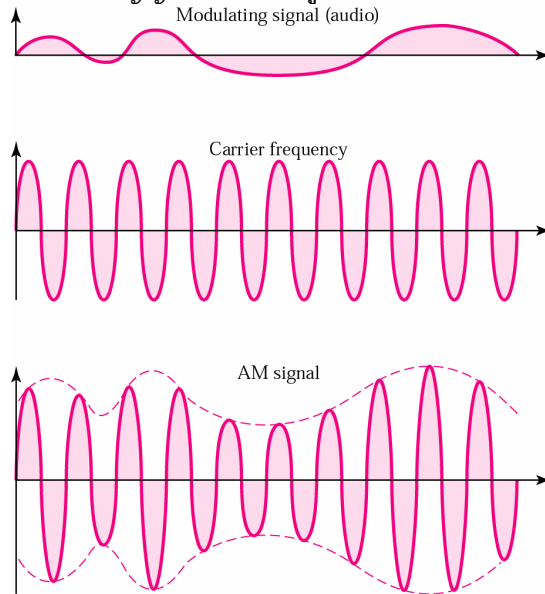


สัญญาณเสียงมีความถี่สูงสุดประมาณ 4 000 Hz ดังนั้นด้วยเงื่อนไขของ Shannon (ไม่มี Quantization) สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราสูงสุด $2 \times 4\,000 = 8\,000$ Symbols ต่อวินาที หรือ 8 000 Bauds เนื่องจาก 1 Symbol ประกอบด้วยข้อมูล 8 Bit ซึ่งคิดเป็นข้อมูล 7 Bits และ Redundant 1 Bit ดังนั้น **อัตราเร็วของข้อมูลในระบบ Asymmetric** มีค่าเท่ากับ $8\,000 \times 7 = 56$ kbps

การผสมสัญญาณอนาล็อก

เนื่องจากสัญญาณ อนาล็อกอาจมี Spectrum เริ่มต้นจาก 0 Hz (DC) ซึ่งพิจารณาเป็นสัญญาณประเภท Low-Pass ได้ และนอกจากนี้สัญญาณ Band-Pass บางสัญญาณอาจจะมีช่วง (Range) ไม่สอดคล้องกับตัวกลาง ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง กระบวนการในการผสมสัญญาณอนาล็อกชนิด Low-Pass และ Band-Pass ดังกล่าว เพื่อแปลงให้เป็นสัญญาณอนาล็อก ชนิด Band-Pass ในช่วงที่เหมาะสม

การผสมสัญญาณเชิงความสูง



การผสมสัญญาณเชิงความสูง (Amplitude Modulation: AM) คือการผสมสัญญาณโดยที่ความสูง (Amplitude) ของสัญญาณพาหะ (Carrier) เปลี่ยนตามความสูงของสัญญาณข่าวสาร (Modulating Signal) ทั้งนี้ ทั้งความถี่ และเฟสของสัญญาณพาหะมีค่าคงที่

รูปด้านบนแสดงสัญญาณข่าวสารที่เป็นเสียงที่มนุษย์ได้ยิน รูปกลางแสดง Simple Signal ของ Carrier ซึ่งมีความถี่สูงกว่าความถี่สูงสุดของ Modulating Signal และรูปด้านล่างแสดงสัญญาณ AM ที่ผ่านการผสมแล้ว

สังเกตลักษณะของสัญญาณ AM จะมีรูปร่างของ Modulating Signal เป็นกรอบของสัญญาณ (Envelope) ทั้งด้านบน และ

Bandwidth ของ AM มีค่าเป็น 2 เท่าของ สัญญาณข่าวสารที่นำมาผสม (ในกรณีที่ Modulation Index) มีค่าเท่ากับ 1 ดังรูป

BW_m = bandwidth of the modulating signal (audio)

BW_t = total bandwidth (radio)

f_c = frequency of the carrier

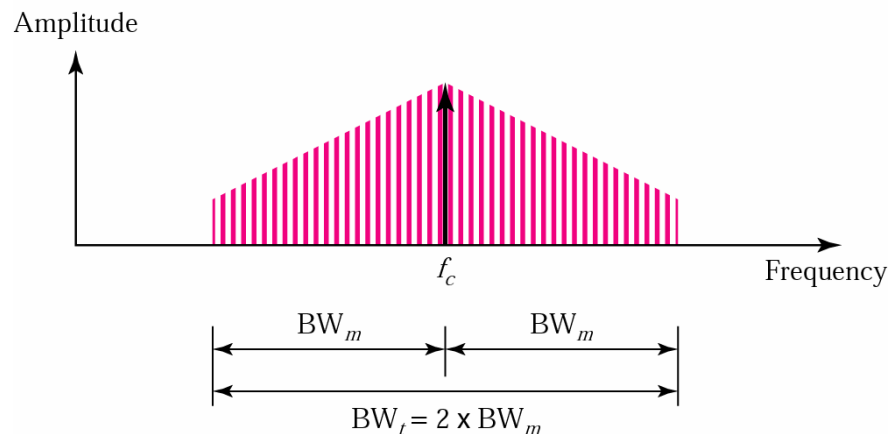


FIGURE 5.15 Spectrum ของสัญญาณ AM ซึ่งผสมสัญญาณข่าวสารซึ่งมี Bandwidth = BW_m ด้วยความถี่พาหะ f_c

Federal Communications Commission (FCC) ได้ระบุข้อกำหนดของการส่งคลื่นวิทยุ AM ให้มี Bandwidth ของสัญญาณ 5 kHz (ครอบคลุมย่านเสียงพูดของมนุษย์) แต่ละสถานีจึงมี Bandwidth เท่ากับ $2 \times 5 = 10$ kHz ดังนั้น ความถี่พาหะของแต่ละสถานีจะต้องเว้นช่วง 10 kHz เพื่อป้องกันการ

รบกวนกัน ตัวอย่างเช่น สัญญาณพาหะของระบบวิทยุ AM อยู่ในช่วง 530 – 1 700 kHz ดังนั้นถ้าสัญญาณพาหะของสถานีหนึ่งมีความถี่ 1 000 kHz สถานีข้างเคียงต้องมีความถี่ 990 และ 1 010 kHz

การผสมสัญญาณเชิงความถี่

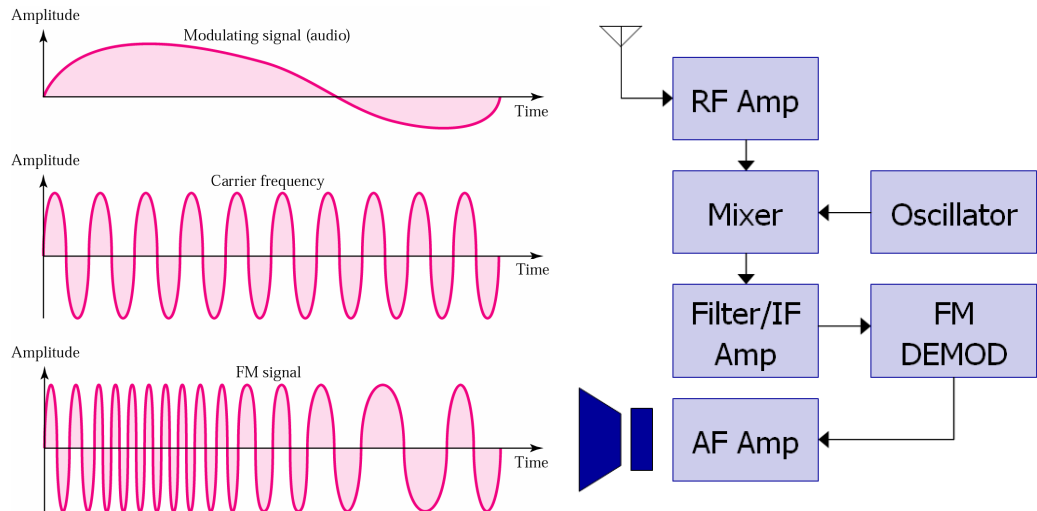


FIGURE 5.16 สัญญาณข่าวสาร สัญญาณพาหะ และสัญญาณ FM (ซ้าย) และแผนผังแสดงเครื่องรับสัญญาณวิทยุ FM (ขวา)

การผสมสัญญาณเชิงความถี่ (Frequency Modulation: FM คือการผสมสัญญาณโดยที่ความถี่ ของสัญญาณพาหะ เปลี่ยนตามความสูงของสัญญาณข่าวสาร (Modulating Signal) ทั้งนี้ ทั้งความสูง และ เฟสของสัญญาณพาหะมีค่าคงที่ รูปที่ 5.17 แสดง Spectrum ของสัญญาณ FM ซึ่งสามารถวิเคราะห์ ด้วยสมการของ Jacobi ได้ว่ามีค่าประมาณ 10 เท่าของสัญญาณข่าวสารที่นำมา Modulate

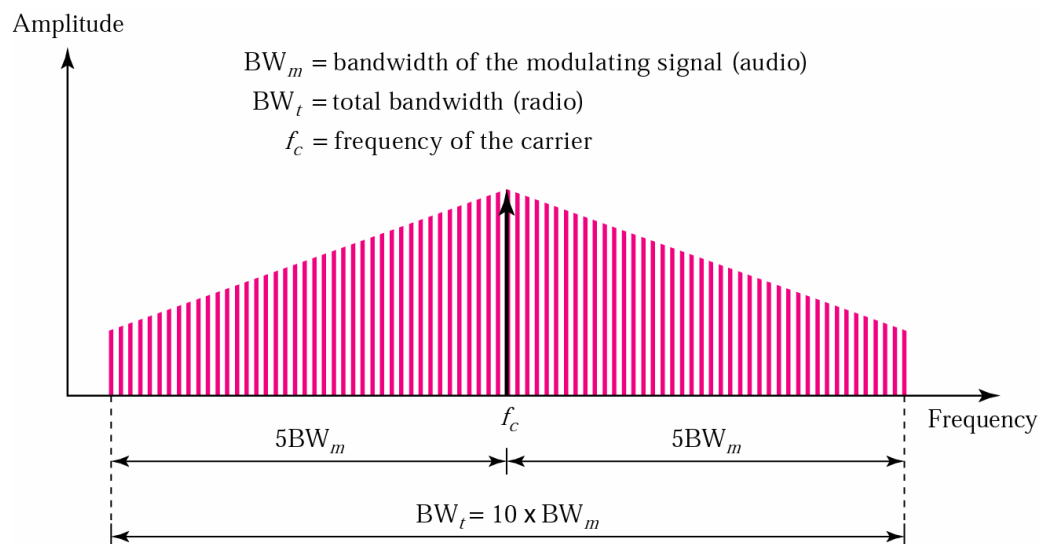


FIGURE 5.17 Spectrum ของสัญญาณ FM ซึ่งผสมสัญญาณข่าวสารซึ่งมี Bandwidth = BW_m ด้วยความถี่พาหะ f_c

FCC ได้ระบุข้อกำหนดของการส่งคลื่นวิทยุ FM ให้มี Bandwidth ของสัญญาณ 15 kHz (ครอบคลุมส่วนใหญ่ของเสียงที่มนุษย์ได้ยิน) และกำหนดให้มี Guard Band สถานีละ 50 kHz แต่ละสถานีจึงมี Bandwidth เท่ากับ $10 \times 15 + 50 = 200$ kHz ตัวอย่างเช่น สัญญาณพาหะของระบบวิทยุ FM อยู่ในช่วง 88 – 108 MHz ถ้า Carrier สถานีหนึ่ง มีความถี่ 106.5 MHz สถานีข้างเคียงต้องมีความถี่ $106.5 \text{ MHz} \pm$ (อย่างน้อย) 200 kHz ซึ่งในทางปฏิบัติ ได้แก่ 106.25 และ 106.75 MHz ตามลำดับ นอกจากนี้ในบางบริเวณ FCC ได้มีการเฝ้าโดย กำหนดให้มีสถานีว่าง (Bandwidth 200 kHz) คั่นระหว่างสถานีที่ติดกัน ซึ่งทำให้ระยะห่างระหว่างสถานีเพิ่มขึ้นเป็น 400 kHz

การผสมสัญญาณเชิงเฟส

การผสมสัญญาณเชิงเฟส (Phase Modulation: PM) คือการผสมสัญญาณโดยที่เฟสของสัญญาณพาหะ เปลี่ยนตามความสูงของสัญญาณข่าวสาร (Modulating Signal) ทั้งนี้ ทั้งความสูง และสัญญาณของสัญญาณพาหะมีค่าคงที่ เนื่องจากระบบรับ-ส่งสามารถออกแบบได้ง่ายกว่า จึงได้มีการนำ PM มาใช้แทน FM ในระบบการสื่อสารบางระบบ สำหรับกระบวนการวิเคราะห์ และผลของสัญญาณที่ผ่านการผสมแล้วของระบบ PM จะคล้ายคลึงกับระบบ FM

แบบฝึกหัด

- อธิบายหลักการและเหตุผลในการทำ Modulation ของข้อมูลดิจิทัล
- หากข้อมูลดิจิทัลมีอัตราเร็ว 1 000 บิตต่อวินาที โดยที่สัญลักษณ์ 1 ตัวสามารถอธิบายได้ด้วยข้อมูล 4 บิต คำนวณหา Baud Rate
- คำนวณหา Bandwidth ของตัวกลางที่ต้องการหาก Modulate ข้อมูลดิจิทัลที่มี Baud Rate เท่ากับ 1 500 ด้วยวิธี ASK โดยที่ Amplitude สูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 8 และ 4 โวลต์ตามลำดับ
- กำหนดตัวกลางมี Bandwidth อยู่ในช่วง 15 000 ถึง 30 000 Hz เขียน Frequency Diagram ของสัญญาณที่ Modulate ด้วยวิธี ASK และรูปแบบการส่งผ่านเป็นแบบ Full Duplex พร้อมทั้งคำนวณหาอัตรา Baud และความถี่ของสัญญาณพาหะในการ Modulate ข้อมูลในทั้งสองทิศทาง
- กำหนดเงื่อนไขของตัวกลางและรูปแบบการส่งผ่าน เช่นเดียวกับข้อ 4 เขียน Frequency Diagram และคำนวณอัตรา Baud ของสัญญาณที่ Modulate ด้วยวิธี FSK ซึ่งมีความแตกต่างของความถี่พาหะในแต่ละทิศทางเท่ากับ 5 000 Hz
- อธิบายเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างการ Modulate ด้วยวิธี ASK และ FSK มาพอสังเขป
- เขียน Constellation Diagram ของการ Modulate ด้วยวิธี PSK เมื่อกำหนดให้สัญลักษณ์ 1 ตัวสามารถอธิบายได้ด้วยข้อมูล 2 บิต และความต่างเฟสระหว่างสัญลักษณ์มีค่าเท่ากัน
- หากต้องการส่งข้อมูลซึ่งมีอัตราเร็ว 56 000 บิตต่อวินาที โดยการ Modulate ด้วยวิธี QAM ซึ่งมี Amplitude และ Phase ที่แตกต่างกัน 4 และ 8 รูปแบบตามลำดับ คำนวณหา Baud Rate และ Bandwidth ของตัวกลางที่น้อยที่สุดที่จำเป็น
- เขียน Frequency Diagram และคำนวณหาความถี่พาหะของสัญญาณในข้อ 8 ถ้าความถี่ต่ำสุดที่ตัวกลางยอมให้ผ่านได้มีค่าเท่ากับ 100 000 Hz
- สรุปหลักการ Analog Modulation ด้วยวิธี AM FM และ PM มาพอสังเขป