



Analog Transmission

Paramate Horkaew

School of Computer Engineering
Institute of Engineering, Suranaree University of Technology



Lecture Outline

- Modulations of Digital Data
 - Digital to Analog Conversions
 - ASK, FSK, PSK and QAM Techniques
 - Bit and Baud Comparison
- Telephone Modems
 - Modem Standards
- Modulation of Analog Signals
 - Amplitude Modulation (AM)
 - Frequency Modulation (FM)
 - Phase Modulation (PM)
- Summary



Modulation of Digital Data

นิยาม

การเปลี่ยน คุณสมบัติ ของสัญญาณ Analog ตามข่าวสารที่ปรากฏในสัญญาณ Digital (เลขฐานสอง)

เหตุผลที่ต้องมีการทำ Digital to Analog Modulation

1. ส่วนของสัญญาณ Digital ที่มีนัยสำคัญอยู่ในย่านความถี่ต่ำ มีพลังงานน้อย ไม่สามารถส่งได้ไกลเท่ากับสัญญาณ Analog ที่มีปริมาณข่าวสารเท่ากัน
2. สัญญาณ Digital มีแถบความถี่ช่วงกว้างมาก ไม่สามารถผ่านไปในตัวกลางได้ทั้งหมด ซึ่งอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดทางด้านการรับได้
3. ระบบทวนสัญญาณด้วย Analog สามารถออกแบบได้ง่ายกว่า
4. ความถี่สัญญาณ Analog ที่ใช้ในการ Modulation ไม่มีเงื่อนไขขอบเขตบน ดังนั้น ยิ่งมีความถี่สูงเท่าไร ก็สามารถออกแบบสายอากาศที่มีขนาดเล็กลงได้มากเท่านั้น (ข้อจำกัดอยู่ที่เทคโนโลยีของอุปกรณ์)

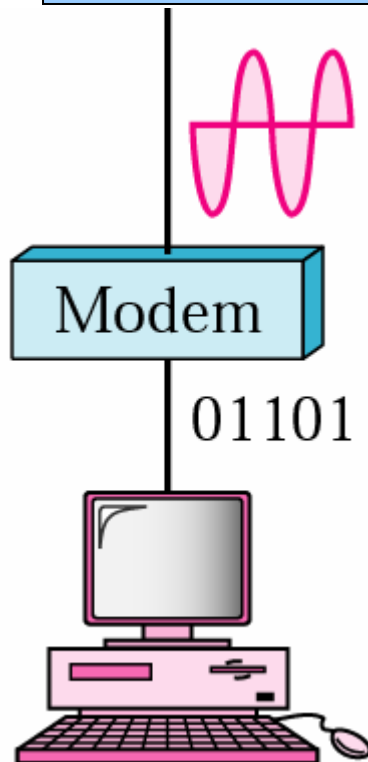


Media Characteristics

Media	Frequency Range	Typical Attenuation	Typical Delay	Repeater Spacing
Twisted Pair Cable (TPC)	0 – 3.5 kHz	0.2 dB/km (@ 1kHz)	50 μ s/km	2 km
TPC (multiple)	0 – 1 MHz	0.7 dB/km (@ 1kHz)	5 μ s/km	2 km
Coaxial Cable	0 – 500 MHz	7 dB/km (@ 1MHz)	4 μ s/km	1 – 9 km
Optical Fiber	186 – 370 THz	0.2 – 0.5 dB/km	5 μ s/km	40 km

Comm. of Modulated Signal

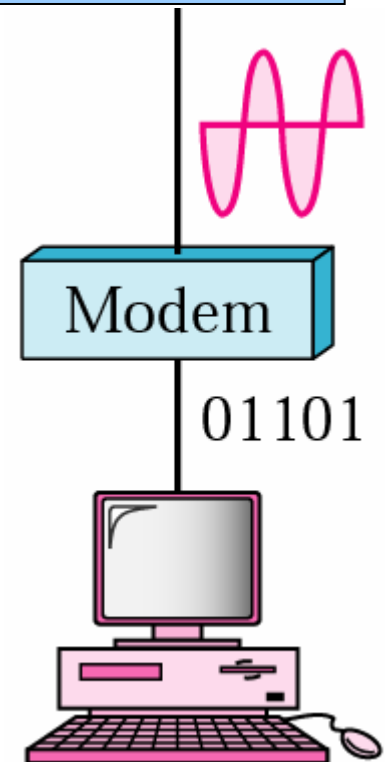
Telephone Network



ตัวอย่าง

รูปแบบหนึ่งของการ Modulate สัญญาณพาหะ ด้วยข้อมูล Digital ที่นิยมใช้กันมาก คือ การสื่อสารผ่าน MODEM ซึ่งย่อมาจาก

(**MO**dulator – **DE**Modulator)





Modulation Basics

จากนิยาม

การเปลี่ยน คุณสมบัติ ของสัญญาณ Analog ตามข่าวสารที่ปรากฏในสัญญาณ Digital เพื่อนำเสนอข่าวสารที่สมมูลกัน ในรูปแบบที่เหมาะสม (กับตัวกลาง)

- * เรียกสัญญาณ Analog นี้ว่า Carrier Signal หรือ สัญญาณพาหะ
- * สัญญาณ Carrier Signal ต้องมีความถี่สูงกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล

Attributes of a Carrier Signal

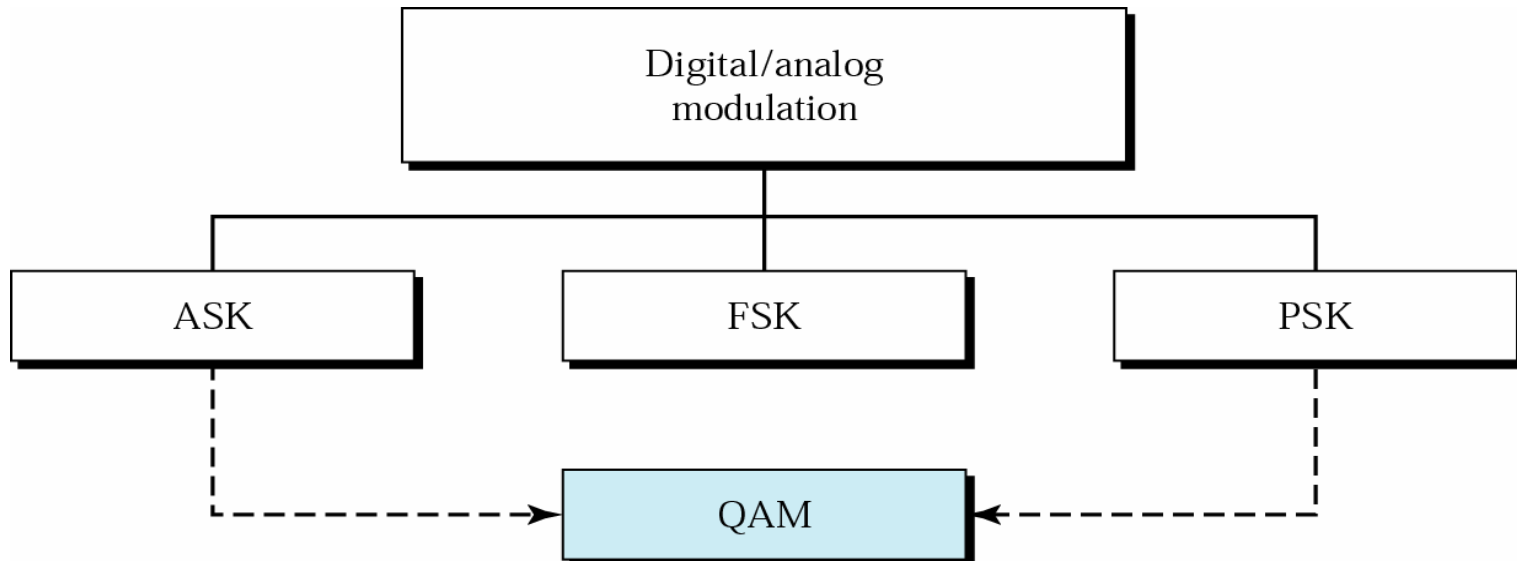
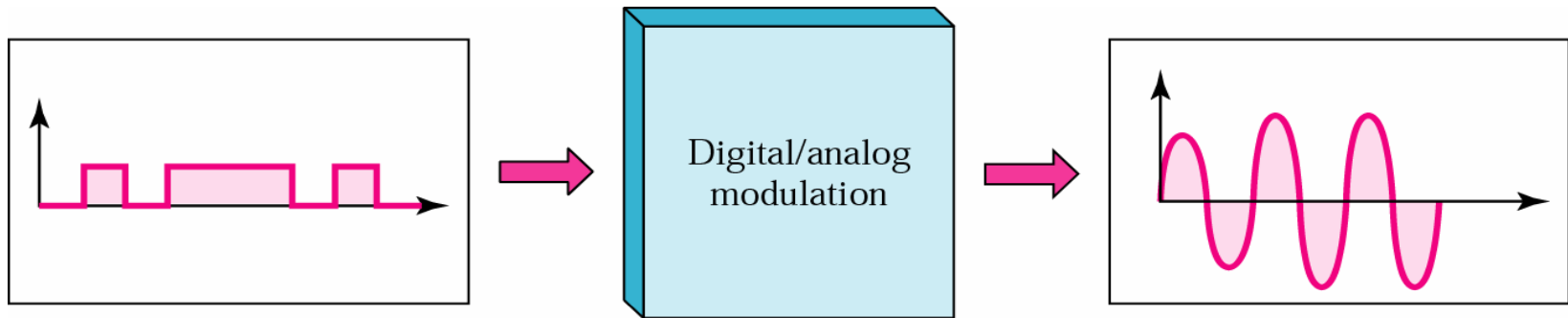
จากสมการของสัญญาณ Analog องค์ประกอบที่สามารถเปลี่ยนได้ คือ ขนาด (A) ความถี่ (f) เฟส (ϕ) หรือทั้ง A และ ϕ (ASK, FSK, PSK และ QAM ตามลำดับ)

$$s(t) = A \sin(2\pi f t + \phi)$$

↑ ↑ ↑



Types of Analog Modulations





Bit and Baud Definitions

ในบริบทของการผสมสัญญาณ มักจะมีการกล่าวถึง Bit และ Baud อยู่เสมอ นิยามต่อไปนี้ เปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่าง ระหว่างคำศัพท์ทั้งสอง

- **Bit Rate**

- จำนวนของ **Bits** ที่ส่งได้ในหนึ่งหน่วยเวลา (1 วินาที)

- **Baud Rate**

- จำนวนของ **Symbols** หรือ **Signal Units** ที่ส่งได้ในหนึ่งหน่วยเวลา
- Symbol แต่ละหน่วย ประกอบด้วยข้อมูลตั้งแต่ 1 บิตขึ้นไป
- Baud Rate เป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพในการถ่ายโอนข้อมูลระหว่างต้นทางและปลายทาง
 - ใช้ Baud Rate ในการพิจารณา Bandwidth ที่จำเป็นในการส่งสัญญาณ
- $\text{Baud Rate} = (\text{Bit Rate}) / (\text{Number of Bits per Signal Unit})$
- $\text{Bit Rate} = (\text{Baud Rate}) \times (\text{Number of Bits per Signal Unit})$



Analogy

เพื่อให้เข้าใจมากขึ้น อาจเปรียบเทียบการสื่อสารกับการขนส่ง ดังนี้

Baud คือ รถโดยสาร

Bit คือ ผู้โดยสาร

รถ 1 คันบรรทุกผู้โดยสารได้หลายคน

ถ้าวรถ 1 คันบรรทุกได้ 1 คน รถ 1000 คัน บรรทุกได้ 1000 คน

ถ้าวรถ 1 คันบรรทุกได้ 4 คน รถ 1000 คัน บรรทุกได้ 4000 คน

ปริมาณการจราจรขึ้นอยู่กับ จำนวนรถ **ไม่ใช่** จำนวนผู้โดยสาร
ขนาดของถนนขึ้นอยู่กับ จำนวนรถ เท่านั้น

ดังนั้น Bandwidth ของการสื่อสารจึงขึ้นอยู่กับ Baud Rate



Examples

Example 1

An analog signal carries 4 bits in each signal unit. If 1000 signal units are sent per second, find the baud rate and the bit rate.

(Ans. 4000 bits/sec หรือ bps)

Example 2

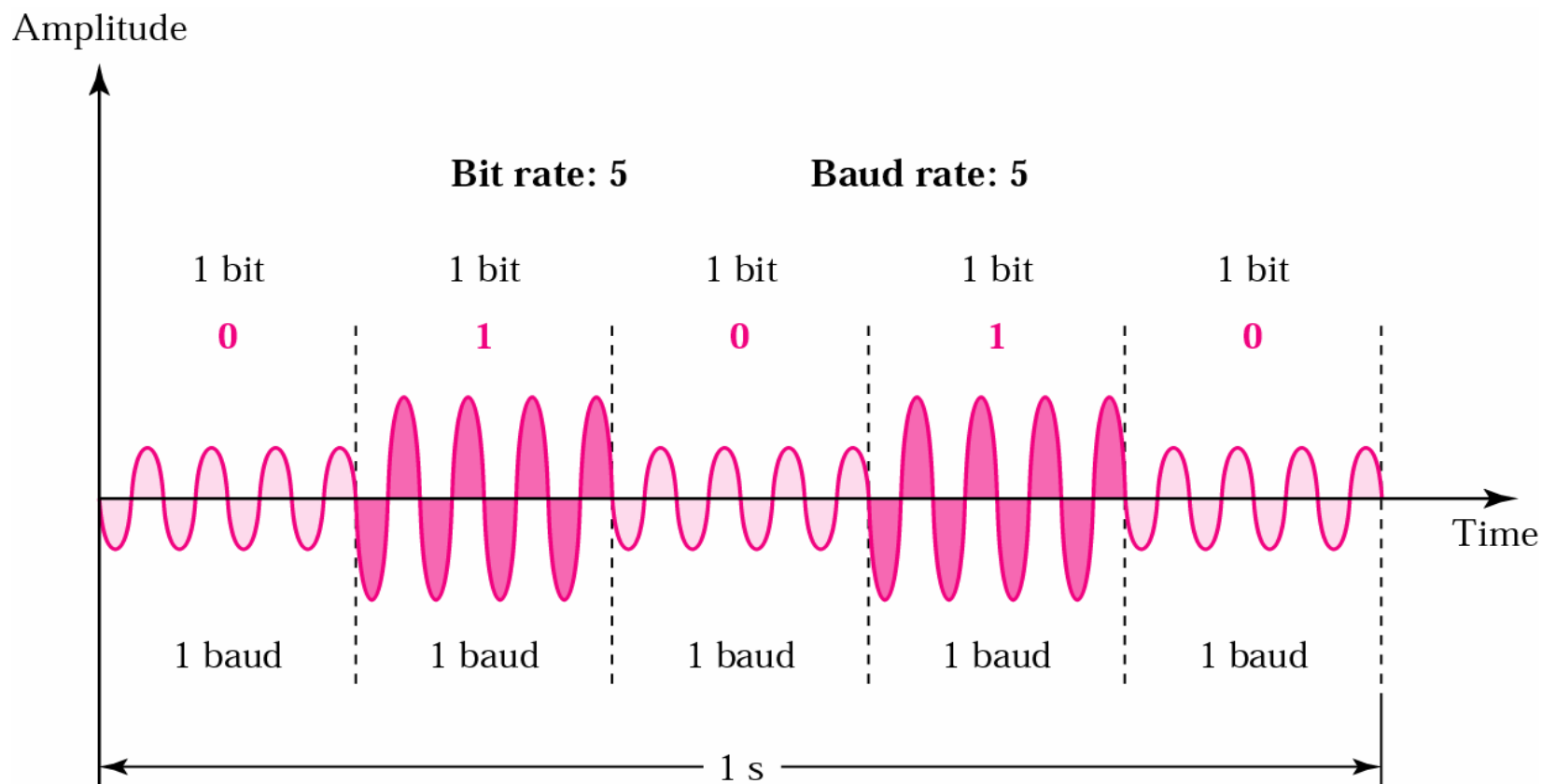
The bit rate of a signal is 3000. If each signal unit carries 6 bits, what is the baud rate?

(Ans. 500 baud/sec)



Amplitude Shift Keying (ASK)

คือการเปลี่ยนความสูง (ระดับ) ของสัญญาณ ตามบิตข้อมูล เช่น ระดับ A_0 เมื่อข้อมูลเป็น 0 (ถ้า $A_0 = 0$ เรียกว่า *On/Off Keying*) และ ระดับ A_1 เมื่อข้อมูลเป็น 1 ทั้งนี้





ASK Characteristics

ข้อดี

ออกแบบได้ง่าย (การคูณกันของฟังก์ชัน 2 ชนิด) และ การคำนวณคุณสมบัติ ไม่ซับซ้อน

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

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

ข้อเสีย

ไม่ทนทานต่อสัญญาณรบกวน เกิดการผิดพลาดได้ง่าย

การใช้งาน ใน MODEM ความเร็วต่ำ (< 1200 Baud/s), ส่งข้อมูลด้วย LED อย่างง่าย



ASK Bandwidth (I)

แถบความถี่ของ ASK สามารถหาได้จากสมการ

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

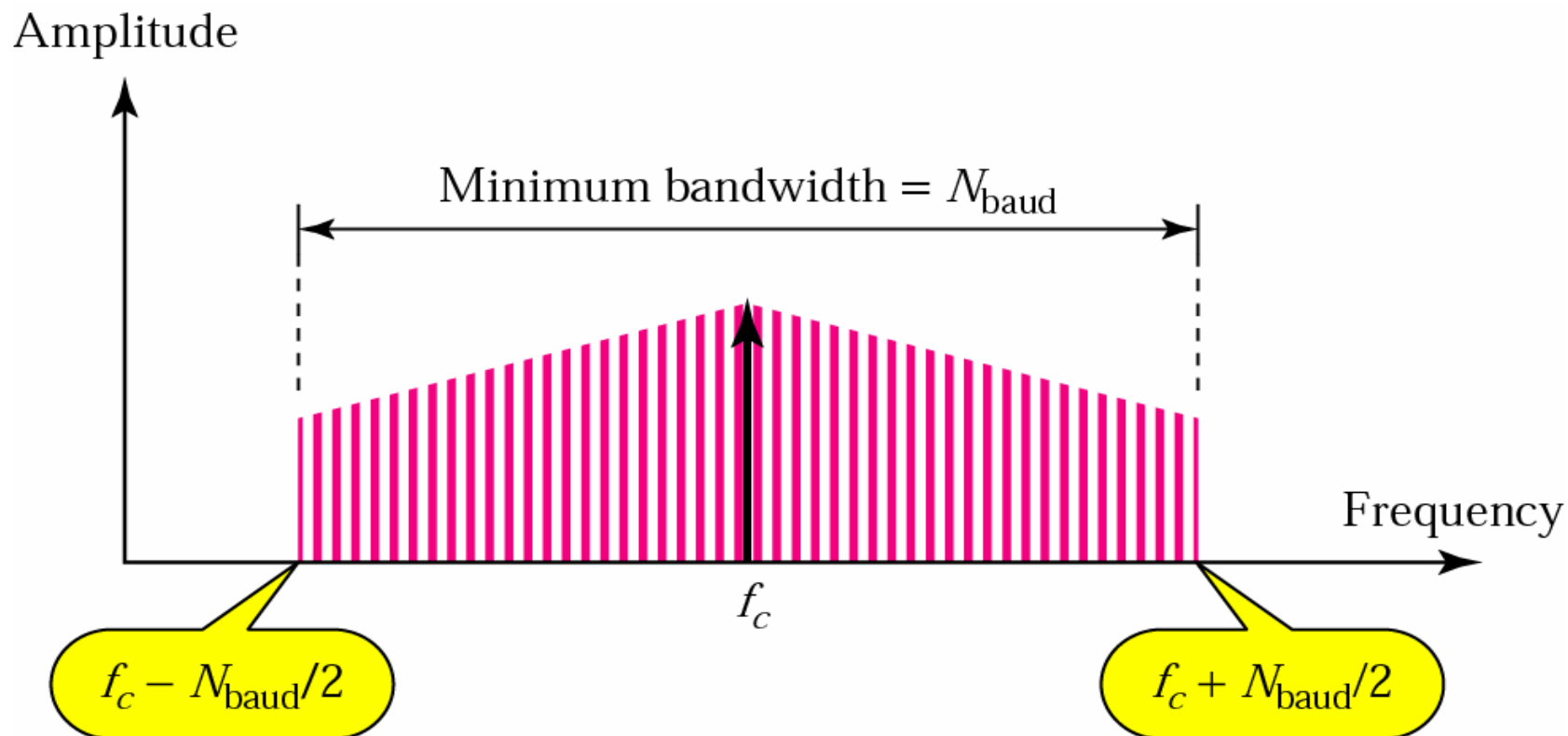
โดยที่ค่า d เรียกว่า **Modulating Factor**

- ค่า d น้อย (A_1 ต่างจาก A_0 น้อย) $\rightarrow$ BW แคบ, โอกาสเสียหายจาก Noise สูง
- ค่า d มาก (A_1 ต่างจาก A_0 มาก) $\rightarrow$ BW กว้าง, โอกาสเสียหายจาก Noise ต่ำ



ASK Bandwidth (II)

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





Examples

Find the minimum bandwidth for an ASK signal transmitting at 2000 bps. The transmission mode is **half-duplex**.

Ans 2000 Hz

Given a bandwidth of 5000 Hz for an ASK signal, what are the baud rate and bit rate?

Ans 5000 bps

Given a bandwidth of 10,000 Hz (1000 to 11,000 Hz), draw the **full-duplex** ASK diagram of the system. Find the **carriers** and the **bandwidths** in each direction. Assume there is no gap between the bands in the two directions.

Ans See Next



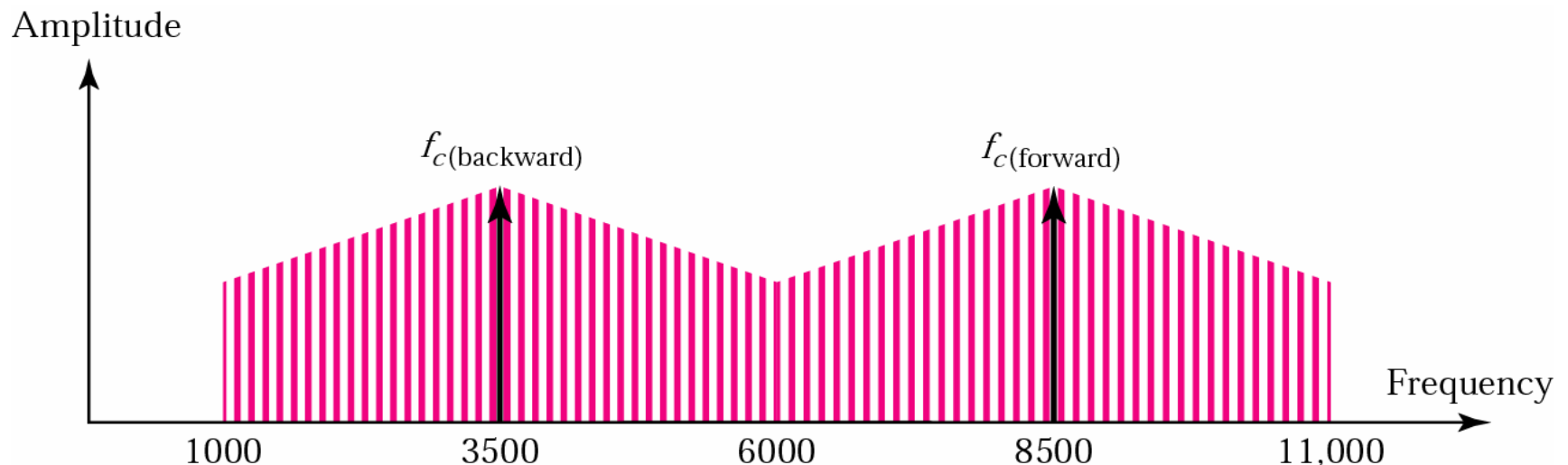
Diagrammatic Solution

สำหรับ Full-Duplex ASK Bandwidth ในแต่ละทิศทางคำนวณจาก
 $BW = 10000 / 2 = 5000 \text{ Hz}$

ดังนั้นความถี่พาหะให้อยู่กึ่งกลางของแถบความถี่แต่ละช่วง

$$f_c (\text{forward}) = 1000 + 5000/2 = 3500 \text{ Hz}$$

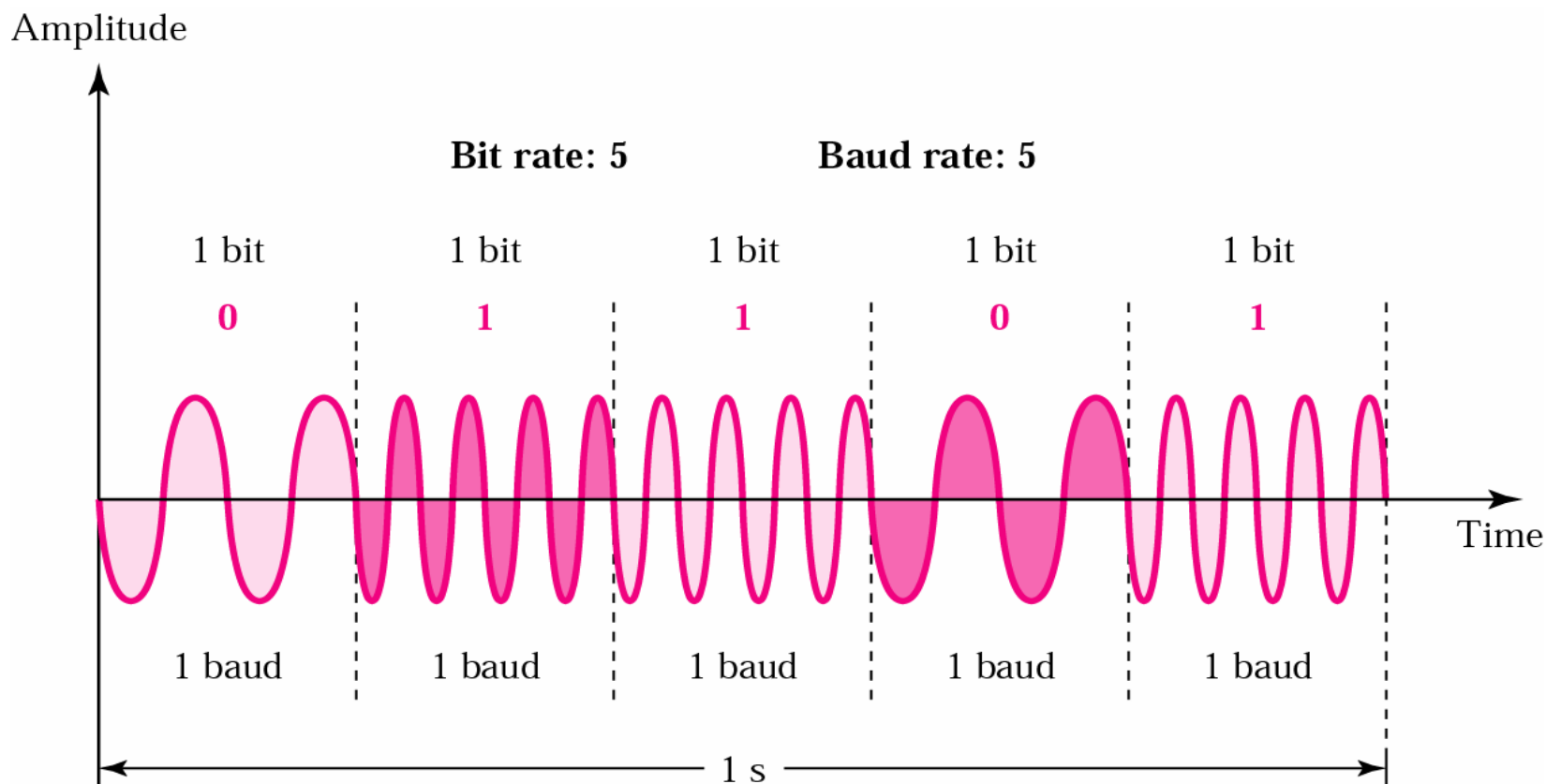
$$f_c (\text{backward}) = 11000 - 5000/2 = 8500 \text{ Hz}$$





Frequency Shift Keying (FSK)

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





FSK Characteristics

สมการ การ Modulation แบบ FSK สามารถเขียนได้ดังนี้

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

ข้อดี

ทนทานต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าวิธี Modulation แบบ ASK เนื่องจากอุปกรณ์ด้านรับมองหา ความถี่เฉพาะ ที่อยู่ในช่วงเวลาหนึ่งๆ โดยไม่สนใจ Noise กระชากระยะสั้น

ข้อเสีย

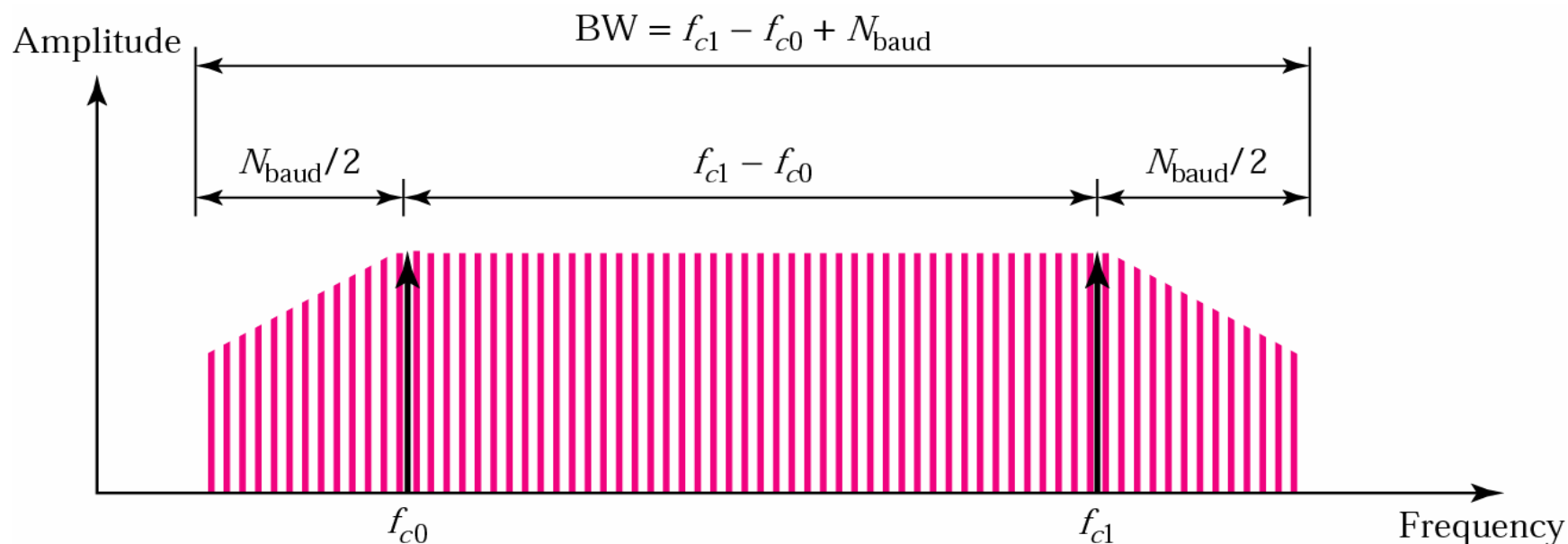
แถบ Bandwidth กว้างกว่าวิธี Modulation แบบ ASK เมื่อส่งข้อมูลที่มี Baud Rate เท่ากัน



FSK Bandwidth

แถบความถี่ของ FSK สามารถหาได้จาก **ผลรวม** ระหว่าง ความแตกต่างของความถี่พาหะ และ อัตราเร็วของข้อมูล

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





Examples

Find the minimum bandwidth for an FSK signal transmitting at 3000 bps. Transmission is in **half-duplex** mode, and the carriers are separated by 3000 Hz.

$$BW = \text{baud rate} + (f_{c1} - f_{c0})$$

$$BW = \text{bit rate} + (f_{c1} - f_{c0}) = 2000 + 3000 = 5000 \text{ Hz}$$

Ans 5000 Hz

Find the maximum bit rates for an FSK signal if the bandwidth of the medium is 12,000 Hz and the difference between the two carriers is 2000 Hz. Transmission is in **full-duplex** mode.

$$BW = \text{baud rate} + (f_{c1} - f_{c0})$$

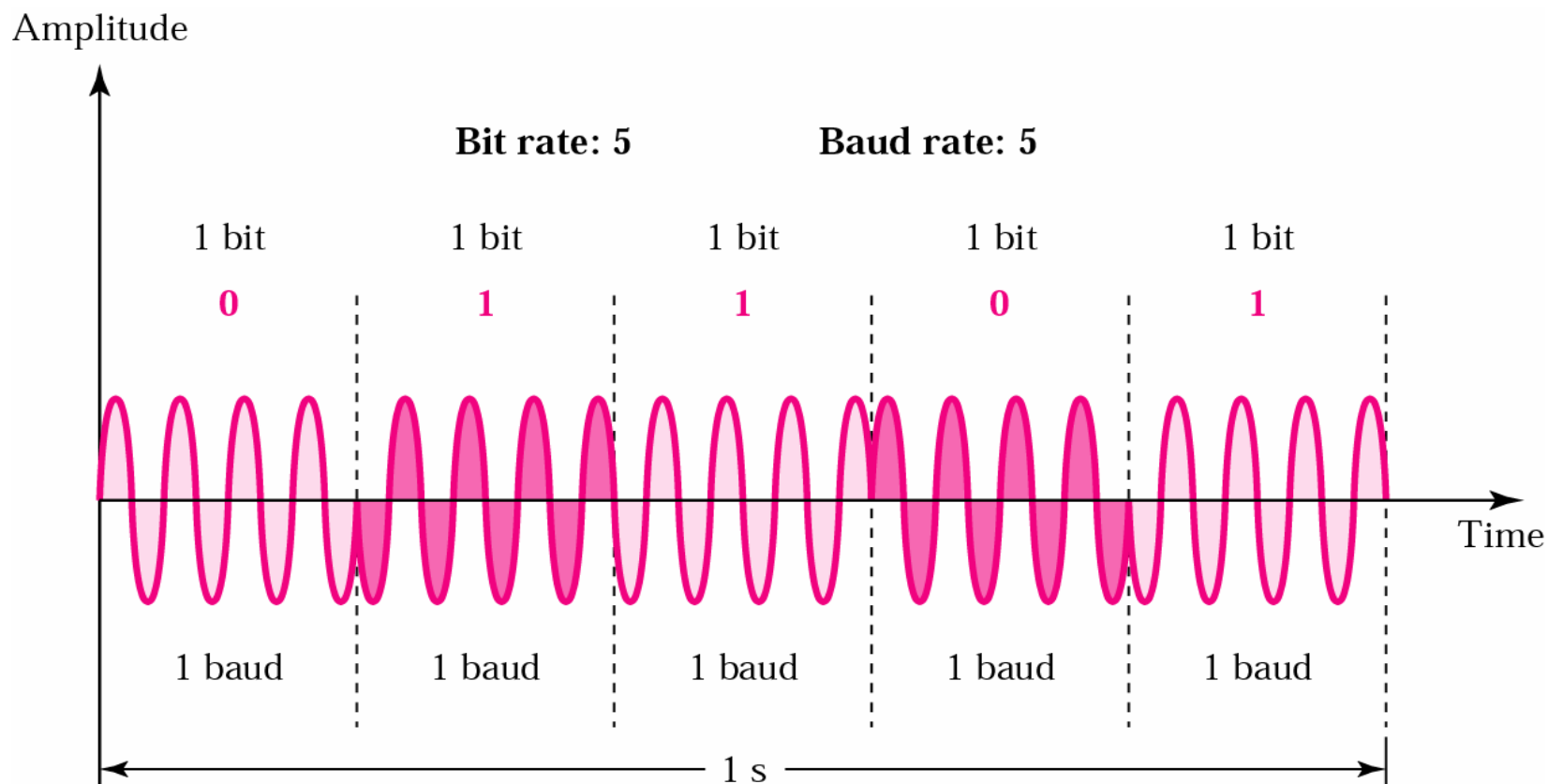
$$\text{Baud rate} = BW - (f_{c1} - f_{c0}) = 6000 - 2000 = 4000$$

Ans 4000 bps



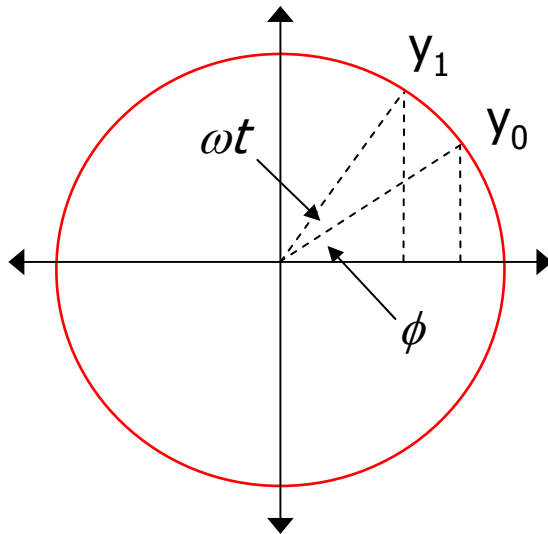
Phase Shift Keying (PSK)

คือการเปลี่ยน เฟส (ตำแหน่งเริ่มต้น) ของสัญญาณพาหะ ตามบิตข้อมูล เช่น เฟส ϕ_0 เมื่อข้อมูลเป็น 0 เฟส ϕ_0 เมื่อข้อมูลเป็น 1 ดังรูป



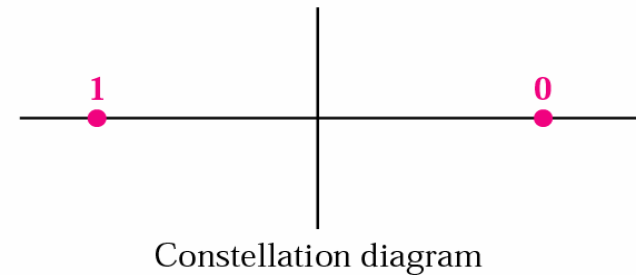
PSK Characteristics

การผสมสัญญาณแบบ PSK ในรูปแบบต่างๆ สามารถแสดงโดยแผนผัง Constellation ซึ่งบอกตำแหน่ง Phase ของสัญญาณลักษณะ จากตัวอย่าง 1 Symbol = 1 Bit $\rightarrow$ Binary PSK



Bit	Phase
0	0
1	180

Bits



ข้อดี ทนทานต่อสัญญาณรบกวนมากกว่า ASK, ใช้แถบความถี่แคบกว่า PSK และ สามารถแทนสัญลักษณ์ได้มากกว่า 1 บิตต่อหน่วยสัญญาณ

ข้อเสีย ออกแบบเครื่องรับ/ส่ง และวิเคราะห์ ยากกว่า ASK และ PSK

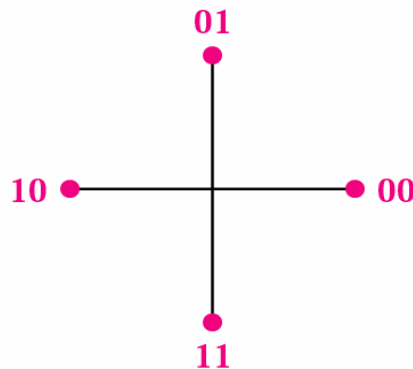
Constellation Diagram (I)

ในการออกแบบ หรือ วิเคราะห์ Modulation PSK มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

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

Dibit	Phase
00	0
01	90
10	180
11	270

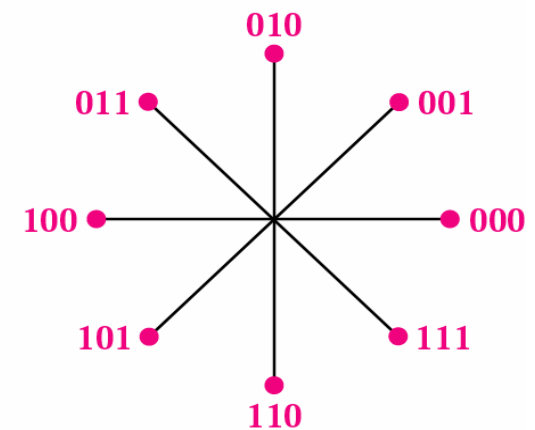
Dibit
(2 bits)



Constellation diagram

Tribit	Phase
000	0
001	45
010	90
011	135
100	180
101	225
110	270
111	315

Tribits
(3 bits)

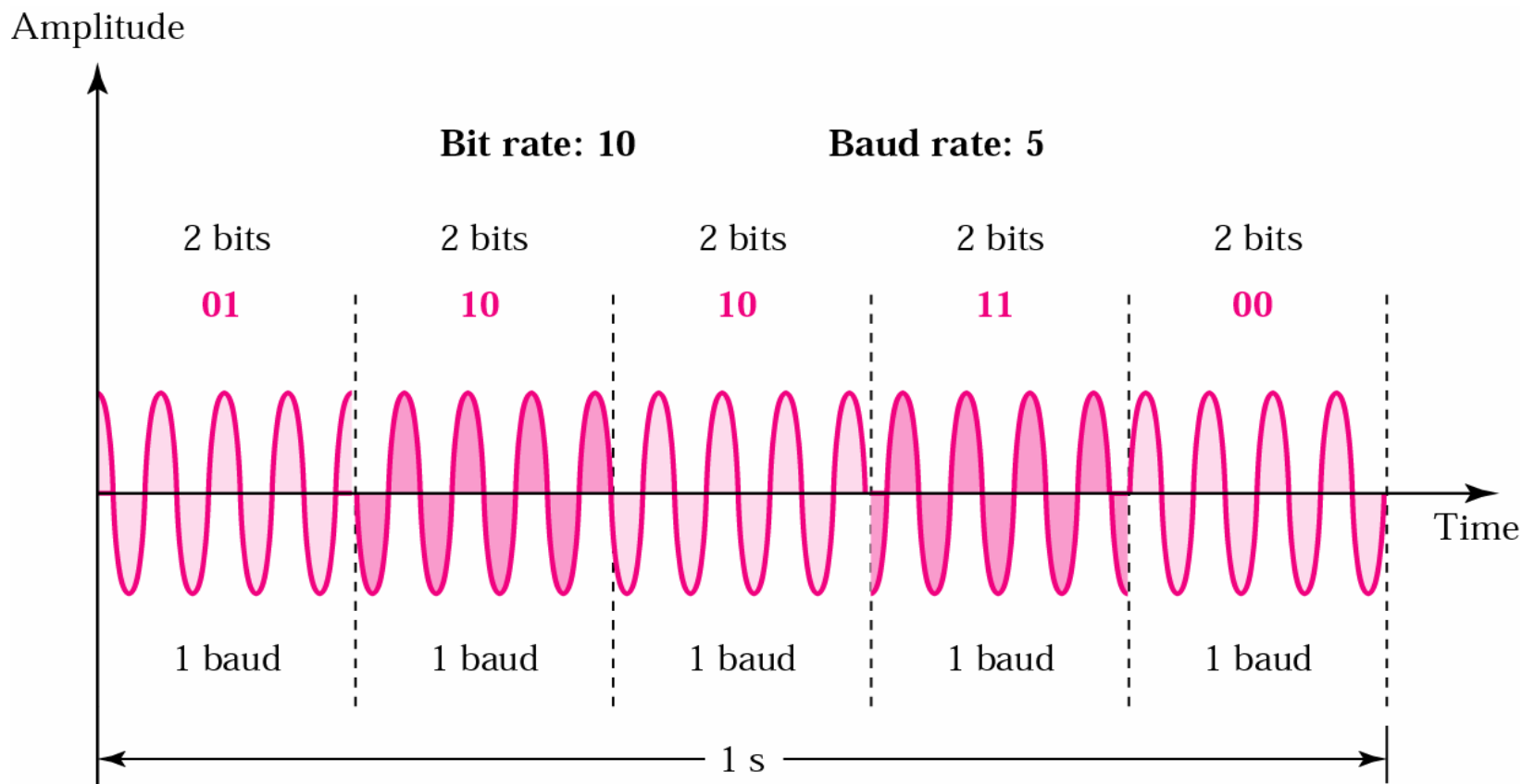


Constellation diagram



Constellation Diagram (II)

รูปด้านล่างแสดงตัวอย่างของ PSK ชนิด Dibit ซึ่งสามารถแทนสัญลักษณ์ได้ 2 บิต (4 รูปแบบ) ต่อ 1 หน่วยสัญญาณ ซึ่งจะได้ว่า $\text{Baud Rate} = 2 \times \text{Bit Rate}$

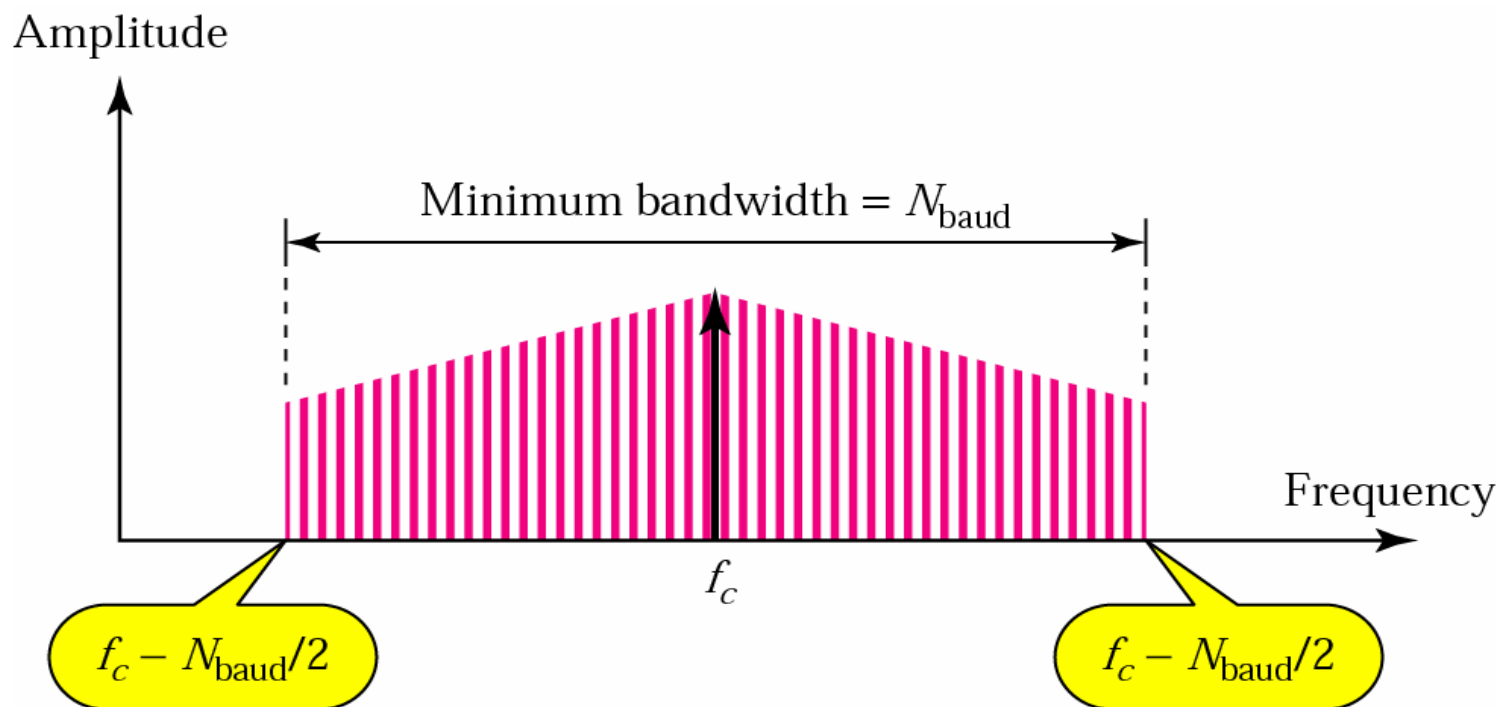




PSK Bandwidth

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

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





Examples

Find the minimum bandwidth for an FSK signal transmitting at 3000 bps. Transmission is in **half-duplex** mode, and the carriers are separated by 3000 Hz.

$$BW = \text{baud rate} + (f_{c1} - f_{c0})$$

$$BW = \text{bit rate} + (f_{c1} - f_{c0}) = 2000 + 3000 = 5000 \text{ Hz}$$

Ans 5000 Hz

Find the maximum bit rates for an FSK signal if the bandwidth of the medium is 12,000 Hz and the difference between the two carriers is 2000 Hz. Transmission is in **full-duplex** mode.

$$BW = \text{baud rate} + (f_{c1} - f_{c0})$$

$$\text{Baud rate} = BW - (f_{c1} - f_{c0}) = 6000 - 2000 = 4000$$

Ans 4000 bps



Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

ข้อเสียของ PSK ได้แก่ การออกแบบอุปกรณ์ที่สามารถจำแนกความแตกต่างของเฟสจำนวนมาก **ทำได้ลำบาก**

“เสนอให้ใช้ Modulation หลายวิธีรวมกัน เพื่อประสิทธิภาพสูงสุด”

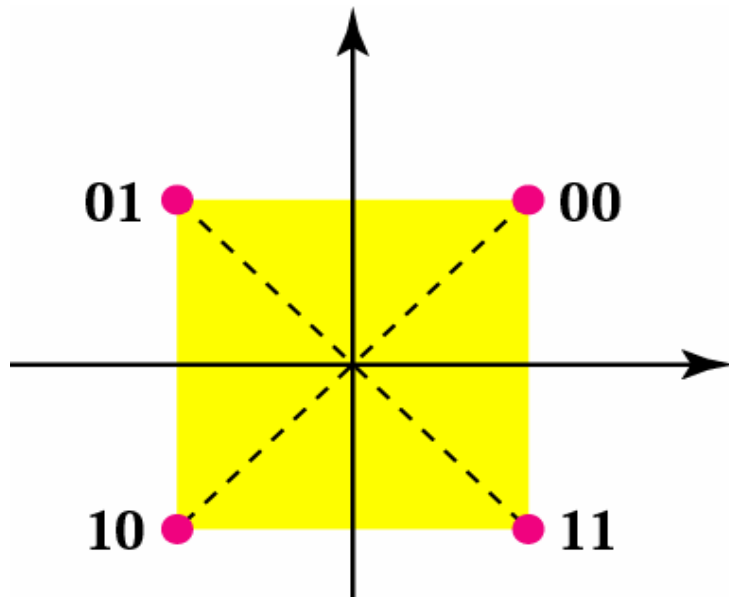
ข้อเสียของ FSK เนื่องจากเงื่อนไขจำกัดทาง Bandwidth จึงไม่สามารถใช้ร่วมกับ Modulation วิธีอื่นได้

วิธีที่เหมาะสม คือ การใช้ **ASK** ที่มีความแตกต่าง **x กรณี** ร่วมกับ **PSK** ที่มีความแตกต่าง **y กรณี** ดังนั้น ความแตกต่างทั้งหมดที่เป็นไปได้จึงเท่ากับ x คูณ y กรณี เรียกวิธีการ Modulation แบบนี้ว่า **Quadrature Amplitude Modulation** ซึ่งทำให้ความแตกต่างระหว่าง Symbol มีมากที่สุด → **แยกแยะง่าย**

ดังนั้นจำนวนบิตของสัญลักษณ์ที่เป็นไปได้จึงเท่ากับ $\log_2 (x \times y)$ บิต

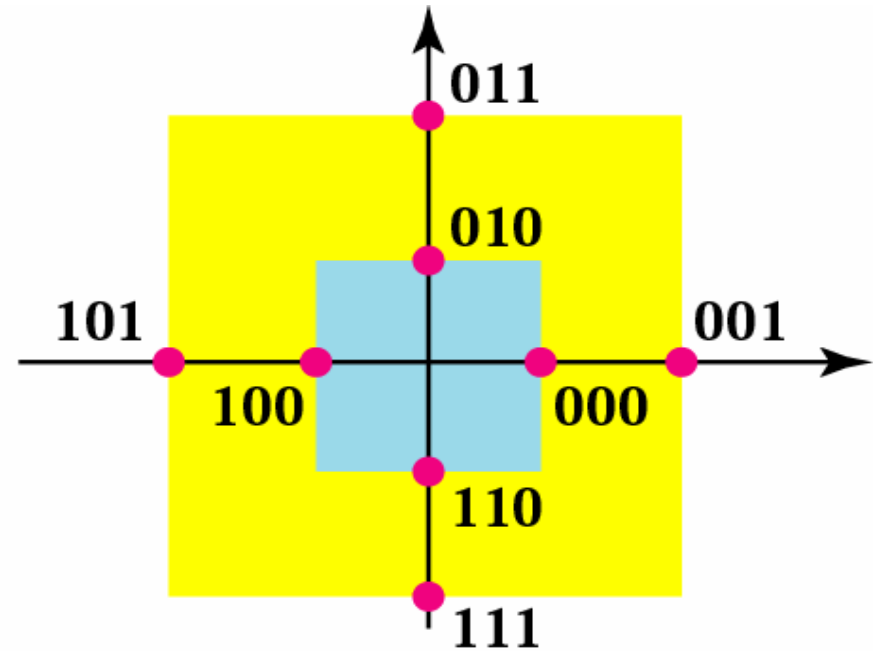
QAM Constellation

การรวม PSK กับ ASK ด้วยวิธี QAM ทำได้หลายรูปแบบ แต่วิธีที่นิยมใช้ ได้แก่ QAM ที่มี **จำนวน Amplitude Shift น้อยกว่า Phase Shift** เนื่องจาก **Phase มีความต้านทานต่อสัญญาณรบกวนมากกว่า Amplitude**



4-QAM

1 amplitude, 4 phases



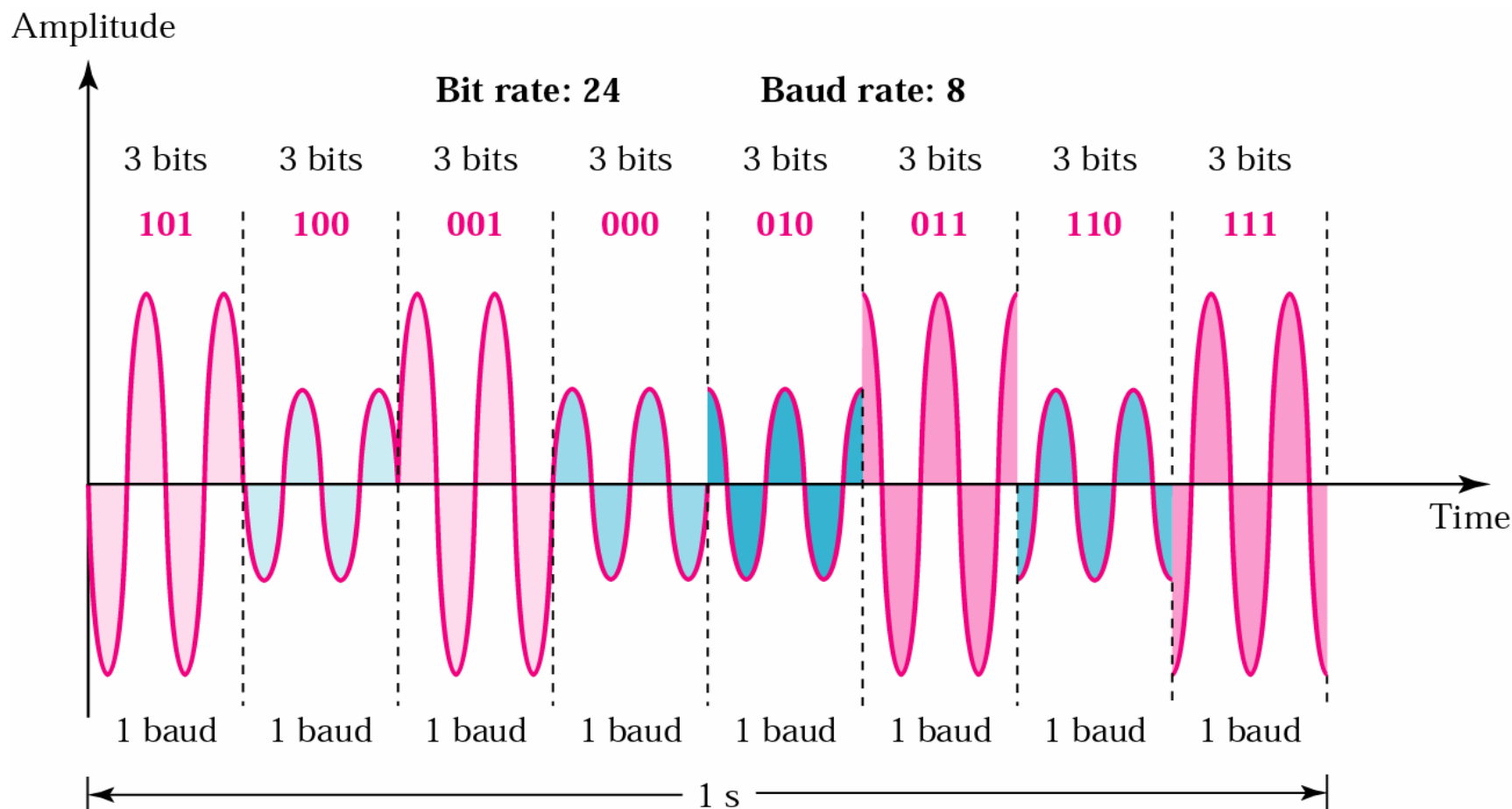
8-QAM

2 amplitudes, 4 phases



Time Domain QAM

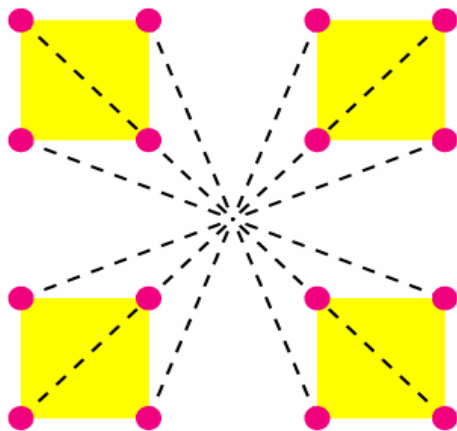
ตัวอย่าง TD Plot สำหรับ 8-QAM แสดงดังรูป



16-QAM Constellation

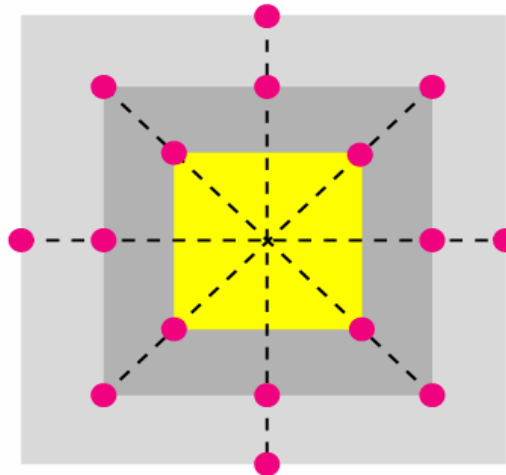
- **3A/12P** ทนต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุด เพราะอัตราส่วน P/A สูง (ITU-T)
- **4A/ 8P** จำแนกความแตกต่างระหว่างสัญญาณได้ดี การออกแบบอุปกรณ์จึงสามารถทำได้ง่าย เนื่องจากแต่ละค่า A มี P เพียง 4 รูปแบบ (OSI)
- **2A/ 8P** QAM ธรรมดา

3 amplitudes, 12 phases



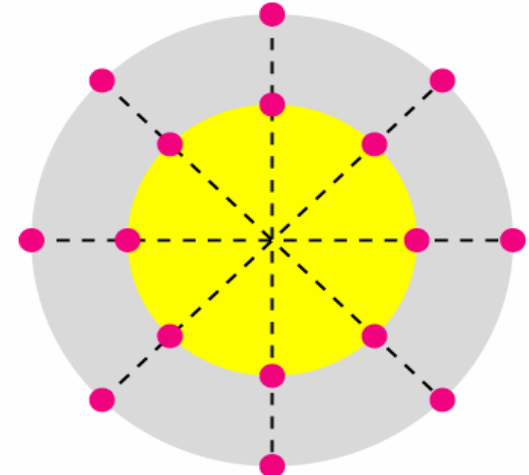
16-QAM

4 amplitudes, 8 phases



16-QAM

2 amplitudes, 8 phases

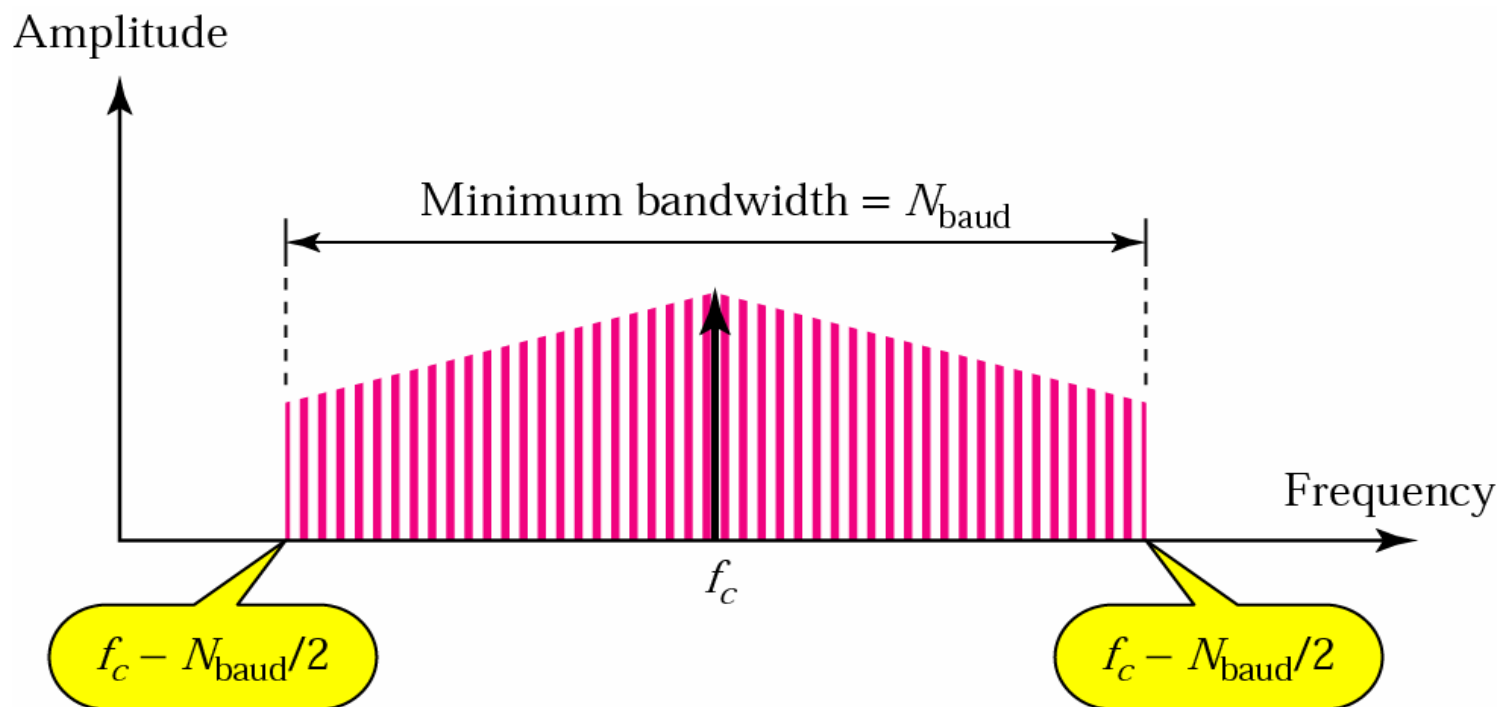


16-QAM

QAM Bandwidth

แถบความถี่ของ QAM เท่ากับ PSK และเท่ากับ ASK (เมื่อส่งด้วยอัตรา Baud เท่ากัน) แต่ Bit Rate ของ QAM จะมากกว่าหรือเท่ากับ ASK เสมอ

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





Bit and Baud Rates (I)

Bit

Baud rate = N

Bit rate = N

0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Dibit

Baud rate = N

Bit rate = $2N$

0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Tribit

Baud rate = N

Bit rate = $3N$

0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Quadbit

Baud rate = N

Bit rate = $4N$

0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---



Bit and Baud Rates (II)

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)



Examples

- กำหนดแผนผัง Constellation ประกอบด้วย จุด ที่มีระยะห่างเท่าๆ กัน 8 จุด
รอบวงกลม ถ้า Bit Rate เท่ากับ 4 800 bps จงหา Baud Rate

Constellation ที่โจทย์กำหนดคือ 8-PSK
ดังนั้น $1 \text{ Symbol} = \log_2 8 = 3 \text{ bits}$

Ans Baud Rate เท่ากับ $4\,800 / 3 = 1\,600 \text{ Baud}$

- คำนวณ Bit Rate สำหรับ 1000 Baud ในสัญญาณ 16-QAM

$1 \text{ Symbol} = \log_2 16 = 4 \text{ bits}$

Ans Bit Rate เท่ากับ $1\,000 \times 4 = 4\,000 \text{ bps}$

- คำนวณ Baud Rate สำหรับ 72 kbps ในสัญญาณ 64-QAM

$1 \text{ Symbol} = \log_2 64 = 6 \text{ bits}$

Ans Baud Rate เท่ากับ $72\,000 / 6 = 12 \text{ kBaud}$



Conclusions

- Modulations of Digital Data
 - Digital to Analog Conversions
 - ASK, FSK, PSK and QAM Techniques
 - Bit and Baud Comparison
- Telephone Modems
 - Modem Standards
- Modulation of Analog Signals
 - Amplitude Modulation (AM)
 - Frequency Modulation (FM)
 - Phase Modulation (PM)
- Summary