

通信とネットワーク (Communication and Network)

第6回, 第7回：通信方式

概要

- アナログ通信
- デジタル通信
 - － ベースバンド方式
 - － デジタル変調方式

1 アナログ変調

- **変調**：伝送したい信号 $s(t)$ を変換してから送る。
- 目的：
 - － 電波(無線通信)を使うためには、アンテナの大きさの制限のために、周波数を高くする必要がある。
 - － 多重化：一つのケーブルに多数の信号を伝送する。
- 搬送波：信号を変換するときに基準とする正弦波

$$A \cos(2\pi f_c t + \phi)$$

f_c ：搬送波の周波数

- 代表的な変調方式
 - － 振幅変調 (**AM**, Amplitude Modulation)：搬送波の振幅を変化させる。
 - － 周波数変調 (**FM**, Frequency Modulation)：
搬送波の周波数を変化させる。
 - － 位相変調 (**PM**, Phase Modulation)：搬送波の位相を変化させる。
- 復調：変調された信号からもとの信号を取り出す。

1.1 AM

- $s(t)$: 送る信号
- **変調波** :

$$A(\alpha s(t) + 1) \cos 2\pi f_c t$$

A, α : 定数

- 簡単のため, 送る信号を次の正弦波とする。

$$s(t) = \cos 2\pi f t$$

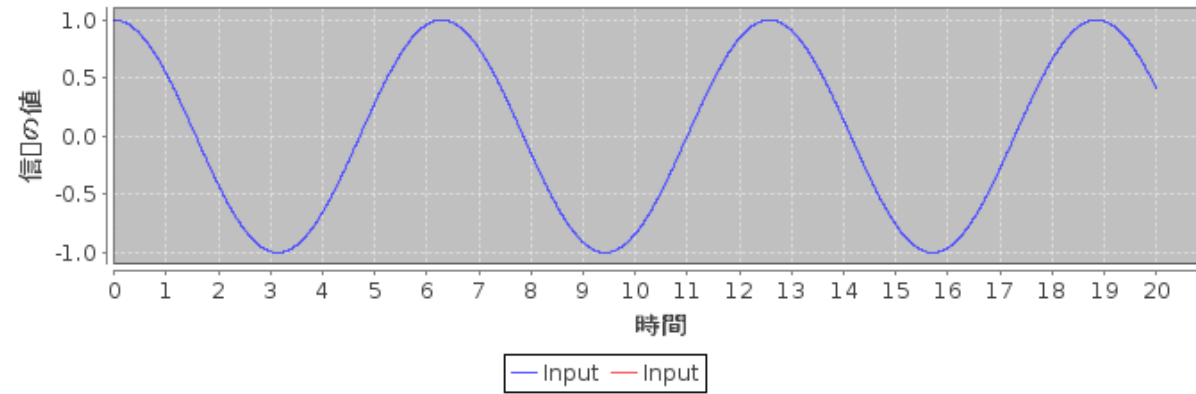
- 送る信号の周波数は, 搬送波の周波数に比べて十分低いものとする ($f \ll f_c$)。振幅変調された信号は(簡単のため $A = \alpha = 1$ とする),

$$\begin{aligned} & (\alpha \cos 2\pi f t + 1) \cos 2\pi f_c t \\ &= \frac{\alpha}{2} \{ \cos 2\pi(f_c + f)t + \cos 2\pi(f_c - f)t \} + \cos 2\pi f_c t \end{aligned}$$

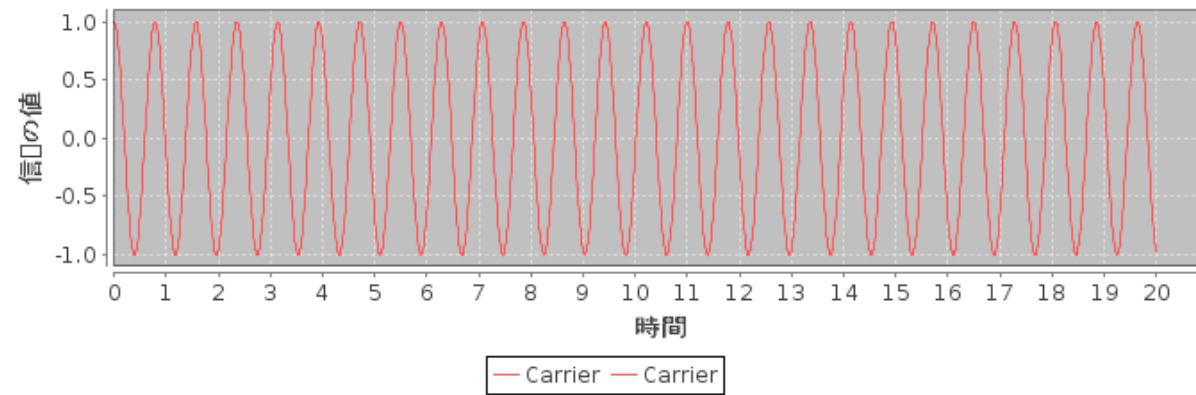
- **3つの周波数の正弦波の和**になっている。

$$f_c - f, \quad f_c, \quad f_c + f$$

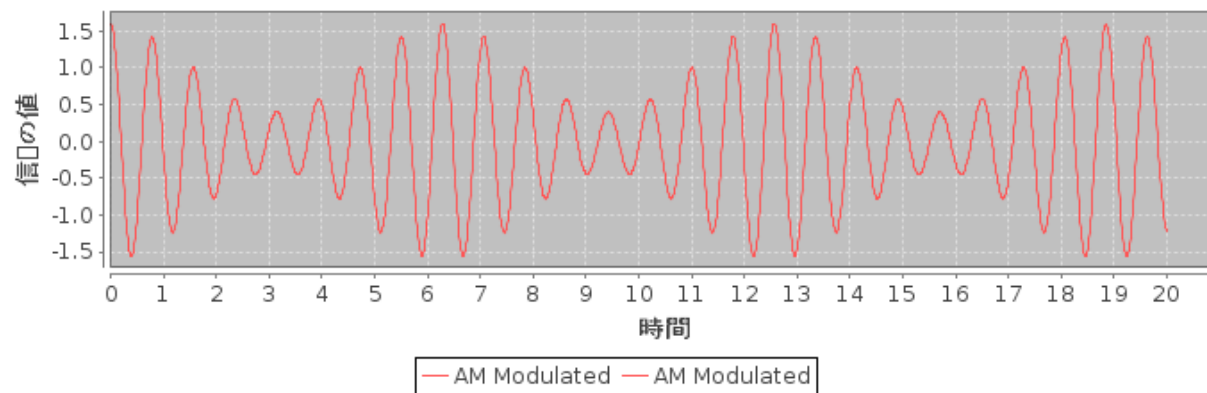
Input



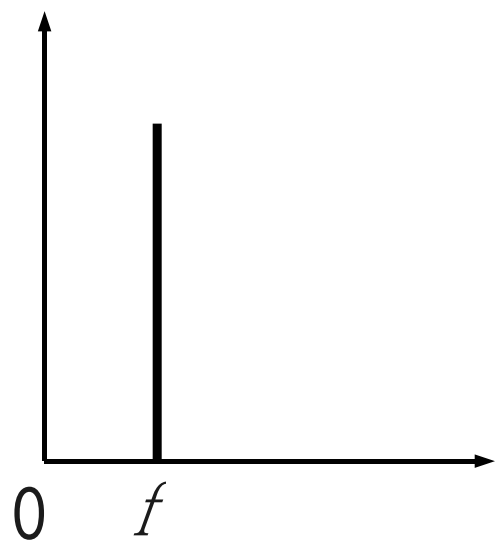
Carrier



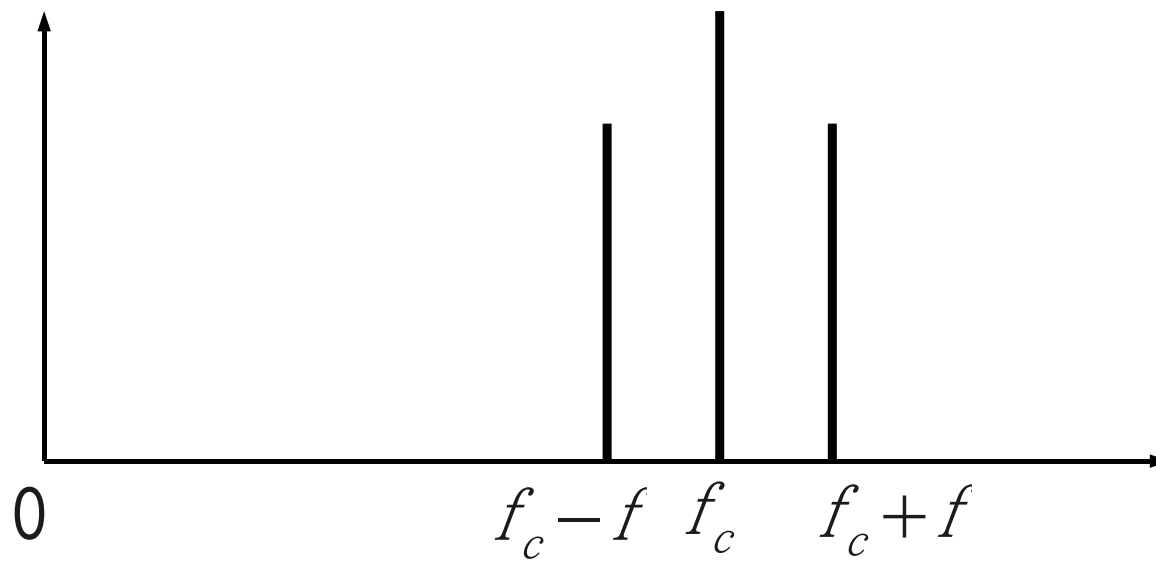
AM



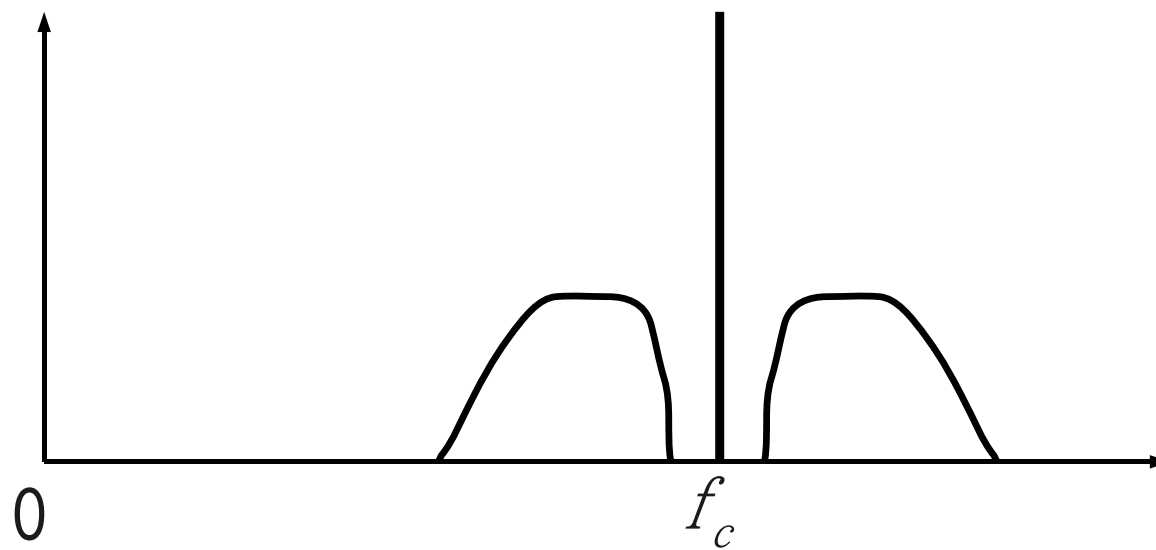
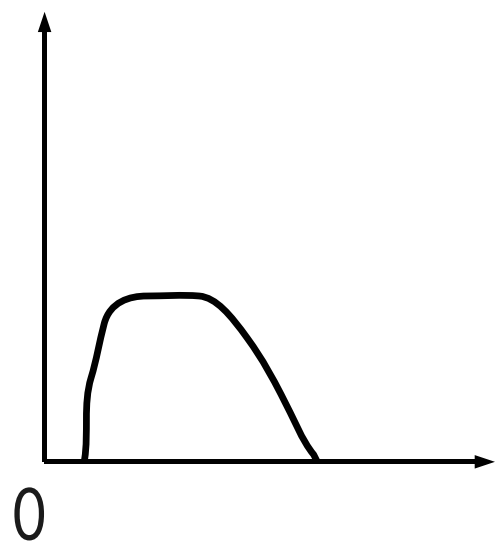
- 実際の信号 $s(t)$ は、周波数が広がっている。 **基底帯域 (baseband)**
例：可聴周波数 (20Hz~20kHz 程度),
アナログテレビ (幅で 5.6MHz 程度)
- AM 変調信号は、3つの周波数帯域に分かれる。
下側波帯, 搬送波, 上側波帯
- これら全てを送らなくても、信号が復元できる。
- 両側波帯 (DSB: Double Side Band)：搬送波を消去して伝送する。
電力効率の向上のため
- **単側波帯 (SSB: Single Side Band)**：下側波帯 or 上側波帯だけを送る。
周波数の利用効率が高まる。
電話のケーブルによるアナログ伝送では、SSBが使われていた。
アマチュア無線の短波帯の通信で使われている。



原信号



変調された信号



1.2 FM

周波数変調された信号： $s(t)$ に応じて周波数が変化する。

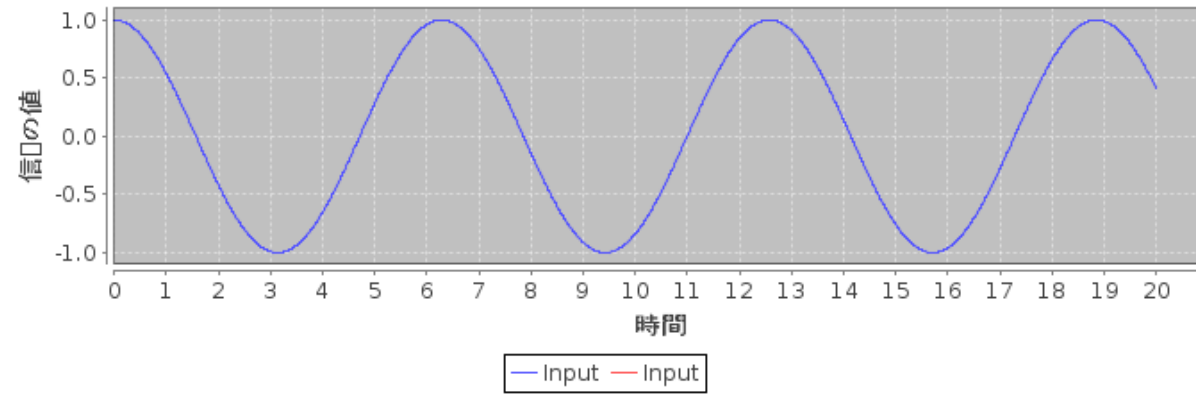
$$A \cos 2\pi \left(f_c t + \alpha \int^t s(\tau) d\tau \right) \simeq A \cos 2\pi (f_c + \alpha s(t)) t$$

1.3 PM

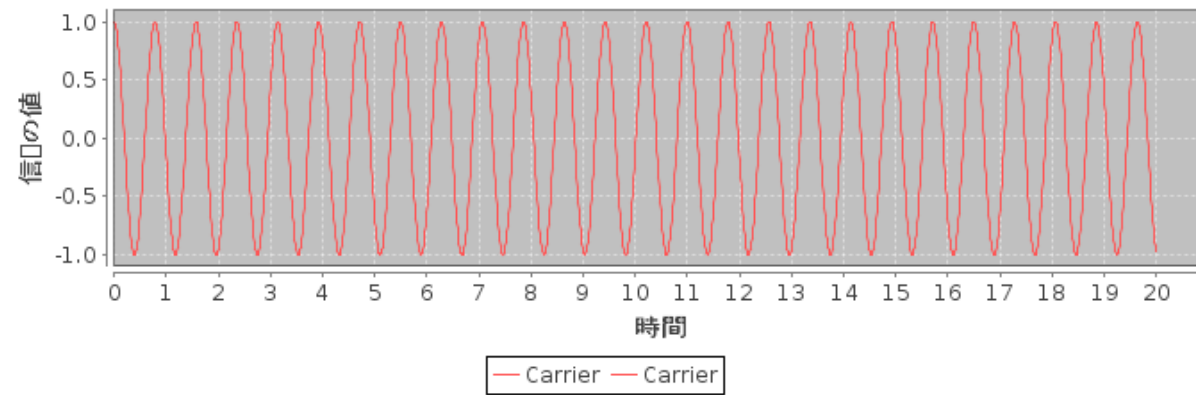
位相変調された信号： $s(t)$ に応じて位相が変化する。

$$A \cos 2\pi (f_c t + \alpha s(t))$$

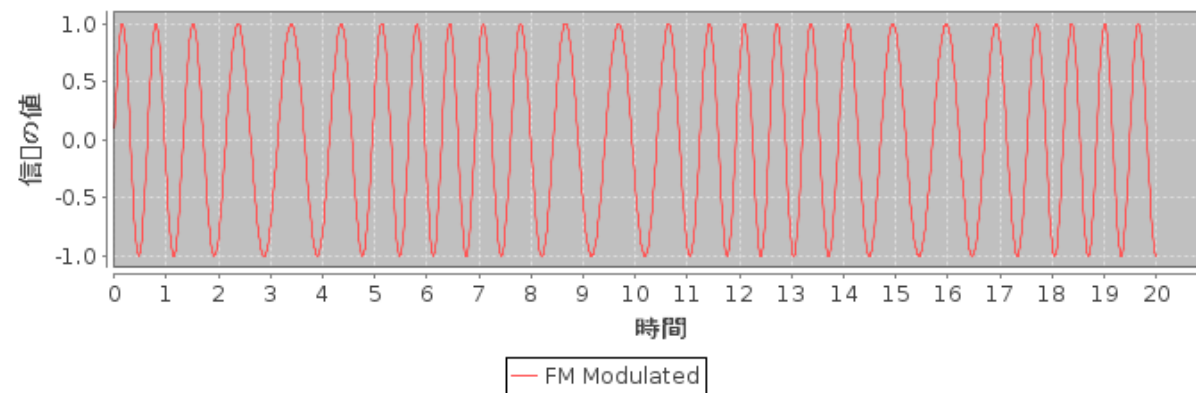
Input



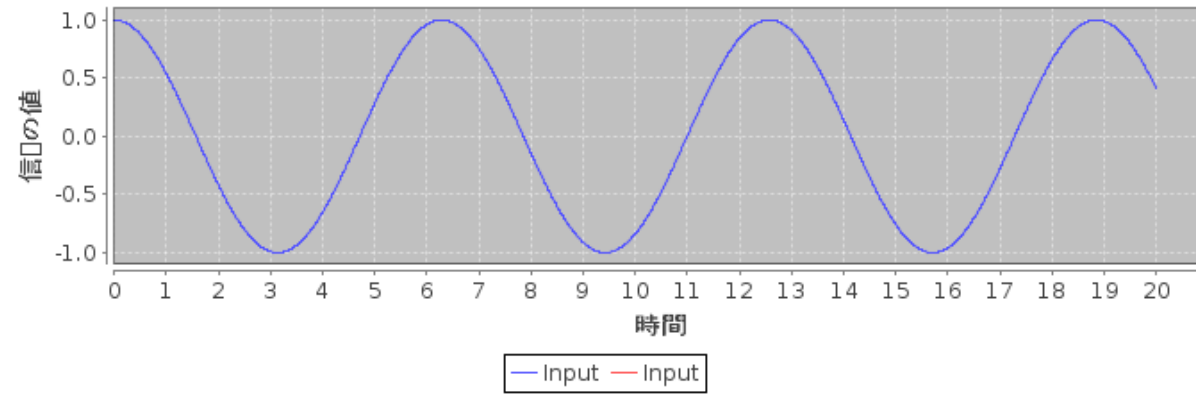
Carrier



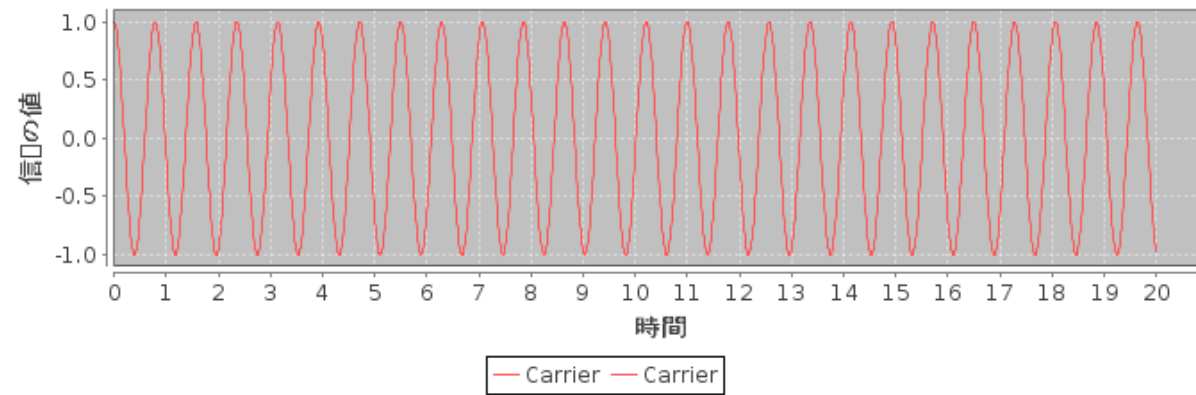
FM



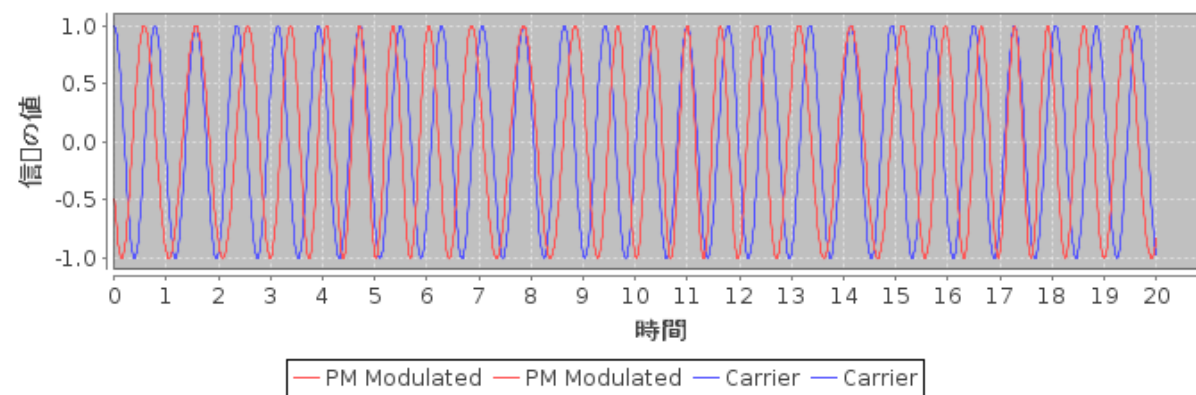
Input



Carrier



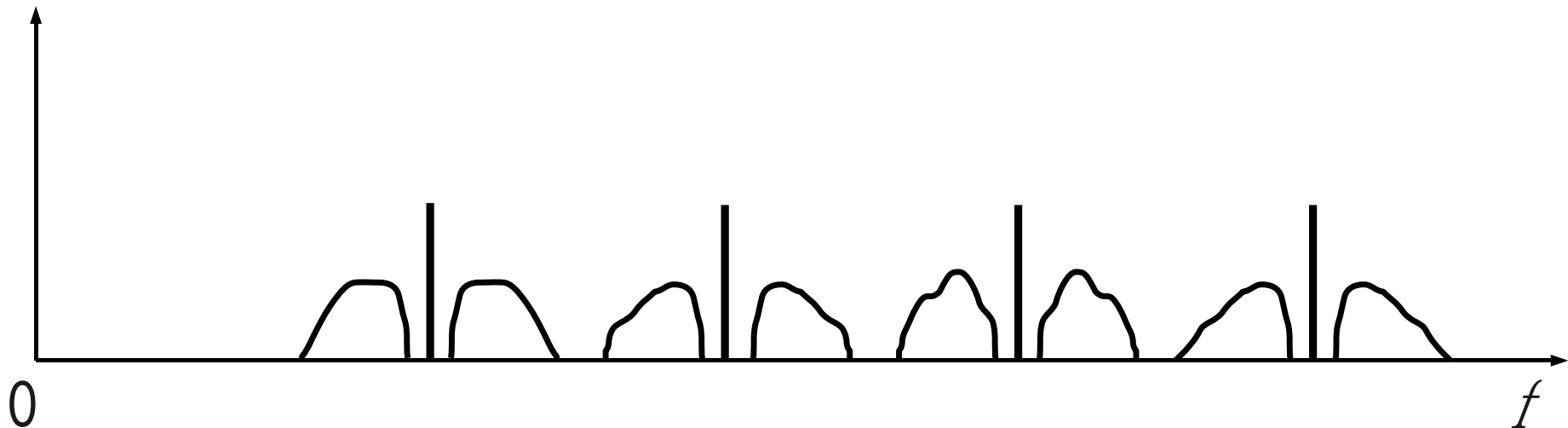
PM

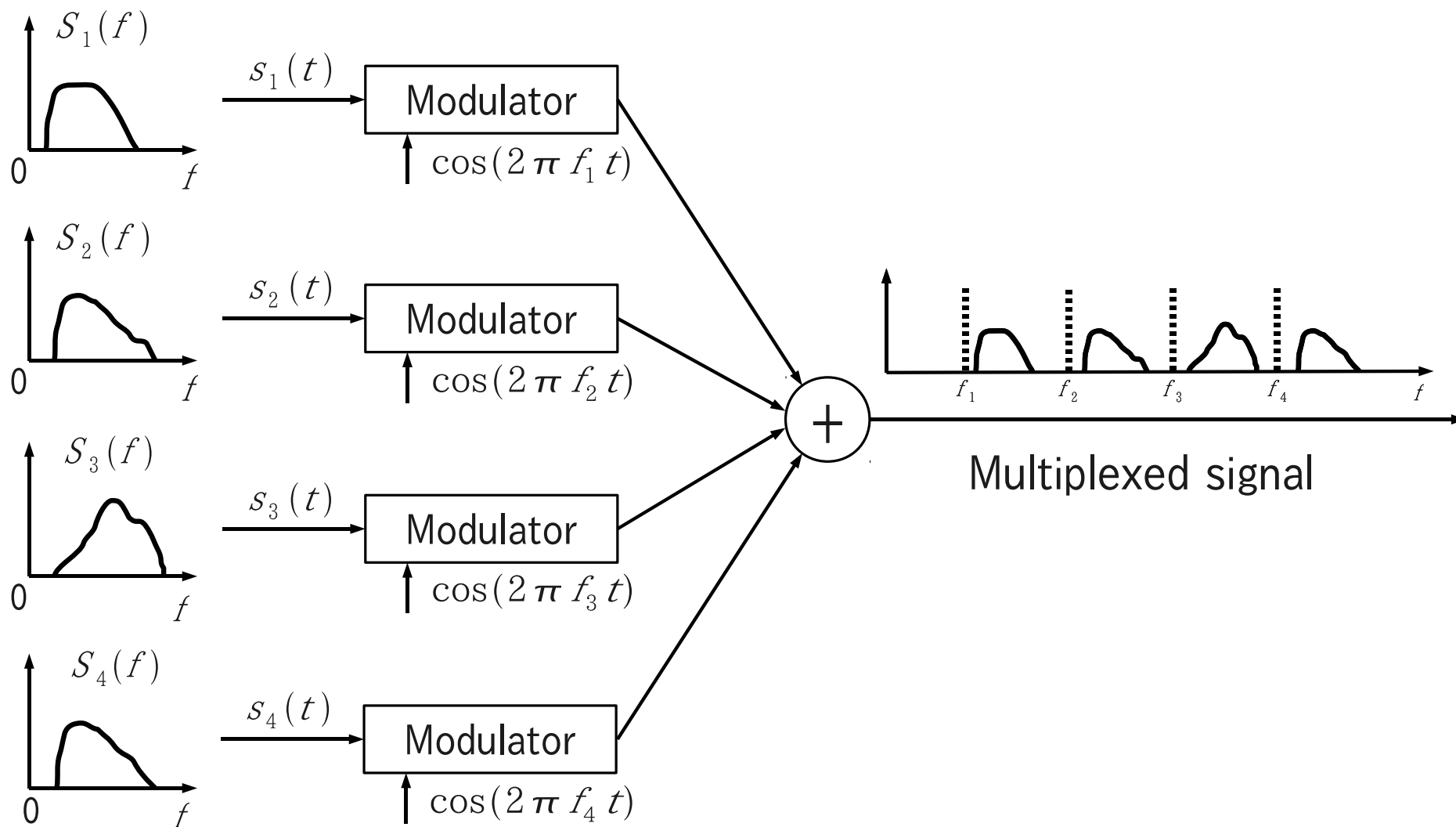


1.4 多重化

● 周波数分割多重

- 周波数の異なる搬送波を用いて、1つの信号路に多数の信号を送る。
- 受信側では、バンドパス(帯域通過型)フィルタを用いて、搬送波ごとに信号を分けて、それぞれを復調する。
- **チャネル**：多重化された伝送路は、仮想的に複数の伝送路があるものと見なすことができる。その仮想的な1つの伝送路のこと。
- **多重化装置**





(SSBによって変調)

1.5 標本化定理

1.5.1 フーリエ級数 (複素数表示)

$-L \leq t \leq L$ で定義される信号 (関数) を考える。

$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ に対して,

$$e_n(t) = e^{\frac{2\pi i n}{2L}t} = \cos\left(\frac{2\pi n}{2L}t\right) + i \sin\left(\frac{2\pi n}{2L}t\right)$$

を考える。

内積を次のように定義すると, e_n は正規直交基底になる。

$$\langle \boldsymbol{f}, \boldsymbol{g} \rangle = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f(t) \overline{g(t)} dt$$

同じ $e_n(t)$ どうしの内積は,

$$\langle e_n, e_n \rangle = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L e^{\frac{2\pi i n}{2L}t} \overline{e^{\frac{2\pi i n}{2L}t}} dt = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L dt = 1$$

$m \neq n$ ならば,

$$\begin{aligned}\langle \mathbf{e}_m, \mathbf{e}_n \rangle &= \frac{1}{2L} \int_{-L}^L \overline{e^{\frac{\pi i m}{L} t}} e^{\frac{\pi i n}{L} t} dt = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L e^{\frac{2\pi i (-m+n)}{2L} t} dt \\ &= \frac{1}{2\pi i (m-n)} \left[e^{\frac{2\pi i (m-n)}{2L} t} \right]_{-L}^L = 0\end{aligned}$$

$-L \leq t \leq L$ で定義される信号 $g(t)$ に対して,

$$c_n = \langle \mathbf{g}, \mathbf{e}_n \rangle = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L g(t) \overline{e^{\frac{2\pi i n}{2L} t}} dt = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L g(t) e^{\frac{-2\pi i n}{2L} t} dt$$

とおく $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。このとき,

$$g(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{\frac{2\pi i n}{2L} t}$$

が成立する。

1.5.2 フーリエ変換

フーリエ級数展開は、原信号が有限区間 $[-L, L]$ 、または周期 $2L$ の周期関数($g(t) = g(t - 2L)$)であるときに使うことができる。

フーリエ変換は、信号が区間が $(-\infty, \infty)$ の場合を扱う。

一般に、 $(-\infty, \infty)$ で定義された関数 $h(f)$ に対して、 $L \rightarrow \infty$ とすれば、次式が成立する。

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} h\left(\frac{n}{2L}\right) \frac{1}{2L} \rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} h(f) df \quad (L \rightarrow \infty)$$

このとき、

$$f = \frac{n}{2L}$$

と考えている。

フーリエ級数展開と逆変換を複素数で表現して、 $f = n/2L$ とすれば、

$$\begin{aligned} g(t) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{2L} \int_{-L}^L g(\tau) e^{\frac{-\pi i n}{L} \tau} d\tau \right) e^{\frac{\pi i n}{L} t} \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\int_{-L}^L g(\tau) e^{-2\pi i \tau (\frac{n}{2L})} d\tau \right) e^{2\pi i t (\frac{n}{2L})} \frac{1}{2L} \\ &\rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \right) e^{2\pi i f t} df \quad (L \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

となる。2つの式に分ければ、次式が成立する。

$$\begin{aligned} G(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \\ g(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{2\pi i f t} df \end{aligned}$$

この2つの式が、フーリエ変換と逆フーリエ変換を表している。 f は周波数である。信号を連続的な周波数をもつ正弦・余弦波成分に分解している。

パルス変調：離散的な時間上の信号を使って信号を伝送する。

帯域制限：信号 $x(t)$ をフーリエ変換したものを $X(f)$ おくとき，ある数 M が存在して，

$$X(f) = 0 \quad (|f| \geq M)$$

となること。

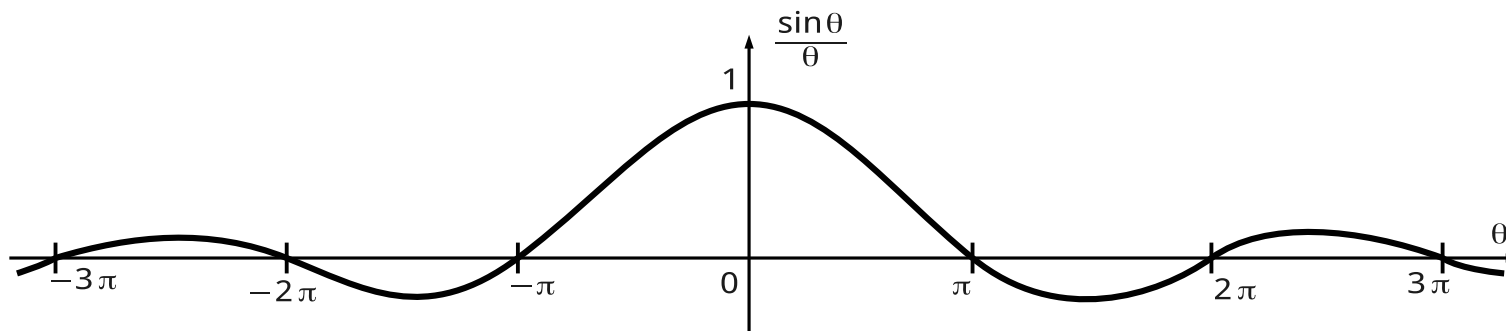
信号 $x(t)$ 信号が M で帯域制限されているとき，

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT) \operatorname{sinc} \left(\frac{\pi(t - nT)}{T} \right)$$

が成立する。 $(T \leq 1/(2M))$

● sinc関数：

$$\operatorname{sinc}(\theta) = \frac{\sin \theta}{\theta}$$



- $t = nT$ という離散時間における信号値 $x(nT)$ から，もとの連続時間の信号を完全に復元することができる。
- T ：サンプリング間隔
- $1/(2T)$ ：ナイキスト周波数
- サンプリング定理：「信号をサンプリングしたとき，その信号がナイキスト周波数で帯域制限れていれば，もとの信号を復元することができる。」
- **折返し歪み (aliasing)**：ナイキスト周波数より高い周波数成分をもつ信号をサンプリングし，復元したとき，もとの周波数の高周波成分が低周波成分となって現れること。
- C.E.Shannon の標本化定理 (1949) と呼ばれる。
- 数学的にはかなり前から分かっていた。
- 染谷勲もほぼ同時期に明らかにしていた。
- V.A.Kotelnikov (ソ連) は，1932年に発表していた。

(標本化定理の証明)

信号 $x(t)$ が、周波数 M で帯域制限されているものとする。一般に、フーリエ変換と逆フーリエ変換は次式で与えられる。

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-2\pi i f t} dt$$
$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{2\pi i f t} df$$

いま、 $f \leq -M$, $f \geq M$ で $X(f) = 0$ となる。これをフーリエ級数展開すると、

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{\frac{2\pi i}{2M} n f} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{2\pi i T n f}$$

と書くことができる ($T = 1/(2M)$)。

信号を周波数で表した $X(f)$ を、フーリエ級数展開している。

a_n は,

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{2M} \int_{-M}^M X(f) e^{-\frac{2\pi i}{2M} n f} df \\ &= T \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{-2\pi i T n f} df \\ &= T \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{2\pi i (-T n) f} df \\ &= T x(-T n) \end{aligned}$$

となる。従って、 $|f| \leq M$ で,

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} T x(-T n) e^{2\pi i T n f}$$

となる。これを使えば、次ページのようにして、標本化定理が証明できる。

$$\begin{aligned}
x(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{2\pi i f t} df = \int_{-M}^M X(f) e^{2\pi i f t} df \\
&= \int_{-M}^M \sum_{n=-\infty}^{\infty} T x(-Tn) e^{2\pi i T n f} e^{2\pi i f t} df \\
&= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(-Tn) T \int_{-M}^M e^{2\pi i (t+Tn) f} df \\
&= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(Tn) T \int_{-M}^M e^{2\pi i (t-Tn) f} df \\
&= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(Tn) \frac{\sin\left(\frac{\pi}{T}(t - nT)\right)}{\frac{\pi}{T}(t - nT)} \\
&= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(Tn) \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi}{T}(t - nT)\right)
\end{aligned}$$

1.6 アナログパルス変調方式

- アナログ信号を離散的なパルスに変換して，伝送すること。
- 信号の大きさ自体は，アナログ的に表している。
- **パルス振幅変調** (PAM : Pulse Amplitude Modulation)
信号に応じてパルスの高さを変化
- **パルス幅変調** (PWM : Pulse Width Modulation)
信号に応じてパルスの幅を変化
- **パルス位置変調** (PPM : Pulse Position Modulation)
信号に応じてパルスの基準からの位置を変化
- **パルス周波数変調** (PFM : Pulse Frequency Modulation)
信号に応じてパルスの密度を変化

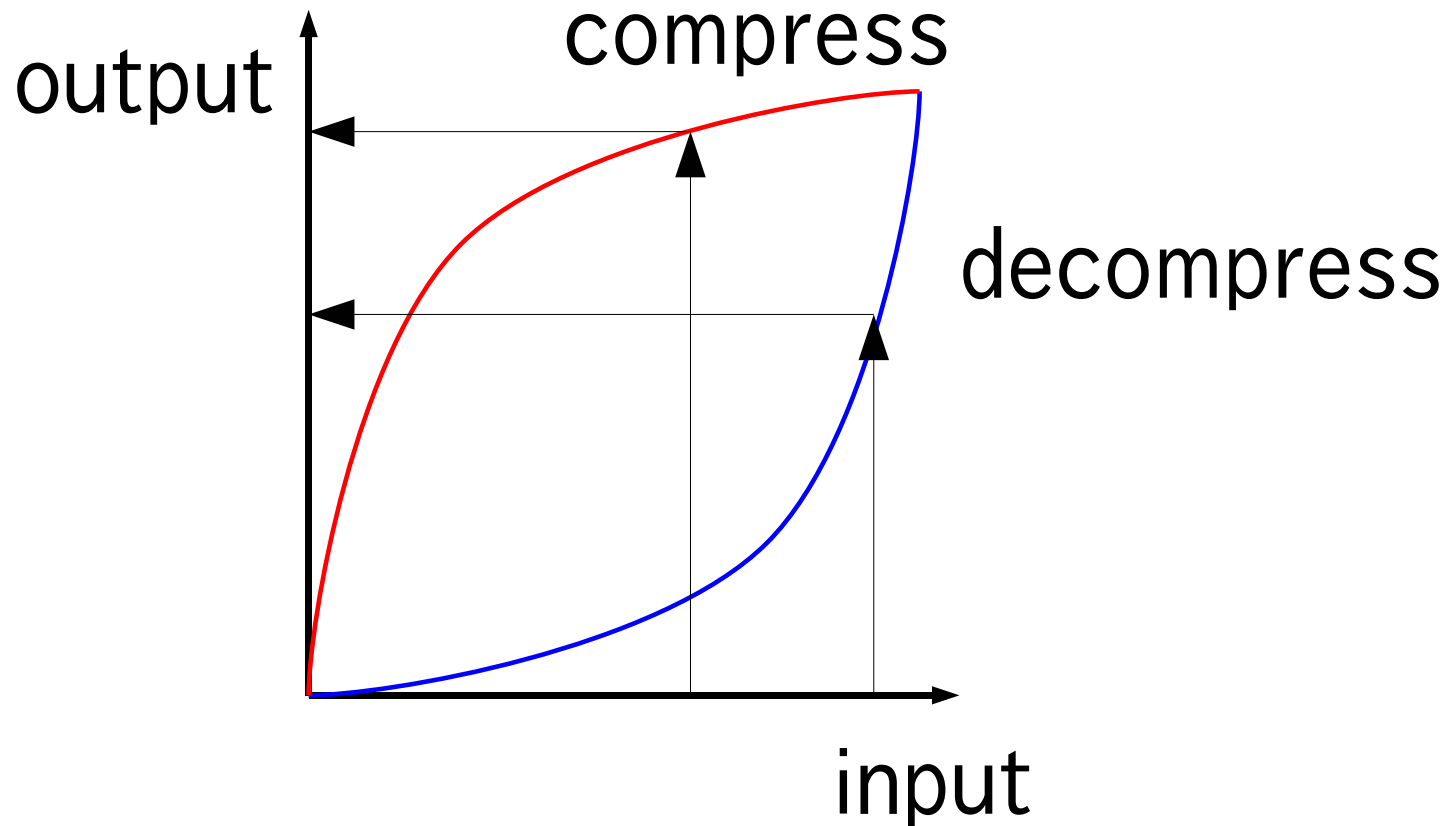
余談：パルス技術は，第二次世界大戦中のレーダの研究で進歩した。
最近は，アナログパルス変調方式を通信に使われるところを見たことがない。

1.7 デジタルパルス変調方式

- **アナログデジタル変換** (Analog Digital Conversion, ADC)
 - 連続値を離散値に変換する。
 - とびとびの値しかとらなくなるため、量子化とも呼ばれる。
 - **先の「標本化」は時間の離散化**
一般に信号は連続時間・連続値である。
⇒ **標本化してから量子化する。**
 - 量子化誤差, 量子化雑音:
量子化されることによって生じる, 連続値との差
線形量子化の場合, 量子化誤差は**最大で量子化幅の1/2**
 - 量子化誤差の例:
デジタルテレビの偽輪郭(8bit, 256階調に量子化されているため)。
CD (16bit, 65536値)で音が悪いという人もいるけれど?

- **デジタルアナログ変換** (Digital Analog Conversion, DAC)
 - ー 離散値を連続値に変換する。
 - ー 量子化幅を乗算する。
 - ー (グラフィックカードの仕様で, 350MHzなどと書いてあったりする)
- **デジタルパルス変調方式** : 量子化された離散値を変調する。
 - ー **パルス数変調** (PNM : Pulse Number Modulation)
離散値をパルスの個数に変換する。
 - ー **パルス符号変調** (PCM : Pulse Code Modulation)
離散値を符号化する。(2進数にするなど)
- **非線形量子化** :
 - ー 音響信号などの場合, 信号の値が大きいときは誤差が大きくなって
も, 人間にはわかりにくい。
 - ー 信号の大きさなどによって, 量子化幅を変更する。
 - ー アナログの段階で信号の値が大きいところで圧縮してから(圧縮器),
線形量子化を行い, 逆量子化したあと, 伸張させる(伸張器)。

μ -law



- **DPCM (Differential PCM)** :
信号そのものでなく前の値との**差分**を送る。
⇒ 一般化すると**予測符号化** (Predict coding) になる。
- **ADPCM (Addaptive DPCM)** :
ステップ幅を信号の大きさによって変更する。

2 デジタル通信方式

- 伝送速度の単位：**bps** (bit per second)
1秒間に送ることができる bit 数 (0/1 の数)
- **ベースバンド方式, デジタル変調方式**

2.1 ベースバンド方式

- ベースバンド方式：
搬送波を使って変調するような変換を行うことなく伝送する。
- **伝送路符号**：伝送路に特性にあわせて符号化する。
 - ー 直流や極めて低い周波数の信号は送ることができない。
← 絶縁のため、信号路が**トランスで区切られている**。
 - ー 符号自体が**同期信号**(タイミングを取るため)を含ませる。
0や1が続くと、その0/1が送られた個数がわからなくなる。
 - ー 高周波帯域が小さい。
伝送路にキャパシタンス成分(コンデンサー)やリアクタンス成分(コイル)があるため。

- **ユニポーラ符号** (Unipolar code) : 0, 1 を使って伝送
 - RZ (Return-Zero) : 1が続くときも、一度0に戻る。
 - NRZ (Non-Return Zero) : 1が続くときは、0に戻らない。
- **ダイポーラ符号** (Dipolar code) : -1 or 0 or 1 を使って伝送 (RZ, NRZ)
- **バイポーラ符号** (Bipolar code) または AMI 符号 (Alternate Mark Inversion Code) : 入力が0のときは0, 1のときは -1 と $+1$ を交互にに出力する。
- **NRZI符号** (Non-Return Zero Inversion Code, 差分符号) : 入力が0のときは出力を $+1$ と -1 で変化させる。入力が1のときは出力を直前と同じにする。
- **ダイコード符号** (Dicode code) : 入力に変化しないときは0, 変化するときは -1 と $+1$ を交互に出力する。
- **デュオバイナリーコード符号** (Dicode code) : 入力が1に対しては出力を0とする。0に対しては、直前の0とはさまれている1の数が、偶数ならば直前の $+1/-1$ を同じものを、奇数ならばそれを反転したものを出力する。

- **バイフェーズ符号** (Biphase code) : 1から0へ変化する波形と0から1へ変化する波形に割り当てる。
 - ー **マンチェスター符号** (Manchester code) 入力の0を1から0へ変化する波形に, 入力の1を0から1へ変化する波形に割り当てる。
- **ブロック符号化** (Block code) : 1 bit ごとではなく, 入力の複数 bit を出力の複数 bit に割り当てる。
(出力の bit 数の方が長い)

伝送ビット列

0

1

1

0

1

0

ユニポーラ (NRZ)

ユニポーラ (RZ)

ダイポーラ (NRZ)

ダイポーラ (RZ)

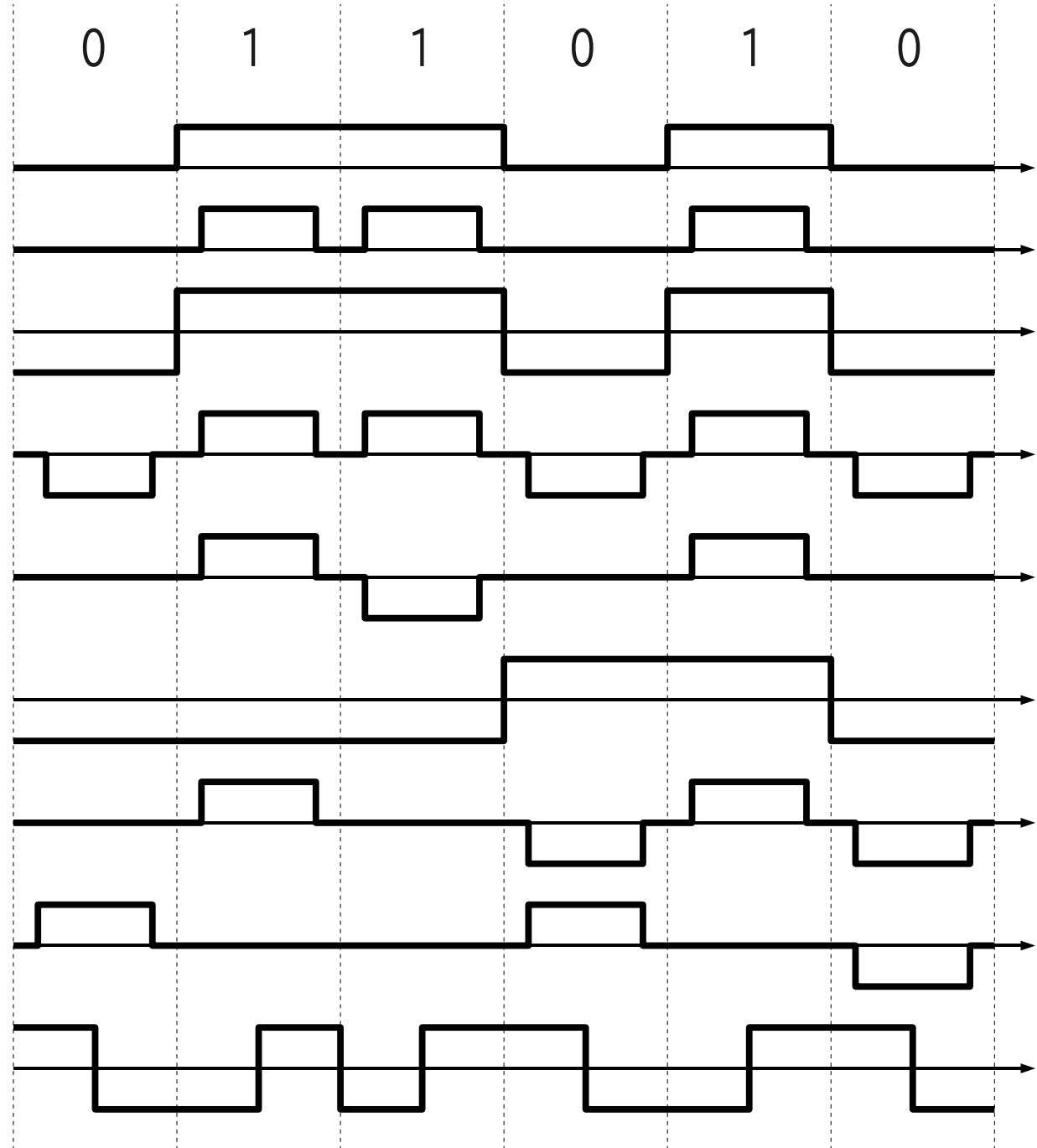
バイポーラ (RZ)

NRZI

ダイコード

デュオバイナリー

マンチェスタ符号



2.2 デジタル変調方式

- アナログ信号に変換して，情報を伝送する。
- **シフトキー方式** (shift keying)
 - デジタル信号の1bitあるいは複数bitの情報に対して，アナログ信号のシンボルを決める。
 - － ブロードバンド方式 (broadband communication) と呼ばれる。
理由：多数の搬送波を使って多重化できるため。
- **ASK** (Amplitude Shift Keying)：入力に応じて振幅を変える。
 - － **OOK** (On-Off Keying)：搬送波があるかないか

$$S_{\text{ASK}}(t) = \begin{cases} 0 & \text{for } 0 \\ A \sin 2\pi f_c t & \text{for } 1 \end{cases}$$

- **FSK** (Frequency Shift Keying)：入力に応じて周波数を変化させる。

$$S_{\text{FSK}}(t) = \begin{cases} A \sin 2\pi f_0 t & \text{for } 0 \\ A \sin 2\pi f_1 t & \text{for } 1 \end{cases}$$

- **変調指数** (Modulation index)

$$m = |f_0 - f_1| \times T$$

- **MSK** (Minimum Shift Keying) : f_0 と f_1 の周波数の差を最小とする。
復号を可能にするために、2種類の信号を直交させる。

$$\int_0^T \sin 2\pi f_0 t \sin 2\pi f_1 t dt = 0$$

より、0でない整数 n に対して、 $2\pi(f_0 - f_1)T = n\pi$ となる。

- 最小の周波数の差は、 $m = 0.5$ のときに達成される。

$$\sin 2\pi f_0 t \sin 2\pi f_1 t = \frac{1}{2} (-\cos 2\pi(f_0 + f_1)t + \cos 2\pi(f_0 - f_1)t)$$

となる。第1項は高周波成分で、フィルタなどにより除去できるので、第2項の積分が0になれば良い。

$$\int_0^T \frac{1}{2} \cos 2\pi(f_0 - f_1)t dt = \frac{\sin 2\pi(f_0 - f_1)T}{4\pi(f_0 - f_1)} = \frac{T}{2} \text{sinc} 2\pi(f_0 - f_1)T$$

となる。この積分が0になるときは、sinc関数のグラフから、0でない整数 n に対して、 $2\pi(f_0 - f_1)T = n\pi$ である。

- **PSK** (Phase Shift Keying) : 入力に応じて位相を変化させる。

$$S_{\text{BPSK}}(t) = \begin{cases} A \sin 2\pi f_c t & \text{for } 0 \\ A \sin(2\pi f_c t + \pi) & \text{for } 1 \end{cases}$$

- **BPSK** (Binary PSK) : 2種類の位相の異なった信号を使う PSK。1つのシンボルで1bitの情報を伝送できる。
- **QPSK** (Quadri PSK) : 4種類の位相の異なった信号を使う PSK。1つのシンボルで2bitの情報を伝送できる。
- $A \sin(2\pi f_c t + \phi)$ というシンボルに対して,

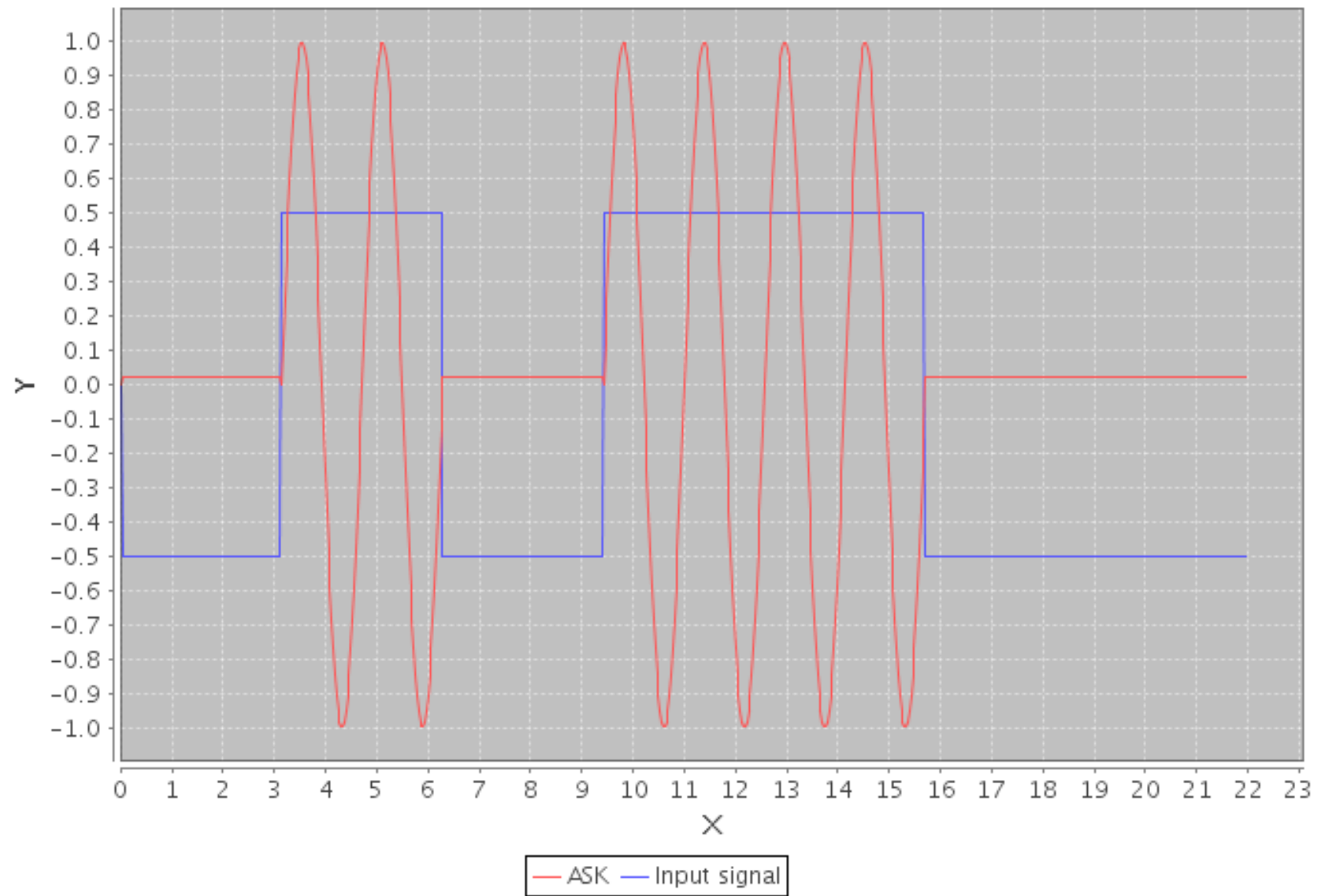
$$x = A \cos \phi$$

$$y = A \sin \phi$$

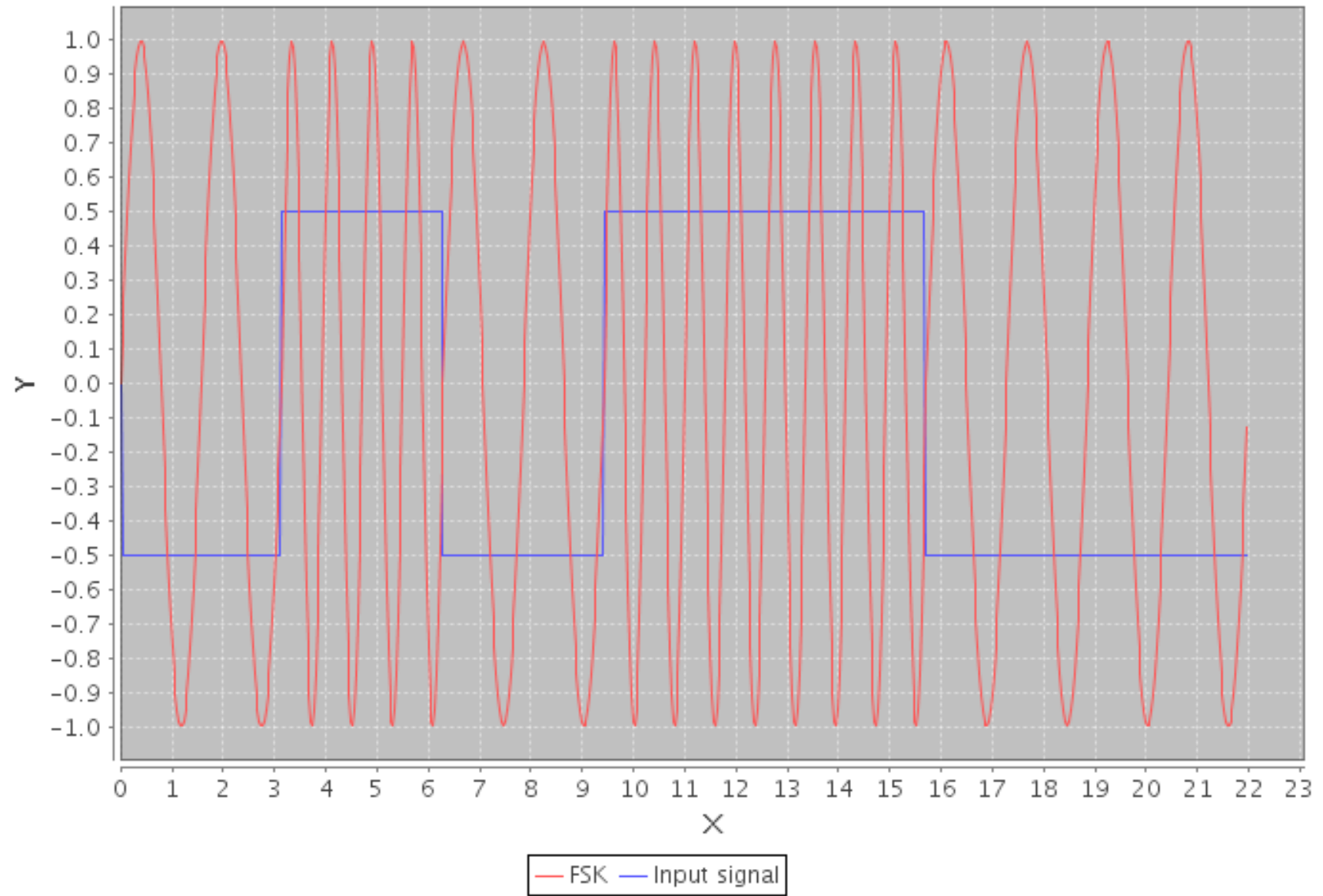
によって, 平面座標系の1点に対応付けることができる。

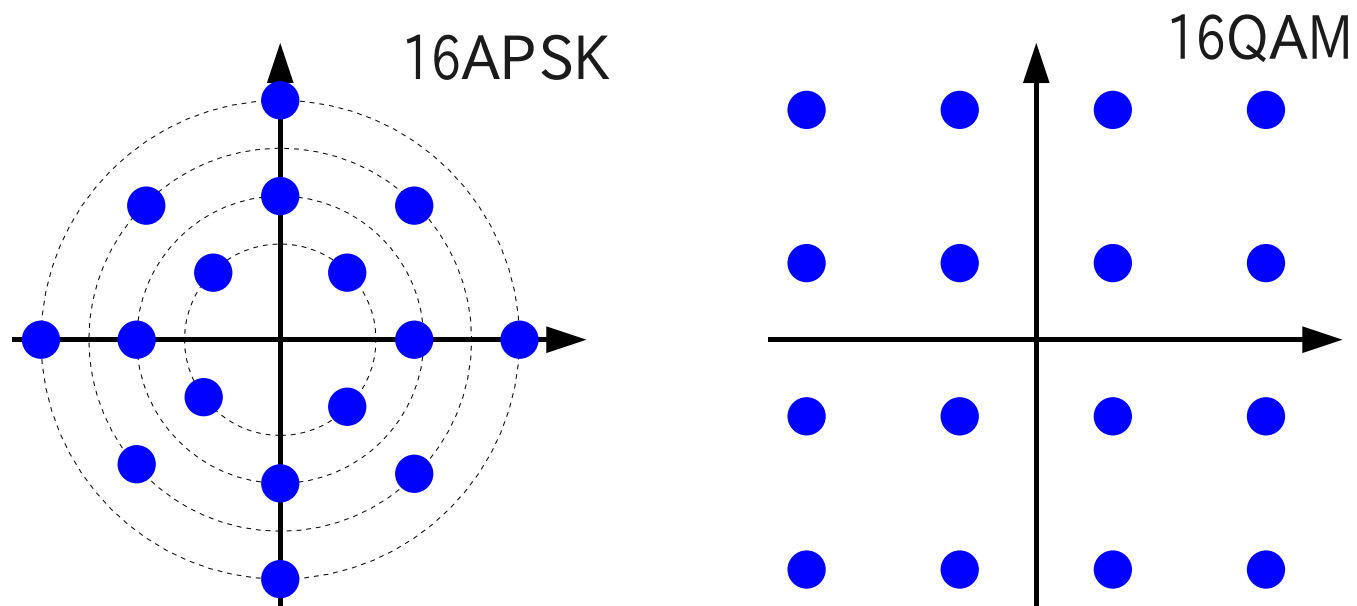
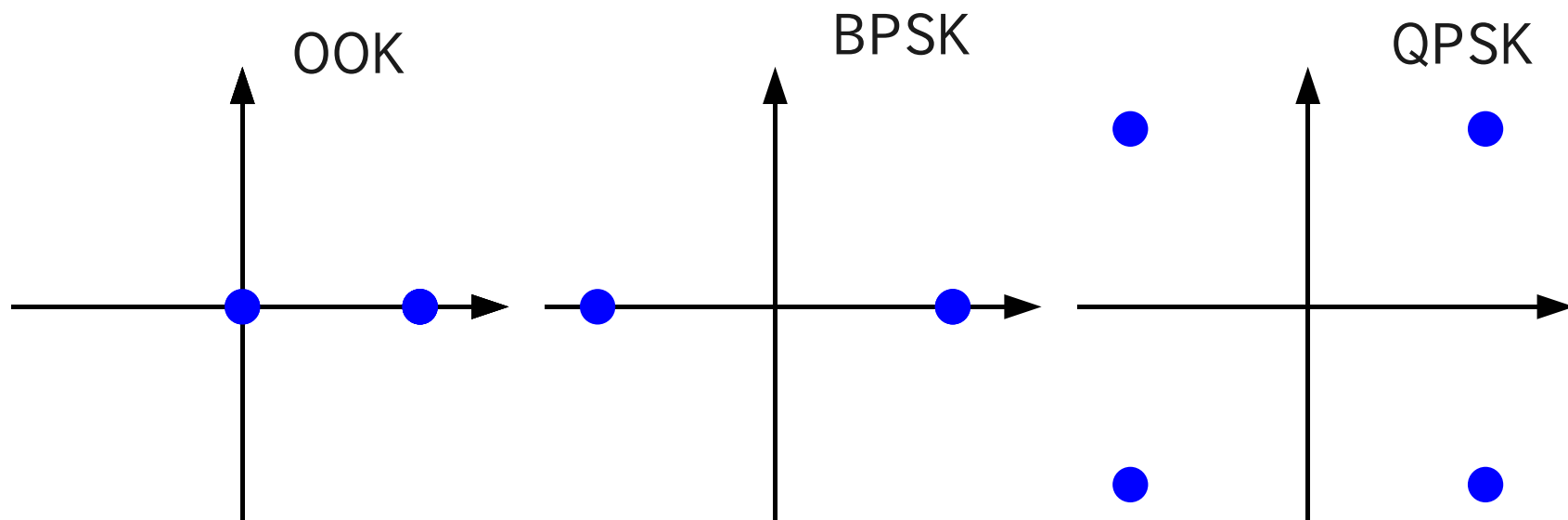
- **APK** (Amplitude Phase shift Keying) :
 - **16APSK** : 4種類の振幅と4種類の位相を使って伝送する。1つのシンボルで4bitの情報を伝送できる(16APKとは言わない)。
- **QAM** (Quardrature Amplitude Modulation) : 振幅と位相を変化させることによって情報を伝送する。シンボル間距離が大きくなるように、振幅と位相の組み合わせを決める。
 - **16QAM** : 1つのシンボルで4bitの情報を伝送できる。

ASK

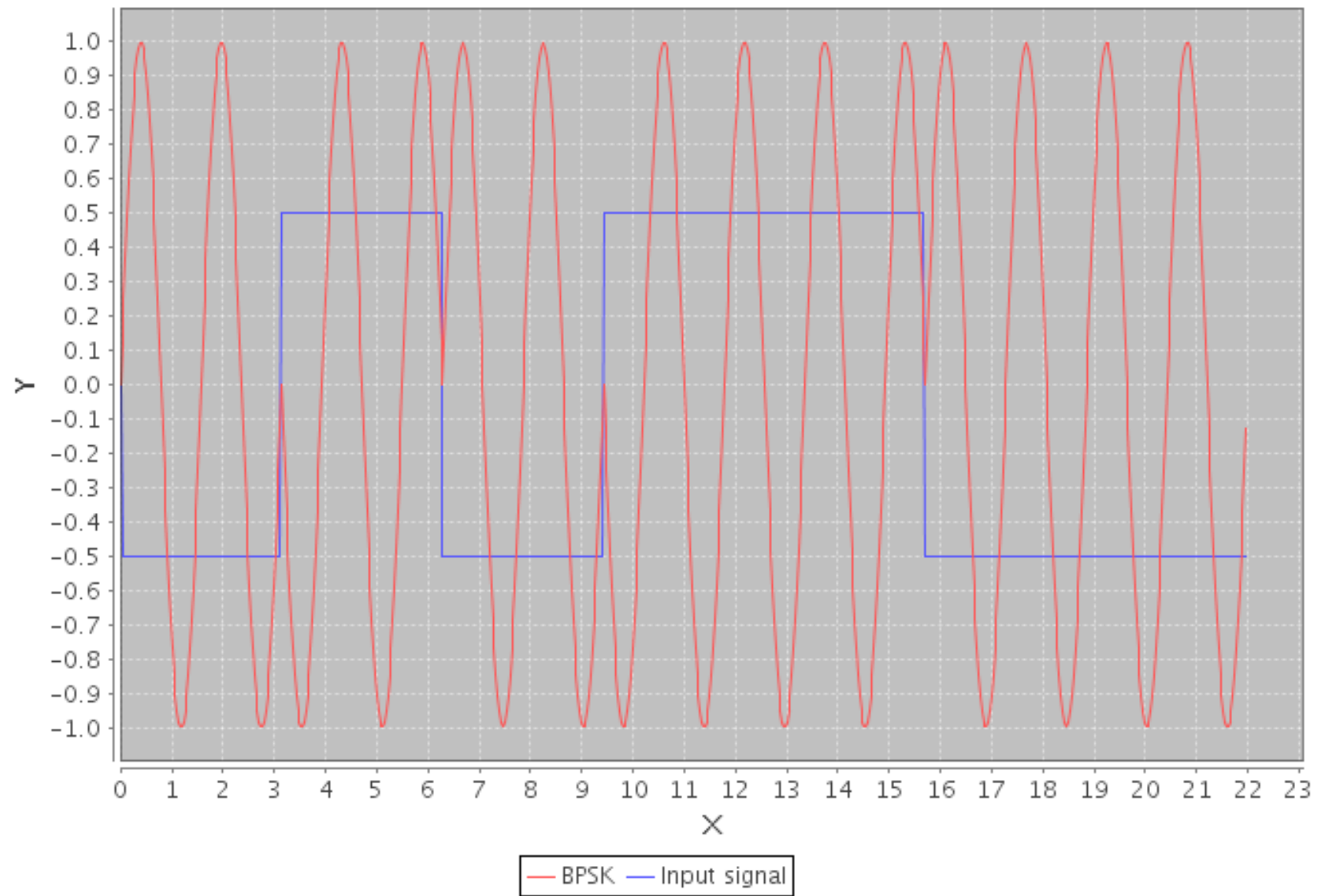


FSK

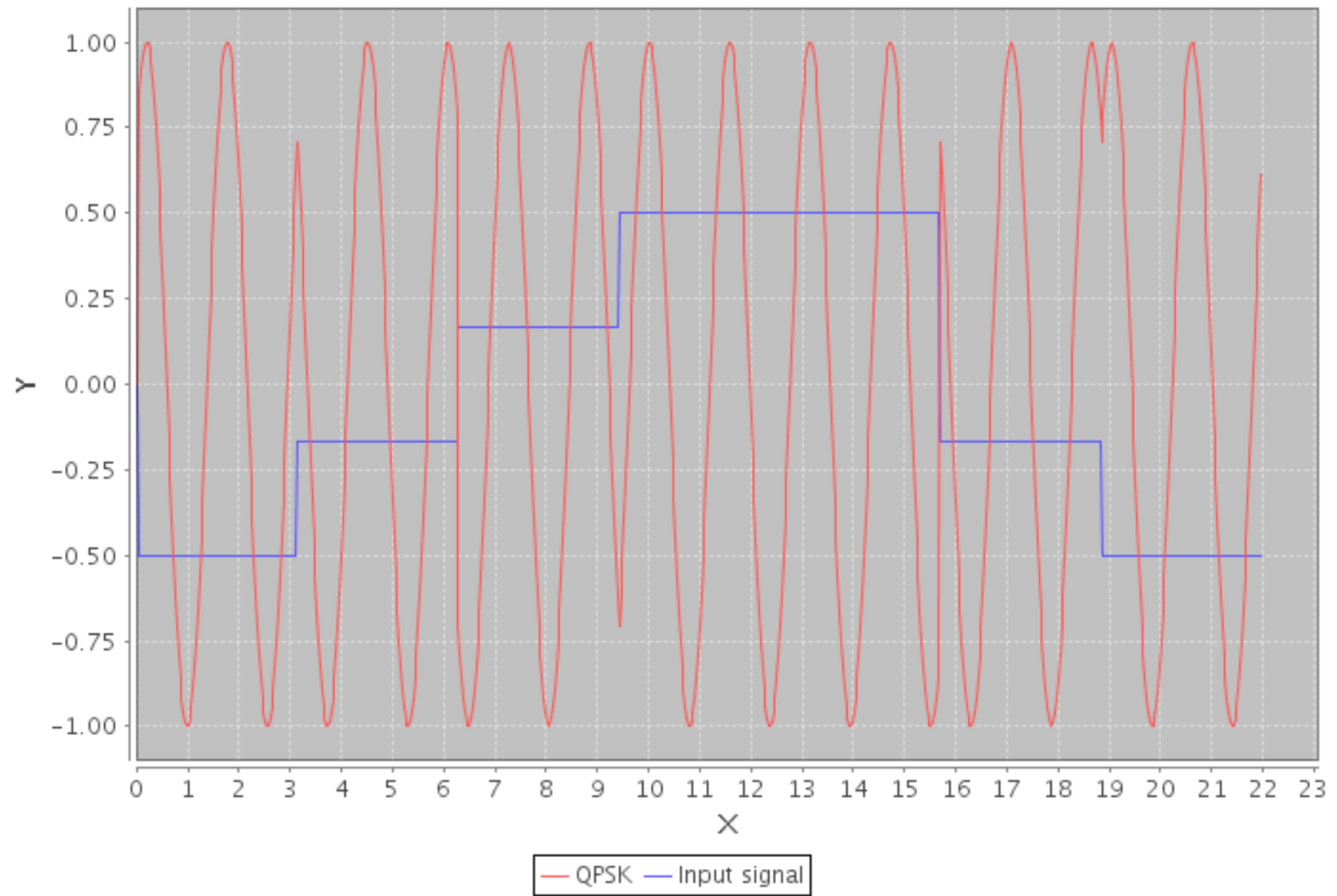




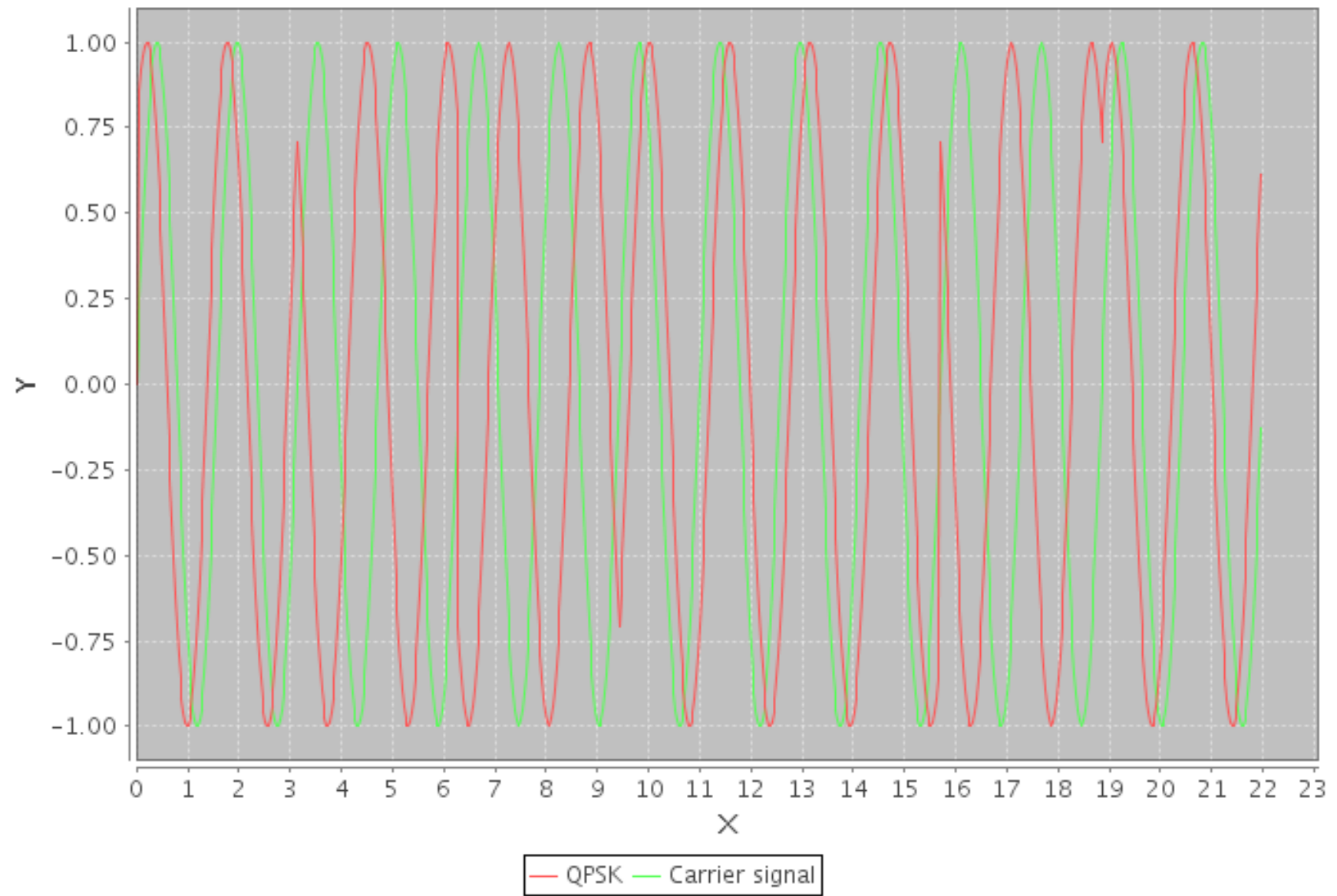
BPSK



QPSK



QPSK2



2.2.1 多重化方式

- 複数の信号を多重化し，その信号を伝送し，逆多重化して配分する。
- 伝送路を効率的に使うことができる。
 - － **多重化**：複数からの入力をまとめて1つの信号にする。
 - － **逆多重化**：まとめられた信号を，もとの複数の信号に戻す。
- **時分割多重** (TDM, Time Division Multiplexing)：伝送路を使用する時間を区切って，複数の入力に割り当てる。
- **スロット**：各入力に割り当てるために，伝送路で分割した時間単位。
- **フレーム**：1つの入力へのスロットの割り当てを周期的に行うとき，その周期のこと。(入力信号にもフレームがある場合があり，その場合，この伝送側のフレームを高次フレームと呼ぶ)
- **ビット多重**：複数の入力信号を，1 bit ごとにまとめる。
- **オクテット多重**：複数の入力信号を，1 byte (= 8bit) ごとにまとめる。
- **フレーム多重**：複数の入力信号を，その(低次)フレームごとにまとめる。

- **同期多重化方式**：多重化器と逆多重化器が時間的に同期して，その時間を元に多重化された信号を分配する。
- **マルチプレクサ**：信号を分配する装置。
- **非同期多重化方式**：多重化された信号に，入力信号に関する情報も埋め込み，その情報を元に信号を分配するもの(パケットなど)。
- **再生中継器**：ケーブルで長い距離を伝送すると，信号が小さくなるだけでなく，波形が歪む。そのため，信号を増幅すると共に，波形を整形して再度送り出す装置。
長距離を伝送するためには，途中に複数個の再生中継器を設置する。
(電気による通信：数kmごと，光による通信：数10kmごと程度)

2.2.2 スペクトル拡散通信

- 伝送したい信号よりも，周波数帯域を拡げて(10～1000倍)伝送する。
- 各周波数における電力密度は低下する。
 - ⇒ 元々は軍事用で，通信があることを悟られないためのものだった。
 - それまでの探知や妨害はキャリア周波数を中心に行っていた。
 - スペクトル拡散通信では，拡散の方法やその鍵がわからないと，通信自体の探知や，その妨害が難しい。
- **拡散変調**：送りたい信号を周波数が拡散した信号に変換する。
 - **直接拡散方式** (DS, Direct Sequence)
 - CDMA200**や**W-CDMA** (FOMA)で使われ一般化した。
 - (CDMA : Code Division Multiple Access)
 - **周波数ホッピング (FH)** 方式
 - Bluetooth (IEEE 802.15.1)で使われている。

2.2.3 直接拡散方式

- **PN (Pseudo-random Noise) 符号** :

擬似的に作り出した, ランダムに0, 1が並ぶビット列

例: M系列

$$x_n = \text{EXOR}(x_{n-p}, x_{n-q})$$

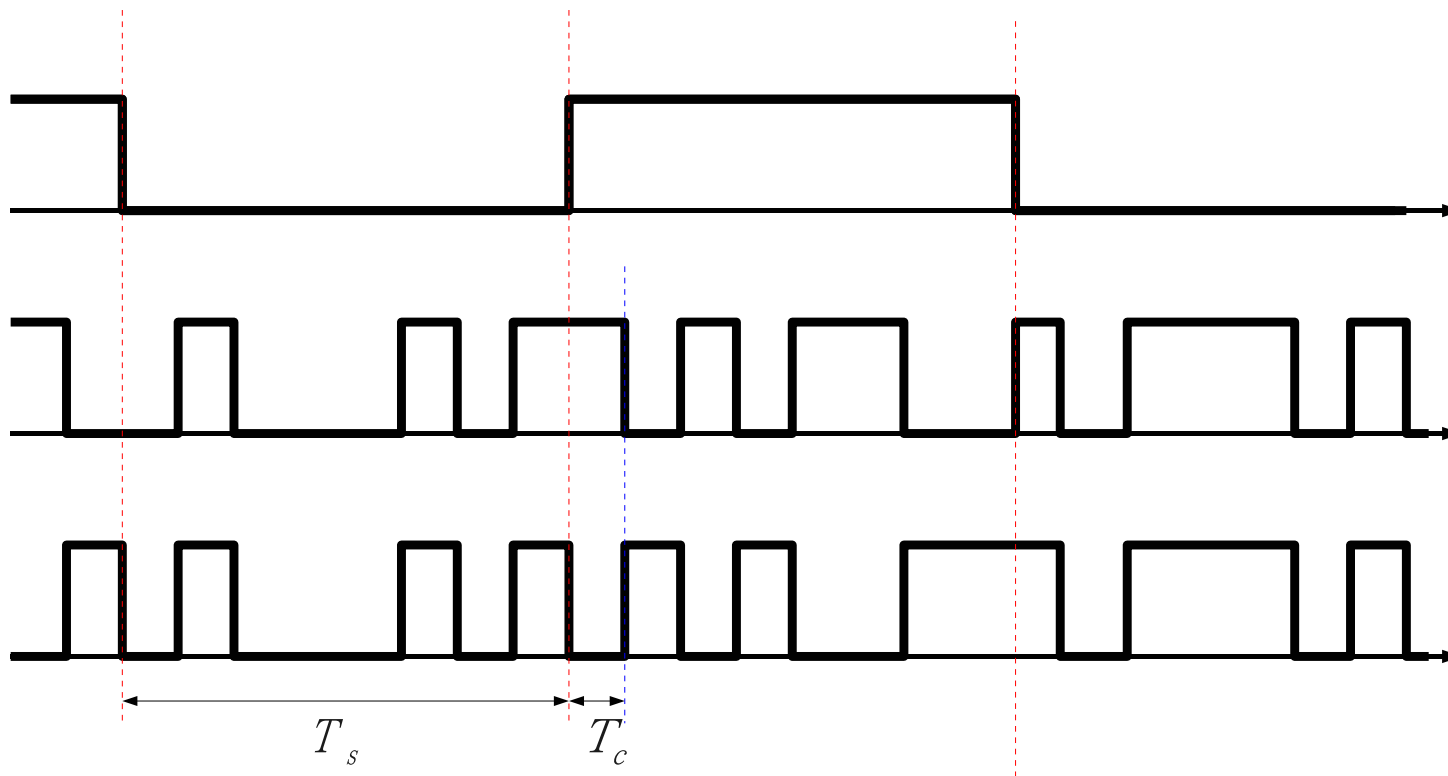
などを用いて, 拡散された信号を生成する (次ページの図を参照)。

- **ビット幅** (bit duration) : 原符号系列の1 bitを送るための時間幅
- **チップ幅** (chip duration) : 拡散符号系列の1 bitを送るための時間幅
- **ビット速度** (bit rate) : 原符号系列の単位時間あたりの伝送ビット数
- **チップ速度** (chip rate) :
拡散符号系列の単位時間あたりの伝送ビット数
W-CDMA (チップ速度: 3.84 Mcps, 周波数帯域: 5MHz)
- **拡散比** (spreading ration) : チップ速度とビット速度の比

Input signal

PN code

SS signal



2.2.4 周波数ホッピング方式

- 短時間でキャリア周波数を変更して伝送する。
- 変更するキャリア周波数のパターンは決まっている。
- **ホッピング速度** (hopping rate) 単位時間に周波数を変更する回数
 - **Slow FH** :
周波数を切り替える時間幅が、ビット幅より長い。
(BluetoothはSlow FHを使っている。)
 - **Fast FH** :
周波数を切り替える時間幅が、ビット幅より短い。

2.2.5 直交周波数分割多重 (OFDM)

● 直交周波数分割多重

(OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

- 無線LAN, 地上波デジタルテレビジョンで使われている(後述)。
また, 携帯電話の3Gの発展形 (LTE : Long Term Evolution, 4G) で利用されている。
- **マルチパス** :
 - 電波が複数の伝送経路を伝わって受信アンテナに入力される。
 - (この電波伝搬は, 高田先生の専門)
 - **フェージング** : 複数の経路が存在すると, 場合によっては波が打ち消しあい, 受信できなくなってしまうことがある。
 - 短波放送を聴いていると, 電離層によるマルチパスのため, 受信される電波の強弱が変わるため, 音が大きくなったり小さくなったりする(現在は短波放送を聞いている人は少ない)。

– ダイバーシティアンテナ

(自動車のテレビのアンテナは2つ付いていたりする)：

電波の干渉はその波長の $1/4$ 程度で変わるため、アンテナを2以上使えばどれかでは打ち消しあわない場合が多い。従って、複数のアンテナの中で信号が強いものを使う方式。

– 周波数選択性フェージング：

周波数のある領域において、フェージングが生じる。

波長が異なれば干渉の状況が変わるため。

– 現実には、ある程度の時間の間、ある周波数領域の信号が使えず、その後、別の周波数領域が使えないということが生じている。

言い換えれば、周波数領域を選べば、伝送に使うことができる。

● マルチパスの伝送遅延差の問題

– 経路によって伝送時間が異なる。

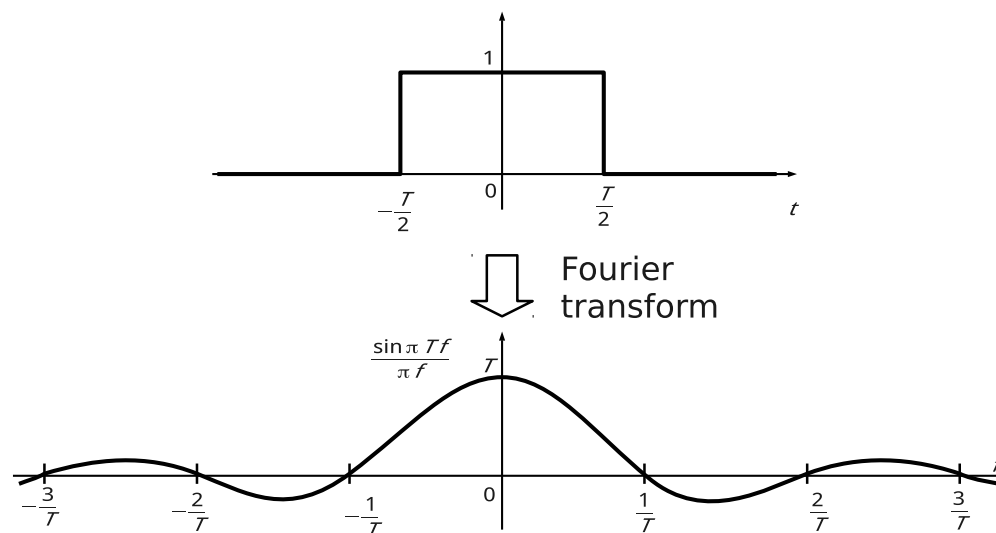
– 受信した信号を復調すると、送信時は異なる時間にあった0と1の信号が混ざるため、受信時に0と1の中間ぐらいの信号になり、0か1か分からなくなる。

テレビのゴーストみたいなもの。

- 厄介そうに思えるマルチパスであるが，近年は**MIMO** (Multiple Input Multiple Output) と言って，パスごとに異なる情報を伝送し，通信速度を向上させることができるようになっている(最近の無線LANと第4世代携帯で採用されている)。
- 幅 T のパルスの周波数帯域

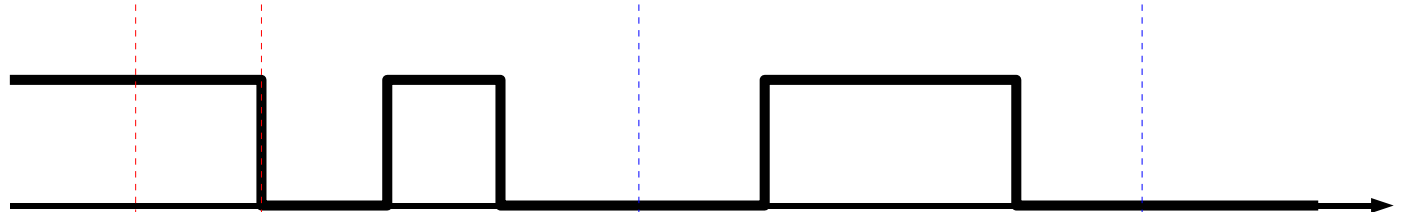
$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} e^{-2\pi i f t} dt = \frac{e^{-\pi i T f} - e^{\pi i T f}}{2\pi i f} = \frac{\sin \pi T f}{\pi f} = T \operatorname{sinc} \pi T f$$

となり，sinc関数のグラフから，およそ **$2/T$ 程度の周波数帯域**を占めることがわかる。

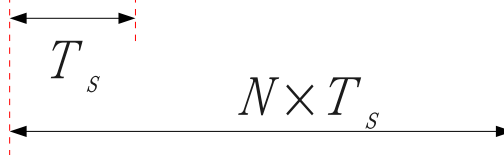
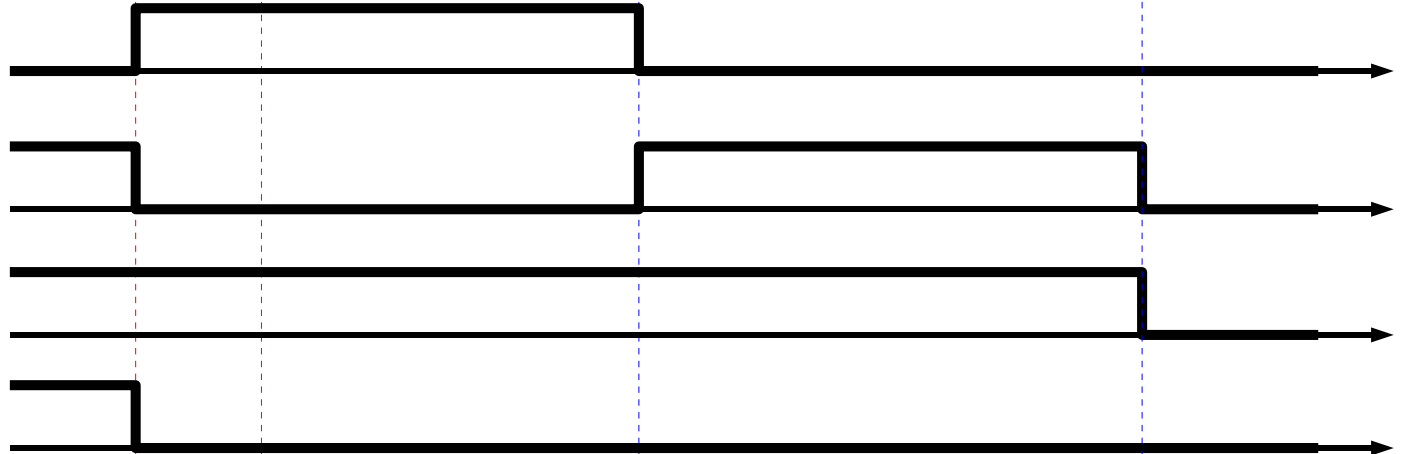


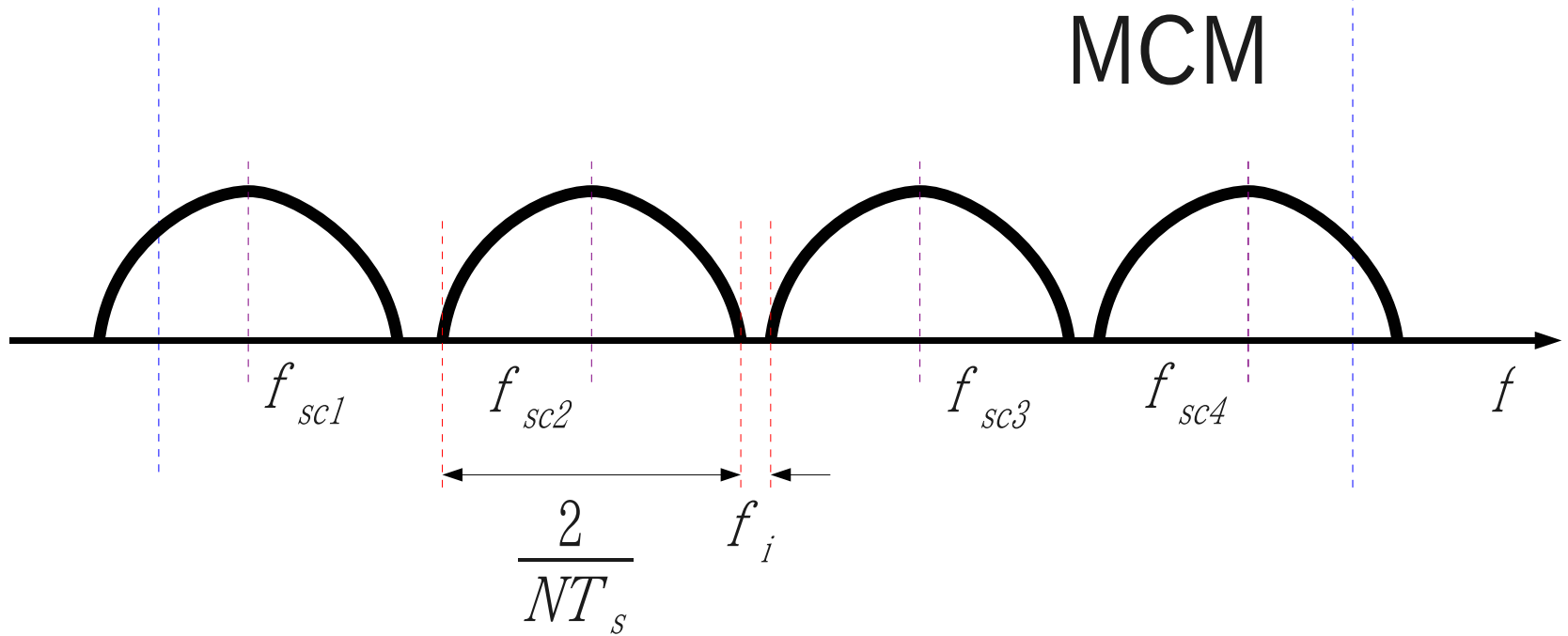
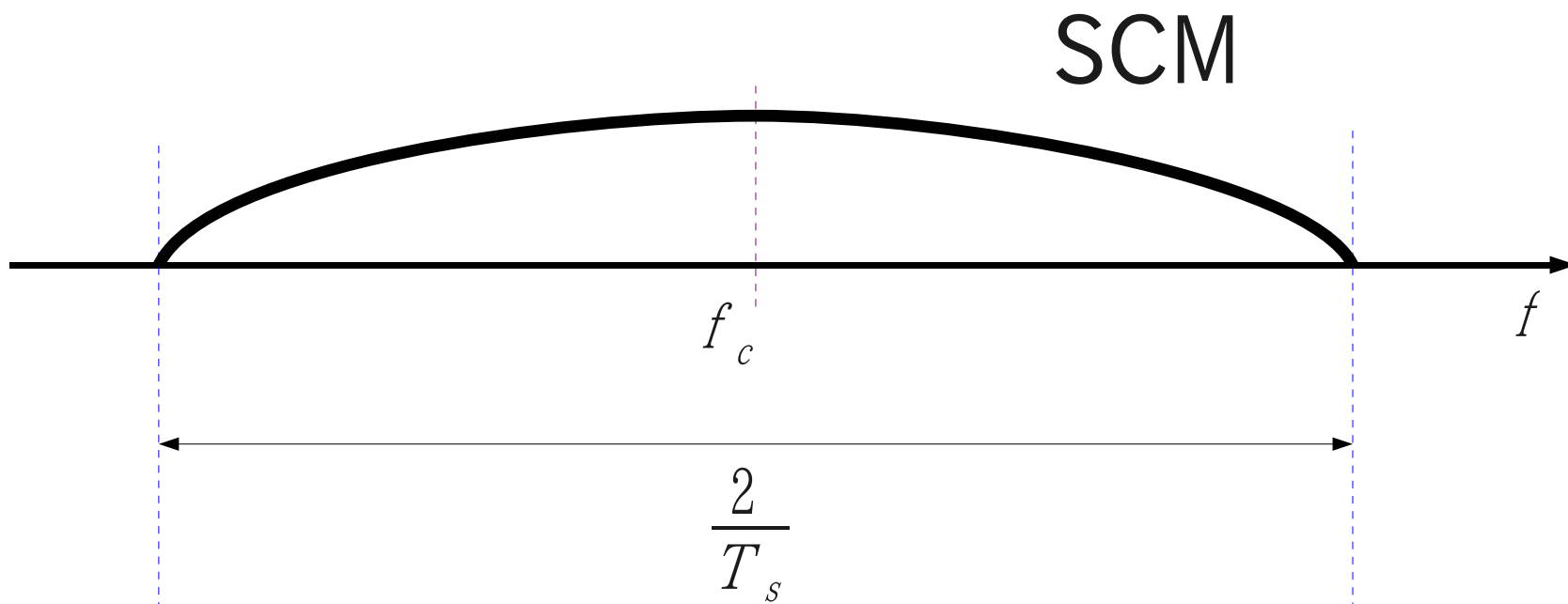
- **シングルキャリア変調** (SCM) : 一つの搬送波で信号を伝送する。高速に送ろうとすると、帯域が広くなるため、その帯域の中に周波数選択性フェージングのせいで、使えない周波数領域があると、すべてが使えなくなってしまう。
- **マルチキャリア変調** (MCM) : 原符号列を分配して、多数の低速な符号列に変換する。それぞれを、複数のキャリアを使って伝送する。
 - － 周波数選択性フェージングが生じてても、送ることができるチャンネルが残り、ある程度の伝送速度を維持できる。
 - － 1 bitを送るために使う時間が長くなっているため、前後のbitの信号が混合する可能性が減り、伝送遅延差に対して頑健になる。
- **サブキャリア** : MCMに用いる複数のキャリア
- **ガードインターバル** : 伝送遅延差に対してさらに頑健にするために、信号を送り次の信号を送るまでの間、何も送らない時間のこと(伝送速度は遅くなる)。

Input signal



Distr. signal





- MCMの周波数帯域の図は、**幅 T のパルスの周波数帯域が $2/T$ になる**ことを使って、サブキャリアの間隔を使って決めていたが、**もう少し詰めることができる。**

⇒**OFDM**

- あるサブキャリアで変調(QPSKなどによって)したものが、隣のサブキャリアで変調されたものと直交していればよい。

$S_n(t)$: n 番目のサブキャリアで変調された信号

T : 分配された信号の1bitあたりの時間 ($T = NT_s$)

このとき、

$$\int_0^T S_n(t) S_{n+1}(t) dt$$

が成立していれば良い。

$$\begin{aligned} & \sin(2\pi f_n t + \theta) \sin 2\pi f_{n+1} t \\ &= \frac{1}{2} (-\cos\{2\pi(f_n + f_{n+1})t + \theta\} + \cos\{2\pi(f_n - f_{n+1})t + \theta\}) \end{aligned}$$

となる。第1項は高周波成分で、フィルタなどにより除去できるので、

第2項の積分が0になれば良い。

$$\begin{aligned}
 & \int_0^T \frac{1}{2} \cos\{2\pi(f_n - f_{n+1})t + \theta\} dt \\
 &= \frac{1}{4\pi(f_n - f_{n+1})} [\sin\{2\pi(f_n - f_{n+1})T + \theta\} - \sin\theta] \\
 &= \frac{2}{4\pi(f_n - f_{n+1})} \left[\sin \frac{2\pi(f_n - f_{n+1})T}{2} \cos \frac{2\pi(f_n - f_{n+1})T + 2\theta}{2} \right] \\
 &= \frac{1}{2\pi(f_n - f_{n+1})} [\sin\{\pi(f_n - f_{n+1})T\} \cos\{\pi(f_n - f_{n+1})T + 2\theta\}]
 \end{aligned}$$

- この条件を満たす搬送波の最小の周波数間隔 $f_{n+1} - f_n$ は,

$$\frac{\sin\{\pi(f_n - f_{n+1})T\}}{\pi(f_n - f_{n+1})} = 0$$

より, $1/T$ となる。

- 位相 θ が変化しても直交しなくてはならないため, FSK のときの最小の周波数間隔 $1/2T$ とは異なる。

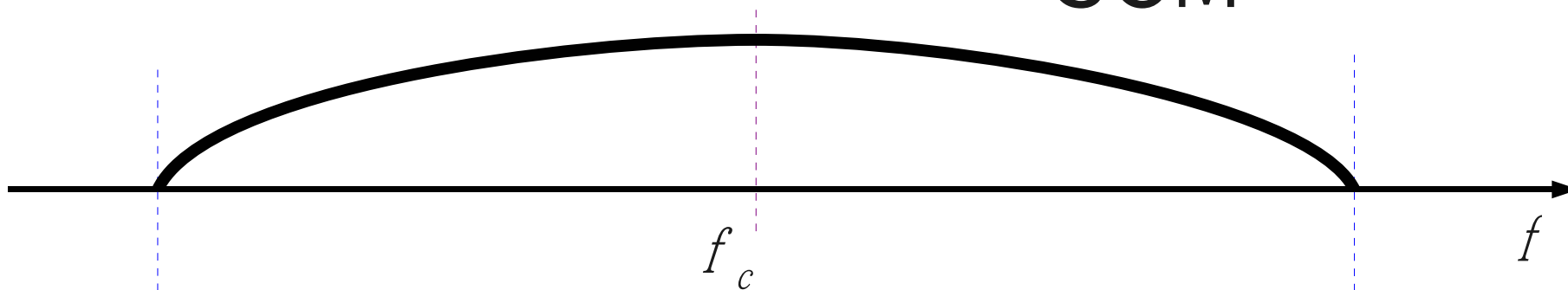
- N 個のサブキャリアを使ったときの，OFDMにおける全体の周波数帯域は，

$$\frac{N + 1}{N \times T_s}$$

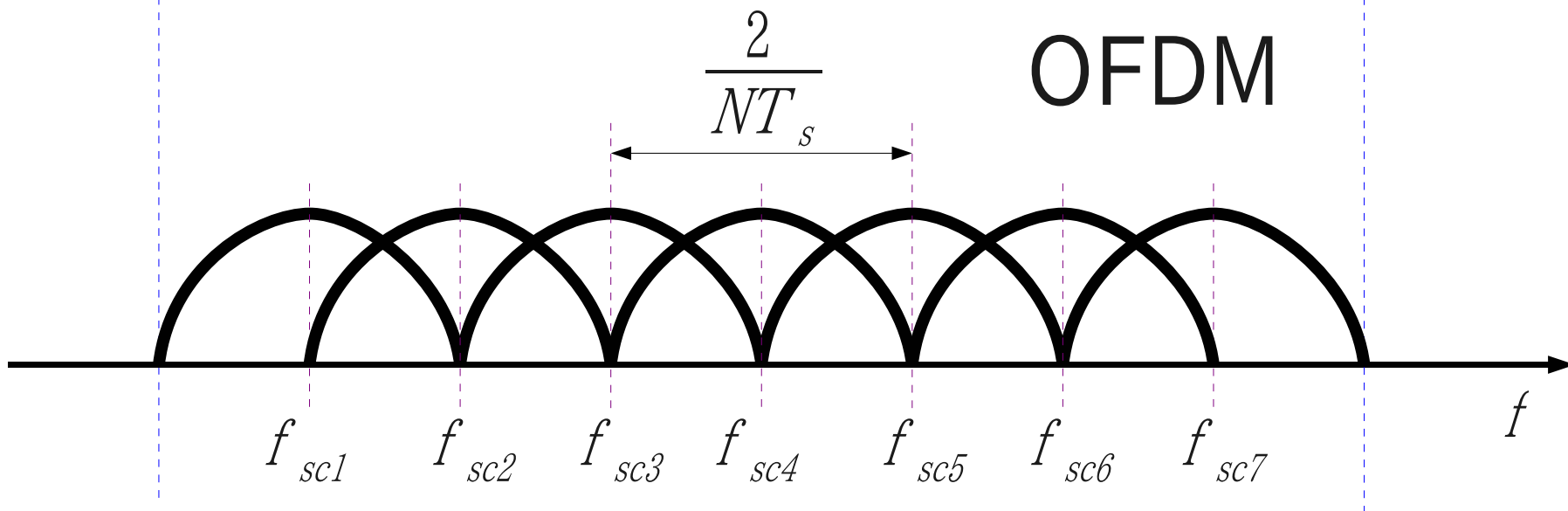
となる。(先の図とは少し異なるが， $N = 7$ での帯域は $8/(7T_s)$ となる。これは，SCMの $2/T_s$ に比べて， $4/7$ 倍である，すなわち，同じデータ量を送るために，OFDMの方が $4/7$ 倍だけ周波数帯域が狭くなっている。)

- **OFDMを使えば， N が大きいとき，同じ帯域を使って約2倍の速度で信号を送ることができる。**
- サブキャリアの合成は，デジタル信号処理(FFT, Fast Fourier Transform)で行い，その後，搬送波を使って伝送に使う周波数まで上げる方法が用いられている。

SCM



OFDM



2.2.6 無線LANの規格

無線LAN規格	最大伝送速度	周波数	変調方式	アクセス方式
IEEE 802.11.b	11Mbps	2.4GHz	DS-CDMA	CSMA/CA
IEEE 802.11.a	54Mbps	5.2/5.3GHz	OFDM	CSMA/CA
IEEE 802.11.g	54Mbps	2.4GHz	OFDM	CSMA/CA
IEEE 802.11.n	100～500Mbps	2.4GHz	OFDM/ MIMOなど	CSMA/CA

(CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)

- **インフラモード**：

1つの基地局(アクセスポイント, AP)と複数の無線端末が通信を行う。無線端末がどうしが通信を行う場合も基地局を通す。

- **ハンドオフ**：無線端末が基地局を変更するための処理

- **アドホックモード**：

無線端末同士が直接通信を行う。(PSPの対戦ゲーム)

- セキュリティー

- **SSID** (Service Set ID), ESSID (Extended SSID) :
無線LANのグループ分けを行う。基地局と端末が同じIDを設定しないと接続できない。ただし、SSIDは公開されるので、これだけではセキュリティ上は不十分。
- **WEP** (Wired Equivalent Privacy) :
無線LANの暗号化規格。共通鍵方式の暗号を使うが、今では比較的短い時間で暗号が破られる。
- **WPA** (Wi-Fi Protected Access) :
無線LANの暗号化規格。TKIP (Temporal Key Integrity Protocol) と呼ばれる暗号を使用する。
- **WPA2** : WPAの改良版
- **WPS** (Wi-Fi Protected Setup) : WPAの設定を容易にするための規格

2.2.7 地上波デジタルテレビジョン

- **BST-OFDM** (Band Segmented Transmission OFDM) :
 - 6MHzの帯域の中の5.6MHzを**13セグメント**に分割して、それぞれのセグメントで異なる通信ができるようにしている。
 - 6MHzの帯域はアナログテレビの時代に決められた規格
 - 日本の地上波デジタルテレビジョンの規格ISDB (Integrated Services Digital Broadcasting)で、使われている通信方式である。(アメリカ：ATSC, 欧州：DVB, 中国：CDMB, 南米：SBTVD(ISBDの改良))
 - セグメント間は信号の周波数に関して重なりがない。
 - 1セグメントの中を、最大432個の搬送波によるOFDMで伝送する。
 - 13セグメントの中で,
 - 12セグメント：HDTV放送に利用
 - 1セグメント：ワンセグに利用

2.3 光通信

- **光ファイバー**：屈折率が高いガラス(プラスチック)の**コア**のまわりを屈折率の低いガラス(プラスチック)の**クラッド**が囲んでいる。
- コアの光はクラッドを通過して外には出ない。
- 光の損失は、1kmで数%程度 (電気ケーブルの1/10程度)。
中継局間距離を伸ばすことができる(電気ケーブルの10倍程度)。
- **マルチモード**ファイバー：
クラッド直径:0.125mm, コア直径：0.05mm or 0.065mm
- **シングルモード**ファイバー：
クラッド直径:0.125mm, コア直径：0.0092mm
- **半導体レーザー**
- **光波長多重通信** ((Dense) Wavelength Division Multiplex, **(D)WDM**)：
 - － 電気と光のインターフェースの性能の限界のため、1つの波長で送ることができる伝送速度は最大でも数十Gbit/s程度。
 - － 多数の波長の光を1本の光ファイバーを通す。
例：海底中継方式：FSA-WDA：10.66Gbit/s×4, 100km(中継間隔)

3 まとめ

- 覚えることが多かったでした。
- この講義で出てきた単語は、**電子製品のカタログ**に書いてあっりますので、覚えておけば何か良いことがあるかもしれません。
(「おー，これはOFDMか。2倍の周波数効率があるんだよな。」と言えは，みんなに変な人と思われることができます。)
- でも，中身を全く知らないで使って平気というのは，理系としては悲しいので，やはり知っておいた方が良いでしょう。