

アナログ信号をデジタル信号に変える符号化はD-A変換器、復号化ではA-D変換器が最初に考えられます。しかし、デジタル通信の場合、符復号でたんにアナログからデジタル、デジタルからアナログに変換するだけではなく、通信路の誤りを減らす誤り訂正や誤り検出の機能、狭い帯域で効率よく情報を送る圧縮・伸張の機能、アプリケーションとの整合性を高めるためのフレーム化等も行います。本書では変復調と共にこれら符復号化の回路の実現方法を学べるようになっていきます。詳細は後で説明します。

このように符号化によりデジタル化された信号を媒体に載せることがデジタル変調になります。デジタル変調はアナログ変調と同様に正弦波の振幅(A)・周波数(f)・位相(θ)の三つの要素のいずれかに対して変化を与えます。

- ① 幅変調(ASK: Amplitude Shift Keying)
- ② 周波数変調(FSK: Frequency Shift Keying)
- ③ 位相変調(PSK: Phase Shift Keying)

それぞれの要素名の後についているShift Keyingは“符号により偏移させる”という意味をもちます。あるいは1/0すなわちデジタル・コードによる変調と読み替えることもできます。

次からデジタル変調・復調について詳細を説明します。

3.1.2 ASK変調

振幅に情報をもたせた変調方式です。送信したいデータが時刻 t で変化する関数 $D(t)$ で表される場合、ASKの変調を施した波形 $Y(t)$ は以下の式で表されます。

$$Y(t) = D(t) \times \sin(2\pi ft + \theta)$$

$D(t)$ はデジタル・データなので1か0の値をとります。図3.13のように $D(t) = 1$ のときは振幅1の正弦波になり、 $D(t) = 0$ のときは $Y(t) = 0$ で何もない状態になります。

ASKは搬送波をデジタル・データによりON/OFFスイッチングすればよいので、図3.14のような簡素な回路で実現できます。

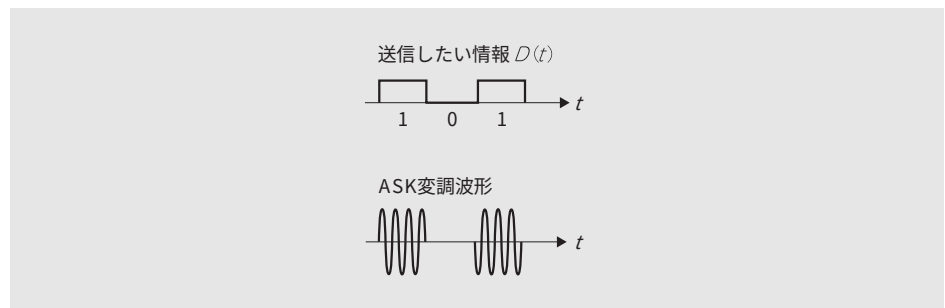


図3.13 ASK

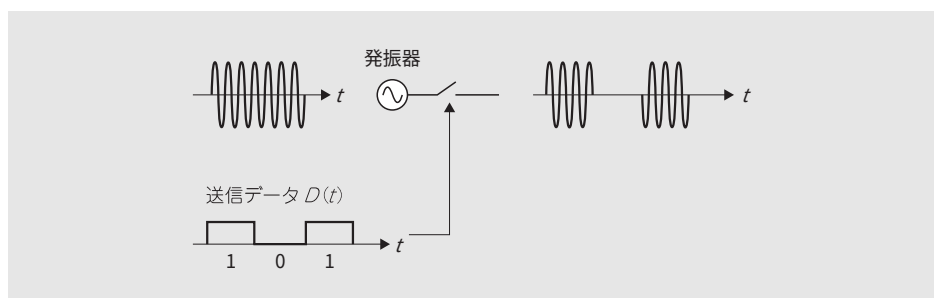


図3.14 ASK回路

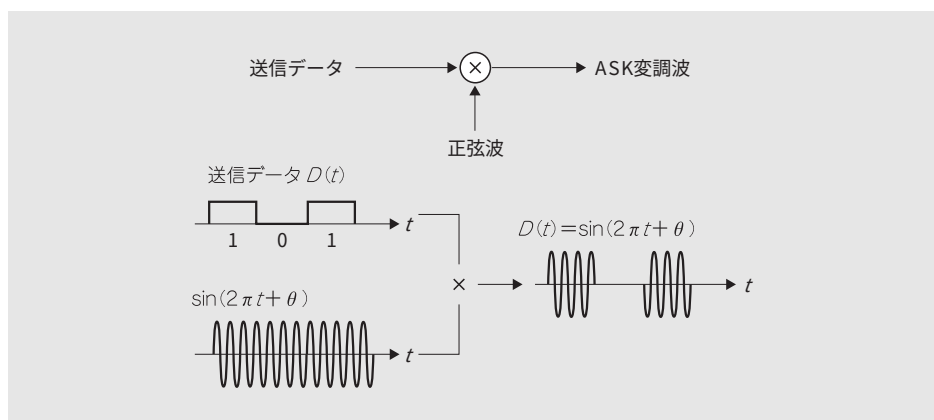


図3.15 乗算器によるASK回路

AMで使った乗算器による回路もそのまま使えます。図3.15にその例を示します。図3.7と見比べるとわかりますが、入ってくる信号がアナログからデジタルに変わっただけです。

3.1.3 FSK変調

FSKはデジタルの情報 $D(t)$ を周波数の変化に変換する変調です。式で表すと以下のようになります。

$$Y(t) = A \times \sin(2\pi f(D(t))t + \theta)$$

周波数 f を $D(t)$ で変化させる変調方式なので、 $D(t)$ により周波数 f がどのように変化するか定義する必要があります。上式を変形して以下のように定義する場合があります。

$$Y(t) = A \times \sin(2\pi(f_c + \Delta f(D(t)))t + \theta)$$

中心周波数を f_c として f_c が $D(t)$ の値に変化する Δf の分だけ時刻ごとに(データの場合はビット毎に)変化します。変化量はたとえば $D(t)=1$ のときに $\Delta f=5\text{kHz}$ 、 $D(t)=0$ のときに $\Delta f=-5\text{kHz}$ というようにシステム毎に任意に決めることができます。FSK

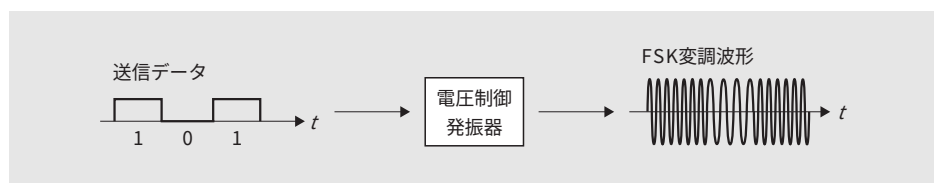


図3.16 VCOによるFSK

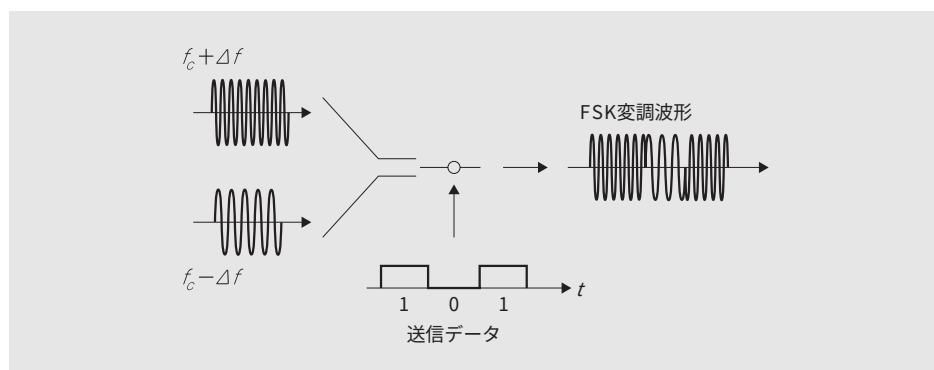


図3.17 スイッチングによるFSK

を行うための回路にはFMの場合と同じようにVCO(図3.16参照)を使う方法と複数の周波数を切り替えるスイッチングの方法(図3.17参照)があります。

図3.16と図3.17を比べてみるとわかりますが、図3.17のスイッチングによる方法はもともと非同期の二つの信号を切り替えるため、切り変わる部分で位相の不連続点が生じます。この不連続点では位相が大きく変化し、周波数帯域が広がってしまうため、この方式はあまり使われていません。

3.1.4 多値変調、ビットとシンボルの関係

ここまで説明したASK, FSKは、ともに送信データを一度に1ビットしか送信しない方法でした。1ビットの場合、とりうる値は0, 1の2値なのでASKの場合は信号があるか(1), ないか(0)で、FSKの場合は周波数が高い($f_c + \Delta f$)か、周波数が低い($f_c - \Delta f$)か、で変調していました。

この、とりうる値を2値ではなく、4値、8値と増やすことも可能です。1回の正弦波の変化で4値の場合は2ビット、8値の場合は3ビットのデータを一度に送ることができます。このように4値以上を1回の正弦波変化で一度に送る方法を多値変調と呼びます。

送信データに比例して、正弦波の要素を変える変調では、正弦波の変化の、一つの状態をシンボルと呼びます。このシンボルが変化するスピードをシンボルレート/シンボル速度といい、その変化の頻度を表す単位に1spsがあります。spsはSymbol

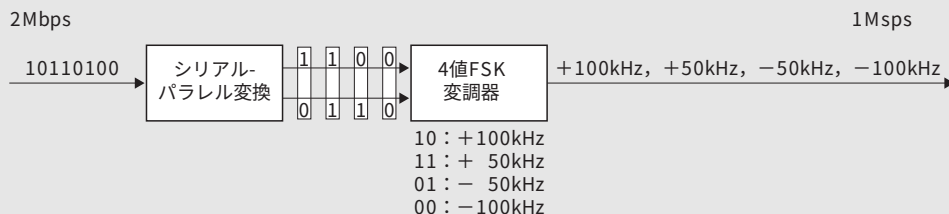


図3.18 4値FSK

Per Secondの略で、1秒間にシンボルが変化する回数を示します。

これまで説明してきましたASK, FSKは、1シンボルで1ビットの値だけ送りますので1sps = 1bpsになります。

変調器で4値、8値またはそれ以上のシンボル状態を作る場合は、1シンボルで2ビット、3ビット送ることができるので、1sps = 1bpsではなく1sps = 2bps(4値の場合)、1sps = 3bps(8値の場合)となります。

たとえば、1秒間に100万回シンボルの变化をするFSK変調器があるとします。このFSK変調器のシンボル速度は1Mspsになります。このときFSK変調器が+100kHz, +50kHz, -50kHz, -100kHzの四つの周波数変化をすることができる変調器であるとする、1シンボル当たり2ビットのデータを送信することができます。これらの条件を備えた変調器はシンボルレート1Msps、ビットレート2Mbpsの変調器ということができます。

詳細を説明するため、図3.18に4値のFSKの回路例を示します。このFSK変調器は入力される2ビットの情報から+100kHz(10), +50kHz(11), -50kHz(01), -100kHz(00)の四つの周波数を発生することができます。したがって入力も4状態、つまり2ビットの制御情報が必要になります。

2ビットの制御情報を作るためには、図3.18のようにシリアル-パラレル変換器を用います。

シリアル-パラレル変換では連続する2ビットを一つの情報(1シンボル)として出力します。このようにシリアル-パラレル変換器を使うことで1ビットのシリアル・データ入力による4値FSKの変調器を構成することができました。図3.18からわかるようにFSK変調器の出力は入力2ビットに対し1回しか変化しません。

3.1.5 直交変調器

スイッチ、乗算器、VCOなどを使用して変調器を構成する方法を説明しました。このような方法で各変調方式を実現する場合がありますが、直交変調器という回路を使うとASK, FSK, そのほかのさまざまな変調方式に対応することができます。

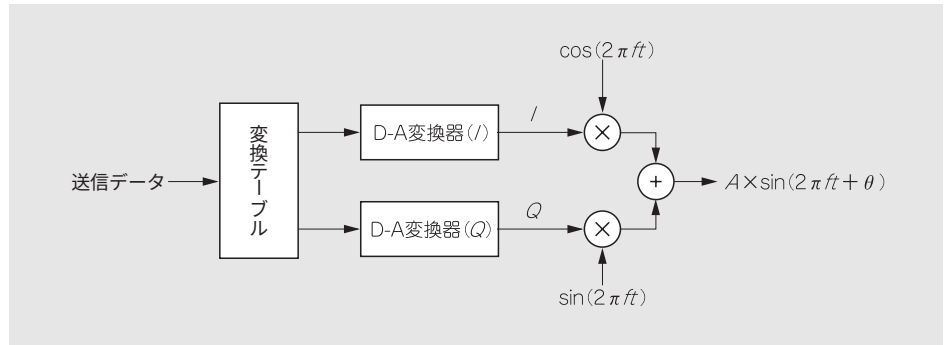


図3.19 直交変調器

図3.19は直交変調器の一般的な構成を表しています。送信データを変換テーブルで I 、 Q の信号に変換し、D-A変換器に供給します。D-A変換器から出力される I 、 Q の信号はそれぞれ $\cos$ 、 $\sin$ の90°位相がずれた信号と乗算した後、それぞれを加算します。

この処理の流れは次のようになります。

$$\begin{aligned} & I \times \sin(2\pi ft) + Q \times \cos(2\pi ft) \\ &= A \times \sin(2\pi ft + \theta) \\ & A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{I}{Q}\right) \end{aligned}$$

ASKにこの直交変調器を適用する場合は、係数 A の値すなわち $\sqrt{I^2 + Q^2}$ をASKの所望の値になるように上式にしたがって I 、 Q を決めるといわけです。

前出の $D(t) = 1$ のときは振幅1の正弦波になり、 $D(t) = 0$ のときは $Y(t) = 0$ で何もない状態になるASK(図3.20参照)を例に直交変調器による生成方法を説明します。

まず、前提条件は

(1) 変調信号の周波数、位相は送信データにより変化しません。したがって θ はつねに一定の値で、その元になる I/Q も一定の値(ただし、 I/Q が一定であることは絶対条件ではなく、十分条件。 $\tan^{-1}(I/Q)$ が一定であれば問題ない)です。

(2) 送信データ $D(t) = 0$ のときは $A = 0$ 、 $D(t) = 1$ のときは $A = 1$ になります。

上記の条件より、 $D(t) = 0$ のときは I 、 Q ともに0、 $D(t) = 1$ のとき I 、 Q ともに $\sqrt{0.5}$ にすると前出のASK変調を実現することができます。

“ $D(t) = 0$ の場合は I 、 Q ともに0、 $D(t) = 1$ の場合は I 、 Q ともに $\sqrt{0.5}$ ”，この条件を図3.20の変換テーブルに回路として作り込めばASK変調器はできあがりです。この例は一例であり上記の(1)、(2)を満たす I 、 Q であれば他の値の変換テーブルであっても問題ありません。

同じくASKの変形として図3.21のような変調を考えてみましょう。このASKは $D(t) = 1$ の場合は振幅2、 $D(t) = 0$ の場合は振幅 $\sqrt{2}$ になるような変調です。

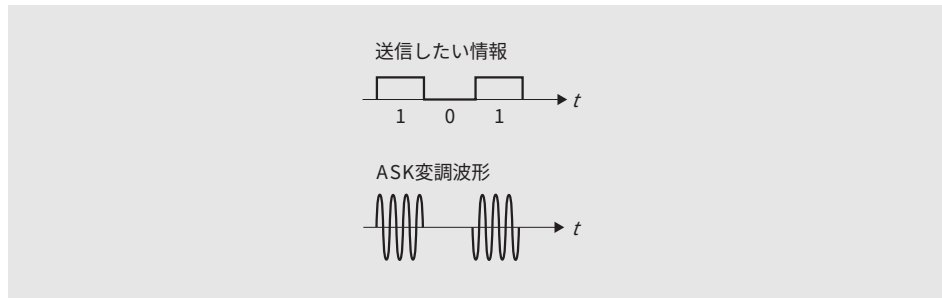


図3.20 ASK

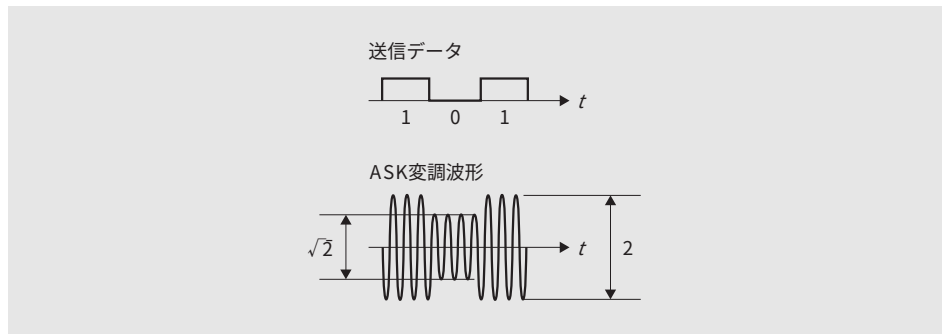


図3.21 変形ASK

(1) 変調信号の周波数、位相は送信データにより変化しません。したがって θ はつねに一定の値で、その元になる I/Q も一定の値(ただし、 I/Q が一定であることは絶対条件ではなく、十分条件。 $\tan^{-1}(I/Q)$ が一定であれば問題ない)です。

(2) 送信データ $D(t) = 0$ の場合は $I = 1$ 、 $Q = 1$ に、 $D(t) = 1$ の場合は $I = \sqrt{2}$ 、 $Q = \sqrt{2}$ になります。

I 、 Q の値によって振幅と位相を制御できることがわかります。一例として直交変調器をASKに適用する例を説明しました。では、周波数 f を変化させるFSKは直交変調器でどのように実現するのでしょうか。

位相と周波数の間には図3.22のような関係があります。D-A変換器の出力で乗算される周波数 f より1Hz高い周波数を発生させるためには、 I 、 Q の変化により θ を1秒間の間に 360° 進めます。逆に1Hz低い周波数が欲しい場合は θ を1秒間に 360° 遅らせると1Hz低い周波数を得ることができます。このようにして、ASKやFSKを直交変調器で実現することができます。

3.1.6 PSK変調

PSK変調は送信データ $D(t)$ により θ を変化させる変調方式です。PSKを使うことにより狭い周波数帯域で高速な通信を行うことが可能なため、移動体通信、固定通信

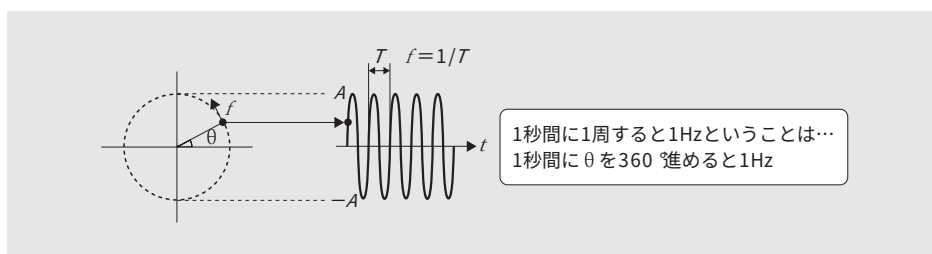


図3.22 位相と周波数の関係

を問わず多くのシステムで採用されています。PSKは位相の変化なので、図3.23のように位相平面の図を用いて表すことが多いです。

図3.23は2相、4相、8相のPSK、それぞれの極配置を示しています。各点はすべて一つの円周上に置かれ、原点からの距離は一定です。このような図のことをコンスタレーション、あるいは星配置と呼ぶ場合もあります。また、図3.23の○のことを位相点と呼びます。

2相PSKでは1シンボルで1ビットのデータを送るので二つ位相点があります。4相では1シンボルで2ビット、8相なら1シンボルで3ビットのデータを送ることができます。なお、図3.23に書かれている位相とデータの関係は一例であり、さまざまなシステムによりさまざまな関連付けを行います。入力データと位相の関連付けをマッピングと呼びます。図3.23では極配置でPSKを説明しましたが、これまでどおりの時間軸上でPSKを説明することも可能です。時間軸によって2相PSKの説明をしたものが図3.24です。

2相PSKの場合は1が180°で0が0°なので、送信データが1から0に遷移するところ(図3.24の①の部分)で位相が180°から0°へ、0から1に遷移するところ(図3.24の②の部分)で、位相が180°から0°に変わります。

上記で説明したPSKは絶対位相そのものに情報をもたせる変調方式です。もう一つのPSKとしてDPSK(Differential PSK)という方式があります。DPSKは現在の位

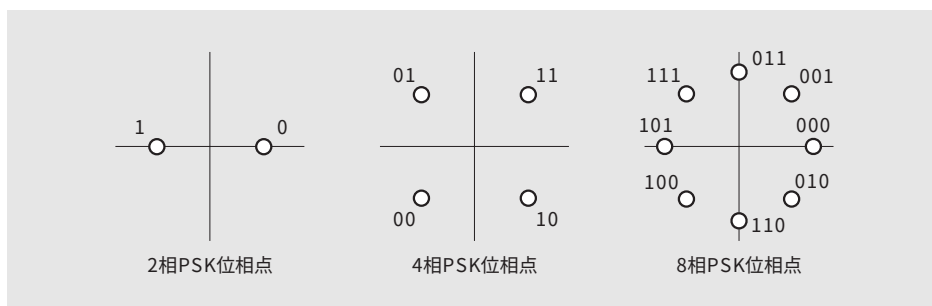


図3.23 各種PSKの極配置