

## 最新ワイヤレス・データ通信システムの 基本技術

# デジタル変復調の基礎

中込 勝  
Masaru Nakagomi

最近の通信システムの多くは、ユーザの増加に対応するため周波数利用効率を上げたり、セキュリティを高めたり、端末(携帯電話)を小型にするためにデジタル化されています。

ここでは、これらのシステムに使われている「デジタル変調」方式の原理やそのハードウェアについて解説します。

### 基本はアナログ変調と同じ

デジタル変調もアナログ変調と同様に搬送波の振幅、周波数、位相を変化させる情報伝達の方法の一つです。搬送波のパラメータを変化させるという点で両者は同じと言えます。

アナログの振幅変調 AM に相当するのが ASK (Amplitude Shift Keying)、周波数変調 FM に相当するのが FSK (Frequency Shift Keying)、位相変調 PM に相当するのが PSK (Phase Shift Keying) です。振幅変調と位相変調を組み合わせた変調方式もあり、これを直交振幅変調 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) と呼びます。

### アナログ変調(analog modulation)

伝送したい情報がアナログの場合で、その信号を変調する方式。振幅変調、周波数変調、位相変調などがある。

### 変調の種類(sort of modulation)

大きく分けてアナログ変調、デジタル変調、線形変調、非線形変調に分類できる。

## デジタル変調とは...アナログ変調との違い

### 離散値で変調する

アナログ変調の変調信号は連続に変化しますが、デジタル変調では、0か1の離散値で変調をかけます。

ASKでは搬送波の振幅値にデータに対応させます。図1-1にASK変調波の例を示します。データ0に振幅0が、1に最大振幅が対応します。

デジタル復調とは、アナログ復調と同様に受信した変調波から送られた変調信号を復元することです。送信側の元データ(0, 1)を復元することを意味します。

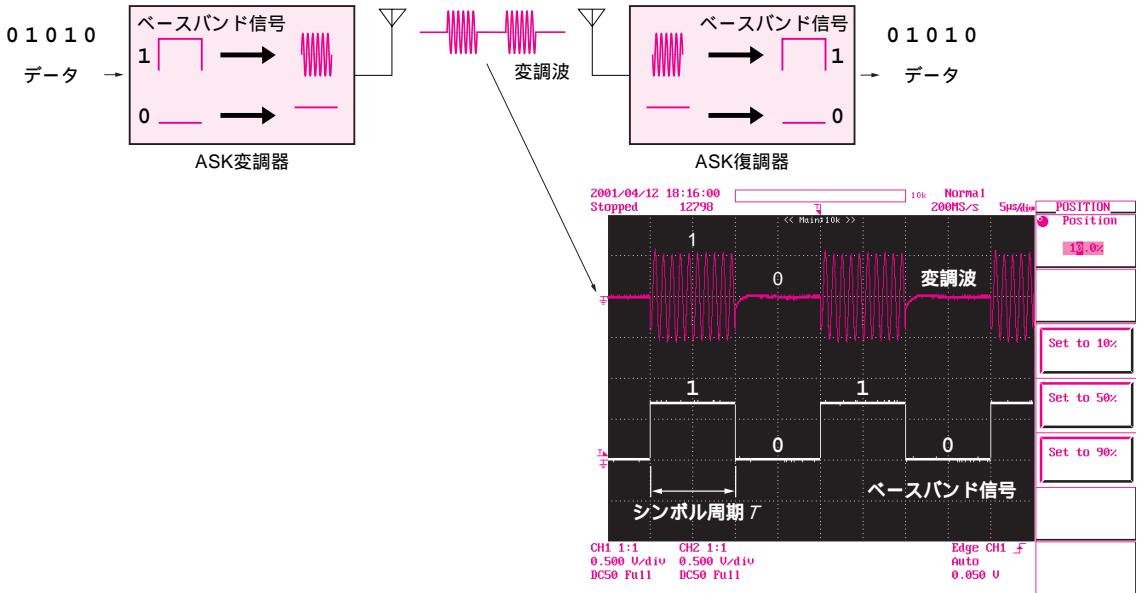
図1-1の例では、振幅0をデータ0に、最大振幅をデータ1に対応させることが送信側と受信側で決められていれば、受信側で変調波の振幅情報から判定回路を通してデータを復元できます。これがデジタル復調です。

### 多値変調によって周波数利用効率を上げる

#### 「シンボル」という単位

図1-1に示すASKでは、ゼロ振幅と最大振幅がデータの0と1に対応しており、二つの変調状態で1ビットぶんのデータを表現しています。この変調の状態

図 1-1 デジタル・データがASK変復調されるようす(上：0.5 V/div. , 下：0.5 V/div. , 5  $\mu$ s/div.)



を**シンボル**という単位で表します。図 1-1 のデジタル変調波は、2シンボルですべてのデータを表す ASK 変調波と言うことができます。

#### 多値変調とは

図 1-1 の時間  $T$  内の変調波の変調状態の数を増やして、1シンボルで表すビット数を2ビット、3ビットと増やしていけば、同じ時間  $T$  内に多くの情報を送信できます。

図 1-2 に、4シンボルの ASK 変調波(4値 ASK)を示します。搬送波を4段階の振幅に変調しています。図に示す**ベースバンド信号**とは、**データから作られた変調用の信号のことです**。4値 ASK のベースバンド信号は、4段階の電圧レベル(4シンボル)をもち、1シンボルで2ビットのデータを表現しています。

このように、一つのシンボルに複数のデータを割り当てる変調方式を**多値変調**と言います。

#### シンボル周波数は低いほど周波数利用効率が高い

シンボル周波数とは、変調波が変化する周波数のことです。

図 1-1 の ASK 変調は、1シンボルが表現できるデータは一つですから、データを読み込む周波数(データ・レート)とシンボル周波数は同じです。一方、多値変調では1シンボルで複数のビット情報を送れるので、データ・レートとシンボル周波数は一致しません。

同じデータ速度に対して、**シンボル周波数が低くなる**ことが**多値化の利点**です。**シンボル周波数が低くなれば、次に説明する周波数帯域も小さくなります**。

#### ローパス・フィルタ

(Low-Pass Filter, LPF)

遮断周波数以下の周波数の信号だけを通過させ、遮断周波数以上の周波数の信号を減衰させるフィルタ。

#### 変調信号を LPF に通す必要がある

同時に多くの人が通話できるシステムを実現するためには、一つの送受信チャネルが使う周波数の周波数帯域幅をできるだけ狭くすることが重要です。しかし、デジタル変調システムではベースバンド信号が高調波をたくさん含んでいるため、**アナログ変調と同じ変調方法では、1チャネル当たりの占有帯域が広くなり周波数利用効率がとても悪くなります**。

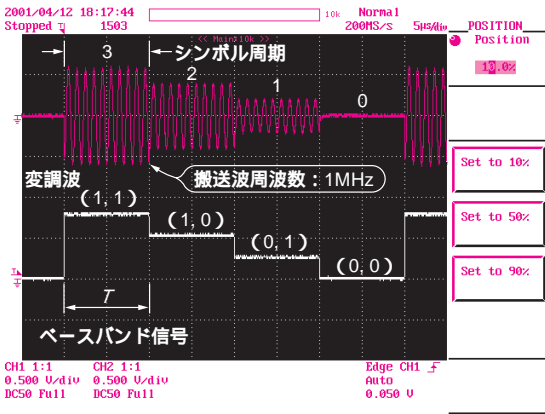
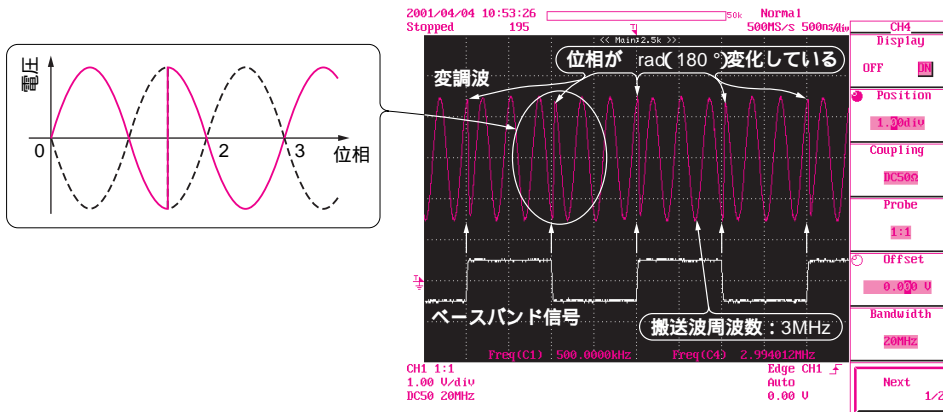


図 1-2  
4 値 ASK の変調波とベースバンド信号の例  
(上 : 0.5 V/div., 下 : 0.5 V/div., 5  $\mu$ s/div.)

図 1-3 BPSK 変調波とベースバンド信号の例 (上 : 1 V/div., 下 : 0.2 V/div., 0.5  $\mu$ s/div.)



ここでは、デジタル変調で一般的な PSK を例に、この問題の解決法について説明します。

ベースバンド信号をそのまま変調すると...

図 1-3 に BPSK (Binary Phase Shift Keying) 変調波の例を示します。

2 シンボルの BPSK は、二つの変調状態で 1 ビット・データ (0, 1) を表します。ベースバンド信号の波形の状態は二つで、データ 0 のとき搬送波の位相は 0 rad、データ 1 のとき位相は  $\pi$  rad 回転します。図からわかるようにベースバンド信号が変わるとき、変調波の位相が  $\pi$  rad 回転しています。

ここでいう位相とは、搬送波を基準にした値で、位相が 0 rad ということは変調波と搬送波と位相が同じということです。逆に、位相 0 rad を表すには、搬送波そのものを使えばよいことになります。

図 1-4 に、図 1-3 の BPSK 変調波のスペクトルを示します。搬送波の周波数は 100 MHz です。図 1-3 の変調波の矢印の部分で電圧が急変していることから予測できるように、スペクトルが広帯域に分布します。このままでは、同じ帯域で使用できる送受信チャネルの数が限られてしまいます。

ベースバンド信号を LPF に通す

この問題は、ベースバンド信号に LPF をかけて高い周波数を除去してから変調器に入力することで解決します。

変調波の帯域を制限する方法も考えられますが、搬送波の高い周波数で、減衰

図 1-4 BPSK 変調波のスペクトル例

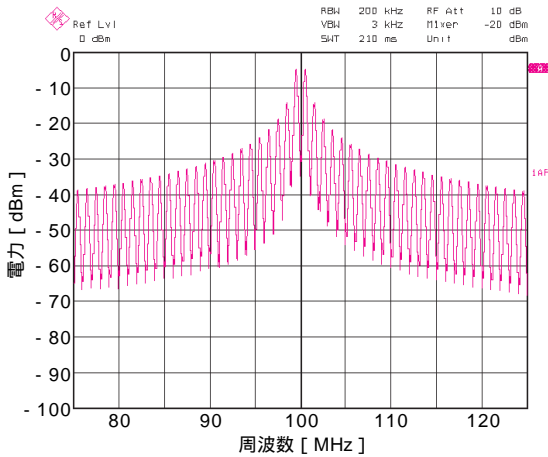


図 1-5 ベースバンド信号を LPF に通したときの BPSK 変調波

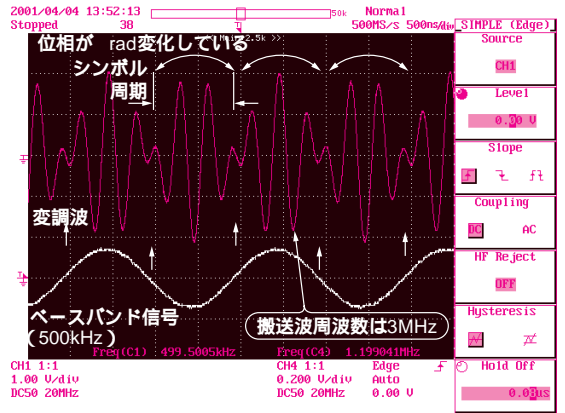
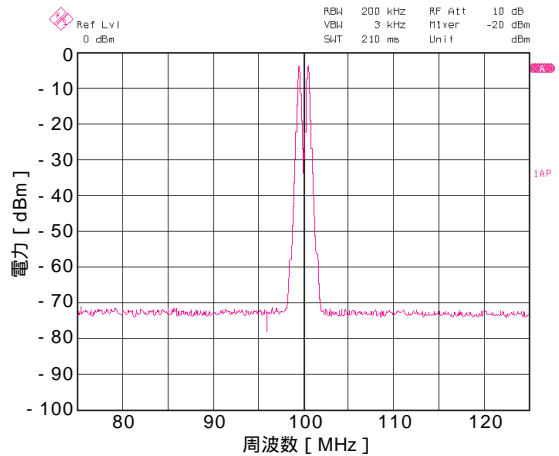


図 1-6

ベースバンド信号を LPF に通したときの BPSK 変調波のスペクトル(搬送波周波数は 100 MHz)



特性のとても急峻な BPF が必要となるため通常は使われません。

図 1-5 に、LPF を通した後のベースバンド信号と変調波を示します。LPF の通過帯域をシンボル周波数( 500 kHz )に設定しているためベースバンド信号の基本波が得られており、波形はほぼ正弦波状になります。変調波をみると、上下対称の 2 種類の波形が  $1 \mu\text{s}$  ごとに現れており、図 1-3 と同様に位相は矢印のポイントで  $\text{rad}$  ぶん変化しています。

図 1-6 に、図 1-5 の波形のスペクトルを示します。スペクトルの広がりがなくなり、すぐ隣に別のチャンネルを設定できることがわかります。なお、図 1-6 ではわかりやすくするため搬送波周波数を 100 MHz に変更しました。

このように、通過帯域がシンボル周波数程度の LPF にベースバンド信号を通せば、データを再現できることがわかります。占有帯域はシンボル周波数で決まります。

## ASK

変調回路は、図 1-7(a) に示すように乗算器だけで実現できます。ベースバンド信号が正の値しか取らないので、AM のように搬送波を後で加える必要はあり