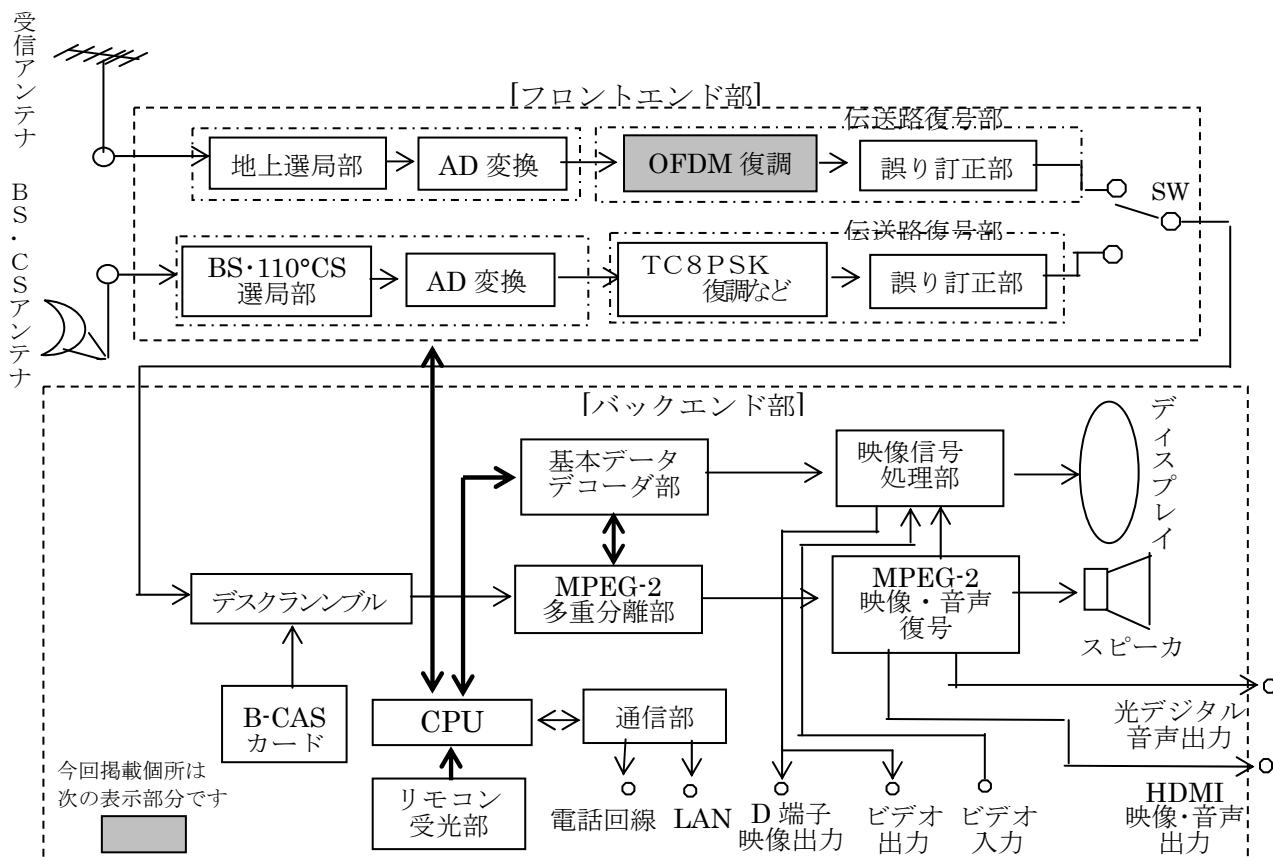




< 地上デジタル放送受信機 (その4・OFDM 復調) >



[参考図] 実際の地上デジタル受信機の回路構成図

前回は地上デジタル受信機のフロントエンド部の最初の選局部を紹介しました。今回は選局部に続く伝送路復号部の OFDM 復調について述べます。なお、送信されてくる OFDM 変調波については、「テレビ放送電波の形? その 10 OFDM 変調(No52)」を参照してください。

☆ 地上デジタル放送用受信機の OFDM 復調部の基本的な信号の流れ

受信機での OFDM 復調は、変調と全く逆の変換 (直交復調と FFT) を行えば元のデータが得られると思いませんか?

実は、それだけでは成り立ちません。各キャリアの変調情報を **FFT** で復調するためには、ノイズ同様に見える **OFDM** 信号からシンボルの区切りを見つけ出さなくてはなりません。放送チャンネルの周波数に変換されたキャリアも正確に元の周波数に戻さなくてはなりません。そのうえ、送信所から伝ぱんして来た電波は、建造物等からのマルチパス妨害を受けて周波数特性や位相特性が乱れている可能性があり、その補正をする必要もあります。

地上デジタル放送用受信機の伝送路復号部の **OFDM** 復調部分の信号の流れを図 1 に示します。

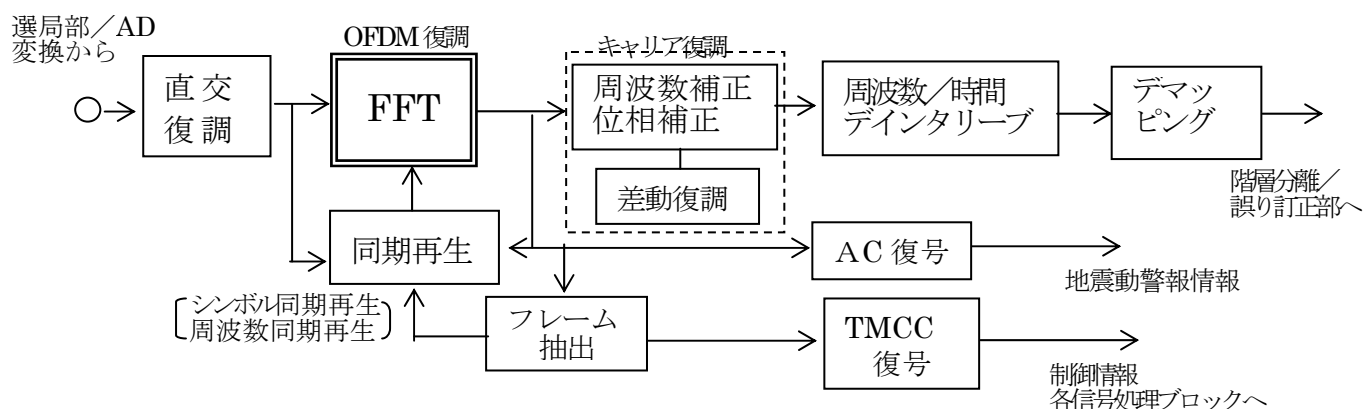


図 1 OFDM 復調部の基本的な信号の流れ

☆ 地上デジタル放送用受信機の OFDM 復調部の回路構成

直交復調で I 軸信号（実数部データ）と Q 軸信号（虚数部データ）に変換した **OFDM** 信号をシンボルごとの **FFT** 処理でキャリア情報に変換します。キャリア情報とは、各キャリアに与えられたデジタル符号の 6 ビットの情報をもととした種々の位相振幅情報をいいます。そして、キャリア変調を復調して 1 シンボルにつき 6 ビットのデータを取り出します。また、直交復調やキャリア復調のために必要なシンボル同期と周波数同期を取る機能と周波数特性や位相を補正する機能をも備えています。

図2 に 地上デジタル放送用受信機の OFDM 復調部の回路構成例を示します。

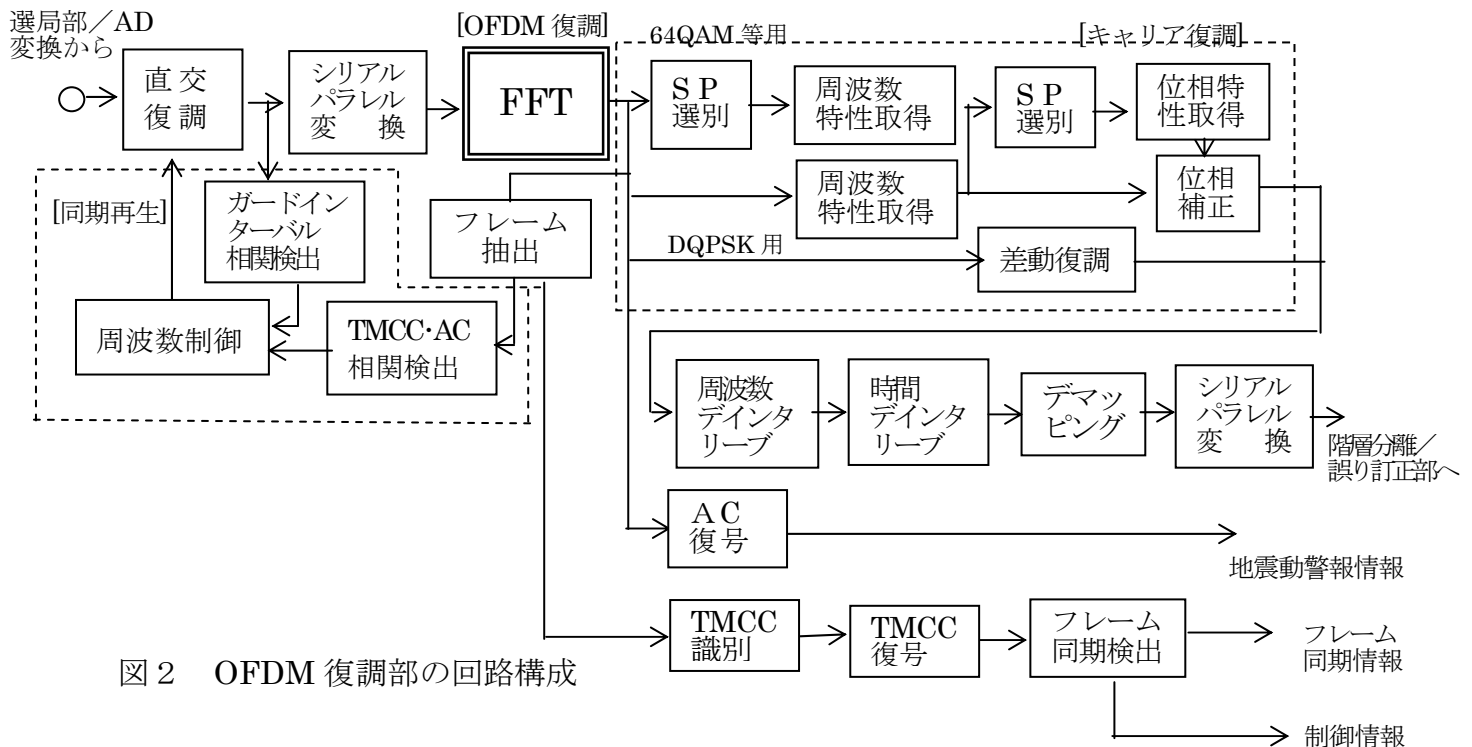


図2 OFDM 復調部の回路構成

各回路の動作状況は次の通りです。

☆ 直交復調

直交復調部は、選局部から希望のチャンネルの信号を受け取り、90°異なる検波軸にて検波し、I信号とQ信号に変換し取り出します。なお、後段の同期再生からの情報をフィードバックし、直交復調のキャリア周波数を同期させます。また、TMCC (Transmission and Multiplexing Configuration Control) およびAC (Auxiliary Channel) の相関検出を行いキャリア周波数を同期させます。

☆ 同期再生

OFDMを復調するには、ノイズのような波形から有効シンボル期間を正確に捕らえてFFTしなければなりません。さらに、キャリア周波数も精密に復元する必要があります。

まず、選局部からの信号を直交復調し、同期再生によりMode、ガード

インターバル長に応じて OFDM シンボル同期および FFT サンプル周波数を正確に再生します。

同期再生部は、直交復調器から受け取った信号を FFT 窓分だけ離れた時点の信号を比較することによりガードインターバルを認識し有効シンボル位置を検出します。

FFT (Fast Fourier Transform) 部が高速フーリエ変換に用いるデータ区間やその同期のための信号を「ガードインターバル相関検出」と「TMCC および AC の相関検出」により生成します。

[ガードインターバル相関検出……シンボル同期]

まず、ガードインターバル相関の検出を行います。ガードインターバルによる同一波形の繰り返しを利用して、有効シンボル長だけ遅延させた波形と元の波形との相関を取ることで、有効シンボル期間の開始点を検出することができます。(図3 参照) これによって有効シンボル期間を FFT することが可能になるとともに、この結果に基づく直交復調のキャリア周波数を制御することができ、キャリア周波数を精密に同期させます。

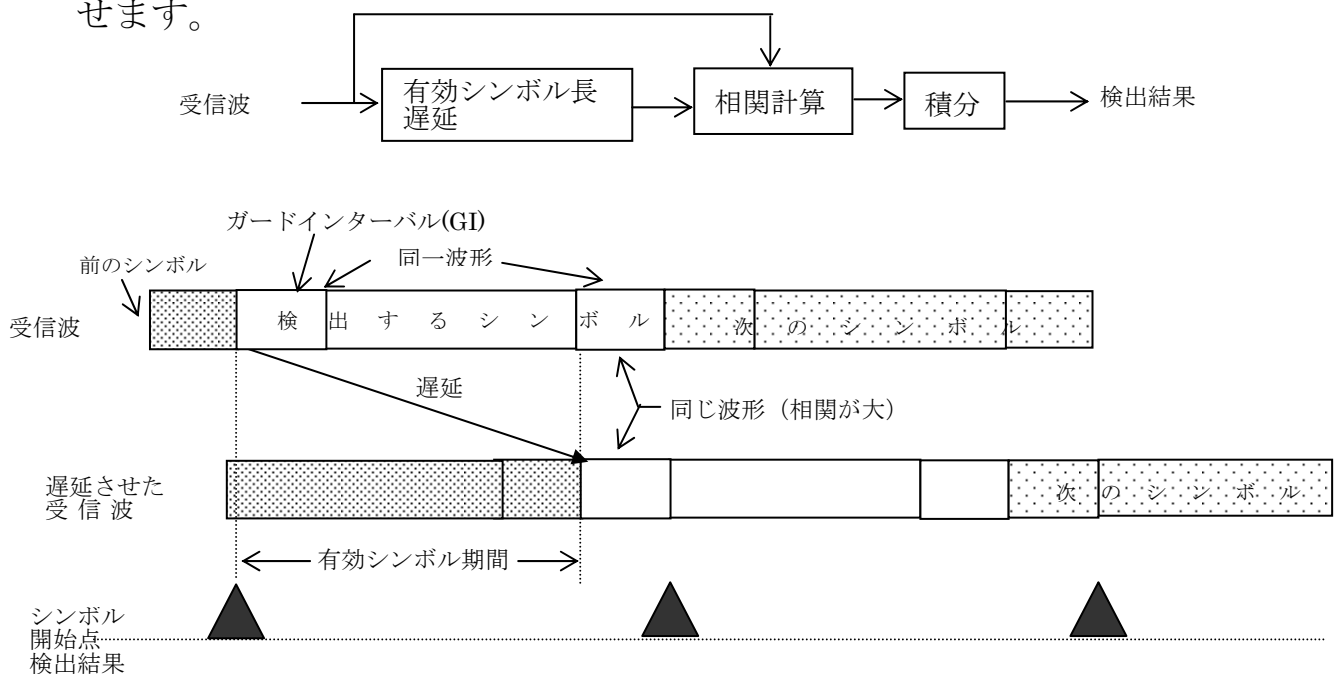


図3 ガードインターバル相関による有効シンボル期間の検出

[TMCC・AC 相関検出……キャリア同期] (末尾「制御信号」参照)

もう一つ、キャリア周波数のずれを検出する方法として TMCC および AC の相関検出があります。TMCC とは、復調に必要な変調方式などの制御情報を送るキャリアです。AC とは、付加的な情報のためのキャリアです。これらは、予め決められた周波数位置に挿入されているので、TMCC キャリアと AC キャリアについて本来あるべき周波数位置と FFT 結果との相関から、キャリア間隔単位の大きな周波数ずれを検出します。TMCC と AC は、データキャリアより振幅が大きいので FFT 後に各キャリアの振幅を比較することによりその周波数位置を知ることができます。

☆ FFT

FFT 部は、直交復調部で得られた時間軸のデータから、周波数軸のデータを生成します。この周波数スペクトルは、1 チャンネルあたり約 5600 本の搬送波が等間隔に配列された構成になっており、この搬送波群を OFDM シンボルといいます。OFDM シンボルのうち有効シンボルに相当する期間について FFT を行います。

☆ フレーム抽出

FFT 出力の TMCC 信号のうちのフレーム同期信号を抽出します。

☆ TMCC 復号

TMCC 復号部は、TMCC 信号から伝送諸元の情報である TMCC 情報を取り出し各種制御を行います。

☆ AC 復号

AC 信号の受信機能を備える場合には、FFT 出力のセグメント No 0 (ワンセグ用のセグメント) の AC 信号のうち構成識別が地震動警報情報である「001」「110」を示すとき地震動警報情報を抽出します。

☆ キャリア復調

キャリア復調部は、FFT 部で生成した周波数軸のデータから、TMCC 情報に応じ、DQPSK 用の差動復調や QPSK、16QAM、64QAM 用のスキッタードパイロット (SP) を用いた同期復調を行い、OFDM シンボ

ルにおけるキャリアごとの振幅と位相を検出します。

キャリア復調するためには、予め、受信機に入力される OFDM 波の振幅や位相を送信時のように整えなければなりません。放送局から送信されたまま何の乱れもない状態なら、先に述べたシンボル同期とキャリア周波数同期だけで十分良好に受信できますが、実際に地上デジタル放送の受信では、マルチパスによる遅延波の影響によって OFDM 波の周波数特性や位相特性が乱れています。そのため、FFT 後の各キャリアのレベルや位相に差異が生じることになります。その結果、コンスタレーション（末尾参照）が乱れて受信特性が著しく劣化してしまいます。この補正は、「周波数特性の補正」と「位相特性の補正」により行われます。

[周波数特性の補正]

周波数特性の補正のためには、SP（スキッタ・パイロット）を利用して OFDM 波の帯域全体の周波数特性を把握します。SP は DPSK（差動 BPSK）で変調された基準キャリアで図 4 に示すようにデータキャリア 12 本に 1 本の割合で挿入されています。さらに、SP の挿入位置は、

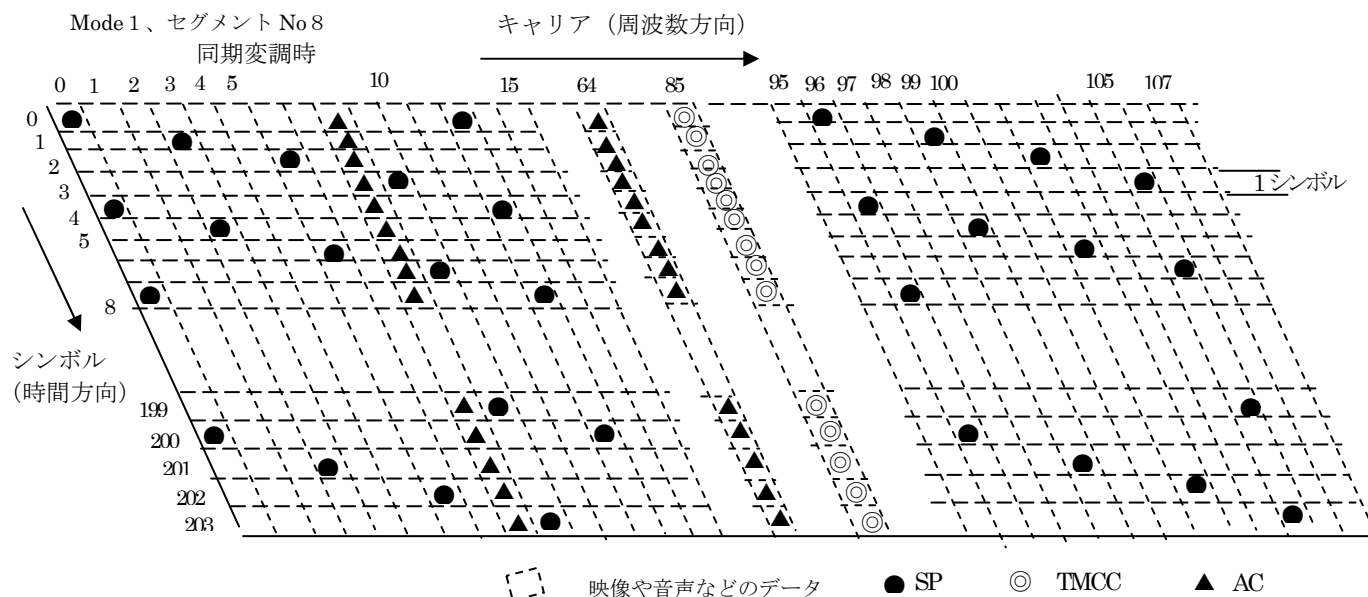


図 4 SP の配置状況

シンボルごとに 3 キャリアずつ移動しながら 4 シンボルで一回りします。

SP の変調内容やレベルは、予め決められた一定の値であるので、これをもとに 図5 に示すように 3 キャリア間隔の周波数特性を把握して、その間を補完した結果をもとに、逆特性で補正することによって、全てのキャリアの振幅は幅はほぼ完全に補正することができます。

[位相の補正]

マルチパス遅延の影響がある場合は FFT で復調したキャリア情報は、周波数特性を補正しても、まだ、位相ずれが残っています。

そこで、再び SP を利用して位相特性を把握して 図6 に示すように位相補正を行います。先ほど述べたように SP の変調とレベルはあらかじめ決められているため位相ずれの情報も得ることができます。

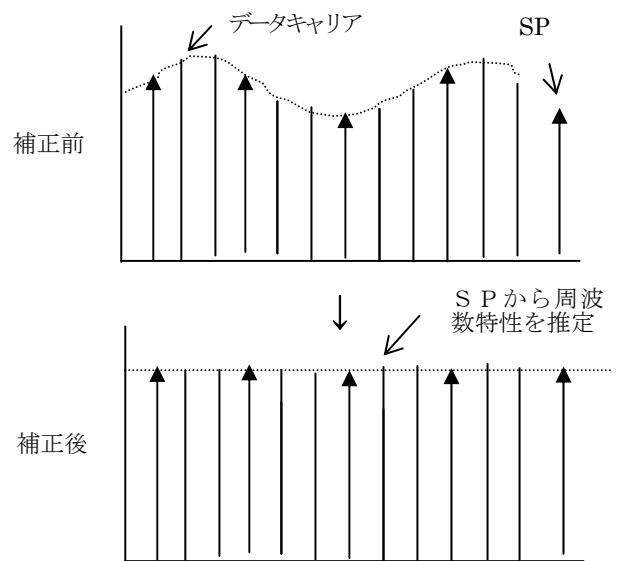


図5 SPによる周波数特性の補正

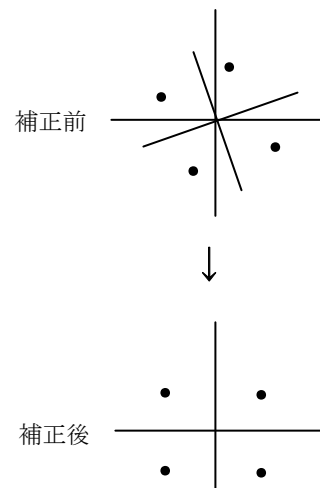


図6 SPによる位相特性の補正

☆ デインタリーブ

周波数特性の補正ならびに位相補正を施した各データに対しては、時間デインタリーブと周波数デインタリーブを行います。デジタル放送電波の形その9 (No51) で紹介したように、OFDM 変調の際のデータ割当法は各キャリアに順次割り当ててのではなく順序を入れ替えていました。

これをインターリーブとって、時間インターリーブと周波数インターリーブがありました。インターリーブは、ノイズやフェージング（気象現象による受信レベルの変動）などによって生じるエラーを分散させてエラー訂正能力を高めるためのものです。

受信機側では、送信側の並び替えをもとに戻さなくてはなりません。これをデインターリーブといいます。

[周波数デインターリーブ]

12 セグメントの放送ではセグメント間にまたがって周波数方向（キャリア番号方向）のキャリアの順序を入れ替える周波数インターリーブ、1セグメントの放送ではセグメント内での周波数インターリーブが行われました。

受信機側では、この周波数インターリーブをもとの周波数位置にもどす操作を周波数デインターリーブといいます。これにより伝送路で特定のキャリアが劣化してもその影響を最小限に抑えることができます。

[時間デインターリーブ]

送信側では、OFDM 信号の同一セグメント内のシンボル間でシンボルを入れ替えています。これを時間インターリーブと呼び、時間デインターリーブ部では、これを元に戻しています。

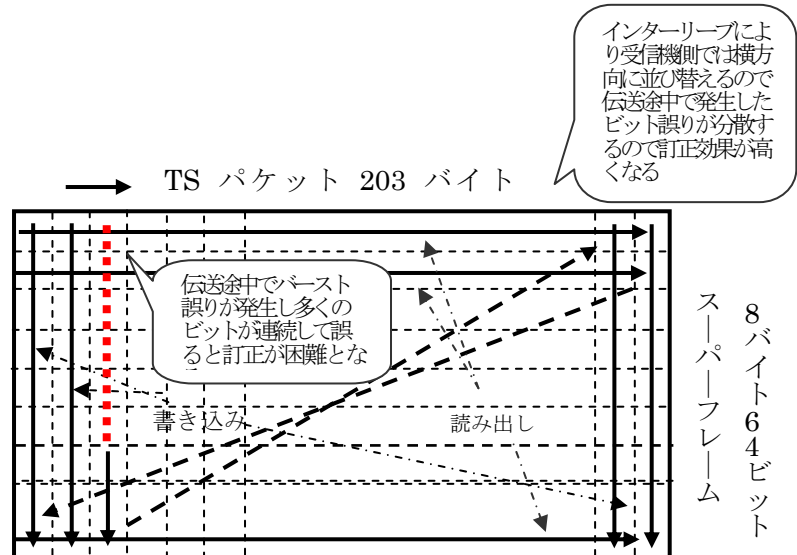


図7 時間デインターリーブの方法

この様子を 図7 に示します。書き込みと読み出しが送信時と逆になります。時間インターリーブにより、連続しているデータを時間的に分散させ、伝送路で生じるバースト誤り（連続して発生する誤り）に強く、移動受信時などの受信特性を改善することができます。

実際の地上デジタル放送では、数百シンボルにわたる長大な長時間インターリーブと周波数インターリーブを合わせた連続したデータをランダムに近い状態にまで分散させて送信しており、このことは、逆にノイ

ズやフェージングの影響がデインターリーブ後にはランダムに近い状態に分散することを狙っています。この後、QPSK や 64QAM など変調方式ごとにデマッピングされてデータキャリアの変調データが得られます。

☆ デマッピング

デマッピング部では、周波数デインターリーブ、時間デインターリーブで元に戻った周波数軸のデータの各キャリアの振幅と位相の情報からもとに割り当てられていた符号列を判定します。実際は 64QAM ですが、ここでは 16QAM の例で符号判定の考え方を 図 8 に示します。

16QAM では、1 シンボルで 4 ビットのデータを伝送できます。そのビットを $[b_0, b_1, b_2, b_3]$ とします。

受信したキャリアの振幅 A と位相 ϕ の対応する点 (図の「●」印) が図のどの位置になるかを照合します。振幅と位相に対応して各データのデータ割り当てがきまっている (図の「○」印の 16 個所) ので受信機にその情報の変換テーブルを構成しておくことで容易に符号判定ができます。

この例では受信したキャリアのデータのビットは
 $[0010]$ となります。

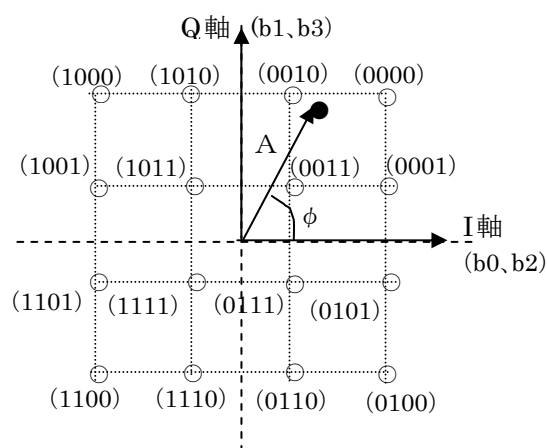


図 8 デマッピングの例 (16QAM)

[もっと知りたい方のために]

◎ 日本のデジタル放送では、QPSK、16QAM、64QAM などの位相が直交関係にある2つの搬送波を合成して伝送する直交変調が用いられています。このとき直交する搬送波をそれぞれ I 軸と Q 軸として、位相と振幅に割り当てたデジタル信号の各シンボル位置を表したものをコンスタレーションといいます。シンボル点の配列を星座(Constellation) にたとえこう呼んでいます。

受信信号の CN 比の低下や雑音などの妨害波の影響を受けた場合、搬送波の振幅や位相が変化するため、図1に示すようにコンスタレーションは、妨害がないときの理想的なシンボル位置との差が大きくなります。

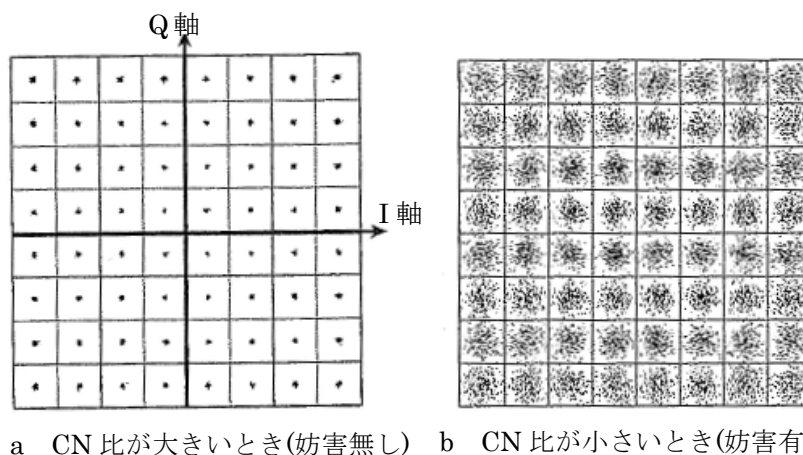


図1 64QAM のコンスタレーションの観測例

また、シンボル点のばらつきかたの特徴(放射状、同心円状、ランダムなど)は、信号劣化の原因を特定する手がかりとなります。

コンスタレーションのバラツキを数値化したものが MER(変調誤差比 : Modulation Error Ratio) です。MER は、図2に示すコンスタレーションの理想的なシンボル位置から実際の受信シンボルまでのベクトル量 ΔP の比をデシベル値で表したものです。MER の大きいほど高品質な信号となります。

MER (dB) は 次の式で求められます。

$$MER (dB) = 10 \log \frac{\left| \sum_{k=1}^N (I_k^2 + Q_k^2) \right|}{\left| \sum_{k=1}^N (\Delta I_k^2 + \Delta Q_k^2) \right|}$$

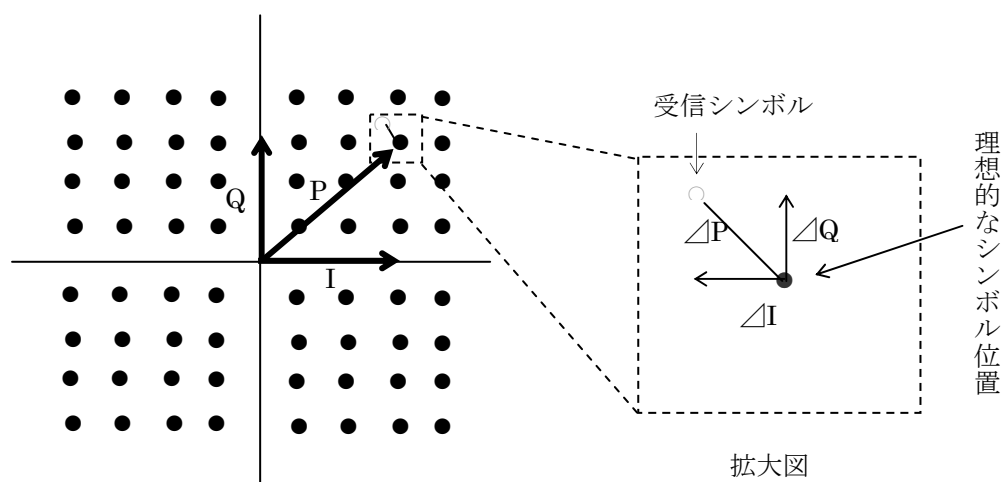


図2 64QAMのコンスタレーションと変調誤差比

◎ 制御信号について

- SP(Scattered Pilot)と CP(Continual Pilot)

SP と CP は、放送受信時に遅延波などの影響で振幅・位相特性がフラットでない場合を想定して、受信機での同期・復調用として予めデータシンボルの間に挿入しておく振幅や位相の基準信号で、BPSK 変調で送られます。

SP は、搬送波方向(周波数方向)とともにシンボル方向(時間方向)にも分散して挿入していて、搬送波方向には 12 搬送波ごとに 1 回、シンボル方向には 4 シンボルごとに 1 回挿入しています。

- TMCC(Transmission and Multiplexing Configuration Control)

階層伝送の構成や各セグメントの伝送パラメータなどを記述している信号で、差動復調の位相基準信号やフレーム同期信号、OFDM セグメント形式識別信号、TMCC 情報などで構成されています。TMCC 情

報には放送種別を識別するための情報、放送事業者が任意のタイミングで階層構成や伝送パラメータを切り替える情報、緊急警報放送用起動フラグなど受信機の制御を行うための重要な情報が含まれているため、所要 CN 比が小さく復調処理が容易な DBPSK 変調で送られます。

- AC(Auxiliary Channel)

AC 信号は、伝送回路など変調波の伝送制御に関する付加情報です。AC 付加情報は、CP と同種のパイロットキャリアを DBPSK 変調して伝送されます。AC 信号には、2 種類 (AC1 と AC2) があり、AC1 は同期変調部 (16QAM、64QAM、QPSK) や差動変調部 (DQPSK) のセグメントに拘わらず固定の周波数位置に配置していて、AC2 は差動変調部に配置しています。