

第1章 ワイヤレス コミュニケーションの基礎

本章では、ワイヤレス情報通信の基礎として、マルチメディア情報通信で用いられているパケットや高能率伝送方式、誤り訂正について述べる。また、デジタル情報通信の基礎理論について簡単に説明する。

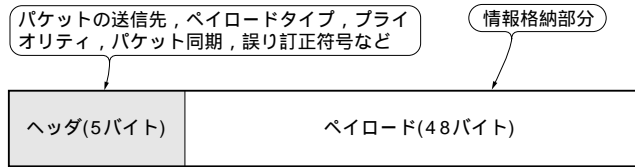
はじめに、本書を理解するために必要となる最低限の基礎知識として、「スペクトル」、「通信容量定理」、「誤り率特性」などの概念について説明する。また、無線通信の基礎として、「送信電力」、「波形等価」についても解説する。これらの基礎原理の中で、後の項を説明する際に必要となる重要なものは、項の最後に番号(定理 ~)をふり、まとめておく。ただし、かなり簡略して説明するので、厳密な定義は参考文献などを参照していただきたい。

1.1 マルチメディア情報通信とワイヤレス通信

マルチメディア情報通信は、音声や画像、データなどの信号を、高能率符号化技術によってデジタル化し、誤り訂正などの処理を加えたあと、パケット化した情報を相手に送信する。マルチメディア情報通信を利用したもっとも身近な例としては、インターネットがあげられる。例えば、インターネットでは、ATM(Asynchronous Transfer Mode)に代表される非同期型の伝送方式を使用している。

伝送方式は同期型と非同期型とに分類することができ、同期型の伝送方式は常(連続的)に情報を伝送し続ける方式である。例えば、放送のように常時一定の情報回線を必要とする場合に使用される。それに対して、非同期型の伝送方式は、確保する回線路を必要に応じて太くしたり細くしたりする方式で、限られた通信容量を複数のユーザーで共用する場合に用いられる。つまり、非同期型接続であるインターネットは、回線のタイムスロット

図1
ATM向けパケットの構造



に空きがあるのを見つけると、そこに伝送したいパケットを挿入して伝送する通信方式であるといえる。そのため、大量の情報(ファイル)を伝送する場合でも、パケットとして小口に分割して伝送することになる。

ATMが適用しているパケットの構造を図1に示す。図に示すように、一つのパケットはヘッダが5バイト、ペイロード(情報格納部分)が48バイトという構成になっている。ヘッダ部分にはパケットの送信先、ペイロードタイプ、プライオリティ、パケット同期、ヘッダの誤り訂正符号などの情報が格納される。これらのヘッダ情報により、非同期状態における通信の効率化を図っている。

また、ペイロード部分にはユーザーが伝送したい情報ビットを格納するためのスペース(48バイト分)が確保されており、ここにデジタル化された音声や画像、データなどの情報を入れて伝送することができる。このペイロード部分には、ユーザーが利用したいマルチメディア情報を自由に格納できることから、インターネットに代表されるように様々な情報のやりとりが可能になった。

さらに、従来からの有線接続によるインターネットに加え、最近になって急速に普及し始めた携帯電話や無線LANなどの無線接続系におけるインターネットアクセスについても、非同期型のパケット接続方式が適用されており、パケット通信はマルチメディア情報伝送の主要なものになりつつある。このように、マルチメディア情報通信におけるパケット通信の位置付けは非常に重要なものとなっている。本章の後半では、この無線によるパケット通信方式として、これから本格的な実用化が期待されているワイヤレスパケット通信方式について詳解する。

1.2 スペクトル拡散通信

また、マルチメディア情報通信の形態は、基本的にはマルチメディア情報の高能率符号化と高能率伝送を組み合わせ、伝送路の状況やユーザーの利用形態に合った高能率符号化方式や高能率伝送方式を選択(または階層化)できるようになっている。

高能率伝送技術については、近年の技術の進歩により、伝送する情報のマルチメディア化や通信速度の高速化が実現されてきた。高能率伝送技術について、これまでは周波数帯域の有効利用を実現するために、一つのチャンネルの帯域幅を狭くし、単位周波数当たりのチャンネル数を増やすことで対応してきた(狭帯域化の時代)。しかし、情報のマルチメディア化に伴って、様々な種類の情報がやり取りされるようになり、帯域幅のマルチ化や通信速度の高速化が求められるようになった。このため、従来の狭帯域化によりチャンネル数を増加する方法では、能率的な周波数帯域の利用法とはいえなくなってしまった。そこで、最近では1チャンネルの帯域幅を広くとり、高速通信回線を確保することで周波数利用効率を高める研究が行われている(広帯域化の時代)。

その中でも、スペクトル拡散(SS: Spread Spectrum)通信は、広帯域(高速)情報通信として最も注目されている技術の一つである。スペクトル拡散通信では、拡散符号系列によって広い周波数帯域にスペクトルを拡散させて送信する。受信側では、拡散符号系列の種類からチャンネルを切り替えることが可能である。米国では以前から携帯電話に利用され、現在では無線LAN、Bluetooth、デジタル放送、GPSなどでも同様の技術が利用されている。このように、スペクトル拡散通信は今後の期待が大きいワイヤレス情報通信方式である。

スペクトル拡散通信方式は、

- 1) 直接拡散方式
- 2) 周波数ホッピング方式
- 3) パルス化周波数変調方式

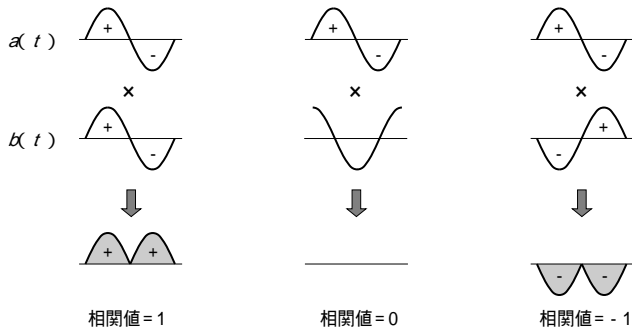
に大別される。これらの詳しい内容については第2章で述べる。

この中で、実際には直接拡散方式や周波数ホッピング方式がよく利用される。例えば、直接拡散方式は携帯電話、無線LAN、デジタル放送などで利用されており、周波数ホッピング方式はBluetoothで適用されている。また、スペクトル拡散と同様に、広帯域通信方式として適用されているものとして、マルチキャリア(OFDM)方式もある。OFDMは、高速無線LANや地上波デジタル放送などに利用されている。

1.3 相関とスペクトル

相関は、前述の信号波形の似ている度合いを示す指数として用いられる。相関値は一般に正規化された形で示され、相関値 = 1 とは同じ波形、相関値 = 0 とは全く似ていない波形、相関値 = -1 とは反転した波形を示す(図2)。

図2
相関の概念



例えば、ある時系列信号 $a(t)$ が時間的にどの程度似ているのか（または変化しているのか）を求めるためには自己相関が用いられ、 $\sum a(t) \times a(t + t')$ を正規化すればよい。また、二つの時系列波形 $a(t)$ 、 $b(t)$ の似ている度合いは相互相関が用いられ、 $\sum a(t) \times b(t + t')$ を正規化することにより求めることができる。これらの計算法からもわかるとおり、波形（信号）の似ている度合いを数値化するための相関は、それぞれの波形の乗算波形の面積を求めてやればよいことがわかる。

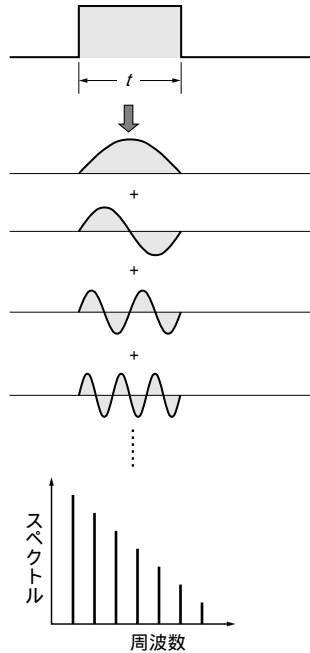
この相関からスペクトルという概念が生まれた。スペクトルとは、ある任意の波形にサイン波（またはコサイン波）などの基底関数（波形）成分が、どの程度含まれているのかを示す値である。

例えば、人間の声の周波数成分を求める場合にも、前述した相関を求める原理で、1Hz、2Hz、...、1kHz と似ている度合いを求めれば、どの周波数成分を多く含んだ声かを分析することができ、これを加工して周波数軸上にグラフ化すればスペクトル成分を求めたことにもなる。

それでは、デジタル信号（パルス）のスペクトル成分はどのようになっているのだろうか。音声の分析と同様に、時間幅 t のパルス波形と基底関数（周期 $1/n$ （ n は整数）のサイン波形）の相関を求めると、図3に示すように高い周波数のサイン波成分まで含んでいることがわかる。

このことは、パルスが様々な周波数のサイン波成分を含んでいることを示しており、ちょうど太陽光線をプリズムによりスペクトル分析すると、色がないように見える太陽光が様々な波長（色）の光の合成で成り立っている事実を確認できることに相当する。また、逆に言えば、太陽光を合成するためには、さまざまな波長（周波数）の光を合成しなければな

図3
デジタル信号(パルス)の
スペクトル成分



らないことを示す。

つまり、デジタル情報1bitは、その周期 t の整数倍の周期のサイン(高調)波成分を含んでおり、本当に矩形をしたパルス表現するには非常に高い周波数成分までを合成する必要があることを示している。さらに、パルスの周期 t が小さくなればなるほど、基底関数の周波数は逆に大きくなり、より高い周波数成分が必要になることがわかる。

この概念が、第2章で説明するスペクトル拡散の基本的な原理である。さらに、基底関数としてコサイン波形(実項)とサイン波形(虚項)の両波形を用いてスペクトル分析をする手法が有名なフーリエ変換で、逆にスペクトル成分から波形を合成する手法が逆フーリエ変換である。

また、スペクトルについてももう一つ重要な特性がある。数学の時間に一度は目にしたことがある三角関数の積算定理に、次の公式がある。

$$\cos \omega a t \times \cos \omega b t = (\cos(\omega a - \omega b)t + \cos(\omega a + \omega b)t) / 2$$

この式は、2つの周期 $\omega a t$ と $\omega b t$ のコサイン波形を乗算すると、それらの和と差の周期のコサイン波形の平均と同値になることを示している。線形系であるスペクトル分析・合

成系でもこのことは同様に観測され、二つの周期の波形の積算波形のもつスペクトルは、それぞれのもつスペクトル成分の和と差で表現されることが知られている。1.4項で述べる「変調」も、波形次元では乗算をしていることと同等であり、スペクトルが両側(和と差)に現れることもこの理論で説明できる。

定理

相関は波形の似ている度合いを示す指数で、波形同士を乗算して面積を求めればよい

デジタル情報(パルス)は、その周期の整数倍の高調波(スペクトル)を含んでいる
波形次元の乗算(変調) = スペクトル次元の和と差(両側スペクトル)

1.4 情報変調と通信容量定理

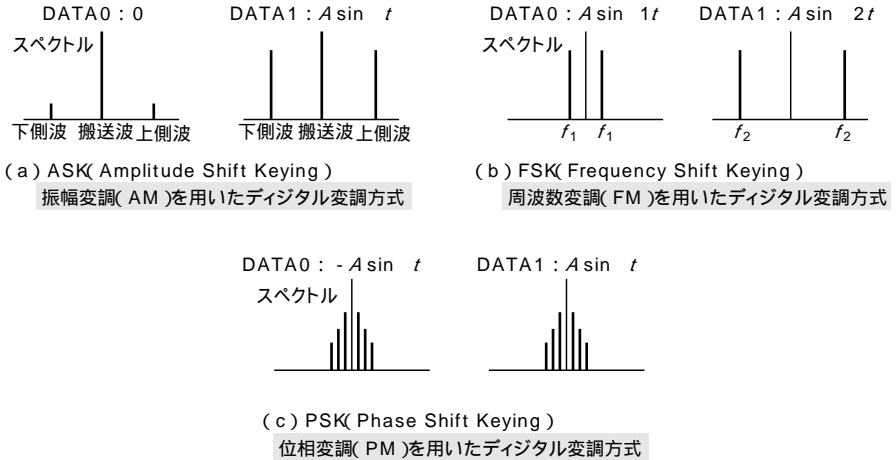
デジタル情報通信では、「1」か「0」かの情報ビット(DATA)を相手に伝えることが目的である。デジタル情報変調は、情報ビットを何らかの電気信号に変換して送出する。また、この電気信号を受信して、もとの情報ビットに戻すことをデジタル情報復調という。

ここでは、代表的な3種類のデジタル情報変調方式について、サイン波形(搬送波)の例で説明する。サイン波の振幅(Amplitude)の大小(または有無)で、情報ビットを表現したデジタル変調がASK(Amplitude Shift Keying: 振幅変調)である。また、サイン波の周期(周波数: Frequency)の大小で情報ビットを表すのがFSK(Frequency Shift Keying: 周波数変調)であり、サイン波の向き(位相: Phase)で情報ビットを表現するのをPSK(Phase Shift Keying: 位相変調)と言う。受信側では、それぞれの信号波形を比較(相関)して、送信側からの情報ビットを判断(検波)する。それぞれのデジタル変調方式の波形とスペクトルを図4に示す。

図からもわかるとおり、情報を伝送するためにはある程度のスペクトル幅が必要になる。また、1つのチャンネルが占めるスペクトル幅を占有帯域(幅)という。この占有帯域の幅は、伝送しようとする情報の速度(単位時間あたりの伝送情報量)に依存する。アナログ信号でAM変調をする場合、伝送する音声の最高周波数の2倍の帯域幅が必要になる。

例えば、1.5kHzまでの高さの周波数(音)を伝送する場合には占有帯域幅は3kHzとなり、15kHzまで伝送するためには30kHzの占有帯域が必要になる。このことは、占有帯域幅が広がれば、高い周波数の音まで伝送することができることを示している。つまり、占有

図4 デジタル変調方式の波形とスペクトル



帯域幅が広げれば、高音質で伝送することが可能になることがわかる。ホワイトノイズやピンクノイズの雑音特性などはさておき、占有帯域幅が狭いAMラジオよりも、広い帯域を利用するFMラジオの音の方がアナログ音質がよいのは、基本的にはこの原理に基づいている。

この占有帯域幅とアナログ音質の関係を、デジタルに適用して考えたものがシャノンの通信(チャンネル)容量定理である。定理では次式のとおり、ある(占有)帯域幅が与えられたときに、その帯域における信号電力と雑音電力の比から、誤りなしに伝送できるデジタル情報の速度(通信容量)が求められる。また逆に、通信容量と S/N から、伝送に最低限必要な帯域幅を計算することもできる。

$$C = W \log_2(1 + S/N)$$

C : 通信容量(bps) W : 占有帯域幅(Hz) S : 信号電力(W) N : 雑音電力(W)

デジタル伝送では、前述の「音質」が「通信容量(情報速度)」に置き換わり、通信容量が大きければ情報を高速に伝送でき、結果としてデジタル画質・音質は向上するが、広い占有帯域幅が必要になることがわかる。

この式は理論式で、いわば最終到達目標であり、我々のような実験屋はいろいろな工夫をして実働環境をこの定理に近づけるべく努力をしている。冒頭でも述べたとおり、スペクトル拡散(CDMA)やマルチキャリアなどの広帯域通信方式では、広い占有帯域幅を必

要とする代わりに、高速な情報通信回線(容量)を確保できることが、通信容量定理からも確認できる。

この定理について信号電力 S と雑音電力 N を変数として見直してみる。例えば、 S が N より63倍強く受信されるような良い受信環境を考えた場合、 $C = W \log_2(1 + 63)$ となり $C = 6W$ が求まり、同じ占有帯域幅でも6倍の通信容量を確保できることがわかる。逆に、 S が非常に弱い劣悪な環境では $S/N = 0$ に近づき、 $C = W \log_2(1 + 0)$ となって $C = 0W$ となってしまい、広帯域通信のメリットがなくなることが予想される。

一方、ある程度までの雑音環境であれば、広い占有帯域幅を適用することで、少々 S/N が悪くても、通信容量を落とすことで誤りのないデジタル情報伝送が可能であることを示している。このことが、一般にスペクトル拡散通信が雑音に強いとされる理由の根拠である。詳細な雑音排除特性については、マルチパス特性などと合わせて後の項で述べる。

定理

通信容量定理より、スペクトル拡散通信では高速通信が可能になる

通信容量定理より、スペクトル拡散通信は雑音への耐性が高くなる

1.5 S/N とビット誤り率

デジタル情報通信方式を評価する重要な指数として、 S/N とビット(情報)誤り率があり、それぞれ以下の式で計算される。

$$S/N = 10 \log_{10} [\text{信号電力}(W) / \text{雑音電力}(W)]$$

$$\text{誤り率} = 10 \log_{10} [\text{誤りビット数}(\text{bit}) / \text{全ビット数}(\text{bit})]$$

S/N の単位はdBで、受信機側の帯域通過フィルタ後の受信信号電力と雑音電力の比から計算され、一般に受信環境の悪さを示す指数として用いられる。他にも D/U 、 C/N などがあるが、同様な概念で計算される。

例えば、 $S = N$ のときは $S/N = 0\text{dB}$ 、 $2S = N$ のときは $S/N = +3\text{dB}$ 、 $4S = N$ のときは $S/N = +6\text{dB}$ という具合に、信号電力が2倍強くなると3dBずつ増え、逆に $S = 2N$ では $S/N = -3\text{dB}$ という具合に、雑音電力が2倍強いと3dBずつ減る。これらは S/N の目安として覚えておくと便利な値である。

ビット誤り率は、 P_e とかBERと書かれる。例えば、 $P_e = 10^{-6}$ というように表現され、これは情報を 10^6 ビット伝送したときに1ビットだけ誤る伝送路であることを示している。つまり、 $P_e = 10^{-k}$ で k が大きいほど情報ビットの誤りが少ない良い伝送路ということになる。