

第1章 無線通信システムの基礎

1.1 通信ネットワーク

通信システムの目的は、ある地点から別の地点に情報を迅速・確実に伝送することにある。このためには、情報の送り主と宛先の間には、通信のための経路が存在する必要がある。通信システムにおいて、この経路にあたるのが情報通信ネットワークである（図 1.1）。

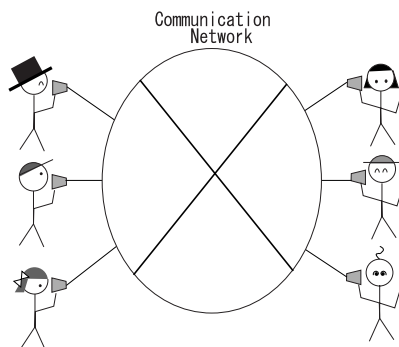


図 1.1: 情報通信ネットワークのイメージ

最も単純な情報通信ネットワークの構造は、通信を行う可能性のあるすべての組み合わせ間に通信経路をあらかじめ設置することである。この場合、 n 人の通信システムの利用者が互いに通信をする可能性があるのであれば、なら双方向通信路は $n(n-1)/2$ 必要となり（図 1.2）、利用者数が多い場合は現実的ではない。そこで、多くの情報通信ネットワークでは、通信の中継を行う装置を複数準備し、各装置において接続先を適切に選択することで、送り主と宛先の間には通信路を設定する手法が用いられる。このような構成において、通信装置間を結ぶ通信路を回線またはリンク (link) という。また図 1.3 に示すような、通信を行う二者を結ぶ複数のリンクがつながった道筋を経路 (route) という。

なお図 1.3 では、中継装置とそれらを結ぶ通信路は木構造に基づく階層をとっている。¹ このような木構造（階層構造）をとるような通信ネットワークでは、利用者とネットワークを直接結ぶ回線をアクセス回線 (access link)² とよぶ。一方木構造の根に近い側（階層構造として上位）の通信回線は、しばしばバックボーン³ と呼ばれる。携帯電話を例にとると、アクセス回線は無線による端末と基地局の回線である。

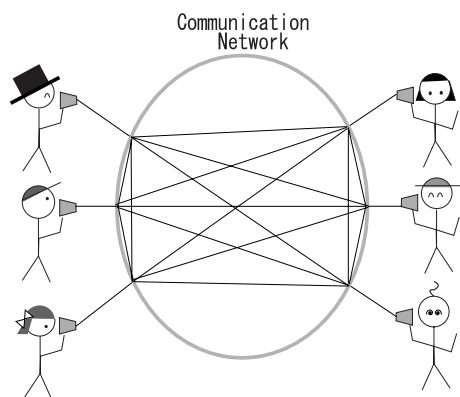


図 1.2: N対Nの全経路を設置した情報通信ネットワーク

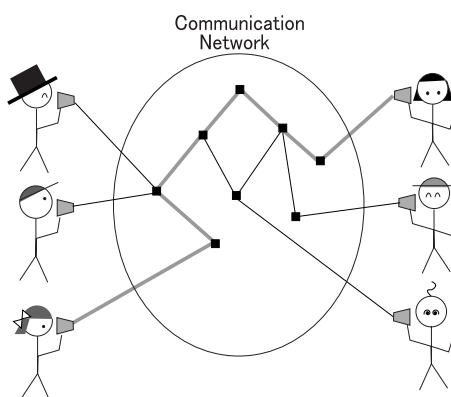


図 1.3: 木構造を持つ情報通信ネットワーク

¹ 図を見るとグラフ中に閉路が存在し、完全な木構造ではない。このように木構造に基づく場合でも、通信量の多い装置間にバイパスを設けたりすることがしばしば行われる。

² 電話では加入者線 (subscriber link/lines)

³ 幹回線 (trunk) とも

1.2 無線通信と有線通信

1.2.1 有線通信と無線通信

情報通信ネットワークにおけるリンクは、無線通信で行う場合と有線通信で行う場合がある。このうち無線通信は、特殊な難しい技術ではない。われわれは、オギャーと生まれたその日から、無線通信を使用しているといえる。音声通信もまた、無線通信システム(図1.4)なのであるから。この場合、情報源たる音声信号は、そのまま、伝送媒体である大気に対して送信される。しかし、大気中の音声の到達距離は高々しれたものである。また第三者に傍受される危険もある。

そこで、音声を、送受信者のみが共有する固体媒体によって伝送する方式を考えよう。たとえば金属棒は、音声振動を良く伝えることができる。また金属棒よりは、伝送損失が大きいが運搬や設置が容易な線路として、繊維(糸)を用いた有線通信システム(図1.5)が現実的である。

以上のように音響によるアナロジーで無線通信と有線通信を比較すると両者の特徴が良く分る。同じ送信出力(声の大きさ)と受信能力(耳の良さ)であれば、無線通信より有線通信のほうが遠距離伝送が可能である。また通信線路(図1.5なら糸)を設置さえすれば複数組の通信が、互いの妨害無しに行える、通信媒体の管理が容易であるために第三者の傍受を受け難い、などといった利点がある。しかし一方で、有線通信は、通信線路の敷設が必要であること、線路の損傷によって容易に通信が失われること、そして移動の自由度が大きく損なわれることといった欠点もある。無線通信と有線通信は、これらの得失のバランスの上で選択されることになる。

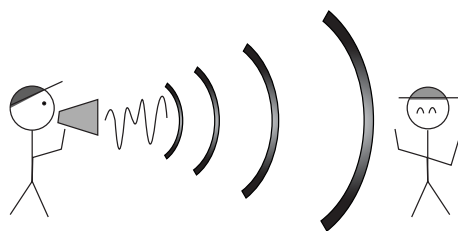


図 1.4: 無線通信システム

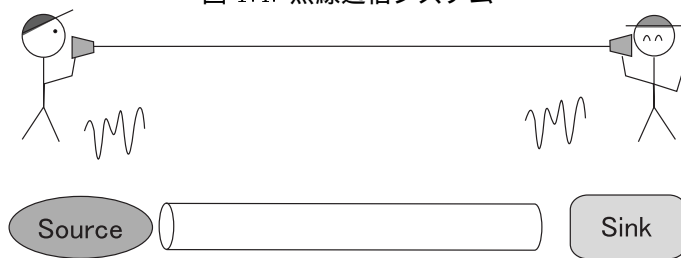


図 1.5: 有線通信システム

1.2.2 無線周波数信号への変換

上で述べたものは、音声をそのまま、媒体の振動として伝送するものである。しかし、電気通信システムでは、音声は、一旦電気信号に変換されてから、伝送される。また、いわゆる「無線通信(Radio Communication)システム」では、電気信号である音声信号は、さらにある種の変形を施され、無線周波数信号(電波)として伝送される(図1.6)。

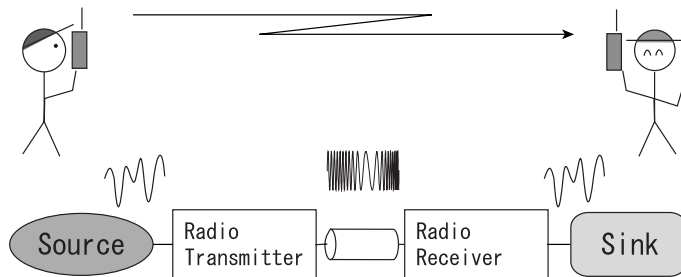


図 1.6: 無線通信システム

音声の振幅変動をそのまま電圧変動に置き換えた音声信号のスペクトルを観測すると、数10Hz から数10kHzの範囲、特にほとんどのエネルギーが数kHzの範囲に集中している。その中心となる周波数は、その信号が存在する周波数範囲（帯域幅）と同程度である。このような信号を、ベースバンド信号という。これに対し、例えば携帯電話の信号では中心周波数は、数百MHzであるのに対し、帯域幅は高々10kHz程度である。このように中心周波数の大きさに対して、帯域幅の大きさが小さな信号を狭帯域信号という。

無線通信システムにおけるもっとも本質的な作業は、伝送したい情報を表現するベースバンド信号を無線周波数を中心周波数とする狭帯域信号に置き換える作業である。この作業を、変調とよび、また情報を表現するベースバンド信号を、変調信号という。ベースバンド信号を狭帯域信号に変換することは、高い周波数の正弦波信号（搬送波）の振幅・位相・周波数を変調信号の関数で表現することによって実現できる。変調の実際については、次章で述べる。最後に無線通信に用いられる無線周波数信号を中心周波数で分類したものを表に示す⁴。

表 1.1: 無線通信に用いられる搬送波周波数

3k~30kHz	超長波
30k~300kHz	長波（電波時計等）
300k~3MHz	中波（放送等）
3M~30MHz	短波（国際放送等）
30M~300MHz	超短波（FM放送、テレビ等）
300M~3GHz	極超短波（携帯電話、UHFテレビ等）
3G~30GHz	マイクロ波（衛星放送、衛星通信等）
30G~300GHz	ミリ波（衛星通信、レーダー等）
300G~3THz	サブミリ波（<フロンティア>）
赤外線	0.7 ~ 数百 μm (~ 約 400THz)
可視光	380nm ~ 780nm (400 ~ 800THz)

1.3 メディアを分け合う技術

1.3.1 回線交換, パケット交換

無線通信における伝送媒体（音声なら大気、無線なら空間⁵）は複数の利用者で共有されている場合が多い。そのためには、ひとつの伝送媒体を複数組の通信者が使用できるための技術が必要である。

この技術は、大別すると2つに分けることができる。即ち回線交換とパケット交換である。前者では、伝送媒体を何らかの方法で分割し⁶、それぞれ（回線という）を通信を行おうとする利用者毎に割り当てる方式である。この場合、回線が割り当てられれば確実に通信できるが、回線割り当てが無い限り通信できない。また回線割り当てのためのオーバーヘッドも大きな問題である。

後者のパケット交換は、送信情報は、ある程度の長さ毎に分割され、送信者・受信者の識別情報などの情報が追加された一塊のデータ（パケットといわれる）となる。そして各ユーザのパケットは、ある規範にしたがって伝送媒体に送出される。受信者は、伝送媒体に送信されたパケットはすべて受信し、その中で自分あてのものだけを取り込むことで通信を行う。

比較的に長い時間通話が継続する電話においては、回線交換が自然な概念である。そのため、例えば公衆電話網や内線電話網などは、回線交換により構築されている。一方、短時間のパースト的に情報が発生する計算機間通信を扱うデータ通信網においてはパケット交換が採用されている。たとえばインターネットのプロトコルがそうである。

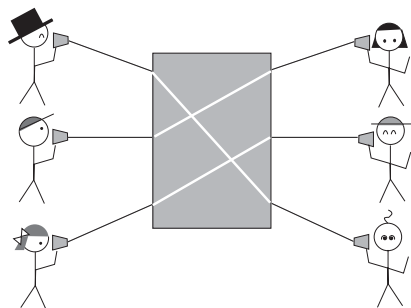


図 1.7: 回線交換

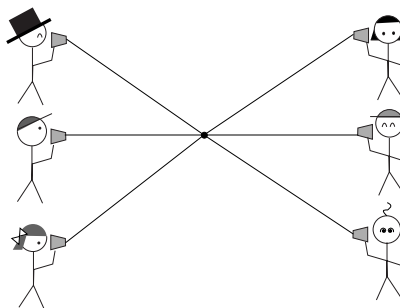


図 1.8: パケット交換

⁴ M(メガ)は 10^6 倍即ち百万倍, G(ギガ)は 10^9 倍即ち十億倍, T(テラ)は 10^{12} 倍即ち1兆倍

⁵ Ether!

⁶ 無線システムでは、信号を周波数, 時間, 符号, 物理空間等で区別する。

1.4 無線通信システムの構成要素

1.4.1 アナログ無線通信システム：送信機

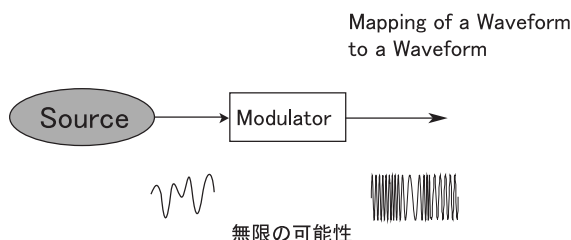


図 1.9: アナログ無線通信システム送信機

アナログ無線通信システムの送信機を概念を図 1.9 に示す。送信機の主たる仕事は、情報を担う信号波形に基づき、伝送路の性質に適した信号（無線システムにおいては無線周波数信号）を生成することである。この操作は、生成されるべき信号の周波数近傍の正弦波（搬送波）を送信したい情報波形（変調波という）に応じて変形する作業と理解できる。そのためこの操作を変調 (modulation) という。たとえば振幅変調 (DSB-SC) と言われる方式では、搬送波を $c(t) = \cos\omega_c t$ 変調波を $m(t)$ とすると、送信信号 $s(t)$ は、搬送波に変調波を乗積することで変形したもの、すなわち $m(t)c(t)$ である。

しかし現在の通信方式、特にデジタル変調においては、変調を「搬送波の変形」と理解するよりも、むしろ、変調波に応じた送信信号波形の対応付け、すなわち、 $s(t) = f(m(t))$ と理解する方が適切である場合が多い。

1.4.2 デジタル無線通信システム：送信機

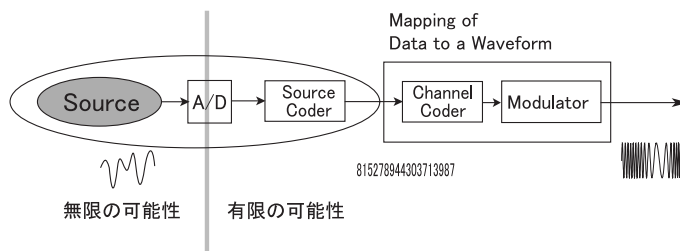


図 1.10: デジタル無線通信システム送信機

デジタル無線通信システムの送信機を概念を図 1.10 に示す。

この図からも分かるように、送信機側の機能は、大きく 2 つにわけられる。即ち、情報を数値（デジタル）に変換する部分と、そのデジタル情報を無線周波数の信号にマッピングする部分である。

情報の数値化

アナログ信号をデジタル通信システムで伝送する場合には、信号はまずアナログデジタル変換部でデジタル化される。たとえば、帯域幅 4kHz の音声の場合、8kHz のサンプリング・レートが必要であり、各サンプルを 8bit で表現すると、ビットレートは 64kbps となる。

このアナログ・デジタル変換は、一定時間範囲において無限の可能性のあるアナログ情報を、有限の可能性に置き換える作業を行っているといえる。これにより、真の（アナログ）情報と数値化情報の間には一定の誤差（量子化雑音）が発生する。しかし一方、送信される情報が有限個であることを利用して、受信側では、誤りの訂正などを行うことができるようになる⁷。

情報源には、計算機データなどのように本来デジタルであるものがある。またアナログ・デジタル変換出力を情報源と見なすことで、アナログ情報源もデジタル情報源として扱うことができる。この場合は、一定時間に発生するデジタル情報はビットレートで規定される有限の可能性しか持たない。

⁷ この性質は、無線通信にかぎらず、デジタル化一般において成立する。

情報源符号化

上記のようにして、デジタル化された情報は、通常多くの冗長を含む。冗長とは、そのデジタル情報のエントロピーと実際に数値化されたデータが表現し得る情報量の差である。これは、上述のデジタル化の過程では、最大周波数と許容量化雑音以外のアナログ情報源の性質が考慮されていないことに起因する。たとえば、人間の音声の情報源の場合、直流や単一周波数正弦波が発生される可能性は無いのに、単純なAD変換器出力はそれらの波形も表現できる情報表現を用いている。

このように、アナログ情報源を単純にデジタル化したものには、アナログ情報源の性格によっては、大きな冗長を含んでいる。そこで、情報源の性質に基づき、データ量の削減を行うことが可能である。この作業は、情報源符号化、またはしばしば情報圧縮と呼ばれる。情報圧縮では場合、元の情報を失うことなく（元の情報を完全に復元できるような）データ量を削減する可逆圧縮と、元の情報の性質の一部が失われる非可逆圧縮がある。たとえば、PDCのハーフレートでは、PSI-CELP（非可逆圧縮）により3.45kbpsの低ビットレートで音声を表現している。

情報源符号化（圧縮）を行うと、データ量は、理想的にはデジタル化された情報のエントロピーに等しいところまで削減でき、すべてのデータのビットは等しい情報量を担うようになることが期待できる。しかし、このためには、大きな計算量と処理時間が必要になる。たとえば動画の場合、連続するフレーム間の相関が大きいことを利用することが有効な圧縮の戦略である。しかしこれは利用したフレーム数の時間だけ（計算機の能力がいくら高くても）処理に時間がかかる。したがって、実際には、許容できる時間内で処理を打ち切った圧縮が行われる。この場合、出力データは、情報源のエントロピーと比べると大きな量を持ち、またしばしば出力データのビット毎に担う情報量が異なる。

情報通信システムの立場では、従来は情報源符号化出力を通信システムの入力と考え、情報源符号化出力をあたかも情報源とみなす考え方が標準的（古典的）である。しかし情報源符号化と後述の通信路符号化を一体とみなす考え方も一般的になりつつある。

情報のマッピング

アナログシステムの場合と異なり、デジタルシステムでは、一定の時間内において送信すべき情報は有限の可能性しか持たない。これら有限のデジタル情報の各々に対応する無線周波数信号波形を準備することが可能である。そうするデジタル無線システムの送信機が行う作業は、デジタル情報に対して対応する波形を選びそれを送出することと行うことができる。

実際、ソフトウェア無線のような考え方で送信機を構成する場合、このような形、即ち情報と波形のマッピングとして送信機を構成することも可能になりつつある。しかし現在の多くのシステムでは、このマッピング作業は、複数のステップに分けて行われる。具体的には以下の通りである。

符号化

情報源符号化：前項で述べた情報源符号化（圧縮）をさす。ここでは情報源の持つ（自然な）冗長を削減することを目的とする。

通信路符号化：伝送すべき情報に（人為的な）冗長情報を加えることで「誤り訂正符号化」を行う。符号化前後のデータ量の比を符号化率という。

変調

送信すべき情報系列に対して、時間関数（送信波形）を割り当てる作業である。情報の1ビット毎に、パルス波形を割り当てるだけでなく、数ビット毎にまとめて波形割り当てを行う場合もある。

1.4.3 アナログ無線通信システム：受信機

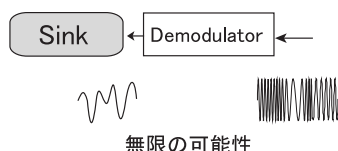


図 1.11: アナログ無線通信システム受信機

アナログ無線通信システムの受信機を概念を図 1.11 に示す。受信機においては、送信機から送出された信号が加法性擾乱（雑音、干渉等）と乗法性擾乱（フェージング等）を受けて到着する。受信機では送信機で行った操作の逆操作により、情報波形（変調波）を取り出す。このような操作を復調

という．たとえば，上の振幅変調信号 (DSB-SC) の場合だと，位相を合わせた搬送波を受信機で準備し受信信号と掛け合わせ⁸，その低周波成分を抽出することで変調波の再生を行う．
 この場合も，送信機同様，復調を，受信信号（時間関数）と復調器出力（時間関数）のマッピングと理解することが可能である．

1.4.4 デジタル無線通信システム：受信機

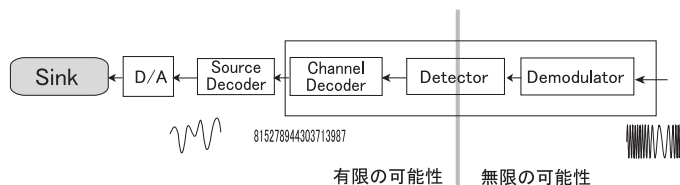


図 1.12: デジタル無線通信システム受信機

デジタル無線通信システムの受信機概念を図 1.12 に示す．

受信機では，送信側で符号化・変調として行った操作の逆を行う．デジタル無線通信システムにおいては，一定の時間内において送信機が送出する波形は有限の可能性しかない．しかし伝播途上の雑音やフェージングなどの擾乱により，受信機の入力は無限の可能性をもった信号となる．従って受信機では，この無限通りの（しかし一定の物理的制約のある）受信信号に対して，送信波形（送信情報）の対応付けを行う作業を行う必要がある．言い換えれば，受信機は，受信信号のとりうる波形の集合（無限要素）を送信情報系列数に分割し，受信信号がどの分割された部分集合に属するかを検出する作業を行っていることになる．

図 1.12 では，受信信号波形からサンプル（アナログ）を得る Demodulator と，そのサンプルから送信された符号データを推定する Channel Detector で実現されている．高度な誤り訂正符号を用いている受信機では，Detector の部分は，Channel Decoder の部分と一体化して構成される場合が多い．また後段の情報源符号化の復号 (Source Decoder) と通信路符号化までも一体としての構成についても提案・検討がなされ始めている．

⁸ 擾乱がない場合 $c(t)s(t) = c(t)c(t)s(t) = s(t)(1 + \cos 2\omega_c t)/2$ を得る