

無線通信方式の基礎

Fundamentals of Wireless Communication Systems

久保田周治
Shuji KUBOTA

芝浦工業大学工学部 〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5
College of Engineering, Shibaura Institute of Technology 3-7-5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo, 135-8548 Japan

E-mail: kubota@sic.shibaura-it.ac.jp

Abstract Recently, LTE, mobile WiMAX and Wireless LAN have attracted considerable attention as the next generation broadband wireless standards. In order to understand the wireless communication systems such as 3.9G mobile and next generation Wireless LAN, this tutorial lecture provides a comprehensive overview of the basic technologies, e.g. error control schemes, modulation schemes including spread spectrum and OFDM technology, multiple access schemes and MIMO technologies for wireless communication systems.

1. はじめに

近年LTEやモバイルWiMAXをはじめとした第3.9世代の携帯電話や次世代無線LANが脚光を浴びている。これらの次世代ブロードバンド・ワイヤレスシステムはマルチキャリア伝送方式であるOFDMやマルチアンテナ技術であるMIMO等の様々な無線通信技術を採用するため、回路設計に際しその基本技術の理解が必要となる。本基礎講座では、無線通信技術の基礎として、誤り制御技術、変調技術、アクセス（多元接続）技術からOFDM, MIMO技術など最近の技術動向までを概説する。

2. 無線通信システムの種類と構成

デジタル無線通信方式は、従来、固定無線中継・衛星通信・移動通信の各分野で発展を遂げてきたが、近年それらの適用分野は無線アクセス（ユーザ・アクセス系）にシフトしてきた。

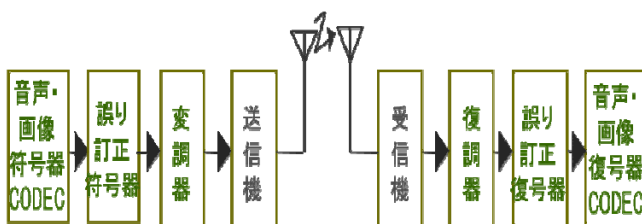


図1 デジタル無線通信方式の構成

そのシステム構成は、図1のように情報源からのデータを誤り制御のために符号化/復号化する機能、変復調機能、送受信機能、アンテナなどからなり、同時に複数のユーザが無線リソースを共用するためのアクセス機能が具備されている⁽¹⁾⁽²⁾。また、データの高速度・広帯域化・大容量化のニーズに伴い、周波数選択性フェージングなどに対応するフェージング補償技術や空間多重(SDM-MIMO)技術が用いられている。

3. 誤り制御技術

デジタル無線通信方式の伝送路上で発生する誤りを受信側の処理によって訂正する誤り訂正(FEC: Forward Error Correction)や、誤りを検出して誤ったデータを再送信させる自動再送制御(ARQ: Automatic Repeat Request)により、高品質かつ高信頼な無線伝送を実現するのが誤り制御技術である。

誤り訂正符号はブロック符号と畳込み符号に大別され、それぞれの符号の中にランダム誤りに強い符号とバースト誤りに強い符号がある。ブロック符号の例として、BCH符号、リード・ソロモン(RS)符号、低密度パリティ検査(LDPC: Low Density Parity Check)符号などが、畳込み符号の例として、畳込み符号に対するビタビ復号、ターボ符号などがある。さらにブロック符号と畳込み符号を連結した接続

符号(Concatenated code, 鎖状符号ともいう)がある。図 2 に、ランダム誤り及びバースト誤り訂正に有効な主な誤り訂正符号・復号方式を示す。

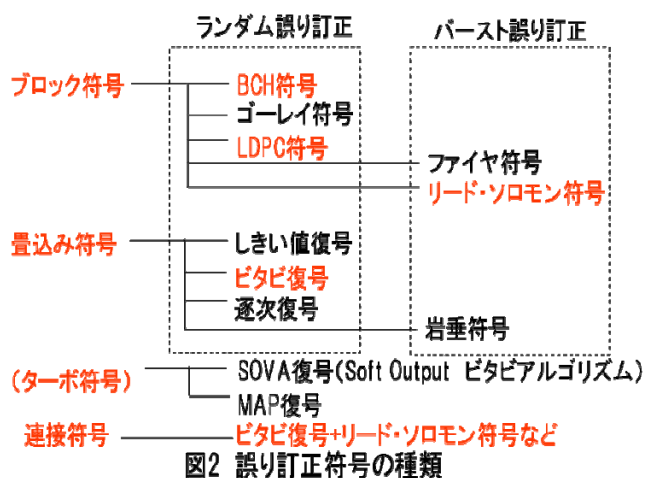


図2 誤り訂正符号の種類

(1) 畳込み符号化-ビタビ復号法

畳込み符号は、連続する情報データに対して検査符号を連続的に付加して符号化する。図 3 に示す畳込み符号器は、符号化率 $r=1/2$ 、拘束長 $K=3$ の例である。また、この畳込み符号を図 4 のようなトレリス表現で表すが、この符号の最小ハミング距離 D_{min} は 5 となる。 $K=7$ の符号では、 $D_{min}=10$ の畳込み符号が得られる。畳込み符号の最小距離 D_{min} は畳込み符号の状態数 $N_s = 2^{B(K-1)}$ が大きいほど大きくなり、例えば符号化率 $r=1/2$ 、拘束長 $K=7$ の畳込み符号の状態数は $N_s=64$ 、符号化率 $r=3/4$ 、拘束長 $K=3$ の畳込み符号の状態数も $N_s=64$ となる。

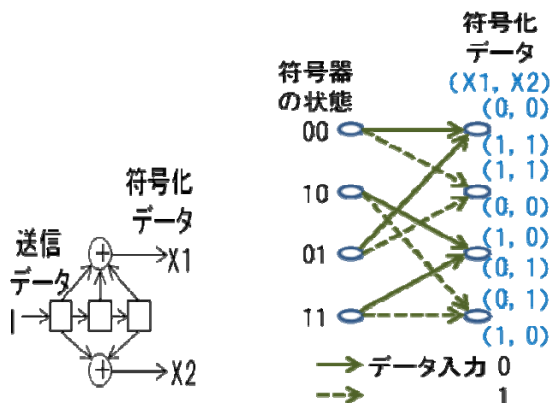


図3 畳込み符号器

図4 畳込み符号のトレリス表現

畳込み符号に対する受信側の復号法としては、簡易な回路構成で代数的な論理演算で実現できるしきい値復号法や比較的複雑な回路を必要とするビタビ復号法⁽¹⁾⁽³⁾、逐次復号法等がある。ビタビ復号法は、1960年代後半に Viterbi により提案された畳込み符号

に対して最も高い誤り訂正効果を発揮できる復号法（最尤復号とも呼ばれる）である。誤り訂正復号を行う時、受信信号のアナログ情報を利用して計算することで誤り訂正効果を高くできる。これを軟判定（ソフト・デシジョン）と呼ぶ。また、符号化率可変のビタビ復号は、符号化率 $r=1/2$ の符号をベースにしてパンクチャド処理（符号の一部を送信しない）の手法により符号化率 $2/3, 3/4, 7/8$ といった高効率な符号化及び復号を実現している。

ビタビ復号は LSI 技術の進歩に伴い応用が進み、まずランダム誤りが支配的な衛星通信に、その後、接続符号の内符号としてデジタル放送、インターリーブやスペクトル拡散、OFDM との組合せで無線 LAN、移動通信をはじめとする多くのシステムに応用されている。

(2) ターボ符号

ターボ符号(Turbo code)⁽¹⁾⁽⁴⁾は、1993 年 Berrou により提案され、シャノン限界に近づく高い誤り訂正効果が示された。ターボ符号は情報データとそれをインターリーブで並べ替えたデータをそれぞれ符号化し、2つの符号語から接続符号を生成し、復号を行う際に他方の系列の復号結果を利用して繰り返し復号を実施する。ターボ符号器および復号器の基本構成を図 5、図 6 に示す。

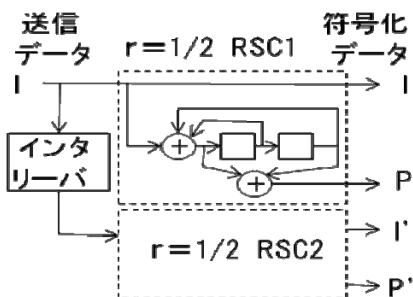


図5 ターボ符号器

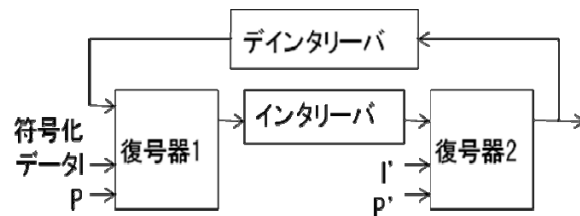


図6 ターボ復号器

ターボ復号器は、2つの復号器とインターリーブ、デインターリーブから構成される。復号器 1 は受信信号

とデインタリーバを経た復号器 2 からの信頼度情報をもとに復号を行う。復号結果をインタリーバで並べ替え、復号器 2 の信頼度情報とする。上記の復号過程を繰り返し行うことで最終的な復号結果を出力する。復号アルゴリズムとしては MAP（最大事後確率）復号、Log-MAP アルゴリズムや軟判定出力ビタビ復号アルゴリズム (SOVA: Soft Output Viterbi Algorithm) などがある。ターボ符号の特性は、SNR の増大と共に BER 特性が急激に改善されるウォーターフォール領域と BER 特性の改善が緩やかなエラーフロア領域を有し、復号反復回数が多くなるほど特性が改善される。第 3 世代移動通信の W-CDMA から用いられている。ブロック符号によるターボ符号も検討されている。

(3) 接続符号

接続符号 (Concatenated Code)⁽⁵⁾ は、ブロック符号と畳み込み符号単体を連結することにより、それぞれを単体で利用する場合以上の誤り訂正効果が得られる。Fornery Jr により検討された。2 元符号（例えば畳み込み符号-ビタビ復号）を内符号 (Inner Code、伝送路側の符号) に、 2^k 元符号（例えば RS 符号）を外符号 (Outer Code、情報源側の符号) に適用する。両符号の間にインタリーバを挿入し、内符号出力に残る誤りを分散し外符号による誤り訂正効果を高める。処理遅延時間が大きくなるが、高い誤り訂正効果を有し、ディジタル放送などに応用されている。

(4) LDPC 符号

LDPC (Low Density Parity Check) 符号⁽⁶⁾ は 1960 年代に Gallager により提案された符号であるが、近年の信号処理能力の発達、ターボ符号による繰り返し復号法の開発が LDPC 符号への注目のきっかけとなった。LDPC 符号は低密度なパリティ検査行列 H で定義されるブロック符号であり、実際のパリティ検査行列数は数十から数万と大規模なものとなる。

線形ブロック符号なので、パリティ検査行列から生成行列を導出することができ、導出された生成行列を用い情報データの符号化を行う。

LDPC 符号の応用については、無線 LAN の 802.11n のオプション、WiMAX のオプション、移動通信の LTE 等のオプションなどが検討されている。

(5) 符号化変調

誤り訂正符号を用いる場合、符号化と変調を切り離して誤り訂正を符号のハミング距離に基づいて行うのではなく、符号化されたデータの変調方式における誤り確率を考慮して符号のユークリッド距離を

もとに誤り訂正を行う方法もある。この考え方を後述の多値変調と畳込み符号に適用した方式をトレリス符号化変調方式⁽¹⁾⁽⁷⁾という。

(6) ARQ (自動再送制御)

ARQ は送信側で情報データに誤り検出符号（例えば CRC 符号）を付加して送信し、受信側で誤りを検出し、送信側に再送を要求する方式である⁽²⁾。符号の冗長度が小さく比較的簡単な処理で高い信頼性が得られる。その反面、再送要求のためのフィードバック回線と再送のためのバッファを必要とし、データ伝送の遅延が無視できなくなる。また、誤りが多くなると伝送効率が急速に低下する。ARQ 方式には大別して、以下の 3 つの方式がある。

- (a) Stop-and-wait (SAW) : 受信側から ACK（受信成功応答）を確認すると次のパケットを送信
- (b) Go-back-N (GBN) : N パケットを 1 群とし、パケットを連続送受信して NACK（受信失敗応答）を確認すると、その失敗パケットが含まれる 1 群を再送
- (c) Selective-Repeat (SR) : パケットを連続送受信して NACK を確認すると、その失敗パケットだけを選択して再送

ARQ 方式は、パケット通信を用いたデータ通信等のリアルタイム性が要求されないサービスに広く利用されている。

さらに、図 7 のような ARQ と FEC を組み合わせたハイブリッド ARQ がある。ハイブリッド ARQ タイプ I は、誤り訂正と検出ができる符号（例えば 2 誤り訂正 3 誤り検出符号）を用いてパケットを構成し、誤り検出された時のみ NAK 返信で再送要求する。タイプ II は、1 回目は基本的な ARQ と同じで、NAK 受信後の再送は情報ビットではなく FEC の冗長ビットを送信して 1 回目受信結果と合わせての誤り訂正を実行する。このため、誤り率の低い伝送路では基本 ARQ と同様で効率が良くなる。



図7 ハイブリッドARQ

4. 変調技術

デジタル無線通信方式において情報を伝送するには、その伝送媒体である電波に情報を乗せるデジタル変調を行う必要がある⁽¹⁾⁽²⁾。

変調信号の振幅を情報のデジタル信号により変調する場合を振幅シフト変調(ASK: Amplitude Shift Keying)という。また、位相 $\phi(t)$ をデジタル信号により変調する場合を位相シフト変調(PSK: Phase Shift Keying)という。さらに、周波数をデジタル信号により変調する場合を周波数シフト変調(FSK: Frequency Shift Keying)という。FSK の一種として FSK の変調指数（搬送波の振幅に対する変調波の振幅比で変調の深さを表す）を 0.5 とした MSK (Minimum Shift Keying) がある。

表1 デジタル変調方式

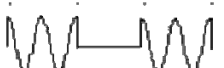
変調方式	情報と変調信号
ASK (Amplitude Shift Keying)	
PSK (Phase Shift Keying)	
FSK (Frequency Shift Keying)	

表1に各デジタル変調方式における情報（ベースバンド信号）と変調信号との関係を示す。これらはいずれも電波のパラメータ（振幅、位相、周波数）のうち1つを変化させるものであるが、2つのパラメータを変化させることによって、より高効率な変調を実現することができる。直交振幅変調(QAM: Quadrature Amplitude Modulation)はその代表的なものであり、振幅と位相の双方を同時に変化させる変調方式である。

(1) 非線形変調方式-MSK 型-

デジタル変調方式を比較する場合、どの方式が最適であるかは使用条件によって異なってくる。大きな送信電力を得ることを優先する場合（電力制限）、変調信号が送信機の高出力増幅器(HPA)の飽和領域（非線形領域）で増幅される方が有利であり、MSK や MSK をガウスフィルタにより狭帯域化した GMSK のような定包絡線変調方式ほど帯域（スペクトル）の広がりが小さく、隣接チャネル間干渉を小さくできる。しかしながら、スペクトルの広がりは無視できず、得られるチャネル容量には限界がある。

(2) 線形変調方式-QPSK 型-

限られた帯域で多数のチャネル数を得ることを優先する場合（周波数制限）、変調信号を帯域制限後、高出力増幅器(HPA)の線形領域で増幅する。例えば、QPSK のような線形変調方式を帯域制限したスペクトルで送信し、チャネル容量を大きくすることができる。

図8に代表的なデジタル変調方式である QPSK と MSK の電力スペクトル（帯域制限なし）を示す。最初のヌル点を与える周波数帯域幅を比較すると QPSK より MSK が約 1.5 倍広がっているが、帯域外減衰特性は MSK の方が優れている。線形変調である QPSK はこのスペクトルに帯域制限を施すことにより狭帯域化され、チャネルの大容量化を図ることができる。

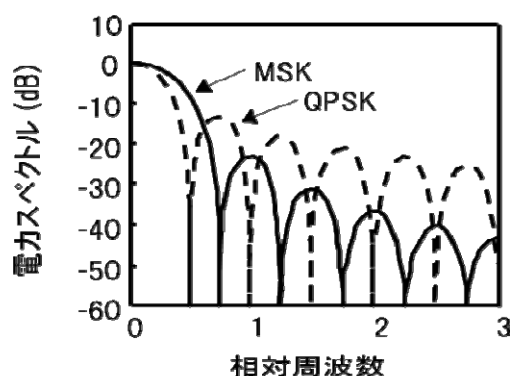


図8 デジタル変調方式のスペクトル

図9(a)に示す QPSK の信号点配置の遷移から、QPSK はゼロクロスする場合があります。これにより信号の振幅変化が大きく増幅に非線形性があると周波数帯域が広がる。また、同一シンボルが連続すると同一信号点に留まり位相が遷移せず、タイミング再生が難しくなる問題もある。これを解決するため、図9(b)に示す信号のゼロクロスを避け狭帯域化を図り、かつ同一シンボルが連続しても常に $\pi/4$ 位相遷移するように変化させる変調方式が $\pi/4$ シフト QPSK である。

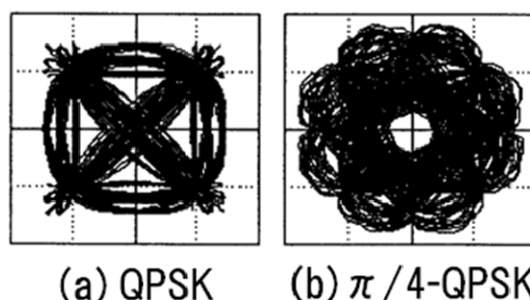


図9 QPSKと $\pi/4$ -QPSKのスペクトル

(3) 多値変調方式-QAM 型-

位相変調と振幅変調を組み合わせることでより多くの情報を 1 つのシンボルで伝送する QAM (Quadrature Amplitude Modulation, 直交振幅変調) が広く用いられている。直交する位相の I チャネルと Q チャネルにそれぞれ 4 つの振幅値をとり、 4×4 で 16 の位相と振幅の組み合わせから伝送シンボルを選び送信する。16 値で 1 シンボルあたり 4 ビットの情報、64 値で 1 シンボルあたり 6 ビットの情報が伝送可能となる。多値変調方式の 16QAM や 64QAM は振幅変調の要素も有することから、増幅器の動作点としては飽和領域から十分レベルを下げて (バックオフという) 線形増幅する必要がある。QAM の多値数としては 16 値 QAM, 64 値 QAM などが一般的だが、図 10 のように符号マッピングとの組み合わせにより増幅の非線形性に対する性能を向上する 12 値 QAM, 24 値 QAM 等も検討されている。12 値 QAM は、7 ビットを 2 シンボルで送信する 3.5bit/symbol の変調方式である。1 シンボルで 4 ビットを伝送する 16 値 QAM より伝送効率は劣るが、16QAM における 4 隅の振幅位相点が無いことから非線形増幅に対する歪みが小さく、より電力効率を高めることが可能となる。同様に 24 値 QAM は、9 ビットを 2 シンボルで送信する 4.5bit/symbol の変調方式である⁽⁸⁾。

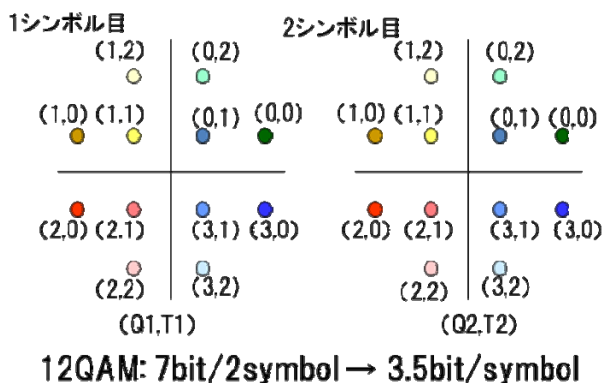


図10 12値QAM変調

(4) リンク・アダプテーション

無線回線では、距離が短ければ受信電力は大きくなり、より高速な信号伝送が可能になる。逆に距離が長くなるにつれて受信信号レベルが小さくなり、信号 1 ビットあたりの受信電力が小さくなることから、高速な信号伝送を行おうとすると通信品質が劣化する。変調方式としても、距離が短く受信電力が大きければ、1 ビットあたりの所要受信電力が大きな多値変調を用いて所定の周波数帯域でより高速な信号伝送が可能となるが、距離が長くなると所要受信電力が小さくてすむ QPSK や BPSK といった変調

方式が望ましくなるが、一定の周波数帯域で送れる情報量は小さくなる。同様に、誤り訂正方式についても、距離が短く受信電力が大きければ符号誤り率は比較的小さいので、誤り訂正能力は小さいが伝送効率が低い高符号化率の誤り訂正符号が使用可能で、より高速な情報伝送が可能となる。一方、距離が長くなると、誤り訂正能力が高いが符号化率 1/2 といった低符号化率の符号が望ましくなるが、一定の周波数帯域で送れる情報量は小さくなる。これらの変調方式や誤り訂正方式を組み合わせると同一の周波数帯域幅であっても、距離が短く受信電力が大きい場合は高速信号伝送に適した多値変調方式と高符号化率誤り訂正方式の組み合わせが有効であり、距離が長く受信電力が小さい場合は低速な信号伝送のための多値数の少ない変調方式と低符号化率の誤り訂正方式の組み合わせが有効となる。これらの組み合わせからなる種々の変調多値数や誤り訂正符号化率の組み合わせの切り替え方式を適応変調、リンク・アダプテーションあるいは、レート・アダプテーションと呼ぶ。モードの切り替えは、受信電力や誤り率など様々なパラメータをもとに制御することが考えられる。

(5) スペクトラム拡散方式

これまで解説してきた変調方式は、情報を搬送波、つまり電波に乗せる役割を果たすが、これを 1 次変調とし、さらに別の符号で 2 次変調するのがスペクトラム拡散方式である⁽¹⁾。無線 LAN や無線 PAN の Bluetooth や UWB などではスペクトラム拡散により他からの干渉 (マルチパス干渉も含む) に強い通信を実現することができる。スペクトラム拡散方式には様々な方法があるが、ここでは代表的な直接拡散方式と周波数ホッピング方式について説明する。

(a) 直接拡散方式

直接拡散方式(Direct Sequence Spread Spectrum)は、1 次変調された送信信号をより高速な拡散符号 (繰返し符号) により 2 次変調することにより広帯域信号 (スペクトラム拡散信号) にして送信する。スペクトラム拡散により送信信号の単位周波数あたりの電力密度は小さくなっており、他の通信に与える干渉が低減される。受信側では送信側と同じ高速の拡散符号で逆拡散を行うことにより、受信信号をもとの 1 次変調信号に戻す。この過程で受信信号に他からの干渉が含まれていても、干渉は広帯域のままで電力密度が低いので、狭帯域な 1 次変調信号のみを通過させるフィルタを通すことにより干渉による劣化を低減することができる。

(b) 周波数ホッピング方式

周波数ホッピング (Frequency Hopping Spread Spectrum)方式では、2 次拡散変調の代わりに高速符号に対応するパターンで搬送波周波数を高速に変化させる。これにより、送信信号はあたかも広帯域信号のようにふるまうことになり、ある周波数に着目すると電力密度の低い信号とみなすことができる。受信側では、送信側の周波数ホッピングに同期して周波数を元に戻すことにより、1 次変調信号が得られる。ここで、他からの干渉信号は一定周波数だとすると受信側のホッピング動作により周波数が分散され干渉による劣化が低減される。

5. アクセス技術

無線ネットワークでは、複数のユーザと基地局がお互いに通信するために無線の電波リソースをどのように割り当てて、通信路（チャネル）をつくるかというアクセス方法（これを多元接続方式ともいう）が重要になる⁽¹⁾⁽²⁾。

このアクセス方式の種類を図 11 に示す。

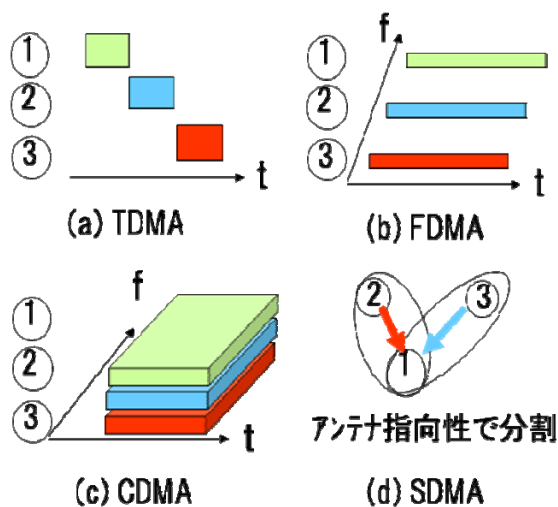


図11 アクセス(多元接続)方式

(1) FDMA 方式

FDMA (Frequency Division Multiple Access, 周波数分割多元接続)は周波数を変えることによって、複数ユーザが同時に通信を行う方式である。例えば、ユーザ 1 には f_1 、ユーザ 2 には f_2 、ユーザ 3 には f_3 という周波数を割り当てて通信を行い、それぞれが異なる搬送波周波数で通信を行うので、周波数切り替えシンセサイザやチャネル選択用の周波数フィルタが必要となるが、比較的シンプルな回路構成となる特徴がある。

(2) TDMA 方式

TDMA は時間を変えることによって複数のユーザが通信を行う方式(Time Division Multiple Access, 時間分割多元接続)で、例えば、ユーザ 1 が T_1 時間使用した後は、ユーザ 2 に T_2 時間を、次にユーザ 3 に T_3 時間を割り当てて通信を行う。それぞれのユーザが異なる時間帯（タイムスロット）を用いて通信を行うことにより、信号の衝突を回避するため、正確な送信タイミングの制御が必要となる。

(3) CDMA 方式

CDMA は、スペクトラム拡散方式における拡散符号を変えることによって、複数ユーザの同時通信を行う方式(Code Division Multiple Access, 符号分割多元接続)である。例えば、ユーザ 1 には符号 1 を、ユーザ 2 には符号 2 を、ユーザ 3 には符号 3 を割り当てて通信を行う。同じ周波数、同じ時間帯で複数ユーザが通信を行っても、拡散符号を変えることによって互いに干渉しないようにする方式である。基地局と各ユーザの距離が大きく異なる場合、近くのユーザの信号が遠くのユーザの信号に対して非常に大きなレベルとなり、干渉を与えてしまう場合がある（遠近問題という）ので、距離によらず受信信号のレベルを一定とするために送信電力制御の機能が必要となる。

CDMA の特徴としては、その耐干渉性から同一周波数でセル繰り返しが可能、多重遅延波を合成受信するレイク受信が可能、セル間のハンド・オーバをスムーズに実現するソフト・ハンドオーバが可能なこと等がある。

これらの基本的なアクセス方式に加え、実際のシステムでは、それらの組み合わせ（例えば、TDMA と FDMA、あるいは、CDMA と FDMA）によるアクセス方式が用いられている。

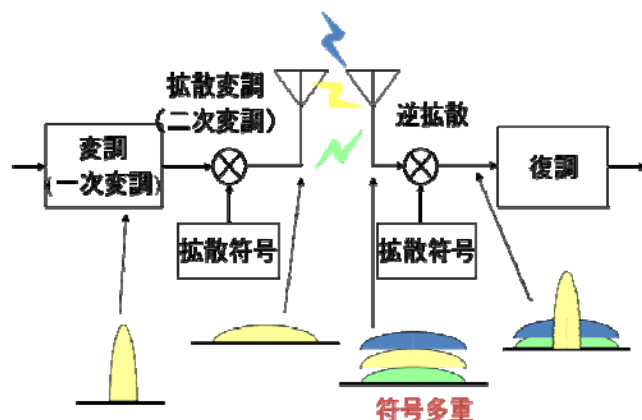


図12 CDMAの原理

(4) SDMA 方式

上記の3つのアクセス方式は、周波数・時間・符号によって通信を区別し、同時に電波を利用する技術であるが、これらに加えて、アンテナの指向性によって空間を分割することで、同じ周波数帯、時間帯での通信を可能にするが SDMA (Space Division Multiple Access, 空間分割多元接続)である⁽⁸⁾。SDMAを実現するためには、個々のユーザに対して基地局からアンテナの指向性(ビーム)を向けてチャンネルを生成するアダプティブ・アレイ・アンテナ(スマート・アンテナともいう)の技術が有効となる。基地局が移動するユーザに対して適応的に個別のビーム(指向性)を生成することが可能になり、これらのビームどうしが完全に分離されている条件では、同一の時間に同一の周波数を用いて同時に通信を行うことが出来るようになる。あるユーザにむけたビームは、他のユーザに対してはできるだけヌル(利得がゼロ)となるように指向性を生成する。また、同一方向にある端末に対しては、時間や周波数を変えて多元接続を実現する。すなわち、限られた周波数リソースにおいても、アンテナ指向性でユーザ回線を分離することにより基地局あたりの伝送容量を増大し周波数利用効率を向上することができる。

これらの「多元接続(Multiple Access)」に対して、「多重(Multiplex)」,「複信(Duplex)」という伝送方法の分類がある。「多元接続」が基本的に複数ユーザ間での接続、すなわち送信点が複数であるのに対して、「多重」は1つの送信点から行われる複数チャンネルの伝送をいう。「複信」は1対1の通信における双方向(上り/下り)のチャンネルをどのように構成するかをいう。

6. OFDM 技術とその応用

(1) OFDM 方式

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) は直交周波数分割多重方式のことで、送信する高速な信号を複数のサブキャリアに分けて、それぞれのキャリアにデータ信号を分散して乗せて並列に多重化して送信する方式である⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。各サブキャリア(数十~数千のサブキャリアを使用する)はBPSK, QPSKなどの位相変調方式やQAM(直交振幅変調方式)で変調されている。

これらのサブキャリアはお互いに重なり合うように密に配置されているが、フーリエ変換によって各サブキャリアを完全に分離することができ、サブキャリア各波が干渉し合わずに完全に並列伝送できる。サブキャリアが重なり合っているのに独立して受信

可能なのは、図13のように、各サブキャリアの中心周波数に他のサブキャリア信号のヌル点(信号電力密度がゼロになる周波数)が一致しているためと理解することができる。

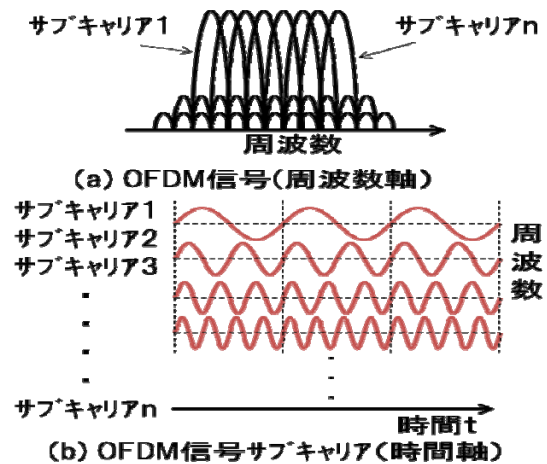


図13 OFDM方式

このように、OFDMでは複数の波(サブキャリア)にデータを分散させて乗せる(変調する)ことによって、1波あたりの変調速度を低速にすることができるため、マルチパス遅延波(多重波干渉)の影響を大幅に軽減することが可能になる。さらに、図14のようにOFDM信号の一部をコピーして追加するガードインターバル(GI: Guard Interval)を設けることにより遅延波の影響を小さくすることができる。

しかし、各サブキャリアの信号が多値変調され、それぞれが独立に変化したものが合成された信号になるため時間軸でみた振幅変動(PAPR: Peak to Average Power Ratio)が大きく、送信増幅器ではより大きなバックオフが必要となる。

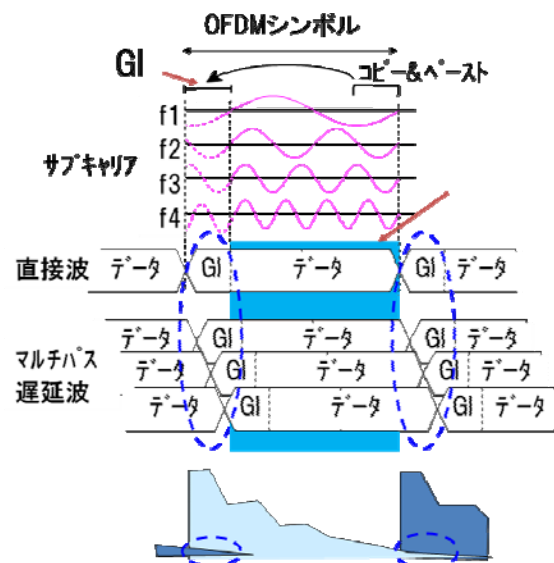


図14 ガード・インターバルの挿入効果

(2) OFDMA 方式

OFDMA 方式⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾は、Orthogonal Frequency Division Multiple Access の略で、OFDM 変調方式において 1 ユーザが OFDM 信号全部を占有するのではなく、周波数軸上のサブキャリアのセット（部分集合）及び時間軸上のタイムスロットの組み合わせで複数ユーザが通信回線をシェアする方法である。

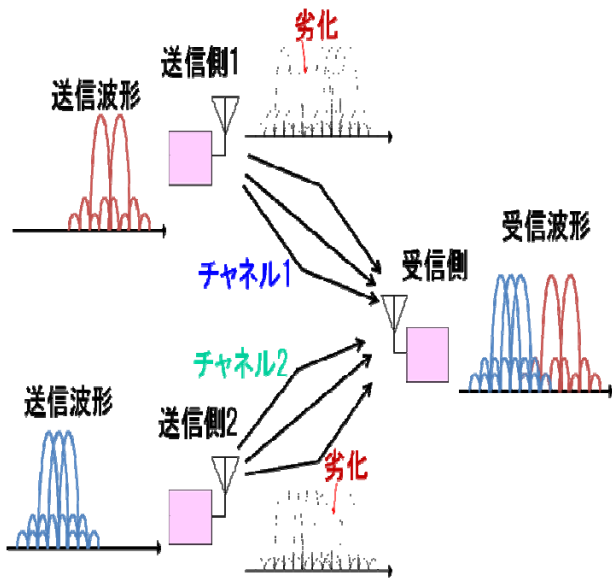


図15 OFDMAの効果

通常、ユーザ端末から基地局への上り回線はそれほど大きな伝送速度を必要としないため、ユーザ端末からの信号伝送に必要な送信電力を低く抑えることが可能になる。これにより、ユーザ端末の小型化、バッテリーの長時間化が可能になる。

また、図 15 に示すように、周波数選択性フェージングに対して、劣化の少ないサブキャリアのセットを割り当てることによって、システム全体の高品質化、大容量化が可能となる。OFDMA 方式は、802.16WiMAX などの多元接続方式として応用されている。

(3) DFT 拡散 OFDM 方式

OFDMA 方式では、各ユーザ端末からの送信信号は OFDM の部分集合であるマルチキャリア信号であるため、増幅器はバックオフをとった線形領域での動作が必須であった。この送信電力の制限を解決するため DFT 拡散 OFDM 方式が検討されている⁽¹⁰⁾。これは、OFDM では複数サブキャリアに分割されて送信される信号となるものを DFT 変換により単一周

波数の比較的広帯域な信号にまとめてから IFFT の処理で周波数に展開するもので、1 ユーザ端末から送信される信号はシングルキャリアの信号となり、その結果、アクセス方式としてはシングルキャリア FDMA (SC-FDMA)方式と等価になる。これにより、PAPR の問題が緩和され電力効率を向上することが可能となる。DFT 拡散 OFDM による SC-FDMA 送信機の構成例を図 16 に示す。

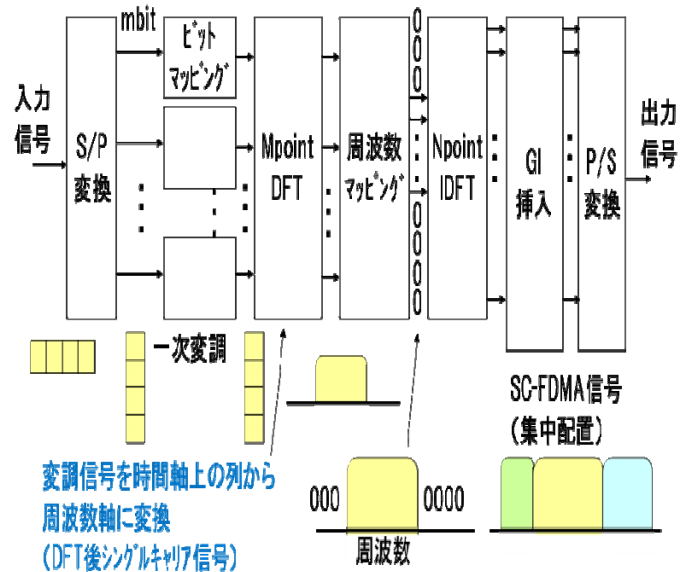


図16 SC-FDMA:DFT拡散OFDM

7. MIMO 技術とその応用

(1) MIMO 方式

無線 LAN や次世代移動通信のさらなる高速化のための手段として MIMO (Multiple Input Multiple Output)技術が注目されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。MIMO は送受信に複数のアンテナ素子を用いることによって電波が伝搬される空間に複数のチャネル（伝搬路）を意図的に構成したりそれら进行操作する技術で、

(a) 多重パスにより伝送容量増大を可能にする（伝送速度高速化）

(b) ダイバーシチ効果や指向性を与えることにより信号電力に対する利得を上げる（受信電力の増大、伝送距離の拡大）

(c) 干渉波を抑圧することにより品質を向上させる（干渉抑圧）

といった技術を含む。特に(1)は同一の周波数リソー

スにおける伝送容量増大を実現する、すなわち、周波数利用効率を増大するための技術として注目され、SDM (Space Division Multiplex, 空間分割多重)とも呼ばれる。

(2) MIMO における伝搬路推定

MIMO の構成例として送受信にそれぞれ 2 系統の送受信装置を用意し、それぞれで異なる信号を同一の周波数で送信する場合を図 17 に示す。

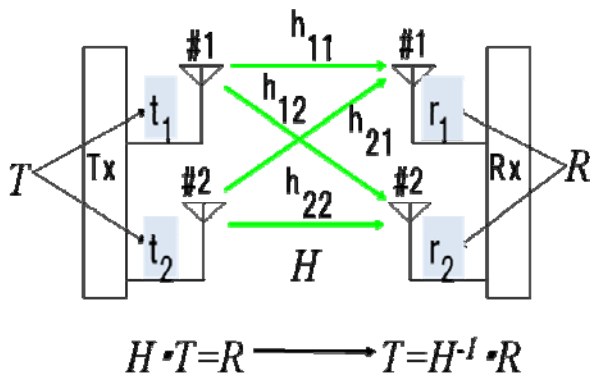


図17 MIMO (SDM)の原理

ここで、送信アンテナ#1, #2 からの送信信号を t_1, t_2 , 受信アンテナ#1, #2 での受信信号を r_1, r_2 とする。 r_1, r_2 はそれぞれ t_1, t_2 の合成波となるが、各アンテナ間の伝達関数を図に示すように $\mathbf{H} = [h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}]$ とし、雑音成分を無視すると、

$$\begin{aligned} r_1 &= t_1 h_{11} + t_2 h_{21} \\ r_2 &= t_1 h_{12} + t_2 h_{22} \end{aligned}$$

となる。この連立方程式を解くと、

$$\begin{aligned} t_1 &= (r_1 h_{22} - r_2 h_{21}) / (h_{11} h_{22} - h_{12} h_{21}) \\ t_2 &= (r_1 h_{12} - r_2 h_{11}) / (h_{21} h_{12} - h_{11} h_{22}) \end{aligned}$$

となり、伝搬路(チャネル)伝達関数 $\mathbf{H} = [h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}]$ が既知であれば受信信号 r_1, r_2 から送信信号 t_1, t_2 を知ることができる。

この $\mathbf{H}$ を受信側で知るためにはバースト (パケット) の先頭信号であるプリアンプルが通常用いられる。これは、あらかじめ送受信間で決められた既知信号を送受信するもので下記のような方法がある。

(a) Scattered 型

送信側は各アンテナから順次既知信号を送信し

(すなわち、あるアンテナから既知信号を送信している時間帯は他のアンテナからは送信しない)、受信側は全てのアンテナからの信号を受信して $\mathbf{H}$ を得る。

(b) STC (Space Time Coding)型

各シンボルタイミングですべての送信アンテナから何らかのプリアンプル信号を送信し、複数送信信号の合成から逆行列演算によって $\mathbf{H}$ を得る。

Scattered 型の場合、各シンボルタイミングで信号を送信していないアンテナが存在するために、全体として送信信号強度は STC 型よりも弱く、このためチャネル推定における SNR 特性は STC 型より劣化してしまう。しかし、STC 型のような逆行列演算をすることなしに直接的に伝達関数行列 $\mathbf{H}$ を求めることが可能であり、回路規模的にはより小さな構成ですむという利点がある。

(3) MIMO 復調処理

前節では、簡単のため 2 系列の例について雑音成分を考慮せず連立方程式で示したが、より一般的には N 系列で行列を用いた表現方法で以下のように説明される。

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{t} + \mathbf{n}$$

が送受信信号の関係であり、 $\mathbf{H}$ の逆行列 $\mathbf{H}^{-1}$ を伝搬路伝達関数として求め、

$$\mathbf{s} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{r} = \mathbf{t} + \mathbf{H}^{-1}\mathbf{n}$$

を得る。この式からわかるように実際には $\mathbf{H}^{-1}\mathbf{n}$ が誤差成分となる。この関係をもとに、受信局側では信号系列の分離処理を行う。以下に、信号系列の分離処理のための代表的な方式を示す。

(a) ZF 方式

簡単な例として、行と列の数が等しい正方行列を伝達関数行列とする場合について考える。伝達関数行列 $\mathbf{H}$ は正方行列であるため、この行列の行列式がゼロでない場合には逆行列 $\mathbf{H}^{-1}$ が存在し、これを用いて送信信号ベクトルを推定することが可能となる。

この ZF (Zero Forcing)方式の基本的な考え方は、各アンテナの受信信号を適宜合成し、それぞれの信号系列が他の信号系列をキャンセルするための線形演算を行う点にある。したがって、複数の受信アンテナで受信された信号は最大比合成されることなく互いに不要な成分をキャンセルしあうだけの処理とな

る。その結果として複数アンテナで受信することによるダイバーシチ利得を十分に得ることができない。さらに、行列の行列式がゼロである場合、逆行列が存在しないことになり、送信信号ベクトルの推定における解は不定となってしまう。

以上の理由から、ZF 方式は回路構成上、最も簡易ではある半面が、特性的には劣る。

(b) MLD 方式

前述の送信信号ベクトルは、各信号系列における送信信号の組み合わせとして与えられている。例えば、変調方式として 64QAM を選択した場合、各信号系列毎に 64 種類の送信信号の候補が存在することになる。つまり、 N 系列の信号系列を多重化する場合には送信信号ベクトルとしての選択肢は 64^N 個存在することになる。

ここで、送信信号ベクトルとしてベクトル $\mathbf{T}$ を仮定し、ベクトル $\mathbf{n}$ を実際の受信信号 $\mathbf{R}$ に対して想定される誤差ベクトルとみなす。この場合、真の送信信号ベクトルが選択されたときに誤差ベクトルの絶対値（大きさ）が最小になると期待される。この原理を利用し、例えば 64QAM であれば 64^N 個の候補の中からひとつの送信信号ベクトルを選択するのが MLD (Maximum Likelihood Detection) 方式である。つまり、MLD 方式では、

①送信信号ベクトルの候補となるベクトルと伝達関数行列から受信信号のレプリカ信号を生成

②このレプリカ信号と実際の受信信号の間のユークリッド距離をそれぞれ求める（誤差ベクトルの大きさを求める）

③これらの中でユークリッド距離が最小となるものを尤度最大の送信信号ベクトルとして出力

とった処理を行う。この MLD 方式の利点は、ZF 方式と異なり、結果として最大比合成の効果が得られることにあり、特性も優れていることが確認されている。しかし、一方で非常に大きな演算量が必要とされ、回路規模が膨大なものとなる。特に大きな N （並列送信アンテナ数）に対しては問題が大きい。これらの問題を解決するため、送信信号点の候補を制限するための工夫などが提案されている。

一方、送信アンテナが 2 系である場合でも受信アンテナ数を 3 系、4 系と増やすことにより、受信ダイバーシチ効果で特性を改善でき、特に変調方式が 16QAM や 64QAM のような場合効果を発揮する。

(4) マルチユーザ MIMO 方式

MIMO が 1 対 1 の通信における SDM であるのに対し、マルチユーザ MIMO 方式は、1 対 n の通信における SDMA であって各ユーザへの通信チャネルが MIMO (SDM) 化しているものである。すなわち、ビーム・フォーミング技術などの活用により、複数ユーザに対して同時に MIMO を行うものであり、システム全体の周波数利用効率を向上させる技術として期待されている。

8. まとめ

無線通信技術の基礎として、誤り制御技術、変調技術、アクセス（多元接続）技術から OFDM, MIMO 技術など最近の技術動向までを概説した。次世代ブロードバンド無線通信システムはマルチキャリア伝送方式である OFDM やマルチアンテナ技術である MIMO 等の様々な無線通信技術が、そのチャネル容量増大や品質の向上のため応用されている。

文 献

- [1] バナード・スカラー, デジタル通信 基本と応用, 森永規彦, 三瓶政一監訳, ピアソン・エデュケーション, 2006 年.
- [2] 三瓶政一, デジタルワイヤレス伝送技術, ピアソン・エデュケーション, 2002 年.
- [3] A. J. Viterbi: Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm, IEEE Trans. Inform. Theory, Vol.IT-13, No.2, pp.260-269, April 1967.
- [4] C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimajshima: Near Shannon limit error-correcting coding and decoding, Proceeding IEEE ICC, pp.1064-1070, May 1993.
- [5] G. D. Forney Jr.: Concatenated codes, MIT Press, Cambridge, 1966.
- [6] R. G. Gallager: Low-Density Parity-Check codes, MIT Press, Cambridge, 1963.
- [7] G. Ungerboeck: Channel coding with multilevel/phase signals, IEEE Trans. Inform. Theory, Vol.IT-28, No.1, pp.55-67, January 1982.
- [8] 服部武, 藤岡雅宣, 改訂三版ワイヤレス・ブロードバンド教科書 高速 IP ワイヤレス編, インプレス R&D, 2008 年.
- [9] 守倉正博, 久保田周治, 改訂三版 802.11 高速無線 LAN 教科書, インプレス R&D, 2008 年.
- [10] 服部武, OFDM/OFDMA 教科書, インプレス R&D, 2008 年.