

# 多重化・多重アクセス方式の基礎

山里敬也

名古屋大学 エコトピア科学研究機構

〒 464-8603 名古屋市千種区不老町

Tel: +81-52-789-2743 Fax: +81-52-789-3173

E-mail: yamazato@nuee.nagoya-u.ac.jp

## あらまし

本稿では、多重化・多重アクセス技術およびその方式について紹介する。

まず、多重化・多重アクセス方式は CDMA の基本式で表現することができることを示し、次にそれを用いて、多重アクセス方式を紹介する。また、多重アクセス方式を評価する上で重要となる信号対干渉雑音電力比 (SNIR) および周波数利用効率について述べる。

次に、多重アクセス方式の議論をもとに、多重化方式について述べる。なお、本稿では主に高速化手法としての多重化方式である、OFDM, マルチコード伝送, MIMO について述べていく。

# Fundamentals of Multiplexing and Multiple Access Technologies

Takaya YAMAZATO

EcoTopia Science Institute, Nagoya University

Furo-cho Chikusa-ku Nagoya, 464-8603

Tel: +81-52-789-2743 Fax: +81-52-789-3173

E-mail: yamazato@nuee.nagoya-u.ac.jp

## Abstract

The paper introduces the fundamentals of multiplexing and multiple access (MA) technologies for mobile communication systems.

We first provide a simple formulization of MA schemes through mathematical expression that is based on CDMA. Using the expression, three concepts of MA are introduced. We also introduce two important performance measures: signal to interference-and-noise ratio (SNIR) and spectral efficiency.

Based on the discussion on MA, we then introduce multiplexing techniques. We focus on OFDM, multi-code transmission, and MIMO, known as high-speed transmission schemes based on multiplexing technique.

# 1 はじめに

無線通信システムでは、そのシステムで通信を行うことができる周波数帯域が予め決まっている。よって、与えられた周波数帯域をいかに有効利用するのか、が重要になる。周波数の有効利用にもっとも関係のある技術が、本稿であつかう多重化・多重アクセス技術である [1]。

多重アクセス技術とは、しばしば多元接続 (multiple access: MA) 技術とも呼ばれる。ひとことで言うと、複数の信号を混信無く通信を行うための技術である。例えば、テレビ放送を考えてみよう。ある放送局から送信される信号は他の放送局から送信される信号との混信を防ぐ必要がある。このため各放送局には、電波を送信できる周波数が割り与えられており、その周波数を用いてテレビ信号を送信している。携帯電話の場合でも基本的に同じである。あるユーザが携帯電話で通話を始めようとした場合、まず、通信を行うチャネル (リンクともいう) が基地局より割り与えられる。ユーザはこのチャネルを用いて通信を行う。このように、多重アクセス技術とは、ある決められた周波数帯域を互いに混信が無いようにチャネルを分割する技術である。なお、分割されたチャネルを各ユーザに割り与えることをチャネル割当てと呼び、それを行うプロトコルのことを多重アクセスプロトコル (multiple access protocol) と呼ぶ。

ところで、このように分割されたチャネルのうちいくつかを一人のユーザが利用することを考えてみよう。この場合、ひとつの送信機で複数のチャネルをまとめて伝送することになる。このような技術を多重化 (Multiplexing) と呼ぶ。あるいは基地局からユーザへの伝送 (下りリンク) も多重化伝送になる。違いは何かというと、前者が高速化のために多重化を行うのに対し、後者は周波数の有効利用が主目的になる。

本稿では、これら多重化・多重アクセス技術およびその方式について述べていく。

まず、代表的な多重アクセス方式である周波数分割多重アクセス (frequency division multiple access: FDMA)、時間分割多重アクセス (time division multiple access: TDMA)、符号分割多重アクセス (code division multiple access: CDMA)、空間分割多重アクセス (space division multiple access: SDMA) を紹介する [2, 3]。次に、これらを簡単な関数で表し、多重アクセス方式を評価する上で重要となる信号対干渉雑音電力比 (signal to interference-plus-noise ratio; SNIR) および周波数利用効率 (spectral efficiency) について述べる。

次に、多重アクセス方式の議論をもとに、多重化方式について述べてる。なお、本稿では主に高速化手法とし

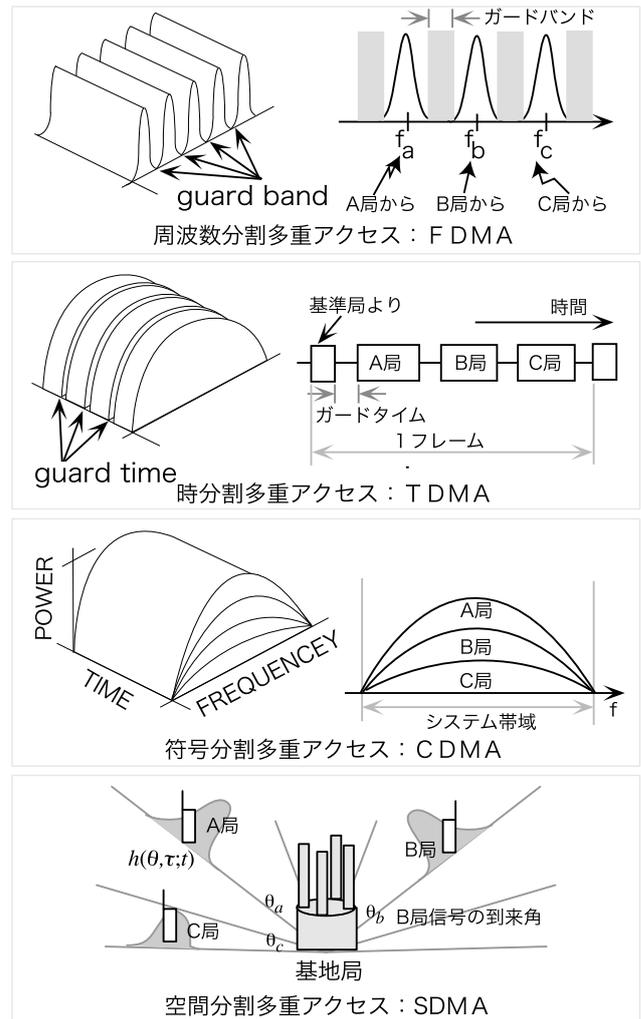


図 1: 多重アクセス方式の概念

での多重化方式について述べていくこととし、その代表的な多重化方式である、OFDM, マルチコード伝送, MIMO について述べていく。

## 2 多重アクセス方式

多重アクセス技術とは、ある決められた周波数帯域を互いに混信が無いようにチャネルを分割する技術である。これは受信側で混信が無ければよいことを意味し、よってシステム全体で共有する物理空間を分割する技術と考えればよい。

多重アクセス方式で共有する物理空間とは、次が考えられる。

周波数, 時間, 符号, 空間 (電波の到来角)

分割した周波数空間をそれぞれのユーザに割り当てて通信を行う多重アクセス方式のことを周波数分割多重ア

表 1: 多重アクセス方式の比較

	FDMA	TDMA	CDMA
信号空間の分割法	周波数帯域を分割して各局に割り当てる	同一周波数で時間的に分割して各局に割り当てる	周波数も時間も重なり合った信号空間を符号により分割して各局に割り当てる
周波数の使用法	同一周波数での干渉量に基づく繰り返し利用	同一周波数での干渉量に基づく繰り返し利用	同一周波数の利用
送信モード	連続送信	バースト送信	連続送信
システムの特徴	伝送速度が早くなると等価器、干渉キャンセラが必要	他重度が大きくなると等価器、干渉キャンセラが必要	DS-SS-CDMAでは送信電力制御が不可欠、RAKE受信で品質向上、干渉キャンセラが容量増加に有効
基地局間同期の必要性	原則として必要	同期が必要	ソフトハンドオーバーのために必要
マルチレートへの対応	困難 (マルチキャリア)	やや困難 (マルチスロット/スロット長可変)	容易 (マルチコード、拡散率可変)
適用例	アナログ自動車・携帯電話 AMPS(FDMA/FDD)	GSM(TDMA/FDD) USDC(TDMA/FDD) PDC(TDMA/FDD) PHS(TDMA/TDD)	IS-95(CDMA/FDD) W-CDMA

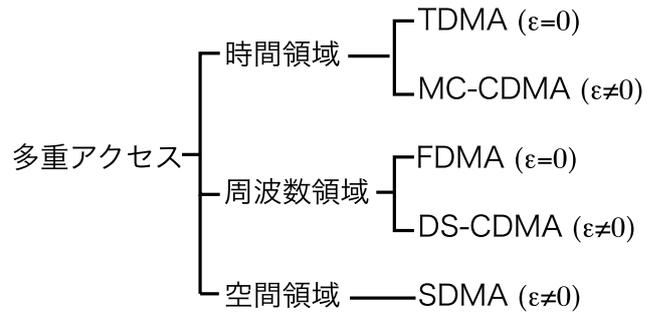


図 2: 多重アクセス方式

ここで  $a_k(t)$  はユーザ  $k$  の多重アクセス関数 (multiple access function: MA function),  $P$  は送信電力,  $b_k(t)$  はデータ,  $\omega_c$  はキャリア周波数である.  $a_k(t) = 1$  の場合, この式は変調方式を表す基本式となる. これより, 多重アクセス方式とは変調方式とは関係無く設計できることがわかる.

簡単のため, BPSK 変調を考え, 全てのユーザがある固定のデータレートで信号送信を行うことを考える. データ信号  $b_k(t)$  は次式で与えられる.

$$b_k(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} b_{m,k} p_{T_b}(t - mT_b) \quad (2)$$

ここで,  $b_{m,k} \in \{-1, 1\}$  はユーザ  $k$  の  $m$  番目のデータであり,  $T_b$  はビット間隔である. また,  $p_x$  は次式で与えられるパルス波形である.

$$p_x(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < x \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ところで, 式 (1) は, CDMA の基本式とまったく同じである. すなわち, 多重アクセス方式とは CDMA で全て表現できることを意味している. これより, CDMA と同様に次式のユーザ間の相互相関を最小にするような  $a_k(t)$  が重要となる.

$$\int_{T_b} a_k(t) a_{k'(\neq k)}(t) \leq \epsilon \quad (4)$$

ここで,  $\epsilon$  は相互相関値を表す.

多重アクセス関数は, 大別すると時間領域で規定されるもの, 周波数領域で規定されるもの, 空間領域で規定されるものの 3 種類ある (図 2 参照). 以下, それぞれについて述べていく.

クセス (Frequency Division Multiple Access: FDMA) と呼ぶ. PDC, GSM ではこの多重アクセス方式が採用されている.

時分割多重アクセス (Time Division Multiple Access: TDMA) では, 時空間を分割して割り当てる.

符号分割多重アクセス (Code Division Multiple Access: CDMA) では, 周波数や時間といった物理空間を分割するのではなく, それぞれのユーザに割り当てられた符号によって識別する.

空間分割多重アクセス (Space Division Multiple Access: SDMA) は, ユーザ信号の基地局へ届く角度 (到来角) によって, それぞれのユーザを識別する. これは, 近年注目されているコンセプトであるが, 今のところ実現例は見られない.

図 1 は, FDMA, TDMA, TDMA の周波数および時間の占有状態を示す概念図である. これらの方式は, 表 1 に示すようにそれぞれに長所と短所を有するが, システムの状況に応じ, 適宜組み合わせることで, 実用性の向上が計られる.

## 2.1 多重アクセス方式の数式表現

あるユーザ  $k$  の送信信号  $s_k(t)$  を次式で表す.

$$s_k(t) = a_k(t) \sqrt{2P} b_k(t) \cos \omega_c t \quad (1)$$

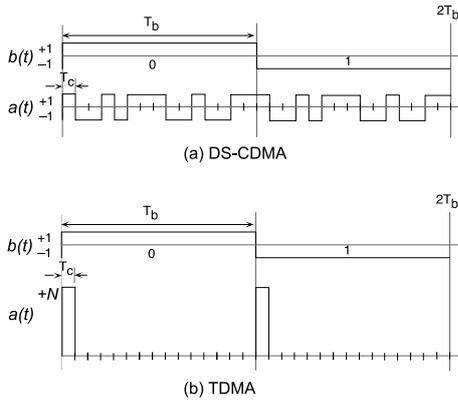


図 3: 時間領域多重アクセスの拡散系列の例

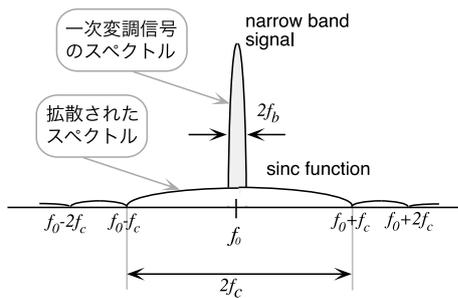


図 4: DS-CDMA 信号の周波数スペクトル

## 2.2 時間領域多重アクセス方式

### 2.2.1 直接拡散符号分割多重アクセス: DS-CDMA

DS-CDMA (direct sequence code division multiple access) の多重アクセス関数は次式で与えられる。

$$a_k(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} a_k^l p_{T_c}(t - lT_b) \quad (5)$$

ここで、 $a_k^l \in \{-1, 1\}$  はユーザ  $k$  の  $l$  番目の拡散系列を表し、 $\mathbf{a}_k = \{a_k^1, a_k^2, \dots, a_k^N\}$  である。DS-CDMA では相互相関が小さい値 ( $\epsilon \approx 0$ ) をとる拡散系列が用いられる。なお相互相関値 0 ( $\epsilon = 0$ ) は、ユーザ間の同期が完全に確保される場合にのみ達成される。これより、基地局から移動局への下りリンク、あるいは同期 CDMA (time-synchronous CDMA) の場合に限定される。

拡散系列の例を図 3 (a) に示す。拡散系列は矩形波の集まりで構成され、その周期は長く、それゆえランダムな系列として扱う事ができる。また、 $a(t)$  のレート (これをチップレートと呼ぶ)  $f_c = 1/T_c$  は  $b(t)$  のビットレート  $f_b = 1/T_b$  よりかなり早い。これより、DS-CDMA 信号  $s(t)$  の占有帯域幅はメインローブ帯域幅で表すと図 4 のようにチップレートの 2 倍 ( $2f_c$ ) に等しくなり、全体

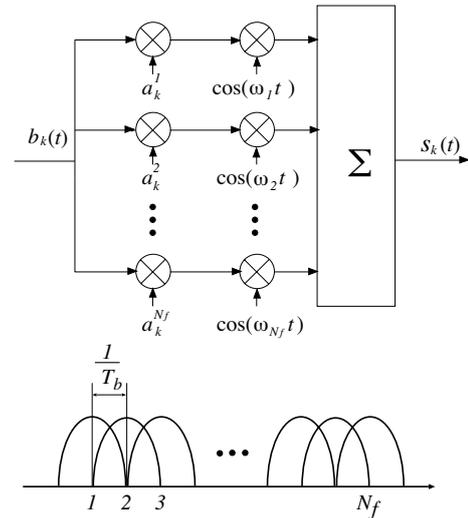


図 5: MC-CDMA の送信機とスペクトル

のスペクトラム分布形状は通常の BPSK 信号のそれと同じく sinc 関数の形になる。ここで、BPSK 信号 (一次変調信号) の帯域幅は  $2f_b$  となるので、スペクトルが  $f_c/f_b$  拡散されたことになる。ここで、拡散率  $N$  を次のように定義する。

$$N = \frac{f_c}{f_b} \quad (6)$$

$N$  は拡散比 (spreading ratio) あるいは処理利得 (processing gain) とも呼ばれる。この様に、DS-CDMA 方式とは一次変調信号の占有帯域幅が 2 次変調によって  $N$  倍に拡大される方式であり、スペクトル拡散方式の名前の由来にもなっている。

### 2.2.2 時分割多重アクセス: TDMA

TDMA の拡散系列は  $\mathbf{a}_1 = \{N, 0, \dots, 0\}$ ,  $\mathbf{a}_2 = \{0, N, 0, \dots, 0\}$ ,  $\dots$  となる。つまり、ユーザ毎に 1 つの要素をとる拡散系列をもつ。こうすることで時間領域での直交性を確保する。図 3(b) に拡散系列の例を示す。

## 2.3 周波数領域多重アクセス

### 2.3.1 マルチキャリア CDMA: MC-CDMA

周波数領域での多重アクセス関数として次式を考える。

$$a_k(t) = \sum_{l=1}^{N_f} a_k^l \cos(\omega_l t) \quad (7)$$

ここで、 $N_f$  は周波数領域での拡散率を表し、各サブキャリアは直交を満たすものとする。すなわち、サブキャリア

ヤ間隔は  $1/T_b$  である．周波数領域での拡散系列も時間領域のそれを用いることができる．その設計指針も同じで，相互相関値  $\epsilon$  の小さい系列を採用することが重要になる．

代表的な多重アクセス方式としてマルチキャリア CDMA (multicarrier code division multiple access: MC-CDMA) がある．図 2.3 に式 (7) による MC-CDMA での拡散の様子およびスペクトルを示す．周波数スペクトルが重なっており，そのため，時間領域多重アクセスに比べ周波数利用効率が高いことが期待できる．

システムの帯域幅およびデータレートが等しい場合，MC-CDMA と DS-CDMA の拡散率には次の関係がある．[5, 6]

$$\begin{aligned} (1 + N_f) \frac{1}{T_b} &= \frac{(1 + \alpha)}{T_c} \\ 1 + N_f &= N(1 + \alpha) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで  $\alpha$  は DS-CDMA で帯域制限を行うために用いるコサイン・ロールオフフィルタのロールオフ率である．もし，このロールオフ率を  $\alpha = 0$  とすると，MC-CDMA と DS-CDMA の拡散率はほぼ等しくなる．

### 2.3.2 周波数多重アクセス：FDMA

FDMA も，時間領域での TDMA を同様に，MC-CDMA の特別な場合となる．これは，図 2.3 でスペクトルの重なりが無いように，拡散系列の要素を 1 つ選び，それをユーザに割り当てることで実現できる．例えば， $\mathbf{a}_1 = \{N_f, 0, \dots, 0\}$ ， $\mathbf{a}_2 = \{0, 0, N_f, 0, \dots, 0\}$ ， $\dots$  となる．この場合も，相互相関値は 0 ( $\epsilon = 0$ ) となる．

## 2.4 空間分割多重アクセス：SDMA

### 2.4.1 無線通信環境とマルチパス

無線通信環境では，マルチパスが存在する．マルチパスというのは，送信局から一つの信号を送信すると，受信側では空間に広がる様々なパスを通るため，それぞれのパスに対する遅延時間を伴う複数の信号が受信される．また，それぞれのパスでは，それぞれ独自の信号の減衰，位相シフト，また，移動に関するドップラーシフトを伴うので，受信側では，様々な信号が受信される．

図 6(a) および (b) にユーザ A および B の時変マルチパス信号の例を示す．これより，あるユーザのチャンネルインパルス応答は

$$h(\tau; t) = \sum_n \alpha_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} \delta(\tau - \tau_n(t)) \quad (9)$$

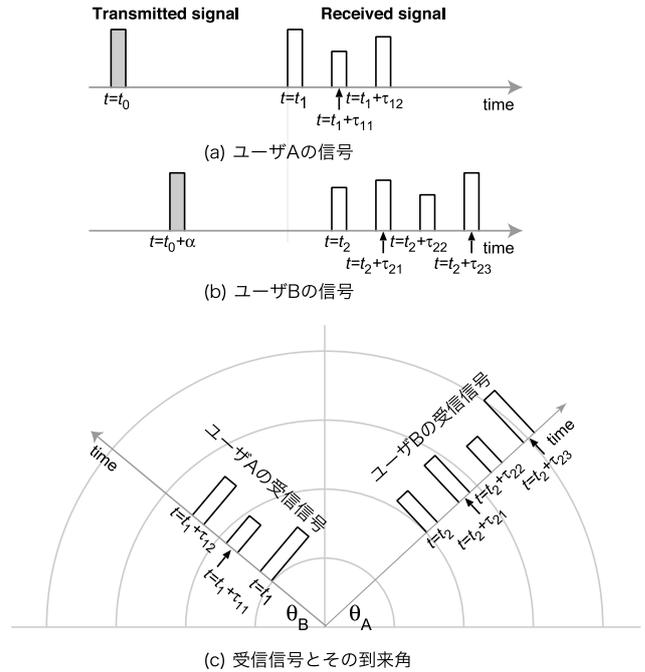


図 6: 時変マルチパス信号とその到来角

と書ける．ここで  $\alpha_n(t)$  は  $n$  番目のパスより受信される信号の減衰要素で， $\tau_n(t)$  は， $n$  番目のパスでの伝達遅延である．

次に，ユーザの位置が異なっている場合を考えてみよう．たとえば，図 6(c) に示すように基地局からみたときの各ユーザの送信信号はある角度から届くことになる．

### 2.4.2 SDMA

SDMA では，ユーザ信号の基地局へ届く角度（到来角）によって，それぞれのユーザを識別する．先のチャンネルインパルス応答に到来角を考慮し次式のように表す．

$$h(\theta, \tau; t) = p(\theta) h(\tau; t) \quad (10)$$

ここで  $p(\theta)$  は角度  $\theta$  によるパスの密度を表す関数で，パスの到来方向に対して角度広がり (angular spread) をもつことが知られている．

式 (4) で  $a_k(t) = h_k(\theta_k, \tau_k; t)$  とおくと，各ユーザの到来角分布が十分に広いならば，式 (4) の  $\epsilon = 0$  が実現できる．これが SDMA の原理である．

一般に，到来角のみでユーザを分離することは難しく，よって，他の多重アクセス方式と組み合わせる場合が多い．例えば，CDMA や TDMA と併用される．

## 2.5 信号対干渉雑音電力比：SNIR

### 2.5.1 受信信号

各ユーザが式(1)で表される信号を送信しているものとし、全部で  $K$  ユーザがいるものとする、受信信号  $r(t)$  は次式となる。

$$r(t) = \sum_{k=1}^K a_k(t - \tau_k) \sqrt{2P} b_k(t - \tau_k) \cos(\omega_c t + \phi_k) + \eta(t) \quad (11)$$

ここで、 $\eta(t)$  は雑音であり、各ユーザはそれぞれ通信路で  $\tau_k$  だけ遅延しているものと仮定している。

いま、ユーザ  $i$  の相関器出力を考える。同期が完全である ( $\tau_i = \phi_i = 0$ ) と仮定すると、

$$Z_i = \int_0^{T_b} r(t) a_i(t) \cos \omega_c t dt \quad (12)$$

となる。これは、以下のように書ける。

$$\begin{aligned} Z_i &= \sqrt{P/2} b_{m,i} T_b \\ &+ \sum_{k=1(k \neq i)}^K \int_0^{T_b} a_k(t - \tau) a_i(t) dt \cdot \cos \phi_k \\ &+ \int_0^{T_b} \eta(t) a_i(t) \cos \omega_c t dt \\ Z_i &= \text{信号} + \text{干渉} + \text{雑音} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで上式の干渉成分に着目すると式(4)で定義した相互相関値  $\epsilon$  が含まれていることに気づく。この項は多重アクセス干渉 (multiple access interference: MAI) と呼ばれ、多重アクセス方式の性能を表す。

### 2.5.2 SNIR

干渉成分をガウス近似できるものと仮定すると、SNIR (signal to interference-and-noise ratio) は次式で表される。

$$SNIR \approx \frac{1}{\rho \epsilon (K-1) + N_0/2E_b} \quad (14)$$

ここで、 $E_b$  は信号エネルギー、 $N_0$  は雑音電力である。また  $\rho$  は後述する干渉除去の効果を表すパラメータである。また、多重アクセス方式の相互相関値は以下のようになる。

- TDMA and FDMA:  $\epsilon = 0$
- DS-CDMA:  $\epsilon = \frac{1-\alpha/4}{2N}$  [4]

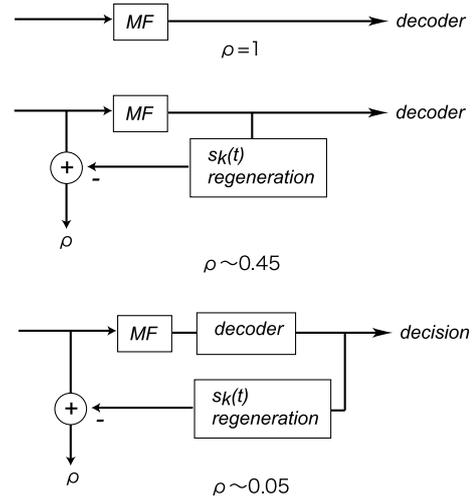


図 7: 干渉除去と  $\rho$

- MC-CDMA:  $\epsilon = \frac{1}{2N_f}$  [5, 6]

ここで、DS-CDMA の  $\alpha = 0$  とおくと、DS-CDMA と MC-CDMA の SNIR は等しくなり、時間領域多重アクセス方式と周波数領域多重アクセス方式の違いは無い。

### 2.5.3 干渉除去による SNIR の改善

CDMA など、 $\epsilon$  が 0 で無い場合、式(14)より  $\epsilon(K-1)$  の多重アクセス干渉が生じる。干渉除去は、これを取り除く技術で CDMA では必須の技術となりつつある。

式(14)において、 $\rho$  は干渉除去の効果を表すパラメータで、干渉除去を用いない場合  $\rho = 1$  となり (実現は不可能であるが) 完全な干渉除去が達成された場合  $\rho = 0$  となる。

図 7 に 2 つの減算形干渉除去方式と  $\rho$  の値を示す [7]。一般に、干渉除去単体の場合  $\rho \approx 0.45$  となり、干渉信号の判定を誤り訂正復号後に行った場合  $\rho \approx 0.05$  となる。これより、多重アクセス方式を考える場合、 $\epsilon$  だけで無く  $\rho$  も考慮に入れる必要がある。また、 $\rho$  を考えることで設計の自由度が増し、より柔軟なシステム構築が可能となる。

## 2.6 周波数利用効率

周波数利用効率 (spectral efficiency) は、単位帯域、単位面積あたりの最大情報量を表し、最も普遍的な尺度である。無線通信システムでは、極めて限られた資源としての割当周波数帯域を如何に効率よく使いこなすが、システムを成功に導く鍵となる。これより、周波数

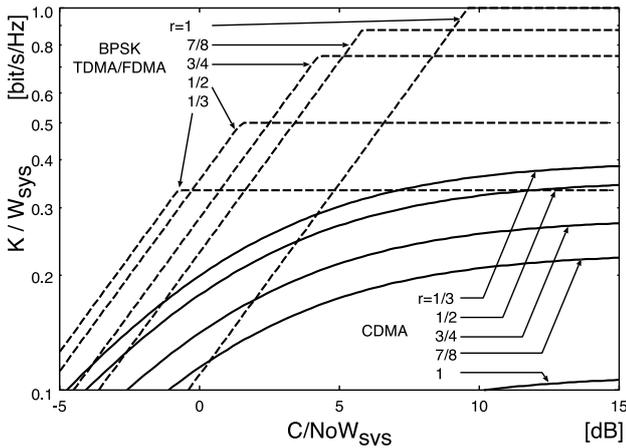
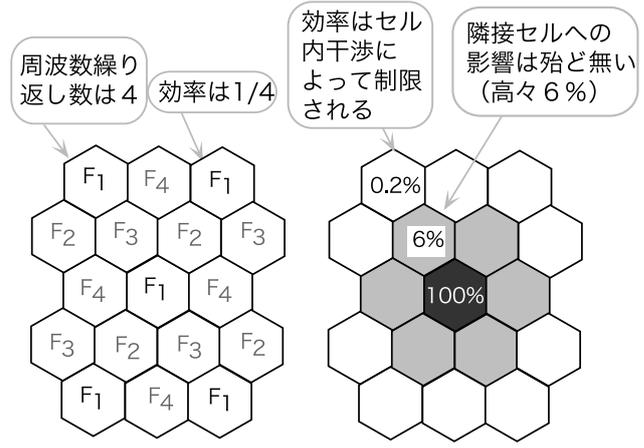


図 8: 周波数利用効率の例



FDMA, TDMAでは隣接するセルは異なる周波数を割り当てる  
CDMAでは全てのセルで同一の周波数を用いる

利用効率は、多元接続方式の比較によく用いられる。  
周波数利用効率は次式で定義される [1] .

$$\eta = \frac{K}{W_{sys}} \cdot \frac{1}{AC} \cdot G \quad [Erlang/m^2/Hz] \quad (15)$$

ここで、 $W_{sys}$  [Hz] はシステムの全帯域幅、 $A[m^2]$  はセルあたりの面積、 $C$  はセルの再利用係数、 $G$  [Erlang/channel] はチャンネルあたりのトラフィックである。この  $C$  であるが、TDMA および FDMA では  $C = 3$  あるいは  $C = 7$  となり、CDMA では  $C = 1$  である。さらに、全ユーザ数  $K$  はシステムで要求される品質 (Quality of Service : QoS) から式 (14) で得られる。

上式で  $\frac{K}{W_{sys}}$  は帯域あたりの効率を表し、誤り訂正符号化、MIMO や OFDM 変調で、効率を向上させることができる。

次に  $\frac{1}{AC}$  は空間効率に関する項で、基地局のサービスエリアを小さくすることで効率を向上させることができる。また、基地局でのアンテナダイバシチ、アダプティブアレーアンテナでも向上させることができる。

最後の  $G$  はネットワーク効率を表す項で、音声活性化率 (voice activation) やマルチメディア伝送で効率を向上させることができる。

### 2.7 周波数利用効率の例

まず、式 (15) の  $\frac{K}{W_{sys}}$  についてみてみよう。図 8 に CDMA と FDMA (あるいは TDMA) の  $\frac{K}{W_{sys}}$  をシステムの信号対雑音比 ( $C/N_0W_s$ ) の関数として示す。この図では、誤り訂正符号を採用することとして、符号化率 ( $r = 1 \sim 1/3$ ) によりビット誤り率  $10^{-5}$  を得る場合の効率が示してある。これより、誤り訂正符号化を行わない場合 ( $r = 1$ )、CDMA は効率が格段に悪い。しか

図 9: セル構成と周波数割り当て

し、誤り訂正符号の効果は CDMA において顕著であり、 $r = 1/3$ 、 $C/N_0W_s = 8$ [dB] では両者はほぼ等しい効率となる。次に音声活性化率を考えてみる。これは一般に 30~40% 程度と言われており、例えば 40% とすると CDMA の効率は FDMA や TDMA の 2.5 倍に上がる。

つぎに  $\frac{1}{AC}$  についてみてみる。先の議論では多数のユーザーが 1 つのセルに接続している場合を想定していた。しかし実際には複数のセルを持つマルチセル構成をとる。この場合、FDMA や TDMA ではセル間の干渉を防ぐために隣接するセルが異なる周波数を用いる必要がある。これより 1 つのセルではシステム全体に割り当てられた周波数の 1 部しか使えない。例えば図 9 の様な場合は  $C = 1/4$  に効率が落ちることになる。一方 CDMA では隣接セルでも同一の周波数を用いる事ができ効率の低下がない。以上より CDMA の周波数利用効率は先ほどの音声活性化率と併せると FDMA や TDMA の 10 倍にも上がる事がわかる。これに加え CDMA では干渉除去の効果が大きく、効率をさらに 2 倍程あげる事が可能である。

## 3 多重化方式

ひとつの送信機で複数のチャンネルをまとめて伝送する技術を多重化 (Multiplexing) 技術と呼ぶ。多重アクセス技術と同様に多重化方式も以下の方式がある。

- (1) 周波数分割多重化 (Frequency Division Multiplexing: FDM)

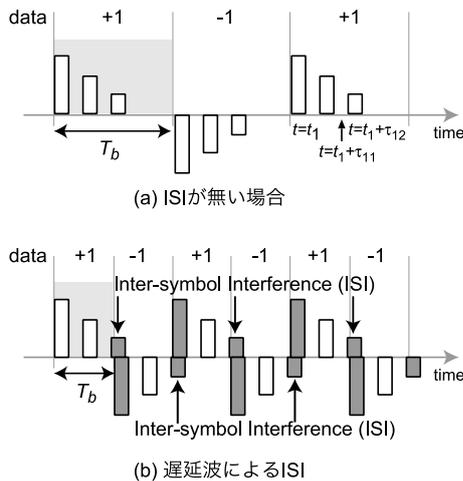


図 10: シンボル間干渉

- (2) 時間分割多重化 (Time Division Multiplexing: TDM)
- (3) 符号分割多重化 (Code Division Multiplexing: CDM)
- (4) 時空間多重化 (Space Time Multiplexing: STM)

多重化は、携帯電話の基地局のように、全てのユーザへの伝送（下りリンク）をまとめて行う場合や、伝送速度の高速化のために行う場合がある。本稿では、高速化を目的とした多重化について述べていく。

周波数分割多重化はマルチキャリア伝送 (multicarrier transmission) とも呼ばれる。代表的な方式として直交周波数分割多重 (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 方式がある。

時間分割多重化の実現例としては、PHS の高速化で用いられるパルク伝送がある。

符号分割多重化は W-CDMA で採用されており、マルチコード伝送 (multicode transmission) と呼ばれる。

時空間多重化は、時空間符号 (space-time codes) あるいは、その伝送形態から MIMO (multiple-input multiple-output) とも呼ばれる。

以下、まず、なぜ多重化方式による高速伝送を行うのか、その理由について述べ、次に代表的な多重化方式である、OFDM, マルチコード伝送, MIMO について述べていく。

### 3.1 多重化と高速伝送

k 有線通信の場合、伝送帯域を広くすれば伝送速度は早くできる。これはビット間隔  $T_b$  を短くすることに

なり、よって高速伝送を実現できる。ところが、無線通信環境ではマルチパスの影響で、単に伝送帯域を広くする（あるいは  $T_b$  を小さくする）だけでは高速化はできない。

図 10(a) にマルチパスが  $T_b$  より短い場合を示す。 $T_b$  は相関器の積分区間のため、その以内のマルチパスが次のシンボルへ影響をおよぼすことは無い。一方、図 10(b) のように、マルチパスが  $T_b$  より長い場合、マルチパスは次のシンボルへ影響をおよぼすことになる。これをシンボル間干渉 (inter-symbol interference: ISI) と呼ぶ。図では、データを +1, -1 を交互に送る場合を示してある。この場合、 $T_b$  を越えるマルチパスは次のシンボルの最初のパスと相殺されることになり、相関器出力が著しく減少することになる。これは誤り率の劣化につながる。

以上の理由より、無線通信システムでは通信路環境によって  $T_b$  が決定される。一般に、送受信機間の伝搬距離が長ければ長いほどマルチパスの遅延量は大きくなるため、通信エリアが大きくなればなるほど  $T_b$  は大きくする必要がある。

では、どうすれば高速化できるのだろうか？答えは簡単で、いくつかのチャンネルを占有し、それらによる多重化伝送を行えば良い。これが無線通信システムで多重化方式が用いられる理由である。

### 3.2 直交周波数分割多重：OFDM

周波数分割多重化は、周波数方向に分割されたチャンネルをひとつの送信機でまとめて伝送する場合に相当する。チャンネル間隔が直交を満たす最小周波数間隔の場合、すなわち  $1/T_b$  のとき、直交周波数分割多重 (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) と呼ぶ。これは、式 (7) において、 $\mathbf{a} = \{b_m, b_{m+1}, \dots, b_{m+N_f-1}\}$  とおくことで実現できる。なお、ユーザを表す  $k$  は省略している。これより、OFDM 信号は次式となる。

$$s(t) = \sum_{l=1}^{N_f} b_{m+l-1} \cos(\omega_l t) \quad (16)$$

図 11 に OFDM の例として、IEEE802.11a の送信機および受信機を示す。図に示すように、OFDM ではマルチキャリア部を IFFT および FFT で構成することができる。

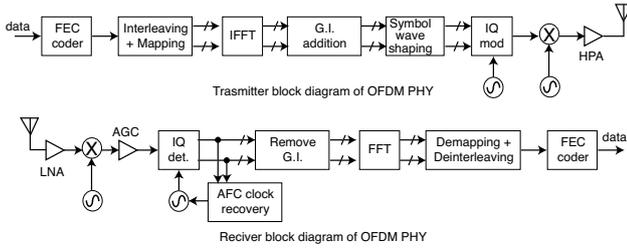


図 11: OFDM の例 (IEEE 802.11a)

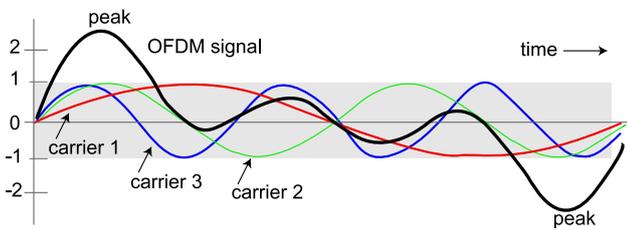


図 12: OFDM 信号と振幅変動

### 3.2.1 OFDM 信号の振幅変動

さて、式 (16) より OFDM 信号は  $N_f$  個のキャリアの和となる。ここで、入力データが全て 1 の場合を考えると、OFDM 信号の振幅値が最大  $N_f$  となる。これより、OFDM 信号はデータに依存した振幅変動を生じる。この様子を図 12 に示す。

### 3.3 マルチコード伝送

OFDM が周波数分割多重であったのに対し、マルチコード伝送は符号分割多重である。具体的には複数の DS-SSMA 信号をひとつの送信機でまとめて伝送する。これは、W-CDMA で採用されている。図 13 にマルチコード伝送の送信機および受信機を示す。

#### 3.3.1 マルチコード信号の振幅変動

マルチコード伝送も OFDM と同様に振幅変動が生じる。図 14 に拡散系列としてアダマール符号を用いた場合のそれぞれの拡散系列とそれの足し合わせで表現されるマルチコード信号を示す。

### 3.4 非線形増幅器の影響

無線端末は、小型、軽量であることが望ましく、それゆえ電源電力も制約をうける。この電源電力のほとんど

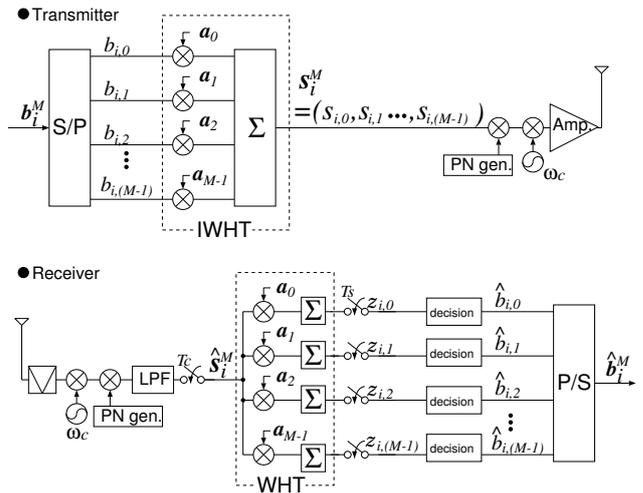


図 13: マルチコード伝送の例

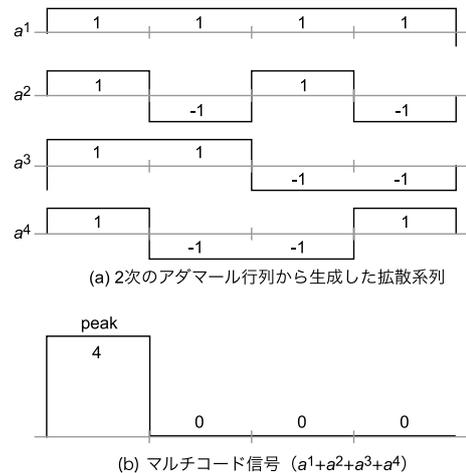


図 14: マルチコード信号と振幅変動

を消費しているのが、増幅器である。よって、通常、電力効率のよい非線形増幅器が用いられる。

残念ながら、OFDM およびマルチコード伝送は振幅変動があるため、非線形増幅器の影響を受ける。高速化を図ろうと多重数を増すほど振幅変動(ピーク値)は大きくなり、よって非線形増幅の影響も大きくなる。非線形増幅の影響は信号歪みを招き、誤り率の劣化を引き起こす。それ以上に問題なのは、信号歪みがシステム帯域外へのスペクトル広がり的重要因素となる点である。これは他システムへの干渉となる。

### 3.5 MIMO

MIMO は送受信機で複数のアンテナを用いることで、周波数帯域や送信電力を増やすことなく高速な伝送がで

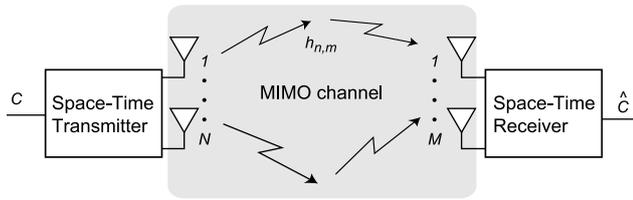


図 15: MIMO システム

きる [8] . 図 15 に MIMO システムを示す .

今, 送信アンテナ数を  $N$ , 受信アンテナ数を  $M$  からなる MIMO システムを考える . ここで, 時刻  $t$  の送信信号標本を  $C_{t,n}, n = 1, 2, \dots, N$  とし, それぞれ各送信アンテナから送信されるものとする . この信号は,  $N \times M$  の MIMO 通信路を経て受信機に到達する . MIMO 通信路を  $h_{n,m}$  で表すものとする, 受信アンテナ  $m$  での受信信号は次式となる .

$$r_{t,m} = \sum_{n=1}^N h_{n,m} C_{t,n} + \eta_{t,m} \quad (17)$$

ここで,  $\eta_{t,m}$  は受信アンテナ  $m$  での雑音標本である .

上式を式 (12) と比較すると, 多重アクセス関数  $a_k(t)$  に替わり MIMO 通信路を表す  $h_{n,m}$  が異なるのみであることが分かる . さらに 2.6 節の干渉除去の効果 (図 7 参照) を思い出して欲しい . 受信側で適当な信号処理を施し, 各受信信号に含まれている干渉信号成分を取り除くことができれば, たとえ時間・周波数空間を分割しなくとも多重化が行える . このような信号処理のことを時空間信号処理 (space-time signal processing) と呼ぶ .

MIMO が研究者を魅了してやまないのは, 通信容量が MIMO のアンテナ数 (送受信アンテナ数の少ない数) に比例して増加する点である .

## 4 まとめ

本稿では, 多重化・多重アクセス技術およびその方式について紹介した .

多重化・多重アクセス方式は CDMA の基本式で表現することができ, それを用いて時間領域での多重アクセス方式 (DS-CDMA および TDMA), 周波数領域での多重アクセス方式 (MC-CDMA および FDMA), そして空間領域での多重アクセス方式 (SDMA) について説明した . また, 多重アクセス方式を評価する上で重要な信号対干渉雑音電力比 (SNIR) について述べ, また, SNIR は相互相関値および干渉除去によって改善できることを紹介した . 周波数利用効率についても紹介

し, CDMA が多重アクセス方式として魅力的である理由を述べた .

次に, 多重アクセス方式の議論をもとに, 多重化方式について紹介した . なぜ, 多重化による高速化を行うのかについて述べ, 次にその代表的な多重化方式である, OFDM, マルチコード伝送, MIMO について紹介した .

多重化・多重アクセス方式の基本概念は, 無線通信システムでの周波数の有効利用および高速伝送の両者に関係がある . 今後もこれらの技術を駆使した新しい多重化方式あるいは多重アクセス方式が出てくるであろう . 本稿では取り上げなかったが, 今後はマルチホップ無線通信, 無線アドホックネットワークなど基地局を介さない通信方式も実用化されていく . これらも混在するシステムで, シームレスな接続および通信が課題となるだろう .

## 参考文献

- [1] Gordon L. Stuber, "Principle of Mobile Communication," Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [2] 小川明 監修: "CDMA 方式と次世代移動体通信システム" トリッケブス
- [3] 山里敬也, "CDMA の基礎," Proc. of 2001 Microwave Workshops and Exhibition, MWE2001.
- [4] T. Shibata, M. Katayama and A. Ogawa, "Performance of Asynchronous Band-Limited DS/SSMA Systems," IEICE Transaction on Communications, vol.E76-B, no.8, pp.921-928, Aug. 1993.
- [5] 村松宏基, 原田政明, 山里敬也, 岡田啓, 片山正昭, "マルチキャリア CDMA 方式における送信増幅器の非線形性の影響," 電子情報通信学会論文誌, vol.J85-A, no.3, pp.340-348, 2002 年 3 月.
- [6] 竹内裕志, 山里敬也, 岡田啓, 片山正昭, "周波数選択性フェージング環境下における非同期 MC-CDMA 方式の SNIR 解析," 電子情報通信学会論文誌 vol.J86-A, no.12, pp.1426-1430, 2002 年 9 月.
- [7] Zaher Dawy and Alexander Seeger, "Coverage and Capacity Enhancement of Multiservice WCDMA Cellular Systems via Serial Interference Cancellation," Proc. of ICC, No. WC07-3, Jun., 2004.
- [8] 大槻知明, "時空間符号," Journal of Signal Processing 「信号処理」, Vol.8, No.3, 2004 年 5 月