

# 次世代高速移動通信への TMUX の応用

～ OFDM および OFCDM の一般化システム ～

市吉 修 (二十一世紀を楽しく生きよう会)

## 要約

次世代高速移動通信として OFDM を基とする種々の信号伝送方式が提案されている。また移動通信に利点の多い CDMA と OFDM を組み合わせた OFCDM も提案されている。移動通信においては多重伝搬特性の伝送路を通じて隣接セクタやセル間の干渉に曝された環境で通信が行われなくてはならない。そのような深い干渉条件の下では多数の信号が多様なタイミングで重なるため OFDM の GI タイミング検出と除去は技術的に困難となるであろう。また OFDM はすべての周波数チャンネルを一括して用いるため個々のチャンネルを独立に用いる FDMA 動作が不可能である。そこで個々の周波数チャンネルを独立に用いることのできる TMUX を用いる次世代高速移動通信を提案する。TMUX は FFT とデジタルフィルタを組み合わせる FDM 伝送方式でありその特殊な形式として OFDM を含む一般性を有している。この提案システムは FDMA 動作が可能であり、多数の移動通信端末が種々の伝送速度で独立に通信を行うことができる。更に周波数軸上で拡散符号を割り当てる FDM-CDMA 方式により隣接セル間で同じ周波数帯域を共用することにより高い周波数利用効率を実現することができる。

Various signal transmission methods based on OFDM are proposed for the next generation mobile communication networks. A combination of CDMA and OFDM called OFCDM is also proposed. In mobile communications, the signal transmission must be made through multi-path radio links and under heavy interferences conditions among adjacent sectors and cells. The signals from multiple sources superpose themselves in such interferences conditions hence the detection of the guard interval (GI) timing will become difficult. Another shortcoming with OFDM is that it does not allow FDMA operation because all the channels are used as a whole. In this paper an alternative signal transmission method based on Trans-Multiplexer (TMUX) is proposed. The proposed system allows a full FDMA operation. Furthermore a CDMA scheme called FDM-CDMA is proposed. The FDM-CDMA conducts a direct frequency spreading in frequency axis and not in time axis but can achieve the features of the conventional CDMA. For example adjacent cells and sectors can share the same frequency bands and the mobile hand-over controls are quite simplified compared with TDMA systems.

## 1. OFDM の特長と問題点

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplex)は地上波デジタル放送、無線 LAN, ADSL などにおいて用いられてきた。また半径数十 km の MAN (Metropolitan Access Network)として仕様化された WiMAX(IEEE802.16)も次世代高速移動通信に応用されようとしているが信号伝送方式は OFDM を用いている。そこでまず OFDM の概要を見てみよう。

### [1] OFDM の送信回路

OFDM の送信部の回路構成を図 1-1 に示す。

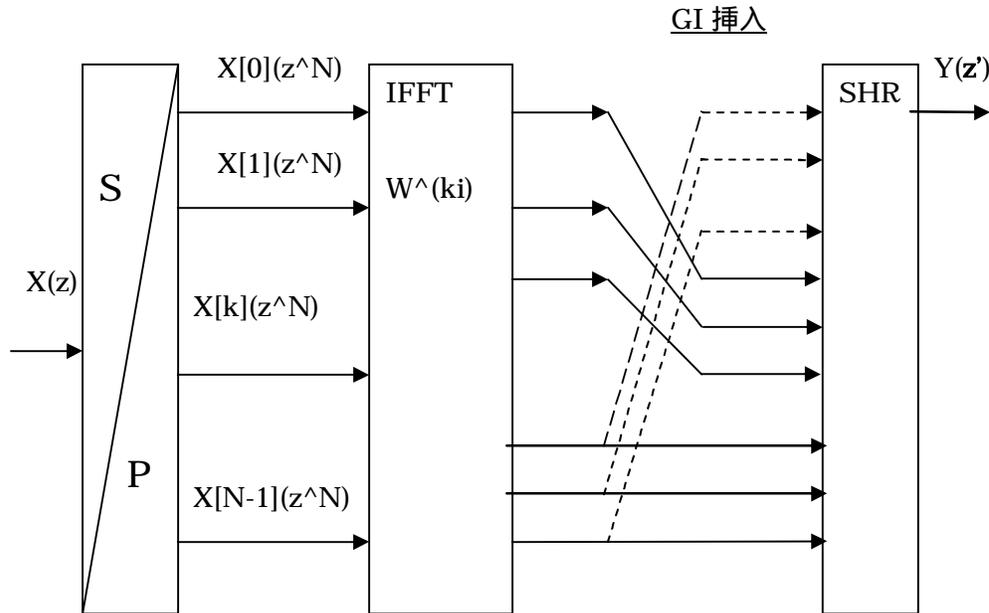


図 1-1 OFDM 送信部の回路構成

図において送信信号は  $X(z) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot z^{-n}$  と表される。  $x(n)$  は  $n$  番目の伝送データであり伝送速度を  $1/T$  とすると変数  $z = e^{sT}$  である。送信信号系列  $X(z)$  はシフトレジスタに蓄積されて  $N$  並列の低速( $1/N$ )信号群  $\{ X[k](z^N), k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \}$  に直並列(S/P)変換される。低速信号群は  $N$  点逆 FFT で変換されその出力は速度  $1/T$  で順番に読み出される。更に GI(Guard Interval)挿入回路において GI が挿入される。GI の符号数を  $G$  とするとフレーム時間  $NT$  の間に  $N+G$  個の符号が出力されるので  $1+G/N$  倍の速度変換が行われる。GI は図 1-1 に点線で示すようにフレームの先頭に挿入されるがその内容は逆 FFT の最後の  $G$  個のデータと同じである。

### [2] OFDM の受信回路

OFDM 受信回路の構成を図 1-2 に示す。

受信標本系列は  $N+G$  個のフレーム毎にシフトレジスタに蓄積される。そのうち最初の  $G$  個は GI であるから廃棄される。残りの  $N$  個の符号は一斉に読み出されて  $N$  並列の低速(時間長  $NT$ )信号となり、 $N$  点 FFT 回路に入力される。  $N$  点 FFT 回路の出力は直列信号に変換されて出力される。

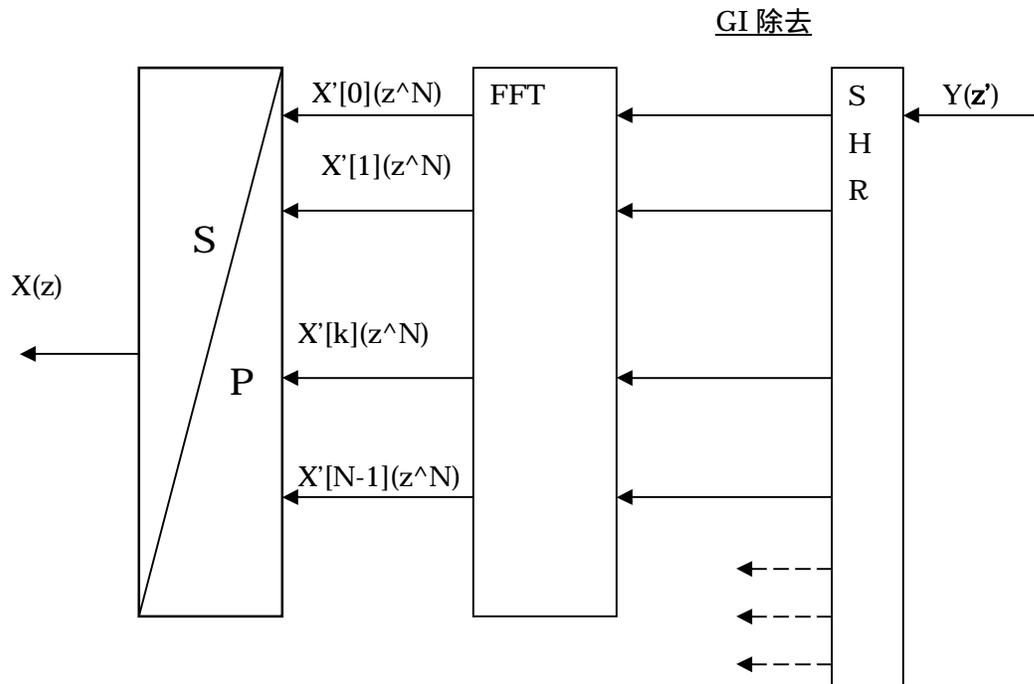


図 1-2 OFDM 受信回路の構成

### [3] GI による多重伝搬干渉の除去

GI の挿入と除去により多重伝搬路(Mult-paths)による符号間干渉を除去できる。その動作を図 1-3 に示す。受信信号は伝送路の遅延分散に渡って先頭の部分がその前の伝送符号により符号間干渉を受ける。そこで直接波のタイミングで先頭の GI 部分を除去すると遅延分散が GI の時間長より小さいならば簡単に符号間干渉が除去される。FFT に入力されるのは直接波と遅延波の合成であるが OFDM 信号の  $N$  の巡回性 ( $W^N = 1, W = e^{j2\pi/N}$ ) の為 FFT により異なるチャネルの信号は分離される。

### [4] OFDM の問題点

OFDM には次の困難がある。

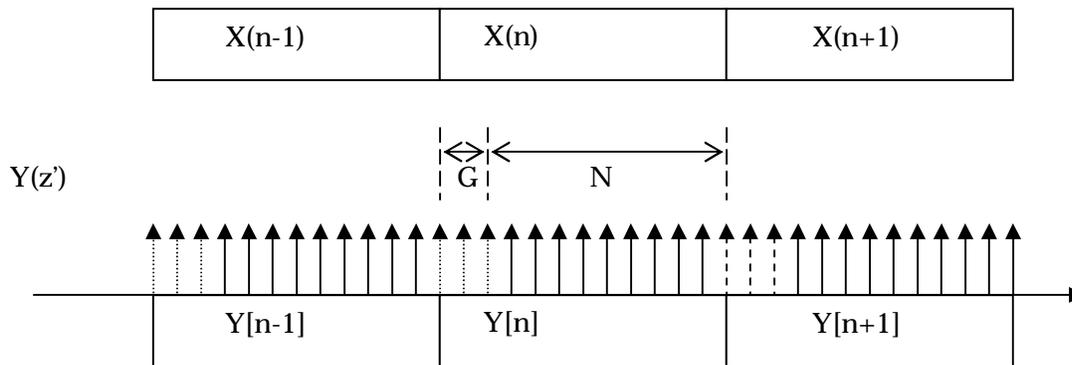
#### (1) FDM 動作が困難

OFDM は送信側で逆 FFT, 受信側で FFT を行う事によりチャネル分離を行う。  $N$  個のチャネルは一体として処理される為個々のチャネルを独立に用いる事ができない。即ち FDMA が不可能である。

#### (2) 移動通信では GI の検出と除去が困難

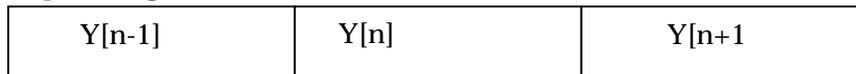
移動通信においては隣接のセクタやセルの信号が重なり合う干渉環境において信号伝送が行われる。特に周波数利用効率を上げる為には CDMA により同一周波数帯域を共用したいが多数の OFDM 信号が重なり合うと GI のタイミングが不分明になり、求める信号の GI タイミングの検出が困難になる。

## 送信信号 Transmit signal

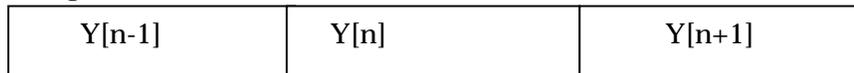


## 受信信号 Receive signals

### 直接波 Direct paths signal



### 遅延波 Delayed signal



GI(廃棄)

(G samples Discarded)

N 点 FFT に入力

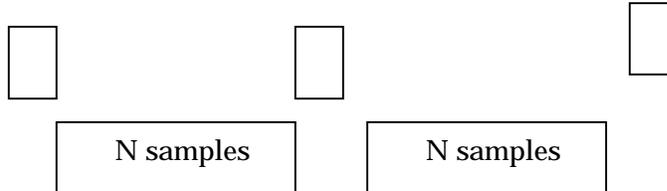


図 1-3 GI による多重伝搬干渉の除去

## 2. TMUX

Trans Multiplexer (TMUX)とは  $N$  個の独立な信号を  $N$  個の周波数分割チャンネルに多重する FDM システムである。多重信号の標本速度を  $1/T$ (samples/sec, s/s)とすると各チャンネルの伝送速度は  $1/(N.T)$  であり FDM 周波数間隔は  $f = 1/(NT)$  (Hz)である。OFDM との違いは TMUX においては FFT に加えて所定の帯域制限濾波を行うことである。

### 2.1 TMUX 多重回路

送信部において周波数分割多重を行う。

[1] チャンネルフィルタとサブフィルタ分割

送信部のチャンネルフィルタとして次式の FIR 型を用いるものとする。

$$G(z) = \sum_{l=0}^{L-1} g(l) \cdot z^{-l} \quad (z = e^{j\omega T}) \quad (2-1-1)$$

これを N 個のサブフィルタに分割する。

$$G(z) = \sum_{i=0}^{N-1} z^{-i} \cdot G[i](z^N) \quad (2-1-2)$$

ここでサブフィルタ  $G[i](z^N)$  は次のものである。

$$G[i](z^N) = \sum_{l=0}^{L/N-1} g(l \cdot N + i) \cdot z^{-l \cdot N} \quad (2-1-3)$$

## [2] 送信信号の並列化

送信信号は速度  $1/T$  の高速信号である。

$$X(z) = \sum_{n} x(n) \cdot z^{-n} \quad (2-1-4)$$

これを N 個のサブ信号列に変換する。

$$X(z) = \sum_{k=0}^{N-1} z^{-k} \cdot X[k](z^N) \quad (2-1-5)$$

但しサブ信号  $X[k](z^N)$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ) は

$$X[k](z^N) = \sum_{n'} x(n'N + k) \cdot z^{-n'N} \quad (2-1-6)$$

## [3] 各チャンネル信号のフィルタリングと周波数移動

各サブ信号は共通のチャンネルフィルタがかけられる。

$$G(z) \cdot X[k](z^N) = \sum_{i=0}^{N-1} z^{-i} \cdot G[i](z^N) \cdot X[k](z^N) \quad (2-1-7)$$

次に 0 (Hz) から  $k \cdot f = k/(NT)$  への周波数移動を行う。そのためには

$$z \rightarrow e^{-j2\pi/N \cdot k} z \quad (2-1-8)$$

なる変数変換を行えば良い。その結果を  $Y(z;k)$  と表すと

$$Y(z;k) = \sum_{i=0}^{N-1} z^{-i} \cdot W^{-(k \cdot i)} \cdot G[i](z^N) \cdot X[k](z^N) \quad (2-1-9)$$

ここで

$$W = e^{-j2\pi/N} \quad (2-1-10)$$

## [4] 周波数分割信号の多重

上の信号  $Y(z;k)$  は周波数分離されているので多重する事ができる。多重された信号を  $Y(z)$  とすると

$$\begin{aligned} Y(z) &= \sum_{k=0}^{N-1} Y(z;k) \\ &= \sum_{k,i=0}^{N-1} z^{-i} \cdot W^{-(k \cdot i)} \cdot G[i](z^N) \cdot X[k](z^N) \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} z^{-i} \cdot Y[i](z^N) \end{aligned} \quad (2-1-11)$$

但し

$$Y[i](z^N) = G[i](z^N) \cdot \underline{\sum_{k=0}^{N-1} W^{-(k \cdot i)} \cdot X[k](z^N)} \quad (2-1-12)$$

ここで上下線部は逆 FFT である。

TMUX 多重回路の構成を図 2-1 に示す。

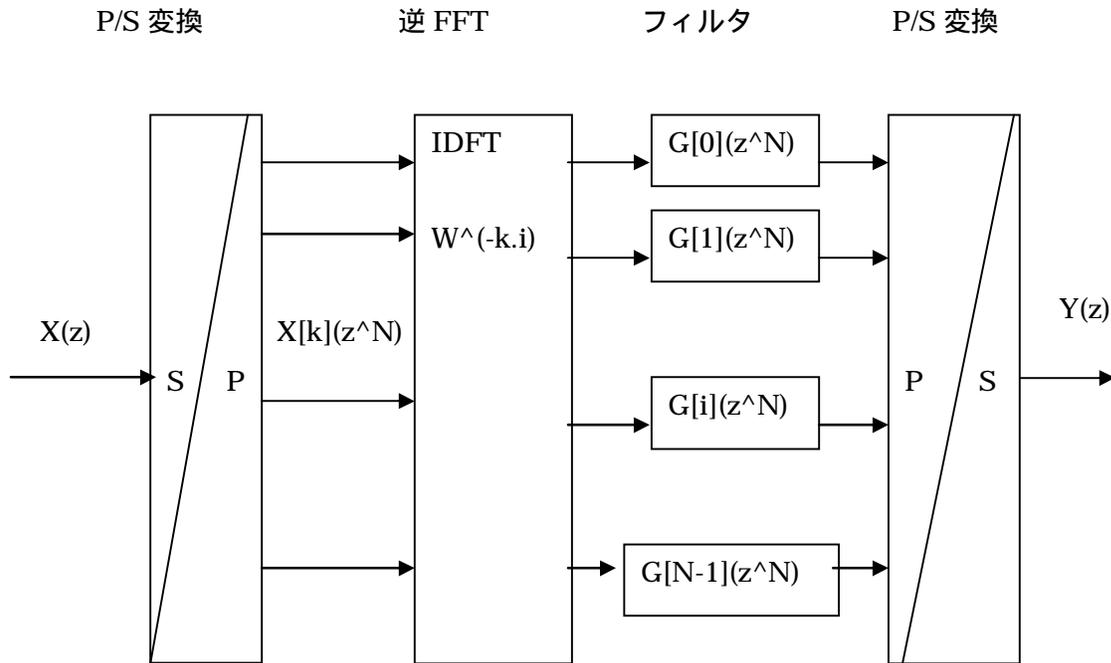


図 2-1 TMUX 多重回路の構成

## 2.2 TMUX 分離回路

### [1] 受信フィルタとサブフィルタ分割

受信チャネルフィルタとしては次の FIR フィルタを採るものとする。

$$H(z) = z^{-(L-1)} \sum_{l=0}^{L-1} h(l) \cdot z^{-l} \quad (2-2-1)$$

N 個のサブフィルタに分割すると

$$H(z) = z^{-(L-1)} \sum_{i=0}^{N-1} z^{i} \cdot H[i](z^N) \quad (2-2-2)$$

第 i 番目のサブフィルタは

$$H[i](z^N) = \sum_{l=0}^{L/N-1} h(l \cdot N + i) \cdot z^{-l} \quad (2-2-3)$$

### [2] チャネル周波数 k. f に同調した受信フィルタ

上のフィルタで周波数 k. f に同調したフィルタ H(z;k)は。

下の変数変換により

$$z \rightarrow e^{j2\pi/N \cdot k} z = W^k \cdot z \quad (2-2-4)$$

$$H(z;k) = z^{-(L-1)} \sum_{i=0}^{N-1} W^{k \cdot i} \cdot z^{i} \cdot H[i](z^N) \quad (2-2-5)$$

### [3] 周波数分波

受信信号 R(z)を次式のように N 点のサブ系列に分割する。

$$\begin{aligned} R(z) &= \sum_{n=0}^{N-1} r(n) \cdot z^{-n} \\ &= \sum_{m=0}^{N-1} z^{-m} \cdot R[m](z^N) \end{aligned} \quad (2-2-6)$$

但し

$$R[m](z^N) = \sum_{n'=0}^{N-1} r(n' \cdot N + m) \cdot z^{-n'N} \quad (2-2-7)$$

第 k チャネルフィルタの出力は

$$\begin{aligned} Z(z;k) &= H(z;k) \cdot R(z) \\ &= z^{-(L-1)} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} W^{ki} \cdot H[i](z^N) \cdot z^i \cdot \sum_{m=0}^{N-1} z^{-m} \cdot R[m](z^N) \\ &= z^{-(L-1)} \cdot \sum_{i,m=0}^{N-1} W^{ki} \cdot z^{i-m} \cdot H[i](z^N) \cdot R[m](z^N) \end{aligned} \quad (2-2-8)$$

#### [4] Down Sampling

第 k チャネルの出力は帯域幅が  $f$  に制限されているので  $f=1/(NT)$  なる周波数で間引き標本化しても歪は生じない。この時同時に 0Hz 帯への周波数変換が行われる。

上の式において  $i = m$  なる項のみ選択すると

$$Z[k](z^N) = z^{-(L-1)} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} W^{ki} \cdot H[i](z^N) \cdot R[i](z^N) \quad (2-2-9)$$

整合フィルタ

ここで送信と受信のチャネルフィルタ  $G(z)$  と  $H(z)$  を整合フィルタに設定するものとする。すると

$$h(l) = g^*(L-1-l) \quad (l = 0, 1, 2, \dots, L-1) \quad (2-2-10)$$

但し  $x^*$  は  $x$  の複素共役を表す。

この時

$$H[i](z^N) = z^{-(L+N)} \cdot G^*[N-1-i](z^N) \quad (2-2-11)$$

であるので周波数分離回路の出力は

$$Z[k](z^N) = z^{-(2L+N-1)} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} W^{ki} \cdot G^*[N-1-i] \cdot R[i](z^N) \quad (2-2-12)$$

となる。

TMUX 分離回路の構成を図 2-2 に示す。

#### [5] TMUX と OFDM の関係

OFDM の周波数合成と分離回路は TMUX においてフィルタを

$$G[i](z^N) = H[i](z^N) = 1 \quad (2-2-13)$$

に設定する特殊な場合に当たる。すなわち

$$G(z) = H(z) = 1 + z^{-1} + z^{-2} + \dots + z^{-(N-1)} \quad (2-2-14)$$

周波数特性は

$$G(j\omega) = e^{j\omega(N-1)T/2} \cdot \frac{\sin(j\omega(N-1)T/2)}{\sin(j\omega T/2)} \quad (2-2-15)$$

OFDM の各チャネルの周波数はチャネル帯域幅  $f = 1/(N \cdot T)$  を越えて全帯域に広がり他のチャネルと重なり合うのに対して TMUX の各チャネルの信号は帯域幅  $f$  以内に帯域制限される。

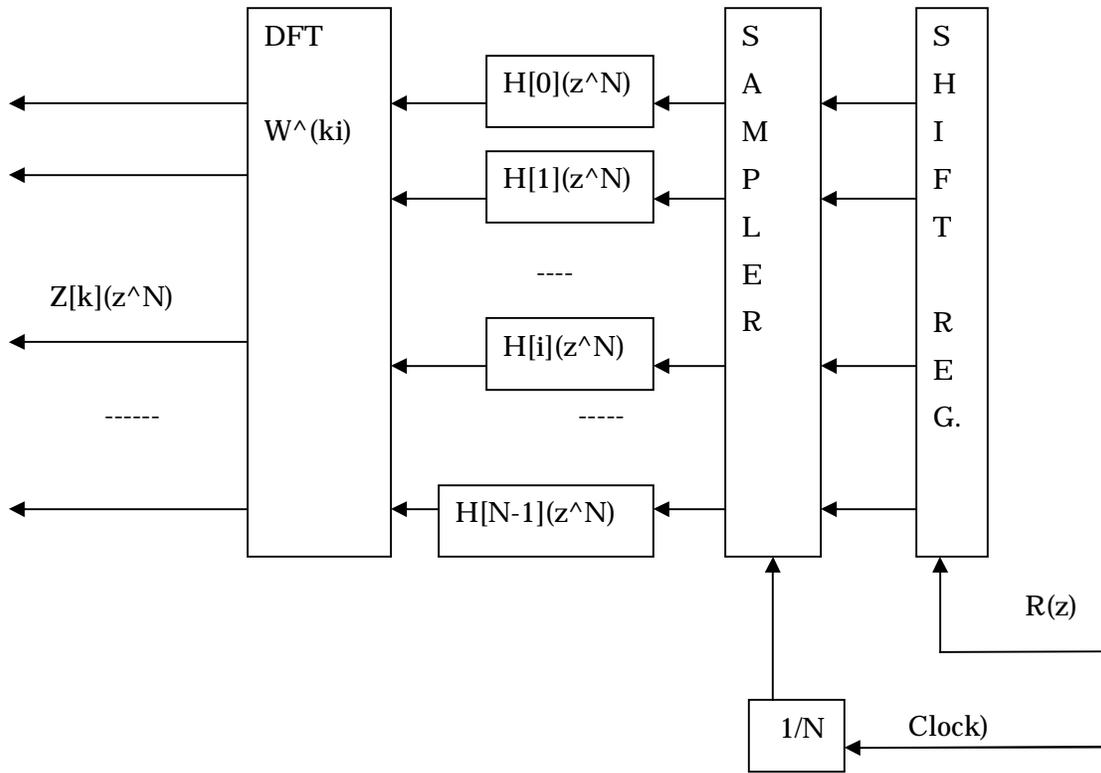


図 2-2 TMUX 分離回路の構成

### [6] Timing 誤差の影響

OFDM においては GI の検出と除去のために受信において正確なクロック位相同期が必要である。TMUX においては各チャンネルは独立なフィルタであり周波数が十分に正確であればよく正確な位相同期は不要である。

今受信信号系列のタイミングが

$$R[i] = Y[i+m](z^N) = G[i+m](z^N) \cdot \sum_{k'=0, N-1} W^{-(k' \cdot (i+m))} \cdot X[k'](z^N) \quad (2-1-12)$$

の場合は

TMUX 分離回路の出力

$$\begin{aligned} Z[k](z^N) &= \sum_{i=0, N-1} W^{(ki)} \cdot G^*[N-1-i](z^N) \cdot R[i](z^N) & (2-2-12) \\ &= \sum_{i=0, N-1} W^{(ki)} \cdot G^*[N-1-i](z^N) \cdot \sum_{k'=0, N-1} W^{-(k' \cdot (i+m))} \cdot X[k'](z^N) \\ &= W^{-(k' \cdot m)} \cdot \sum_{i=0, N-1} G^*[N-1-i](z^N) \cdot G[i+m](z^N) \cdot X[k](z^N) \\ &\quad + \sum_{k' \neq k} W^{-(k' \cdot m)} \cdot X[k'](z^N) \cdot \sum_{i=0, N-1} W^{-(k'-k) \cdot i} \cdot G^*[N-1-i] \cdot G[i+m](z^N) \end{aligned}$$

上の第二項は各サブフィルタがほぼ同じ周波数特性を持つことから下線部がほぼ 0 となり

$$Z[k](z^N) (\approx) W^{-(k' \cdot m)} \cdot \sum_{i=0, N-1} G^*[N-1-i](z^N) \cdot G[i+m](z^N) \cdot X[k](z^N) \quad (2-2-16)$$

即ちチャンネルごとに比例する位相誤差係数がかかる。

位相誤差が  $m = 0$  となる場合には

$$Z[k](z^N) = \sum_{i=0, N-1} G^*[N-1-i](z^N) \cdot G[i](z^N) \cdot X[k](z^N) \quad (2-2-17)$$

となり各チャネルとも正確に同じ周波数特性の伝送路となる。

### 3. FDM-CDMA

CDMA は移動通信に大きな利点がある。ここでは TMUX を用いてその各チャネルに対して周波数軸上で直交符号化を行う FDM-CDMA について記述する。拡散符号を  $C[0], C[1], C[2], \dots, C[N-1]$  とする。夫々の値は+1 か-1 をとる PN 系列である。

符号化回路を図 3-1 に、復号化回路を図 3-2 に示す。

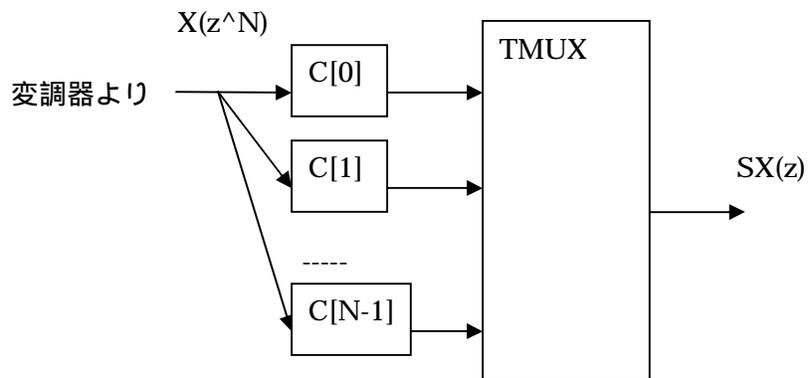
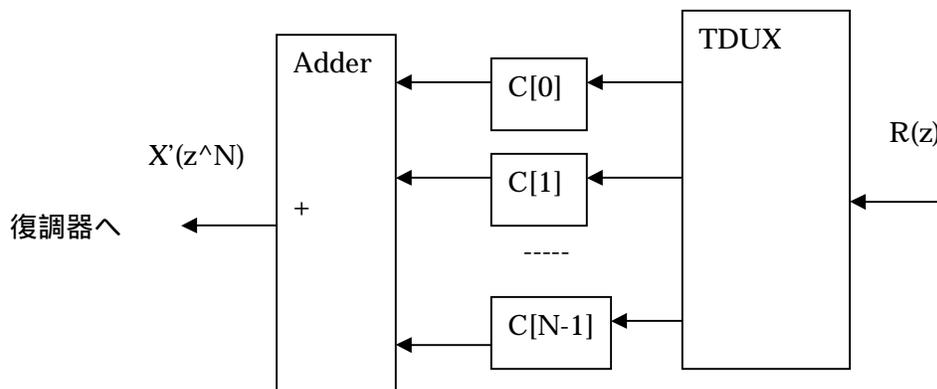


図 3-1 FDM-CDMA 符号化回路



FDM-CDMA 復号回路の構成

### 4. 多重伝搬路の伝達特性

基地局と移動機の距離が十分に大きい時は多数の伝搬路が生じ、それらの総和が伝搬路となる。

いま送信信号を

$$s(t) = e^{j(\omega_c t)} \quad (4-1)$$

とすると受信信号は

$$\begin{aligned} r(t) &= \sum_n a(n) e^{j(\omega_c(t - \tau(n)))} \\ &= e^{j(\omega_c(t - \tau_0))} \sum_n a(n) e^{-j(\omega_c(\tau(n) - \tau_0))} \end{aligned} \quad (4-2)$$

但し  $a(n) (> 0)$ ,  $\tau(n)$  は  $n$  番目の伝搬路の振幅係数と遅延である。  $\tau_0$  は基準伝搬路の遅延である。

今伝搬路の数が非常に多いとすると和を積分で置き換えて

$$r(t) = e^{j(\omega_c(t - \tau_0))} A(\omega) \quad (4-3)$$

$$A(\omega) = \int a(\tau) e^{-j(\omega(\tau - \tau_0))} d\tau \quad (4-4)$$

遅延分散の分布が指数分布の場合

$$a(\tau) = e^{-(\tau - \tau_0)/\sigma} / \sigma \quad (4-5)$$

とする。但し  $\sigma$  は遅延分散の平均である。この時は

$$A(\omega) = \int a(\tau) e^{-j(\omega(\tau - \tau_0))} d\tau = 1 / (1 + j\omega\sigma) \quad (4-6)$$

遅延分散の分布が正規分布の場合

$$a(\tau) = e^{-(\tau - \tau_0)^2 / (2\sigma^2)} / (\sigma\sqrt{2\pi}) \quad (4-7)$$

但し  $\tau_0$ ,  $\sigma$  はそれぞれ遅延分散の平均及び分散である。この時は

$$A(\omega) = \int a(\tau) e^{-j(\omega(\tau - \tau_0))} d\tau = e^{-(\omega\sigma)^2 / 2} \quad (4-8)$$

上の  $A(\omega)$  は多重伝搬路の伝達特性である。その周波数特性は  $|\omega\sigma| \ll 1$  の範囲では殆ど一定である。即ち極めて多数の伝搬路から成る多重伝搬路は搬送波周波数に対して十分狭い範囲では平坦な伝搬路であると看做せる。

従って FDM-CDMA が適用可能となる。

## 5. 提案システムの設計例

設計例

セルの半径 10km, 帯域幅 20MHz, 移動機の最大速度  $v = 100$  km/H なる移動通信網を設計する。

(1) 無線周波数

$$f_c = 2.5 \text{ (GHz)}$$

(2) 最大 Doppler 周波数

$$f_d = f_c \cdot v/c = 2.5 \times 10^9 \times 100/3600 / (3 \times 10^8) = 231.5 \text{ (Hz)}$$

(1) 遅延分散  $\sigma$

セル半径 10km の端と基地局間の伝搬時間は  $33 \mu\text{s}$  である。遅延分散はその一割とすると

$$\sigma = 3 \text{ (}\mu\text{s)}.$$

(2) TMUX チャンネル間隔  $f$

チャンネルタ間隔  $f$  は次の条件を満足するように定める。

$$f_d \ll f \ll 1/\sigma \text{ 即ち } 231.5 \ll f \ll 300 \text{ (kHz)}$$

ここでは  $f = 20 \text{ (kHz)}$  としよう。

(5) TMUX の設計

帯域幅約 20 MHz,を用いて  $f = 20(\text{kHz})$ の TMUX を設計するには  $N = 1,024$   
実際に用いるチャンネル数を 824 とする。上下端の各 100 チャンネルは保護バンドとする。

#### (6) TMUX channel filter

Nyquist フィルタで例えば Roll-off 率 = 0.25.

タップ数は  $1/f$  単位で  $M = 5$  タップとすると  $L = M \cdot N = 5 \times 1024 = 5120$ .

FIR フィルタの応答時間は  $L/(N \cdot f) = 250 (\mu\text{s}) \gg c(3.3 \mu\text{s})$

#### (7) 変調方式とデータ伝送速度

QPSK を用いると最大 824 波で  $2 \times 824 \cdot f / 1.25 = 26.368(\text{Mbps})$

#### 運用法

- (1) セルの端にいる移動機には FDM-CDMA を割り当て自セルや隣接セルとの干渉の下でも周波数や時間を共用した状態で運用できる。この時の伝送速度は QPSK で 32kbps, BPSK で 16kbps である。
- (2) 基地局の近くにいる移動機は FDMA で動作させる。一台で全帯域を専用すれば 26Mbps の高速伝送が可能である。FDMA により多数の移動機が効率よく高速伝送ができる。例えば 26 台が平均 1Mbps の伝送速度で通信することができる。
- (3) FDMA と CDMA の併用が可能である。この例では処理利得 824 であるから同時に 10 台の移動機が CDMA で動作し、FDMA に対して -20dB で運用すれば CDMA から FDMA への干渉は 10dB, FDMA から CDMA への干渉は 9dB の D/U 比で運用が可能と成る。

## 6. まとめ

次世代高速移動通信の信号伝送方式として開発されている WiMAX, OFCDM, 次世代 PHS 等は何れも OFDM を基としている。OFDM は多重伝搬路によって生じる遅延分散を送信側における GI の挿入と受信側における除去によって抑圧する。そのためには受信部において正確な信号のタイミングを再生する必要がある。そのために必要なクロック再生と同期は移動通信において生じる自セル、隣接セル、隣接セクタ間の深い干渉の中では困難である。また OFDM は全帯域に広がった周波数スペクトルを FFT で一括処理するため FDMA が不可能である。他方 CDMA はセル間の周波数再利用を可能にし、また移動機のセル間移動時にソフトハンドオフが可能な特長を有するが、OFCDM は基本的に OFDM に基づくものであり上述の問題から実用は困難であろう。

ここで提案した TMUX 技術に基づくシステムは FDMA が可能で且つ FDM-CDMA も可能であり、OFDM の抱える問題を解決できる。基地局の近傍で FDMA を用い、遠方で FDM-CDMA を用いれば高速移動体に対して周波数利用効率が高くかつ隣接セルで周波数共用が可能な移動通信網が可能となる。これにより第 4 世代の移動通信が実現可能になると期待される。

#### 文献

- [1] IEEE 802.16-2004
- [2] IEEE 802.16e
- [3] 佐和橋他 “(2)ブロードバンド無線アクセス方式の概要”

新他 “(3) VSF-OFCDM および VSCRF-CDMA に基づくブロードバンド無線アクセス技術”

NTT DoCoMo テクニカルジャーナル Vol.11, No2

[4] 市吉 修 “FDM-CDMA 送信方法、FDM-CDMA 受信放送およびそれらの装置”

特許出願 2000-138181

[5] Fumio Takahata, Osamu Ichiyoshi and Kazuo Yano “PSK Group MODEM and Its Performances” Globecom, Honolulu, 1986 IEEE 47.3.1-7