

## 光符号分割多元接続方式における 繰返し巡回シフト系列による多元接続干渉の緩和

園田 敏雄† 鎌倉 功弘†  
大槻 知明‡ 笹瀬 巖†

†慶應義塾大学大学院理工学部情報工学科 〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1  
Phone: +81-45-563-1141 Ext. 43236 E-mail: sonoda@sasase.ics.keio.ac.jp  
‡東京理科大学理工学部電気工学科 〒278-8510 野田市山崎 2641

あらまし 本稿では、多元接続干渉 (Multiple Access Interference: MAI) を緩和することを目的として、繰返し巡回シフト系列 (Repetitional Cyclic-shifted Sequences: RCS) を適用した光符号分割多元接続 (Code Division Multiple Access: CDMA) 方式を提案する。  $k$  回繰返しの RCS/CDMA 方式では、各ユーザに割り当てた 1 つの拡散符号を任意に巡回シフトさせて得られる  $k$  個の符号系列を情報に応じて繰返し送信し、受信機側では所望信号として各フレームにおける相関の和をとる。したがって、所望信号は RCS を用いない場合と比較して  $k$  倍になるのに対して、ユーザ間の符号系列シフト量の多様性から各フレームに干渉する確率は変わらないので MAI を緩和することができる。  $k=2$  の RCS/CDMA 方式において、情報変調にオン・オフ・キーイング (OOK) およびパルス位置変調 (PPM) を用いた場合のビット誤り率特性を理論解析により導出し、従来の OOK-CDMA 方式および PPM-CDMA 方式とそれぞれ比較して評価する。その結果、RCS を適用することで従来の誤り率特性をそれぞれ改善できることを示す。

キーワード 光符号分割多元接続 (CDMA) 方式, オン・オフ・キーイング (OOK), パルス位置変調 (PPM), 繰返し巡回シフト系列 (RCS), 多元接続干渉 (MAI)

### MAI Mitigation by Repetitional Cyclic-Shifted Sequences in Optical CDMA Systems

Toshio Sonoda†, Katsuhiko Kamakura†,  
Tomoaki Ohtsuki‡ Iwao Sasase†

†Dept. of Information and Computer Science, Keio University,  
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku, Yokohama, 223-8522 Japan  
E-mail: sonoda@sasase.ics.keio.ac.jp

‡Dept. of Electrical Engineering, Science University of Tokyo  
2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510 Japan

Abstract In this paper optical code-division multiple-access (CDMA) systems with repetitional cyclic-shifted sequences (RCS) is proposed for mitigation of multiple access interference (MAI). When the number of repetition is  $k$ , a user transmit  $k$  sequences in each frame, and the  $k$  sequences are generated by arbitrary cyclic-shifting a code assigned to each user. At the receiver side the outputs from the correlators over  $k$  sequences are summed as the desired signal. RCS/CDMA system can mitigate MAI because the peak power of the desired signal in the RCS/CDMA is  $k$  times larger than that in the system without RCS, while the interference probability of each frame is almost same as that of the system without RCS for the variety of the numbers of cyclic-shift sequences among the users. We evaluate the bit error probability of on-off keying (OOK)-RCS/CDMA system and pulse-position modulation (PPM)-RCS/CDMA system with  $k=2$  by the theoretical analysis and compare with the conventional system. We show that the RCS can improve the bit error probability of the conventional system.

key words optical code-division multiple-access (CDMA), on-off keying (OOK), pulse-position modulation (PPM), repetitional cyclic-shifted sequences (RCS), multiple access interference (MAI)

# 1 研究背景

光符号分割多元接続 (Code Division Multiple Access: CDMA) 方式では、オン・オフ・キーイング (OOK) やパルス位置変調 (PPM) などを情報変調に用いる方式が一般的である。OOK は光パルスが励起されるか否かで情報を変調する方式で、高ビットレートを達成できる方式であるが、励起した1つの光パルスで1ビットの変調を行うため電力効率が低く、また光 CDMA に適用した場合、多元接続干渉 (Multiple Access Interference: MAI) の影響を大きく受ける [1][2]。これに対し、PPM は時間軸をフレームと呼ばれる単位に区切り、さらにそのフレームをスロットと呼ばれる単位に分割し、1フレーム中のどのスロットに光パルスを励起するかで情報変調を行う方式である。M-ary PPM は励起した1つの光パルスで  $\log_2 M$  ビットを送信することができるため、電力効率が優れている。また、光 CDMA 方式に適用した場合、そのパルス位置の多様性から MAI の影響を低減できる [3]。これら OOK-CDMA 方式および PPM-CDMA 方式では同時ユーザ数が増加するにつれて MAI の影響が大きくなるため、誤り率特性が劣化するという問題があり、MAI を緩和する方式の提案が求められている。従来、MAI を緩和する有効な方式としてダブルハードリミッタを用いる方式が提案されており、誤り率特性を大幅に改善できることが報告されている [4]。

本稿では、MAI の緩和を目的として、繰返し巡回シフト系列 (Repetitional Cyclic-shifted Sequences: RCS) を適用した光 CDMA 方式を提案する。k 回繰返しの RCS/CDMA 方式では、各ユーザに割り当てた1つの拡散符号を任意に巡回シフトさせて得られる k 個の符号系列を情報に応じて繰返し送信し、受信機側では所望信号として各フレームにおける相関の和をとる。したがって、所望信号は RCS を用いない場合と比較して k 倍になるのに対して、ユーザ間の符号系列シフト量の多様性から各フレームに干渉する確率は変わらないので MAI を緩和することができる。RCS/CDMA 方式に対してもダブルハードリミッタを適用することはできるが、本稿では RCS/CDMA 方式の基本特性を求めるため、ダブルハードリミッタを用いない場合について評価する。k = 2 の RCS/CDMA 方式において、情報変調にオン・オフ・キーイング (OOK) およびパルス位置変調 (PPM) を用いた場合のビット誤り率特性を理論解析により導出し、従来の OOK-CDMA 方式および PPM-CDMA 方式とそれぞれ比較して評価する。その結果、RCS を適用することで従来の OOK-CDMA 方式および PPM-CDMA 方式の誤り率特性をそれぞれ改善できることを示す。

# 2 システムモデル

本章では、繰返し送信数 k = 2 の OOK-RCS/CDMA 方式のシステムモデルについて説明する。本稿では拡散符号として、オフピーク自己相関の最大値が 1、相互相関の最大値が 1 の光直交符号 (Optical Orthogonal Code: OOC) を用いる [5]。n 番目のユーザには 1 つの OOC ( $C_n(0)$ ) と

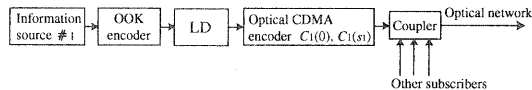


図 1: 繰返し送信数 k = 2 の OOK-RCS/CDMA 方式の送信機モデル

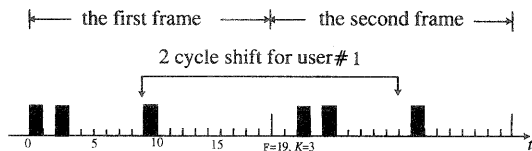


図 2: ユーザ 1 の送信パルスの例

巡回シフトさせた OOC ( $C_n(s_n)$ ,  $s_n$ : シフト量) の 2 つの拡散符号を割り当てる。

図 1 に繰返し送信数 k = 2 の OOK/RCS-CDMA 方式の送信機モデルを示す。まず、ユーザは送信する情報に応じて、“0”を送信するときには光パルスを励起せず、“1”を送信するときには重ならない 2 つのフレームにそれぞれ光パルスを励起する。ここで、フレームとは繰返し送信単位時間を表す。励起した 2 つの光パルスはユーザ 1 に割り当てた 2 つの符号系列  $C_1(0)$ ,  $C_1(s_1)$  を用いてそれぞれ拡散符号化し、2 つのフレームで 1 つのシンボルを送信する。ここで、拡散符号化とは、スプリッタ、遅延線およびコンバイナを用いて、拡散符号の重み位置に光パルスを配置するように時間軸上に拡散することである [3]。例として、図 2 にユーザ 1 の送信パルスの例を示す。図中の  $F = 19$ ,  $K = 3$  はそれぞれ OOC の符号長と重みを表す。ユーザ 1 に対して拡散符号  $C_1(0) = [10100000010000000000]$  が割り当てられ、シフト量  $s_1 = 2$  の場合、 $C_1(0)$  とそれをもとに 2 チップシフトさせた  $C_1(2) = [00101000000100000000]$  の 2 つの系列を割り当てる。そして、第 1 フレームに励起した光パルスを  $C_1(0)$  で拡散符号化し、第 2 フレームに励起した光パルスを  $C_1(2)$  で拡散符号化する。

図 3 に繰返し送信数 k = 2 の OOK/RCS-CDMA 方式の受信機モデルを示す。受信機では、まず、受信信号をフレーム単位でスイッチングを行い、上側のブランチで符号系列

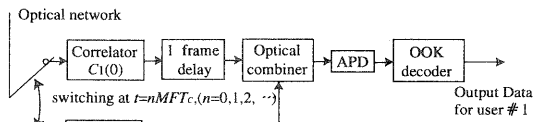


図 3: 繰返し送信数 k = 2 の OOK-RCS/CDMA 方式の受信機モデル

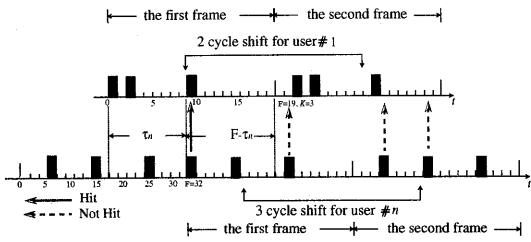


図4: 繰返し送信数  $k=2$  の OOK-RCS/CDMA 方式における干渉の一例

$C_1(0)$  にしたがって第1フレームの相関をとり、下側のプランチで  $C_1(s_1)$  にしたがって第2フレームの相関をとる。相関器は送信機の符号器を構成しているタップ遅延線と逆の遅延パターンで構成されており、この相関器を用いることでスロット全域に拡散されていた光パルスを送受信の最終チップに集めることができる。各フレームの相関をとった後、第1フレームの相関出力に1フレーム分の遅延を与え、第2フレームの相関出力に加算し、アバランシェフォトダイオード (APD) を用いて光電変換を行う。そして、APD 出力をスレッシュホールドと比較して、以上であれば“0”、以下であれば“1”として情報を復調する。図2の例の場合、第1フレームの3つのパルスと第2フレームの3パルスの計6パルスを所望信号とする。PPM-RCS/CDMA 方式は、上記の OOK-RCS/CDMA 方式の情報変調部分を PPM に置き換えたシステムモデルである。

図4に繰返し送信数  $k=2$  の OOK-RCS/CDMA 方式における干渉の一例を示す。上側はユーザ1の送信パルス、下側はユーザ  $n$  の送信パルスを示す。図に示すように、ユーザ  $n$  の第1フレームの先頭のパルスがユーザ1の第1フレームの先頭から3つめの相関チップ位置に干渉しているが、ユーザ  $n$  の第2フレームのパルスはユーザ1の相関チップ位置に干渉していないことがわかる。RCS を用いない方式において重み  $K$  のとき、 $K$  パルス分の所望信号に対して1パルスの干渉は  $1/K$  の MAI と考えることができる。RCS/CDMA 方式では、 $2K$  パルス分の所望信号に対して1パルスの干渉は  $1/2K$  の MAI となり、RCS を用いない場合と比較して  $1/2$  の MAI になる。また、巡回シフトさせた拡散符号を用いて繰返し送信を行うため、そのシフト量の多様性から第1フレームおよび第2フレームに干渉する確率は RCS を用いない場合と比較してほぼ変わらないため、結果として MAI を緩和することができる。

### 3 理論解析

本稿では、RCS/CDMA 方式の基本的特性を調べるために、繰返し送信数  $k=2$  の場合についてビット誤り率を求め、主な雑音として MAI、APD の過剰雑音について考慮する。また、ユーザ間においてチップ同期がとれていると仮定する。

#### 3.1 OOK-RCS/CDMA 方式

いま、送信シンボル  $b^i = i \in \{0, 1\}$  のとき、第1フレームと第2フレームの相関器出力の和を  $Z_1^i$ 、APD 出力を  $Y_1^i$  とする。OOK-RCS/CDMA 方式の誤り率  $P_b$  は次式で表される。

$$P_{b[\text{OOK}]} = \frac{1}{2} [\Pr(Y_0^1 > \theta | b^1 = 0) + \Pr(Y_1^1 \leq \theta | b_j^1 = 1)] \quad (1)$$

ここで、 $\theta$  は OOK 復号器のスレッシュホールドレベルを表す。

次に、システムの同時ユーザ数を  $N$  とし、そのうち1人を所望ユーザとする。また、所望ユーザの第1フレームに干渉を与えうる  $N-1$  人のユーザを次のように分類する。

- (i) 第1フレームに2パルスの干渉を与えるユーザ:  $l_2$
  - (ii) 第1フレームに1パルスの干渉を与えるユーザ:  $l_1$
  - (iii) 第1フレームに干渉を与えないユーザ:  $l_0$
- 但し、(i)~(iii) のユーザの和は  $N-1$  に等しい。

次に上記のように分類したそれぞれのユーザからの干渉確率を求める。RCS を用いる場合、第1フレームと第2フレームで拡散符号をシフトさせているために1ユーザから最大2パルスの干渉を考慮する必要がある。したがって、本稿の解析において図??に示すように、所望ユーザとユーザ  $n$  との相対遅延  $\tau_n$  を考慮する [6]。ここで、重み位置が系列上に一樣であると仮定すると、所望ユーザの第1フレームに対してユーザ  $n$  の前半のフレームから干渉する確率は  $(K\tau_n/F)^2/2\tau_n$ 、後半のフレームから干渉する確率は  $(K(F-\tau_n)/F)^2/2(F-\tau_n)$  になる。したがって、第1フレームに対して2パルスの干渉を与える確率  $p$  は次式になる。

$$\begin{aligned} p &\equiv \Pr[2\text{hits}] \\ &= \sum_{\tau_n=0}^{F-1} \Pr(\tau_n) \Pr(2\text{hits}|\tau_n) \\ &= \sum_{\tau_n=0}^{F-1} \frac{1}{F} \left[ \left( \frac{K\tau_n}{F} \right)^2 \frac{1}{2\tau_n} \left( \frac{K(F-\tau_n)}{F} \right)^2 \frac{1}{2(F-\tau_n)} \right] \\ &= \frac{K^4}{F^4} \frac{F^2-1}{24} \end{aligned} \quad (2)$$

同様に第1フレームに対して1パルスの干渉を与える確率  $q$ 、第1フレームに対して干渉を与えない確率  $r$  はそれぞれ次式になる。

$$\begin{aligned} q &\equiv \Pr[1\text{hit}] \\ &= \sum_{\tau_n=0}^{F-1} \Pr(\tau_n) \Pr(1\text{hit}|\tau_n) \\ &= \sum_{\tau_n=0}^{F-1} \frac{1}{F} \left[ \left( \frac{K\tau_n}{F} \right)^2 \frac{1}{2\tau_n} + \left( \frac{K(F-\tau_n)}{F} \right)^2 \frac{1}{2(F-\tau_n)} \right] - p \\ &= \frac{K^2}{2F} - p \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} r &\equiv \Pr[0\text{hit}] \\ &= 1 - p - q \end{aligned} \quad (4)$$

次に所望ユーザの第2フレームに干渉を与える場合について考える。第1フレームの場合同様に第2フレームに干

渉を与える  $N-1$  人のユーザを次のように分類する。

(iv) 2パルスの干渉を与えるユーザ:  $m_2$

(v) 1パルスの干渉を与えるユーザ:  $m_1$

(vi) 干渉を与えないユーザ:  $m_0$

ここで、各ユーザに割り当てたシフト量は任意であるため、所望ユーザの第1フレームと第2フレームに干渉を与えるユーザをそれぞれ独立に考える。したがって、各ユーザ (iv), (v) および (vi) からの干渉確率はそれぞれ式 (2), (3) および (4) で与えられる。以上より、干渉ユーザベクトル  $l = (l_2, l_1, m_2, m_1)$  の生起確率は多項分布を用いて以下のよう表される。

$$P(l) = \frac{(N-1)!(N-1)!}{l_2! l_1! m_2! m_1!} \cdot p^{l_2+m_2} \cdot q^{l_1+m_1} \cdot r^{l_0+m_0} \quad (5)$$

次に、送信シンボル  $i$  のとき第1繰返しフレームと第2繰返しフレームの相関後のパルス数  $Z_i^1$  は次式になる。

$$Z_i^1 = 2K\delta(i) + 2 \times (l_2 + m_2) + (l_1 + m_1) \quad (6)$$

ここで、 $\delta(i)$  はデルタ関数である。

本稿では光検出の際 APD を用いると仮定する。APD 出力はガウス分布で近似できる [4]。送信シンボル  $i$  に対応する APD 出力の条件付確率密度関数は次式で与えられる。

$$p_{Y_i^1}(x|b_j^1 = i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} e^{-(x-\mu_i)^2/2\sigma_i^2}, \quad (i = 0, 1) \quad (7)$$

ここで、 $\mu_i, \sigma_i$  はそれぞれ APD 出力の平均と分散を表し、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \mu_i &= GT_c [Z_i^1 \lambda_s + (2KN - Z_i^1) \lambda_s / M_e + I_b / e] \\ &\quad + T_c I_s / e \quad (8) \\ \sigma_i^2 &= G^2 F_e T_c [Z_i^1 \lambda_s + (2KN - Z_i^1) \lambda_s / M_e + I_b / e] \\ &\quad + T_c I_s / e + \sigma_{th}^2 \quad (9) \end{aligned}$$

ここで、 $G$  は APD 利得、 $M_e$  は変調消光比、 $I_s$  は表面漏れ電流、 $I_b$  はバルク漏れ電流である。また、 $\lambda_s$  は APD の平均光子吸収率、 $F_e$  は過剰雑音係数であり、次式で与えられる。

$$\lambda_s = \frac{\eta P}{hf} \quad (10)$$

$$F_e = k_{eff} G + (2 - 1/G)(1 - k_{eff}) \quad (11)$$

ここで、 $\eta$  は APD の光電変換効率、 $P$  は受信光パワー、 $h$  はプランク定数、 $f$  は光の周波数、 $k_{eff}$  は APD のイオン化率である。また、 $\sigma_{th}$  は、熱雑音の分散であり、次式で与えられる。

$$\sigma_{th}^2 = 2k_B T_r T_c / (e^2 R_L) \quad (12)$$

ここで、 $k_B$  はボルツマン定数、 $T_r$  は受信機雑音温度、 $R_L$  は受信機負荷抵抗である。以上より、式 (1) の右辺第1項および第2項はそれぞれ次式で求められる。

$$\begin{aligned} \Pr(Y_0^1 > \theta | b_j^1 = 0) &= \sum_{l_2=0}^{N-1} \sum_{l_1=0}^{N-1-l_2} \sum_{m_2=0}^{N-1} \sum_{m_1=0}^{N-1-m_2} \\ &\quad Q\left(\frac{\theta - \mu_0}{\sigma_0}\right) P(l) \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pr(Y_1^1 \leq \theta | b_j^1 = 1) &= \sum_{l_2=0}^{N-1} \sum_{l_1=0}^{N-1-l_2} \sum_{m_2=0}^{N-1} \sum_{m_1=0}^{N-1-m_2} \\ &\quad \left(1 - Q\left(\frac{\theta - \mu_1}{\sigma_1}\right)\right) P(l) \quad (14) \end{aligned}$$

ここで、 $Q(\cdot)$  は  $Q$  関数である。また、OOK-RCS/CDMA 方式のビットレートは以下の式で表される。

$$Rb[\text{OOK}] = \frac{1}{2FT_c} \quad (15)$$

### 3.2 M-ary PPM-RCS/CDMA 方式

いま、送信シンボル  $b^1 = i (i \in \{0, 1, \dots, M-1\})$  のとき、第1フレーム第2フレームの所望スロットの第  $i$  スロットと比較スロットの第  $h (i \neq h)$  スロットの相関器出力の和をそれぞれ  $Z_i^1, Z_h^1$  とし、その APD 出力をそれぞれ  $Y_i^1, Y_h^1$  とする。検出に関しては、 $M$  スロットの APD 出力のうち最大のものを選択するとする。ここで、シンボル誤り率  $P_s$  はユニオンバウンドを用いると以下のように導くことができる [3]。

$$\begin{aligned} P_s &= 1 - \Pr\{Y_i^1 > Y_h^1 \\ &\quad \text{for } \forall h \in 0, 1, \dots, i-1, i+1, \dots, M-1 | b^1 = i\} \\ &= 1 - \Pr\{Y_0^1 > Y_1^1, Y_2^1, \dots, Y_{M-1}^1 | b^1 = i\} \\ &\leq (M-1) \Pr\{Y_h^1 > Y_i^1 | b^1 = i\} \quad (16) \end{aligned}$$

次に、システムのユーザを分類する。ここで、 $M$ -ary PPM-RCS/CDMA 方式では、第1フレームに2パルス干渉した場合、第2フレームにおいては2パルスの干渉を与えることはないため、第1フレームおよび第2フレームに干渉を与えるユーザは独立ではない。しかし、解析を容易にするために第1フレームおよび第2フレームに干渉を与えるユーザをそれぞれ独立に考え、第1フレームおよび第2フレームにそれぞれ2パルスの干渉が起こりうると仮定することで誤り率の上限界を求める。

まず、第1フレームに干渉を与えるユーザ  $N-1$  人を次の6つのユーザに分類する。

- (i) 第  $i$  スロットに2パルスの干渉、第  $h$  スロットに干渉を与えないユーザ:  $l_{2,0}$
- (ii) 第  $i$  スロットに干渉を与えず、第  $h$  スロットに2パルスの干渉を与えるユーザ:  $l_{0,2}$
- (iii) 第  $i$  スロットに1パルスの干渉、第  $h$  スロットに1パルスの干渉を与えるユーザ:  $l_{1,1}$
- (iv) 第  $i$  スロットに1パルスの干渉、第  $h$  スロットに干渉を与えないユーザ:  $l_{1,0}$
- (v) 第  $i$  スロットに干渉を与えず、第  $h$  スロットに1パルスの干渉を与えるユーザ:  $l_{0,1}$
- (vi) 第  $i$  スロット、第  $h$  スロットともに干渉を与えないユーザ:  $l_{0,0}$

但し、(i)~(vi) のユーザの和は  $N-1$  に等しい。

次に分類した各ユーザ1人からの干渉確率を求める。まず、(i) のユーザからの干渉確率  $p$  は次式で表される。

$$p \equiv \Pr[2 \text{ hits on } i \text{ slot}, 0 \text{ hit on } h \text{ slot}]$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{\tau_n=0}^{F-1} \Pr(\tau_n) \Pr(2 \text{ hits on } i \text{ slot}, 0 \text{ hits on } h \text{ slot} | \tau_n) \\
&= \sum_{\tau_n=0}^{F-1} \frac{1}{F} \left[ \left( \frac{K\tau_n}{F} \right)^2 \frac{1}{M^2\tau_n} \left( \frac{K(F-\tau_n)}{F} \right)^2 \frac{1}{M(F-\tau_n)} \right] \\
&= \frac{K^4}{M^3 F^4} \frac{F^2 - 1}{6} \quad (17)
\end{aligned}$$

ここで、 $p$  はスロット位置に依存しないので、(ii) のユーザからの干渉確率も  $p$  で与えられる。また、(iii), (iv) のユーザからの干渉確率  $q, r$  はそれぞれ次式で表される。

$$\begin{aligned}
q &\equiv \Pr[1 \text{ hit on } i \text{ slot}, 1 \text{ hit on } h \text{ slot}] \\
&= \sum_{\tau_n=0}^{F-1} \Pr(\tau_n) \Pr(1 \text{ hits on } i \text{ slot}, 1 \text{ hit on } h \text{ slot} | \tau_n) \\
&= \sum_{\tau_n=0}^{F-1} \frac{1}{F} \left[ \left\{ \left( \frac{K\tau_n}{F} \right)^2 \frac{1}{M\tau_n} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \left( \frac{K(F-\tau_n)}{F} \right)^2 \frac{1}{M(F-\tau_n)} \right\}^2 \right] - 2p \quad (18)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
r &\equiv \Pr[1 \text{ hit on } i \text{ slot}, 0 \text{ hit on } h \text{ slot}] \\
&= \sum_{\tau_n=0}^{F-1} \Pr(\tau_n) \Pr(1 \text{ hits on } i \text{ slot}, 0 \text{ hits on } h \text{ slot} | \tau_n) \\
&= \sum_{\tau_n=0}^{F-1} \frac{1}{F} \left[ \left( \frac{K\tau_n}{F} \right)^2 \frac{1}{M\tau_n} + \left( \frac{K(F-\tau_n)}{F} \right)^2 \frac{1}{M(F-\tau_n)} \right] \\
&\quad - 2p - q = \frac{K^4}{M^2 F^3} - 2p - q \quad (19)
\end{aligned}$$

ここで、 $r$  はスロット位置に依存しないので、(v) のユーザからの干渉確率も  $r$  で与えられる。第  $i$  スロットおよび第  $h$  スロットともに干渉を与えない確率  $s$  は  $s = 1 - 2p - q - 2r$  で与えられる。また、第 1 フレームに対して干渉を与えるユーザの場合に  $l_{2,0}, \dots, l_{0,0}$  と分類したように、第 2 フレームに対して干渉を与えるユーザ  $N-1$  を  $m_{2,0}, \dots, m_{0,0}$  と分類する。

以上より、干渉ユーザベクトル  $l = (l_{2,0} l_{0,2} \dots m_{0,1})$  の生起確率は多項分布を用いて以下のように表される。

$$\begin{aligned}
P(l) &= \frac{(N-1)!(N-1)!}{l_{2,0} l_{0,2} \dots m_{0,1}} \\
&\quad \cdot p^{l_{2,0} + l_{0,2} + m_{2,0} + m_{0,2}} \cdot q^{l_{1,1} m_{1,1}} \\
&\quad \cdot r^{l_{1,0} + l_{0,1} + m_{1,0} + m_{0,1}} \cdot s^{l_{0,0} + m_{0,0}} \quad (20)
\end{aligned}$$

次に、送信シンボル  $i$  のとき第 1 フレームと第 2 フレームの相関後のパルス数  $Z_i^1, Z_h^1$  は次式になる。

$$Z_i^1 = 2K + 2 \times (l_{2,0} + m_{2,0}) + (l_{1,1} + l_{1,0} + m_{1,1} + m_{1,0}) \quad (21)$$

$$Z_h^1 = 2 \times (l_{0,2} + l_{0,2}) + (l_{1,1} + l_{0,1} + m_{1,1} + m_{0,1}) \quad (22)$$

スロット位置  $i$  に対応する APD 出力の条件付確率密度関数は次式で与えられる。

$$p_{Y_i^1}(x|b_j^1 = i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} e^{-(x-\mu_i)^2/2\sigma_i^2}, \quad (i = 0, \dots, M-1) \quad (23)$$

ここで、 $\mu_i, \sigma_i$  はそれぞれ APD 出力の平均と分散を表し、次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
\mu_i &= GT_c [Z_i^1 \lambda_s + (2KN - Z_i^1) \lambda_s / M_e + I_b / e] \\
&\quad + T_c I_s / e \quad (24)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_i^2 &= G^2 F_e T_c [Z_i^1 \lambda_s + (2KN - Z_i^1) \lambda_s / M_e + I_b / e] \\
&\quad + T_c I_s / e + \sigma_{th}^2 \quad (25)
\end{aligned}$$

また、第  $h$  スロットについても式 (23), (24) および (25) において  $i = h$  とおくことで APD 出力の条件付確率密度関数、平均および分散が得られる。以上より、所望スロットの APD 出力より比較スロットの APD 出力が大きくなる確率は、次式で求められる。

$$\begin{aligned}
\Pr\{Y_h^1 > Y_i^1 | b_j^1 = i\} &= \sum_{l_{2,0}=0}^{N-1} \dots \sum_{m_{2,0}=0}^{N-1} \dots \left[ P(l) \right. \\
&\quad \left. \int_{-\infty}^{\infty} p_{Y_i^1}(x) Q\left(\frac{x - \mu_h}{\sigma_h}\right) dx \right] \quad (26)
\end{aligned}$$

以上より、 $M$ -ary PPM-RCS/CDMA 方式のビット誤り率は式 (16) から次式を用いて導かれる。

$$P_b[PPM] \leq \frac{M}{2(M-1)} P_s \quad (27)$$

また、OOK-RCS/CDMA 方式のビットレートは以下の式で表される。

$$Rb[PPM] = \frac{\log_2 M}{2MFT_c} \quad (28)$$

## 4 数値結果

本章で示す数値結果は、変調消光比  $M_e$  を 100, APD 利得  $G$  を 100, APD イオン化率  $k_{eff}$  を 0.02, APD の光電変換効率  $\eta$  を 0.6, プランク定数  $h$  を  $6.626 \times 10^{-34}$ , 光周波数を  $f$  を  $2.306 \times 10^{14}$  Hz, ボルツマン定数  $k_B$  を  $1.379 \times 10^{-23}$ , 受信機雑音温度  $T_r$  を  $1100^\circ$  K, 受信機負荷抵抗  $R_L$  を  $1030 \Omega$ , 表面漏れ電流  $I_s$  を  $10 \mu\text{A}$ , バルク漏れ電流  $I_b$  を  $0.1 \mu\text{A}$ , チップ時間幅  $T_c$  を  $10$  ps を用いている。また、従来の OOK-CDMA 方式および PPM-CDMA 方式と比較して評価する。符号長  $F$  を OOK/CDMA では 500 とし、利用帯域とビットレートを一定にして評価するために、OOK-RCS/CDMA では 250 とした。また、重み  $K$  を OOK-CDMA では 4 とし、得られる符号数 [5] を 41 とし一定にして評価するために、OOK-RCS/CDMA では 3 とした。

図 5 に OOK-CDMA および OOK-RCS/CDMA のシンボル当りの受信光パワーに対するビット誤り率特性を示す。OOK-CDMA および OOK-RCS/CDMA とともに同時ユーザ数  $N = 6$ , ビットレートは  $100$  Mbps とした。図

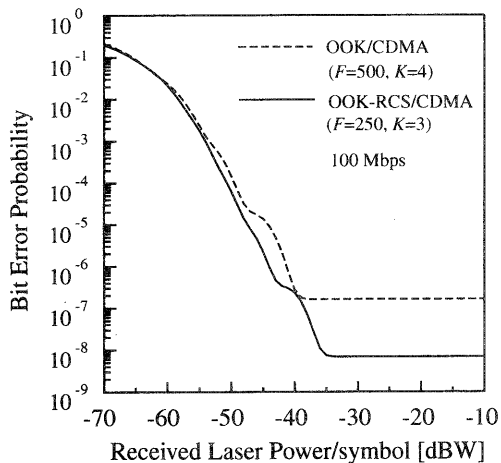


図5: OOK-CDMA および OOK-RCS/CDMA のシンボル当りの受信光パワーに対するビット誤り率特性 (同時ユーザ数 6, 符号数 41, ビットレート 100 Mbps)

より, OOK-CDMA と比較して OOK-RCS/CDMA の特性が優れていることがわかる. RCS を用いた場合スレッシュホールド判別に用いる所望信号が 6 パルス分になるのに対し, 従来 4 パルス分になるため, 1 パルスの干渉の影響は RCS/CDMA 方式の方が小さい. また, RCS を用いた場合の干渉確率は式 (2) および (3) に示すように 1 パルスの干渉確率は 2 パルスの干渉確率と比較して大きく, また, RCS を用いない場合の干渉確率と比較してほぼ変わらないので, 結果として MAI を緩和することができるためである.

図 6 に  $M$ -ary PPM-CDMA および  $M$ -ary PPM-RCS/CDMA のシンボル当りの受信光パワーに対するビット誤り率特性を示す. PPM-CDMA および PPM-RCS/CDMA とともに同時ユーザ数  $N = 6$ , ビットレートは  $M=4, 8, 16$  のときそれぞれ 50 Mbps, 37.5 Mbps, 25 Mbps とした. 図より, いずれの  $M$  の値においても PPM-CDMA と比較して PPM-RCS/CDMA の特性が優れていることがわかる. これは, RCS による MAI を緩和する効果は  $M$  の値に依存することなく得られるためである.

## 5 むすび

本稿では, MAI の緩和を目的として, 繰返し巡回シフト系列 (RCS) を適用した光 CDMA 方式を提案した. 繰返し送信数が 2 の RCS/CDMA 方式のビット誤り率特性を理論解析により導出し, 従来の OOK-CDMA 方式および PPM-CDMA 方式とそれぞれ比較して評価した. その結果, RCS を適用することで従来の OOK-CDMA 方式および PPM-CDMA 方式の誤り率特性をそれぞれ改善できることを示した.

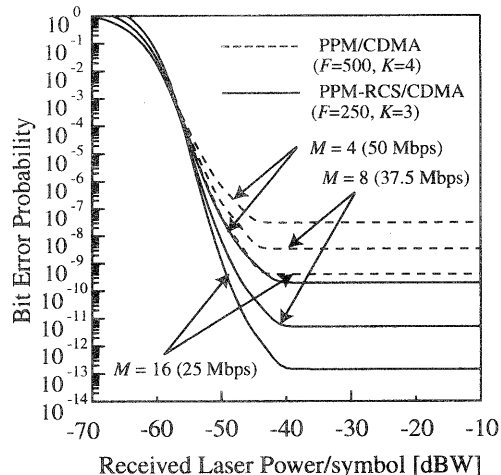


図6:  $M$ -ary PPM-CDMA および  $M$ -ary PPM-RCS/CDMA のシンボル当りの受信光パワーに対するビット誤り率特性 (同時ユーザ数 6, 符号数 41,  $M=4, 8, 16$ )

## 参考文献

- [1] J. A. Salehi and C. A. Brackett, "Code division multiple-access techniques in optical fiber network-part I: Fundamental principles," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, no. 8, pp. 824-833, Aug. 1989.
- [2] J. A. Salehi, "Code division multiple-access techniques in optical fiber network-part II: systems performance analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, no. 8, pp. 834-842, Aug. 1989.
- [3] H. M. Shalaby, "Performance analysis of optical synchronous CDMA communication systems with PPM signaling," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 2/3/4, pp. 624-634, Feb./March/April 1995.
- [4] T. Ohtsuki, "Direct-detection optical asynchronous CDMA systems with double optical hard limiters: APD noise and thermal noise," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E81-B, no. 7, pp. 1491-1498, July 1998.
- [5] F. R. K. Chung, J. A. Salehi, and V. K. Wei, "Optical orthogonal codes: design, analysis and applications," *IEEE Trans. Inform. Theory.*, vol. 37, pp. 595-604, Atlanta, GA, Apr. 1996.
- [6] H. M. Kwon, "Optical orthogonal code-division multiple-access system-part II: Multibits/sequence-period OOC-CDMA," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 42, pp. 2592-2599, Aug. 1994.