

論文

多ビット送信シーケンスを用いた PPM 光 CDMA システムの特性解析

三好 徹哉[†] 西岡 隆^{††} 八嶋 弘幸^{††} 稲葉 直彦[†]
 鈴木 誠史^{††} 山田 芳文[†]

Performance Analysis of PPM Multi-Bits/Sequence-Period Optical CDMA System

Tetsuya MIYOSHI[†], Takashi NISHIOKA^{††}, Hiroyuki YASHIMA^{††}, Naohiko INABA[†],
 Jouji SUZUKI^{††}, and Yoshihumi YAMADA[†]

あらまし 光通信における多元接続の一方式として、光符号分割多元接続 (OCDMA) が注目されている。なかでも Multi-bits/Sequence-period OCDMA (MS-OCDMA, 多ビット送信シーケンス光 CDMA) システムは、ビット誤り率の面で On-Off Keying OCDMA (OOK-OCDMA) システムよりも優れている方式として知られている。本研究では、MS-OCDMA の多ビット送信シーケンスを Pulse Position Modulation OCDMA (PPM-OCDMA, パルス位置変調光 CDMA) システムに用いた光 CDMA システム、すなわち、signature シーケンスのシフト数にデータを乗せることで、1 PPM フレームで $\log_2 MF$ ビット (M : スロット数, F : シーケンス長) 送信する PPM-OCDMA システムを提案する。受信信号レベルは十分大きいものと仮定して、信号の劣化要因は他利用者の干渉信号のみを考慮し、同システムの誤り率の上限を解析的に導出する。

キーワード 光通信, 光 CDMA, PPM, 多ビット送信シーケンス

1. ま え が き

近年、情報量の飛躍的な増加に伴い高速通信ネットワークの構築が重要な課題となっており、光ファイバ通信は広帯域で超高速伝送が可能であるため広く利用されている。また、マルチメディア化に伴い多数の利用者で伝送路を共有する高速な多元接続が可能な通信システムが重要視されている。光ファイバ通信においては TDM (Time Division Multiplex) や WDM (Wavelength Division Multiplex) 等の多重通信があるが、これらはフレキシブルな多元接続を行うには多重度が高くなるにつれ難しくなる。近年、光ファイバ通信における多元接続として光符号分割多元接続 (OCDMA: Optical Code Division Multiple Access) が研究されている。OCDMA システムでは、signature シーケンスと呼ばれる、0, 1 のパルスからなるシーケンスを各利用者に割り当てる。多元接続は、それぞれの利用者固有の signature シーケンスを共通

の光ファイバにのせることで実現される。受信側では受信信号と signature シーケンスの相関をとることでデータを復号する。したがって、オフピーク自己相関値と相互相関値が小さいシーケンスの集合を signature シーケンスとして用いることで、干渉の少ない多元接続が可能となる。OCDMA は光ファイバの極めて広い帯域を有効に利用する方法として、大きな注目を集めている。

当初の OCDMA では、1 シーケンスで 1 ビットを送信するシステム、すなわち On-Off Keying OCDMA (OOK-OCDMA) システムが研究されていた [1]~[4]。しかし近年では、Pulse Position Modulation OCDMA (PPM-OCDMA, パルス位置変調光 CDMA) システム [5]、Multi-bits/Sequence-period OCDMA (MS-OCDMA, 多ビット送信シーケンス光 CDMA) システム [6] などのシステムが提案されており、他利用者の干渉信号以外の雑音 (photo detector のポアソンショットノイズ等) が比較的大きい状況のときは、前者は同一スループットの条件下において OOK-OCDMA より優れたビット誤り率特性をもっており、逆に他利用者の干渉信号以外の雑音が比較的小さい状況のときは、後者は同一スループットの条件下において OOK-OCDMA より優れたビット誤り率特

[†] 宇都宮大学工学部情報工学科, 宇都宮市
 Faculty of Engineering, Utsunomiya University,
 Utsunomiya-shi, 321-8585 Japan

^{††} 埼玉大学工学部情報システム工学科, 浦和市
 Faculty of Engineering, Saitama University, Urawa-shi,
 338-8570 Japan

性をもっている。しかしながら、後者は、同程度のビット誤り率を得るのに、OOK-OCDMA に比べて受信器がかなり複雑になるという欠点がある。

本研究では、MS-OCDMA の多ビット送信シーケンスを PPM-OCDMA に用いた光 CDMA システムを提案し、その特性解析を行う。OOK-OCDMA や PPM-OCDMA では、signature シーケンスは、希望信号と干渉信号の区別をするためのみに用いられるのに対し、MS-OCDMA 及び本研究の提案システムでは、シーケンスのシフト数にデータを乗せる。したがって提案システムは、1PPM フレームで $\log_2 MF$ ビット (M : スロット数, F : シーケンス長) のデータを送信する。解析にあたり、受信信号レベルは十分大きいものと仮定して、信号の劣化要因は他利用者の干渉信号のみを考慮する。以上の仮定のもとで、同システムのビット誤り率の上限を解析的に導出し、更に従来法との特性比較を行い、提案法の有効性を示す。提案法は同一スループットの条件下において OOK-OCDMA より優れたビット誤り率特性をもち、同程度のビット誤り率を MS-OCDMA よりも簡単な受信器で実現できることが示される。

2. システムモデル

本研究で提案するシステムモデルについて説明する。図1にシステムモデルを示す。

利用者 n が送る $\log_2 M$ ビットのデータを10進数にした値を PPM シンボル S_p^n ($S_p^n \in \{0, \dots, M-1\}$) とする。光 PPM 符号器では M スロットのうち S_p^n 番目のスロットにパルスを出力する。よって利用者 $n \in \{1, \dots, N\}$ の PPM 符号器の出力 $b^n(t)$ は、

$$b^n(t) = \mathfrak{R}_{T_s}(t - S_p^n T_s) \quad (0 \leq t \leq T = MT_s) \quad (1)$$

となる。ここで T_s は1スロット時間、 T は1PPM フレーム時間、 $\mathfrak{R}_{T_s}(\cdot)$ は持続時間 T_s の方形波で

$$\mathfrak{R}_{T_s}(t) = \begin{cases} 1; & 0 < t < T_s \\ 0; & \text{otherwise} \end{cases}$$

また、送信、受信者数はともに N とする。

各利用者は、それぞれに割り当てられた0, 1のパルスからなる signature シーケンスを有する。signature シーケンスには1シーケンス長が F 、1シーケンス内のパルス数が ν 、オフピーク自己相関値の最大値が1、相互相関値の最大値が1である $(F, \nu, 1, 1)$ Optical Orthogonal Code (OOC) [1], [7] を用いる。幅 T_s/F

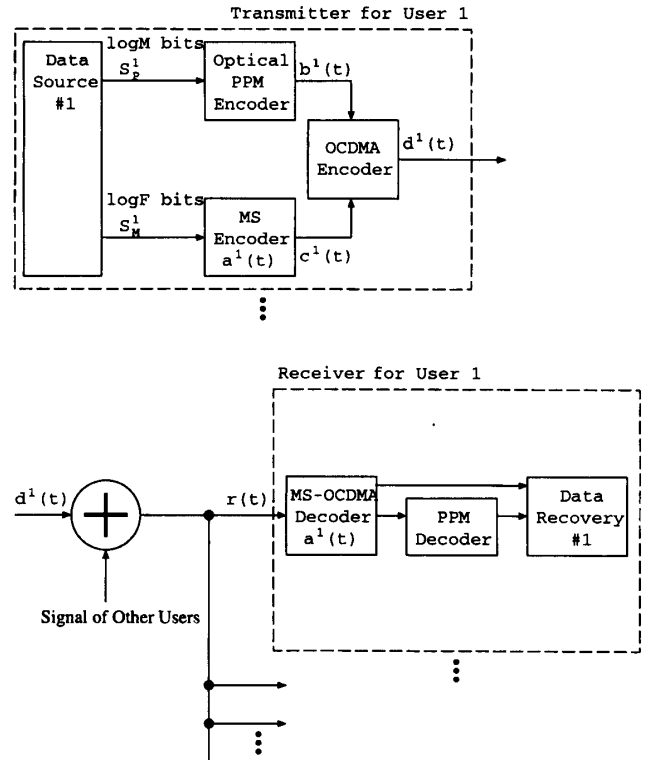


図1 提案システムモデル
Fig. 1 System model.

のパルスで T_s ごとに signature シーケンスを繰り返すパルス列を $a^n(t)$ とすると、MS 符号器は、 $a^n(t)$ を $\log_2 F$ ビットのデータを10進数にした値 S_M^n (MS シンボル, $S_M^n \in \{0, \dots, F-1\}$) だけシフトさせる。よって利用者 n の MS 符号器の出力 $c^n(t)$ は、

$$c^n(t) = a^n(t - S_M^n T_c) \quad (0 \leq t \leq T = MT_s = MFT_c) \quad (2)$$

となる。ここで、 T_c は1チップ時間である。そして OCDMA 符号器において、 $b^n(t)$ と $c^n(t)$ とが乗算され、利用者 n の送信器は、レーザ出力 $d^n(t)$

$$d^n(t) = \lambda_s b^n(t) \cdot c^n(t) \quad (0 \leq t \leq T) \quad (3)$$

を送信する。ここで、 λ_s はレーザの光電力である。以上より、本システムでは PPM1 フレーム時間 T 、1シーケンスパルスで $\log_2 MF$ ビットのデータを送信できる。また、各利用者間では PPM フレーム同期が確立され、各利用者の遅延はないものとする。

以降、利用者1について説明し、 $a^1(t)$ などは $a(t)$ のように1を省略する。受信器は、各利用者の信号が混在した信号 $r(t)$ を受信し、希望とする信号からデー

論文/多ビット送信シーケンスを用いた PPM 光 CDMA システムの特性解析

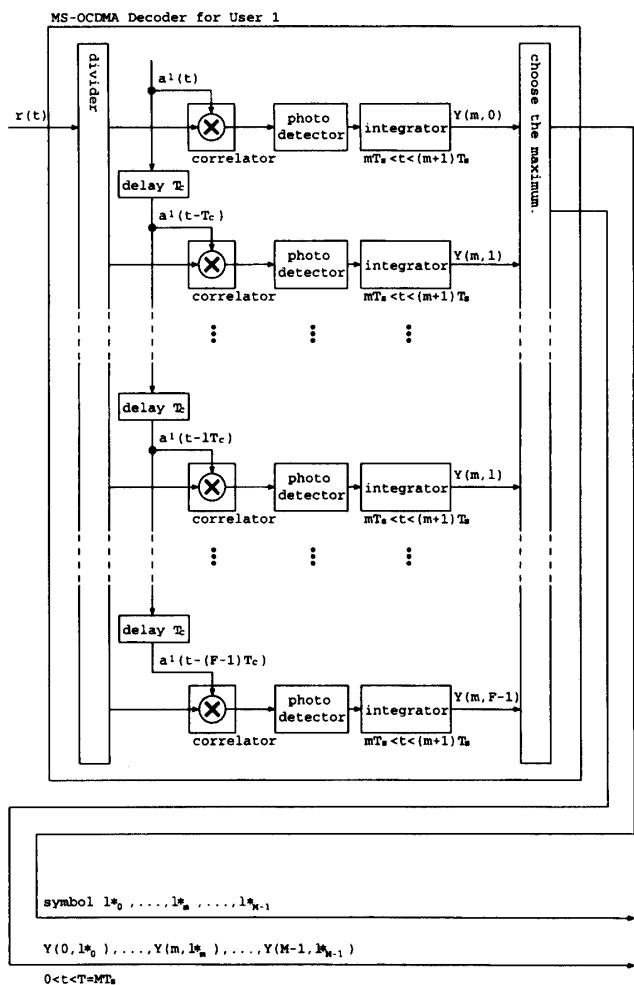


図2 MS復号器のブロック図
Fig. 2 A block diagram of MS-OCDMA decoder.

データを復号する。ここで、 $r(t)$ は

$$r(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N d^n(t) \quad (4)$$

となる。図2に示すように、MS復号器では、まず受信信号が F 分割され F 個の相関器に入力される。スロット $m \in \{0, \dots, M-1\}$ における、受信信号 $r(t)$ とシフト数 $l \in \{0, \dots, F-1\}$ の signature シーケンス $a(t-lT_c)$ との相関値 $Y(m, l)$ が、 F 個の相関器とその後段の Photo Detector (PD) で求められる。相関値 $Y(m, l)$ は

$$Y(m, l) = \int_{mT_s}^{(m+1)T_s} PD(r(t) \cdot a(t-lT_c)/F) dt \quad (5)$$

となる。ここで、 $PD(x)$ は PD への入射光の光電力

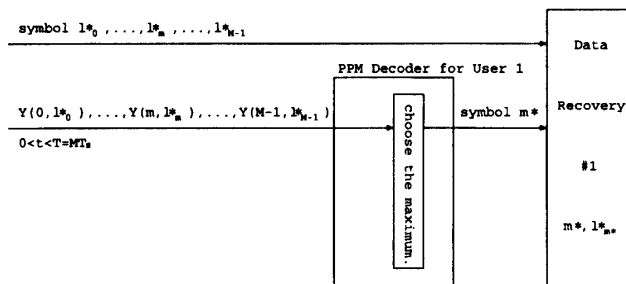


図3 PPM復号器のブロック図
Fig. 3 A block diagram of PPM decoder.

が $x(t)$ のときの PD の出力である。次に、スロット m における F 個の相関値 $Y(m, l)$ のなかから最大値 $Y(m, l*_m)$ を求め、それを PPM 復号器に出力する。

図3に示すように、PPM復号器では、MS復号器で得られた M 個の最大値 $Y(m, l*_m)$ のなかから更に最大値 $Y(m*, l*_m*)$ を求める。このときの $m*$ が PPM シンボル、 $l*_m*$ が MS シンボルとして復号される。すなわち、 $M \times F$ 種類の PPM シンボルと MS シンボルの組合せのなかから最も相関値の大きい組合せ $(m*, l*_m*)$ を復号する。 $m* = S_P$ かつ $l*_m* = S_M$ ならば、 $\log_2 MF$ ビットのデータが正しく復号される。

上述のように本システムにおいては、受信信号は F 分割され F 個の相関器に入力される。したがって、受信信号レベルが十分大きくないときには、各相関器に入力される信号が小さくなり、システムの特性が劣化する可能性がある。本研究では、受信信号レベルは十分大きいものとする。したがって、信号の劣化要因は、他利用者の干渉信号のみを考慮し、相関器の後段の PD におけるポアソンショットノイズ等は無視できるものとする。

3. ビット誤り率の解析

ポアソンショットノイズは考えないので、相関値 $Y(m, l)$ は時刻 mT_s から $(m+1)T_s$ の間の PD への入射光の光電力量 $\int_{mT_s}^{(m+1)T_s} (r(t) \cdot a(t-lT_c)/F) dt$ に比例する。簡単のため比例定数を F とすると、

$$Y(m, l) = \begin{cases} \lambda_s T_c \nu + \lambda_s T_c \alpha(m, l); & m = S_P, l = S_M \\ \lambda_s T_c \alpha(m, l); & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

となる。ここで、 $\lambda_s T_c \nu$ は受信信号 $r(t)$ の希望信号

成分, $\lambda_s T_c \alpha(m, l)$ は干渉信号成分である [6]. また $\alpha(m, l)$ は, スロット m において干渉信号 $u(t)$ と $a(t - lT_c)$ の相関に表れる干渉パルス数である. ただし, $m = S_P$ かつ $l = S_M$ 以外のときは, 希望信号も干渉信号とみなす. よって $u(t)$ は,

$$u(t) = \begin{cases} \sum_{n=2}^N d^n(t); & m = S_P, l = S_M \\ \sum_{n=1}^N d^n(t); & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

となる.

復号された MS シンボルが正しいという事象を A , 復号された PPM シンボルが正しいという事象を B とすると, 復号誤りは $P(\bar{A}B)$, $P(A\bar{B})$, $P(\bar{A}\bar{B})$ の 3 通りが考えられる. 以降の解析では, この三つの確率を求め, そこからビット誤り率を得る. $P(\bar{A}B)$, $P(A\bar{B})$, $P(\bar{A}\bar{B})$ はそれぞれ

$$P(\bar{A}B) = P(\bar{A}|B) \cdot P(B) \quad (8)$$

$$P(A\bar{B}) = P(A|\bar{B}) \cdot P(\bar{B}) \quad (9)$$

$$P(\bar{A}\bar{B}) = P(\bar{A}|\bar{B}) \cdot P(\bar{B}) \quad (10)$$

の関係がある.

まず MS シンボルについての確率 $P(\bar{A}|B)$, $P(A|\bar{B})$, $P(\bar{A}|\bar{B})$ を求める. まず $P(\bar{A}|B)$ を求める. いま, MS シンボル S_M を i とすると, $Y(S_P, i)$ が $Y(S_P, j (\neq i))$ より大きいときは i が MS シンボルとして選ばれ, $Y(S_P, i) = Y(S_P, j (\neq i))$ となる j があるときはランダムに選ばれる. よって, 復号された PPM シンボルが正しいという条件下で, 復号された MS シンボルが正しい確率 $P(A|B)$ の下限は,

$$\begin{aligned} P(A|B) &\geq \sum_{i=0}^{F-1} P(Y(S_P, i) > Y(S_P, j (\neq i)) | S_M = i) \\ &\quad \times P(S_M = i) \\ &= P(Y(S_P, 0) > Y(S_P, j (\neq 0)) | S_M = 0) \\ &= \sum_{\alpha(S_P, 0)=0}^{N-1} \sum_{\alpha(S_P, 1)=0}^N \cdots \sum_{\alpha(S_P, F-1)=0}^N \\ &\quad P(Y(S_P, 0) > Y(S_P, j (\neq 0)) | S_M = 0, \vec{\alpha}) \\ &\quad \times P(\vec{\alpha} | S_M = 0) \end{aligned} \quad (11)$$

となる. ここで, $\vec{\alpha}$ は $\vec{\alpha} = (\alpha(S_P, 0), \dots, \alpha(S_P, l), \dots, \alpha(S_P, F-1))$ となるベクトルである.

$$\begin{aligned} P(Y(S_P, 0) > Y(S_P, j (\neq 0)) | S_M = 0, \vec{\alpha}) \\ = \begin{cases} 1; & \nu + \alpha(S_P, 0) > \alpha(S_P, j (\neq 0)) \\ 0; & \nu + \alpha(S_P, 0) \leq \alpha(S_P, j (\neq 0)) \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

となる. 以上より $P(A|B)$ の下限が求められるが, 式 (11) から, 膨大な計算量になることがわかる. よって計算を簡単にするため, $P(\bar{A}|B)$ の上限を union bound を用いて求める. 式 (11) より

$$\begin{aligned} P(\bar{A}|B) &\leq 1 - P(Y(S_P, 0) > Y(S_P, j (\neq 0)) | S_M = 0) \\ &\leq \sum_{j=1}^{F-1} P(Y(S_P, j) \geq Y(S_P, 0) | S_M = 0) \\ &= (F-1) P(Y(S_P, 1) \geq Y(S_P, 0) | S_M = 0) \\ &= (F-1) \sum_{\alpha(S_P, 0)=0}^{N-1} \sum_{\alpha(S_P, 1)=0}^N \\ &\quad P(Y(S_P, 1) \geq Y(S_P, 0) \\ &\quad | S_M = 0, \alpha(S_P, 0), \alpha(S_P, 1)) \\ &\quad \times P(\alpha(S_P, 0), \alpha(S_P, 1) | S_M = 0) \end{aligned} \quad (13)$$

式 (13) において

$$\begin{aligned} P(Y(S_P, 1) \geq Y(S_P, 0) \\ | S_M = 0, \alpha(S_P, 0), \alpha(S_P, 1)) \\ = \begin{cases} 1; & \alpha(S_P, 1) \geq \nu + \alpha(S_P, 0) \\ 0; & \alpha(S_P, 1) < \nu + \alpha(S_P, 0) \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

となる. なお, 式 (13) における $P(\alpha(S_P, 0), \alpha(S_P, 1) | S_M = 0)$ の計算は付録 1. で示す.

次に $P(A|\bar{B})$, $P(\bar{A}|\bar{B})$ を求める. 復号された PPM シンボルが誤っているとき, そのシンボルが示すスロット位置には希望信号がない. よって, 誤ったスロット位置で正しい MS シンボルが復号される確率 $P(A|\bar{B})$ は $1/F$, 誤った MS シンボルが復号される確率 $P(\bar{A}|\bar{B})$ は $(F-1)/F$ となる.

次に, PPM シンボルについての確率 $P(\bar{B})$, $P(B)$ を求める. まず $P(\bar{B})$ を求める. スロット S_P における相関値の最大値 $Y(S_P, l^*_{S_P})$ は少なくとも $Y(S_P, S_M)$ である. そこで, $Y(S_P, l^*_{S_P}) = Y(S_P, S_M)$ と仮定

し、 $P(B)$ の下限、 $P(\bar{B}) (= 1 - P(B))$ の上限を求め
る。いま、PPM シンボル S_P が u であるとする、
 $Y(u, S_M)$ が $Y(v (\neq u), l_{*v})$ より大きいときは u が
PPM シンボルとして選ばれ、 $Y(u, S_M) = Y(v, l_{*v})$
となる v があるときは、ランダムに選ばれる。よっ
て、復号された PPM シンボルが正しい確率 $P(B)$ の
下限は、

$$\begin{aligned}
 P(B) &\geq \sum_{u=0}^{M-1} P(Y(u, S_M) > Y(v (\neq u), l_{*v}) | S_P = u) \\
 &\quad \times P(S_P = u) \\
 &= P(Y(0, S_M) > Y(v (\neq 0), l_{*v}) | S_P = 0) \\
 &= \sum_{\alpha(0, S_M)=0}^{N-1} \sum_{\alpha(1, l_{*1})=0}^{N-1-\alpha(0, S_M)} \cdots \\
 &\quad \sum_{\alpha(M-1, l_{*M-1})=0}^{N-1-\alpha(0, S_M) \cdots - \alpha(M-2, l_{*M-2})} \cdots \\
 &\quad P(Y(0, S_M) > Y(v (\neq 0), l_{*v}) | S_P = 0, \vec{\alpha}) \\
 &\quad \times P(\vec{\alpha} | S_P = 0) \quad (15)
 \end{aligned}$$

となる。ここで、 $\vec{\alpha}$ は $\vec{\alpha} = (\alpha(0, S_M), \alpha(1, l_{*1}), \dots, \alpha(m, l_{*m}), \dots, \alpha(M-1, l_{*M-1}))$ となるベクトルである。ここでも計算量が膨大になるので、union bound を用いて $P(\bar{B})$ の上限を求める。式 (15) より

$$\begin{aligned}
 P(\bar{B}) &\leq 1 - P(Y(0, S_M) > Y(v (\neq 0), l_{*v}) | S_P = 0) \\
 &\leq \sum_{v=1}^{M-1} P(Y(v, l_{*v}) \geq Y(0, S_M) | S_P = 0) \\
 &= (M-1) P(Y(1, l_{*1}) \geq Y(0, S_M) | S_P = 0) \\
 &= (M-1) \sum_{\alpha(0, S_M)=0}^{N-1} \sum_{\alpha(1, l_{*1})=0}^{N-1-\alpha(0, S_M)} \\
 &\quad P(Y(1, l_{*1}) \geq Y(0, S_M) | S_P = 0, \alpha(0, S_M), \alpha(1, l_{*1})) \\
 &\quad \times P(\alpha(0, S_M), \alpha(1, l_{*1}) | S_P = 0) \quad (16)
 \end{aligned}$$

式 (16) において

$$\begin{aligned}
 &P(Y(1, l_{*1}) \geq Y(0, S_M) \\
 &\quad | S_P = 0, \alpha(0, S_M), \alpha(1, l_{*1}))
 \end{aligned}$$

$$= \begin{cases} 1; & \alpha(1, l_{*1}) \geq \nu + \alpha(0, S_M) \\ 0; & \alpha(1, l_{*1}) < \nu + \alpha(0, S_M) \end{cases} \quad (17)$$

となる。なお、式 (16) における $P(\alpha(0, S_M), \alpha(1, l_{*1}) | S_P = 0)$ の計算は付録 2. で示す。

次に $P(B)$ の上限を求める。

$$\begin{aligned}
 P(B) &\leq \sum_{u=0}^{M-1} P(Y(u, 0) \geq Y(v (\neq u), l_{*v}) \\
 &\quad \cup Y(u, 1) \geq Y(v (\neq u), l_{*v}) \cup \\
 &\quad \cdots \cup Y(u, S_M) \geq Y(v (\neq u), l_{*v}) \cup \\
 &\quad \cdots \cup Y(u, F-1) \geq Y(v (\neq u), l_{*v}) \\
 &\quad | S_P = u) \\
 &\quad \times P(S_P = u) \\
 &= P(Y(0, 0) \geq Y(v (\neq 0), l_{*v}) \\
 &\quad \cup Y(0, 1) \geq Y(v (\neq 0), l_{*v}) \cup \\
 &\quad \cdots \cup Y(0, S_M) \geq Y(v (\neq 0), l_{*v}) \cup \\
 &\quad \cdots \cup Y(0, F-1) \geq Y(v (\neq 0), l_{*v}) \\
 &\quad | S_P = 0) \quad (18)
 \end{aligned}$$

ここで、union bound を用いると、

$$\begin{aligned}
 P(B) &\leq \sum_{j=0}^{F-1} P(Y(0, j) \geq Y(v (\neq 0), l_{*v}) | S_P = 0) \\
 &= P(Y(0, S_M) \geq Y(v (\neq 0), l_{*v}) | S_P = 0) \\
 &\quad + \sum_{j=0}^{S_M-1} P(Y(0, j) \geq Y(v (\neq 0), l_{*v}) | S_P = 0) \\
 &\quad + \sum_{j=S_M+1}^{F-1} P(Y(0, j) \geq Y(v (\neq 0), l_{*v}) \\
 &\quad | S_P = 0) \\
 &= P(Y(0, S_M) \geq Y(v (\neq 0), l_{*v}) | S_P = 0) \\
 &\quad + (F-1) P(Y(0, 0) \geq Y(v (\neq 0), l_{*v}) \\
 &\quad | S_P = 0, S_M \neq 0) \quad (19)
 \end{aligned}$$

ここで、union bound を用いて $P(Y(0, S_M) \geq Y(v (\neq 0), l_{*v}) | S_P = 0)$, $P(Y(0, 0) \geq Y(v (\neq 0), l_{*v}) | S_P = 0, S_M \neq 0)$ の上限を求めるが、計算は付録 3. で示す。

\overline{AB} , $A\overline{B}$, $\overline{A}\overline{B}$ によるビット誤り率をそれぞれ P_{b_1} , P_{b_2} , P_{b_3} とする. Q 値シンボルのシンボル誤り率が P_{se} のとき, ビット誤り率 BER は

$$BER = \frac{Q/2}{Q-1} P_{se} \quad (20)$$

となる [6]. \overline{AB} では $\log_2 MF$ ビット中 $\log_2 F$ ビットのなかに誤りがあるため,

$$P_{b_1} = \frac{\log_2 F}{\log_2 MF} \cdot \frac{F/2}{F-1} P(\overline{AB}) \quad (21)$$

となる. 同様に,

$$P_{b_2} = \frac{\log_2 M}{\log_2 MF} \cdot \frac{M/2}{M-1} P(A\overline{B}) \quad (22)$$

$$P_{b_3} = \frac{1}{\log_2 MF} \times \left((\log_2 M) \frac{M/2}{M-1} + (\log_2 F) \frac{F/2}{F-1} \right) \times P(\overline{A}\overline{B}) \quad (23)$$

となる. よってビット誤り率 BER は

$$BER = P_{b_1} + P_{b_2} + P_{b_3} \quad (24)$$

となる.

4. 解析結果

本章では, 前章で得られたビット誤り率 BER の理論式を用いて, 提案法 (MS/PPM) と従来法 (OOK, MS) とを比較する. OOK システムについては誤り率の厳密値を求め, MS/PPM システムについては提案法と全く同様に union bound を用いて誤り率の上限を求めた.

N , F , ν の間の次の関係が満たされなければならない [1].

$$F \geq N\nu(\nu - 1) + 1 \quad (25)$$

また, MS/PPM, OOK, MS のスループット (単位は bits/chip) はそれぞれ

$$\text{MS/PPM} : R_{\text{MS/PPM}} = \frac{\log_2 MF}{MF} \quad (26)$$

$$\text{OOK} : R_{\text{OOK}} = \frac{1}{F} \quad (27)$$

$$\text{MS} : R_{\text{MS}} = \frac{\log_2 F}{F} \quad (28)$$

である.

まず OOK システムと比較する. 両者のスループットをできるだけ等しくして比較するため, OOK システムの signature シーケンス長を $F = 1024$ とし, MS/PPM システムの signature シーケンス長, PPM スロット数がそれぞれ $F = 1024$, $M = 8$ の場合 (Case 1) と, それぞれ $F = 2048$, $M = 4$ の場合 (Case 2) を取り上げ比較する. このとき $R_{\text{MS/PPM}} \simeq 1.59 \times 10^{-3}$, $R_{\text{OOK}} \simeq 9.77 \times 10^{-4}$ であり, $R_{\text{MS/PPM}}/R_{\text{OOK}} > 1$ となる. 同じシステムではスループットが大きいほどビット誤り率が悪くなるので, この設定は提案法 (MS/PPM) にとって不利な設定である. signature シーケンスの重み ν は大きいほうが一般にビット誤り率が良いので, できるだけ大きくする. そこで, 最大 20 人の利用者が利用するものとして, 式 (25) より, OOK と MS/PPM の Case 1 については $\nu = 7$ に, MS/PPM の Case 2 については $\nu = 10$ とする. 以上の設定で, $N = 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20$ のときの誤り率を比較する. 誤り率特性を図 4 に示す. なお, このとき提案法 (MS/PPM) の場合, 100 Mbits/s を得るには chip 幅は約 15.9 ps/chip, 10 Mbits/s を得るには約 159 ps/chip となる. 同様に, OOK システムについて $F = 2048$, $\nu = 10$, MS/PPM システムについて $F = 2048$, $M = 8$, $\nu = 10$ (Case 3) 及び $F = 4096$, $M = 4$, $\nu = 14$ (Case 4) とした場合の誤り率特性を図 5 に示す. このとき $R_{\text{MS/PPM}} \simeq 8.54 \times 10^{-4}$, $R_{\text{OOK}} \simeq 4.88 \times 10^{-4}$ であり, $R_{\text{MS/PPM}}/R_{\text{OOK}} > 1$ となる. なお, このとき提案法 (MS/PPM) の場合, 100 Mbits/s を得る

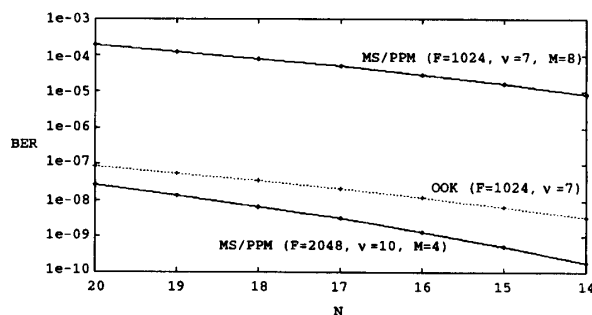


図 4 N - BER 特性 ($F = 1024$, $\nu = 7$, $M = 8$ (MS/PPM Case 1), $F = 2048$, $\nu = 10$, $M = 4$ (MS/PPM Case 2), $F = 1024$, $\nu = 7$ (OOK))

Fig. 4 N - BER characteristics ($F = 1024$, $\nu = 7$, $M = 8$ (MS/PPM Case 1), $F = 2048$, $\nu = 10$, $M = 4$ (MS/PPM Case 2), $F = 1024$, $\nu = 7$ (OOK)).

論文/多ビット送信シーケンスを用いた PPM 光 CDMA システムの特性解析

には chip 幅は約 8.54 ps/chip, 10 Mbps/s を得るには約 85.4 ps/chip となる. 図 4, 図 5 より, 提案法 (MS/PPM システム) は同一のスループットでは, PPM スロット数 M を小さくし signature シーケンス長 F を大きくすると誤り率が向上し, OOK システムの誤り率より良くなることわかる. このことは以下のように考察される. F 値を大きくすると, MS/PPM システム, OOK システムとも, 干渉が減り, 更に signature シーケンスの重み ν を増やすことができるので, 誤り率は良くなる. MS/PPM システムでは, M 値を大きくすると, やはり干渉が減ることにより誤り率は良くなる. MS/PPM システムにおいて F 値を大きくすること M 値を大きくすること各々の, 誤り率向上への寄与の程度は, 前者のほうが大きい.

次に MS システムと比較する. まず両システムを同一スループットのもとで比べる. 図 4 の場合に対しては, $F = 8192, \nu = 20$ で MS システムを構成すると MS/PPM システムと同一スループットとなり, 誤り率は $N = 20$ のとき $BER \approx 8.94 \times 10^{-24}$, $N \leq 19$ のとき $BER = 0$ となる. したがって, MS システムは, 同じ程度のスループットでは, OOK システムや提案法 (MS/PPM システム) よりも優れた誤り率特性をもつことがわかる. 次に受信器の簡単さを考慮した比較を行う. MS システムや MS/PPM システムでは

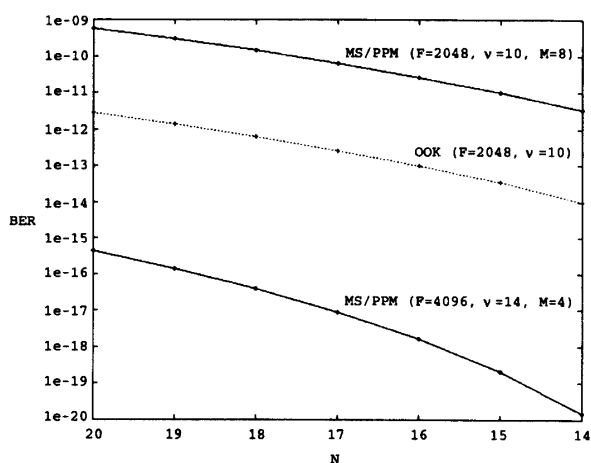


図 5 N -BER 特性 ($F = 2048, \nu = 10, M = 8$ (MS/PPM Case 3), $F = 4096, \nu = 14, M = 4$ (MS/PPM Case 4), $F = 2048, \nu = 10$ (OOK))

Fig. 5 N -BER characteristics ($F = 2048, \nu = 10, M = 8$ (MS/PPM Case 3), $F = 4096, \nu = 14, M = 4$ (MS/PPM Case 4), $F = 2048, \nu = 10$ (OOK)).

F 値と同じ個数の相関器が必要である. OOK, MS, MS/PPM のいずれのシステムとも, 受信器を簡単にするには, F 値を小さくしてスループットを高くし, 誤り率を悪くすることが必要になる. そこで, 同程度の受信器の簡単さでの比較, すなわち F 値を等しく設定して MS/PPM システムと MS システムの誤り率の比較を行う. OOK システムとの比較 (図 4, 図 5) と同様に ν はできるだけ大きくする. 図 4 の Case 2 に対しては, MS システムのパラメータは $F = 2048, \nu = 10$ とする. 誤り率特性を図 6 に示す. 同様に図 5 の Case 4 に対しては, MS システムのパラメータは $F = 4096, \nu = 14$ とする. 誤り率特性を図 7 に示す. 図 6, 図 7 より, 同程度の受信器の簡単さでは, 提案法 (MS/PPM システム) は MS システムよりも優れ

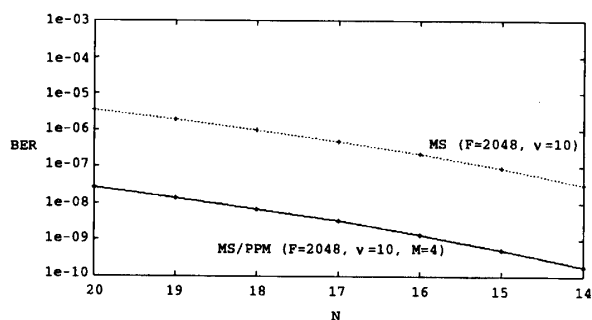


図 6 N -BER 特性 ($F = 2048, \nu = 10, M = 4$ (MS/PPM Case 2), $F = 2048, \nu = 10$ (MS))

Fig. 6 N -BER characteristics ($F = 2048, \nu = 10, M = 4$ (MS/PPM Case 2), $F = 2048, \nu = 10$ (MS)).

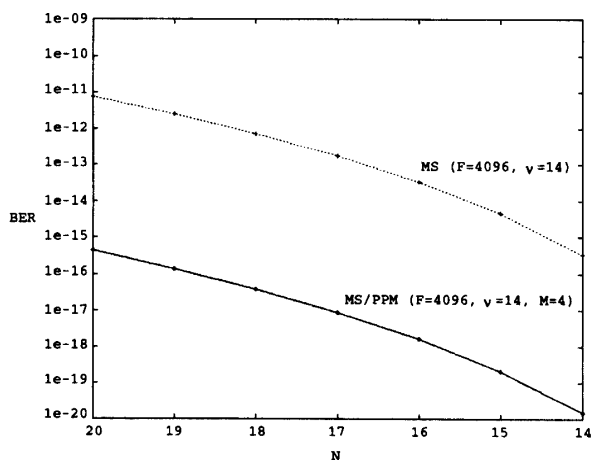


図 7 N -BER 特性 ($F = 4096, \nu = 14, M = 4$ (MS/PPM Case 4), $F = 4096, \nu = 14$ (MS))

Fig. 7 N -BER characteristics ($F = 4096, \nu = 14, M = 4$ (MS/PPM Case 4), $F = 4096, \nu = 14$ (MS)).

た誤り率特性をもつことがわかる。これは、MS/PPM システムは 1 利用者当り M スロット中 1 スロット だけパルスを出力するので、等しい F 値においては、MS システムに比べ他利用者の干渉が少ないためであると考えられる。なお、OOK システムは F 値によらず 1 個の相関器があればよいので、同程度の誤り率を更に簡単な受信器で実現できる。

以上の結果をまとめると次のことがわかる。受信器をできるだけ簡単にしたいという要求がない場合は、OOK システムより MS/PPM システムのほうが、MS/PPM システムより MS システムのほうが、良い誤り率あるいは高いスループットを実現できる。しかしながら、受信器はできるだけ簡単なものにしたという場合は、MS システムより MS/PPM システムのほうが、MS/PPM システムより OOK システムのほうが、より簡単な受信器で同程度の誤り率を得られるという特徴が生じる。したがって、誤り率とスループットの要求水準によって、OOK システム、MS/PPM システム、MS システムの三者から選択すればよい。

なお、提案システムにおいては、受信信号は F 分割されるので、2. で述べたように、受信信号レベルが十分大きくないときには、雑音の影響が大きくなることが考えられる。雑音を考慮すると、一例として APD を用いた直接検波光 CDMA システム [8] においては、受光電力 -20 dBm 程度でビット誤り率 10^{-9} が得られる。提案システムにおいては、例えば $F = 1024$ の場合、 F 分割による信号の減衰がロスを含め 35 dB 程度見込まれるので、各利用者の受信端における所要光受信電力は 15 dBm となる。しかしながら、例えば受信機で EDFA を用いて 30 dB 程度増幅することにより、所要光受信電力は -15 dBm となる。また、この場合システムの主要な劣化要因は他利用者の干渉であるといえる。

5. むすび

本研究では、多ビット送信シーケンスを用いた PPM 光 CDMA システムを提案し、その特性解析を行った。解析の条件として、signature シーケンスには $(F, \nu, 1, 1)$ Optical Orthogonal Code (OOC) を用い、各利用者間では PPM フレーム同期が確立されているものとし、信号の劣化要因は他利用者の干渉信号のみを考慮した。そしてビット誤り率の理論式を導出し、誤り率と各パラメータとの関係を求めた。提案法 (MS/PPM) と従来法 (OOK, MS) との特性比較の

結果、提案法は、OOK システムよりも良い誤り率あるいは高いスループットを実現でき、MS システムよりも簡単な受信器で同程度の誤り率を得られるので、誤り率とスループットの要求水準によっては、提案法は有効であることがわかった。

謝辞 本研究に関し有益な御助言を頂いた山梨大学工学部の埜雅典先生に深く感謝します。

文 献

- [1] J.A. Salehi, "Code division multiple-access techniques in optical fiber networks — part I: fundamental principles," IEEE Trans. Commun., vol.37, no.8, pp.824–833, Aug. 1989.
- [2] J.A. Salehi and C.A. Brackett, "Code division multiple-access techniques in optical fiber networks — part II: systems performance analysis," IEEE Trans. Commun., vol.37, no.8, pp.834–842, Aug. 1989.
- [3] J.H. Wu and J. Wu, "Synchronous fiber-optic CDMA using hard-limiter and BCH codes," IEEE J. Lightwave Technol., vol.13, no.6, pp.1169–1176, June 1995.
- [4] M.R. Dale and R.M. Gagliardi, "Channel coding for asynchronous fiberoptic CDMA communications," IEEE Trans. Commun., vol.43, no.9, pp.2485–2492, Sept. 1995.
- [5] H.M.H. 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.
- [6] H.M. Kwon, "Optical orthogonal code-division multiple-access system—part II: multibits/sequence-period OOCMA," IEEE Trans. Commun., vol.42, no.8, pp.2592–2599, Aug. 1994.
- [7] F. Chung and J. Salehi, "Optical orthogonal codes: Design, analysis and applications," IEEE Trans. Inform. Theory, vol.35, pp.595–604, May 1989.
- [8] T. Ohtsuki, "Channel interference cancellation using electrooptic switch and optical hardlimiters for direct-detection optical CDMA systems," IEEE J. Lightwave Technol., vol.16, no.4, pp.520–526, April 1998.

付 録

1. $P(\alpha(S_P, 0), \alpha(S_P, 1) | S_M = 0)$ の求め方
スロット m にレーザパルスを送信した他利用者数が κ_m のとき、

$$\begin{aligned}
 & P(\alpha(S_P, 0), \alpha(S_P, 1) | S_M = 0) \\
 &= \sum_{\kappa_{S_P}=0}^{N-1} P(\alpha(S_P, 0), \alpha(S_P, 1) | S_M = 0, \kappa_{S_P})
 \end{aligned}$$

$$\times P(\kappa_{SP}|S_M = 0) \quad (\text{A.1})$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} & P(\alpha(S_P, 0), \alpha(S_P, 1)|S_M = 0, \kappa_{SP}) \\ &= P(\alpha(S_P, 0)|S_M = 0, \kappa_{SP}) \\ & \quad \times P(\alpha(S_P, 1)|S_M = 0, \kappa_{SP}) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

また、

$$\begin{aligned} & P(\kappa_{SP}|S_M = 0) \\ &= \binom{N-1}{\kappa_{SP}} \left(\frac{1}{M}\right)^{\kappa_{SP}} \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{N-1-\kappa_{SP}} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} & P(\alpha(S_P, 0)|S_M = 0, \kappa_{SP}) \\ &= \binom{\kappa_{SP}}{\alpha(S_P, 0)} \left(\frac{\nu^2}{F}\right)^{\alpha(S_P, 0)} \left(1 - \frac{\nu^2}{F}\right)^{\kappa_{SP} - \alpha(S_P, 0)} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{aligned} & P(\alpha(S_P, 1)|S_M = 0, \kappa_{SP}) \\ &= \binom{\kappa_{SP}}{\alpha(S_P, 1)} \left(\frac{\nu^2}{F}\right)^{\alpha(S_P, 1)} \left(1 - \frac{\nu^2}{F}\right)^{\kappa_{SP} - \alpha(S_P, 1)} \\ & \quad \times \left(1 - \frac{\nu(\nu-1)}{F-1}\right) \\ & \quad + \binom{\kappa_{SP}}{\alpha(S_P, 1) - 1} \left(\frac{\nu^2}{F}\right)^{\alpha(S_P, 1) - 1} \\ & \quad \times \left(1 - \frac{\nu^2}{F}\right)^{\kappa_{SP} - \alpha(S_P, 1) + 1} \frac{\nu(\nu-1)}{F-1} \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

となる。

2. $P(\alpha(0, S_M), \alpha(1, l_{*1})|S_P = 0)$ の求め方

スロット m にレーザパルスを送信した他利用者数が κ_m のとき、

$$\begin{aligned} & P(\alpha(0, S_M), \alpha(1, l_{*1})|S_P = 0) \\ &= \sum_{\kappa_0=0}^{N-1} \sum_{\kappa_1=0}^{N-1-\kappa_0} \\ & \quad P(\alpha(0, S_M), \alpha(1, l_{*1})|S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1) \\ & \quad \times P(\kappa_0, \kappa_1|S_P = 0) \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} & P(\alpha(0, S_M), \alpha(1, l_{*1})|S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1) \\ &= P(\alpha(0, S_M)|S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1) \\ & \quad \times P(\alpha(1, l_{*1})|S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1) \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

また、

$$\begin{aligned} & P(\kappa_0, \kappa_1|S_P = 0) \\ &= \binom{N-1}{\kappa_0} \left(\frac{1}{M}\right)^{\kappa_0} \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{N-1-\kappa_0} \\ & \quad \times \binom{N-1-\kappa_0}{\kappa_1} \left(\frac{1}{M-1}\right)^{\kappa_1} \\ & \quad \times \left(1 - \frac{1}{M-1}\right)^{N-1-\kappa_0-\kappa_1} \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

となる。また、

$$\begin{aligned} & P(\alpha(0, S_M)|S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1) \\ &= \binom{\kappa_0}{\alpha(0, S_M)} \left(\frac{\nu^2}{F}\right)^{\alpha(0, S_M)} \\ & \quad \times \left(1 - \frac{\nu^2}{F}\right)^{\kappa_0 - \alpha(0, S_M)} \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

となる。ここで、 $\alpha(1, l_{*1})$ は $\alpha(1, l \in \{0, \dots, F-1\})$ の最大値である。 $\alpha(1, l_{*1})$ がある離散値 y ($0 \leq y \leq \kappa_1$) 以下である確率は、

$$\begin{aligned} & P(\alpha(1, l_{*1}) \leq y|S_P = 0, \kappa_1) \\ &= \prod_{l=0}^{F-1} \sum_{\alpha(1, l)=0}^y \\ & \quad \binom{\kappa_1}{\alpha(1, l)} \left(\frac{\nu^2}{F}\right)^{\alpha(1, l)} \left(1 - \frac{\nu^2}{F}\right)^{\kappa_1 - \alpha(1, l)} \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

となる。また、これより $S_P = 0, \kappa_1$ のときの $\alpha(1, l_{*1})$ の累積密度分布は、

$$\begin{aligned} & \text{Pcdf}(\alpha(1, l_{*1})) \\ &= \sum_{y=0}^{\kappa_1} (P(\alpha(1, l_{*1}) \leq y|S_P = 0, \kappa_1) \\ & \quad \times \delta(\alpha(1, l_{*1}) - y)) \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

よって、 $\alpha(1, l_{*1})$ の確率分布は式 (A.11) を $\alpha(1, l_{*1})$ に関して差分をとることにより得られる。ゆえに $P(\alpha(1, l_{*1})|S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1)$ は、

$$\begin{aligned} & P(\alpha(1, l_{*1})|S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1) \\ &= P(\alpha(1, l_{*1})|S_P = 0, \kappa_1) \\ &= \text{Pcdf}(\alpha(1, l_{*1})) - \text{Pcdf}(\alpha(1, l_{*1}) - 1) \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

となる。

3. $P(Y(0, S_M) \geq Y(v \neq 0, l^*_{*v}) | S_P = 0)$,
 $P(Y(0, 0) \geq Y(v \neq 0, l^*_{*v}) | S_P = 0, S_M \neq 0)$
 の上限の求め方

$$\begin{aligned}
 & P(Y(0, S_M) \geq Y(v \neq 0, l^*_{*v}) | S_P = 0) \\
 & \leq 1 - \sum_{v=1}^{M-1} P(Y(v, l^*_{*v}) > Y(0, S_M) | S_P = 0) \\
 & \quad + \sum_{v_1=1}^{M-2} \sum_{v_2=v_1+1}^{M-1} P(Y(v_1, l^*_{*v_1}) > Y(0, S_M) \\
 & \quad \cap Y(v_2, l^*_{*v_2}) > Y(0, S_M) | S_P = 0) \\
 & = 1 - (M-1)P(Y(1, l^*_{*1}) > Y(0, S_M) | S_P = 0) \\
 & \quad + \binom{M-1}{2} P(Y(1, l^*_{*1}) > Y(0, S_M) \\
 & \quad \cap Y(2, l^*_{*2}) > Y(0, S_M) | S_P = 0) \\
 & = 1 - (M-1) \sum_{\alpha(0, S_M)=0}^{N-1} \sum_{\alpha(1, l^*_{*1})=0}^{N-1-\alpha(0, S_M)} \\
 & \quad P(Y(1, l^*_{*1}) > Y(0, S_M) \\
 & \quad | S_P = 0, \alpha(0, S_M), \alpha(1, l^*_{*1})) \\
 & \quad \times P(\alpha(0, S_M), \alpha(1, l^*_{*1}) | S_P = 0) \\
 & \quad + \binom{M-1}{2} \\
 & \quad \times \sum_{\alpha(0, S_M)=0}^{N-1} \sum_{\alpha(1, l^*_{*1})=0}^{N-1-\alpha(0, S_M)} \sum_{\alpha(2, l^*_{*2})=0}^{N-1-\alpha(0, S_M)-\alpha(1, l^*_{*1})} \\
 & \quad P(Y(1, l^*_{*1}) > Y(0, S_M) \\
 & \quad \cap Y(2, l^*_{*2}) > Y(0, S_M) \\
 & \quad | S_P = 0, \alpha(0, S_M), \alpha(1, l^*_{*1}), \alpha(2, l^*_{*2})) \\
 & \quad \times P(\alpha(0, S_M), \alpha(1, l^*_{*1}), \alpha(2, l^*_{*2}) \\
 & \quad | S_P = 0) \tag{A.13} \\
 & P(Y(0, 0) \geq Y(v \neq 0, l^*_{*v}) | S_P = 0, S_M \neq 0) \\
 & \leq 1 - \sum_{v=1}^{M-1} P(Y(v, l^*_{*v}) > Y(0, 0) \\
 & \quad | S_P = 0, S_M \neq 0) \\
 & \quad + \sum_{v_1=1}^{M-2} \sum_{v_2=v_1+1}^{M-1} P(Y(v_1, l^*_{*v_1}) > Y(0, 0) \\
 & \quad \cap Y(v_2, l^*_{*v_2}) > Y(0, 0) | S_P = 0, S_M \neq 0) \\
 & = 1 - (M-1)P(Y(1, l^*_{*1}) > Y(0, 0) \\
 & \quad | S_P = 0, S_M \neq 0)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \binom{M-1}{2} P(Y(1, l^*_{*1}) > Y(0, 0) \\
 & \quad \cap Y(2, l^*_{*2}) > Y(0, 0) | S_P = 0, S_M \neq 0) \\
 & = 1 - (M-1) \sum_{\alpha(0,0)=0}^N \sum_{\alpha(1, l^*_{*1})=0}^{N-\alpha(0,0)} \\
 & \quad P(Y(1, l^*_{*1}) > Y(0, 0) \\
 & \quad | S_P = 0, S_M \neq 0, \alpha(0, 0), \alpha(1, l^*_{*1})) \\
 & \quad \times P(\alpha(0, 0), \alpha(1, l^*_{*1}) | S_P = 0, S_M \neq 0) \\
 & \quad + \binom{M-1}{2} \\
 & \quad \times \sum_{\alpha(0,0)=0}^N \sum_{\alpha(1, l^*_{*1})=0}^{N-\alpha(0,0)} \sum_{\alpha(2, l^*_{*2})=0}^{N-\alpha(0,0)-\alpha(1, l^*_{*1})} \\
 & \quad P(Y(1, l^*_{*1}) > Y(0, 0) \cap Y(2, l^*_{*2}) > Y(0, 0) \\
 & \quad | S_P = 0, S_M \neq 0, \alpha(0, 0), \alpha(1, l^*_{*1}), \alpha(2, l^*_{*2})) \\
 & \quad \times P(\alpha(0, 0), \alpha(1, l^*_{*1}), \alpha(2, l^*_{*2}) \\
 & \quad | S_P = 0, S_M \neq 0) \tag{A.14}
 \end{aligned}$$

式 (A.13) において

$$\begin{aligned}
 & P(Y(1, l^*_{*1}) > Y(0, S_M) \\
 & \quad | S_P = 0, \alpha(0, S_M), \alpha(1, l^*_{*1})) \\
 & = \begin{cases} 1; & \alpha(1, l^*_{*1}) > \nu + \alpha(0, S_M) \\ 0; & \alpha(1, l^*_{*1}) \leq \nu + \alpha(0, S_M) \end{cases} \\
 & \tag{A.15}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & P(Y(1, l^*_{*1}) > Y(0, S_M) \cap Y(2, l^*_{*2}) > Y(0, S_M) \\
 & \quad | S_P = 0, \alpha(0, S_M), \alpha(1, l^*_{*1}), \alpha(2, l^*_{*2})) \\
 & = \begin{cases} 1; & \alpha(1, l^*_{*1}) > \nu + \alpha(0, S_M) \text{ かつ} \\ & \alpha(2, l^*_{*2}) > \nu + \alpha(0, S_M) \\ 0; & \alpha(1, l^*_{*1}) \leq \nu + \alpha(0, S_M) \text{ または} \\ & \alpha(2, l^*_{*2}) \leq \nu + \alpha(0, S_M) \end{cases} \\
 & \tag{A.16}
 \end{aligned}$$

式 (A.14) において

$$\begin{aligned}
 & P(Y(1, l^*_{*1}) > Y(0, 0) \\
 & \quad | S_P = 0, S_M \neq 0, \alpha(0, 0), \alpha(1, l^*_{*1})) \\
 & = \begin{cases} 1; & \alpha(1, l^*_{*1}) > \alpha(0, 0) \\ 0; & \alpha(1, l^*_{*1}) \leq \alpha(0, 0) \end{cases} \\
 & \tag{A.17}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & P(Y(1, l_{*1}) > Y(0, 0) \cap Y(2, l_{*2}) > Y(0, 0)) \\
 & |S_P = 0, S_M \neq 0, \alpha(0, 0), \alpha(1, l_{*1}), \alpha(2, l_{*2}) \\
 & = \begin{cases} 1; & \alpha(1, l_{*1}) > \alpha(0, 0) \text{ かつ} \\ & \alpha(2, l_{*2}) > \alpha(0, 0) \\ 0; & \alpha(1, l_{*1}) \leq \alpha(0, 0) \text{ または} \\ & \alpha(2, l_{*2}) \leq \alpha(0, 0) \end{cases} \\
 & \hspace{15em} \times \left(1 - \frac{1}{M-2}\right)^{N-1-\kappa_0-\kappa_1-\kappa_2} \quad (\text{A}\cdot 21)
 \end{aligned}$$

となる。また付録 2. と同様に

$$\begin{aligned}
 & P(\alpha(0, S_M) | S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2) \\
 & = \binom{\kappa_0}{\alpha(0, S_M)} \left(\frac{\nu^2}{F}\right)^{\alpha(0, S_M)} \left(1 - \frac{\nu^2}{F}\right)^{\kappa_0 - \alpha(0, S_M)} \\
 & \hspace{15em} (\text{A}\cdot 22)
 \end{aligned}$$

となる。なお、式 (A-13) における $P(\alpha(0, S_M), \alpha(1, l_{*1}) | S_P = 0), P(\alpha(0, S_M), \alpha(1, l_{*1}), \alpha(2, l_{*2}) | S_P = 0)$, 式 (A-14) における $P(\alpha(0, 0), \alpha(1, l_{*1}) | S_P = 0, S_M \neq 0), P(\alpha(0, 0), \alpha(1, l_{*1}), \alpha(2, l_{*2}) | S_P = 0, S_M \neq 0)$ の計算はそれぞれ付録 2., 4.~6. で示す。

4. $P(\alpha(0, S_M), \alpha(1, l_{*1}), \alpha(2, l_{*2}) | S_P = 0)$ の求め方

スロット m にレーザパルスを送信した他利用者数が κ_m のとき、

$$\begin{aligned}
 & P(\alpha(0, S_M), \alpha(1, l_{*1}), \alpha(2, l_{*2}) | S_P = 0) \\
 & = \sum_{\kappa_0=0}^{N-1} \sum_{\kappa_1=0}^{N-1-\kappa_0} \sum_{\kappa_2=0}^{N-1-\kappa_0-\kappa_1} \\
 & P(\alpha(0, S_M), \alpha(1, l_{*1}), \alpha(2, l_{*2}) \\
 & | S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2) \\
 & \times P(\kappa_0, \kappa_1, \kappa_2 | S_P = 0) \quad (\text{A}\cdot 19)
 \end{aligned}$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned}
 & P(\alpha(0, S_M), \alpha(1, l_{*1}), \alpha(2, l_{*2}) | S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2) \\
 & = P(\alpha(0, S_M) | S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2) \\
 & \times P(\alpha(1, l_{*1}) | S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2) \\
 & \times P(\alpha(2, l_{*2}) | S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2) \quad (\text{A}\cdot 20)
 \end{aligned}$$

また、

$$\begin{aligned}
 & P(\kappa_0, \kappa_1, \kappa_2 | S_P = 0) \\
 & = \binom{N-1}{\kappa_0} \left(\frac{1}{M}\right)^{\kappa_0} \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{N-1-\kappa_0} \\
 & \times \binom{N-1-\kappa_0}{\kappa_1} \left(\frac{1}{M-1}\right)^{\kappa_1} \\
 & \times \left(1 - \frac{1}{M-1}\right)^{N-1-\kappa_0-\kappa_1} \\
 & \times \binom{N-1-\kappa_0-\kappa_1}{\kappa_2} \left(\frac{1}{M-2}\right)^{\kappa_2}
 \end{aligned}$$

となる。 $P(\alpha(1, l_{*1}) | S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2), P(\alpha(2, l_{*2}) | S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2)$ も付録 2. と同様に、

$$\begin{aligned}
 & P(\alpha(1, l_{*1}) | S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2) \\
 & = P(\alpha(1, l_{*1}) | S_P = 0, \kappa_1) \\
 & = \text{Pcdf}(\alpha(1, l_{*1})) - \text{Pcdf}(\alpha(1, l_{*1}) - 1) \\
 & \hspace{15em} (\text{A}\cdot 23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & P(\alpha(2, l_{*2}) | S_P = 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2) \\
 & = P(\alpha(2, l_{*2}) | S_P = 0, \kappa_2) \\
 & = \text{Pcdf}(\alpha(2, l_{*2})) - \text{Pcdf}(\alpha(2, l_{*2}) - 1) \\
 & \hspace{15em} (\text{A}\cdot 24)
 \end{aligned}$$

となる。

5. $P(\alpha(0, 0), \alpha(1, l_{*1}) | S_P = 0, S_M \neq 0)$ の求め方

スロット m にレーザパルスを送信した他利用者数が κ_m のとき、

$$\begin{aligned}
 & P(\alpha(0, 0), \alpha(1, l_{*1}) | S_P = 0, S_M \neq 0) \\
 & = \sum_{\kappa_0=0}^{N-1} \sum_{\kappa_1=0}^{N-1-\kappa_0} \\
 & P(\alpha(0, 0), \alpha(1, l_{*1}) | S_P = 0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1) \\
 & \times P(\kappa_0, \kappa_1 | S_P = 0, S_M \neq 0) \quad (\text{A}\cdot 25)
 \end{aligned}$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned}
 & P(\alpha(0, 0), \alpha(1, l_{*1}) | S_P = 0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1) \\
 & = P(\alpha(0, 0) | S_P = 0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1) \\
 & \times P(\alpha(1, l_{*1}) | S_P = 0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1) \\
 & \hspace{15em} (\text{A}\cdot 26)
 \end{aligned}$$

また付録 2. と同様に

$$\begin{aligned}
 & P(\kappa_0, \kappa_1 | S_P = 0, S_M \neq 0) \\
 & = \binom{N-1}{\kappa_0} \left(\frac{1}{M}\right)^{\kappa_0} \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{N-1-\kappa_0}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \binom{N-1-\kappa_0}{\kappa_1} \left(\frac{1}{M-1}\right)^{\kappa_1} \\ & \times \left(1 - \frac{1}{M-1}\right)^{N-1-\kappa_0-\kappa_1} \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot\text{27})$$

となる。また、

$$\begin{aligned} & P(\alpha(0,0)|S_P=0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1) \\ & = \binom{\kappa_0}{\alpha(0,0)} \left(\frac{\nu^2}{F}\right)^{\alpha(0,0)} \left(1 - \frac{\nu^2}{F}\right)^{\kappa_0-\alpha(0,0)} \\ & \times \left(1 - \frac{\nu(\nu-1)}{F-1}\right) \\ & + \binom{\kappa_0}{\alpha(0,0)-1} \left(\frac{\nu^2}{F}\right)^{\alpha(0,0)-1} \\ & \times \left(1 - \frac{\nu^2}{F}\right)^{\kappa_0-\alpha(0,0)+1} \frac{\nu(\nu-1)}{F-1} \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot\text{28})$$

となる。 $P(\alpha(1, l_{*1})|S_P=0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1)$ は付録 2. と同様に、

$$\begin{aligned} & P(\alpha(1, l_{*1})|S_P=0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1) \\ & = P(\alpha(1, l_{*1})|S_P=0, \kappa_1) \\ & = \text{Pcdf}(\alpha(1, l_{*1})) - \text{Pcdf}(\alpha(1, l_{*1}) - 1) \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot\text{29})$$

となる。

6. $P(\alpha(0,0), \alpha(1, l_{*1}), \alpha(2, l_{*2})|S_P=0, S_M \neq 0)$ の求め方

スロット m にレーザパルスを送信した他利用者数が κ_m のとき、

$$\begin{aligned} & P(\alpha(0,0), \alpha(1, l_{*1}), \alpha(2, l_{*2})|S_P=0, S_M \neq 0) \\ & = \sum_{\kappa_0=0}^{N-1} \sum_{\kappa_1=0}^{N-1-\kappa_0} \sum_{\kappa_2=0}^{N-1-\kappa_0-\kappa_1} \\ & P(\alpha(0,0), \alpha(1, l_{*1}), \alpha(2, l_{*2}) \\ & |S_P=0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2) \\ & \times P(\kappa_0, \kappa_1, \kappa_2|S_P=0, S_M \neq 0) \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot\text{30})$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} & P(\alpha(0,0), \alpha(1, l_{*1}), \alpha(2, l_{*2}) \\ & |S_P=0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2) \\ & = P(\alpha(0,0)|S_P=0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2) \\ & \times P(\alpha(1, l_{*1})|S_P=0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2) \\ & \times P(\alpha(2, l_{*2})|S_P=0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2) \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot\text{31})$$

また付録 4. と同様に

$$\begin{aligned} & P(\kappa_0, \kappa_1, \kappa_2|S_P=0, S_M \neq 0) \\ & = \binom{N-1}{\kappa_0} \left(\frac{1}{M}\right)^{\kappa_0} \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{N-1-\kappa_0} \\ & \times \binom{N-1-\kappa_0}{\kappa_1} \left(\frac{1}{M-1}\right)^{\kappa_1} \\ & \times \left(1 - \frac{1}{M-1}\right)^{N-1-\kappa_0-\kappa_1} \\ & \times \binom{N-1-\kappa_0-\kappa_1}{\kappa_2} \left(\frac{1}{M-2}\right)^{\kappa_2} \\ & \times \left(1 - \frac{1}{M-2}\right)^{N-1-\kappa_0-\kappa_1-\kappa_2} \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot\text{32})$$

となる。また付録 5. と同様に

$$\begin{aligned} & P(\alpha(0,0)|S_P=0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2) \\ & = \binom{\kappa_0}{\alpha(0,0)} \left(\frac{\nu^2}{F}\right)^{\alpha(0,0)} \left(1 - \frac{\nu^2}{F}\right)^{\kappa_0-\alpha(0,0)} \\ & \times \left(1 - \frac{\nu(\nu-1)}{F-1}\right) \\ & + \binom{\kappa_0}{\alpha(0,0)-1} \left(\frac{\nu^2}{F}\right)^{\alpha(0,0)-1} \\ & \times \left(1 - \frac{\nu^2}{F}\right)^{\kappa_0-\alpha(0,0)+1} \frac{\nu(\nu-1)}{F-1} \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot\text{33})$$

となる。 $P(\alpha(1, l_{*1})|S_P=0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2)$, $P(\alpha(2, l_{*2})|S_P=0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2)$ は付録 2. と同様に、

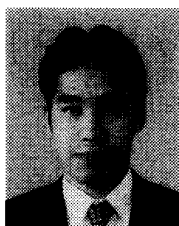
$$\begin{aligned} & P(\alpha(1, l_{*1})|S_P=0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2) \\ & = P(\alpha(1, l_{*1})|S_P=0, \kappa_1) \\ & = \text{Pcdf}(\alpha(1, l_{*1})) - \text{Pcdf}(\alpha(1, l_{*1}) - 1) \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot\text{34})$$

$$\begin{aligned} & P(\alpha(2, l_{*2})|S_P=0, S_M \neq 0, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2) \\ & = P(\alpha(2, l_{*2})|S_P=0, \kappa_2) \\ & = \text{Pcdf}(\alpha(2, l_{*2})) - \text{Pcdf}(\alpha(2, l_{*2}) - 1) \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot\text{35})$$

となる。

(平成 11 年 2 月 5 日受付, 5 月 17 日再受付)

論文/多ビット送信シーケンスを用いた PPM 光 CDMA システムの特性解析



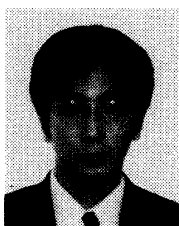
三好 徹哉 (学生員)

平8宇都宮大・工・情報卒。現在、同大大学院博士後期課程在学中。非線形回路解析、光 CDMA システムに関する研究に従事。第10回回路とシステム軽井沢ワークショップ奨励賞受賞。



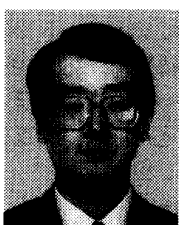
山田 芳文 (正員)

昭41東北大・工・電気卒。昭46同大大学院博士課程了。同年同大・工・助手。昭49北大・応用電気研・講師。昭54宇都宮大・工・助教授、平2同教授、現在に至る。医用データ処理、医用情報処理、新方式磁気共鳴映像法とその光学映像再構成等に関する研究に従事。工博。日本 ME 学会、計測自動制御学会、日本磁気共鳴医学会、IEEE、ISMRM 各会員。



西岡 隆

平9埼玉大・工・情報卒。同年青森電子計算センター入社。現在、青森市役所勤務。在学中、光 CDMA システムに関する研究に従事。



八嶋 弘幸 (正員)

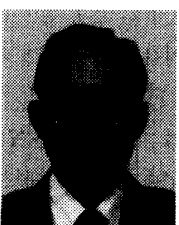
昭56慶大・工・電気卒。平2同大大学院博士課程了。同年埼玉大・工・助手、平3同助教授、現在に至る。平6カナダ・ビクトリア大客員研究員。工博。変復調、符号理論、光通信方式、衛星通信方式に関する研究に従事。平1年度 Society of Satellite

Professionals International, Scholarship Award 受賞。情報理論とその応用学会、IEEE 各会員。



稲葉 直彦 (正員)

昭59慶大・工・電気卒。平1同大大学院博士課程了。同年宇都宮大・工・助手、平6同助教授、現在に至る。工博。非線形回路解析、通信方式に関する研究に従事。第7回回路とシステム軽井沢ワークショップ奨励賞受賞。IEEE 会員。



鈴木 誠史 (正員)

昭30東工大・工・電気卒。同年郵政省電波研究所(現、通信総合研究所)入所。以来、音声情報処理、音声通信、通信システム等の研究に従事。工博。昭63通信総合研究所長。平1埼玉大・工・教授。平10・4月日本工大・教授。同年5月東洋通信機

中央研究所技術顧問。昭61前島賞受賞。