

# 背景光雑音を考慮した水中可視光通信路モデルにおける差動符号化OOK方式の誤り率性能

7314628 早乙女 充

## 1 まえがき

現在、可視光波長を用いた水中可視光通信が注目を集めている。この水中可視光通信は青色や緑色の波長を利用することで、音波通信 [1] に比べて、数 GBit/s もの通信速度を達成でき、また水質が良ければ理論的に数百メートルもの通信が可能である [2][3][4]。

水中可視光通信は分光減衰特性と背景光雑音の影響により、通信性能が大きく制限される。水中可視光通信では光キャリアは指数関数的に減衰する。この水中下の減衰  $c(C_C, \lambda)$  は送信波長に依存しており、吸収  $a(C_C, \lambda)$  と拡散  $b(C_C, \lambda)$  の和で表され、全て単位は  $[m^{-1}]$  である。吸収とは水分子や他の分子の相互作用により、光子のエネルギーが熱など他の状態に変化し、エネルギーが減少することである。拡散とは分子に光が衝突することで、光の進行方向が変わってしまうことである。これら二つの減衰をあわせた水中下の減衰は、水質が悪くなるほど大きくなり、水中に溶けている植物プランクトンの量を示すクロロフィル濃度  $C_C$  も大きくなる。反対に、水質が良いほど水中下の減衰は少なく、またクロロフィル濃度も小さくなる。水中下の減衰の割合を決定付ける水質は、Morel and Prieur model を利用し、四つに分類する。水質が良い順に、Pure sea, Clean ocean, Coastal, Harbor であり、それぞれクロロフィル濃度は 0.005, 0.31, 0.83, 5.9  $[mg/m^3]$  である。通信可能距離は Pure sea や Clean ocean で数百 m, Coastal や Harbor で数十 m 程度である [5]。

これらの減衰は水質が良い時には青色や緑色の波長帯が伝播しやすく、また水質が悪い時には赤色の波長帯が伝播しやすい、分光減衰特性がある。この特性に対応するため、プリアンプルを利用し水質に応じて最適な波長帯を選択し、水質に応じて適した波長帯で情報を送信した方式が提案されている [3]。[6] では、符号化率  $1/R$  の畳み込み符号を用いた光信号を青、赤、緑色を用いた複数色で表現し、誤り訂正が行われている。これら複数色 LED を利用したシステムのビット誤り率は単色 LED を利用したシステムのビット誤り率より性能が良いことが示されている。

これらの分光減衰特性に対応する方式の提案に加えて、伝送速度を改善するためには、可視光通信システムにおける外部環境を考慮する必要がある。背景光の影響を無視することはできない [7]。しかしながら、著者の知る限り、従来の水中可視光通信において現実的な背景光を考慮した水中可視光通信路モデルは検討されていない。

そこで本稿では、分光減衰特性に加えて、太陽光の解析を SPCTRAL2[8] のシミュレーションモデルを利用し、

水中下における太陽光の振る舞いを [7] を参考にし導出することで、深さ、時間に応じて入射する現実的な背景光雑音を導出する。

更に、背景光雑音を考慮した水中可視光通信路モデルを用いて、OOK, 差動符号化 OOK(DOOK) の誤り率性能について解析を行う。ここで DOOK システムは、自由空間中の可視光通信において、背景光の影響を減らすために提案された変調方式である [9]。この DOOK を提案モデルで評価することで、水中下における DOOK システムの有効性を確認する。

## 2 従来研究

### 2.1 水中通信路モデル

水中可視光通信のモデルを考えるにあたり、陸上における通信と異なったモデルが必要である。具体的には通信路が大きく異なり、三つのモデルを考慮する必要がある。具体的には、分光減衰特性、背景光雑音、水分子に光子が衝突することにより起こる、拡散を考慮したインパルス応答である。

分光減衰特性とは、光の減衰量が水質及び送信波長に依存することである。水質は、海中の植物プランクトンの濃度 (クロロフィル濃度) により、変化する。そのため、分光減衰特性により光の減衰量がクロロフィル濃度及び送信波長により変化する。したがって環境 (水質) により通信に適した波長が変化するのである。

背景光雑音とは、太陽光の影響による雑音である。水中通信は基本的に屋外で行われる通信であるため、無視できない環境条件である。

拡散を考慮したインパルス応答とは、送信された光子が水分子に衝突し、光子の進行方向が変わる、拡散により波形が広がる現象である。拡散により光の進む方向が変わることで、送信機から受信機に到達するまでの距離が変わる。この現象のため、同じ時間に放射された光子であろうとも受信機に入射するまでの時間が変わる。この原因により、波形が広がってしまうのである。

### 2.2 水中通信路に適した変復調の設計

水中可視光通信において、水中通信路に適した変復調の設計が必須である。従来の研究では、OOK(On-Off-Keying) や PPM(Pulse-Position-Modulation) といったシンプルな変調方式が主に利用されている。また分光減衰特性に対応するため、複数色を利用した変調方式も提案されている。

例えば、波長推定法というプリアンプルを利用した変調方式が提案されている [3]。プリアンプルにおいて青

色と赤色を同時に等しい電力で送信し、受信機でどちらの色の受信電力が大きいかを比較し、有利な波長で情報を送信する方式である。この方式により、水質に応じて最適な波長帯を選択し、水質に応じて適した波長帯で情報を送信されることが示されている。[6]では、送信機において符号化率  $1/R$  の畳み込み符号を用いた光信号を青、赤、緑色を用いた複色で表現し、受信機において誤り訂正を行う畳み込み符号化 OOK が提案されている。この方式により、三色を利用した通信を行うことで環境に対応しやすい結果が示されている。これら複色 LED を利用したシステムのビット誤り率は、単色 LED を利用したシステムの BER より性能が良いことが示されている。

以上のように、分光減衰特性へ対応した変調方式は提案されている。しかし、いずれの方式も背景光雑音を考慮した設計がなされていない。

### 3 背景光雑音を考慮した水中可視光通信路モデル

背景光雑音を考慮した水中可視光通信路モデルを実現するにあたり、分光減衰特性、背景光雑音、水分子に光子が衝突することにより起こる、拡散を考慮したインパルス応答をモデル化する必要があると述べた。しかし従来研究では先述のモデルは独立して考えられ、全ての要素を考慮したモデルは著者の知る限り存在しない。そこで本研究では、背景光雑音を考慮した水中可視光通信路のモデル化を行う。しかしながら、拡散を考慮したインパルス応答は ns オーダーであり、通信路により波形の歪みに影響はほとんどない [12]。そこで本研究ではモデル化にあたり、拡散を考慮したインパルス応答を無視し、分光減衰特性、背景光雑音を考慮する。

#### 3.1 分光減衰特性

本研究では通信路のモデル化にあたり、分光減衰特性、背景光雑音を考慮すると先述した。まず、分光減衰特性モデルについて説明する。

光が減衰する理由として、距離による減衰と消滅による減衰がある。分光減衰特性は、光の消滅により生じる。光の消滅は、水質に大きく影響を受ける。本稿では水分子による影響に加え、クロロフィルや有機物質の影響を考えている。式を導出するにあたり、Smith and Baker の式 [10] を基とし、値は [11] を参照している。

光の消滅が起こる原因として、吸収と拡散がある。まず、吸収のモデルについて説明する。

吸収のモデルは、水分子、クロロフィル、有機物質(フルボ酸とフミン酸)を考慮している。吸収の減衰係数  $a(C_C, \lambda)$  は、以下の式で表せる [10]。

$$\begin{aligned} a(C_C, \lambda) &= a_w(\lambda) + 0.06a_c^0(\lambda)(C_C)^{0.602} \\ &+ a_f^0 C_f \exp(-k_f \lambda) \\ &+ a_h^0 C_h \exp(-k_h \lambda) [\text{m}^{-1}] \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$  は波長、 $a_w(\lambda) [\text{m}^{-1}]$  は水分子による吸収減衰係数、 $a_c^0(\lambda) [\text{m}^{-1}]$  は葉緑体(クロロフィル)による

吸収減衰係数、 $C_C [\text{mg m}^{-3}]$  は単位体積あたりに含まれる植物プランクトンの量、すなわちクロロフィル濃度であり、 $a_f^0 = 35.959 [\text{m}^2/\text{mg}]$  はフルボ酸による吸収減衰係数、 $k_f = 0.0189 [\text{nm}^{-1}]$ 、 $a_h^0 = 18.828 [\text{m}^2/\text{mg}]$  はフミン酸による吸収減衰係数、 $k_h = 0.01105 [\text{nm}^{-1}]$ 、 $C_f$  はフルボ酸の濃度、 $C_h$  はフミン酸の濃度であり、以下の式で表せる。

$$C_f = 1.74098 C_C \exp(0.12327 C_C) [\text{mg m}^{-3}] \quad (2)$$

$$C_h = 0.19334 C_C \exp(0.12343 C_C) [\text{mg m}^{-3}] \quad (3)$$

パラメータの具体的な値を決めるにあたり、[11] の 677 ページを参照した。

次に、拡散のモデルについて説明する。

拡散のモデルは、水分子、大きい微粒子、小さい微粒子を考慮している。拡散の減衰係数  $b(C_C, \lambda)$  は、以下の式で表せる。

$$b(C_C, \lambda) = b_w(\lambda) + b_s^0(\lambda) C_s + b_l^0(\lambda) C_l [\text{m}^{-1}] \quad (4)$$

ここで、 $b_w(\lambda)$  は水分子による拡散減衰係数、 $b_s^0$  は小さい微粒子による拡散減衰係数、 $b_l^0$  は大きい微粒子による拡散減衰係数であり、いずれも波長に依存した以下の式で表せる。

$$b_w(\lambda) = 0.005826 \left( \frac{400(\text{nm})}{\lambda(\text{nm})} \right)^{4.322} [\text{m}^{-1}] \quad (5)$$

$$b_s^0(\lambda) = 1.151302 \left( \frac{400(\text{nm})}{\lambda(\text{nm})} \right)^{1.7} [\text{m}^2/\text{mg}] \quad (6)$$

$$b_l^0(\lambda) = 0.341074 \left( \frac{400(\text{nm})}{\lambda(\text{nm})} \right)^{0.3} [\text{m}^2/\text{mg}] \quad (7)$$

$C_s$  は小さい微粒子の濃度、 $C_l$  は大きい微粒子の濃度であり、以下の式で表せる。

$$C_s = 0.01739 C_C \exp(0.11631 C_C) [\text{mg m}^{-3}] \quad (8)$$

$$C_l = 0.76284 C_C \exp(0.03092 C_C) [\text{mg m}^{-3}] \quad (9)$$

パラメータの具体的な値を決めるにあたり、[11] の 677 ページを参照した。

以上、吸収減衰係数と拡散減衰係数を足したものが光の減衰係数となる。

$$c(C_C, \lambda) = a(C_C, \lambda) + b(C_C, \lambda) \quad (10)$$

また、Pure Sea, Clear Ocean, Coastal, Harbor, いずれの水質であろうとも上記の計算方法が適用できる。ただし、クロロフィル濃度の値がいずれも異なる。具体的には、[12] におけるクロロフィル濃度を利用した。このクロロフィル濃度の違いが水質の違いを生んでいる。

#### 3.2 背景光雑音

次に、太陽光の影響により生じる背景光雑音モデルについて説明する。

背景光雑音とは、太陽光によりもたらされる雑音のことである。一般的に太陽光の影響を無視することはできない。受信機に入射する背景光雑音(太陽光)は以下の計算式で表される [7]。

$$P_{sun} = \frac{E_{total} R A_d L_{fac} \exp(-K(\lambda)d)}{\pi} \quad (11)$$

ここで、 $P_{sun}$  は受信機に入射する太陽光の電力 [ $W/m^2$ ]、 $E_{total}$  [ $W/m^2 \text{ sr}$ ] は海水面に照射する太陽光の単位面積あたりの電力、 $R$  は太陽光の反射率、 $A_d$  は受信機の受光面積 [ $m^2$ ]、 $L_{fac}$  は受信機の向いている方向により決まる方向係数、 $K(\lambda)$  は水面と垂直に光が入射する時の減衰係数、 $d[m]$  は水深である。また、受信機では背景光によるサチュレーションを考慮していない。

水面に入射する太陽光の入射電力  $E_{total}$  は、太陽光のシミュレーションモデル SPCTRAL2[R.E.Bird,2003] を利用し求めた。この SPCTRAL2 は Bird[8] により開発されたモデルである。[8] は測定したい日、時間、場所(緯度、経度)を入力することで、地表に届く波長の入射輝度を求めるアルゴリズムである。受信機が受け取ることのできる太陽光  $E_{total}$  は以下の式で求める。

$$E_{total} = \int E(\lambda)d\lambda \quad (12)$$

$E(\lambda)$  はある波長における太陽光の入射輝度である。SPCTRAL2 を利用し波長ごとの太陽光  $E(\lambda)[W/m^2/nm]$  を求め、その中から受信機が受光可能な波長に関して積分を行うことで、太陽光の総和  $E_{total}[W/m^2]$  を算出するのである。SPCTRAL2 を利用して  $E(\lambda)$  を求めるにあたり、表 1 の示す場所、時間でシミュレーションを行った。

表 1 シミュレーション時間と場所

シミュレーション場所	Hawaii
シミュレーション場所の緯度	19°
シミュレーション場所の経度	155°
シミュレーションを行った日付	March 1

$R$  は水面に入射する太陽光のうち、水中に入射する太陽光の割合を示している。[7] を参照し、 $R$  の値を 1.25% と設定した。 $L_{fac}$  は受信機の向いている方向により太陽光の入射する量を求める係数である。このパラメータは [13] により測定された。受信機が上を向いている時(水面方向を向いている時、 $\theta = 0^\circ$  の  $L_{fac}$  を 1 とし、他の方向を向いている時の値を比で算出する。 $\theta = 90^\circ$  の時、受信機は水面と平行な方向を向いており、 $L_{fac}$  は 0.026 である。 $\theta = 180^\circ$  の時、受信機は水面と反対方向を向いており、 $L_{fac}$  は 0.0037 である。このパラメータを求めるにあたっては、depth 66.1m における測定結果を基にした。なぜなら水深が深いほど水中環境による雑音の影響を受けにくいと、受信機の方向による太陽光の影響がより正確に測定できるためである。 $K(\lambda)$  は水面と垂直に光が入射する時の減衰係数であり、[7] によると、clean ocean 下ではおよそ  $K(\lambda) = c(\lambda)/3$  である。本稿では最悪のケースを想定し、全ての減衰係数を水面と垂直に光が入射する時の減衰係数 ( $c(\lambda)$ ) に統一する ( $K(\lambda) = c(\lambda)$ )。

#### 4 背景光雑音を考慮した水中可視光通信路モデルにおける DOOK システムの検討

本研究では背景光の影響を軽減させるため、自由空間

中の可視光通信において、背景光の影響を減らすために提案された DOOK システムを検討する。比較にあたり、閾値を変化させた OOK を利用する。

#### 4.1 DOOK システム

DOOK システムの構成を図 1 に示す [9]。

まず送信機において、差動符号化を行った信号を LED により送信する。差動符号化とは、入力したデータと一つ前の状態の出力との排他的論理和を出力することである。例として、情報ビット列 '1,0,1,1' を送信する時を考える。この信号が差動符号化することで、'1,1,0,1' が得られる。この信号列は光信号に変換され、Lambertian Law に従って送信される。その後、光信号は水中通信路を通ることで、減衰する。

受信機では、信号を APD(アバランシェフォトダイオード)により受信、電気信号に変換し、信号を遅延検波する。遅延検波とは、ある信号から一つ前の状態の信号を引くことであり、この動作により背景光雑音の影響を低減できる。例として、'1,1,0,1' の信号を受け取った場合を考える。この信号は遅延検波により '+1,0,-1,+1' に変換される。この信号の絶対値を取ることで、元の信号である '1,0,1,1' が得られる。

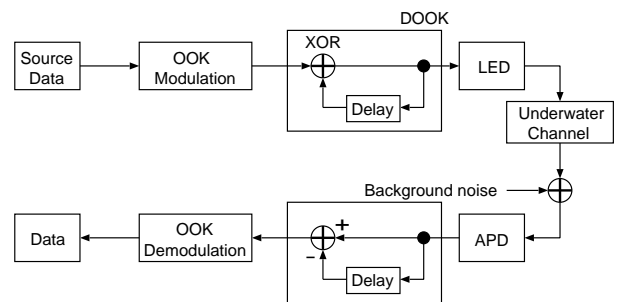


図 1 システムモデル

#### 4.2 OOK システム

DOOK システムの比較に用いる、閾値を変化させた OOK システムについて説明する。

本稿では、変調方式として OOK, DOOK を用いる。ただし、OOK については閾値を変え、二通りの計算を行う。OOK の閾値の図を図 2 示す。閾値 A(破線) は背景光を想定していない閾値(受信機であらかじめ背景光を推定することはできないため、現実的)であり、閾値は LED から送信された信号による受信電力の半分である。閾値 B(実線) は背景光を想定した理想的な閾値(受信機で背景光を推定したもの、理想的)であり、閾値は受信機に入射する背景光電力に LED から送信された信号による受信電力の半分である。これより、閾値 A を採用した OOK を "OOK", 閾値 B を採用した OOK を "理想的な OOK" と呼ぶ。理想的な OOK(閾値 B) の BER は、閾値が最適化されているため、通常の OOK の BER を求める方法で算出できる。

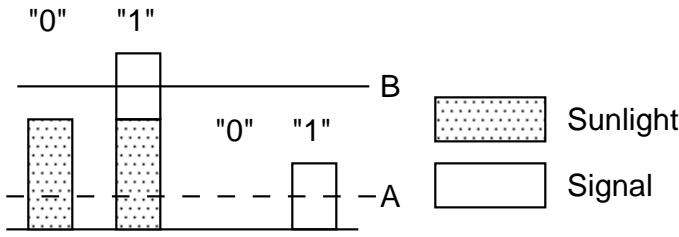


図 2 OOK の閾値の図解

## 5 性能評価

### 5.1 システムモデル

送受信機の位置関係を図 3 に示す．水中可視光通信システムとして，LOS(line-of-sight) 状態を考慮し，送受信機の光軸は一致している状態を考える．送信機では，差動符号化した信号を送信する．この信号列は光信号に変換され，Lambertian Law に従って送信される．その後，光信号は水中通信路を通ることで，減衰する．通信路は理想的であり，等方性かつ一定の均質を保つものとし，波や乱流は考慮しない．これは水中可視光通信路が線型時不変系システムであることを示す [14] ．

受信機では，信号を APD(アバランシェフォトダイオード) により受信，電気信号に変換し，信号を遅延検波する．受信機では雑音として，太陽光の影響である背景光雑音，APD 内部で生じるショット雑音，負荷抵抗内の電子の熱運動により生じる熱雑音の三つを考慮し，これらの雑音は加法的白色ガウス雑音 (AWGN) であると仮定する [15] ．

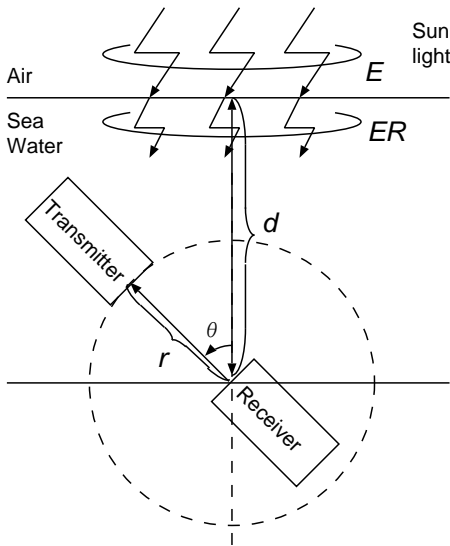


図 3 送受信機の位置関係

以下に，送信機から受信機へと届く電力の具体的な計算方法を説明する [16] ．送信機である LED の光は完全拡散 (光の半値角は  $\pi/3$  [rad]) とし，点光源とする．通信路においては，距離による減衰と消滅による減衰の二つの要素を考慮する．光の消滅による減衰とは，水により光が拡散，吸収される減衰を合わせたものであり，ベールの法則に従った減衰係数  $c(C_C, \lambda)$  により表せる．そして通信路により減衰した信号は受信機である APD によ

り受光される．

以上の過程をまとめることで，送信電力と受信電力の関係が表せる．

$$P_r = \frac{P_t}{\pi} \cos(\phi_t) \times \frac{\exp(-c(C_C, \lambda)r)}{r^2} \times A_d \cos(\phi_r) \quad (13)$$

ここで，送信信号電力を  $P_t$ ，放射強度を  $I_\phi$ ，距離を  $r$ ， $A_d$  を受光面積， $\phi_r$  を入射角， $P_r$  を受信電力とする．

先述の式により求められた受信電力により，信号対雑音比 (SNR) を求める．この SNR により，変調方式に応じた BER を導出するのである．

理想的な OOK(閾値 B) における BER の計算方法は以下となる．

$$\begin{aligned} BER &= P_{rob}(T_h < y | "0") \times P_{rob}("0") \\ &+ P_{rob}(T_h \geq y | "1") \times P_{rob}("1") \\ &= \int_{T_h}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) dy \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{T_h}{\sqrt{2}\sigma}\right) \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{SNR}{2}}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

ここで， $T_h$  は閾値， $N_b$  を背景光の受信電力としている．一方，OOK(閾値 A) の BER は背景光の影響を考慮しなければならないため，以下ようになる．

$$\begin{aligned} BER &= P_{rob}(T_h < y | "0") \times P_{rob}("0") \\ &+ P_{rob}(T_h \geq y | "1") \times P_{rob}("1") \\ &= \frac{1}{2} \int_{T_h}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(y - N_b)^2}{2\sigma^2}\right) dy \\ &+ \frac{1}{2} \int_{T_h}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(y - N_b - T_h)^2}{2\sigma^2}\right) dy \\ &= \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(\frac{T_h - N_b}{\sqrt{2}\sigma}\right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(\frac{T_h + N_b}{\sqrt{2}\sigma}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

DOOK システムにおける BER の計算方法は，以下のようになる．

$$\begin{aligned} BER &= P_{rob}(T_h < y | "0") \times P_{rob}("0") \\ &+ P_{rob}(T_h \geq y | "+1") \times P_{rob}("+1") \\ &+ P_{rob}(-T_h > y | "0") \times P_{rob}("0") \\ &+ P_{rob}(T_h \leq y | "-1") \times P_{rob}("-1") \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{SNR}{2}}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

理想的な OOK と同じ式になるが，受信機において遅延検波を行うため雑音は約 2 倍になる．よって，一般的に理想的な OOK より 3dB 性能が悪くなる．

表 2 解析諸元

名称	値
LED1 個あたりの総放射電力	1.3 [W]
放射, 入射角	0 [deg]
送受信機間距離	5 [m]
水質	Coastal
送信波長	530 [nm]
受信波長域	20 [nm]
受光面積	7.07 [mm <sup>2</sup> ]
受光感度	1.0 [A/W]
増倍率	50 [倍]
負荷抵抗	50 [ $\Omega$ ]
温度	1100 [K]
過剰雑音係数	2.99
バルク漏れ電流	18.3 [pA]
表面漏れ電流	91.7 [pA]

## 5.2 解析諸言及び結果

本解析における数値諸言を表 2 に示す。また、送受信機の光軸は一致しているため  $\phi_t = \phi_r = 0$  となる。

図 4 は時間に対する受信機に入射する太陽光の電力を表している。図 5 と図 6 はコンピュータシミュレーションによる BER 特性を示している。図 5 は受信機の深さに対する BER 特性であり、時刻は 12:00 である。図 6 は時刻に対する BER 特性であり、深さは 2m である。減衰係数の値は [11] を参照し、クロロフィル濃度の値は [12] を参照した。いずれの図も DOOK システムと通常の OOK システム、理想的な OOK システムの比較を行っている。

図 5 の結果における、 $\theta = 90$  の時に着目する。深さが 55m 以下の時には、DOOK の BER 特性は OOK with fixed threshold の BER 特性に比べて優れている。これは深さが 55m 以下の時には背景光雑音の影響が強いため、通常の OOK システムは性能が劣化してしまう一方、DOOK システムは背景光雑音の影響を軽減できるため、BER 性能は良い結果となる。深さが 55m 以上の時、OOK with fixed threshold の BER 特性は DOOK システムの BER 特性に比べて優れている。これは深さが 55m 以上の時には背景光雑音の影響はほとんど存在しないため、通常の OOK の BER 特性の方が優れているのである。しかしながら、DOOK の BER 特性は理想的な OOK の BER 特性と比べると性能が悪い。これは DOOK の SNR は遅延検波により 3dB 減少してしまうため、理想的な OOK より性能が悪いのである。

図 6 の結果より、7:00 から 18:00 の間の時刻では、DOOK の BER 特性は OOK with fixed threshold の BER 特性に比べて優れている。これは 7:00 から 18:00 の間の時刻では背景光雑音の影響が強いため、背景光雑音の影響を軽減できる DOOK システムの方が有利なのである。一方、18:00 から 7:00 の間の時刻では、OOK with fixed threshold の BER 特性は DOOK システムの BER 特性に比べて優れている。これは背景光雑音の影響がほとんど存在しないため、通常の OOK システムの

BER 特性の方が優れているのである。

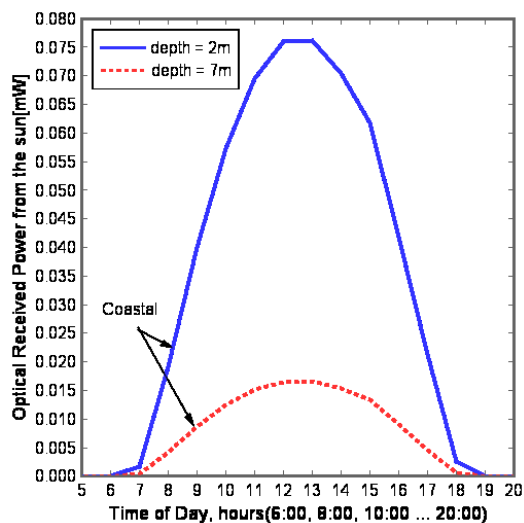


図 4 時間に対する受信機に入射する太陽光の電力

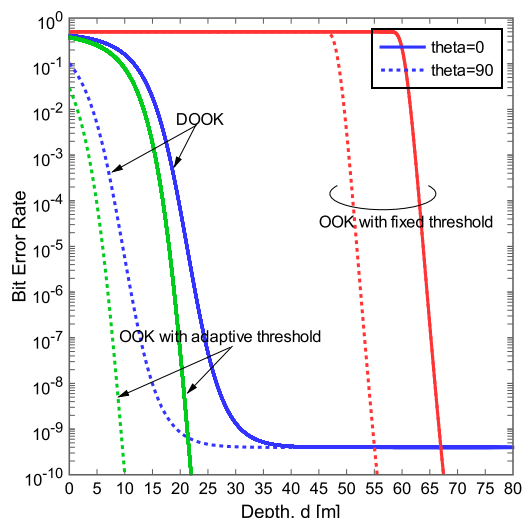


図 5 受信機の深さに対する BER 特性

## 6 結論

本稿では、背景光雑音を考慮した現実的な水中可視光通信システムモデルを示し、太陽光の影響を低減できる DOOK システムの適用を提案した。結果として、太陽光の影響が強い条件、例えば深さ 50m 以下、日が出ている時間帯、では DOOK システムが背景高雑音の影響を軽減できるため有利である。一方、太陽光の影響が弱い条件、例えば深さ 50m 以上、日が沈んでいる時間帯、では OOK システムが有利であることが示された。

### 参考文献

- [1] L. Freitag, M. Johnson, and D. Frye, " High-rate acoustic communications of ocean observatories-performance testing over a 3000m vertical path, " in Proc. OCEANS Conf., Sep. 2000, vol. 2, pp. 1443-1448.
- [2] Gabriel, C, Khalighi, M, Bourennane, S, Leon, P, Rigaud, V. "Channel modeling for underwater op-

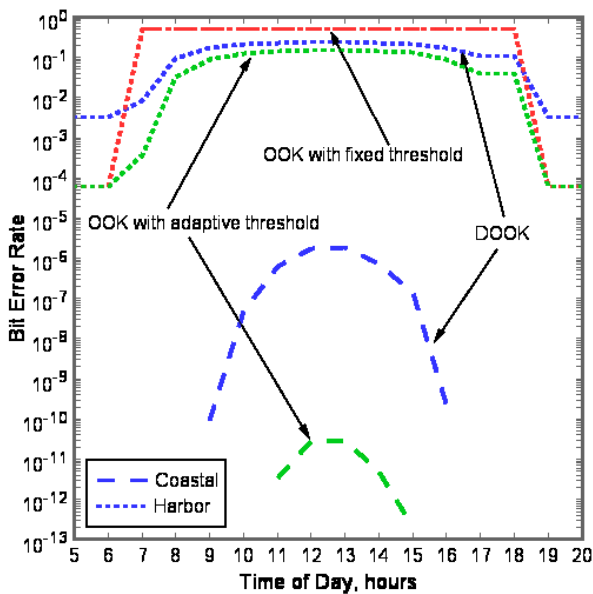


図 6 シミュレーション時刻に対する BER 特性

tical communication”, IEEE GLOBECOM Workshops (GC Workshops), pp. 833-837, 5-9 Dec. 2011.

- [3] Mitsuru Saotome, Yusuke Kozawa, Yohtaro Umeda, “ A Study of Optimum Wavelength Estimation for Underwater Optical Communications ”, 2014.
- [4] A. S. Fletcher, S. A. Hamilton, and J. D. Moores, “ Undersea laser communication with narrow beams, ” IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 11, pp. 49–55, 2015.
- [5] F. Akhondi, J. A. Salehi, and A. Tashakori, “ Cellular Underwater Wireless Optical CDMA Network: Performance Analysis and Implementation Concepts.,” TCOM, vol. 63, no. 3, pp. 882–891, 2015.
- [6] Takuya Mori, Yusuke Kozawa, Yohtaro Umeda, Hiromasa Habuchi, “ A study of convolutional coded OOK system using multi-color LED for high-speed underwater visible light communications ”, RCC ITS WBS, no.364(WBS), no.365(ITS), no.366(RCC), pp.139-144, Okinawa Industry Support Center, Japan, December 2015.
- [7] J. W. Giles and I. N. Bankman, “ Underwater optical communications systems. Part 2: basic design considerations, ” Military Communications Conference, pp. 1700-1705 Vol. 3, 2005.
- [8] R. E. Bird and C. Riordan, “ Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth’s surface for cloudless atmospheres, ” Journal of Climate and Applied Meteorology, vol. 25, no. 1, pp. 87–97, 1986.
- [9] Sachin Rai, Yusuke Kozawa, Hiromasa Habuchi, Yuto Matsuda, “ Mitigation of the Influence of

Optical Background Noise by Using Turbo-Coded DOOK ”, Journal of Signal Processing, Vol. 19, No. 6 Special Issue on Nonlinear Circuits, p. 269-273, NOV, 2015.

- [10] Vladimir I. Haltrin, “Chlorophyll-Based Model of Seawater Optical Properties” Appl. Opt. 38, 6826-6832 (1999).
- [11] Louis Prieur and Shubha Sathyendranath, “ An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials “ , Limnol. Oceanogr. 26, 671-689(1981).
- [12] Gabriel, C. Khalighi, M. Bourennane, S. Leon, P. Rigaud, V. “ Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems ”, IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Volume:5, Issue: 1, pp. 1-12, January 2013.
- [13] Duntley, S.Q., “Light in the Sea,” J. Optical Society of America, Vol. 53, No. 2, 214-233, 1963.
- [14] Jaruwatanadilok, S, “ Underwater Wireless Optical Communication Channel Modeling and Performance Evaluation using Vector Radiative Transfer Theory ”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume:26 pp. 1620-1627, December 2008.
- [15] “Characteristics and use of Si APD (Avalanche Photodiode)“, Hamamatsu Photonics
- [16] Doniec. M, Angermann. M, Rus. D, “ An End-to-End Signal Strength Model for Underwater Optical Communications ”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Volume:38, Issue: 4, pp. 743-757, Oct. 2013.

## 本研究に対する学会発表など

### (A) 査読付き論文

なし

### (B) 査読付き小論文

Mitsuru S, Yusuke K, Yohtaro U, Hiromasa H, “ Differential-OOK System for Underwater Visible light Communications ”, NCSP’16, 発表予定.

### (C) 査読なし論文

なし

### (D) 学会大会等の口頭発表・ポスター発表

早乙女 充, 小澤佑介, 榎田洋太郎: 「水中可視光通信における最適な波長推定法の一検討」, 電子情報通信学会総合大会, A-5-16, pp. 102, 2014年3月.

早乙女 充, 小澤佑介, 榎田洋太郎: 「水中可視光通信における波長推定法を用いたパルス位置変調方式のビット誤り率性能」, 電子情報通信学会学生会, A-5, pp. 5, 2014年3月.

### (E) 特許

なし