

# 高速水中可視光通信のための 複数色 LED を用いた畳み込み符号化 OOK 方式の研究

7314680 森 卓哉

## 1 はじめに

現在、水中通信では潜水艦間通信に代表される長距離通信に加えて、短距離だが数十 Mbps を達成可能な高速無線通信の需要が高まっている。例えば、ダイバー間通信や、自立型無人機 (AUV(Autonomous Underwater Vehicle)) 間通信や、AUV と海洋モニタリング用センサー間での通信などがある。従来の長距離水中通信では、音波が用いられているが、縦波であるため長距離伝送が可能という利点に対して、環境音、ドップラー効果、水温による屈折などの影響により伝送速度に限界があるため、短距離高速通信には向かない [1]。この音波通信に変わるものとして、RF 帯を用いた無線通信、可視光帯を用いた可視光通信の適用が期待されている。地上での無線通信では主に電波が用いられているが、水中ではイオンの影響により空気中よりも大きく減衰するため、1MHz 程度の周波数で数 kbps、数 m 程度の通信のみ可能となっている [2]。

これらの欠点を解消するものとして、可視光通信に注目が集まっている [3][4]。可視光通信とは送信機を LED、受信機をフォトダイオード (PD) とし、光の点滅によって通信を行うものである。水中では可視光帯の減衰が極めて低く、海水塩分の濃度による消散がとても小さい。さらに可視性により伝搬方向や位置範囲の制御が容易で、高い指向性と集光性により数十 Mbps の高速通信が可能である。しかし問題として、通信距離が光の届く範囲に限られるため数十 m と短いこと、太陽光が雑音となること、水質 (クロロフィル濃度) によって通信に適した波長が変化することがあげられる [5][6]。従来研究として波長依存性を考慮した適応型 PPM 方式 [7]、最適な波長推定法を用いた OOK、PPM 方式 [8] など、水中可視光に適した変調法の検討が行われており、その結果、最適な波長を選択することにより通信品質が向上することが分かっている。本稿では、さらなる高信頼化伝送を実現するために、誤り訂正符号を利用した水中可視光通信を検討する。とくに、誤り訂正符号として畳み込み符号に着目し、クロロフィル濃度に対する畳み込み符号化 OOK 方式の誤り率性能の評価を行う。さらに、波長依存性通信路に対応するために、畳み込み符号により符号化された信号と LED の発光色 (R,G,B) とを組み合わせることでさらなる誤り率性能の向上を目指す。

## 2 複数色 LED を用いた畳み込み符号化 OOK 方式

システム構成を図 1 に示す。本稿では、最も基本的な符号化率  $1/2$  と  $1/3$  の畳み込み符号器を用い、符号化率  $1/2$  の場合は、2 個の LED と送信波長に対応した 2 個の PD を用い、 $1/3$  の場合は 3 個の LED と 3 個の PD を用いる (図 1)。ここで、本稿では赤 (R)、青 (B)、緑 (G) のいずれかを送信 LED で用いる発光色として適用する。畳み込み符号器により生成された信号は、LED の周波数応答性の影響を受けて光信号となり出力される。水中通信路では、波長依存性のあるクロロフィル減衰 (詳細は 3.2 節) と距離減衰の影響を受け、各 PD によって受光され、ピタビ符号を用いた畳み込み復合器によって復調される。

畳み込み符号器の符号化率が  $1/3$  の場合における、送信機で使用される発光色の種類に応じた送信信号について、具体的な例を用いて説明する (図 2,3,4)。図 2 のように  $N_1, N_2, N_3$  が全て同じ色で送信する場合、同じ色を同時に送ると復調側で各々を分割することが出来ないため、 $T_s$  (シンボル幅) を 3 分割 (パラレル-シリアル変換) してチップ幅  $T_c = T_s/3$  として送信を行う。図 3 のように  $N_3$  のみ違う色で、 $N_1$  と  $N_2$  を同じ色で送信する場合、 $T_s$  を 2 分割して  $T_c = T_s/2$  として送信を行う。図 4 のように  $N_1, N_2, N_3$  が全て違う色の場合、 $T_s$  を分割せずに  $T_c = T_s$  として送信を行う。本稿では LED の応答性を考慮しているため、伝送速度を上げたとき、チップ幅が狭いほど通信品質が落ちる。

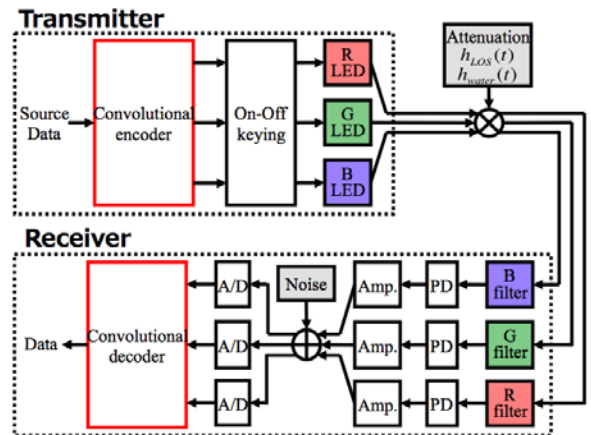


図 1 符号化率  $1/3$  畳み込み符号化方式のシステムモデル

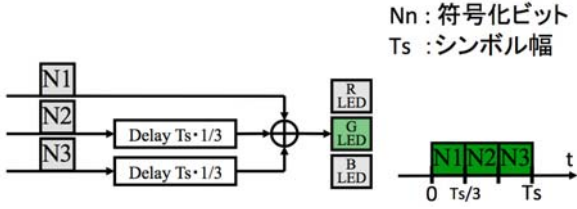


図 2 単色 LED を用いた場合の畳み込み符号化 OOK の信号例

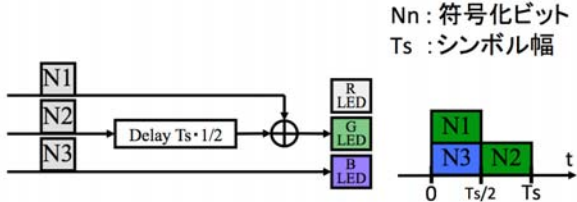


図 3 2 色 LED を用いた場合の畳み込み符号化 OOK の信号例

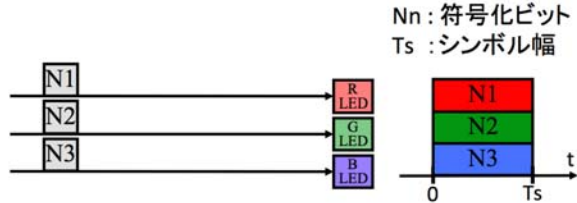


図 4 3 色 LED を用いた場合の畳み込み符号化 OOK の信号例

### 3 水中通信路モデル

#### 3.1 通信路モデル

送信機から受信機までの構成を図 6 に示す [9]。送信機として LED、受信機として PD を用いる。送信機において、光は完全拡散とし、点光源とする。受光電力  $P_r(t)$  は以下の式で表される。

$$P_r(t) = s(t) \otimes h_{LOS}(t) \otimes h_{water}(t) + n(t) \quad (1)$$

ただし  $s(t)$  は送信信号、 $h_{LOS}(t)$  は通信路の応答、 $h_{water}(t)$  は水中通信路の応答、 $n(t)$  はホワイトガウスノイズでモデリングされた雑音とする。 $s(t)$  は以下の式で表される。

$$s(t) = P_s X(t) \otimes g_{LED}(t) \quad (2)$$

ただし  $P_s$  は送信信号電力、 $g_{LED}(t)$  は LED のインパルス応答とする。ここで、 $X(t)$  は畳み込み符号器により生成された信号であり、チップ幅  $T_c$  ごとに LED に入力される。 $g_{LED}(t)$  は指数的減衰とし、次の式で表せる [10]。

$$g_{LED}(t) = 2\pi f_c \exp(-2\pi f_c t) \quad (3)$$

$h_{LOS}(t)$  は以下の式で表せる。

$$h_{LOS}(t) = \frac{(m+1)A_d}{2\pi r^2} \cos^m(\theta) g(\theta) \cos(\phi) \text{rect}\left(\frac{t}{T_s}\right) \delta(t) \quad (4)$$

$$g(\theta) = \frac{1}{\sin^2(\theta)}$$

ただし  $r[m]$  は LED と PD の距離、 $A_d[m^2]$  を受光面積、 $\theta$  を入射角、 $\phi$  を放射角、 $g(\theta)$  をレンズの利得、 $\phi$  は視角とする。 $m$  はランベルト放射指数であり、半値角  $\theta_{1/2}$  を用いて以下の式で表せる。

$$m = -\frac{1}{\log_2(\cos(\theta_{1/2}))} \quad (5)$$

また矩形関数は次の式で表せる。

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } |x| \leq 1 \\ 0 & \text{for } |x| > 1 \end{cases} \quad (6)$$

水中通信路におけるクロロフィル減衰では、拡散と消散の二つの要素を考慮する。光の拡散とは、距離  $r[m]$  による減衰のことである。光の消散とは、クロロフィル濃度  $Chl$  と波長  $\lambda$  からなる水中の減衰係数  $c(Chl, \lambda)$  [5][6] による光の減衰であり、ベールの法則に従って減衰する。以上より水中通信路の応答  $h_{water}(t)$  は以下の式で表せる。

$$h_{water}(t) = \exp\{-c(Chl, \lambda)r\} \delta(t) \quad (7)$$

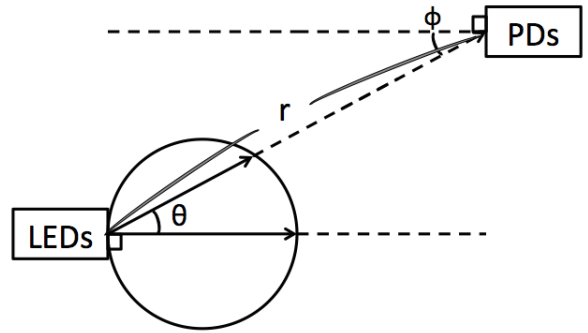


図 5 送信機から受信機までの構成

#### 3.2 減衰係数

水中での可視光通信は、水分子による影響の他に、プランクトンによる水質  $Chl$  (クロロフィル濃度) に大きく影響を受ける。この水質による減衰は波長  $\lambda$  によって割合が変わる [5][6]。光の消滅が起こる理由として吸収と拡散があり、光の減衰係数は吸収減衰係数  $a(Chl, \lambda)$  と拡散減衰係数  $b(Chl, \lambda)$  を用いて以下の式で表せる。

$$c(Chl, \lambda) = a(Chl, \lambda) + b(Chl, \lambda) \quad (8)$$

まず吸収のモデルについて説明する。吸収のモデルは、クロロフィルと有機物質 (フルボ酸とフミン酸) を考慮する。吸収の減衰係数  $a(Chl, \lambda)$  は次の式で表せる。

$$a(Chl, \lambda) = a_w(\lambda) + 0.06a_C^0(\lambda)(Chl)^{0.602} + a_f^0 C_f \exp(-k_f \lambda) + a_h^0 C_h \exp(-k_h \lambda) [m^{-1}] \quad (9)$$

$a_w(\lambda)$  は pure water の下での吸収減衰係数、 $a_C^0(\lambda)$  はクロロフィルによる吸収減衰係数で表 1 の値を用いる。 $Chl$  は単位体積あたりに含まれる植物プランクトンの量 (クロロフィル濃度)、 $a_f^0 = 35.959[m^2/mg]$  はフルボ酸による吸収

減衰係数,  $k_f = 0.0189[nm^{-1}]$ ,  $a_h^0 = 18.828[m^2/mg]$  はフミン酸による吸収減衰係数,  $k_h = 0.01105[nm^{-1}]$ .  $C_f$  はフルボ酸濃度,  $C_h$  はフミン酸濃度であり, 以下の式で表せる.

$$C_f = 1.74098 \times Chl \times \exp(0.12327Chl)[mg \cdot m^{-3}] \quad (10)$$

$$C_h = 0.19334 \times Chl \times \exp(0.12343Chl)[mg \cdot m^{-3}] \quad (11)$$

次に拡散のモデルについて, 拡散の減衰係数  $b(Chl, \lambda)$  は以下の式で表せる.

$$b(Chl, \lambda) = b_w(\lambda) + b_s^0(\lambda)C_s + b_l^0(\lambda)C_l[m^{-1}] \quad (12)$$

$b_w(\lambda)$  は pure water の下での拡散減衰係数,  $b_s^0$  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.

$$b_w(\lambda) = 0.005826(400/\lambda)^{4.322}[m^{-1}] \quad (13)$$

$$b_s^0(\lambda) = 1.151302(400/\lambda)^{1.7}[m^2/mg] \quad (14)$$

$$b_l^0(\lambda) = 0.341074(400/\lambda)^{0.3}[m^2/mg] \quad (15)$$

$C_s$  は小さい微粒子の濃度,  $C_l$  は大きい微粒子の濃度で以下の式で表せる.

$$C_s = 0.01739 \times Chl \times \exp(0.11631Chl)[mg \cdot m^{-3}] \quad (16)$$

$$C_l = 0.76284 \times Chl \times \exp(0.03092Chl)[mg \cdot m^{-3}] \quad (17)$$

赤色, 緑色, 青色 LED それぞれの, クロロフィル濃度と減衰係数の関係を図 6 に示す. 図より  $Chl = 0 \sim 0.7[\mu g/l]$  程度では青,  $Chl = 0.7 \sim 6[\mu g/l]$  程度では緑, それ以上では赤の減衰係数が最も低くなることがわかる.

表 1 R, G, B, 各色の  $a_w(\lambda)$  と  $a_c^0(\lambda)$

	$a_w(\lambda)[m^{-1}]$	$a_c^0(\lambda)[m^{-1}]$
<b>R</b>	0.315	0.299
<b>G</b>	0.016	0.87
<b>B</b>	0.051	0.474

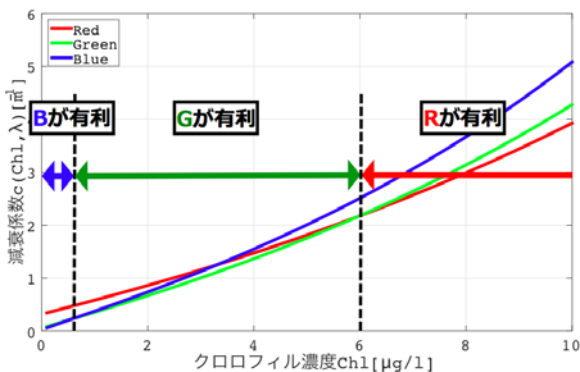


図 6 R,G,B 各色の  $Chl$  と減衰係数の関係

## 4 性能評価

シミュレーションの諸元を表 2 に示す. また本稿では LED の応答性, クロロフィル濃度による水中通信路減衰を考慮する.

符号化率と光の波長の組み合わせとチップ幅の関係を表 3 に示す. 比較のための従来方式として R-OOK, G-OOK, B-OOK, (R,R), (G,G), (B,B), (R,R,R), (G,G,G), (B,B,B) を用いる. R-OOK, G-OOK, B-OOK は符号化を行わない OOK 方式で, R, G, B それぞれ単色で送信を行う. (R,R), (G,G), (B,B) は符号化を行うが, 符号化ビットを全て同じ光の波長で送信する符号化率 1/2 の方式, (R,R,R), (G,G,G), (B,B,B) は符号化率 1/3 の方式である. 提案方式として, 本稿での検討範囲であるクロロフィル濃度  $Chl = 0 \sim 7\mu g/l$  において広い範囲で最も有利である緑 (G) を主に用いた方式を採用している. (G,R), (G,B) は符号化率 1/2 で符号化された信号をそれぞれ緑 (G) と赤 (R), 緑 (G) と青 (B) の 2 色で送信する. (G,G,R), (G,G,B) は符号化率 1/3 で符号化された信号をそれぞれ緑 (G) と赤 (R), 緑 (G) と青 (B) の 2 色で, (R,G,B) は赤 (R), 緑 (G), 青 (B) の 3 色で送信する.

表 2 シミュレーション諸元

雑音	AWGN
LEDの波長	R=625,G=530,B=470 nm
LEDの半値角	$\pi/3$ rad
放射角,入射角	0 rad
PDの受光面積	1 cm <sup>2</sup>
PDの受光感度	1 A/W
通信距離	1 m
クロロフィル濃度Chl	0~7 µg/l
LEDの3dB帯域幅	20 MHz
伝送速度	25, 50, 75 Mbps
拘束長	7
符号化率R 生成多項式(8進)	1/2 (165 171) 1/3 (133 165 171)

表 3 符号化率, 光の波長の組み合わせとチップ幅

	組み合わせ	符号化率R	チップ幅Tc
従来方式	R-OOK	-	Ts
	G-OOK	-	Ts
	B-OOK	-	Ts
	(R,R)	1/2	Ts/2
	(G,G)	1/2	Ts/2
	(B,B)	1/2	Ts/2
	(R,R,R)	1/3	Ts/3
	(G,G,G)	1/3	Ts/3
提案方式	(B,B,B)	1/3	Ts/3
	(G,G,R)	1/3	Ts/2
	(G,G,B)	1/3	Ts/2
	(G,R)	1/2	Ts
	(G,B)	1/2	Ts
	(R,G,B)	1/3	Ts

図7~9にクロロフィル濃度  $Chl = 0\mu\text{g/l}$ , 伝送速度がそれぞれ 25, 50, 75Mbps の  $E_b/N_0$  と BER の関係を示す。図7より伝送速度 25Mbps では従来方式と提案方式の全ての  $BER = 10^{-5}$  を達成する  $E_b/N_0$  が 59~65dB 程度の範囲であることが分かる。図8より伝送速度 50Mbps ではチップ幅  $T_c=T_s$  である R-OOK, G-OOK, B-OOK, (G,R), (G,B), (R,G,B),  $T_c=T_s/2$  である (R,R), (G,G), (B,B), (G,G,R), (G,G,B) に比べ,  $T_c=T_s/3$  である, 従来方式の (R,R,R), (G,G,G), (B,B,B) の BER 性能が大きく劣化していることが分かる。また図8より伝送速度 75Mbps ではチップ幅  $T_c=T_s/3$  である (R,R,R), (G,G,G), (B,B,B) の BER 性能が大きく劣化しているのに加え,  $T_c=T_s/2$  である, 従来方式の (R,R), (G,G), (B,B), 提案方式の (G,G,R), (G,G,B) の性能が劣化していることが分かる。これらよりチップ幅が大きい程, 伝送速度をあげたときの性能の劣化が少なくなることが分かる。よって以降では  $T_c=T_s$  である, 従来方式の R-OOK, G-OOK, B-OOK と, 提案方式の (G,R), (G,B), (R,G,B) の比較を行う。

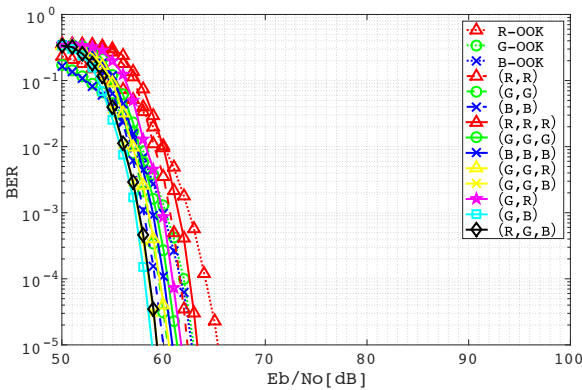


図7 伝送速度 25Mbps,  $Chl = 0\mu\text{g/l}$  のときの BER

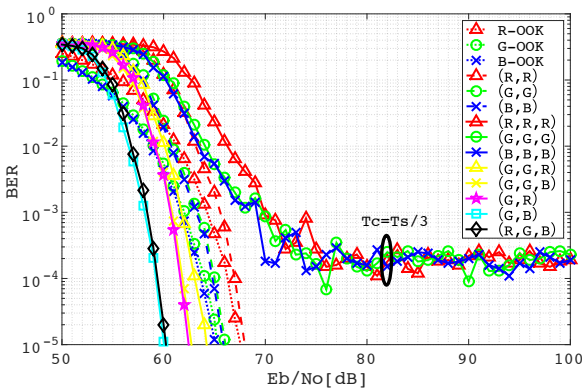


図8 伝送速度 50Mbps,  $Chl = 0\mu\text{g/l}$  のときの BER

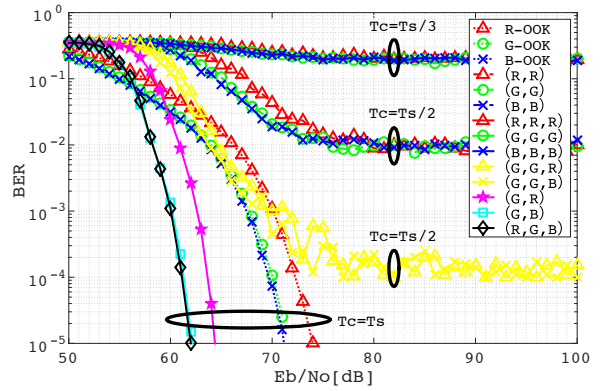


図9 伝送速度 75Mbps,  $Chl = 0\mu\text{g/l}$  のときの BER

図10~12にクロロフィル濃度  $Chl = 0\sim 7\mu\text{g/l}$ , 伝送速度がそれぞれ 25, 50, 75Mbps の  $BER = 10^{-5}$  を達成する  $E_b/N_0$  の関係を示す。単色で送信を行う従来方式である R-OOK, G-OOK, B-OOK がクロロフィル濃度  $Chl$  の影響によって, その優劣が入れ替わっていることが確認できる。また図10より, 伝送速度 25Mbps のクロロフィル濃度  $Chl = 6\mu\text{g/l}$  以上では提案方式の (G,B) よりも, 従来方式である R-OOK の性能が良くなっている。これは (G,B) が畳み込み符号によって誤り訂正が行われているものの, 符号化率 1/2 で符号化されているために 1 シンボルあたりのエネルギー効率が 1/2 になっていること, クロロフィル濃度  $Chl = 6\mu\text{g/l}$  程度では R(赤)の減衰率が低く, G(緑)と B(青)の減衰率が高くなっていることが原因だと考えられる。図10~12より, 伝送速度が上がるに従って, 符号化を行う提案方式よりも符号化を行わない従来方式の性能が大きく劣化している。これは符号化によるエネルギー効率の影響よりも, 符号化による誤り訂正による影響が大きいことによるものだと考えられる。これらより伝送速度 25~75Mbps, クロロフィル濃度  $Chl = 0\sim 7\mu\text{g/l}$  の範囲では, 従来方式よりも提案方式のいずれかの性能が良くなることが示された。また従来方式の G-OOK よりも, 提案方式の (R,G,B) が伝送速度 75Mbps, クロロフィル濃度  $Chl = 0\sim 7\mu\text{g/l}$  において,  $E_b/N_0$  を約 10dB 改善していることが分かる。以降では符号化率と最適な波長の組み合わせを検討する。

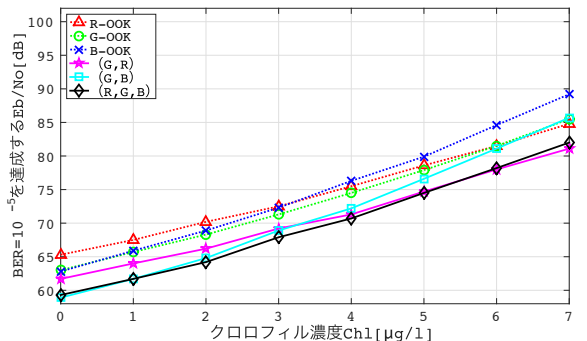


図10 伝送速度 25Mbps における  $Chl$  と  $BER=10^{-5}$  を達成する  $E_b/N_0$  の関係



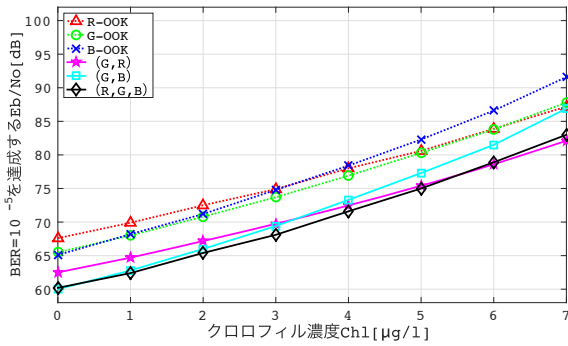


図 11 伝送速度 50Mbps における  $Chl$  と  $BER=10^{-5}$  を達成する  $E_b/N_0$  の関係

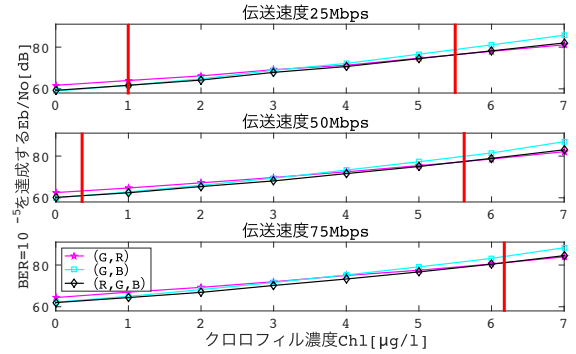


図 13 伝送速度 25, 50, 75Mbps における  $Chl$  と  $BER=10^{-5}$  を達成する  $E_b/N_0$  の関係

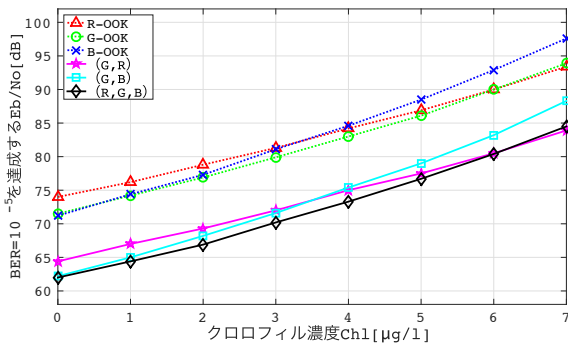


図 12 伝送速度 75Mbps における  $Chl$  と  $BER=10^{-5}$  を達成する  $E_b/N_0$  の関係

図 13 に (G,R), (G,B), (R,G,B) の伝送速度 25, 50, 75Mbps における  $Chl$  と  $BER=10^{-5}$  を達成する  $E_b/N_0$  の関係を示す。図より符号化率と光の波長の最適な組み合わせは、伝送速度 25Mbps では、クロロフィル濃度  $Chl = 0 \sim 1 \mu\text{g/l}$  程度では (G,B), クロロフィル濃度  $Chl = 1 \sim 5.5 \mu\text{g/l}$  程度では (R,G,B), クロロフィル濃度  $Chl = 5.7 \mu\text{g/l}$  程度以上では (G,R). 伝送速度 50Mbps では、クロロフィル濃度  $Chl = 0 \sim 0.4 \mu\text{g/l}$  程度では (G,B), クロロフィル濃度  $Chl = 0.4 \sim 5.7 \mu\text{g/l}$  程度では (R,G,B), クロロフィル濃度  $Chl = 5.7 \mu\text{g/l}$  程度以上では (G,R). 伝送速度 75Mbps では、クロロフィル濃度  $Chl = 0 \sim 6.2 \mu\text{g/l}$  程度では (R,G,B), クロロフィル濃度  $Chl = 6.2 \mu\text{g/l}$  程度以上では (G,R) である。また伝送速度が大きくなるにつれて、(R,G,B) の有利な範囲が広がっている。これはクロロフィル濃度  $Chl$  による光の波長の影響や、符号化率  $1/2$  と  $1/3$  のエネルギー効率の違いによる影響よりも、符号化率  $1/2$  と  $1/3$  の訂正能力の違いによる影響が大きいと考えられる。伝送速度を 75Mbps よりも大きくすると、さらに (R,G,B) の有利な範囲が広がると考えられる。

## 5 まとめ

本稿では水質変化による誤り率劣化に対応する方法として複数色 LED を用いた畳み込み符号化 OOK 方式を提案し、ビット誤り率 (BER) 特性を評価した。その結果、伝送速度が 75Mbps の場合、BER 性能が  $10^{-5}$  の点で、提案方式の (R,G,B) は単色 LED を用いた G-OOK 方式に比べ、1 ビットあたりの信号電力対雑音電力を約 10dB 改善することが示された。また伝送速度が大きくなると、チップ幅が小さいほど性能が大きく劣化した。符号化率と光の波長の最適な組み合わせは、伝送速度 25Mbps では、クロロフィル濃度  $Chl = 0 \sim 1 \mu\text{g/l}$  程度では (G,B), クロロフィル濃度  $Chl = 1 \sim 5.5 \mu\text{g/l}$  程度では (R,G,B), クロロフィル濃度  $Chl = 5.7 \mu\text{g/l}$  程度以上では (G,R). 伝送速度 50Mbps では、クロロフィル濃度  $Chl = 0 \sim 0.4 \mu\text{g/l}$  程度では (G,B), クロロフィル濃度  $Chl = 0.4 \sim 5.7 \mu\text{g/l}$  程度では (R,G,B), クロロフィル濃度  $Chl = 5.7 \mu\text{g/l}$  程度以上では (G,R). 伝送速度 75Mbps では、クロロフィル濃度  $Chl = 0 \sim 6.2 \mu\text{g/l}$  程度では (R,G,B), クロロフィル濃度  $Chl = 6.2 \mu\text{g/l}$  程度以上では (G,R) である。

## 参考文献

- [1] 海洋音響学会編 “海洋音響の基礎と応用” 成山堂 2004.
- [2] 大浜 俊樹, 滝沢 賢一, 井家上 哲史, “海中における電磁波利用無線通信に関する一検討,” IEICE Technical Report WBS2013-32, Oct. 2013.
- [3] 伊藤 陽介, 春山 真一郎, 中川 正雄, “可視光を用いた海中通信の検討,” 信学技報 IEICE Technical Report OCS2005-87, Nov. 2005.
- [4] Z. Ghassemlooy, S. Arnon, M. Uysal, Z. Xu, and J. Cheng, “Emerging Optical Wireless Communications-Advances and Challenges,” IEEE Journal On Selected Areas in Communications, Vol.

33, No. 9, Sep. 2015.

- [5] V. I. Haltrin, "Chlorophyll Based Model of Seawater Optical Properties," *Applied Optics*, Vol. 38, pp. 6826-6832, 1999.
- [6] L. Prieur and S. 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.* Vol. 26, pp. 671-689, Jul. 1981.
- [7] 林 新, 澤 隆雄, "波長適応技術を用いた海中 LED 光無線データ通信," *JAMSTEC Rep. Res. Dev.*, Vol. 19, pp. 11-18, Sep. 2014.
- [8] 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," *電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会*, 2013.
- [9] M. Doniec, M. Angermann, D. Rus, "An End-to-End Signal Strength Model for Underwater Optical Communications", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.38, Issue. 4, pp. 743-757, Oct. 2013.
- [10] 米津 宏雄, "光通信素子工学 -発光・受光素子-, " *工学図書*, 1995.

## 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

なし

(C) 査読なし論文

森 卓哉, 小澤 佑介, 榎田 洋太郎, "高速水中可視光通信のための複数色 LED を用いた畳み込み符号化 OOK 方式の一検討", *信学技報*, vol. 115, no. 364, WBS2015-63, pp. 139-144, 2015 年 12 月.

(D) 学会大会等の口頭発表・ポスター発表

なし

(E) 特許

なし