

# 水中可視光通信における波長選択法を用いたパルス位置変調方式のビット誤り率性能

7310060 早乙女 充

## 1 背景と目的

現在, 水中下での通信には音波が用いられている. しかしながら, 音波では通信速度が遅く, 通信に用いる機材の費用が高くなってしまふ. それらの欠点を解消するため, 可視光通信が注目されている. 可視光通信とは LED を送信機, フォトダイオードを受信機として通信を行うことである. この可視光通信を用いることで, 先の欠点を解消すると同時, 省電力, 小型化にも貢献できる. しかしながら, 可視光通信を行うと水により光が大きく減衰してしまふ.

水による減衰の一つに, プランクトンによる水質(クロロフィル濃度)の影響がある. この水質(クロロフィル濃度)による減衰は, 波長により割合が変わる [1] [2]. 水中下ではバッテリー駆動となるため, より消費電力を抑えることが望ましく, クロロフィル濃度に応じた最適な可視光波長の推定は必要不可欠である.

そこで本稿では, クロロフィル濃度に応じた最適な可視光波長の推定法を提案し, 変調方式として Pulse-Position-Modulation(PPM) を用いた場合のビット誤り率 (BER) 特性を評価する.

## 2 水質

水中下での可視光通信は水質に大きく影響を受ける. 青色, 赤色の LED の送信電力を共に 1.3 [W], LED から 3.0 [m] 離れた点において, 水質(クロロフィル濃度)を変化させた時の受信電力を図 1 に示す. 図 1 より, 水質が良い時には青色が通信に有利な波長となり, 水質が悪い時には赤色が通信に有利な波長となることが分かる.

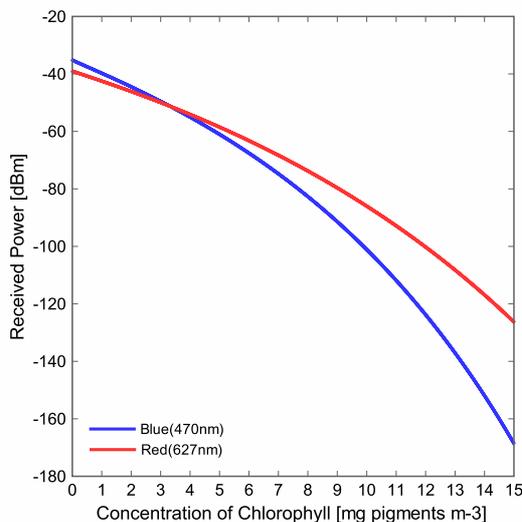


図 1 クロロフィル濃度に対する受信電力

## 3 システムモデル

### 3.1 提案方式

本システムでは, 二つの RGB-LED を送信用に用い, 青色, 赤色に各々対応した二つの APD(アバランシェフォトダイオード) で受光する (図 2). 送信信号は推定部とデータ部で構成されている. 推定部では, 二つの LED をそれぞれ赤色, 青色に発光させる. このとき各色の送信電力は等しい. 受信機では, 推定部の各色の受光電力を比較し, より大きい方を最適な可視光波長帯として選択する. データ部では, 推定された可視光波長を二つの LED を用い, パルスの位置によって変調する方式, PPM で情報を送信する. したがって, 本方式の誤り率は式 (1) の通り表すことができる.

$$\begin{aligned}
 BER &= P_E(\lambda_R|Chl) \times P_B(\lambda_R|Chl) \\
 &+ P_E(\lambda_B|Chl) \times P_B(\lambda_B|Chl) \quad (1) \\
 P_B(\lambda_R|Chl) &= \frac{M}{2(M-1)} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-z^2) \right. \\
 &\times \left. \left( \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(-z - \sqrt{2SNR}) \right)^{M-1} dz \right) \quad (2)
 \end{aligned}$$

ここで,  $P_E$  はクロロフィル濃度が  $Chl$  でかつ, 送信波長を赤 ( $\lambda_R$ ), または青 ( $\lambda_B$ ) と推定する確率である. また,  $P_B$  はクロロフィル濃度が  $Chl$  でかつ, 送信波長が赤, または青の場合の PPM の誤り率である (式 (2)). したがって, 従来の方式の誤り率は  $P_B(\lambda_R|Chl)$ , または  $P_B(\lambda_B|Chl)$  となる. また  $M$  は PPM の 1 フレームあたりのスロット数,  $z$  は確率変数であり, 信号対雑音比  $SNR$  の導出は次項に示す.

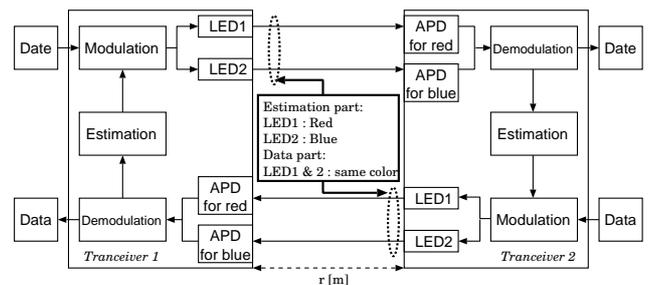


図 2 システム構成

### 3.2 SNR 導出

送信機において、光は完全拡散 (光の半値角は  $\pi/3$  [rad]) とし、点光源とする。

光源の放射強度  $I_\theta$  を、放射角  $\theta$ 、光源の最大放射強度  $I_{peak}$  (多くの場合  $\theta=0$  [rad] の時) により表すと、式 (3) となる。また、送信信号電力  $P_t$  を放射強度  $I_\theta$  により表すと、式 (4) となる。

$$I_\theta = I_{peak} \cos(\theta) \quad (3)$$

$$P_t = 2\pi \int_0^{\pi/2} I_\theta \sin(\theta) d\theta \quad (4)$$

光が完全拡散であることを考慮した式 (3) を式 (4) に代入することで、送信信号電力  $P_t$  と最大放射強度  $I_{peak}$  との関係が式 (5) により示される。

$$P_t = \pi I_{peak} \quad (5)$$

通信路においては、拡散と消滅の二つの要素を考慮する。光の拡散とは、距離  $r$  による減衰のことである。 $E_\theta(r)$  を  $r$  離れた点で得られる電力とすると、放射強度  $I_\theta$  との関係が式 (6) で示される。

$$E_\theta(r) = I_\theta / r^2 \quad (6)$$

光の消滅とは、水中の減衰係数  $c(\text{Chl}, \lambda)$  [1] [2] による光の減衰であり、ベールの法則に従って減衰する。

$$E_\theta(r) = I_\theta \exp(-c(\text{Chl}, \lambda)r) \quad (7)$$

以上二つの要素を考慮することにより、距離  $r$  の位置に届く電力は式 (8) で表せる。

$$E_\theta(r) = I_\theta \exp(-c(\text{Chl}, \lambda)r) / r^2 \quad (8)$$

受信機において受信できる電力は、単純に決めることができる。 $A_d$  を受光面積、 $\phi$  を入射角、 $P_r$  を受信電力とする。

$$P_r = E_\theta(r) A_d \cos\phi \quad (9)$$

以上のように送信機、通信路、受信機の三点すべてを考慮することで、SNR を求めることが可能となる [3]。また、受信機として APD を使っていることを考慮すると、SNR は式 (10) で表せる。

$$SNR = \frac{\left( \left( \frac{P_t}{\pi} \right) \cos(\theta) \frac{e^{-c(\text{Chl}, \lambda)r}}{r^2} A_d \cos(\phi) \right)^2 G^2}{N} \quad (10)$$

$G$  は APD の増倍率であり、 $N$  はショット雑音、背景光雑音、熱雑音の分散値の総和である。

### 4 性能評価

図 3 に 1 シンボルあたりの送信電力に対する提案法と従来法 (赤の LED のみ、または青の LED のみを用いた PPM 方式) の BER 特性を示す。ただし、送信機と受信機の光軸は一致 (放射、入射角は共に 0 度) しているものとし、 $A_d = 7.1 \times 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>]、 $r = 1.0$  [m]、 $G=50$  とする。また、各 APD の受光感度は各波長に対して 1.0 [A/W] であり、 $M=4$  である。推定を用いた場合は水質に適応でき、より性能が良い色のみを用いた場合に近い性能を発揮できる。

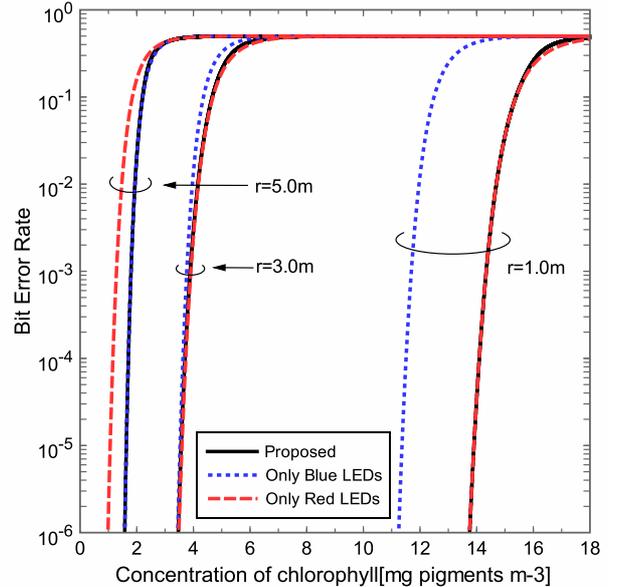


図 3 クロロフィル濃度に対する BER

### 5 まとめ

本稿では、水中可視光通信において、二つの RGB-LED を用いることで得られる最適な可視光波長推定法を利用し、PPM 方式の BER 性能の評価を行った。この結果、提案方式は最適な可視光波長帯を推定し、誤り率を軽減できることを明らかにした。

### 参考文献

- [1] Iadimir I. Haltrin, "Chlorophyll-Based Model of Seawater Optical Properties" Appl. Opt. 38, 6826-6832 (1999)
- [2] 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)
- [3] Doniec.M, Angermann.M, Rus.D, "An End-to-End Signal Strength Model for Underwater Optical Communications", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.38, Issue.4, pp. 743 - 757(2013)