# 水中光無線通信方式の多段中継による大容量化に関する研究

代表研究者 松 元 隆 博 山口大学大学院 創成科学研究科 准教授

#### 1 はじめに

四方を海に囲まれた島国の日本にとって,海洋資源の調査や開発,発掘は重要な課題となっている.現在, 有人潜水調査艇等による調査,海底津波計や海底地震計等のセンサによる計測などがなされており,機器間 もしくは機器と母船等への通信は,有線,もしくは超音波によって行なわれている.有線通信では敷設作業 や保守管理が面倒であり,断線事故の発生が懸念される等の問題がある.一方,超音波通信は有線通信での 問題を解決でき,長距離通信も可能であるが,伝搬路である水中の特性から帯域を広くとれず,音声通信程 度の低速通信しか出来ないことや海中温度変化がもたらす音速分布の不均一性による影響などで通信安定性 に問題がある.従って,今後の海洋開発で必要となる海底のリアルタイムモニタリング等の高速通信や多く の各種計測データを同時に伝送するための多重通信に対応できないという問題を抱えている.これらの問題 解決のため,波長 380-780[nm]の可視光による無線通信が近年注目されているが,長距離通信のためにレー ザーダイオードで実現する必要があることから機器の設置期間が長くなる海中調査での利用では消費電力が 過大であることが課題となっている.

そこで、本研究では近距離の通信しか出来ない省電力のLEDを用いた海中での光無線通信を多段中継伝送 させることで、長距離伝送を可能とする新しい省電力の通信方式の実現可能性について検討を行う.ここで は更に、中継途中に並列に配置した複数の中継器を複数のアンテナに見立てた MIMO 通信技術と CDMA 方式を 適用することで、受信時の SN 比を向上させ BER 特性を改善させることに加え、CDMA 方式を適用することで 多重通信を実現する.

# 2 海中光学特性

一般に光がある媒体中を伝播するとき、その強度は散乱と吸収によって減少する.海中での散乱は、分子や粒子が光子の方向を変化させることであり、また、海中での吸収は、分子や粒子の振動による熱などの別のものに変換されることである.これらは、クロロフィルと黄色の物質を含む水分子と溶解した粒子によって引き起こされる[1]、[2].ここで、減衰係数 $c(C_c, \lambda)$ は、以下の式で求められる.

#### $c(C_{c},\lambda) = a(C_{c},\lambda) + b(C_{c},\lambda)$

但し、 $C_c$ はクロロフィルの濃度、 $\lambda$ は波長、 $a(C_c, \lambda)$ は吸収係数、 $b(C_c, \lambda)$ は散乱係数である. クロロフィルの濃度は水質によって異なり、特徴的な環境として、深海のような純粋な海水、透明な海水、沿岸海域の3つが挙げられる。例として、波長 $\lambda$ が 550[nm]のときのそれぞれの環境におけるクロロフィルの濃度 $C_c$ と吸収係数 $a(C_c, \lambda)$ 、散乱係数 $b(C_c, \lambda)$ 、減衰係数 $c(C_c, \lambda)$ を表 1 に示す[2].

X = X & D A M				
水質	$C_c[mg/m^3]$	$a(C_c,\lambda)[m^{-1}]$	$b(C_c,\lambda)[m^{-1}]$	$c(C_c, \lambda)[m^{-1}]$
純粋な海水	0.005	0.053	0.003	0.056
透明な海水	0.31	0.069	0.08	0.15
沿岸の海水	0.83	0.088	0.216	0.305

表 1. 異なる水域におけるクロロフィル濃度 $C_c$ 、吸収係数 $a(C_c, \lambda)$ 、散乱係数 $b(C_c, \lambda)$ 、減衰係数 $c(C_c, \lambda)$ の例

また,図1にそれぞれの環境における波長 $\lambda$ と減衰係数 $c(C_c, \lambda)$ の関係を示す.次の節に、具体的に吸収係数 $a(C_c, \lambda)$ と散乱係数 $b(C_c, \lambda)$ について詳しく述べる.

# 2-1 吸収係数

吸収係数 $a(C_c, \lambda)$ はクロロフィルの濃度とフルボ酸、フミン酸に基づいてモデル化され、以下の式で表される.



図 1. 波長λに対する各環境での減衰係数c(C<sub>c</sub>,λ)

$$a(C_c,\lambda) = a_w(\lambda) + a_c(\lambda)C'_c(C_c) + a_fC_f(C_c)\exp\left(k_f(\lambda)\right) + a_hC_h(C_c)\exp\left(k_h(\lambda)\right)$$

但し、 $a_w(\lambda)$ は波長 $\lambda$ における純水での吸収係数で、図2の関係がある[3].また、 $a_c(\lambda)$ は波長 $\lambda$ におけるクロロフィルの吸収係数で文献[4]で得られ、 $a_f$ はフルボ酸の吸収係数で、 $C_f(C_c)$ はクロロフィルの濃度が $C_c$ のときのフルボ酸の濃度で、

 $C_f(C_c) = 1.74098C_c \exp(0.12327C_c)$ 

で表される.同様に、 $a_h$ はフミン酸の吸収係数、 $C_h(C_c)$ はクロロフィルの濃度が $C_c$ のときのフミン酸の濃度で、

C<sub>h</sub>(C<sub>c</sub>) = 0.19334C<sub>c</sub>exp(0.12343C<sub>c</sub>) で表される.また、C'<sub>c</sub>(C<sub>c</sub>)、 $k_f(\lambda)$ 、 $k_h(\lambda)$ はそれぞれ、  $C'_c(C_c) = 0.06|C_c|^{0.0602}$  $k_f(\lambda) = 0.01890(450 - \lambda)$  $k_h(\lambda) = 0.01105(450 - \lambda)$ 

である.ここで,文献[5]によればフルボ酸の吸収係数は $a_f = 0.00728$ ,フミン酸の吸収係数は $a_h = 0.1304$ である.

### 2-2 散乱係数

散乱係数 $b(C_c, \lambda)$ は純粋の散乱と小さな粒子の散乱、大きな粒子の散乱によりモデル化され、以下の式で表される.

$$b(C_c, \lambda) = b_w(\lambda) + b_s(\lambda)C_s(C_c) + b_l(\lambda)C_l(C_c)$$

但し、 $b_w(\lambda)$ は波長 $\lambda$ における純水での散乱係数で、 $b_s(\lambda)$ は波長 $\lambda$ における小さな粒子による散乱係数で、 $b_l(\lambda)$ は波長 $\lambda$ における大きな粒子による散乱係数で、

$$b_w(\lambda) = 0.005826 \left(\frac{400}{\lambda}\right)^{4.322}$$
$$b_s(\lambda) = 0.341074 \left(\frac{400}{\lambda}\right)^{1.7}$$
$$b_l(\lambda) = 0.341074 \left(\frac{400}{\lambda}\right)^{0.3}$$

で表される.また、 $C_s(C_c)$ はクロロフィルの濃度が $C_c$ のときの小さな粒子の濃度で、 $C_l(C_c)$ はクロロフィルの濃度が $C_c$ のときの大きな粒子の濃度で、



図 2. 波長λに対する純水での吸収係数a<sub>w</sub>(λ)

 $C_s(C_c) = 0.01739C_c \exp(0.11631C_c)$  $C_l(C_c) = 0.76284C_c \exp(0.03092C_c)$ 

で表される.

# 3 海中での背景光雑音

海中での背景光雑音は、太陽光による影響が大きい.地表での太陽光の放射照度を求めるモデルとして、 1984 年に Bird 氏によって SPCTRAL2 が提案されている[6].このモデルでは、ある時間において水平面、または傾斜平面上に澄んだ空での太陽の光の照度を計算できる.また、受信機平面が傾斜している場合は入射角、または平面の傾きと方位角を指定することで照度を計算できる.

受信機に入射する背景光雑音のパワーは,

$$P_b = \frac{E_{total} \cdot R \cdot A \cdot L \cdot exp(-c(C_c, \lambda)D)}{\pi}$$

π

で求められる.但し、Etotalは水面に入射する全波長の太陽光の照度で、波長λにおける照度をE(λ)とすれば、

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

で求められる.また、Rは太陽光の照度の水中反射率で1.25%、Aは受光面積、Dは受信機の深さで、Lは水中の放射照度の方向依存性で、受信機の受光面が上を向いて水面に対して平行の場合は1で、受光面が横を向いて水面に対して垂直の場合は0.026、受光面が下を向いて水面に対して平行の場合は0.0037である.

また,背景光の光子数の平均値λ<sub>b</sub>は,

$$\lambda_{\rm b} = \frac{\eta P_{\rm b}}{hf}$$

で表される. 但し, ηは量子効率, hはプランク定数, fは光の周波数である.

# 4 光 ZCZ 系列セットを用いた多段中継伝送

#### 4-1 光 ZCZ 系列セット

Zero-correlation zone (ZCZ) 系列セット[7][8]とは、周期相関特性に零相関区間(zero-correlation zone) を持つ系列のセットである.この零相関区間とは、相関特性のシフト0の前後のある限られた区間で自己相 関特性がインパルス特性で、相互相関特性が完全に0となる区間である.光 ZCZ 系列セットはそのような相



(a) 周期自己相関特性(b) 周期相互相関特性図 3. 光 ZCZ 系列の周期相関特性

関特性を持つ系列の一つで、光の on と off で情報を伝送する光 code-division multiple access (CDMA) 方式 に適用できるように、送信側で用いる1と0の要素からなる2値系列と、受信側で用いる1と-1の要素から なる2相系列の対からなる系列セットである.

長さNで、1 と-1の要素からなる2相系列 $a_N^j$ を、

$$a_{N}^{j} = (a_{N,0}^{j}, a_{N,1}^{j}, \cdots, a_{N,i}^{j}, \cdots, a_{N,N-1}^{j}),$$
$$a_{N,i}^{j} \in \{1, -1\}$$

と表記する.但し,jは系列番号で,iは順序変数である.同様に,長さNで1と0の要素からなる2値系列 $\hat{a}_{N}^{j,d}$ を,

$$\hat{a}_{N}^{j,d} = (\hat{a}_{N,0}^{j,d}, \hat{a}_{N,1}^{j,d}, \cdots, \hat{a}_{N,i}^{j,d}, \cdots, \hat{a}_{N,N-1}^{j,d}),$$

$$\hat{a}_{N,i}^{j,d} \in \{1,0\},$$

$$d \in \{1,0\}$$

と表記する. これらの系列の対の集合Aを

$$A = \{ (a_N^1, \hat{a}_N^{1,d}), (a_N^2, \hat{a}_N^{2,d}), \cdots, (a_N^j, \hat{a}_N^{j,d}), \cdots, (a_N^M, \hat{a}_N^{M,d}) \}$$

とする. 但し, Mは系列数である.

このとき、2相系列 $a_{N}^{j}$ と2値系列 $\hat{a}_{N}^{j',d}$ の周期相関関数 $\rho_{a_{N}^{j},\hat{a}_{N}^{j',d},i'}$ を、

$$\rho_{a_{N}^{j},\hat{a}_{N}^{j',d},i'} = \sum_{i=0}^{N-1} a_{N,i}^{j} \,\hat{a}_{N,(i+i') \bmod N}^{j',d}$$

と定義したとき、この周期相関関数 $\rho_{a_N^{j}, \hat{a}_N^{j', d}, i'}$ が、

$$\rho_{a_{N}^{j},\hat{a}_{N}^{j',d},i'} = \begin{cases} w \ ; i' = 0, j = j', d = 0, \\ -w \ ; i' = 0, j = j', d = 1, \\ 0 \ ; i' = 0, j \neq j', \\ 0; 1 \le |i'| \le Zcz \end{cases}$$

となるとき、この集合Aを光 ZCZ 系列セットと呼ぶ. 但し、Zczは零相関区間のサイズ、wは2 値系列 $\hat{a}_{N}^{j,d}$ の系



図 4. 中継伝送の基本モデル

列要素1の数に等しく,

$$w = \sum_{i=0}^{N-1} \hat{a}_N^{j,d} \le N$$

の関係を満たす.ここでは、j = j'のときの周期相関関数を周期自己相関関数と、 $j \neq j'$ のときの周期相関関数 を周期相互相関関数と呼ぶことにする.図3に周期自己相関関数と周期相互相関関数を示す.このように、 シフト0周辺の前後Zczの範囲が、理想的な自己相関特性、相互相関特性になっている.

## 4-2 光 ZCZ 系列セットを用いた多段中継伝送システムの構成

海中では、前述した光の吸収と散乱によって、光のパワーが減衰し、長距離伝送が困難である.そこで、途中に送受信機能を有する中継機を配置し、距離を延すことを考える.本稿では基本的な中継方式として AF(Amplify and Forward)方式を適用した場合で検討を行う.図4に中継伝送の基本モデルを示す.送信機で

2 値の光 ZCZ 系列 $a_N^{j,d}$ によって拡散変調された信号は、LED にて電気信号から光信号に変換され送信される.

この際,ビットデータがd = 0の場合は $\hat{a}_N^{j,0}$ を、d = 1の場合は $\hat{a}_N^{j,1}$ をそれぞれ送信される.各中継局では avalanche photodiode (APD)で変換された電気信号は、増幅され、再度 LED で光信号に変換され送信される. これらの複数の中継機を何段も経て、受信機にて APD で変換された電気信号を 2 相の光 ZCZ 系列 $a_N^j$ によって 逆拡散され、相関出力を正負で閾値判定し復調される.



次に、図5に送信機と中継機、受信機の配置の例を示す.この例では中継数 $N_r$ が2、並列数 $N_p$ が3の場合である.以後、中継数 $N_r$ 、並列数 $N_p$ の場合の場合を $(N_r, N_p)$ と記述する.矢印が各送信機、中継機からの光が届く経路を示している.これはLEDの指向性によるもので、以後の性能評価では正面の中継機の上下1機の中継機、もしくは受信機に届くこととする.中継機は各段で並列に配置し、それを多段に中継することによって、経路数を増やしS/N比を改善させる.

# 5 計算機シミュレーションによる性能評価

海中光無線通信に前述の多段中継伝送を行った場合のビット誤り率 (BER) 特性を計算機シミュレーション で評価する.計算機シミュレーションの諸元を表 2 に示す.

衣 2. 可昇機シミュレーションの商儿				
拡散系列	光 ZCZ 系列			
系列長 N	16			
零相関区間Zcz	1			
試行回数	10 <sup>6</sup>			
ビットレート[Mbps]	3			
チップレート[Mcps]	48			
光の波長λ[nm]	青 450, 緑 530, 赤 650			
APD 量子効率n	0.6			
APD 利得G	100			
APD イオン化係数K <sub>eff</sub>	0.02			
APD 口径[mm]	1.5			
バルク漏れ電流I <sub>b</sub> [nA]	0. 1			
表面漏れ電流I <sub>s</sub> [nA]	10			
受信機雑音温度T <sub>r</sub> [K]	1100			
受信機負荷抵抗R <sub>L</sub> [Ω]	1030			
クロロフィル濃度C <sub>c</sub> [mg/cm <sup>3</sup> ]	0.005, 0.31, 0.83			
送信機と受信機の距離	30			
最大水深	30			
背景光モデル	SPCTRL2			
経度[°]	155			
緯度[°]	19			
時差	10.33			
時間(hh:mm:ss)	12:00:00			
放射輝度の方向依存性	1.0(下方向),0.037(上方向)			

表2. 計算機シミュレーションの諸元

#### 5-1 中継機の数Nrによる性能評価

最初に,透明な海水の環境、つまりクロロフィルの濃度C<sub>c</sub>が0.31[*mg/cm*<sup>3</sup>]の場合に,海底から海面に向け て上向けに通信した場合の中継数の違いによる BER 特性の比較を行う.ここでは,海底 30[m]の場所に送信 機を,海面に受信機を設置し,その間の中継機の数N<sub>r</sub>を変化させる.並列数N<sub>p</sub>が 1,3,5の場合の BER 特性 をそれぞれ図 6,図 7,図 8 に示す.

これらより、光の波長(色)に関わらず中継機の数 $N_r$ を増加させることで BER 特性を向上できることが確認できる.これは必要な BER を満たすための伝送距離が延ばせることを意味する.また、並列数 $N_p$ に関わらず緑色(530[nm])、青色(450[nm])、赤色(650[nm])の順で BER 特性が良いことがわかる.これは図1の波長 $\lambda$ に対する減衰係数 $c(C_c, \lambda)$ による影響と考えられる.

# 5-2 中継機の数Nrと並列数Nnによる性能評価

次に、5-1の中継機の数 $N_r$ と並列数 $N_p$ をどちらとも変化させた場合の最適な組み合わせについて検討を行う.送信機と受信機、中継機の配置、及び透明な海水の環境(クロロフィルの濃度 $C_c$ が $0.31[mg/cm^3]$ )は



5-1 と同様である.赤色 (650[nm]),緑色 (530[nm]),青色 (450[nm])の LED を使用した場合の BER 特性を それぞれ図 9,図 10,図 11 に示す.

これらより、光の波長(色)に関わらず中継機の数N<sub>r</sub>と並列数N<sub>p</sub>を増加させることで BER 特性を向上できることが確認できる.これは 5-1 と同様、必要な BER を満たすための伝送距離が延ばせることを意味する.また、各光の波長(色)の中継機の数N<sub>r</sub>と並列数N<sub>p</sub>の組み合わせは、(N<sub>r</sub>, N<sub>p</sub>) = (4,3)と(3,5)の場合は、緑色(530[nm])と青色(450[nm])は BER 特性がほとんど同じであるが、赤色(650[nm])では(N<sub>r</sub>, N<sub>p</sub>) = (3,5)に比べて、(N<sub>r</sub>, N<sub>p</sub>) = (4,3)の方が BER 特性が向上できることがわかる.これは図1の波長んに対する減衰係数 $c(C_c, \lambda)$ より、緑色(530[nm])と青色(450[nm])に比べ、赤色(650[nm])が減衰係数 $c(C_c, \lambda)$ が大きいため、伝送距離の増加による減衰を抑えるために中継機の数N<sub>r</sub>を増加させる方が効果が大きいからだと考えられる.

### 5-3 クロロフィル濃度による性能評価

次に、クロロフィル濃度の違いによる影響について検討を行う.送信機と受信機、中継機の配置は 5-1、 5-2 と同様である.また、中継機の数N<sub>r</sub>と並列数N<sub>p</sub>の組み合わせは、(N<sub>r</sub>, N<sub>p</sub>) = (4,3)と(3,5)、(4,5)の3通り でそれぞれ比較している.赤色(650[nm])、緑色(530[nm])、青色(450[nm])のLEDを使用した場合のBER 特性をそれぞれ図 12、図 13、図 14 に示す.



これらより、クロロフィル濃度が小さい、すなわち純粋な海水ほど BER 特性が向上できることが確認できる.また、中継機の数N<sub>r</sub>と並列数N<sub>p</sub>の組み合わせ(N<sub>r</sub>, N<sub>p</sub>) = (4,3)と(3,5)の場合で比較した場合、図 12 より赤色(650[nm])の場合はクロロフィルの濃度によらず(N<sub>r</sub>, N<sub>p</sub>) = (3,5)より、(4,3)の方が BER 特性が向上するが、図 13 と図 14 より緑色(530[nm])と青色(450[nm])の場合はクロロフィル濃度が大きいC<sub>c</sub> = 0.83の場合は赤色(650[nm])と同様、(N<sub>r</sub>, N<sub>p</sub>) = (3,5)より、(4,3)の方が BER 特性が向上するが、クロロフィル濃度が小さいC<sub>c</sub> = 0.005の場合は赤色(650[nm])とは逆に(N<sub>r</sub>, N<sub>p</sub>) = (4,3)より、(3,5)の方が BER 特性が向上する.これは赤色(650[nm])の場合は、クロロフィル濃度に関係なく、減衰が大きいため、BER 特性を向上させるためには中継機の数N<sub>r</sub>を増やしてその影響を抑えた方が良く、緑色(530[nm])と青色(450[nm])の場合はクロロフィル濃度が小さい場合は減衰の影響が比較的小さく、逆に背景光の影響が大きくなるために並列数N<sub>n</sub>を増やしてその影響を抑えた方がいいからだと考えられる.

#### 5-4 通信方向の違いによる性能評価

最後に、透明な海水の環境、つまりクロロフィルの濃度 $C_c$ が $0.31[mg/cm^3]$ の場合の、通信方向の違いによる影響について検討を行う。送信機と受信機、中継機の配置が 5-1、5-2、5-3 と同様に上方向の場合と、それとは逆に海面の送信機を、海底 30[m]の場所に受信機を設置し、その間の中継機の数 $N_r$ と並列数 $N_p$ を変化させる。ここでは、中継機の数 $N_r$ と並列数 $N_p$ の組み合わせは、 $(N_r, N_p) = (4,3) \ge (3,5)$ 、(4,5)の 3 通りでそれぞれ比較している。赤色(650[nm])、緑色(530[nm])、青色(450[nm])のLEDを使用した場合のBER特性をそれぞれ図 15、図 16、図 17 に示す。



図 16. 緑色(530[nm])で上下方向の場合の BER 特性 図 17. 青色(450[nm])で上下方向の場合の BER 特性

これらより、海面から海底への下方向への通信に比べ、海底から海面への上方向の通信の方が BER 特性が 良いことが確認できる.これは下方向の場合は中継機と受信機の受光面が太陽を向き、それによる背景光の 影響が大きいためである.また、中継機の数N<sub>r</sub>と並列数N<sub>p</sub>の組み合わせ(N<sub>r</sub>, N<sub>p</sub>) = (4,3)と(3,5)の場合で比較 した場合、図 15 より赤色(650[nm])の場合は通信の方向によらず(N<sub>r</sub>, N<sub>p</sub>) = (3,5)より、(4,3)の方が BER 特 性が向上するが、図 16 と図 17 より緑色(530[nm])と青色(450[nm])の場合は上方向であれば、赤色(650[nm]) と同様、(N<sub>r</sub>, N<sub>p</sub>) = (3,5)より、(4,3)の方が BER 特性が向上するが、下方向の場合、赤色(650[nm])とは逆 に(N<sub>r</sub>, N<sub>p</sub>) = (4,3)より、(3,5)の方が BER 特性が向上する.これは減衰の影響が比較的小さく、逆に背景光の 影響が大きい場合、並列数N<sub>p</sub>を増やしてその影響を抑えた方がいいからだと考えられる.

#### 6 おわりに

本研究では、近距離の通信しか出来ない省電力のLEDを用いた光 CDMA 方式に多段中継伝送を適用することで、長距離伝送を可能とする新しい省電力の通信方式を提案し、その通信性能を計算機シミュレーションによって評価した.本方式によれば、水質や使用する LED の色(波長)に関係なく、通信距離を延ばせることが明らかになった.また、中継機の配置は、水質による減衰による影響が大きいときは中継数を、背景光による影響が大きい場合は並列数を増加させることで BER 特性を改善できると考えられる.

# 【参考文献】

- Vladimir I. Haltrin, "Chlorophyll-Based Model of Seawater Optical Properties," Appl. Opt. 38, vol. 38, no. 33, pp. 6826-6832, Nov. 1999.
- [2] C. Gabriel, M.Khalighi, S. Bourennane, P. Leon, V. Rigaud, "Monte-Carlo-Based Channel Characterization for Underwater Optical Communication System," J. Optical Communications and Networking, vol. 5, no.1, p.1-12, Jan. 2013.
- [3] R. M. Pope, E. S. Fry, "Absorption spectrum(380-700nm) of pure water.II. Integrating cavity measurements," Applied Optics, vol.36, no.33, pp.8710-8723, Nov.1997.
- [4] L. Prieur, S. Sathyendranath, "An optical classificantion 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, no. 4, pp. 671-689, Jan. 1981.
- [5] K. L. Carde, R.G. Stewart, G. R. Harvey, and P. B. Ortner, "Marine humic and fulvic acids: their effects on remote sensing of ocean chlorophyll," Limnol. Oceanooogr, vol. 34, no. 1, pp. 68-81, 1989.
- [6] R. E. Bird and C. Riordan," Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and rilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres," Journal of Climate and Applied Meteorogy, vol. 25, no. 1, pp. 87-97, Jan. 1986.

- [7] S. Matsufuji, T. Matsumoto, Y. Tanada, N. Kuroyanagi, "ZCZ codes for ASK-CDMA system," IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. E89-A, no.9, pp. 2268-2274, Sept. 2006.
- [8] Y. Ohira, T. Matsumoto, H. Torii, Y. Ida, S. Matsufuji, "Code generator for an optical ZCZ sequence with zero-correlation zone 2<sup>z</sup>," Journal of Signal Processing, Vol. 21, No. 6, pp. 265-272, Nov. 2017.

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Code Generator for an Optical ZCZ Sequence with Zero-Correlation Zone 2z	Journal of Signal Processing	Nov. 2017
BER Performance of SS System Using a Huffman Sequence Against CW Jamming	IEICE Trans. Fundamentals	Jan. 2018
A Compact Matched Filter Bank for an Optical ZCZ Sequence Set with Zero-Correlation Zone 2z	IEICE Trans. Fundamentals	Jan. 2018
Modified Mutually ZCZ Set of Optical Orthogonal Sequences	IEICE Trans. Fundamentals	Dec. 2018
A Generation Method of a Mutually ZCZ Set of Optical Orthogonal Sequences Consisting of Binary and Ternary Sequence Pairs	2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'17)	March 2017
Construction of a Code Generator for an Optical ZCZ Sequence with Zero- Correlation Zone 2 <sup>z</sup>	2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'17)	March 2017
Experimental Evaluation of Optical ZCZ-CDMA System on the Move	2017 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA2017)	Sept. 2017
Study on BER Performance of Optical Wireless Code-Shift Keying System Using Compact Matched Filter Bank for Optical ZCZ Sequence Set	2017 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA2017)	Sept. 2017
Construction of Code Generator for Optical ZCZ Sequence Used as Synchronization Symbol	2017 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA2017)	Sept. 2017
A Generation Method of a Modified Mutually ZCZ Set of Optical Orthogonal Sequences	2017 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA2017)	Sept. 2017
Influence of ISI on Synchronous OCDMA System Using an Optical ZCZ Sequence Set on a Diffuse Channel	8th International Workshop on Signal Design and Its Applications in Communications (IWSDA'17)	Sept. 2017
Theoretical Analysis of BER Performance of OCDMA System Using Compact Matched Filter Bank for an Optical ZCZ Sequence Set	20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC2017)	Dec. 2017
A Generation Method of a Two- Dimensional Optical ZCZ Sequence with the Smallest Zero-Correlation Zone	2019 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP2019)	March 2019

〈発表資料〉