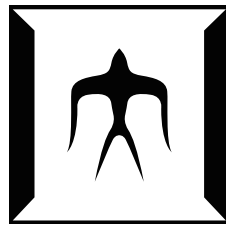


論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	畳み込み符号を用いた 全光誤り訂正符号化技術に関する研究
Title(English)	A Study on Optical Forward Error Correction Coding Scheme with Convolutional code
著者(和文)	相川洋平
Author(English)	Yohei Aikawa
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10532号, 授与年月日:2017年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:植之原 裕行,浅田 雅洋,小山 二三夫,渡辺 正裕,宮本 智之,遊部 雅生
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10532号, Conferred date:2017/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

博士論文 要約

畳み込み符号を用いた
全光誤り訂正符号化技術に関する研究



東京工業大学 大学院
総合理工学研究科
物理電子システム創造専攻

相川 洋平

指導教員 植之原 裕行 教授

論文の目次

1. Introduction

1.1. Research Background

1.1.1. Evolution of Optical Communication Systems

1.1.2. Historical Perspective of FEC Technologies for Optical Communication Systems

1.1.3. Need for All-Optical FEC Technologies

1.1.4. Related Research

1.1.5. Our Target Code

1.2. Objectives of This Thesis

1.2.1. Objectives

1.2.2. Research topics

1.3. Contents of This Thesis

2. Theory of Convolutional Code and *Viterbi* Decoding Scheme

2.1. Forward Error Correction

2.1.1. Principles of Forward Error Correction

2.2. Basic Idea of Convolutional Coding

2.2.1. Convolutional Coding

2.2.2. *Viterbi* Decoding

2.3. Generalized Description

2.3.1. Convolutional Coding with Constraint Length of K

2.3.2. Generalized Algorithm for *Viterbi* Decoding

3. Analytical Investigation of Optical FEC Coding Scheme with Convolutional Code

3.1. Operating Principles

3.1.1. Optical XOR Gates using FWM

3.1.2. Architecture of Optical Coding Circuit

3.2. Analytical Evaluation

3.2.1. Numerical Simulation

3.2.2. Optical XOR Operation

3.2.3. Optical Coding Operation and BER Evaluation

3.2.4. Conclusion in this section

4. Experimental Investigation of Optical FEC Coding Scheme with Convolutional Code

4.1. Measurement Setup

4.1.1. Operational Bandwidth of FWM Efficiency

4.1.2. Demonstration of Optical XOR Operation

4.2. Experimental Demonstration of Optical FEC Coding Operation

4.2.1. Performance of Optical Coding Operation

4.2.2. Conclusion in this section

5. Theoretical Investigation for Performance Limitation Optical FEC Coding Scheme

5.1. Performance Limitation

5.1.1. Derivation Process

5.1.2. Constraint Lengths vs Number of Cascaded XOR gates

5.1.3. Power Penalties vs Numbers of Cascaded XOR gates

5.1.4. Constraint Lengths vs Upper Bound of Net Coding Gain

5.1.5. Achievable Net Coding Gain

6. Investigation of Optical and Electrical Converted *Viterbi* Decoding Scheme

6.1. Operating Principles

6.1.1. Optical and Electrical Converted *Viterbi* Decoding

6.1.2. Optical Comparator

6.2. Analytical Evaluation

6.2.1. Simulation Model

6.2.2. Analytical Results of Novel *Viterbi* Decoding Scheme

6.2.3. Evaluation of the Number of Calculation Steps

6.3. Performance Limitation

6.3.1. Scalability of Calculation Steps

6.3.2. Novel Design for Optical Comparators

6.3.3. Evaluation of the Number of Calculation Steps with Novel Design

7. Conclusion

7.1. Conclusion of this thesis

Reference

Acknowledge

1. はじめに

インターネットやモバイルネットワークサービスの発展を受けフォトニックネットワークの大容量化が求められており、なかでも誤り訂正 (FEC) 技術の性能向上は近年めざましい [1–3]。一方で、既存の電気処理に頼った受信端における FEC 復号処理では、CMOS 駆動電力の物理限界によりその性能が鈍化傾向にあり、大規模データ処理における消費電力増加は避けられない課題となっている [4, 5]。

このような問題に対して、筆者らは既存の電気処理にて行われている FEC 技術を光信号処理にて代替する方法を提案している。例えば、(1) 送信側での符号化処理にて光処理を導入することで、電氣的処理を介さず光パスを維持したまま FEC 技術を実現できるようになる。これによって、光パスの途中にて符号化処理により雑音耐性を付加することが可能となり、ノード間の高速な品質補償が実現される。また、(2) 受信側での復号化処理において一部を光信号処理に代替することで、電氣的処理を省いて総演算量の削減を実現することができる。このように、高速性や並列性などの光の優位性を活かした FEC 技術によって、高速信号処理の性能向上に寄与できると考えている。

具体例の 1 つとして、前パラグラフ (1) に相当する FEC 符号化に関して、光信号処理を導入した際のイメージを Fig. 1 に示す。この技術により、光パスの一部区間において動的なノイズが発生した場合に、伝送信号に対して FEC 符号化の有無を切り替えることで雑音耐性を付与することが可能となる。

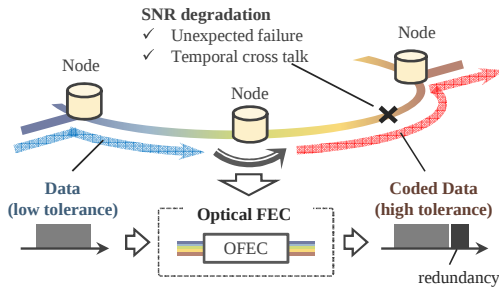


Fig. 1 Conceptual image of all-optical FEC coding scheme for dynamic noise-compensation technologies.

上記の課題に対して、全光 FEC 技術はこれまでにシンドローム復号を用いた検討 [6]、巡回符号を用いた検討 [7] がそれぞれ報告されている。しかしながら、これら技術は獲得可能な符号化利得が低く、実用に適さないという課題があった。そこで、過去の検討例と比較して獲得可能な符号化利得が高い点に着目し、全光処理での FEC 符号化動作の実現にあたって符号方式には畳み込み符号を、復号方式には Viterbi 復号を採用した。

以上を踏まえて、本研究では、高機能・低消費電力な光 NW システム技術を実現するための畳み込み符号化・Viterbi 復号化に関する光信号処理技術の確立に取り組む。より具体的な研究目的を以下に示す。

- 光符号化動作：

- (1) 全光畳み込み符号化回路の提案

- (2) 動作要件の明確化および動作実証

- (3) 性能限界の評価

- 光復号化動作：

- (1) Viterbi 復号に光信号処理を導入する手法を新規提案
- (2) 提案手法の性能評価および改善効果の評価
- (3) 性能限界の評価

本論文では、2 章にて動作原理を、3 章および 4 章にて Fig. 1 に示す光 FEC 符号化技術の検討内容を、5 章にて光復号処理における検討内容をそれぞれ述べる。

2. 動作原理

はじめに、畳み込み符号における符号化動作の原理を説明する。Fig. 2 に、実現対象とする (7, 5)₈ 畳み込み符号の電気回路図を示す。(7, 5)₈ 符号は生成多項式を $G(D) = (1 + D + D^2, 1 + D^2)$ とする。ここで "+" は XOR (exclusive OR) 演算を、"D" はシフトレジスタを表している。すなわち、入力ビット系列を $x = x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ と想定した時に、符号化信号 1 として $c_1 = x_t \oplus x_{t-1} \oplus x_{t-2}$ に、符号化信号 2 として $c_2 = x_t \oplus x_{t-2}$ に一致した規則性を与えることで、受信側での復号演算を実現させる。また、時刻 t における回路の出力信号は、 $X(t) = (c_1(t), c_2(t))$ として与えられる。

上記の通り、畳み込み符号は XOR 素子とシフトレジスタによって構成される。従って、符号化動作を光信号処理で実現するためには光 XOR 素子の高度な制御が必要となる。とくに、その性能はシフトレジスタ数 ν に紐づけられた拘束長 $K = \nu + 1$ によって決定される事が知られている。

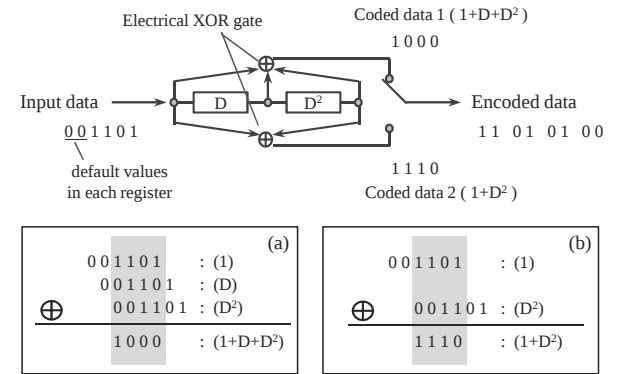


Fig. 2 Electrical FEC coding circuit: (a) operating principles of optical XOR gate in the case of three-input, (b) in the case of two-input.

つづいて、畳み込み符号における復号化動作の原理を説明する。復号動作は、受信した信号からシフトレジスタの内部状態を再現することで行われる。とくに、レジスタ状態の時間遷移を図示した Trellis パスを用いることで元の信号が推定される。畳み込み符号におけるこのような復号手法は Viterbi 復号と呼ばれる。

Viterbi 復号は、受信信号に最も一致する Trellis パスを探す復号法であり、ブランチメトリックとパスメトリックと呼ばれる二種類の距離計算に基づいて行われる。ブランチメトリック

とは受信信号と *Trellis* パスとの *Hamming* 距離で与えられ、ある時刻にて受信した信号がその時間範囲での候補 *Trellis* パスのどれに最も近いかを判断する指標となる。一方で、パスメトリックとは復号開始時点からのブランチメトリックの総和として与えられ、過去の *Trellis* パスに遡って推定する場合の指標となる。

Fig. 3 に、信号系列 "01 01 00 10 11 11" を受信した際の *Viterbi* 復号の動作例を示す。具体的なアルゴリズムは省略するが、この例では $t = 4$ までの *Trellis* パスは一つに収束しており、 $t = 4 \sim 7$ 間のパスは4つに分かれている。一般的に、過去の *Trellis* パスは一つに収束し、1つの *Trellis* パスは1つの符号語に一致するため、正しいパスを選択することで、受信信号に誤りが含まれている場合にも復号動作が行われる。

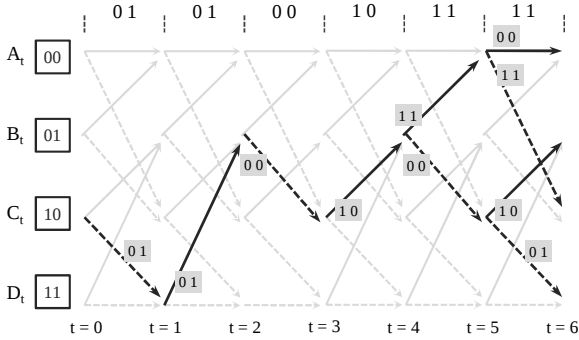


Fig. 3 Operational example of *Trellis* path, when "01 01 00 10 11 11" signal is received.

3. 光符号化動作に関する解析検討

動作対象とする $(7, 5)_8$ 畳み込み符号の光回路を Fig. 4 に示す。ここで、光 XOR 素子は DPSK 信号を対象とすること、位相整合条件の制御性などから、HNLF (Highly non-linear fiber) における四光波混合を選択した [8, 9].

回路へ入力された波長 λ_A である信号 A は 3 つに分岐され、うち 2 つの信号が HNLF における縮退四光波混合によって異なる波長に変換される ($\lambda_A \rightarrow \lambda_B$, $\lambda_A \rightarrow \lambda_C$). その後、生成多項式に一致するよう、信号 B (λ_B) および信号 C (λ_C) には 2-bit および 1-bit の遅延が加えられ、それぞれが HNLF からなる後段の光 XOR 素子に入力される。続く 2 つの HNLF では、四光波混合により 3 入力および 2 入力の XOR 演算がそれぞれ行われる。Fig. 4(b), 4(c) に光 XOR の動作原理を示す。上部 HNLF では 3 信号全てが HNLF に入力されることで、発生するアイドラ光には 3 信号間の XOR 演算結果が転写される ($\phi_{idler} = \phi_A \oplus \phi_B \oplus \phi_C$). また、下部 HNLF では信号 A, 信号 B, および波長 λ_C である CW 光が HNLF に入力され、アイドラ光に 2 信号間の XOR 結果が転写される ($\phi_{idler} = \phi_A \oplus \phi_B$). このように、2 入力および 3 入力間での XOR 演算信号を得ることで、所望の符号化動作を実現することができる。

3.1 光 FEC 符号化の動作波形

Fig. 5 に入力信号群とアイドラ信号の平均時間波形を示す。

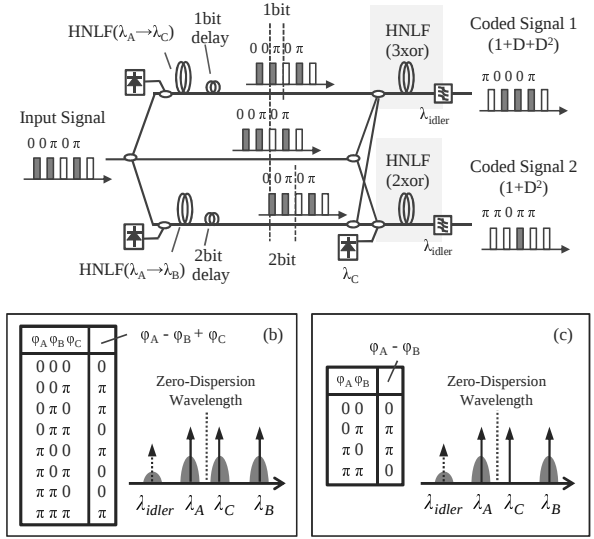


Fig. 4 Experimental setup for optical XOR gates: optical spectra of output from 3-input XOR gate (a) before HNLF, (b) after HNLF, and from 2-input XOR gate (c) before HNLF, and (d) after HNLF.

Fig. 5(a)-(g) はそれぞれが 3 入力 XOR 動作時および 2 入力 XOR 動作時に対応しており、波形の上側および下側ピークは 1 および 0 のビットパターンにそれぞれ対応している。アイドラ信号における符号が、同一タイミングでの入力信号間の XOR 演算結果に対応することから、光 XOR 動作を実現できていることが分かる。

動作解析に当たって、HNLF パラメータは、長さ 600 m、分散スロープ $0.006 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-2} \text{ km}^{-1}$ 、非線形係数 $10.8 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 、ゼロ分散波長 1550 nm に設定した。

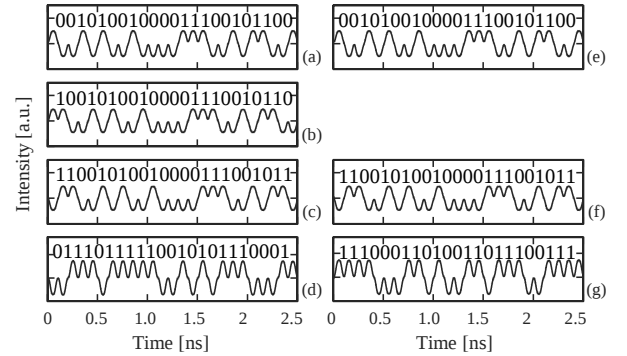


Fig. 5 Temporal waveforms of optical FEC coding operation: (a)-(d) signals for 3-input case, (e)-(g) signals for 2-input case.

3.2 BER 結果

Fig. 6 に、符号化信号の BER 測定結果を示す。黒丸、白四角、および白菱形は、それぞれ B2B 信号、符号化信号 1、および符号化信号 2 の BER 結果を示す。符号化信号 1 および 2 のパワーペナルティがほぼ無視できることから、提案回路が理論値である 4 dB の符号化利得を獲得可能であると解析的に示すことができた。

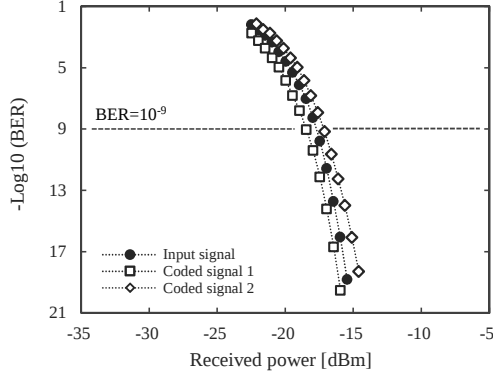


Fig. 6 Normalized Q-factor of optical XOR results plotted against HNLF length.

4. 光符号化動作に関する実験検討

光 FEC 符号化回路に関して動作実現を試みた。

4.1 光 XOR 動作の最適化検討

はじめに、光 XOR 動作に関して最適動作条件の導出を行った。

Fig. 7 に光 XOR 動作の測定系を示す。当該測定系では、中心波長をそれぞれ $\lambda_A=1547.5$ nm, $\lambda_B=1545.5$ nm, $\lambda_C=1550.5$ nm とする 3 つの TLD (Tunable laser diode) を光源とした。また、変調素子に PPG (Pulse pattern generator), LN-PM (Lithium Niobate phase modulator), および LN-IM (LN intensity modulator) を用いて、 $2^{23} - 1$ PRBS の系列を持つ 3 つの 10.72 Gb/s DPSK-RZ 信号を生成した。3 信号は独立に分岐され、信号間で任意の遅延が加えられた後に合波される構成とした。その後、EDFA (Erbium-doped fiber amplifier) を用いて 3 信号を 13 dBm まで増幅した後、HNLF へ入力した。

HNLF は、長さ 600 m, 分散スロープ 0.006 ps·nm⁻²km⁻¹, 非線形係数 10.8 W⁻¹km⁻¹, ゼロ分散波長 1529 nm のものを用いた。なお、当該 HNLF においてゼロ分散波長は C バンドを外れるものの、低い分散スロープにより 1550 nm 帯においても十分な非線形効率を有することを確認した。

Fig. 7(a)-(d) に HNLF 前後における信号群の光スペクトルを示す。(a),(b) が 3 入力 XOR 動作時の光スペクトルであり、(c),(d) が 2 入力動作 XOR の光スペクトルである。どちらの場合においても非線形光学効果により、入力信号以外の波長においてアイドラ光が発生している様子を確認できる。ここで、 $\lambda_{idler}^{-1} = \lambda_A^{-1} - \lambda_B^{-1} + \lambda_C^{-1}$ に相当するアイドラ光が、XOR 結果が転写される位相条件をもつため、光学フィルタを用いて切り出し、FSR (Free spectrum range) 10.72 GHz の 1-bit 遅延干渉計とフォトディテクタを用いて検波を行った。

4.1.1 ファイバ長依存性評価

一般に、アイドラ光の発生効率は HNLF 長と入力光強度によって決定することが知られている。そのため、高品質な光 XOR 動作の実現を目指し、HNLF 長を変化させた際のアイドラ信号 Q 値の推移を評価した。HNLF 長を 100~1200 m の範囲で変化させた際の、アイドラ信号における規格化 Q 値の変化を、測定および数値解析により評価した。評価に用いた Q

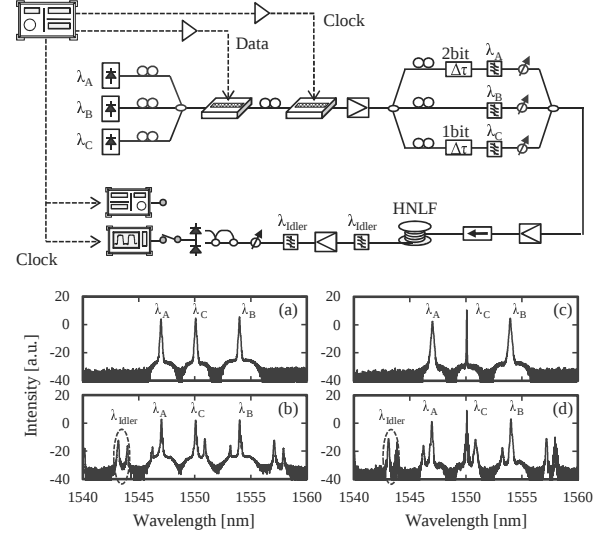


Fig. 7 Experimental setup for optical XOR gates: optical spectra of output from 3-input XOR gate (a) before HNLF, (b) after HNLF, and from 2-input XOR gate (c) before HNLF, and (d) after HNLF.

値は、

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (1)$$

で定義され、式中 μ , σ は信号の平均強度、標準偏差を示し、添え字は論理レベルを示すものとした。また、Fig. ?? に数値解析によって得られた規格化 Q 値の計算結果を併せて示す。このとき、計算に用いた HNLF の物理パラメータは測定に用いたものと同一に設定した [10]。

測定結果および解析結果において、HNLF 長の増加と共に Q 値が上に凸の曲線を描く様子が確認された。短 HNLF 領域におけるこの傾向は、HNLF 長の増加と共にアイドラ発生効率が上昇し、Q 値が向上することから説明することができる。同様に、長 HNLF 領域での傾向は、アイドラ発生効率が一定値以上に大きくなることで SPM (Self phase modulation) の影響が無視できなくなり、波形劣化が生じて Q 値が低下したのだと理解することができる。

4.1.2 強度依存性評価

つづいて、HNLF 長を 600 m に固定し、入力光強度を変化させた際のアイドラ信号 Q 値の推移を評価した。2 入力 XOR 動作時において、CW 光の光強度を固定値とし、信号 A および信号 B 信号の光強度をそれぞれ 5~19 dBm の範囲で変化させ、出力信号 Q 値の評価を行った。規格化 Q 値の測定および解析結果は、HNLF 長依存性と同様に上に凸の曲線が得られた様子が確認できた。最適条件はどちらの信号強度も等しい条件であり、その際の入力信号強度は 13 dBm であった。

さらに、3 入力 XOR 動作において、信号 A および信号 B の信号強度を 13 dBm に固定し、信号 C の信号強度を 5~19 dBm に変化させた際に出力信号 Q 値の評価を行った。こちらにおいても同様の凸傾向が得られ、最適条件は 3 つの信号がそれぞれ等しい条件であることが分かった。

4.2 光 FEC 符号化動作の実証検討

光 XOR 動作における最適条件の結果に基づいて、生成多項式を $G(D) = (1 + D + D^2, 1 + D^2)$ とする光 FEC 符号化の動作実現を検討した。Fig. 8 に光 FEC 符号化動作の測定系を示す。当該測定系では、TLD, PPG, LN-PM, および LN-IM により、中心波長 $\lambda_A=1547.5$ nm とする $2^{23} - 1$ PRBS 10.72 Gb/s DPSK-RZ 信号の生成を行った。

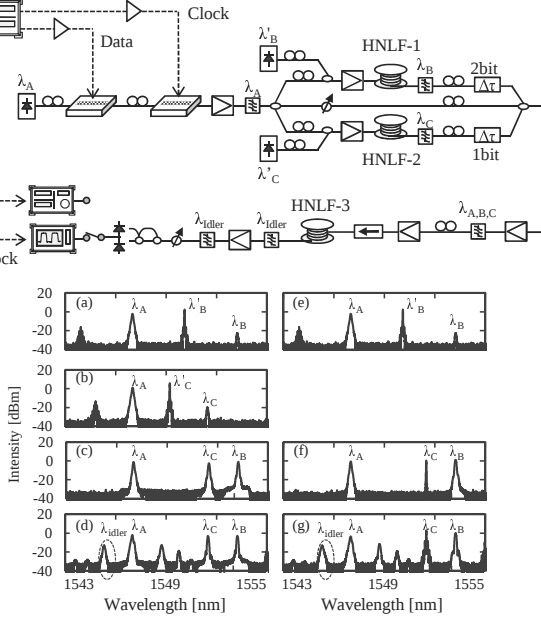


Fig. 8 Experimental Setup for all-optical FEC coding scheme: The measured spectra (a) after HNL-1, (b) after HNL-2, (c) before HNL-3, and (d) after HNL-3 for coded signal 1, and the spectrum (e) after HNL-1, (f) before HNL-3, and (g) after HNL-3 for coded signal 2.

生成された信号 A は 3 つに分岐され、うち 2 つの信号が HNL-1 および HNL-2 における縮退四光波混合によって異なる波長に変換された。Fig. 8(a)-(d) に示すのは、符号化信号 1 ($1 + D + D^2$) を得る際の各 HNLF における光スペクトルの遷移である。HNL-1 では信号 A とポンプ光 ($\lambda'_B=1550.5$ nm) によって $\lambda_B=1553.5$ nm の波長変換光が発生する様子が、HNL-2 ではポンプ光 ($\lambda'_C=1549.8$ nm) によって $\lambda_C=1552.0$ nm の波長変換光が発生する様子がそれぞれ確認できる。その後、生成多項式に一致するよう、信号 B (λ_B) および信号 C (λ_C) に 2-bit および 1-bit の遅延が加えられ、HNL-3 に 3 信号全てが入力される構成となっている。このようにして符号化信号 1 が得られる。

Fig. 8(e)-(g) に示すのは、符号化信号 2 ($1 + D^2$) を得る際の各 HNLF における光スペクトルの遷移である。この場合には、 λ_C は CW 光で良いため、 $\lambda_A \rightarrow \lambda_C$ の変換は必要とされない。HNL-1 では信号 A とポンプ光 ($\lambda'_B=1550.5$ nm) によって $\lambda_B=1553.5$ nm の波長変換光が発生する様子が確認できる。その後は、生成多項式に一致するよう遅延調整が行われ、さらに HNL-3 に 2 信号と CW 光が入力されることで符号化信号 2 が得られる。このような操作を通じて、光処理にて所望の

FEC 符号化動作が達成される。

前節での最適動作条件に基づき、HNLF 長は 600 m に設定した。また、入力光強度は全ての信号において等しくなるよう EDFA 前段にて 8 dBm に設定した。Fig. 8(d) および (g) において、 $\lambda_{idler}^{-1} = \lambda_A^{-1} - \lambda_B^{-1} + \lambda_C^{-1}$ に相当するアイドラ光を光学フィルタを用いて切り出し、FSR 10.72 GHz の 1-bit 遅延干渉計とフォトディテクタを用いて検波を行った。検波後の信号は、オシロスコープを用いて動作波形を確認すると共に、エラーディテクタを用いて BER の評価を行った。

4.2.1 動作波形の評価

Fig. 9 に提案回路において得られた符号化信号の時間波形を示す。Fig. 9(a), 9(b) は、それぞれ符号化信号 1 および符号化信号 2 に対応しており、波形の上側および下側ピークは 1 および 0 のビットパターンにそれぞれ対応している。また、各符号化信号における符号間に対応から、入力信号間の XOR 演算結果がアイドラ信号に転写されていることが分かる。これによって、DPSK 信号を対象とした光 FEC 符号化動作を実験的に実証することができた。

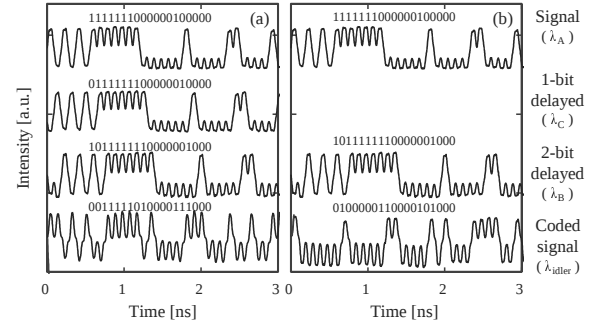


Fig. 9 Measured waveforms of optical (7,5)₈ coding scheme: (a) coded signal 1, (b) coded signal 2.

4.2.2 符号化利得の評価

最後に、提案回路にて獲得できる符号化利得を導出するために、回路のパワーペナルティを評価した。Fig. 10 に、符号化信号の BER 測定結果を示す。黒丸、白四角、および白菱形は、それぞれ B2B 信号、符号化信号 1、および符号化信号 2 の BER 結果を示す。2 つの符号化信号の BER 曲線は、 $BER \geq 10^{-8}$ の領域においてはほぼ B2B 信号と同じように変化し、より低いエラーレート領域に向かうにつれて飽和する傾向を示した。なお、B2B 信号に対するパワーペナルティは、 $BER \geq 10^{-8}$ では 0.0 dB、 $BER = 10^{-9}$ では 0.5 dB であった。

また、Fig. 10 に、理論的に得られる復号後 BER 曲線を併せて示す。復号後の BER は、遅延検波を行うことから

$$BER_{dec} = \frac{1}{2} \exp \left\{ d_{free} \cdot R \cdot \left(-\frac{E_b}{4N_0} \right) \right\} \quad (2)$$

で与えられる。ここで d_{free} および R は最小自由距離と符号化率であり、今回用いた符号方式において $d_{free} = 5$ および $R = 1/2$ となる。得られた BER 曲線から、 $BER \geq 10^{-8}$ において 4.0 dB、 $BER = 10^{-9}$ において 0.5 dB の符号化利得が得られることを示した。

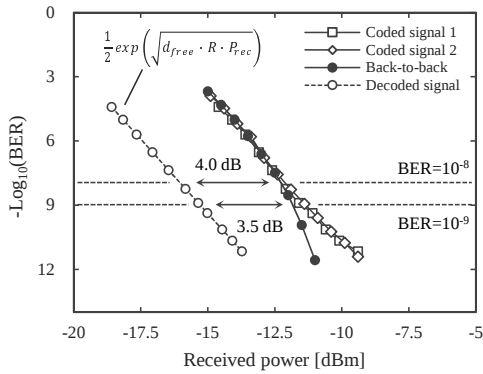


Fig. 10 Power penalty measurements

5. 光符号化動作に関する理論検討

光 FEC 符号化回路に関してその性能限界を評価した。

5.1 性能限界評価

今回対象とした $(7,5)_8$ 符号よりも強力な畳み込み符号を用いた際に達成しうる、最大の符号化利得を理論的に評価した。一般に、強力な符号ほど XOR 素子への入力信号数が増えることが知られている。一方で、提案手法は光 XOR 素子における三次の非線形効果（四光波混合）を用いるため、1つの XOR あたりの最大入力信号数は3つに限定される。これを超えると XOR 素子の多段接続が必要となるが、これによってパワーペナルティが発生するため、性能向上と性能劣化はトレードオフの関係となる。

そこで、これらの関係を定量評価するために、任意の符号における符号化利得の理論上界を導出した。Fig. 11 に、拘束長 $K = 2 \sim 14$ の異なる符号において求めた BER 曲線をまとめて示す [11, 12]。Fig. 11 にて、黒丸を伴う実線は基準となる BER 曲線を示し、通常の実線は理論式によって与えられる BER 曲線を示す。同図では、拘束長 K が大きい符号ほど同一 BER を達成するのに必要な E_b/N_0 が小さくすむことが分かる。従って、拘束長 K の増加に対して符号化利得は増加傾向になると分かる。

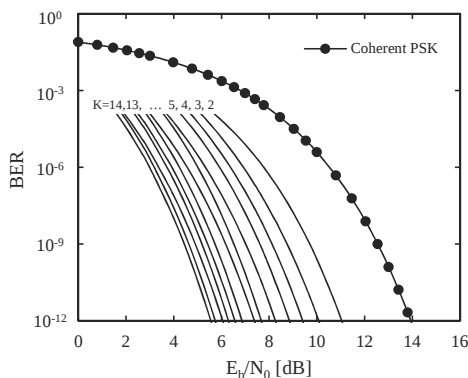


Fig. 11 Calculated BER curves at various constraint lengths K from 2 to 14

Fig. 11 を用いて導出した $BER = 10^{-9}$ における符号化利得

を拘束長 K に対して評価した。この時、符号化利得の理論上界は拘束長 K に対して対数的に増加する傾向を確認した。一方で、XOR 多段数に対して要求されるパワーペナルティを拘束長 K に対して評価した。この時、パワーペナルティは拘束長 K に対して緩やかに増加する傾向を確認した。両者の差分が符号化利得となり、最大の符号化利得は拘束長 $K = 14$ の際に 7.2 dB 程度であることがわかった。

6. 光復号化動作に関する解析検討

復号化動作に関して光信号処理の導入を試み、その性能を解析的に評価した。

6.1 光電融合型 Viterbi 復号

受信側での Viterbi 復号における計算量削減を目的として、既存の電気処理で行われる復号動作において光信号処理の導入を試みた。Fig. 12 に提案する Viterbi 復号のコンセプトを示す。既存の Viterbi 復号では、受信した光信号を光電変換した後、電気段で Viterbi アルゴリズムが実行される。これに対して、提案する Viterbi 復号ではブランチメトリック計算に着目し、任意の Trellis パスとの Hamming 距離の演算を光信号処理にて光電変換の前段にて並列実行する。これによって、後段での電気処理を省き総演算量の削減を狙う。

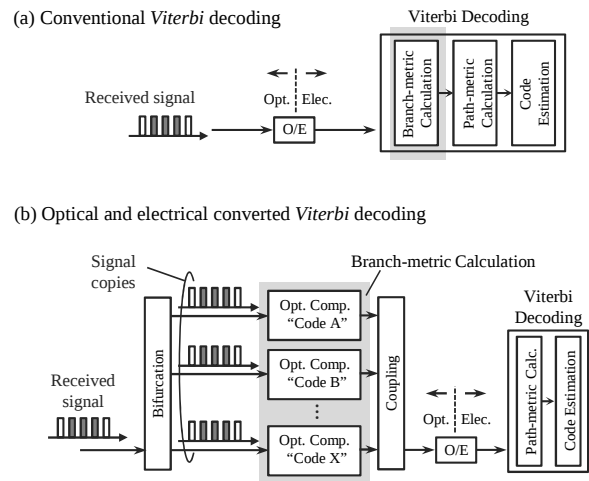


Fig. 12 Conceptual image of Viterbi decoding: (a) conventional Viterbi decoding, (b) optical and electrical converted Viterbi decoding.

6.2 光比較器

前章にて述べたように、提案手法では Hamming 距離演算を光信号処理にて行う。これは任意の符号語間での比較演算を光処理にて実現するものであり、本論文では光比較器と呼ぶ。

光比較器の動作原理に関して説明する。光比較器は、複数シンボルからなる光信号を時間的に1つに重畳し、そのコンスタレーションから信号系列を推定するものである。その際に、コンスタレーションから信号系列を一意に識別するために、任意の符号語をユニークなコンスタレーションに変換する操作を必要とする。とくに、提案する光比較器は $(7,5)_8$ 符号の性質に基づいて3シンボルからなる QPSK 信号を想定しているため、

ユニークなコンスタレーション条件として3シンボルそれぞれを"00"座標に変換する操作が必要とされる。

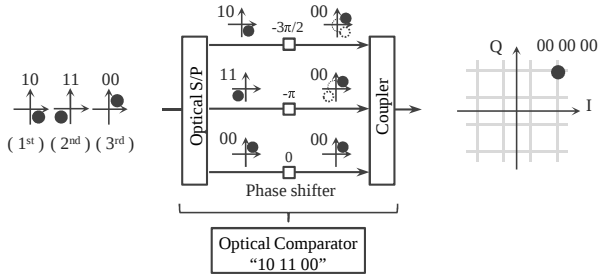


Fig. 13 Configuration of optical comparator designed for "10 11 00" signal.

光比較器の構成を Fig. 13 に示す。光比較器は、光シリアル・パラレル (S/P) 変換器、位相シフタ、および光カプラから構成される。ここで、位相シフタは、任意の符号系列に対して、各シンボルを“00”座標への変換を与えるものである。Fig. 13 は“10 11 00”系列に対して機能する光比較器であり、信号系列“10 11 00”が入力された際に3シンボルすべてが“00”座標に変換される。結果、3つの“00”シンボルが合波された、複素平面上で“00 00 00”コンスタレーションをもつ合波信号が出力される。

光比較器の動作例を示す。上記の思想に基づいて設計した4つの異なる光比較器において、共通の信号系列を入力した場合の具体的な動作例を Fig. 14 に示す。比較器の定義から、入力信号と比較器の系列が一致する場合においては、出力信号は“00 00 00”コンスタレーションに配置される (Fig. 14 - #1)。一方で、Fig. 14 から、入力信号と比較器の系列が異なるほど、“00 00 00”コンスタレーションから遠い位置に配置されていくことが分かる (Fig. 14 - #2 - #4)。すなわち、入力信号と比較器の系列とのハミング距離が、出力信号の複素平面上でのユークリッド距離に反映されているといえる。このようにして、光比較器を用いることで光領域での比較演算が可能となる。

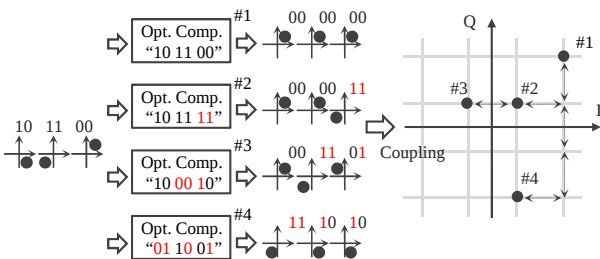


Fig. 14 Operative example of optical comparators

6.3 光電融合型 Viterbi 復号の解析的性能評価

光比較器を用いた光電融合型 Viterbi 復号に関してその性能を解析的に評価した。はじめに、光比較器の正常動作を解析的に確認した。(7,5)₈ 符号において拘束長 $K=3$ に対応する時間間隔での、候補となる32個の Trellis パスに一致する光比較器に対して、共通の信号系列を入力した場合における32

個のコンスタレーションを評価した。入力信号を“00 11 01”とし、SNR を 10 dB とした際の得られたコンスタレーションを Fig. 15 に示す。

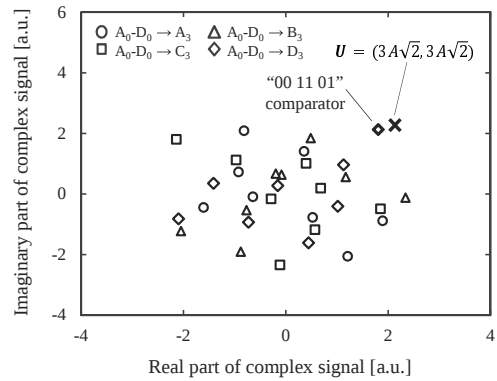


Fig. 15 Operating example of optical and electrical converted Viterbi decoding scheme : plotted results correspond to the optical comparators which are designed all trellis paths from A_0-D_0 to A_3-D_3 .

Fig. 15 から、入力信号“00 11 01”と系列を一緒にする比較器のコンスタレーションが“00 00 00”コンスタレーションの最近傍に位置することから、比較器のコンスタレーション配置から信号系列を推定できることがわかった。

つづいて、光電融合型 Viterbi 復号において復号性能を BER 解析によって評価した。解析により得られた BER 結果を Fig. 16 に示す。Fig. 16 には理論上得られる BER 曲線を Viterbi 復号の有無にて描き分けてあり、その上に今回の解析結果をプロットしている。その結果から、提案する光電融合型 Viterbi 復号は理論値とほぼ一致することがわかった。また、 $BER=10^{-4}$ の条件において理論値である 4 dB の符号化利得が得られるとわかった。

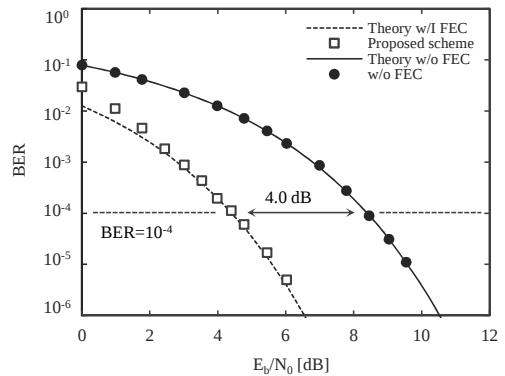


Fig. 16 光 FEC 符号化回路の BER 則系結果

復号処理における電氣的な計算ステップ数を、既存 Viterbi 復号と提案 Viterbi 復号とで比較した。結果を、Table 1 に示す。Table 1 より、提案する光電融合型 Viterbi 復号は計算ステップ数を約 4/5 倍に削減できることがわかった。

6.4 性能限界評価

今回対象とした (7,5)₈ 符号よりも強力な畳み込み符号を用

Tab. 1 Calculation steps with $2^{23} - 1$ PRBS data stream

Proposed	Conventional	Ratio
162688116	201326544	0.81

いた際の、光電融合型 *Viterbi* 復号の計算ステップ削減効果を評価した。一般に、強力な符号ほど拘束長 K が大きくなるため、シフトレジスタの状態数が大きくなる。その結果、候補となる *Trellis* パスが指数的に増大することがわかっている。

前節までにおいて述べられた光比較器では、その符号系列 K' が拘束長 K に一致するように設計され用いられてきた。その場合には、拘束長 K の増加に対して比較器数が指数的に増加し、メトリック計算がスケールしないという問題がある。とくに、拘束長 $K \geq 4$ の条件では、既存 *Viterbi* 復号に対して提案 *Viterbi* 復号の方が計算量が多くなることがわかっている。

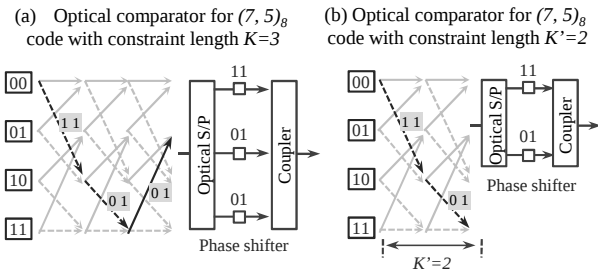


Fig. 17 Detail of calculation step with constraint length of K' : (a) conventional *Viterbi* decoding, (b) proposed *Viterbi* decoding.

そこで、光比較器における符号系列 K' を拘束長 K と独立に設計する手法を提案した。新設計手法の考え方を Fig. 17 に示す。Fig. 17 (a) は従来の設計手法であり、(b) は新規設計手法である。本例では、 $(7,5)_8$ 符号を対象としており、従来手法では拘束長 $K = 3$ に一致するように S/P 変換での分岐数が 1:3 に設計されている。これに対して、新規手法では拘束長 K よりも小さい $K' = 2$ に一致するよう分岐数が 1:2 に設計されている。これにより、任意の K に対して K' を一定にすることができ、*Trellis* パスの増大を避けることが可能となる。

最後に、新規設計手法による計算ステップの削減効果を理論的に評価した。従来手法と新規手法を用いた際の、既存 *Viterbi* 復号と提案 *Viterbi* 復号とでの計算ステップ比を求めた。その結果、拘束長 $K \geq 4$ において計算比が 1 を超えることから、計算量が拘束長に対してスケールしない従来の課題を確認した。これに対して、新規手法では拘束長の変化に対して計算比がほぼ一定となった。とくに、 $K' = 2$ の条件において計算比は最小となり、その際の削減効果は従来 *Viterbi* 復号の 3/4 倍であるとわかった。

7. 結 論

3 章～5 章にて得られた結論を章毎に以下にまとめる。

7.1 光符号化動作に関する解析検討

$(7,5)_8$ 畳み込み符号を用いた光 FEC 符号化回路を提案し、

その動作性能を数値解析により評価した。回路の出力信号の時間波形から、10 Gb/s での正常動作を解析的に確認した。また、BER 評価からパワーペナルティが十分に小さいことを確認し、理論値である 4 dB の符号化利得が獲得可能であることを示した。

7.2 光符号化動作に関する実験検討

$(7,5)_8$ 畳み込み符号を用いた光 FEC 符号化回路を構築し、その動作を実験的に実証した。動作速度 10 Gb/s にて符号化系列に一致する出力信号を得たことで、DPSK 信号を対象とした光 FEC 符号化動作を実験的に示した。また、BER 評価から、 $BER = 10^{-8}$ において 4.0 dB、 $BER = 10^{-9}$ において 0.5 dB の符号化利得が得られることを示した。さらに、より強力な符号を用いた場合に獲得可能な符号化利得として 7.1 dB が得られることを示した。

7.3 光復号化動作に関する解析検討

既存の *Viterbi* 復号における比較演算を光信号処理にて並列実行する、光電融合型 *Viterbi* 復号を新たに提案し、その動作性能を解析的に評価した。とくに、任意の *Trellis* パスとの *Hamming* 距離の演算を光処理にて実現する光比較器を提案し、その動作原理を示すとともに、*Viterbi* 復号において用いた際の正常な動作を確認した。また、光比較器を用いた場合の光電融合型 *Viterbi* 復号性能を解析的に評価し、 $BER = 10^{-4}$ の条件において理論値と一致する 4 dB の符号化利得が得られることを示した。その際に、既存 *Viterbi* 復号と比較して計算ステップ数を 4/5 倍に低減できることを示した。

拘束長 K の増加に対して、 K と非依存な K' を用いて比較器を設計する手法を新規提案し、その条件において計算量削減効果が拘束長 K の増加に対してスケールすることを示した。また、 $K' = 2$ の比較器を用いることで、計算ステップ数を 3/4 倍に低減できることを示した。

文 献

- [1] R. Gallager, “low-density parity-check codes,” *IRE Trans. Inform. Theory*, vol. 8, no. 1, pp. 21–28, Jan. 1962.
- [2] D. Chang, F. Yu, Z. Xiao, N. Stojanovic, F. N. Hauske, Y. Cai, C. Xie, L. Li, X. Xu, and Q. Xiong, “LDPC convolutional codes using layered decoding algorithm for high speed coherent optical transmission,” *Proc. Conference on Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, 2012, pp. 1–3.
- [3] K. Sugihara, Y. Miyata, T. Sugihara, K. Kubo, H. Yoshida, W. Matsumoto, and T. Mizuoichi, “A spatially-coupled type LDPC Code with an NCG of 12 dB for optical transmission beyond 100 Gb/s,” *Proc. Conference on Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, 2013, pp. 1–3.
- [4] “TOP500 LISTS,” Internet: <http://www.top500.org/lists/>
- [5] “2013 International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS),” Internet: <http://www.semiconductors.org/cli entuploads/ResearchTechnology/ITRS/2013/2013Overview .pdf>, 2016.
- [6] M. Suzuki and H. Uenohara, “Investigation of all-optical error detection circuit using SOA-MZI-based XOR gates at 10 Gbit/s,” *Electron. Lett.*, vol. 45, no. 4, pp. 224–225, Feb. 2009.
- [7] Y. Aikawa, S. Shimizu, and H. Uenohara, “Demonstration

of All-Optical Divider Circuit Using SOA-MZI-Type XOR Gate and Feedback Loop for Forward Error Detection,” *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 29, no. 15, pp. 2259–2266, Aug. 2011.

- [8] J. Wang, Q. Sun, and J. Sun, “All-optical 40 Gbit/s CSRZ-DPSK logic XOR gate and format conversion using four-wave mixing,” *J. Opt. Express*, vol. 17, no. 15, pp. 12555–12563, Jul. 2009.
- [9] M.P. Fok and P.R. Prucnal, “Polarization Effect on Optical xor Performance Based on Four-Wave Mixing,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, no. 15, pp. 1096–1098, Aug. 2010.
- [10] Yohei Aikawa, and Hiroyuki Uenohara, “Numerical Investigation of All-Optical Forward-Error-Correction Coding Scheme With Convolutional Code,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 2, Article #0600911, Apr. 2016.
- [11] A. J. Viterbi, “Convolutional Codes and Their Performance in Communication Systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 19, no. 5, pp. 751–772, Oct. 1971.
- [12] Y. Yasuda, Y. Hirata, and A. Ogawa, “Bit Error Rate Performance of Soft Decision Viterbi Decoding,” *IEICE TRANSACTIONS*, vol. E64, no. 11, pp. 700–707, Nov. 1981.

本研究に関する発表

学術論文

1. Yohei Aikawa, and Hiroyuki Uenohara, “Demonstration of Optical FEC Coding Scheme with Convolutional Code Consisting of a Single Source,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 29, no. 1, pp.165–168, Jan. 2017.
2. Yohei Aikawa, and Hiroyuki Uenohara, “Proposal and analytical investigation of optical comparator for optical and electrical converted Viterbi-decoding scheme,” *Electronics Letters*, vol. 52, no. 16, pp.1397–1399, Aug. 2016.
3. Yohei Aikawa, and Hiroyuki Uenohara, “Numerical Investigation of All-Optical Forward-Error-Correction Coding Scheme With Convolutional Code,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 2, Article #0600911, Apr. 2016.

国際学会

1. Yohei Aikawa, and Hiroyuki Uenohara, “Experimental Demonstration of All-Optical FEC Coding Scheme with Convolutional Code using Single Signal Source,” *42nd European Conference and Exhibition on Optical Communication*, W.4.P1.SC3.20, Dusseldorf (Germany), Sep. 2016 (Poster)
2. Yohei Aikawa, and Hiroyuki Uenohara, “Experimental Demonstration of All-Optical FEC Coding Scheme with Convolutional Code,” *21th Optoelectronics and Communications Conference / International Conference on Photonics in Switching 2016*, MF2-4, Niigata (Japan), Jul. 2016 (Oral)
3. Yohei Aikawa, and Hiroyuki Uenohara, “A Proposal and Analytical Investigation of Optical Comparison-Operation Scheme for Viterbi Decoding,” *Asia Communications and Photonics Conference 2015*, AM3F.2, Hong Kong (China), Nov. 2015 (Oral)
4. Yohei Aikawa, and Hiroyuki Uenohara, “Analytical Investigation of All-Optical FEC Coding Scheme with Convolutional Code,” *International Conference on Photonics in Switching 2015*, 259-261, Florence (Italy), Sep. 2015 (Oral)
5. Yohei Aikawa, and Hiroyuki Uenohara, “Analytical Investigation of All-optical XOR operation Based on FWM in HNLF with DPSK Modulated Signals,” *International Nano-Optoelectronics Workshop 2015*, Tokyo (Japan), Aug. 2015 (Poster)

国内学会

1. 相川洋平, 植之原裕行, “畳み込み符号を用いた光誤り訂正符号化動作の実証検討”, 2016 年光通信システム 10 月研究会, OCS2016-53, 宮崎, Oct. 2016. (口頭)
2. 相川洋平, 植之原裕行, “全光符号化技術の実現に向けた光 XOR 回路の動作特性の実験的検証”, 2016 年電子情報通信学会総合大会, C-3-16, 福岡, Mar. 2016. (口頭)
3. 相川洋平, 植之原裕行, “光比較器を用いた Viterbi 復号動作における解析的性能評価”, 第 29 回光通信システムシンポジウム, P-16, 三島, Dec. 2015. (ポスター)
4. 相川洋平, 植之原裕行, “光比較器を用いた Viterbi 復号動作における解析的動作実証”, 2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-28, 仙台, Sep. 2015. (口頭)
5. 相川洋平, 植之原裕行, “畳み込み符号を用いた全光符号化回路の解析的動作実証”, 2015 年電子情報通信学会総合大会, B-10-65, 草津, Mar. 2015 (口頭)

特許

1. 2015-186029 号, 「光符号化技術, および光復号化装置」, 相川洋平, 2015 年 10 月

謝辞

本研究を進めるにあたって多大なるご指導・ご鞭撻を賜った植之原 裕行 教授に感謝致します。前職を辞め博士課程に戻ると決断した際に快く受け入れて頂いたことで、人生の選択肢が広がりました。心より感謝しております。また、本研究をまとめるにあたり、有益なご助言を頂いた、小山 二三夫 教授、浅田 雅洋 教授、遊部 雅生 教授、宮本 智之 准教授、渡辺 正裕 准教授に感謝致します。

輪講を通じて有益なご助言を頂いた、坂口 孝浩 助教授、顧 曉冬 研究員、中濱 正統 助教授に深く感謝致します。皆さんの適切なご助言により、研究が順調に進みました。

また、短い期間であります米国滞在の際に研究員として受け入れて頂いた Prof. Yoo, SJ Ben, Dr. Roberto Proietti に感謝致します。

さらに、光通信研究会などにおいて様々なご助言を頂いた、末松 安晴 名誉教授、伊賀 健一 名誉教授、小林 功郎 名誉教授、荒井 滋久 教授、浅田 雅洋 教授、國分 泰雄 教授、馬場 俊彦 教授、渡辺 正裕 准教授、西山 伸彦 准教授、荒井 昌和 准教授、雨宮 智宏 助教授に感謝致します。

また、学会活動を通して意見交換を行った、小川 憲介 上席研究員、中川 剛二 研究員、小西 毅 准教授、五十嵐 浩司 准教授、山崎 裕史 研究員、谷澤 健 研究員、清水 智 研究員、森 崇嘉 研究員、田口 勝久 研究員、若山 雄太 研究員、近藤 圭祐 研究員に感謝致します。

研究生活においてサポートして頂いた、吉田 ひろみ 氏、千葉 とみ江 氏、山川 英明 研究員、Hamed Dalir 研究員、沼田 雅之 研究員、Hameeda Ibrahim 研究員、Ahmed Hassan 研究員、井上 俊也 氏、菊池 麻子 氏、鈴木 絢子 氏、住本 裕一 氏、高橋 雄太 氏、田辺 賢司 氏、角田 健 氏、柳館 優輝 氏、魏 徹 氏、Hu Shanting 氏、押田 将平 氏、小山 俊康 氏、賀川 拓用 氏、小林 拓貴 氏、笹子 寛貴 氏、鈴木 崇裕 氏、鈴木 陽平 氏、谷口 寛樹 氏、森 裕之 氏、森脇 翔平 氏、荒牧 恵悟 氏、池田 拓磨 氏、北本 智士 氏、小森 雄貴 氏、齋藤 季 氏、須原 壮 氏、土岡 弘明 氏、森田 晃平 氏、小林 卓矢 氏、丸山 彰 氏、頼 映佑 研究員、許 在旭 氏、國貞 彰吾 氏、竹田 亮平 氏、平林 祐紀 氏、熊本 知優 氏、志村 京亮 氏、須田 義久 氏、永沼 友浩 氏、三村 正樹 氏、西村 駿 氏、山崎 将志 氏に感謝致します。

また、Fund Raise イベントを通して関った多くの方々、TEDx イベントを通して関わった多くの方々、バスケットを通じて関わったの方々、前職の同期、地元の同期、常に良い刺激をくれる大学同期に感謝致します。

最後に、日頃より温かく見守ってくれている、親戚の皆、兄家族、父、亡き母に感謝致します。なにより、前職を辞めて新しい人生を歩むことを優しく後押ししてくれた 妻 麻莉子 に心から感謝致します。