

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06424

研究課題名(和文) 多値変調光信号の長距離伝送のためのコヒーレント光信号中継

研究課題名(英文) Long-distance coherent repeated transmission of multivalued modulated optical signals

研究代表者

松本 正行 (Matsumoto, Masayuki)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：10181786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、長距離多値変調光信号伝送の雑音抑制と非線形劣化補償のために、光ホモダイン検波と小規模のアナログ電気信号処理からなる光信号再生器と、光イントラダイン検波と光変調器の組合せによる位相共役光発生器を伝送路中に分散的に配置することを提案し、高速アナログ デジタル変換や大規模のデジタル信号処理を用いない多値変調光信号再生中継伝送の実現を目指した。

具体的な研究項目として、ホモダイン信号再生における位相同期局発振光生成の新たな方法を提案しその有効性と問題を明らかにするとともに、イントラダイン光電気変換型位相共役器の分散および非線形劣化補償の効果を確認する実験を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

基幹伝送系に導入が進みつつあるデジタルコヒーレント光伝送方式は、分散補償などの信号処理を電気領域において柔軟に行えるという利点をもつ一方、信号処理遅延や消費電力が大きいという欠点をもつ。伝送路中に複数回設置されることになる信号再生中継装置においてこの方式を採用する場合、これらの欠点が問題となる。本研究では、高速アナログ デジタル変換や大規模のデジタル信号処理に頼らない、シンプルな信号再生中継装置の実現を目指した。

研究成果の概要(英文)：This study proposes a simple scheme for extending transmission distance of multivalued optical signals without resorting to high-speed analog-to-digital conversion and large-scale digital signal processing. The scheme uses an opto-electrical signal regenerator consisting of optical homodyne detection together with analog electrical signal processing and an intradyne opto-electrical signal phase conjugator in combination.

In this project, a novel method of generating optically phase-locked local oscillator light for homodyne detection is proposed and studied, and dispersion and nonlinearity compensation performance of an intradyne opto-electrical signal conjugator is demonstrated.

研究分野：光通信工学

キーワード：光ファイバ通信 コヒーレント光通信 光位相共役 光信号再生

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

動画配信、クラウドサービス、ウェブ閲覧、ソーシャルネットワーキングサービス、M2M通信（機器間情報通信）などで取り扱う情報は増大の一途をたどっており、情報伝送の基幹を担う光ファイバ通信の性能向上の要求は非常に強い。近年、デジタルコヒーレント伝送技術が実用化され、ファイバ1本あたりの情報伝送速度が格段に増大した。しかしながら、デジタルコヒーレント伝送において必要不可欠なデジタル信号処理が消費する電力は大きく、より低消費電力でシンプルな長距離高速信号伝送方式を開発する機運もある。本研究では、高速デジタル-アナログ変換やデジタル信号処理を用いない長距離高速光信号中継伝送方式の研究を行う。

### 2. 研究の目的

多値変調光信号伝送の長距離化を目的としてコヒーレント光信号再生中継の研究を行う。本研究では、雑音抑制と非線形劣化補償のために、光ホモダイン検波と小規模のアナログ電気信号処理からなる多値光信号再生器と、光イントラダイン検波と光変調器の組合せによる位相共役光発生器を伝送路中に分散的に配置することを提案し、この方法によって信号伝送距離を拡大できることを明らかにする。この取り組みにより、高速アナログ-デジタル変換や大規模のデジタル信号処理を用いない、信号劣化補償性能に優れたシンプルな多値変調光信号再生中継伝送の実現を目指す。

### 3. 研究の方法

信号再生や位相共役などの信号処理方式は、全光学的な方式と光および電気信号処理を併用する方式に大別できる。本研究では、強い信号処理効果を小型・低電力消費の装置で実現することができ、高次変調光信号を処理するための操作性や柔軟性に富む後者の光電気ハイブリッド型信号処理方式を採用する。このような光電気変換型コヒーレント信号処理手法を用いて高次変調光信号伝送の長距離化を図る。具体的には、

- (1) キャリア成分を持たない高次変調光信号からの光学的な光キャリア抽出
- (2) コヒーレント信号再生器と光位相共役器の作成
- (3) 光電気変換型信号再生器と位相共役器を併用した長距離波長分割多重高次変調光信号伝送システム的设计

を行う。

### 4. 研究成果

- (1) キャリア成分をもたない四位相偏移変調 (QPSK) 光信号からのキャリア抽出

デジタル信号処理によるキャリア位相推定を行わない光ホモダイン受信では、信号キャリアと位相同期した局部発振光 (L0 光) を生成することが必要である。本研究では、QPSK などの多値位相変調が施され光源のキャリア成分が消失した光信号を受信した場合のキャリア抽出と局部発振光生成を試み、2 値の位相変調 (BPSK) の場合との比較をおこなった。図 1 にキャリア抽出とホモダイン検波の回路を示す。図 1 では、検出した同相位相成分と直交位相成分によって

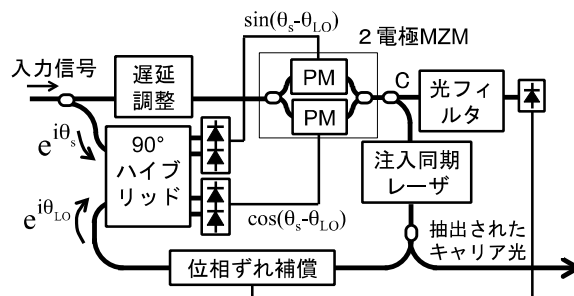


図1 キャリア抽出／ホモダイン検波回路

2 電極マツェンダー変調器 (MZM) を駆動し、信号の位相データを消去してキャリア成分を回復する。駆動電気信号と変調される光信号のタイミングが一致している場合、2 電極 MZM の上側位相変調器 (PM) および下側 PM の出力光の位相は、それぞれ、 $\theta_s + k \cos(\theta_s - \theta_{L0})$ 、 $\theta_s + k \sin(\theta_s - \theta_{L0})$ 、となる。ただし、 $\theta_s$ 、 $\theta_{L0}$  は、信号光、L0 光の位相、 $k$  は信号光と L0 光の電力、検出器の応答度、変調器ドライバの利得、変調器の  $V_\pi$  で決まる定数である。下側 PM の出力光の位相を  $\theta_r$  だけ回転させた後に上側 PM の出力光と合波したものが出力光となる。

$\theta_r$  の値を、QPSK 信号 ( $\theta_s = \pm\pi/4$ 、 $\pm 3\pi/4$ ) の場合は  $\theta_r = -\pi/2$ 、BPSK 信号 ( $\theta_s = 3\pi/4$ 、 $-\pi/4$ ) の場合は  $\theta_r = -\pi$  に選び、さらに、 $k = \pi/\sqrt{2}$ 、 $\theta_{L0} = 0$  であれば、QPSK、BPSK 信号いずれの場合も 2 電極 MZM によって光位相データが消去され、キャリアが再生される。再生されたキャリアを注入同期半導体レーザー (ILLD) に注入することによって連続波の L0 光が生成される。なお、2 電極 MZM 出力光中のキャリア成分電力をモニタし、最大となるように制御することで  $\theta_{L0}$  を 0 に保つことができる。

このように、 $k = \pi/\sqrt{2}$  の場合、図 1 の回路によって信号キャリアと位相同期した連続波の L0 光を生成できる。しかし、 $k$  の値が  $\pi/\sqrt{2}$  からずれると、QPSK 信号の場合は 2 電極 MZM 出力光の位相が 1 点に集まらず、変調雑音が残る。(BPSK 信号の場合は、 $k$  の値が  $\pi/\sqrt{2}$  からずれても 2 電極 MZM 出力光の位相が 1 点に集まり、位相データが消去される。) 変調雑音が残ると、ILLD の出力光が大きな位相雑音を含むようになり、正確なキャリア抽出およびホモダイン

検波ができなくなる。図 2 (a)に、10Gbaud RZ-QPSK 信号のスペクトル、図 2 (b)に  $k = \pi/\sqrt{2} \times 0.9$  の場合の 2 電極 MZM 出力光のスペクトル、図 2 (c)に ILLD 出力光 (注入光 / 出力光電力比が -22dB の場合) のスペクトルのシミュレーション例を示す。k の値が最適値から 10%ずれただけでも、ILLD 出力光の純度が劣化し、安定な局部発振光の生成のためには回路パラメタの正確な設定が必要であることがわかった。

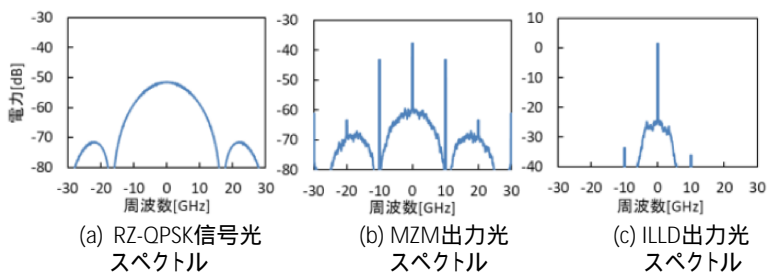


図2 光信号スペクトル

(2) 光電気変換型位相共役器による分散および非線形劣化補償

光ファイバ伝送路における分散およびカー非線形効果による信号歪みは、伝送路の midpoint に位相共役器を配置することによって補償することができる。光信号の位相共役器は、全光型と光電気変換型に分類される。光電気変換型位相共役器(OEPC)は、処理できる信号の帯域幅が制限される一方、波長変換機能を組み込むことが容易である等の利点を持つ。本研究では、OEPC による位相共役光生成と分散および非線形劣化補償の実験を行った。

OEPC は局部発振レーザ、光 90°ハイブリッド、平衡検出器のペア、RF 増幅器、および光 IQ 変調器で構成される(図 3)。入力信号光はイントラダイン検出され、その出力電気信号が増幅された後に光 IQ 変調器に入力され、OEPC 内の光源から出力された光の振幅と位相を変調する。光 IQ 変調器内の一方の MZM 出力位相を 変化させることによって、位相共役処理の有無を切り替えることができる。

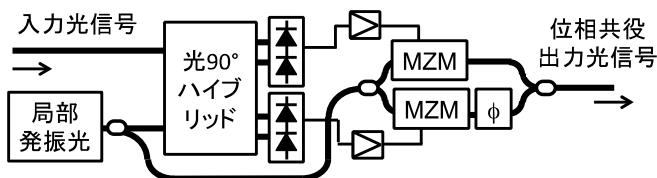


図3 光電気変換型位相共役器

第 1 の実験では、標準単一モードファイバ 50km からなる 10Gb/s、00K 信号伝送系の midpoint に OEPC を設置し、分散補償の効果を測定した。図 4 は、位相共役あり ( $\phi = -\pi/2$ )、なし ( $\phi = \pi/2$ ) の場合のビット誤り率特性である。位相共役を行うことによって、OEPC なしの場合と比較して 4.3dB の特性改善が得られた。なお、信号光と局部発振光間の周波数差の許容量は約 14GHz であった。

第 2 の実験では、非線形性が強い高非線形ファイバを伝送路として用いた場合の非線形劣化補償特性を調べた。伝送速度 1.25Gb/s の 3 チャネルの 00K 信号をチャンネル間隔 3GHz で多重化し、伝送した。伝送ファイバの非線形性によって四光波混合が生じ、送信信号以外の周波数成分が現れるとともに信号振幅に揺らぎが生ずる。伝送路途中で位相共役を行うことによって非線形劣化が抑制される。図 5 は位相共役を行う場合と行わない場合の受信感度ペナルティである。OEPC 前後の信号電力のバランスを取るによって、非線形劣化が消失することを確認した。

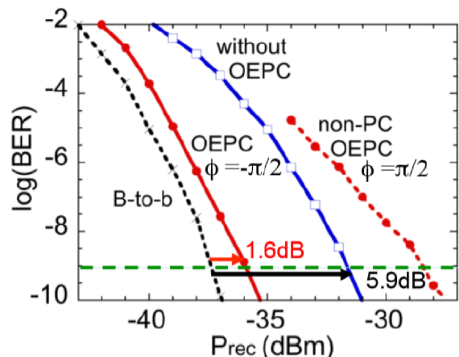


図4 光電気変換型位相共役による分散補償実験結果

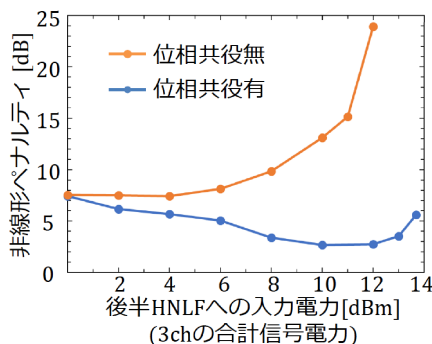


図5 光電気変換型位相共役による非線形劣化補償実験結果

### (3) 光電気変換型位相共役器による波長分割多重伝送のチャンネル間非線形相互作用抑制

OEPC は処理できる信号の帯域幅が狭く、チャンネル間隔が数十 GHz の波長分割多重信号の位相共役を行う際は、チャンネルごとに位相共役処理を行うことになる。その一方で、中心周波数を変化させない位相共役や、任意の波長変換を伴う位相共役が可能になる。ここでは、28Gbaud NRZ-16QAM 波長多重信号の伝送シミュレーションを行い、伝送路中点における位相共役の際に波長順を変化させない場合（波長保持位相共役：WPPC）と、波長順を反転させる場合（波長交換位相共役：WEPC）の特性比較を行った（図6）。伝送特性劣化が主として波長チャンネル間の相互位相変調によって生ずる場合、増幅器スパンごとに分散補償ファイバによって分散補償を行う分散マネージ伝送システムでは、WPPC のほうが劣化補償効果が大きく、増幅器スパンごとに分散補償を行わない分散非マネージ伝送システムでは WEPC のほうが劣化補償効果が大きいことを明らかにした。

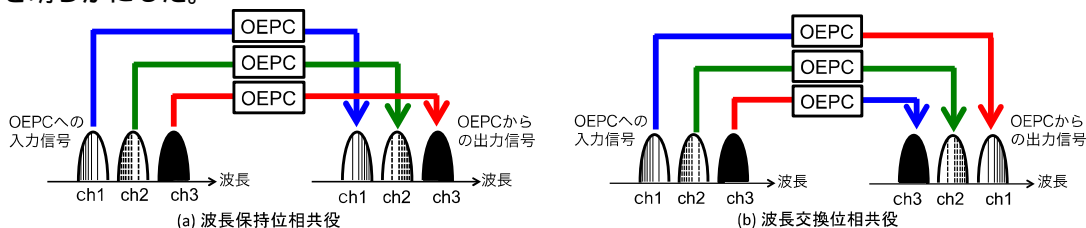


図6 波長分割多重信号の位相共役

#### 引用文献

J. K. Perin, A. Shastri, and J. M. Kahn, "Design of low-power DSP-free coherent receivers for data center links", J. Lightwave Technol., vol. 35, no. 21, pp. 4650-4662 (2017).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 武田凌、松本正行
2. 発表標題 光電気変換型位相共役器による波長分割多重信号の非線形劣化補償
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武田凌、松本正行
2. 発表標題 光電気変換型位相共役器による強度変調光信号の非線形劣化補償
3. 学会等名 電子情報通信学会光通信システム研究会第32回光通信システムシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayuki Matsumoto and Ryohei Obata
2. 発表標題 Mitigation of cross-phase modulation in WDM transmission by mid-link electro-optic phase conjugation
3. 学会等名 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masayuki Matsumoto and Shinogu Takeda
2. 発表標題 Performance of opto-electronic phase conjugation in intensity-modulated signal transmission systems
3. 学会等名 Pacific Rim Conference on Lasers and Electro Optics (CLEO/Pacific Rim) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永井孝明、松本正行
2. 発表標題 位相変調光信号からの位相同期キャリア抽出に関する考察
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

松本正行、 “ 光電気変換型コヒーレント光信号再生 ”、TELECOM FRONTIER、no. 100、 pp.1-5 、テレコム先端技術研究支援センター(2018) .

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考