

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04464

研究課題名（和文）直接検波方式光ファイバ通信における複素変調信号再構成の研究

研究課題名（英文）Reconstruction of complex-modulated signals in direct-detection optical fiber communication systems

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：データセンター間信号伝送などの比較的短い距離（百km程度以下）の光ファイバ通信における低コストの信号受信方式として、直接検波によって取得した強度波形から受信信号の複素変調情報を読み取る方法が適している。本研究では、強度情報のみから信号の複素情報（振幅と位相）を読み取るための信号再構成アルゴリズムの有効性を、各種の信号変調形式（単一キャリア複素変調、直交周波数分割多重変調、多値パルス振幅変調）について、雑音耐性や信号再構成精度の観点から明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光信号の直接検波においては受信信号の位相情報が基本として失われる。検波によって消失した位相情報を強度情報からどのようにして／どれだけ忠実に／どれだけ制約なく回復できるかを明らかにすることは、光ファイバ通信への応用に限らず工学や科学の幅広い分野における重要な課題である。光ファイバ通信において、直接検波によって取得した強度情報から受信光信号の位相を読み出すことによって、簡素な受信機構成による低コストで安定性のよいデータ伝送システムを構築でき、社会の情報通信基盤の発展に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Complex field reconstruction from direct-detection intensity waveforms of optical signals realizes simple and low-cost yet high-speed data transmission suitable for short-reach (< hundred kilometers) systems such as those used in inter-data-center networks. This research studies effectiveness of various algorithms for complex field reconstruction in direct detection optical receivers. Issues such as applicabilities of the algorithms to different modulation formats and tolerance to noise are discussed.

研究分野：光通信工学

キーワード：光ファイバー通信 コヒーレント光通信 直接検波 位相変調 位相再構成 強度輸送方程式 Gerchberg-Saxtonアルゴリズム

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

グローバルな通信ネットワーク上を流れるデータ量は増大を続けている。情報端末や IoT (Internet of Things) デバイスの多くは無線電波を使ってネットワークと接続されるが、ネットワーク内ではデータの多くが光ファイバを用いて伝送される。近年は、大量の情報が大規模なデータセンター内で蓄積・処理されており、データセンター間などの比較的短距離 (伝送距離数 100km 以下) の大容量光データ伝送の需要が高まっている。

波長 1.55 $\mu\text{m}$  前後の低損失かつ光ファイバ増幅器の利用が可能な限られた波長帯域を使って高速のデータ伝送を行うためには光の強度だけではなく位相にも情報を書き込む必要がある。そのための受信方式としてコヒーレント検波方式を用いることが有効であるが、この方式は必要な光部品点数や信号処理負担が大きく高コストとなる。データセンター間 / 内通信のような送受信機コストが全コストの大きな部分を占める光通信システムにおいては、構成がシンプルな直接検波受信機を用いることが強く望まれる。

一般に、直接検波によって光信号を電気信号に変換する際に光の位相情報が失われる。直接検波によって取得した強度情報から光信号の複素情報 (大きさと位相) を読み取るための手法がこれまでも提案されてきたが (Goeger, et al., ECOC2015, P.3.12(2015), Mecozzi, et al., Optica, 3, 11, 1220 (2016), Yoshida, et al., OFC2019, Th4A.3 (2019), Chen, et al., ECOC2019, Tu1D1 (2019)) その有効性や方式間の性能比較は十分に明らかになっていない。本研究では、各種の信号変調形式 (単一キャリアナイキスト変調、直交周波数分割多重変調、多値パルス振幅変調) を用いる場合に、雑音耐性や信号再構成精度の観点から各種の複素振幅再構成手法の性能を明らかにする。

### 2. 研究の目的

波長の強度から位相を読み取ることにに関して、電子顕微鏡や X 線および光イメージングなどの画像計測の分野で多くの研究がなされてきた。空間的な回折が加わる前後の強度画像から反復計算によって位相分布を数値的に算出する方法 (Gerchberg-Saxton (GS) アルゴリズム) (Gerchberg and Saxton, Optik, 35, 2, 237 (1972)) や、空間を伝搬する光波の強度分布と位相分布の間に成り立つ方程式 (強度輸送方程式) を数値的に解く手法 (Teague, J. Opt. Soc. Am., 73, 11, 1434 (1983)) が、1970~1980 年代に考案されその適用範囲を広げる研究が広くなされてきた。空間的な回折は時間的な分散と数式的に等価であると言えるので、これらのイメージング分野で用いられた位相再構成手法を、分散性の伝送路である光ファイバを伝搬する光信号の位相を取得することに適用できる。本研究ではこれらの位相再構成手法を、高速光ファイバ通信における位相変調信号の位相復調に応用する。クラマース・クロニヒ (KK) 法 (Mecozzi, Optica, 3, 11, 1220 (2016)) などの従来の位相再構成方式にはない利点を有する直接検波複素信号受信方式を見出せる可能性がある。

### 3. 研究の方法

図 1 に本研究で取り上げる直接検波光受信機の構成を示す。受信された光信号は 2 分岐されたのち、一方が直ちに検波され、他方は群速度分散係数が  $\beta_2$  の分散媒質 (光ファイバなど) を伝搬したのちに検波される。それぞれの強度波形を  $P_0(t)$ 、 $P_1(t)$  とする。強度波形はアナログデジタル変換器 (ADC) によって離散化されて演算装置に取り込まれ、デジタル信号処理 (DSP) を経て受信信号の位相  $\phi(t)$  が算出される。本研究では、非反復の直接的な計算処理によって位相  $\phi(t)$  を算出する方法と、反復的な計算によって位相  $\phi(t)$  を算出する方法の両者を用いる。

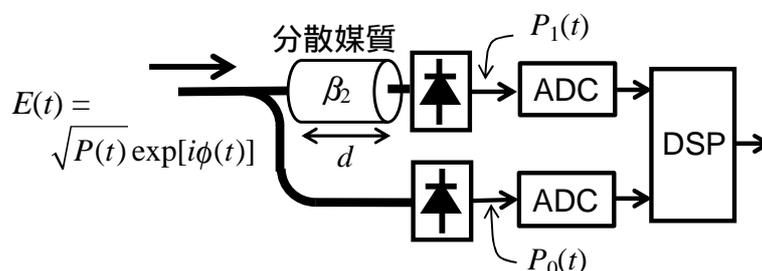


図 1 直接検波光受信機 (ADC:アナログデジタル変換、DSP:デジタル信号処理)

非反復の方法では、分散媒質中の光波の強度と位相が時間領域強度輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( P \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) = \frac{1}{\beta_2} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (1)$$

を満たすことを利用する。この場合は、分散媒質の長さ  $d$  を十分小さい値に選ぶ。式(1)の右辺の  $P/z$  を前進差分  $(P_1(t) - P_0(t)) / d$  によって近似した後に微分方程式(1)を解き、位相  $\phi(t)$  を求める。なお、差分近似の精度を上げるためには、分散媒質の個数を 2 個とし、それらの前後で取得した強度波形  $P_0(t)$ ,  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$  のうち、 $P_1(t)$  を(1)の左辺中の強度波形として用い、 $P_0(t)$  と  $P_2(t)$  から中心差分を用いて  $P/z$  を算出することが有効である。

反復計算による位相再構成の場合、図 2 に示すフレネル変換型 Gerchberg-Saxton (GS) アルゴリズムを用いる。分散媒質伝搬前の複素振幅を  $f_n(t)$  とする。初期の複素振幅波形を  $f_0(t) = \sqrt{P_0(t)} \exp[i\phi_0(t)]$ ,  $\phi_0(t) = 0$  において反復を開始する。受信機内の分散媒質と等量の分散だけ数値伝搬し、伝搬後の振幅波形を  $P_1(t)^{1/2}$  で置き換える。それを分散媒質と棟梁の分散だけ逆伝搬し、振幅波形を  $P_0(t)^{1/2}$  で置き換えた複素振幅を次の反復の初期波形とする。これを、振幅波形誤差が小さくなるまで繰り返す。受信機内に設置する分散媒質の個数と取得する強度波形の数を増やし、3 個以上の強度波形を既知の条件として反復を繰り返すことによって誤差減少の速度が速くなり、必要な反復回数が少なくなる。さらに、反復時の波形更新の方法を工夫することによって収束の速度を上げることができる。

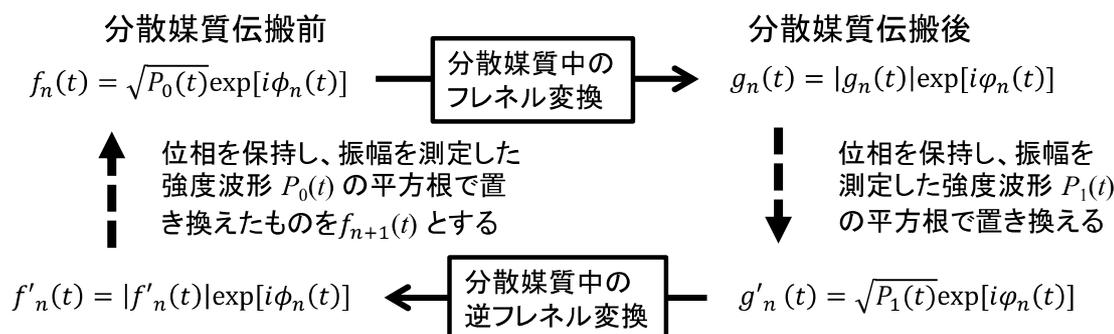


図 2 フレネル変換型 GS アルゴリズム

#### 4. 研究成果

時間領域強度輸送方程式を解く非反復の位相再構成手法に関して、信号光波長 1550nm、伝送速度 28GBaud のナイキスト 16QAM 信号の直接検波による複素振幅再構成の計算を行った。送信機で生成された信号にキャリア光を付加し、標準単一モードファイバ 20~100km を伝送させた後に、検波した強度波形から位相を再構成した。受信機内の分散媒質の分散値を 10ps/nm とした場合のシンボル誤り率 (SER) とキャリア対信号電力比 (CSPR) の関係を図 3 に示す。ここで用いている強度波形から信号位相を再構成する手法では、位相を正確に再構成できるためには光信号の強度を一定の値以上に保つ必要があり、そのためには変調された信号に一定のバイアスとなるキャリア光を不可する必要がある。キャリア光は情報伝達に寄与しない信号電力なので、CSPR は極小小さいことが望ましい。図 3 から、本位相再構成方式では、伝送距離にも依存するが 10dB 程度以上の CSPR が必要であることがわかる。CSPR がそれ以上であれば、SER が理論的な計算値に近づき、位相再構成が誤差なく行われていることがわかる。

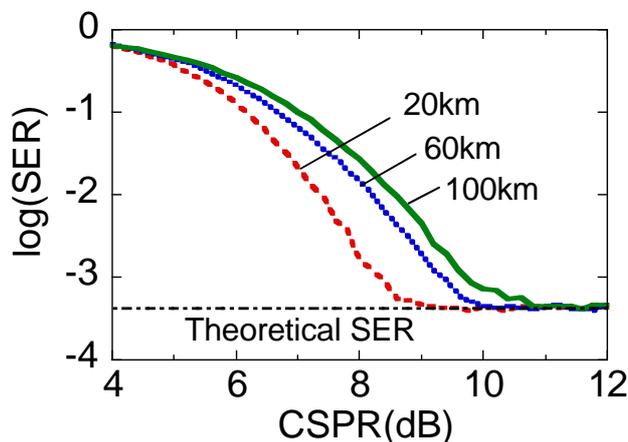


図 3 シンボル誤り率とキャリア対信号電力比の関係

図 4 は、時間領域強度輸送方程式を解く計算を行う際に、強度波形に加わる雑音の影響を調べた結果である。  $P_0(t)$ ,  $P_1(t)$  に雑音加わると、差分近似によって  $\partial P / \partial z$  を算出する際の誤差等の影響が大きくなる。図 4 は、強度波形に加わる雑音量を評価する指標であるアナログデジタル変

換器の実効ビット数 (ENOB) を変えて SER を計算した結果である。横軸は受信機内の分散媒質の分散値である。雑音量が大きい (ENOB が小さい) と SER が急激に大きくなり、この位相再構成手法が受信機雑音の影響を受けやすいことがわかる。

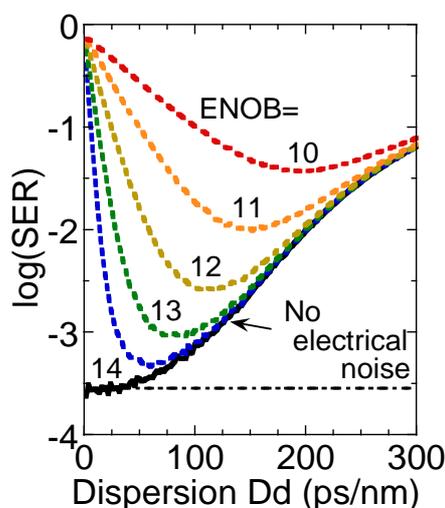


図4 シンボル誤り率(SER)と受信機内分散値の関係

反復的な計算によって受信信号の複素振幅を再構成する手法に関しては、信号光波長 1550nm、伝送距離 100km、伝送速度 28GBaud の 4 値パルス振幅変調 (PAM4) 信号の複素振幅再構成と位相情報を用いた分散補償の有効性の計算を行った。PAM4 信号では、データ伝送のために位相変調を用いているわけではないが、受信時の光信号位相を読み取ることによって、受信機内の電気信号処理による分散補償が可能になる。図 5 (a)は、送信信号のアイパターン、(b)は、受信機内の分散媒質の個数が 1 個でその前後の 2 つの強度波形をもとに反復計算によって複素振幅を再構成したのちに分散補償して得られた信号のアイパターン、(c)は、受信機内の分散媒質の個数が 2 個でその前後の 3 つの強度波形をもとに反復計算によって複素振幅を再構成したのちに分散補償して得られた信号のアイパターンである。取得する強度波形の個数を増やして反復計算を行うことによってアイ開口が開き、送信されたデータを読み取ることができるようになる。

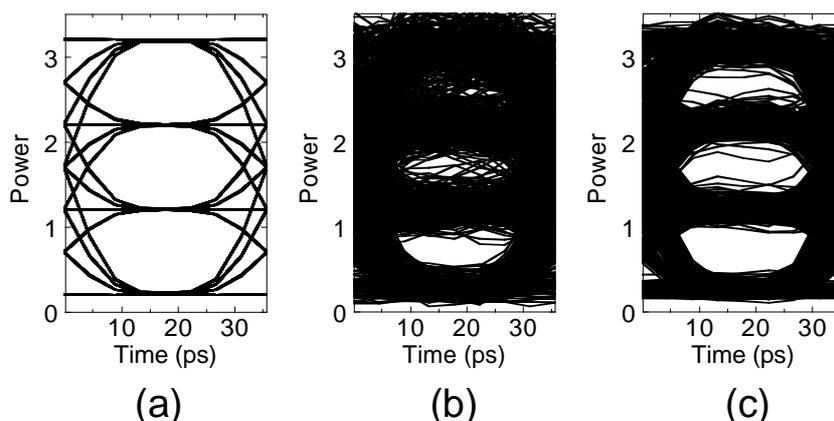


図5 PAM4 信号伝送のアイパターン、(a)送信信号、(b) 2 つの強度波形をもとに反復計算によって推定した送信信号、(c) 3 つの強度波形をもとに反復計算によって推定した送信信号

反復的な計算による複素振幅の再構成については、伝送距離 250km、伝送速度毎秒 10 ギガビットのオンオフ変調 (OOK) 信号の伝送実験を実施した。GS アルゴリズム、および波形更新に Fienup の更新アルゴリズムを取り入れた反復計算を行うことによって、検波した電気信号に対する分散補償が可能になり、送信信号波形を受信機で再構成できること示した。

以上に述べたように、各種の位相再構成アルゴリズムを用いることによって、光ファイバ通信における高速時系列信号の位相を直接検波で取得したいいくつかの強度波形から再構成できることを明らかにした。実用化にあたっては、時間領域強度輸送方程式を用いる直接的な位相再構成においては、検波した強度波形に加わる雑音の影響を低減する方法を併用すること、反復計算を用いる位相再構成においては、信号のスペクトル幅など、信号が有する性質を拘束条件として計算に取り入れ、反復計算の収束を早めることなどが必要になる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Masayuki Matsumoto	4. 巻 29
2. 論文標題 Complex field reconstruction of optical OFDM signals based on temporal transport-of-intensity equation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 36155 ~ 36155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.438149	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masayuki Matsumoto	4. 巻 38
2. 論文標題 Optical signal phase reconstruction based on temporal transport-of-intensity equation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 4722-4729
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JLT.2020.2995640	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 4件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 松本正行
2. 発表標題 時間領域強度輸送方程式を用いた光OFDM信号の複素振幅再構成
3. 学会等名 電子情報通信学会光通信システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayuki Matsumoto
2. 発表標題 Field reconstruction of optical OFDM signals using temporal transport-of-intensity equation
3. 学会等名 IEEE Photonics Society, 2021 Summer Topicals Meeting Series (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayuki Matsumoto
2. 発表標題 Analysis of optical OFDM signal reconstruction using temporal transport-of-intensity equation
3. 学会等名 The 12th International Conference on Information Optics and Photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本正行、高橋拓也
2. 発表標題 IM/DD伝送における受信光信号位相の反復計算による検出
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayuki Matsumoto and Takuya Takahashi
2. 発表標題 Comparison of iterative field reconstruction schemes for IM/DD PAM4 signal transmission
3. 学会等名 Asia Communications and Photonics Conference (ACP 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本正行
2. 発表標題 局部発振光を用いないコヒーレント受信方式
3. 学会等名 電子情報通信学会超高速光エレクトロニクス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayuki Matsumoto
2. 発表標題 Field reconstruction of optical OFDM signals using temporal transport-of-intensity equation
3. 学会等名 IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting Series (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayuki Matsumoto
2. 発表標題 Iterative field reconstruction using Gerchberg-Saxton and Fienup algorithms in IM/DD PAM4 signal transmission
3. 学会等名 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masayuki Matsumoto
2. 発表標題 Iterative field reconstruction in direct-detection receiver using the Fienup input-output algorithm
3. 学会等名 2022 IEEE Photonics Conference (IPC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 松本正行 (分担執筆: 執筆者総数62名)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 628
3. 書名 次世代高速通信に対応する光回路実装、デバイスの開発 (第12章第8節 “光直接検波信号からの位相情報の読み取り技術”、執筆)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

和歌山大学システム工学部 松本正行のホームページ  
<https://web.wakayama-u.ac.jp/~mmatsu/>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------