

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02153

研究課題名（和文）搬送波位相同期超高速光時分割多重信号の位相感応光中継増幅伝送技術の研究

研究課題名（英文）Phase sensitive amplified repeated optical fiber transmission system using carrier phase locked optical time domain multiplexed signal light

研究代表者

高田 篤 (TAKADA, Atsushi)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部（理工学域）・教授

研究者番号：00548563

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：光搬送波位相が連続した光時分割多重信号を伝送する位相感応型光増幅多中継光ファイバ伝送系について、以下の検討を行った。

搬送波位相同期超高速光時分割多重分離技術：光位相が連続する光パルスを出力する光時分割多重回路の回路構成法を検討した。広帯域位相感応型光増幅中継技術：パルス幅0.1psクラスの超短光パルスを分極反転二オプ酸リチウム結晶における位相感応光増幅時のパルス波形劣化を理論解析した。振幅雑音圧縮光増幅技術：光ファイバ伝送路における自己位相変調効果と位相感応光増幅中継器を用いて、振幅雑音の増加を抑圧する伝送系を提案し、理論解析により大幅な再生中継間隔延伸が可能であることを明確化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光ファイバ伝送システムの大容量化/長距離化は、電気的時分割多重システムの高速度と波長分割多重（WDM：Wavelength Division Multiplexing）システムの波長数の増加により達成されてきた。しかし、主に光増幅器の光雑音による信号品質の劣化により、システム性能向上の限界が見えてきつつある。本研究は、新たな光増幅原理である位相感応型光増幅による雑音圧縮作用を光ファイバ伝送系に適用することにより、SNRの劣化を抑止する作用を見出している点に学術的意義があり、この作用により、光ファイバ伝送リンクの再生中継間隔を大幅に延伸できる可能性がある点に社会的な意義がある。

研究成果の概要（英文）：A phase-sensitive optical amplifier repeated fiber transmission system that transmits optical time-division multiplexed signals with continuous optical carrier wave phase is studied.

(1) A circuit configuration for an optical time-division multiplexing circuit that outputs optical pulses with a continuous optical phase was investigated. (2) Theoretical analysis of the pulse waveform degradation during phase-sensitive optical amplification of ultrashort optical pulses with a pulse width of 0.1 ps class in a polarisation inversion lithium niobate crystal. (3) A transmission system that suppresses the increase in amplitude noise using self-phase modulation effects in optical fiber transmission lines and phase-sensitive optical amplification relay was proposed, and theoretical analysis clarified that a significant extension of the regeneration relay interval was possible.

研究分野：光通信システム

キーワード：光ファイバ 光増幅 光通信 通信ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

通信ネットワークのトラヒックの急増により、通信ネットワークを構成する光ファイバ伝送システムの大容量化に対する需要が高まっている。従来、光ファイバ伝送システムの大容量化は、電氣的時分割多重システムのビットレート高速化、波長分割多重 (WDM : Wavelength Division Multiplexing) システムの波長数の増加より実現されてきた。ところが、下に述べる増幅中継器が発生する光雑音により、伝送システムの高性能化に限界が見えてきつつある。

2. 研究の目的

本研究は、WDM による光伝送システムの大容量化を、複数の光信号ストリームを1つにまとめる多重化プロセスを、WDM 技術に代わり光信号の状態で光時分割多重 (OTDM : Optical Time-Division Multiplexing) 技術により行い、この OTDM 信号を PSA 中継器により多中継伝送するシステムにより、光信号状態のままで SNR を改善し光ファイバ伝送システムの大容量化と光再生中継間隔の長距離化を図ることを目的としている。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため以下の検討を行った。

- (1) 搬送波位相同期超高速光時分割多重分離 (搬送波位相同期 OTDM) 技術 : 光パルス列の位相がパルス間で連続する超高速信号を出力する OTDM 光回路の基本構成法。
- (2) 広帯域位相感応型光増幅中継技術 : PSA 媒質として分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN) の短光パルス増幅時の波形劣化特性。
- (3) 振幅雑音圧縮光伝送系設計技術 : 光ファイバ伝送路における自己位相変調と PSA 増幅による振幅雑音抑圧効果による SNR 劣化の抑圧。

4. 研究成果

- (1) 搬送波位相同期超高速光時分割多重分離 (搬送波位相同期 OTDM) 技術 : 図1に搬送波 OTDM 光多重回路の基本構成を示す。

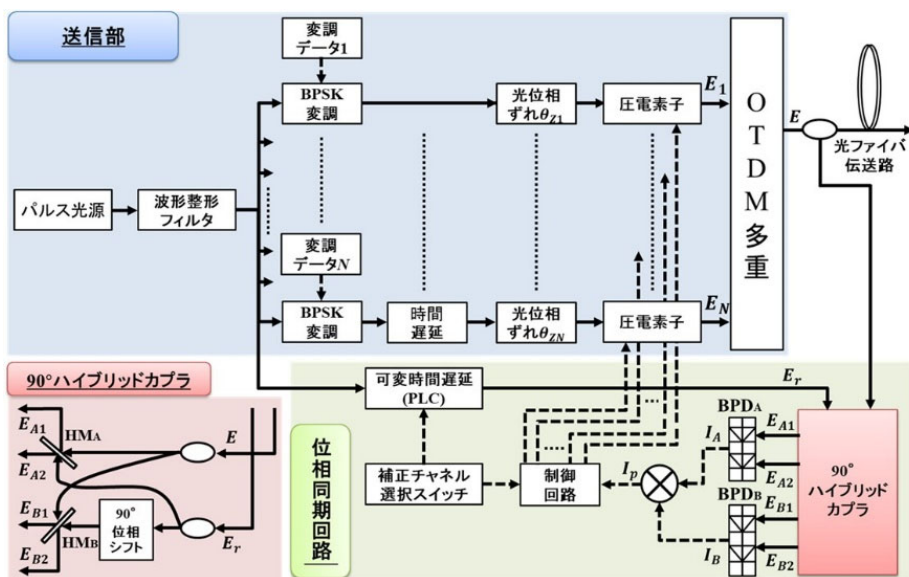


図1 搬送波位相同期 OTDM 多重化回路の基本構成

励起光位相を連続した CW 光とした PSA により列をなす光パルスに同一の利得を与えることができるよう、隣り合う光パルス間で搬送波が連続するよう時分割多重化している。光位相同期回路により、多重化後のパル

ス間光位相差を検出し、圧電素子を用いて遅延を調整している。理論計算により、20PSA 中継伝送後のアイダイアグラムの劣化を 1% 以下にするためには OTDM 多重化回路における光位相調整誤差を ± 0.25 rad 以内にする必要があることが分かった。

(2) 広帯域位相感応型光増幅中継技術：

位相感応型光増幅には 2 次の光非線形性を有する分極反転ニオブ酸リチウム結晶 (PPLN) 導波路における差周波光発生プロセスを用いる。すなわち、信号光の 2 倍の光周波数を有する励起光と信号光を波長多重し PPLN 導波路に結合する。信号光の 2 倍の周波数を有する励起光は、信号光の PLL 回路により搬送波を回復しその搬送波の第 2 次高調波 (SHG) を PPLN を用いて発生させることにより得られる。差周波光発生プロセスを利用する PPLN 内の信号光と励起光の相互作用は以下の連立微分方程式を用いて計算できる。

$$\begin{cases} \frac{\partial A_1}{\partial z} = -\frac{\beta_1' - \beta_2'}{2} \frac{\partial A_1}{\partial t} + j \frac{\beta_1''}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + \frac{\beta_1'''}{6} \frac{\partial^3 A_1}{\partial t^3} - j\kappa^* A_1^* A_2 e^{-j(\Delta k)z} \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} = \frac{\beta_1' - \beta_2'}{2} \frac{\partial A_2}{\partial t} + j \frac{\beta_2''}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} + \frac{\beta_2'''}{6} \frac{\partial^3 A_2}{\partial t^3} - j\kappa (A_1)^2 e^{j(\Delta k)z} \end{cases} \quad (1)$$

A_1 と A_2 はそれぞれ、信号光と励起光の電界の複素振幅、 β は位相定数、 β の添字 1 は信号波長光領域、添字 2 は励起光波長領域を表し、また β につくダッシュ「 $'$ 」は角周波数による微分であり、ダッシュの個数は微分回数を表す。また、 Δk は、ニオブ酸リチウム結晶の常光と異常光間の位相不整合量を、 κ は 2 次の光非線形係数であり、適切な位置周期で符号を反転している。この方程式に光パルスを入力しその出力をルンゲクッタ法により求めた。

位相定数の各角周波数微分の値は通常のニオブ酸リチウム(バルク)の次の値を用いた。

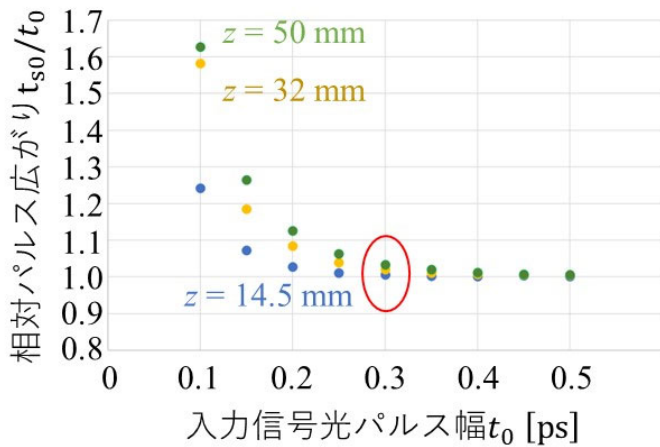


図2 PPLN—PSA におけるパルス波形広がり

図2に、入力パルス幅 t_0 に対する PPLN - PSA 出力パルスのパルス幅 (t_{s0}) を示す。 $\beta_1' = 7.5508 \times 10^{-9}$ [s/m]、 $\beta_2' = 3.8849 \times 10^{-9}$ [s/m]、 $\beta_1'' = 1.1049 \times 10^{-25}$ [s²/m]、 $\beta_2'' = 3.8868 \times 10^{-25}$ [s²/m]、 $\beta_1''' = -4.5105 \times 10^{-40}$ [s³/m]、 $\beta_2''' = 9.7432 \times 10^{-41}$ [s³/m] とした。図中のパラメータは PPLN 中の長さであり、現在の PPLN 導波路の長さの典型値である 50mm を最長としている。伝搬距離が長いほどパルス幅の広がりが大きく、なることがわ

かる。入力パルス幅が 0.3ps を下回ると、パルス広がりが顕著になることがわかる。入力パルス幅が 0.1ps では、50 mm 伝搬後の出力パルスは約 1.6 倍に広がる。したがって、このような短光パルス領域では、PPLN 導波路前後に、分散補償を施す必要がある。

(3) 振幅雑音圧縮光増幅技術：

振幅雑音と位相雑音を含む信号光を入力とする理想的な縮退光パラメトリック PSA の増幅出力光では、位相雑音によるばらつきは圧縮され、振幅雑音による SNR は劣化しないという特徴がある。本研究では、この特徴に加えて、PSA 増幅前に信号光を光 Kerr 媒質を伝搬させ自己位相変調 (SPM: Self Phase Modulation) させた光を PSA 増幅 (ると、振幅雑音による SNR が増加す

る条件があることを見出した。この効果を、伝送路光ファイバでの光 Kerr 効果と中継増幅器としての PSA により生じさせることにより、再生中継間隔を大幅に延伸できる可能性がある。

この光 Kerr 効果と PSA による振幅雑音圧縮原理を図 3 に示す。

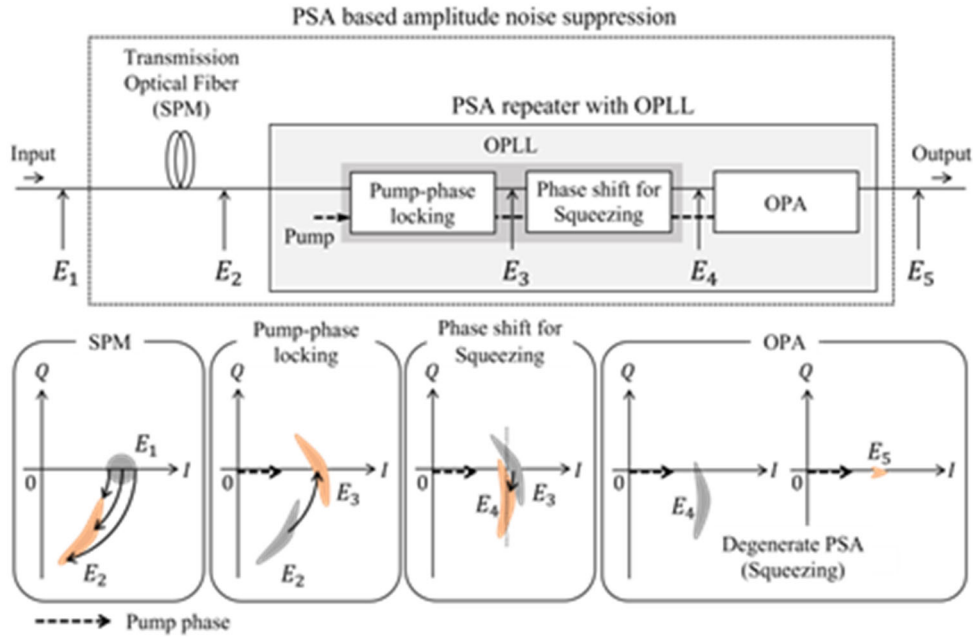


図 3 縮退光パラメトリック PSA による振幅雑音抑圧効果

伝送路光ファイバが光 Kerr 媒質として機能し、 E_2 は自己位相変調効果を受けている。励起光位相を基準にすると等価的に E_2 の位相が回転し E_3 に偏移する。この状態が E_3 が最大利得となるが、SPM により円周方向に広がった分布の同相成分の拡がり最小になるように、更なる位相シフトを与えて E_4 として縮退パラメトリック PSA 増幅すると、振幅雑音は E_1 のそれと比較して減少している。

式②と③を用いて、数値計算を行った。図 4 に計算結果を示す。

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{1}{2}\alpha E - \frac{j}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 E}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 E}{\partial T^3} - j\gamma|E|^2 E \quad (2)$$

$$E_5 = E_4 \cosh\left(\frac{gL}{2}\right) + E_4^* e^{j\theta_p} \sinh\left(\frac{gL}{2}\right) \quad (3)$$

入力信号は 10Gbit/s の BPSK 信号とし、そのホモダイン検波したとした場合の SNR として 20dB から 35dB まで設定し、入力信号光の光パワを変化させて PSA 出力の SNR を計算している。光ファイバの非線形係数 $\gamma = 1.92/W/\text{km}$ 、損失 $\alpha = 0.3\text{dB}/\text{km}$ 、分散スロープは $0.06\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ とした。入力信号光パワが小さい場合は、光 Kerr 効果が小さいため、出力 SNR は入力 SNR に等しいが、数 mW 以上の図のオレンジの範囲に置いて、出力 SNR が向上することがわかる。入力光 SNR が高いと SNR 向上効果は小さくなることをわかる。入力光パワに応じて、出力 SNR が最大となるような、最適な信号光位相シフト量が存在する。これを図 5 に示す。信号光パワが数 mW から 35mW 程度のとき、SNR が向上する最適位相シフト量は、0 から約 -0.4rad の範囲に存在することがわかる。この振幅雑音圧縮効果を、PSA 多中継光ファイバ伝送系に適用したとき、再生中継間隔の延伸量を見積もるため、図 6 に示す数値計算モデルを構築した。

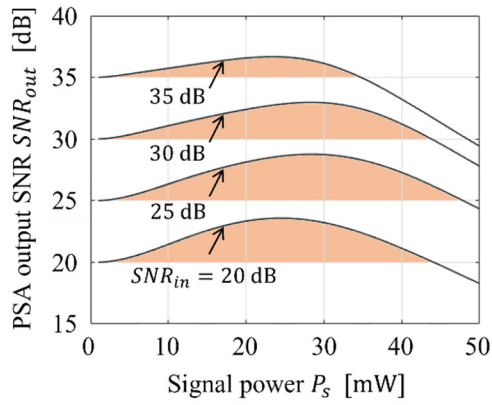


図4 PSA 出の SNR

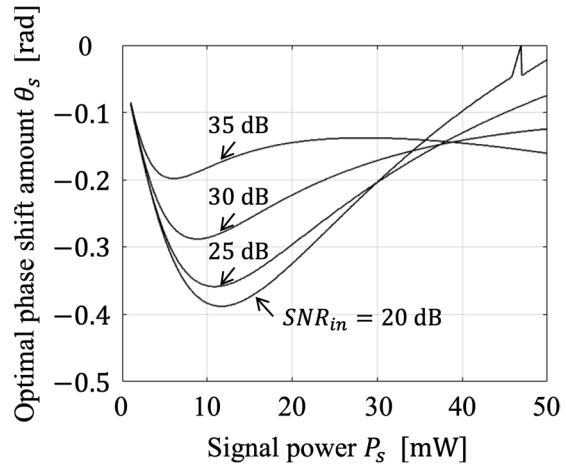


図5 最適な信号光位相シフト量

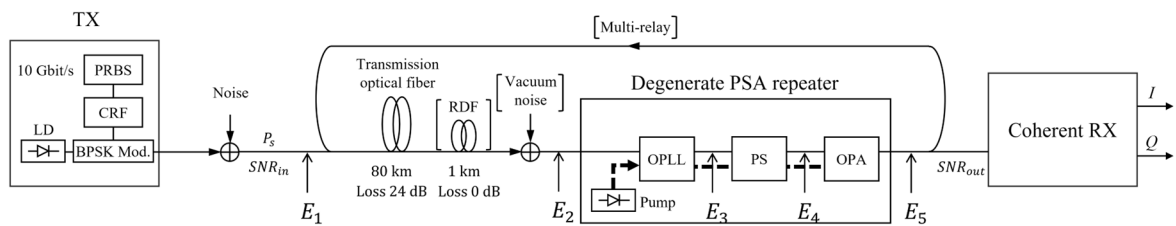


図6 振幅雑音抑圧 PSA 多中継伝送系の数値計算モデル

送信信号は、10Gbit/s BPSK 信号とし、ショット雑音を模擬するため、直交位相成分にガウス関数の確率密度関数に従うばらつきを付加している。伝送路ファイバ長は 80km、伝送路損失は、0.3dB/km とし、逆分散ファイバにより分散補償を行っている。また、伝送路光ファイバの損失に伴い、真空場雑音を付加している。PSA 内部は図 5 と同様である。

計算結果を図 7 に示す。横軸は PSA 中継段数、縦軸は PSA 中継器の出力光の SNR である。一点鎖線は、信号光位相を最大利得が得られるように調整した場合（位相シフトしない場合）、実線が SNR が最大となるように、信号光位相を図 7 に示すように最大利得が得られる位相からシフトした場合の SNR である。位相シフトをしない従来の PSA 調整方法では、SNR は、中継段数の増加とともに急速に減少するのに対して、提案方式では 200 中継しても SNR は 22dB 以上を保っている。

以上から提案方式によると再生中継間隔を大幅に延伸できる可能性がある。

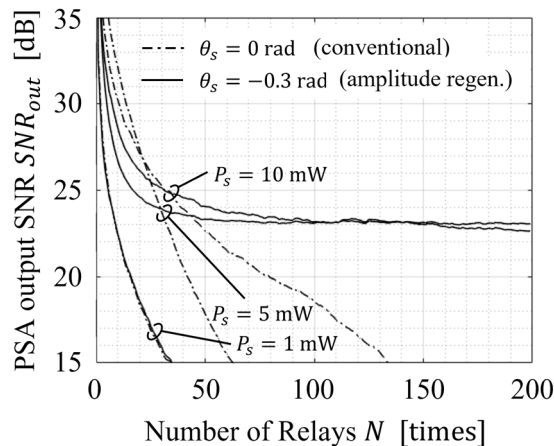


図7 PSA 多中継光ファイバ伝送系での中継段数に対する SNR

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Akira Tanaka, Yasuhiro Okamura, Atsushi Takada	4. 巻 19
2. 論文標題 Amplitude Noise Suppression of BPSK Signals Using Transmission Optical Fibers and Optical Parametric Phase-Sensitive Amplifiers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 1, 5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/elex.19.20220196	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4件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田中 輝、岡村 康弘、高田 篤
2. 発表標題 光Kerr効果を用いた振幅雑音抑圧 位相感応型光増幅多中継伝送方式の検討
3. 学会等名 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 田中 輝、岡村 康弘、高田 篤
2. 発表標題 非縮退光パラメトリック位相感応増幅と光Kerr効果を用いた振幅雑音抑圧法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高田 篤、岡村 康弘
2. 発表標題 光パラメトリック技術と光ファイバ通信への応用
3. 学会等名 電子情報通信学会支部CoEシンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡村 康弘
2. 発表標題 光パラメトリック信号処理技術の光ファイバ通信への応用
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	岡村 康弘 (OKAMURA Yasuhiro) (90706996)	徳島大学・大学院社会産業理工学研究部（理工学域）・助教 (16101)	

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