

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7689277号
(P7689277)

(45)発行日 令和7年6月6日(2025.6.6)

(24)登録日 令和7年5月29日(2025.5.29)

(51)国際特許分類		F I	
H 0 4 J	14/02 (2006.01)	H 0 4 J	14/02
H 0 4 B	10/50 (2013.01)	H 0 4 B	10/50
H 0 4 B	10/60 (2013.01)	H 0 4 B	10/60

請求項の数 10 (全21頁)

(21)出願番号	特願2023-576280(P2023-576280)	(73)特許権者	000004226 日本電信電話株式会社 東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(86)(22)出願日	令和4年1月25日(2022.1.25)	(74)代理人	110001634 弁理士法人志賀国際特許事務所
(86)国際出願番号	PCT/JP2022/002651	(72)発明者	濱岡 福太郎 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
(87)国際公開番号	WO2023/144880	(72)発明者	中村 政則 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
(87)国際公開日	令和5年8月3日(2023.8.3)	(72)発明者	小林 孝行 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
審査請求日	令和6年7月4日(2024.7.4)	(72)発明者	長谷 宗彦

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光送信機、光受信機、光送信方法及び光受信方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

複数の狭帯域信号を多重し、広帯域光変調信号を生成する多重信号生成部と、前記広帯域光変調信号の強度を増幅する半導体光増幅器と、を備え、
前記広帯域光変調信号の変動時間と前記半導体光増幅器のキャリアライフタイムとの差は、前記狭帯域信号を変調することで生成される狭帯域光変調信号の変動時間と前記キャリアライフタイムとの差よりも大きい、
光送信機。

【請求項2】

前記多重信号生成部は、
前記複数の狭帯域信号から前記狭帯域信号よりも周波数帯域の広い広帯域信号を生成する広帯域信号生成部と、
前記広帯域信号に基づいて光信号を変調し、前記広帯域光変調信号を生成する光変調部と、
を備える請求項1に記載の光送信機。

【請求項3】

前記多重信号生成部は、
前記狭帯域信号に基づいて光信号を変調し、光変調信号を生成する複数の光変調部と、
複数の前記光変調信号を合波し、前記広帯域光変調信号を生成する波長合波部と、

を備える請求項 1 に記載の光送信機。

【請求項 4】

前記広帯域光変調信号の前記半導体光増幅器による歪を補償する歪補償部と、
をさらに備える請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載の光送信機。

【請求項 5】

広帯域光変調信号の強度を増幅する半導体光増幅器と、
前記広帯域光変調信号を狭帯域信号に分離する多重信号分離部と、
を備え、

前記広帯域光変調信号の変動時間と前記半導体光増幅器のキャリアライフタイムとの差は、
前記狭帯域信号を変調することで生成される狭帯域光変調信号の変動時間と前記キャリ
アライフタイムとの差よりも大きい、
光受信機。

10

【請求項 6】

前記多重信号分離部は、
前記増幅された広帯域光変調信号を電気信号に変換する光電変換部と、
前記電気信号を帯域に基づいて分離する広帯域信号 狭帯域信号変換部と、
を備える請求項 5 に記載の光受信機。

【請求項 7】

前記多重信号分離部は、
前記増幅された広帯域光変調信号を分波し、狭帯域光変調信号を生成する波長分波部と、
前記狭帯域光変調信号を狭帯域信号に変換する光電変換部と、
を備える請求項 5 に記載の光受信機。

20

【請求項 8】

前記広帯域光変調信号の前記半導体光増幅器による歪を補償する S O A 歪補償部と、
をさらに備える請求項 6 又は 7 に記載の光受信機。

【請求項 9】

複数の狭帯域信号を多重し、広帯域光変調信号を生成する多重信号生成ステップと、
前記広帯域光変調信号の強度を増幅する半導体光増幅ステップと、
を有し、

前記広帯域光変調信号の変動時間と前記半導体光増幅ステップにおけるキャリアライフタ
イムとの差は、前記狭帯域信号を変調することで生成される狭帯域光変調信号の変動時間
と前記キャリアライフタイムとの差よりも大きい、
光送信方法。

30

【請求項 10】

広帯域光変調信号の強度を増幅する半導体光増幅ステップと、
前記広帯域光変調信号を狭帯域信号に分離する多重信号分離ステップと、

前記広帯域光変調信号の変動時間と前記半導体光増幅ステップにおけるキャリアライフタ
イムとの差は、前記狭帯域信号を変調することで生成される狭帯域光変調信号の変動時間
と前記キャリアライフタイムとの差よりも大きい、

を備える光受信方法。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光送信機、光受信機、光送信方法及び光受信方法に関する。

【背景技術】

【0002】

光伝送システムの大容量化に伴い光送受信機のサイズや消費電力が増加している。光送
受信機のサイズや消費電力を低減するために、波長可変レーザ、ドライバアンプ、光変調
器、受光素子などを一体に実装した I C - T R O S A (integrated coherent transmit-
receiver optical subassembly) と呼ばれる集積光モジュールの研究開発が進められて

50

いる（非特許文献1参照）。

【0003】

半導体光増幅器（SOA、Semiconductor Optical Amplifier）は小型で低消費電力であるため、IC-TROSAのような光モジュールにおける光プリアンプとして使用できる。非特許文献2には、データ伝送速度が400-600 Gb/sでシンボルレートが64 GBdであるIC-TROSAの光プリアンプとして半導体光増幅器を組み込む構成が記載されている。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0004】

【文献】Implementation Agreement for Integrated Coherent Transmit-Receive Optical Sub Assembly,” OIF-IC-TROSA

【文献】J. Zhou, et al., “Characterizations of Semiconductor Optical Amplifiers for 64Gbaud 16-64QAM Coherent Optical Transceivers,” OFC2019, Tu2H.7

【文献】A. A. M. Saleh, “Nonlinear Models of Travelling-wave Optical Amplifiers,” Electronics Letters, vol.24, no.14, pp.835-837, 1988.

【文献】N. Kamitani, Y. Yoshida, and K. Kitayama, “Experimental Study on Impact of SOA Nonlinear Phase Noise in 40Gbps Coherent 16QAM Transmissions,” ECOC2012, P1.04.

【文献】S. Okamoto, M. Yoshida, K. Yonenaga, and T. Kataoka. “Adaptive Pre-equalization using Bidirectional Pilot Sequences to Estimate and Feed Back Amplitude Transfer Function and Chromatic Dispersion,” OFC2015 Th2A.29.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、光送受信機が扱う光変調信号のシンボルレートは通常数十GBdである。光変調信号の変動時間はシンボルレートの逆数であって、およそ数十psである。半導体光増幅器のキャリアライフタイムは通常数百psであり、光変調信号の変動時間と近い値であることから光変調信号に半導体光増幅器に起因する非線形歪みが生じることがある。このような条件では、半導体光増幅器への注入電流を増加して半導体光増幅器を高い光ゲインで駆動した際に、半導体光増幅器に起因した非線形歪みが増大し、光変調信号の著しい性能劣化を引き起こしてしまう。

本発明は、半導体光増幅器に起因する非線形歪みの影響を低減することができる技術を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明の一態様は、複数の狭帯域信号を多重し、広帯域光変調信号を生成する多重信号生成部と、前記広帯域光変調信号の強度を増幅する半導体光増幅器と、を備える光送信機である。

【0007】

本発明の一態様は、広帯域光変調信号の強度を増幅する半導体光増幅器と、前記広帯域光変調信号を狭帯域信号に分離する多重信号分離部と、を備える光受信機である。

【0008】

本発明の一態様は、複数の狭帯域信号を多重し、広帯域光変調信号を生成する多重信号生成ステップと、前記広帯域光変調信号の強度を増幅する半導体光増幅ステップと、を有する光送信方法である。

【0009】

本発明の一態様は、広帯域光変調信号の強度を増幅する半導体光増幅ステップと、前記広帯域光変調信号を狭帯域信号に分離する多重信号分離ステップと、を備える光受信方法である。

10

20

30

40

50

【発明の効果】

【0010】

本発明の技術は、半導体光増幅器に起因する非線形歪みの影響を低減することができる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】第1の実施形態に係る光伝送システム1の構成を示す図である。

【図2】第1の実施形態に係る光送信機2の構成を示す図である。

【図3】第1の実施形態に係る光送信機2の動作を示すフローチャートである。

【図4】第1の実施形態に係る光送信機2の変形例である。

【図5】第1の実施形態に係る光受信機4の構成を示す図である。

10

【図6】第1の実施形態に係る光受信機4の動作を示すフローチャートである。

【図7】第1の実施形態に係る光受信機4の変形例である。

【図8】第2の実施形態に係る光送信機2の構成を示す図である。

【図9】第2の実施形態に係る光送信機2の動作を示すフローチャートである。

【図10】第2の実施形態に係る光受信機4の構成を示す図である。

【図11】第2の実施形態に係る光受信機4の動作を示すフローチャートである。

【図12】第3の実施形態に係るデジタル信号処理部21及びデジタル信号処理部43の構成を示す図である。

【図13】各条件における信号空間ダイアグラムを示す表である。

【図14】半導体光増幅器への注入電流(SOA注入電流)の大きさとSNRペナルティの関係を示すグラフである。

20

【図15】本実施形態に係る光送受信機100を示す図である。

【図16】本実施形態に係る偏波多重を行う光送受信機100を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0012】

第1の実施形態

図1は、第1の実施形態に係る光伝送システム1の構成を示す図である。光伝送システム1は、光信号を用いた通信機器である。光伝送システムは、光送信機2、伝送路3と、光受信機4を備える。光送信機2は、光信号を送信する通信機器である。伝送路3は光送信機2から送信される光信号を光受信機4に伝送する。光受信機4は光信号を受信する通信機器である。

30

【0013】

図2は、第1の実施形態に係る光送信機2の構成を示す図である。光送信機2は、デジタル信号処理部21、多重信号生成部22、半導体光増幅器23を備える。多重信号生成部22は、広帯域信号生成部221、光変調部222、及び信号光源223により実現される。

【0014】

デジタル信号処理部21は、信号生成部211と、帯域分割部212、狭帯域信号処理部213、デジタル-アナログ変換部214を備える。信号生成部211は、バイナリ情報である送信データ系列から変調信号系列($I(n)$, $Q(n)$)を生成する。 $I(n)$ 、 $Q(n)$ は変調信号の同相成分と直交成分を示す電気信号である。信号生成部211は、生成した変調信号系列($I(n)$, $Q(n)$)を、帯域分割部212に出力する。帯域分割部212は、信号生成部211から入力された変調信号系列を、狭帯域信号に分割し、狭帯域信号処理部213へ入力する。狭帯域信号は、変調信号系列よりも帯域が狭い信号である。狭帯域信号処理部213は、狭帯域信号どうしの加算や減算処理を行い、デジタル-アナログ変換部214に入力する。

40

【0015】

デジタル-アナログ変換部214は、狭帯域信号処理部213から入力された変調信号系列をアナログ信号に変換する。デジタル-アナログ変換部214は、変換したアナログ信号系列($I_1'(t)$, $Q_1'(t)$)及び($2I_1'(t)$, $2Q_1'(t)$)を広帯域信号

50

生成部 2 2 1 へ出力する。

【 0 0 1 6 】

広帯域信号生成部 2 2 1 は、帯域分割部 2 1 2 及び狭帯域信号処理部 2 1 3 で予め処理されて、デジタル - アナログ変換部 2 1 4 から入力された複数の狭帯域のアナログ信号から広帯域信号を生成する。

帯域分割部 2 1 2 における変調信号系列の狭帯域信号への分割、狭帯域信号処理部 2 1 3 における狭帯域信号どうしの加算や減算処理、及び広帯域信号生成部 2 2 1 における複数の狭帯域のアナログ信号からの広帯域信号の生成は任意の手法で実施することができる。例えば、特開 2 0 1 8 - 0 1 9 2 5 5 号公報に開示された手法を用いると以下のような処理となる。

【 0 0 1 7 】

帯域分割部 2 1 2 は、信号生成部 2 1 1 から入力された変調信号系列 ($I(n), Q(n)$) を、上側波帯と下側波帯とに分割し、周波数シフトする。帯域分割部 2 1 2 は、周波数シフトした上側波帯信号 (狭帯域信号、 $(I_1'(n), Q'(n))$) 及び下側波帯信号 (狭帯域信号 ($I_2'(n), Q'(n)$)) を、それぞれ狭帯域信号処理部 2 1 3 へ出力する。

【 0 0 1 8 】

狭帯域信号処理部 2 1 3 は、帯域分割部 2 1 2 から入力された上側波帯信号及び下側波帯信号について、上側波帯と下側波帯どうしの加算及び減算の処理のうち少なくとも一方の処理を行う。狭帯域信号処理部 2 1 3 は、加算及び減算の処理のうち少なくとも一方の処理を行った狭帯域信号 ($I_1''(n), Q''(n)$) 及び ($2I_1''(n), 2Q''(n)$) を、デジタル - アナログ変換部 2 1 4 へ出力する。

【 0 0 1 9 】

広帯域信号生成部 2 2 1 は、デジタル - アナログ変換部 2 1 4 から入力された複数のアナログ信号に対して、それぞれ周波数シフトする。広帯域信号生成部 2 2 1 は、周波数シフトされた複数のアナログ信号どうしの加算の処理を行い、広帯域信号を生成する。広帯域信号の帯域は、加算処理されるアナログ信号の帯域よりも大きい。広帯域信号生成部 2 2 1 は、生成した広帯域信号 ($I(t), Q(t)$) を、光変調部 2 2 2 へ出力する。広帯域信号 ($I(t), Q(t)$) は、周波数シフトした異なる複数のアナログ信号系列の加算により生成されるため、広帯域信号系列の周波数帯域はアナログ信号系列の周波数帯域よりも広い。

【 0 0 2 0 】

光変調部 2 2 2 は、信号光源 2 2 3 から出力された搬送波としての光信号を、広帯域信号生成部 2 2 1 から入力される広帯域信号で変調して広帯域光変調信号を生成する。光変調部 2 2 2 は、生成した広帯域光変調信号を半導体光増幅器 2 3 に出力する。

【 0 0 2 1 】

半導体光増幅器 2 3 は、光変調部 2 2 2 から入力される広帯域光変調信号の強度を増幅する。半導体光増幅器 2 3 は、伝送路 3 を介して増幅した光変調信号を光受信機 4 へ出力する。

尚、変調信号系列を 3 つ以上の狭帯域信号に分割してデジタル・アナログ変換部から出力し、広帯域光変調信号を生成する構成としても良い。

広帯域信号生成部 2 2 1 及び光変調部 2 2 2 の間にドライバンプを挿入し、広帯域信号を増幅する構成をとっても良い。多重信号生成部 2 2 は広帯域信号生成部 2 2 1 と光変調部 2 2 2 を集積化した構成をとっても良い。この集積化した多重信号生成部 2 2 に信号光源 2 2 3 やドライバンプを追加して集積化する構成としても良い。狭帯域信号処理部 2 1 3 をアナログ回路として、デジタル - アナログ変換部 2 1 4 と広帯域信号生成部 2 2 1 の間に挿入する構成をとっても良い。また、この狭帯域信号処理部 2 1 3 を集積化した多重信号生成部 2 2 に追加して集積化する構成としても良い。

【 0 0 2 2 】

図 3 は、第 1 の実施形態に係る光送信機 2 の動作を示すフローチャートである。信号生成部 2 1 1 は、変調信号を生成する (ステップ S 1)。帯域分割部 2 1 2 は、変調信号を

10

20

30

40

50

狭帯域信号に変換する(ステップS2)。広帯域信号生成部221は、複数の狭帯域信号に基づいて広帯域信号を生成する(ステップS3)。光変調部222は、広帯域信号に基づいて広帯域光変調信号を生成する(ステップS4)。半導体光増幅器23は、広帯域光変調信号を増幅する(ステップS5)。

【0023】

以上説明したように、第1の実施形態に係る光送信機2は、複数の狭帯域信号に基づいて当該狭帯域信号よりも広帯域である広帯域信号を生成する。広帯域光変調信号の変動時間は光信号帯域の逆数と等しいことから、広帯域信号に基づいて生成される広帯域光変調信号は、広帯域信号よりも狭い帯域の信号に基づいて生成される光変調信号よりも変動時間が短い信号である。そのため、第1の実施形態に係る光送信機2は光変調信号の変動時間を、半導体光増幅器のキャリアライフタイムよりも十分短くすることができる。そのため、第1の実施形態に係る光送信機2は、半導体光増幅器に起因する非線形歪みの影響を軽減することができる。

10

【0024】

広帯域信号を生成するためには、高速動作可能なデジタル-アナログ変換器(DAC: Digital-to-Analog Converter)、及びアナログ-デジタル変換器(ADC: Analog-to-Digital Converter)が不可欠であるが、CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor: 相補型金属酸化膜半導体)プラットフォームを用いて作成されたDAC及びADCは、そのアナログ出力帯域が30GHz程度と不十分である。しかしながら、第1の実施形態に係る光送信機2が生成する広帯域信号は十分に広い帯域を有する。

20

【0025】

第1の実施形態に係る光送信機2は、図4に示す構成であってもよい。図示するように、第1の実施形態に係る光送信機2は複数のデジタル信号処理部(デジタル信号処理部21-1及びデジタル信号処理部21-2)から、独立した狭帯域信号がそれぞれ出力され、当該独立した狭帯域信号に基づいて生成された広帯域信号が生成されてもよい。

【0026】

図4に示すように、第1の実施形態に係る光送信機2は、信号生成部211と、デジタル-アナログ変換部214と、からなる2つのデジタル信号処理部21(21-1、21-2)と、狭帯域信号処理部213と、広帯域信号生成部221と、光変調部222と、信号光源223と、からなる多重信号生成部22と、から構成されてもよい。

30

【0027】

デジタル信号処理部21-1の信号生成部211-1は、バイナリ情報である送信データ系列から、狭帯域信号である変調信号系列($I_1(n)$, $Q_1(n)$)を生成してもよい。デジタル信号処理部21-1の信号生成部211-1は、生成した変調信号系列($I_1(n)$, $Q_1(n)$)を、デジタル-アナログ変換部214-1へ出力してもよい。

同様に、デジタル信号処理部21-2の信号生成部211-2は、バイナリ情報である送信データ系列から、狭帯域信号である変調信号系列($I_2(n)$, $Q_2(n)$)を生成してもよい。デジタル信号処理部21-2の信号生成部211-2は、生成した変調信号系列($I_2(n)$, $Q_2(n)$)を、デジタル-アナログ変換部214-1へ出力してもよい。

【0028】

デジタル信号処理部21-1のデジタル-アナログ変換部214-1は、信号生成部211-1から入力された変調信号系列を、アナログ信号に変換してもよい。デジタル信号処理部21-1のデジタル-アナログ変換部214-1は、変換したアナログ信号($I_1(t)$, $Q_1(t)$)を、狭帯域信号処理部213へ出力してもよい。

40

同様に、デジタル信号処理部21-2のデジタル-アナログ変換部214-2は、信号生成部211-2から入力された変調信号系列を、アナログ信号に変換してもよい。デジタル信号処理部21-2のデジタル-アナログ変換部214-2は、変換したアナログ信号($I_2(t)$, $Q_2(t)$)を、狭帯域信号処理部213へ出力してもよい。

【0029】

狭帯域信号処理部213は、デジタル信号処理部21-1のデジタル-アナログ変換部

50

214-1及びデジタル信号処理部21-2のデジタル-アナログ変換部214-2からそれぞれ入力されたアナログ信号である狭帯域信号について、当該狭帯域信号どうしの加算及び減算の処理のうち少なくとも一方の処理を行ってもよい。

狭帯域信号処理部213は、加算及び減算の処理のうち少なくとも一方の処理を行った狭帯域信号($I_1'(t) = I_1(t) + I_2(t)$, $Q_1'(t) = -I_2(t) + Q_1(t)$)、($I_2'(t) = I_1(t) - I_2(t)$, $Q_2'(t) = I_2(t) + Q_1(t)$)を、広帯域信号生成部221へ出力してもよい。

【0030】

光送信機2が図4に示す構成であるとき、光送信機2は変調信号を狭帯域信号に変換する動作(図3のフローチャートにおけるステップS2)を行わなくてよい。また、図4に示す光送信機2は、デジタル信号処理部21を3つ以上備えてもよい。

10

【0031】

図5は、第1の実施形態に係る光受信機4の構成を示す図である。光受信機4は半導体光増幅器41、多重信号分離部42、デジタル信号処理部43を備える。多重信号分離部42は、光電変換部421、局発光源422、広帯域信号-狭帯域信号変換部423、狭帯域信号処理部424により実現される。

【0032】

半導体光増幅器41は、伝送路3を介して受信した広帯域光変調信号の強度を増幅する。半導体光増幅器41は、増幅した光信号を光電変換部421へ出力する。

【0033】

光電変換部421は、半導体光増幅器41から入力された光信号を電気信号に変換する。光電変換部421は、半導体光増幅器41から入力された広帯域光変調信号を、局発光源422から出力された局発光と干渉させることで、光信号をアナログ信号である広帯域信号($I(t)$, $Q(t)$)に変換する。光電変換部421は、電気信号を広帯域信号-狭帯域信号変換部423へ出力する。

20

【0034】

光電変換部421は、例えば90度光ハイブリッド、フォトダイオード、トランスインピーダンスアンプ(TIA)を備える。光電変換部421は、例えば90度光ハイブリッドにより半導体光増幅器41から入力された光信号と局発光から干渉光を生成する。干渉光の同相成分及び直交成分は、それぞれフォトダイオードに入力される。フォトダイオードにより生成された電流信号をTIAにより電圧信号に変換し、電圧信号を広帯域信号-狭帯域信号変換部423へ出力する。

30

【0035】

広帯域信号-狭帯域信号変換部423は、広帯域信号を複数の狭帯域信号に分離し狭帯域信号処理部424へ入力する。狭帯域信号処理部424は、狭帯域信号どうしの信号処理を行い、デジタル信号処理部43へ出力する。

【0036】

広帯域信号-狭帯域信号変換部423における広帯域信号の狭帯域信号への分離、狭帯域信号処理部424における狭帯域信号どうしの信号処理は任意の手法で実施することができる。例えば、国際公開第2019/031447号に開示された手法を用いると以下のような処理となる。

40

【0037】

広帯域信号-狭帯域信号変換部423は、光電変換部421から入力された広帯域信号($I(t)$, $Q(t)$)を、複数(本実施形態においては2つ)の広帯域信号にそれぞれ分割する。広帯域信号-狭帯域信号変換部423は、分割した複数の広帯域信号を周波数シフトし狭帯域信号とする。広帯域信号-狭帯域信号変換部423は、周波数シフトした複数の狭帯域信号($(I_1'(t), Q_1'(t))$ 、($I_2'(t), Q_2'(t)$))を、それぞれ狭帯域信号処理部424へ出力する。狭帯域信号それぞれは、(式1)で表される。

【0038】

(式1)

50

$$\begin{aligned} I_1'(t) &= I_1(t) + I_2(t), \\ Q_1'(t) &= -Q_1(t) + Q_2(t), \\ I_2'(t) &= I_1(t) - I_2(t), \\ Q_2'(t) &= Q_1(t) + Q_2(t), \end{aligned}$$

【0039】

狭帯域信号処理部424は、広帯域信号-狭帯域信号変換部423から入力された複数の狭帯域信号について、当該複数の狭帯域信号どうしの加算及び減算の処理のうち少なくとも一方の処理を行う。狭帯域信号処理部424は、加算及び減算の処理のうち少なくとも一方の処理を行った複数の狭帯域信号 $(I_1(t), Q_1(t))$ 、 $(I_2(t), Q_2(t))$ を、アナログ-デジタル変換部431へ出力する。

10

尚、狭帯域信号処理部424はデジタル信号処理部43の復号部432に備えられる構成としてもよい。

【0040】

デジタル信号処理部43は、アナログ-デジタル変換部431及び復号部432を備える。アナログ-デジタル変換部431は、多重信号分離部42から入力された狭帯域のアナログ信号系列をデジタル信号系列 $(I_1(n), Q_1(n))$ 、 $(I_2(n), Q_2(n))$ に変換する。復号部432は、狭帯域信号を広帯域信号へ変換し、光送信機2や伝送路3及び光受信機4で生じた波形歪みを等化した後に、デジタル信号系列を復号する。

尚、復号部432は、狭帯域信号を広帯域信号へ変換せず、光送信機2や伝送路3及び光受信機4で狭帯域信号に生じた波形歪みを独立に等化した後に、デジタル信号系列を復号する構成としてもよい。

20

【0041】

図6は、第1の実施形態に係る光受信機4の動作を示すフローチャートである。半導体光増幅器41は、光受信機4が受信した広帯域光変調信号を半導体光増幅器で増幅する(ステップS11)。多重信号分離部42は、広帯域光変調信号を狭帯域信号に分離する(ステップS12)。デジタル信号処理部43は、アナログ-デジタル変換部431により、狭帯域のアナログ信号系列をデジタル信号系列に変換し、復号部432で狭帯域信号を復号する(ステップS13)。

【0042】

第1の実施形態に係る光伝送システム1は、光送信機2が送信する光信号の周波数帯域が広帯域であることから、光送信機2に備えられた半導体光増幅器23及び光受信機4に備えられた半導体光増幅器41に起因する非線形歪みの影響を軽減することができる。

30

【0043】

第1の実施形態に係る光受信機4は、図7に示す構成であってもよい。図示するように、第1の実施形態に係る光受信機4は複数のデジタル信号処理部43(デジタル信号処理部43-1及びデジタル信号処理部43-2)を備える構成であってもよい。また、光受信機4が3つ以上のデジタル信号処理部を備えるような構成であってもよい。

【0044】

第2の実施形態

図8は、第2の実施形態に係る光送信機2の構成を示す図である。第2の実施形態に係る光送信機2は、第1の実施形態に係る光送信機2と異なり、中心波長の異なる複数の光変調信号を波長合波部で多重して広帯域光変調信号を生成することに特徴がある。第2の実施形態に係る光送信機2は、デジタル信号処理部21を複数(本実施形態では2個)備える。第2の実施形態に係る各デジタル信号処理部21の構成は、第1の実施形態に係るデジタル信号処理部21と同じであり、帯域分割部212及び狭帯域信号処理部213を備える。尚、この際、複数のデジタル信号処理部21を集積化して1つのデジタル信号処理部21とし、帯域分割部212及び狭帯域信号処理部213を備えた構成としてもよい。なお、他の実施形態においては、複数のデジタル信号処理部21は信号生成部211及びデジタル-アナログ変換部214のみ備え、帯域を分割せずに $I(n)$ 、 $Q(n)$ 信号をDA変換するものであってもよい。この場合は、多重信号生成部22は、広帯域信号生成

40

50

部 2 2 1 を備えず、複数備えたデジタル信号処理部 2 1 から出力された複数のアナログ狭帯域信号をそれぞれ光変調し、波長合波してもよい。尚、この際、光送信機 2 は、複数のデジタル信号処理部 2 1 を集積化して 1 つのデジタル信号処理部 2 1 とし、信号生成部 2 1 1 及びデジタル-アナログ変換部 2 1 4 のみ備え、複数の狭帯域信号を出力する構成でもよい。

【 0 0 4 5 】

第 2 の実施形態に係る多重信号生成部 2 2 は、広帯域信号生成部 2 2 1、光変調部 2 2 2 及び信号光源 2 2 3 を複数（本実施形態では 2 個）備え、波長合波部 2 2 4 を備える。また、第 2 の実施形態に係る光送信機 2 は信号光源 2 2 3 を複数個備えず、信号光源 2 2 3 を複数の光搬送波を有するスーパーコンティニウム光源として、これらの搬送波を分割して、複数の光変調部 2 2 2 に信号光を出力してもよい。

10

【 0 0 4 6 】

第 2 の実施形態に係る光変調部 2 2 2 は、デジタル信号処理部 2 1 から入力されるアナログ信号系列をそれぞれ変調し、光変調信号を生成する。第 2 の実施形態に係る光変調部 2 2 2 は、光変調信号を波長合波部 2 2 4 へ出力する。

【 0 0 4 7 】

波長合波部 2 2 4 は、複数の光変調部 2 2 2 から入力される光変調信号を合波し、広帯域光変調信号を生成する。広帯域光変調信号の周波数帯域は光変調信号の周波数帯域よりも大きい。波長合波部 2 2 4 は、広帯域光変調信号を半導体光増幅器 2 3 へ出力する。

【 0 0 4 8 】

第 2 の実施形態に係る半導体光増幅器 2 3 は、波長合波部 2 2 4 から入力される広帯域光変調信号の強度を増幅する。第 2 の実施形態に係る半導体光増幅器 2 3 は、増幅した光信号を伝送路 3 を介して光受信機 4 へ出力する。

20

【 0 0 4 9 】

図 9 は、第 2 の実施形態に係る光送信機 2 の動作を示すフローチャートである。信号生成部 2 1 1 は、変調信号を生成する（ステップ S 2 1）。帯域分割部 2 1 2 は、変調信号を狭帯域信号に変換する（ステップ S 2 2）。広帯域信号生成部 2 2 1 は、複数の狭帯域信号に基づいて広帯域信号を生成する（ステップ S 2 3）。波長合波部 2 2 4 は、光変調部 2 2 2 から出力される複数の光変調信号を合波し広帯域光変調信号を生成する（ステップ S 2 4）。半導体光増幅器 2 3 は、広帯域光変調信号を増幅する（ステップ S 2 5）。

30

尚、上述した通りデジタル信号処理部 2 1 が信号生成部 2 1 1 及びデジタル-アナログ変換部 2 1 4 のみ備え、多重信号生成部 2 2 が広帯域信号生成部 2 2 1 を備えない場合は、ステップ S 2 2 を省略することができる。

【 0 0 5 0 】

第 2 の実施形態に係る光送信機 2 は、波長合波部 2 2 4 により光変調信号を合波することで帯域の広い光信号を生成することができる。そのため、第 2 の実施形態に係る光送信機 2 が扱う光変調信号の変動時間は、第 1 の実施形態に係る光送信機 2 と同様に半導体光増幅器のキャリアライフタイムよりも短い。そのため、第 2 の実施形態に係る光送信機 2 は、半導体光増幅器に起因する非線形歪みの影響を軽減することができる。

【 0 0 5 1 】

図 10 は、第 2 の実施形態に係る光受信機 4 の構成を示す図である。第 2 の実施形態に係る光受信機 4 は、第 1 の実施形態に係る光受信機 4 と異なり広帯域光変調信号を波長分波部 4 2 5 で分波して、狭帯域信号を生成することに特徴がある。第 2 の実施形態に係る光受信機 4 は、半導体光増幅器 4 1 と、多重信号分離部 4 2 と複数（本実施形態では 2 個）のデジタル信号処理部 4 3 を備える。多重信号分離部 4 2 は、波長分波部 4 2 5 と、複数（本実施形態では 2 個）の光電変換部 4 2 1、局発光源 4 2 2、広帯域信号-狭帯域信号変換部 4 2 3、及び狭帯域信号処理部 4 2 4 を備える。第 2 の実施形態に係る各デジタル信号処理部 4 3 は、それぞれ第 1 の実施形態に係るデジタル信号処理部 4 3 と同じ構成であり、アナログ-デジタル変換部 4 3 1 及び復号部 4 3 2 を備える。なお、他の実施形態においては、多重信号分離部 4 2 は、波長分波部 4 2 5、光電変換部 4 2 1 及び局発光源 4

40

50

2 2のみを備え、アナログ信号において狭帯域信号への変換を行わずに $I(t)$ 、 $Q(t)$ 信号を出力するものであってもよい。なお、この際は、光受信機4はデジタル信号処理部43を1つ備え、光電変換部421から入力される信号をAD変換し復号してもよい。また、第2の実施形態に係る光受信機4は局発光源422を複数備えず、局発光源422を複数の光搬送波を有するスーパーコンティニウム光源として、これらの搬送波を分割して、複数の光電変換部421に局発光を出力してもよい。

【0052】

波長分波部425は、半導体光増幅器41から入力された広帯域光変調信号を分波する。波長分波部425は、分波した光信号をそれぞれ対応する光電変換部421へ出力する。

【0053】

第2の実施形態に係る光電変換部421は、波長分波部425から入力される光信号を電気信号に変換する。第2の実施形態に係る広帯域信号-狭帯域信号変換部423は光電変換部421から入力される広帯域信号を複数の狭帯域信号に分離し狭帯域信号処理部424へ入力する。第2の実施形態に係る狭帯域信号処理部424は、広帯域信号-狭帯域信号変換部423から入力された複数の狭帯域信号について、当該複数の狭帯域信号どうしの加算及び減算の処理のうち少なくとも一方の処理を行う。第2の実施形態に係るアナログ-デジタル変換部431は、多重信号分離部42から入力された狭帯域のアナログ信号系列をデジタル信号系列に変換する。第2の実施形態に係る復号部432は、狭帯域信号を広帯域信号へ変換し、光送信機2や伝送路3及び光受信機4で生じた波形歪みを等化した後に、デジタル信号系列を復号する。

【0054】

図11は、第2の実施形態に係る光受信機4の動作を示すフローチャートである。半導体光増幅器41は、光受信機4が受信した広帯域光変調信号を増幅する(ステップS31)。多重信号分離部42に備えた波長分波部425は、広帯域光変調信号を分波し、狭帯域信号に分離する(ステップS32)。デジタル信号処理部43は、アナログ-デジタル変換部431により、狭帯域のアナログ信号系列をデジタル信号系列に変換し、復号部432で狭帯域信号を復号する(ステップS33)。

【0055】

第2の実施形態に係る光伝送システム1は、第1の実施形態に係る光伝送システム1と同様に、光送信機2が送信する光信号の周波数帯域が広帯域であることから、光送信機2に備えられた半導体光増幅器23及び光受信機4に備えられた半導体光増幅器41に起因する非線形歪みの影響を軽減することができる。

【0056】

第3の実施形態

図12は、第3の実施形態に係るデジタル信号処理部21及びデジタル信号処理部43の構成を示す図である。第3の実施形態に係るデジタル信号処理部21は第1の実施形態又は第2の実施形態に係るデジタル信号処理部21と異なり、デジタル信号処理部21内にSOA歪補償部215を備える。第3の実施形態に係るデジタル信号処理部43は第1の実施形態又は第2の実施形態に係るデジタル信号処理部43と異なり、SOA歪推定部434及び物理パラメータ推定部435を備える。なお、物理パラメータが既知である場合には、第3の実施形態に係るデジタル信号処理部43は、SOA歪推定部434と物理パラメータ推定部435を備えなくてもよい。SOA歪補償部215、SOA歪推定部434、物理パラメータ推定部435には任意の手法を用いることができる。例えば特開2018-019255号公報に記載された手法を用いて、以下のようにしてSOAにより生じる歪の補償をすることができる。

【0057】

SOA歪補償部215は、信号生成部211により生成された変調信号に対して、半導体光増幅器23による歪を補償する。SOA歪補償部215は、補償した信号を帯域分割部212に出力する。

【0058】

10

20

30

40

50

SOA歪補償部215は、半導体光増幅器23の物理パラメータの推定値を光受信機4の物理パラメータ推定部435から取得する。SOA歪補償部215は、半導体光増幅器23の物理パラメータの推定値に基づいて、半導体光増幅器23に入力される光信号に生じる非線形信号歪みを推定し、非線形信号歪みを補償する。なお、物理パラメータが既知である場合には、物理パラメータをSOA歪補償部215に設定しておけば良い。

【0059】

SOA歪補償部215は、半導体光増幅器23によって半導体光増幅器23に入力される光信号に生じる非線形信号歪みの利得係数 $h(t)$ を、半導体光増幅器23の物理パラメータの推定値に基づいて算出する。SOA歪補償部215は、非線形信号歪みの利得係数 $h(t)$ の逆特性の利得係数 $-h(t)$ を用いて、非線形信号歪みの利得係数 $h(t)$ の逆特性を表す値 $(\exp(-h(t)(1+j)/2))$ を算出する。SOA歪補償部215は、非線形信号歪みの利得係数 $h(t)$ の逆特性を表す値 $(\exp(-h(t)(1+j)/2))$ を、半導体光増幅器23に入力される光信号に乘算する。これにより、SOA歪補償部215は、半導体光増幅器23に入力される光信号に生じる非線形信号歪みを、予等化することができる。

10

【0060】

半導体光増幅器23が取得した光信号と半導体光増幅器23が出力した光信号との関係は、式(1)に示す物理モデルで示される(非特許文献3及び非特許文献4参照)。

【0061】

【数1】

20

$$E_o(t) = E_I(t) \exp\left(\frac{h(t)(1+j\alpha)}{2}\right) \dots (1)$$

【0062】

ここで、 $E_I(t)$ は、半導体光増幅器23が取得した光信号(光変調部222が出力する光変調信号)の複素振幅を示す。 $E_o(t)$ は、半導体光増幅器23が送信した光信号の複素振幅を示す。 $h(t)$ は、利得係数を示す。 α は、線幅増大係数を示す。 j は、虚数単位を示す。 $\exp(h(t)(1+j)/2)$ は、半導体光増幅器23によって光変調信号に生じる非線形信号歪みを示す。

30

【0063】

式(1)に示す物理モデルでは、利得係数 $h(t)$ は、式(2)に示す微分方程式で表現される。

【0064】

【数2】

$$\tau_c \frac{d}{dt} h(t) = h_0 - h(t) - \left[\exp(h(t)) - 1 \right] \frac{|E_I(t)|^2}{P_{sat}}$$

40

... (2)

【0065】

ここで、 τ_c は、キャリア寿命を示す。 h_0 は、非飽和利得を示す。 P_{sat} は、飽和出力を示す。これらは、式(1)に示す線幅増大係数とともに、半導体光増幅器23の物理パラメータである。式(1)に示す物理モデルでは、これらの物理パラメータが求めれば、半導体光増幅器23によって送信信号に生じる非線形信号歪みの挙動は、表現可能である。

50

【 0 0 6 6 】

半導体光増幅器 2 3 が取得した光信号のパワーに利得係数 $h(t)$ の時間変化が依存していることは、式 (2) に示されている。したがって、半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータが分かれば、光信号のパワーに依存した利得係数 $h(t)$ は、式 (2) から求めることができる。

【 0 0 6 7 】

S O A 歪補償部 2 1 5 は、例えば、オイラー法や N 次 (N は正の整数) のルンゲクッタ法による時間発展解法によって、式 (2) から利得係数 $h(t)$ を数値解として求めることができる。S O A 歪補償部 2 1 5 は、式 (2) から利得係数 $h(t)$ を求める場合、解析解が存在すれば解析解を用いてもよい。

10

【 0 0 6 8 】

S O A 歪補償部 2 1 5 は、利得係数 $h(t)$ の逆特性の利得係数 ($-h(t)$) を用いて、非線形信号歪みの利得係数 $h(t)$ の逆特性を表す値 ($\exp(-h(t)(1+j)/2)$) を算出する。

【 0 0 6 9 】

S O A 歪補償部 2 1 5 は、非線形信号歪みの利得係数 $h(t)$ の逆特性を表す値 ($\exp(-h(t)(1+j)/2)$) を光変調信号 $E_I(t)$ に乗算することによって、半導体光増幅器 2 3 で光変調信号に生じる非線形信号歪みを補償する。これにより、S O A 歪補償部 2 1 5 は、半導体光増幅器 2 3 によって光変調信号に生じる非線形信号歪みを、予等化することができる。

20

【 0 0 7 0 】

なお、S O A 歪補償部 2 1 5 は、時間発展解法以外の解法によって、式 (2) から利得係数 $h(t)$ を求めてもよい。半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータが推定されていない場合、S O A 歪補償部 2 1 5 では、利得係数 $h(t)$ を 0 とし、半導体光増幅器 2 3 で光変調信号に生じる非線形信号歪みを補償しない構成をとってもよい。半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータが推定されていない場合、信号生成部 2 1 1 から出力される変調信号は、S O A 歪補償部 2 1 5 を迂回して半導体光増幅器 2 3 で光変調信号に生じる非線形信号歪みを補償しない構成をとってもよい。

【 0 0 7 1 】

S O A 歪推定部 4 3 4 は、光送信機 2 の送信信号に基づくデジタル信号である受信信号を、アナログ - デジタル変換部 4 3 1 から取得する。S O A 歪推定部 4 3 4 は、光送信機 2 の送信信号を、参照信号として光送信機 2 から取得する。例えば、S O A 歪推定部 4 3 4 は、コミュニケーションチャンネル (非特許文献 5 参照)、N E - O p S (Network Element-Operations Systems) 又は N W - O p S (Network-Operations System) 等である制御チャンネル 5 を介して、光送信機 2 の送信信号を参照信号として光送信機 2 から取得する。例えば、S O A 歪推定部 4 3 4 は、送信データ系列の一部の既知信号を、参照信号として光送信機 2 から取得する。例えば、S O A 歪推定部 4 3 4 は、受信信号のシンボルの値の系列を、参照信号として光送信機 2 から取得する。

30

【 0 0 7 2 】

S O A 歪推定部 4 3 4 は、測定された光信号 $E_o(t)$ を光信号 $E_I(t)$ で除算した結果と式 (1) とに基づいて、半導体光増幅器 2 3 によって送信信号に生じる非線形信号歪みを表す値 ($\exp(h(t)(1+j)/2)$) と線幅増大係数 α とを、式 (3) のように求める。

40

【 0 0 7 3 】

【 数 3 】

$$\frac{E_o(t)}{E_I(t)} = \exp\left(\frac{h(t)(1+j\alpha)}{2}\right) \dots (3)$$

50

【 0 0 7 4 】

S O A 歪推定部 4 3 4 は、参照信号を繰り返し信号として同一シンボルの平均値を算出してもよい。これにより、S O A 歪推定部 4 3 4 は、白色雑音による信号歪みを軽減することができる。S O A 歪推定部 4 3 4 は、非線形信号歪みの推定精度を上げることができる。

【 0 0 7 5 】

S O A 歪推定部 4 3 4 は、半導体光増幅器 2 3 による非線形信号歪みが大きい場合、信号品質の劣化により、非線形信号歪みを精度よく推定することができない場合がある。S O A 歪推定部 4 3 4 は、一度推定した値をフィードバックして推定を繰り返してもよい。これにより、S O A 歪推定部 4 3 4 は、半導体光増幅器 2 3 による非線形信号歪みが大きい場合でも、より高い精度で伝達関数を補償することができる。

10

【 0 0 7 6 】

半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータの測定値は、半導体光増幅器 2 3 の製造誤差等に起因する個体差によって、半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータの設計値とは異なる場合がある。そこで、物理パラメータ推定部 4 3 5 は、半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータを、デジタル信号処理によって推定する。これによって、光送信機 2 の S O A 歪補償部 2 1 5 は、光送信機 2 の半導体光増幅器 2 3 の個体差を吸収して、非線形信号歪みを補償することができる。S O A 歪推定部 4 3 4 は、未知の物理パラメータを有する半導体光増幅器 2 3 に対しても、非線形信号歪みを補償することができる。物理パラメータ推定部 4 3 5 は、S O A 歪推定部 4 3 4 が参照信号に基づいて非線形信号歪みを推定した結果に基づいて、半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータを推定する。

20

【 0 0 7 7 】

物理パラメータ推定部 4 3 5 は、式 (3) を用いて求められた利得係数 $h (t)$ と式 (2) とよって、半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータを推定する。半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータは、例えば、キャリア寿命 τ_c 、非飽和利得 h_0 、飽和出力 P_{sat} である。

【 0 0 7 8 】

物理パラメータ推定部 4 3 5 は、半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータを推定する方法は、特定の方法に限定されない。例えば、物理パラメータ推定部 4 3 5 は、半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータを、最小二乗法によるフィッティングや、連立方程式による算出等によって推定してもよい。

30

【 0 0 7 9 】

物理パラメータ推定部 4 3 5 は、コミュニケーションチャネル (非特許文献 5 参照)、N E - O p S 又は N W - O p S 等の制御チャネル 5 を通じて、半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータを S O A 歪補償部 2 1 5 にフィードバックする。

【 0 0 8 0 】

なお、物理パラメータ推定部 4 3 5 は、光送信機 2 と光受信機 4 とが専用線で直結されている場合、伝送路 3 の代わりに専用線を伝送された光信号に基づいて、半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータを推定してもよい。物理パラメータ推定部 4 3 5 は、半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータを推定した後において、参照信号が加えられた送信信号から参照信号を削除した結果の信号を光送信機 2 及び復号部 4 3 2 に送信することができる。この後に、物理パラメータを再度推定する必要がある場合、物理パラメータ推定部 4 3 5 は、送信信号に参照信号を再び加えてもよい。物理パラメータ推定部 4 3 5 は、半導体光増幅器 2 3 に注入される電流が変化しない場合や、半導体光増幅器 2 3 が取得する光信号の強度が変化しない場合、半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータの推定結果を継続的に使用することができる。これらの場合、物理パラメータ推定部 4 3 5 は、半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータの推定を一時停止してもよいし、半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータを継続的及び定期的に算出してもよい。物理パラメータ推定部 4 3 5 は、半導体光増幅器 2 3 に注入される電流が変化しない場合や、半導体光増幅器 2 3 が取得する光信号の強度が変化した場合、半導体光増幅器 2 3 の物理パラメータを再び算出する。

40

50

【 0 0 8 1 】

以上により、第3の実施形態に係る光送信機2は、信号生成部211により生成された変調信号に対して、半導体光増幅器23による歪を補償することができ、より半導体光増幅器に起因する非線形歪みの影響を軽減することができる。

【 0 0 8 2 】

S O A歪推定部434及び物理パラメータ推定部435が備えられるのはデジタル信号処理部43に限られない。例えば、物理パラメータ推定部435又はS O A歪推定部434と物理パラメータ推定部435の両方が対応するデジタル信号処理部21に備えられ、デジタル信号処理部43とデジタル信号処理部21とが制御チャンネル5を通じて、信号を送受信してもよい。

10

【 0 0 8 3 】

また、S O A歪補償部が備えられるのはデジタル信号処理部21に限られない。例えばデジタル信号処理部43の復号部432にS O A歪補償部が備えられ、アナログ-デジタル変換部431により変換された信号に非線形信号歪みの利得係数 $h(t)$ の逆特性を表す値 $(\exp(-h(t)(1+j)/2))$ を乗算することによって、半導体光増幅器23で送信信号に生じる非線形信号歪みを補償してもよい。

【 0 0 8 4 】

S O A歪補償部215及び復号部432に備えたS O A歪補償部は、光受信機4に備えられる半導体光増幅器41により生じる非線形信号歪みも、半導体光増幅器23により生じる非線形信号歪みと同様に補償してもよい。

20

【 0 0 8 5 】

実験例

以下、第1の実施形態の図2の構成における実験例を説明する。実験例において、光送信機2の光変調部222から半導体光増幅器23に入力される広帯域光変調信号のシンボルレートは42GBd、84GBd、168GBdである。変調方式は、確率的コンスタレーションシェーピングを施した偏波多重16QAM (quadrature amplitude modulation) である。また、半導体光増幅器23に注入する電流を変化させ、増幅率を変化させた。

【 0 0 8 6 】

図13は、各条件における信号空間ダイヤグラムを示す表である。図13に示された6つの信号空間ダイヤグラムは、半導体光増幅器23に注入する電流を100mA及び350mA、広帯域光変調信号のシンボルレートを42GBd、84GBd及び168GBdにした場合に光送信機2から出力される信号を示す信号空間ダイヤグラムである。光変調信号のシンボルレートが42GBdから84GBd、84GBdから168GBdと大きくなることで、信号点間の境界が明確になり、半導体光増幅器に起因する非線形歪みが低減されていることが、特に注入電流が350mAである場合に確認された。

30

【 0 0 8 7 】

また、光送信機2の半導体光増幅器23から出力される光信号のSN比と、光送信機の半導体光増幅器23をE D F A (Erbium Doped Fiber Amplifier) に取って代えた場合にE D F Aから出力される光信号のSN比との差をSNRペナルティとして、半導体光増幅器への注入電流の依存性を示した。

40

【 0 0 8 8 】

図14は、半導体光増幅器への注入電流(S O A注入電流)の大きさとSNRペナルティの関係を示すグラフである。S O A注入電流が350mAであるとき、光変調信号のシンボルレートが168GBdのSNRペナルティは、シンボルレートが42GBdのSNRペナルティよりも約2dB小さく、シンボルレートが84GBdのSNRペナルティよりも約1dB小さかった。よって、高いシンボルレートの光変調信号を用いることで、特に半導体光増幅器の増幅率が高い場合に、半導体光増幅器に起因する非線形歪みが低減されることが示された。

【 0 0 8 9 】

他の実施形態

50

以上、図面を参照してこの発明の実施形態について詳しく説明してきたが、具体的な構成は上述のものに限られることはなく、この発明の要旨を逸脱しない範囲内において様々な設計変更等を行うことが可能である。

【0090】

上記実施形態において信号生成部211は光信号の同相成分と直交成分を示す電気信号である変調信号系列($I(n)$, $Q(n)$)を生成するがこれに限られない。例えば、光信号の偏波を利用し、光信号のX偏波とY偏波の同相成分と直交成分を示す電気信号($XI(n)$, $XQ(n)$, $YI(n)$, $YQ(n)$)を生成してもよい。

【0091】

第1の実施形態において、光送信機2の半導体光増幅器23は光変調部222により生成される光変調信号の強度を増幅するがこれに限られない。半導体光増幅器23は、光変調部222と信号光源223との間に設けられ、信号光源223から入力される信号光を増幅して光変調部222に出力してもよい。また、光信号のX偏波とY偏波とで異なる信号を有する場合、半導体光増幅器23は光変調部222に含まれ、X偏波成分又はY偏波成分の一方のみ、もしくは半導体光増幅器23は光変調部222に複数含まれ両方、を増幅してもよい。

10

【0092】

第1の実施形態において、光受信機4の半導体光増幅器41は光受信機4に入力される光信号の強度を増幅するがこれに限られない。光信号のX偏波とY偏波とで異なる信号を有する場合、半導体光増幅器41は、光電変換部421に含まれ、X偏波成分又はY偏波成分の一方のみ、もしくは半導体光増幅器41は光電変換部421に複数含まれ両方、を増幅してもよい。

20

【0093】

光送信機2と光受信機4とは同じ装置により実現されてもよい。このとき、信号光源223と局発光源422とは同一の光源であってもよい。

【0094】

第1及び第2の実施形態においてはIQ変調信号が扱われる構成例であったが、強度変調信号が扱われる構成例としても良い。この場合は局発光源422と光電変換部421を構成する90度光ハイブリッドを省略することもできる。

【0095】

図15は、本実施形態に係る光送受信機100を示す図である。光送受信機100は、処理装置101及び光フロントエンド102を備える。処理装置101は、デジタル信号処理部21及びデジタル信号処理部43を備える。光フロントエンド102は、多重信号生成部22、半導体光増幅器23、半導体光増幅器41、多重信号分離部42を備える。光フロントエンド102を構成する多重信号生成部22、半導体光増幅器23、半導体光増幅器41、多重信号分離部42は、集積化された構成をとってもよい。光フロントエンド102に信号光源223を集積化してもよい。多重信号分離部42は局発光源422を備えず、信号光源223を分岐して局発光源422の機能を有していてもよい。

30

【0096】

なお、上述した通り、光送受信機100は、光信号の偏波を利用し、光信号のX偏波とY偏波の同相成分と直交成分を示す電気信号($XI(n)$, $XQ(n)$, $YI(n)$, $YQ(n)$)を用いた通信を行ってもよい。図16は、本実施形態に係る偏波多重を行う光送受信機100を示す図である。

40

図16に示すように、デジタル信号処理部21において、信号生成部211は、光信号のX偏波とY偏波の同相成分と直交成分を示す電気信号($XI(n)$, $XQ(n)$, $YI(n)$, $YQ(n)$)を生成し、帯域分割部212、狭帯域信号処理部213及びデジタル-アナログ変換部214は、X偏波に係る電気信号とY偏波に係る電気信号をそれぞれ独立して処理する。多重信号生成部22において、広帯域信号生成部221は、X偏波に係る電気信号とY偏波に係る電気信号をそれぞれ独立して処理し、光変調部222は、光変調に加え偏波合成を行うことで光信号を生成する。

50

【 0 0 9 7 】

また、多重信号分離部 4 2 においては、光電変換部 4 2 1 は光信号を偏波分離した後、光電変換を行うことで、X 偏波と Y 偏波に係る広帯域信号を生成する。広帯域信号-狭帯域信号変換部 4 2 3、狭帯域信号処理部 4 2 4、アナログ - デジタル変換部 4 3 1 は、X 偏波に係る電気信号と Y 偏波に係る電気信号をそれぞれ独立して処理する。復号部 4 3 2 は、X 偏波に係る電気信号と Y 偏波に係る電気信号を復号し、受信データ系列を生成する。

尚、多重信号生成部 2 2、半導体光増幅器 2 3、半導体光増幅器 4 1、多重信号分離部 4 2 を、集積化し、光フロントエンド 1 0 2 とする構成をとってもよい。この光フロントエンド 1 0 2 に信号光源 2 2 3 を集積化してもよい。

【 符号の説明 】

【 0 0 9 8 】

1 光伝送システム、2 光送信機、3 伝送路、4 光受信機、2 1 デジタル信号処理部、2 1 1 信号生成部、2 1 2 帯域分割部、2 1 3 狭帯域信号処理部、2 1 4 デジタル - アナログ変換部、2 2 多重信号生成部、2 2 1 広帯域信号生成部、2 2 2 光変調部、2 2 3 信号光源、2 2 4 波長合波部、2 3、4 1 半導体光増幅器、4 2 多重信号分離部、4 2 1 光電変換部、4 2 2 局発光源、4 2 3 広帯域信号-狭帯域信号変換部、4 2 4 狭帯域信号処理部、4 2 5 波長分波部

10

20

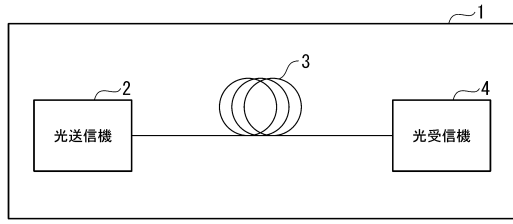
30

40

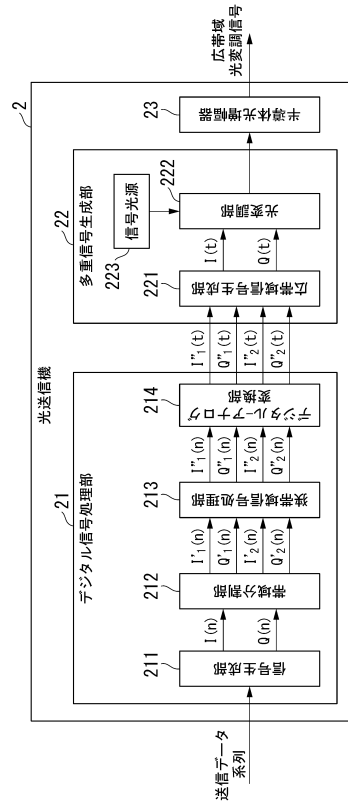
50

【図面】

【図 1】



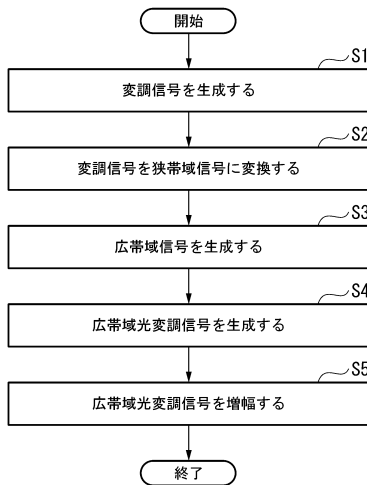
【図 2】



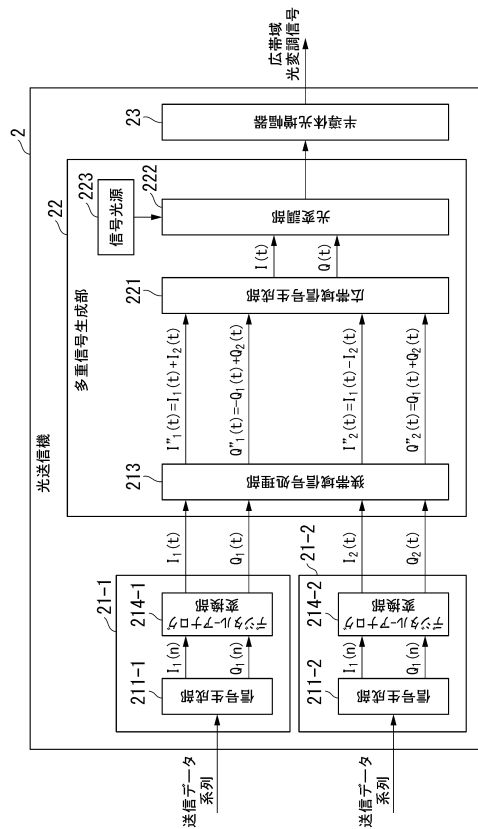
10

20

【図 3】



【図 4】

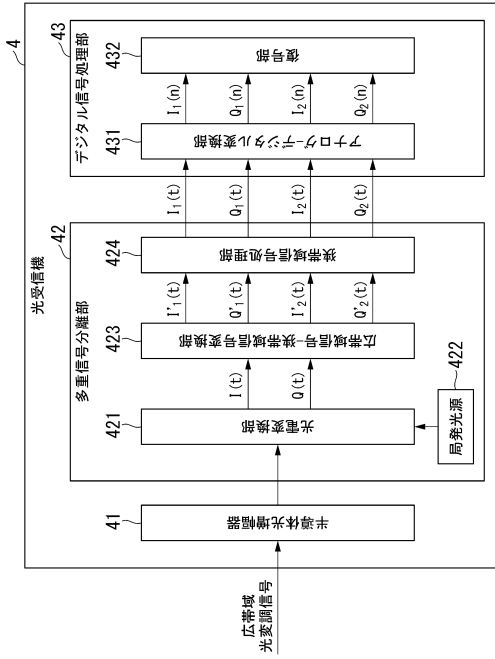


30

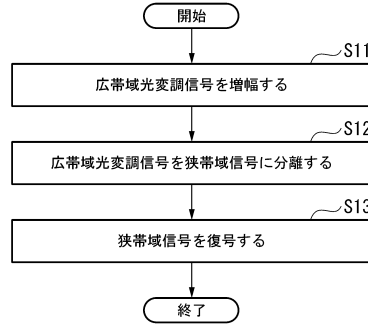
40

50

【図5】



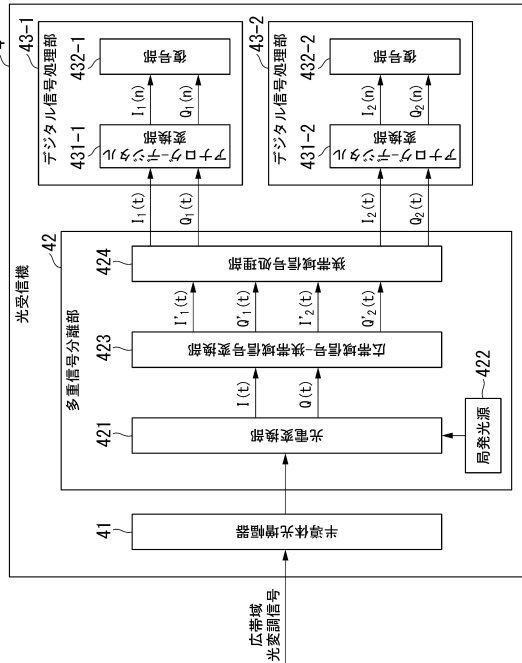
【図6】



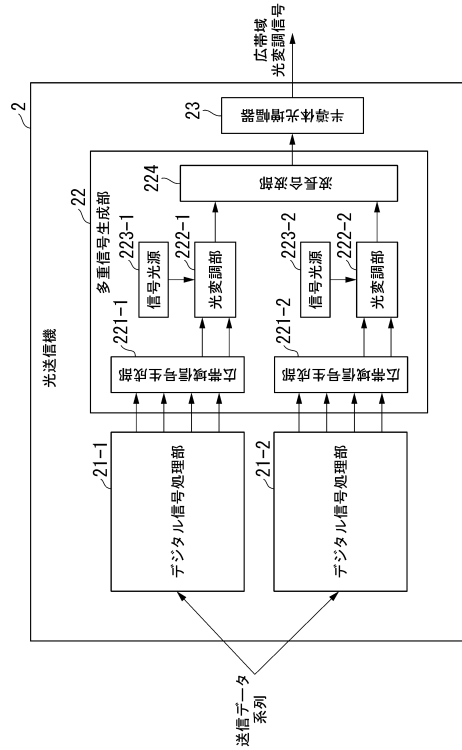
10

20

【図7】



【図8】

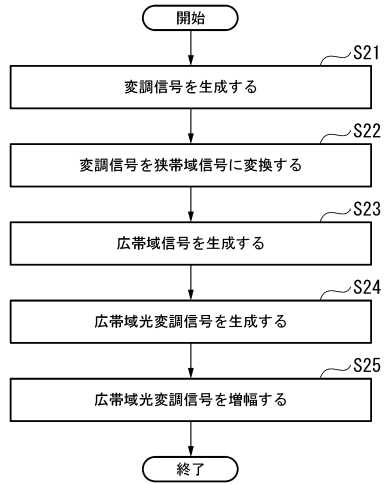


30

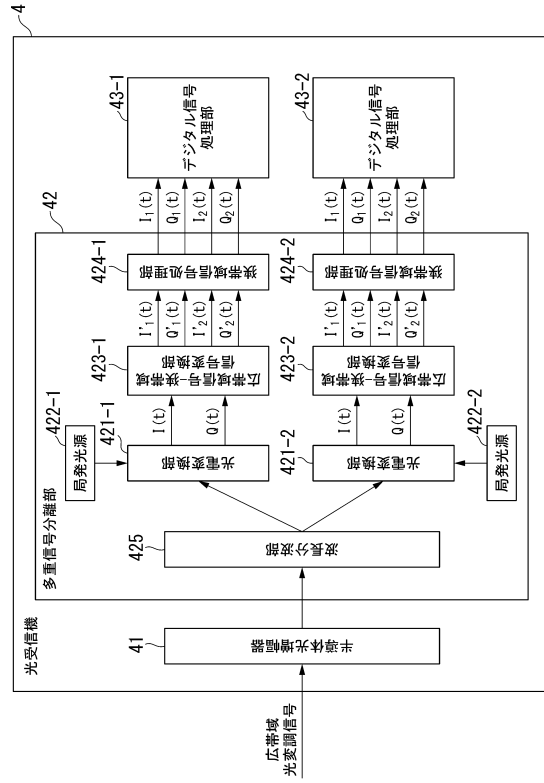
40

50

【図9】



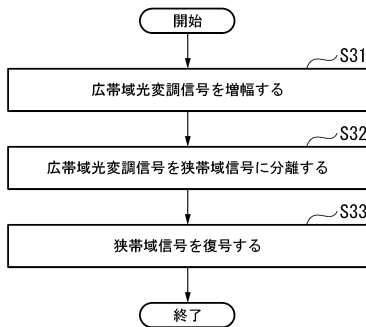
【図10】



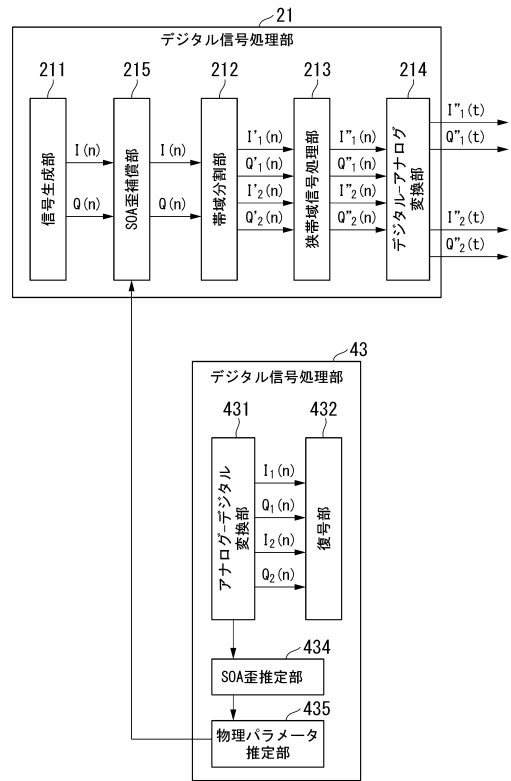
10

20

【図11】



【図12】

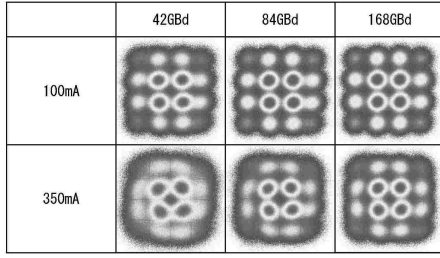


30

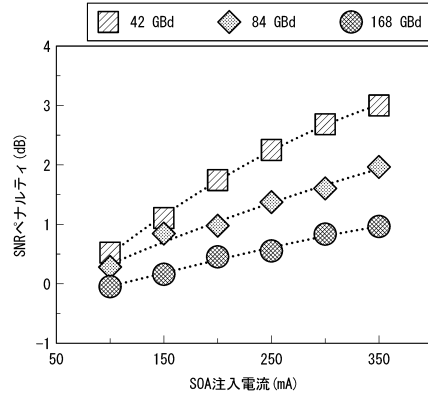
40

50

【図 1 3】

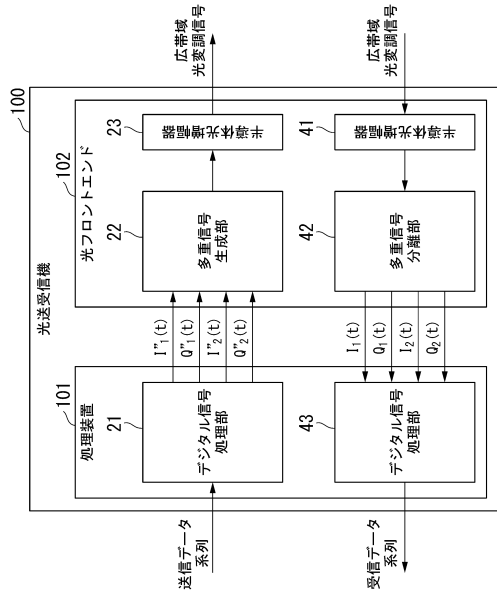


【図 1 4】

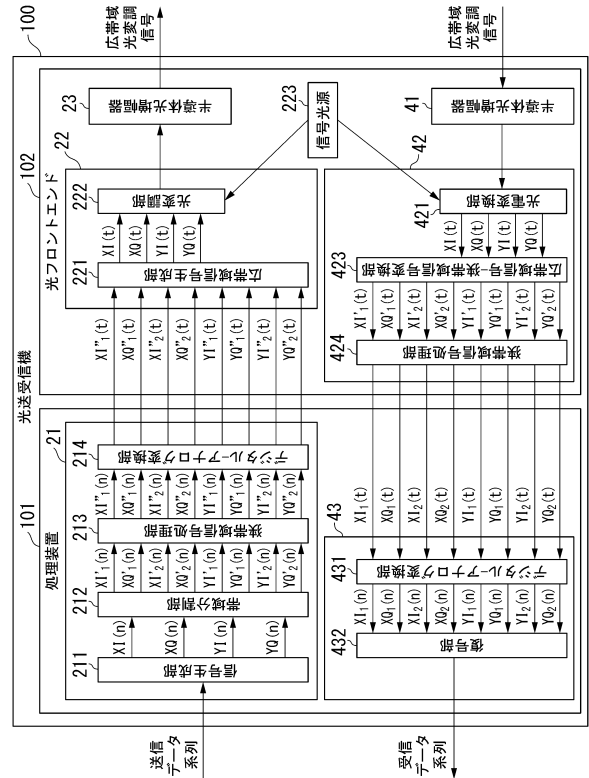


10

【図 1 5】



【図 1 6】



20

30

40

50

フロントページの続き

- 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
(72)発明者 脇田 斉
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
(72)発明者 山崎 裕史
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
(72)発明者 小木曾 義弘
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
(72)発明者 宮本 裕
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
審査官 鴨川 学
(56)参考文献 特開2019-220773(JP,A)
特開2004-112781(JP,A)
特開2018-019255(JP,A)
(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
H04J 14/02
H04B 10/50
H04B 10/60