

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2024年3月7日(07.03.2024)



(10) 国際公開番号

WO 2024/047733 A1

- (51) 国際特許分類:
H04B 10/58 (2013.01) **H04B 10/61** (2013.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2022/032540
- (22) 国際出願日: 2022年8月30日(30.08.2022)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人: 日本電信電話株式会社 (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008116 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 濱岡 福太郎 (HAMAOKA Fukutaro); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 中

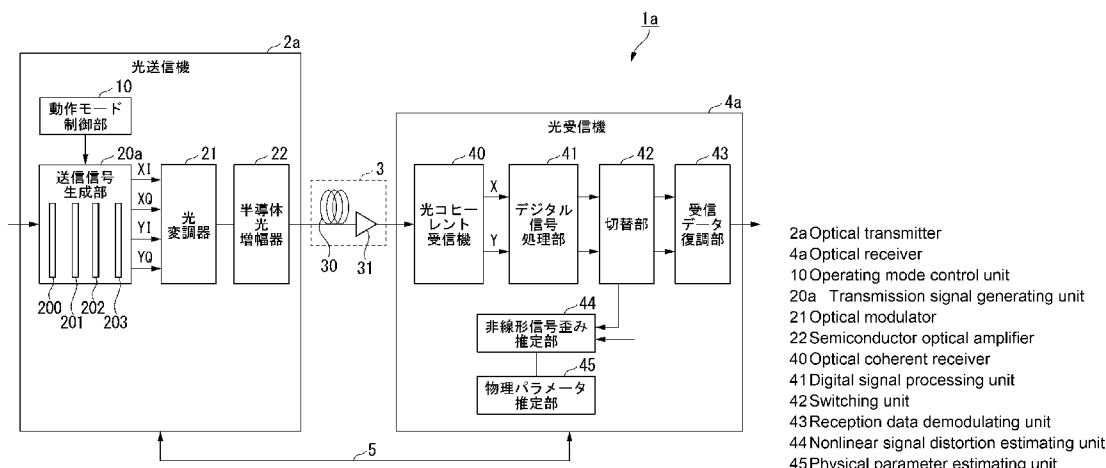
村 政則(NAKAMURA Masanori); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 笹井 健生(SASAI Takeo); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 小林 孝行(KOBAYASHI Takayuki); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 弁理士法人志賀国際特許事務所 (SHIGA INTERNATIONAL PATENT OFFICE); 〒1006620 東京都千代田区丸の内一丁目9番2号 Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN,

(54) Title: OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM AND SIGNAL DISTORTION COMPENSATION METHOD

(54) 発明の名称: 光伝送システム及び信号歪み補償方法



(57) Abstract: In this optical transmission system: an optical transmitter comprises an operating mode control unit that sets any of a first operating mode for generating signals with a low symbol rate and a second operating mode for generating signals with a high symbol rate, and a transmission signal generating unit for generating transmission signals corresponding to the operating mode; an optical receiver comprises an optical coherent receiver, a digital signal processing unit, and a reception data demodulating unit; the optical transmitter or the optical receiver comprises a nonlinear signal distortion compensation unit that multiplies the transmission signals by a value that represents an inverse characteristic of a gain coefficient of nonlinear signal distortion produced in the transmission signals by a semiconductor optical amplifier, a non-

CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告(条約第21条(3))

linear signal distortion estimating unit that estimates the nonlinear signal distortion, and a physical parameter estimating unit that estimates a physical parameter of the semiconductor optical amplifier; and the optical receiver switches the output destination so that the transmission signals are outputted to the nonlinear signal distortion estimating unit when the optical transmitter is operating in the first operating mode, and switches the output destination so that the transmission signals are outputted to the reception data demodulating unit when the optical transmitter is operating in the second operating mode.

(57) 要約: 光送信機は、低シンボルレートの信号を生成する第1動作モードと高シンボルレートの信号を生成する第2動作モードのいずれかを設定する動作モード制御部と、動作モードに応じた送信信号を生成する送信信号生成部とを備え、光受信機は、光コヒーレント受信機とデジタル信号処理部と受信データ復調部とを備え、光送信機又は光受信機は、半導体光増幅器によって送信信号に生じる非線形信号歪みの利得係数の逆特性を表す値を送信信号に乗算する非線形信号歪み補償部と、非線形信号歪みを推定する非線形信号歪み推定部と、半導体光増幅器の物理パラメータを推定する物理パラメータ推定部とを備え、光受信機は、光送信機が第1動作モードで動作している場合、受信信号が非線形信号歪み推定部に出力されるように出力先を切り替え、光送信機が第2動作モードで動作している場合、受信信号が受信データ復調部に出力されるように出力先を切り替える、光伝送システム。

明 細 書

発明の名称：光伝送システム及び信号歪み補償方法

技術分野

[0001] 本発明は、光伝送システム及び信号歪み補償方法に関する。

背景技術

[0002] 光伝送システムの小型化及び低消費電力化のため、半導体光増幅器（SOA: Semiconductor Optical Amplifier）を適用した光送受信機の開発が進められている。このような光送受信機では、半導体光増幅器において増幅した際に信号に非線形な歪みが生じる。そのため、デジタル信号処理により、半導体光増幅器に起因する歪みを補償する技術が提案されている（例えば、特許文献1参照）。

[0003] 信号の高シンボルレート化により半導体光増幅器によって生じる非線形歪みを軽減することができる。しかし、非特許文献1に記載のように168 G B a u dの超高シンボルレート信号においては、約1 d B程度のS N R（Signal to Noise Ratio）ペナルティが発生する。高品質な通信の実現のためには、高シンボルレート信号においても信号処理における高精度な補償技術が求められる。

先行技術文献

非特許文献

[0004] 非特許文献1：F. Hamaoka, et al., “Experimental Investigation of Influence of SOA-Induced Nonlinear Distortion on High-Symbol-Rate 168-GBaud Signal for Achieving Ultra-Broadband Optical Frontend”, in Proceedings Optical Fiber Communication Conference (OFC), San Diego, CA, USA, 2022, M3H.2.

特許文献

[0005] 特許文献1：特許第6633470号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] 特許文献 1 に記載の技術では、受信信号を用いて推定した半導体光増幅器の物理パラメータに基づいて、半導体光増幅器に起因する歪みの利得係数を算出し、算出した利得係数の逆特性を信号に乗算することで非線形信号歪みを補償している。しかしながら、高シンボルレート信号のように半導体光増幅器によって生じる非線形歪みが小さい場合には、半導体光増幅器の物理パラメータの推定精度が劣化する。そのため、半導体光増幅器によって生じる非線形歪みの補償精度が劣化してしまうという問題があった。

[0007] 上記事情に鑑み、本発明は、半導体光増幅器によって生じる非線形歪みの補償精度を向上させることができる技術の提供を目的としている。

課題を解決するための手段

[0008] 本発明の一態様は、光送信機と、光受信機とを備える光伝送システムであって、前記光送信機は、低シンボルレートの信号を生成する第 1 動作モードと、高シンボルレートの信号を生成する第 2 動作モードのいずれかの動作モードを設定する動作モード制御部と、前記動作モード制御部によって設定された動作モードに応じた送信信号を生成する送信信号生成部と、を備え、前記光受信機は、前記送信信号に基づく光信号を取得し、前記光信号に基づく受信信号を生成する光コヒーレント受信機と、前記受信信号に対してデジタル信号処理を行うデジタル信号処理部と、前記デジタル信号処理が行われた受信信号に基づいて、送信データ系列のバイナリ情報を復調する受信データ復調部と、を備え、前記光送信機、又は、前記光受信機は、半導体光増幅器によって送信信号に生じる非線形信号歪みの利得係数を前記半導体光増幅器の物理パラメータの推定値に基づいて算出し、前記利得係数の逆特性を表す値を前記送信信号に乗算する非線形信号歪み補償部と、前記送信信号を取得し、前記送信信号及び前記受信信号の比較結果に基づいて、前記非線形信号歪みを推定する非線形信号歪み推定部と、前記非線形信号歪み推定部により推定された前記非線形信号歪みに基づいて前記半導体光増幅器の物理パラメータを推定する物理パラメータ推定部と、をさらに備え、前記光受信機は、

前記光送信機が第1動作モードで動作している場合、前記デジタル信号処理が行われた受信信号が、前記非線形信号歪み推定部に出力されるように出力先を切り替え、前記光送信機が第2動作モードで動作している場合、前記デジタル信号処理が行われた受信信号が、前記受信データ復調部に出力されるように出力先を切り替える、光伝送システムである。

[0009] 本発明の一態様は、光送信機と、光受信機とを備える光伝送システムが行う信号歪み補償方法であって、前記光送信機が、低シンボルレートの信号を生成する第1動作モードと、高シンボルレートの信号を生成する第2動作モードのいずれかの動作モードを設定し、前記光送信機が、設定された動作モードに応じた送信信号を生成し、前記光受信機が、前記送信信号に基づく光信号を取得し、前記光信号に基づく受信信号を生成し、前記光受信機が、前記受信信号に対してデジタル信号処理を行い、前記光受信機が、前記デジタル信号処理が行われた受信信号に基づいて、送信データ系列のバイナリ情報を復調し、前記光送信機、又は、前記光受信機が、半導体光増幅器によって送信信号に生じる非線形信号歪みの利得係数を前記半導体光増幅器の物理パラメータの推定値に基づいて算出し、前記利得係数の逆特性を表す値を前記送信信号に乗算し、前記送信信号を取得し、前記送信信号及び前記受信信号の比較結果に基づいて、前記非線形信号歪みを推定し、推定された前記非線形信号歪みに基づいて前記半導体光増幅器の物理パラメータを推定し、前記光受信機が、前記光送信機が第1動作モードで動作している場合、前記デジタル信号処理が行われた受信信号が、前記非線形信号歪みを推定する非線形信号歪み推定部に出力されるように出力先を切り替え、前記光送信機が第2動作モードで動作している場合、前記デジタル信号処理が行われた受信信号が、前記送信データ系列のバイナリ情報を復調する受信データ復調部に出力されるように出力先を切り替える、信号歪み補償方法である。

発明の効果

[0010] 本発明により、半導体光増幅器によって生じる非線形歪みの補償精度を向上させることが可能となる。

図面の簡単な説明

- [0011] [図1]第1実施形態における光送受信機の構成例を示す図である。
- [図2]第1実施形態における送信信号生成部の構成例を示す図である。
- [図3]第1実施形態における光伝送システムの処理の流れを示すシーケンス図である。
- [図4]第1実施形態における光伝送システムの処理の流れを示すシーケンス図である。
- [図5]第2実施形態における光送受信機の構成例を示す図である。
- [図6]第3実施形態における光送受信機の構成例を示す図である。
- [図7]第4実施形態における光送受信機の構成例を示す図である。
- [図8]注入電流と、物理パラメータ及び線幅増大係数 α の関係を示す図である。
- [図9]第4実施形態における効果を説明するための図である。
- [図10]168 G B a u dの高シンボルレート信号における半導体光増幅器の注入電流が350 mA時のコンストラクションを示す図である。
- [図11]第5実施形態における光送受信機の構成例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0012] 以下、本発明の一実施形態を、図面を参照しながら説明する。

[0013] (第1実施形態)

図1は、第1実施形態における光送受信機1aの構成例を示す図である。

光送受信機1a（光伝送システム）は、光信号を用いた通信機器である。光送受信機1aは、光送信機2aと、伝送路3と、光受信機4aと、制御チャネル5とを備える。光送信機2aは、光信号を送信する通信機器である。光送信機2aは、複数の動作モードで動作する。例えば、光送信機2aは、第1動作モードと第2動作モードを切り替えて動作する。第1動作モードは、半導体光増幅器の物理パラメータを推定する際に利用する動作モードである。光送信機2aは、第1動作モードで動作する場合、低シンボルレート信号を生成する。第2動作モードは、半導体光増幅器の物理パラメータ推定後に

利用する動作モードである。光送信機 2 a は、第 2 動作モードで動作する場合、高シンボルレート信号を生成する。以下の説明では、低シンボルレート信号が 4 2 G B a u d の信号であり、高シンボルレート信号が 1 6 8 G B a u d の信号である場合を例に説明する。なお、低シンボルレート信号及び高シンボルレート信号は、上記の例に限定されない。光受信機 4 a は、半導体光増幅器 2 2 を備えてもよい。伝送路 3 は、半導体光増幅器 2 2 を備えてもよい。

[0014] 光送信機 2 a は、動作モード制御部 1 0 と、送信信号生成部 2 0 a と、光変調器 2 1 と、半導体光増幅器 2 2 とを備える。なお、光送信機 2 a は、半導体光増幅器 2 2 を内蔵又は外付けで備える。

[0015] 動作モード制御部 1 0 は、光送信機 2 a の動作モードを制御する。具体的には、動作モード制御部 1 0 は、光送信機 2 a の動作モードとして、第 1 動作モードで動作するか、第 2 動作モードで動作するかを光送信機 2 a に設定する。

[0016] 送信信号生成部 2 0 a は、バイナリ情報である送信データ系列に基づいて、変調信号系列 (X I、X Q、Y I、Y Q) を生成する。送信信号生成部 2 0 a は、動作モード制御部 1 0 に設定された動作モードに従って、シンボルレートが異なる変調信号系列 (X I、X Q、Y I、Y Q) を生成する。例えば、送信信号生成部 2 0 a は、動作モード制御部 1 0 に設定された動作モードが第 1 動作モードである場合、低シンボルレートの変調信号系列 (X I、X Q、Y I、Y Q) 信号 (以下、「低シンボルレート信号」という。) を生成する。例えば、送信信号生成部 2 0 a は、動作モード制御部 1 0 に設定された動作モードが第 2 動作モードである場合、高シンボルレートの変調信号系列 (X I、X Q、Y I、Y Q) 信号 (以下、「高シンボルレート信号」という。) を生成する。

[0017] 光変調器 2 1 は、ドライバアンプと、レーザモジュールと、偏波多重のマッハチェンダ型ベクトル変調器 (偏波多重 I Q 変調器) とを備える。ドライバアンプは、送信信号の振幅をレーンごとに増幅する。光変調器 2 1 は、レ

ーザモジュールの代わりに、直接変調光源を備えてもよい。光変調器 21 は、強度変調器でもよい。光変調器 21 は、変調信号系列を変調する。光変調器 21 は、偏波多重の光変調信号を半導体光増幅器 22 に出力する。なお、光変調器 21 は、単一偏波の光変調信号を半導体光増幅器 22 に出力してもよい。

[0018] 半導体光増幅器 22 は、変調された光信号（光変調信号）を光変調器 21 から取得する。半導体光増幅器 22 は、光変調信号の強度を増幅する。半導体光増幅器 22 では、半導体内のキャリア再結合に伴い、光変調信号の強度に依存して利得変動が生じる。このため、パターン効果による非線形信号歪みが光信号に生じて、信号特性が劣化する。半導体光増幅器 22 は、非線形信号歪みが生じた光変調信号を、伝送路 3 を介して光受信機 4 a に出力する。

[0019] 送信信号生成部 20 a は、図 2 に示すように、ビットマッピング部 200 と、波形整形部 201 と、非線形信号歪み補償部 202 と、DAC 203（デジタルアナログ変換部、Digital-to-Analog Converter）とを備える。図 2 は、第 1 実施形態における送信信号生成部 20 a の構成例を示す図である。

[0020] ビットマッピング部 200 は、送信データ系列を取得する。ビットマッピング部 200 は、送信データ系列の送信ビットを、動作モードに応じた変調方式のシンボル点に割り当てる。例えば、ビットマッピング部 200 は、変調方式として、QPSK（Quadrature Phase Shift Keying）や 16QAM（Quadrature Amplitude Modulation）等を用いる。なお、シンボル点は、QPSK や 16QAM 以外の変調フォーマットのシンボル点でもよい。

[0021] 波形整形部 201 は、レイズド・コサイン・フィルタ（Raised Cosine Filter）やルート・レイズド・コサイン・フィルタ（Root Raised Cosine Filter）等を用いたフィルタリング処理を、送信信号に対して実行する。波形整形部 201 は、前置波長分散補償や前置非線形光学効果補償等の前置信号補償を実行してもよい。波形整形部 201 は、電気回路や光変調器 21 における周波数特性の補償を実行してもよい。

[0022] 非線形信号歪み補償部 202 は、送信信号を波形整形部 201 から取得する。第 1 実施形態では、非線形信号歪み補償部 202 は、半導体光増幅器 22 の物理パラメータの推定値を、光受信機 4 a から取得する。非線形信号歪み補償部 202 は、半導体光増幅器 22 の物理パラメータの推定値に基づいて、未知の送信信号に半導体光増幅器 22 によって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。

[0023] 非線形信号歪み補償部 202 は、半導体光増幅器 22 によって送信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 22 の物理パラメータの推定値に基づいて算出する。非線形信号歪み補償部 202 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 $(\exp((-h(t)(1+j\alpha))/2))$ を算出する。非線形信号歪み補償部 202 は、非線形信号歪みの利得係数 $h(t)$ の逆特性を表す値 $(\exp((-h(t)(1+j\alpha))/2))$ を、送信信号に乗算する。これにより、非線形信号歪み補償部 202 は、半導体光増幅器 22 によって送信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。

[0024] なお、光送信機 2 a が第 1 動作モードで動作する場合、非線形信号歪み補償部 202 は、利得係数 $h(t)$ を 0 とする。光送信機 2 a が第 2 動作モードで動作する場合、非線形信号歪み補償部 202 は、利得係数 $h(t)$ を半導体光増幅器 22 の物理パラメータの推定値に基づいて算出する。

[0025] 半導体光増幅器 22 が取得した光信号と半導体光増幅器 22 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。

[0026] [数1]

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

[0027] ここで、式 (1) に示す $E_i(t)$ は、半導体光増幅器 22 が取得した光信号（送信信号生成部 20 a の送信信号）の複素振幅を示す。式 (1) に示す $E_o(t)$ は、半導体光増幅器 22 が送信した光信号（光受信機 4 a の受信信

号)の複素振幅を示す。式(1)に示す $h(t)$ は、利得係数を示す。式(1)に示す α は、線幅増大係数を示す。式(1)に示す j は、虚数単位を示す。式(1)に示す $\exp(h(t)(1+j\alpha)/2)$ は、半導体光増幅器22によって送信信号に生じる非線形信号歪みを示す。

[0028] 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。

[0029] [数2]

$$\tau_c \frac{d}{dt} h(t) = h_0 - h(t) - \left[\exp(h(t)) - 1 \right] \frac{|E_1(t)|^2}{P_{\text{sat}}} \dots (2)$$

[0030] ここで、式(2)に示す τ_c は、キャリア寿命を示す。式(2)に示す h_0 は、非飽和利得を示す。式(2)に示す 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 α とともに、半導体光増幅器22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まれば、半導体光増幅器22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。

[0031] 半導体光増幅器22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22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。

[0032] 非線形信号歪み補償部202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。非線形信号歪み補償部202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。

[0033] 非線形信号歪み補償部202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($\exp(-h(t)(1+j\alpha)/2)$)を算出する。

[0034] 非線形信号歪み補償部 202 は、非線形信号歪みの利得係数 $h(t)$ の逆特性を表す値 $(\exp(-h(t)(1+j\alpha)/2))$ を送信信号 $E_1(t)$ に乗算することによって、半導体光増幅器 22 で送信信号に生じる非線形信号歪みを補償する。これにより、非線形信号歪み補償部 202 は、半導体光増幅器 22 によって送信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。

[0035] なお、非線形信号歪み補償部 202 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。光送信機 2a が第 1 動作モードで動作する場合、送信信号は、非線形信号歪み補償部 202 を迂回して DAC 203 に入力されてもよい。すなわち、光送信機 2a が第 1 動作モードで動作する場合、送信信号は、非線形信号歪み補償部 202 を介さずに、波形整形部 201 から DAC 203 に直接出力されてもよい。

[0036] DAC 203 は、デジタル信号をアナログ信号に変換する。DAC 203 は、アナログ信号である送信信号を光変調器 21 に出力する。

[0037] 図 1 に戻って説明を続ける。

伝送路 3 は、光ファイバ 30 と、光増幅器 31 とを備える。伝送路 3 は、光信号の経路を切り替えるための経路切り替え器をさらに備えてもよい。光ファイバ 30 は、光信号（例えば、光変調信号）を伝送する。光増幅器 31 は、光信号の強度を増幅する。

[0038] 光受信機 4a は、光信号を受信する通信機器である。光受信機 4a は、光コヒーレント受信機 40 と、デジタル信号処理部 41 と、切替部 42 と、受信データ復調部 43 と、非線形信号歪み推定部 44 と、物理パラメータ推定部 45 とを備える。光受信機 4a は、レーザモジュールをさらに備える。

[0039] 光コヒーレント受信機 40 は、レーザモジュールによる局発光を用いて、伝送路 3 で伝送された光信号をアナログ信号である受信信号（ベースバンド信号）に変換する。

[0040] デジタル信号処理部 41 は、アナログ信号である受信信号をデジタル信号である受信信号に変換する。デジタル信号処理部 41 は、伝送路 3 で光信号

に生じた波長分散、偏波変動、非線形光学効果による波形劣化を、デジタル信号処理によって補償する。デジタル信号処理部41は、光送信機2aのレーザと光受信機4aのレーザとの周波数誤差と、光送信機2a及び光受信機4aのレーザの線幅による位相雑音とを、デジタル信号処理によって補償する。

[0041] 切替部42は、光送信機2aの動作モードに応じて、デジタル信号処理部41から出力された受信信号の出力先の経路を切り替える。切替部42は、例えば、スイッチである。切替部42は、光送信機2aが第1動作モードで動作している場合、デジタル信号処理部41と非線形信号歪み推定部44とを接続するように経路を切り替える。これにより、切替部42は、デジタル信号処理部41から出力された受信信号を非線形信号歪み推定部44に出力する。このように、切替部42は、光送信機2aが第1動作モードで動作している場合には、半導体光増幅器22の物理パラメータを推定するために受信信号を非線形信号歪み推定部44に出力する。

[0042] 切替部42は、光送信機2aが第2動作モードで動作している場合、デジタル信号処理部41と受信データ復調部43とを接続するように経路を切り替える。これにより、切替部42は、デジタル信号処理部41から出力された受信信号を受信データ復調部43に出力する。光送信機2aの動作モードは、コミュニケーションチャネル、NE-Ops (Network Element-Operations Systems) 又はNW-Ops (Network-Operations System) 等である制御チャネル5を介して光送信機2aから通知されてもよいし、外部装置を用いて光受信機4aに通知されてもよい。切替部42は、デジタル信号処理部41に組み込まれていてもよい。

[0043] 受信データ復調部43は、波形劣化が補償された受信信号を、切替部42から取得する。受信データ復調部43は、デジタル信号である受信信号に基づいて、送信データ系列のバイナリ情報を復調する。

[0044] 非線形信号歪み推定部44は、光送信機2aの送信信号に基づくデジタル信号である受信信号を、切替部42から取得する。非線形信号歪み推定部4

4 は、光送信機 2 a の送信信号を、参照信号として光送信機 2 a から取得する。例えば、非線形信号歪み推定部 4 4 は、制御チャネル 5 を介して、光送信機 2 a の送信信号を参照信号として光送信機 2 a から取得する。例えば、非線形信号歪み推定部 4 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 a から取得する。例えば、非線形信号歪み推定部 4 4 は、例えば、非線形信号歪み推定部 4 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 a から取得する。

[0045] 非線形信号歪み推定部 4 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 2 によって送信信号に生じる非線形信号歪みを表す値 $(\exp(h(t)(1+j\alpha)/2))$ と線幅増大係数 α とを、式 (3) のように求める。

[0046] [数3]

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

[0047] 非線形信号歪み推定部 4 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、非線形信号歪み推定部 4 4 は、白色雑音による信号歪みを軽減することができる。非線形信号歪み推定部 4 4 は、非線形信号歪みの推定精度を上げることができる。

[0048] 非線形信号歪み推定部 4 4 は、半導体光増幅器 2 2 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。非線形信号歪み推定部 4 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、非線形信号歪み推定部 4 4 は、半導体光増幅器 2 2 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。

[0049] 半導体光増幅器 2 2 の物理パラメータの測定値は、半導体光増幅器 2 2 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 2 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 5 は、半導体光増幅器 2 2 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 a の非線形信号歪み補償部 2 0 2 は、光送信機 2 a の半導体光増幅器 2 2 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。非線形信号歪み補償部 2 0 2 は、未知の物理パラメータを有する半導体光増幅器 2 2 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 5 は、非線形信号歪み推定部 4 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 2 の物理パラメータを推定する。

[0050] 物理パラメータ推定部 4 5 は、式 (3) を用いて求められた利得係数 $h(t)$ と式 (2) とに基づいて、半導体光増幅器 2 2 の物理パラメータを推定する。半導体光増幅器 2 2 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。具体的には、物理パラメータ推定部 4 5 は、式 (2) の離散式から最小二乗法を用いて、式 (4) に示す残差の平方和を最小化するようにしてキャリア寿命 τ_c 、非飽和利得 h_0 、飽和出力 P_{sat} を求める。

[0051] [数4]

$$\varepsilon(\tau_c, h_0, P_{sat}) = \sum_n \left(\tau_c \frac{h(n+1) - h(n-1)}{2\Delta t} - \left(h_0 - h(n) - (\exp(h(n)) - 1) \frac{|E_l(n)|^2}{P_{sat}} \right) \right)^2 \quad \dots (4)$$

[0052] 物理パラメータ推定部 4 5 が半導体光増幅器 2 2 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 5 は、半導体光増幅器 2 2 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。

[0053] 物理パラメータ推定部 4 5 は、制御チャネル 5 を通じて、半導体光増幅器 2 2 の物理パラメータを非線形信号歪み補償部 2 0 2 にフィードバックする。

[0054] なお、物理パラメータ推定部 4 5 は、光送信機 2 a と光受信機 4 a 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 2 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 5 は、半導体光増幅器 2 2 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 a 及び受信データ復調部 4 3 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 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 5 は、半導体光増幅器 2 2 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 2 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 2 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 5 は、半導体光増幅器 2 2 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 2 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 5 は、半導体光増幅器 2 2 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 2 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 2 の物理パラメータを再び算出する。

[0055] 図 3 及び図 4 は、第 1 実施形態における光伝送システムの処理の流れを示すシーケンス図である。

動作モード制御部 1 0 は、外部からの指示に応じて、光送信機 2 a の動作モードを第 1 動作モードに設定する（ステップ S 1 0 1）。なお、光送信機 2 a は、動作モード制御部 1 0 によって動作モードが設定されたことに応じて、動作モードの情報を光受信機 4 a に通知してもよい。送信信号生成部 2 0 a は、動作モード制御部 1 0 が設定した動作モードが第 1 動作モードであるため、低シンボルレート信号を生成する（ステップ S 1 0 2）。なお、光送信機 2 a が第 1 動作モードで動作しているため、非線形信号歪み補償部 2 0 2 は、非線形信号歪みの利得係数 $h(t)$ を 0 として処理を行うことになる。送信信号生成部 2 0 a は、生成した低シンボルレート信号を光変調器 2 1 に出力する。

- [0056] 光変調器 21 は、送信信号生成部 20a から出力された低シンボルレート信号を変調することによって光変調信号を生成する（ステップ S103）。光変調器 21 は、生成した光変調信号を半導体光増幅器 22 に出力する。半導体光増幅器 22 は、光変調器 21 から出力された光変調信号の強度を増幅する（ステップ S104）。半導体光増幅器 22 は、増幅後の光変調信号を、伝送路 3 を介して光受信機 4a に送信する（ステップ S105）。
- [0057] 光受信機 4a の光コヒーレント受信機 40 は、伝送路 3 で伝送された光変調信号を、レーザモジュールによる局発光を用いてアナログ信号である受信信号（ベースバンド信号）に変換する（ステップ S106）。光コヒーレント受信機 40 は、変換後の受信信号をデジタル信号処理部 41 に出力する。デジタル信号処理部 41 は、光コヒーレント受信機 40 から出力された受信信号をデジタル信号である受信信号に変換する（ステップ S107）。デジタル信号処理部 41 は、デジタル信号である受信信号を切替部 42 に出力する。
- [0058] 切替部 42 には、光送信機 2a が第 1 動作モードで動作していることが通知されている。そこで、切替部 42 は、デジタル信号処理部 41 から出力された受信信号を非線形信号歪み推定部 44 に出力する（ステップ S108）。非線形信号歪み推定部 44 は、切替部 42 から出力された受信信号に基づいて非線形信号歪みを推定する（ステップ S109）。非線形信号歪み推定部 44 は、非線形信号歪みを推定した結果を物理パラメータ推定部 45 に出力する。物理パラメータ推定部 45 は、非線形信号歪み推定部 44 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 22 の物理パラメータを推定する（ステップ S110）。物理パラメータ推定部 45 は、推定した半導体光増幅器 22 の物理パラメータを、制御チャネル 5 を介して光送信機 2a に通知する（ステップ S111）。
- [0059] 動作モード制御部 10 は、外部からの指示に応じて、光送信機 2a の動作モードを第 2 動作モードに設定する（ステップ S112）。なお、光送信機 2a は、動作モード制御部 10 によって動作モードが設定されたことに応じ

て、動作モードの情報を光受信機 4 a に通知してもよい。送信信号生成部 20 a は、動作モード制御部 10 が設定した動作モードが第 2 動作モードであるため、高シンボルレート信号を生成する（ステップ S 113）。なお、光送信機 2 a が第 2 動作モードで動作しているため、非線形信号歪み補償部 202 は、光受信機 4 a から通知された半導体光増幅器 22 の物理パラメータの推定値に基づいて非線形信号歪みを推定し、非線形信号歪みを補償する。送信信号生成部 20 a は、生成した高シンボルレート信号を光変調器 21 に出力する。

[0060] 光変調器 21 は、送信信号生成部 20 a から出力された高シンボルレート信号を変調することによって光変調信号を生成する（ステップ S 114）。光変調器 21 は、生成した光変調信号を半導体光増幅器 22 に出力する。半導体光増幅器 22 は、光変調器 21 から出力された光変調信号の強度を増幅する（ステップ S 115）。半導体光増幅器 22 は、増幅後の光変調信号を、伝送路 3 を介して光受信機 4 a に送信する（ステップ S 116）。

[0061] 光受信機 4 a の光コヒーレント受信機 40 は、伝送路 3 で伝送された光変調信号を、レーザモジュールによる局発光を用いてアナログ信号である受信信号（ベースバンド信号）に変換する（ステップ S 117）。光コヒーレント受信機 40 は、変換後の受信信号をデジタル信号処理部 41 に出力する。デジタル信号処理部 41 は、光コヒーレント受信機 40 から出力された受信信号をデジタル信号である受信信号に変換する（ステップ S 118）。デジタル信号処理部 41 は、デジタル信号である受信信号を切替部 42 に出力する。

[0062] 切替部 42 には、光送信機 2 a が第 2 動作モードで動作していることが通知されている。そこで、切替部 42 は、デジタル信号処理部 41 から出力された受信信号を受信データ復調部 43 に出力する（ステップ S 119）。受信データ復調部 43 は、切替部 42 から出力された受信信号に基づいて、送信データ系列のバイナリ情報を復調する（ステップ S 120）。

[0063] 以上のように構成された第 1 実施形態の光送受信機 1 a によれば、半導体

光増幅器 2 2 によって生じる非線形歪みの補償精度を向上させることが可能になる。具体的には、光送受信機 1 a では、光送信機 2 a が第 1 動作モードで動作する場合、低シンボルレート信号に基づく光信号を光受信機 4 a に送信する。光受信機 4 a は、低シンボルレート信号に基づく光信号に基づいて、半導体光増幅器 2 2 で増幅した際に生じる半導体光増幅器 2 2 の非線形信号歪みを推定する。そして、光受信機 4 a は、推定した非線形信号歪みに基づいて半導体光増幅器 2 2 の物理パラメータを推定する。信号の高シンボルレート化により半導体光増幅器 2 2 によって生じる非線形歪みは小さくなる一方、低シンボルレート信号では高シンボルレート信号に比べて半導体光増幅器 2 2 によって生じる非線形歪みが大きい。その結果、光受信機 4 a において半導体光増幅器 2 2 の物理パラメータを精度よく推定することができる。そして、光送信機 2 a において、低シンボルレート信号で推定した半導体光増幅器 2 2 の物理パラメータを用いて、高シンボルレート信号を半導体光増幅器 2 2 で増幅した際の非線形信号歪みの利得係数を精度良く算出することにより、高シンボルレート信号の半導体光増幅器 2 2 によって生じる非線形歪みの補償精度を向上させることが可能になる。

[0064] (第 2 実施形態)

第 2 実施形態では、光送信機が物理パラメータ推定部 4 5 を備える点が、第 1 実施形態と相違する。第 2 実施形態では、第 1 実施形態との相違点を中心に説明する。

[0065] 図 5 は、第 2 実施形態における光送受信機 1 b の構成例を示す図である。光送受信機 1 b は、光送信機 2 b と、伝送路 3 と、光受信機 4 b と、制御チャネル 5 とを備える。光送信機 2 b は、動作モード制御部 1 0 と、送信信号生成部 2 0 a と、光変調器 2 1 と、半導体光増幅器 2 2 と、物理パラメータ推定部 4 5 とを備える。なお、光送信機 2 b は、半導体光増幅器 2 2 を内蔵又は外付けで備える。光受信機 4 b は、光コヒーレント受信機 4 0 と、デジタル信号処理部 4 1 と、切替部 4 2 と、受信データ復調部 4 3 と、非線形信号歪み推定部 4 4 とを備える。光受信機 4 b は、半導体光増幅器 2 2 を備え

てもよい。伝送路 3 は、半導体光増幅器 2 2 を備えてもよい。

[0066] 非線形信号歪み推定部 4 4 は、非線形信号歪みを推定した結果である利得係数 $h(t)$ 及び線幅増大係数 α を、制御チャネル 5 を介して、光送信機 2 b が備える物理パラメータ推定部 4 5 に送信する。

[0067] 物理パラメータ推定部 4 5 は、非線形信号歪み推定部 4 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 2 の物理パラメータを推定する。

[0068] 以上のように構成された第 1 実施形態の光送受信機 1 b によれば、第 1 実施形態と同様の効果を得ることができる。

[0069] (第 3 実施形態)

第 3 実施形態では、光送信機が非線形信号歪み推定部 4 4 及び物理パラメータ推定部 4 5 を備える点が、第 2 実施形態と相違する。第 3 実施形態では、第 2 実施形態との相違点を中心に説明する。

[0070] 図 6 は、第 3 実施形態における光送受信機 1 c の構成例を示す図である。光送受信機 1 c は、光送信機 2 c と、伝送路 3 と、光受信機 4 c と、制御チャネル 5 とを備える。光送信機 2 c は、動作モード制御部 1 0 と、送信信号生成部 2 0 c と、光変調器 2 1 と、半導体光増幅器 2 2 と、非線形信号歪み推定部 4 4 と、物理パラメータ推定部 4 5 とを備える。なお、光送信機 2 c は、半導体光増幅器 2 2 を内蔵又は外付けで備える。光受信機 4 c は、光コヒーレント受信機 4 0 と、デジタル信号処理部 4 1 と、切替部 4 2 と、受信データ復調部 4 3 とを備える。光受信機 4 c は、半導体光増幅器 2 2 を備えてもよい。伝送路 3 は、半導体光増幅器 2 2 を備えてもよい。

[0071] 切替部 4 2 は、光送信機 2 c が第 1 動作モードで動作する場合、デジタル信号処理部 4 1 から出力された受信信号を、制御チャネル 5 を介して、光送信機 2 c が備える非線形信号歪み推定部 4 4 に送信する。非線形信号歪み推定部 4 4 は、非線形信号歪みを推定した結果である利得係数 $h(t)$ 及び線幅増大係数 α を、物理パラメータ推定部 4 5 に出力する。物理パラメータ推定部 4 5 は、非線形信号歪み推定部 4 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 22 の物理パラメータを推定する。

[0072] 以上のように構成された第 3 実施形態の光送受信機 1 c によれば、第 1 実施形態と同様の効果を得ることができる。

[0073] (第 4 実施形態)

第 4 実施形態では、光受信機が光コヒーレント受信機 40 の後段に非線形信号歪み補償部 202 を備える点が、第 1 実施形態と相違する。第 4 実施形態では、第 1 実施形態との相違点を中心に説明する。

[0074] 図 7 は、第 4 実施形態における光送受信機 1 d の構成例を示す図である。光送受信機 1 d は、光送信機 2 d と、伝送路 3 と、光受信機 4 d と、制御チャネル 5 とを備える。光送信機 2 d は、動作モード制御部 10 と、送信信号生成部 20 d と、光変調器 21 と、半導体光増幅器 22 とを備える。光送信機 2 d は、半導体光増幅器 22 を内蔵又は外付けで備える。送信信号生成部 20 d は、ビットマッピング部 200 と、波形整形部 201 と、DAC 203 とを備える。

[0075] 光受信機 4 d は、光コヒーレント受信機 40 と、デジタル信号処理部 41 と、切替部 42 と、受信データ復調部 43 と、非線形信号歪み推定部 44 と、物理パラメータ推定部 45 と、非線形信号歪み補償部 202 とを備える。光受信機 4 d は、光コヒーレント受信機 40 の後段に、非線形信号歪み補償部 202 を備える。光受信機 4 d は、非線形信号歪み補償部 202 の後段に、デジタル信号処理部 41 を備える。光受信機 4 d は、半導体光増幅器 22 を備えてもよい。伝送路 3 は、半導体光増幅器 22 を備えてもよい。

[0076] 切替部 42 は、光送信機 2 d の動作モードに応じて、デジタル信号処理部 41 から出力された受信信号の出力先の経路を切り替える。切替部 42 は、例えば、スイッチである。切替部 42 は、光送信機 2 d が第 1 動作モードで動作している場合、デジタル信号処理部 41 と非線形信号歪み推定部 44 とを接続するように経路を切り替える。これにより、切替部 42 は、デジタル信号処理部 41 から出力された受信信号を非線形信号歪み推定部 44 に出力

する。このように、切替部42は、光送信機2dが第1動作モードで動作している場合には、半導体光増幅器22の物理パラメータを推定するために受信信号を非線形信号歪み推定部44に出力する。

[0077] 切替部42は、光送信機2dが第2動作モードで動作している場合、デジタル信号処理部41と受信データ復調部43とを接続するように経路を切り替える。これにより、切替部42は、デジタル信号処理部41から出力された受信信号を受信データ復調部43に出力する。光送信機2dの動作モードは、制御チャネル5を介して光送信機2dから通知されてもよいし、外部装置を用いて光受信機4dに通知されてもよい。切替部42は、デジタル信号処理部41に組み込まれていてもよい。

[0078] 非線形信号歪み補償部202は、アナログ信号である受信信号を、光コヒーレント受信機40から取得する。非線形信号歪み補償部202は、半導体光増幅器22の物理パラメータを、物理パラメータ推定部45から取得する。

[0079] 非線形信号歪み補償部202は、非線形信号歪みの利得係数 $h(t)$ の逆特性を表す値 $(\exp(-h(t)(1+j\alpha)/2))$ に応じたアナログ信号を受信信号 $E(t)$ に乗算することによって、半導体光増幅器22で送信信号に生じる非線形信号歪みを補償する。これにより、非線形信号歪み補償部202は、半導体光増幅器22によって送信信号に生じる非線形信号歪みを、等化することができる。

[0080] なお、光送信機2dが第1動作モードで動作する場合、非線形信号歪み補償部202は、利得係数 $h(t)$ を0とする。光送信機2dが第2動作モードで動作する場合、非線形信号歪み補償部202は、利得係数 $h(t)$ を半導体光増幅器22の物理パラメータの推定値に基づいて算出する。光送信機2dの動作モードは、制御チャネル5を介して光送信機2dから通知されてもよいし、外部装置を用いて光受信機4dに通知されてもよい。なお、光送信機2dの動作モードが制御チャネル5を介して光送信機2dから通知されない場合には、光送受信機1dは制御チャネル5を備えなくてもよい。

[0081] 非線形信号歪み補償部202が、式(2)から利得係数 $h(t)$ を数値解として求める場合には、以下の式(5)から式(9)に基づいて利得係数 $h(t)$ が求められる。なお、これは第1実施形態から第3の実施形態及び後述する第5実施形態においても同様である。

[0082] [数5]

$$h(n+1) = h(n) + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad \dots (5)$$

[0083] [数6]

$$k_1 = f(h(n)) \quad \dots (6)$$

[0084] [数7]

$$k_2 = f(h(n) + k_1/2) \quad \dots (7)$$

[0085] [数8]

$$k_3 = f(h(n) + k_2/2) \quad \dots (8)$$

[0086] [数9]

$$k_4 = f(h(n) + k_3) \quad \dots (9)$$

[0087] なお、本実施形態のように、光受信機4d側で利得係数 $h(t)$ を算出する場合(非線形信号歪み補償部202が光受信機4dに備えられる場合)、非線形信号歪み補償部202は式(10)において、送信信号 E_i の代わりに、受信信号 E_o を用いて利得係数 $h(t)$ を算出する。

[0088] [数10]

$$f(u) = \frac{\Delta t}{\tau_c} \left(h_0 - u - (\exp(u) - 1) \frac{|E_o(n)|^2}{P_{\text{sat}}} \right) \quad \dots (10)$$

[0089] 次に本発明の効果について説明する。図8は、注入電流(Injection current)と、物理パラメータ及び線幅増大係数 α の関係を示す図である。ここで

注入電流は、半導体光増幅器 22 への注入電流を表す。図 8 の (a) には、注入電流 (Injection current) と線幅増大係数 α の関係を示し、図 8 の (b) には、注入電流 (Injection current) と物理パラメータであるキャリア寿命 τ_c の関係を示し、図 8 の (c) には、注入電流 (Injection current) と物理パラメータである非飽和利得 h_0 の関係を示し、図 8 の (d) には、注入電流 (Injection current) と物理パラメータである飽和出力 P_{sat} の関係を示している。

[0090] 図 9 は、本発明の効果を説明するための図である。図 9 に示す通り、168 Gbaud の高シンボルレート信号に対して、半導体光増幅器 22 の歪み補償なしで生じている SNR ペナルティ 0.96 dB を、42 Gbaud の低シンボルレート信号で推定した物理パラメータを用いた半導体光増幅器 22 の歪み補償では、SNR ペナルティを 0.29 dB 以下に低減することが可能となった。なお、168 Gbaud の高シンボルレート信号で推定した物理パラメータを用いた半導体光増幅器 22 の歪み補償では、SNR ペナルティが改善されていないことが分かる。各実施形態において、高シンボルレート信号は、例えば 100 Gbaud を超える信号とし、低シンボルレート信号は、例えば 100 Gbaud 以下の信号とする。

[0091] 図 10 は、168 Gbaud の高シンボルレート信号における半導体光増幅器 22 の注入電流が 350 mA 時のコンスタレーションを示す図である。図 10 の (a) には、半導体光増幅器 22 の歪み補償なしの場合のコンスタレーションを示し、図 10 の (b) には、42 Gbaud 信号で推定した物理パラメータを用いた半導体光増幅器 22 の歪み補償した場合のコンスタレーションを示している。図 10 から明らかなように、42 Gbaud 信号で推定した物理パラメータを用いて補償を行った場合のコンスタレーションは、補償を行わない場合のコンスタレーションに比べて非線形歪みが補償されていることが分かる。

[0092] 以上のように構成された第 4 実施形態の光送受信機 1d によれば、半導体光増幅器 22 によって生じる非線形歪みの補償精度を向上させることが可能

になる。具体的には、光送受信機 1 d では、光送信機 2 d が第 1 動作モードで動作する場合、低シンボルレート信号に基づく光信号を光受信機 4 d に送信する。光受信機 4 d は、低シンボルレート信号に基づく光信号に基づいて、半導体光増幅器 2 2 で増幅した際に生じる半導体光増幅器 2 2 の非線形信号歪みを推定する。そして、光受信機 4 d は、推定した非線形信号歪みに基づいて半導体光増幅器 2 2 の物理パラメータを推定する。そして、光受信機 4 d において、低シンボルレート信号で推定した半導体光増幅器 2 2 の物理パラメータを用いて、高シンボルレート信号を半導体光増幅器 2 2 で増幅した際の非線形信号歪みの利得係数を精度良く算出することにより、高シンボルレート信号の半導体光増幅器 2 2 によって生じる非線形歪みの補償精度を向上させることが可能になる。

[0093] (第 5 実施形態)

第 5 実施形態では、光受信機がデジタル信号処理部 4 1 の後段に非線形信号歪み補償部 2 0 2 を備える点が、第 4 実施形態と相違する。第 5 実施形態では、第 4 実施形態との相違点を中心に説明する。

[0094] 図 1 1 は、第 5 実施形態における光送受信機 1 e の構成例を示す図である。光送受信機 1 e は、光送信機 2 e と、伝送路 3 と、光受信機 4 e と、制御チャネル 5 を備える。光送信機 2 e は、動作モード制御部 1 0 と、送信信号生成部 2 0 d と、光変調器 2 1 と、半導体光増幅器 2 2 とを備える。光送信機 2 e は、半導体光増幅器 2 2 を内蔵又は外付けで備える。送信信号生成部 2 0 e は、ビットマッピング部 2 0 0 と、波形整形部 2 0 1 と、DAC 2 0 3 とを備える。

[0095] 光受信機 4 e は、光コヒーレント受信機 4 0 と、デジタル信号処理部 4 1 と、切替部 4 2 と、受信データ復調部 4 3 と、非線形信号歪み推定部 4 4 と、物理パラメータ推定部 4 5 と、非線形信号歪み補償部 2 0 2 とを備える。光受信機 4 e は、デジタル信号処理部 4 1 の後段に、切替部 4 2 及び非線形信号歪み補償部 2 0 2 を備える。光受信機 4 e は、非線形信号歪み補償部 2 0 2 の後段に、受信データ復調部 4 3 を備える。光受信機 4 e は、半導体光

増幅器 2 2 を備えてもよい。伝送路 3 は、半導体光増幅器 2 2 を備えてもよい。

[0096] 切替部 4 2 は、光送信機 2 e の動作モードに応じて、デジタル信号処理部 4 1 から出力された受信信号の出力先の経路を切り替える。切替部 4 2 は、例えば、スイッチである。切替部 4 2 は、光送信機 2 e が第 1 動作モードで動作している場合、デジタル信号処理部 4 1 と非線形信号歪み推定部 4 4 とを接続するように経路を切り替える。これにより、切替部 4 2 は、デジタル信号処理部 4 1 から出力された受信信号を非線形信号歪み推定部 4 4 に出力する。このように、切替部 4 2 は、光送信機 2 e が第 1 動作モードで動作している場合には、半導体光増幅器 2 2 の物理パラメータを推定するために受信信号を非線形信号歪み推定部 4 4 に出力する。

[0097] 切替部 4 2 は、光送信機 2 e が第 2 動作モードで動作している場合、デジタル信号処理部 4 1 と非線形信号歪み補償部 2 0 2 とを接続するように経路を切り替える。これにより、切替部 4 2 は、デジタル信号処理部 4 1 から出力された受信信号を非線形信号歪み補償部 2 0 2 に出力する。光送信機 2 e の動作モードは、制御チャネル 5 を介して光送信機 2 e から通知されてもよいし、外部装置を用いて光受信機 4 e に通知されてもよい。切替部 4 2 は、デジタル信号処理部 4 1 に組み込まれていてもよい。

[0098] 非線形信号歪み補償部 2 0 2 は、デジタル信号である受信信号を、切替部 4 2 から取得する。非線形信号歪み補償部 2 0 2 は、半導体光増幅器 2 2 の物理パラメータを、物理パラメータ推定部 4 5 から取得する。

[0099] 非線形信号歪み補償部 2 0 2 は、非線形信号歪みの利得係数 $h(t)$ の逆特性を表す値 $(\exp(-h(t)(1+j\alpha)/2))$ を受信信号 $E(t)$ に乗算することによって、半導体光増幅器 2 2 で送信信号に生じる非線形信号歪みを補償する。これにより、非線形信号歪み補償部 2 0 2 は、半導体光増幅器 2 2 によって送信信号に生じる非線形信号歪みを、等化することができる。

[0100] 以上のように構成された第 5 実施形態の光送受信機 1 e によれば、第 4 実

施形態と同様の効果を得ることができる。

[0101] 上述した実施形態における光送信機、光受信機及び光送受信機の少なくとも一部をコンピュータで実現するようにしてもよい。その場合、この機能を実現するためのプログラムをコンピュータ読み取り可能な記録媒体に記録して、この記録媒体に記録されたプログラムをコンピュータシステムに読み込ませ、実行することによって実現してもよい。なお、ここでいう「コンピュータシステム」とは、OSや周辺機器等のハードウェアを含むものとする。また、「コンピュータ読み取り可能な記録媒体」とは、フレキシブルディスク、光磁気ディスク、ROM、CD-ROM等の可搬媒体、コンピュータシステムに内蔵されるハードディスク等の記憶装置のことをいう。さらに「コンピュータ読み取り可能な記録媒体」とは、インターネット等のネットワークや電話回線等の通信回線を介してプログラムを送信する場合の通信線のように、短時間の間、動的にプログラムを保持するもの、その場合のサーバやクライアントとなるコンピュータシステム内部の揮発性メモリのように、一定時間プログラムを保持しているものも含んでもよい。また上記プログラムは、前述した機能の一部を実現するためのものであってもよく、さらに前述した機能をコンピュータシステムにすでに記録されているプログラムとの組み合わせで実現できるものであってもよく、FPGA (Field Programmable Gate Array) 等のプログラマブルロジックデバイスを用いて実現されるものであってもよい。

[0102] 以上、この発明の実施形態について図面を参照して詳述してきたが、具体的な構成はこの実施形態に限られるものではなく、この発明の要旨を逸脱しない範囲の設計等も含まれる。

産業上の利用可能性

[0103] 本発明は、光伝送システムの通信機器に適用可能である。

符号の説明

[0104] 1 a ~ 1 e … 光送受信機、2 a … 光送信機、3 … 伝送路、4 a ~ 4 e … 光受信機、5 … 制御チャネル、20 a ~ 20 e … 送信信号生成部、21 … 光変調

器、22…半導体光増幅器、30…光ファイバ、31…光増幅器、40…光コヒーレント受信機、41…デジタル信号処理部、42…切替部、43…受信データ復調部、44…非線形信号歪み推定部、45…物理パラメータ推定部、200…ビットマッピング部、201…波形整形部、202…非線形信号歪み補償部、203…DAC

請求の範囲

[請求項1]

光送信機と、光受信機とを備える光伝送システムであって、
前記光送信機は、

低シンボルレートの信号を生成する第1動作モードと、高シンボルレートの信号を生成する第2動作モードのいずれかの動作モードを設定する動作モード制御部と、

前記動作モード制御部によって設定された動作モードに応じた送信信号を生成する送信信号生成部と、を備え、

前記光受信機は、

前記送信信号に基づく光信号を取得し、前記光信号に基づく受信信号を生成する光コヒーレント受信機と、

前記受信信号に対してデジタル信号処理を行うデジタル信号処理部と、

前記デジタル信号処理が行われた受信信号に基づいて、送信データ系列のバイナリ情報を復調する受信データ復調部と、を備え、

前記光送信機、又は、前記光受信機は、

半導体光増幅器によって送信信号に生じる非線形信号歪みの利得係数を前記半導体光増幅器の物理パラメータの推定値に基づいて算出し、前記利得係数の逆特性を表す値を前記送信信号に乗算する非線形信号歪み補償部と、

前記送信信号を取得し、前記送信信号及び前記受信信号の比較結果に基づいて、前記非線形信号歪みを推定する非線形信号歪み推定部と、

前記非線形信号歪み推定部により推定された前記非線形信号歪みに基づいて前記半導体光増幅器の物理パラメータを推定する物理パラメータ推定部と、をさらに備え、

前記光受信機は、前記光送信機が第1動作モードで動作している場合、前記デジタル信号処理が行われた受信信号が、前記非線形信号歪

み推定部に出力されるように出力先を切り替え、前記光送信機が第2動作モードで動作している場合、前記デジタル信号処理が行われた受信信号が、前記受信データ復調部に出力されるように出力先を切り替える、

光伝送システム。

[請求項2]

前記光送信機が第1動作モードで動作している場合、

前記非線形信号歪み補償部は、前記半導体光増幅器によって送信信号に生じる非線形信号歪みの補償を行わず、

前記光送信機が第2動作モードで動作している場合、

前記非線形信号歪み補償部は、前記物理パラメータ推定部によって推定された前記半導体光増幅器の物理パラメータに基づいて前記半導体光増幅器によって送信信号に生じる非線形信号歪みの利得係数を算出する、

請求項1に記載の光伝送システム。

[請求項3]

前記光送信機は、前記非線形信号歪み補償部、を備え、

前記光受信機は、

前記非線形信号歪み推定部と、

前記物理パラメータ推定部と、を備える、

請求項1又は2に記載の光伝送システム。

[請求項4]

前記光送信機は、

前記非線形信号歪み補償部と、

前記物理パラメータ推定部と、を備え、

前記光受信機は、

前記非線形信号歪み推定部、を備える、

請求項1又は2に記載の光伝送システム。

[請求項5]

前記光送信機は、

前記非線形信号歪み補償部と、

前記非線形信号歪み推定部と、

前記物理パラメータ推定部と、を備える、
請求項 1 又は 2 に記載の光伝送システム。

[請求項6]

前記光受信機は、
前記非線形信号歪み補償部と、
前記非線形信号歪み推定部と、
前記物理パラメータ推定部と、を備える、
請求項 1 又は 2 に記載の光伝送システム。

[請求項7]

光送信機と、光受信機とを備える光伝送システムが行う信号歪み補償方法であって、

前記光送信機が、低シンボルレートの信号を生成する第 1 動作モードと、高シンボルレートの信号を生成する第 2 動作モードのいずれかの動作モードを設定し、

前記光送信機が、設定された動作モードに応じた送信信号を生成し、

前記光受信機が、前記送信信号に基づく光信号を取得し、前記光信号に基づく受信信号を生成し、

前記光受信機が、前記受信信号に対してデジタル信号処理を行い、

前記光受信機が、前記デジタル信号処理が行われた受信信号に基づいて、送信データ系列のバイナリ情報を復調し、

前記光送信機、又は、前記光受信機が、

半導体光増幅器によって送信信号に生じる非線形信号歪みの利得係数を前記半導体光増幅器の物理パラメータの推定値に基づいて算出し、

前記利得係数の逆特性を表す値を前記送信信号に乗算し、

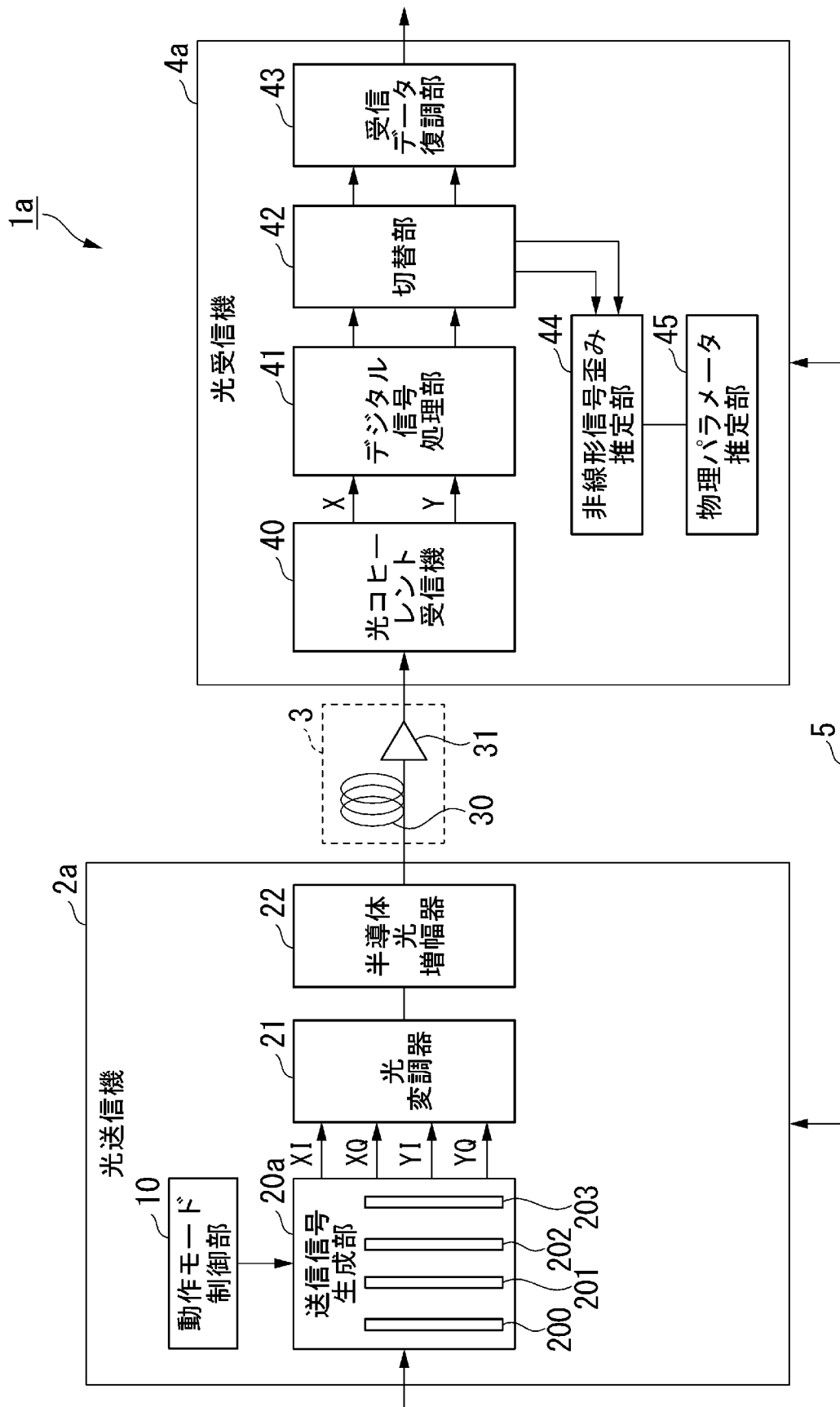
前記送信信号を取得し、前記送信信号及び前記受信信号の比較結果に基づいて、前記非線形信号歪みを推定し、

推定された前記非線形信号歪みに基づいて前記半導体光増幅器の物理パラメータを推定し、

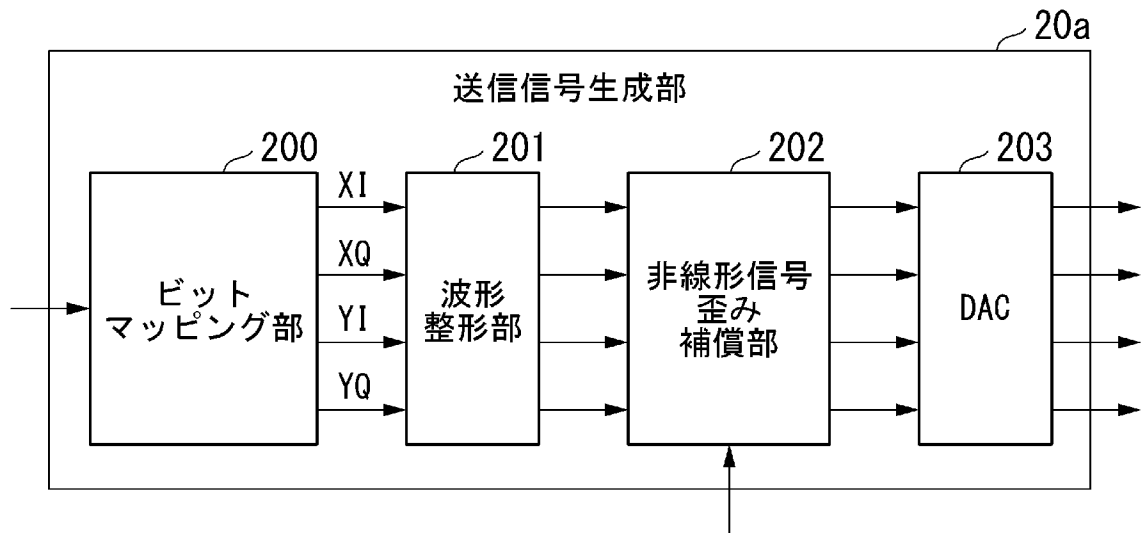
前記光受信機が、前記光送信機が第1動作モードで動作している場合、前記デジタル信号処理が行われた受信信号が、前記非線形信号歪みを推定する非線形信号歪み推定部に出力されるように出力先を切り替え、前記光送信機が第2動作モードで動作している場合、前記デジタル信号処理が行われた受信信号が、前記送信データ系列のバイナリ情報を復調する受信データ復調部に出力されるように出力先を切り替える、

信号歪み補償方法。

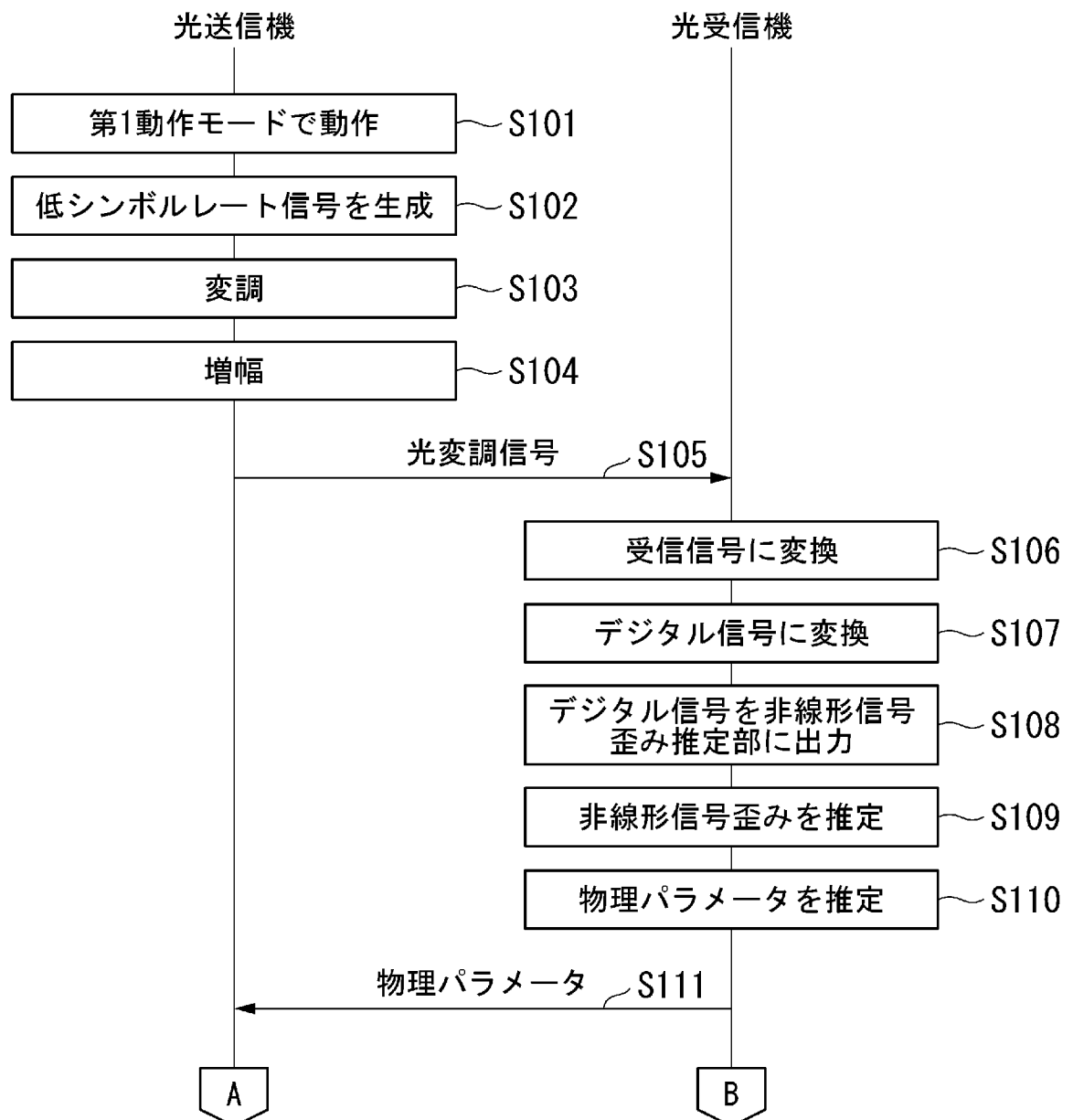
[図1]



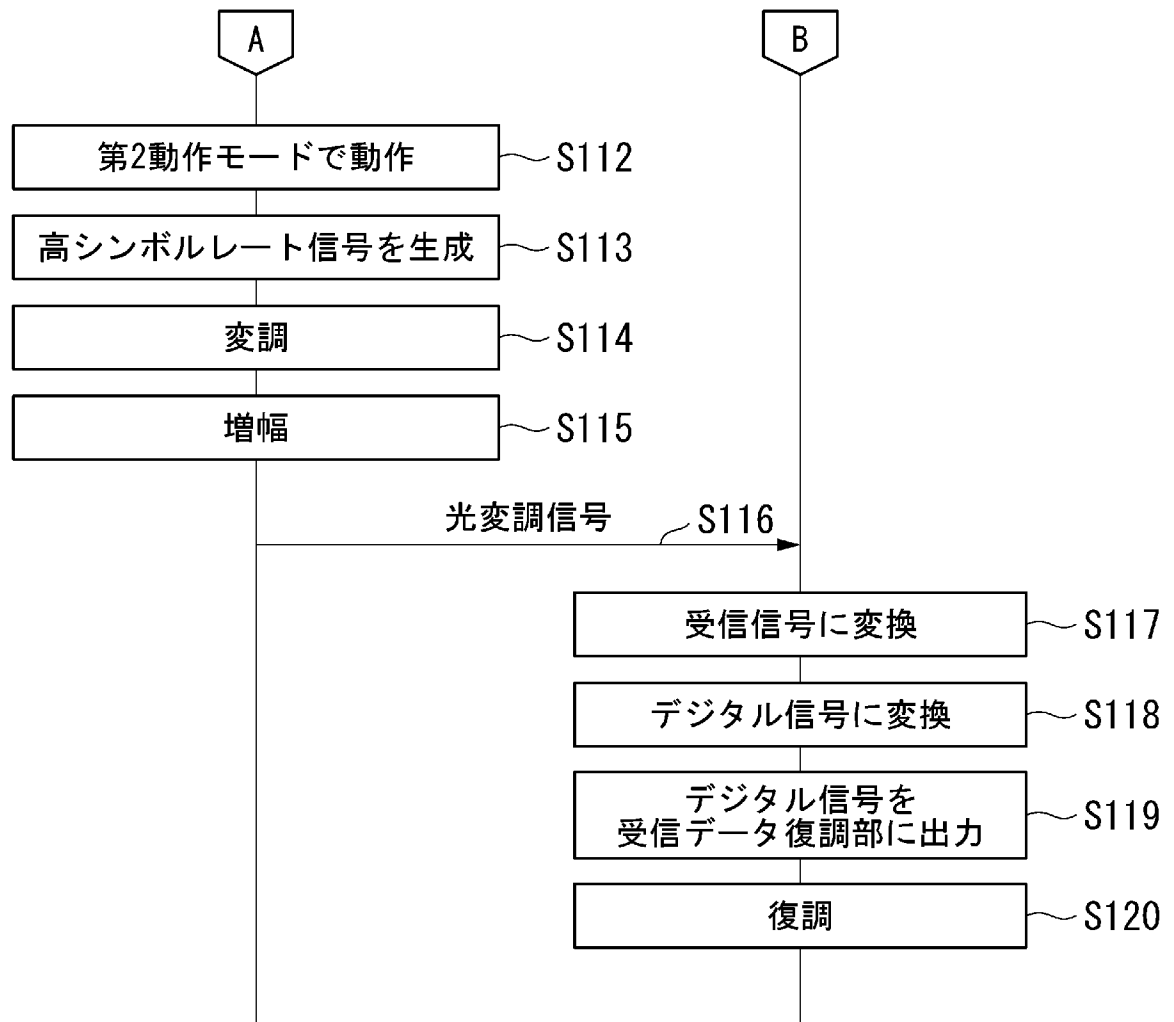
[図2]



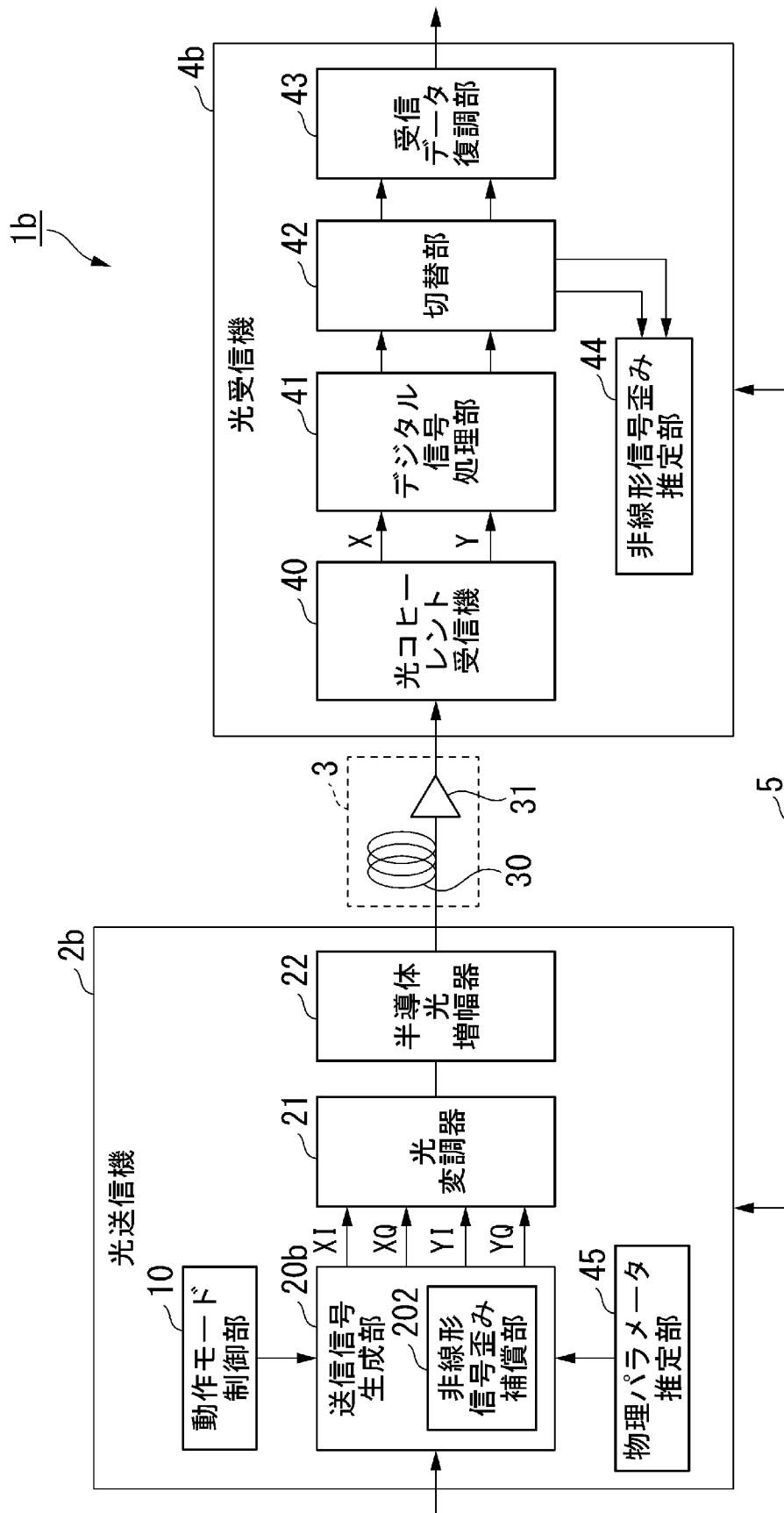
[図3]



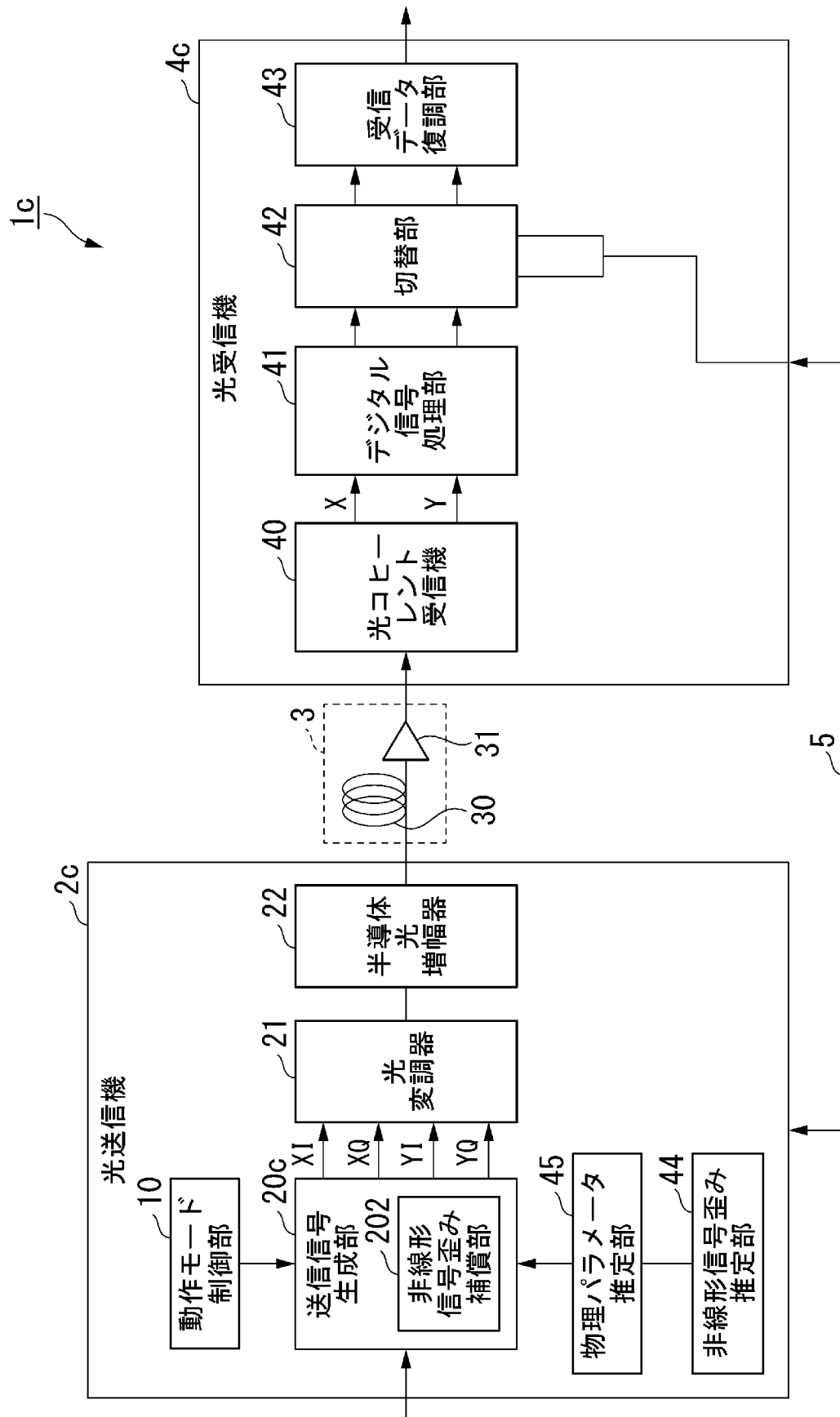
[図4]



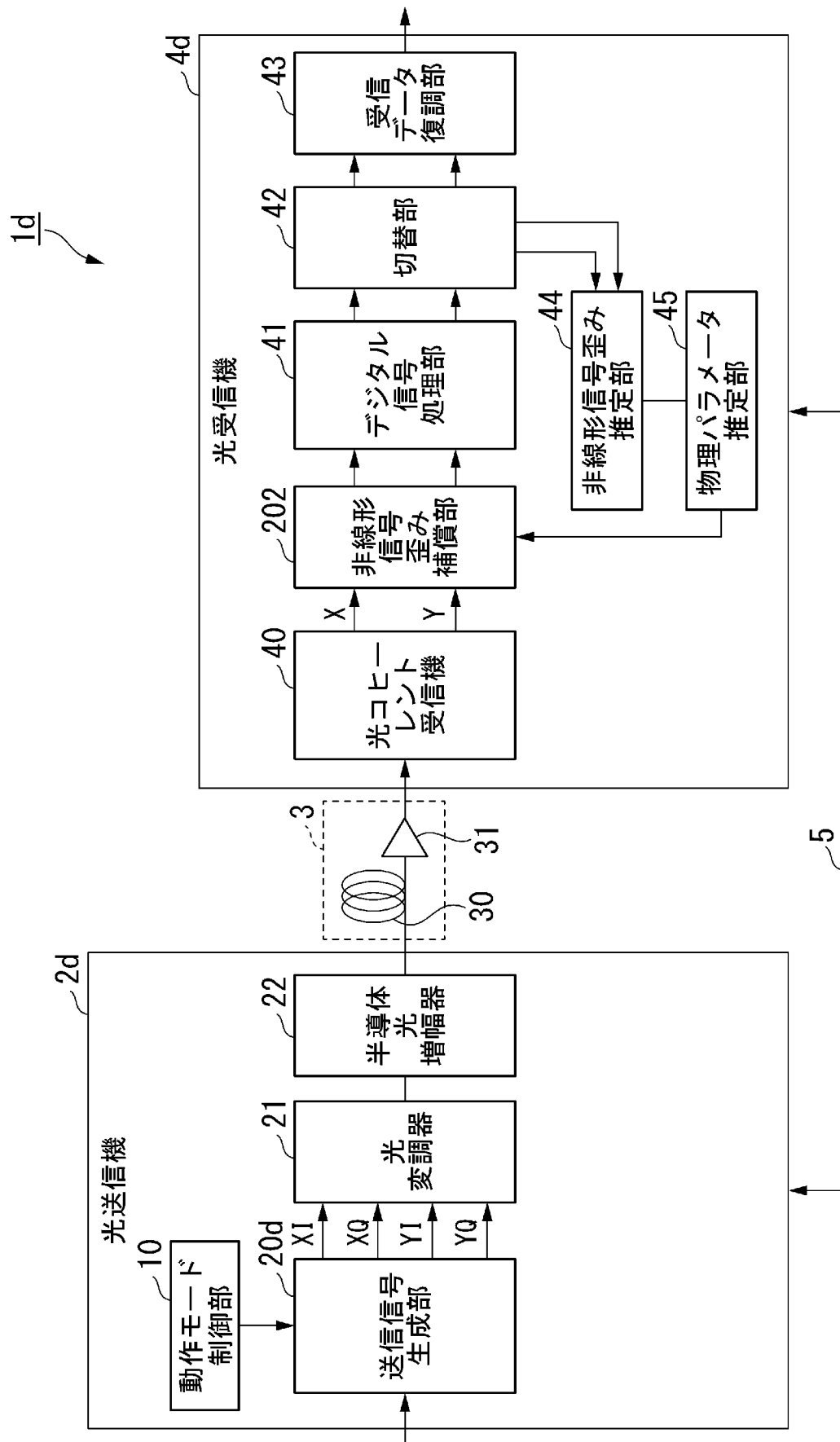
[図5]



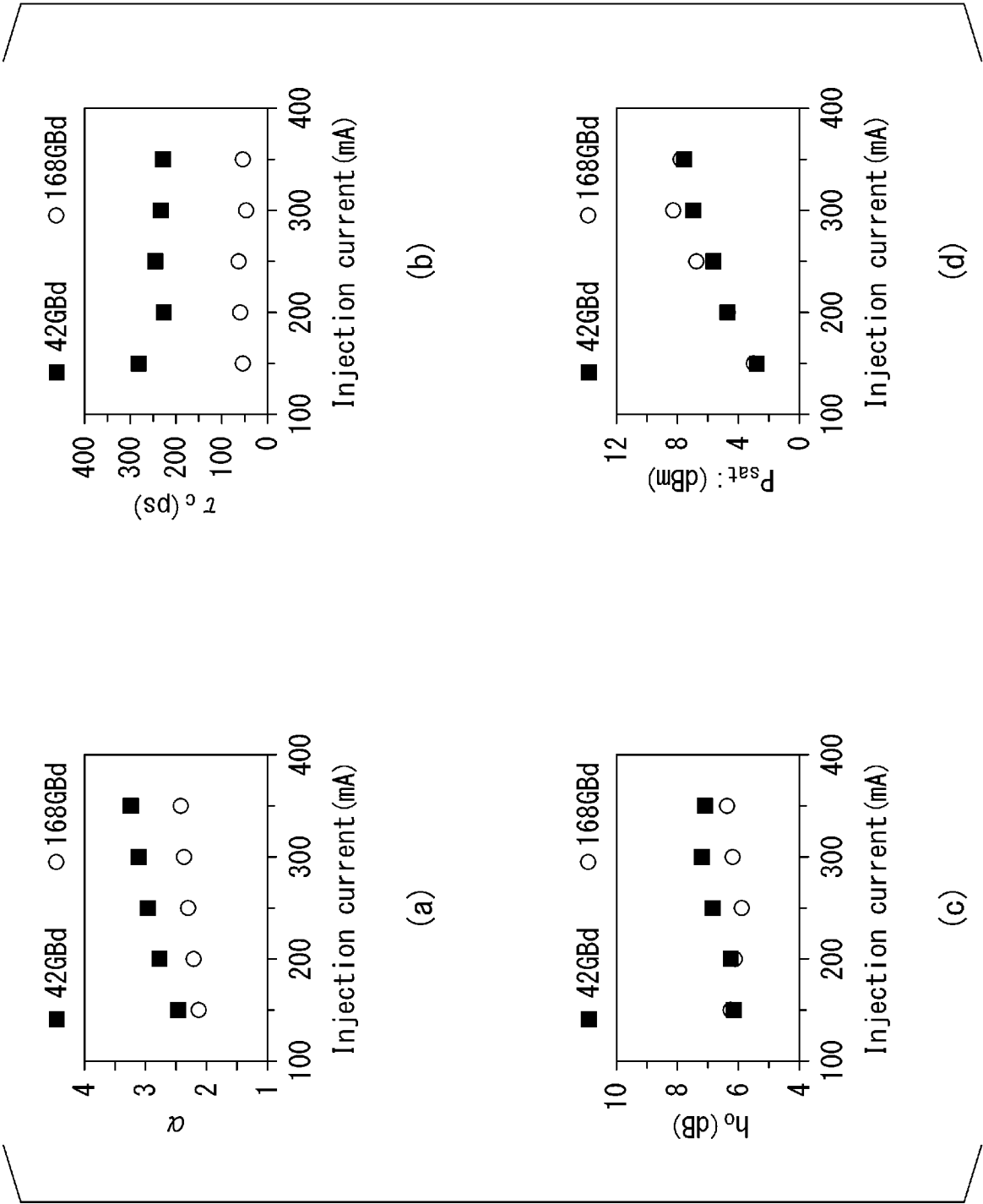
[図6]



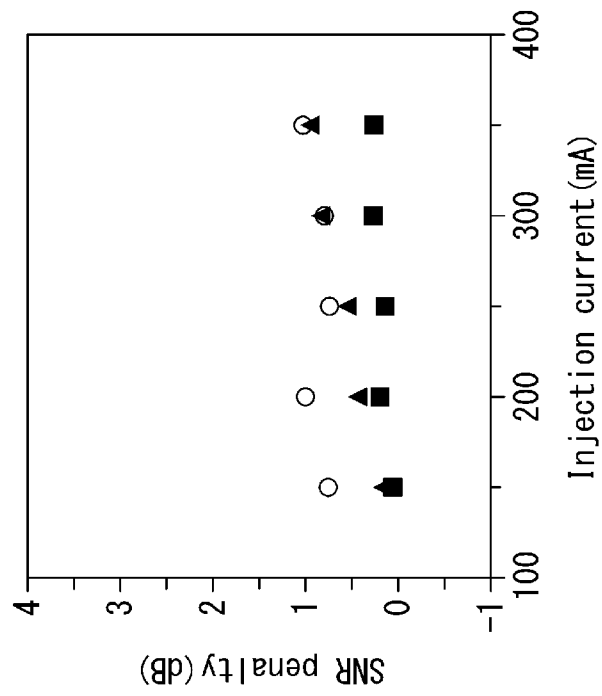
[図7]



[図8]



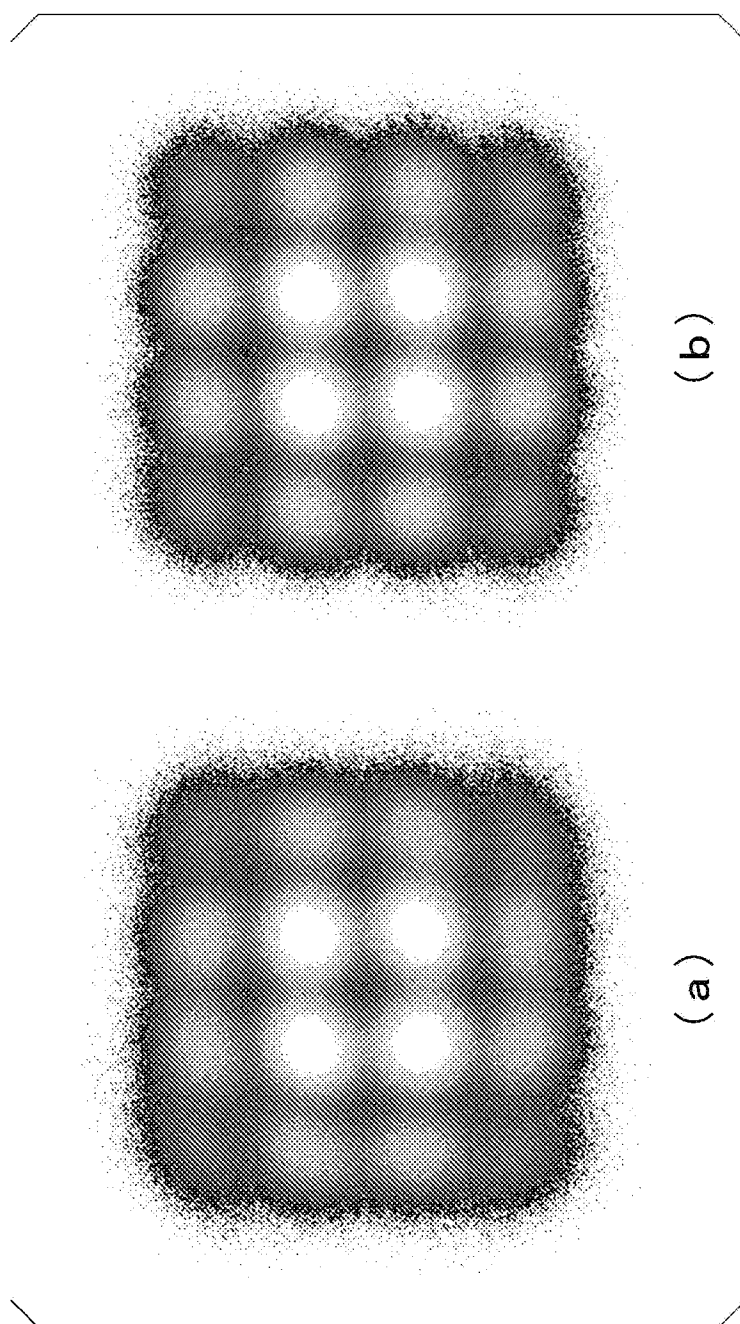
[図9]



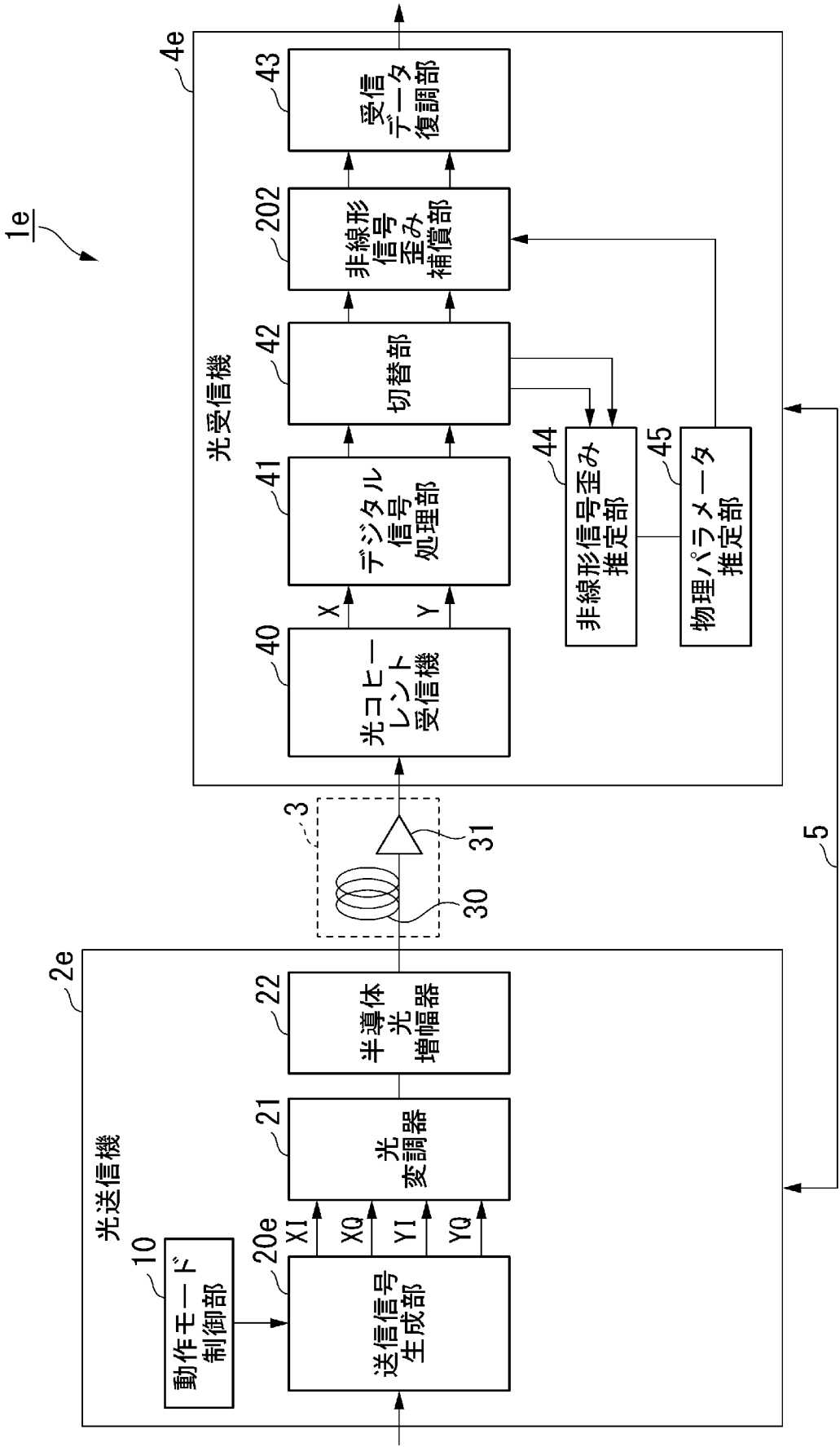
凡例

- ▲ : 半導体光増幅器22の歪み補償なし
- : 168GBaud信号で推定した物理パラメータを用いた半導体光増幅器22の歪み補償
- ◐ : 42GBaud信号で推定した物理パラメータを用いた半導体光増幅器22の補償

[図10]



[図11]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2022/032540

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**H04B 10/58**(2013.01)i; **H04B 10/61**(2013.01)i

FI: H04B10/58; H04B10/61

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H04B10/58; H04B10/61

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2022
 Registered utility model specifications of Japan 1996-2022
 Published registered utility model applications of Japan 1994-2022

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2018-19255 A (NIPPON TELEGRAPH & TELEPHONE) 01 February 2018 (2018-02-01)	1-7
A	US 2010/0239270 A1 (UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA RESEARCH FOUNDATION, INC.) 23 September 2010 (2010-09-23)	1-7
A	LANGE, Sophie et al. A Low-complexity Digital Pre-compensation of SOA Induced Phase Distortion in Coherent QAM Transmissions. 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC) [online]. 2013, [retrieved on 28 October 2022], Retrieved from the Internet: <URL: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6532893 >, <DOI: 10.1364/OFC.2013.OTh3C.7> entire text, all drawings	1-7



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date
 “L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 “O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 “P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 “X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 “Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 “&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

01 November 2022

Date of mailing of the international search report

15 November 2022

Name and mailing address of the ISA/JP

Japan Patent Office (ISA/JP)
 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915
 Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2022/032540

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP	2018-19255	A	01 February 2018	(Family: none)	
US	2010/0239270	A1	23 September 2010	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H04B 10/58(2013.01)i; H04B 10/61(2013.01)i FI: H04B10/58; H04B10/61										
B. 調査を行った分野										
調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） H04B10/58; H04B10/61										
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの										
<table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922 - 1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971 - 2022年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996 - 2022年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994 - 2022年</td> </tr> </table>			日本国実用新案公報	1922 - 1996年	日本国公開実用新案公報	1971 - 2022年	日本国実用新案登録公報	1996 - 2022年	日本国登録実用新案公報	1994 - 2022年
日本国実用新案公報	1922 - 1996年									
日本国公開実用新案公報	1971 - 2022年									
日本国実用新案登録公報	1996 - 2022年									
日本国登録実用新案公報	1994 - 2022年									
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）										
C. 関連すると認められる文献										
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号								
A	JP 2018-19255 A（日本電信電話株式会社）01.02.2018（2018 - 02 - 01）	1-7								
A	US 2010/0239270 A1（UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA RESEARCH FOUNDATION, INC.） 23.09.2010（2010 - 09 - 23）	1-7								
A	LANGE, Sophie et al., A Low-complexity Digital Pre-compensation of SOA Induced Phase Distortion in Coherent QAM Transmissions, 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC) [online], 2013, [retrieved on 2022.10.28], Retrieved from the Internet : <URL: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6532893>, <DOI: 10.1364/OFC.2013.0Th3C.7> 全文, 全文	1-7								
☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。 ☒ パテントファミリーに関する別紙を参照。										
<table border="0"> <tr> <td> * 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技术水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献 </td> <td> “T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献 </td> </tr> </table>			* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技术水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献	“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献						
* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技术水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献	“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献									
国際調査を完了した日 01.11.2022	国際調査報告の発送日 15.11.2022									
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 後澤 瑞征 5K 4540 電話番号 03-3581-1101 内線 3556									

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2022/032540

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP	2018-19255	A	01.02.2018	(ファミリーなし)	
US	2010/0239270	A1	23.09.2010	(ファミリーなし)	