

(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
2020年1月9日(09.01.2020)



(10) 国際公開番号

WO 2020/008982 A1

(51) 国際特許分類:
H04B 10/2513 (2013.01) H04B 10/27 (2013.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2019/025463

(22) 国際出願日: 2019年6月26日(26.06.2019)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2018-128028 2018年7月5日(05.07.2018) JP

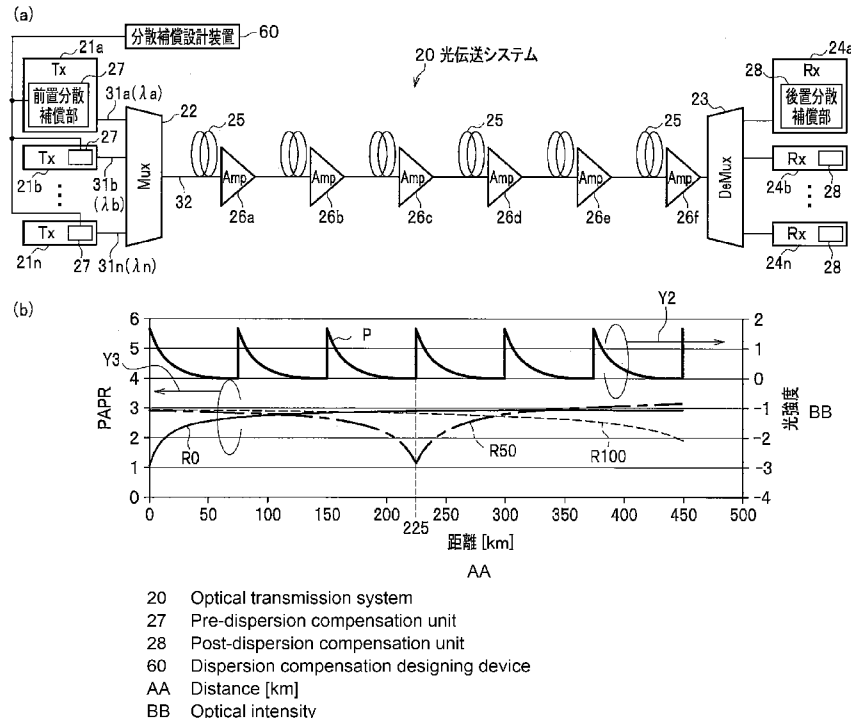
(71) 出願人: 日本電信電話株式会社 (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008116 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 山口 秀 (YAMAGUCHI, Minoru); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 齋藤 航平(SAITO, Kohei); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 久保 勉(KUBO, Tsutomu); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 特許業務法人磯野国際特許商標事務所 (ISONO INTERNATIONAL PATENT OFFICE, P.C.); 〒1050001 東京都港区虎ノ門一丁目1番18号 ヒューリック虎ノ門ビル Tokyo (JP).

(54) Title: DISPERSION COMPENSATION DESIGNING DEVICE, DISPERSION COMPENSATION METHOD, OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM, AND PROGRAM

(54) 発明の名称: 分散補償設計装置、分散補償方法、光伝送システム及びプログラム



(57) Abstract: [Problem] To suppress signal distortion that occurs when transmitting a multilevel modulated optical signal down an optical transmission line in which optical amplifiers are interspersed and improve transmission quality. [Solution] An optical transmission system 20 comprises: transmitters 21a-21n for transmitting a multilevel modulated optical signal 32 to an optical fiber 25; optical amplifiers 26a-26f interspersed in the optical fiber 25, for amplifying the optical signal 32

(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, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, 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, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, 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, 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))

transmitted down the optical fiber 25; and receivers 24a-24n for receiving the amplified optical signal 32 via the optical fiber 25. The pre-dispersion compensation units 27 of the transmitters 21a-21n perform pre-dispersion compensation on the transmitted optical signal 32 that is based on a pre-dispersion compensation rate that determines in advance a percentage with which dispersion compensation for narrowing the bandwidth expanded by wavelength dispersion while the optical signal 32 is transmitted down the optical fiber 25 is applied to the wavelength dispersion accumulated in the optical fiber 25.

(57) 要約: 【課題】光増幅器が点在する光伝送路で多値変調光信号を伝送する際に生じる信号歪を抑制して伝送品質を向上させる。【解決手段】光伝送システム20は、多値変調された光信号32を光ファイバ25へ送信するT×21a~21nと、光ファイバ25を伝送する光信号32を増幅し、光ファイバ25に点在される光増幅器26a~26fと、増幅された光信号32を光ファイバ25を介して受信するR×24a~24nとを備える。T×21a~21nの前置分散補償部27は、光信号32が光ファイバ25を伝送中に波長分散で広がる帯域幅を狭める分散補償を、光ファイバ25で累積される波長分散に対して事前に何パーセント行うかを定める前置分散補償率に基づく前置分散補償を、送信される光信号32に対して行う。

明 細 書

発明の名称：

分散補償設計装置、分散補償方法、光伝送システム及びプログラム

技術分野

[0001] 本発明は、多値変調光信号を光ファイバで伝送した際に非線形効果により発生する信号歪を波長の分散補償により抑制する分散補償設計装置、分散補償方法、光伝送システム及びプログラムに関する。

背景技術

[0002] 光伝送システムにおいては、年々、通信トラフィックの増加に応じて伝送容量を増加する必要がある。図12に示すように、1980年位から1995年位の間における第一世代の電気多重TDM (Time Division Multiplexing) 技術では、約100Mbps～10Gbps位までの伝送容量が必要であった。2000年位から2010年位の間における第二世代のWDM (Wavelength Division Multiplexing: 波長分割多重方式) 技術・光増幅技術では、約2.4Gbps×80波～40Gbps×40波位までの伝送容量が必要であった。今後、2015年位から2025年位の間における第三世代のデジタルコヒーレント技術では、約100Gbps×80波～400Gbps×40波の伝送容量が必要である。更に、この伝送容量を超えて、1Tbps超の伝送容量が要望されている。

[0003] この1T超伝送に向けて更なる周波数利用効率の向上のため、64QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 等の多値変調方式による伝送が検討されている。しかし、図13に示すように、多値変調方式の多値度を、線11で示すQPSK (Quadrature Phase Shift Keying)、線12で示す8QAM、線13で示す16QAMと上げることで非線形効果による信号歪（又は非線形歪）が発現し易くなり、伝送品質が劣化する。

[0004] 但し、図13の横軸は1ビット当たりのエネルギーと雑音電力の比を示す E_b/N_0 (ビットエネルギー対雑音電力密度比) であり、縦軸はBER (B

it Error Rate : 符号誤り率) である。適正なデータを受信するために、ある一定以下の誤り率を得るためには、より大きい E_b/N_0 が必要である。

[0005] $BER = 10^{-4}$ で一定となる双方向矢印 Y1 で示すように、QPSK11、8QAM12、16QAM13のように、より大容量の信号伝送方式に移行する場合、4 dB 分雑音の少ない状態 (よりよい環境) としないと、小容量に比べ大容量の方式では同じエラー率が得られない。つまり、QPSK11 から 16QAM13 のように伝送容量を大きくすると、非線形効果による信号歪が多く出て BER で示す伝送品質が劣化する。

[0006] この信号歪を抑制する技術として、前置分散補償を行う技術 (非特許文献 1) が提案されている。光ファイバを伝送する光の速さは波長によって異なるため (波長分散)、光信号波形が歪み、伝送容量を制限する原因となる。この光信号波形の歪みを補償するのが分散補償である。つまり、送信側で前置分散補償を行うことにより、波長分散をキャンセルするように波形を歪ませることで、受信側で適正な信号の受信を可能とする。

先行技術文献

非特許文献

[0007] 非特許文献 1 : S.Fujisawa, et.al., " Mitigation of intra-channel nonlinear distortions based on PAPR reduction with CD pre-compensation in real-time 50Gbps PM-QPSK transmission" , OECC2012, 5B1-1.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0008] しかし、上記非特許文献 1 の前置分散補償においては、ピーク対平均電力比 (Peak to Average Power Ratio : PAPR) は考慮されているが、光ファイバ伝送中の光信号の光強度に対しては十分に考慮されていない。一方、伝送方向の信号光の伝搬特性は、下式 (1) の非線形シュレディンガー方程式で表されるが、後述するように、式 (1) から、光強度に応じて位相変調されるため、光強度についても考慮する必要がある。

[0009] [数1]

$$\frac{dE_1}{dz} = i\gamma|E_1|^2E_1 + 2i\gamma(|E_2|^2 + |E_3|^2 + |E_4|^2)E_1 + 2i\gamma E_2^* E_3 E_4 \exp(i\Delta\beta z) - \frac{1}{2}\alpha E_1$$

… (1)

[0010] 式(1)において、 $E_1 \sim E_4$ は、図14に示す各々周波数が異なる光信号の光強度（電界強度）である。 i は位相情報（虚数）、 γ は非線形係数、 $\Delta\beta$ は位相不整合量、 z は伝搬距離、 α は損失係数である。但し、 $i\gamma$ で位相回転を表わす。

[0011] 左辺の dE_1/dz は伝送距離における光強度の変化を表わす。右辺の第1項は自己位相変調（Self-Phase Modulation: SPM）、第2項は相互位相変調（Cross-Phase Modulation: XPM）、第3項は四光波混合（Four Wave Mixing: FWM）を表わす。

[0012] 第1項の自己位相変調は、自信号の光強度に対して位相が回転することを意味する。即ち、自信号光の光強度である $|E_1|^2$ に、自信強度 E_1 が掛けられて位相変調することを意味する。第2項の相互位相変調は、光強度 $E_2 \sim E_4$ の周りの他信号の局部発信光で位相が回転することを意味する。第3項の四光波混合は、光強度 $E_2 \sim E_4$ によって、光強度 E_1 に、光強度 $E_1 \sim E_4$ とは異なる新しい雑音信号が重なることを意味する。第4項の「 $(-1/2) \cdot \alpha E_1$ 」は、信号光が非線形ではなく線形的な変化で伝送するにつれて光強度が弱くなる（ α : 損失係数）ことを意味する。

[0013] このように式(1)で表わされるSPM、XPMは、各信号光の光強度 $E_1 \sim E_4$ に応じて位相変調も大きくなる。このため、信号光の帯域幅が広がり、信号歪が生成され、伝送品質が劣化するという問題があった。

[0014] 本発明は、このような事情に鑑みてなされたものであり、光増幅器が点在する光伝送路で多値変調光信号を伝送する際に生じる信号歪を抑制して伝送品質を向上させることができる分散補償設計装置、分散補償方法、光伝送システム及びプログラムを提供することを課題とする。

課題を解決するための手段

- [0015] 上記課題を解決するための手段として、請求項 1 に係る発明は、多値変調された光信号を、当該光信号を増幅する光増幅器が点在された光伝送路を介して受信装置へ送信する送信装置に、当該光信号が光伝送路で累積される波長分散に対して補償を行う分散補償のために設定される分散補償量を、事前に設計する分散補償設計装置であって、前記波長分散に対する事前の分散補償量である前置分散補償量を定める前置分散補償率を、前記光伝送路を伝送する光信号の光強度と、光強度のピーク及び信号光の平均電力の比率である P A P R との所定の関係から求め、この求められた前置分散補償率に応じて前置分散補償量を設計することを特徴とする分散補償設計装置である。
- [0016] 請求項 7 に係る発明は、多値変調された光信号を、当該光信号を増幅する光増幅器が点在された光伝送路を介して受信装置へ送信する送信装置に、当該光信号が光伝送路で累積される波長分散に対して補償を行う分散補償のために設定される分散補償量を、事前に設計する分散補償設計装置による分散補償方法であって、前記分散補償設計装置は、前記波長分散に対する事前の分散補償量である前置分散補償量を定める前置分散補償率を、前記光伝送路を伝送する光信号の光強度と、光強度のピーク及び信号光の平均電力の比率である P A P R との所定の関係から求めるステップと、前記求められた前置分散補償率に応じて前置分散補償量を設計するステップとを実行することを特徴とする分散補償方法である。
- [0017] 請求項 8 に係る発明は、多値変調された光信号を、当該光信号を増幅する光増幅器が点在された光伝送路を介して受信装置へ送信する送信装置に、当該光信号が光伝送路で累積される波長分散に対して補償を行う分散補償のために設定される分散補償量を、事前に設計する分散補償設計装置としてのコンピュータを、前記波長分散に対する事前の分散補償量である前置分散補償量を定める前置分散補償率を、前記光伝送路を伝送する光信号の光強度と、光強度のピーク及び信号光の平均電力の比率である P A P R との所定の関係から求める手段、前記求められた前置分散補償率に応じて前置分散補償量を設計する手段として機能させるためのプログラムである。

- [0018] 請求項 1 の構成、請求項 7 の方法、請求項 8 のプログラムによれば、送信装置が、分散補償設計装置で設計された前置分散補償量に応じて前置分散補償を行うことにより、光伝送路で拡がる多値変調光信号の帯域幅が事前に狭められて送信される。このため、伝送時に波長分散により生じる信号歪が抑制されるので、伝送品質を向上させることができる。これによって、受信装置で信号歪が抑制された適正な帯域幅の光信号を受信できる。
- [0019] 請求項 2 に係る発明は、前記光強度と前記 P A P R との乗算値を前記光伝送路の伝送距離で積分した光信号の伝送劣化量である P P I を、予め定められた閾値以下又は小さくなるように前記前置分散補償率を求めることを特徴とする請求項 1 に記載の分散補償設計装置である。
- [0020] この構成によれば、P P I が閾値以下又は小さくなる前置分散補償率に応じて前置分散補償を行うことができるので、光信号の伝送劣化量が小さく抑制されるように光信号を送信できる。
- [0021] 請求項 3 に係る発明は、前記閾値は、前記 P P I が当該閾値以下の場合に、前記受信装置で受信される光信号の Q 値又は符号誤り率を改善、又は、前記受信装置が光信号を誤り無しで受信するエラーフリー伝送が可能となる誤り訂正リミットまで Q 値又は符号誤り率を改善、或いは、前記受信装置で分散補償による波長分散量の改善の内、何れかの改善を可能とする値であることを特徴とする請求項 2 に記載の分散補償設計装置である。
- [0022] この構成によれば、P P I が閾値以下となる前置分散補償率に応じて前置分散補償を行うことができるので、上記何れかの改善が可能となり、光信号の非線形歪を抑制して適正な受信が可能となる。
- [0023] 請求項 4 に係る発明は、前記光増幅器の増幅利得及び光伝送路上での配置位置に応じて、前記 P P I が閾値以下又は小さくなる光信号の光強度を求めることを特徴とする請求項 2 又は 3 に記載の分散補償設計装置である。
- [0024] この構成によれば、光増幅器の増幅利得及び配置位置の双方で可変される光強度が、P P I が閾値以下又は小さくなるように決定される。これによって、P P I が閾値以下となる前置分散補償率に応じて前置分散補償を行うこ

とができるので、光信号の非線形歪を抑制して適正な受信が可能となる。

[0025] 請求項 5 に係る発明は、前記光伝送路で上り下りの双方向に光信号を送信する場合、当該双方向の光信号の前記 P A P R 及び光強度との所定の関係に重み付けを行った結果から前記前置分散補償率を求め、この求められた前置分散補償率に応じて前置分散補償量を設計することを特徴とする請求項 1 に記載の分散補償設計装置である。

[0026] この構成によれば、双方向に伝送される光信号が相互に及ぼす影響を、重み付けで抑制することができ、双方向の光信号の非線形歪を抑制して適正な受信が可能となる。

[0027] 請求項 6 に係る発明は、多値変調した光信号を光伝送路へ送信する送信装置と、前記光伝送路を伝送する光信号を増幅し、当該光伝送路に点在される光増幅器と、前記増幅された光信号を光伝送路を介して受信する受信装置とを有する光伝送システムであって、前記光信号が光伝送路で累積される波長分散に対して補償を行う分散補償において、当該波長分散に対する事前の分散補償量である前置分散補償量を定める前置分散補償率を、当該光伝送路を伝送する光信号の光強度と、光強度のピーク及び信号光の平均電力の比率である P A P R との所定の関係から求め、この求められた前置分散補償率に応じて定められた前置分散補償量を前記送信装置に設定し、設定された前置分散補償量に応じて前記送信装置が前置分散補償を行うことを特徴とする光伝送システムである。

[0028] この構成によれば、送信装置が前置分散補償量に応じて前置分散補償を行うことにより、光伝送路で拡がる多値変調光信号の帯域幅が事前に狭められて送信されるので、波長分散により生じる信号歪が抑制され、伝送品質を向上できる。

発明の効果

[0029] 本発明によれば、光増幅器が点在する光伝送路で多値変調光信号を伝送する際に生じる信号歪を抑制して伝送品質を向上させることができる分散補償設計装置、分散補償方法、光伝送システム及びプログラムを提供することが

できる。

図面の簡単な説明

[0030] [図1] (a) 本発明の第1実施形態に係る光伝送システムの構成を示すブロック図、(b) 光伝送システムの光ファイバに点在する光増幅器の増幅光強度と、前置分散補償率に応じた距離毎のPAPR（ピーク対平均電力比）とを示すグラフである。

[図2] 第1実施形態の光伝送システムにおいて、前置分散補償率を決める前置分散補償量を設定する動作を説明するためのフローチャートである。

[図3] 前置分散補償率を可変した場合の光ファイバの距離とPPIとの関係を示すグラフである。

[図4] (a) 第1実施形態の応用例の光伝送システムの構成を示すブロック図、(b) 横軸を光ファイバの伝送距離、縦軸を波長分散量とした際の前置分散累積量を表わすグラフである。

[図5] (a) 伝送距離に応じた分散累積量を示す図、(b) 横軸を光ファイバの伝送距離、縦軸をPAPRとした際の、前置分散補償率によるPAPRの変化を表わすグラフである。

[図6] (a) 本発明の第2実施形態に係る光伝送システムの構成を示すブロック図、(b) は光伝送システムの光ファイバに点在する光増幅器の2パターンの増幅光強度と、前置分散補償率が一定の場合の距離毎のPAPRとを示すグラフである。

[図7] 光伝送システムにおいて、前置分散補償量の可変ができない場合又はできる場合に光増幅器の増幅利得の可変及び配置位置を可変して、PPIが閾値以下となるような光信号の光強度を得る際の動作を説明するためのフローチャートである。

[図8] 伝送システムの光ファイバに点在する光増幅器の2パターンの増幅光強度をパラメータとするPPIと光ファイバの光ファイバの距離との関係を表すグラフである。

[図9] (a) 本発明の第3実施形態に係る光伝送システムの構成を示すブロッ

ク図、（b）光伝送システムの光ファイバに点在する光増幅器の2パターンの増幅光強度と、各前置分散補償率に応じた距離毎のPAPRとを示すグラフである。

[図10]縦軸にPPI、横軸に光ファイバの距離を取った場合の、光強度と各種の前置分散補償率のPAPRとに係るPPI曲線を示すグラフである。

[図11]（a）本発明の第4実施形態に係る光伝送システムの構成を示すブロック図、（b）光伝送システムの光ファイバに点在する光増幅器の上り側の増幅光強度と、下り側の増幅光強度とを示すグラフである。

[図12]光伝送システムにおける年毎の通信トラフィックの伝送容量を表わす図である。

[図13]縦軸にBER、横軸にEb/NOを取った場合の多値変調方式の多値度を表わすグラフである。

[図14]各々周波数が異なる光信号の光強度を示すスペクトル図である。

発明を実施するための形態

[0031] 以下、本発明の実施形態を、図面を参照して説明する。但し、本明細書的全図において対応する構成部分には同一符号を付し、その説明を適宜省略する。

<第1実施形態の構成>

図1（a）は本発明の第1実施形態に係る光伝送システムの構成を示すブロック図、（b）は光伝送システムの光ファイバに点在する光増幅器の増幅光強度と、前置分散補償率に応じた距離毎のPAPR（ピーク対平均電力比）とを示すグラフである。

[0032] 図1（a）に示す光伝送システム20は、複数のTx（光送信機）21a, 21b, ..., 21nと、Mux（Multiplexer：合波器）22と、Demux（Demultiplexer：分波器）23と、複数のRx（光受信機）24a, 24b, ..., 24nと、Mux22とDemux23間を接続する光ファイバ25と、光ファイバ25に介挿されて所定間隔で点在する光増幅器（Amp）26a, 26b, 26c, 26d, 26e, 26fとを備えて構成されてい

る。T x 2 1 a ~ 2 1 n は前置分散補償部 2 7 を備え、R x 2 4 a ~ 2 4 n は後置分散補償部 2 8 を備える。前置分散補償部 2 7 には、T x 2 1 a ~ 2 1 n の外部に設けられる分散補償設計装置（設計装置ともいう）6 0 が接続されている。

[0033] なお、T x 2 1 a ~ 2 1 n 及び M u x 2 2 は、請求項記載の送信装置を構成する。R x 2 4 a ~ 2 4 n 及び D e m u x 2 3 は、請求項記載の受信装置を構成する。光ファイバ 2 5 は請求項記載の光伝送路を構成する。

[0034] T x 2 1 a , 2 1 b , … , 2 1 n は、各々周波数が異なる波長 λa , λb , … , λn の光信号 3 1 a , 3 1 b , … , 3 1 n を M u x 2 2 へ送信する。M u x 2 2 は、各光信号 3 1 a ~ 3 1 n を多重化し、この多重化された多値変調光信号である光信号 3 2 を光ファイバ 2 5 へ送信する。光増幅器 2 6 a ~ 2 6 f は、光ファイバ 2 5 を伝送する光信号 3 2 を増幅する。D e m u x 2 3 は、光信号 3 2 に多重された各波長 $\lambda a \sim \lambda n$ の光信号 3 1 a ~ 3 1 n に分波する。R x 2 4 a ~ 2 4 n は、分波された光信号 3 1 a ~ 3 1 n（図では符号省略）を受信する。

[0035] 分散補償設計装置 6 0 は、光ファイバ 2 5 における光信号 3 2 の伝送中に波長分散により歪んだ波形を受信側で元に戻す補償を行う分散補償を、送信時に前置分散補償部 2 7 で事前に行わせるために次の分散補償設計処理を行う。

[0036] 即ち、設計装置 6 0 は、光伝送システム 2 0 の構成要素である光ファイバ 2 5 及び光増幅器 2 6 a ~ 2 6 f の特性から、伝送される光信号 3 2 の波長分散を予測し、この予測された波長分散が受信側において無くなるように、予め送信光信号 3 2 の波形を歪ませる前置分散補償量を求める設計を行う。設計装置 6 0 は、その求めた前置分散補償量を前置分散補償部 2 7 に設定する。前置分散補償部 2 7 は前置分散補償量に応じて後述の前置分散補償の処理を行う。

[0037] ところで、信号光は、波長分散が小さい程、ピーク対平均電力比（P A P R）が小さくなるという特性がある。このため、前側（送信側）で波長分散

量を調整することにより、伝送路中のPAPRを所定距離で小さく調整できる。そこで、前置分散補償によって、光強度の強い所でPAPRを小さくし、PAPRが大きい所では光強度を小さくするように、設計装置60で前置分散補償量を設計する。

[0038] この前置分散補償量は、前置分散補償率を決めるものとなる。前置分散補償率は、図1(a)に示すMux22とDemux23間の光ファイバ25の全長(450km)の波長分散に対して前側(Tx21a~21n側)で補償するパーセンテージである。言い換えれば、前置分散補償率は、光ファイバ25の伝送路で累積される波長分散に対して何パーセントを前側で補償するかのパーセンテージを表わす。つまり、設計装置60では前置分散補償率を求め、この前置分散補償率から前置分散補償量を決めるようになっている。

[0039] 更に、前置分散補償について説明する。図1(b)に線Pで示す光信号32の光強度は、光増幅器26a~26f毎の増幅で高く(強く)なり、次の光増幅器まで徐々に減衰して低く(弱く)なる。なお、Mux22においても図示せぬ光増幅器で増幅後に光信号32を送信するため、光強度Pが高くなっている。図1(b)に示す右方向の矢印Y2は光強度Pのレベルがグラフ右側の数値目盛で表わされることを示す。

[0040] 左方向の矢印Y3は、各前置分散補償率R0, R50, R100の際のPAPRがグラフ左側の数値目盛で表わされることを示す。線R0は、パラメータである前置分散補償率Rが0%であることを示す。つまり、前側で分散補償せず、後側(Rx24a~24n側)で分散補償を行う際の後置分散補償率が100%であることを示す。線R50は、前置分散補償率Rが50%であることを示す。つまり、前側で50%分散補償することを表わす。線R100は、前置分散補償率Rが100%であることを示す。つまり、前側で100%分散補償することを表わす。

[0041] 上述した前置分散補償率Rを決める前置分散補償量は、図2のフローチャートに示す手順を設計装置60が実行することにより決められる。言い換え

れば、図 1 (b) に示す光伝送システム 10 において、設計装置 60 が、光ファイバ 25 及び点在する光増幅器 26 a ~ 26 f が固定の場合に、前置分散補償量を次のように設計する。

[0042] 図 2 のステップ S 1 において、設計装置 60 は、光伝送システム 20 における光ファイバ 25 の伝送距離に応じた損失を表わす損失係数及び光ファイバ長と、光増幅器 26 a ~ 26 f の配置位置及び増幅利得に基づく周知の処理により、光ファイバ 25 に伝送される光信号 32 の光強度 P {図 1 (b)} を求める。なお、光強度は、光ファイバ 25 の損失係数及び光ファイバ長と、光増幅器 26 a ~ 26 f の配置位置及び増幅利得に応じて変化する。

[0043] 次に、ステップ S 2 において、設計装置 60 は、光ファイバ 25 及び光増幅器 26 a ~ 26 f の特性の固定値から設計された前置分散補償量に応じて $PAPR$ を決定する。例えば図 1 (b) の前置分散補償率 $R50$ の場合は、 $PAPR$ が最小となるのは距離が約 225 km の場合である。同様に、 $R0$ の場合は、距離 0 km、 $R100$ の場合は距離 450 km となり、前置分散補償量により、 $PAPR$ の最小となる距離が決まる。

なお、図 1 (a) では 75 km 毎に光増幅器 26 a ~ 26 f を設置する例を示しているため、($R50$ の $PAPR$ が最小となる) 225 km 地点で、光増幅器 26 c により光信号が増幅されている。

[0044] 次に、ステップ S 3 において、設計装置 60 は、上記ステップ S 1 で求められた光強度と、ステップ S 2 で決まった $PAPR$ とを乗算し、この乗算値を伝搬方向に積分 (下式 2 の 0 から L までの積分) することにより、光信号の伝送劣化量を求める。この光信号の伝送劣化量を、 PPI (Peak Power Integration: 累積ピークパワー) と定義し、次式 (2) で表わす。但し、光強度は $Power$ とする。

[0045] [数2]

$$PPI = \int_0^L (PAPR \times Power) dz$$

… (2)

- [0046] 次に、ステップS4において、設計装置60は、PPI（光信号の伝送劣化量）が予め定められた閾値以下か否かを判定する。この判定は、PPIが大きいと、実際の伝送品質の非線形効果が高く、伝送劣化が大きいことを示すので、PPIを小さくするために行う。
- [0047] その閾値は、PPIを小さくすることが望ましいが、実際は、運用上問題とならないような閾値以下とすれば良い。例えば、PPIの閾値は、 $R \times 24a \sim 24n$ で受信される光信号32のQ値又はBERを改善する、或いは、エラーフリー伝送が可能となるFECリミットまでQ値又はBERを改善する、非線形処理等の受信側での信号処理が可能なレベルまで伝送劣化を抑制する、となるような値に設定できれば良い。
- [0048] ステップS4の判定の結果、閾値を超えていれば（No）、上記ステップS2に戻って前置分散補償量を決定する。この場合、ステップS2では、前置分散補償率Rを0%～100%に可変しながら、PPIが閾値以下となるように前置分散補償量を決定するための処理が行われる。なお、前置分散補償率Rが100%になってもPPIが閾値以下となる条件が見つからない場合は、PPIの閾値を見直して再度処理を行う。また、本明細書において「可変」は変えることを意味するものとして使用する。
- [0049] 即ち、ステップS4の判定結果が、閾値以下であれば（Yes）、ステップS5において、この時、ステップS2で設計された前置分散補償量を前置分散補償部27に設定する。前置分散補償部27は、設定された前置分散補償量に応じて前置分散補償を行うことになる。
- [0050] ここで、上記ステップS2において、図1（b）に示すように前置分散補償率RをR0（0%）、R50（50%）、R100（100%）に可変した場合の、光伝送路（光ファイバ25）の距離とPPIとの関係のグラフを図3に示す。
- [0051] 図1（b）において、PPIはPAPRと光強度との積を距離で積分して表されるため、光増幅器26a～26fの位置毎（光増幅器で光信号が増幅される毎）にPPIは、図3に示すように、湾曲状に突出して増加する。

[0052] 前置分散補償率 $R=0$ の場合、距離が短い範囲では、他の $R=50$ 、 $R=100$ と比較し PPI が小さいため、 PPI も小さくなっている。

一方、 $R=100$ の場合は、 PPR が小さくなるのは距離が長くなってからのため、その影響は小さく、 $R=0$ 、 $R=50$ と比較し、全ての範囲で PPI は大きくなっている。

$R=50$ の場合、距離が短い範囲では $R=0$ と比較し PPR が大きいため PPI は大きいものの、 PPR の小さい範囲と光強度の大きい範囲とが重なる領域が広いため、その影響により、距離が長くなると $R=0$ より PPI は小さくなっている。

[0053] この例の場合、全長 450 km において、前置分散補償率 $R=50$ の場合に PPI が最も小さくなるので、この $R=50\%$ を決める前置分散補償量が、設計装置 60 で求められて前置分散補償部 27 に設定される。

[0054] 次に、図 1 (a) に示す各々の $R \times 24a \sim 24n$ の後置分散補償部 28 について説明する。後置分散補償部 28 は、光ファイバ 25 の伝送による波長分散で歪んだ光信号 32 を元の波形に戻す後置分散補償を行う。

[0055] ここで、送信側の前置分散補償量を D_{pre} とし、受信側での後置分散補償量を D_{post} とする。また、光ファイバ 25 全長での波長分散累積量を D_{total} とすると、 $D_{total} + D_{pre} + D_{post} = 0$ となるように、前置分散補償及び後置分散補償を行う。

[0056] この際、前置分散補償率 $R = -D_{pre} / D_{total}$ として、前置分散補償量を前置分散補償部 27 に設定する。上述したように式 (2) で PPI (光信号の伝送劣化量) が閾値以下となるように前置分散補償率 R を決めて前置分散補償量を設定する。なお、 PPI が最小となるように前置分散補償率 R を決めて前置分散補償量を設定してもよい。

[0057] その前置分散補償率を $R=0\% \sim 100\%$ まで可変する後置分散補償について、図 4 (a) 及び (b) を参照して説明する。図 4 (a) は光伝送システム 20A の構成を示すブロック図、(b) は横軸を光ファイバ 25 の伝送距離 $[km]$ 、縦軸を波長分散 $[ps/nm]$ とした際の波長分散累積量 D

t o t a l を線 4 1, 4 2, 4 3 で表わすグラフである。但し、光伝送システム 2 0 A においては、光増幅器 2 6 が所定の n 段 {図 1 (a) では光増幅器 2 6 a ~ 2 6 f は 6 段} となっている。

[0058] 設計装置 6 0 で、前置分散補償率が $R = 0\%$ となるように前置分散補償量が求められ、前置分散補償部 2 7 に設定されたとする。この場合、図 4 (b) に破線 4 1 で示すように、波長分散累積量 $D t o t a l$ が、 $T \times 2 1 a \sim 2 1 n$ の送信時の「0」から徐々に累積され、光ファイバ 2 5 を介して $R \times 2 4 a \sim 2 4 n$ での受信時には、最も高い波長分散量となる。 $R \times 2 4 a \sim 2 4 n$ で受信後は、後置分散補償部 2 8 にて後置分散補償が行われるので、波長分散量は「0」となる。

[0059] 次に、設計装置 6 0 で、前置分散補償率が $R = 50\%$ となるように前置分散補償量が求められ、前置分散補償部 2 7 に設定されたとする。この場合、図 4 (b) に下向き矢印 4 2 a で示すように、前置分散補償量 $D p r e$ として 50% 補償される。このため、波長分散累積量 $D t o t a l$ は、マイナス 50% から開始され、徐々に累積される。その後、 $D t o t a l$ は、実線 4 2 で示すように波長分散量の「0」を超え、受信直前には、前置分散補償量の残りの 50% を有する値となる。この値を受信後に後置分散補償部 2 8 によって、下向き矢印 4 2 b で示す後置分散補償が行われるので、波長分散量は「0」となる。

[0060] 次に、設計装置 6 0 で、前置分散補償率が $R = 100\%$ となるように前置分散補償量が求められ、前置分散補償部 2 7 に設定されたとする。この場合、図 4 (b) に下向き矢印 4 3 a で示すように、前置分散補償量 $D p r e$ として 100% 補償されるため、波長分散累積量 $D t o t a l$ は、マイナス 100% から開始され、徐々に累積される。その後、 $D t o t a l$ は、実線 4 3 で示すように受信直前に「0」となるので、後置分散補償は行われない。

[0061] このような波長分散累積量 $D t o t a l$ と $P A P R$ との関係を図 5 (a) 及び (b) に示す。この線 4 1, 4 2, 4 3 で示す波長分散累積量 $D t o t a l$ と、線 $R 0$, $R 50$, $R 100$ で示す $P A P R$ との関係は、 $D t o t a$

l の増加に伴い P A P R が増加するが、D t o t a l がある程度増加すると P A P R が飽和する傾向にある。

[0062] 図 5 (a) に示す前置分散補償率 $R = 0\%$ の場合の D t o t a l 4 1 が送信時から徐々に増加する過程において、図 5 (b) に示す P A P R は送信時に最も低い。この後、P A P R は、0 k m ~ 1 0 0 k m 近くまでに急激に増加し、その後、受信側の光増幅器 2 6 f の位置 (4 5 0 k m) に至るまで徐々に増加して飽和する。

[0063] 図 5 (a) に示す前置分散補償率 $R = 5 0\%$ の場合の D t o t a l 4 2 が波長分散量のマイナス 5 0 % から開始され、徐々に増加する過程において、図 5 (b) に示す P A P R は「3」付近から徐々に減少し、1 5 0 k m 付近から急激に減少して全長の 5 0 % である 2 2 5 k m で最小となる。この時点で図 5 (a) に示す D t o t a l 4 2 の波長分散量は「0」となっている。更に、P A P R は、その最小から急激に増加し 3 0 0 k m 付近から徐々に 4 5 0 k m まで増加する。

[0064] 図 5 (a) に示す前置分散補償率 $R = 1 0 0\%$ の場合の D t o t a l 4 3 が波長分散量のマイナス 1 0 0 % から開始され、徐々に増加する過程において、図 5 (b) に示す P A P R は最初は高めであるが徐々に減少する。最終の 4 5 0 k m 時点で D t o t a l 4 3 が 0 になると、P A P R は全ての前置分散補償率の中で最小となる。

[0065] このように P A P R が推移する前置分散補償率 $R 0$, $R 5 0$, $R 1 0 0$ においては、距離 0 k m ~ 4 5 0 k m まで積分した際に、真ん中で積分値が最小となる前置分散補償率 $R 5 0$ の積分値が最も小さくなる。このため、非線形効果による非線形歪も最も小さくなり、伝送劣化も小さくなる。

[0066] また、前置分散補償率 R を $0\% \sim 1 0 0\%$ に変化させることで、図 5 (a) に示す波長分散累積量 D t o t a l が線 4 1 ~ 4 3 の範囲で変化し、この変化に応じて図 5 (b) に示す P A P R が変化することになる。例えば、 $R = 2 5\%$ であれば、全長 4 5 0 k m の 2 5 % の 1 1 2 . 5 k m の位置で P A P R が最小となる。

[0067] なお、双方向矢印 Y 5 は、前置分散補償率 R を変化させた際、P A P R が最小となる距離も変化することを示すと共に、前置分散補償率 R が大きくなる程、つまり、最小値となる距離が大きくなる程、P A P R の最小値も大きくなることを示す。

[0068] このことから前置分散補償率 R を変化させることで P A P R が変化し、この変化する P A P R と光強度とを乗算して得られる乗算値が変化する。このため、上式 (2) における P P I が変化するようになる。従って、前置分散補償率 R を 0 % ~ 1 0 0 % 変化させて、P P I が最小となる前置分散補償率 R に応じた前置分散補償量を設計することで、非線形効果による非線形歪を最も小さくできる。この際、前置分散補償率 R が 1 0 0 % 未満であれば、後置分散補償部 2 8 で後置分散補償を行うことになる。

[0069] なお、R x 2 4 a ~ 2 4 n 側の後置分散補償量は、後置分散補償部 2 8 が後置分散補償量を推定し、自律的に設定してもよく、設計装置 6 0 が設定してもよい。この場合の R x 2 4 a ~ 2 4 n 側での後置分散補償量の推定は、例えば、設計装置 6 0 が T x 2 1 a ~ 2 1 n の前置分散補償部 2 7 に前置分散補償量を設定後、既知のトレーニングパルスを送信し、これを R x 2 4 a ~ 2 4 n で受信した光信号から、後置分散補償部 2 8 が分散補償量を推定してもよい。

[0070] <第 1 実施形態の効果>

第 1 実施形態に係る光伝送システム 2 0 (又は 2 0 A) における分散補償設計装置 6 0 によって前置分散補償量を設計する際の効果について説明する。分散補償設計装置 6 0 は、多値変調された光信号 3 2 を、光増幅器 2 6 a ~ 2 6 f が点在された光ファイバ 2 5 を介して R x 2 4 a ~ 2 4 n へ送信する T x 2 1 a ~ 2 1 n に、光信号 3 2 が光ファイバ 2 5 で累積される波長分散に対して補償を行う分散補償のために設定される分散補償量を、事前に設計するものである。

[0071] (1) 分散補償設計装置 6 0 を、波長分散に対する事前の分散補償量である前置分散補償量を定める前置分散補償率 R を、光ファイバ 2 5 を伝送する

光信号 3 2 の光強度と、光強度のピーク及び信号光の平均電力の比率である P A P R との所定の関係から求め、この求められた前置分散補償率 R に応じて前置分散補償量を設計する構成とした。

[0072] この構成によれば、T x 2 1 a ~ 2 1 n が、分散補償設計装置 6 0 で設計された前置分散補償量に応じて前置分散補償を行うことにより、光伝送路で波長分散により波形が歪められる多値変調光信号を、事前にその歪をキャンセルするように歪ませて送信させる。このため、伝送時に波長分散により生じる信号歪が抑制されるので、伝送品質を向上させることができる。これによって、R x 2 4 a ~ 2 4 n で信号歪が抑制された適正な帯域幅の光信号 3 2 を受信できる。

[0073] (2) 分散補償設計装置 6 0 は、光強度と P A P R との乗算値を光ファイバ 2 5 の伝送距離で積分した光信号の伝送劣化量である P P I を、予め定められた閾値以下又は小さくなるように前置分散補償率を求める構成とした。

[0074] この構成によれば、光信号 3 2 の伝送劣化量が小さく抑制されるように光信号 3 2 を送信できる。

[0075] (3) 閾値は、P P I が当該閾値以下の場合に、R x 2 4 a ~ 2 4 n で受信される光信号 3 2 の Q 値又は符号誤り率を改善、又は、R x 2 4 a ~ 2 4 n が光信号 3 2 を誤り無しで受信するエラーフリー伝送が可能となる誤り訂正リミットまで Q 値又は符号誤り率を改善、或いは、R x 2 4 a ~ 2 4 n で分散補償による波長分散量の改善の内、何れかの改善を可能とする値である。

[0076] これによって、P P I が閾値以下であれば、光信号 3 2 の非線形歪を抑制して適正な受信が可能となる。

[0077] (4) 分散補償設計装置 6 0 は、光増幅器 2 6 a ~ 2 6 f の増幅利得及び光ファイバ 2 5 上での配置位置に応じて、P P I が閾値以下又は小さくなる光信号の光強度を求める構成とした。

[0078] この構成によれば、T x 2 1 a ~ 2 1 n の分散補償装置による光信号 3 2 における前置分散補償の対象外の部分が、R x 2 4 a ~ 2 4 n の分散補償装

置による後置分散補償で、波長分散量が0となるように処理される。このため、 $R \times 24a \sim 24n$ で信号歪が抑制された適正な帯域幅の光信号32を受信できる。

なお、前述及び後述の説明に用いた $T \times 21a \sim 21n$ 、 $R \times 24a \sim 24n$ 、光増幅器26a～26fの数、光増幅器26a～26fの挿入位置、光強度、光増幅器26a～26fの増幅率、光ファイバ25の距離、波長分散量といったパラメータは一例である。

また、分散補償装置は $T \times$ に前置分散補償量を設定できる箇所に配置されていればよく、 $T \times$ 内部に配置されても良い。

[0079] <第2実施形態の構成>

図6(a)は本発明の第2実施形態に係る光伝送システムの構成を示すブロック図、(b)は光伝送システムの光ファイバに点在する光増幅器の2パターンの増幅光強度と、前置分散補償率が一定の場合の距離毎のPAPR（ピーク対平均電力比）とを示すグラフである。

[0080] 図6(a)に示す第2実施形態の光伝送システム20Bが、第1実施形態の光伝送システム20{図1(a)}と異なる点は、光ファイバ25に点在される光増幅器26a1～26e1の各々が、矢印Y7a～Y7eで示すように増幅利得が可変できていることと、矢印Y8a～Y8eで示すように配置位置が、送信側又は受信側に可変できていることにある。

[0081] 但し、光伝送システム20の光増幅器26a～26fが6つであったのに対して、光伝送システム20Bの光増幅器26a1～26e1は5つであり、 $M \times 22$ から最後尾の光増幅器26e1までの距離が、図6(b)に示すように400kmであるとする。また、光伝送システム20Bでは、 $T \times 21a \sim 21n$ が、前置分散補償量が固定量となった前置分散補償部27aを備えるとする。

[0082] つまり、光伝送システム20Bでは、前置分散補償量の可変ができないが、光増幅器26a1～26e1の増幅利得の可変及び配置位置の可変が可能

な場合に、その増幅利得及び配置位置を可変して、 $PP1$ （光信号の伝送劣化量）が閾値以下となる（又は小さくなる）ような光信号32の光強度を得るようにする。この動作を図7のフローチャートを参照して説明する。

[0083] 但し、設計装置60で設計される前置分散補償量は、前置分散補償率が $R = 50\%$ で一定の場合の固定量であるとする。この $R = 50\%$ を図6（b）のグラフに線R50で示す。従って、前置分散補償率R50の場合の $PAPR$ （ピーク対平均電力比）は、そのグラフのように定まっている。

[0084] 図7のステップS11において、光強度を設定（設計）する伝送路の設計を行う。まず、現在の光ファイバ25に点在された各光増幅器26a1～26e1の増幅利得及び配置位置の状態で決まる光強度が、図6（b）に線P1で示す光強度であるとする。

[0085] 次に、ステップS12において、設計装置60では前置分散補償量が可変か否かが判断されるが、この場合、前置分散補償量が固定量なので、ステップS14に進む。なお、ステップS13は後述の第3実施形態で説明する。

[0086] ステップS14において、設計装置60は、上記ステップS11で求められた光強度P1と、固定値である前置分散補償率R50により定まっている $PAPR$ とを乗算し、この乗算値を伝搬方向で積分することにより、 $PP1$ （光信号の伝送劣化量）を求める。

[0087] この光強度P1及び後述の光強度P2をパラメータとする $PP1$ と光ファイバ25の距離との関係を図8のグラフに示す。図8では、光強度P1に係る $PP1$ は、光ファイバ25に点在する光増幅器26a1～26e1の位置毎（距離毎）に湾曲状に突出して増加している。

[0088] 次に、ステップS15において、設計装置60は、 $PP1$ が予め定められた閾値以下か否かを判定する。この結果、閾値を超えていた（No）とする。この場合、上記ステップS11に戻って伝送路の再設計を行い、新たな光強度を次のように求める。

[0089] 例えば、光増幅器26c1の増幅利得を上げると共に、その配置位置を受信側にずらして配置する。光増幅器26a1，26b1は、増幅利得を同じ

で配置位置を送信側にずらして配置し、光増幅器 26 d 1 は、増幅利得を同じで配置位置を受信側にずらして配置する。更に、光増幅器 26 e 1 は増幅利得及び配置位置ともに同じとする。この状態で決まる光強度を、図 6 (b) に破線 P 2 で示す。

[0090] 次に、ステップ S 1 2 を介して進んだステップ S 1 4 において、前置分散補償部 27 a は、上記ステップ S 1 1 で求められた光強度 P 2 と P A P R とを乗算後に積分して P P I を求める。

[0091] 次に、ステップ S 1 5 において、設計装置 60 によって、P P I が予め定められた閾値以下であると判定 (Y e s) 判定された場合、閾値以下であれば (Y e s)、ステップ S 5 において、この時、ステップ S 2 で決定された前置分散補償量を前置分散補償部 27 に設定する。上記ステップ S 1 1 で設計された各光増幅器 26 a 1 ~ 26 e 1 の増幅利得及び配置位置の状態を光ファイバ 25 に設定する。この設定に応じて光ファイバ 25 を伝送する光信号 32 の信号歪が抑制されるので、R x 24 a ~ 24 n で適正な帯域幅の光信号 32 を受信できる。

[0092] <第 3 実施形態の構成>

図 9 (a) は本発明の第 3 実施形態に係る光伝送システムの構成を示すブロック図、(b) は光伝送システムの光ファイバに点在する光増幅器の 2 パターンの増幅光強度と、各前置分散補償率に応じた距離毎の P A P R とを示すグラフである。

[0093] 図 9 (a) に示す第 3 実施形態の光伝送システム 20 C が、第 1 実施形態の光伝送システム 20 {図 1 (a)} と異なる点は、光ファイバ 25 に点在される光増幅器 26 a 1 ~ 26 f 1 の各々が、矢印 Y 7 a ~ Y 7 f で示すように増幅利得が可変できるようになっていることと、矢印 Y 8 a ~ Y 8 f で示すように配置位置が、送信側又は受信側に可変できるようになっていることにある。

[0094] 光伝送システム 20 C では、第 1 実施形態と同様に前置分散補償量の可変が可能であると共に、光増幅器 26 a 1 ~ 26 f 1 の増幅利得の可変及び配

置位置の可変が可能な構成となっている。この構成の場合に、上記の前置分散補償量、増幅利得及び配置位置を可変して、 $PP1$ （光信号の伝送劣化量）が閾値以下となる（又は小さくなる）ような光信号32の光強度を得るようにする。この動作を図7のフローチャートを参照して説明する。

[0095] 但し、図9（b）に示すグラフにおいて、前置分散補償率 $R0$ 、 $R50$ 、 $R100$ と、実線の光強度 P とは、図1（b）と同じであるが、破線の光強度 $P3$ が異なっている。光強度 $P3$ は、光増幅器26a1～26f1の増幅利得及び配置位置を所定状態に可変した場合の光強度である。

[0096] 図7のステップS11において、光強度を設定（設計）する伝送路の設計を行う。まず、現在の光ファイバ25に点在された各光増幅器26a1～26f1の増幅利得及び配置位置の状態が決まる光強度が、図9（b）に線 P で示す光強度であるとする。

[0097] 次に、ステップS12において、設計装置60では前置分散補償量が可変か否かが判断される。この場合、前置分散補償量が可変できる（Yes）ので、ステップS13に進む。

[0098] 次に、ステップS13において、設計装置60は、前置分散補償量を決定する。例えば図9（b）の225kmに示すように、前置分散補償率 $R50$ の場合に光強度 P の強い所で $PAPR$ が小さくなるが、このように $PAPR$ の平均電力が小さい所ではピークが大きくても良いように前置分散補償量を決定する。この前置分散補償量により必然的に $PAPR$ が決まる。

[0099] ステップS14において、設計装置60は、上記ステップS11で求められた光強度 P と、 $R50$ の前置分散補償量に応じて決まった $PAPR$ とを乗算し、この乗算値を伝搬方向で積分することにより、 $PP1$ を求める。

[0100] このように、光強度 P と $R50$ の場合の $PAPR$ との乗算結果を積分した $PP1$ の曲線（ $PP1$ 曲線）を、図10に符号 $PR2$ で示す。図10に示す各 $PP1$ 曲線 $PR1$ ～ $PR6$ は、光ファイバ25の距離に対する $PP1$ を示すパラメータである。

[0101] $PP1$ 曲線 $PR1$ は、光強度 P と $R0$ の場合の $PAPR$ との乗算結果を積

分した P P I を示す。P P I 曲線 P R 2 は、光強度 P と R 5 0 の場合の P A P R との乗算結果を積分した P P I を示す。P P I 曲線 P R 3 は、光強度 P と R 1 0 0 の場合の P A P R との乗算結果を積分した P P I を示す。P P I 曲線 P R 4 は、後述する光強度 P 3 と R 0 の場合の P A P R との乗算結果を積分した P P I を示す。P P I 曲線 P R 5 は、光強度 P 3 と R 5 0 の場合の P A P R との乗算結果を積分した P P I を示す。P P I 曲線 P R 6 は、光強度 P 3 と R 1 0 0 の場合の P A P R との乗算結果を積分した P P I を示す。

[0102] 各 P P I 曲線 P R 1 ~ P R 6 は、光ファイバ 2 5 に点在する光増幅器 2 6 a 1 ~ 2 6 f 1 の位置毎（距離毎）に湾曲状に突出して増加している。

[0103] 次に、図 7 のステップ S 1 5 において、設計装置 6 0 は、P P I が予め定められた閾値以下か否かを判定する。この結果、閾値を超えていた（N o）とする。この場合、上記ステップ S 1 1 に戻って伝送路の再設計を行い、新たな光強度を次のように求める。

[0104] 再設計において、光増幅器 2 6 b 1, 2 6 f 1 は増幅利得及び配置位置を同じとした。光増幅器 2 6 a 1 は増幅利得を上げ、配置位置を受信側にずらした。光増幅器 2 6 c 1 は増幅利得を同じとし、配置位置を送信側にずらした。光増幅器 2 6 d 1, 2 6 e 1 は増幅利得を上げ、配置位置を送信側にずらした。この状態で決まる光強度を、図 9（b）に破線 P 3 で示す。

[0105] 次に、ステップ S 1 2 の Y e s を介して進んだステップ S 1 3 において、設計装置 6 0 は、上記ステップ S 1 1 で求められた光強度 P 3 と前置分散補償率 R 0, R 5 0, R 1 0 0 毎の P A P R とを乗算後に積分して各 P P I を求める。ここでステップ S 1 5 において閾値判定を行うが、前置分散補償率 R が 1 0 0 % になっても P P I が閾値以下となる条件が見つからない場合は、P P I の閾値を見直して再度処理を行う。

[0106] 次に、ステップ S 1 5 において、設計装置 6 0 によって、各 P P I が閾値以下であると判定（Y e s）されたとする。この光強度 P 3 で各 P A P R の場合の各 P P I が、図 1 0 に各 P P I 曲線 P R 4 ~ P R 6 で示す通りとなる。受信端の 4 5 0 k m では P P I 曲線 P R 5 が最小となっている。即ち、光

強度 P_3 と R_{50} の場合の $PAPR$ との乗算結果を積分した $PP1$ が最小となっている。

[0107] 従って、 $PP1$ を保持する上記ステップ $S11$ で再設計された各光増幅器 $26a1 \sim 26f1$ の増幅利得及び配置位置の状態を光ファイバ 25 に設定する。この設定に応じて光ファイバ 25 を伝送する光信号 32 の信号歪が抑制されるので、 $Rx24a \sim 24n$ で適正な帯域幅の光信号 32 を受信できる。

[0108] <第4実施形態の構成>

図11(a)は本発明の第4実施形態に係る光伝送システムの構成を示すブロック図、(b)は光伝送システムの光ファイバに点在する光増幅器の上り側の増幅光強度と、下り側の増幅光強度とを示すグラフである。

[0109] 図11(a)に示す第4実施形態の光伝送システム $20D$ が、第1実施形態の光伝送システム 20 {図1(a)} と異なる点は、光ファイバ $25A$ が一芯双方向のものであり、光増幅器 $41a \sim 41g$ が双方向に光信号 32 を増幅可能となっている。従って、一端側に $Mux/Demux42$ 、他端側に $Demux/Mux43$ が配置され、 $Mux/Demux42$ に $Tx21a, 21n$ と $Rx24b$ とが混在して接続され、 $Demux/Mux43$ に対向側の $Rx24a, 24n$ と $Tx21b$ とが混在して接続されている。なお、 $Mux/Demux42$ 、 $Tx21a, 21n$ 及び $Rx24b$ は、請求項記載の送受信装置を構成する。 $Demux/Mux43$ 、 $Rx24a, 24n$ 及び $Tx21b$ は、請求項記載の送受信装置を構成する。

[0110] 図11(b)に矢印 $Y10$ で示すように、光信号 32 が上り側に伝送される際に光増幅器 $41a \sim 41g$ が光信号 32 を増幅すると、光強度が線 $P5$ で示すように光増幅器 $41a \sim 41g$ 毎に立ち上がり、出力後に徐々に立ち下がって行く。

[0111] 一方、矢印 $Y10$ の逆方向の矢印 $Y11$ で示すように、光信号 32 が下り側に伝送される際に光増幅器 $41g \sim 41a$ が光信号 32 を増幅すると、光強度が線 $P6$ で示すように光増幅器 $41g \sim 41a$ 毎に立ち上がり、出力後

に徐々に立ち下がって行く。

[0112] ところで、図1に示した光ファイバ25を上り下り毎に合計2本敷設すれば、上りと下りの光信号32を分離できるので、上りのPP1を閾値以下（又は最小）、下りのPP1を閾値以下とできる。しかし、図11（a）に示す光ファイバ25Aのように、一芯双方向では上り下りの光信号32が相互に影響を及ぼすため、上り下りの各々をPP1が閾値以下となるように前置分散補償率を決めただけでは、上り下り双方のPP1を最小にできない。

[0113] そこで、光伝送システム20Dにおいては、光ファイバ25Aを介して対向する前置分散補償部27が、上りのPP1に重み付けの値（重み付け値）を乗算し、下りのPP1に重み付け値を乗算する。更に、前置分散補償部27は、その乗算結果と対向側の乗算結果との加算値が予め定められた閾値以下（又は最小）となる前置分散補償率に応じて、上り下り各々の前置分散補償を行うようにした。このようにすれば、上り下りの光信号32が相互に及ぼす影響を重み付け値で抑制することができ、上り下り双方の光信号32の非線形歪を抑制して適正な受信が可能となる。

[0114] また、本実施形態のコンピュータを実行するプログラムについて説明する。コンピュータは、多値変調された光信号32を、光信号32を増幅する光増幅器26a～26fが点在された光ファイバ25を介して受信装置（Demux23及びRx24a～24n）へ送信する送信装置（Tx21a～21n及びMux22）に、光信号32が光ファイバ25で累積される波長分散に対して補償を行う分散補償のために設定される分散補償量を、事前に設計する分散補償設計装置60であるとする。

[0115] このプログラムは、上記コンピュータを、波長分散に対する事前の分散補償量である前置分散補償量を定める前置分散補償率を、光ファイバ25を伝送する光信号32の光強度と、光強度のピーク及び信号光の平均電力の比率であるPAPRとの所定の関係から求める手段、前記求められた前置分散補償率に応じて前置分散補償量を設計する手段として機能させる。

[0116] このプログラムによれば、上述した第1実施形態の設計装置60の効果と

同様の効果を得ることができる。

[0117] その他、具体的な構成について、本発明の主旨を逸脱しない範囲で適宜変更が可能である。

以上の説明では、分散補償は $T \times$ 及び $R \times$ で行っているが、電氣的に DSP (Digital Signal Processor) による信号処理で分散補償を行っても良く、また、分散補償ファイバ等の光デバイスで行っても良い。更に、分散補償の光デバイスを光ファイバの伝送路に挿入することで実現しても良い。この場合は、複数の $T \times$ (光信号) による PPI を全体的に小さくするように前置分散補償率 R を設計すれば良い。また、分散補償量は光伝送路の波長分散を 0 となるように補償を行っているが、PPI を小さくするように補償を行えばよく、必ずしも 0 となるような補償でなくとも良い。

[0118] 遠隔励起増幅器等を用いた長距離無中継伝送においては、遠隔励起増幅器の他、高出力信号やラマン増幅の使用により非線形現象が強く発現する。特に海底伝送系は海底に光ファイバを敷設すると、伝送路の変更が困難であるため、上述した第 2 ～ 第 4 実施形態の光伝送システム構成を事前に設計することが重要となる。既設の光ファイバに対して伝送系の装置を更改する場合は、第 1 実施形態のような前置分散補償を行う設計が重要となる。従って、上記の事前設計を行うようにしてもよい。

符号の説明

[0119] 20, 20A, 20B, 20C, 20D 光伝送システム
21a ~ 21n $T \times$ (光送信機)
22 Mux (合波器)
23 Demux (分波器)
24a ~ 24n $R \times$ (光受信機)
25, 25A 光ファイバ
26a ~ 26f, 26a1 ~ 26f1, 41a ~ 41g 光増幅器
27, 27a 前置分散補償部
28 後置分散補償部

3 2 光信号

4 1 ~ 4 3 波長分散累積量

4 2 a 前置分散補償量

4 2 b 後置分散補償量

6 0 分散補償設計装置

P, P 1 ~ P 3, P 5, P 6 光強度

R 0, R 5 0, R 1 0 0 前置分散補償率

請求の範囲

- [請求項1] 多値変調された光信号を、当該光信号を増幅する光増幅器が点在された光伝送路を介して受信装置へ送信する送信装置に、当該光信号が光伝送路で累積される波長分散に対して補償を行う分散補償のために設定される分散補償量を、事前に設計する分散補償設計装置であって、
- 前記波長分散に対する事前の分散補償量である前置分散補償量を定める前置分散補償率を、前記光伝送路を伝送する光信号の光強度と、光強度のピーク及び信号光の平均電力の比率であるPAPRとの所定の関係から求め、この求められた前置分散補償率に応じて前置分散補償量を設計することを特徴とする分散補償設計装置。
- [請求項2] 前記光強度と前記PAPRとの乗算値を前記光伝送路の伝送距離で積分した光信号の伝送劣化量であるPPIを、予め定められた閾値以下又は小さくなるように前記前置分散補償率を求めることを特徴とする請求項1に記載の分散補償設計装置。
- [請求項3] 前記閾値は、前記PPIが当該閾値以下の場合に、前記受信装置で受信される光信号のQ値又は符号誤り率を改善、又は、前記受信装置が光信号を誤り無しで受信するエラーフリー伝送が可能となる誤り訂正リミットまでQ値又は符号誤り率を改善、或いは、前記受信装置で分散補償による波長分散量の改善の内、何れかの改善を可能とする値であることを特徴とする請求項2に記載の分散補償設計装置。
- [請求項4] 前記光増幅器の増幅利得及び光伝送路上での配置位置に応じて、前記PPIが閾値以下又は小さくなる光信号の光強度を求めることを特徴とする請求項2又は3に記載の分散補償設計装置。
- [請求項5] 前記光伝送路で上り下りの双方向に光信号を送信する場合、当該双方向の光信号の前記PAPR及び光強度との所定の関係に重み付けを

行った結果から前記前置分散補償率を求め、この求められた前置分散補償率に応じて前置分散補償量を設計する

ことを特徴とする請求項 1 に記載の分散補償設計装置。

[請求項6]

多値変調した光信号を光伝送路へ送信する送信装置と、前記光伝送路を伝送する光信号を増幅し、当該光伝送路に点在される光増幅器と、前記増幅された光信号を光伝送路を介して受信する受信装置とを有する光伝送システムであって、

前記光信号が光伝送路で累積される波長分散に対して補償を行う分散補償において、当該波長分散に対する事前の分散補償量である前置分散補償量を定める前置分散補償率を、当該光伝送路を伝送する光信号の光強度と、光強度のピーク及び信号光の平均電力の比率である P A P R との所定の関係から求め、この求められた前置分散補償率に応じて定められた前置分散補償量を前記送信装置に設定し、設定された前置分散補償量に応じて前記送信装置が前置分散補償を行う

ことを特徴とする光伝送システム。

[請求項7]

多値変調された光信号を、当該光信号を増幅する光増幅器が点在された光伝送路を介して受信装置へ送信する送信装置に、当該光信号が光伝送路で累積される波長分散に対して補償を行う分散補償のために設定される分散補償量を、事前に設計する分散補償設計装置による分散補償方法であって、

前記分散補償設計装置は、

前記波長分散に対する事前の分散補償量である前置分散補償量を定める前置分散補償率を、前記光伝送路を伝送する光信号の光強度と、光強度のピーク及び信号光の平均電力の比率である P A P R との所定の関係から求めるステップと、

前記求められた前置分散補償率に応じて前置分散補償量を設計するステップと

を実行することを特徴とする分散補償方法。

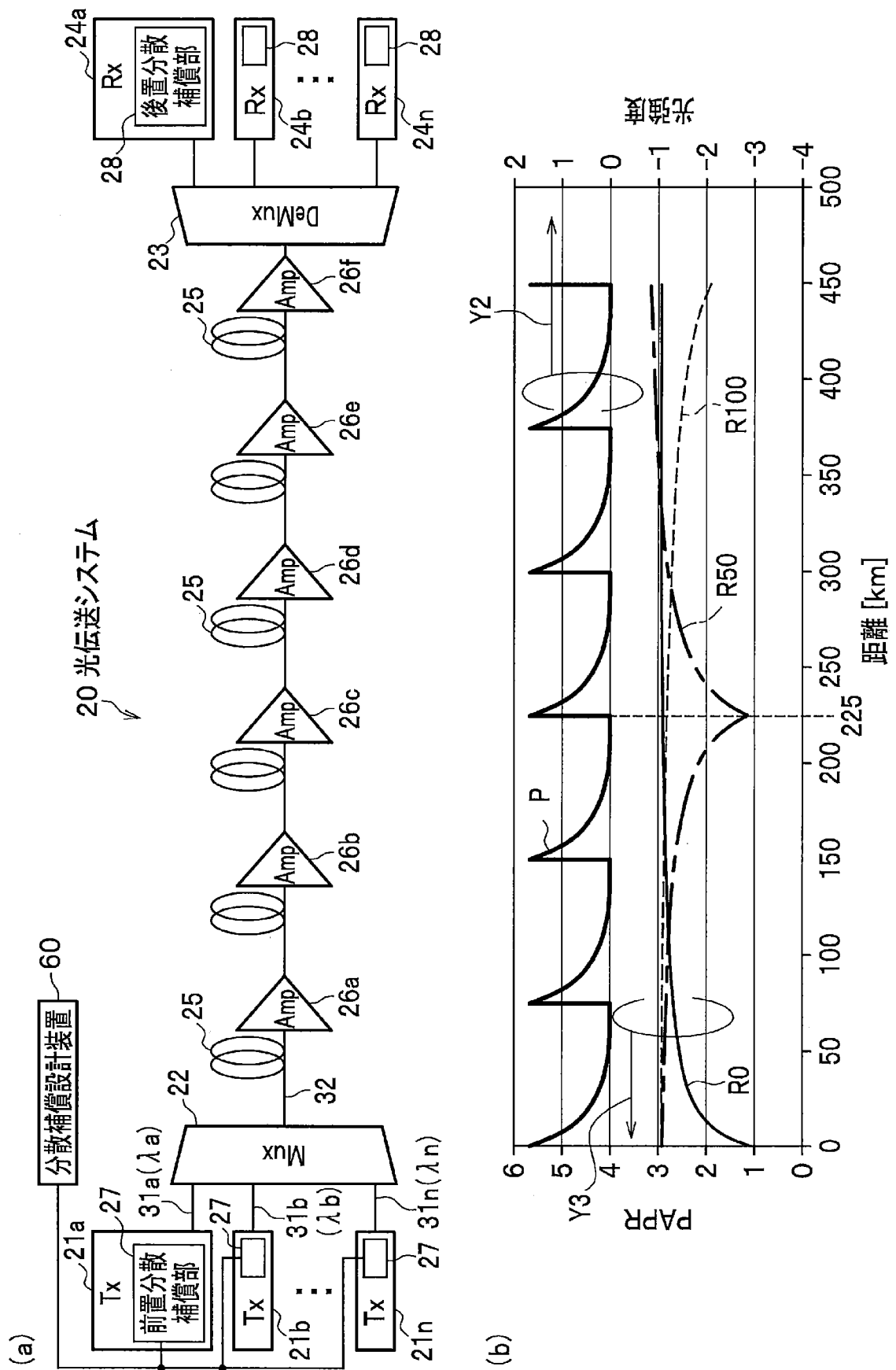
[請求項8] 多値変調された光信号を、当該光信号を増幅する光増幅器が点在された光伝送路を介して受信装置へ送信する送信装置に、当該光信号が光伝送路で累積される波長分散に対して補償を行う分散補償のために設定される分散補償量を、事前に設計する分散補償設計装置としてのコンピュータを、

前記波長分散に対する事前の分散補償量である前置分散補償量を定める前置分散補償率を、前記光伝送路を伝送する光信号の光強度と、光強度のピーク及び信号光の平均電力の比率であるPAPRとの所定の関係から求める手段、

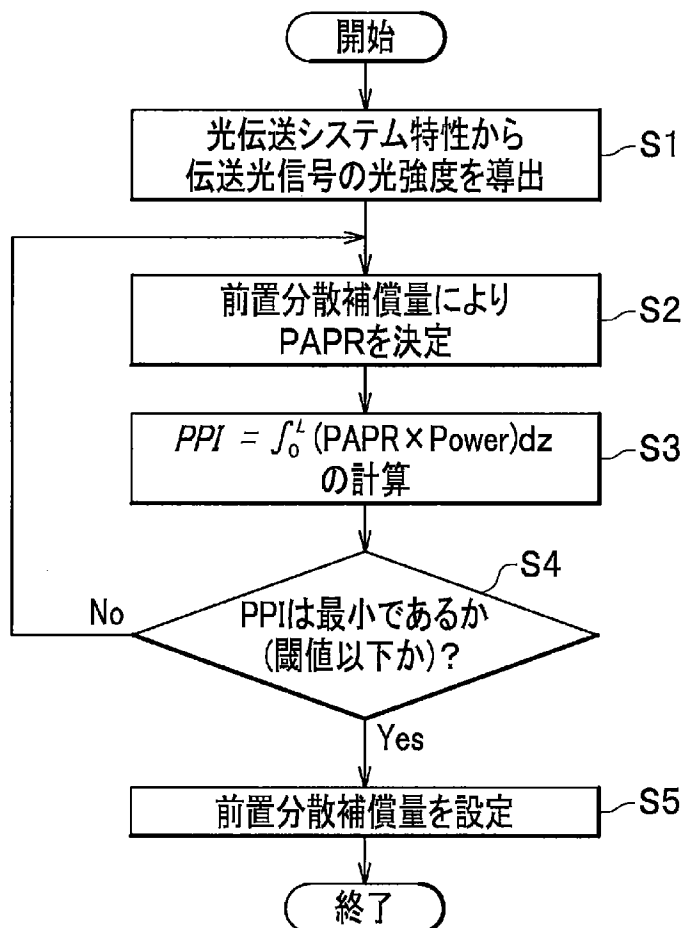
前記求められた前置分散補償率に応じて前置分散補償量を設計する手段

として機能させるためのプログラム。

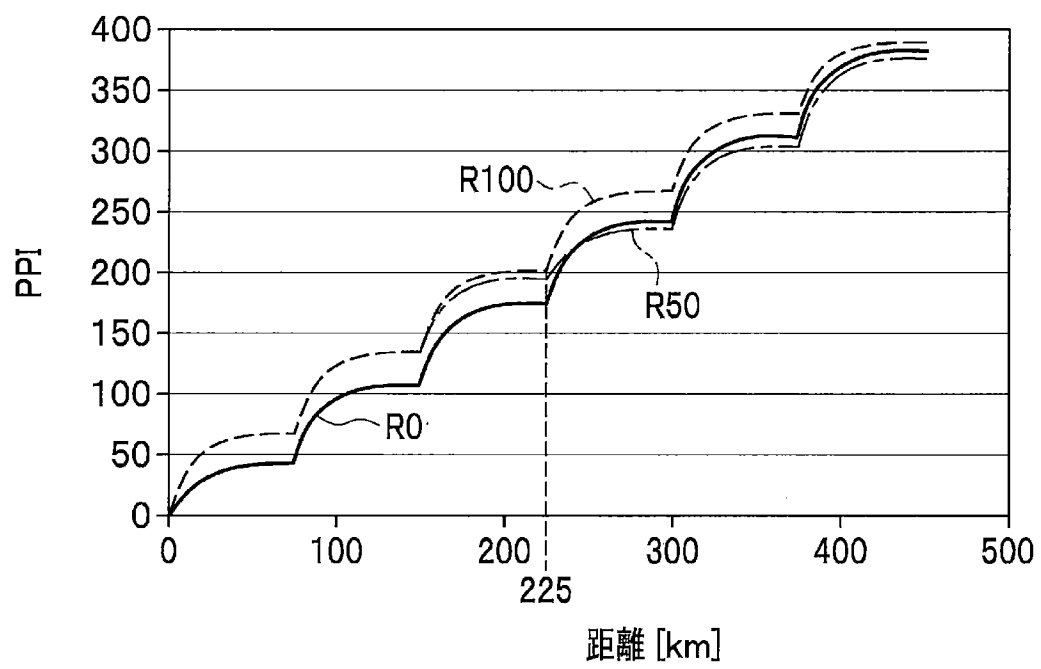
[図1]



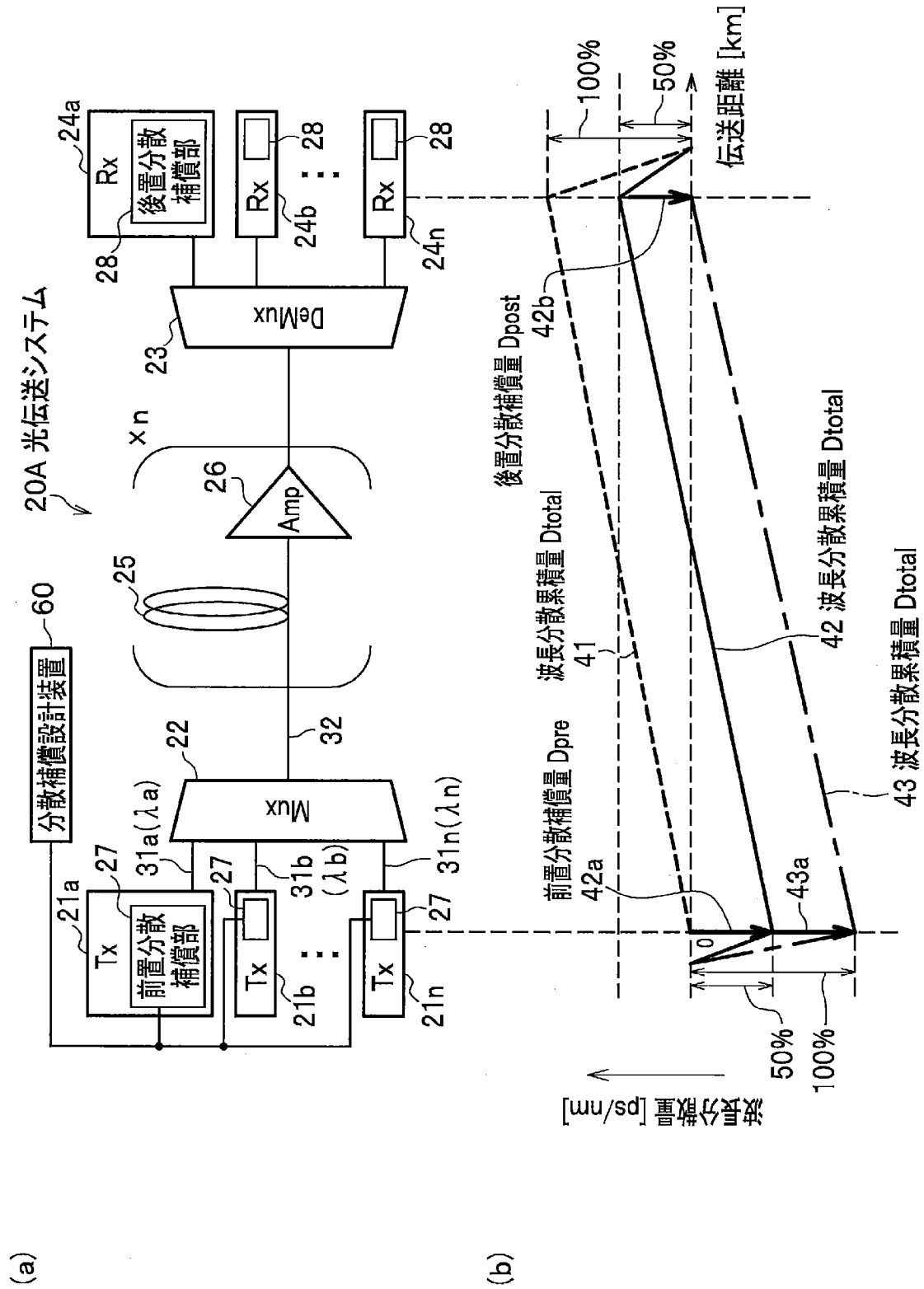
[図2]



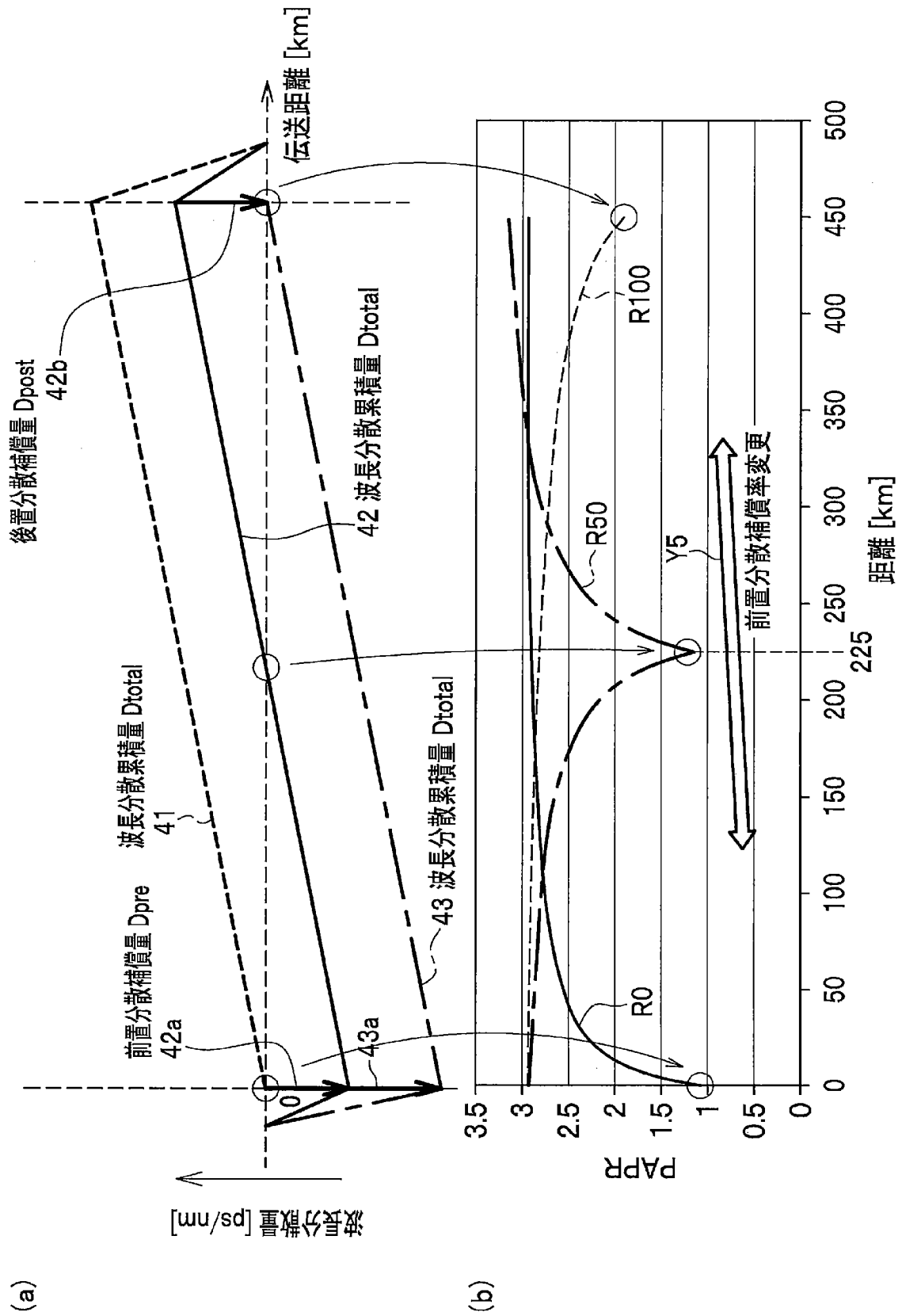
[図3]



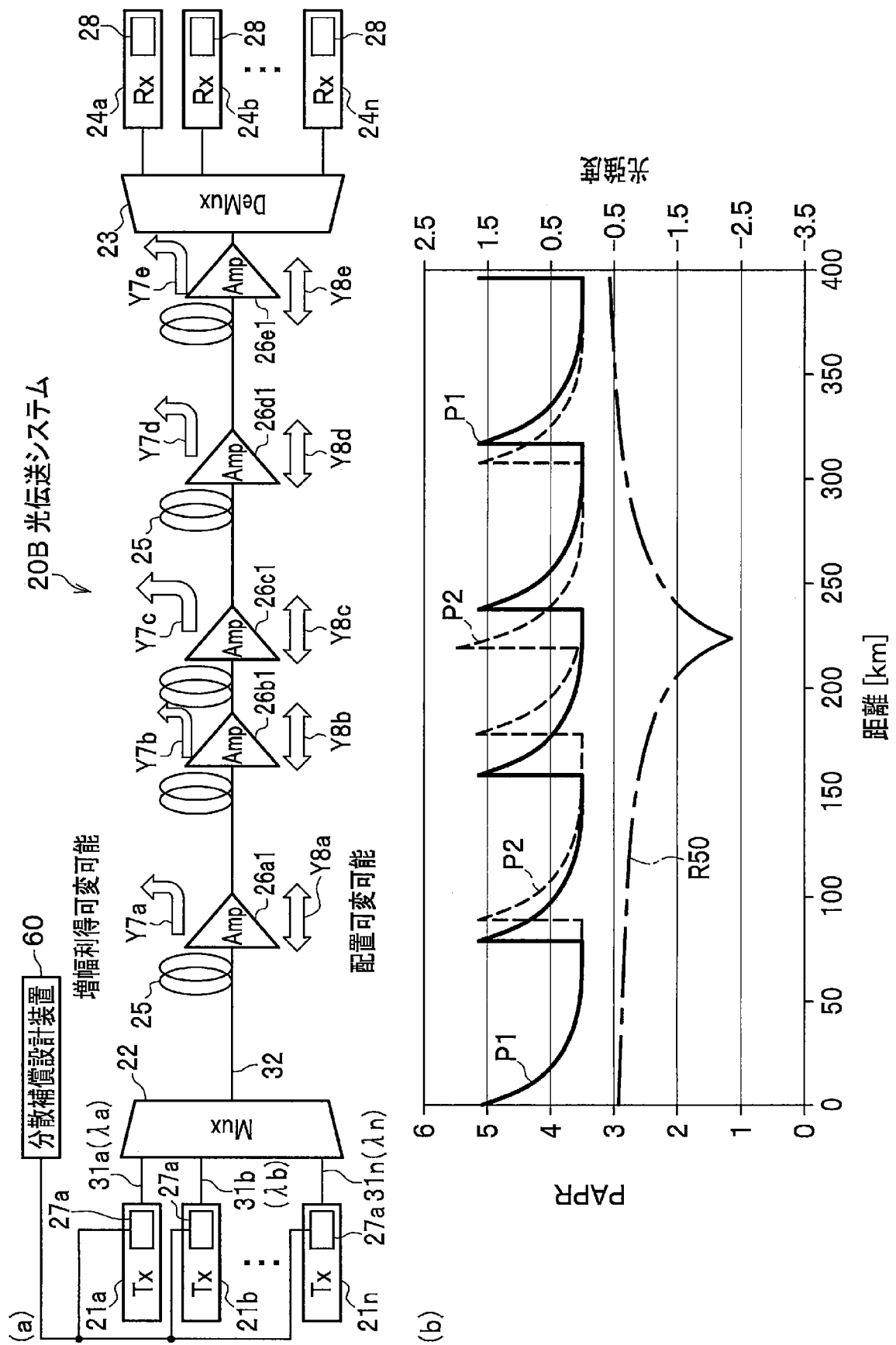
[図4]



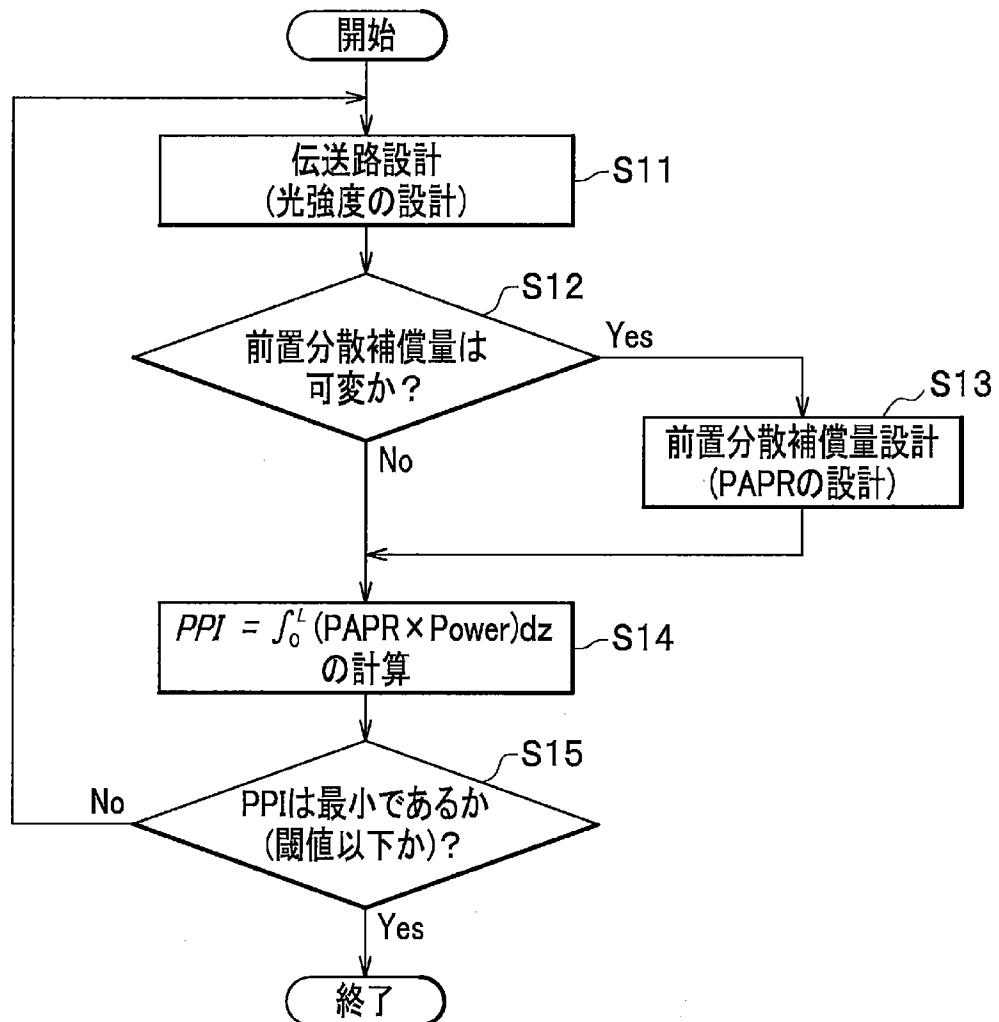
[図5]



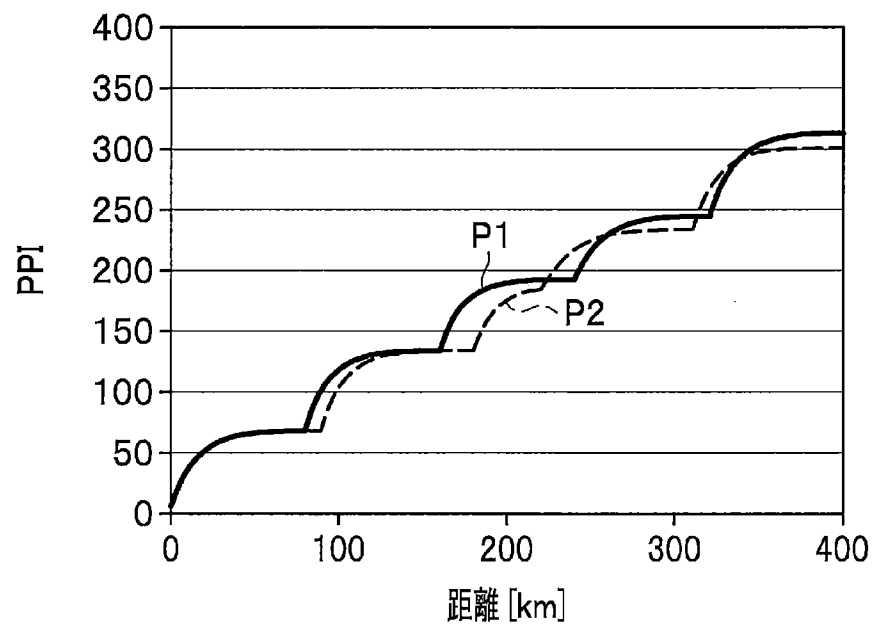
[図6]



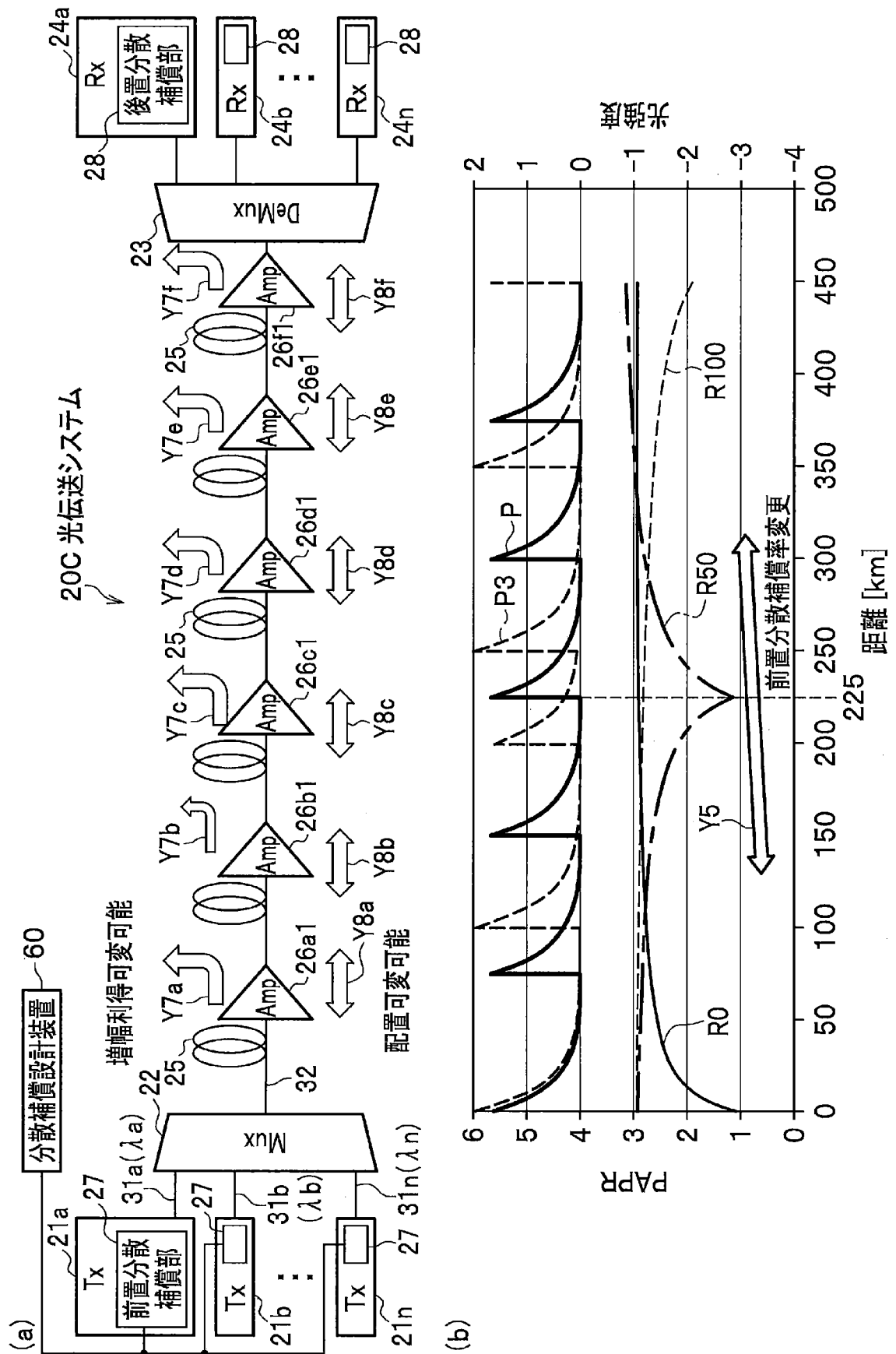
[図7]



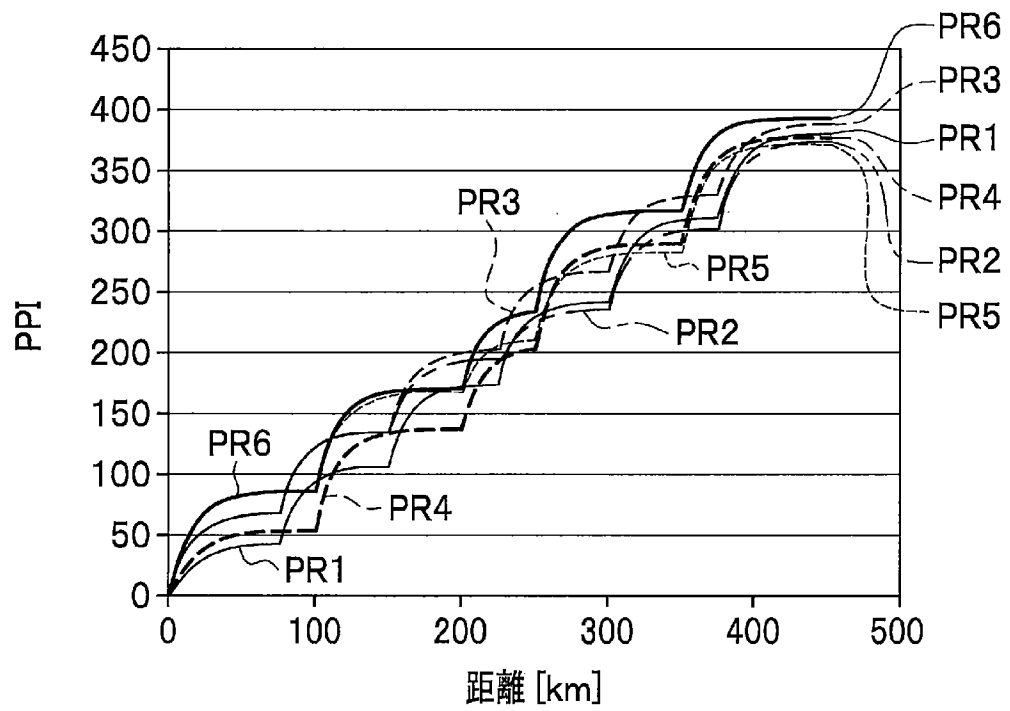
[図8]



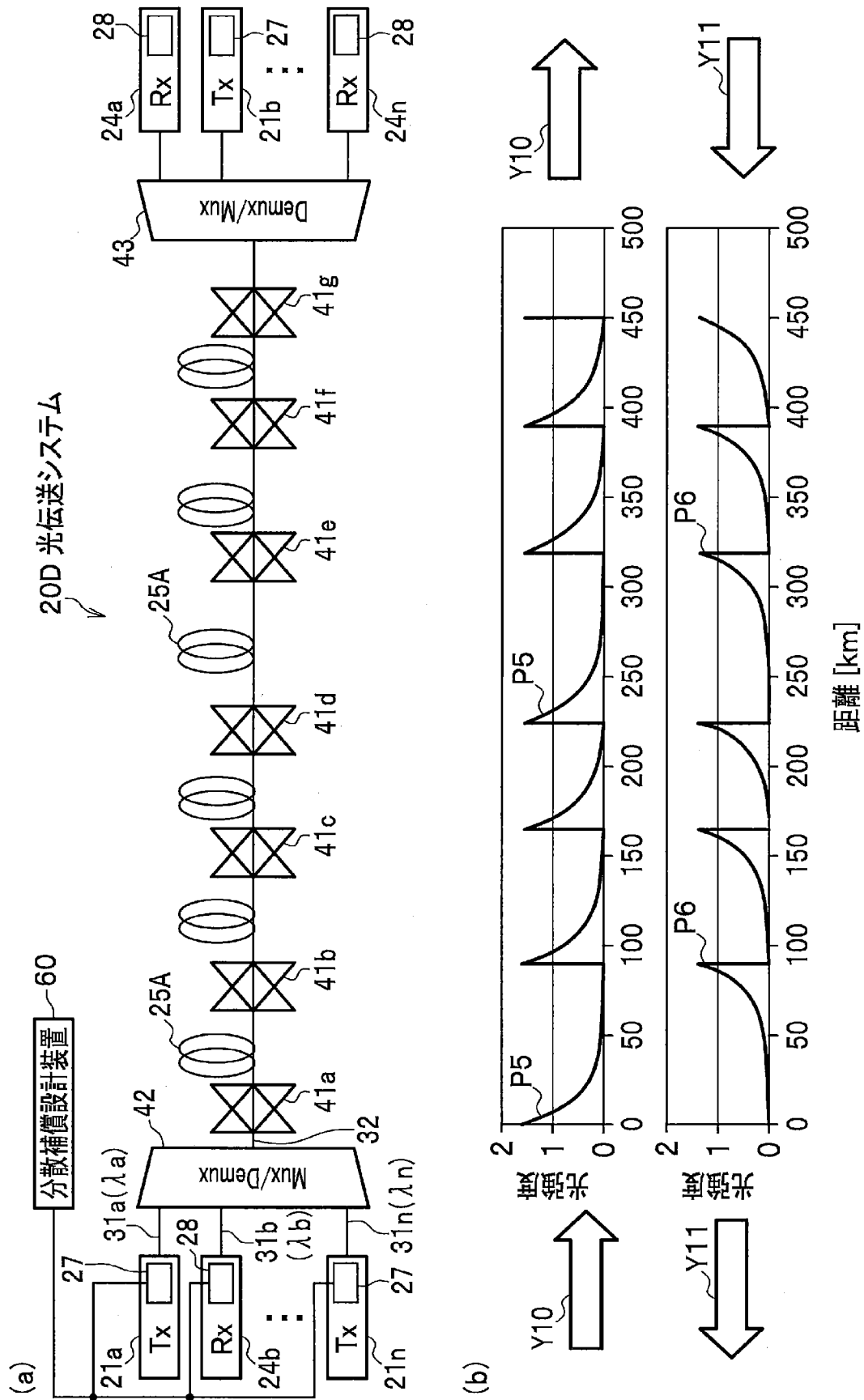
[図9]



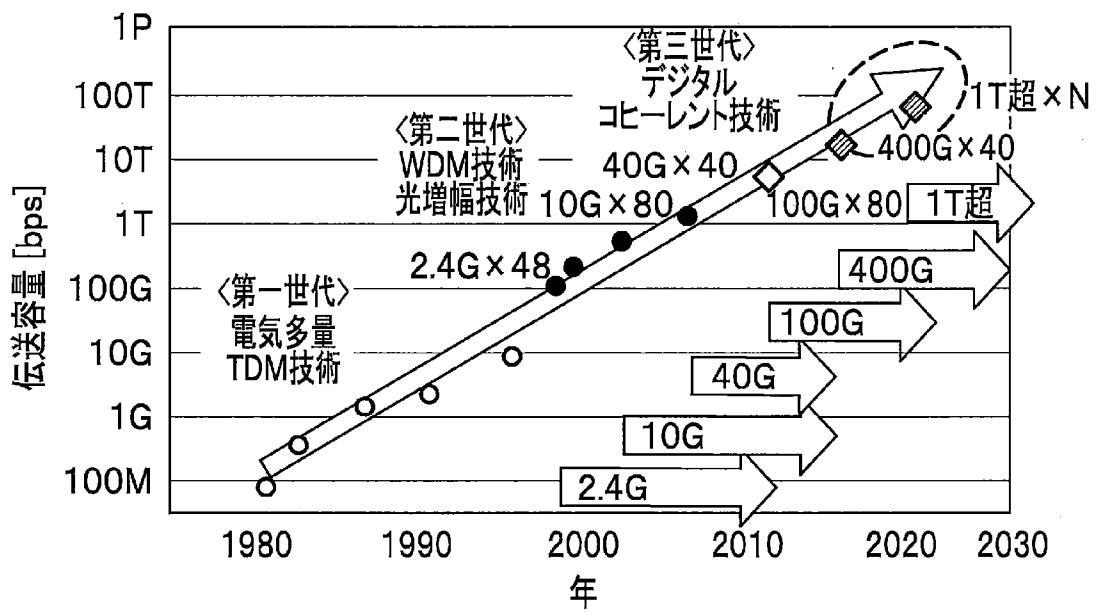
[図10]



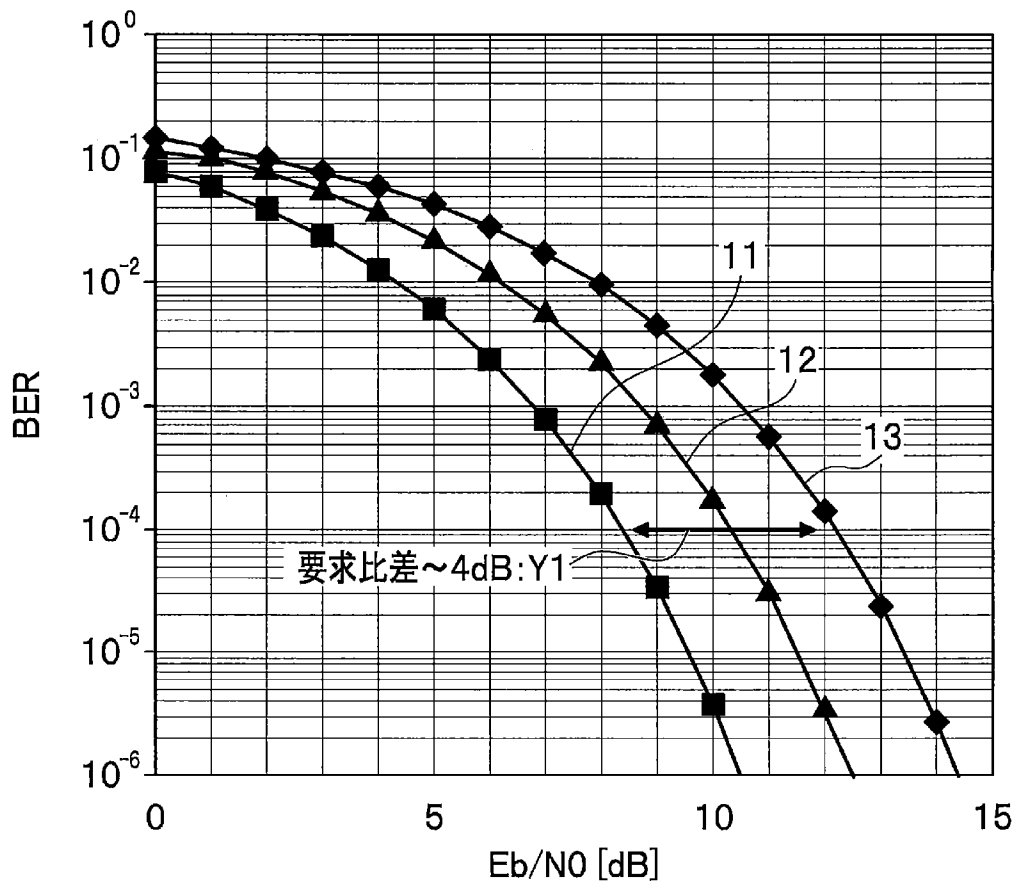
[図11]



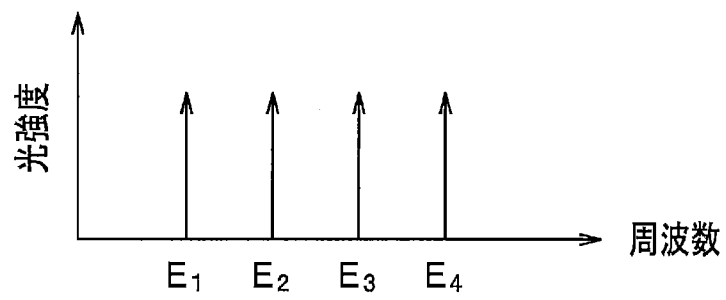
[図12]



[図13]



[図14]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/025463

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. H04B10/2513 (2013.01) i, H04B10/27 (2013.01) i

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)

Int.Cl. H04B10/2513, H04B10/27

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 1971-2019

Registered utility model specifications of Japan 1996-2019

Published registered utility model applications of Japan 1994-2019

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

IEEE Xplore

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	山口秀、他、前置分散補償による伝送特性改善の補償率依存性の伝送実験, 電子情報通信学会 2018 年総合大会講演論文集, 2018, p. 280, non-official translation (YAMAGUCHI, Shigeru et al., "Transmission experiment on compensation rate dependence of transmission performance improvement by pre-dispersion compensation", Proceedings of the 2018 IEICE General Conference)	1-8
A	山口秀、他、C+L band 伝送における前置分散補償による伝送特性改善, 電子情報通信学会 2017 年総合大会講演論文集, 2017, p. 269, non-official translation (YAMAGUCHI, Shigeru et al., "Transmission performance improvement by pre-dispersion compensation in C+L band transmission", Proceedings of the 2017 IEICE General Conference)	1-8

☒ 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
29 August 2019 (29.08.2019)Date of mailing of the international search report
10 September 2019 (10.09.2019)Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/025463

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	前田和佳子、他、前置分散補償による光位相雑音起因分散補償ペナルティの緩和、電子情報通信学会 2014 年総合大会講演論文集, 2014, p. 436, (MAEDA, Wakako, "Mitigation of Receiver-side Dispersion Compensation Penalty Caused by Optical Phase Noise Using Transmitter-side Pre-Dispersion Compensation", Proceedings of the 2014 IEICE General Conference)	1-8
A	JP 2003-298521 A (TYCO TELECOMMUNICATIONS (US) INC.) 17 October 2003 & US 2004/0208605 A1	1-8
A	JP 2004-128530 A (OKI ELECTRIC INDUSTRY CO., LTD.) 22 April 2004 & US 2004/0062555 A1 & CN 1497892 A	1-8
A	JP 2007-228415 A (FUJITSU LTD.) 06 September 2007 & US 2007/0201790 A1	1-8
A	JP 2012-16009 A (TYCO ELECTRONICS SUBSEA COMMUNICATIONS LLC) 19 January 2012 & US 2011/0318019 A1 & CN 102315882 A	1-8
A	FRIGNAC, Y. et al., "Numerical optimization of pre- and in-line dispersion compensation in dispersion-managed systems at 40 Gbit/s, Optical Fiber Communication Conference and Exhibit", IEEE, 2002, pp. 612-613	1-8

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H04B10/2513(2013.01)i, H04B10/27(2013.01)i

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））

Int.Cl. H04B10/2513, H04B10/27

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

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019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）

IEEE Xplore

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	山口秀、他、前置分散補償による伝送特性改善の補償率依存性の伝送実験、電子情報通信学会2018年総合大会講演論文集、2018, p. 280	1-8
A	山口秀、他、C+L band 伝送における前置分散補償による伝送特性改善、電子情報通信学会2017年総合大会講演論文集、2017, p. 269	1-8

☒ 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。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「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矛盾するものではなく、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

29.08.2019

国際調査報告の発送日

10.09.2019

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

鴨川 学

5 K

6307

電話番号 03-3581-1101 内線 3556

C (続き) . 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	前田和佳子、他、前置分散補償による光位相雑音起因分散補償ペナルティの緩和、電子情報通信学会 2014 年総合大会講演論文集, 2014, p. 436	1-8
A	JP 2003-298521 A (タイコ テレコミュニケーションズ (ユーエス) インコーポレーテッド) 2003.10.17, & US 2004/0208605 A1	1-8
A	JP 2004-128530 A (沖電気工業株式会社) 2004.04.22, & US 2004/0062555 A1 & CN 1497892 A	1-8
A	JP 2007-228415 A (富士通株式会社) 2007.09.06, & US 2007/0201790 A1	1-8
A	JP 2012-16009 A (タイコ エレクトロニクス サブシー コミュニケーションズ エルエルシー) 2012.01.19, & US 2011/0318019 A1 & CN 102315882 A	1-8
A	FRIGNAC Y, et al., Numerical optimization of pre- and in-line dispersion compensation in dispersion-managed systems at 40 Gbit/s, Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, IEEE, 2002, pp.612-613	1-8