

(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6月18日(18.06.2020)



(10) 国際公開番号

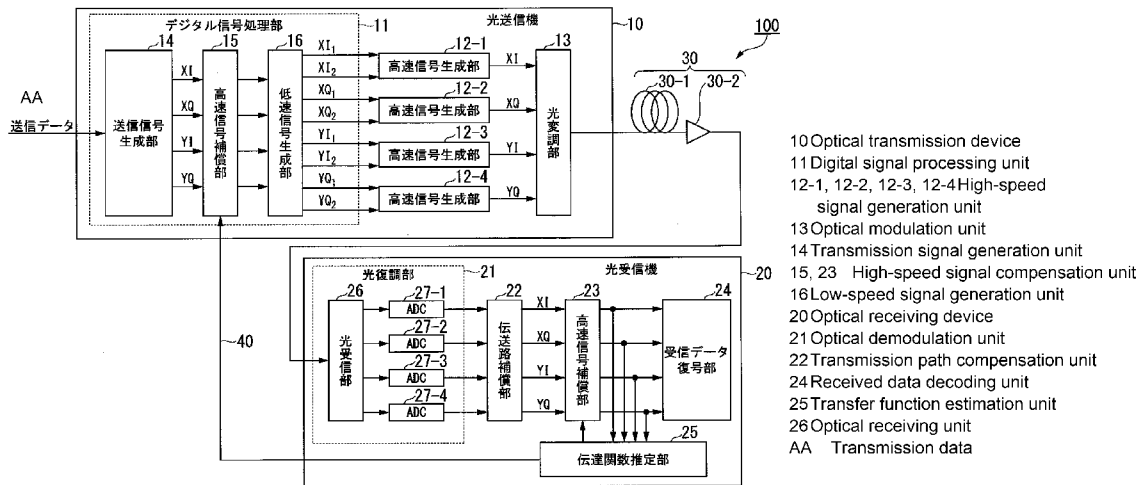
WO 2020/121901 A1

- (51) 国際特許分類:
H04B 10/516 (2013.01) H04L 27/26 (2006.01)
H04B 10/61 (2013.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2019/047309
- (22) 国際出願日: 2019年12月4日(04.12.2019)
- (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 2018-231943 2018年12月11日(11.12.2018) 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: 中村 政則 (NAKAMURA Masanori); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 濱岡 福太郎 (HAMAOKA Fukutaro); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 山崎 裕史 (YAMAZAKI Hiroshi); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 長谷 宗彦 (NAGATANI Munchiko); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 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9-11 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 宮本 裕 (MIYAMOTO

(54) Title: OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM, OPTICAL TRANSMISSION DEVICE, OPTICAL RECEIVING DEVICE, AND TRANSFER FUNCTION ESTIMATION METHOD

(54) 発明の名称: 光伝送システム、光送信機、光受信機及び伝達関数推定方法



(57) Abstract: Provided is an optical transmission system comprising an optical transmission device and an optical receiving device. The optical transmission device comprises: a low-speed signal generation unit which generates a plurality of low-speed signals on the basis of a transmission data series input signal and a signal in which the spectrum of the input signal is cyclically shifted; a high-speed signal generation unit which generates high-speed signals by digital-analog converting and compositing the plurality of low-speed signals; and an optical modulation unit which transmits to a transmission path an optical signal in which the high-speed signals are modulated. The optical receiving device comprises: a receiving unit which receives the optical signal from the optical path and outputs the high-speed signals obtained from the

Yutaka); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町 3 丁目
9-11 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 特許業務法人 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, 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))

received optical signal; an optical receiving device-side high-speed signal compensation unit with which the high-speed signals are compensated on the basis of the high-speed signals outputted by the receiving unit and a signal in which the spectra of the high-speed signals are cyclically shifted; and a received data decoding unit which restores binary information which is included in the optical signal transmitted by the optical transmission device by decoding the high-speed signals the compensation of which is carried out by the optical receiving device-side high-speed signal compensation unit.

(57) 要約: 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、光送信機は、送信データ系列の入力信号と、入力信号のスペクトルを巡回シフトした信号とに基づいて複数の低速信号を生成する低速信号生成部と、複数の低速信号をデジタルアナログ変換して、合成することにより高速信号を生成する高速信号生成部と、高速信号を変調した光信号を伝送路に送信する光変調部と、を備え、光受信機は、伝送路から光信号を受信し、受信する光信号から得られる高速信号を出力する受信部と、受信部が出力する高速信号と、高速信号のスペクトルを巡回シフトした信号とに基づいて高速信号を補償する光受信機側高速信号補償部と、光受信機側高速信号補償部により補償がなされた高速信号を復号することによって光送信機が送信した光信号に含まれるバイナリ情報を復元する受信データ復号部と、を備える。

明 細 書

発明の名称：

光伝送システム、光送信機、光受信機及び伝達関数推定方法

技術分野

[0001] 本発明は、光伝送システム、光送信機、光受信機及び伝達関数推定方法に関する。

背景技術

[0002] 光通信システムの基幹網において、近年の通信トラヒックの拡大と、400 Gbps (Gigabits per second) や1 Tbps (Terabits per second) のEthernet (登録商標)をはじめとするクライアント信号を収容する回線の容量増加により、1チャンネルあたりの伝送容量の拡大が求められている。現在の1チャンネルあたり100 Gbpsを有するシステムでは、変調速度が32 GBaud (Baud)であり、変調方式としてDP-QPSK (Dual Polarization-Quadrature Phase Shift Keying)を用いるデジタルコヒーレント光伝送方式が採用されている。

[0003] 1チャンネルあたりの伝送容量拡大に向け、次世代の400 Gbps、1 Tbps級の伝送では、変調速度の向上が検討されている。変調速度を向上させる上でDAC (Digital to Analog Converter)のアナログ帯域の制限が課題となる。DACのアナログ帯域を拡大する技術として、複数のデジタルアナログコンバータ (DAC) とアナログ多重部を用いて複数の低速信号をアナログ的に合成することによって高速信号を生成する技術が提案されている (例えば、非特許文献1～3参照)。このような技術では、アナログ的に信号を多重するため、アナログ回路の不完全性が、生成される高速信号の品質に大きな影響を与える。そのため、光送信機の不完全性の推定・補償技術が重要となる。

[0004] 上記のようなアナログ回路の不完全性を補償するための技術として、特許文献1及び非特許文献に示す技術が提案されている。

特許文献１に開示された技術では、光送信機又は光受信機において、上記の技術によって生成された高速信号を複数の低速信号に再分離することで、低速信号における伝達関数を推定し、推定した伝達関数を用いて伝達関数を更新する。

非特許文献４に開示された技術では、低速信号における伝達関数と、高速信号における伝達関数とを同時に補償可能なデジタルフィルタを用いている。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献１：特開２０１８－０４２０７３号公報

非特許文献

[0006] 非特許文献１：H. Yamazaki, M. Nagatani, S. Kanazawa, H. Nosaka, T. Hashimoto, A. Sano, and Y. Miyamoto, “Digital-Preprocessed Analog-Multiplexed DAC for Ultrawideband Multilevel Transmitter”, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 34, NO. 7, pp. 1579-1584, APRIL 1, 2016.

非特許文献２：X. Chen, S. Chandrasekhar, S. Randel, G. Raybon, A. Adamiecki, P. Pupalais, and P. J. Winzer, “All-Electronic 100-GHz Bandwidth Digital-to-Analog Converter Generating PAM Signals up to 190 GBaud”, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 35, NO. 3, pp. 411-417, FEBRUARY 1, 2017.

非特許文献３：F. Hamaoka, M. Nakamura, M. Nagatani, H. Wakita, H. Yamazaki, T. Kobayashi, H. Nosaka, and Y. Miyamoto, “Electrical spectrum synthesis technique using digital pre-processing and ultra-broadband electrical bandwidth doubler for high-speed optical transmitter”, Electronics Letters, Vol. 54, issue 24, pp. 1390-1391, November 29, 2018.

非特許文献４：H. Yamazaki, M. Nagatani, H. Wakita, Y. Ogiso, M. Nakamura, M. Ida, T. Hashimoto, H. Nosaka, and Y. Miyamoto, “Transmission of

f 400-Gbps Discrete Multi-tone Signal Using > 100-GHz-Bandwidth Analog Multiplexer and InP Mach-Zehnder Modulator”, Proceedings of ECOC 2018, Th3B: Post-deadline papers – Session 2, September 27, 2018.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0007] しかしながら、従来のようにアナログ多重部を用いて複数の低速信号をアナログ的に合成して高速信号を生成する場合、アナログ回路の不完全性により低速信号間のクロストーク成分が残留してしまう。これにより、信号品質が劣化してしまうという問題があった。
- [0008] 上記事情に鑑み、本発明は、信号品質の劣化を改善す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

- [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であって、前記光送信機は、送信データ系列の入力信号と、前記入力信号のスペクトルを巡回シフトした信号とに基づいて複数の低速信号を生成する低速信号生成部と、前記複数の低速信号をデジタルアナログ変換して、合成することにより高速信号を生成する高速信号生成部と、前記高速信号を変調した光信号を伝送路に送信する光変調部と、を備え、前記光受信機は、前記伝送路から前記光信号を受信し、受信する前記光信号から得られる前記高速信号を出力する受信部と、前記受信部が出力する前記高速信号と、前記高速信号のスペクトルを巡回シフトした信号とに基づいて前記高速信号を補償する光受信機側高速信号補償部と、前記光受信機側高速信号補償部により補償がなされた前記高速信号を復号することによって前記光送信機が送信した前記光信号に含まれるバイナリ情報を復元する受信データ復号部と、を備える光伝送システムである。
- [0010] 本発明の一態様は、光伝送システムであって、前記光送信機は、送信データ系列の入力信号と、前記入力信号のスペクトルを巡回シフトした信号とのそれぞれに対して伝達関数を乗算し、乗算結果を加算することにより前記入

力信号を補償する送信機側高速信号補償部をさらに備え、前記低速信号生成部は、前記送信機側高速信号補償部により補償がなされた前記入力信号から前記複数の低速信号を生成し、前記光受信機側高速信号補償部は、前記受信部が出力する前記高速信号と、前記高速信号のスペクトルを巡回シフトした信号とのそれぞれに対して伝達関数を乗算し、乗算結果を加算することにより前記高速信号を補償する。

[0011] 本発明の一態様は、光伝送システムであって、前記低速信号生成部は、送信データ系列の入力信号と、前記入力信号のスペクトルを巡回シフトした信号とのそれぞれに対して伝達関数を乗算し、乗算結果を加算することにより前記入力信号を補償するとともに、補償した前記入力信号から前記複数の低速信号を生成し、前記光受信機側高速信号補償部は、前記受信部が出力する前記高速信号と、前記高速信号のスペクトルを巡回シフトした信号とのそれぞれに対して伝達関数を乗算し、乗算結果を加算することにより前記高速信号を補償する。

[0012] 本発明の一態様は、光伝送システムであって、前記光受信機は、前記光受信機側高速信号補償部の出力信号と、参照信号との差分に基づいて、前記伝達関数を算出する伝達関数推定部をさらに備える。

[0013] 本発明の一態様は、光伝送システムであって、前記伝達関数推定部は、予め既知信号として定められている前記送信データ系列の一部を前記参照信号として前記伝達関数を算出するか、又は、前記光受信機側高速信号補償部の出力を硬判定した値を前記参照信号として前記伝達関数を算出する。

[0014] 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における光送信機であって、送信データ系列の入力信号と、前記入力信号のスペクトルを巡回シフトした信号とに基づいて複数の低速信号を生成する低速信号生成部と、前記複数の低速信号をデジタルアナログ変換して、合成することにより高速信号を生成する高速信号生成部と、前記高速信号を変調した光信号を伝送路に送信する光変調部と、を備える光送信機である。

[0015] 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にお

ける光受信機であって、前記光送信機から送信された光信号を伝送路を介して受信し、受信する前記光信号から得られる高速信号を出力する受信部と、前記受信部が出力する前記高速信号と、前記高速信号のスペクトルを巡回シフトした信号とに基づいて前記高速信号を補償する高速信号補償部と、前記光受信機側高速信号補償部により補償がなされた前記高速信号を復号することによって前記光送信機が送信した前記光信号に含まれるバイナリ情報を復元する受信データ復号部と、を備える光受信機である。

[0016] 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における伝達関数推定方法であって、前記光送信機が、送信データ系列の入力信号と、前記入力信号のスペクトルを巡回シフトした信号とに基づいて複数の低速信号を生成する低速信号生成ステップと、前記複数の低速信号をデジタルアナログ変換して、合成することにより高速信号を生成する高速信号生成ステップと、前記高速信号を変調した光信号を伝送路に送信する光変調ステップと、を有し、前記光受信機が、前記伝送路から前記光信号を受信し、受信する前記光信号から得られる前記高速信号を出力する受信ステップと、前記受信ステップにおいて出力される前記高速信号と、前記高速信号のスペクトルを巡回シフトした信号とに基づいて前記高速信号を補償する光受信機側高速信号補償ステップと、前記光受信機側高速信号補償ステップにより補償がなされた前記高速信号を復号することによって前記光送信機が送信した前記光信号に含まれるバイナリ情報を復元する受信データ復号ステップと、を有する伝達関数推定方法である。

発明の効果

[0017] 本発明により、信号品質の劣化を改善することが可能となる。

図面の簡単な説明

[0018] [図1]本発明における光伝送システムの構成を示すブロック図である。

[図2]送信信号生成部の内部構成を示す図である。

[図3]高速信号補償部の内部構成を示す図である。

[図4]本実施形態の低速信号生成部における低速信号の生成の一例を示す図で

ある。

[図5]高速信号生成部の内部構成を示す図である。

[図6]アナログ多重部の内部構成を示す図である。

[図7]高速信号補償部の内部構成を示す図である。

[図8]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9]本発明により得られる効果を説明するための図である。

[図10]本発明の技術を非特許文献1に示すアナログ多重方式に適用した場合の低速信号生成部における低速信号の生成の一例を示す図である。

[図11]本発明の技術を非特許文献1に示すアナログ多重方式に適用した場合のアナログ多重部の内部構成を示す図である。

[図12]本発明の技術を非特許文献4に示すアナログ多重方式に適用した場合の低速信号生成部における低速信号の生成の一例を示す図である。

[図13]本発明の技術を非特許文献4に示すアナログ多重方式に適用した場合のアナログ多重部の内部構成を示す図である。

発明を実施するための形態

[0019] 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。

図1は、本発明における光伝送システム100の構成を示すブロック図である。

光伝送システム100は、光送信機10及び光受信機20を備える。光送信機10と光受信機20は、伝送路30を介して接続される。また、光送信機10と光受信機20は、通信回線40を介して接続される。

[0020] 伝送路30は、光送信機10から送信された光信号を光受信機20に伝送する経路である。伝送路30は、光ファイバ30-1と光増幅器30-2とで構成される。光送信機10から出力される光信号は、光ファイバ30-1により伝送され、光増幅器30-2により増幅されて、光受信機20が受信する。

[0021] 通信回線5は、光受信機20によって算出された伝達関数が光送信機10に送信される際に用いられる。通信回線5は、例えば、コミュニケーション

チャネルやNE-Ops (Network Element Operation System) やNW-Ops (Network Operation System) 等の制御チャネルである。

[0022] 次に、光送信機10及び光受信機20の具体的な構成について説明する。

光送信機10は、デジタル信号処理部11、高速信号生成部12及び光変調部13を備える。なお、以下の記載において、低速信号及び高速信号の用語における低速と高速の意味は、アナログ帯域の帯域幅の狭さと広さを示す。例えば、高速信号の帯域幅が f_c [GHz]である場合、低速信号の帯域幅は f_c [GHz]より小さい値となる。本実施形態では、高速信号 $\div$ 低速信号 $\times N$ (N は整数でDAC (Digital-to-Analog Converter) の個数) 程度の帯域幅とする。

[0023] デジタル信号処理部11は、外部から供給されるバイナリ情報である送信データ系列に対してデジタル信号処理を行う。デジタル信号処理部11は、送信信号生成部14、高速信号補償部15及び低速信号生成部16を備える。

送信信号生成部14は、高速信号である変調信号系列 (X_I , X_Q , Y_I , Y_Q) を生成する。具体的には、送信信号生成部14は、図2に示す内部構成を有しており、ビットマッピング部141及び波形整形部142を備える。ビットマッピング部141は、送信データ系列に対して、QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) や16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 等のシンボル点に対する送信ビットの割り当てを行い、高速信号である変調信号系列 (X_I , X_Q , Y_I , Y_Q) を生成する。

[0024] 波形整形部142は、ビットマッピング部141が出力する変調信号系列 (X_I , X_Q , Y_I , Y_Q) それぞれに対してフィルタリング処理を行う。フィルタリング処理には、Raised Cosine FilterやRoot Raised Cosine Filter等のフィルタが用いられる。なお、波形整形部142において、伝送路での波形歪を補償する前置波長分散補償や前置非線形光学効果補償等の任意の信号処理を行うようにしてもよい。

[0025] 高速信号補償部15は、波形整形がなされた変調信号系列 (X_I , X_Q ,

Y I, Y Q) と、光受信機 20 から得られる伝達関数とに基づいて周波数特性の補償を行う。ここで、伝達関数に基づく周波数特性の補償の方式としては、任意の方式を適用することができ、例えば、FIR (Finite Impulse Response) フィルタや IIR (Infinite Impulse Response) フィルタ、離散フーリエ変換を用いた周波数領域での等化器等を使ったデジタル信号処理方式、または、位相器や遅延線等のアナログフィルタを用いたアナログ方式が適用される。高速信号補償部 15 は、波形整形がなされた変調信号系列 (X I, X Q, Y I, Y Q) 毎に周波数特性の補償を行う。なお、高速信号補償部 15 において、伝送路での波形歪を補償する前置波長分散補償や前置非線形光学効果補償等の任意の信号処理を行うようにしてもよい。

[0026] 具体的には、高速信号補償部 15 は、図 3 に示す内部構成を有しており、複数の周波数シフト部 151-1 ~ 151-3 及び高速信号等化部 152 を備える。

なお、図 3 では、一例として波形整形部 142 が出力する 1 レーンの高速信号 (X I) を例に示して説明するが、高速信号補償部 15 は波形整形部 142 が出力する 4 レーンの高速信号 (X I, X Q, Y I, Y Q) それぞれに対して同様の処理を行う。

[0027] 周波数シフト部 151-1 ~ 151-3 は、入力された変調信号系列のスペクトルを周波数的に巡回シフトする。具体的には、周波数シフト部 151-1 は、入力された変調信号系列のスペクトルを左に 1 つ分シフトする。周波数シフト部 151-2 は、入力された変調信号系列のスペクトルを左に 2 つ分シフトする。周波数シフト部 151-3 は、入力された変調信号系列のスペクトルを左に 3 つ分シフトする。帯域間クロストークが生じる場合には、分割されたスペクトルが各帯域に存在していることで補償が可能となる。そのため巡回シフトの個数は、分割されるスペクトルの個数に依存する。図 3 では、分割数 $N = 2$ の場合を記載しており、巡回シフトの個数は、 $M = N \times 2$ で表される。

[0028] 本発明は、分割後のスペクトルを周波数軸上で並びかえて、分割後の各ス

ペクトル成分が、全ての周波数帯域に出現するように処理を行う。この処理の1つの実現方法が、周波数シフト部151-1~151-3が行う「巡回シフト」である。

[0029] 図3に示すように、入力された変調信号系列の高速信号を $R_0(f)$ とし、周波数シフト部151-1により高速信号 $R_0(f)$ のスペクトルがシフトされた高速信号を $R_1(f)$ とし、周波数シフト部151-2により高速信号 $R_0(f)$ のスペクトルがシフトされた高速信号を $R_2(f)$ とし、周波数シフト部151-3により高速信号 $R_0(f)$ のスペクトルがシフトされた高速信号を $R_3(f)$ とする。

[0030] 高速信号等化部152は、入力された複数の高速信号($R_0(f)$, $R_1(f)$, $R_2(f)$, $R_3(f)$)それぞれに対して伝達関数($A_0(f)$, $A_1(f)$, $A_2(f)$, $A_3(f)$)を乗算し、乗算結果を加算して高速信号を補償する。高速信号等化部152は、複数の乗算器153-1~153-4及び加算器154を備える。

[0031] 乗算器153-1~153-4は、入力された高速信号に対して伝達関数を乗算する。

具体的には、乗算器153-1には波形整形部142から出力された変調信号系列の高速信号 $R_0(f)$ がそのまま入力され、乗算器153-2には周波数シフト部151-1によって周波数的に巡回シフトされた高速信号 $R_1(f)$ が入力され、乗算器153-3には周波数シフト部151-2によって周波数的に巡回シフトされた高速信号 $R_2(f)$ が入力され、乗算器153-4には周波数シフト部151-3によって周波数的に巡回シフトされた高速信号 $R_3(f)$ が入力される。また、乗算器153-1~153-4に入力される伝達関数 $A_0(f)$, $A_1(f)$, $A_2(f)$, $A_3(f)$ は、光受信機20によって算出される。

[0032] 乗算器153-1は、高速信号 $R_0(f)$ と、伝達関数 $A_0(f)$ とを乗算し、乗算結果を加算器154に出力する。乗算器153-2は、高速信号 $R_1(f)$ と、伝達関数 $A_1(f)$ とを乗算し、乗算結果を加算器154に出力す

る。乗算器 153-3 は、高速信号 $R_2(f)$ と、伝達関数 $A_2(f)$ とを乗算し、乗算結果を加算器 154 に出力する。

乗算器 153-4 は、高速信号 $R_3(f)$ と、伝達関数 $A_3(f)$ とを乗算し、乗算結果を加算器 154 に出力する。

[0033] 加算器 154 は、乗算器 153-1 ~ 153-4 それぞれから出力された乗算結果を加算する。これにより、高速信号 $S(f)$ が生成される。加算器 154 は、生成した高速信号 $S(f)$ を低速信号生成部 16 に出力する。なお、高速信号 $S(f)$ は以下の式 (1) のように表される。

[0034] [数1]

$$S(f) = (A_0(f) \ A_1(f) \ A_2(f) \ A_3(f)) \begin{pmatrix} R_0(f) \\ R_1(f) \\ R_2(f) \\ R_3(f) \end{pmatrix} \quad \text{式 (1)}$$

[0035] 上述したように、高速信号補償部 15 は、入力した変調信号系列と、変調信号系列を周波数シフトした信号に対してそれぞれ伝達関数を畳み込み演算を行い、畳み込み演算結果を合計した信号を低速信号生成部 16 に出力する。

[0036] 低速信号生成部 16 は、高速信号補償部 15 から出力された高速信号 $S(f)$ を複数の低速信号に分解して高速信号生成部 12-1 ~ 12-4 に出力する。具体的には、低速信号生成部 16 は、出力する低速信号が高速信号生成部 12-1 ~ 12-4 により合成された際に、所望の信号が生成されるように信号処理を行って低速信号を生成する。低速信号の生成の手法としては、例えば、高速信号補償部 15 から出力された高速信号 $S(f)$ を周波数領域で分割し、高周波成分を折り返し、低周波成分と高周波成分を加算した信号と、低周波成分から高周波成分を減算した信号とをそれぞれ低速信号として生成する。なお、低速信号を生成する手法は、上記の手法に限られない。

[0037] 低速信号生成部 16 は、高速信号 (X_I , X_Q , Y_I , Y_Q) の 4 つのレーン毎に、高速信号から複数の低速信号を生成する機能を有する。例えば、

低速信号生成部 16 は、高速信号 (X_1) から複数の低速信号 (X_{11} , X_{12}) を生成する。また、例えば、低速信号生成部 16 は、高速信号 (X_Q) から複数の低速信号 (X_{Q1} , X_{Q2}) を生成する。また、例えば、低速信号生成部 16 は、高速信号 (Y_1) から複数の低速信号 (Y_{11} , Y_{12}) を生成する。また、例えば、低速信号生成部 16 は、高速信号 (Y_Q) から複数の低速信号 (Y_{Q1} , Y_{Q2}) を生成する。また、上記の低速信号生成部 16 が行う処理は、高速信号補償部 15 に入力される伝達関数 $A_0 \sim A_M$ (M は 1 以上の整数) の係数を用いることで、高速信号の補償と同時に実施しても良い。すなわち、高速信号補償部 15 と低速信号生成部 16 が 1 つの機能部として構成されてもよい。このように構成される場合、低速信号生成部 16 は、高速信号補償部 15 が備える機能を有する。すなわち、低速信号生成部 16 は、送信データ系列の入力信号と、入力信号のスペクトルを巡回シフトした信号とのそれぞれに対して伝達関数を乗算し、乗算結果を加算することにより入力信号を補償する。

[0038] 図 4 は、本実施形態の低速信号生成部 16 における低速信号の生成の一例を示す図である。

図 4 (A) は低速信号生成部 16 に入力された高速信号 $S(f)$ のスペクトルを表し、図 4 (B) は低速信号生成部 16 によって生成された第 1 の低速信号のスペクトルを表し、図 4 (C) は低速信号生成部 16 によって生成された第 2 の低速信号のスペクトルを表す。

第 1 の低速信号は、上述したように、低速信号生成部 16 が入力された高速信号 $S(f)$ を周波数領域で分割し、高周波成分をシフトして低周波成分と高周波成分を加算することによって生成される。第 2 の低速信号は、上述したように、低速信号生成部 16 が上述したように、入力された高速信号 $S(f)$ を周波数領域で分割し、高周波成分をシフトして低周波成分から高周波成分を減算することによって生成される。

[0039] 高速信号生成部 12-1 ~ 12-4 は、同一の内部構成を有しており、一例として、図 5 に、高速信号生成部 12-1 の内部構成を示す。高速信号生

成部12-1は、2つのDAC121-1及び122-1と、アナログ多重部123-1とを備える。DAC121-1及び122-1は、デジタル信号である第1の低速信号(X_{l1})及び第2の低速信号(X_{l2})をそれぞれアナログ信号に変換する。

[0040] アナログ多重部123-1は、DAC121-1及び122-1それぞれによって変換されたアナログ信号を所定の周波数のクロックにより変調し、変調後のアナログ信号を合成することによって高速信号を生成する。このように、2つのDAC121-1及び122-1を用いることで、単一のDACにより高速信号を生成する場合に対して、2つのDAC121-1及び122-1の各々に要求される帯域を大幅に低減することができる。

[0041] 図6は、アナログ多重部123-1の内部構成を示す図である。

アナログ多重部123-1は、高速スイッチング回路1231、高速スイッチング回路1232、位相遅延回路1233及び加算器1234を備える。

高速スイッチング回路1231は、入力端子としてch1p及びch1nを有する。ch1pには、DAC121-1から出力されたアナログ信号（低速信号）が入力され、ch1nには、DAC121-1から出力されたアナログ信号と極性を反転させたアナログ信号（低速信号）が入力される。高速スイッチング回路1231に入力されたアナログ信号は、所定の周波数（例えば、 $f_{UB}/2$ ）のクロックを出力するクロック生成器124によって生成されたクロックで変調される。変調後の第1の低速信号は加算器1234に入力される。

[0042] 高速スイッチング回路1232は、入力端子としてch2p及びch2nを有する。ch2pには、DAC122-1から出力されたアナログ信号（低速信号）が入力され、ch2nには、DAC122-1から出力されたアナログ信号と極性を反転させたアナログ信号（低速信号）が入力される。高速スイッチング回路1232に入力されたアナログ信号は、クロック生成器124によって生成されたクロックに対して $-\pi/2$ 分の位相遅延が与えられ

たクロックで変調される。変調後の第2の低速信号は加算器1234に入力される。

高速スイッチング回路1231及び高速スイッチング回路1232は、等価回路として、 $ch1$ 側には $\cos(wt)$ 、 $ch2$ 側には $\sin(wt)$ の乗算と表すことができる。

[0043] 位相遅延回路1233は、入力されたクロックに対して遅延を与える回路である。図6に示す例では、位相遅延回路1233は、入力されたクロックに対して $-\pi/2$ 分の位相遅延を与える。

[0044] 加算器1234は、高速スイッチング回路1231から出力された変調後の第1の低速信号と、高速スイッチング回路1232から出力された変調後の第2の低速信号とを加算する。変調後（アップコンバージョン後）の信号は加算され、アップコンバージョン後の第1及び第2の低速信号のスペクトルにおいて極性の反転したスペクトル成分は打ち消され、同じ極性のスペクトル成分だけが残し、高速信号が再構築される。

[0045] アナログデバイスに不完全性がある場合、上記の打消しが不完全になるため、高速信号のスペクトルを4つのサブバンドに分解して考えると、再構築されるスペクトルにおいてサブバンド間のクロストーク成分が残留してしまう。他のアナログ多重方式（例えば、非特許文献1でも、デバイスの不完全性により同様のクロストークが発生してしまう。また、高速スイッチング回路1231、1232にスプリアス（所望のクロック周波数でないところに存在する信号）がある場合、意図しない帯域に低速信号が変調されてしまい、サブバンド間にクロストークが発生する。本発明では、サブバンド間のクロストークをデジタル信号処理により補償する。スプリアスが存在せず、他のデバイス不完全性に起因したクロストークがある場合は巡回シフトの必要個数はM個となる。またスプリアスが存在する場合では、スプリアスの周波数だけ巡回シフトさせた信号を高速信号補償部15に追加することで、スプリアスによるサブバンド間のクロストークについても補償することが可能となる。この場合、巡回シフトの必要個数はMよりも多くなる。

[0046] 光変調部 13 は、高速信号を光信号に変調する。光変調部 13 は、偏波多重型マッハツェンダ型ベクトル変調器、ドライバアンプ、レーザモジュールを備える偏波多重 I Q 変調器である。また、光変調部 13 において、高速信号生成部 12-1 ~ 12-4 が出力する 4 レーンの高速信号 (X I, X Q, Y I, Y Q) に対して、各々のレーンに設置されるドライバアンプが増幅を行い、増幅した高速信号を偏波多重型マッハツェンダ型ベクトル変調器に変調信号として出力する。偏波多重型マッハツェンダ型ベクトル変調器は、当該変調信号に基づいてレーザモジュールからの光信号を変調し、変調した光信号を伝送路 30 に対して出力する。

[0047] 次に、光受信機 20 の構成について説明する。

光受信機 20 は、光復調部 21、伝送路補償部 22、高速信号補償部 23、受信データ復号部 24 及び伝達関数推定部 25 を備える。光復調部 21 は、光送信機 10 から送信された光信号を復調する。光復調部 21 は、光受信部 26 及び複数の ADC 27-1 ~ 27-4 を備える。

光受信部 26 は、内部にレーザモジュールを有しており、伝送路 30 を介して受信した光信号を、レーザモジュールからの局発光によりベースバンド信号に変換して電気信号として出力する。なお、光受信部 26 は直接検波により、伝送路 30 を介して受信した光信号を電気信号として出力してもよい。ADC 27-1 ~ 27-4 は、アナログの電気信号をデジタルの電気信号に変換して出力する。

[0048] 伝送路補償部 22 は、伝送路 30 において発生する波長分散、偏波変動、非線形光学効果による波形劣化を補償する。

高速信号補償部 23 は、伝送路補償部 22 により補償がなされた電気信号と、伝達関数推定部 25 から得られる伝達関数とに基づいて周波数特性の補償を行う。高速信号補償部 23 は、高速信号補償部 15 と同様の構成を有する。

[0049] 具体的には、高速信号補償部 23 は、図 7 に示す内部構成を有しており、複数の周波数シフト部 231-1 ~ 231-3 及び高速信号等化部 232 を

備える。

なお、図7では、一例として伝送路補償部22が出力する1レーンの高速信号(XI)を例に示して説明するが、高速信号補償部23は伝送路補償部22が出力する4レーンの高速信号(XI, XQ, YI, YQ)それぞれに対して同様の処理を行う。

[0050] 周波数シフト部231-1~231-3は、入力された変調信号系列のスペクトルを周波数的に巡回シフトする。具体的には、周波数シフト部231-1は、入力された変調信号系列のスペクトルを左に1つ分シフトする。周波数シフト部231-2は、入力された変調信号系列のスペクトルを左に2つ分シフトする。周波数シフト部231-3は、入力された変調信号系列のスペクトルを左に3つ分シフトする。

[0051] 図7に示すように、入力された変調信号系列の高速信号を $R'(f)$ とし、周波数シフト部231-1により高速信号 $R'(f)$ のスペクトルがシフトされた高速信号を $R'_1(f)$ とし、周波数シフト部231-2により高速信号 $R'(f)$ のスペクトルがシフトされた高速信号を $R'_2(f)$ とし、周波数シフト部151-3により高速信号 $R'(f)$ のスペクトルがシフトされた高速信号を $R'_3(f)$ とする。

[0052] 高速信号等化部232は、入力された複数の高速信号($R'(f)$, $R'_1(f)$, $R'_2(f)$, $R'_3(f)$)それぞれに対して伝達関数($A_0(f)$, $A_1(f)$, $A_2(f)$, $A_3(f)$)を乗算し、乗算結果を加算して高速信号を補償する。高速信号等化部232は、複数の乗算器233-1~233-4及び加算器234を備える。

[0053] 乗算器233-1~233-4は、入力された高速信号に対して伝達関数を乗算する。

具体的には、乗算器233-1には伝送路補償部22から出力された高速信号 $R'(f)$ がそのまま入力され、乗算器233-2には周波数シフト部231-1によって周波数的に巡回シフトされた高速信号 $R'_1(f)$ が入力され、乗算器233-3には周波数シフト部231-2によって周波数的に巡

回シフトされた高速信号 $R'_2(f)$ が入力され、乗算器 233-4 には周波数シフト部 231-3 によって周波数的に巡回シフトされた高速信号 $R'_3(f)$ が入力される。また、乗算器 233-1 ~ 233-4 に入力される伝達関数 $A_0(f)$, $A_1(f)$, $A_2(f)$, $A_3(f)$ は、光受信機 20 によって算出される。

[0054] 乗算器 233-1 は、高速信号 $R'_0(f)$ と、伝達関数 $A_0(f)$ とを乗算し、乗算結果を加算器 234 に出力する。乗算器 233-2 は、高速信号 $R'_1(f)$ と、伝達関数 $A_1(f)$ とを乗算し、乗算結果を加算器 234 に出力する。乗算器 233-3 は、高速信号 $R'_2(f)$ と、伝達関数 $A_2(f)$ とを乗算し、乗算結果を加算器 234 に出力する。乗算器 233-4 は、高速信号 $R'_3(f)$ と、伝達関数 $A_3(f)$ とを乗算し、乗算結果を加算器 234 に出力する。

[0055] 加算器 234 は、乗算器 233-1 ~ 233-4 それぞれから出力された乗算結果を加算する。これにより、高速信号 $S'(f)$ が生成される。加算器 234 は、生成した高速信号 $S'(f)$ を受信データ復号部 24 及び伝達関数推定部 25 に出力する。なお、高速信号 $S'(f)$ は以下の式 (2) のように表される。

[0056] [数2]

$$S'(f) = (A_0(f) \ A_1(f) \ A_2(f) \ A_3(f)) \begin{pmatrix} R'_0(f) \\ R'_1(f) \\ R'_2(f) \\ R'_3(f) \end{pmatrix} \quad \text{式 (2)}$$

[0057] 受信データ復号部 24 は、高速信号補償部 23 が出力する高速信号 (X_I , X_Q , Y_I , Y_Q) に対して誤り訂正符号の復号を行い、光送信機 10 が送信したバイナリ情報を復元する。

[0058] 伝達関数推定部 25 は、高速信号補償部 23 からの出力と、参照信号との誤差に基づいて、高速信号補償部 15 及び高速信号補償部 23 で用いる伝達関数を算出する。具体的には、伝達関数推定部 25 は、高速信号補償部 23

からの出力と、参照信号とを同期して周波数応答を算出する。ここで、周波数応答の算出手法としては、高速信号補償部 23 から出力される高速信号と、参照信号との誤差を最小化するようにデジタルフィルタのタップ係数を最適化する LMS (Least Mean Square) アルゴリズムや RLS (Recursive Least Square) アルゴリズムを用いる適用フィルタを利用する手法がある。また、これら以外の手法として、ZF (Zero-Forcing) 法や、MMSE (Minimum Mean Square Error) 法等を適用してもよい。また、参照信号としては、送信信号系列に含まれる既知信号、又は、高速信号補償部 23 の出力を硬判定した値が用いられてもよい。

[0059] 伝達関数推定部 25 は、高速信号 (X_I , X_Q , Y_I , Y_Q) の 4 つのレーン毎にそれぞれ伝達関数を算出する。

[0060] 図 8 は、光伝送システム 100 の処理の流れを示すシーケンス図である。

送信信号生成部 14 は、外部から供給されるバイナリ情報である送信データ系列に対して、変調を行うことによって高速信号である変調信号系列を生成する (ステップ S101)。送信信号生成部 14 は、生成した変調信号系列に対してフィルタリング処理を行うことによって波形を整形する (ステップ S102)。送信信号生成部 14 は、波形整形がなされた変調信号系列を高速信号補償部 15 に出力する。

[0061] 高速信号補償部 15 は、送信信号生成部 14 から出力された変調信号系列と、光受信機 20 から得られる伝達関数とに基づいて周波数特性の補償を行う (ステップ S103)。

高速信号補償部 15 は、周波数特性の補償を行った後の変調信号系列を低速信号生成部 16 に出力する。低速信号生成部 16 は、高速信号補償部 15 から出力された変調信号系列である高速信号から複数の低速信号 (第 1 の低速信号及び第 2 の低速信号) をレーン毎に生成する (ステップ S104)。

[0062] 低速信号生成部 16 は、変調信号系列 (X_I) から生成した第 1 の低速信号 (X_{I1}) 及び第 2 の低速信号 (X_{I2}) を高速信号生成部 12-1 に出力する。低速信号生成部 16 は、変調信号系列 (X_Q) から生成した第 1 の低

速信号 (XQ_1) 及び第2の低速信号 (XQ_2) を高速信号生成部12-2に出力する。低速信号生成部16は、変調信号系列 (YI) から生成した第1の低速信号 (YI_1) 及び第2の低速信号 (YI_2) を高速信号生成部12-3に出力する。低速信号生成部16は、変調信号系列 (YQ) から生成した第1の低速信号 (YQ_1) 及び第2の低速信号 (YQ_2) を高速信号生成部12-4に出力する。

[0063] 高速信号生成部12-1は、低速信号生成部16から出力された第1の低速信号 (XI_1) 及び第2の低速信号 (XI_2) をデジタル信号からアナログ信号に変換し、アナログ信号を合成することによって高速信号を生成する (ステップS105)。また、高速信号生成部12-2は、低速信号生成部16から出力された第1の低速信号 (XQ_1) 及び第2の低速信号 (XQ_2) をデジタル信号からアナログ信号に変換し、アナログ信号を合成することによって高速信号を生成する。また、高速信号生成部12-3は、低速信号生成部16から出力された第1の低速信号 (YI_1) 及び第2の低速信号 (YI_2) をデジタル信号からアナログ信号に変換し、アナログ信号を合成することによって高速信号を生成する。また、高速信号生成部12-4は、低速信号生成部16から出力された第1の低速信号 (YQ_1) 及び第2の低速信号 (YQ_2) をデジタル信号からアナログ信号に変換し、アナログ信号を合成することによって高速信号を生成する。高速信号生成部12-1~12-4は、生成した高速信号を光変調部13に出力する。

[0064] 光変調部13は、入力された高速信号を光信号に変調する (ステップS106)。光変調部13は、変調後の高速信号を、伝送路30を介して光受信機20に送信する (ステップS107)。

光受信機20の光復調部21は、光送信機10から送信された光信号を復調する (ステップS108)。光復調部21は、復調後の電気信号を伝送路補償部22に出力する。伝送路補償部22は、伝送路30において発生する波長分散、偏波変動、非線形光学効果による波形劣化を補償する (ステップS109)。

[0065] 高速信号補償部23は、伝送路補償部22から出力された信号と、伝達関数推定部25から得られる伝達関数とに基づいて周波数特性の補償を行う（ステップS110）。高速信号補償部23は、周波数特性の補償を行った後の高速信号を受信データ復号部24及び伝達関数推定部25に出力する。受信データ復号部24は、高速信号補償部23が出力する高速信号に対して誤り訂正符号の復号を行い、光送信機10が送信したバイナリ情報を復元する（ステップS111）。

[0066] 伝達関数推定部25は、高速信号補償部23からの出力と、参照信号との誤差に基づいて、高速信号補償部15及び高速信号補償部23で用いる伝達関数を算出する（ステップS112）。伝達関数推定部25は、算出した伝達関数を高速信号補償部15及び高速信号補償部23に出力する。例えば、伝達関数推定部25は、算出した伝達関数を、通信回線40を介して光送信機10の高速信号補償部15に送信する（ステップS113）。これにより、高速信号補償部15及び高速信号補償部23では、新たに得られた伝達関数を用いて高速信号を補償する。

[0067] 図9は、本発明により得られる効果を説明するための図である。

図9では、偏波多重120GBd-QPSKにおいて本発明の技術を適用する前と、適用した後の実験結果を示している。図9（A）は偏波多重120GBd-QPSKにおいて本発明の技術を適用する前の実験結果を表す図であり、図9（B）は本発明の技術を適用した後の実験結果を表す図である。

図9（A）及び図9（B）に示されるように、本発明の技術を適用した後では、本発明の技術を適用する前に比べて明らかに干渉による影響が低減されていることがわかる。

このように、本発明では、デバイス間の不完全性によって生じるサブバンド間のクロストーク成分を除去することができる。

[0068] 以上のように構成された光伝送システム100によれば、高速信号補償部23が出力する高速信号と、参照信号とを用いて伝達関数推定部25が伝達

関数を算出する。高速信号補償部 15 は、算出された伝達関数に基づいて、送信信号生成部 14 が出力する高速信号 (X_I , X_Q , Y_I , Y_Q) を予め補償する演算を行う。また、高速信号補償部 23 は、算出された伝達関数に基づいて、送信信号生成部 14 が出力する高速信号 (X_I , X_Q , Y_I , Y_Q) に対して補償する演算を行う。これにより、光送信機 10 の高速信号生成部 12-1 ~ 12-4 及び光変調部 13 において生じる低速信号間や高速信号間の周波数特性差やアナログデバイスの不完全性を補償する伝達関数を算出することができる。したがって、算出した伝達関数による補償を行うことで信号品質の劣化を改善することが可能となる。

[0069] また、光伝送システム 100 では、高速信号補償部 15 における周波数シフト部 151-1 ~ 151-3 や、高速信号補償部 23 における周波数シフト部 231-1 ~ 231-3 により、分割したスペクトルを並び替える。これにより、デバイスの不完全性等によって生じた帯域間のクロストーク成分を回収することが可能になる。

[0070] <変形例>

本実施形態では、偏波多重信号を対象としているが、単一偏波信号でもよい。また、上記の実施形態の構成では、IQ 変調信号を対象としているが、強度変調信号でもよく、この場合、光変調部 13 は、前述した偏波多重型マッハツェンダ型ベクトル変調器ではなく、強度変調器タイプのものや、レーザモジュールに直接変調光源を用いるものが適用される。

本実施形態では、ビットマッピング部 141 が割り当てるシンボル点として、QPSK や 16QAM のシンボル点を適用しているが、これら以外の変調フォーマットを適用してもよい。

アナログ多重部 123 のクロックにスプリアスが存在する場合は、図 3 の構成に周波数シフト部 151 をスプリアスの周波数に合わせて追加することで、スプリアスによるサブバンド間のクロストークも補償することが可能となる。

[0071] 本実施形態では、本発明の技術を、非特許文献 3 に示すアナログ多重方式

(AMUX (Analogue Multiplexer)) に適用した場合を例に説明したが、本発明はこれに限られない。例えば、本発明の技術を、非特許文献 1 に示すアナログ多重方式 (帯域ダブラ (type 1)) に適用してもよいし、非特許文献 4 に示すアナログ多重方式 (帯域ダブラ (type 2)) に適用してもよい。以下、本発明の技術を他のアナログ多重方式に適用した場合の構成について具体的に説明する。

[0072] まず、図 10 及び図 11 を用いて、本発明の技術を非特許文献 1 に示すアナログ多重方式 (帯域ダブラ (type 1)) に適用した場合について説明する。

図 10 は、本発明の技術を非特許文献 1 に示すアナログ多重方式に適用した場合の低速信号生成部 16 における低速信号の生成の一例を示す図である。

図 10 (A) は低速信号生成部 16 に入力された高速信号 $S(f)$ のスペクトルを表し、図 10 (B) は低速信号生成部 16 によって生成された第 1 の低速信号のスペクトルを表し、図 10 (C) は低速信号生成部 16 によって生成された第 2 の低速信号のスペクトルを表す。低速信号生成部 16 は、高速信号からスペクトルを周波数的にシフトして加算した第 1 の低速信号と、高速信号からスペクトルを周波数的にシフトして減算した第 2 の低速信号とを生成する。

[0073] 高速信号生成部 12-1 におけるアナログ多重部 123-1 の構成は、図 11 に示すように図 6 のアナログ多重部 123-1 と異なる。図 11 は、本発明の技術を非特許文献 1 に示すアナログ多重方式に適用した場合のアナログ多重部 123a-1 の内部構成を示す図である。なお、図 11 では、アナログ多重部 123a-1 の構成を例に説明するが、アナログ多重部 123a-2 ~ 123a-4 も同様の構成を備える。

[0074] アナログ多重部 123a-1 は、高速スイッチング回路 1235 を備える。

高速スイッチング回路 1235 は、入力端子として $ch1$ 及び $ch2$ を有

する。c h 1 には、D A C 1 2 1 - 1 から出力されたアナログ信号（低速信号）が入力され、c h 2 には、D A C 1 2 2 - 1 から出力されたアナログ信号（低速信号）が入力される。高速スイッチング回路 1 2 3 5 に入力されたアナログ信号は、所定の周波数（例えば、 f_{UB} ）のクロックを出力するクロック生成器 1 2 6 によって生成されたクロックで変調される。高速スイッチング 1 2 3 5 は、等価回路として、c h 1 側には $1 + 1/r \times \cos(wt)$ 、c h 2 側には $1 - 1/r \times \cos(wt)$ の乗算と表すことができる。

[0075] 変調後（アップコンバージョン後）の信号は加算され、アップコンバージョン後の第 1 及び第 2 の低速信号のスペクトルにおいて極性の反転したスペクトル成分は打ち消され、同じ極性のスペクトル成分だけが残し、高速信号が再構築される。

また、合成後に生じる帯域外のスペクトルは電気または光アナログフィルタで除去してもよい。デバイスに不完全性がある場合、上記の打消しが不完全になるため、高速信号のスペクトルを 4 つのサブバンドに分解して考えると、再構築されるスペクトルにおいてサブバンド間のクロストーク成分が残留しまう。本発明では、サブバンド間のクロストークを高速信号補償部 1 5 や高速信号補償部 2 3 で、分割したスペクトルを並び替えることにより除去する。

[0076] 次に、図 1 2 及び図 1 3 を用いて、本発明の技術を非特許文献 4 に示すアナログ多重方式（帯域ダブル（type 2））に適用した場合について説明する。

図 1 2 は、本発明の技術を非特許文献 4 に示すアナログ多重方式に適用した場合の低速信号生成部 1 6 における低速信号の生成の一例を示す図である。

図 1 2 （A）は低速信号生成部 1 6 に入力された高速信号 $S(f)$ のスペクトルを表し、図 1 2 （B）は低速信号生成部 1 6 によって生成された第 1 の低速信号のスペクトルを表し、図 1 2 （C）は低速信号生成部 1 6 によって生成された第 2 の低速信号のスペクトルを表す。低速信号生成部 1 6 は、

高速信号からスペクトルを周波数的にシフトして加算した第1の低速信号と、高速信号からスペクトルを周波数的にシフトして減算した第2の低速信号とを生成する。

[0077] 高速信号生成部12-1におけるアナログ多重部123-1の構成は、図13に示すように図6のアナログ多重部123-1と異なる。図13は、本発明の技術を非特許文献4に示すアナログ多重方式に適用した場合のアナログ多重部123a-1の内部構成を示す図である。なお、図13では、アナログ多重部123a-1の構成を例に説明するが、アナログ多重部123a-2～123a-4も同様の構成を備える。

[0078] アナログ多重部123a-1の内部構成は、図11に示すアナログ多重部123a-1と同様である。図11に示すアナログ多重部123a-1と異なる点は、高速スイッチング回路1235に入力されたアナログ信号が、所定の周波数（例えば、 $f_{UB}/2$ ）のクロックを出力するクロック生成器124によって生成されたクロックである点である。すなわち、高速スイッチング回路1235に入力されたアナログ信号は、所定の周波数（例えば、 $f_{UB}/2$ ）のクロックを出力するクロック生成器124によって生成されたクロックで変調される。高速スイッチング1235は、等価回路として、ch1側には $1 + 1/r \times \cos(wt)$ 、ch2側には $1 - 1/r \times \cos(wt)$ の乗算と表すことができる。

[0079] 変調後（アップコンバージョン後）の信号は加算され、アップコンバージョン後の第1及び第2の低速信号のスペクトルにおいて極性の反転したスペクトル成分は打ち消され、同じ極性のスペクトル成分だけが残し、高速信号が再構築される。

また、合成後に生じる帯域外のスペクトルは電気または光アナログフィルタで除去してもよい。デバイスに不完全性がある場合、上記の打消しが不完全になるため、高速信号のスペクトルを4つのサブバンドに分解して考えると、再構築されるスペクトルにおいてサブバンド間のクロストーク成分が残ってしまう。本発明では、サブバンド間のクロストークを高速信号補償部15

や高速信号補償部 23 で、分割したスペクトルを並び替えることにより除去する。

[0080] 上述した光送信機 10 及び光受信機 20 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。

[0081] 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。

[0082] 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。

符号の説明

[0083] 10…光送信機, 20…光受信機, 11…デジタル信号処理部, 12-1~12-4…高速信号生成部, 121…DAC, 122…DAC,

1 2 3 - 1 ~ 1 2 3 - 4, 1 2 3 a - 1 ~ 1 2 3 a - 4 ... アナログ多重部
, 1 2 3 1、1 2 3 2、1 2 3 5 ... 高速スイッチング回路, 1 2 3 3 ...
位相遅延回路, 1 2 3 4 ... 加算器, 1 3 ... 光変調部, 1 4 ... 送信信号
生成部, 1 4 1 ... ビットマッピング部, 1 4 2 ... 波形整形部, 1 5 ...
高速信号補償部, 1 5 1 - 1 ~ 1 5 1 - 3 ... 周波数シフト部, 1 5 2 ...
高速信号等化部, 1 5 3 - 1 ~ 1 5 3 - 4 ... 乗算器, 1 5 4 ... 加算器,
1 6 ... 低速信号生成部, 2 1 ... 光復調部, 2 2 ... 伝送路補償部, 2
3 ... 高速信号補償部, 2 3 1 - 1 ~ 2 3 1 - 3 ... 周波数シフト部, 2 3
2 ... 高速信号等化部, 2 3 3 - 1 ~ 2 3 3 - 4 ... 乗算器, 2 3 4 ... 加算
器, 2 4 ... 受信データ復調部, 2 5 ... 伝達関数推定部, 2 6 ... 光受信
部, 2 7 - 1 ~ 2 7 - 4 ... A D C

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、
送信データ系列の入力信号と、前記入力信号のスペクトルを巡回シフトした信号とに基づいて複数の低速信号を生成する低速信号生成部と、
前記複数の低速信号をデジタルアナログ変換して、合成することにより高速信号を生成する高速信号生成部と、
前記高速信号を変調した光信号を伝送路に送信する光変調部と、
を備え、
前記光受信機は、
前記伝送路から前記光信号を受信し、受信する前記光信号から得られる前記高速信号を出力する受信部と、
前記受信部が出力する前記高速信号と、前記高速信号のスペクトルを巡回シフトした信号とに基づいて前記高速信号を補償する光受信機側高速信号補償部と、
前記光受信機側高速信号補償部により補償がなされた前記高速信号を復号することによって前記光送信機が送信した前記光信号に含まれるバイナリ情報を復元する受信データ復号部と、
を備える光伝送システム。

[請求項2]

前記光送信機は、送信データ系列の入力信号と、前記入力信号のスペクトルを巡回シフトした信号とのそれぞれに対して伝達関数を乗算し、乗算結果を加算することにより前記入力信号を補償する送信機側高速信号補償部をさらに備え、
前記低速信号生成部は、前記送信機側高速信号補償部により補償がなされた前記入力信号から前記複数の低速信号を生成し、
前記光受信機側高速信号補償部は、前記受信部が出力する前記高速信号と、前記高速信号のスペクトルを巡回シフトした信号とのそれぞれ

れに対して伝達関数を乗算し、乗算結果を加算することにより前記高速信号を補償する、請求項 1 に記載の光伝送システム。

[請求項3] 前記低速信号生成部は、送信データ系列の入力信号と、前記入力信号のスペクトルを巡回シフトした信号とのそれぞれに対して伝達関数を乗算し、乗算結果を加算することにより前記入力信号を補償するとともに、補償した前記入力信号から前記複数の低速信号を生成し、

前記光受信機側高速信号補償部は、前記受信部が出力する前記高速信号と、前記高速信号のスペクトルを巡回シフトした信号とのそれぞれに対して伝達関数を乗算し、乗算結果を加算することにより前記高速信号を補償する、請求項 1 に記載の光伝送システム。

[請求項4] 前記光受信機は、前記光受信機側高速信号補償部の出力信号と、参照信号との差分に基づいて、前記伝達関数を算出する伝達関数推定部をさらに備える、請求項 2 又は 3 に記載の光伝送システム。

[請求項5] 前記伝達関数推定部は、
予め既知信号として定められている前記送信データ系列の一部を前記参照信号として前記伝達関数を算出するか、又は、前記光受信機側高速信号補償部の出力を硬判定した値を前記参照信号として前記伝達関数を算出する、請求項 4 に記載の光伝送システム。

[請求項6] 光送信機と、光受信機とを備える光伝送システムにおける光送信機であって、

送信データ系列の入力信号と、前記入力信号のスペクトルを巡回シフトした信号とに基づいて複数の低速信号を生成する低速信号生成部と、

前記複数の低速信号をデジタルアナログ変換して、合成することにより高速信号を生成する高速信号生成部と、

前記高速信号を変調した光信号を送送路に送信する光変調部と、
を備える光送信機。

[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における光受信機

であって、

前記光送信機から送信された光信号を伝送路を介して受信し、受信する前記光信号から得られる高速信号を出力する受信部と、

前記受信部が出力する前記高速信号と、前記高速信号のスペクトルを巡回シフトした信号とに基づいて前記高速信号を補償する高速信号補償部と、

前記高速信号補償部により補償がなされた前記高速信号を復号することによって前記光送信機が送信した前記光信号に含まれるバイナリ情報を復元する受信データ復号部と、

を備える光受信機。

[請求項8] 光送信機と、光受信機とを備える光伝送システムにおける伝達関数推定方法であって、

前記光送信機が、送信データ系列の入力信号と、前記入力信号のスペクトルを巡回シフトした信号とに基づいて複数の低速信号を生成する低速信号生成ステップと、

前記複数の低速信号をデジタルアナログ変換して、合成することにより高速信号を生成する高速信号生成ステップと、

前記高速信号を変調した光信号を伝送路に送信する光変調ステップと、

を有し、

前記光受信機が、

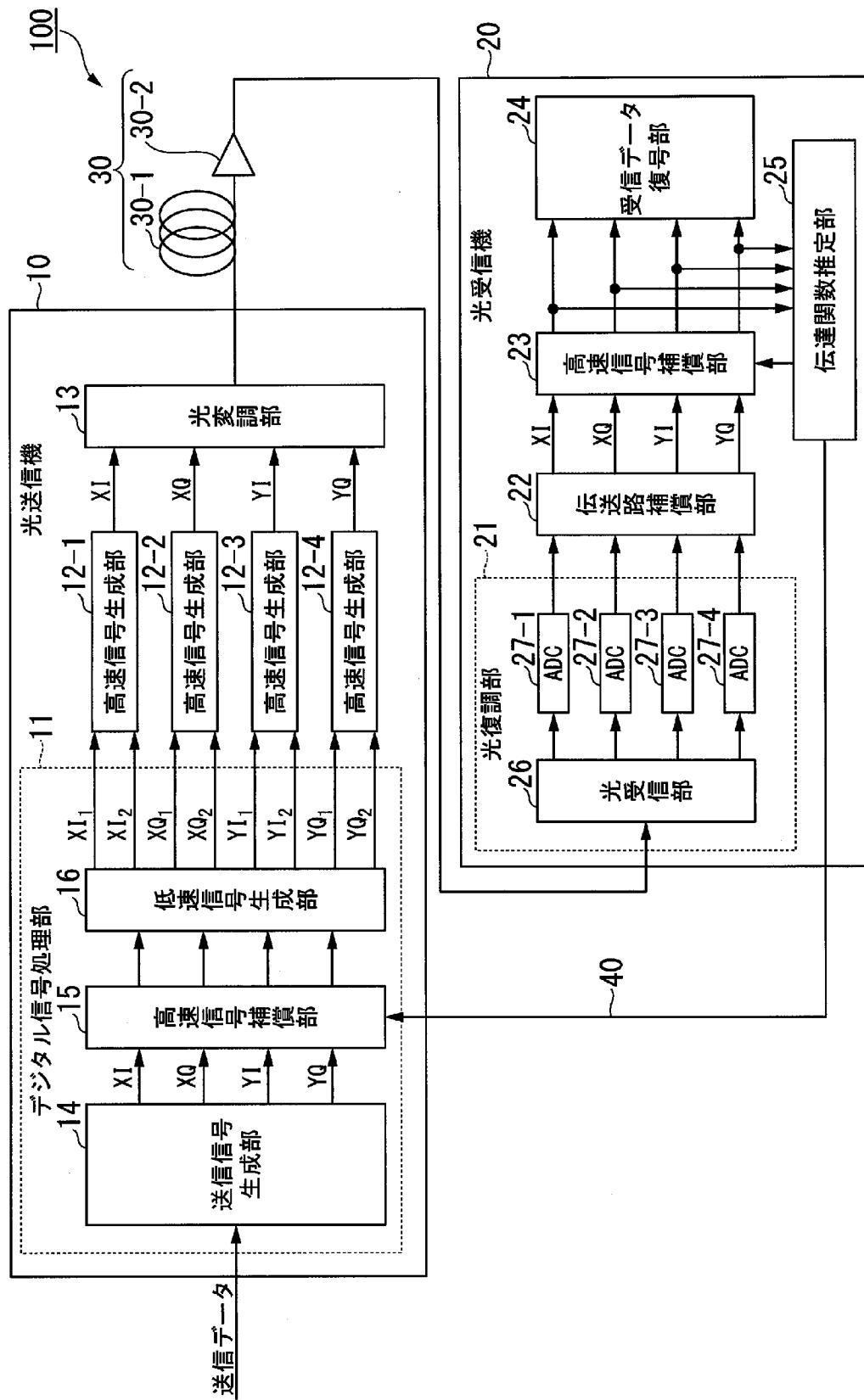
前記伝送路から前記光信号を受信し、受信する前記光信号から得られる前記高速信号を出力する受信ステップと、

前記受信ステップにおいて出力される前記高速信号と、前記高速信号のスペクトルを巡回シフトした信号とに基づいて前記高速信号を補償する光受信機側高速信号補償ステップと、

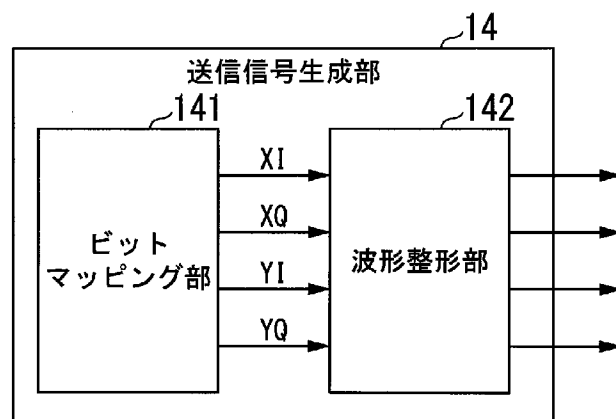
前記光受信機側高速信号補償ステップにより補償がなされた前記高速信号を復号することによって前記光送信機が送信した前記光信号に

含まれるバイナリ情報を復元する受信データ復号ステップと、
を有する伝達関数推定方法。

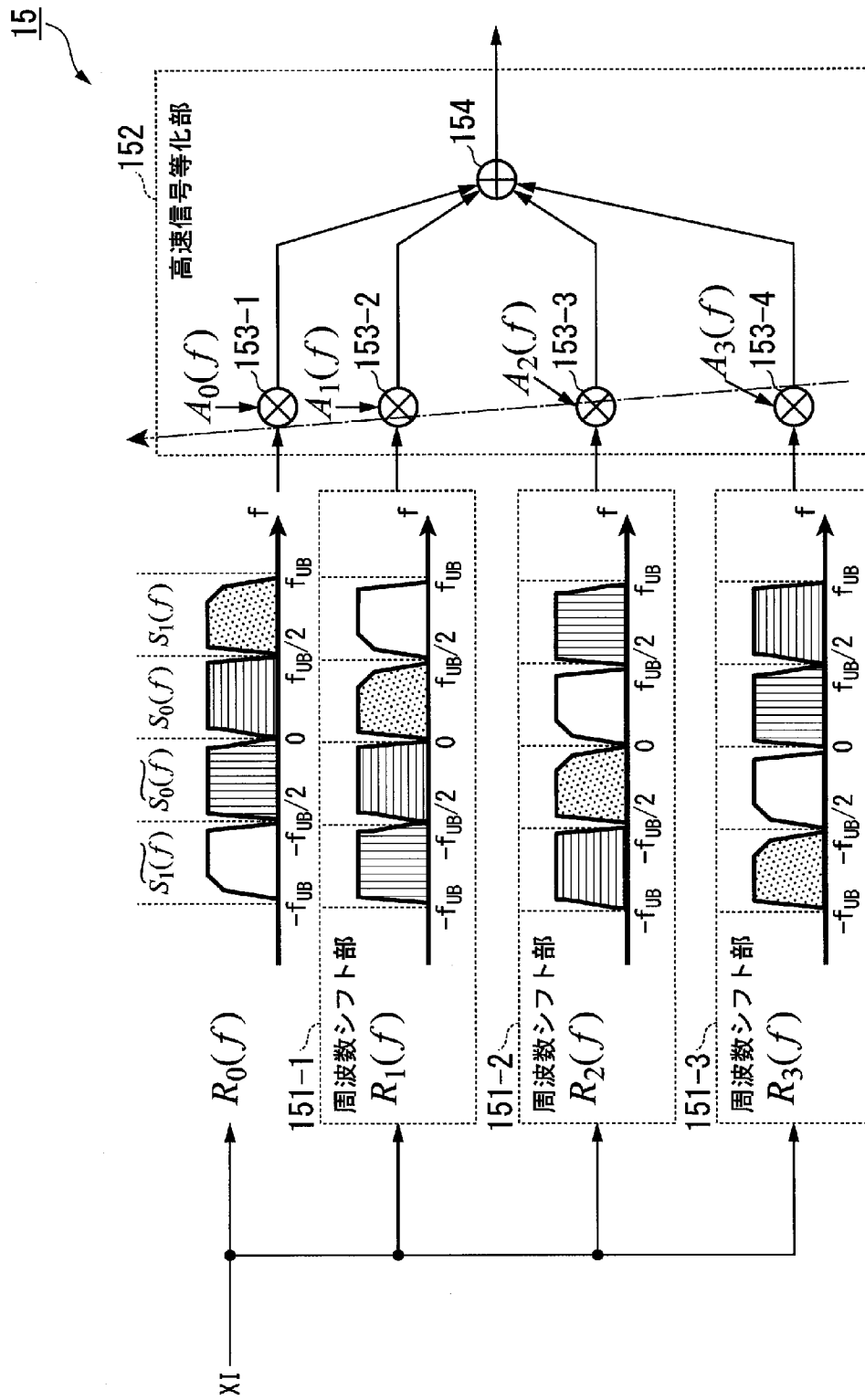
[図1]



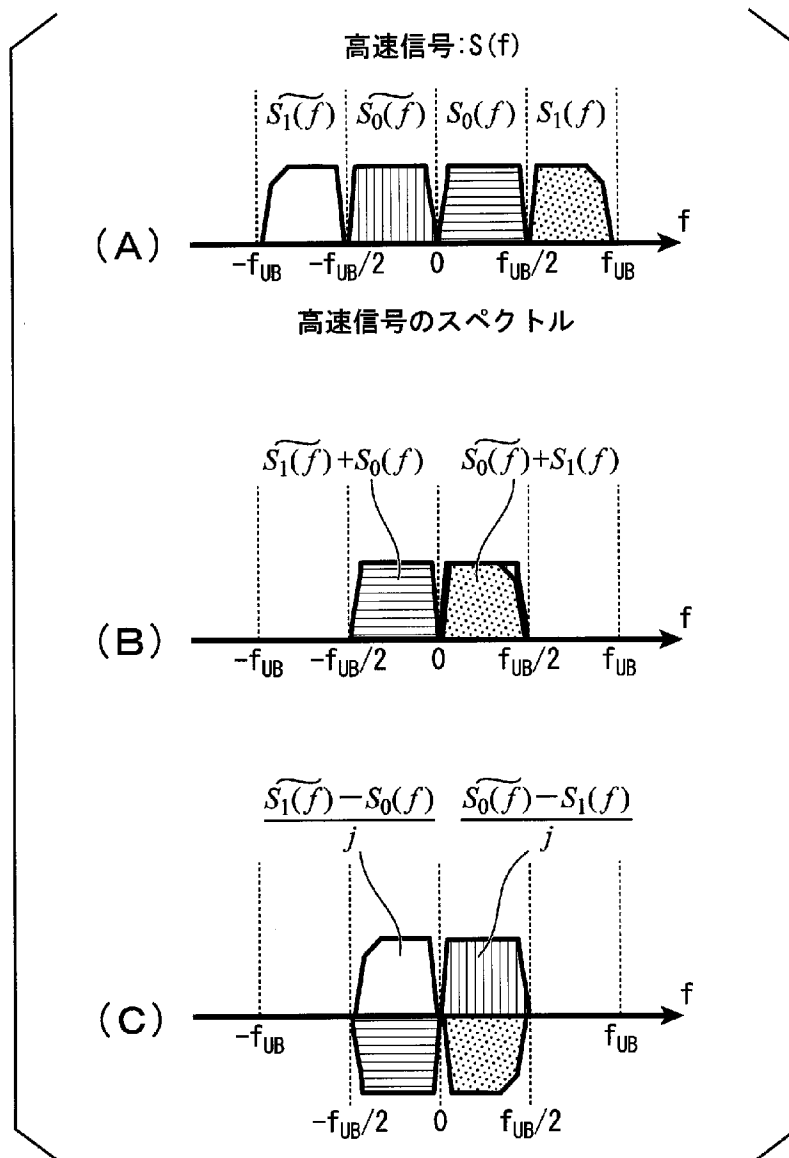
[図2]



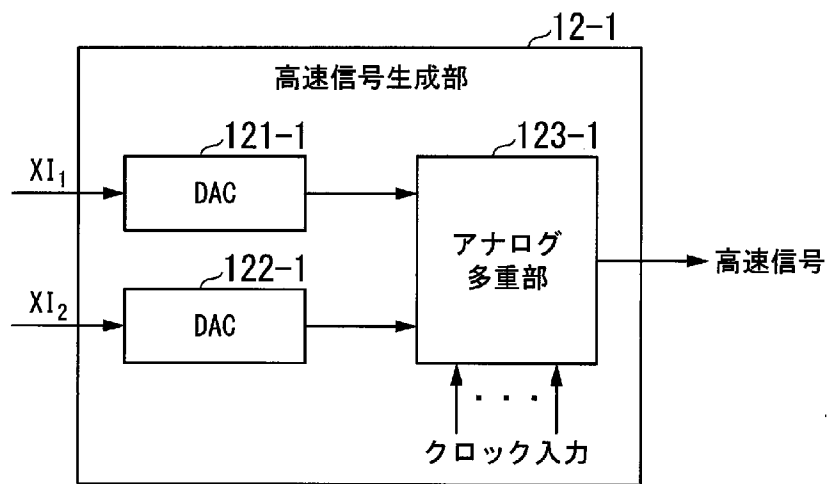
[図3]



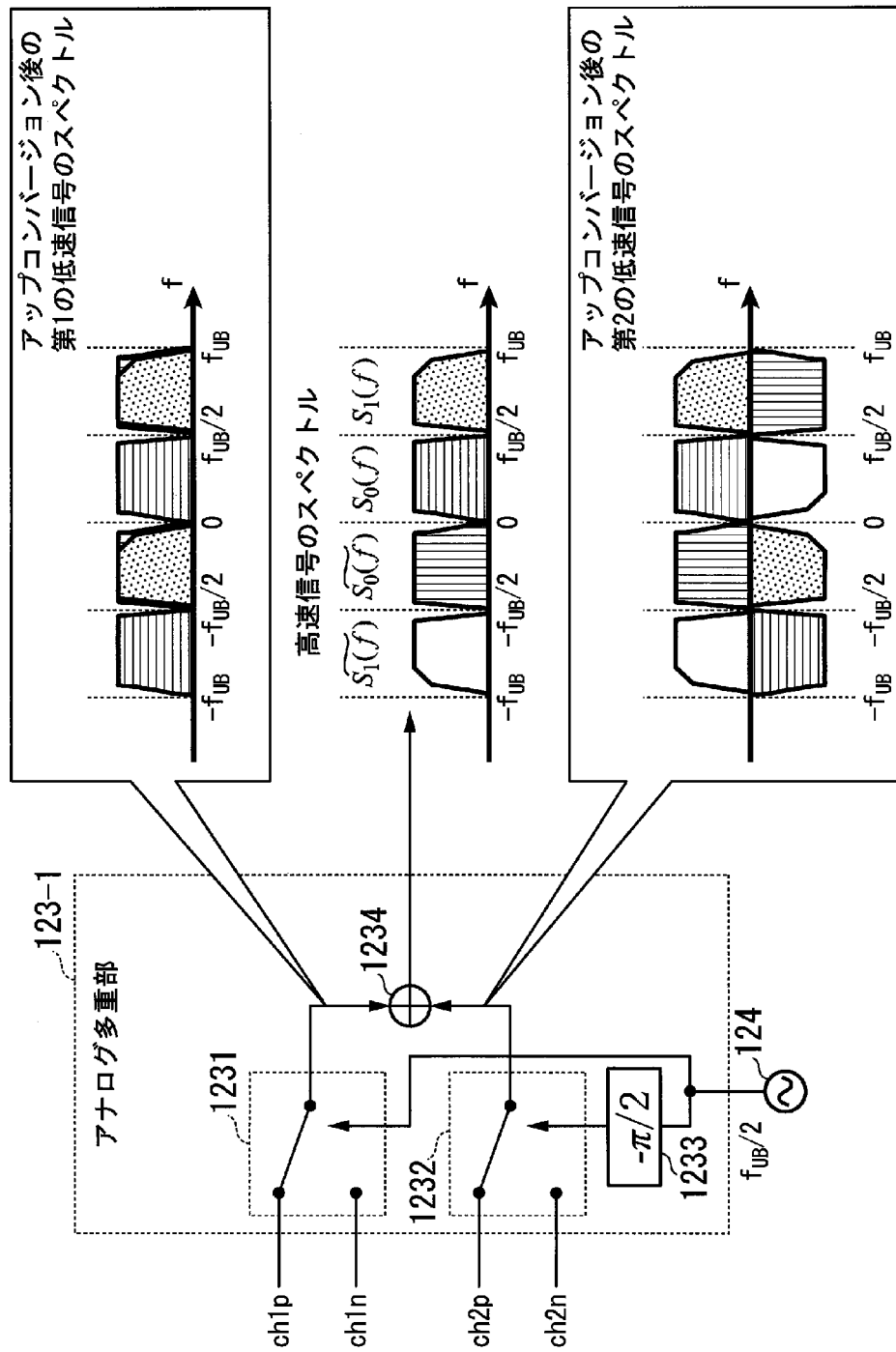
[図4]



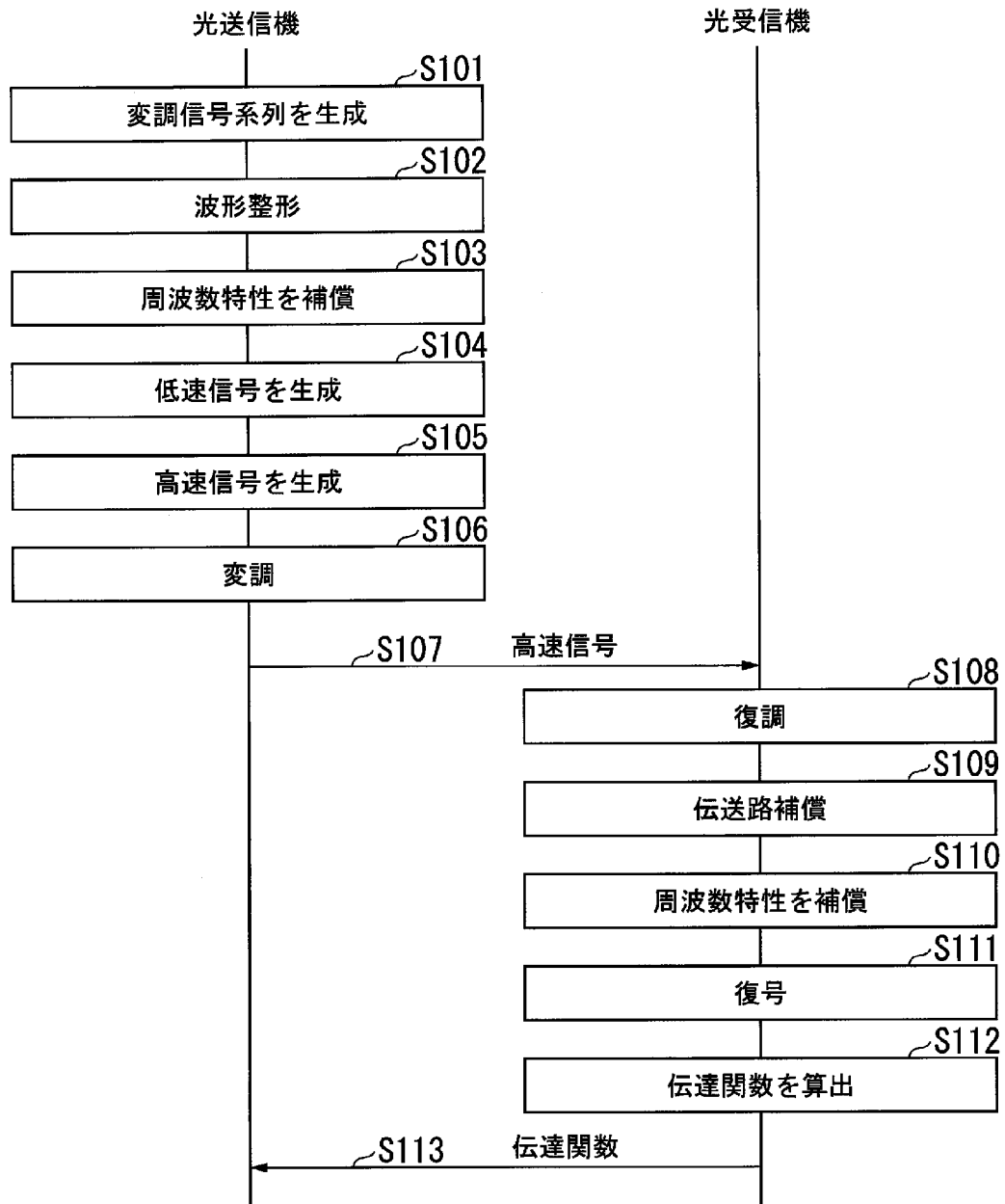
[図5]



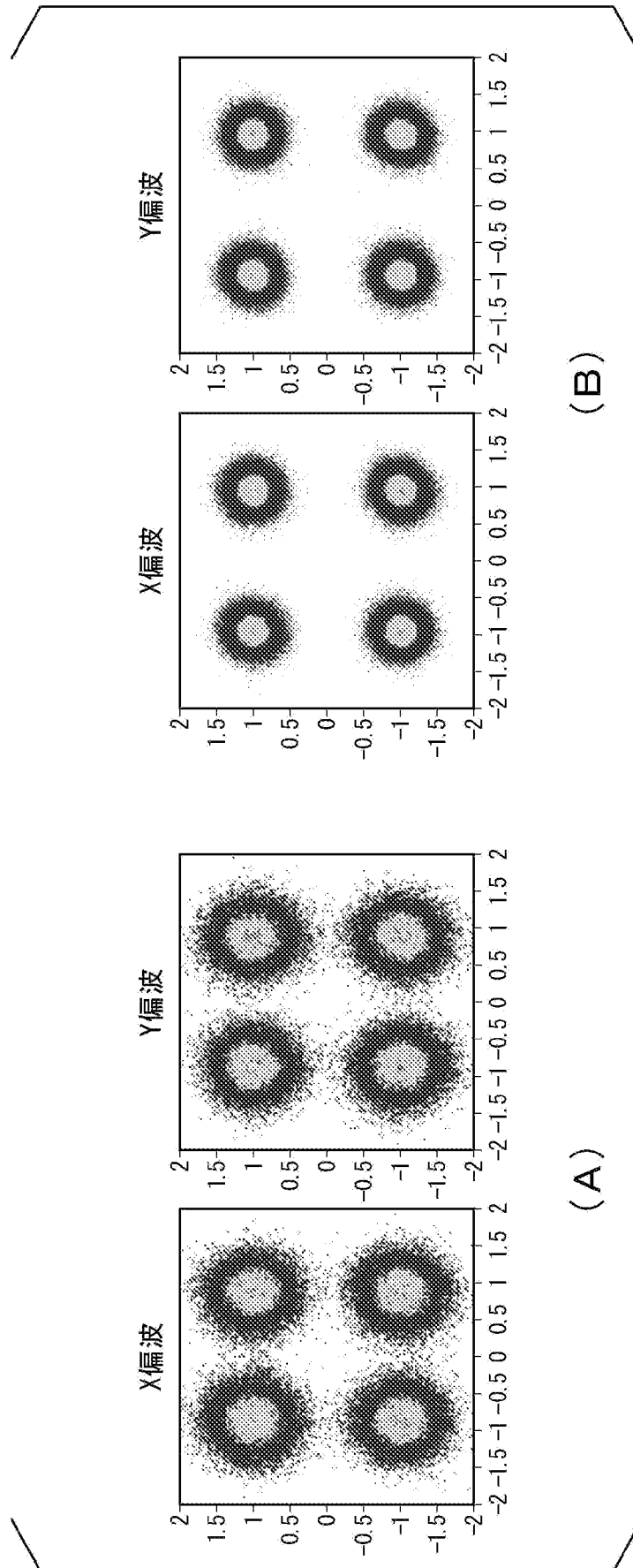
[図6]



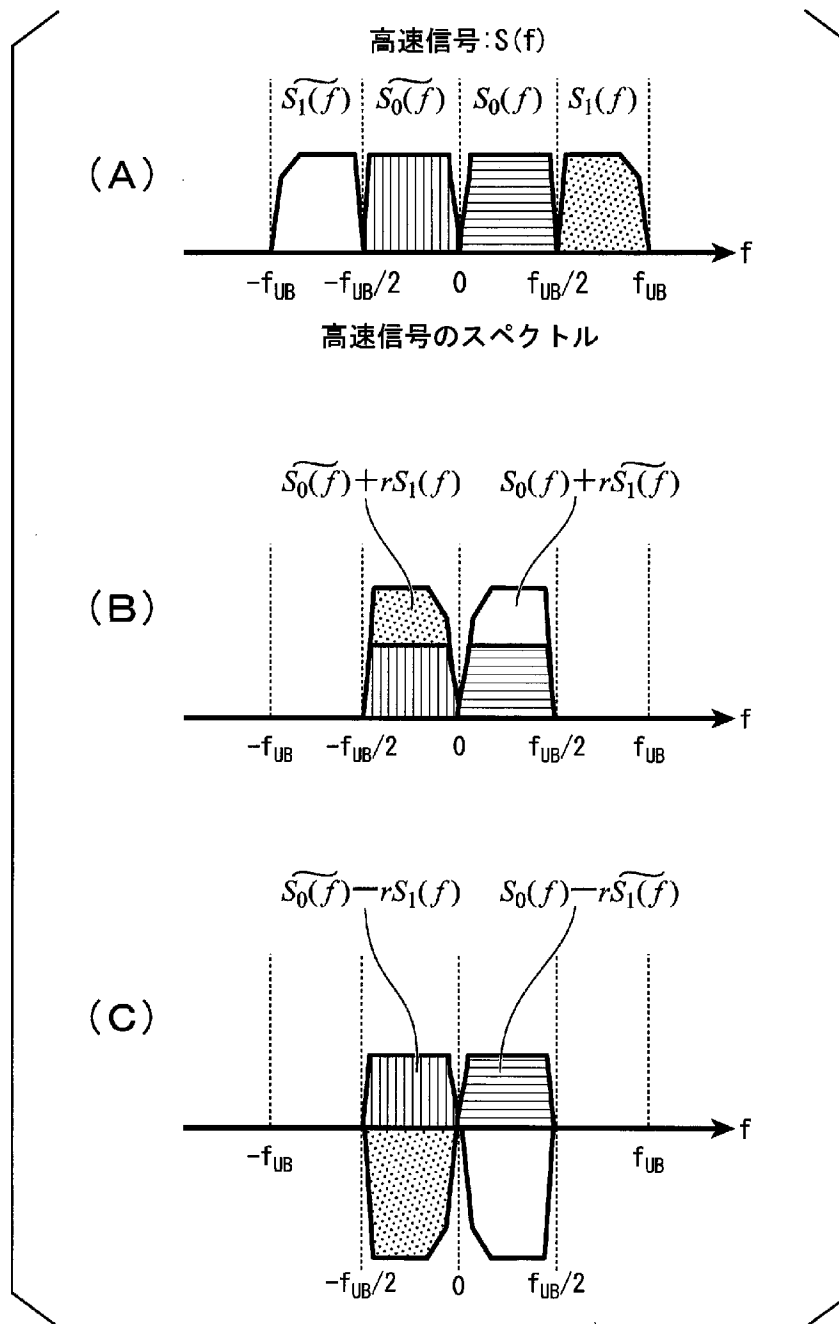
[図8]



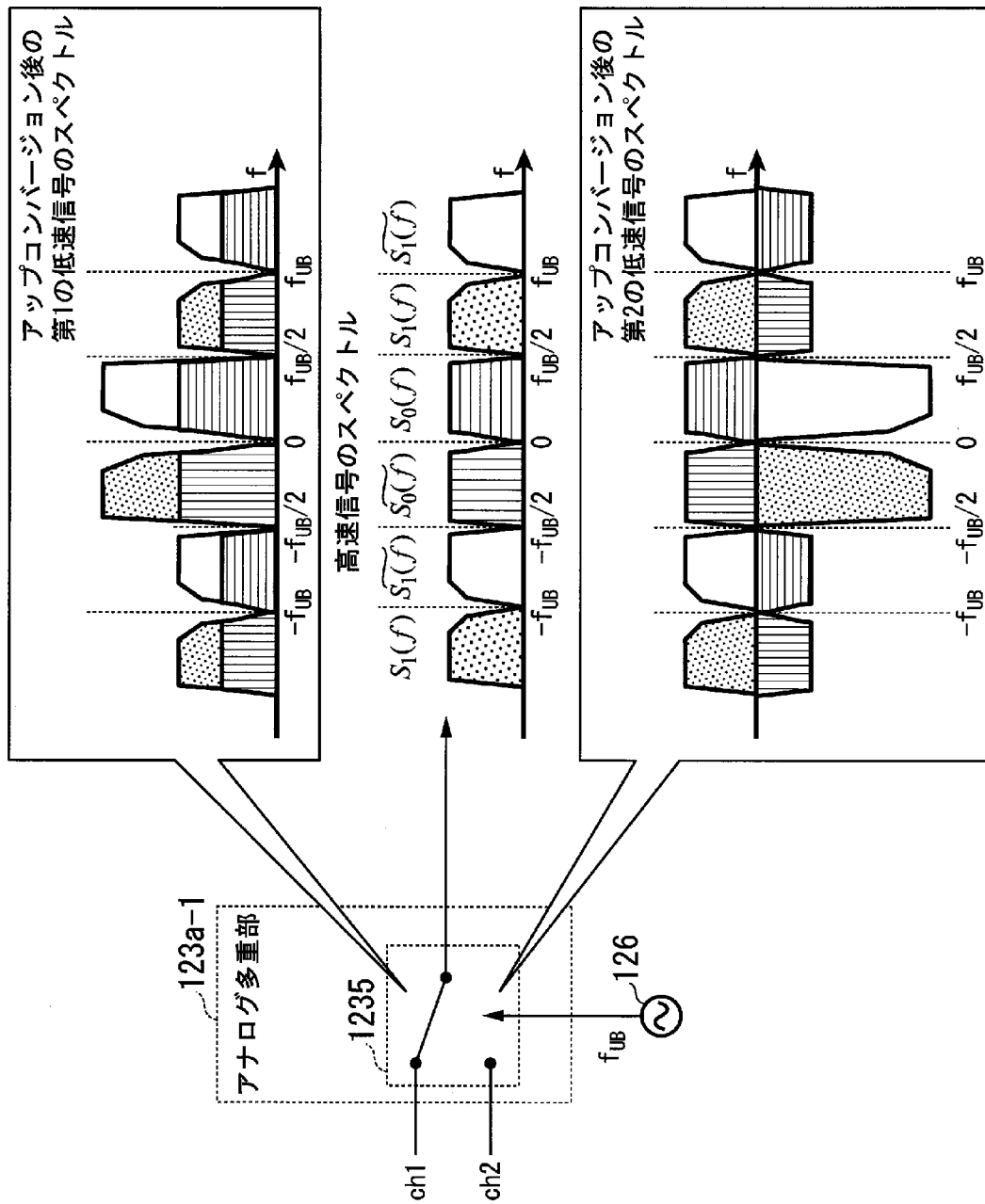
[図9]



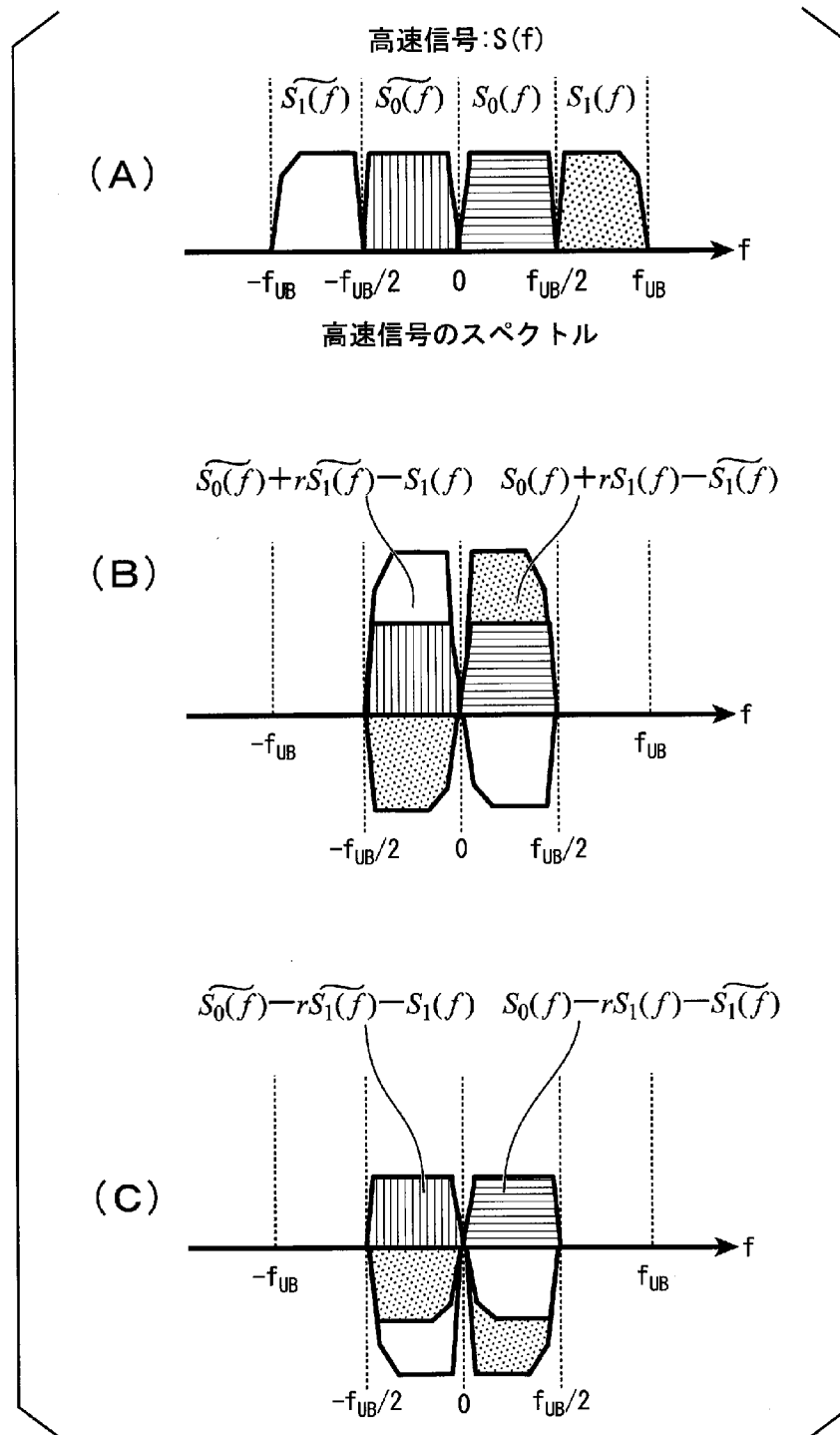
[図10]



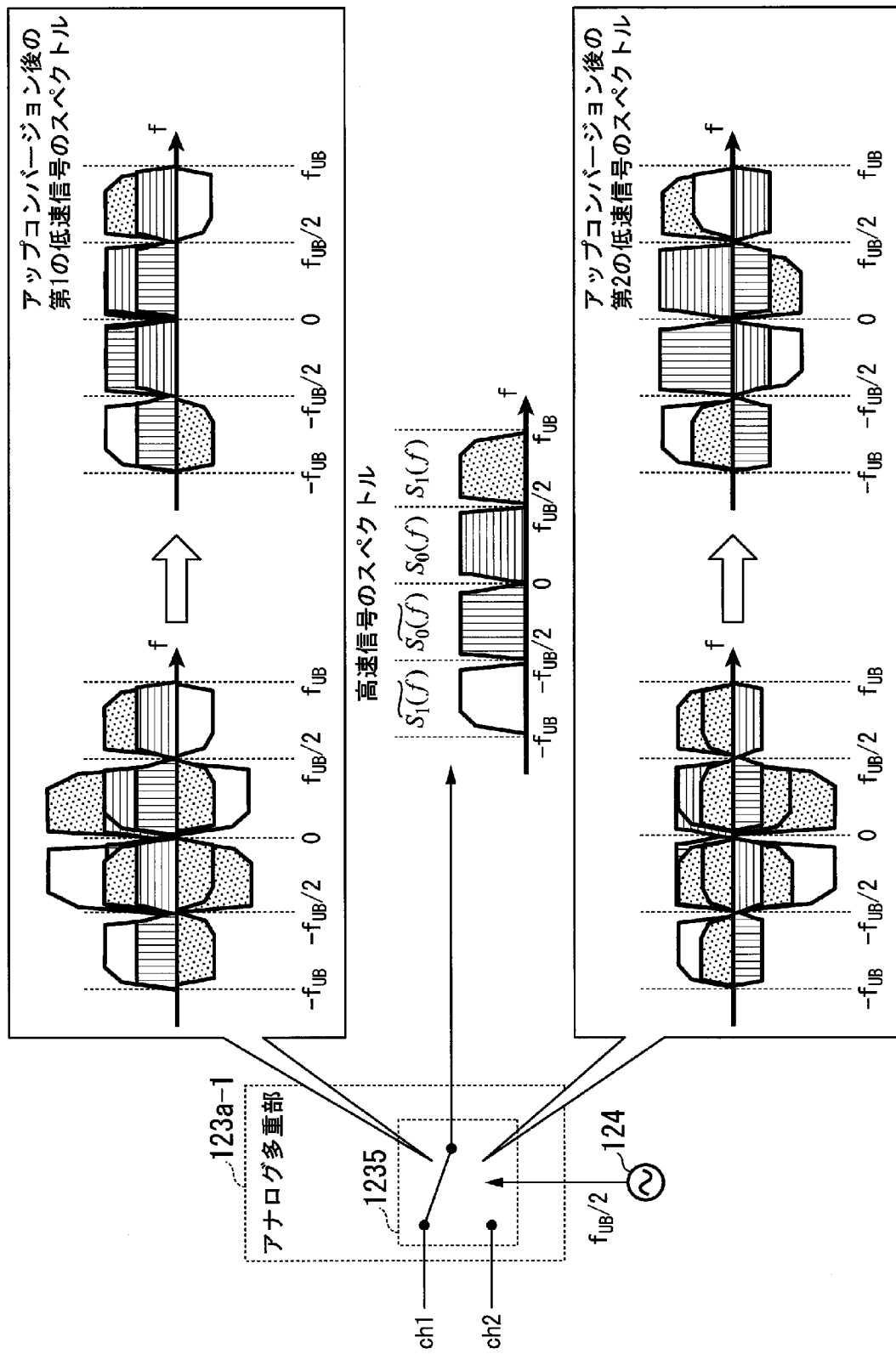
[図11]



[図12]



[図13]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/047309

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. H04B10/516(2013.01)i, H04B10/61(2013.01)i, H04L27/26(2006.01)i
FI: H04B10/516, H04B10/61, H04L27/26110, H04L27/26410

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. H04L27/26, H04B10/516, 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	1971-2020
Registered utility model specifications of Japan	1996-2020
Published registered utility model applications of Japan	1994-2020

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 2015-6004 A (PANASONIC INTELLECTUAL PROPERTY CORPORATION OF AMERICA) 08 January 2015, entire text, all drawings	1-8
A	WO 2009/008180 A1 (PANASONIC CORPORATION) 15 January 2009, entire text, all drawings	1-8
A	JP 2014-22932 A (SHARP CORPORATION) 03 February 2014, entire text, all drawings	1-8
A	JP 2018-42073 A (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) 15 March 2018, entire text, all drawings	1-8
A	YAMAZAKI, H. et al., Transmission of 400-Gbps discrete multi-tone signal using >100-GHz-Bandwidth analog multiplexer and InP mach-zehnder modulator, ECOC 2018, September 2018, entire text, all drawings	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
08.01.2020

Date of mailing of the international search report
21.01.2020

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
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2019/047309

JP 2015-6004 A	08 January 2015	US 2013/0077466 A1 entire text, all drawings WO 2010/032482 A1 EP 2330762 A1 CN 102160310 A KR 10-2011-0073449 A
WO 2009/008180 A1	15 January 2009	US 2010/0266060 A1 entire text, all drawings
JP 2014-22932 A	03 February 2014	(Family: none)
JP 2018-42073 A	15 March 2018	(Family: none)

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H04B 10/516(2013.01)i; H04B 10/61(2013.01)i; H04L 27/26(2006.01)i FI: H04B10/516; H04B10/61; H04L27/26 110; H04L27/26 410														
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）） H04L27/26; H04B10/516; 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 - 2020年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996 - 2020年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994 - 2020年</td> </tr> </table> 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）			日本国実用新案公報	1922 - 1996年	日本国公開実用新案公報	1971 - 2020年	日本国実用新案登録公報	1996 - 2020年	日本国登録実用新案公報	1994 - 2020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 - 2020年													
日本国実用新案登録公報	1996 - 2020年													
日本国登録実用新案公報	1994 - 2020年													
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 2015-6004 A（パナソニック インテレクチュアル プロパティ コーポレーション オブ アメリカ）08.01.2015（2015 - 01 - 08） 全文全図	1-8												
A	WO 2009/008180 A1（パナソニック株式会社）15.01.2009（2009 - 01 - 15） 全文全図	1-8												
A	JP 2014-22932 A（シャープ株式会社）03.02.2014（2014 - 02 - 03） 全文全図	1-8												
A	JP 2018-42073 A（日本電信電話株式会社）15.03.2018（2018 - 03 - 15） 全文全図	1-8												
A	YAMAZAKI H. et al., Transmission of 400-Gbps Discrete Multi-tone Signal Using >100-GHz-Bandwidth Analog Multiplexer and InP Mach-Zehnder Modulator, ECOC 2018, 2018年9月 全文全図	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。														
<table border="0"> <tr> <td>* 引用文献のカテゴリー</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</td> </tr> <tr> <td>“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの</td> <td>“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</td> </tr> <tr> <td>“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</td> <td>“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</td> </tr> <tr> <td>“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）</td> <td>“&” 同一パテントファミリー文献</td> </tr> <tr> <td>“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献</td> <td></td> </tr> <tr> <td>“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></td> </tr> </table>			* 引用文献のカテゴリー	“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	“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの	“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	“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	“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	“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）	“&” 同一パテントファミリー文献	“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	
* 引用文献のカテゴリー	“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													
“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの	“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													
“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	“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													
“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）	“&” 同一パテントファミリー文献													
“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														
国際調査を完了した日 08.01.2020		国際調査報告の発送日 21.01.2020												
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） 対馬 英明 5K 1211 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/JP2019/047309

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP	2015-6004	A	08.01.2015	US 2013/0077466 A1 全文全図	
				WO 2010/032482 A1	
				EP 2330762 A1	
				CN 102160310 A	
				KR 10-2011-0073449 A	
WO	2009/008180	A1	15.01.2009	US 2010/0266060 A1 全文全図	
JP	2014-22932	A	03.02.2014	(ファミリーなし)	
JP	2018-42073	A	15.03.2018	(ファミリーなし)	