

(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
2022年6月30日(30.06.2022)



(10) 国際公開番号

WO 2022/137299 A1

(51) 国際特許分類:
H04B 7/0413 (2017.01) H04B 10/2581 (2013.01)
H04B 7/08 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2020/047752

(22) 国際出願日: 2020年12月21日(21.12.2020)

(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: 芝原 光樹 (SHIBAHARA Koki); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 1

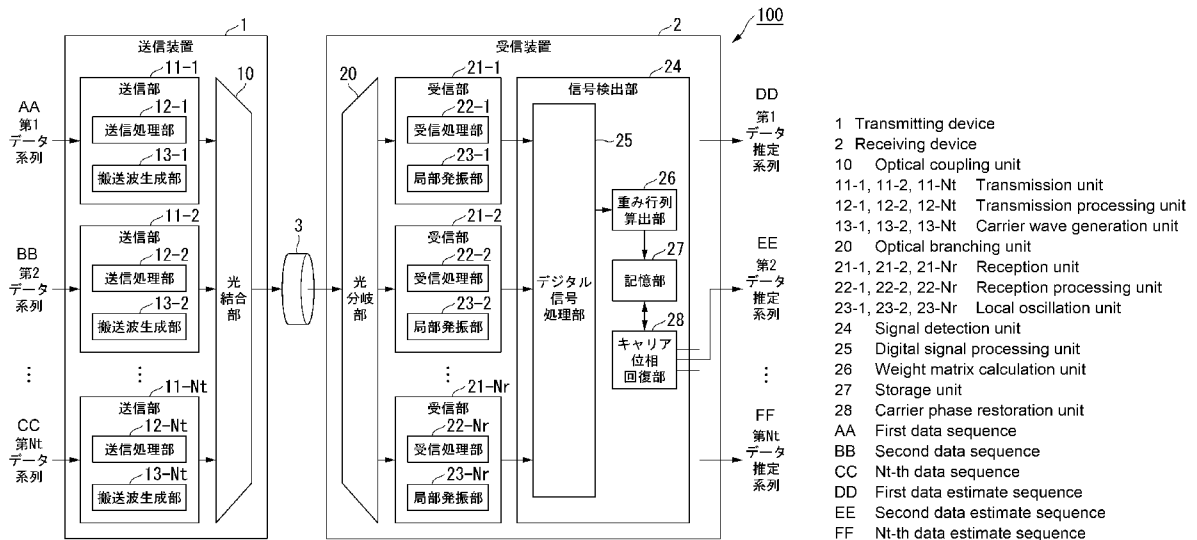
N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 水野 隆之 (MIZUNO Takayuki); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 1 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 宮本 裕 (MIYAMOTO Yutaka); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 1 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP).

(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,

(54) Title: SIGNAL DETECTION DEVICE, CARRIER PHASE RESTORATION DEVICE, CARRIER PHASE RESTORATION METHOD AND CARRIER PHASE RESTORATION PROGRAM

(54) 発明の名称: 信号検出装置、キャリア位相回復装置、キャリア位相回復方法及びキャリア位相回復プログラム



(57) Abstract: The present invention calculates a weight matrix that is used when performing MIMO linear reception for a received data sequence, calculates the estimated value of posterior state of an interfering component by applying a Karman filter algorithm to a predetermined equation of state for calculating posterior state information on the basis of prior state information, with an interfering component generated due to the fact that a plurality of carrier wave generation units and a plurality of local oscillation units are asynchronous being defined as the state information, and to a predetermined equation of observation for calculating observation information in the state indicated by the posterior state information, with a transmitted data sequence defined as the observation information, on the basis of the posterior state information calculated

HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, 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, 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))

by the equation of state, the received data sequence, and the weight matrix, and calculates the estimated sequence of a transmitted data sequence which has had the interfering component removed, on the basis of the calculated estimated value of posterior state.

(57) 要約: 受信データ系列に対してMIMO線形受信を行う際に用いる重み行列を算出し、複数の搬送波生成部と、複数の局部発振部とが非同期であるために生じる妨害成分を状態情報とし、事後の状態情報を、事前の状態情報に基づいて算出する予め定められる状態方程式と、送信データ系列を観測情報とし、状態方程式により算出する事後の状態情報と、受信データ系列と、重み行列とに基づいて、事後の状態情報が示す状態における観測情報を算出する予め定められる観測方程式とに対して、カルマンフィルタアルゴリズムを適用して妨害成分の事後状態推定値を算出し、算出した事後状態推定値に基づいて、妨害成分を除去した送信データ系列の推定系列を算出する。

明 細 書

発明の名称：

信号検出装置、キャリア位相回復装置、キャリア位相回復方法及びキャリア位相回復プログラム

技術分野

[0001] 本発明は、信号検出装置、キャリア位相回復装置、キャリア位相回復方法及びキャリア位相回復プログラムに関する。

背景技術

[0002] 近年の5G(5th Generation)サービスの開始、高精細動画サービス配信、IoT(Internet of Things)サービスの発展などに伴って、光ネットワークを流れる通信トラヒックは年々増加の一途をたどっている。増加する通信トラヒック需要に対する光ネットワークにおける対策として、例えば伝送路としての光ファイバの構造を変えずに、光ネットワークの端局に設置される光通信システム装置の高機能化、光増幅器や光スイッチの導入などの対策が行われてきた。

[0003] 現在の大容量光ネットワークの基盤となっている光ファイバは、LAN(Local Area Network)などの近距離向けの局所的なネットワークを除くと、シングルモードファイバが用いられている。シングルモードファイバは、クラッド内に光信号の通路となる単一のコアを有しており、大容量光ネットワークで用いられるC帯やL帯などの波長帯では単一のモード伝搬のみを許容する光ファイバである。これにより、毎秒数テラビットに達する情報を長距離にわたり安定的に転送する大容量光ネットワークが実現されている。

[0004] デジタル信号処理技術と、コヒーレント送受信技術とを用いるデジタルコヒーレント伝送技術が、毎秒100ギガビット級の光伝送装置に商用導入されている。デジタルコヒーレント伝送技術は、コヒーレント受信方式と、超高速デジタル信号処理とを組み合わせた技術である。コヒーレント受信方式は、受信側における光と局部発振光との干渉光を検波する受信方式である。

超高速デジタル信号処理は、信号をデジタル化した後に、信号光を生成する送信側光源及び局部発振光を生成する受信側光源における周波数や位相揺らぎに起因する位相成分の雑音を取り除く処理である。

[0005] デジタルコヒーレント伝送技術により、複雑な位相同期回路等を用いることなく、小型で安価な低消費電力な特性を持つ光送受信モジュール及びそれを用いた光トランシーバが実現されている。デジタルコヒーレント伝送技術の登場により、大容量光ネットワークを構成する光伝送時における受信感度の改善のみならず、光搬送波の振幅や位相や偏波に情報を載せることで情報伝送効率を飛躍的に向上させることが可能になっている。

[0006] 光伝送システムにおけるデジタルコヒーレント伝送技術を用いた伝送方式の例として、単一モードファイバに対して直交偏波の2モードを使った偏波多重光伝送がある。偏波多重光伝送では、直交関係にある偏波にそれぞれ異なる情報を載せることができる。偏波多重光伝送が行われる際、光伝送路中では、直交関係にある偏波が複雑に混合し、偏波モードの直交軸が高速に変動する。そのため、このような偏波を、光デバイスを使って追従することは困難である。そこで、偏波ダイバーシティ構造に対応した受信装置では、混合した偏波多重光信号を受信し、受信した偏波多重光信号をデジタル信号に変換し、デジタル信号処理を用いて分離する処理を行う。この処理は、無線通信システムで用いられる 2×2 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) システムとしてモデル化することができる。これにより、分離した信号から偏波ごとの情報を取り出すことが可能になり、送受信機間での通信が確立する。

[0007] デジタルコヒーレント伝送技術を用いた伝送方式の別の例として、マルチモードの光ファイバにおける複数の空間モード（以下「モード」ともいう）を使ったモード多重光伝送がある。モード多重光伝送では、コア径をシングルモードファイバと比較して広げる。これにより、C帯などの既存波長帯においても、複数のモードを励振することができ、各モードにそれぞれ異なる情報を載せることができる。モード多重光伝送の場合においても、偏波多重

光伝送の場合と同様に、モード多重された光信号は、マルチモードの光ファイバを伝搬中に複雑に混合する。モードダイバーシティ構造に対応した受信装置は、混合したモード多重された光信号を受信し、受信したモード多重された光信号をデジタル信号に変換し、励振されるモード数に応じた規模のMIMOデジタル信号処理を用いて分離する。

[0008] より具体的な例として、2つのLP (Linearly Polarized) モードを励振する数モードファイバを考える。2LPモード用の数モードファイバでは、基底モードとなるLP01モード、および高次モードとなるLP11モードが励振される。さらに、LP11モードの縮退2モード（これらをそれぞれ、LP11a, LP11bという）及び、各モードの偏波モード（これらをそれぞれ、X偏波、Y偏波という）とを活用することにより、2LPモード用の数モードファイバでは、LP01X、LP01Y、LP11aX、LP11aY、LP11bX、LP11bYの合計6つの空間モードにそれぞれ異なる情報を載せることができる。したがって、光ファイバの非線形光学効果を見捨てるならば、原理的には2LPモード用の数モードファイバは、既存のシングルモードファイバの3倍の伝送容量を達成することができる。

[0009] 将来の大容量光基幹ネットワークを実現する上で、上記したマルチモードの光ファイバ中の伝搬光に情報を載せる空間分割多重伝送技術基盤を確立することが不可欠である。しかし、上記したデジタルコヒーレント伝送技術が適用されたコヒーレント送受信回路における光源およびその周辺回路構成については未検討の部分が多いと言われている。特に現時点における実験室レベルでの空間分割多重伝送実験の報告では、コヒーレント送受信回路における光源について、光源間の位相や周波数の同期性が暗黙のうちに仮定されているという事情がある。

[0010] 既存のシングルモードファイバを伝送媒体とした伝送システムにおけるコヒーレント送受信回路では、送受信間の光源が一般に非同期のため受信信号に位相雑音成分や周波数オフセット成分が付加され、これらを除去する必要がある。この除去に用いられる代表的なアルゴリズムとしては、例えば、非

特許文献1記載の拡張カルマンフィルタ型位相振幅補正法や、非特許文献2記載のBPS (Blind phase search) 法が知られている。しかし、前者の拡張カルマンフィルタ型位相振幅補正法はシングルモード伝送用に設計されており、空間分割多重伝送には適用できない。後者のBPS法は、空間分割多重伝送に原理的には拡張可能であるが、非同期の光源の数だけテスト位相の組み合わせ数が指数関数的に増大するため、実装の観点から空間分割多重伝送には適用できない。

先行技術文献

非特許文献

[0011] 非特許文献1: Lalitha Pakala et al., “Extended Kalman filtering for joint mitigation of phase and amplitude noise in coherent QAM systems”, Optics Express, Vol.24 Issue6, pp.6391-6401, Mar 2016

非特許文献2: Timo Pfau et al, “Hardware-efficient coherent digital receiver concept with feedforward carrier recovery for M-QAM constellations”, Journal of Lightwave Technology, vol. 27, Issue. 8, pp989-999, April 2009

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0012] 光源間の位相及び周波数の同期性を確保するためには、単一光源からの出力光を光分岐して光増幅する手法や、注入同期などの手法により実現可能である。しかしながら、同期性の所定の要求条件確保に要する新たなモニタ機構の追加などにより、装置サイズの大型化や消費電力の増大などの課題が懸念される。波長多重システム用途の波長可変半導体光源用の既存ウェハ製造プロセスの変更などにより、装置製造コストの増加の課題が懸念される。

[0013] 上記事情に鑑み、本発明は、送信装置が生成する搬送波と、受信装置が生成する局部発振信号とが非同期である状態で複数信号を、同一伝送媒体を用いて伝送することを可能にす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

[0014] 本発明の一態様は、各々に与えられる送信データ系列に基づいて、各々が有する搬送波生成部が出力する搬送波を変調して送信信号を生成し、生成した前記送信信号を、複数の信号を伝送する伝送路に送出する複数の送信部を備える送信装置と、前記伝送路が伝送する複数の信号を受信し、受信した受信信号を、各々が有する局部発振部が出力する局部発振信号に基づいて復調して受信データ系列を生成する複数の受信部を備える受信装置とを備える通信システムにおける前記受信装置が備える信号検出装置であって、前記受信データ系列に対してMIMO線形受信を行う際に用いる重み行列を算出する重み行列算出部と、複数の前記搬送波生成部と、複数の前記局部発振部とが非同期であるために生じる妨害成分を状態情報とし、事後の前記状態情報を、事前の前記状態情報に基づいて算出する予め定められる状態方程式と、前記送信データ系列を観測情報とし、前記状態方程式により算出する事後の前記状態情報と、前記受信データ系列と、前記重み行列とに基づいて、事後の前記状態情報が示す状態における前記観測情報を算出する予め定められる観測方程式とに対して、カルマンフィルタアルゴリズムを適用して前記妨害成分の事後状態推定値を算出し、算出した前記事後状態推定値に基づいて、前記妨害成分を除去した前記送信データ系列の推定系列を算出するキャリア位相回復部と、を備える信号検出装置である。

[0015] 本発明の一態様は、上記の信号検出装置が備えるキャリア位相回復部を装置としたキャリア位相回復装置である。

[0016] 本発明の一態様は、各々に与えられる送信データ系列に基づいて、各々が有する搬送波生成部が出力する搬送波を変調して送信信号を生成し、生成した前記送信信号を、複数の信号を伝送する伝送路に送出する複数の送信部を備える送信装置と、前記伝送路が伝送する複数の信号を受信し、受信した受信信号を、各々が有する局部発振部が出力する局部発振信号に基づいて復調して受信データ系列を生成する複数の受信部を備える受信装置とを備える通信システムにおける前記受信装置が行うキャリア位相回復方法であって、前

記受信データ系列に対してMIMO線形受信を行う際に用いる重み行列を算出し、複数の前記搬送波生成部と、複数の前記局部発振部とが非同期であるために生じる妨害成分を状態情報とし、事後の前記状態情報を、事前の前記状態情報に基づいて算出する予め定められる状態方程式と、前記送信データ系列を観測情報とし、前記状態方程式により算出する事後の前記状態情報と、前記受信データ系列と、算出した前記重み行列とに基づいて、事後の前記状態情報が示す状態における前記観測情報を算出する予め定められる観測方程式とに対して、カルマンフィルタアルゴリズムを適用して前記妨害成分の事後状態推定値を算出し、算出した前記事後状態推定値に基づいて、前記妨害成分を除去した前記送信データ系列の推定系列を算出する、キャリア位相回復方法である。

[0017] 本発明の一態様は、コンピュータを、上記のキャリア位相回復装置として機能させるためのキャリア位相回復プログラムである。

発明の効果

[0018] 本発明により、送信装置が生成する搬送波と、受信装置が生成する局部発振信号とが非同期である状態で複数信号を、同一伝送媒体を用いて伝送することが可能になる。

図面の簡単な説明

[0019] [図1]第1の実施形態の通信システムの構成を示すブロック図である。

[図2]第1の実施形態の記憶部が備える第1データベース部、第2データベース部及び第3データベース部のデータ構成を示す図である。

[図3]第1の実施形態のキャリア位相回復部の内部構成と、キャリア位相回復部が備える機能部の各々が、記憶部が備える第1データベース部、第2データベース部及び第3データベース部のいずれを利用するかを示すブロック図である。

[図4]第1の実施形態のキャリア位相回復部による処理の流れを示すフローチャートである。

[図5]第2の実施形態の通信システムの構成を示すブロック図である。

[図6]第2の実施形態の記憶部が備える第1データベース部、第2データベース部及び第3データベース部のデータ構成を示す図である。

[図7]第2の実施形態のキャリア位相回復部の内部構成と、キャリア位相回復部が備える機能部の各々が、記憶部が備える第1データベース部、第2データベース部及び第3データベース部のいずれを利用するかを示すブロック図である。

[図8]第2の実施形態のキャリア位相回復部による処理の流れを示すフローチャートである。

[図9]第3の実施形態の通信システムの構成を示すブロック図である。

[図10]第3の実施形態のキャリア位相回復部の内部構成と、キャリア位相回復部が備える機能部の各々が、記憶部が備える第1データベース部、第2データベース部及び第3データベース部のいずれを利用するかを示すブロック図である。

[図11]シミュレーション結果のグラフを示す図（その1）である。

[図12]シミュレーション結果のグラフを示す図（その2）である。

発明を実施するための形態

[0020]（第1の実施形態）

以下、本発明の第1の実施形態について図面を参照して説明する。図1は、第1の実施形態の通信システム100の構成を示すブロック図である。通信システム100は、送信装置1、受信装置2及び送信装置1と受信装置2の間を接続する伝送路3を備える。伝送路3は、例えば、マルチモードの光ファイバであり、複数の空間モードの光信号を伝送する。

[0021] 送信装置1は、 N_t 個の送信部11-1～11- N_t と光結合部10を備える。ここで、 N_t は、2以上の整数である。送信部11-1は、送信処理部12-1と搬送波生成部13-1を備える。送信部11-2～11- N_t の各々は、符号の枝番号に対応する送信処理部12-2～12- N_t 及び搬送波生成部13-2～13- N_t を備える。

[0022] 搬送波生成部13-1～13- N_t の各々は、搬送波、すなわちキャリア

を生成する。第1の実施形態では、搬送波生成部 $13-1 \sim 13-N_t$ として、信号光光源が適用され、搬送波生成部 $13-1 \sim 13-N_t$ の各々は、キャリアとなる連続光を出射する。送信処理部 $12-1 \sim 12-N_t$ の各々は、それぞれ独立した情報の系列であるデータ系列を送信データ系列として取り込む。なお、以下では、送信処理部 $12-1, 12-2, \dots, 12-N_t$ の各々が取り込む送信データ系列のそれぞれを、第1データ系列、第2データ系列、 $\dots$ 第 N_t データ系列といい、第1データ系列 $\sim$ 第 N_t データ系列の N_t 個の送信データ系列を成分とするベクトルを送信信号ベクトル x という。

[0023] 送信処理部 $12-1 \sim 12-N_t$ の各々は、各々が取り込んだ第1データ系列 $\sim$ 第 N_t データ系列を符号化する。送信処理部 $12-1 \sim 12-N_t$ の各々は、内部に光変調器を備える。送信処理部 $12-1 \sim 12-N_t$ の各々は、内部の光変調器を用いて、各々が符号化した電気信号の第1データ系列 $\sim$ 第 N_t データ系列を変調信号として、各々に対応する搬送波生成部 $13-1 \sim 13-N_t$ が出射するキャリアの連続光を変調することにより、送信データ系列から光信号を生成する。

[0024] より詳細には、送信処理部 $12-1 \sim 12-N_t$ の各々が内部に備える光変調器の各々の電気入力には、送信処理部 $12-1 \sim 12-N_t$ の各々が符号化した第1データ系列 $\sim$ 第 N_t データ系列の電気信号が印加される。送信処理部 $12-1 \sim 12-N_t$ の各々が内部に備える光変調器の各々の光入力には、各々に対応する搬送波生成部 $13-1 \sim 13-N_t$ が出射するキャリアの連続光が与えられる。ここで、一般的には、同期した N_t 系列の連続光を得るために、送信処理部 $12-1 \sim 12-N_t$ の各々が内部に備える光変調器に与える連続光として、単独の連続光を光分岐して光増幅する手法、または、注入同期を行う手法などが採用される。これに対して、第1の実施形態の送信装置1では、このような同期の手法を行う構成は必要とせず、搬送波生成部 $13-1 \sim 13-N_t$ が出射するキャリアの連続光の各々が、非同期の状態であってもよい。

- [0025] 光結合部 10 は、送信処理部 $12-1 \sim 12-N_t$ の各々は、生成した N_t 個の光信号を結合して、伝送路 3 に送出する。伝送路 3 は、 N_t 個の光信号を各空間モードの光信号として受信装置 2 に伝送する。
- [0026] 受信装置 2 は、光分岐部 20、 N_r 個の受信部 $21-1 \sim 21-N_r$ 及び信号検出部 24 を備える。ここで、 N_r は、2 以上の整数である。伝送路 3 を伝搬する各空間モードの光信号は、伝送路 3 を伝搬する間に混合する。光分岐部 20 は、各空間モードの光信号が混合した光信号を N_r 個の光信号に分岐する。
- [0027] 受信部 $21-1$ は、受信処理部 $22-1$ と局部発振部 $23-1$ を備え、同様に、受信部 $21-2 \sim 21-N_r$ の各々は、符号の枝番号に対応する受信処理部 $22-2 \sim 22-N_r$ 及び局部発振部 $23-2 \sim 23-N_r$ を備える。局部発振部 $23-1 \sim 23-N_r$ の各々は、復調に用いられる局部発振信号を生成して出力する。第 1 の実施形態では、局部発振部 $23-1 \sim 23-N_r$ として、局部発振光光源が適用され、局部発振部 $23-1 \sim 23-N_r$ の各々は、局部発振信号としてコヒーレント検波に用いられる連続光を出射する。
- [0028] 受信処理部 $22-1 \sim 22-N_r$ の各々は、内部にコヒーレント検波を行う復調器を備える。受信処理部 $22-1 \sim 22-N_r$ の各々は、内部に備える復調器に対して、各々に対応する局部発振部 $23-1 \sim 23-N_r$ が出射する連続光を与えて、各々に対して光分岐部 20 が出力する光信号に対してコヒーレント検波を行うことにより、光信号を復調して電気信号の受信データ系列を生成する。
- [0029] ここで、伝送路 3 が伝送する光信号のモード数を「 N_m 」とした場合、送信部 $11-1 \sim 11-N_t$ の台数 N_t と、受信装置 2 の受信部 $21-1 \sim 21-N_r$ の台数 N_r と、 N_m との関係は、 $N_t \leq N_r \leq N_m$ である。独立信号の搬送モードとして、モード数 N_m をどれぐらいの数にするかは、 $N_t \leq N_m$ 、かつ $N_r \leq N_m$ となるように利用者によって予め定められる。MIM 通信では一般的に、 $N_t \leq N_m$ 、 $N_r \leq N_m$ であるため、上記した条件で

ある $N_t \leq N_r \leq N_m$ の関係が成立する。なお、送信装置 1 において N_m 以下のモードを励振していても、光ファイバの曲がりやねじれ、マイクロベンディング等のファイバ不完全性のために全モードの光が励振される場合がある。そのような場合に、良好な MIMO による受信を行うためには、 $N_r = N_m$ とするのが望ましい。

[0030] 信号検出部 24 は、デジタル信号処理部 25、重み行列算出部 26、記憶部 27 及びキャリア位相回復部 28 を備える。デジタル信号処理部 25 は、受信処理部 22-1 ~ 22- N_r が生成した N_r 個の受信データ系列に対して、以下のデジタル信号処理を行う。デジタル信号処理部 25 は、伝送路 3 による伝送により N_r 個の受信データ系列の各々の波形に生じた歪み等をデジタル信号処理により除去する。デジタル信号処理部 25 は、伝送路 3 による伝送により N_r 個の受信データ系列の各々において生じた誤りをデジタル信号処理により訂正する。これにより、 N_r 個の受信データ系列を分離することができ、分離した N_r 個の受信データ系列に基づいて、 N_t 個の送信データ系列を推定することが可能になる。以下、デジタル信号処理部 25 がデジタル信号処理を行って出力する N_r 個の受信データ系列を成分とするベクトルを受信信号ベクトル y という。

[0031] 重み行列算出部 26 は、デジタル信号処理部 25 がデジタル信号処理した受信信号ベクトル y に対して信号分離を行う手法の 1 つである平均最小二乗誤差（以下「MMSE」（Minimum Mean Square Error）ともいう）法を用いる際に必要となる重み行列 W を算出する。

[0032] 記憶部 27 は、図 2 に示すように、第 1 データベース部 31、第 2 データベース部 32 及び第 3 データベース部 33 を備える。第 1 データベース部 31 は、事前状態推定値、事後状態推定値、事前誤差共分散行列 P^- 、事後誤差共分散行列 P を記憶する。事前状態推定値と事後状態推定値は、ベクトルであり、それぞれ次式（1）、（2）として表される。

[0033] [数1]

$$\hat{\phi}^- \dots (1)$$

[0034] [数2]

$$\hat{\phi} \dots (2)$$

[0035] 以下、本文では、式（１）の事前状態推定値を表す記号を、ベクトル $\hat{\phi}^-$ と記載し、式（２）の事後状態推定値を表す記号を、ベクトル $\hat{\phi}$ と記載する。

[0036] 第２データベース部３２は、システム雑音共分散行列 Q と、観測雑音共分散行列 R とを記憶する。

[0037] 第３データベース部３３は、重み行列算出部出力データ、事前出力信号、カルマンゲイン行列 G 、補助行列 A 、補助行列 B 及び補助行列 C を記憶する。重み行列算出部出力データは、重み行列算出部２６によって書き込まれるデータであり、重み行列 W と、受信信号ベクトル y とが含まれる。

[0038] 事前出力信号は、ベクトルであり、次式（３）として表される。以下、本文では、次式（３）の事前出力信号を表す記号を、ベクトル $\hat{x}^-$ と記載する。

[0039] [数3]

$$\hat{x}^- \dots (3)$$

[0040] なお、サンプリング時刻を示す変数を k とした場合、記憶部２７における、第１データベース部３１、第２データベース部３２及び第３データベース部３３が記憶するベクトル及び行列のうちシステム雑音共分散行列 Q 及び観測雑音共分散行列 R を除くベクトル及び行列は、各々に対応するサンプリング時刻を示す変数 k を付することが正確な表記であるが、図２では、変数 k を付さずに示している。ここで、変数 k は、自然数であるが、以下において、予め定められる初期値を示す場合、変数 k の値として「０」を示す場合もある。

[0041] キャリア位相回復部２８は、搬送波生成部１３－１～１３－ N_t の位相揺らぎに起因する妨害成分と、局部発振部２３－１～２３－ N_r の位相揺らぎに起因する妨害成分とを推定する。キャリア位相回復部２８は、推定した２

つの妨害成分を除去した送信信号ベクトル x の推定系列を算出する。

[0042] 第1の実施形態では、キャリア位相回復部28は、2つの妨害成分として、搬送波生成部13-1～13- N_t の各々の光源の位相揺らぎに起因する位相雑音成分と、局部発振部23-1～23- N_r の各々の光源の位相揺らぎに起因する位相雑音成分とを推定する。

[0043] ここで、搬送波生成部13-1～13- N_t の各々の光源の位相揺らぎに起因する位相雑音成分を ϕ_1^t , ϕ_2^t , ..., $\phi_{N_t}^t$ とし、局部発振部23-1～23- N_r の各々の光源の位相揺らぎに起因する位相雑音成分を、 ϕ_1^r , ϕ_2^r , ..., $\phi_{N_r}^r$ とする。搬送波生成部13-1～13- N_t の各々の光源の位相揺らぎに起因する位相雑音成分 ϕ_1^t , ϕ_2^t , ..., $\phi_{N_t}^t$ を成分とする列ベクトルである位相雑音成分ベクトル ϕ^t を次式(4)として定義する。

[0044] [数4]

$$\phi^t \triangleq \begin{pmatrix} \phi_1^t \\ \vdots \\ \phi_{N_t}^t \end{pmatrix} \quad \dots (4)$$

[0045] 局部発振部23-1～23- N_r の各々の光源の位相揺らぎに起因する位相雑音成分 ϕ_1^r , ϕ_2^r , ..., $\phi_{N_r}^r$ を成分とする列ベクトルである位相雑音成分ベクトル ϕ^r を次式(5)として定義する。

[0046] [数5]

$$\phi^r \triangleq \begin{pmatrix} \phi_1^r \\ \vdots \\ \phi_{N_r}^r \end{pmatrix} \quad \dots (5)$$

[0047] なお、本文では、「 N_t 」、「 N_r 」の添え字の「 t 」と「 r 」を下付き文字にはしていないが、式(4)、(5)に示すように、数式においては、見易さの観点から「 N_t 」及び「 N_r 」の添え字の「 t 」と「 r 」とを下付き文字として示しており、以下に示す数式においても同様に示すものとする。

[0048] ここで、位相雑音成分ベクトル ϕ^t から算出されるベクトル θ^t と、位相雑

音成分ベクトル ϕ^r から算出されるベクトル θ^r とをそれぞれ、次式 (6)、(7) として定義する。

[0049] [数6]

$$\boldsymbol{\theta}^t \triangleq \begin{pmatrix} e^{j\phi_1^t} \\ \vdots \\ e^{j\phi_{N_t}^t} \end{pmatrix} \cdots \quad (6)$$

[0050] [数7]

$$\boldsymbol{\theta}^r \triangleq \begin{pmatrix} e^{j\phi_1^r} \\ \vdots \\ e^{j\phi_{N_r}^r} \end{pmatrix} \cdots \quad (7)$$

[0051] 式 (6) のベクトル $\boldsymbol{\theta}^t$ の成分を対角成分に並べた行列 $\mathbf{D}_t$ を次式 (8) として定義し、式 (7) のベクトル $\boldsymbol{\theta}^r$ の成分を対角成分に並べた行列 $\mathbf{D}_r$ を次式 (9) として定義する。

[0052] [数8]

$$\mathbf{D}_t = \text{diag}(\boldsymbol{\theta}^t) \cdots \quad (8)$$

[0053] [数9]

$$\mathbf{D}_r = \text{diag}(\boldsymbol{\theta}^r) \cdots \quad (9)$$

[0054] 送信信号ベクトル $\mathbf{x}$ を次式 (10) として定義し、受信信号ベクトル $\mathbf{y}$ を次式 (11) として定義する。

[0055] [数10]

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{N_t}]^T \cdots \quad (10)$$

[0056] [数11]

$$\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_{N_r}]^T \cdots \quad (11)$$

[0057] 受信信号ベクトル $\mathbf{y}$ が得られるまでに付加される雑音、言い換えると、通信路である伝送路 3 と、送信装置 1 の送信処理部 12-1 ~ 12-N_t や受

信装置 2 の受信処理部 2 2 - 1 ~ 2 2 - N_r や受信装置 2 のデジタル信号処理部 2 5 などの送受信回路によって付加される雑音をまとめた雑音ベクトル $\mathbf{z}$ を次式 (1 2) として定義する。

[0058] [数12]

$$\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_{N_r}]^T \dots (12)$$

[0059] 伝送路 3 の通信路行列を、N_r 行 N_t 列のサイズの行列である通信路行列 $\mathbf{H}$ と定義する。この場合、次式 (1 3) に示す関係が成り立つ。

[0060] [数13]

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} e^{j\phi_1^r} & & & \\ & e^{j\phi_2^r} & & \\ & & \ddots & \\ & & & e^{j\phi_{N_r}^r} \end{pmatrix} \mathbf{H} \begin{pmatrix} e^{j\phi_1^t} & & & \\ & e^{j\phi_2^t} & & \\ & & \ddots & \\ & & & e^{j\phi_{N_t}^t} \end{pmatrix} \mathbf{x} + \mathbf{z}$$

$$= \mathbf{D}_r \mathbf{H} \mathbf{D}_t \mathbf{x} + \mathbf{z} \dots (13)$$

[0061] 式 (1 3) に示すベクトル及び行列に含まれる成分の値は、サンプリング時刻ごとに値が変化する値であり、サンプリング時刻を示す変数 k を付すことが正確な表記であるが、ここでは、見易さのために簡略化して k を付さずを示している。なお、以下の数式の記載においても、数式の内容からサンプリング時刻を示す変数 k を付すことが自明である場合には、変数 k を省略して示す場合があるものとする。

[0062] 重み行列算出部 2 6 が算出する重み行列 $\mathbf{W}$ を用いた MIMO 線形受信の目的とは、デジタル信号処理部 2 5 がデジタル信号処理した受信信号ベクトル $\mathbf{y}$ に、重み行列 $\mathbf{W}$ を乗算することにより、通信路、すなわち伝送路 3 における空間チャネル間の結合を仮想的に解いて、N_t 個の送信データ系列の推定系列を得ることである。これに対して、キャリア位相回復部 2 8 が行う処理の目的とは、位相雑音成分ベクトル ϕ^t と、位相雑音成分ベクトル ϕ^r とを縦に並べた (N_t + N_r) 行の列ベクトルである位相雑音成分ベクトル ϕ をサンプリング時刻ごとに推定し、MIMO 線形受信により得られる N_t 個の送

信データ系列の推定系列から更に、推定した位相雑音成分ベクトル ϕ を除去することである。

[0063] キャリア位相回復部28は、予め定義する観測方程式及び状態方程式に対してカルマンフィルタアルゴリズムを適用して状態ごとに得られる観測情報に基づいて、位相雑音成分ベクトル ϕ をサンプリング時刻ごとに推定する処理を行う。以下、カルマンフィルタアルゴリズムを用いる際に予め定義する必要のある観測方程式と、状態方程式とについて説明する。

[0064] 重み行列算出部26が算出する重み行列 W の設計規範として、一般的なMSE法が適用される場合、通信路行列 H がユニタリ行列でない場合、重み行列 W の乗算によって空間チャネル間の影響を完全に取り除くことができず干渉成分が残留することになる。この残留する干渉成分と、雑音ベクトル z とをまとめると、次式(14)として表すことができる。

[0065] [数14]

$$\tilde{z} \triangleq -\frac{1}{\gamma} \mathbf{D}_t^H \mathbf{F}^{-1} \mathbf{D}_t \mathbf{x} + \mathbf{D}_t^H \mathbf{W}^H \mathbf{D}_r^H \mathbf{z} \quad \dots (14)$$

[0066] 以下、本文では、式(14)の左辺の記号を $\sim z$ と記載する。式(14)において、 γ は、伝送路3を伝搬した後の信号対雑音比であり、行列 F は、次式(15)により定義される行列である。次式(15)において、 $\mathbf{I}_{N_t}$ は、 N 行 N 列の単位行列である。

[0067] [数15]

$$\mathbf{F} \triangleq \mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{1}{\gamma} \mathbf{I}_{N_t} \quad \dots (15)$$

[0068] 受信信号ベクトル y から送信信号ベクトル x の推定系列を得るためには、キャリア位相回復部28が推定する位相雑音成分ベクトル ϕ に基づいて、搬送波生成部13-1～13- N_t に起因する位相ずれの分の回転演算である行列 $\mathbf{D}_t^H$ を乗算する演算と、局部発振部23-1～23- N_r に起因する位相ずれの分の回転演算であるベクトル θ_r^* を乗算する演算を行った上で $\sim z$

を除去する必要がある。この関係を式で示すと、次式（１６）として表すことができる。

[0069] [数16]

$$\mathbf{D}_t^H \mathbf{W}^H \text{diag}(\mathbf{y}) \boldsymbol{\theta}^{r*} = \mathbf{x} + \tilde{\mathbf{z}} \quad \dots (16)$$

[0070] 式（１６）は、送信信号ベクトル $\mathbf{x}$ の推定系列を観測情報とし、 $\sim \mathbf{z}$ を観測雑音とする観測方程式といえることができる。観測方程式の表記を簡略化するため、次式（１７）に示す非線形関数 $h(\phi)$ を定義する。

[0071] [数17]

$$h(\phi) \triangleq \mathbf{D}_t^H \mathbf{W}^H \text{diag}(\mathbf{y}) \boldsymbol{\theta}^{r*} \quad \dots (17)$$

[0072] 式（１７）の非線形関数 $h(\phi)$ を用いることにより、式（１６）の観測方程式を次式（１８）として表すことができる。

[0073] [数18]

$$h(\phi) = \mathbf{x} + \tilde{\mathbf{z}} \quad \dots (18)$$

[0074] キャリア位相回復部２８が推定する位相雑音成分ベクトル ϕ に関する状態方程式は、次式（１９）として表すことができる。

[0075] [数19]

$$\phi(k+1) = \phi(k) + \mathbf{v}(k) \quad \dots (19)$$

[0076] 式（１９）において、ベクトル $\mathbf{v}(k)$ は、 $(N_t + N_r)$ 行のベクトルである。ここで、受信部２１－１～２１－ N_r が行うコヒーレント検波の特性を考慮し、位相雑音成分ベクトル ϕ の成分のうち特定の１つの成分を定常的な値、すなわち参照角とする。このように、位相雑音成分ベクトル ϕ の成分のうち特定の１つの成分を参照角とする理由は、複数存在する最小二乗解から特定の解に限定するためである。特定の１つの成分の選び方は、任意に定めてもよい。ここでは、送信側の搬送波生成部１３－１～１３－ N_t の各々の位相揺らぎに起因する位相雑音成分を $\phi_1^t, \phi_2^t, \dots, \phi_{N_t}^t$ の中から参照角となる位相雑音成分として ϕ_1^t を選択し、更に、一般性を失わないよう

にするため、 $\phi_1^t = 0$ とする。参照角を「0」にする理由は、例えば、QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) のような変調方式で変調された信号を送信する場合、参照角を0とすることで、他の未知数に対する最小二乗解も通信において意味のある解になることが期待されるためである。この場合、ベクトル $\mathbf{v}(k)$ は、次式 (20) として表すことができる。

[0077] [数20]

$$\mathbf{v}(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ v_2(k) \\ \vdots \\ v_{N_t+N_r}(k) \end{bmatrix} \dots (20)$$

[0078] 上記の式 (20) に示すように、ベクトル $\mathbf{v}(k)$ の第1の成分 $v_1(k)$ は、参照角であるため「0」であり、残りの $(N_t + N_r - 1)$ 個の $v_2(k) \sim v_{N_t+N_r}(k)$ の成分は、平均0、分散 $2\pi\Delta v T$ の白色雑音である。ここで、 Δv は、搬送波生成部 13-1 $\sim$ 13-N_t 及び局部発振部 23-1 $\sim$ 23-N_r の線幅であり、 T は、サンプリング周期である。

[0079] 式 (18) により示される観測方程式と、式 (19) により示される状態方程式とに基づくカルマンフィルタアルゴリズムは、1. 事前状態推定値更新、2. 事前誤算共分散更新、3. カルマンゲイン更新、4. 事後状態推定値更新、5. 事後誤差共分散更新、6. 信号出力値という一連の演算を繰り返すアルゴリズムになる。「1. 事前状態推定値更新」の演算は、式 (21) によって表される。

[0080] [数21]

$$\hat{\phi}^-(k) = \hat{\phi}(k-1) \dots (21)$$

[0081] 上記の式 (21) において、ベクトル $\hat{\phi}^-(k)$ は、式 (1) に示した事前状態推定値であってサンプリング時刻が (k) の場合の事前状態推定値であり、ベクトル $\hat{\phi}(k-1)$ は、式 (2) に示した事後状態推定値であってサンプリング時刻が $(k-1)$ の事後状態推定値である。「2. 事前誤差共分散更新」の演算は、次式 (22) によって表される。

[0082] [数22]

$$\mathbf{P}^-(k) = \mathbf{P}(k-1) + \mathbf{Q} \quad \cdots (22)$$

[0083] 上記の式(22)において、行列 $\mathbf{P}^-(k)$ は、サンプリング時刻が (k) の場合の事前誤差共分散行列であり、行列 $\mathbf{P}(k-1)$ は、サンプリング時刻が $(k-1)$ の場合の事後誤差共分散行列である。式(22)の行列 $\mathbf{Q}$ は、次式(23)により定義されるシステム雑音共分散行列であり、次式(23)の $E[\cdot]$ は、期待値演算を示す記号である。

[0084] [数23]

$$\mathbf{Q} \triangleq E[\mathbf{v}(k)\mathbf{v}^H(k)] \quad \cdots (23)$$

[0085] 「3. カルマンゲイン更新」の演算は、次式(24)として表される。

[0086] [数24]

$$\mathbf{G}(k) = \mathbf{P}^-(k)\mathbf{T}^H(k) [\mathbf{T}(k)\mathbf{P}^-(k)\mathbf{T}^H(k) + \mathbf{R}]^{-1} \quad \cdots (24)$$

[0087] 上記の式(24)において、行列 $\mathbf{G}(k)$ は、カルマンゲイン行列である。式(24)の行列 $\mathbf{R}$ は、次式(25)により定義される観測雑音共分散行列であり、次式(25)の $E[\cdot]$ は、期待値演算を示す記号である。

[0088] [数25]

$$\mathbf{R} \triangleq E[\tilde{\mathbf{z}}(k)\tilde{\mathbf{z}}^H(k)] \quad \cdots (25)$$

[0089] 式(24)の行列 $\mathbf{T}$ は、次式(26)により定義される行列である。次式(26)から分かるように、行列 $\mathbf{T}$ は、その一部に、事前出力信号であるベクトル $\hat{\mathbf{x}}^-$ の成分である $\hat{x}_1^- \sim \hat{x}_{N_t}^-$ を含む行列である。

[0090]

[数26]

$$T = \left. \frac{\partial h(\boldsymbol{\phi})}{\partial \boldsymbol{\phi}} \right|_{\boldsymbol{\phi}=\hat{\boldsymbol{\phi}}^-}$$

$$= -j \begin{pmatrix} \hat{x}_1^- & w_{11}^* y_1 e^{-j\phi_1^{t-}} e^{-j\phi_1^{r-}} \cdots w_{N_r 1}^* y_{N_r} e^{-j\phi_1^{t-}} e^{-j\phi_{N_r}^{r-}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{x}_{N_t}^- & w_{1N_t}^* y_1 e^{-j\phi_{1N_t}^{t-}} e^{-j\phi_1^{r-}} \cdots w_{N_r N_t}^* y_{N_r} e^{-j\phi_{N_t}^{t-}} e^{-j\phi_{N_r}^{r-}} \end{pmatrix}$$

... (26)

[0091] なお、式（26）では、行列 $T(k)$ を、式の記載の見易さの観点からサンプリング時刻を示す変数 k を省略して表記しているが、行列 $T(k)$ の成分は、サンプリング時刻ごとに値が変化する値であり、サンプリング時刻を考慮した正式な表記は、次式（27）である。

[0092] [数27]

$$T(k) = \left. \frac{\partial h(\boldsymbol{\phi})}{\partial \boldsymbol{\phi}} \right|_{\boldsymbol{\phi}=\hat{\boldsymbol{\phi}}^-(k)} \quad \dots (27)$$

[0093] 「4. 事後状態推定値更新」の演算は、次式（28）により表される。次式（28）において、ベクトル $\hat{\mathbf{x}}^-(k)$ は、式（3）に示したように事前出力信号であってサンプリング時刻が (k) の場合の事前出力信号である。式（28）のベクトル $\mathbf{x}_{HD}(k)$ は、事前出力信号のベクトル $\hat{\mathbf{x}}^-(k)$ に対して所定の信号変調方式にしたがった仮判定を行うことにより得られる仮判定値ベクトルである。

[0094] [数28]

$$\hat{\boldsymbol{\phi}}(k) = \hat{\boldsymbol{\phi}}^-(k) + \mathbf{G}(k)[\mathbf{x}_{HD}(k) - \hat{\mathbf{x}}^-(k)] \quad \dots (28)$$

[0095] 「5. 事後誤差共分散更新」の演算は、次式（29）により表される。

[0096] [数29]

$$\mathbf{P}(k) = [\mathbf{I}_{N_t+N_r} - \mathbf{G}(k)\mathbf{T}(k)] \mathbf{P}^-(k) \quad \dots (29)$$

[0097] 「6. 信号出力値」の演算は、次式（30）により表される。式（30）の右辺のベクトル $\hat{x}(k)$ が、送信信号ベクトル x の推定系列になる。

[0098] [数30]

$$\hat{x}(k) = h(\hat{\phi}(k)) \quad \dots (30)$$

[0099] 図3は、上記のカルマンフィルタアルゴリズムを実行するキャリア位相回復部28が備える機能部と、各々の機能部が、記憶部27が備える第1データベース部31、第2データベース部32及び第3データベース部33のいずれを利用するかを示したブロック図である。キャリア位相回復部28は、時刻更新部41、事前状態推定値更新部42、事前誤差共分散更新部43、事前出力信号算出部44、補助行列算出部45、カルマンゲイン更新部46、事後状態推定値更新部47、事後誤差共分散更新部48及び出力信号算出部49を備える。

[0100] 時刻更新部41は、カルマンフィルタアルゴリズムにおけるサンプリング時刻を示す変数 k （以下「サンプリング時刻 k 」ともいう）を生成して出力する。事前状態推定値更新部42は、上記した「1. 事前状態推定値更新」の演算を行う。事前誤差共分散更新部43は、上記した「2. 事前誤差共分散更新」の演算を行う。事前出力信号算出部44は、上記した「4. 事後状態推定値更新」の演算において用いられるサンプリング時刻 k における事前出力信号ベクトル $\hat{x}^-(k)$ と、上記した「3. カルマンゲイン更新」の演算において用いられるサンプリング時刻 k における行列 $T(k)$ とを算出する。

[0101] 補助行列算出部45は、上記した「3. カルマンゲイン更新」と「5. 事後誤差共分散更新」の演算において用いられる次式（31）～式（33）により表される3つの補助行列 $A(k)$ 、 $B(k)$ 、 $C(k)$ を算出する。

[0102] [数31]

$$A(k) = P^-(k)T^H(k) \quad \dots (31)$$

[0103]

[数32]

$$\mathbf{B}(k) = \mathbf{T}(k)\mathbf{A}(k) \quad \dots (32)$$

[0104] [数33]

$$\mathbf{C}(k) = (\mathbf{B}(k) + \mathbf{R})^{-1} \quad \dots (33)$$

[0105] カルマンゲイン更新部46は、上記の「3. カルマンゲイン更新」の演算を行う。ただし、式(24)に示した式に替えて、補助行列算出部45が算出する補助行列 $\mathbf{A}(k)$ と、補助行列 $\mathbf{C}(k)$ とを用いて、次式(34)の演算を行ってサンプリング時刻 k のカルマンゲイン行列 $\mathbf{G}(k)$ を算出する。

[0106] [数34]

$$\mathbf{G}(k) = \mathbf{A}(k)\mathbf{C}(k) \quad \dots (34)$$

[0107] 事後状態推定値更新部47は、上記した「4. 事後状態推定値更新」の演算を行う。事後誤差共分散更新部48は、上記した「5. 事後誤差共分散更新」の演算を行う。ただし、式(29)に示した式に替えて、補助行列算出部45が算出する補助行列 $\mathbf{A}(k)$ を用いた次式(35)の演算を行ってサンプリング時刻 k の事後誤差共分散行列 $\mathbf{P}(k)$ を算出する。

[0108] [数35]

$$\mathbf{P}(k) = \mathbf{P}^-(k) - \mathbf{G}(k)\mathbf{A}^H(k) \quad \dots (35)$$

[0109] 出力信号算出部49は、上記した「6. 信号出力値」の演算を行う。

[0110] (第1の実施形態のキャリア位相回復部による処理)

次に、図3、図4を参照しつつ、キャリア位相回復部28による処理について説明する。図4は、キャリア位相回復部28による処理の流れを示すフローチャートである。

[0111] 以下に示す処理の前提として、重み行列算出部26は、デジタル信号処理部25が出力する受信信号ベクトル $\mathbf{y}$ を取り込むごとに、取り込んだ受信信号ベクトル $\mathbf{y}$ に対してMIMO線形受信を行う場合に適用する重み行列 $\mathbf{W}$ と

、取り込んだ受信信号ベクトル y とに、サンプリング時刻を示す変数 k を 1 から順に 1 ずつ増やして、 $W(k)$ 、 $y(k)$ として第 3 データベース部 33 に書き込む処理を行う。言い換えると、第 3 データベース部 33 は、重み行列算出部出力データとして $[W(1), y(1)]$ 、 $[W(2), y(2)]$ 、…という時系列のデータを記憶することになる。なお、重み行列算出部 26 は、例えば、送信装置 1 が周期的に送信信号ベクトル x に含めて送信する重み行列算出用のパイロットシンボルを予め内部の記憶領域に記憶させており、送信装置 1 が重み行列算出用のパイロットシンボルを送信した際に、デジタル信号処理部 25 が出力する受信信号ベクトルと、内部の記憶領域が記憶する重み行列算出用のパイロットシンボルとに基づいて、新たな重み行列 W の算出を行っているものとする。

[0112] 第 1 データベース部 31 には、事後状態推定値の初期値としてベクトル $\hat{\phi}(0)$ が予め書き込まれており、事後誤差共分散行列の初期値として、事後誤差共分散行列 $P(0)$ が予め書き込まれているものとする。第 2 データベース部 32 には、システム雑音共分散行列 Q が、式 (20)、(23) に基づいて予め算出されて書き込まれており、観測雑音共分散行列 R が、式 (14)、(25) に基づいて予め算出されて書き込まれているものとする。なお、式 (25) において、 $\sim z(k)$ と、 $\sim z^H(k)$ は、変数としてサンプリング時刻 k を含んでいるが、式 (14) から分かるように $\sim z$ は、送信パワーに変化がなければ定常的な値となる。そのため、観測雑音共分散行列 R の変化は、サンプリング時刻 k の間隔に比べて十分に長い間隔での変化であり、観測雑音共分散行列 R を定常的な値とみなすことができるため、観測雑音共分散行列 R を式 (14)、(25) に基づいて予め算出することができる。

[0113] 時刻更新部 41 は、サンプリング時刻 k の初期値を「1」とし、初期値のサンプリング時刻 ($k=1$) を事前状態推定値更新部 42 に出力する（ステップ S1）。

[0114] 事前状態推定値更新部 42 は、時刻更新部 41 からサンプリング時刻 k を

受けると、受けたサンプリング時刻 k に基づいて、第1データベース部31から事後状態推定値であるベクトル $\hat{\phi}(k-1)$ を読み出して式(21)の演算、すなわち、読み出したベクトル $\hat{\phi}(k-1)$ を事前状態推定値であるベクトル $\hat{\phi}^-(k)$ とする演算を行う。事前状態推定値更新部42は、事前状態推定値であるベクトル $\hat{\phi}^-(k)$ を第1データベース部31に書き込んで更新する。第1データベース部31にサンプリング時刻 $k-1$ のベクトル $\hat{\phi}^-(k-1)$ が書き込まれている場合、事前状態推定値更新部42は、ベクトル $\hat{\phi}^-(k-1)$ を削除してベクトル $\hat{\phi}^-(k)$ を書き込んで更新する。事前状態推定値更新部42は、サンプリング時刻 k を事前誤差共分散更新部43に出力する(ステップS2)。

[0115] 事前誤差共分散更新部43は、事前状態推定値更新部42からサンプリング時刻 k を受けると、受けたサンプリング時刻 k に基づいて、第2データベース部32からシステム雑音共分散行列 Q を読み出す。事前誤差共分散更新部43は、第1データベース部31から事後誤差共分散行列 $P(k-1)$ を読み出す。事前誤差共分散更新部43は、読み出したシステム雑音共分散行列 Q と、事後誤差共分散行列 $P(k-1)$ とに基づいて、式(22)の演算を行って事前誤差共分散行列 $P^-(k)$ を算出する。事前誤差共分散更新部43は、算出した事前誤差共分散行列 $P^-(k)$ を第1データベース部31に書き込んで更新する。第1データベース部31にサンプリング時刻 $k-1$ の事前誤差共分散行列 $P^-(k-1)$ が書き込まれている場合、事前誤差共分散更新部43は、事前誤差共分散行列 $P^-(k-1)$ を削除して事前誤差共分散行列 $P^-(k)$ を書き込んで更新する。事前誤差共分散更新部43は、サンプリング時刻 k を事前出力信号算出部44に出力する(ステップS3)。

[0116] 事前出力信号算出部44は、事前誤差共分散更新部43からサンプリング時刻 k を受けると、受けたサンプリング時刻 k に基づいて、第1データベース部31から事前状態推定値であるベクトル $\hat{\phi}^-(k)$ を読み出す。事前出力信号算出部44は、第3データベース部33から重み行列 $W(k)$ と、受信信号ベクトル $y(k)$ を読み出す。事前出力信号算出部44は、読み出し

た事前状態推定値であるベクトル $\hat{\phi}^-(k)$ と、重み行列 $W(k)$ と、受信信号ベクトル $y(k)$ とに基づいて、次式 (36) の演算を行って事前出力信号であるベクトル $\hat{x}^-(k)$ を算出する。

[0117] [数36]

$$\hat{x}^-(k) = h(\hat{\phi}^-(k)) \cdots (36)$$

[0118] 事前出力信号算出部 44 は、算出した事前出力信号であるベクトル $\hat{x}^-(k)$ と、事前状態推定値であるベクトル $\hat{\phi}^-(k)$ と、重み行列 $W(k)$ と、受信信号ベクトル $y(k)$ とに基づいて、式 (26), (27) に示す行列 $T(k)$ を算出する。事前出力信号算出部 44 は、算出した事前出力信号であるベクトル $\hat{x}^-(k)$ を第 3 データベース部 33 に書き込んで更新する。第 3 データベース部 33 にサンプリング時刻 $k-1$ のベクトル $\hat{x}^-(k-1)$ が書き込まれている場合、事前出力信号算出部 44 は、ベクトル $\hat{x}^-(k-1)$ を削除してベクトル $\hat{x}^-(k)$ を書き込んで更新する。事前出力信号算出部 44 は、算出した行列 $T(k)$ と、サンプリング時刻 k とを補助行列算出部 45 に出力する (ステップ S4)。

[0119] 補助行列算出部 45 は、事前出力信号算出部 44 が出力する行列 $T(k)$ を取り込む。補助行列算出部 45 は、事前出力信号算出部 44 から受けたサンプリング時刻 k に基づいて、第 1 データベース部 31 から事前誤差共分散行列 $P^-(k)$ を読み出す。補助行列算出部 45 は、第 2 データベース部 32 から観測雑音共分散行列 R を読み出す。補助行列算出部 45 は、取り込んだ行列 $T(k)$ と、読み出した事前誤差共分散行列 $P^-(k)$ 及び観測雑音共分散行列 R とに基づいて、式 (31), (32), (33) の演算を行って補助行列 $A(k)$, $B(k)$, $C(k)$ を算出する。

[0120] 補助行列算出部 45 は、算出した補助行列 $A(k)$, $B(k)$, $C(k)$ を第 3 データベース部 33 に書き込んで更新する。第 3 データベース部 33 にサンプリング時刻 $k-1$ の補助行列 $A(k-1)$, $B(k-1)$, $C(k-1)$ が書き込まれている場合、補助行列算出部 45 は、補助行列 $A(k-1)$

1), $B(k-1)$, $C(k-1)$ を削除して補助行列 $A(k)$, $B(k)$, $C(k)$ を書き込んで更新する。補助行列算出部 45 は、サンプリング時刻 k をカルマンゲイン更新部 46 に出力する (ステップ S5)。

[0121] カルマンゲイン更新部 46 は、補助行列算出部 45 からサンプリング時刻 k を受けると、受けたサンプリング時刻 k に基づいて、第 3 データベース部 33 から補助行列 $A(k)$, $C(k)$ を読み出す。カルマンゲイン更新部 46 は、読み出した補助行列 $A(k)$, $C(k)$ に基づいて、式 (34) の演算を行ってカルマンゲイン行列 $G(k)$ を算出する。カルマンゲイン更新部 46 は、算出したカルマンゲイン行列 $G(k)$ を第 3 データベース部 33 に書き込んで更新する。第 3 データベース部 33 にサンプリング時刻 $k-1$ のカルマンゲイン行列 $G(k-1)$ が書き込まれている場合、カルマンゲイン更新部 46 は、カルマンゲイン行列 $G(k-1)$ を削除してカルマンゲイン行列 $G(k)$ を書き込んで更新する。カルマンゲイン更新部 46 は、サンプリング時刻 k を事後状態推定値更新部 47 に出力する (ステップ S6)。

[0122] 事後状態推定値更新部 47 は、カルマンゲイン更新部 46 からサンプリング時刻 k を受けると、受けたサンプリング時刻 k に基づいて、第 3 データベース部 33 からカルマンゲイン行列 $G(k)$ と、事前出力信号であるベクトル $\hat{x}^-(k)$ とを読み出す。事後状態推定値更新部 47 は、第 1 データベース部 31 から事前状態推定値であるベクトル $\hat{\phi}^-(k)$ を読み出す。事後状態推定値更新部 47 は、事前出力信号であるベクトル $\hat{x}^-(k)$ に対して所定の信号変調方式にしたがった仮判定を行うことにより仮判定値ベクトル $x_{HD}(k)$ を算出する。

[0123] 事後状態推定値更新部 47 は、算出した仮判定値ベクトル $x_{HD}(k)$ と、読み出した事前状態推定値であるベクトル $\hat{\phi}^-(k)$ 、カルマンゲイン行列 $G(k)$ 及び事前出力信号であるベクトル $\hat{x}^-(k)$ とに基づいて、式 (28) の演算を行って事後状態推定値であるベクトル $\hat{\phi}(k)$ を算出する。事後状態推定値更新部 47 は、算出した事後状態推定値であるベクトル $\hat{\phi}(k)$ を第 1 データベース部 31 に書き込んで更新する。第 1 データベース

部31にサンプリング時刻 $k-1$ のベクトル $\hat{\phi}(k-1)$ が書き込まれている場合、事後状態推定値更新部47は、ベクトル $\hat{\phi}(k-1)$ を削除してベクトル $\hat{\phi}(k)$ を書き込んで更新する。事後状態推定値更新部47は、サンプリング時刻 k を事後誤差共分散更新部48に出力する（ステップS7）。

[0124] 事後誤差共分散更新部48は、事後状態推定値更新部47からサンプリング時刻 k を受けると、受けたサンプリング時刻 k に基づいて、第3データベース部33からカルマンゲイン行列 $G(k)$ と、補助行列 $A(k)$ とを読み出す。事後誤差共分散更新部48は、第1データベース部31から事後誤差共分散行列 $P^-(k)$ を読み出す。事後誤差共分散更新部48は、読み出したカルマンゲイン行列 $G(k)$ と、補助行列 $A(k)$ と、事前誤差共分散行列 $P^-(k)$ とに基づいて、式(35)の演算を行って事後誤差共分散行列 $P(k)$ を算出する。事後誤差共分散更新部48は、算出した事後誤差共分散行列 $P(k)$ を第1データベース部31に書き込んで更新する。第1データベース部31にサンプリング時刻 $k-1$ の事後誤差共分散行列 $P(k-1)$ が書き込まれている場合、事後誤差共分散更新部48は、事後誤差共分散行列 $P(k-1)$ を削除して事後誤差共分散行列 $P(k)$ を書き込んで更新する。事後誤差共分散更新部48は、サンプリング時刻 k を出力信号算出部49に出力する（ステップS9）。

[0125] 出力信号算出部49は、事後誤差共分散更新部48からサンプリング時刻 k を受けると、受けたサンプリング時刻 k に基づいて、第1データベース部31から事後状態推定値であるベクトル $\hat{\phi}(k)$ を読み出す。出力信号算出部49は、読み出した事後状態推定値であるベクトル $\hat{\phi}(k)$ に基づいて、式(30)の演算を行って送信信号ベクトル x の推定系列であるベクトル $\hat{x}(k)$ を算出し、算出したベクトル $\hat{x}(k)$ の成分である第1データ推定系列、第2データ推定系列、…、第 N_t データ推定系列を外部に出力する。

[0126] 出力信号算出部49は、第3データベース部33を参照し、現在のサンプ

リング時刻 k に 1 を加えたサンプリング時刻 $k + 1$ に対応する受信信号ベクトル $y(k + 1)$ を第 3 データベース部 33 が記憶しているか否かを判定する (ステップ S10)。出力信号算出部 49 は、サンプリング時刻 $k + 1$ に対応する受信信号ベクトル $y(k + 1)$ を第 3 データベース部 33 が記憶していると判定した場合 (ステップ S10、Yes)、サンプリング時刻 k を時刻更新部 41 に出力する。時刻更新部 41 は、サンプリング時刻 k に 1 を加えた値を新たなサンプリング時刻 k とし、新たなサンプリング時刻 k を事前状態推定値更新部 42 に出力する (ステップ S11)。その後、ステップ S2 以降の処理が行われる。

[0127] 一方、出力信号算出部 49 は、サンプリング時刻 $k + 1$ に対応する受信信号ベクトル $y(k + 1)$ を第 3 データベース部 33 が記憶していないと判定した場合 (ステップ S10、No)、処理を終了する。

[0128] 上記の第 1 の実施形態の通信システム 100 において、伝送路 3 は、マルチモードの光ファイバであり、複数の空間モードにより複数の光信号を伝送する。送信装置 1 は、複数の送信部 $11-1 \sim 11-N_t$ を備えており、複数の送信部 $11-1 \sim 11-N_t$ の各々は、各々に与えられる送信データ系列に基づいて、各々が有する搬送波生成部 $13-1 \sim 13-N_t$ が出力する搬送波の連続光を変調して送信光信号を生成し、生成した送信光信号を伝送路 3 に送出する。受信装置 2 は、複数の受信部 $21-1 \sim 21-N_r$ を備えており、複数の受信部 $21-1 \sim 21-N_r$ は、伝送路 3 が複数の空間モードにより伝送する複数の光信号を受信し、受信した受信光信号を、各々が有する局部発振部 $23-1 \sim 23-N_r$ が出力する局部発振信号としての連続光に基づいて復調して受信データ系列を生成する。信号検出部 24 は、重み行列算出部 26 と、キャリア位相回復部 28 とを備えており、重み行列算出部 26 は、受信データ系列に対して MIMO 線形受信を行う際に用いる重み行列 W を算出する。キャリア位相回復部 28 は、複数の搬送波生成部 $13-1 \sim 13-N_t$ と、複数の局部発振部 $23-1 \sim 23-N_r$ とが非同期であるために生じる妨害成分である複数の搬送波生成部 $13-1 \sim 13-N_t$ 及

び複数の局部発振部 $23-1 \sim 23-N_t$ の各々が有する光源の位相揺らぎに起因する位相雑音成分を状態情報とし、事後の状態情報を、事前の状態情報に基づいて算出する予め定められる状態方程式と、送信データ系列を観測情報とし、状態方程式により算出する事後の状態情報と、受信データ系列と、重み行列とに基づいて、事後の状態情報が示す状態における観測情報を算出する予め定められる観測方程式とに対して、カルマンフィルタアルゴリズムを適用して妨害成分の事後状態推定値を算出し、算出した事後状態推定値に基づいて、妨害成分である複数の搬送波生成部 $13-1 \sim 13-N_t$ 及び複数の局部発振部 $23-1 \sim 23-N_t$ の各々が有する光源の位相揺らぎに起因する位相雑音成分を除去した送信データ系列の推定系列を算出する。

[0129] これにより、複数信号を同一伝送媒体の複数のモードで伝送する際、送信装置 1 が生成する搬送波と、受信装置 2 が生成する局部発振信号とが非同期であることにより生じる妨害成分である複数の搬送波生成部 $13-1 \sim 13-N_t$ 及び複数の局部発振部 $23-1 \sim 23-N_t$ の各々が有する光源の位相揺らぎに起因する位相雑音成分を除去することができる。そのため、複数信号を同一伝送媒体の複数のモードで伝送するコヒーレント伝送において、送信装置 1 の搬送波生成部 $13-1 \sim 13-N_t$ の各々が有する光源と、受信装置 2 の局部発振部 $23-1 \sim 23-N_r$ の各々が有する光源において、非同期の光源を適用することが可能になる。言い換えると、送信装置 1 が生成する搬送波と、受信装置 2 が生成する局部発振信号とが非同期である状態で複数信号を同一伝送媒体の複数のモードで伝送することが可能になる。

[0130] (第 2 の実施形態)

以下、本発明の第 2 の実施形態について図面を参照して説明する。図 5 は、第 2 の実施形態の通信システム 100a の構成を示すブロック図である。第 2 の実施形態において、第 1 の実施形態と同一の構成については、同一の符号を付し、以下、異なる構成について説明する。通信システム 100a は、送信装置 1、受信装置 2a 及び送信装置 1 と受信装置 2a の間を接続する伝送路 3 を備える。

[0131] 受信装置 2 a は、光分岐部 2 0、 N_r 個の受信部 $21-1 \sim 21-N_r$ 及び信号検出部 2 4 a を備える。信号検出部 2 4 a は、デジタル信号処理部 2 5、重み行列算出部 2 6、記憶部 2 7 a 及びキャリア位相回復部 2 8 a を備える。記憶部 2 7 a は、図 6 に示すように、第 1 データベース部 3 1 a、第 2 データベース部 3 2 a 及び第 3 データベース部 3 3 a を備える。

[0132] 第 1 データベース部 3 1 a は、事前状態推定値、事後状態推定値、事前誤差共分散行列 P_f^- 、事後誤差共分散行列 P_f を記憶する。事前状態推定値と事後状態推定値は、ベクトルであり、それぞれ次式 (37)、(38) として表される。

[0133] [数37]

$$\hat{\omega}^- \quad \dots \quad (37)$$

[0134] [数38]

$$\hat{\omega} \quad \dots \quad (38)$$

[0135] 以下、本文では、式 (37) の事前状態推定値を表す記号を、ベクトル $\hat{\omega}^-$ と記載し、式 (38) の事後状態推定値を表す記号を、ベクトル $\hat{\omega}$ と記載する。

[0136] 第 2 データベース部 3 2 a は、システム雑音共分散行列 Q_f と、観測雑音共分散行列 R とを記憶する。

[0137] 第 3 データベース部 3 3 a は、重み行列算出部出力データ、ベクトル $\hat{x}^-$ である事前出力信号、カルマンゲイン行列 G_f 、補助行列 A、補助行列 B 及び補助行列 C を記憶する。重み行列算出部出力データは、第 1 の実施形態と同様に、重み行列算出部 2 6 によって書き込まれるデータであり、重み行列 W と、受信信号ベクトル y とが含まれる。なお、第 1 の実施形態の図 2 と同様に、図 6 においても、サンプリング時刻を示す変数 k を付さずに示している。

[0138] キャリア位相回復部 2 8 a は、搬送波生成部 $13-1 \sim 13-N_t$ の位相揺らぎに起因する妨害成分と、局部発振部 $23-1 \sim 23-N_r$ の位相揺ら

ぎに起因する妨害成分とを推定する。キャリア位相回復部 28 a は、検出した 2 つの妨害成分を除去した送信信号ベクトル x の推定系列を算出する。

[0139] 第 2 の実施形態では、キャリア位相回復部 28 a は、2 つの妨害成分として、搬送波生成部 13-1 ~ 13- N_t の各々の光源の位相揺らぎに起因する位相雑音成分及び周波数オフセット成分という妨害成分と、局部発振部 23-1 ~ 23- N_r の各々の光源の位相揺らぎに起因する位相雑音成分及び周波数オフセット成分という妨害成分とを推定する。

[0140] ここで、搬送波生成部 13-1 ~ 13- N_t の各々の光源の周波数揺らぎに起因する周波数オフセット成分を $\phi_1^t, \phi_2^t, \dots, \phi_{N_t}^t$ とし、局部発振部 23-1 ~ 23- N_r の各々の光源の周波数揺らぎに起因する周波数オフセット成分を、 $\phi_1^r, \phi_2^r, \dots, \phi_{N_r}^r$ とする。ここで、搬送波生成部 13-1 ~ 13- N_t の各々の光源の周波数揺らぎに起因する周波数オフセット成分 $\phi_1^t, \phi_2^t, \dots, \phi_{N_t}^t$ を成分とする列ベクトルである周波数オフセット成分ベクトル ϕ^t を次式 (39) として定義する。

[0141] [数39]

$$\psi^t \triangleq \begin{pmatrix} \psi_1^t \\ \vdots \\ \psi_{N_t}^t \end{pmatrix} \dots (39)$$

[0142] 局部発振部 23-1 ~ 23- N_r の各々の光源の周波数揺らぎに起因する周波数オフセット成分、 $\phi_1^r, \phi_2^r, \dots, \phi_{N_r}^r$ を成分とする列ベクトルである周波数オフセット成分ベクトル ϕ^r を次式 (40) として定義する。

[0143] [数40]

$$\psi^r \triangleq \begin{pmatrix} \psi_1^r \\ \vdots \\ \psi_{N_r}^r \end{pmatrix} \dots (40)$$

[0144] キャリア位相回復部 28 a が推定する対象である位相雑音成分ベクトル ϕ^t , ϕ^r と、周波数オフセット成分ベクトル ϕ^t , ϕ^r とを含むベクトル ω を次式 (41) により定義する。

[0145] [数41]

$$\boldsymbol{\omega} \triangleq \begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}^t \\ \boldsymbol{\phi}^r \\ \boldsymbol{\psi}^t \\ \boldsymbol{\psi}^r \end{bmatrix} \quad \dots (41)$$

[0146] この場合、キャリア位相回復部 28 a が推定するベクトル $\boldsymbol{\omega}$ に関する状態方程式は、次式 (42) として表すことができる。

[0147] [数42]

$$\boldsymbol{\omega}(k+1) = \boldsymbol{M}\boldsymbol{\omega}(k) + \boldsymbol{\nu}(k) \quad \dots (42)$$

[0148] 式 (42) において、行列 $\boldsymbol{M}$ は、次式 (43) として表され、ベクトル $\boldsymbol{\nu}(k)$ は、次式 (44) として表される。

[0149] [数43]

$$\boldsymbol{M} \triangleq \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{N_t+N_r} & \boldsymbol{I}_{N_t+N_r}^{(i)} \\ \mathbf{0}_{N_t+N_r, N_t+N_r} & \boldsymbol{I}_{N_t+N_r} \end{bmatrix} \quad \dots (43)$$

[0150] [数44]

$$\boldsymbol{\nu}(k) \triangleq \begin{bmatrix} \boldsymbol{\nu}(k) \\ \mathbf{0}_{N_t+N_r, 1} \end{bmatrix} \quad \dots (44)$$

[0151] 式 (43), (44) において、次式 (45) の記号は、 m 行 n 列の全成分を 0 とする行列を意味している。

[0152] [数45]

$$\mathbf{0}_{m,n} \quad \dots (45)$$

[0153] 次式 (46) の記号は、 m 行 n 列の単位行列のうち第 (i, i) 成分を 0 にした行列を意味している。

[0154] [数46]

$$\boldsymbol{I}_m^{(i)} \quad \dots (46)$$

[0155] 式（４４）の右辺に示すベクトル $\mathbf{v}(k)$ は、第１の実施形態において式（２０）によって示したベクトルである。

[0156] 第２の実施形態における観測方程式は、第１の実施形態と同様に、式（１８）に示す式であり、式（１８）により示される観測方程式と、式（４２）により示される状態方程式とに基づくカルマンフィルタアルゴリズムは、１ a. 事前状態推定値更新、２ a. 事前誤算共分散更新、３ a. カルマンゲイン更新、４ a. 事後状態推定値更新、５ a. 事後誤差共分散更新、６ a. 信号出力値という一連の演算を繰り返すアルゴリズムになる。「１ a. 事前状態推定値更新」の演算は、式（４７）によって表される。

[0157] [数47]

$$\hat{\omega}^-(k) = \mathbf{M}\hat{\omega}(k-1) \quad \dots (47)$$

[0158] 上記の式（４７）において、ベクトル $\hat{\omega}^-(k)$ は、式（３７）に示した事前状態推定値であってサンプリング時刻が（ k ）の場合の事前状態推定値であり、ベクトル $\hat{\omega}(k-1)$ は、式（３８）に示した事後状態推定値であってサンプリング時刻が（ $k-1$ ）の場合の事後状態推定値である。「２ a. 事前誤差共分散更新」の演算は、次式（４８）によって表される。

[0159] [数48]

$$\mathbf{P}_f^-(k) = \mathbf{M}\mathbf{P}_f(k-1)\mathbf{M}^H + \mathbf{Q}_f \quad \dots (48)$$

[0160] 上記の式（４８）において、行列 $\mathbf{P}^-(k)$ は、サンプリング時刻が（ k ）の場合の事前誤差共分散行列であり、行列 $\mathbf{P}(k-1)$ は、サンプリング時刻が（ $k-1$ ）の場合の事後誤差共分散行列である、行列 $\mathbf{Q}_f$ は、次式（４９）により定義されるシステム雑音共分散行列であり、次式（４９）の $E[\cdot]$ は、期待値演算を示す記号である。

[0161] [数49]

$$\mathbf{Q}_f \triangleq E[\mathbf{v}(k)\mathbf{v}^H(k)] \quad \dots (49)$$

[0162] 「３ a. カルマンゲイン更新」の演算は、次式（５０）として表される。

[0163] [数50]

$$\mathbf{G}_f(k) = \mathbf{P}_f^-(k) \mathbf{T}_f^H(k) \left[\mathbf{T}_f(k) \mathbf{P}_f^-(k) \mathbf{T}_f^H(k) + \mathbf{R} \right]^{-1} \quad \dots (50)$$

[0164] 上記の式 (50) において、行列 $\mathbf{G}_f(k)$ は、第2の実施形態におけるカルマンゲイン行列であり、行列 $\mathbf{R}$ は、第1の実施形態と同様に、式 (25) によって表される観測雑音共分散行列である。

[0165] 行列 $\mathbf{T}_f$ は、次式 (51) により定義される行列である。

[0166] [数51]

$$\mathbf{T}_f \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{0}_{N_t, N_t + N_r} \end{bmatrix} \quad \dots (51)$$

[0167] 式 (51) に示す行列 $\mathbf{T}$ は、第1の実施形態において、式 (26) に示した行列である。なお、式 (51) では、行列 $\mathbf{T}_f(k)$ を、式の記載の見易さの観点からサンプリング時刻を示す変数 k を省略して表記しているが、行列 $\mathbf{T}_f(k)$ の成分は、サンプリング時刻ごとに値であり、サンプリング時刻を考慮した正式な表記は、次式 (52) である。

[0168] [数52]

$$\mathbf{T}_f(k) = \left. \frac{\partial h(\omega)}{\partial \omega} \right|_{\omega = \hat{\omega}^-(k)} \quad \dots (52)$$

[0169] 「4 a. 事後状態推定値更新」の演算は、次式 (53) により表される。

[0170] [数53]

$$\hat{\omega}(k) = \hat{\omega}^-(k) + \mathbf{G}_f(k) [\mathbf{x}_{HD}(k) - \hat{\mathbf{x}}^-(k)] \quad \dots (53)$$

[0171] 「5 a. 事後誤差共分散更新」の演算は、次式 (54) により表される。

[0172] [数54]

$$\mathbf{P}_f(k) = [\mathbf{I}_{2N_t + 2N_r} - \mathbf{G}_f(k) \mathbf{T}_f(k)] \mathbf{P}_f^-(k) \quad \dots (54)$$

[0173] 「6 a. 信号出力値」の演算は、次式 (55) により表される。式 (55

）において、式（１７）に示した非線形関数 $h(\cdot)$ に、事後状態推定値であるベクトル $\hat{\omega}(k)$ を代入する式を示しているが、非線形関数 $h(\cdot)$ の演算は、第１の実施形態の事後状態推定値であるベクトル $\hat{\phi}(k)$ を対象とする関数である。そのため、式（５５）で示す演算は、実質的には、非線形関数 $h(\cdot)$ に、ベクトル $\hat{\omega}(k)$ に含まれるベクトル $\hat{\phi}(k)$ を代入する演算であり、式（５５）に示す関係が成り立つ。式（５５）のベクトル $\hat{x}(k)$ が、第２の実施形態における送信信号ベクトル x の推定系列になる。

[0174] [数55]

$$\hat{x}(k) = h(\hat{\omega}(k)) = h(\hat{\phi}(k)) \quad \dots (55)$$

[0175] 図７は、上記した第２の実施形態のカルマンフィルタアルゴリズムを実行するキャリア位相回復部２８ａが備える機能部と、各々の機能部が、記憶部２７ａが備える第１データベース部３１ａ、第２データベース部３２ａ及び第３データベース部３３ａのいずれを利用するかを示したブロック図である。キャリア位相回復部２８ａは、時刻更新部４１、事前状態推定値更新部４２ａ、事前誤差共分散更新部４３ａ、事前出力信号算出部４４ａ、補助行列算出部４５ａ、カルマンゲイン更新部４６ａ、事後状態推定値更新部４７ａ、事後誤差共分散更新部４８ａ及び出力信号算出部４９ａを備える。

[0176] 事前状態推定値更新部４２ａは、上記した「１．事前状態推定値更新」の演算を行う。事前誤差共分散更新部４３ａは、上記した「２．事前誤差共分散更新」の演算を行う。事前出力信号算出部４４ａは、上記した「４．事後状態推定値更新」の演算において用いられるサンプリング時刻 k における事前出力信号ベクトル $\hat{x}^-(k)$ と、上記した「３．カルマンゲイン更新」の演算において用いられるサンプリング時刻 k における行列 $T_f(k)$ とを算出する。

[0177] 補助行列算出部４５ａは、上記した「３．カルマンゲイン更新」と「５．事後誤差共分散更新」の演算において用いられる次式（５６）～式（５

8)により表される3つの補助行列 $A(k)$, $B(k)$, $C(k)$ を算出する。

[0178] [数56]

$$\mathbf{A}(k) = \mathbf{P}_f^-(k) \mathbf{T}_f^H(k) \quad \dots (56)$$

[0179] [数57]

$$\mathbf{B}(k) = \mathbf{T}_f(k) \mathbf{A}(k) \quad \dots (57)$$

[0180] [数58]

$$\mathbf{C}(k) = (\mathbf{B}(k) + \mathbf{R})^{-1} \quad \dots (58)$$

[0181] カルマンゲイン更新部46aは、上記の「3a. カルマンゲイン更新」の演算を行う。ただし、式(50)に示した式に替えて、補助行列算出部45aが算出する補助行列 $A(k)$ と、補助行列 $C(k)$ とを用いて、次式(59)の演算を行ってカルマンゲイン行列 $G_f(k)$ を算出する。

[0182] [数59]

$$\mathbf{G}_f(k) = \mathbf{A}(k) \mathbf{C}(k) \quad \dots (59)$$

[0183] 事後状態推定値更新部47aは、上記した「4a. 事後状態推定値更新」の演算を行う。事後誤差共分散更新部48aは、上記した「5a. 事後誤差共分散更新」の演算を行う。ただし、式(54)に示した式に替えて、補助行列算出部45aが算出する補助行列 $A(k)$ を用いた式(60)の演算を行って事後誤差共分散行列 $P_f(k)$ を算出する。

[0184] [数60]

$$\mathbf{P}_f(k) = \mathbf{P}_f^-(k) - \mathbf{G}_f(k) \mathbf{A}^H(k) \quad \dots (60)$$

[0185] 出力信号算出部49aは、上記した「6a. 信号出力値」の演算を行う。

[0186] (第2の実施形態のキャリア位相回復部による処理)

次に、図7、図8を参照しつつ、キャリア位相回復部28aによる処理について説明する。図8は、キャリア位相回復部28aによる処理の流れを示

すフローチャートである。

[0187] 以下に示す処理の前提として、第1の実施形態と同様に、重み行列算出部26は、デジタル信号処理部25が出力する受信信号ベクトル y を取り込むごとに、取り込んだ受信信号ベクトル y に対してMIMO線形受信を行う場合に適用する重み行列 W と、取り込んだ受信信号ベクトル y とに、サンプリング時刻を示す変数 k を1から順に1ずつ増やして、 $W(k)$ 、 $y(k)$ として第3データベース部33aに書き込む処理を行う。言い換えると、第3データベース部33aは、重み行列算出部出力データとして $[W(1), y(1)]$ 、 $[W(2), y(2)]$ 、…という時系列のデータを記憶することになる。なお、重み行列算出部26は、例えば、送信装置1が周期的に送信信号ベクトル x に含めて送信する重み行列算出用のパイロットシンボルを予め内部の記憶領域に記憶させており、送信装置1が重み行列算出用のパイロットシンボルを送信した際に、デジタル信号処理部25が出力する受信信号ベクトルと、内部の記憶領域が記憶する重み行列算出用のパイロットシンボルとに基づいて、新たな重み行列 W の算出を行っているものとする。

[0188] 第1データベース部31aには、事後状態推定値の初期値としてベクトル $\hat{\omega}(0)$ が予め書き込まれており、事後誤差共分散行列の初期値として、事後誤差共分散行列 $P_f(0)$ が予め書き込まれているものとする。第2データベース部32aには、システム雑音共分散行列 Q_f が、式(44)、(49)に基づいて予め算出されて書き込まれており、観測雑音共分散行列 R が、式(14)、(25)に基づいて予め算出されて書き込まれているものとする。事前状態推定値更新部42aと事前誤差共分散更新部43aの各々は、内部の記憶領域に式(43)に示した行列 M を予め記憶させている。

[0189] 時刻更新部41は、サンプリング時刻 k の初期値を「1」とし、初期値のサンプリング時刻($k=1$)を事前状態推定値更新部42aに出力する(ステップS a1)。

[0190] 事前状態推定値更新部42aは、時刻更新部41からサンプリング時刻 k を受けると、受けたサンプリング時刻 k に基づいて、第1データベース部3

1 a から事後状態推定値であるベクトル $\hat{\omega} (k-1)$ を読み出す。事前状態推定値更新部 4 2 a は、読み出した事後状態推定値であるベクトル $\hat{\omega} (k-1)$ と、内部の記憶領域が記憶する行列 M とに基づいて、式 (4 7) の演算を行って事前状態推定値であるベクトル $\hat{\omega}^- (k)$ を算出する。事前状態推定値更新部 4 2 a は、算出した事前状態推定値であるベクトル $\hat{\omega}^- (k)$ を第 1 データベース部 3 1 a に書き込んで更新する。第 1 データベース部 3 1 a にサンプリング時刻 $k-1$ のベクトル $\hat{\omega}^- (k-1)$ が書き込まれている場合、事前状態推定値更新部 4 2 a は、ベクトル $\hat{\omega}^- (k-1)$ を削除してベクトル $\hat{\omega}^- (k)$ を書き込んで更新する。事前状態推定値更新部 4 2 a は、サンプリング時刻 k を事前誤差共分散更新部 4 3 a に出力する（ステップ S a 2）。

[0191] 事前誤差共分散更新部 4 3 a は、事前状態推定値更新部 4 2 a からサンプリング時刻 k を受けると、受けたサンプリング時刻 k に基づいて、第 2 データベース部 3 2 a からシステム雑音共分散行列 Q_f を読み出す。事前誤差共分散更新部 4 3 a は、第 1 データベース部 3 1 a から事後誤差共分散行列 $P_f (k-1)$ を読み出す。事前誤差共分散更新部 4 3 a は、読み出したシステム雑音共分散行列 Q_f と、事後誤差共分散行列 $P_f (k-1)$ と、内部の記憶領域が記憶する行列 M とに基づいて、式 (4 8) の演算を行って事前誤差共分散行列 $P_f^- (k)$ を算出する。事前誤差共分散更新部 4 3 a は、算出した事前誤差共分散行列 $P_f^- (k)$ を第 1 データベース部 3 1 a に書き込んで更新する。第 1 データベース部 3 1 a にサンプリング時刻 $k-1$ の事前誤差共分散行列 $P_f^- (k-1)$ が書き込まれている場合、事前誤差共分散更新部 4 3 a は、事前誤差共分散行列 $P_f^- (k-1)$ を削除して事前誤差共分散行列 $P_f^- (k)$ を書き込んで更新する。事前誤差共分散更新部 4 3 a は、サンプリング時刻 k を事前出力信号算出部 4 4 a に出力する（ステップ S a 3）。

[0192] 事前出力信号算出部 4 4 a は、事前誤差共分散更新部 4 3 a からサンプリング時刻 k を受けると、受けたサンプリング時刻 k に基づいて、第 1 データベース部 3 1 a から事前状態推定値であるベクトル $\hat{\omega}^- (k)$ を読み出す。

事前出力信号算出部44aは、第3データベース部33aから重み行列 $W(k)$ と、受信信号ベクトル $y(k)$ を読み出す。事前出力信号算出部44aは、読み出した事前状態推定値であるベクトル $\hat{\omega}^-(k)$ に含まれるベクトル $\hat{\phi}^-(k)$ と、重み行列 $W(k)$ と、受信信号ベクトル $y(k)$ とに基づいて、式(36)の演算を行って事前出力信号であるベクトル $\hat{x}^-(k)$ を算出する。

[0193] 事前出力信号算出部44aは、算出した事前出力信号であるベクトル $\hat{x}^-(k)$ と、事前状態推定値であるベクトル $\hat{\omega}^-(k)$ と、重み行列 $W(k)$ と、受信信号ベクトル $y(k)$ とに基づいて、式(26)，(27)に示す行列 $T(k)$ を算出する。事前出力信号算出部44aは、算出した行列 $T(k)$ に基づいて、式(51)，(52)に示す行列 $T_f(k)$ を算出する。事前出力信号算出部44aは、算出した事前出力信号であるベクトル $\hat{x}^-(k)$ を第3データベース部33aに書き込んで更新する。第3データベース部33aにサンプリング時刻 $k-1$ のベクトル $\hat{x}^-(k-1)$ が書き込まれている場合、事前出力信号算出部44aは、ベクトル $\hat{x}^-(k-1)$ を削除してベクトル $\hat{x}^-(k)$ を書き込んで更新する。事前出力信号算出部44aは、算出した行列 $T_f(k)$ と、サンプリング時刻 k とを補助行列算出部45aに出力する(ステップS a4)。

[0194] 補助行列算出部45aは、事前出力信号算出部44aが出力する行列 $T_f(k)$ (k)を取り込む。補助行列算出部45aは、事前出力信号算出部44aから受けたサンプリング時刻 k に基づいて、第1データベース部31aから事前誤差共分散行列 $P_f^-(k)$ を読み出す。補助行列算出部45aは、第2データベース部32aから観測雑音共分散行列 R を読み出す。補助行列算出部45aは、取り込んだ行列 $T(k)$ と、読み出した事前誤差共分散行列 $P_f^-(k)$ 及び観測雑音共分散行列 R とに基づいて、式(56)，(57)，(58)の演算を行って補助行列 $A(k)$ ， $B(k)$ ， $C(k)$ を算出する。

[0195] 補助行列算出部45aは、算出した補助行列 $A(k)$ ， $B(k)$ ， $C(k)$ を第3データベース部33aに書き込んで更新する。第3データベース部

33aにサンプリング時刻 $k-1$ の補助行列 $A(k-1)$, $B(k-1)$, $C(k-1)$ が書き込まれている場合、補助行列算出部45aは、補助行列 $A(k-1)$, $B(k-1)$, $C(k-1)$ を削除して補助行列 $A(k)$, $B(k)$, $C(k)$ を書き込んで更新する。補助行列算出部45aは、サンプリング時刻 k をカルマンゲイン更新部46aに出力する(ステップSa5)。

[0196] カルマンゲイン更新部46aは、補助行列算出部45aからサンプリング時刻 k を受けると、受けたサンプリング時刻 k に基づいて、第3データベース部33aから補助行列 $A(k)$, $C(k)$ を読み出す。カルマンゲイン更新部46aは、読み出した補助行列 $A(k)$, $C(k)$ に基づいて、式(59)の演算を行ってカルマンゲイン行列 $G_f(k)$ を算出する。カルマンゲイン更新部46aは、算出したカルマンゲイン行列 $G_f(k)$ を第3データベース部33aに書き込んで更新する。第3データベース部33aにサンプリング時刻 $k-1$ のカルマンゲイン行列 $G_f(k-1)$ が書き込まれている場合、カルマンゲイン更新部46aは、カルマンゲイン行列 $G_f(k-1)$ を削除してカルマンゲイン行列 $G_f(k)$ を書き込んで更新する。カルマンゲイン更新部46aは、サンプリング時刻 k を事後状態推定値更新部47aに出力する(ステップSa6)。

[0197] 事後状態推定値更新部47aは、カルマンゲイン更新部46aからサンプリング時刻 k を受けると、受けたサンプリング時刻 k に基づいて、第3データベース部33aからカルマンゲイン行列 $G_f(k)$ と、事前出力信号であるベクトル $\hat{x}^-(k)$ を読み出す。事後状態推定値更新部47aは、第1データベース部31aから事前状態推定値であるベクトル $\hat{\omega}^-(k)$ を読み出す。事後状態推定値更新部47aは、事前出力信号であるベクトル $\hat{x}^-(k)$ に対して所定の信号変調方式にしたがった仮判定を行うことにより仮判定値ベクトル $x_{HD}(k)$ を算出する。

[0198] 事後状態推定値更新部47aは、算出した仮判定値ベクトル $x_{HD}(k)$ と、読み出した事前状態推定値であるベクトル $\hat{\omega}^-(k)$ 、カルマンゲイン行

列 $G_f(k)$ 及び事前出力信号であるベクトル $\hat{x}^-(k)$ とに基づいて、式 (53) の演算を行って事後状態推定値であるベクトル $\hat{\omega}(k)$ を算出する。事後状態推定値更新部 47a は、算出した事後状態推定値であるベクトル $\hat{\omega}(k)$ を第1データベース部 31a に書き込んで更新する。第1データベース部 31a にサンプリング時刻 $k-1$ のベクトル $\hat{\omega}(k-1)$ が書き込まれている場合、事後状態推定値更新部 47a は、ベクトル $\hat{\omega}(k-1)$ を削除してベクトル $\hat{\omega}(k)$ を書き込んで更新する。事後状態推定値更新部 47a は、サンプリング時刻 k を事後誤差共分散更新部 48a に出力する (ステップ S a 7)。

[0199] 事後誤差共分散更新部 48a は、事後状態推定値更新部 47a からサンプリング時刻 k を受けると、受けたサンプリング時刻 k に基づいて、第3データベース部 33a からカルマンゲイン行列 $G_f(k)$ と、補助行列 $A(k)$ とを読み出す。事後誤差共分散更新部 48a は、第1データベース部 31a から事後誤差共分散行列 $P_f^-(k)$ を読み出す。事後誤差共分散更新部 48a は、読み出したカルマンゲイン行列 $G_f(k)$ と、補助行列 $A(k)$ と、事前誤差共分散行列 $P_f^-(k)$ とに基づいて、式 (60) の演算を行って事後誤差共分散行列 $P_f(k)$ を算出する。事後誤差共分散更新部 48a は、算出した事後誤差共分散行列 $P_f(k)$ を第1データベース部 31a に書き込んで更新する。第1データベース部 31a にサンプリング時刻 $k-1$ の事後誤差共分散行列 $P_f(k-1)$ が書き込まれている場合、事後誤差共分散更新部 48a は、事後誤差共分散行列 $P_f(k-1)$ を削除して事後誤差共分散行列 $P_f(k)$ を書き込んで更新する。事後誤差共分散更新部 48a は、サンプリング時刻 k を出力信号算出部 49a に出力する (ステップ S a 9)。

[0200] 出力信号算出部 49a は、事後誤差共分散更新部 48a からサンプリング時刻 k を受けると、受けたサンプリング時刻 k に基づいて、第1データベース部 31a から事後状態推定値であるベクトル $\hat{\omega}(k)$ を読み出す。出力信号算出部 49a は、読み出した事後状態推定値であるベクトル $\hat{\omega}(k)$ に基づいて、式 (55) の演算を行って送信信号ベクトル x の推定系列であ

るベクトル $\hat{x}(k)$ を算出し、算出したベクトル $\hat{x}(k)$ の成分である第1データ推定系列、第2データ推定系列、…、第 N_t データ推定系列を外部に出力する。

[0201] 出力信号算出部49aは、第3データベース部33aを参照し、現在のサンプリング時刻 k に1を加えたサンプリング時刻 $k+1$ に対応する受信信号ベクトル $y(k+1)$ を第3データベース部33aが記憶しているか否かを判定する(ステップS a 10)。出力信号算出部49aは、サンプリング時刻 $k+1$ に対応する受信信号ベクトル $y(k+1)$ を第3データベース部33aが記憶していると判定した場合(ステップS a 10、Yes)、サンプリング時刻 k を時刻更新部41に出力する。時刻更新部41は、サンプリング時刻 k に1を加えた値を新たなサンプリング時刻 k とし、新たなサンプリング時刻 k を事前状態推定値更新部42aに出力する(ステップS a 11)。その後、ステップS a 2以降の処理が行われる。

[0202] 一方、出力信号算出部49aは、サンプリング時刻 $k+1$ に対応する受信信号ベクトル $y(k+1)$ を第3データベース部33aが記憶していないと判定した場合(ステップS a 10、No)、処理を終了する。

[0203] 上記の第2の実施形態では、除外する妨害成分として、第1の実施形態の妨害成分である複数の搬送波生成部13-1～13- N_t 及び複数の局部発振部23-1～23- N_t の各々が有する光源の位相揺らぎに起因する位相雑音成分に加えて、更に、複数の搬送波生成部13-1～13- N_t 及び複数の局部発振部23-1～23- N_t の各々が有する光源の周波数揺らぎに起因する周波数オフセット成分を含めている。これにより、複数の搬送波生成部13-1～13- N_t 及び複数の局部発振部23-1～23- N_t の各々が有する光源の位相揺らぎに起因する位相雑音成分と共に、複数の搬送波生成部13-1～13- N_t 及び複数の局部発振部23-1～23- N_t の各々が有する光源の周波数揺らぎに起因する周波数オフセット成分を除去することが可能になる。そのため、複数信号を同一伝送媒体の複数のモードで伝送するコヒーレント伝送において、送信装置1の搬送波生成部13-1～

13-Ntの各々が有する光源と、受信装置2の局部発振部23-1~23-Nrの各々が有する光源について非同期光源を適用することが可能になる。言い換えると、送信装置1が生成する搬送波と、受信装置2aが生成する局部発振信号とが非同期である状態で複数信号を同一伝送媒体の複数のモードで伝送することが可能になる。更に、第2の実施形態の通信システム100aでは、複数の搬送波生成部13-1~13-Nt及び複数の局部発振部23-1~23-Ntの各々が有する光源の周波数揺らぎに起因する周波数オフセット成分を除去するため、第1の通信システム100よりも高い精度で送信信号ベクトルの推定系列を推定することが可能となる

[0204] なお、上記の第1及び第2の実施形態では、デジタル信号処理部25がデジタル信号処理を行って出力するNr個の受信データ系列を成分とするベクトルを受信信号ベクトルyとしている。これに対して、デジタル信号処理部25を備えずに、重み行列算出部26が、受信処理部22-1~22-Nrが出力するNr個の受信データ系列を直接取り込むようにしてもよい。この場合、受信処理部22-1~22-Nrが出力するNr個の受信データ系列が受信信号ベクトルyとなる。

[0205] (第3の実施形態)

第1及び第2の実施形態では、カルマンゲイン更新部46、46aは、式(28)及び式(53)において、事前信号推定値ベクトル $\hat{x}^-(k)$ に対して所定の信号変調方式にしたがった仮判定を行うことにより得られる仮判定値ベクトル $x_{HD}(k)$ を用いていた。そのため、事前信号推定値ベクトル $\hat{x}^-(k)$ の精度によっては、仮判定値ベクトル $x_{HD}(k)$ は誤りを含むことがあり、キャリア位相回復の性能を劣化させることになる。第3の実施形態では、仮判定値ベクトル $x_{HD}(k)$ に替えて予め定められるパイロットシンボルを用いて、キャリア位相回復の性能を劣化させないようにする構成を備える。

[0206] 図9は、第3の実施形態による通信システム100bの構成を示すブロック図である。第3の実施形態において、第1の実施形態と同一の構成につい

ては同一の符号を付し、以下、異なる構成について説明する。通信システム 100bは、送信装置1b、伝送路3及び受信装置2bを備える。送信装置1bは、送信部11b-1～11b- N_t 及び光結合部10を備える。送信部11b-1は、送信処理部12b-1及び搬送波生成部13-1を備え、同様に、送信部11b-2～11b- N_t の各々は、符号の枝番号に対応する送信処理部12b-2～12b- N_t 及び搬送波生成部13-2～13- N_t を備える。

[0207] 送信処理部12b-1～12b- N_t は、第1の実施形態の送信処理部12-1～12- N_t が備える構成に加えて、各々が取り込む第1データ系列～第 N_t データ系列から生成する信号フレームの先頭等の予め定められるパイロットシンボルを周期的に挿入する。

[0208] 受信装置2bは、光分岐部20、受信部21-1～21- N_r 及び信号検出部24bを備える。信号検出部24bは、デジタル信号処理部25、重み行列算出部26、記憶部27及びキャリア位相回復部28bを備える。

[0209] キャリア位相回復部28bは、図10に示すように、第1の実施形態のキャリア位相回復部28が備えるカルマンゲイン更新部46に替えてカルマンゲイン更新部46bを備える他は、第1の実施形態のキャリア位相回復部28と同一の構成を有する。

[0210] キャリア位相回復部28bは、内部の記憶領域に、送信装置1bが挿入する予め定められるパイロットシンボルと、パイロットシンボルが挿入される周期を予め記憶する。ここで、パイロットシンボルは、送信信号ベクトル x と同様に N_t 個のデータ系列を含むベクトルである。

[0211] カルマンゲイン更新部46bは、式(28)の演算の一部、すなわち送信処理部12b-1～12b- N_t が周期的に挿入するパイロットシンボルが受信信号ベクトル $y(k)$ に含まれるサンプリング時刻 k のタイミングにおいて行う式(28)の演算において、仮判定値ベクトル $x_{HD}(k)$ に替えて、内部の記憶領域が予め記憶するパイロットシンボルを用いて演算を行う。

[0212] これにより、第3の実施形態では、仮判定値ベクトル $x_{HD}(k)$ の一部を

、送信装置 1 b と、受信装置 2 b とにおいて既知であるパイロットシンボルに置き換えて演算を行うことから、事前信号推定値ベクトル $\hat{x}^-(k)$ の精度が低い場合であっても、キャリア位相回復の性能を劣化させないようにすることが可能となる。

[0213] なお、第 3 の実施形態の構成は、第 1 の実施形態にパイロットシンボルを利用する構成を加えているが、第 2 の実施形態の通信システム 100 a に対しても同様にパイロットシンボルを利用する構成を加えることができ、それにより、式 (53) の演算において、仮判定値ベクトル $x_{HD}(k)$ の一部に替えて、パイロットシンボルを適用することができ、事前信号推定値であるベクトル $\hat{x}^-(k)$ の精度が低い場合であっても、キャリア位相回復の性能を劣化させないようにすることが可能となる。

[0214] 上記の第 3 の実施形態では、送信処理部 12 b-1 ~ 12 b-N t は、信号フレームの先頭等の予め定められるパイロットシンボルを周期的に挿入している。これに対して、数百シンボルごとにパイロットシンボルを周期的に挿入してもよいし、通信状況に応じてパイロットシンボルを挿入する周期を適応的かつ可変的に変えるようにしてもよい。ただし、パイロットシンボルを挿入する周期を可変にする場合、受信装置 2 b のキャリア位相回復部 28 b のカルマンゲイン更新部 46 b に対して、パイロットシンボルが挿入されるタイミングを通知する手段が必要となる。第 3 の実施形態のパイロットシンボルとして、第 1 及び第 2 の実施形態において、重み行列算出部 26 が、重み行列 W の算出に用いる重み行列算出用のパイロットシンボルを用いるようにしてもよい。

[0215] 上記の第 3 の実施形態の構成により、送信装置 1 b がパイロットシンボルを送信するタイミングにおいて、式 (28) の演算を行う際に、ベクトル $x_{HD}(k)$ に替えて、受信装置 2 b において予め記憶するパイロットシンボルを用いて事後状態推定値であるベクトル $\hat{\phi}(k)$ を算出することができる。そのため、事前信号推定値であるベクトル $\hat{x}^-(k)$ の精度が低い場合であっても、キャリア位相回復の性能を劣化させないようにすることが可能にな

り、第1及び第2の実施形態の構成に比べて、より精度よく妨害成分を除去した送信データ系列の推定系列を算出することが可能になる。

[0216] (シミュレーション結果)

図11は、2つの独立した送信データ系列の送信に対して、 $N_t = N_r = 2$ である第1の実施形態の通信システム100を適用してモード多重伝送のシミュレーションを行った結果を示すグラフである。送信装置1の送信部11-1, 11-2の送信処理部12-1, 12-2は、各々が取り込む2つの独立した送信データ系列である第1データ系列のビット列及び第2データ系列のビット列を、信号変調速度10Gbaudの16QAM(Quadrature Amplitude Modulation)信号として変調して光信号を生成する。光結合部10は、送信処理部12-1, 12-2が生成した2つの光信号を結合して、伝送路3に送出する。伝送路3において、2つの独立した送信データ系列に対応する光信号が等しいパワーで混合する。

[0217] なお、シミュレーションにおいて、伝送路3を伝搬した後の信号対雑音比 γ は、17dBであると仮定している。送信装置1が備える2つの搬送波生成部13-1, 13-2と、受信装置2が備える2つの局部発振部23-1, 23-2の線幅は、100kHzであると仮定している。さらに、第1データ系列の変調に用いられる搬送波生成部13-1に起因するデジタル信号段での位相 ϕ_1^t を参照角に定めて $\phi_1^t = 0$ としている。

[0218] 図11に示す6つのグラフにおいて、横軸は、シンボル番号であり、縦軸は、位相雑音を示している。位相雑音の単位は[rad]である。図11において、左側の列のグラフ(A1), (B1), (C1)の各々は、搬送波生成部13-2、局部発振部23-1、局部発振部23-2における実際に発生した位相雑音音量を示している。これに対して、右側の列のグラフ(A2), (B2), (C2)は、キャリア位相回復部28が搬送波生成部13-2、局部発振部23-1、局部発振部23-2の各々に対して推定した位相雑音音量である。搬送波生成部13-2に対応するグラフ(A1)とグラフ(A2)と、局部発振部23-1に対応するグラフ(B1)とグラフ(B2)

と、局部発振部 23-2 に対応するグラフ (C1) とグラフ (C2) の各々を比較すると分かるように、キャリア位相回復部 28 は、搬送波生成部 13-2、局部発振部 23-1、局部発振部 23-2 に起因するシンボルごと、すなわちサンプリング時刻ごとの位相雑音量を精度よく推定していることが分かる。

[0219] 図 12 は、上記したシミュレーションの条件下で、第 1 の実施形態の通信システム 100 と、第 3 の実施形態の通信システム 100b とにおいて、更に、搬送波生成部 13-1、13-2 及び局部発振部 23-1、23-2 の各光源の線幅を変化させて位相雑音の推定を行った場合の結果を示すグラフである。図 12 に示すグラフにおいて、縦軸は、BER (Bit Error Rate) であり、横軸は、線幅シンボル時間積である。線幅シンボル時間積とは、例えば、線幅シンボル時間積の値が、 10^{-4} である場合、光源の線幅 1 MHz に対応する。なお、第 3 の実施形態の通信システム 100b において、送信処理部 12b-1、12b-2 は、10 シンボルに 1 回の周期でパイロットシンボルの挿入を行っている。

[0220] 図 12 のグラフから分かるように、第 1 の実施形態の通信システム 100 のキャリア位相回復部 28 は、線幅シンボル時間積が 10^{-4} 程度まで精度よく位相雑音を推定できていることが分かる。これに対して、第 3 の実施形態の通信システム 100b のキャリア位相回復部 28b は、パイロットシンボルの挿入により、線幅シンボル時間積が 10^{-4} よりも大きくなっても第 1 の実施形態のキャリア位相回復部 28 よりも低い BER で位相雑音の推定ができていていることが分かる。

[0221] なお、上記の第 1 及び第 2 の実施形態において、重み行列算出部 26 は、例えば、重み行列算出用のパイロットシンボルを用いて新たな重み行列 W の算出を行うとしている。これに対して、第 1 の実施形態の場合には、キャリア位相回復部 28 の出力信号算出部 49 が、式 (30) に基づいて算出するベクトル $\hat{x}(k)$ を重み行列算出部 26 にフィードバックし、重み行列算出部 26 が、フィードバックされたベクトル $\hat{x}(k)$ に基づいて新たな重

み行列 W を算出するようにしてもよい。第2の実施形態の場合には、キャリア位相回復部28aの出力信号算出部49aが、式(55)に基づいて算出するベクトル $\hat{x}(k)$ を重み行列算出部26にフィードバックし、重み行列算出部26が、フィードバックされたベクトル $\hat{x}(k)$ に基づいて新たな重み行列 W を算出するようにしてもよい。

[0222] 上記の第1から第3の実施形態の通信システム100, 100a, 100bは、空間多重光伝送システムを対象としているが、第1から第3の実施形態に示した構成は、空間多重光伝送システムに限定されるものではなく、無線通信システム、衛星通信システム、磁気記録媒体、チップ間通信などのあらゆる通信システムにおいて、MIMO型信号処理を行う場合に複数信号に重畳する妨害成分の除去に適用することが可能である。なお、無線によって伝送を行う通信システムの場合、伝送路3は、無線電波が伝搬する空間に対応することになる。搬送波生成部13-1~13- N_t は、無線電波の搬送波になる電気信号の搬送波を生成することになり、送信処理部12-1~12- N_t , 12b-1~12b- N_t は、電気信号の搬送波を用いて送信データ系列を変調することになる。送信装置1, 1bは、光結合部10を備えず、送信処理部12-1~12- N_t , 12b-1~12b- N_t の各々に接続される複数の送信アンテナによって送信が行われることになる。局部発振部23-1~23- N_r は、復調に用いる電気信号の局部発振波を生成することになる。受信装置2, 2a, 2bは、光分岐部20を備えず、受信処理部22-1~22- N_r の各々に接続する複数の受信アンテナを用いて無線信号を受信し、受信した無線信号を電気信号の局部発振波によって復調することになる。

[0223] 上述した第1から第3の実施形態における信号検出部24, 24a, 24bを単体の装置である信号検出装置として構成し、構成した信号検出装置を受信装置2, 2a, 2bが備えるようにしてもよいし、第1から第3の実施形態におけるキャリア位相回復部28, 28a, 28bを単体の装置であるキャリア位相回復装置として構成し、構成したキャリア位相回復装置を信号

検出部 24, 24 a, 24 b が備えるようにしてもよい。

[0224] 信号検出部 24, 24 a, 24 b を単体の装置である信号検出装置として構成した場合、信号検出装置をコンピュータとプログラムで実現するようにしてもよい。第 1 から第 3 の実施形態におけるキャリア位相回復部 28, 28 a, 28 b を単体の装置であるキャリア位相回復装置として構成した場合、キャリア位相回復装置をコンピュータとプログラムで実現するようにしてもよい。その場合、これら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、この記録媒体に記録されたプログラムをコンピュータに読み込ませ、実行することによって実現してもよい。また、これらのプログラムをインターネット等のネットワークを通じて提供するようにしてもよい。なお、ここでいう「コンピュータ」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。

[0225] 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

[0226] MIMO型の通信処理を行う通信システムに適用できる。

符号の説明

[0227] 100…通信システム、1…送信装置、2…受信装置、3…伝送路、10…光結合部、11-1～11-Nt…送信部、12-1～12-Nt…送信処理部、13-1～13-Nt…搬送波生成部、20…光分岐部、21-1～21-Nr…受信部、22-1～22-Nr…受信処理部、23-1～23-Nr…局部発振部、24…信号検出部、25…デジタル信号処理部、26…重み行列算出部、27…記憶部27、28…キャリア位相回復部

請求の範囲

[請求項1] 各々に与えられる送信データ系列に基づいて、各々が有する搬送波生成部が出力する搬送波を変調して送信信号を生成し、生成した前記送信信号を、複数の信号を伝送する伝送路に送出する複数の送信部を備える送信装置と、前記伝送路が伝送する複数の信号を受信し、受信した受信信号を、各々が有する局部発振部が出力する局部発振信号に基づいて復調して受信データ系列を生成する複数の受信部を備える受信装置とを備える通信システムにおける前記受信装置が備える信号検出装置であって、

前記受信データ系列に対してMIMO線形受信を行う際に用いる重み行列を算出する重み行列算出部と、

複数の前記搬送波生成部と、複数の前記局部発振部とが非同期であるために生じる妨害成分を状態情報とし、事後の前記状態情報を、事前の前記状態情報に基づいて算出する予め定められる状態方程式と、前記送信データ系列を観測情報とし、前記状態方程式により算出する事後の前記状態情報と、前記受信データ系列と、前記重み行列とに基づいて、事後の前記状態情報が示す状態における前記観測情報を算出する予め定められる観測方程式とに対して、カルマンフィルタアルゴリズムを適用して前記妨害成分の事後状態推定値を算出し、算出した前記事後状態推定値に基づいて、前記妨害成分を除去した前記送信データ系列の推定系列を算出するキャリア位相回復部と、

を備える信号検出装置。

[請求項2] 前記妨害成分は、

複数の前記搬送波生成部の位相揺らぎに起因する第1の位相雑音成分及び複数の前記局部発振部の位相揺らぎに起因する第2の位相雑音成分を含む成分である、

請求項1に記載の信号検出装置。

[請求項3] 前記妨害成分は、

前記第1の位相雑音成分及び前記第2の位相雑音成分に加えて、複数の前記搬送波生成部の周波数揺らぎに起因する第1の周波数オフセット成分及び複数の前記局部発振部の周波数揺らぎに起因する第2の周波数オフセット成分を含む成分である、

請求項2に記載の信号検出装置。

[請求項4]

前記キャリア位相回復部は、

前記妨害成分の事後状態推定値を算出する際、前記観測方程式に基づいて算出する前記観測情報と、当該観測情報を仮判定して得られる前記送信データ系列の仮判定値とに基づいて算出する前記事後状態推定値を算出するか、または、前記送信装置がパイロットシンボルとして送信する前記送信データ系列と、前記観測方程式に基づいて算出する前記観測情報とに基づいて前記事後状態推定値を算出する、

請求項1から3のいずれか一項に記載の信号検出装置。

[請求項5]

前記伝送路は、複数のモードにより前記複数の信号を伝送するマルチモード光ファイバを含む光伝送路であり、

前記搬送波生成部は、前記搬送波である連続光を出射する信号光光源であり、

前記局部発振部は、前記局部発振信号である連続光を出射する局部発振光光源であり、

前記受信部が行う復調は、前記局部発振光光源が出射する連続光に基づくコヒーレント検波である、

請求項1から4のいずれか一項に記載の信号検出装置。

[請求項6]

請求項1から5のいずれか一項に記載の信号検出装置が備えるキャリア位相回復部を装置としたキャリア位相回復装置。

[請求項7]

各々に与えられる送信データ系列に基づいて、各々が有する搬送波生成部が出力する搬送波を変調して送信信号を生成し、生成した前記送信信号を、複数の信号を伝送する伝送路に送出する複数の送信部を備える送信装置と、前記伝送路が伝送する複数の信号を受信し、受信

した受信信号を、各々が有する局部発振部が出力する局部発振信号に基づいて復調して受信データ系列を生成する複数の受信部を備える受信装置とを備える通信システムにおける前記受信装置が行うキャリア位相回復方法であって、

前記受信データ系列に対してMIMO線形受信を行う際に用いる重み行列を算出し、

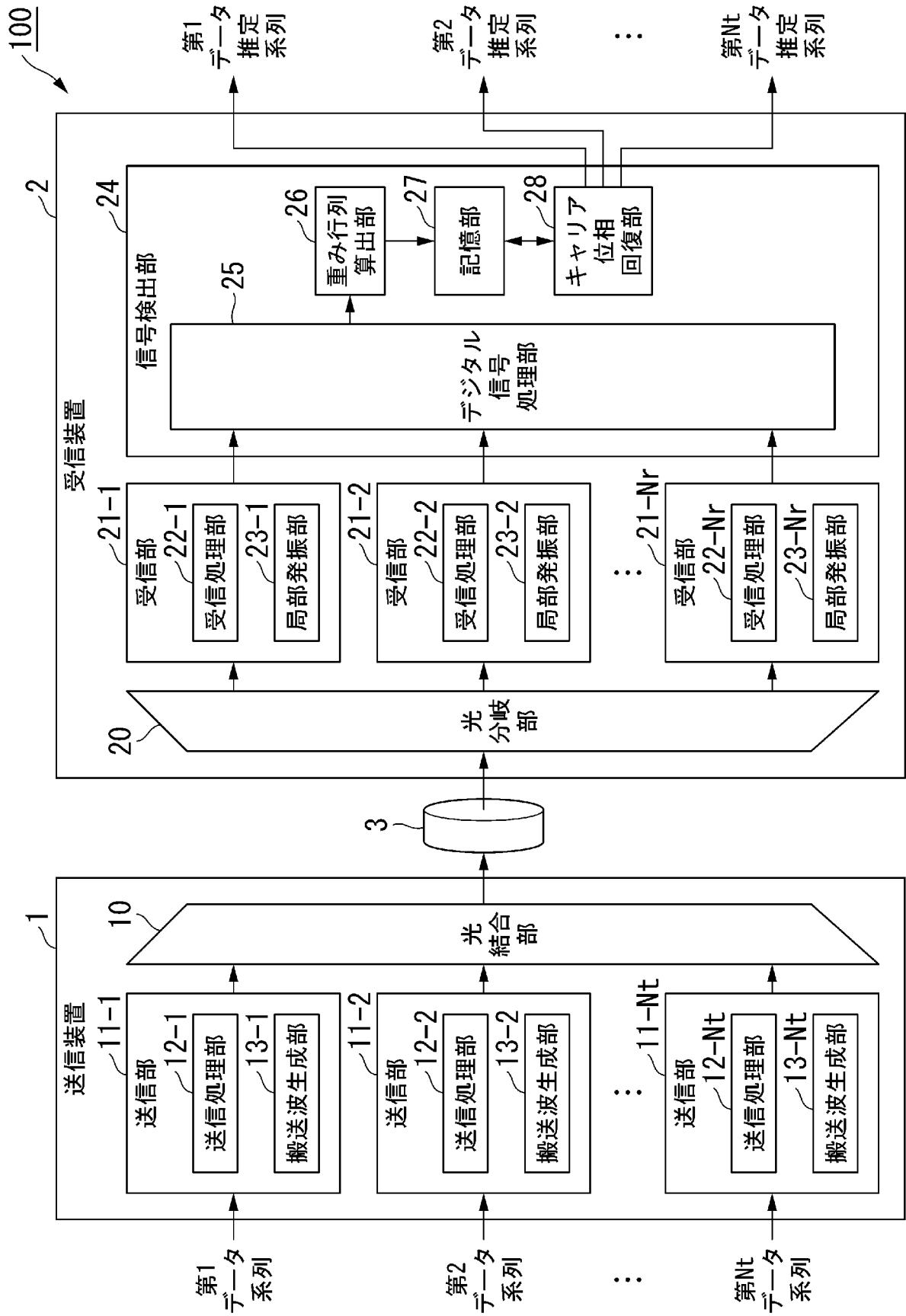
複数の前記搬送波生成部と、複数の前記局部発振部とが非同期であるために生じる妨害成分を状態情報とし、事後の前記状態情報を、事前の前記状態情報に基づいて算出する予め定められる状態方程式と、前記送信データ系列を観測情報とし、前記状態方程式により算出する事後の前記状態情報と、前記受信データ系列と、算出した前記重み行列とに基づいて、事後の前記状態情報が示す状態における前記観測情報を算出する予め定められる観測方程式とに対して、カルマンフィルタアルゴリズムを適用して前記妨害成分の事後状態推定値を算出し、

算出した前記事後状態推定値に基づいて、前記妨害成分を除去した前記送信データ系列の推定系列を算出する、

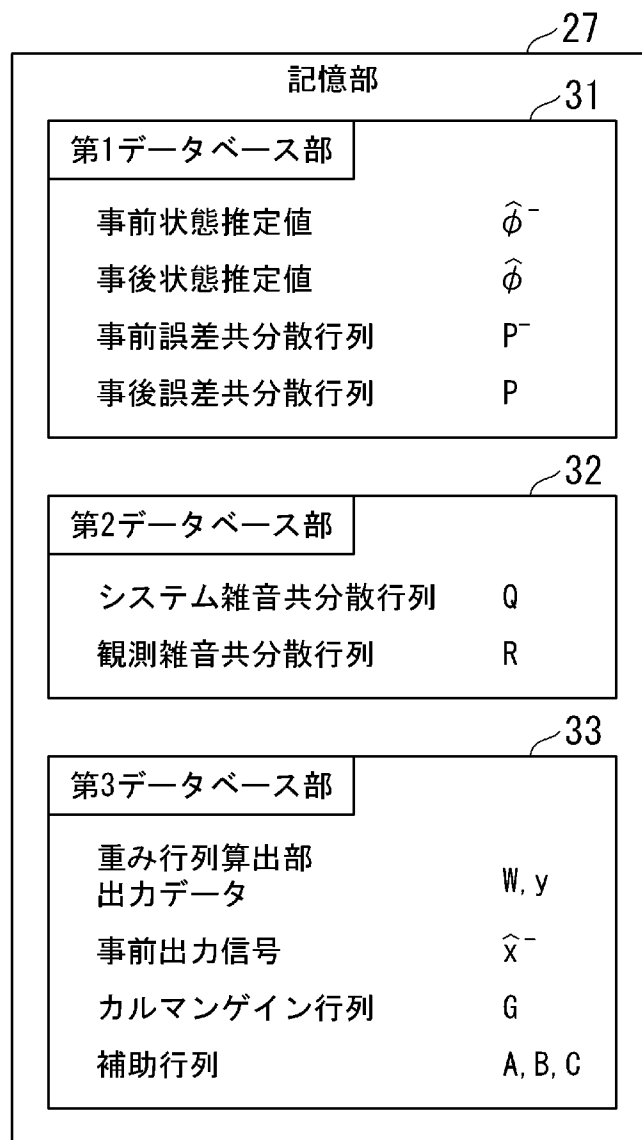
キャリア位相回復方法。

[請求項8] コンピュータを、請求項6に記載のキャリア位相回復装置として機能させるためのキャリア位相回復プログラム。

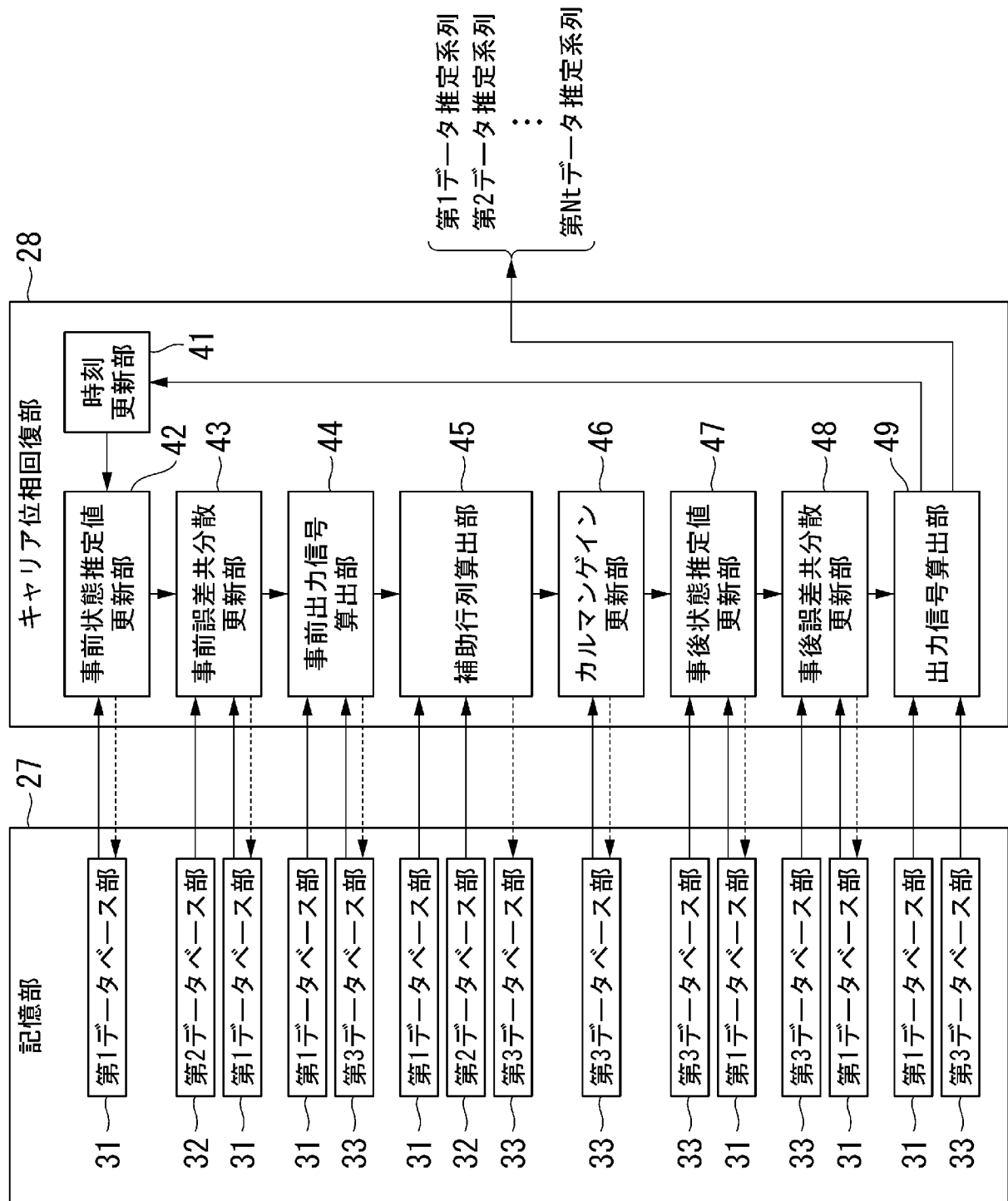
[図1]



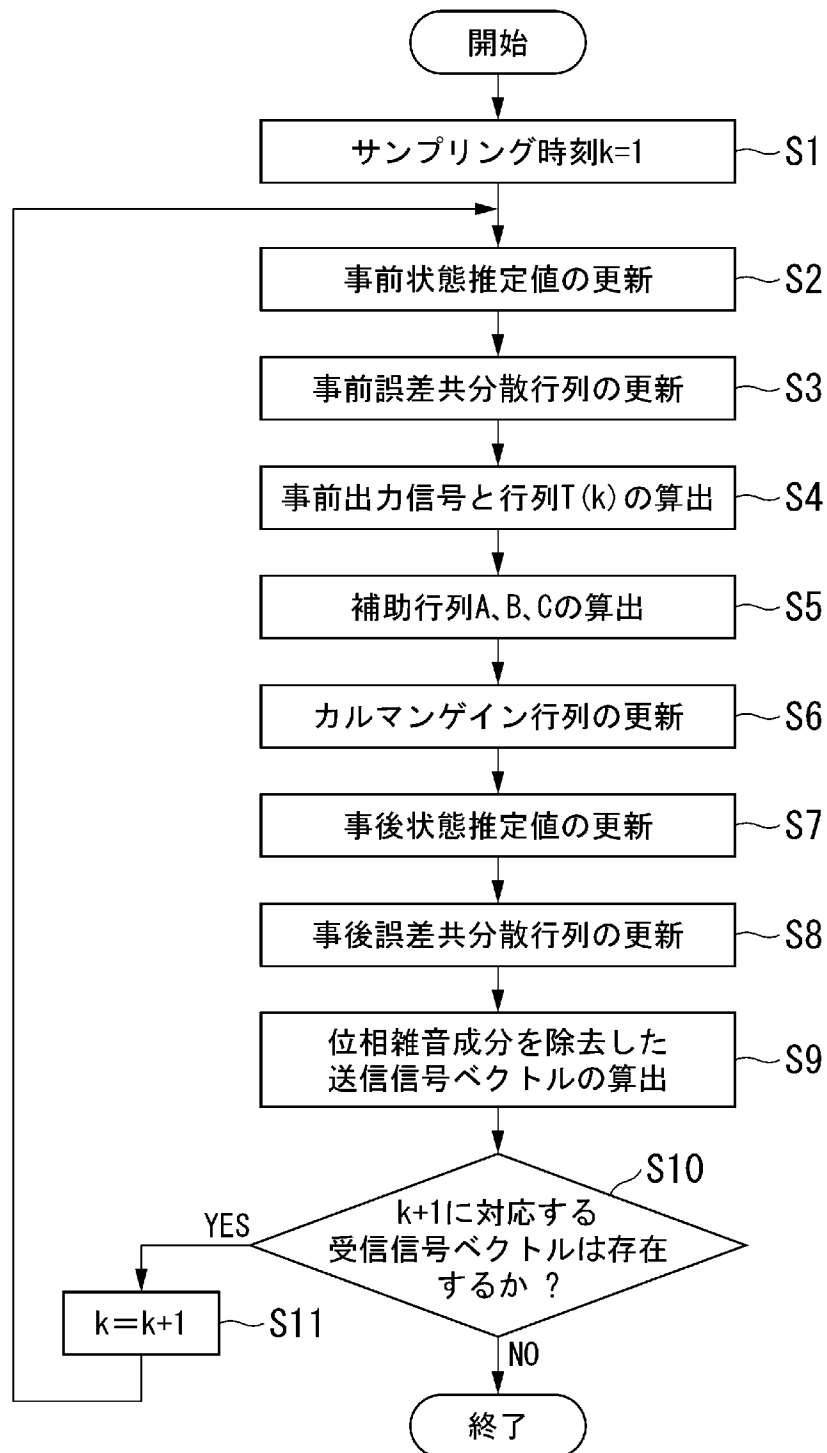
[図2]



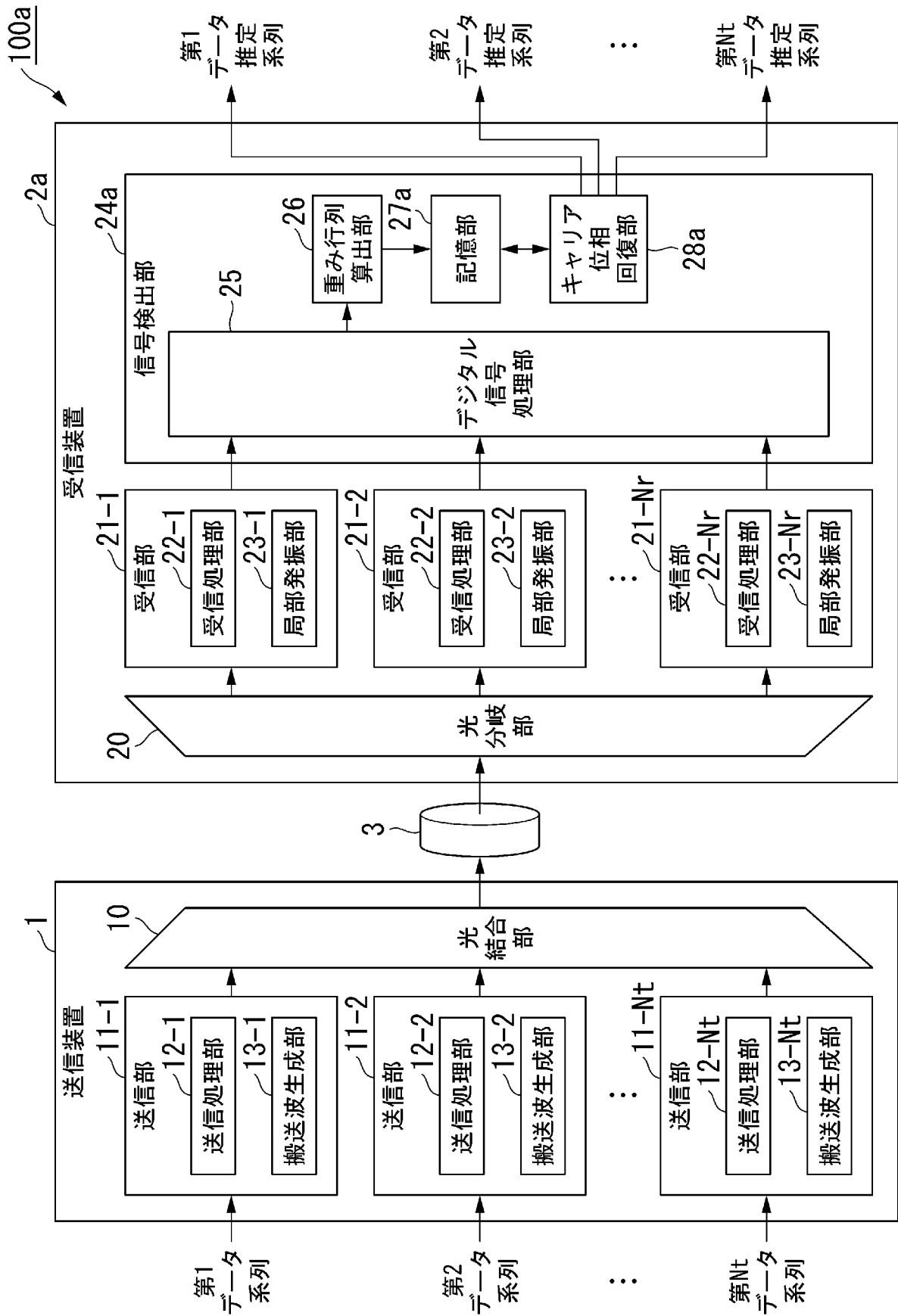
[図3]



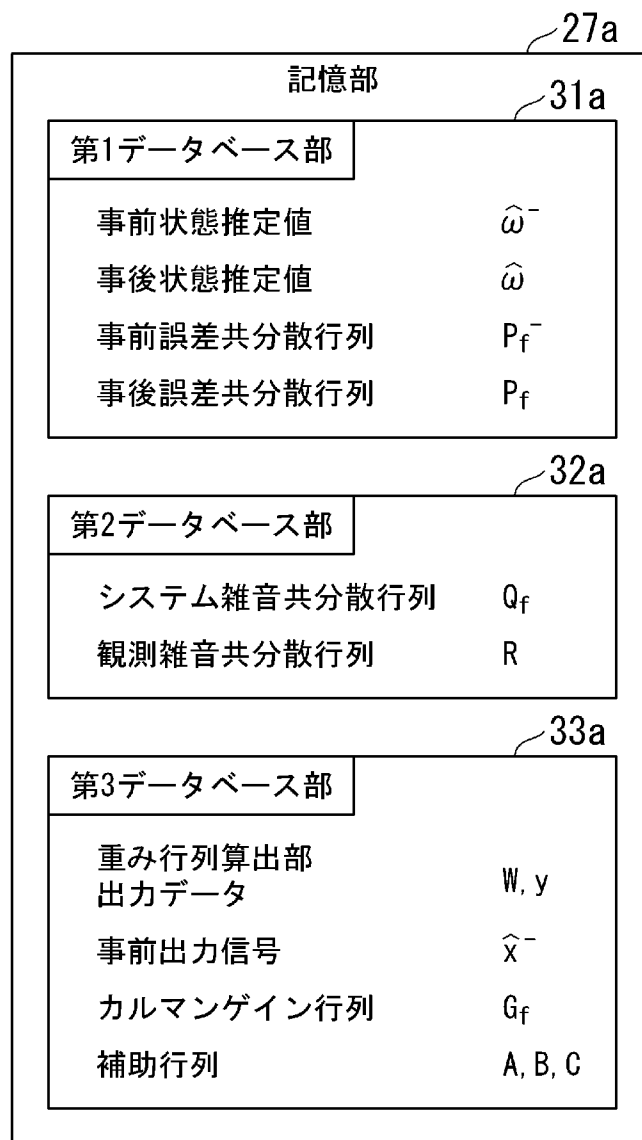
[図4]



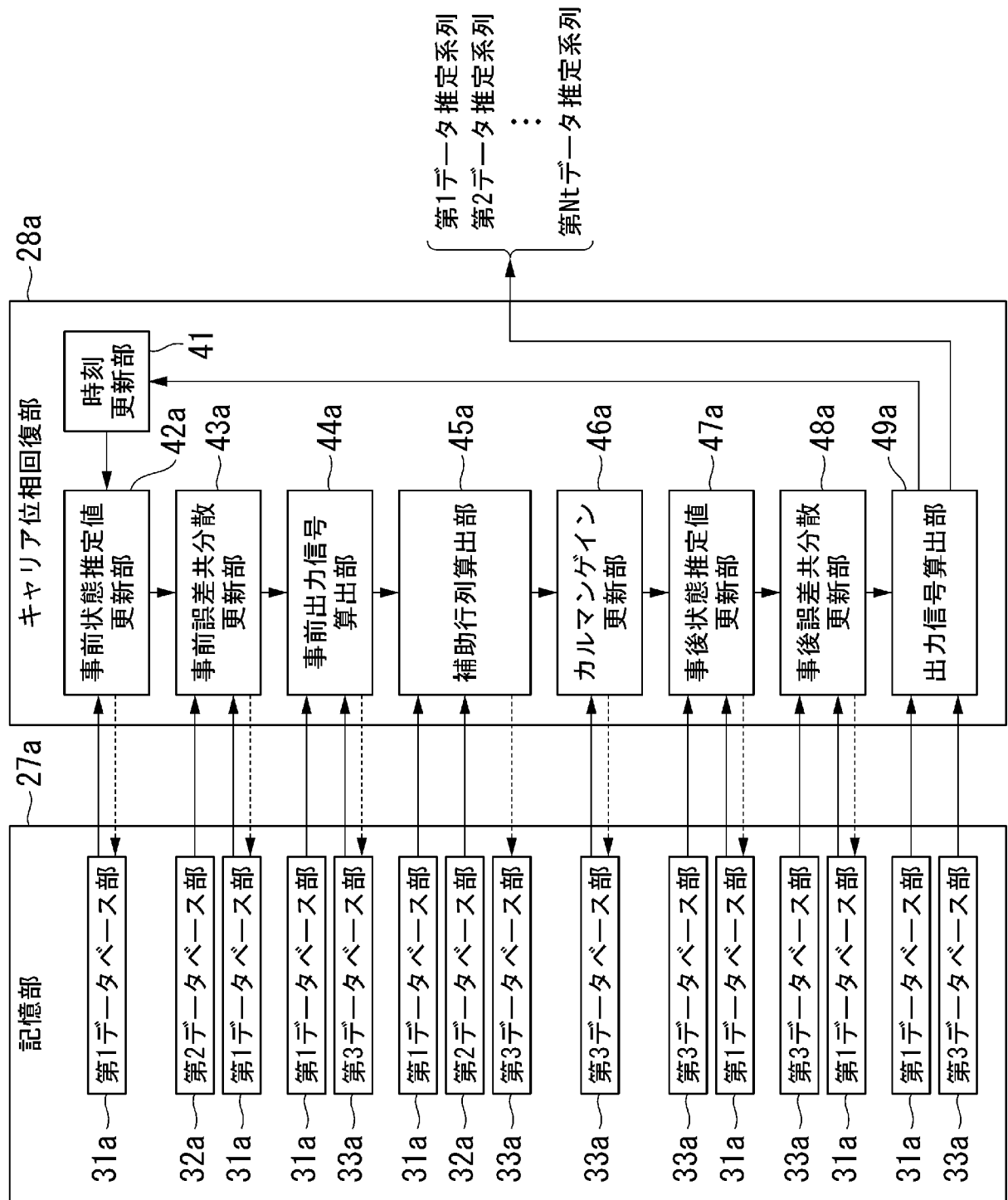
[図5]



[図6]



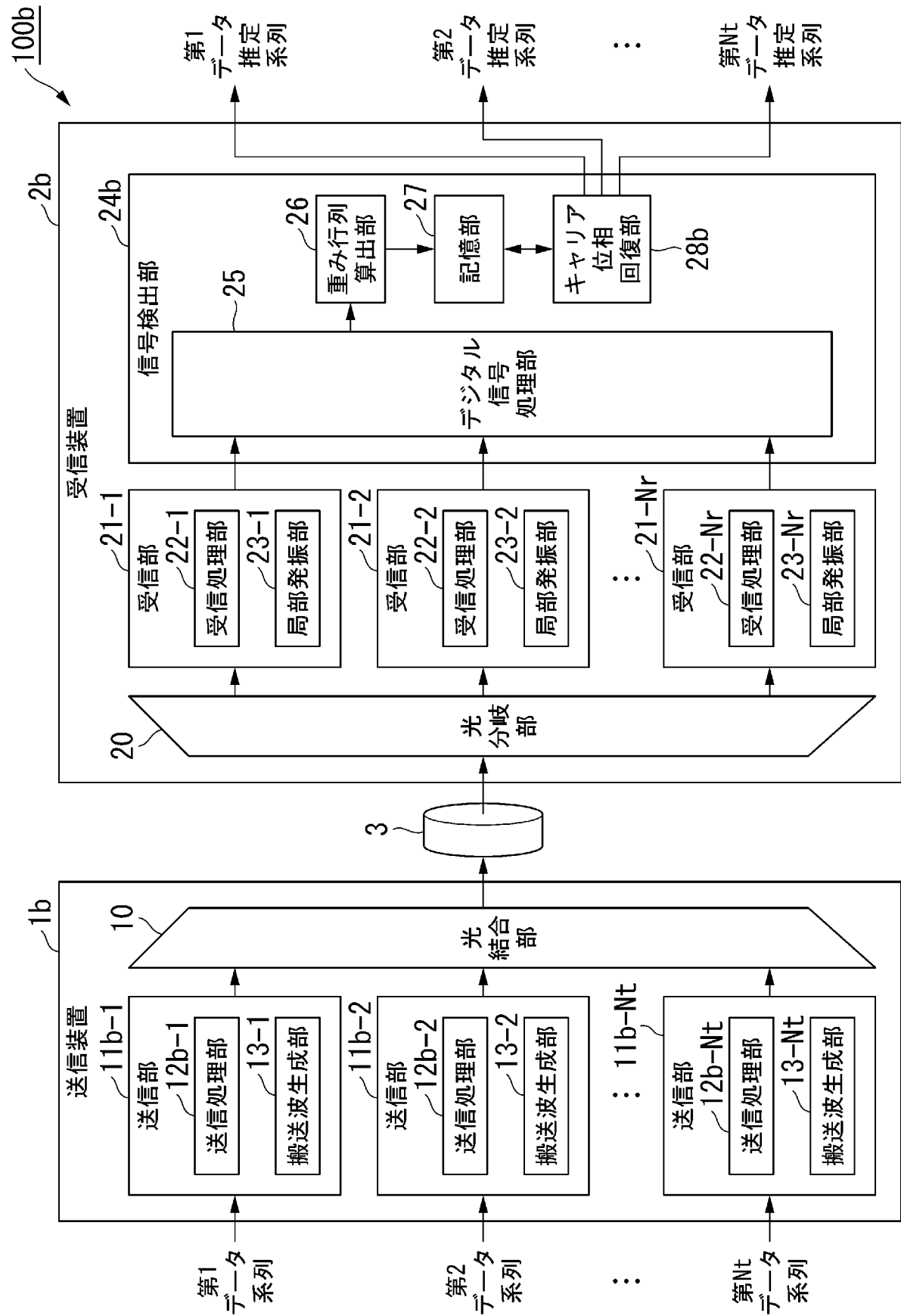
[図7]



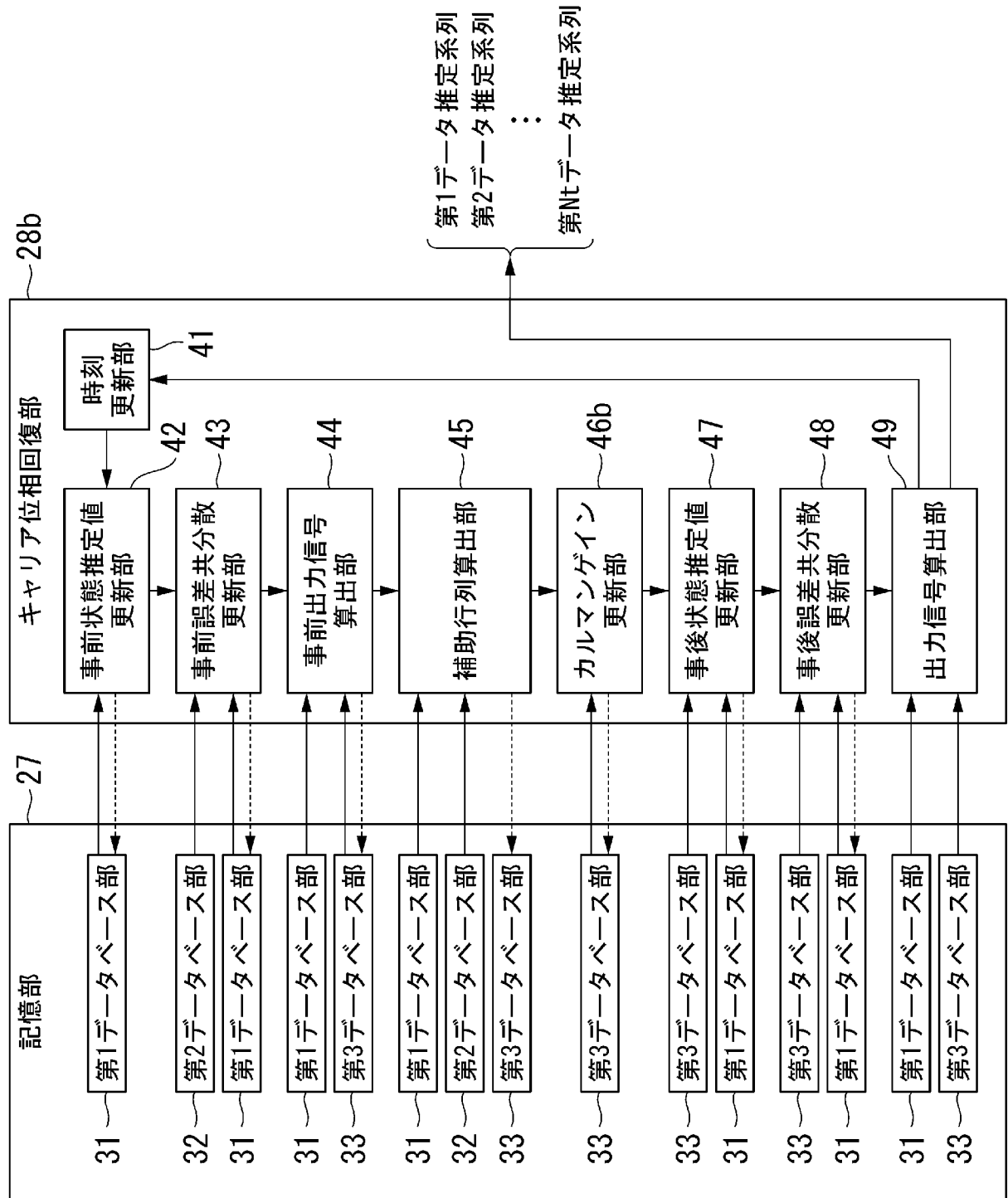
[図8]



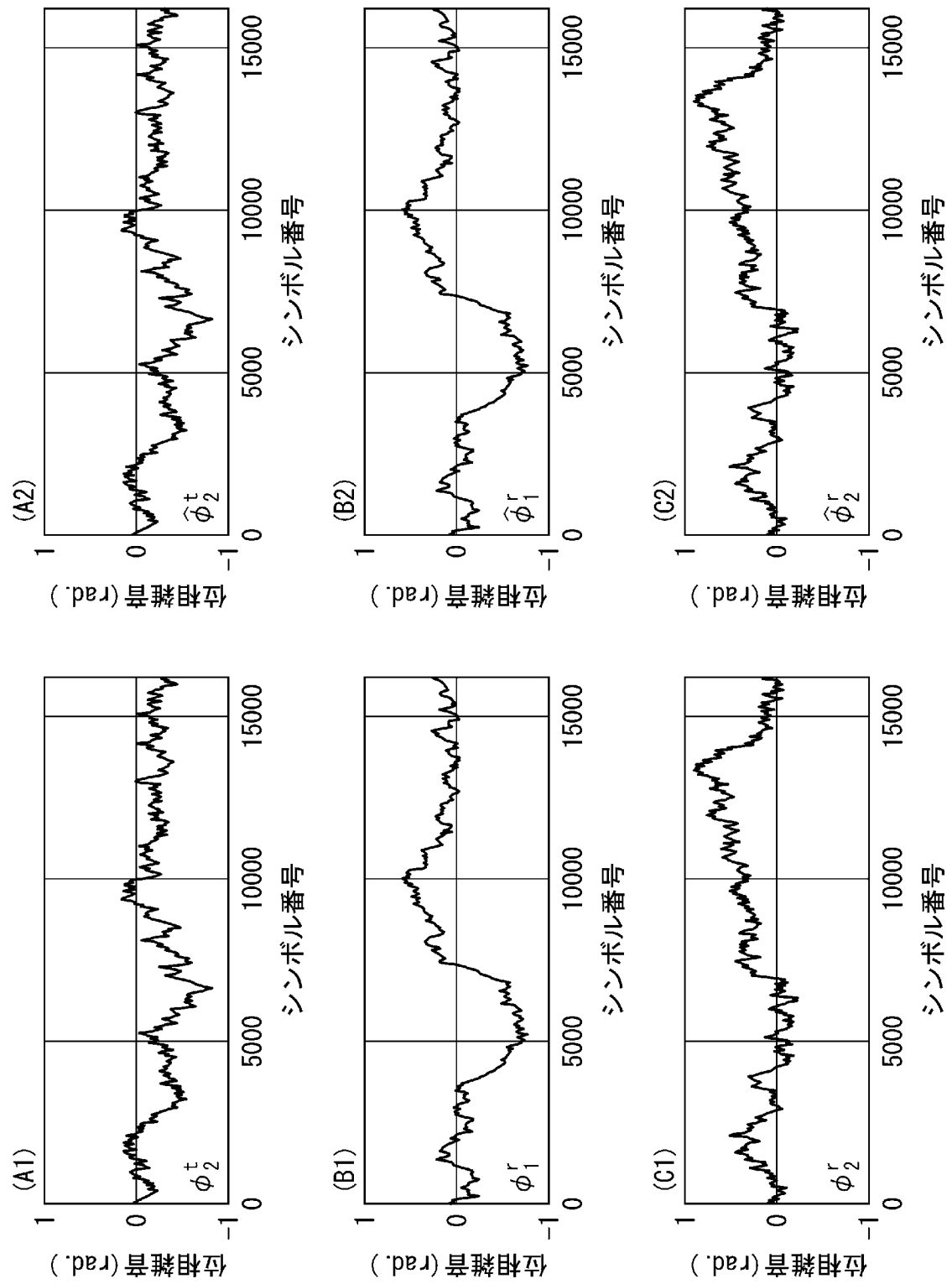
[図9]



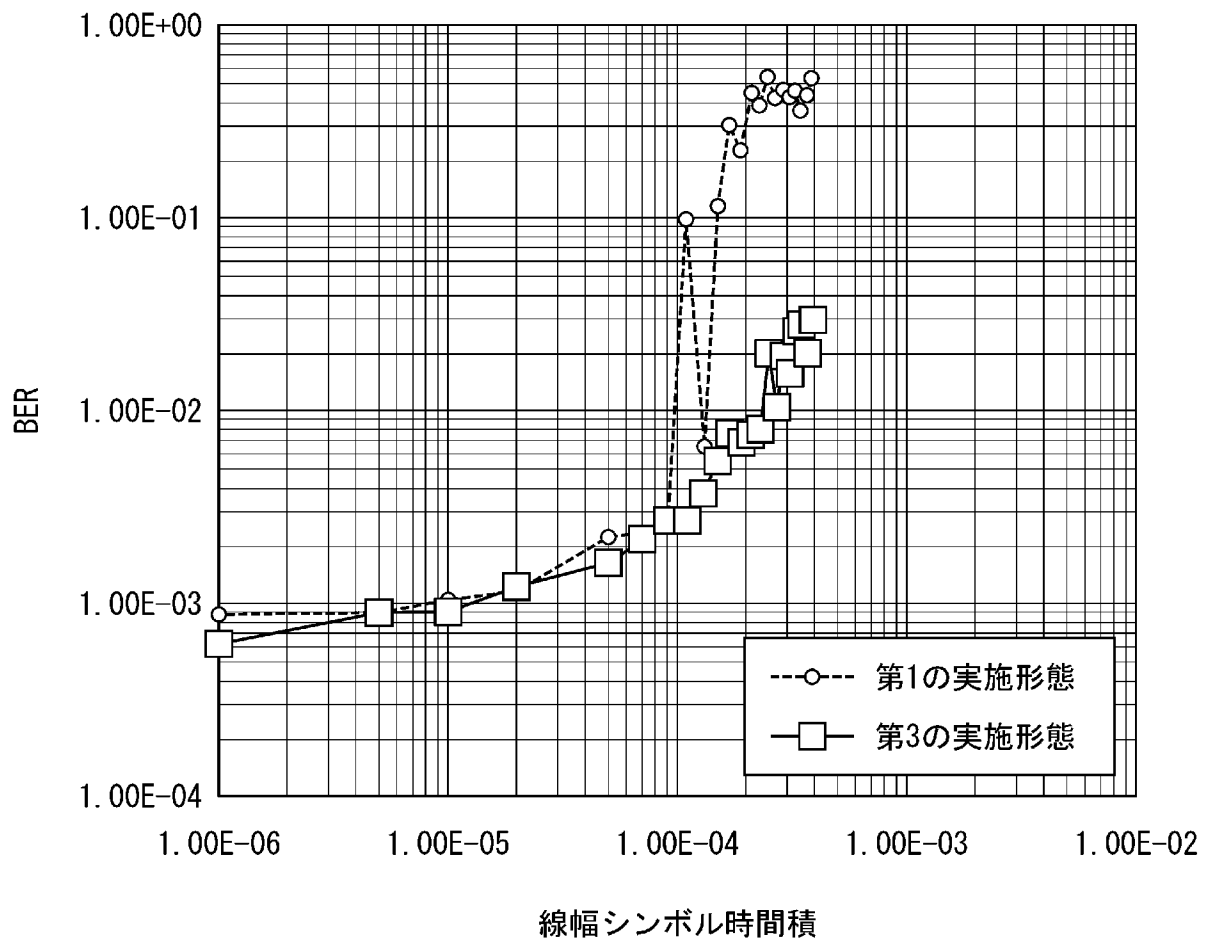
[図10]



[図11]



[図12]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2020/047752

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. H04B7/0413 (2017.01) i, H04B7/08 (2006.01) i, H04B10/2581 (2013.01) i
FI: H04B7/0413200, H04B7/08982, H04B10/2581

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. H04B7/0413, H04B7/08, H04B10/2581

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	1971-2021
Registered utility model specifications of Japan	1996-2021
Published registered utility model applications of Japan	1994-2021

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.
X Y	CN 109639606 A (GUANGDONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 16 April 2019 (2019-04-16), paragraphs [0002], [0124]-[0135], [0142]-[0145], [0159], [0169]-[0171], fig. 1 (Family: none)	1, 4, 6-8 2, 3, 5
Y	WO 2015/052895 A1 (NEC CORPORATION) 16 April 2015 (2015-04-16), paragraph [0054] (Family: none)	2, 3, 5
Y	JP 2020-141294 A (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) 03 September 2020 (2020-09-03), paragraph [0030] (Family: none)	2, 3, 5



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 March 2021

Date of mailing of the international search report
13 April 2021

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/JP2020/047752

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	REGGIANI, L., DOSSI, L., BARLETTA, L., SPALVIERI, A, Extended kalman filter for MIMO phase noise channels with independent oscillators, IEEE Communications Letters (vol.: 22, issue: 6, June 2018), 10 January 2018, pp.: 1200-1203, entire text	1-8

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H04B 7/0413(2017.01)i; H04B 7/08(2006.01)i; H04B 10/2581(2013.01)i FI: H04B7/0413 200; H04B7/08 982; H04B10/2581										
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）） H04B7/0413; H04B7/08; H04B10/2581										
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 - 2021年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996 - 2021年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994 - 2021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 - 2021年	日本国実用新案登録公報	1996 - 2021年	日本国登録実用新案公報	1994 - 2021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 - 2021年									
日本国実用新案登録公報	1996 - 2021年									
日本国登録実用新案公報	1994 - 2021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								
X	CN 109639606 A (GUANGDONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 16.04.2019 (2019 - 04 - 16)	1, 4, 6-8								
Y	[0002], [0124]-[0135], [0142]-[0145], [0159], [0169]-[0171], 図1 (ファミリーなし)	2, 3, 5								
Y	WO 2015/052895 A1 (日本電気株式会社) 16.04.2015 (2015 - 04 - 16) [0054] (ファミリーなし)	2, 3, 5								
Y	JP 2020-141294 A (日本電信電話株式会社) 03.09.2020 (2020 - 09 - 03) [0030] (ファミリーなし)	2, 3, 5								
A	Luca Reggiani; Laura Dossi; Luca Barletta; Arnaldo Spalvieri, Extended Kalman Filter for MIMO Phase Noise Channels With Independent Oscillators, IEEE Communications Letters (Volume: 22, Issue: 6, June 2018), 2018.01.10, Page(s): 1200 - 1203 全文	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 29.03.2021		国際調査報告の発送日 13.04.2021								
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） 原田 聖子 5K 3360 電話番号 03-3581-1101 内線 3556								