

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6701466号
(P6701466)

(45) 発行日 令和2年5月27日 (2020.5.27)

(24) 登録日 令和2年5月8日 (2020.5.8)

(51) Int.Cl. F I
HO 4 B 10/118 (2013.01) HO 4 B 10/118
HO 4 B 10/61 (2013.01) HO 4 B 10/61

請求項の数 5 (全 20 頁)

(21) 出願番号	特願2020-503219 (P2020-503219)	(73) 特許権者	000006013
(86) (22) 出願日	平成30年3月1日 (2018.3.1)		三菱電機株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2018/007860		東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(87) 国際公開番号	W02019/167237	(74) 代理人	100123434
(87) 国際公開日	令和1年9月6日 (2019.9.6)		弁理士 田澤 英昭
審査請求日	令和2年2月26日 (2020.2.26)	(74) 代理人	100101133
			弁理士 濱田 初音
早期審査対象出願		(74) 代理人	100199749
			弁理士 中島 成
		(74) 代理人	100197767
			弁理士 辻岡 将昭
		(72) 発明者	松田 恵介
			東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三
			菱電機株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 空間光通信受信器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

空間伝播した光信号を集光しコリメートされた光信号を出力する望遠鏡と、
 前記望遠鏡から出力された光信号の角度ずれを補償するポインティングミラーと、
 前記ポインティングミラーからの光信号を集光する集光光学系と、
 前記集光された光信号を伝送する複数のコアのマルチコアファイバと、
 前記マルチコアファイバで伝送された各コアの光信号をコア毎に異なるシングルモード
 ファイバを通して出力する分離器と、

前記各シングルモードファイバからの光信号をコヒーレント検波するコヒーレント検波
 器と、

前記コヒーレント検波された信号のデジタル信号を復号するデジタル信号処理部とを備
 え、

前記デジタル信号処理部は、マルチ入力シングル出力等化を行う適応等化器と、前記適
 応等化器からの信号の位相を補償する位相補償部と、前記位相を補償した信号を復号する
 復号部と、前記各コアに対応するパワーのモニタ値を出力するパワーモニタと、前記モニ
 タ値を用いて前記集光光学系へ入力される光信号の角度ずれの値を示す角度ずれ信号を出
 力する角度ずれ検出部とを備え、

前記ポインティングミラーは、前記角度ずれ信号に対応して補償角度を更新することを
 特徴とする空間光通信受信器。

【請求項 2】

10

20

空間伝播した光信号を集光しコリメートされた光信号を出力する望遠鏡と、
前記望遠鏡から出力された光信号の波面歪を補償する形状可変鏡と、
前記形状可変鏡からの光信号を集光する集光光学系と、
前記集光された光信号を伝送する複数のコアのマルチコアファイバと、
前記マルチコアファイバで伝送された各コアの光信号をコア毎に異なるシングルモード
ファイバを通した各光信号をコヒーレント検波するコヒーレント検波器と、
前記コヒーレント検波された信号のデジタル信号を復号するデジタル信号処理部とを備
え、

前記デジタル信号処理部は、マルチ入力シングル出力等化を行う適応等化器と、前記適
応等化器からの信号の位相を補償する位相補償部と、前記位相を補償した信号を復号する
復号部と、前記適応等化器のフィルタ係数からマルチコアファイバ入射端面における振幅
分布の低周波成分を算出する低周波数振幅分布算出部と、前記低周波数振幅分布算出部か
らの振幅分布を、前記集光光学系の入力における振幅分布に変換して波面歪を算出するフ
ーリエ変換部とを備え、

前記形状可変鏡は、前記フーリエ変換部から出力される波面歪に対応して波面歪補償量
を更新することを特徴とする空間光通信受信器。

【請求項 3】

空間伝播した光信号を集光しコリメートされた光信号を出力する望遠鏡と、
前記望遠鏡から出力された光信号を第 1 の方向と第 2 の方向に出力する分配器と、
前記第 1 の方向に出力された光信号の波面歪を検出する波面センサと、
前記第 2 の方向に出力された光信号の波面歪を補償する形状可変鏡と、
前記形状可変鏡からの光信号を集光する集光光学系と、
前記集光された光信号を伝送する複数のコアのマルチコアファイバと、
前記マルチコアファイバで伝送された各コアの光信号をコア毎に異なるシングルモード
ファイバを通した各光信号をコヒーレント検波するコヒーレント検波器と、
前記コヒーレント検波された信号のデジタル信号を復号するデジタル信号処理部と、
前記波面センサで検出された波面歪に基づき前記形状可変鏡と前記デジタル信号処理部
とを制御する波面補償制御部とを備え、

前記波面補償制御部は、

前記波面センサで検出した波面歪を打ち消すように前記形状可変鏡を制御する形状可変
鏡制御部と、前記形状可変鏡からの出力に残留する波面歪を算出し、当該波面歪をフー
リエ変換し、前記マルチコアファイバの入射端面における振幅分布に変換して出力するフ
ーリエ変換部とを備え、

前記デジタル信号処理部は、マルチ入力シングル出力等化を行う適応等化器と、前記適
応等化器からの信号の位相を補償する位相補償部と、前記位相を補償した信号を復号する
復号部と、前記フーリエ変換部から出力された前記振幅分布に基づき、前記適応等化器の
等化係数の初期値を設定する等化係数初期設定部とを備えたことを特徴とする空間光通信
受信器。

【請求項 4】

前記デジタル信号処理部は、前記波面補償制御部からの残留波面歪量と、前記適応等化
器のフィルタ係数とを比較し、当該適応等化器の誤収束を検出した場合に前記等化係数初
期設定部に誤収束信号を出力する誤収束判定部を備え、前記等化係数初期設定部は、前記
誤収束判定部から誤収束信号が出力された場合に前記適応等化器の初期値を設定すること
を特徴とする請求項 3 記載の空間光通信受信器。

【請求項 5】

前記マルチコアファイバに代えてマルチコアファイバアンプとしたことを特徴とする請
求項 1 から請求項 4 のうちのいずれか 1 項記載の空間光通信受信器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

10

20

30

40

50

この発明は、例えば航空機や衛星といった移動体に送受信器を搭載して空間光通信を行うための空間光通信受信器に関する。

【背景技術】

【0002】

大容量空間通信を実現する手段として波長1.5 μm 帯や1.0 μm 帯の光を使った空間光通信が使われる。空間光通信では従来の無線通信と比較してキャリアである光の波長が短く、光アンテナすなわち望遠鏡を含めた送受信器の小型化が期待できる。またビーム広がりを小さく抑えることができ、効率的に光を伝送できるため低消費電力化が期待できる。

空間光通信では、望遠鏡を対向する送受信器に向ける必要があるが、航空機や衛星などの移動体に送受信器を搭載する場合、望遠鏡の指向する角度に誤差を生じてしまい、光の結合損失を生じる。この問題に対処するため、高速に角度誤差を補償するポインティングミラーが用いられる。ポインティングミラーの制御には望遠鏡に入射した光信号の角度誤差を検出するセンサが必要となるが、受信した光を一部分配した光か、信号光とは異なる波長のビーコン光をセンサに入力する必要がある。

また大気中を伝播した光は大気の影響を受けて波面が歪む。コヒーレント検波をする場合を考えると、受信光を、コヒーレント受信器の入力ポートであるシングルモードファイバ(SMF)に結合する必要がある。波面が歪んでいる場合には結合損が発生してしまい、信号対雑音電力比(SNR)が劣化してしまう課題がある。これを解決するために、波面の歪を波面センサで検出し、形状可変鏡(DM: Deformable mirror)による波面歪の補償が行われていた(例えば、非特許文献1参照)。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0003】

【非特許文献1】Malcolm W. Wright, et al., "Adaptive optics correction into single mode fiber for a low Earth orbiting space to ground optical communication link using the OPALS downlink," Optics Express Vol. 23, No. 26 pp33705-33712.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、従来のように、信号光とは異なる波長のビーコン光を使う場合には、ビーコン光を送信器において波長合波する必要がある、送信側の構成が複雑化するという問題があった。また、受信側でも、角度誤差を検出するセンサが必要となる。さらに、波面センサで波面の歪を検出するためには、信号とは異なる波長のビーコン信号を用いる必要がある、信号光とは異なる波長のビーコン光を使う場合には、上述したように、ビーコン光を送信器において波長合波する必要があるが生じ、構成の複雑化が避けられないという課題があった。

【0005】

この発明は、かかる問題を解決するためになされたもので、信号対雑音電力比の劣化と構成の複雑化を抑制することができ、安定した空間光通信を行うことのできる空間光通信受信器を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

この発明に係る空間光通信受信器は、空間伝播した光信号を集光しコリメートされた光信号を出力する望遠鏡と、望遠鏡から出力された光信号の角度ずれを補償するポインティングミラーと、ポインティングミラーからの光信号を集光する集光光学系と、集光された光信号を伝送する複数のコアのマルチコアファイバと、マルチコアファイバで伝送された各コアの光信号をコア毎に異なるシングルモードファイバを通して出力する分離器と、各シングルモードファイバからの光信号をコヒーレント検波するコヒーレント検波器と、コヒーレント検波された信号のデジタル信号を復号するデジタル信号処理部とを備え、デジ

タル信号処理部は、マルチ入力シングル出力等化を行う適応等化器と、適応等化器からの信号の位相を補償する位相補償部と、位相を補償した信号を復号する復号部と、各コアに対応するパワーのモニタ値を出力するパワーモニタと、モニタ値を用いて集光光学系へ入力される光信号の角度ずれの値を示す角度ずれ信号を出力する角度ずれ検出部とを備え、ポインティングミラーは、角度ずれ信号に対応して補償角度を更新するようにしたものである。

【発明の効果】

【 0 0 0 7 】

この発明に係る空間光通信受信器は、マルチコアファイバを用いて伝送した光信号をコヒーレント検波してデジタル信号処理部で復号する。デジタル信号処理部では、集光光学系に入力される光信号の角度ずれを検出し、ポインティングミラーは、この角度ずれに対応して補償角度を更新するようにしたので、信号対雑音電力比の劣化と構成の複雑化を抑制することができ、安定した空間光通信を行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 0 8 】

【図 1】この発明の実施の形態 1 の空間光通信受信器の構成図である。

【図 2】この発明の実施の形態 1 の空間光通信受信器のデジタル信号処理部の構成図である。

【図 3】この発明の実施の形態 1 の空間光通信受信器のデジタル信号処理部のハードウェア構成図である。

【図 4】この発明の実施の形態 1 の空間光通信受信器の動作を示すフローチャートである。

【図 5】この発明の実施の形態 1 の空間光通信受信器のマルチコアファイバの断面図である。

【図 6】この発明の実施の形態 2 の空間光通信受信器の構成図である。

【図 7】この発明の実施の形態 2 の空間光通信受信器のデジタル信号処理部の構成図である。

【図 8】この発明の実施の形態 2 の空間光通信受信器の動作を示すフローチャートである。

【図 9】この発明の実施の形態 3 の空間光通信受信器の構成図である。

【図 10】この発明の実施の形態 3 の空間光通信受信器の波面補償制御部の構成図である。

【図 11】この発明の実施の形態 3 の空間光通信受信器のデジタル信号処理部の構成図である。

【図 12】この発明の実施の形態 3 の空間光通信受信器の動作を示すフローチャートである。

【図 13】この発明の実施の形態 4 の空間光通信受信器のデジタル信号処理部の構成図である。

【図 14】この発明の実施の形態 4 の空間光通信受信器の動作を示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 0 9 】

以下、この発明をより詳細に説明するために、この発明を実施するための形態について、添付の図面に従って説明する。

実施の形態 1 .

図 1 は、実施の形態 1 による空間光通信受信器を示す構成図である。

図示の空間光通信受信器は、望遠鏡 101、ポインティングミラー (PM) 102、集光光学系 103、マルチコアファイバ (MCF) 104、分離器 105、シングルモードファイバ (SMF) 106、局発光源 107、コヒーレント検波器 108、アナログデジタルコンバータ (ADC) 109、デジタル信号処理部 (DSP: digital an

10

20

30

40

50

alog processor) 110を備える。望遠鏡101は、空間伝播した光信号を集光しコリメートされた光信号を出力するよう構成されている。ポインティングミラー102は、望遠鏡101から出力された光信号の角度ずれを補償するミラーであり、デジタル信号処理部110で検出された角度ずれの信号を入力とし、角度ずれを補償して出力光の角度を変えるよう構成されている。集光光学系103は、入力されたコリメート光をマルチコアファイバ104の入射端面付近に集光するための光学系である。マルチコアファイバ104は、集光光学系103で集光された光信号を伝送する二つ以上のコアを持つ光ファイバであり、後述する図5に示すように各コアがクラッド内に略均一に配置され、かつ、その入射端面が集光光学系103の焦点近傍に位置するよう配置されている。

【0010】

10

分離器105は、マルチコアファイバ104における各コアを伝播した光信号をそれぞれ異なるシングルモードファイバ106に分離して出力するよう構成されている。シングルモードファイバ106は、シングルモードの光ファイバである。局発光源107は、コヒーレント検波器108に対して同一の光信号を出力する光源である。コヒーレント検波器108は、シングルモードファイバ106に対応して複数個設けられ、シングルモードファイバ106を介して入力された光信号に対して局発光源107からの光信号と干渉させることによりコヒーレント検波して電気信号を出力する検波器である。アナログデジタルコンバータ109は、コヒーレント検波器108に対応して複数個設けられ、コヒーレント検波器108からの電気信号であるアナログ信号をデジタル信号に変換するコンバータである。デジタル信号処理部110は、アナログデジタルコンバータ109で変換されたデジタル信号の復号を行う処理部であり、その内部構成を図2に示す。

20

【0011】

図2において、デジタル信号処理部110は、適応等化器201、位相補償部202、復号部203、パワーモニタ204、角度ずれ検出部205を備える。適応等化器201は、マルチ入力シングル出力(MISO: Multi-Input and Single-Output)等化を行う適応等化器である。位相補償部202は、受信光のキャリアと局発光との位相差を補償する機能部である。復号部203は、位相補償部202から出力されたデジタル信号の判定及び復号を行う機能部である。パワーモニタ204は、アナログデジタルコンバータ109からの各コアに結合したパワーをモニタしてそのモニタ値を出力する回路である。角度ずれ検出部205は、パワーモニタ204から出力されたモニタ値から集光光学系103に入力される光信号の角度ずれを検出する検出器であり、その検出結果をポインティングミラー102に出力するよう構成されている。

30

【0012】

また、デジタル信号処理部110における適応等化器201～角度ずれ検出部205はそれぞれ専用のハードウェアであってもメモリに格納されるプログラムを実行するCPU(Central Processing Unit、なお、中央処理装置、処理装置、演算装置、マイクロプロセッサ、マイクロコンピュータ、プロセッサともいう)を用いて構成してもよい。

適応等化器201～角度ずれ検出部205が専用のハードウェアである場合、例えば、単一回路、複合回路、プログラム化したプロセッサ、並列プログラム化したプロセッサ、ASIC、FPGA、またはこれらを組み合わせたものが該当する。適応等化器201～角度ずれ検出部205をそれぞれ固有の処理回路で実現してもよいし、各部の機能をまとめて処理回路で実現してもよい。

40

【0013】

適応等化器201～角度ずれ検出部205をCPUを用いて実現する場合、これら機能部は、ソフトウェア、ファームウェア、またはソフトウェアとファームウェアとの組み合わせにより実現される。図3にCPUを用いて実現した場合のハードウェア構成を示す。

図示の回路は、CPU301、メモリ302、入出力インタフェース(I/F)303、バス304からなる。ここで、CPU301は、適応等化器201～角度ずれ検出部205の機能に対応したプログラムを実行することにより、これら適応等化器201～角度

50

ずれ検出部 205 を実現するためのプロセッサである。メモリ 302 は、適応等化器 201 ~ 角度ずれ検出部 205 の機能に対応したプログラムを格納するメモリであり、例えば、RAM、ROM、フラッシュメモリ、EPROM、EEPROM等の、不揮発性または揮発性の半導体メモリや、磁気ディスク、フレキシブルディスク、光ディスク、コンパクトディスク、ミニディスク、DVD等が該当する。入出力インタフェース 303 は、外部との信号のやり取りを行うためのインタフェースである。バス 304 は、CPU 301 ~ 入出力インタフェース 303 を相互に接続するための通信路である。

【0014】

なお、適応等化器 201 ~ 角度ずれ検出部 205 の一部の機能部を専用のハードウェアで実現し、他の機能部をソフトウェアまたはファームウェアで実現するようにしてもよい。例えば、適応等化器 201、位相補償部 202 及び復号部 203 については専用のハードウェアでその機能を実現し、パワーモニタ 204 及び角度ずれ検出部 205 については、CPU 301 がメモリ 302 に格納されたプログラムを読み出して実行することによってその機能を実現するといったことが可能である。

このように、デジタル信号処理部 110 を構成する各機能部は、ハードウェア、ソフトウェア、ファームウェア、またはこれらの組み合わせによって実現することができる。

【0015】

次に、実施の形態 1 の空間光通信受信器の動作について説明する。

図 4 は、実施の形態 1 の空間光通信受信器の動作を示すフローチャートである。

空間を伝播した光信号が望遠鏡 101 に入力されると、望遠鏡 101 は光信号を集光しコリメートする（ステップ ST101）。次にポインティングミラー 102 は、光信号の角度ずれを補償する（ステップ ST102）。ポインティングミラー 102 からの光信号は集光光学系 103 によって集光され（ステップ ST103）、これがマルチコアファイバ 104 に入力され、マルチコアファイバ 104 内を伝播する（ステップ ST104）。その後、分離器 105 によってコア毎に分離され（ステップ ST105）、コヒーレント検波器 108 で局発光源 107 からの局発光と干渉させ、コヒーレント検波が行われる（ステップ ST106）。次いでコヒーレント検波器 108 からのアナログ信号はアナログデジタルコンバータ 109 によってデジタル信号に変換される（ステップ ST107）。このデジタル信号に対しては、デジタル信号処理部 110 内で並行して二つの処理が行われる。一方の処理は、適応等化器 201 により各コアに対応するデジタル信号が合成され（ステップ ST108）、位相補償部 202 によって位相差が補償され（ステップ ST109）、復号部 203 によって判定及び復号が行われる（ステップ ST110）。他方の処理は、各コアに対応するデジタル信号からパワーモニタ 204 がパワーをモニタし（ステップ ST111）、角度ずれ検出部 205 によって角度誤差を検出する（ステップ ST112）ものである。

【0016】

先ず、一方の処理（ステップ ST108 ~ ST110）について説明する。

ここで、N 個のコアをもつマルチコアファイバ 104 を用いた場合、各コアに対応して、直交する二つの偏波の信号が適応等化器 201 に入力されるため、入力は 2N 個の複素信号となる。適応等化器 201 は 2N 個の例えば複素係数をもつ FIR フィルタにより構成され、2N 個の入力は、それぞれ個別の FIR フィルタを通った後に、加算される。適応等化器 201 のフィルタ係数は入力信号に応じて適応的に更新される。更新には例えば定包絡線アルゴリズムを用いる。

今、適応等化器 201 が長さ M タップの 1 サンプル / シンボルで動作する FIR フィルタから構成されている場合を考える。i 番目のコアに対応する FIR フィルタのタップ係数を $h_{ix}(m)$ 、 $h_{iy}(m)$ ($m = 1, 2, \dots, M$) とし、適応等化器 201 に入力される i 番目のコアに対応する k シンボル目の X 偏波成分を $E_{ix}(k)$ 、Y 偏波成分を $E_{iy}(k)$ とし、出力を $E_{OUT}(k)$ とすると、式 (1) の関係となる。

$$E_{\text{out}}(k) = \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M h_{iX}(m) E_{iX}(k-m+1) + \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M h_{iY}(m) E_{iY}(k-m+1) \quad (1)$$

【 0 0 1 7 】

次に、他方の処理（ステップ S T 1 1 1、S T 1 1 2）について説明する。

パワーモニタ 2 0 4 は各コアに対応する、信号の直交する二つの偏波の振幅値から、各コアに結合したパワーをモニタする。i 番目のコアに対応する信号パワー P_i は、直交する X 偏波と Y 偏波の振幅を E_{iX} 、 E_{iY} とすると式（2）により表される。

$$P_i = |E_{iX}|^2 + |E_{iY}|^2 \quad (2)$$

10

角度ずれ検出部 2 0 5 は、図 5 に示すようにマルチコアファイバ 1 0 4 の入射端面に対して、x - y 座標をとり、i 番目のコアの中心座標を (x_i, y_i) とし、式（3）によってマルチコアファイバ 1 0 4 入射端面における光パワーの重心を計算する。

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{\sum_{i=1}^N x_i P_i}{\sum_{i=1}^N P_i} \\ y_c &= \frac{\sum_{i=1}^N y_i P_i}{\sum_{i=1}^N P_i} \end{aligned} \quad (3)$$

20

集光光学系 1 0 3 の焦点距離を f とすると、x 方向の角度ずれ θ_x と y 方向の角度ずれ θ_y は、式（4）により計算される。

$$\theta_x = \sin^{-1} \frac{x_c}{f}, \quad \theta_y = \sin^{-1} \frac{y_c}{f} \quad (4)$$

角度ずれ検出部 2 0 5 は計算結果をポインティングミラー 1 0 2 に入力する。すなわち、図 4 のフローチャートにおいて、ステップ S T 1 1 2 の後、ステップ S T 1 0 1 に戻り、ステップ S T 1 0 2 において、ポインティングミラー 1 0 2 は入力された角度ずれを補償する。

30

【 0 0 1 8 】

次に、このように構成された空間光通信受信器の効果について説明する。

マルチコアファイバではなく、シングルモードファイバを用いた従来の構成であった場合、大気の影響を受け、集光光学系に入射する波面が歪むと、シングルモードファイバの入射端面における光強度分布がシングルモードファイバのコア径に対して広がってしまい、結合損失を生じる。

これに対して本実施の形態のようにマルチコアファイバ 1 0 4 を用いた場合、光強度分布が広がった場合でも、複数のコアが入射端面に配置されているため、光信号は複数のコアに結合される。各コアに対応する信号成分と雑音成分の二乗平均平方根振幅を S_{RMS_i} および N_{RMS_i} とすると、一つのコアに対応する信号の信号電力と雑音電力はそれぞれ、 $(S_{RMS_i})^2$ 、 $(N_{RMS_i})^2$ となる。一方、適応等化器 2 0 1 により合成された信号の信号電力と雑音電力は、式（5）（6）でそれぞれ表される。

40

$$\left(\sum_{i=1}^N S_{\text{RMS}i} \right)^2 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N (N_{\text{RMS}i})^2 \quad (6)$$

従って、一つのコアに対応する S N R は式 (7) になるのに対し、適応等化器 2 0 1 により合成された信号の S N R は式 (8) となる。

$$\text{SNR}_i = \frac{E_{\text{rms}i}^2}{N_{\text{rms}i}^2} \quad (7)$$

$$\text{SNR} = \frac{\left(\sum_{i=1}^N S_{\text{RMS}i} \right)^2}{\sum_{i=1}^N (N_{\text{RMS}i})^2} \quad (8)$$

【 0 0 1 9 】

もし、各コアの信号成分と雑音成分の R M S (R o o t M e a n S q u a r e : 二乗平均平方根) が一定である場合には、合成された信号の S N R は一つのコアに対応する S N R の N 倍に改善する。

また本実施の形態では、角度ずれ検出のための専用のセンサを用いることなく、角度ずれ検出部 2 0 5 によって角度ずれ検出が可能であり、センサへの信号光の分配による損失も生じず、ビーコン光も必要としない。そしてコヒーレント検波器 1 0 8 による高感度なコヒーレント検波を行うため、受信パワーが小さくても角度ずれを検出することが可能である。

マルチコアファイバ 1 0 4 を用いることで角度ずれの検出が可能となるのは、マルチコアファイバ 1 0 4 の各コアを伝送する光信号が物理的な位置関係を保って伝送されることに依る。

【 0 0 2 0 】

コヒーレント検波には、局発光との干渉を生じさせる必要がある。また干渉した光信号を高速な電気信号に変換する必要がある。従って、複数のコヒーレント検波器を用いる場合には、コヒーレント検波器全体の小型化には限界がある。本実施の形態では光を低損失で伝送可能なマルチコアファイバ 1 0 4 を用いることで、分離器 1 0 5 及びコヒーレント検波器 1 0 8 を光学系から物理的に離して自由に配置でき、空間光通信受信器の機構設計の制約を減らすことができる。

また、マルチコアファイバは伝送媒体として製造されているため、密集したコア配置が安定して製造されており、空間光通信受信器を安価に実現することができる。

さらに、形状可変鏡だけの補償では、空間的な位相の歪は補償されるが、強度分布の歪は補償されない。これに対し、本実施の形態では適応等化器 2 0 1 によりコア毎の位相と強度に応じた合成を行うことができる。

【 0 0 2 1 】

以上説明したように、実施の形態 1 の空間光通信受信器によれば、空間伝播した光信号を集光しコリメートされた光信号を出力する望遠鏡と、望遠鏡から出力された光信号の角度ずれを補償するポインティングミラーと、ポインティングミラーからの光信号を集光する集光光学系と、集光された光信号を伝送する複数のコアのマルチコアファイバと、マルチコアファイバで伝送された各コアの光信号をコア毎に異なるシングルモードファイバを通して出力する分離器と、各シングルモードファイバからの光信号をコヒーレント検波するコヒーレント検波器と、コヒーレント検波された信号のデジタル信号を復号するデジタル信号処理部とを備え、デジタル信号処理部は、マルチ入力シングル出力等化を行う適応等化器と、適応等化器からの信号の位相を補償する位相補償部と、位相を補償した信号を復号する復号部と、各コアに対応するパワーのモニタ値を出力するパワーモニタと、モニ

10

20

30

40

50

タ値を用いて集光光学系へ入力される光信号の角度ずれの値を示す角度ずれ信号を出力する角度ずれ検出部とを備え、ポインティングミラーは、角度ずれ信号に対応して補償角度を更新するようにしたので、信号対雑音電力比の劣化と構成の複雑化を抑制することができる、安定した空間光通信を行うことができる。

【0022】

実施の形態2.

実施の形態2は、デジタル信号処理部と形状可変鏡の制御を協調させて行うようにしたものである。

図6は、実施の形態2の空間光通信受信器の構成図である。

図示の空間光通信受信器は、望遠鏡101、形状可変鏡(DM)601、集光光学系103、マルチコアファイバ(MCF)104、分離器105、シングルモードファイバ106、局発光源107、コヒーレント検波器108、アナログデジタルコンバータ(ADC)109、デジタル信号処理部(DSP)602を備える。ここで、形状可変鏡601とデジタル信号処理部602以外の構成は図1に示した実施の形態1の構成と同様であるため、対応する部分に同一符号を付してその説明を省略する。

【0023】

形状可変鏡601は、望遠鏡101から出力された光信号の波面歪を、鏡の形状を変化させることにより補償するミラーであり、デジタル信号処理部602で検出された波面歪の信号を入力とし、波面歪を補償して出力するよう構成されている。デジタル信号処理部602は、アナログデジタルコンバータ109で変換されたデジタル信号の復号を行うと共に、集光光学系103の入力の波面歪を算出する処理部であり、その内部構成を図7に示す。

【0024】

図7において、デジタル信号処理部602は、適応等化器201、位相補償部202、復号部203、低周波数振幅分布算出部701、フーリエ変換部(FT)702を備える。ここで、適応等化器201、位相補償部202及び復号部203は、図2に示した実施の形態1の構成と同様であるため、対応する部分に同一符号を付してその説明を省略する。低周波数振幅分布算出部701は、適応等化器201のフィルタ係数から、マルチコアファイバ104入射端面における、各コアに結合した光信号の振幅を算出することで、マルチコアファイバ104入射端面における振幅分布を算出する機能部である。フーリエ変換部702は、低周波数振幅分布算出部701で算出された振幅分布から集光光学系103入力における波面歪を算出して出力する回路である。また、フーリエ変換部702の出力は形状可変鏡601に送出され、形状可変鏡601は、この波面歪の値に基づいて波面歪を補償するよう構成されている。

また、実施の形態2におけるデジタル信号処理部602についても、それぞれの機能を専用のハードウェアで構成しても、ソフトウェア、ファームウェア等で構成してもよい。

【0025】

次に、実施の形態2の空間光通信受信器の動作について説明する。

図8は、実施の形態2の空間光通信受信器の動作を示すフローチャートである。

図8のフローチャートにおいて、まず、ステップST101において、望遠鏡101が光信号を集光してコリメートするのは実施の形態1と同様である。次に、実施の形態2では、望遠鏡101から出力された光信号に対して形状可変鏡601はその波面歪を補償する(ステップST201)。その後、ステップST103～ステップST107は実施の形態1と同様である。実施の形態2では、次のステップST108aにおいて、適応等化器201は、実施の形態1と同様にMISO等化による合成を行うと共に、自身のフィルタ係数更新を行う。その後の並行処理のうち、位相補償部202及び復号部203による一方の処理(ステップST109、ST110)は実施の形態1と同様である。他方の処理では、まず、低周波数振幅分布算出部701によって、適応等化器201のフィルタ係数から、マルチコアファイバ104入射端面における、各コアに結合した光信号の振幅を

算出することで、マルチコアファイバ 104 入射端面における振幅分布を算出する（ステップ S T 202）。次に、フーリエ変換部 702 は、算出された振幅分布から、集光光学系入力における波面歪を算出し、これを形状可変鏡 601 での補償量として出力する（ステップ S T 203）。以下、低周波数振幅分布算出部 701 及びフーリエ変換部 702 の詳細について説明する。

【0026】

先ず、低周波数振幅分布算出部 701 について説明する。i 番目のコアの位相 θ_i は式 (9) により、適応等化器 201 のフィルタ係数から計算される。

$$\theta_i = \arg(|\bar{h}_x| h_x + |\bar{h}_y| h_y), \quad (9)$$

$$\bar{h}_x = \sum_{m=1}^M h_{ix}(m), \quad \bar{h}_y = \sum_{m=1}^M h_{iy}(m)$$

各コアの座標 (x_i, y_i) における位相から、座標に対して位相をアンラッピングすることで、マルチコアファイバ 104 入力端における位相の分布が得られる。また振幅の絶対値の分布については、式 (10) で計算される R M S から計算するか、入力信号の R M S から計算する。

$$RMS h_i = \sqrt{\sum_{m=1}^M h_{ix}^2(m) + h_{iy}^2(m)} \quad (10)$$

位相と振幅の絶対値を組み合わせることで、マルチコアファイバ 104 入射端面における振幅分布が得られる。

ここで、振幅分布は大気変動に伴い変動しており、低周波数振幅分布算出部 701 は、時間によって変動する振幅分布に、例えば 1 k H z の低域通過フィルタをかけて、低周波数成分を算出し、出力する。

【0027】

次に、フーリエ変換部 702 の詳細について説明する。フーリエ変換部 702 は入力される、マルチコアファイバ 104 入射端面における振幅分布を二次元フーリエ変換し、集光光学系 103 入力における振幅分布に変換する。振幅分布の位相を抽出することで、位相分布すなわち波面歪が算出され、形状可変鏡 601 に対して出力される。

形状可変鏡 601 では入力された波面歪を打ち消すように、鏡面形状が制御される。

【0028】

このように、実施の形態 2 では、形状可変鏡 601 で低速な波面歪を補償し、デジタル信号処理部 602 にて残留する歪を取り除くことで、デジタル信号処理部 602 において必要となる補償量を抑えることができ、結果的にデジタル信号処理部 602 が高速かつ高精度に波面歪の補償を行うことが可能となり、形状可変鏡 601 とデジタル信号処理部 602 を合わせた波面歪補償能力が高まる。

【0029】

実施の形態 2 においても、実施の形態 1 と同様にマルチコアファイバを用いることで、シングルモードファイバを用いた従来の構成と比較して S N R の改善が可能となる。また波面センサを必要とせず、波面センサのための光分配による損失はなく、ビーコンも不要となる効果がある。なお、マルチコアファイバを用いることで波面歪の検出が可能となるのは、マルチコアファイバの各コアを伝播する光信号が物理的な位置関係を保って伝播されることに依る。

さらに、実施の形態 1 と同様に、マルチコアファイバを用いることで、機構設計の制約

10

20

30

40

50

が減る。

また、マルチコアファイバは伝送媒体として製造されているため、密集したコア配置が安定して製造されており、空間光通信受信器を安価に実現することができる。

そして、形状可変鏡だけの補償では、空間的な位相の歪は補償されるが、強度分布の歪は補償されない。これに対し、実施の形態 2 では、適応等化器 201 によりコア毎の位相と強度に応じた合成を行うことができる。

【0030】

以上説明したように、実施の形態 2 の空間光通信受信器によれば、空間伝播した光信号を集光しコリメートされた光信号を出力する望遠鏡と、望遠鏡から出力された光信号の波面歪を補償する形状可変鏡と、形状可変鏡からの光信号を集光する集光光学系と、集光された光信号を送る複数のコアのマルチコアファイバと、マルチコアファイバで伝送された各コアの光信号をコア毎に異なるシングルモードファイバを通した各光信号をコヒーレント検波するコヒーレント検波器と、コヒーレント検波された信号のデジタル信号を復号するデジタル信号処理部とを備え、デジタル信号処理部は、マルチ入力シングル出力等化を行う適応等化器と、適応等化器からの信号の位相を補償する位相補償部と、位相を補償した信号を復号する復号部と、適応等化器のフィルタ係数からマルチコアファイバ入射端面における振幅分布の低周波成分を算出する低周波数振幅分布算出部と、低周波数振幅分布算出部からの振幅分布を、集光光学系の入力における振幅分布に変換して波面歪を算出するフーリエ変換部とを備え、形状可変鏡は、フーリエ変換部から出力される波面歪に対応して波面歪補償量を更新するようにしたので、信号対雑音電力比の劣化と構成の複雑化を抑制することができ、安定した空間光通信を行うことができる。

【0031】

実施の形態 3 .

実施の形態 3 は、デジタル信号処理部と、集光光学系の入力側に位置する形状可変鏡と波面センサと波面補償制御部とを協調させて制御するようにしたものである。

図 9 は、実施の形態 3 の空間光通信受信器の構成図である。

図示の空間光通信受信器は、望遠鏡 101、形状可変鏡 (DM) 601、分配器 (BS) 901、波面センサ (WFS) 902、波面補償制御部 903、集光光学系 103、マルチコアファイバ (MCF) 104、分離器 105、シングルモードファイバ 106、局発光源 107、コヒーレント検波器 108、アナログデジタルコンバータ (ADC) 109、デジタル信号処理部 (DSP) 904 を備える。ここで、分配器 901、波面センサ 902、波面補償制御部 903 及びデジタル信号処理部 904 以外の構成は図 6 に示した実施の形態 2 の構成と同様であるため、対応する部分に同一符号を付してその説明を省略する。

【0032】

分配器 901 は、入力された光信号を集光光学系 103 側と波面センサ 902 側に分配する分配器である。波面センサ 902 は、分配器 901 で分配された光の波面歪を検出するセンサである。波面補償制御部 903 は、波面センサ 902 で検出された波面歪の信号を形状可変鏡 601 に出力すると共に、残留する波面歪により生じるマルチコアファイバ 104 入射端面における振幅分布の信号をデジタル信号処理部 904 に出力するよう構成されている。デジタル信号処理部 904 は、アナログデジタルコンバータ 109 で変換されたデジタル信号の復号を行うと共に、波面補償制御部 903 から出力された振幅分布の信号に基づいて適応等化器 201a (図 11 に示す) の初期値を設定するよう構成されている。波面補償制御部 903 の内部構成を図 10 に示し、デジタル信号処理部 904 の内部構成を図 11 に示す。

【0033】

図 10 において、波面補償制御部 903 は、形状可変鏡制御部 (以下、DM 制御部という) 1001 とフーリエ変換部 (FT) 1002 を備える。DM 制御部 1001 は、波面センサ 902 で検出された波面歪のうち、形状可変鏡 601 の空間分解能とダイナミックレンジを考慮し、補償可能な範囲の波面歪の信号を形状可変鏡 601 に出力するよう構成

されている。また、DM制御部1001は、波面センサ902で検出された波面歪に対して形状可変鏡601で補償された後に残留する波面歪の値の信号を出力する機能を有する。フーリエ変換部1002は、DM制御部1001から出力された波面歪の値を位相分布に変換してフーリエ変換することで、マルチコアファイバ104入射端面における振幅分布を算出し、デジタル信号処理部904に出力するよう構成されている。

【0034】

図11において、デジタル信号処理部904は、適応等化器201a、位相補償部202、復号部203、立ち上がり検出部1101、等化係数初期設定部1102を備える。立ち上がり検出部1101はアナログデジタルコンバータ109からデジタル信号処理部904への信号入力開始されたことを検出する。等化係数初期設定部1102は、立ち上がり検出部1101により信号入力開始されたことを検出した際に、波面補償制御部903から入力される振幅分布に基づき適応等化器201aのフィルタに値を設定する機能部である。適応等化器201aは等化係数初期設定部1102により設定されたフィルタ係数を初期値として、入力信号に応じて適応的にフィルタ係数を更新するよう構成されたMISO等化器である。位相補償部202及び復号部203は実施の形態2と同様である。

【0035】

また、実施の形態3におけるデジタル信号処理部904と波面補償制御部903については、それぞれの機能部を専用のハードウェアで構成しても、ソフトウェア、ファームウェア等で構成してもよい。

【0036】

次に、実施の形態3の空間光通信受信器の動作について説明する。

図12は、実施の形態3の空間光通信受信器の動作を示すフローチャートである。

図12のフローチャートにおいて、まず、ステップST101において、望遠鏡101が光信号を集光してコリメートするのは実施の形態1、2と同様である。その後は二つの処理が並行して行われる。一方の処理は、形状可変鏡601によって光信号の波面歪を補償し、集光光学系103で集光して、マルチコアファイバ104内を伝播する処理（ステップST201、ST103、ST104）であり、これは実施の形態2と同様である。他方の処理は、分配器901によって分配された光信号から波面センサ902によって波面歪を検出し（ステップST301）、次に、波面補償制御部903によって、形状可変鏡601での補償量を算出すると共に（ステップST302）、マルチコアファイバ104での振幅分布を算出する処理（ステップST303）である。

【0037】

二つの並行した処理の後、分離器105によってコア毎に光信号が分離され（ステップST105）、コヒーレント検波器108によって局発光と干渉させたアナログ信号を得て、これがアナログデジタルコンバータ109によってデジタル信号に変換される。次に、デジタル信号処理部904の立ち上がり検出部1101で、入力したデジタル信号の立ち上がりを検出した場合（ステップST304 - Yes）、等化係数初期設定部1102は、適応等化器201bの等化係数の初期値設定を行う（ステップST305）。立ち上がり検出部1101は、アナログデジタルコンバータ109からの出力（例えばRMS）のいずれかが予め設定した閾値以上となった場合に、信号入力の開始を検出する。以下、等化係数初期設定部1102の処理の詳細について説明する。

【0038】

等化係数初期設定部1102は、波面補償制御部903から出力された振幅分布を入力し、振幅分布から各コアを伝播する光信号の振幅を算出する。ここで、実施の形態2と同様に適応等化器201aが長さMタップの1サンプル/シンボルで動作するFIRフィルタから構成されている場合を考え、例えば、i番目のコアの振幅が A_i となったとする。等化係数初期設定部1102はフィルタ係数を最大比合成に基づき、例えば式(11)のように係数を設定する。式中、*は複素共役を示す。ここで m_c は、タップの概略中心の位置を示し、例えば $M/2$ である。

10

20

30

40

50

$$\begin{aligned} h_{xi}(m_c) &= A_i^*, \\ h_{xi}(m) &= 0, \quad m \neq m_c \end{aligned} \quad (11)$$

適応等化器 201a は、等化係数初期設定部 1102 により設定されたフィルタ係数を初期値として、入力信号に応じて適応的にフィルタ係数を更新する（ステップ ST306）。その後は実施の形態 1 及び実施の形態 2 と同様に、適応等化器 201a により各コアに対応するデジタル信号が合成されて、位相補償部 202 で位相差が補償され（ステップ ST109）、復号部 203 で判定及び復号が行われる（ステップ ST110）。なお、ステップ ST304 において、等化係数初期設定部 1102 で、デジタル信号処理部 904 への入力信号が検出されなかった場合（ステップ ST304 - No）は、適応等化器 201a の初期値設定は行わず、ステップ ST306 に移行して適応等化器 201a による合成フィルタ係数の更新を行う。

【0039】

一般に MISO 等化器は、入力信号に対して適応的にフィルタ係数を設定するが、入力信号には雑音が載っているため、フィルタ係数を収束させるには多数の信号入力が必要であり、収束するまでに時間を要する。これに対し、実施の形態 3 では、波面補償制御部 903 からの信号に基づいて適応等化器 201b の係数の初期値を設定することで、概略収束すべき条件からフィルタ係数の更新を開始することができ、その結果、収束時間の短縮につながる。すなわち、信号の受信を開始した際に高速に通信を成立させることができる。また、形状可変鏡 601 とマルチコアファイバ 104 入射端面における振幅分布の関係はフーリエ変換の関係となるので、形状可変鏡 601 においては空間分解能が高く、変動範囲が大きい波面歪すなわち位相分布であったとしても、マルチコアファイバ 104 入射端面では、比較的空間分解能が落ちるかまたは位相変化を少なくすることができる。なお、この関係は形状可変鏡 601 とマルチコアファイバ 104 入射端面を入れ替えても同じである。従って、形状可変鏡 601 のみ、または、マルチコアファイバ 104 とデジタル信号処理部 904 のみでは補償できない、空間分解能が高くかつ変動範囲が大きい波面歪も補償することができる。

【0040】

波面補償制御部 903 からの振幅分布に基づき適応等化器 201a のフィルタ係数の初期値を等化係数初期設定部 1102 が設定できるのは、マルチコアファイバ 104 の各コアを伝送する光信号が物理的な位置関係を保って伝送されることに依る。

形状可変鏡だけを用いた補償では、空間的な位相の歪は補償されるが、強度分布の歪は補償されない。これに対し、実施の形態 3 では、実施の形態 1、2 と同様に、適応等化器 201b によりコア毎の位相と強度に応じた合成を行うことができる。

さらに、実施の形態 1 と同様に、マルチコアファイバを用いることで、機構設計の制約が減る。

【0041】

以上説明したように、実施の形態 3 の空間光通信受信器によれば、空間伝播した光信号を集光しコリメートされた光信号を出力する望遠鏡と、望遠鏡から出力された光信号を第 1 の方向と第 2 の方向に出力する分配器と、第 1 の方向に出力された光信号の波面歪を検出する波面センサと、第 2 の方向に出力された光信号の波面歪を補償する形状可変鏡と、形状可変鏡からの光信号を集光する集光光学系と、集光された光信号を伝送する複数のコアのマルチコアファイバと、マルチコアファイバで伝送された各コアの光信号をコア毎に異なるシングルモードファイバを通した各光信号をコヒーレント検波するコヒーレント検波器と、コヒーレント検波された信号のデジタル信号を復号するデジタル信号処理部と、波面センサで検出された波面歪に基づき形状可変鏡とデジタル信号処理部とを制御する波面補償制御部とを備え、波面補償制御部は、波面センサで検出した波面歪を打ち消すように形状可変鏡を制御する形状可変鏡制御部と、形状可変鏡からの出力に残留する波面歪を

算出し、波面歪をフーリエ変換し、マルチコアファイバの入射端面における振幅分布に変換して出力するフーリエ変換部とを備え、デジタル信号処理部は、マルチ入力シングル出力等化を行う適応等化器と、適応等化器からの信号の位相を補償する位相補償部と、位相を補償した信号を復号する復号部と、フーリエ変換部から出力された振幅分布に基づき、適応等化器の等化係数の初期値を設定する等化係数初期設定部とを備えたので、実施の形態 1 の効果に加えて、信号の受信を開始した際に高速に通信を成立させることができる。

【 0 0 4 2 】

実施の形態 4 .

実施の形態 4 は、デジタル信号処理部における適応等化器の誤収束を判定してその適応等化器の初期値を設定するようにしたものである。

10

図 1 3 は、実施の形態 4 の空間光通信受信器におけるデジタル信号処理部 1 3 0 0 を示す構成図である。

図示のデジタル信号処理部 1 3 0 0 は、適応等化器 2 0 1 b、位相補償部 2 0 2、復号部 2 0 3、立ち上がり検出部 1 1 0 1、等化係数初期設定部 1 1 0 2 a、誤収束判定部 1 3 0 1 を備える。適応等化器 2 0 1 b は、実施の形態 3 における適応等化器 2 0 1 a と同様に、等化係数初期設定部 1 1 0 2 a によって与えられる値を初期値として設定すると共に、誤収束判定部 1 3 0 1 に対して誤収束判定信号を与えるよう構成された M I S O 等化器である。等化係数初期設定部 1 1 0 2 a は、実施の形態 3 の等化係数初期設定部 1 1 0 2 と同様に、波面補償制御部から出力された振幅分布の信号を入力し、この信号または誤収束判定部 1 3 0 1 から出力された誤収束信号が入力された場合に適応等化器 2 0 1 b の初期値を設定するよう構成されている。デジタル信号処理部 1 3 0 0 内における位相補償部 2 0 2 及び復号部 2 0 3 の構成は実施の形態 1 ~ 実施の形態 3 の位相補償部 2 0 2 及び復号部 2 0 3 と同様である。また、デジタル信号処理部 1 3 0 0 以外の空間光通信受信器の構成は図 9 に示した実施の形態 3 の構成と同様であるため、図示及び各構成要素の説明は省略する。なお、以下の空間光通信受信器の説明では図 9 の構成を用いて行う。

20

【 0 0 4 3 】

また、実施の形態 4 におけるデジタル信号処理部 1 3 0 0 と波面補償制御部 9 0 3 については、それぞれの機能部を専用のハードウェアで構成しても、ソフトウェア、ファームウェア等で構成してもよい。

【 0 0 4 4 】

30

次に、実施の形態 4 の空間光通信受信器の動作について説明する。

図 1 4 は、実施の形態 4 の空間光通信受信器の動作を示すフローチャートである。

図 1 4 のフローチャートにおいて、ステップ S T 1 0 1 からステップ S T 1 0 6 までの処理は、図 1 2 に示す実施の形態 3 のステップ S T 1 0 1 からステップ S T 1 0 6 までの処理と同様である。次に実施の形態 4 では、ステップ S T 1 0 6 でコヒーレント検波器 1 0 8 がコヒーレント検波を行った後、等化係数初期設定部 1 1 0 2 a は、デジタル信号処理部 1 3 0 0 への信号入力があったか、すなわち、立ち上がり検出部 1 1 0 1 において信号の立ち上がりを検出した場合、または、誤収束判定部 1 3 0 1 から誤収束の判定信号が出力された場合（ステップ S T 4 0 1 - Y e s）に、適応等化器 2 0 1 b の初期値設定を行う（ステップ S T 3 0 5）。なお、デジタル信号処理部 1 3 0 0 への信号入力があった場合の等化係数初期設定部 1 1 0 2 a の初期値設定の動作は実施の形態 3 と同様である。

40

【 0 0 4 5 】

また、誤収束判定部 1 3 0 1 による等化係数初期設定部 1 1 0 2 a の初期値設定の動作は次の通りである。まず、誤収束判定部 1 3 0 1 は、波面補償制御部 9 0 3 から出力された振幅分布と適応等化器 2 0 1 b のフィルタ係数とを入力し、これらを比較することにより適応等化器 2 0 1 b の誤収束を判定する。判定結果が誤収束であった場合、誤収束判定部 1 3 0 1 は、等化係数初期設定部 1 1 0 2 a に対し、適応等化器 2 0 1 b の初期値設定信号を出力する。誤収束判定は、例えば、適応等化器 2 0 1 b のフィルタ係数から、式 (1 2) で計算される $h_{avg,i}$ と、 A_i^* とを式 (1 3) で比較し、式 (1 3) の値 y が例えば 0 . 5 以下となった場合に、誤収束と判定する。

50

$$h_{avg} = |\overline{h_x}|h_x + |\overline{h_y}|h_y,$$

$$\overline{h_x} = \sum_{m=1}^M h_{ix}(m), \quad \overline{h_y} = \sum_{m=1}^M h_{iy}(m) \quad (12)$$

$$Y = \frac{|\sum_{i=1}^N h_{avg} \cdot A_i^*|}{\sqrt{(\sum_{i=1}^N h_{avg}^2) (\sum_{i=1}^N A_i^{*2})}} \quad (13)$$

10

等化係数初期設定部 1102a は、誤収束判定部 1301 で誤収束と判定された場合、デジタル信号処理部 1300 への信号入力があった場合と同様に適応等化器 201b の初期値設定を行う（ステップ ST305）。

【0046】

ステップ ST305 で適応等化器 201b の初期値を設定した以降の処理（ステップ ST306～ステップ ST109～ステップ ST110）については、実施の形態 3 と同様である。なお、ステップ ST401 において、等化係数初期設定部 1102a で、デジタル信号処理部 1300 への入力信号と誤収束判定部 1301 による誤収束判定信号が共に検出されなかった場合（ステップ ST401 - No）は、適応等化器 201b の初期値設定は行わず、ステップ ST306 に移行して適応等化器 201b による合成フィルタ係数の更新を行う。

20

【0047】

以上説明したように、実施の形態 4 の空間光通信受信器によれば、デジタル信号処理部は、波面補償制御部からの残留波面歪量と、適応等化器のフィルタ係数とを比較し、適応等化器の誤収束を検出した場合に等化係数初期設定部に誤収束信号を出力する誤収束判定部を備え、等化係数初期設定部は、誤収束判定部から誤収束信号が出力された場合に適応等化器の初期値を設定するようにしたので、実施の形態 3 の効果に加えて、適応等化器が誤収束状態で留まることを避けることができる。

【0048】

実施の形態 5 .

30

実施の形態 5 は、マルチコアファイバを、光増幅を行うマルチコアファイバアンプとしたものである。

上記実施の形態 1～4 におけるマルチコアファイバ 104 をマルチコアファイバアンプとしても良く、このマルチコアファイバアンプによって光信号を伝播する際に光増幅を行う。このような構成により、コヒーレント検波において光信号を電気信号に変換する際の雑音を抑えることができ、信号の SNR が改善し、通信品質を向上させることができる。

【0049】

なお、本願発明はその発明の範囲内において、各実施の形態の自由な組合せ、あるいは各実施の形態の任意の構成要素の変形、もしくは各実施の形態において任意の構成要素の省略が可能である。

40

【産業上の利用可能性】

【0050】

以上のように、この発明に係る空間光通信受信器は、空間伝播した光信号を入力してコヒーレント検波し、この信号のデジタル信号を復号する構成に関するものであり、例えば、航空機や衛星などの移動体に送受信器を搭載した大容量空間通信に用いるのに適している。

【符号の説明】

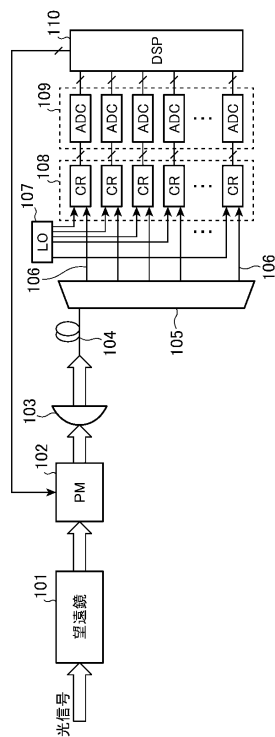
【0051】

101 望遠鏡、102 ポインティングミラー（PM）、103 集光光学系、104 マルチコアファイバ（MCF）、105 分離器、106 シングルモードファイバ

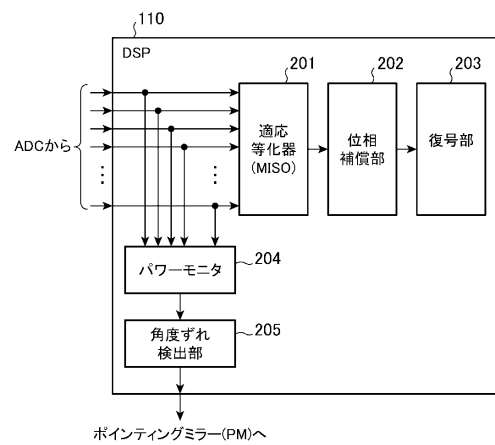
50

、 1 0 7 局発光源、 1 0 8 コヒーレント検波器、 1 0 9 アナログデジタルコンバータ (ADC)、 1 1 0 , 6 0 2 , 9 0 4 , 1 3 0 0 デジタル信号処理部 (DSP)、 2 0 1 , 2 0 1 a , 2 0 1 b 適応等化器、 2 0 2 位相補償部、 2 0 3 復号部、 2 0 4 パワーモニタ、 2 0 5 角度ずれ検出部、 6 0 1 形状可変鏡 (DM)、 7 0 1 低周波数振幅分布算出部、 7 0 2 , 1 0 0 2 フーリエ変換部 (FT)、 9 0 1 分配器 (BS)、 9 0 2 波面センサ (WFS)、 9 0 3 波面補償制御部、 1 0 0 1 形状可変鏡制御部 (DM制御部)、 1 1 0 1 立ち上がり検出部、 1 1 0 2 , 1 1 0 2 a 等化係数初期設定部、 1 3 0 1 誤収束判定部。

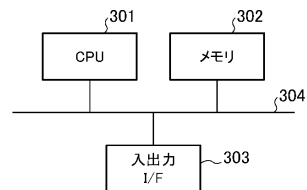
【図 1】



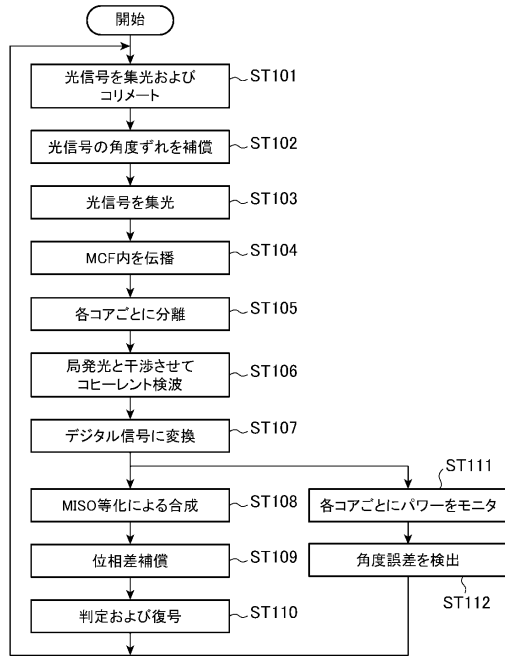
【図 2】



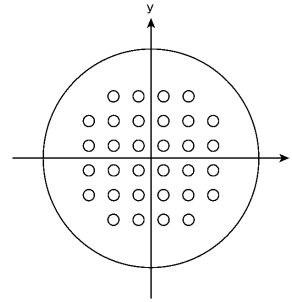
【図 3】



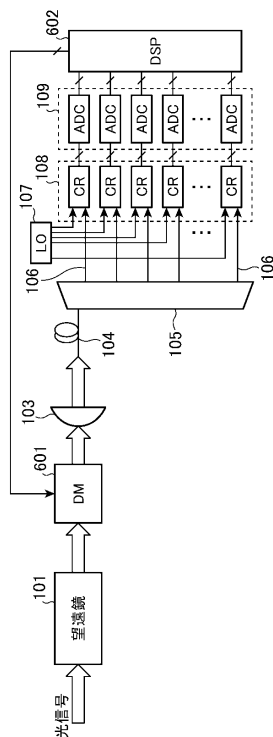
【図 4】



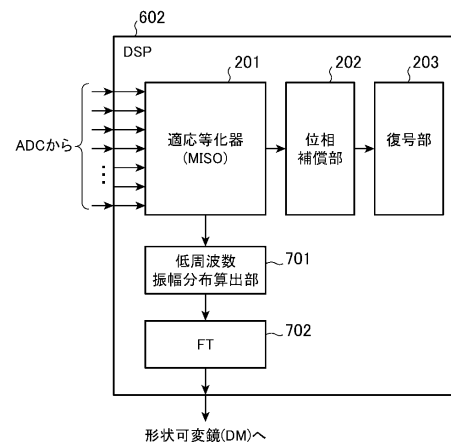
【図 5】



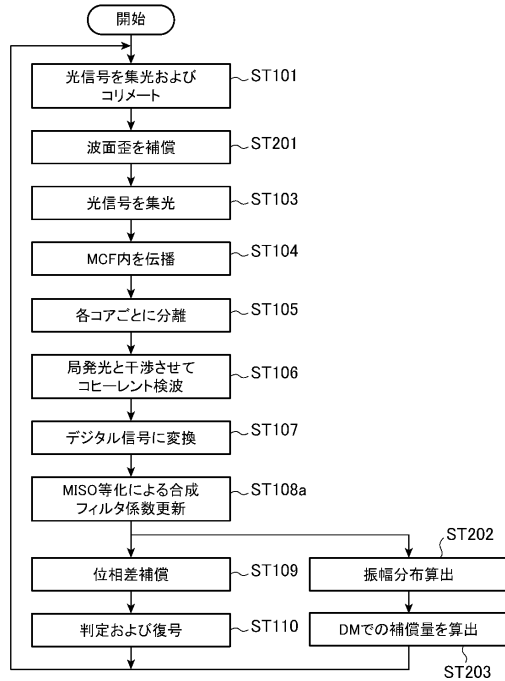
【図 6】



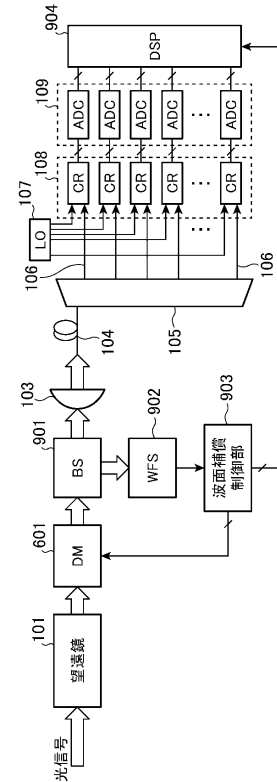
【図 7】



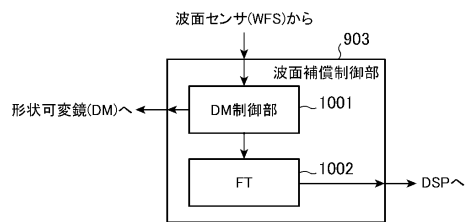
【図 8】



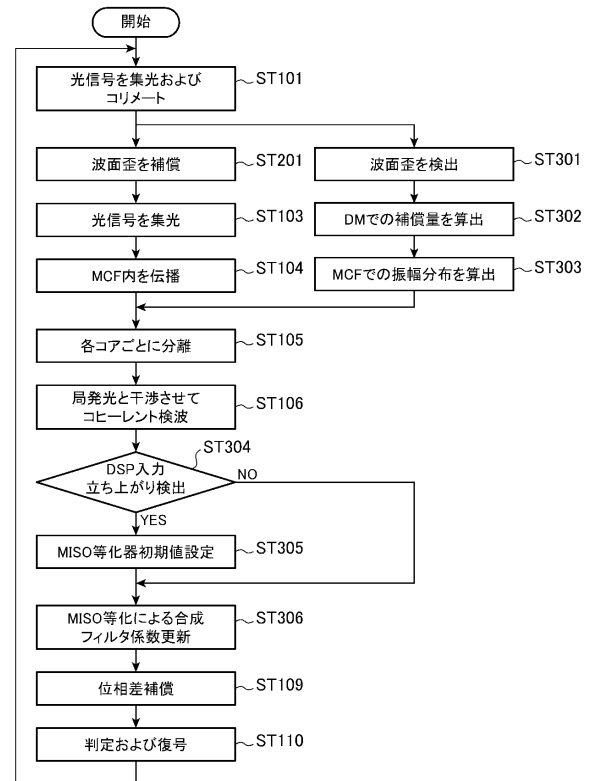
【図 9】



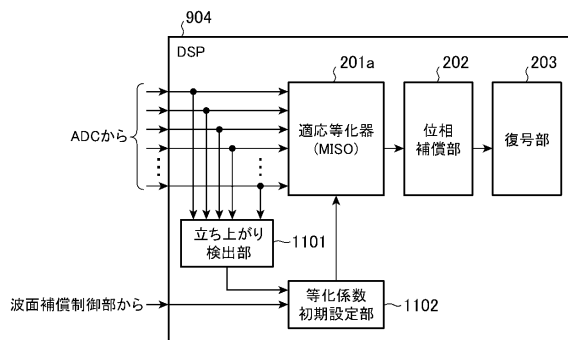
【図 10】



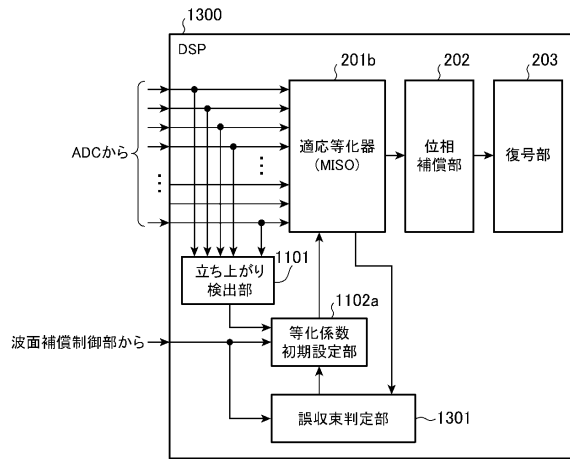
【図 12】



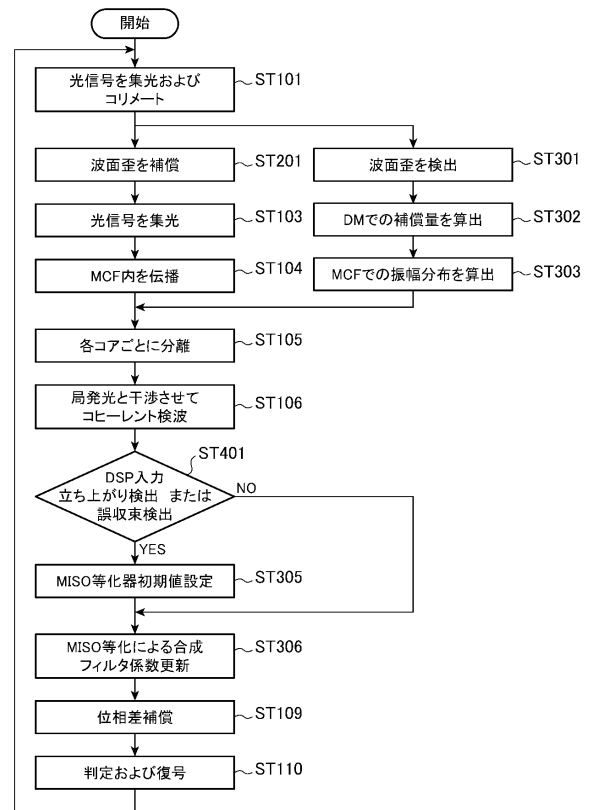
【図 11】



【図 13】



【図 14】



フロントページの続き

- (72)発明者 原口 英介
東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内
- (72)発明者 安藤 俊行
東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内

審査官 対馬 英明

- (56)参考文献 特表2013-535871(JP,A)
特開2002-314487(JP,A)
特開2016-144197(JP,A)
特開2017-152773(JP,A)
特開2001-36471(JP,A)
国際公開第2016/047100(WO,A1)
国際公開第2017/013864(WO,A1)

- (58)調査した分野(Int.Cl.,DB名)
H04B 10/00 - 10/90
H04J 14/00 - 14/08