

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4132051号
(P4132051)

(45) 発行日 平成20年8月13日(2008.8.13)

(24) 登録日 平成20年6月6日(2008.6.6)

(51) Int.Cl.

G01C 19/72 (2006.01)

F 1

G01C 19/72
G01C 19/72M
J

請求項の数 4 (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願2003-558431 (P2003-558431)
 (86) (22) 出願日 平成15年1月7日 (2003.1.7)
 (65) 公表番号 特表2005-515410 (P2005-515410A)
 (43) 公表日 平成17年5月26日 (2005.5.26)
 (86) 國際出願番号 PCT/US2003/000418
 (87) 國際公開番号 WO2003/058168
 (87) 國際公開日 平成15年7月17日 (2003.7.17)
 審査請求日 平成17年12月9日 (2005.12.9)
 (31) 優先権主張番号 10/041,192
 (32) 優先日 平成14年1月8日 (2002.1.8)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(73) 特許権者 500575824
 ハネウェル・インターナショナル・インコ
 ーポレーテッド
 アメリカ合衆国ニュージャージー州O 7 9
 6 2 - 2 2 4 5, モーリスタウン, コロン
 ピア・ロード 1 0 1, ピー・オー・ボッ
 クス 2 2 4 5
 (74) 代理人 100089705
 弁理士 社本 一夫
 (74) 代理人 100076691
 弁理士 増井 忠式
 (74) 代理人 100075270
 弁理士 小林 泰
 (74) 代理人 100080137
 弁理士 千葉 昭男

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】ファイバ光源の相対強度雑音制御装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光ファイバ・ジャイロスコープの相対過剰雑音を抑制するシステム(300)であって、光出力を生成するエルビウム・ドープ広帯域光源(112)であって、前記光出力の光の揺らぎを制御するように構成されるエルビウム・ドープ広帯域光源(112)と、

前記光出力を受光し、その一部をサンプリングして、サンプリング信号を提供するよう結合されるファイバ・タップカプラ(116)と、

前記サンプリング信号を感知し、その強度の揺らぎを検出して、前記サンプリング信号を、前記サンプリング信号の強度に比例する電圧を有する検出信号に変換するよう結合される光検出器(250)と、

前記検出信号に応答するサーボ制御(302)であって、前記サーボ制御は、誤差信号を生成するように配置され、これにより、前記エルビウム・ドープ広帯域光源(112)が、前記光出力の強度を変更し、それにより、前記光出力の強度の揺らぎを消去させ、前記サーボ制御は、バイアス変調周波数又はそれより高い周波数で最大の電力利得を有するよう構成される、ところのサーボ制御(302)と、

を備え、

前記タップカプラ(116)、前記光検出器(250)、前記エルビウム・ドープ広帯域光源(112)、および前記サーボ制御(302)は、前記エルビウム・ドープ広帯域光源(112)によって提供される利得に応答する開ループ利得を有する負のフィードバックループを備える、システム。

【請求項 2】

請求項 1 に記載のシステムであって、

前記光検出器 (250) は、光ダイオードとトランスインピーダンス増幅器とを備え、

前記サーボ制御 (302) は、少なくとも 1 つの 2 次フィードバック制御論理 (620) をさらに備え、

前記光源 (112) は、偏光子を備える、システム。

【請求項 3】

請求項 1 に記載のシステムであって、

前記サーボ制御 (302) は、進み遅れ回路 (610) を有する少なくとも 1 つの 2 次フィードバック制御論理 (620) をさらに備える、システム。

10

【請求項 4】

請求項 3 に記載のシステムであって、前記進み遅れ回路 (610) は、

演算増幅器の出力と負の入力端子との間に結合される抵抗及びキャパシタの並列組み合わせと、

前記演算増幅器の負の入力端子に接続される負荷抵抗と、
を備える、システム。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、一般に、光ファイバ・ジャイロスコープ、および光ファイバ・ジャイロスコープを作成および動作する方法に関する。

20

【背景技術】**【0002】**

光ファイバ・ジャイロスコープは、光ファイバ技術が通信システムにもたらした利点の多くを測定システムにもたらす有力なクラスのセンサに含まれる。たとえば、光ファイバ・ジャイロスコープにおいて使用される光ファイバの非常に広い帯域幅により、光ファイバ・ジャイロスコープは、大量の測定情報を単一ファイバを経て伝達することが可能になる。さらに、光ファイバは、誘電体なので、感知環境に存在する可能性がある電磁波からの干渉の影響を受けない。さらに、光ファイバ・ジャイロスコープは、温度ならびに圧力の劣悪な条件下において、および迅速に金属を腐食することが一般的である毒性または腐食性の環境において、通常、機能することができる。

30

【0003】

しかし、多くの従来の光ファイバ・ジャイロスコープに固有の問題は、低回転速度において、過剰雑音妨害に敏感なことがあることがある。たとえば、周知のレーリ散乱 (Raleigh scattering) (すなわち、サイズが波長より小さい材料密度の不均質性による光の散乱)、偏光雑音 (polarization noise) (すなわち、電圧の揺らぎにより観測される偏光の揺らぎ)、およびカーラー効果 (Kerr effect) によるゼロ回転ドリフト (zero rotation drift) (すなわち、等方性透明物質が電場に配置されたときの複屈折の進展) は、一般的な問題であり、回転速度の感知に誤差を導入することにより、光ジャイロスコープ出力の精度がしばしば低減される。

40

【0004】

過剰雑音妨害に由来する回転速度感知の誤差を最小限に抑えるために、光ファイバ・ジャイロスコープ・システムの設計者は、通常、ジャイロスコープ・システムの構築に広帯域光源を使用する。より具体的には、光ファイバ・ジャイロスコープの設計者は、通常、たとえばスーパー・ルミネッセント・ダイオード (SLD, super luminescent diode) またはスーパー・ルミネッセント・ファイバ源 (SLS, super luminescent fiber source) など、安定なスペクトルを有する広帯域光源を使用する。しかし、これらのソースを使用する欠点は、帯域幅が有限であるために、これらの広帯域源は、追加の過剰雑音項をジャイロ出力に導入することである

50

。これにより、光ファイバ・ジャイロスコープ・システムの性能および満足度が低下する。したがって、最適なジャイロスコープの性能を達成するために、広帯域源によってジャイロ出力に導入される過剰雑音成分を排除することが望ましい。

【0005】

残念ながら、SLDが光ファイバ・ジャイロスコープにおいて実施される場合、光ファイバ・ジャイロスコープは、一般に、温度に対する高い波長感度、単一モードファイバへの非効率的な結合、および光学フィードバックに対する耐性の欠如により悪影響を受ける。したがって、近年では、光ファイバ・ジャイロスコープの設計者は、SLDを使用する光ファイバ・ジャイロスコープ・システムより、SLDに固有の問題のほとんどを通常提示しないスーパー・ルミネッセント・ファイバ源(SLS)を対象としている。

10

【0006】

たとえば、SLSを使用する場合、光ファイバ・ジャイロスコープは、SLSスペクトル内の温度範囲にわたって、より安定な応答を有する。すなわち、SLSスペクトルの温度安定性、具体的には中心波長は、SLDの安定性よりはるかに優れており、放出波長は、通常、約0.05nm/degCだけ変化する。さらに、SLSで設計することによって、光ファイバ・ジャイロスコープの設計者は、SLSにおいて利用可能であるより多くの電力をSLSにおいて生成することができる。たとえば、通常のSLDでは、利用可能な電力は、約30mWであり、おそらくはそのせいぜい数ミリワットを単一モードファイバに結合することができる。一方、通常のSLSを使用する場合、光ファイバ・ジャイロスコープの設計者は、約40mWから200mWの電力を生成することができる。それでも依然として、実際のシステムでは、源/システム境界からの望ましくない擬似反射が、システムのファイバに結合することができる電力を大きく低減することができる。これらの反射は、源とシステムファイバとを融合ガラス-ガラス接合で接合することによって、SLSファイバ装置では最小限に抑えることができるが、これは、SLDでは通常実現することができない。最後に、SLSファイバ源の高い変換効率、およびそのポンプ帯域の広い特性により、SLSは、多くのコンパクトなレーザダイオードポンプ構成にとって、SLDより有益な選択肢となる。

20

【0007】

スーパー・ルミネッセント・ファイバ源(SLS)は、通常、ルーセントテクノロジー(Lucent Technologies、ミズーリ州チェスターフィールド在)のモデルHG980などの3価イオン希土類元素がドープされたコアを有する単一モードファイバ、およびJDSユニフェーズ(JDS Uniphase、コネチカット州ブルームフィールド在)のモデルWS1415-LWなどの波長分割マルチプレクサ(WDM)からなる。SLSは、当技術分野では周知であり、具体的には通信分野において、広帯域(たとえば、10~30ナノメートルの大きさ)レーザ様(高度に誘電性)光ビームを多くの応用分野に提供するために有利に使用してきた。例示的なスーパー・ルミネッセント・ファイバ源を記述するために、参照によって本明細書に組み込まれている「Journal of Lightwave Technology」、Vol. 7、No. 5、1989年5月においてIEEEによって発行されたデスブリエ(Emmanuel Desurvire)およびシンプソン(J.R. Simpson)による「Amplification of Spontaneous Emission in Erbium-Doped Single-Mode Fibers」という名称の文献を参照されたい。

30

【0008】

留意したように、SLSは、通常、3価イオン希土類元素がドープされたコアを有する、ある長さの単一モードファイバを含む。たとえば、ネオジウム(Nd³⁺)およびエルビウム(Er³⁺)は、コアがレーザ媒体として作用するように、単一モードファイバのコアにドープするために使用することが可能な希土類元素である。動作中、ファイバは、ポンプレーザによって提供されるポンプ入力信号を一端において受け取る。ポンプ入力信号は、通常、特有の波長_pを有するレーザ信号である。ファイバコア内のイオンは、波

40

50

長_pの入力レーザ放射を吸収し、その結果、これらのイオンの外郭の電子は、イオンのより高いエネルギー状態に励起される。十分なポンプ電力がファイバの端部に入力されたとき、ポピュレーション反転が創出され（すなわち、コア内のより多くの電子が、基底状態より励起状態にある）、著しい量の蛍光が、ファイバの両方向に沿って生成される。周知であるように、蛍光（すなわち、異なる波長_sにおける光子の放出）は、電子が励起状態から基底状態に自発的に戻るためであり、その結果、波長_sの光子が、励起状態から基底状態に遷移する際に放出される。ファイバから波長_sにおいて放出される光は、従来のレーザ光のように、高度に指向性の光である。しかし、従来のレーザ（すなわち、光共振器を組み込むレーザ）とは異なるこの放出の1つの主な特性は、スーパー・ルミネッセント・ファイバ源から放出される光のスペクトル内容が、一般に非常に広い（1ナノメートルと30ナノメートルとの間）ことである。したがって、ファイバによって出力される光信号は、通常、波長_p + 約 - 15ナノメートルにある。

【0009】

従来の光ファイバ・ジャイロスコープの構築および動作は、周知であり、したがって、本明細書ではさらに議論しない。光ファイバ・ジャイロスコープの通常の議論は、1995年11月7日にストランドジョルド（Strandjord）に発行され、かつ参考によって本明細書に組み込まれている米国特許第5,465,149号明細書に見ることが可能である。例示のために、図1は、従来の技術において見ることが可能である例示的な光ファイバ・ジャイロスコープ・システムを示す。一般に、システム100の光学部分は、このシステムが相互性であることを保証するように、光路に沿っていくつかの特徴を含む。すなわち、システムを考慮するとき、以下で記述するように、非相互性位相差シフトの特有の導入を除いて、ほぼ同一の光路が、反対方向に伝播する電磁波のそれぞれについて生じることを理解されたい。一般に、光路に沿った特徴には、光ファイバ光源112、ファイバカプラ116、多機能処理チップ（たとえば、集積回路チップ）120、および光ファイバコイル110が含まれる。これらは、すべて、光ファイバ部分114、118、124、および126によって多様に接続される。

【0010】

コイル状光ファイバは、周囲の回転が感知される軸の回りに巻かれた単一モード光ファイバを使用して、コアまたはスプールの回りにコイル110を形成する。単一モードファイバを使用することにより、電磁波または光波の経路を一意に確定することが可能になり、さらに、そのような誘導波の位相面を一意に確定することも可能になる。これは、相互性の維持に大きく役立つ。

【0011】

光源112は、光ファイバシステム100を経て電磁波を伝播させる任意の広帯域光源とすることが可能である。この源112は、通常、半導体スーパー・ルミネッセント・ダイオードまたは希土類ドープファイバ光源であり、830ナノメートル（nm）と1550nmとの間の通常の波長の範囲にわたって、スペクトルの赤外部分に近い電磁波を提供する。一般に、源112は、コイル110の散乱サイトにおけるレーリー散乱およびフレネル散乱によるこれらの波の間における位相シフト差の誤差を低減するように、放出光について短いコヒーレンス長を有する。

【0012】

光源112と光ファイバコイル110との間に、光ファイバ形成コイル110の端部をいくつかの光結合構成要素に延長することによって形成される光路構成が示されている。光結合構成要素は、全光路をいくつかの光路部分に分割する。図示したように、光ファイバ部分114が、光源112からの最適な光放出点において光源112に接して配置され、さらに、第1光指向性カプラ（光学光ビームカプラまたは波長コンバイナおよびスプリッタとも呼ばれる）116まで延びる。この場合、光ファイバ部分114は、光源112とカプラ116とが、常に接続されることを保証する。

【0013】

カプラ116は、光透過性媒体を内部に有し、光透過性媒体は、カプラ116の各端部

10

20

30

40

50

に示されている4つのポートa、b、c、およびdの間に延びる。図からわかるように、ポートaは、それに接して配置された光ファイバ114を介して光源112に接続される。ポートbでは、光指向性カプラ116の感知端部に、光検出器138に接して配置されるように延びる他の光ファイバ136が示されている。

【0014】

光検出器138は、それに接して配置された光ファイバ部分136から上に当たる電磁波または光波を検出し、信号成分選択手段(図示せず)に応答して光電流を提供する。この光電流は、上記で指摘したように、上に当たる2つのほぼコヒーレントな光波の場合、そのような1対のほぼコヒーレントな光波間における位相差の余弦に依存する光電流出力の提供について、かさ上げ余弦関数に従う。この光検出器装置は、非常に低いインピーダンスにおいて動作して、衝突放射の線形関数であり、かつ、通常、p-i-n光ダイオードとすることが可能である光電流を提供する。

【0015】

また、カプラ116に接して、光ファイバ134が配置される。この光ファイバ134は、通常、ジャイロスコープの動作には使用されない可能性がある。カプラ116のポートcに接して、多機能集積光学チップ120まで延びる他の光ファイバ118がある。多機能集積光学チップ120は、位相変調器128、およびy接合部132を形成する集積光学機器導波路122ならびに130を含む。多機能処理チップ120から、光ファイバ124および126が延び、それぞれ、導波路122および130を介してファイバコイル110に接続される。

【0016】

ファイバカプラ116のポートbとジャイロスコープ出力との間には、ファイバコイル110の回転速度に対応する出力を感知および生成するように設計された様々な光感知および電気構成要素がある。具体的には、光検出器138、アナログ信号調整装置140、アナログデジタル変換器(A/D)変換器142、デジタル復調器144、および方形波バイアス変調器146が含まれ、各要素は、光ファイバ・ジャイロスコープ・システム出力の処置中、電気接続されて維持される。上述した要素のそれぞれの機能は、当技術分野では周知であることに留意されたい。したがって、光ファイバ・ジャイロスコープ・システム100の動作の理解を補助するために、要素について簡潔にのみ以下において議論する。

【0017】

光指向性カプラ(たとえば、ファイバカプラ)116は、その任意のポートにおいて電磁波または光の受光に際して、透過光の約半分が、入りポートを有する端部とは反対側の端部にあるカプラ116の2つのポートのそれぞれにおいて出現するように、そのような光を透過させる。一方、そのような波または光は、入射光ポートとカプラ112の同じ端部にあるポートには透過されない。たとえば、ポートaにおいて受容された光は、ポートcおよびdには透過されるが、ポートbには透過されない。同様に、ポートcにおいて受容された光は、ポートaおよびbには透過されるが、ポートdには透過されない、などである。

【0018】

したがって、動作中、光源112は、広帯域光波を、光ファイバ114を介してカプラ116のポートに透過させる。ファイバカプラ116は、透過光を分割して、光をポートcおよびdに提供する。この場合、ポートdに提供された光は、通常、ジャイロスコープによって使用されない可能性がある。しかし、ポートcに提供された光は、光ファイバ118を介して多機能集積光学チップ120にさらに透過され、そこで、光波は、y接合部132においてさらに分割されて、導波路122および130に提供される。

【0019】

導波路122に提供された光は、光ファイバ124を介してファイバコイル110に透過され、そこで、ファイバコイル110の全長の回りを時計方向に伝播する(これ以後、「cw波」)。同様に、導波路130の光波は、光ファイバ126を介してファイバコイ

10

20

30

40

50

ル 110 に提供され、そこで、光波は、ファイバコイル 110 の全長の回りを半時計回りに伝播する（これ以後、「ccw 波」）。

【0020】

それぞれ光ファイバ 124 および 126 を介してファイバコイル 110 から多機能集積光学チップ 120 に透過された後、ccw 波および cw 波は、y 接合部 132 において組み合わされ、その後、光ファイバ 118 を介して光ファイバ 116 のポート c にさらに提供される。上記で留意したように、2 つの光波がポート c に提供された後、次いで、波は、ポート a および b に提供されるが、ポート d には提供されない。

【0021】

ポート b は、光ファイバ 136 を介して光検出器 138 にさらに接続され、それにより、ccw 波および cw 波は、光検出器 138 において検出され、光検出器 138 は、出力光電流 i をアナログ信号調整ユニット 140 に提供する。光電流 i の値は、上に当たる 2 つの電磁波または光波の強度に比例する。したがって、光電流 i は、検出器 138 に当たる 2 つの波の位相差の余弦に従うことが予期される。

【0022】

記述した従来の技術の構成では、光検出器 138 からの出力信号は、アナログ信号調整ユニット 140 (ASC) において、電圧に変換して、增幅することが可能である。次いで、出力電圧信号は、アナログデジタル変換器 142 にさらに提供することが可能であり、そこで、デジタル信号に変換され、その後、PSD / デジタル復調器 144 に渡される。PSD / デジタル復調器 144 は、位相復調システムの一部として作用し、周知の装置である。そのような PSD / デジタル復調器 144 は、光検出器 138 の出力信号から基本周波数 f_b 、または復調信号生成装置 146 の基本周波数により高次の高調波をえたものの振幅を抽出して、光検出器 138 に当たる電磁波の相対位相の表示を提供する。この情報は、ジャイロスコープの出力として、PSD / デジタル復調器 144 によって提供される。

【0023】

通常、過剰雑音（たとえば、「相対強度雑音」）を最小限に抑えることを要求するジャイロスコープの設計者は、信号測定の作業点が、回転率の変化につき、最大測定信号変化の特徴的な範囲に常にるように、ファイバコイル内を反対に伝播する光を位相変調することを要求する技法を使用する。すなわち、角度回転の感知に対するジャイロスコープの感度を最大にすることを要求する設計者は、ジャイロスコープの感度を最大にするために、特定のジャイロスコープの構成について生じることがある最大変調を考慮しなければならない。様々な従来の相対強度雑音または過剰雑音の抑制技法は、参照によって本明細書に完全に組み込まれている、ストランドジョルド (Strandjord) らに 2001 年 3 月 20 日に発行された米国特許第 6,204,521 号明細書に記載されている。

【0024】

従来の技術に見られる過剰雑音低減技法の 1 つのタイプは、「減算」技法と呼ばれ、これを図 2 を参照して示す。図 2 では、図 1 と同じ参照符号は、同様の動作の同様の構成要素を示す。図 1 に示したものとは異なり、カプラ 116 のポート d を向けられる光源 112 の部分が使用される。すなわち、光ファイバ部分 134 に向けられる光信号は、第 2 光検出器 250 にさらに提供され、そこで、信号は、第 2 光電流に変換される。光検出器 250 によって生成された第 2 光電流は、可変利得増幅器 251 にさらに提供され、そこで、増幅され、その後、アナログアダ- 253 に提供される。

【0025】

同様にして、カプラ 116 は、光信号を、ポート b および光ファイバのファイバ部分 136 を介して第 1 光検出器 138 に提供する。次いで、第 1 光検出器 138 は、信号を第 1 光電流に変換し、第 1 光電流は、次いで、アナログアダ- 253 に提供される。アナログアダ- 253 は、アナログ信号を組み合わせるための任意の変換アダ- とすることが可能であることを理解されたい。したがって、アナログアダ- 253 において、第 1 光電流および第 2 光電流は加算されて、ASC 116 に提供される加算光電流を生成する。

10

20

30

40

50

【0026】

理想的な光学構成要素では、第1光検出器138および第2光検出器250において観測される過剰雑音は、相関される。すなわち、コイル固有周波数においてバイアス変調で動作する光ファイバ・ジャイロスコープでは、奇数高調波を含む固有周波数において生じる光検出器138における過剰雑音は、同じ周波数において生じる光検出器250における雑音とは、位相が180度ずれている。したがって、光検出器250からの適切に利得調整された信号を、光検出器138からの信号に追加することによって、過剰雑音に関連するアダ-253の出力における雑音は、理想的な構成要素を使用するジャイロの固有周波数および奇数高調波においてゼロに低減される。しかし、偏光クロストークなど、実際の光学構成要素の不完全性により、過剰雑音が実際に低減される程度は限定される。

10

【0027】

「減算」技法の追加の利点は、高レベルの過剰雑音低減を有するために、光検出器250からの信号の振幅調整は、比較的精確でなければならないことである。具体的には、振幅調整の量は、光検出器138および250の応答性、増幅器251の利得、バイアス変調振幅、およびファイバカプラ116から多機能チップ122ならびにファイバコイル110を経て再びファイバカプラ116を経て光検出器138ならびに250に伝播する光波の光損失など、多くのシステムパラメータに依存する。さらに、システムパラメータが、ジャイロの老朽化に伴い、時間と共に変化する際に、振幅調整におけるこれらのシステムの誤差が増大することに留意することが重要である。

【0028】

20

システムパラメータの変化は、たとえば放射に暴露される宇宙応用分野、または時間の経過に伴い光損失を増大させるコイルファイバの老朽化機構に遭遇する潜水艦ナビゲーション応用分野など、高性能光ファイバ・ジャイロスコープを使用するシステムにおいて、よりいっそう顕著になる（この老朽化機構は、現時点ではよく理解されていない）。これらのシステムでは、検出器250からの信号に対して行われる振幅調整は、留意したシステムパラメータに関してしばしば容易に生じるドリフトを追跡するために、通常、更新されなければならない。したがって、パラメータの更新は、通常、可変利得増幅器を使用することによって実施され、この場合、利得制御252は、光検出器138および250において検出される光のレシオメトリック測定に基づいて調整される。レシオメトリック測定を実施するために使用される可変利得増幅器および回路は、望ましくない複雑さをジャイロスコープの設計および動作に追加することを理解されたい。

30

【0029】

しかし、「減算」技法に固有の欠点は、過剰雑音サーボを実施することによって、通常、克服することが可能であることに留意されたい。一般に、過剰雑音サーボの使用は、超蛍光ファイバ光源の一部をサーボに提供することを通常含み、サーボは、提供された光を使用して、光源ポンプ電流（たとえば、負のフィードバック）を制御する。このようにして、超蛍光ファイバ光源の光出力強度は、ポンプ電流の関数となり、それにより、光出力の強度のランダムな揺らぎは、ポンプ電流レベルの適切な変化を加えることによって、消去することが可能である。

【0030】

40

しかし、高性能光ファイバ・ジャイロスコープがエルビウム・ファイバを使用した場合、サーボ制御と共に減算技法を使用することは、実現不可能であると見なされたことにさらに留意されたい。すなわち、従来の高性能光ファイバ・ジャイロスコープの通常のバイアス変調周波数 f_b は、約20kHzから50kHzとすることが可能であることを理解されたい。さらに、当業者なら、従来の高性能光ファイバ・ジャイロスコープの基本復調周波数は、バイアス変調周波数と同じとすることが可能であることを理解するであろう。以下で式（1）によって示すように、復調器の出力雑音は、基本周波数および奇数高調波における入力雑音に依存する。したがって、式（1）を慎重に調査することにより、角度ランダムウォークに対する過剰雑音の影響を低減するために、過剰雑音は、通常、復調周波数の基本波、3次高調波、および5次高調波において低減されることが明らかになる。

50

【0031】

【数1】

$$\sigma_{out} = R_f G_A B \sqrt{\sum_{i=0}^{\infty} \left(G_f [(2i+1)f_b] \frac{1}{2i+1} i_n [(2i+1)f_b] \right)^2} \quad (1)$$

【0032】

しかし、高性能エルビウム・ファイバ光学ジャイロスコープでは、復調の基本波、3次高調波、および5次高調波において、ジャイロスコープ・システムの過剰雑音を低減することは、エルビウム・ファイバ（たとえば、エルビウム原子）の上準位（upper state）寿命が、どの程度迅速に出力光を制御することができるかを限定するので、実現不可能であると考えられていた。すなわち、これまで、光ファイバ・ジャイロスコープの設計者は、約100ヘルツの後では、エルビウム・ファイバの周波数応答は、ポンプ電流を介したジャイロスコープの過剰雑音出力の制御には無効であると考えていた。さらに、エルビウム・ファイバ光源の光出力は、20kHzから50kHzの範囲の強度の変化を管理するように十分迅速に制御することができないと考えられていた。さらに、設計者は、過剰雑音サーボが、エルビウム・ドープ光ファイバを使用するシステムにおいて動作することができる帯域幅は、100Hz未満に限定されたと考えていた。

【0033】

しかし、エルビウム・ファイバの周波数応答に関する最近の実験は、予測されていなかった異なる結果をもたらした。すなわち、カットオフ周波数後のエルビウム・ファイバの周波数応答の調査は、カットオフ周波数後のロールオフ（roll off）により、相対強度雑音サーボの制御を強化することが可能であるという点で、光ファイバ・ジャイロスコープ技術における使用に適していることが判明した。たとえば、エルビウム・ファイバのカットオフ周波数後、1550nmのエルビウム・ファイバ強度に提供される約1480nmのポンプ強度は、3kHz周波数応答を有し、かつ3kHzのカットオフ周波数後、ポンプエルビウム・ファイバの組み合わせの強度ロールオフは、管理し易い6dB/オクターブであることが判明した。したがって、エルビウム・ファイバの予測されていなかった特性により、少なくとも100kHzから500kHzの帯域幅を有する相対強度雑音サーボの構築が可能となることが判明した。これにより、光ファイバ・ジャイロスコープ復調器の出力において、4のファクタの雑音低減が実現される。

【0034】

これまで、エルビウム原子の比較的長い上準位寿命が、光強度のあらゆる制御を1kHzよりかなり低く限定するという誤った考えのために、エルビウム・ファイバの特性を使用して、光ファイバシステムの利得を向上させることは、試行されていなかった。それを調査する（リー、この主張を支持する記述原典を引用されたい）。

【0035】

したがって、復調の基本波、3次高調波、および5次高調波におけるジャイロスコープ・システムの過剰雑音の低減に使用されるシステムが必要であり、このシステムにより、エルビウム・ファイバによってジャイロスコープに提供される利得を利用することによって、角度ランダムウォークおよび相対強度雑音をさらに制御することが可能になる。エルビウムを使用して過剰雑音ジャイロスコープを制御する現在機知の制御方法は、具体的には、過剰雑音を限定し、かつ低周波数においてポンプ電流制御を提供する能力について、依然として不十分である。

【発明の開示】

【課題を解決するための手段】

【0036】

（発明の実施形態の概要）

従来の技術の欠点の多くに対処する、高性能光ファイバ・ジャイロスコープの相対強度雑音を低減する方法およびシステムの様々な実施形態を提供する。より具体的には、エル

10

20

30

40

50

ビウム・ドープ・ファイバの利得特性に起因する利得に応答してエルビウム・ドープ光源によって提供される光の強度を維持することによって、エルビウム・ドープ光ファイバ・ジャイロスコープに存在する過剰雑音を低減する様々な方法およびシステムを本明細書において提供する。

【0037】

様々な態様によれば、光ファイバ・ジャイロスコープの相対強度雑音を抑制するシステムが提供される。該システムは、エルビウム・ファイバの周波数応答を利用して、ポンプ電流の変化を制御し、したがって、ジャイロスコープ光源の揺らぎを制御する。具体的には、様々な実施形態は、ポンプ電流を制御する安定な制御ループフィードバック設計を容易にするために、エルビウム・ファイバ周波数応答を使用する。より具体的には、本発明は、3 kHzより大きいエルビウム・ファイバの周波数応答が、3 kHzよりはるかに大きい帯域幅を有する相対強度雑音制御ループを見込む6 dB / オクターブのロールオフを有する積分器を厳密に模倣するという最近の発見を利用する。このタイプの周波数応答により、20 kHzから200 kHzまたはそれより高い周波数範囲において高い正の利得を有する安定なループが提供される。

10

【0038】

1つの例示的な態様によれば、エルビウム・ファイバ光源の一部（たとえば、「光信号」）が、エルビウム光源の光強度の揺らぎを検出するために、光検出器に提供される。光検出器は、信号を增幅する前に、光信号を電気信号に変換する。一定直流（dc）信号が、增幅信号に印加され、次いで、組み合わせ信号は、ポンプ注入電流ドライバの電流制御入力にさらに提供される。ドライバの出力は、注入電流であり、これは、ポンプレーザに供給されて、光電力に変換される。次いで、光電力は、エルビウム・ファイバ光源に提供され、この光源により、エルビウム・ファイバは、公称強度レベルを表す波長の光を放出する。

20

【0039】

本発明の他の態様によれば、過剰雑音または相対強度雑音の存在によって生じる光強度の揺らぎは、制御ループを介して低減され、この場合、低減の量は、制御ループの開ループ利得の関数である。制御ループの開ループ利得は、エルビウム・ファイバによりループに提供される追加の利得によって改善される。

【0040】

30

本発明の他の態様によれば、エルビームドープ光源に起因するシステム全体に対する利得に応答して、エルビウム・ドープ光源の強度の揺らぎの制御を容易にするために、サーボ制御が提供される。

【0041】

なお、本発明のより完全な理解は、同じ符合が同じ要素を表す添付の図面の図と関連して記述される本発明の様々な例示的な実施形態を参照することによって、得ることが可能である。

【発明を実施するための最良の形態】

【0042】

本発明は、機能ブロック構成要素および様々な処理工程の観点で本明細書において記述することが可能である。そのような機能ブロックは、特定の機能を実施するように構成される任意の数のハードウェアおよび/またはソフトウェア構成要素によって実現することが可能であることを理解されたい。たとえば、本発明は、1つまたは複数のマイクロプロセッサもしくは他の制御装置の制御下において様々な機能を実施することが可能であるメモリ要素、処理要素、論理要素、ルックアップ表などの様々な集積回路または光学構成要素を使用することが可能である。同様に、本発明の要素が、ソフトウェアプログラミングまたはソフトウェア要素を使用して実施される場合、本発明は、C、C++、JAVA、アセンブリなどの任意のプログラミング言語またはスクリプト言語で実施することが可能であり、様々なアルゴリズムは、データ構造、オブジェクト、プロセス、ルーチン、または他のプログラミング要素の任意の組み合わせで実施される。さらに、本発明は、電子工学

40

50

構成、光学構成、信号処理および／または制御、データ処理などについて、任意の数の従来の技法を使用することができることに留意されたい。

【0043】

本明細書において示し、記述する具体的な実施態様は、本発明の例示であり、本発明の範囲を限定することを全く意図しないことをさらに理解されたい。実際、簡略化のために、従来の電子機器、制御システム、光学機器、ソフトウェア開発、およびシステム（ならびにシステムの個々の動作構成要素の構成要素）の他の機能的な態様は、本明細書において詳細には記述しない可能性がある。さらに、本明細書に含まれる様々な図の接続線またはコネクタは、様々な要素間の例示的な機能上の関係および／または物理的もしくは論理的な結合を表すことを意図する。多くの代替または追加の機能的な関係、物理的な接続または論理的な接続が、実際のセンサ装置に存在する可能性があることに留意されたい。さらに、要素が、本明細書において「不可欠」または「必須」であると具体的に記述されていない限り、項目または構成要素は、本発明の実施に不可欠ではない。

10

【0044】

さらに、本発明は、高性能ジャイロスコープの観点で本明細書において記述されるが、本発明は、そのように限定されないことを理解されたい。たとえば、本発明の理解を容易にするために、温度センサ、歪みセンサ、および／または磁気計、もしくはエルビウム・ファイバを使用する同様のセンサなど、様々な従来の光ファイバシステムの観点で、本発明を記述することが可能である。本発明から利益を得ることが可能である通常のジャイロスコープ・システムの技術には、たとえば、1998年6月16日にストランドジョルド（Strandjord）に発行された米国特許第5,767,968号明細書、1998年7月14日にストランドジョルド（Strandjord）らに発行された米国特許第5,781,300号明細書、1999年12月7日にサンダーズ（Sanders）らに発行された米国特許第5,999,304号明細書（これらは、すべて、参照によって本明細書に組み込まれている）に記載されたジャイロスコープが含まれる。これらは、すべて、十分に本発明の範囲内にあると見なされる。

20

【0045】

本発明の様々な例示的な実施形態によれば、光ファイバセンサ（および関連する動作方法）が生成され、高度に相互性の光路がジャイロスコープの2つ以上の光ビームに提供される。実際、センサの光学部分を通って伝播する様々なビームが取る経路は、ビーム間の変調を含む光学回路の部分を除いて、同一とすることが可能である。干渉センサ（干渉光ファイバ・ジャイロスコープなど）と関連して使用してきた様々な従来の技法（製造技法、変調技法、および信号処理技法など）のいずれかを、本発明と共に使用することが可能であることが理解されるであろう。さらに、様々な代替実施形態において本明細書で記述する構成要素の代わりに、大型の光学機器構成要素（カプラなど）を代用することが可能である。

30

【0046】

さらに、本明細書では、様々な増幅器、およびより高い利得ならびにより鋭敏な周波数応答を実施する様々な回路に関して、例示的な実施形態を記述するが、そのような回路は、フィードバック回路において使用される任意の適切な制御を備えることが可能であることを理解されたい。

40

【0047】

光ファイバ・ジャイロスコープの過剰雑音または相対強度雑音を制御するためにサーボを使用することに関して、ポンプ電力の変化に対する周波数応答によって決定されるサーボの帯域幅は、光源112に含まれるエルビウム・ドープ光ファイバの存在のために、約3kHzに限定されると考えられていたことに留意されたい。しかし、以下でより完全に記述するように、図4A、4B、5A、および5Bは、100Hzを超えるエルビウム周波数応答のより精確な記述を示す。すなわち、図からわかるように、エルビウム原子の上準位寿命は、ジャイロスコープの設計者によって以前に考えられていたものとは大きく異なる応答を有する。最近発見されたエルビウム周波数応答の利益を完全に理解することを

50

補助するために、エルビウムを使用し、かつ光の揺らぎを制御するためにフィードバックループを使用する例示的な光ファイバ・ジャイロスコープについて、多様に含まれている図を参照して、以下で記述する。

【0048】

図3は、光ファイバ・ジャイロスコープ(FOG, fiber optic)の例示的な実施形態のブロック図であり、光ファイバ・ジャイロスコープ・システム300は、ポンプ注入装置電流ドライバ375を介したポンプレーザ377への負のフィードバックを含む。「負のフィードバック」を使用する技法は、通常、光ファイバ・ジャイロスコープによって生成されている信号の一部がフィードバックされ、光源112によって生成される信号と比較されることを通常必要とする。このようにして、光ファイバ・ジャイロスコープに導入される歪みは、通常、事前訂正して、ほぼ排除することが可能である。その結果、光ファイバ・ジャイロスコープ・システムは、電源の揺らぎおよび電子構成要素の性能にもかかわらず、ほとんど歪みのないようにすることが可能である。10

【0049】

図3に関して、負のフィードバック300を使用する例示的な光ファイバ・ジャイロスコープには、光源112、光ファイバカプラ116、多機能集積光学チップ120、ファイバコイル110、第1光検出器回路138および第2光検出器回路250、ならびにサーボ制御720が含まれる。サーボ制御720には、周波数フィルタ371、dc基準電圧372、アダ(たとえば、加算器)373、およびポンプ注入電流ドライバ375がさらに含まれる。図からわかるように、光源112には、ポンプレーザ377、およびエルビウム・ファイバ・アセンブリ378がさらに含まれる。20

【0050】

図1、2、および3に関して記述された要素と同じ要素は、同様の構造および/または動作を有することに留意されたい。さらに、光検出器138は、図1および2に関して記述したシステムなど、ジャイロ出力信号を提供するための任意の適切なシステムに接続することが可能であり、様々なASC、A/D変換器、変調器、復調器などを含むことが可能である。さらに、光源112は、ファイバカプラ116に適切に結合することが可能であり、ファイバカプラ116は、図1および2に関して記述したのと同様の方式で、光検出器138および250に適切に結合することが可能である。さらに、ファイバカプラ116は、図1および2においても示したように、光ファイバ118を介して、y接合部132を含む多機能集積チップ、およびジャイロスコープコイル110に結合することが可能である。30

【0051】

光ファイバ・ジャイロスコープ・システム100の様々な構成要素を相互接続する光ファイバ(ファイバ114、118、124、126、134、および136など)は、構成要素間で光を向けることができる任意の種類の光ファイバとすることが可能であることに留意されたい。様々な実施形態において、光ファイバは、単一光モードを向けることができる単一モードファイバであり、それにより、所望の信号処理モードを分離するために、光ファイバ・ジャイロスコープ・システム300において様々なフィルタを必要とするこことはない。光ファイバは、具体的には光学回路に偏光子を含まない実施形態では(図3に示した実施形態など)、偏光維持ファイバとすることも可能である。偏光維持光ファイバを使用しない場合、様々な代替実施形態は、集積光学チップ120において、またはカプラ116と光学チップ120との間など、光学回路のあらゆる場所に光学偏光子を含むことが可能である。40

【0052】

カプラ116は、別々のファイバを伝播する光信号を接合することができる任意の結合装置とすることが可能である。例示的なカプラは、グールドエレクトロニクス(Gould Electronics、メリーランド州ミラーズビル在)からModel PM-10055-052UV01として入手可能な従来の2×2カプラを含む。代替として、ファイバ114ならびに136、および/または118ならびに134は、カプラを形成50

するように接合することが可能である。カプラは、カプラの適切な位置において各ファイバのクラッディングをはぎ取り、2つのファイバのコアを共に配置して、熱および光学張力を加えることにより、コアを1つに融合することによって形成される。

【0053】

多機能集積光学チップ (I O C, integrated optics chip) 120は、y接合部132および少なくとも1つの変調器128を含むことが適切である。様々な実施形態において、多機能集積光学チップ120は、ニオブ酸リチウム (LiNbO₃)、または印加された電圧に応答して光速に影響を与える他の材料から形成される。代替として、多機能集積光学チップ120は、JDSユニフェーズコーポレーション (JDS Uniphase corporation、コネチカット州ブルームフィールド在) から入手可能なモデル10022250など、任意の従来の光学スプリッタ/変調器組み合わせとすることが可能である。多機能集積光学チップ120は、源112からチップを経て光を誘導する導波路 (集積光学チップ120において実線で示す) を含むことが適切である。経路は、カプラ116からの光を2つの経路122および130に分割するy接合部132を含むことが可能である。y接合部132は、また、経路122および130において受光された光を、適宜、再び組み合わせる。1つまたは複数の光学位相変調器128 (経路122および/または130の付近で、多機能集積光学チップ120において電極として実施することも可能である) も提供され、位相変調器128によって生成される変調信号に応答して、経路122および130をそれぞれ通過する光に位相シフトを生成する。様々な代替実施形態では、以下でより完全に記述するように、多機能集積光学チップ120を、カプラ、スプリッタ、変調器 (圧電変調器など) など、異なるが等価な構成要素と置き換えることが可能である。

【0054】

光検出器250は、ポンプレーザ誤差信号を光ファイバ376を介して光源112に提供するために、負のフィードバックループ302にさらに接続される。1つの例示的な実施形態では、フィードバックループ302は、光検出器250に電気的に結合された高域通過増幅器371、dc基準電圧372、高域通過増幅器371ならびにdc基準電圧372に電気的に結合されたアダー373、およびアダー373ならびに光源112に電気的に結合されたポンプ注入電流ドライバ375を含むことが適切である。様々な実施形態によれば、光源112は、図1に関して記述した同様の要素と同様の構造および動作を有することが可能であり、この場合、光源には、エルビウム・ファイバ・アセンブリ378およびポンプレーザ377が含まれる。

【0055】

様々な実施形態によれば、高域増幅器371は、入力キャパシタ/抵抗並列組み合わせ、およびフィードバック抵抗を有する演算増幅器とすることが可能である。DC基準電圧372は、高域通過増幅器371の出力を加えるのに適切な基準電圧 (たとえば、2.5V) を提供することができる任意の源とすることが可能である。たとえば、dc基準電圧372は、I Cディップ・パッケージ (dip package) にある基準電圧の一部として得ることが可能である (リー、dc基準電圧をこのシステムに提供するのに適している特有の構造を提供されたい)。さらに、アダー373は、少なくとも2つの電気信号を組み合わせて、加算電気信号を提供することができる任意の要素とすることが可能である。たとえば、アダー373は、たとえば演算増幅器の加算接合部への共通の接続を有する2つの抵抗など、デジタルまたはアナログの加算器とすることが可能である。さらに、ポンプ注入電流ドライバ375は、電流信号をポンプレーザ377に提供することができる任意の電流ドライバとすることが可能である。様々な実施形態と共に使用される通常のポンプ注入電流ドライバは、通常、演算増幅器、いくつかの抵抗およびキャパシタを有する電力トランジスタからなることが可能である。通常のポンプ注入電流ドライバの構造は、当技術分野では周知であるので、本明細書では詳細には議論しない。

【0056】

光源112は、光源112によって放出される光の強度を制御するために、エルビウム

10

20

30

40

50

・ドープ・ファイバ・アセンブリ 378 およびポンプレーザ 377 を使用する任意の通常の光源とすることが可能である。様々な実施形態と共に使用される通常の源は、参照によつて本明細書に組み込まれている「*Erbium-Doped Fiber Amplifiers*」(ジョン・ウィリー&サンズインク、ニューヨーク在) 1994 に記載されている。

【0057】

1つの例示的な実施形態では、フィードバックループ 302 は、光検出器 250 の出力を受け取り、光源 112 に提供されるフィードバック信号を計算することができる任意の処理回路を適切に含むことが可能である。たとえば、フィードバックループ 302 は、光ファイバ出力およびフィードバック信号の計算に適している、任意の従来のマイクロプロセッサ、マイクロ制御装置、デジタル信号プロセッサ、プログラムアレイ論理 (PAL)、特定用途向け集積回路 (ASIC)、任意の適切な信号濾波システム、加算器または注入ドライバなどを含むことが可能である。

【0058】

他の例示的な実施形態では、負のフィードバックループ 302 は、電気コネクタ 370 を介して光検出器 250 に結合され、かつコネクタ 304 を介してアダ-373 に結合された高域通過濾波システム 371 をさらに含む。アダ-373 は、コネクタ 706 を介して dc 基準電圧 372 を提供するシステムにさらに接続され、かつコネクタ 708 を介してポンプ注入電流ドライバ 375 にさらに接続される。さらに、ポンプ注入電流ドライバ 375 は、コネクタ 376 を介して光源 112 のポンプレーザ 377 にさらに接続される。

【0059】

光検出器 138 および 250 は、ファイバ 136 および 134 から放出される光の強度 (すなわち、振幅) を検出することができる任意の回路とすることが可能である。様々な実施形態では、光検出器回路 138 および 250 は、入射光の強度に応答して電気電流を伝達する光ダイオードを含むことが適切である。光検出器回路 138 および 250 は、ASC138、增幅器 251 などのいずれかに適宜提供されるデジタル信号またはアナログ信号を生成する回路または他の構成要素をも含むことが可能である。多くの従来の光検出器回路 138 および 250 が、センサ 100 に適用することができる光ファイバ・ジャイロスコープまたは他のセンサと共に使用するために開発してきた。様々な実施形態では、光検出器 138 および 250 は、FETトランジスタ、演算增幅器、抵抗ならびにキャパシタ、および光ダイオードからなることが可能である。本発明と共に使用することができる光ダイオードの例には、JDSユニフェーズ (ニュージャージー州ウエストトレントン在) から入手可能なモデル EXT300T がある。光検出器 138 および 250 の応答は、入射光の波長に依存する可能性がある。したがって、光検出器 138 および 250 は、光ファイバ・ジャイロスコープ・システム 300 を経て伝播する光の波長に対応するように選択することができる。

【0060】

信号のフィードバックおよび濾波の様々な実施形態について、様々な光ファイバ・ジャイロスコープ装置と関連して開示してきたが、あらゆる光ファイバ・ジャイロスコープ電子機器は、センサ 300 において使用するように容易に適合させることができることにさらに留意されたい。たとえば、システム 300 は、調整出力信号を生成するように、信号の濾波および処理を光検出器 250 に適切に組み込むことが可能である。図 3 に示した実施形態は、フィードバック駆動構成または「閉ループ」構成、ならびに光検出器 250 の出力に関係なく変調信号を生成する「開ループ」(すなわち、無フィードバック) 構成において動作することができることを理解されたい。

【0061】

動作中、光検出器 250 は、光検出器 250 に当たる光の強度を表す電気信号を高域通過增幅器 371 に提供する。高域通過增幅器 371 は、電気信号を 1 単位から 100 の利得で増幅し、その後、信号をアダ-373 に提供する。利得の量は、カプラ 116 の結合

10

20

30

40

50

比、ポンプ電流ドライバ375の電圧対電流利得、および光源112の効率など、様々なファクタに依存する。DC基準電圧要素372は、約2.5Vのdc基準電圧をアダ-373にさらに提供する。アダ-373は、高域通過増幅器371およびdc基準電圧要素372によって提供された信号を、電流制御入力379を介してポンプ注入電流ドライバ375に提供される加算信号にさらに加算する。ポンプ注入電流ドライバ375は、通常、加算信号を、光源112のポンプレーザを制御するように使用される電気信号に変換することが可能である。

【0062】

加算信号は、ポンプ注入電流ドライバ375の電流制御入力379にさらに提供され、そこで、光源112のポンプレーザ377にさらに提供される。ポンプレーザ377は、光電力を生成し、この光電力は、エルビウム・ファイバ・アセンブリ378のエルビウム・ファイバに提供（たとえば、「注入」）される。ポンプレーザ377からのこの光により、エルビウム・ファイバは、ポンプ光の波長とは異なる波長の光を放出する。すなわち、エルビウム・ファイバは、波長が1550nmの光を放出する。

10

【0063】

検出器250における光強度の揺らぎは、高域通過増幅器371、アダ-373、ポンプ注入電流ドライバ375、光源アセンブリ112、ファイバカプラ116、および検出器250によって形成される制御ループの利得によって低減されることを理解されたい。さらに、通常の実施形態では、低減される量は、制御ループの開ループ利得に部分的に依存することが適切である。すなわち、特定の周波数における開ループ利得が大きくなると、その周波数において低減される強度の揺らぎの量が大きくなる。これは、一部には、より高いループ利得が、低周波数回転に対する実施形態の感度を増大させ、それにより、わずかな信号の揺らぎでジャイロスコープの回転を適切に評価することが可能であるからである。

20

【0064】

追加の開ループ利得、したがって、追加の雑音低減は、2次の負のフィードバックループを使用することによって実現することができることに留意されたい。図6Aは、ポンプ注入電流ドライバ375を介したポンプレーザ377への負のフィードバックを使用する光ファイバ・ジャイロスコープの他の例示的な実施形態のブロック図であり、2次の負のフィードバックループが使用される。図からわかるように、図6Aに示した回路は、図3に示した回路とほぼ同じであり、したがって、図3および図6Aの同じ要素は、ほぼ同様の動作および性能を有する。しかし、図6Aは、高域通過増幅器371とアダ-373との間に配置することができる進み遅れ（lead-lag）回路610を含むことに留意されたい。

30

【0065】

進み遅れ回路610は、より高いループ利得を有する安定なフィードバックループを可能にする任意の従来の構成とすることが可能であり、これにより、図3に示した回路より雑音は大きく低減される。図6Bは、図6Aと共に使用される例示的な進み遅れ回路を示すが、他の適切な回路を使用することが可能である。1つの特定の実施形態では、進み遅れ回路610は、キャパシタ603と並列に接続された抵抗602、および演算増幅器604の負の端子605に接続された付加抵抗を含むことが可能である。キャパシタ603および抵抗602の値は、回路610の時定数を制御するのに適切な値とすることが可能である。たとえば、キャパシタ603および抵抗602の値は、回路610の周波数応答を適切に制御するように選択することができる（たとえば、時定数 = 抵抗 × キャパシタ）。

40

【0066】

進み遅れ回路の構造および動作は、周知である。したがって、進み遅れ回路610の構造および動作について、本明細書では詳細には議論しない。進み遅れ回路610は、離散要素を使用して記述されているが、回路610は、たとえば、任意の集積回路、ソフトウェアの実施態様など、任意の適切な進み遅れ回路を使用して実施することが可能であるこ

50

とに留意されたい。

【0067】

以前に記述したように、ジャイロスコープの設計者は、ループの全利得を一単位よりはるかに大きい周波数に増大させることによって、3 kHz を超えてサーボの帯域幅を増大させることを試行した。しかし、使用される電流ポンプの電流限界を超えて利得を増大させることは、ポンプを電流雑音で飽和させると考えられていたので、エルビウム・ファイバを使用するシステムにおけるサーボの帯域幅は、約100Hz に限定されるとさらに考えられていた。しかし、図4A～B および5A～B に示すように、エルビウム・ファイバの周波数応答は、ポンプを飽和させず、代わりに、サーボの帯域幅が100Hz を超えるように、利得をフィードバック・システムに追加する。これは、3 kHz より高い周波数における開ループ利得のレベルの増大に備える。すなわち、エルビウム周波数応答を利用することによって、高性能ジャイロスコープの設計者は、フィードバック・システム全体の利得を増大させることが可能であり、したがって、過剰雑音または相対強度雑音に対するより優れた回路応答を見込む。
10

【0068】

図4A～4B には、図3 および6A～B に示したような、簡単な過剰雑音サーボの開ループ利得を示す通常のボーデ・プロット (Bode plot) が示されている。具体的には、図4A は、制御ループの様々な段階中に生じる利得を示す。たとえば、曲線460 は、本発明において使用される高域通過フィルタ371 の利得の通常のボーデ・プロットであり、これは、より低いカットオフ周波数 f_1 およびより高いカットオフ周波数 f_4 を有し、 f_1 は、約1Hz から100Hz とすることが可能であり、 f_4 は、数10メガヘルツより大きいとすることが可能である。さらに、曲線461 は、光検出器250 の利得の通常のボーデ・プロットであり、これは、通常、数メガヘルツより通常大きい低域通過カットオフ周波数 f_3 を有することが可能である。さらに、曲線462 は、エルビウム・ファイバ光源の例示的な利得のボーデ・プロットであり、これは、通常約1kHz から3kHz である低域通過カットオフ周波数 f_2 を有する。
20

【0069】

上記で留意したように、エルビウム・ファイバの周波数応答は、エルビウム原子の上準位寿命の関数であり、さらに、曲線462 によって示すように、エルビウム・ファイバの周波数応答は、高域通過フィルタ371 および検出器250 の周波数応答と組み合わされたとき、ポンプレーヤが雑音電流で飽和されないようなものである。すなわち、図3 の簡単過剰雑音制御ループの正味 (たとえば、加算合計) の開ループ利得を表す図4B の曲線463 によってわかるように、エルビウム・ファイバの周波数応答は、単位ループ利得の領域において、約6dB / オクターブのループ利得ロールオフを可能にすることが適切である。したがって、エルビウム・ファイバに起因する利得を含むことによって、ループの周波数応答は安定する。さらに、光源の強度を制御するために負のフィードバックを使用する通常のジャイロスコープの設計では、ループ利得は、単位利得周波数が、光検出器250 のカットオフ周波数 f_3 より小さくなるように、通常、限定することが可能である。すなわち、光検出器250 は、通常、約 f_3 において周波数ロールオフを提示するので、フィードバックループの他の電子構成要素 (たとえば、アダーポンプ注入電流ドライバ、広域通過フィルタなど) に対する光検出器250 の周波数応答は、通常、どの程度の雑音低減が実現されるかを限定する。
30

【0070】

図5A～B に関して、ボーデ・プロットは、図6A～B に示した2次フィードバックループの開ループ利得を示す。具体的には、図5A は、図6A～B の制御ループの様々な段階の利得を示し、したがって、曲線560 は、本発明において使用される高域通過フィルタ371 の利得の通常のボーデ・プロットであり、下限カットオフ周波数 f_1 (たとえば、約1Hz から100Hz まで) および上限カットオフ周波数 f_4 (たとえば、約数十メガヘルツ以上) を有する。さらに、曲線561 は、光検出器250 の利得の通常のボーデ・プロットであり、これは、通常、低域通過カットオフ周波数 f_3 (たとえば、約数メガヘルツ以上) を有する。
40

ヘルツ以上)を有することが可能である。さらに、曲線962は、エルビウム・ファイバ光源の利得のボーデ・プロットを表し、これは、低域通過カットオフ周波数 f_2 (たとえば、約1kHzから3kHzまで)を有する。さらに、曲線520は、図6A~Bに示した進み遅れ回路610の周波数応答の利得の通常のボーデ・プロットである。さらに、図5Bの曲線521は、図6Aの2次制御ループの利得全体の通常のボーデ・プロットである。

【0071】

進み遅れ回路610を導入することによって、光検出器250のカットオフ周波数 f_3 未満において、より高い利得を得ることが可能である。フィードバックループの周波数応答は2次なので、進み遅れ回路は、より低い周波数においてより高い利得を与えるが、 f_6 より大きい平坦周波数応答を有する。 f_6 が適切に選択される限り、平坦周波数応答は、制御ループが依然として安定であることを保証する。進み遅れ回路は、 f_6 と f_3 との間では利得を増大させないが、 f_6 未満では、利得を増大させる。さらに、進み遅れ回路を導入することによって、 f_6 より低い周波数(たとえば、約100kHzから1MHz)では、利得がより迅速に増大する(12dB/オクターブ)。当業者なら、周波数 f_6 は、ロールオフ進み遅れ回路が停止する周波数を表し、かつ、図6Aの抵抗602の値およびキャパシタ603の値によって決定されることを理解するであろう。この抵抗値およびキャパシタ値は、図6Bの進み遅れ回路の時定数を提供する(たとえば、時定数= $R \times C$)。すなわち、周波数 f_6 の後、および単位利得周波数にわたって、開ループロールオフは、6dB/オクターブであり、したがって、安定なループを見込む。

10

20

【0072】

光ファイバ・ジャイロスコープについて、様々な例示的な実施形態を参照して上記で記述した。しかし、当業者なら、本発明の範囲から逸脱せずに、例示的な実施形態に対し、変更および修正を実施することが可能であることを理解するであろう。たとえば、様々な動作工程、ならびに動作工程を実施する構成要素は、具体的な応用分野および/または光源の偏光状態(たとえば、偏光または減偏光)に応じて、もしくはシステムの動作に関連する任意の数のコスト関数を考慮して、実施することが可能である。たとえば、適切な高域通過周波数応答を有する検出器、または適切な高域通過進み遅れ応答を有する周波数フィルタユニットを提供するなど、様々な構成要素を排除する、修正する、または他の構成要素と組み合わせることが可能である。

30

【0073】

さらに、光源が偏光されている場合、本発明は、そのような偏光を支持するのに必要な構造と共に、光ファイバ・ジャイロスコープ・システムに含むことが可能である。

【0074】

さらに、上述した相対強度雑音抑制システムは、光ファイバ・ジャイロスコープの過剰雑音の抑制に適しているが、システムは、あらゆるシステムにおいて使用することも可能であることに留意されたい。システムでは、たとえば、電流、磁場、歪み、および圧力を測定する他の光ファイバセンサなど、エルビウム・ファイバによって提供される利得を含むことによって、システム全体のループ利得を増大させることが有益である。

【0075】

さらに、「開ループ」ジャイロ構成において本発明のジャイロスコープ・システムを記述したが、本発明は、そのように限定されないことを理解されたい。たとえば、検出器138における信号を回転信号に変換するのに必要な電子機器を追加することにより、本明細書のシステムを、閉ループ構成において記述することが可能である。そのような電子機器は、検出器138における信号を調整し、次いで、検出器138における信号と加算されるように、フィードバック信号を多機能チップ120に提供する従来の方法を含むことが可能である。提供されるフィードバックの量は、ジャイロの回転率の関数とすることが可能である。開ループジャイロスコープ・システムから閉ループシステムへの変換は、よく理解されており、したがって、本発明の範囲内にあると見なされるが、変換の委細については、簡潔にするために、本明細書では議論しない。

40

50

【 0 0 7 6 】

これらおよび他の変更または修正は、以下の請求項において述べられるように、本発明の範囲内に含まれることを意図する。

【図面の簡単な説明】

〔 0 0 7 7 〕

【図1】デジタル復調器を使用する従来の技術の光ファイバ・ジャイロスコープの概略的なブロック図である。

【図2】過剰雑音を低減するために「減算技法」を使用する従来の技術の光ファイバ・ジャイロスコープの概略的なブロック図である。

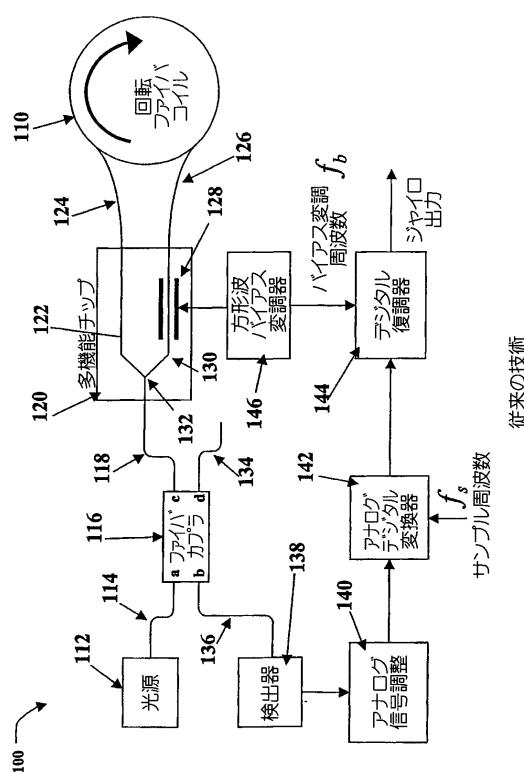
【図3】光源の強度を制御するために、ポンプレーザへの負のフィードバックを使用することを示す概略的なブロック図である。

【図4】図4 Aは、過剰雑音制御ループを作成する主な構成要素の周波数に対する開ループ利得を示すボーデ・プロットである。図4 Bは、過剰雑音制御ループを作成する主な構成要素の周波数に対する開ループ利得を示すボーデ・プロットである。

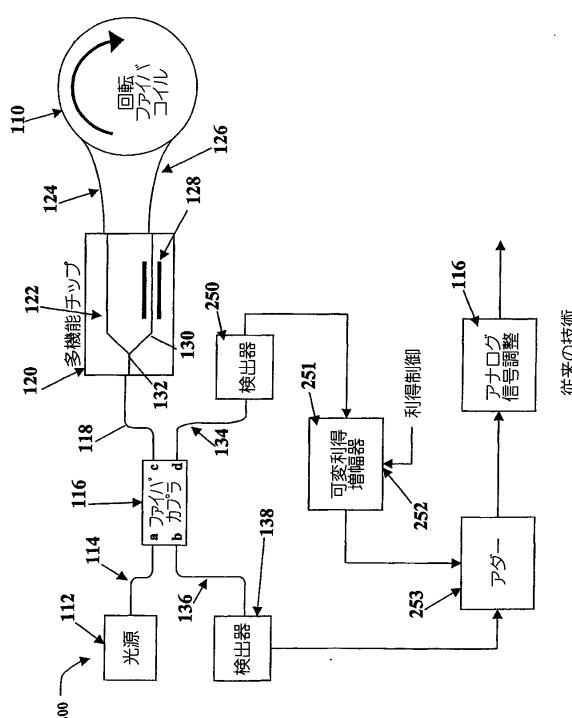
【図5】図5Aは、進み遅れ回路を使用して過剰雑音制御ループを作成する主な構成要素の周波数に対する開ループ利得を示すボーデ・プロットである。図5Bは、進み遅れ回路を使用して過剰雑音制御ループを作成する主な構成要素の周波数に対する開ループ利得を示すボーデ・プロットである。

【図6】図6 Aは、進み遅れ回路を使用する過剰雑音制御ループの代替方法の概略的図である。図6 Bは、進み遅れ回路を使用する過剰雑音制御ループの代替方法の概略的図である。

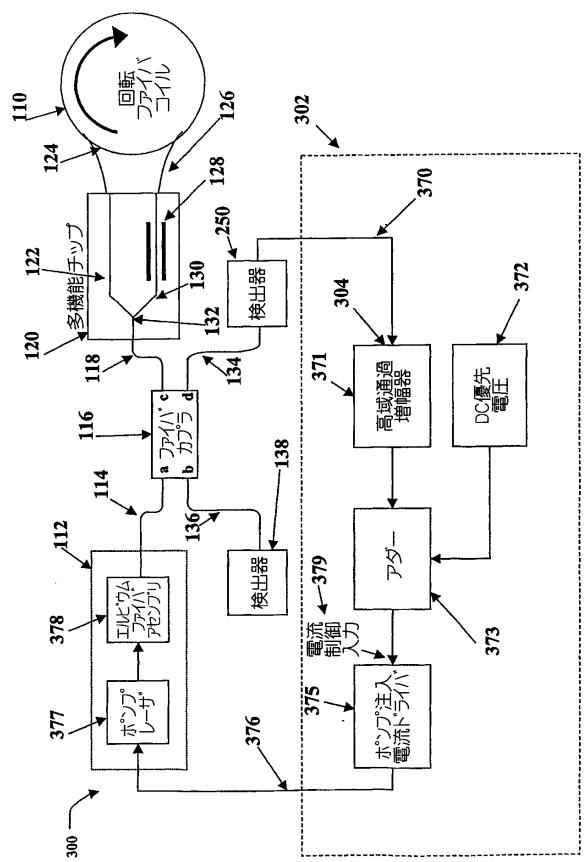
(1)



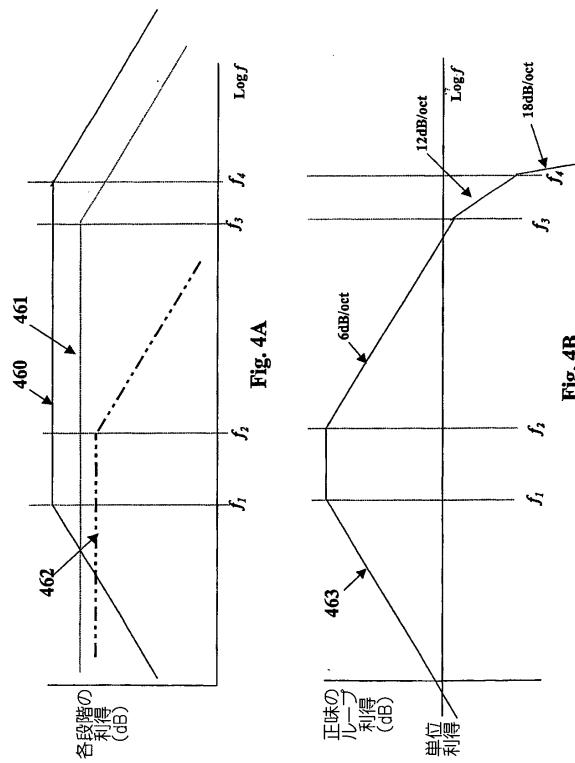
【 2 】



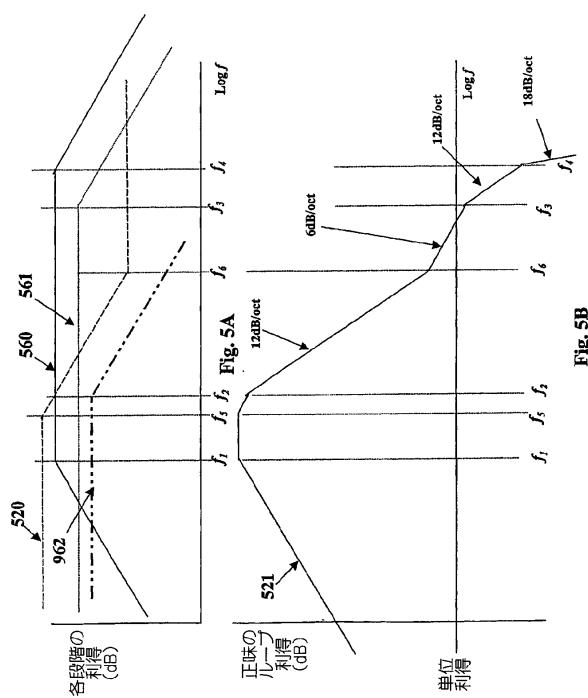
【 义 3 】



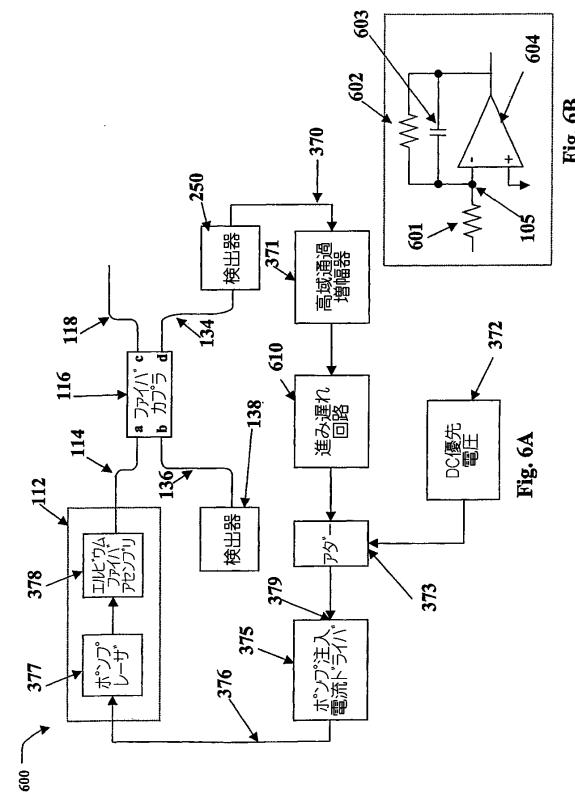
【 図 4 】



【図5】



【 四 6 】



フロントページの続き

(74)代理人 100096013

弁理士 富田 博行

(74)代理人 100120558

弁理士 住吉 勝彦

(72)発明者 ストランドジョード, リー・ケイ

アメリカ合衆国ミネソタ州55331, トンカ・ベイ, ヒルクレスト・ドライブ 35

(72)発明者 サンダーズ, グレン・エイ

アメリカ合衆国アリゾナ州85029, フェニックス, ノース・トゥエンティサード・ドライブ
11034

審査官 谷口 智利

(56)参考文献 特開平11-145534 (JP, A)

特開2001-094182 (JP, A)

特開平05-223582 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01C 19/72