

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第3923077号

(P3923077)

(45) 発行日 平成19年5月30日(2007.5.30)

(24) 登録日 平成19年3月2日(2007.3.2)

(51) Int. Cl.

G 0 1 C 19/72 (2006.01)

F I

G 0 1 C 19/72

J

請求項の数 21 (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願平8-511150
 (86) (22) 出願日 平成7年12月28日(1995.12.28)
 (65) 公表番号 特表平11-500526
 (43) 公表日 平成11年1月12日(1999.1.12)
 (86) 国際出願番号 PCT/US1995/016877
 (87) 国際公開番号 W01997/024579
 (87) 国際公開日 平成9年7月10日(1997.7.10)
 審査請求日 平成14年10月25日(2002.10.25)

(73) 特許権者 591002810
 リットン システムズ インコーポレイテッド
 LITTON SYSTEMS, INC
 CORPORATED
 アメリカ合衆国、91367-6675
 カリフォルニア、ウッドランド・ヒルズ、
 バーバンク・プレバード、21240
 (74) 代理人 100064447
 弁理士 岡部 正夫
 (74) 代理人 100085176
 弁理士 加藤 伸晃
 (74) 代理人 100096943
 弁理士 臼井 伸一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光ファイバ・ジャイロスコープのランダム・ウォークを減少する方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光ファイバのセンサ・コイルを備えた光ファイバジャイロスコープを変調する法であって、光源から上記コイルに向けられた出力が一对のビームに分けられ、それぞれコイルの対向する端部に入力されてコイル内を相反する方向に進行し、その相反する方向に進行するビームが結合してジャイロスコープ出力を形成する方法において、

a) 上記の出力の主として相対強度ノイズによるランダム・ウォークが最大出力信号変調の主として相対強度ノイズによるランダム・ウォークよりも少なくなるように周期的な人為的位相のずれを選択するステップと、

b) 上記の周期的な人為的位相のずれを上記の相互に反対方向に進行するビームの間に加えるステップとを含み、

上記の選択ステップが、

c) 矩形波の位相のずれを選択するステップと、

d) 上記のジャイロスコープ出力の平均光学電力が電力の半分のレベルより少なくなるように、上記の矩形波の振幅を選択するステップとをさらに含み、

上記の位相のずれが、 n が 0 を含む整数である $(4n+1)\pi/2 < |\varphi_M(t)| < (2n+1)\pi$ の場合、 $\varphi_M(t)$ である方法。

【請求項2】

光ファイバのセンサ・コイルを備えた光ファイバジャイロスコープを変調する法であって、光源から上記コイルに向けられた出力が一对のビームに分けられ、それぞれコイルの対

10

20

向する端部に入力されてコイル内を相反する方向に進行し、その相反する方向に進行するビームが結合してジャイロスコープ出力を形成する方法において、

a) 上記の出力の主として相対強度ノイズによるランダム・ウオークが最大出力信号変調の主として相対強度ノイズによるランダム・ウオークよりも少なくなるように周期的な人為的位相のずれを選択するステップと、

b) 上記の周期的な人為的位相のずれを上記の相互に反対方向に進行するビームの間に加えるステップとを含み、

上記の選択ステップが、

c) 矩形波の位相のずれを選択するステップと、

d) 上記のジャイロスコープ出力の平均光学電力が電力の半分のレベルより少なくなるように、上記の矩形波の振幅を選択するステップとをさらに含み、

上記の位相のずれが、 n が 0 を含む整数である $(2n+1)\pi < |\varphi_M(t)| < (4n+3)\pi/2$ の場合、 $\varphi_M(t)$ である方法。

【請求項 3】

光ファイバのセンサ・コイルを備えた光ファイバジャイロスコープを変調する法であって、光源から上記コイルに向けられた出力が一对のビームに分けられ、それぞれコイルの対向する端部に入力されてコイル内を相反する方向に進行し、その相反する方向に進行するビームが結合してジャイロスコープ出力を形成する方法において、

a) 上記の出力の主として相対強度ノイズによるランダム・ウオークが最大出力信号変調の主として相対強度ノイズによるランダム・ウオークよりも少なくなるように周期的な人為的位相のずれを選択するステップと、

b) 上記の周期的な人為的位相のずれを上記の相互に反対方向に進行するビームの間に加えるステップとを含み、

上記の位相のずれが、 $x < |\varphi_M(t)| < y$ の場合、 x が $J_1(x)$ が最大値で、 $J_1(y)$ が 0 であり、 $J_1(\quad)$ が第一のタイプの一次ベッセル関数である時、正弦波 $\varphi_M(t)$ である方法。

【請求項 4】

光ファイバのセンサ・コイルを含むタイプの光ファイバ・ジャイロスコープの変調方法であって、

a) 光源の出力を上記のジャイロスコープに送るステップと、

b) 上記の光源の出力を一对のビームに分割するステップと、

c) 上記の一对のビームを上記のコイルの両端部に入力し、相互に反対方向に進行させるステップと、

d) 矩形波の形の周期的な人為的位相のずれ $\varphi_M(t)$ を、 n が 0 を含む整数である $(4n+1)\pi/2 < |\varphi_M(t)| < (2n+1)\pi$ として、相互に反対方向に進行する一对のビームの間に加えるステップと、

e) 上記の相互に反対方向に進行する一对のビームをジャイロスコープの出力を形成するために結合するステップとを含む方法。

【請求項 5】

上記のジャイロスコープの出力の主として相対強度ノイズによる予め定めたレベルのランダム・ウオークを得るために、上記の周期的な位相のずれの大きさを調整するステップをさらに含む請求項 4 に記載の方法。

【請求項 6】

上記の周期的な人為的位相のずれの周期が上記のセンサ・コイルの遷移時間の 2 倍に等しい請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

上記の光源が希土によりドーピングされた光ファイバからなる請求項 4 に記載の方法。

【請求項 8】

上記の周期的な位相のずれの大きさを、ジャイロスコープ出力のランダム・ウオークの相対強度ノイズ成分を最小にするように選択した請求項 6 に記載の方法。

10

20

30

40

50

【請求項 9】

光ファイバのセンサ・コイルを含むタイプの光ファイバ・ジャイロスコープの変調方法であって、

- a) 光源の出力を上記のジャイロスコープに送るステップと、
- b) 上記の光源の出力を一对のビームに分割するステップと、
- c) 上記の一对のビームを上記のコイルの両端部に入力し、相互に反対方向に進行させるステップと、
- d) 矩形波の波形の周期的な人為的位相のずれ $\varphi_M(t)$ を、 n が 0 を含む整数である $(2n+1)\pi < |\varphi_M(t)| < (4n+3)\pi/2$ として、相互に反対方向に進行する一对のビームの間に加えるステップと、
- e) 上記の相互に反対方向に進行する一对のビームをジャイロスコープの出力を形成するために結合するステップとを含む方法。

10

【請求項 10】

上記のジャイロスコープの出力の主として相対強度ノイズによる予め定めたレベルのランダム・ウォークを得るために、上記の周期的な位相のずれの大きさを調整するステップをさらに含む請求項 9 に記載の方法。

【請求項 11】

上記の周期的な人為的位相のずれの周期が上記のセンサ・コイルの遷移時間の 2 倍に等しい請求項 10 に記載の方法。

【請求項 12】

上記の光源が希土によりドーピングされた光ファイバからなる請求項 9 に記載の方法。

20

【請求項 13】

上記の周期的な位相のずれの大きさが、ジャイロスコープ出力の主として相対強度ノイズによるランダム・ウォークを最小にするように選択された請求項 13 に記載の方法。

【請求項 14】

光ファイバのセンサ・コイルを含むタイプの光ファイバ・ジャイロスコープの変調方法であって、

- a) 光源の出力を上記のジャイロスコープに送るステップと、
- b) 上記の光源の出力を一对のビームに分割するステップと、
- c) 上記の一对のビームを上記のコイルの両端部に入力し、相互に反対方向に進行させるステップと、
- d) 正弦波の波形の周期的な人為的位相のずれ $\varphi_M(t)$ を、 x が $J_1(x)$ が最大値で、 $J_1(y)$ が 0 であり、 $J_1(\quad)$ が第一のタイプの一次ベッセル関数である時、 $x < |\varphi_M(t)| < y$ の場合、相互に反対方向に進行する一对のビームの間に加えるステップと、
- e) 上記の相互に反対方向に進行する一对のビームをジャイロスコープの出力を形成するために結合するステップとを含む方法。

30

【請求項 15】

上記のジャイロスコープの出力の主として相対強度ノイズによる予め定めたレベルのランダム・ウォークを得るために、上記の周期的な位相のずれの大きさを調整するステップをさらに含む請求項 14 に記載の方法。

40

【請求項 16】

上記の周期的な人為的位相のずれの周期が上記のセンサ・コイルの遷移時間の 2 倍に等しい請求項 15 に記載の方法。

【請求項 17】

上記の光源が希土によりドーピングされた光ファイバからなる請求項 14 に記載の方法。

【請求項 18】

上記の周期的な位相のずれの大きさを、ジャイロスコープ出力のランダム・ウォークの相対強度ノイズ成分を最小にするように選択した請求項 16 に記載の方法。

【請求項 19】

50

一対の光ビームが光ファイバのセンサ・コイル内を相互に反対方向に進行するタイプの光ファイバ・ジャイロスコープの出力内の主として相対強度ノイズによるランダム・ウォーク・ノイズの調整方法であって、

a) 周期的な人為的位相のずれを上記の相互に反対方向に進行する一対のビームの間に加えるステップと、

b) 上記の周期的な人為的位相のずれの大きさを变化させ、上記の主として相対強度ノイズによるランダム・ウォーク・ノイズをそれに応じて調整するステップと、

c) 上記の主として相対強度ノイズによるランダム・ウォークが最大出力信号変調の主として相対強度ノイズによるランダム・ウォークより小さくなるように、上記の周期的な人為的位相のずれを選択するステップとを含み、

上記の選択ステップが、

d) 矩形波の位相のずれを選択するステップと、

e) 上記のジャイロスコープ出力の平均光学電力が電力の半分のレベル以下になるように、上記の矩形波の振幅を選択するステップをさらに含み、

上記の位相のずれが、 n が 0 を含む整数である $(4n + 1)\pi / 2 < |\varphi_M(t)| < (2n + 1)\pi$ の場合、矩形波 $\varphi_M(t)$ の形をしている方法。

【請求項 20】

一対の光ビームが光ファイバのセンサ・コイル内を相互に反対方向に進行するタイプの光ファイバ・ジャイロスコープの出力内の主として相対強度ノイズによるランダム・ウォーク・ノイズの調整方法であって、

a) 周期的な人為的位相のずれを上記の相互に反対方向に進行する一対のビームの間に加えるステップと、

b) 上記の周期的な人為的位相のずれの大きさを变化させ、上記の主として相対強度ノイズによるランダム・ウォーク・ノイズをそれに応じて調整するステップと、

c) 上記の主として相対強度ノイズによるランダム・ウォークが最大出力信号変調の主として相対強度ノイズによるランダム・ウォークより小さくなるように、上記の周期的な人為的位相のずれを選択するステップとを含み、

上記の選択ステップが、

d) 矩形波の位相のずれを選択するステップと、

e) 上記のジャイロスコープ出力の平均光学電力が電力の半分のレベル以下になるように、上記の矩形波の振幅を選択するステップをさらに含み、

上記の位相のずれが、 n が 0 を含む整数である $(2n + 1)\pi < |\varphi_M(t)| < (4n + 3)\pi / 2$ の場合、矩形波 $\varphi_M(t)$ の形をしている方法。

【請求項 21】

一対の光ビームが光ファイバのセンサ・コイル内を相互に反対方向に進行するタイプの光ファイバ・ジャイロスコープの出力内の主として相対強度ノイズによるランダム・ウォーク・ノイズの調整方法であって、

a) 周期的な人為的位相のずれを上記の相互に反対方向に進行する一対のビームの間に加えるステップと、

b) 上記の周期的な人為的位相のずれの大きさを变化させ、上記の主として相対強度ノイズによるランダム・ウォーク・ノイズをそれに応じて調整するステップと、

c) 上記の主として相対強度ノイズによるランダム・ウォークが最大出力信号変調の主として相対強度ノイズによるランダム・ウォークより小さくなるように、上記の周期的な人為的位相のずれを選択するステップとを含み、

上記の位相シフトが、 x が $J_1(x)$ が最大値、 $J_1(y)$ が 0 であり、 $J_1(\quad)$ が第一のタイプの一次ベッセル関数のとき、 $x < |\varphi_M(t)| < y$ である場合、正弦波 $\varphi_M(t)$ の形をしている方法。

【発明の詳細な説明】

(技術分野)

本発明は、光ファイバ・ジャイロスコープに関する。本発明は、特に、光ファイバ・ジャ

10

20

30

40

50

イロスコープの出力のランダム・ウオークを減少する装置および方法に関する。

(背景技術)

サニャック干渉計は、一組の相互に反対方向に進行する光のビームの間に発生する非相互的位相差を測定することにより回転を知るための装置である。サニャック干渉計は、通常レーザのような光源、数個のミラーまたは光ファイバを数回巻いたものからなる光学的導波管、ビーム分割装置・結合装置、検出装置および信号処理装置からなっている。

干渉計の内部においては、ビーム分割装置からの光の二つの波は一本の光学通路に沿って相互に反対方向に進行する。導波管は「両方の光の波に影響をあたえる」。すなわち、光学通路に何らかの歪があると、相互に反対方向に進行する二本のビームは、同時にまたは同じ方向で上記の変動を受けるわけではないが、相互に反対方向に進行する二本のビームの両方に同じように影響を与える。時間によって変化する変動は、時間的間隔が光学的導波管の周囲の光の進行時間に等しい場合に観察することができる。一方、「非相互的」変動は、相互に反対方向に進行する二本のビームに進行方向によって異なる影響を与える。上記の非相互的変動は、二本のビームが進行する光学媒体の対称性を失わせる物理的影響により起こる。

非相互的効果は二つあるが、それらは周知である。ファラディの磁気光学効果、すなわち、共線磁気光学効果は、磁場により光学的物質内で電子が優越スピン方位を起こした場合に起こる。一方、サニャック効果、すなわち、慣性相対論的效果は、慣性フレームに対して干渉計が回転して、光の進行時間の対称性が失われた場合に起こる。後者の効果はリング・ジャイロスコープの動作原理として使用されている。

測定または検出されたジャイロスコープの出力は、ジャイロスコープのループを一回完全に横断した後の「結合された」ビーム（すなわち、二本の相互に反対方向に進行する二本のビームから形成された合成ビーム）である。感知軸を中心とする回転速度は、相互に反対方向に進行する二本のビームの間に生じる位相ずれに比例する。従って、位相ずれを正確に測定することが最も重要である。

図1は、光ファイバのコイルから検出されたビームの出力の強度（すなわち、電界の平方の関数である電力）と、一回のループの遷移完了後の相互に反対方向に進行する二本のビームの間の位相差ととの間の周知の関係を示す。（注：通常、先行技術の光検出機構は、強度ではなく出力パワーを測定するように作られている。）この図は、ビーム間の位相差 $\Delta\phi$ のコサインに比例するフリンジ・パターンを開示している。上記位相差は、例えば、回転による非相互的変動の測定の際に使用される。図1にDCレベルを示す。上記のDCレベルはジャイロスコープの出力の強度レベルの半分（平均）またはパワー・レベルの半分に対応する。

僅かな位相差、または n が整数である $\pm n\pi$ という僅かな位相差が（比較的低い回転速度に対応して）検出されたとき、出力ビームの強度は位相の変動すなわち、誤差には比較的影響を受けない。何故なら、測定した位相差は、出力フリンジ・パターンの最大または最小の領域内にあるからである。このことは、フリンジ・パターンの形から得られる周知の結果である。この現象は $\phi = 0, +2\pi, +\pi, -2\pi$ 、および $-\pi$ それぞれのラジアン領域内の位相ずれに対応するフリンジ・パターンの領域10、12、12'、14および14'に現れている。さらに、強度だけでは回転速度の存在または方向は分からない。

上記の理由から、人為的にバイアスをかけた位相差を通常、一組のビームがセンサ・コイルを通して通過するとき、一方は周期的に位相が遅れ、他方は周期的に位相が進む反対方向に進行する二本のビームのそれぞれの上に重畳するという方法がとられる。「非相互的零シフト」という名でも知られている位相ずれにバイアスをかける方法により、回転の存在を示す位相の偏差 ε により敏感なことを特徴としている領域に動作点を移動させることによって、位相差の強度測定の感度は改善される。上記の方法により、光学検出機構で観察された光の強度の変動、すなわち、 ΔI （または電力 ΔP ）は、所与の非相互的位相の変動 ε に対して大きくなる。

所与の位相の変動 ε による強度の影響を高めることにより、光学検出機構の出力感度および精度がそれに対応して向上する。これにより、出力エレクトロニクスが簡単になり、そ

10

20

30

40

50

の結果経済的になる。上記の出力エレクトロニクスは、通常、その間で電気光学モジュレータ（しばしば、多機能集積光学チップまたは「MIOC」と呼ばれる）が、ループ・トランジット時間 γ の間、反復して動作を行う二つの動作点の強度値を比較するための差回路を含んでいる。

今日では、光ファイバ・ジャイロスコープは、通常、周期的変調波形によりバイアスがかかる。この周期的変調波形としては矩形波または正弦波がよく使用される。矩形波は、 $\pm \pi / 2$ の周期で 2γ の間を変動するが、一方、正弦波は約 ± 1.8 ラジアン の最大および最小の間を変動する。正弦波の最大値および最小値は、第一のタイプの一次のベッセル関数、 $J_1(x)$ の最大値の引数に対応する。図 2 に先行技術の矩形波変調波形を示す。

図 1 に戻って説明すると、先行技術の矩形波変調の代表的な矩形波変調プロファイルは、動作点 16 および 18 の間の出力強度曲線の変化に対応する。各点 16 および 18 は、位相差 $\Delta \phi$ の小さな非相互的変動 ε が、光学的強度（電力）出力内の最大の検出可能な変化、すなわち、 ΔI (ΔP) を起こす強度フリンジ・パターンの屈折部のところにある。同様に、二つの異なる動作点の間に掛かっているバイアスが変化することによって、システムは ε の符号を決定することができ、その結果回転の方向を知ることができる。

位相変調の他に、「位相零化」が通常干渉計の出力にかけられる。これにより、非相互的（サニャック）効果による位相の変化を補償するための負帰還機構によりさらに位相のずれが起こる。測定した位相差の変化率に比例する勾配を持つ位相ランプ（アナログまたはデジタル）は、通常この目的のために生成される。通常、0 から 2π ラジアン の間で高さが変化するランプは、位相のずれを零にする。何故なら、必要なシフトは電圧の制限のために無限に大きくなることはできないからである。

慣性システムの主要な用途の一つは、航空機機首方位の決定である。このような決定は、ジャイロスコープを含むシステム・センサの性能に左右されるし、ジャイロスコープの出力のノイズの量および種類により影響を受ける。

高度な技術によるジャイロスコープ（例えば、レーザおよび光ファイバ型ジャイロスコープ）の出力のノイズ特性は、いわゆる「ランダム・ウォーク」特性を含んでいる。このことは各ステップが統計的に独立した事象からなる確立的プロセスを表している。光ファイバ・ジャイロスコープの出力のような、ランダム・ウォークに左右される変数を測定する場合には、いわゆる「真」の測定への緩やかな集束が起こる。例えば、1 時間当たりの 0 度の真のドリフト率を処理するための周知の光ファイバ・ジャイロスコープにより機首方位角度のドリフト率を測定する際には、100 秒刻みで 1 時間当たり 0.9 度の測定値を、900 秒刻みで 1 時間当たり 0.3 度の測定値が得られるだろう。長さ（サンプルの数）が増大するにつれて、推定値の不確実性が減少するのがランダム・ウォークの特徴である。

ランダム・ウォークは、ホワイト・ノイズ（すなわち、スペクトル密度（PSD）が「フラット」なノイズ）として知られているランダムで、非集束性確立的プロセスを含むことができる。ホワイト・ノイズがある場合は、機首方位角度の測定にジャイロスコープを使用すると特に厄介なことになる。ジャイロスコープの出力のノイズの成分が真にホワイト・ノイズ的にランダムである場合には、角度の RMS 値は時間の平方根に従って増大する。すなわち、

$$\sigma = RW \sqrt{T} \quad (1)$$

上記式中、RW はランダム・ウォーク係数、T は時間、 σ は機首方位角度の標準偏差である。

上記の式はホワイト・ノイズによるランダム・ウォーク誤差は、時間が経過するにつれて機首方位角度を増大させることを示している。いうまでもなく、このことは非常に面倒なことである。

図 3 は、光ファイバ・ジャイロスコープのランダム・ウォーク（曲線 20）と光源ピーク電力との間の関係を示すグラフ（正確な尺度によらない）である。光ファイバ・ジャイロスコープの出力のホワイト・ノイズは、多数の発生源を持つ場合がある。電子ノイズ（暗

10

20

30

40

50

電流およびジョンソン・ノイズ、すなわち、熱雑音)、ショット雑音およびうなり、すなわち全部をひっくるめた相対強度ノイズすべてが関連している場合もある。ジャイロスコープのランダム・ウォークに対する電子ノイズおよびショット雑音の影響は、ピーク電力が増大するにつれて減少する。図3にこの現象の概略を示す。図3を見れば同様に分かるように、全部をひっくるめた相対強度ノイズ(曲線22)の影響は、ピーク電力とは無関係で、ジャイロスコープのランダム・ウォークがピーク電力の増大につれて減少する効果を抑制している。予め定めた範囲内とは対照的に、ピーク電力が増大すると、電子ノイズ(曲線24)およびショット雑音(曲線26)の影響は減少する。上記の領域を越えると、電力が増大してもランダム・ウォークの影響は改善されない。

ホワイト・ノイズの相対的重要性は、光源の電力が増大するにつれて増大する。超発光ダイオードのピーク電力は約0.5ミリワットであるが、希土でドーピングした光源のピーク電力は通常約10ミリワットである。図3について説明すると、超発光ダイオードのような低電力電源を使用した場合には、ランダム・ウォークに対するホワイト・ノイズの影響は、ショット雑音の影響に比べるとほんの僅かであり、ショット雑音の影響は電子雑音の影響に比べるとほんの僅かである。光源の電力が増大するにつれて、全部をひっくるめた相対高度雑音の影響は、結果的にジャイロスコープのノイズの影響の中で支配的なものになる。

ジャイロスコープの出力からホワイト・ノイズの影響を分離し、除去しようとした先行技術としては、光源の出力を「取り出し」、上記の出力をジャイロスコープの出力から分離する方法などがある。この方法は、全部をひっくるめた相対強度ノイズは光源に由来しているという事実に基づいている。この方法の機構化は複雑で、検出した出力の同期および時間および温度によって変化するゲインの整合および安定化および第二の検出装置を設置しなければならないなどの技術的困難を数多く含んでいる。電力を含めてコストが高くなることが明らかな上に、ジャイロスコープの大きさが必然的に増大し、上記の方法の実際の使用は困難である。

(発明の開示)

本発明は、まず第一に光ファイバのセンサ・コイルを含むタイプの光ファイバ・ジャイロスコープの変調方法を改善することによって、先行技術の上記および他の欠点の改良を行う。上記のジャイロスコープの場合には、光源の出力はコイルに導かれ、一組のビームに分割される。この一組のビームはコイルの両端部に入力され、相互に反対方向に進行し、ジャイロスコープの出力を形成するために結合される。

本発明の改善は、出力のランダム・ウォークが最大出力信号変調のランダム・ウォークより小さい周期的な人為的位相のずれを選択することから始まる。この後で、上記の周期的な人為的位相のずれは相互に反対方向に進行するビームの間に加えられる。

本発明の第二の態様は、光ファイバのセンサ・コイルを含むタイプの光ファイバ・ジャイロスコープの変調方法を提供することである。上記の方法の最初の段階は、光源の出力をジャイロスコープに導入することである。その後で、光源の出力は一組のビームに分割され、この一組のビームはコイルの両端部に入力され、相互に反対方向に進行する。矩形波の形の周期的な人為的位相のずれ $\varphi_m(t)$ は、相互に反対方向に進行する一組のビームの間に加えられる。上記の周期的な人為的位相のずれは、 $(4n+1)\pi/2 < |\varphi_m(t)| < (2n+1)\pi$ の形をしている。この場合、 n は0を含む整数である。相互に反対方向に進行する一組のビームは、その後、ジャイロスコープの出力を形成するために結合される。

第三の態様は、すでに述べた方法を、相互に反対方向に進行する一組のビームの間に周期的な人為的位相のずれを起こすための矩形波 $\varphi_m(t)$ を $(2n+1)\pi < |\varphi_m(t)| < (4n+3)\pi/2$ の形にするとする点だけに限って修正しているということである。上記の n は0を含む整数である。

第四の態様について説明すると、本発明は光ファイバのセンサ・コイルを含むタイプの光ファイバ・ジャイロスコープの変調方法を提供する。この態様は、光源の出力をジャイロスコープに入力することである。その後、光源の出力は一組のビームの分割され、この一

10

20

30

40

50

組のビームはコイルの両端部に入力され、相互に反対方向に進行する。

周期的な人為的位相のずれは、相互に反対方向に進行する一組のビームの間に加えられる。上記の位相のずれは正弦波 $\varphi_M(t)$ からなる。この場合、 $x < |\varphi_M(t)| < y$ であり、 x は $J_1(x)$ が最大値の場合であり、 $J_1(y)$ が 0 であり、 $J_1(\quad)$ が第一のタイプの一次ベッセル関数である。その後、相互に反対方向に進行するビームはジャイロスコープの出力を形成するために合成される。

本発明の第五の態様は、一組の光のビームが光ファイバのセンサ・コイル内を相互に反対方向に進行するタイプの光ファイバ・ジャイロスコープの出力内のランダム・ウオーク・ノイズの調整方法を提供することである。上記の方法の最初のステップは、相互に反対方向に進行する一組の光のビームの間に周期的な人為的位相のずれを加え、それに対応してランダム・ウオーク・ノイズを調整するために周期的な人為的位相のずれの大きさを変化させることである。

本発明の上記のおよび他の特徴および利点は、以下の詳細な説明を読めば明らかになる。上記の詳細な説明には図面が添付されている。本文の数字に対応する図面の数字については、本発明の部材を参照されたい。詳細な説明および図面のすべてにわたって、類似の数字は類似の部材を示す。

【図面の簡単な説明】

図 1 は、図示の先行技術による矩形波変調を受けた相互に反対方向に進行する各ビームの間の位相のずれの関数としての光ファイバ出力ジャイロスコープの出力の強度、すなわち電力のグラフである。

図 2 は、先行技術による光ファイバ・ジャイロスコープ用の代表的変調波形（矩形波）のグラフである。

図 3 は、光ファイバ・ジャイロスコープの出力のランダム・ノイズの成分と光源のピーク電力との間の関係を示すグラフである。

図 4 は、変調振幅の関数としてのジャイロスコープ出力のランダム・ウオークのグラフである。

図 5 (a) および 5 (b) は、本発明の方法による変調波形のグラフと、上記の変調を受ける光ファイバ・ジャイロスコープの出力のグラフである。

図 6 は、本発明による矩形波変調に対応する図示の領域を持っている光ファイバ・ジャイロスコープの出力のグラフである。

（発明を実施するための最良の形態）

本発明は、ランダム・ウオーク誤差の影響を受け、ホワイト・ノイズ成分を含む光ファイバ・ジャイロスコープの出力の実現可能なノイズ低減の限界を克服するためのものである。図 3 に戻って説明すると、ランダム・ウオーク・ノイズは光源のピーク電力が増大するにつれて減少する。しかし、電力が増大するにつれて、ノイズ低減の限界値に近づく。機首方位の誤差とホワイト・ノイズが存在する時間との間に比例関係があるために、長い時間にわたって機首方位角度を測定する場合には、上記の制限値の存在は特に面倒なものになる。

超発光ダイオードが通常光源として使用されてきた。しかし、希土でドーピングをした光ファイバの高電力電源は、超発光ダイオードの電力を遥かに越える 10 ミリワットの範囲の電力を発生することができる。図 3 は光源の電力が増大するにつれて、ピーク電力には影響されない一つの要因、すなわち、総括的にひくくめた相対強度ノイズの相対的な影響が、出力ノイズに対して支配的になる様子を示す。

本発明の発明者は、図 2 の矩形波変調のようなタイプの先行技術の変調方法を使用したとき、予想されるものより少ないランダム・ウオークを特徴とする出力信号を生成する変調方式を提供することによって、ジャイロスコープのノイズの低減の「基本的な」問題に取り組んできた。さらに、本発明による変調方式は、光源の電力が増大するにつれてより顕著になってくる諸問題の解明に挑戦する。それ故、非相互的な位相の変動 ε に対する出力の感度がある程度犠牲になる反面、増大した光源の電力が、データ処理目的のために適当な信号出力を生成して補償を行う。

I. 矩形波変調の分析

すでに説明したように、光ファイバ・ジャイロスコープの出力のランダム・ウオークは、フラットなPSDを持っているホワイト・ノイズによって制限される。光ファイバ・ジャイロスコープのホワイト・ノイズの発生源は、電子ノイズ、ショット雑音およびビート・ノイズすなわち、総括的にひっくるめると相対強度ノイズを含んでいる。例えば、図2に示すように変調したジャイロスコープに対する上記の各ノイズ源によるランダム・ウオークは、下記の式で表される。

$$RW_{\text{Elex}} = \frac{1}{K_{\text{SSF}}} \sqrt{\frac{2 \text{NEP}}{P_0}} \quad (2a)$$

$$RW_{\text{shot}} = K_{\text{SSF}} \sqrt{\frac{2e}{RP_0}} \quad (2b)$$

$$RW_{\text{RIN}} = \text{RIN} / [K_{\text{SSF}}^2] \quad (2c)$$

$$RW_{\text{RSS}} = \sqrt{RW_{\text{elex}}^2 + RW_{\text{shot}}^2 + RW_{\text{RIN}}^2} \quad (2d)$$

上記式中、 K_{SSF} は光ファイバ・ジャイロスコープのサニャック換算係数であり、NEPは光検出機構に対するWatts / $\sqrt{\text{Hz}}$ 単位でのノイズ等価電力であり、eは一個の電子の電荷であり、Rはamps / Watts単位での光検出機構の応答感度であり、RINは1 / Hz単位の光源の相対強度ノイズ係数であり、 P_0 はジャイロスコープの光源のピーク電力である。

サニャック換算係数、 K_{SSF} は下記の式により表される。

$$K_{\text{SSF}} = 2\pi LD / \lambda c \quad (3)$$

上記式中、Lは光ファイバの長さであり、Dは光ファイバの直径であり、 λ は光ファイバ・ジャイロスコープ内の光の平均波長であり、cは光の自由空間内の速度である。光ファイバ・ジャイロスコープの検出電力は、下記の式で表される。

$$P = P_0 (1 + \cos(K_{\text{SSF}} \Omega + \phi_M(t))) / 2 \quad (4)$$

上記式中、 Ω は測定対象の回転速度であり、 $\phi_M(t)$ は周期変調関数である。図2について説明すると、 $\phi_M(t)$ は周期が 2γ 、振幅が $\pi/2$ の矩形波になるように選んである。しかし、最大値が約 ± 1.8 ラジアンの間で変化し、 2γ の周期を持っている(この場合、 1.8 ラジアンは、 $J_1(x)$ が第一のタイプの一次ベッセル関数である場合の、 $J_1(x)_{\text{max}}$ の引数xである)正弦波形は、それに対応する先行技術の正弦波変調方法を示す。すでに説明したように、 γ は長さLの光ファイバ・コイルを通る光の遷移時間である。図2に示す変調関数(すなわち、振幅が $\pm \pi/2$ の矩形波)を収容するために、復調は広帯域A/D変換を行った後のデジタル減算により行うことができる。

式2a - 2dを図3のグラフと一緒に参照すれば、 RW_{elect} と RW_{shot} はそれぞれ P_0 に反比例し、一方、 RW_{RIN} 値、すなわち、 RW_{RSS} の残りの成分は P_0 とは無関係であることに気がつくと思う。従って、それは光ファイバ・ジャイロスコープの出力内の真のホワイト・ノイズ源である総括的にひっくるめていうと相対強度ノイズによるものである。ジャイロスコープのランダム・ウオークのこのノイズ成分は、電力が増加することにより行うことができるノイズ抑制効果を制限する。

本発明の発明者は、相対強度ノイズの影響を減らす変調方法により上記のノイズ制限の問題に取り組んできた。この方法を使用すれば、ジャイロスコープの出力のノイズの働きにより、図2に示す矩形波または対応する正弦波による先行技術の変調波形のような「従来の」周期変調波形が適用される場合に存在する制限を克服することができる。

任意の振幅の矩形波変調を受けるジャイロスコープの電子雑音、ショット雑音、およびビート・ノイズによるランダム・ウオークの一般式が以下に示すものであることは周知である。

10

20

30

40

50

$$RW_{\text{elex}} = K_{\text{SSF}} \frac{1}{P_0} \frac{\sqrt{2} \text{ NEP}}{\sin \phi_M} \quad (5a)$$

$$RW_{\text{shot}} = K_{\text{SSF}} \frac{1}{\sqrt{2e}} \frac{\sqrt{1 + \cos \phi_M}}{\sin \phi_M} \quad (5b)$$

$$RW_{\text{RIN}} = K_{\text{SSF}} \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\text{RIN}}{\sin \phi_M} \quad (5c)$$

前に記載したように、

$$RW_{\text{RSS}} = \sqrt{RW_{\text{elex}}^2 + RW_{\text{shot}}^2 + RW_{\text{RIN}}^2} \quad (5d)$$

上記の各式は、 ϕ_M を $\pi/2$ に設定した場合には現れなかった項が含まれているという点で式2 a乃至2 dのそれとは異なっている。(当業者にとっては周知の対応する各式は、任意の振幅 ϕ_M の正弦波変調を受けるジャイロスコープの出力ノイズを示す。)式5 a乃至5 cを参照することにより、本発明の発明者は、矩形波変調の振幅を先行技術の最大信号変調を示す $\pm \pi/2$ から以下の式で表される関数 $\phi_M(t)$ に変化させると、式2 cで与えられるレベル以下に「制限」ランダム・ウォーク係数 RW_{RIN} を減らすことができることを発見した。

$$(4n+1)\pi/2 < |\phi_M(t)| < (2n+1)\pi \quad (6a)$$

$$(2n+1)\pi < |\phi_M(t)| < (4n+3)\pi/2 \quad (6b)$$

上記式中、 n は0を含む整数である。

本発明の発明者は、正弦波変調 $\phi_M(t)$ が約 ± 1.8 ラジアン of 最大値と最小値の間で変化する正弦波から下記の式で表される範囲の最大値および最小値を持っている正弦波に変化したとき、上記の変調が行われている場合の出力ランダム・ウォークをそれに対応して改善する方法を発見した。

$$X < |\phi_M(t)| < Y \quad (6c)$$

上記式中、 x は $J_1(x)$ が最大値であり、 $J_1(y)$ が0であり、そして $J_1(\quad)$ が第一のタイプの一次ベッセル関数である。

本発明の変調により行うことができるジャイロスコープのランダム・ウォークの改善は、ランダム・ウォーク(対数目盛り)対矩形波変調振幅 ϕ_M の関係を示す図4のグラフにより確認することができる。三本の曲線が表示されているが、その各々は異なるピーク電力レベルに対応している。一本の曲線はピーク電力が10ミリワットの場合の変数の変化を示す。もう一本の曲線は、ピーク電力が100ミリワットの場合の変数の変化を示す。三番目の曲線はピーク電力が1000ミリワットの場合の変数の変化を示す。図を見れば分かるように、ジャイロスコープのランダム・ウォークはピーク電力が増大するにつれて減少する。(注：グラフの一番左の数値は、先行技術($\pm \pi/2$)矩形波変調を示す。)

図2のグラフと図4のグラフを比較すると、矩形波変調の振幅 ϕ_M が $\pi/2$ 以上に増大すると、ランダム・ウォークが劇的に減少することに気がつく。($-\pi/2$ 以下においても、同じ結果が観察される。)図4に示すように、ランダム・ウォークは、 $\pi/2$ 矩形波変調振幅におけるすべての電力レベルに対して約0.007度/ $\sqrt{\text{hour}}$ に制限される。この数値は本質的に式2 cの相対強度ノイズの項 RW_{RIN} を表す。変調振幅 ϕ_M が、1000ミリワットのピーク電力ジャイロスコープにおいて、約 $31\pi/32$ に増大すると、10倍以上のノイズの減少が起こる。その後、位相差が π (または $n\pi$ 、この場合 n は整数)の領域内での位相差の変動に対する出力強度の相対的感応の偏差を反映して、ジャイロスコープ出力のランダム・ウォークは π ラジアン of 領域で実質的に増大する。

下記の表Iは、最適変調振幅および本発明に従ってそのような最適変調振幅を使用して達

10

20

30

40

50

成したランダム・ウオーク値とともに、先行技術（すなわち、 $\pm \pi / 2$ 矩形波変調振幅）動作によって得ることができるランダム・ウオークを示す。さらに、本発明による変調を使用して達成したホワイト・ノイズの減少を示す改善係数を示す。

表 I

ピーク電力 の改善（マ イクロワッ ト）係数	先行技術による ランダム・ ウオーク (度/ $\sqrt{hr}$)	最適変調振幅 ϕ_{opt} (ラジアン)	ϕ_{opt} における ランダム・ ウオーク (度/ $\sqrt{hr}$)	
1 0	0. 0 0 8	2. 6	0. 0 0 4	2 X
1 0 0	0. 0 0 7	3. 0	0. 0 0 1	7 X
1 0 0 0	0. 0 0 7	3. 1	0. 0 0 0 4	1 7. 5 X

10

図 5 (a) および図 5 (b) は、本発明により変調（矩形波変調）された光ファイバ・ジャイロスコープの変調、動作点および出力を示す一組のグラフである。上記の一組のグラフは、先行技術によって変調された低電力光ファイバ・ジャイロスコープの対応する数字との比較が行われている。（対応する先行技術による数値は一点鎖線で表示されている。）

20

図 5 (a) を見れば、変調波形 2 8 は振幅が $\pi / 2$ から π へ、 $-\pi$ から $-\pi / 2$ へと変化する周期が 2γ の矩形波からなる。（第一のタイプの一次ベッセル関数である $J_1(x)$ の引数が 0 から最大値の間での周期および振幅 x が同一の正弦波形も、同様に使用することができる。）変調振幅の正確な数値は、最小値に対する式 5 d を解くことにより知ることができる。しかし、本発明の方法は、単に最小のランダム・ウオーク値を得ることではなく、先行技術による変調方法で得られる数値以上にランダム・ウオークの数値を改善することである。

30

図 5 (b) は、 $\Delta \phi$ の関数としての、光ファイバ・ジャイロスコープの出力の強度のグラフである。図を見れば分かるように、本発明による矩形波変調を表す式 6 a の $n = 0$ に対応する動作点 3 0、3 2 は、出力曲線 3 4 の $\pm \pi / 2$ 屈折点 3 0' および 3 2' から離れた場所に位置している。上記の動作点の出力強度の特徴は、検出回転速度を示す非相互的変動 ε への感度が最大値より低いということである。低下した信号感度は、部分的には、超発光ダイオードのようなより低い電力源に対応する（一点鎖線で示す）曲線 3 6 と比較して、出力曲線 3 4 の電力を増大することによって補償される。本質的なことではないが、必要な場合には、より電力の高い光源と交換することにより、電子出力を発生するために位相の偏差に対して低下した感度を補償することができる。さらに、図 3 を見れば分かるように、本発明の変調方法の相対的利点は、ピーク電力が増大するにつれてもっとはつきりしてくる。本発明の方法により変調されたジャイロスコープの動作点 3 0、3 2 を、 $\pm \pi / 2$ 矩形波変調を受けたジャイロスコープの動作点 3 8' および 4 0' と比較すると、先行技術による変調は信号を最大にすることを目的としているが、本発明の変調方法は S / N 比を最大にして、等価的にランダム・ウオークを最小にすることを目的としている。

40

図 6 は、位相のずれ $\Delta \phi$ の関数としての光ファイバ・ジャイロスコープの出力のグラフである。図 6 に「A」で示した領域は、式 6 a に定義する本発明の方法による矩形波変調に対応し、一方、「B」で示す領域は式 6 b に定義する本発明による矩形波変調に対応する。

式 6 c は本発明による正弦波変調を定義している。本発明による矩形波変調および正弦波変調の両方とも、それぞれが所与の非相互的位相のずれ ε に対して最大出力信号 ΔI (または ΔP) の発生する点以外の点におけるジャイロスコープ出力フリッジ上で動作するように作られているという特徴を持っている。上記の先行技術による矩形波変調および正弦波変調 (すなわち、約 1.8 ラジアンに対応する $\pi/2$) の最大振幅の間の相違は、矩形波および正弦波の最大値および最小値の間の遷移周期の定質的相違持続時間に関連している。それ故、当業者には周知のフーリエ - ベッセル分析は、丁度 $\pm \pi/2$ が所与の ε に対する最大ジャイロスコープ出力を得るための矩形波の最大値と最小値を定義するように、約 1.8 ラジアンを所与の ε に対する最大ジャイロスコープ出力を得るための正弦波の最大値および最小値として定義している。式 6 a および 6 b により定義された変調のように、式 6 c により定義された変調は、最大信号出力が行われる領域以外のジャイロスコープ出力曲線の領域上で動作するようになっている。

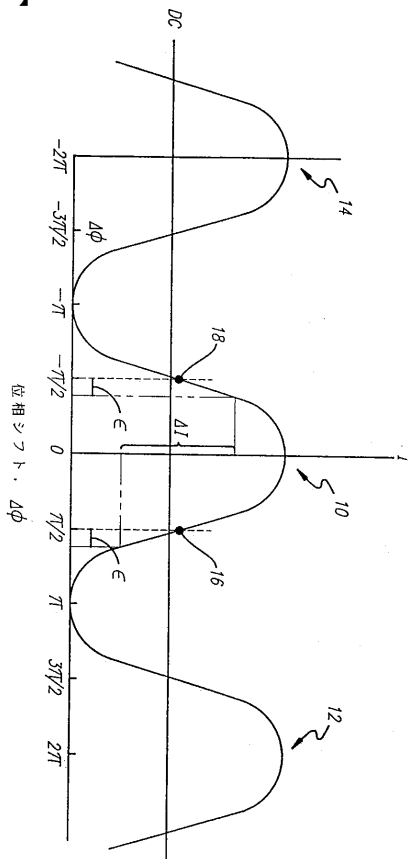
10

それ故、本発明は先行技術による変調方法の限界を越えて、ランダム・ウォークのホワイト・ノイズ成分を減少する光ファイバ・ジャイロスコープの変調方法を提供するものであることが理解できると思う。上記の誤差を減らすことによって、機首方位角度を決定するために光ファイバ・ジャイロスコープを使用している慣性航法装置の精度を有意に改善することができる。本発明の方法は、ノイズを減少させるのに追加のハードウェアを必要としないので、装置がより複雑にもならなければ、より多くのコストも必要としない。

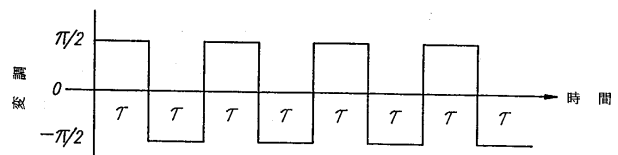
好適な実施例を参照しながら、本発明を説明してきたが、本発明はそれに制限されない。本発明は以下の請求の範囲によってのみ制限されるもので、すべての類似の実施例をその範囲内に含む。

20

【図 1】

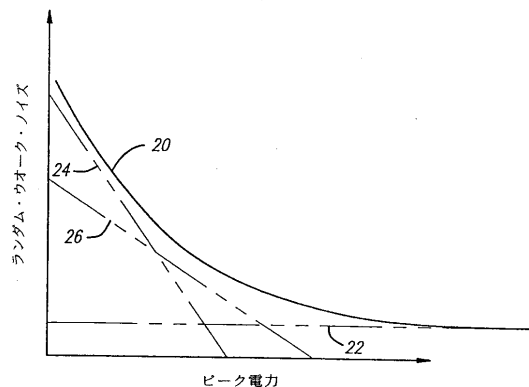
FIG. 1
PRIOR ART

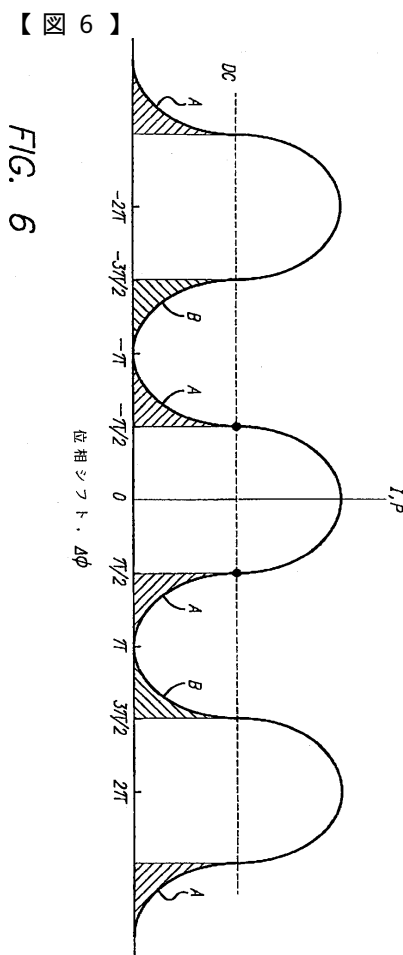
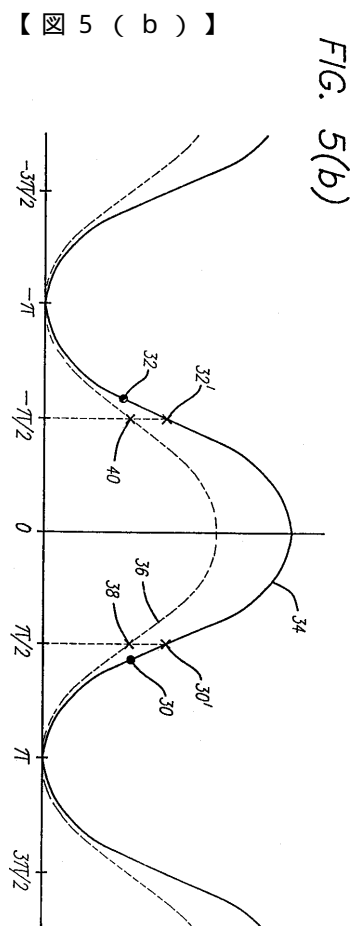
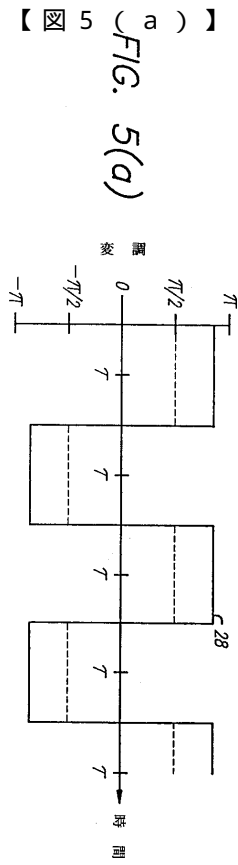
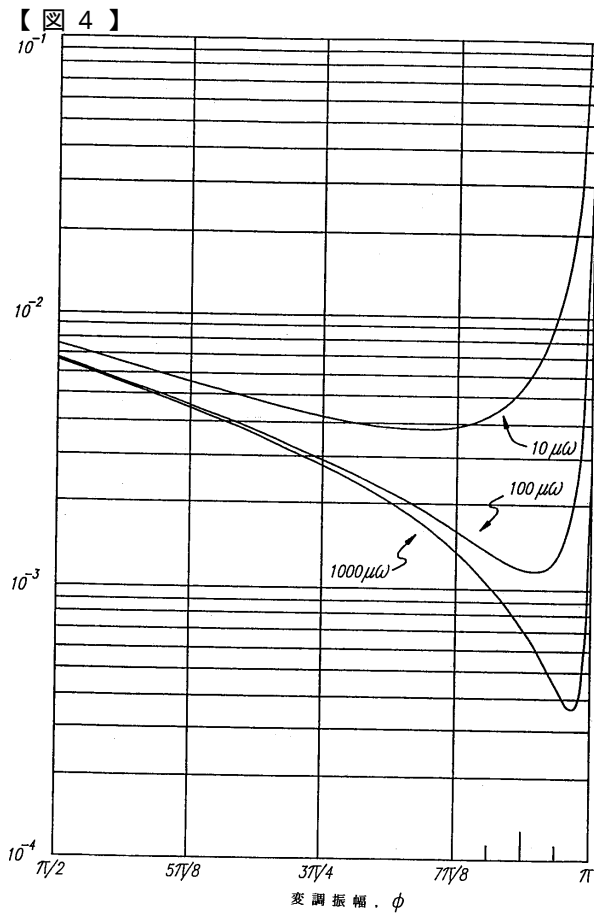
【図 2】

FIG. 2
PRIOR ART

【図 3】

FIG. 3





フロントページの続き

(74)代理人 100101498

弁理士 越智 隆夫

(74)代理人 100104352

弁理士 朝日 伸光

(72)発明者 バヴロス, エー・ジョージ

アメリカ合衆国, 9 1 3 6 0 カリフォルニア, サウザンド オークス, カレ ケブラッコ 3 5
1 3

審査官 森 雅之

(56)参考文献 特公平02-004149(JP, B2)

特公平03-024794(JP, B2)

特許第2528199(JP, B2)

特開平3-239911(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

日本国特許審査官が調査した主分野

G01C 19/64