

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号
特許第4219519号
(P4219519)

(45) 発行日 平成21年2月4日 (2009.2.4)

(24) 登録日 平成20年11月21日 (2008.11.21)

(51) Int.Cl. F I

HO 4 B 10/04 (2006.01)

HO 4 B 10/06 (2006.01)

HO 4 B 10/142 (2006.01)

HO 4 B 10/152 (2006.01)

HO 4 B 10/02 (2006.01)

HO 4 B 9/00 L

HO 4 B 9/00 M

GO 2 F 2/00

請求項の数 12 (全 26 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2000-10929 (P2000-10929)	(73) 特許権者	000005821
(22) 出願日	平成12年1月19日 (2000.1.19)		パナソニック株式会社
(65) 公開番号	特開2000-278218 (P2000-278218A)		大阪府門真市大字門真1006番地
(43) 公開日	平成12年10月6日 (2000.10.6)	(74) 代理人	100098291
審査請求日	平成18年12月11日 (2006.12.11)		弁理士 小笠原 史朗
(31) 優先権主張番号	特願平11-10143	(72) 発明者	布施 優
(32) 優先日	平成11年1月19日 (1999.1.19)		大阪府門真市大字門真1006番地 松下
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		電器産業株式会社内

審査官 川口 貴裕

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 周波数変調装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光周波数の互いに異なる第1および第2の光をそれぞれ出力する第1および第2の光源を用いた光周波数変調および光ヘテロダイン検波により、入力電気信号を周波数変調信号に変換し、FM変調信号として出力する周波数変調装置であって、

前記入力電気信号で周波数変調された前記第1の光を第1の光信号として出力する第1の光変調器と、

前記第1および第2の光から自乗検波特性に基づく光検波によって得られるビート信号の搬送波成分に相当する無変調ビート信号を生成するビート信号生成部と、

前記無変調ビート信号の周波数を変換することにより周波数変換信号を生成する周波数変換器と、

前記第1の光信号と前記第2の光とのうち一方を前記周波数変換信号で光振幅変調または光強度変調することにより第2の光信号を生成する第2の光変調器と、

前記第1の光信号と前記第2の光とのうちの他方および前記第2の光信号を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により前記FM変調信号を生成する光受信器と、を備える周波数変調装置。

【請求項 2】

前記第1の光変調器は、直接変調によって前記第1の光信号を生成し、

前記ビート信号生成部は、

前記第1の光信号および前記第2の光を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により

10

20

、前記第 1 の光信号および前記第 2 の光の光周波数の差に相当する中心周波数を有する変調された電気信号である変調ビート信号を生成する受光素子と、
前記変調ビート信号からその搬送波成分を抽出し、当該搬送波成分を前記無変調ビート信号として出力するフィルタとを含む、請求項 1 に記載の周波数変調装置。

【請求項 3】

前記第 1 の光変調器は、
無変調光である前記第 1 の光を出力する前記第 1 の光源と、
前記第 1 の光源から出力された前記第 1 の光を前記入力電気信号で変調することにより前記第 1 の光信号を生成する外部光変調器とを含み、
前記第 2 の光源は、無変調光を前記第 2 の光として出力し、
前記ビート信号生成部は、無変調光である前記第 1 および第 2 の光を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により前記無変調ビート信号を生成する受光素子を含む、請求項 1 に記載の周波数変調装置。

10

【請求項 4】

前記第 1 の光変調器は、前記入力電気信号の振幅変化を前記第 1 の光の光周波数の変化に一意に変換することにより、所定の中心周波数 f_1 の前記第 1 の光信号を生成し、
前記第 2 の光源は、所定の周波数 f_2 の光を前記第 2 の光として出力し、
前記ビート信号生成部は、
前記第 1 の光信号と前記第 2 の光とを受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、
前記第 1 の光信号および前記第 2 の光の光周波数の差に相当する周波数 $f_s = |f_1 - f_2|$ において、変調された電気信号である変調ビート信号を生成する受光素子と、
前記変調ビート信号からその搬送波成分を抽出し、当該搬送波成分を前記無変調ビート信号として出力するフィルタとを含み、
前記周波数変換器は、前記無変調ビート信号を所定の周波数 f_x の信号に変換し、変換後の当該信号を前記周波数変換信号として出力し、
前記第 2 の光変調器は、前記第 1 の光信号と前記第 2 の光とのうち一方を周波数 f_x の前記周波数変換信号で光振幅変調または光強度変調することにより第 2 の光信号を生成し、
前記光受信器は、前記第 1 の光信号と前記第 2 の光とのうち他方および前記第 2 の光信号を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、周波数 $f_L = |f_s - f_x|$ において前記 FM 変調信号を生成する、請求項 1 に記載の周波数変調装置。

20

30

【請求項 5】

前記入力電気信号を互いに逆相の第 1 および第 2 の電気信号に分岐させる分波器と、
前記第 2 の電気信号を光強度変調によって第 3 の光信号に変換する第 3 の光変調器と、
を更に備え、
前記第 1 の光変調器は、直接変調によって前記第 1 の電気信号の振幅変化を前記第 1 の光の光周波数の変化に一意に変換することにより、所定の中心周波数 f_1 の前記第 1 の光信号を生成し、
前記第 2 の光源は、所定の周波数 f_2 の光を前記第 2 の光として出力し、
前記ビート信号生成部は、
前記第 1 の光信号と前記第 2 の光とを受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、
前記第 1 の光信号および前記第 2 の光の光周波数の差に相当する周波数 $f_s = |f_1 - f_2|$ において、変調された電気信号である変調ビート信号を生成する受光素子と、
前記変調ビート信号からその搬送波成分を抽出し、当該搬送波成分を前記無変調ビート信号として出力するフィルタとを含み、
前記周波数変換器は、前記無変調ビート信号を所定の周波数 f_x の信号に変換し、変換後の当該信号を前記周波数変換信号として出力し、
前記第 2 の光変調器は、前記第 1 の光信号と前記第 2 の光とのうち一方を周波数 f_x の前記周波数変換信号で光振幅変調または光強度変調することにより第 2 の光信号を生成し、
前記光受信器は、前記第 1 の光信号と前記第 2 の光とのうち他方および前記第 2 の光信号を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、周波数 $f_L = |f_s - f_x|$ にお

40

50

いて前記 F M 変調信号を生成するとともに、前記第 3 の光信号を受け取って、前記光検波により、前記第 3 の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する電気信号を生成する、請求項 1 に記載の周波数変調装置。

【請求項 6】

前記光受信器の前記自乗検波特性に基づく光検波によって生成される強度変調 - 直接検波成分のうち前記第 1 の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第 1 の I M - D D 成分と、当該生成される強度変調 - 直接検波成分のうち前記第 3 の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第 2 の I M - D D 成分とを、互いに逆相かつ同一振幅とする位相・振幅調整手段を更に備える、請求項 5 に記載の周波数変調装置。

【請求項 7】

前記入力電気信号を互いに逆相の第 1 および第 2 の電気信号に分岐する分波器と、所定の中心周波数 f_2 の変調光である前記第 2 の光を第 4 の光信号として出力する第 4 の光変調器と、

を更に備え、

前記第 1 の光変調器は、直接変調によって前記第 1 の電気信号の振幅変化を前記第 1 の光の光周波数の変化に一意に変換することにより、所定の中心周波数 f_1 の前記第 1 の光信号を生成し、

前記第 4 の光変調器は、直接変調によって前記第 2 の電気信号の振幅変化を前記第 2 の光の光周波数の変化に一意に変換することにより、所定の中心周波数 f_2 の前記第 4 の光信号を生成し、

前記ビート信号生成部は、

前記第 1 および第 4 の光信号を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、前記第 1 および第 4 の光信号の光周波数の差に相当する周波数 $f_s = |f_1 - f_2|$ において、変調された電気信号である変調ビート信号を生成する受光素子と、

前記変調ビート信号からその搬送波成分を抽出し、当該搬送波成分を前記無変調ビート信号として出力するフィルタとを含み、

前記周波数変換器は、前記無変調ビート信号を所定の周波数 f_x の信号に変換し、変換後の当該信号を前記周波数変換信号として出力し、

前記第 2 の光変調器は、前記第 1 の光信号と前記第 4 の光信号のうち一方を周波数 f_x の前記周波数変換信号で光振幅変調または光強度変調することにより第 2 の光信号を生成し

、
前記光受信器は、前記第 1 の光信号と前記第 4 の光信号のうちの他方および前記第 2 の光信号を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、周波数 $f_L = |f_s - f_x|$ において前記 F M 変調信号を生成する、請求項 1 に記載の周波数変調装置。

【請求項 8】

前記光受信器の前記自乗検波特性に基づく光検波によって生成される強度変調 - 直接検波成分のうち前記第 1 の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第 1 の I M - D D 成分と、当該生成される強度変調 - 直接検波成分のうち前記第 4 の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第 3 の I M - D D 成分とを、互いに逆相かつ同一振幅とする位相・振幅調整手段を更に備える、請求項 7 に記載の周波数変調装置。

【請求項 9】

前記第 1 の光変調器と前記ビート信号生成部との間に挿入され、前記第 1 の光信号からその光搬送波成分を抽出する光フィルタを更に備え、

前記第 2 の光源は、無変調光を前記第 2 の光として出力し、

前記ビート信号生成部は、前記光フィルタによって抽出された光搬送波成分と前記第 2 の光とを受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により前記無変調ビート信号を生成する受光素子を含む、請求項 1 に記載の周波数変調装置。

【請求項 10】

前記入力電気信号を互いに逆相の第 1 および第 2 の電気信号に分岐する分波器と、所定の中心周波数 f_2 の変調光である前記第 2 の光を第 4 の光信号として出力する第 4 の

10

20

30

40

50

光変調器と、

前記第1の光変調器と前記ビート信号生成部との間に挿入された第1の光フィルタと、
前記第4の光変調器と前記ビート信号生成部との間に挿入された第2の光フィルタと、
を更に備え、

前記第1の光変調器は、直接変調によって前記第1の電気信号の振幅変化を前記第1の光の光周波数の変化に一意に変換することにより、所定の中心周波数 f_1 の前記第1の光信号を生成し、

前記第4の光変調器は、直接変調によって前記第2の電気信号の振幅変化を前記第2の光の光周波数の変化に一意に変換することにより、所定の中心周波数 f_2 の前記第4の光信号を生成し、

前記第1の光フィルタは、前記第1の光信号からその光搬送波成分を抽出し、前記第2の光フィルタは、前記第4の光信号からその光搬送波成分を抽出し、前記ビート信号生成部は、前記第1および第2の光フィルタによって抽出された両光搬送波成分を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、当該両光搬送波成分の光周波数の差に相当する周波数 $f_s = |f_1 - f_2|$ において前記無変調ビート信号を生成する受光素子を含み、
前記周波数変換器は、前記無変調ビート信号を所定の周波数 f_x の信号に変換し、変換後の当該信号を前記周波数変換信号として出力し、

前記第2の光変調器は、前記第1の光信号と前記第4の光信号のうち一方を周波数 f_x の前記周波数変換信号で光振幅変調または光強度変調することにより第2の光信号を生成し、

前記光受信器は、前記第1の光信号と前記第4の光信号のうちの他方および前記第2の光信号を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、周波数 $f_L = |f_s - f_x|$ において前記FM変調信号を生成する、請求項1に記載の周波数変調装置。

【請求項11】

前記光受信器の前記自乗検波特性に基づく光検波によって生成される強度変調 - 直接検波成分のうち前記第1の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第1のIM-DD成分と、当該生成される強度変調 - 直接検波成分のうち前記第4の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第3のIM-DD成分とを、互いに逆相かつ同一振幅とする位相・振幅調整手段を更に備える、請求項10に記載の周波数変調装置。

【請求項12】

前記第1の光源から前記ビート信号生成部を介して前記光受信器に至る経路の光および電気伝搬時間と、前記第1の光源から直接に前記光受信器に至る経路の光伝搬時間とを互いに等しくする第1の伝搬時間調整手段と、

前記第2の光源から前記ビート信号生成部を介して前記光受信器に至る経路の光および電気伝搬時間と、前記第2の光源から直接に前記光受信器に至る経路の光伝搬時間とを互いに等しくする第2の伝搬時間調整手段と、

を更に備える、請求項1に記載の周波数変調装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、半導体レーザによる光周波数変調と光ヘテロダイン検波とを利用して、広帯域な周波数変調信号（以下「FM変調信号」という）を発生させる変調装置に関する。

【0002】

【従来の技術】

図14は、従来の周波数変調装置の構成を示すブロック図である。この周波数変調装置は、例えば文献（K.Kikushima, et al, "Optical Super Wide-Band FM Modulation Scheme and Its Application to Multi-Channel AM Video Transmission Systems", IOOC'95 Technical Digest, Vol.5 PD2-7, pp.33-34）に、その動作などが詳しく説明されている。図14に示したこの周波数変調装置は、信号源700と、光変調器702と、局発光源703と、第1の光導波路706と、第2の光導波路708と、光受信器714とを備えてい

10

20

30

40

50

る。

【 0 0 0 3 】

上記の周波数変調装置において、信号源 7 0 0 は、F M 変調すべき元信号となる電気信号 S_i を出力する。光変調器 7 0 2 は、例えば半導体レーザで構成される。一般に、半導体レーザは、注入電流一定の条件では一定の光周波数 f_1 の光を出力し、その注入電流を振幅変調すると、光周波数も変調を受けて、光周波数 f_1 を中心とした光周波数変調信号を出力する。光変調器 7 0 2 は、この性質により、信号源 7 0 0 から入力された電気信号 S_i を光周波数変調信号 L_1 に変換し、出力する。局発光源 7 0 3 は、一定の光周波数 f_2 の無変調光 L_2 を出力する。光変調器 7 0 2 および局発光源 7 0 3 から出力される各光 L_1 , L_2 は、それぞれ第 1 の光導波路 7 0 6 および第 2 の光導波路 7 0 8 を介して、光受信器 7 1 4 に入力される。光受信器 7 1 4 は、自乗検波特性を有するフォトダイオードなどで構成され、入力される 2 つの光 L_1 , L_2 の光周波数差に相当する周波数 $f_s = |f_1 - f_2|$ において当該 2 つの光のビート信号を出力する（この動作は「光ヘテロダイン検波」と呼ばれる）。このようにして得られたビート信号は、信号源 7 0 0 からの電気信号 S_i を元信号とした周波数変調信号 S_{fm} となる。

10

【 0 0 0 4 】

以上のようにして、図 1 4 に示した従来の周波数変調装置では、半導体レーザの高い周波数変調効率（一般の電気回路方式の場合における周波数変調効率の 1 0 倍以上）を利用することによって、一般の電気回路では作成困難な非常に高周波かつ広帯域な（周波数偏移量の大きい）F M 変調信号を容易に生成することができる。

20

【 0 0 0 5 】

【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、半導体レーザ等の光源は一般に電気発振器と比較して位相雑音が大きいため、上記従来の周波数変調装置は、それによって生成された F M 変調信号の復調の際に白色雑音成分が増大するという特有の問題を有している。すなわち、光変調器 7 0 2 からの光周波数変調信号 L_1 および局発光源 7 0 3 からの無変調光 L_2 が図 1 5 (A) に示すような周波数スペクトルを有する場合には、光受信器 7 1 4 から出力される F M 変調信号 S_{fm} の周波数スペクトルは図 1 5 (B) に示すようなものとなる。図 1 5 (A) および (B) に示されるように、F M 変調信号 S_{fm} に含まれる位相雑音は、光周波数変調信号 L_1 および無変調光 L_2 のそれぞれに含まれる位相雑音の総和となるため、この F M 変調信号 S_{fm} を復調する際に白色雑音成分が増大する。

30

【 0 0 0 6 】

それ故に、本発明の目的は、半導体レーザによる光周波数変調と光ヘテロダイン検波とを組み合わせた構成により、高周波かつ広帯域な周波数変調を実現しながら、生成される周波数変調信号に含まれる位相雑音を抑圧し、雑音特性に優れた周波数変調装置を提供することである。

【 0 0 0 7 】

【課題を解決するための手段および発明の効果】

第 1 の発明は、光周波数の互いに異なる第 1 および第 2 の光をそれぞれ出力する第 1 および第 2 の光源を用いた光周波数変調および光ヘテロダイン検波により、入力電気信号を周波数変調信号に変換し、F M 変調信号として出力する周波数変調装置であって、前記入力電気信号で周波数変調された前記第 1 の光を第 1 の光信号として出力する第 1 の光変調器と、前記第 1 および第 2 の光から自乗検波特性に基づく光検波によって得られるビート信号の搬送波成分に相当する無変調ビート信号を生成するビート信号生成部と、前記無変調ビート信号の周波数を変換することにより周波数変換信号を生成する周波数変換器と、前記第 1 の光信号と前記第 2 の光とのうち一方を前記周波数変換信号で光振幅変調または光強度変調することにより第 2 の光信号を生成する第 2 の光変調器と、前記第 1 の光信号と前記第 2 の光とのうちの他方および前記第 2 の光信号を受け取って、

40

50

自乗検波特性に基づく光検波により前記 F M 変調信号を生成する光受信器と、
を備える。

【 0 0 0 8 】

上記第 1 の発明によれば、2 つの光源（第 1 および第 2 の光源）と 2 つの自乗検波器（ビート信号生成部および光受信器）とにより 2 つの光ヘテロダイン系が実現され、第 1 の光源に対応する第 1 の光変調器と局発光源に相当する第 2 の光源とビート信号生成部とで構成される第 1 の光ヘテロダイン系において生成されるビート信号の搬送波成分（中心周波数成分）を周波数変換することにより得られる周波数変換信号で、第 1 の光変調器と第 2 の光源（局発光源）と光受信器とで構成される第 2 の光ヘテロダイン系における 2 つの光のうちいずれか一方が振幅変調または強度変調される。これにより、第 2 の光ヘテロダイン系において生成されるビート信号である F M 変調信号の位相雑音を抑圧し、雑音特性に優れた周波数変調を実現できる。

10

【 0 0 0 9 】

第 2 の発明は、第 1 の発明において、
前記第 1 の光変調器は、直接変調によって前記第 1 の光信号を生成し、
前記ビート信号生成部は、
前記第 1 の光信号および前記第 2 の光を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、前記第 1 の光信号および前記第 2 の光の光周波数の差に相当する中心周波数を有する変調された電気信号である変調ビート信号を生成する受光素子と、
前記変調ビート信号からその搬送波成分を抽出し、当該搬送波成分を前記無変調ビート信号として出力するフィルタとを含むことを特徴とする。

20

【 0 0 1 0 】

上記第 2 の発明によれば、直接変調によって第 1 の光信号が生成され、この第 1 の光信号と第 2 の光とから生成される変調ビート信号から搬送波成分である無変調ビート信号がフィルタによって抽出され、その無変調ビート信号を周波数変換することにより得られる周波数変換信号で、第 2 の光ヘテロダイン系における 2 つの光のうちいずれか一方が振幅変調または強度変調される。これにより、光受信器により生成される F M 変調信号の位相雑音を抑圧し、雑音特性に優れた周波数変調を実現できる。

【 0 0 1 1 】

第 3 の発明は、第 1 の発明において、
前記第 1 の光変調器は、
無変調光である前記第 1 の光を出力する前記第 1 の光源と、
前記第 1 の光源から出力された前記第 1 の光を前記入力電気信号で変調することにより前記第 1 の光信号を生成する外部光変調器とを含み、
前記第 2 の光源は、無変調光を前記第 2 の光として出力し、
前記ビート信号生成部は、無変調光である前記第 1 および第 2 の光を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により前記無変調ビート信号を生成する受光素子を含むことを特徴とする。

30

【 0 0 1 2 】

上記第 3 の発明によれば、外部変調によって第 1 の光から変調光である第 1 の光信号に変換され、ビート信号生成部では、無変調光である第 1 及び第 2 の光から無変調ビート信号が生成される。このため、変調ビート信号からその搬送波成分を抽出するためのフィルタが不要となる。

40

【 0 0 1 3 】

第 4 の発明は、第 1 の発明において、
前記第 1 の光変調器は、前記入力電気信号の振幅変化を前記第 1 の光の光周波数の変化に一意に変換することにより、所定の中心周波数 f_1 の前記第 1 の光信号を生成し、
前記第 2 の光源は、所定の周波数 f_2 の光を前記第 2 の光として出力し、
前記ビート信号生成部は、
前記第 1 の光信号と前記第 2 の光とを受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、

50

前記第 1 の光信号および前記第 2 の光の光周波数の差に相当する周波数 $f_s = |f_1 - f_2|$ において、変調された電気信号である変調ビート信号を生成する受光素子と、
前記変調ビート信号からその搬送波成分を抽出し、当該搬送波成分を前記無変調ビート信号として出力するフィルタとを含み、
前記周波数変換器は、前記無変調ビート信号を所定の周波数 f_x の信号に変換し、変換後の当該信号を前記周波数変換信号として出力し、
前記第 2 の光変調器は、前記第 1 の光信号と前記第 2 の光とのうち一方を周波数 f_x の前記周波数変換信号で光振幅変調または光強度変調することにより第 2 の光信号を生成し、
前記光受信器は、前記第 1 の光信号と前記第 2 の光とのうち他方および前記第 2 の光信号を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、周波数 $f_L = |f_s - f_x|$ において前記 FM 変調信号を生成することを特徴とする。

10

【0014】

上記第 4 の発明によれば、第 1 の光変調器により入力電気信号が光周波数変調信号に変換され、第 1 の光変調器と局発光源に相当する第 2 の光源とビート信号生成部とで構成される第 1 の光ヘテロダイン系において、ビート信号生成部から出力される無変調ビート信号である搬送波成分が周波数変換され、第 1 の光変調器と第 2 の光源（局発光源）と光受信器とで構成される第 2 の光ヘテロダイン系において、第 1 の光変調器または第 2 の光源から出力される光のいずれか一方が、上記の周波数変換された搬送波成分で振幅変調または強度変調される。これにより、光受信器から出力されるビート信号である FM 変調信号の位相雑音を抑圧し、雑音特性に優れた周波数変調を実現できる。

20

【0015】

第 5 の発明は、第 1 の発明において、
前記入力電気信号を互いに逆相の第 1 および第 2 の電気信号に分岐させる分波器と、
前記第 2 の電気信号を光強度変調によって第 3 の光信号に変換する第 3 の光変調器と、
を更に備え、
前記第 1 の光変調器は、直接変調によって前記第 1 の電気信号の振幅変化を前記第 1 の光の光周波数の変化に一意に変換することにより、所定の中心周波数 f_1 の前記第 1 の光信号を生成し、
前記第 2 の光源は、所定の周波数 f_2 の光を前記第 2 の光として出力し、
前記ビート信号生成部は、
前記第 1 の光信号と前記第 2 の光とを受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、
前記第 1 の光信号および前記第 2 の光の光周波数の差に相当する周波数 $f_s = |f_1 - f_2|$ において、変調された電気信号である変調ビート信号を生成する受光素子と、
前記変調ビート信号からその搬送波成分を抽出し、当該搬送波成分を前記無変調ビート信号として出力するフィルタとを含み、
前記周波数変換器は、前記無変調ビート信号を所定の周波数 f_x の信号に変換し、変換後の当該信号を前記周波数変換信号として出力し、
前記第 2 の光変調器は、前記第 1 の光信号と前記第 2 の光とのうち一方を周波数 f_x の前記周波数変換信号で光振幅変調または光強度変調することにより第 2 の光信号を生成し、
前記光受信器は、前記第 1 の光信号と前記第 2 の光とのうち他方および前記第 2 の光信号を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、周波数 $f_L = |f_s - f_x|$ において前記 FM 変調信号を生成するとともに、前記第 3 の光信号を受け取って、前記光検波により、前記第 3 の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する電気信号を生成することを特徴とする。

30

40

【0016】

上記第 5 の発明によれば、周波数変調の元信号である入力電気信号が互いに逆相の第 1 および第 2 の電気信号に分岐し、第 1 の光変調器により第 1 の電気信号が光周波数変調信号である第 1 の光信号に変換され、第 1 の光変調器と局発光源に相当する第 2 の光源とビート信号生成部とで構成される第 1 の光ヘテロダイン系において、ビート信号生成部から出力される無変調ビート信号である搬送波成分が周波数変換され、第 1 の光変調器と第 2 の

50

光源（局発光源）と光受信器とで構成される第２の光ヘテロダイン系において、第１の光変調器または第２の光源から出力される光のいずれか一方が、上記の周波数変換された搬送波成分で振幅変調または強度変調される。さらに、第３の光変調器により第２の電気信号が光強度変調信号である第３の光信号に変換されて光受信器に入力され、そこで自乗検波により強度変調 - 直接検波成分（ $IM - DD$ 成分）が生成される。この $IM - DD$ 成分により、第１の光信号に含まれる光強度変調成分（これは直接変調に起因して発生する）に相当する $IM - DD$ 成分が光受信器において相殺される。これにより、光受信器から出力されるビート信号である FM 変調信号の位相雑音を抑圧し、かつ不要成分を低減した品質の良好な周波数変調を実現できる。

【００１７】

10

第６の発明は、第５の発明において、前記光受信器の前記自乗検波特性に基づく光検波によって生成される強度変調 - 直接検波成分のうち前記第１の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第１の $IM - DD$ 成分と、当該生成される強度変調 - 直接検波成分のうち前記第３の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第２の $IM - DD$ 成分とを、互いに逆相かつ同一振幅とする位相・振幅調整手段を更に備えることを特徴とする。

【００１８】

上記第６の発明によれば、第１の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第１の $IM - DD$ 成分と、第３の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第２の $IM - DD$ 成分とが、互いに逆相かつ同一振幅となるように、その位相および振幅が調整される。このため、光受信器から出力される $IM - DD$ 成分がより確実に抑圧され、より高品質な高周波・広帯域 FM 変調信号を生成することができる。

20

【００１９】

第７の発明は、第１の発明において、前記入力電気信号を互いに逆相の第１および第２の電気信号に分岐する分波器と、所定の中心周波数 f_2 の変調光である前記第２の光を第４の光信号として出力する第４の光変調器と、を更に備え、

前記第１の光変調器は、直接変調によって前記第１の電気信号の振幅変化を前記第１の光の光周波数の変化に一意に変換することにより、所定の中心周波数 f_1 の前記第１の光信号を生成し、

30

前記第４の光変調器は、直接変調によって前記第２の電気信号の振幅変化を前記第２の光の光周波数の変化に一意に変換することにより、所定の中心周波数 f_2 の前記第４の光信号を生成し、

前記ビート信号生成部は、

前記第１および第４の光信号を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、前記第１および第４の光信号の光周波数の差に相当する周波数 $f_s = |f_1 - f_2|$ において、変調された電気信号である変調ビート信号を生成する受光素子と、

前記変調ビート信号からその搬送波成分を抽出し、当該搬送波成分を前記無変調ビート信号として出力するフィルタとを含み、

40

前記周波数変換器は、前記無変調ビート信号を所定の周波数 f_x の信号に変換し、変換後の当該信号を前記周波数変換信号として出力し、

前記第２の光変調器は、前記第１の光信号と前記第４の光信号のうち一方を周波数 f_x の前記周波数変換信号で光振幅変調または光強度変調することにより第２の光信号を生成し、

前記光受信器は、前記第１の光信号と前記第４の光信号のうちの他方および前記第２の光信号を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、周波数 $f_L = |f_s - f_x|$ において前記 FM 変調信号を生成することを特徴とする。

【００２０】

上記第７の発明によれば、周波数変調の元信号である入力電気信号が互いに逆相の第１お

50

よび第2の電気信号に分岐し、第1の光変調器での直接変調により第1の電気信号が光周波数変調信号である第1の光信号に変換され、第4の光変調器での直接変調により第2の電気信号が光周波数変調信号である第4の光信号に変換される。そして、第1の光変調器と第4の光変調器とビート信号生成部とで構成される第1の光ヘテロダイン系において、ビート信号生成部から出力される無変調ビート信号である搬送波成分が周波数変換され、第1の光変調器と第4の光変調器と光受信器とで構成される第2の光ヘテロダイン系において、第1の光変調器または第4の光変調器から出力される光のいずれか一方が、上記の周波数変換された搬送波成分で振幅変調または強度変調される。これにより、光受信器から出力されるビート信号であるFM変調信号の位相雑音を抑圧し、雑音特性に優れた周波数変調を実現できる。また、上記のように、第1の光変調器と第4の光変調器とがプッシュプル動作を行うことによって周波数変調信号が生成されるため、直接変調において生じる光強度変調成分に起因する不要成分であるIM-DD成分が相殺される。これにより、不要成分を低減した品質の良好な周波数変調を実現できる。

10

【0021】

第8の発明は、第7の発明において、前記光受信器の前記自乗検波特性に基づく光検波によって生成される強度変調 - 直接検波成分のうち前記第1の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第1のIM-DD成分と、当該生成される強度変調 - 直接検波成分のうち前記第4の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第3のIM-DD成分とを、互いに逆相かつ同一振幅とする位相・振幅調整手段を更に備えることを特徴とする。

20

【0022】

上記第8の発明によれば、第1の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第1のIM-DD成分と、第4の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第3のIM-DD成分とが、互いに逆相かつ同一振幅となるように、その位相および振幅が調整される。このため、光受信器から出力されるIM-DD成分がより確実に抑圧され、より高品質な高周波・広帯域FM変調信号を生成することができる。

【0023】

第9の発明は、第1の発明において、前記第1の光変調器と前記ビート信号生成部との間に挿入され、前記第1の光信号からその光搬送波成分を抽出する光フィルタを更に備え、前記第2の光源は、無変調光を前記第2の光として出力し、前記ビート信号生成部は、前記光フィルタによって抽出された光搬送波成分と前記第2の光とを受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により前記無変調ビート信号を生成する受光素子を含むことを特徴とする。

30

【0024】

上記第9の発明によれば、第1の光変調器により入力電気信号が光周波数変調信号である第1の光信号に変換され、第1の光変調器と局発光源に相当する第2の光源とビート信号生成部とで構成される第1の光ヘテロダイン系において、第1の光変調器とビート信号生成部との間に挿入された光フィルタによって、第1の光信号からその光搬送波成分が抽出され、ビート信号生成部では、この光搬送波成分と第2の光とからフィルタを用いることなく無変調ビート信号が生成され、この無変調ビート信号すなわち搬送波成分を周波数変換することにより周波数変換信号が生成される。そして、第1の光変調器と第2の光源と光受信器とで構成される第2の光ヘテロダイン系において、第1の光変調器または第2の光源から出力される光のいずれか一方が、上記の周波数変換信号（周波数変換された搬送波成分）によって振幅変調または強度変調される。これにより、光受信器から出力されるビート信号であるFM変調信号の位相雑音を抑圧し、雑音特性に優れた周波数変調を実現できる。

40

【0025】

第10の発明は、第1の発明において、前記入力電気信号を互いに逆相の第1および第2の電気信号に分岐する分波器と、

50

所定の中心周波数 f_2 の変調光である前記第 2 の光を第 4 の光信号として出力する第 4 の光変調器と、

前記第 1 の光変調器と前記ビート信号生成部との間に挿入された第 1 の光フィルタと、
前記第 4 の光変調器と前記ビート信号生成部との間に挿入された第 2 の光フィルタと、
を更に備え、

前記第 1 の光変調器は、直接変調によって前記第 1 の電気信号の振幅変化を前記第 1 の光の光周波数の変化に一意に変換することにより、所定の中心周波数 f_1 の前記第 1 の光信号を生成し、

前記第 4 の光変調器は、直接変調によって前記第 2 の電気信号の振幅変化を前記第 2 の光の光周波数の変化に一意に変換することにより、所定の中心周波数 f_2 の前記第 4 の光信号を生成し、

前記第 1 の光フィルタは、前記第 1 の光信号からその光搬送波成分を抽出し、前記第 2 の光フィルタは、前記第 4 の光信号からその光搬送波成分を抽出し、前記ビート信号生成部は、前記第 1 および第 2 の光フィルタによって抽出された両光搬送波成分を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、当該両光搬送波成分の光周波数の差に相当する周波数 $f_s = |f_1 - f_2|$ において前記無変調ビート信号を生成する受光素子を含み、

前記周波数変換器は、前記無変調ビート信号を所定の周波数 f_x の信号に変換し、変換後の当該信号を前記周波数変換信号として出力し、

前記第 2 の光変調器は、前記第 1 の光信号と前記第 4 の光信号のうち一方を周波数 f_x の前記周波数変換信号で光振幅変調または光強度変調することにより第 2 の光信号を生成し

、
前記光受信器は、前記第 1 の光信号と前記第 4 の光信号のうちの他方および前記第 2 の光信号を受け取って、自乗検波特性に基づく光検波により、周波数 $f_L = |f_s - f_x|$ において前記 FM 変調信号を生成することを特徴とする。

【0026】

上記第 10 の発明によれば、周波数変調の元信号である入力電気信号が互いに逆相の第 1 および第 2 の電気信号に分岐し、第 1 の光変調器での直接変調により第 1 の電気信号が光周波数変調信号である第 1 の光信号に変換され、第 4 の光変調器での直接変調により第 2 の電気信号が光周波数変調信号である第 4 の光信号に変換される。そして、第 1 の光変調器と第 4 の光変調器とビート信号生成部とで構成される第 1 の光ヘテロダイン系において、第 1 の光フィルタによって第 1 の光信号からその光搬送波成分が抽出され、第 2 の光フィルタによって第 4 の光信号からその光搬送波成分が抽出され、ビート信号生成部ではこれらの光搬送波成分からフィルタを用いることなく無変調ビート信号が生成される。この無変調ビート信号すなわち搬送波成分を周波数変換することにより周波数変換信号が生成され、第 1 の光変調器と第 4 の光変調器と光受信器とで構成される第 2 の光ヘテロダイン系において、第 1 の光変調器または第 4 の光変調器から出力される光のいずれか一方が、上記の周波数変換信号（周波数変換された搬送波成分）によって振幅変調または強度変調される。これにより、光受信器から出力されるビート信号である FM 変調信号の位相雑音を抑圧し、かつ不要成分を低減した品質の良好な周波数変調を実現できる。

【0027】

第 11 の発明は、第 10 の発明において、

前記光受信器の前記自乗検波特性に基づく光検波によって生成される強度変調 - 直接検波成分のうち前記第 1 の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第 1 の IM-DD 成分と、当該生成される強度変調 - 直接検波成分のうち前記第 4 の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第 3 の IM-DD 成分とを、互いに逆相かつ同一振幅とする位相・振幅調整手段を更に備えることを特徴とする。

【0028】

上記第 11 の発明によれば、上記第 8 の発明と同様、第 1 の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第 1 の IM-DD 成分と、第 4 の光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第 3 の IM-DD 成分とが、互いに逆相かつ同一振幅となるように、その位相および

振幅が調整される。このため、光受信器から出力される $IM - DD$ 成分がより確実に抑圧され、より高品質な高周波・広帯域 FM 変調信号を生成することができる。

【0029】

第12の発明は、第1の発明において、
前記第1の光源から前記ビート信号生成部を介して前記光受信器に至る経路の光および電気伝搬時間と、前記第1の光源から直接に前記光受信器に至る経路の光伝搬時間とを互いに等しくする第1の伝搬時間調整手段と、
前記第2の光源から前記ビート信号生成部を介して前記光受信器に至る経路の光および電気伝搬時間と、前記第2の光源から直接に前記光受信器に至る経路の光伝搬時間とを互いに等しくする第2の伝搬時間調整手段とを更に備えることを特徴とする。

10

【0030】

上記第12の発明によれば、第1の光源から出力されて2つに分岐した光信号のそれぞれが、各構成部を通過し、あるいは光電気変換や電気光変換等の処理を経て、光受信器に到達するまでの伝搬時間が互いに等しくなるように設定され、かつ、第2の光源から出力されて2つに分岐した光のそれぞれが、各構成部を通過し、あるいは光電気変換や電気光変換等の処理を経て、光受信器に到達するまでの伝搬時間を互いに等しくなるように設定される。これにより、光受信器から出力されるビート信号である FM 変調信号の位相雑音をより適切に抑圧し、さらに雑音特性に優れた周波数変調を実現できる。

【0031】

【発明の実施の形態】

20

以下、添付図面を参照しつつ本発明の各実施形態について説明する。

【0032】

(第1の実施形態)

図1および図2(A)～(C)を参照しつつ本発明の第1の実施形態に係る周波数変調装置について以下に説明する。

【0033】

図1は、第1の実施形態に係る周波数変調装置の構成を示すブロック図である。この周波数変調装置は、信号源100と、第1の光変調器102と、局発光源103と、第1の光分岐回路104と、第2の光分岐回路105と、第1の光導波路106と、第2の光導波路107と、第3の光導波路108と、第4の光導波路109と、第1の光受信器110およびフィルタ111を含むビート信号生成部200と、周波数変換器112と、第2の光変調器113と、第2の光受信器114とを備えている。この周波数変調装置は、光周波数の互いに異なる2つの光(第1の光 L_1 および第2の光 L_2)をそれぞれ出力する2つの光源(第1および第2の光源)を用いた光周波数変調および光ヘテロダイン検波により、信号源100から出力される電気信号 S_i を周波数変調信号に変換し、これを FM 変調信号 S_{fm} として出力する。

30

【0034】

次に、図1に示す周波数変調装置の動作を詳細に説明する。第1の光変調器102は、直接変調方式の光変調器であって、通常、光周波数変調効果を有する第1の光源である半導体レーザで構成され、信号源100から出力される電気信号 S_i によってその半導体レーザへの注入電流を振幅変調することにより、中心光周波数 f_1 の光周波数変調信号 L_1 を第1の光として出力する。第1の光変調器102から出力された光信号 L_1 は、第1の光分岐回路104で2つの光信号に分岐し、これらのうち一方の光信号は第2の光導波路107を介してビート信号生成部200における第1の光受信器110に、他方の光信号は第1の光導波路106を介して第2の光受信器114に、それぞれ入力される。局発光源103は、第2の光源に相当し、光周波数 f_2 の無変調光 L_2 を第2の光として出力する。局発光源103から出力された光 L_2 は、第2の光分岐回路105で2つの光に分岐し、これらのうち一方の光は第4の光導波路109を介してビート信号生成部200における第1の光受信器110に、他方の光は第3の光導波路108を介して第2の光変調器113に、それぞれ入力される。

40

50

【 0 0 3 5 】

ビート信号生成部 2 0 0 は、第 1 の光分岐回路 1 0 4 で分岐した第 1 の光である光信号 L 1 と第 2 の光分岐回路 1 0 5 で分岐した第 2 の光 L 2 とを受け取り、下記の動作により、第 1 および第 2 の光 L 1 , L 2 の光周波数の差に相当する周波数 $f_s = |f_1 - f_2|$ を有する無変調の電気信号（以下「無変調ビート信号」という）S b を生成する。すなわち、第 1 の光受信器 1 1 0 は、自乗検波特性を有するフォトダイオード等の受光素子で構成され、第 1 の光変調器 1 0 2 からの光信号 L 1 と局発光源 1 0 3 からの光 L 2 とを受け取って、その自乗検波特性に基づく光ヘテロダイン検波により、それらの光周波数差 $f_s (= |f_1 - f_2|)$ を中心周波数とするビート信号（以下「変調ビート信号」という）S b fm を生成する。この変調ビート信号 S b fm は、第 1 の光変調器 1 0 2 から出力される光周波数変調信号 L 1 をダウンコンバートした F M 変調信号である。図 2 (A) は、この変調ビート信号 S b fm の周波数スペクトルを、信号源 1 0 0 から出力される電気信号 S i が周波数 f_p を中心とする信号と想定した場合について示したものである。この変調ビート信号 S b fm はフィルタ 1 1 1 に入力される。このフィルタ 1 1 1 は、帯域通過フィルタであって、F M 変調信号である上記変調ビート信号 S b fm の搬送波成分（中心周波数 f_s の成分）のみを抽出し、無変調ビート信号 S b として出力する。

10

【 0 0 3 6 】

周波数変換器 1 1 2 は、例えば周波数 f_L の局部発振信号 S L により、フィルタ 1 1 1 から出力される搬送波成分である無変調ビート信号 S b を周波数変換（例えば、ダウンコンバート）し、周波数 $f_x (= |f_s - f_L|)$ の信号を周波数変換信号 S x として出力する。図 2 (B) は、このような周波数変換器 1 1 2 の入力信号である無変調ビート信号 S b および出力信号である周波数変換信号 S x の周波数スペクトルを、局部発振信号 S L の周波数スペクトルと共に示している。

20

【 0 0 3 7 】

第 2 の光変調器 1 1 3 は、第 3 の光導波路 1 0 8 の途上に挿入、配置され、局発光源 1 0 3 から出力される無変調光 L 2 を、周波数変換器 1 1 2 から出力される周波数変換信号 S x によって光学的に変調する。すなわち、第 2 の光変調器 1 1 3 は、光振幅変調または光強度変調によって無変調光 L 2 を光変調信号 L 2x に変換し、これを出力する。

【 0 0 3 8 】

第 2 の光受信器 1 1 4 は、自乗検波特性を有するフォトダイオード等の受光素子で構成され、第 1 の光変調器 1 0 2 からの光信号 L 1 と第 2 の光変調器 1 1 3 からの光信号 L 2x とを受け取って、その自乗検波特性に基づく光ヘテロダイン検波により、周波数 $f_L (= |f_s - f_x|)$ を中心周波数とするビート信号として F M 変調信号 S fm を生成する。このようにして生成された F M 変調信号 S fm は、第 1 の光変調器 1 0 2 から出力される光周波数変調信号 L 1 をダウンコンバートした信号であって、図 2 (C) に示すように位相雑音が抑圧されている。

30

【 0 0 3 9 】

本実施形態における F M 変調信号の位相雑音抑圧効果について、以下に数式を用いて説明する。

第 1 の光変調器 1 0 2 から出力される光周波数変調信号 L 1 の電界成分は、

$$E_1(t) = A_1 [1 + m_1 \cos(2\pi f_p t)]^{1/2} \cos[2\pi f_1 t + F \sin(2\pi f_p t) + \phi_1] \dots (1)$$

40

局発光源 1 0 3 から出力される無変調光 L 2 の電界成分は、

$$E_2(t) = A_2 \cos(2\pi f_2 t + \phi_2) \dots (2)$$

で、それぞれ表される。ここで、 m_1 は、第 1 の光変調器 1 0 2 における光（強度）変調度を表し、 f_p は、信号源 1 0 0 から出力される電気信号 S i（正弦波を想定）の周波数を表し、 f_1 および f_2 は、第 1 の光変調器 1 0 2 と局発光源 1 0 3 から出力される光の光周波数をそれぞれ表し、 ϕ_1 、 ϕ_2 は、第 1 の光変調器 1 0 2 と局発光源 1 0 3 から出力される光が有する位相雑音をそれぞれ表し、 F は、信号源 1 0 0 から出力される電気信号 S i に対応して第 1 の光変調器 1 0 2 において与えられる周波数偏移量を表す。

【 0 0 4 0 】

50

第1の光受信器110がこれら2つの光L1およびL2の合波光を受け取ると、第1の光受信器110で用いられる受光素子の自乗検波特性に基づき、次式で表される光電流がその受光素子に流れる。

$$\begin{aligned} I_1(t) &= R_1 |E_1(t) + E_2(t)|^2 \\ &= R_1 A_1^2 [1 + m_1 \cos(2 f_p t)] \cos^2[2 f_1 t + F \sin(2 f_p t) + \phi_1] \\ &\quad + R_1 A_2^2 \cos^2(2 f_2 t + \phi_2) \\ &\quad + 2 R_1 A_1 A_2 [1 + m_1 \cos(2 f_p t)]^{1/2} \cos[2 f_1 t + F \sin(2 f_p t) + \phi_1] \\ &\quad \times \cos(2 f_2 t + \phi_2) \quad \dots (3) \end{aligned}$$

ここで、R1は、第1の光受信器110で用いられる受光素子の変換効率を表す。式(3)における第1項および第2項に相当する信号成分は、第1の光受信器110で用いられる受光素子の周波数応答制限によって検波されない。なお、第1項に相当する信号成分には、第1の光変調器102からの光信号L1における光強度変調成分が直接検波されることによって生じるIM-DD(強度変調-直接検波)成分も含まれるが、このIM-DD成分は後述のフィルタ111で除去されるので無視してもよい。

【0041】

式(3)における第3項をさらに展開すると、

$$\begin{aligned} I_{c1}(t) &= R_2 A_1 A_2 [1 + m_1 \cos(2 f_p t)]^{1/2} \\ &\quad \times [\cos[2(f_1 + f_2)t + F \sin(2 f_p t) + \phi_1 + \phi_2] \\ &\quad + \cos[2(f_1 - f_2)t + F \sin(2 f_p t) + \phi_1 - \phi_2]] \quad \dots (4) \end{aligned}$$

となる。式(4)における大括弧“[]”内の第1項に相当する信号成分は、第1の光受信器110に用いられる受光素子の周波数応答限界によって検波されず、大括弧“[]”内の第2項に相当する信号成分のみが出力される。この第2項は、信号源100から出力される電気信号Siを元信号とし、搬送波周波数を $f_s = |f_1 - f_2|$ 、周波数偏移量をFとするFM変調信号を表している。この第2項のFM変調信号は、第1の光変調器102から出力される光信号L1が有する位相雑音 ϕ_1 と局発光源103から出力される光L2の位相雑音 ϕ_2 とで決まる位相雑音を有する。

【0042】

フィルタ111は、式(4)で表されるFM変調信号における搬送波成分(中心周波数 f_s の成分)として

$$I_s(t) = \cos[2(f_1 - f_2)t + \phi_1 - \phi_2] \quad \dots (5)$$

で表される信号成分である無変調ビート信号Sbのみを通過させる。

【0043】

周波数変換器112は、周波数 f_L の局発振信号SLを用いて、式(5)で表される無変調ビート信号Sbを周波数変換する。例えば、無変調ビート信号Sbをダウンコンバートすることによって、周波数 $f_x = |f_1 - f_2 - f_L|$ の信号として、

$$\begin{aligned} I_x(t) &= \cos[2(f_1 - f_2 - f_L)t + \phi_1 - \phi_2] \\ &= \cos(2 f_x t + \phi_1 - \phi_2) \quad \dots (6) \end{aligned}$$

で表される信号(周波数変換信号Sx)に変換する。

【0044】

第2の光変調器113は、式(6)で表される周波数変換信号Sxにより、局発光源103から出力される無変調光L2(式(2)参照)を例えば光振幅変調し、電界成分が

$$E_{2x}(t) = A_2 \cos(2 f_x t + \phi_1 - \phi_2) \cos(2 f_2 t + \phi_2) \quad \dots (7)$$

で表される光変調信号L2xを出力する。

【0045】

第2の光受信器114は、第1の光変調器102からの光変調信号L1(式(1)参照)と、第2の光変調器113からの光変調信号L2x(式(7)参照)とを合波し、その自乗検波特性に基づき、

$$\begin{aligned} I_2(t) &= R_2 |E_1(t) + E_{2x}(t)|^2 \\ &= R_2 A_1^2 [1 + m_1 \cos(2 f_p t)] \cos^2[2 f_1 t + F \sin(2 f_p t) + \phi_1] \\ &\quad + R_2 A_2^2 \cos^2(2 f_x t + \phi_1 - \phi_2) \cos^2(2 f_2 t + \phi_2) \end{aligned}$$

10

20

30

40

50

$$+2R_2A_1A_2[1+m_1\cos(2f_pt)]^{1/2}\cos[2f_1t+F\sin(2f_pt)+\varphi_1] \\ \times \cos(2f_xt+\varphi_1-\varphi_2)\cos(2f_2t+\varphi_2) \quad \dots (8)$$

で表される光電流を出力する。ここで、 R_2 は、第2の光受信器114で用いられる受光素子の変換効率を表す。式(8)における第1項および第2項に相当する信号成分は、第2の光受信器114に用いられる受光素子の周波数応答制限によって検波されない。なお、第1項に相当する信号成分には、第1の光変調器102からの光信号L1における光強度変調成分が直接検波されることによって生じるIM-DD成分も含まれるが、このIM-DD成分の周波数帯域がFM変調信号S_{fm}の周波数帯域から離れている場合にはこの成分を無視してもよい。このIM-DD成分の周波数帯域がFM変調信号S_{fm}の周波数帯域と重なる場合には、後述の他の実施形態の構成によりこの成分を抑圧することができる。

10

【0046】

式(8)における第3項をさらに展開すると、

$$I_{c2}(t)=R_2A_1A_2[1+m_1\cos(2f_pt)]^{1/2} \\ \times [\cos(2f_xt+\varphi_1-\varphi_2)\cos[2(f_1+f_2)t+F\sin(2f_pt)+\varphi_1+\varphi_2] \\ + \cos(2f_xt+\varphi_1-\varphi_2)\cos[2(f_1-f_2)t+F\sin(2f_pt)+\varphi_1-\varphi_2]] \\ =(R_2A_1A_2/2)[1+m_1\cos(2f_pt)]^{1/2} \\ \times [\cos[2(f_1+f_2+f_x)t+F\sin(2f_pt)+2\varphi_1] \\ + \cos[2(f_1+f_2-f_x)t+F\sin(2f_pt)+2\varphi_2] \\ + \cos[2(f_1-f_2+f_x)t+F\sin(2f_pt)+2(\varphi_1-\varphi_2)] \\ + \cos[2(f_1-f_2-f_x)t+F\sin(2f_pt)]] \quad \dots (9)$$

20

となる。式(9)における大括弧“[]”内の第1項および第2項に相当する信号成分は、第2の光受信器114に用いられる受光素子の周波数応答限界によって検波されず、大括弧“[]”内の第3項および第4項に相当する信号成分のみがFM変調信号S_{fm}として出力される。このうち第4項は、信号源100から出力される電気信号S_iを元信号とし、搬送波周波数を $f_L = |f_1 - f_2 - f_x|$ 、周波数偏移量をFとするFM変調信号を表している。この第4項のFM変調信号は、第1の光変調器102および局発光源103からそれぞれ出力される光L1、L2の位相雑音 φ_1 および φ_2 に依存せず、位相雑音のない信号である。

【0047】

なお、第2の光変調器113が、式(6)で表される周波数変換信号S_xにより、局発光源103から出力される無変調光L2(式(2)参照)を光強度変調する場合、第2の光変調器113から出力される光変調信号の電界成分は

30

$$E_{2y}(t)=A_2[1+m_2\cos(2f_xt+\varphi_1-\varphi_2)]^{1/2}\cos(2f_2t+\varphi_2)$$

で表される。上記式は次式のように近似することができる。

$$E_{2y}(t)=A_2[1+(m_2/2)\cos(2f_xt+\varphi_1-\varphi_2)]\cos(2f_2t+\varphi_2) \quad \dots (10)$$

ここで、 m_2 は、第2の光変調器113における光(強度)変調度である。式(10)における中括弧“{ }”内の第1項は無変調光成分を表しているので、以下では、その中括弧“{ }”内については第2項のみを考える。

【0048】

第2の光受信器114は、第1の光変調器102からの光変調信号L1(式(1)参照)と、第2の光変調器113からの光変調信号L2_x(式(10)における中括弧“{ }”内の第2項参照)を合波し、その自乗検波特性に基づき、

40

$$I_2(t)=R_2|E_1(t)+E_{2y}(t)|^2 \\ =R_2A_1^2[1+m_1\cos(2f_pt)]\cos^2[2f_1t+F\sin(2f_pt)+\varphi_1] \\ +R_2A_2^2(m_2^2/4)\cos^2(2f_xt+\varphi_1-\varphi_2)\cos^2(2f_2t+\varphi_2) \\ +2R_2A_1A_2[1+m_1\cos(2f_pt)]^{1/2}\cos[2f_1t+F\sin(2f_pt)+\varphi_1] \\ \times (m_2/2)\cos(2f_xt+\varphi_1-\varphi_2)\cos(2f_2t+\varphi_2) \quad \dots (11)$$

で表される光電流を出力する。式(11)における第1項および第2項に相当する信号成分は、第2の光受信器114に用いられる受光素子の周波数応答制限によって検波されない。なお、第1項に相当する信号成分には、第1の光変調器102からの光信号L1にお

50

ける光強度変調成分が直接検波されることによって生じるIM-DD成分も含まれるが、このIM-DD成分の周波数帯域がFM変調信号S_{fm}の周波数帯域から離れている場合にはこの成分を無視してもよい。このIM-DD成分の周波数帯域がFM変調信号S_{fm}の周波数帯域と重なる場合には、後述の他の実施形態の構成によりこの成分を抑圧することができる。

【0049】

式(11)における第3項をさらに展開すると、

$$\begin{aligned} I_{c2}(t) &= (R_2 A_1 A_2 m_2 / 2) [1 + m_1 \cos(2 f_p t)]^{1/2} \\ &\times [\cos(2 f_x t + \phi_1 - \phi_2) \cos[2 (f_1 + f_2) t + F \sin(2 f_p t) + \phi_1 + \phi_2] \\ &+ \cos(2 f_x t + \phi_1 - \phi_2) \cos[2 (f_1 - f_2) t + F \sin(2 f_p t) + \phi_1 - \phi_2]] \\ &= (R_2 A_1 A_2 m_2 / 4) [1 + m_1 \cos(2 f_p t)]^{1/2} \\ &\times [\cos[2 (f_1 + f_2 + f_x) t + F \sin(2 f_p t) + 2 \phi_1] \\ &+ \cos[2 (f_1 + f_2 - f_x) t + F \sin(2 f_p t) + 2 \phi_2] \\ &+ \cos[2 (f_1 - f_2 + f_x) t + F \sin(2 f_p t) + 2(\phi_1 - \phi_2)] \\ &+ \cos[2 (f_1 - f_2 - f_x) t + F \sin(2 f_p t)]] \dots (12) \end{aligned} \quad 10$$

となる。式(12)における大括弧“[]”内の第4項は、式(9)と同様に、信号源100から出力される電気信号S_iを元信号とし、搬送波周波数を $f_L = |f_1 - f_2 - f_x|$ 、周波数偏移量をFとするFM変調信号を表している。この第4項のFM変調信号は、第1の光変調器102および局発光源103からそれぞれ出力される光L₁、L₂の位相雑音 ϕ_1 および ϕ_2 に依存せず、位相雑音のない信号である。 20

【0050】

なお、式(9)と式(12)の比較により明らかなように、第2の光受信器114から出力されるFM変調信号L_{2x}の大きさ(振幅)に関しては、第2の光変調器113において光振幅変調を適用した方が2倍大きく、このFM変調信号を伝送する場合等に、CNR(搬送波対雑音電力比)において有利である。従って、以下では、第2の光変調器113において光振幅変調を適用する場合についてのみ説明する。

【0051】

以上説明したように、第1の実施形態によれば、2つの光源を用いた光ヘテロダイン構成において、光源の位相雑音に依存することなく、位相雑音のない高周波・広帯域FM変調信号を生成することができる。 30

【0052】

(第2の実施形態)

図3および図4(A)~(C)を参照しつつ本発明の第2の実施形態に係る周波数変調装置について以下に説明する。

【0053】

図3は、第2の実施形態に係る周波数変調装置の構成を示すブロック図である。この周波数変調装置は、図1に示した第1の実施形態の構成に加えて、分波器301と第3の光変調器315と第5の光導波路317とを備える。なお、図3において、第1の実施形態における構成要素と同じ構成要素には同一の参照符号が付されている。

【0054】

次に、図3に示す本実施形態の動作を説明する。ただし、本実施形態の構成は、前述の第1の実施形態に準ずるため、相違点のみを以下に説明する。

本実施形態の周波数変調装置では、分波器301は、信号源100から出力された電気信号S_iを、互いに逆相の関係になるように第1および第2の電気信号S_{i1}、S_{i2}に分岐させて出力する。第1の光変調器102は、分波器301から出力された第1の電気信号S_{i1}を、第1の実施形態と同様に、光周波数変調信号L₁に変換し、出力する。第3の光変調器315は、通常、半導体レーザで構成され、分波器301から出力された第2の電気信号S_{i2}を、光強度変調信号L₃に変換し、出力する。この光信号L₃は、第5の光導波路317を介して第2の光受信器114に入力される。

【0055】

第2の光受信器114は、第1の光変調器102からの光信号L1と第2の光変調器113からの光信号L2xとを受け取って、その自乗検波特性に基づく光ヘテロダイン検波より、それらの光信号L1およびL2xの光周波数差を中心周波数とするビート信号としてFM変調信号S_{fm}を生成し、かつ、第3の光変調器315からの光強度変調信号L3を受け取って、その自乗検波特性に基づく直接検波により、その光強度変調信号L3からIM-DD(強度変調-直接検波)成分を生成する。第1の光変調器102において、第1の実施形態で説明したように半導体レーザによる直接変調方式を採用した場合、第1の光変調器102からの光信号L1は、光周波数変調成分と共に光強度変調成分をも含む。そのため、第2の光受信器114は、図4(A)に示すように、第1の光変調器102からの光信号L1と第2の光変調器113からの光信号L2xとを受け取って、光ヘテロダイン検波により、それら2つの光信号のビート信号であるFM変調信号を生成すると同時に、直接検波により、第1の光変調器102からの光信号に含まれる光強度変調成分に相当する第1のIM-DD(強度変調-直接検波)成分S_{imdd1}を生成する。この第1のIM-DD成分S_{imdd1}は、本来必要となるFM変調信号S_{fm}に対する不要成分であり、特に、図4(A)に示すように、第1のIM-DD成分S_{imdd1}の占有周波数帯域がFM変調信号S_{fm}の周波数帯域と重なる場合には、FM変調信号S_{fm}の品質を大きく劣化させる。第2の光受信器114は、第3の光変調器315からの光強度変調信号L3をも受け取って、直接検波により、図4(B)に示すように、その光強度変調信号L3に相当するIM-DD成分、すなわち前記第1のIM-DD成分S_{imdd1}と逆相である第2のIM-DD成分S_{imdd2}を生成する。この第2のIM-DD成分S_{imdd2}で第1のIM-DD成分S_{imdd1}が相殺されることにより、図4(C)に示すように、前記第1のIM-DD成分S_{imdd1}が抑圧される。

【0056】

以上説明したように、第2の実施形態によれば、光信号L1に含まれる光強度変調成分に起因した不要成分であるIM-DD成分の発生を抑え、位相雑音のない高品質な高周波・広帯域FM変調信号S_{fm}を生成することができる。

【0057】

(第3の実施形態)

図5を参照しつつ本発明の第3の実施形態に係る周波数変調装置について以下に説明する。

【0058】

図5は、第3の実施形態に係る周波数変調装置の構成を示すブロック図である。この周波数変調装置は、図1に示した第1の実施形態の構成において、同発光源103に代えて、分波器301と第4の光変調器516とを備える。なお、図5において、第1の実施形態における構成要素と同じ構成要素には同一の参照符号が付されている。

【0059】

次に、図5に示す本実施形態の動作を説明する。

本実施形態の周波数変調装置では、分波器301は、信号源100から出力された電気信号S_iを、互いに逆相の関係になるように第1および第2の電気信号S_{i1}, S_{i2}に分岐させて出力する。第1の光変調器102は、分波器301から出力された第1の電気信号S_{i1}を、第1の実施形態と同様に、光周波数変調信号L1に変換し、出力する。第1の光変調器102から出力された光信号L1は、第1の光分岐回路104で2つの光信号に分岐し、これらのうち一方の光信号は第2の光導波路107を介してビート信号生成部200における第1の光受信器110に、他方の光信号は第1の光導波路106を介して第2の光受信器114に、それぞれ入力される。

【0060】

第4の光変調器516は、直接変調方式の光変調器であって、通常、半導体レーザ等で構成され、分波器301から出力される第2の電気信号S_{i2}を光周波数変調信号L2に変換し、出力する。第4の光変調器516において直接変調方式が採用されているため、第1の光変調器102と同様、出力される光信号L2は、光周波数変調成分と共に光強度変調

成分をも含む。第4の光変調器516から出力された光信号L2は、第2の光分岐回路105で2つの光信号に分岐し、これらのうち一方の光信号は第4の光導波路109を介してビート信号生成部200における第1の光受信器110に、他方の光信号は第3の光導波路108を介して第2の光変調器113に、それぞれ入力される。

【0061】

ビート信号生成部200は、第1の光分岐回路104で分岐した光信号L1と第2の光分岐回路105で分岐した光信号L2とを受け取り、下記の動作により、第1および第2の光信号L1, L2の光周波数の差に相当する周波数 $f_s = |f_1 - f_2|$ を有する無変調の電気信号Sbを生成する。すなわち、第1の光受信器110は、自乗検波特性を有するフォトダイオード等の受光素子で構成され、第1の光変調器102からの光信号L1と第4の光変調器516からの光信号L2とを受け取って、その自乗検波特性に基づく光ヘテロダイン検波により、それらの光周波数差 $f_s (= |f_1 - f_2|)$ を中心周波数とする変調ビート信号Sb_{fm}を生成する。この変調ビート信号Sb_{fm}は、第1の光変調器102から出力される光周波数変調信号L1をダウンコンバートしたFM変調信号である。フィルタ111は、この変調ビート信号Sb_{fm}の搬送波成分(中心周波数 f_s の成分)のみを抽出し、無変調ビート信号Sbとして出力する。

10

【0062】

周波数変換器112は、この無変調ビート信号Sbを周波数変換(例えば、ダウンコンバート)し、周波数 $f_x (= |f_s - f_L|)$ の信号である周波数変換信号Sxを出力する。

20

【0063】

第2の光変調器113は、第3の光導波路108の途上に挿入、配置され、第4の光変調器516から出力される光信号L2を、周波数変換器112から出力される周波数変換信号Sxによって光学的に変調する。すなわち、第2の光変調器113は、光振幅変調または光強度変調によって光信号L2を光変調信号L2xに変換し、これを出力する。

【0064】

第2の光受信器114は、第1の光変調器102からの光信号L1と第2の光変調器113からの光信号L2xとを受け取って、その自乗検波特性に基づく光ヘテロダイン検波により、周波数 $f_L (= |f_s - f_x|)$ を中心周波数とするビート信号として、位相雑音の抑圧されたFM変調信号S_{fm}を生成する(図2(C)参照)。また、第2の光受信器114は、その自乗検波特性に基づく直接検波により、第1の光変調器102からの光信号L1に含まれる光強度変調成分に相当する第1のIM-DD成分を生成すると共に、第4の光変調器516からの光信号L2に含まれる光強度変調成分をも受け取って、その自乗検波特性に基づく直接検波により、前記第1のIM-DD成分と逆相である第3のIM-DD成分を生成する。この第3のIM-DD成分によって第1のIM-DD成分が相殺され、これによりIM-DD成分の抑圧されたFM変調信号S_{fm}が得られる。

30

【0065】

以上説明したように、第3の実施形態によれば、光信号L1に含まれる光強度変調成分に起因した不要成分であるIM-DD成分の発生を抑え、位相雑音のない高品質な高周波・広帯域FM変調信号S_{fm}を生成することができる。

40

【0066】

(第4の実施形態)

図6を参照しつつ本発明の第4の実施形態に係る周波数変調装置について以下に説明する。

【0067】

図6は、第4の実施形態に係る周波数変調装置の構成を示すブロック図である。この周波数変調装置は、図1に示した第1の実施形態の構成において、電気的なフィルタ111に代えて光フィルタ617を備える。なお、図6において、第1の実施形態における構成要素と同じ構成要素には同一の参照符号が付されている。

【0068】

50

次に、図 6 に示す本実施形態の動作を説明する。ただし、本実施形態の構成は、前述の第 1 の実施形態に準ずるため、相違点のみを以下に説明する。

本実施形態の周波数変調装置では、光フィルタ 6 1 7 は、第 1 の光変調器 1 0 2 からの光信号 L 1 のうち第 1 の光分岐回路 1 0 4 で分岐して第 1 の光受信器 1 1 0 へ向かう光信号 L 1 の光搬送波成分 L 1cのみを通過させる。第 1 の光受信器 1 1 0 は、その光フィルタ 6 1 7 を通過した光搬送波成分 L 1cと局発光源 1 0 3 からの光 L 2 とを受け取って、その自乗検波特性に基づく光ヘテロダイン検波により、それらの光周波数差 f_s に相当する周波数を有する無変調ビート信号 S_b を生成する。周波数変換器 1 1 2 は、この無変調ビート信号 S_b を周波数変換し、周波数 f_x の周波数変換信号 S_x を出力する。第 2 の光変調器 1 1 3 は、局発光源 1 0 3 から出力される光 L 2 に対し、前記周波数変換器 1 1 2 から出力される周波数変換信号 S_x を用いて光変調（光振幅変調または光強度変調）を施し、光変調信号 L 2xを出力する。第 2 の光受信器 1 1 4 は、第 1 の光変調器 1 0 2 からの光信号 L 1 と第 2 の光変調器 1 1 3 からの光信号 L 2xとを受け取って、その自乗検波特性に基づく光ヘテロダイン検波により、周波数 $f_L (= |f_s - f_x|)$ を中心周波数とするビート信号として、位相雑音の抑圧された F M 変調信号 S_{fm} を生成する。

【 0 0 6 9 】

以上説明したように、第 4 の実施形態によれば、2 つの光源を用いた光ヘテロダイン構成において、光源の位相雑音に依存することなく、位相雑音のない高周波・広帯域 F M 変調信号を生成することができる。

【 0 0 7 0 】

なお、上述の第 3 の実施形態のように局発光源 1 0 3 に代えて第 4 の光変調器 5 1 6 を備える構成（図 5 参照）においては、図 7 に示すように、上記第 4 の実施形態と同様に第 2 の光導波路 1 0 7 の途上に第 1 の光フィルタ 6 1 7 を備えると共に、第 4 の光導波路 1 0 9 の途上にも第 2 の光フィルタ 6 2 7 を備え、第 4 の光変調器 5 1 6 から出力されて第 2 の光分岐回路 1 0 5 で分岐し第 1 の光受信器 1 1 0 に向かう光信号 L 2 のうち、第 2 の光フィルタ 6 2 7 がその光搬送波成分のみを通過させるようにしてもよい。このような構成によれば、第 3 の実施形態と同様、第 1 の光受信器 1 1 0 からは無変調ビート信号 S_b が出力されるため、電気的なフィルタ 1 1 1 を用いることなく、位相雑音のない高周波・広帯域 F M 変調信号を生成することができる。

【 0 0 7 1 】

（第 5 の実施形態）

図 8 を参照しつつ本発明の第 5 の実施形態に係る周波数変調装置について以下に説明する。

【 0 0 7 2 】

図 8 は、第 5 の実施形態に係る周波数変調装置の構成を示すブロック図である。この周波数変調装置は、図 1 に示した第 1 の実施形態の構成において、直接変調方式の第 1 の光変調器 1 0 2 に代えて、第 1 の光 L 1 として光周波数 f_1 の無変調光を出力する光源 1 0 1 と外部変調方式により周波数変調を行う光変調器（以下「外部光変調器」という）1 0 2 e とを備え、フィルタ 1 1 1 が削除されている。図 8 に示すように、光源 1 0 1 から出力された無変調光 L 1 は第 1 の光分岐回路 1 0 4 に入力される。また、外部光変調器 1 0 2 e は、第 1 の光導波路 1 0 6 の途上に挿入、配置され、信号源 1 0 0 から元信号としての電気信号 S_i を受け取る。なお、図 8 において、第 1 の実施形態における構成要素と同じ構成要素には同一の参照符号が付されている。

【 0 0 7 3 】

次に、図 8 に示す本実施形態の動作を説明する。

本実施形態の周波数変調装置では、光源 1 0 1 から出力された無変調光 L 1 は第 1 の光分岐回路 1 0 4 で 2 つの光に分岐し、それらの 2 つの光のうち一方の光は外部光変調器 1 0 2 e に入力され、他方の光は第 1 の光受信器 1 1 0 に入力される。

【 0 0 7 4 】

外部光変調器 1 0 2 e は、光源 1 0 1 からの無変調光 L 1 を信号源 1 0 0 からの電気信号

10

20

30

40

50

S_i によって変調することにより、中心光周波数 f_1 の光周波数変調信号 L_{1m} を生成する。この光信号 L_{1m} は第2の光受信器 114 に入力される。第1の光受信器 110 は、光源 101 からの無変調光 L_1 と局発光源 103 からの無変調光 L_2 とを受け取って、その自乗検波特性に基づく光ヘテロダイン検波により、それらの光周波数差 $f_s = |f_1 - f_2|$ に相当する周波数を有する無変調ビート信号 S_b を生成する。周波数変換器 112 は、この無変調ビート信号 S_b を周波数変換し、周波数 f_x の周波数変換信号 S_x を出力する。第2の光変調器 113 は、局発光源 103 からの光 L_2 に対し、前記周波数変換器 112 から出力される周波数変換信号 S_x を用いて光変調（光振幅変調または光強度変調）を施し、光変調信号 L_{2x} を出力する。この光変調信号 L_{2x} も第2の光受信器 114 に入力される。第2の光受信器 114 は、第1の光変調器 102 からの光信号 L_1 と第2の光変調器 113 からの光信号 L_{2x} とを受け取って、その自乗検波特性に基づく光ヘテロダイン検波により、周波数 $f_L (= |f_s - f_x|)$ を中心周波数とするビート信号として、位相雑音の抑圧された FM 変調信号 S_{fm} を生成する。

【0075】

以上のように、第5の実施形態によれば、第4の実施形態と同様、第1の光受信器 110 からは無変調ビート信号 S_b が出力されるため、電気的なフィルタ 111 を用いることなく、位相雑音のない高周波・広帯域 FM 変調信号を生成することができる。しかも、第5の実施形態では、光源 101 からの無変調光 L_1 が第1の光受信器 110 に入力されるため、第4の実施形態とは異なり、光フィルタも不要である。

【0076】

（第1の変形例）

上記の各実施形態において、第2の光変調器 113 は、第3の光導波路 108 の途上に挿入され、局発光源 103 から出力される無変調光 L_2 または第4の光変調器 516 から出力される光信号 L_2 を周波数変換信号 S_x によって光学的に変調しているが、これに代えて、第2の光変調器 113 を第1の光導波路 106 の途上に挿入することにより、第1の光変調器 102 から出力される光信号 L_1 を周波数変換信号 S_x によって光学的に変調するようにしてもよい。図9は、このような周波数変調装置の構成の一例を示すブロック図である。この周波数変調装置は、図1に示した第1の実施形態の変形例（以下「第1の変形例」という）であって、第1の実施形態において第3の光導波路 108 の途上に挿入されていた第2の光変調器 113 を、第1の光導波路 106 の途上に備えている。

【0077】

第1の実施形態等では、第2の光変調器 113 は、周波数 $f_x (= |f_s - f_L|)$ の周波数変換信号 S_x で光周波数 f_2 の無変調光 L_2 を光振幅変調または光強度変調することにより、図10(A)に示すような光周波数スペクトルを有する光変調信号 L_{2x} を生成する（ただし $f_1 > f_2$ とする）。

【0078】

これに対し、第1の変形例の周波数変調装置では、第2の光変調器 113 は、周波数 $f_x (= |f_s - f_L|)$ の周波数変換信号 S_x で中心周波数 f_1 の光信号 L_1 を光振幅変調または光強度変調することにより、図10(B)に示すような光周波数スペクトルを有する光変調信号 L_{1x} を生成する（同様に $f_1 > f_2$ とする）。第1の変形例における第2の光受信器 114 は、この光変調信号 L_{1x} と局発光源 103 から出力される周波数 f_2 の無変調光 L_2 とを受け取って、その自乗検波特性に基づく光ヘテロダイン検波により、周波数 $f_L (= |f_s - f_x|)$ を中心周波数とするビート信号として FM 変調信号 S_{fm} を生成する。すなわち、第1の実施形態において得られる FM 変調信号 S_{fm} と実質的に同一の FM 変調信号が生成される。したがって、第1の変形例の構成によっても、第1の実施形態の場合等と同様、光源の位相雑音に依存することなく、位相雑音のない高周波・広帯域 FM 変調信号を生成することができる。

【0079】

（第2の変形例）

以上説明した各実施形態において、より望ましくは、第1の光変調器 102（正確にはこ

10

20

30

40

50

の光変調器 102 を構成する半導体レーザ等の光源) から出力された第 1 の光 L1 が第 1 の光導波路 106 を介して直接に第 2 の光受信器 114 に到達するまでの伝搬時間と、その光 L1 が第 2 の光導波路 107、第 1 の光受信器 110 および第 2 の光変調器 113 等を介して第 2 の光受信器 114 に到達するまでの伝搬時間とが互いに等しく、かつ、局発光源 103 または第 4 の光変調器 516 (正確にはこの光変調器 516 を構成する光源) から出力された第 2 の光 L2 が第 3 の光導波路 108 および第 2 の光変調器 113 を介して第 2 の光受信器 114 に到達するまでの伝搬時間と、その光 L2 が第 4 の光導波路 109、第 1 の光受信器 110 および第 2 の光変調器 113 等を介して第 2 の光受信器 114 に到達するまでの伝搬時間とが、互いに等しくなるように設定する。

【0080】

例えば、上記第 1 および第 2 の光 L1, L2 の伝搬経路を構成する光導波路等の光学的経路または電氣的経路に 1 つまたは複数の光学的または電氣的な遅延回路を伝搬時間の調整手段として挿入することにより、このような設定を実現することができる。この伝搬時間の調整手段としては、コストなどの面で、光学的な調整手段よりも電氣的な調整手段の方が好ましい。図 11 は、図 1 に示した第 1 の実施形態の変形例 (以下「第 2 の変形例」という) の構成を示すブロック図であって、電氣的な遅延回路で構成される遅延調整器 710 が上記調整手段として周波数変換器 112 と第 2 の光変調器 113 との間に挿入された周波数変調装置の構成を示している。なお、遅延調整器 710 の挿入位置は、上記位置に限定されるものではなく、周波数変換器 112 と第 2 の光変調器 113 との間に代えて、例えば、フィルタ 111 と周波数変換器 112 との間、または、第 1 の光受信器 11 とフ

【0081】

このような伝搬時間の調整手段によって上記の設定を実現することにより、第 2 の光受信器 114 から出力される FM 変調信号 S_{fm} の位相雑音をより確実に抑圧し、さらに高品質な高周波・広帯域 FM 変調信号を生成することができる。

【0082】

(第 3 および第 4 の変形例)

上記の第 2 の実施形態および第 3 の実施形態において、より望ましくは、第 2 の光受信器 114 において生成される第 1 の IM-DD 成分と第 2 の IM-DD 成分とが、あるいは第 1 の IM-DD 成分と第 3 の IM-DD 成分とが、互いに逆相でかつ振幅が等しくなるように設定する。より具体的には、それらの IM-DD 成分の位相を調整すべく、分波器 301 で分岐した一方の信号である第 1 の電気信号 S_{i1} が、第 1 の光変調器 102 により光信号 L1 に変換され、第 1 の光導波路 106 を介して第 2 の光受信器 114 に到達するまでの伝搬時間と、分波器 301 で分岐した他方の信号である第 2 の電気信号 S_{i2} が、第 3 の光変調器 315 または第 4 の光変調器 516 によって光信号 L3 または L2 に変換され、第 5 の光導波路 317 または第 3 の光導波路 108 を介して第 2 の光受信器 114 に到達するまでの伝搬時間とが、互いに等しくなるように設定する。また、第 2 の光受信器 114 が受け取る光信号において第 1 の IM-DD 成分と第 2 の IM-DD 成分にそれぞれ対応する光強度変調成分の振幅が互いに等しく、または、第 1 の IM-DD 成分と第 3 の IM-DD 成分にそれぞれ対応する光強度変調成分の振幅が互いに等しくなるように設定する。

【0083】

例えば、上記の信号の伝搬経路を構成する電氣的経路または光学的経路 (光導波路) に、1 つまたは複数の電氣的または光学的な遅延回路および可変利得増幅器 (または減衰器) などを信号の位相および振幅の調整手段として挿入することにより、このような設定を実現することができる。このような位相および振幅の調整手段としては、コストなどの面で、光学的な調整手段よりも電氣的な調整手段の方が好ましい。図 12 は、図 3 に示した第 2 の実施形態の変形例 (以下「第 3 の変形例」という) の構成を示すブロック図であって、電氣的な遅延回路と可変利得増幅器で構成される遅延・振幅調整器 720 が上記調整手段として分波器 301 と第 3 の光変調器 315 との間に挿入された周波数変調装置の構成

10

20

30

40

50

を示している。また、図 13 は、図 5 に示した第 3 の実施形態の変形例（以下「第 4 の変形例」という）の構成を示すブロック図であって、上記の調整手段として同様の構成の遅延・振幅調整器 730 が分波器 301 と第 4 の光変調器 516 との間に挿入された周波数変調装置の構成を示している。なお、遅延・振幅調整器 720、730 の挿入位置は、上記位置に限定されるものではなく、例えば、分波器 301 と第 1 の光変調器 102 との間に挿入してもよい。

【0084】

このような位相および振幅の調整手段によって上記の設定を実現することにより、第 2 の光受信器 114 から出力される IM - DD 成分がより確実に抑圧され、さらに高品質な高周波・広帯域 FM 変調信号を生成することができる。

10

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の第 1 の実施形態に係る周波数変調装置の構成を示すブロック図。

【図 2】第 1 の実施形態に係る周波数変調装置における第 1 の光受信器からの出力信号の周波数スペクトルを示す模式図（A）、第 1 の実施形態に係る周波数変調装置における周波数変換器の入出力信号の周波数スペクトルを示す模式図（B）、および、第 1 の実施形態に係る周波数変調装置における第 2 の光受信器からの出力信号の周波数スペクトルを示す模式図（C）。

【図 3】本発明の第 2 の実施形態に係る周波数変調装置の構成を示すブロック図。

【図 4】第 2 の実施形態に係る周波数変調装置において第 1 および第 2 の光変調器から出力され第 2 の光受信器に入力される光信号に対応する検波後の信号の周波数スペクトルを示す模式図（A）、第 2 の実施形態に係る周波数変調装置において第 3 の光変調器から出力され第 2 の光受信器に入力される光信号に対応する検波後の信号の周波数スペクトルを示す模式図（B）、および、第 2 の実施形態に係る周波数変調装置における第 2 の光受信器からの出力信号の周波数スペクトルを示す模式図（C）。

20

【図 5】本発明の第 3 の実施形態に係る周波数変調装置の構成を示すブロック図。

【図 6】本発明の第 4 の実施形態に係る周波数変調装置の構成を示すブロック図。

【図 7】第 4 の実施形態に係る周波数変調装置の他の構成を示すブロック図。

【図 8】本発明の第 5 の実施形態に係る周波数変調装置の構成を示すブロック図。

【図 9】第 1 の実施形態の変形例である第 1 の変形例に係る周波数変調装置の構成を示すブロック図。

30

【図 10】第 1、第 2、第 4 および第 5 の各実施形態に係る周波数変調装置において第 2 の光受信器に入力される光信号の光周波数スペクトルを示す模式図（A）、および、第 1 の変形例に係る周波数変調装置において第 2 の光受信器に入力される光信号の光周波数スペクトルを示す模式図（B）。

【図 11】第 1 の実施形態の他の変形例である第 2 の変形例に係る周波数変調装置の構成を示すブロック図。

【図 12】第 2 の実施形態の変形例である第 3 の変形例に係る周波数変調装置の構成を示すブロック図。

【図 13】第 3 の実施形態の変形例である第 4 の変形例に係る周波数変調装置の構成を示すブロック図。

40

【図 14】従来の周波数変調装置の構成を示すブロック図。

【図 15】従来の周波数変調装置における光受信器に入力される光信号の光周波数スペクトルを示す模式図（A）、および、従来の周波数変調装置における光受信器からの出力信号の周波数スペクトルを示す模式図（B）。

【符号の説明】

100 ... 信号源

102 ... 第 1 の光変調器

102e ... 外部光変調器

103 ... 局発光源

104 ... 第 1 の光分岐回路

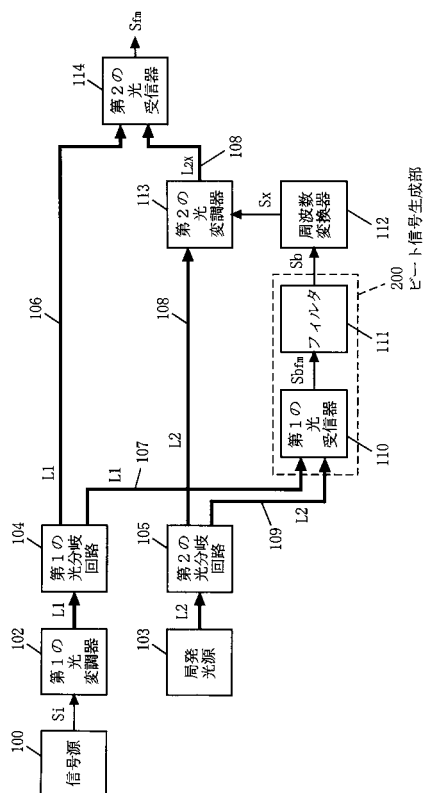
50

- 1 0 5 ... 第 2 の 光 分 岐 回 路
 1 0 6 ... 第 1 の 光 導 波 路
 1 0 7 ... 第 2 の 光 導 波 路
 1 0 8 ... 第 3 の 光 導 波 路
 1 0 9 ... 第 4 の 光 導 波 路
 1 1 0 ... 第 1 の 光 受 信 器
 1 1 1 ... フィルタ
 1 1 2 ... 周 波 数 変 換 器
 1 1 3 ... 第 2 の 光 変 調 器
 1 1 4 ... 第 2 の 光 受 信 器
 2 0 0 ... ビート 信号 生 成 部
 3 0 1 ... 分 波 器
 3 1 5 ... 第 3 の 光 変 調 器
 5 1 6 ... 第 4 の 光 変 調 器
 6 1 7 , 6 2 7 ... 光 フィルタ
 7 1 0 ... 遅 延 調 整 器
 7 2 0 , 7 3 0 ... 遅 延 ・ 振 幅 調 整 器
 S i ... (入 力) 電 気 信 号
 S b f m ... 変 調 ビート 信 号
 S b ... 無 変 調 ビート 信 号
 S x ... 周 波 数 変 換 信 号
 S f m ... F M 変 調 信 号 (周 波 数 変 調 信 号)

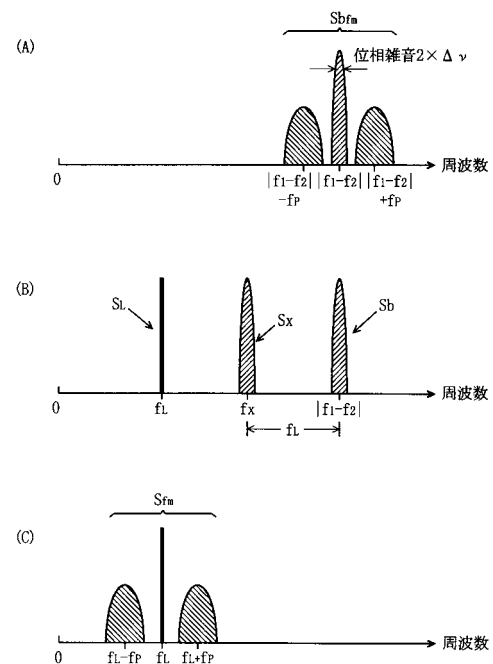
10

20

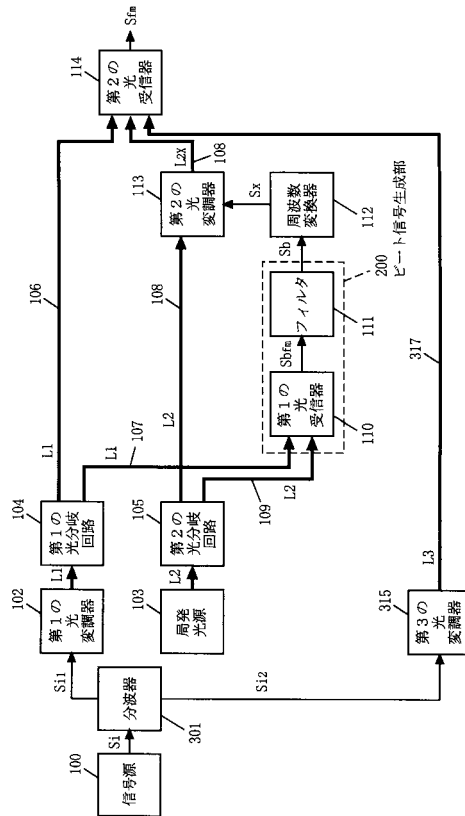
【 図 1 】



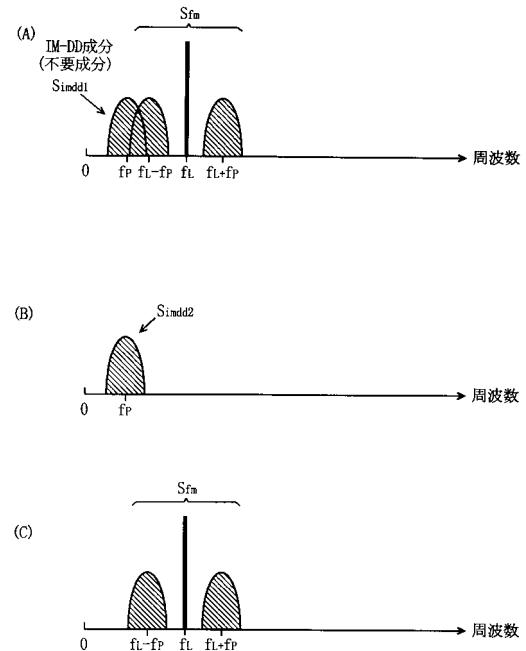
【 図 2 】



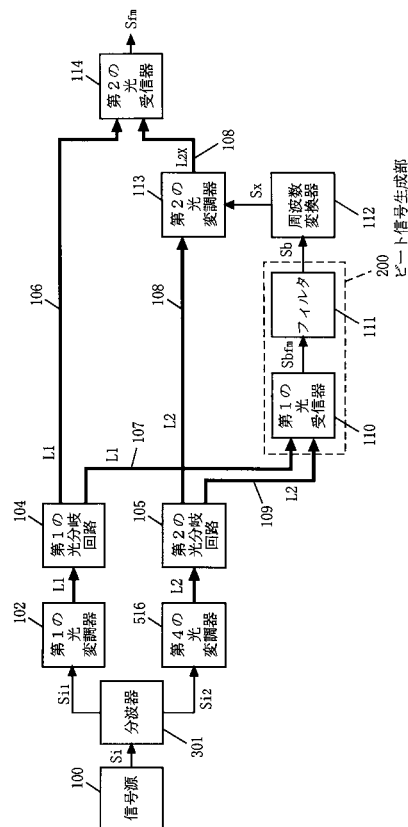
【 図 3 】



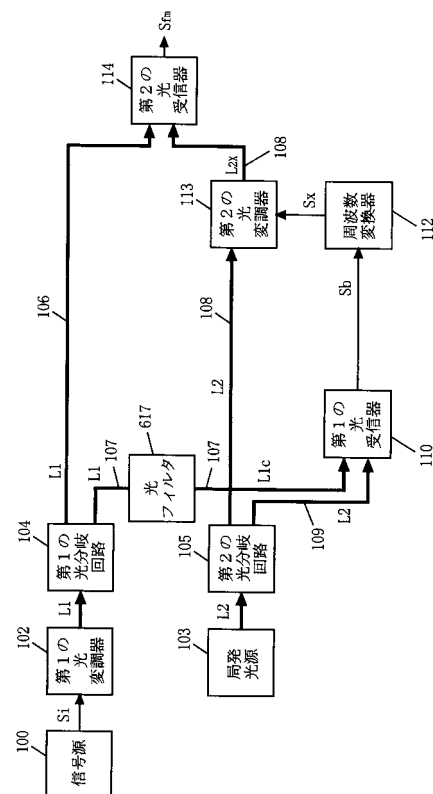
【 図 4 】



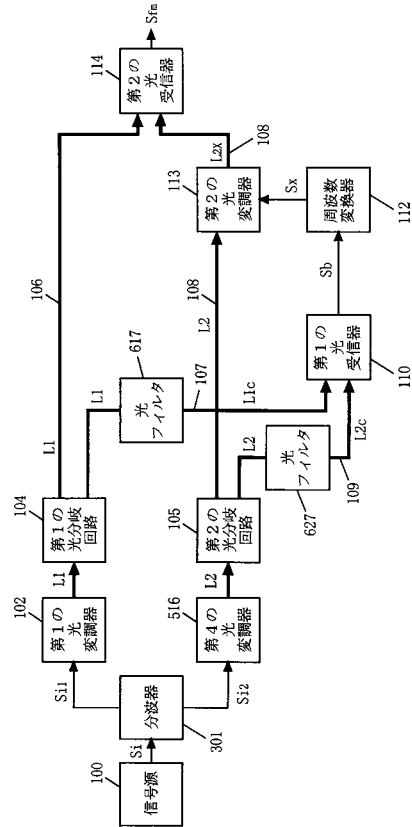
【 図 5 】



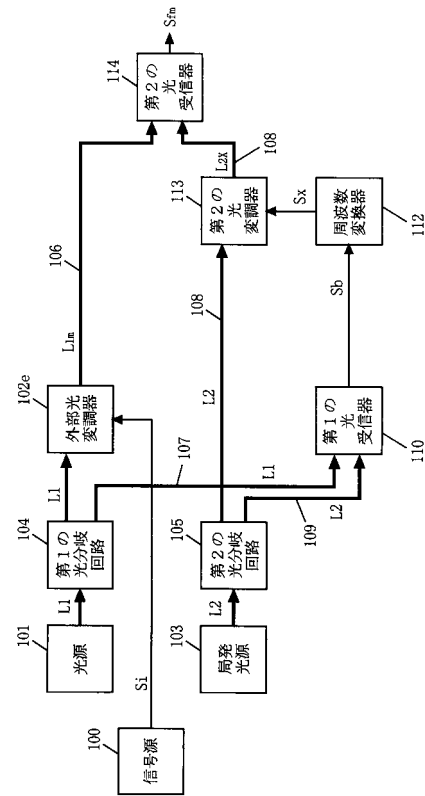
【 図 6 】



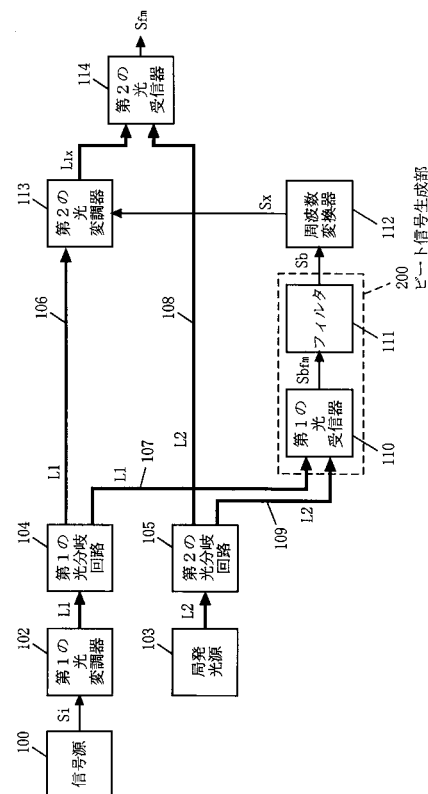
【 図 7 】



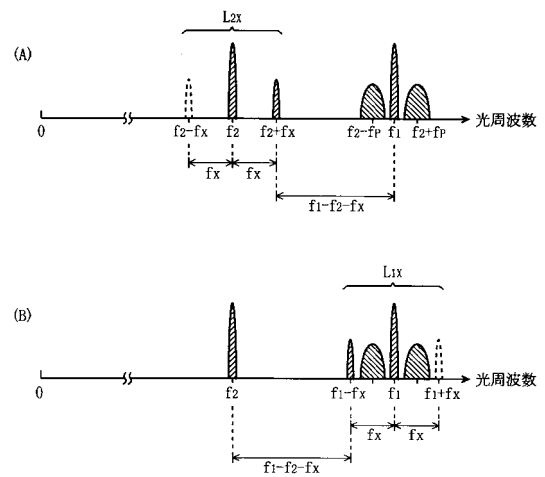
【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 1 0 】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I

H 0 4 B 10/18 (2006.01)

G 0 2 F 2/00 (2006.01)

(56)参考文献 特開平 0 6 - 3 0 3 1 9 5 (J P , A)
特開平 0 8 - 2 7 4 7 1 4 (J P , A)
特開平 1 0 - 1 9 0 5 8 6 (J P , A)
特開平 1 0 - 3 2 2 2 8 4 (J P , A)
特開平 9 - 3 2 6 7 6 9 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

H04B 10/00-10/28

H04J 14/00-14/08

G02F 2/00