



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110011174 B

(45)授权公告日 2020.07.03

(21)申请号 201910278491.9

H01S 3/13(2006.01)

(22)申请日 2019.04.09

H04B 10/54(2013.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 110011174 A

(56)对比文件

CN 101694998 A,2010.04.14

CN 108768539 A,2018.11.06

(43)申请公布日 2019.07.12

CN 201008144 Y,2008.01.16

(73)专利权人 南京航空航天大学

CN 1859004 A,2006.11.08

地址 210000 江苏省南京市江宁区将军大道29号

CN 104333378 A,2015.02.04

审查员 关玉巧

(72)发明人 潘时龙 刘鸿飞 刘世锋 吕凯林 康晓晨 朱楠

(74)专利代理机构 北京德崇智捷知识产权代理有限公司 11467

代理人 杨楠

(51)Int.Cl.

H01S 3/098(2006.01)

权利要求书2页 说明书7页 附图1页

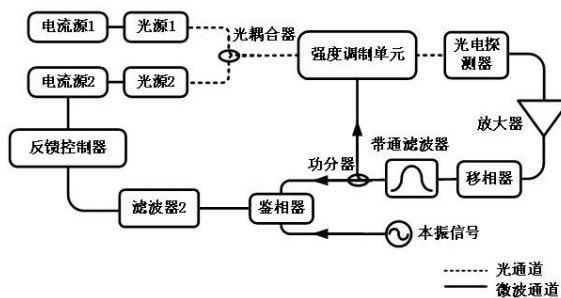
(54)发明名称

基于微波光子分频的光学锁相方法及装置

(57)摘要

本发明公开了一种基于微波光子分频的光学锁相方法。将待锁相的两个单色光源所输出光信号的耦合信号输入一个光电振荡环路,光电振荡环路中微波滤波器对频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 的微波信号振荡模式为带通, ω_0 为两个单色光源的输出频率差;令频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 的微波信号的振荡模式在光电振荡环路中形成正反馈振荡,从而获得稳定的频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 微波信号;对光电振荡环路输出

相器的要求,从而实现高频稳定微波信号输出。



的稳定的频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 微波信号与本振微波信号进行鉴相,并利用滤除高频分量后的鉴相结果对至少一个所述单色光源的相位进行反馈控制,从而实现所述两个单色光源的相位锁定。本发明还公开了一种基于微波光子分频的光学锁相装置。本发明可克服锁定相位抖动的问题并降低对鉴

CN 110011174 B

1. 一种基于微波光子分频的光学锁相方法,其特征在于,将待锁相的两个单色光源所输出光信号的耦合信号输入一个由强度调制单元、微波放大器、移相器、微波滤波器、功分器所组成的光电振荡环路,所述微波滤波器对频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 的微波信号振荡模式为带通, ω_0 为所述两个单色光源的输出频率差, n 为正整数;令频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 的微波信号的振荡模式在所述光电振荡环路中形成正反馈振荡,从而获得稳定的频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 微波信号;对所述光电振荡环路输出的稳定的频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 微波信号与本振微波信号进行鉴相,并利用滤除高频分量后的鉴相结果对至少一个所述单色光源的相位进行反馈控制,从而实现所述两个单色光源的相位锁定。

2. 如权利要求1所述光学锁相方法,其特征在于,令所述光电振荡环路满足以下稳态条件,以使得 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 分频的振荡模式在所述光电振荡环路中形成正反馈振荡:

$$\begin{cases} V_1 = \alpha G E_1 E_2 \sin^2\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_1^2(m) \\ \theta_1 = \frac{\varphi(i_1(t)) - \varphi(i_2(t))}{4n-1} \\ m = \frac{\pi V_1}{V_\pi} \\ \omega_0 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{4n-1} \end{cases}$$

α 为光电振荡环路的系统衰减, G 为微波放大器增益, E_1 、 E_2 、 $\varphi(i_1(t))$ 、 $\varphi(i_2(t))$ 、 ω_1 、 ω_2 分别为所述两个单色光源输出光信号的幅度、相位和频率, V_1 、 θ_1 分别为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 分频的振荡模式的幅度、相位, m 为强度调制单元的调制系数, $J_1(m)$ 为第一阶贝塞尔函数, V_π 为强度调制单元的半波电压, V_B 为强度调制单元的直流偏置电压。

3. 如权利要求1或2所述光学锁相方法,其特征在于,所述强度调制单元为工作在最小传输点的推挽式马赫-曾德尔调制器。

4. 一种基于微波光子分频的光学锁相装置,其特征在于,该装置包括:

光耦合器,用于对待锁相的两个单色光源所输出光信号进行耦合;

光电振荡环路,由强度调制单元、微波放大器、移相器、微波滤波器、功分器所组成,强度调制单元的光输入端与所述光耦合器的输出端连接,所述微波滤波器对频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 的微波信号振荡模式为带通, ω_0 为所述两个单色光源的输出频率差, n 为正整数;鉴相器,用于对所述光电振荡环路输出的稳定的频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 微波信号与本振微波信号进行鉴相;

滤波器,用于滤除鉴相器输出信号中的高频分量;

反馈控制器,用于利用滤除高频分量后的鉴相结果对至少一个所述单色光源的相位进行反馈控制,从而实现所述两个单色光源的相位锁定。

5.如权利要求4所述光学锁相装置,其特征在于,所述光电振荡环路满足以下稳态条件,以使得 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 分频的振荡模式在所述光电振荡环路中形成正反馈振荡:

$$\begin{cases} V_1 = \alpha G E_1 E_2 \sin^2\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_1^2(m) \\ \theta_1 = \frac{\varphi(i_1(t)) - \varphi(i_2(t))}{4n-1} \\ m = \frac{\pi V_1}{V_\pi} \\ \omega_0 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{4n-1} \end{cases}$$

α 为光电振荡环路的系统衰减, G 为微波放大器增益, E_1 、 E_2 、 $\varphi(i_1(t))$ 、 $\varphi(i_2(t))$ 、 ω_1 、 ω_2 分别为所述两个单色光源输出光信号的幅度、相位和频率, V_1 、 θ_1 分别为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 分频的振荡模式的幅度、相位, m 为强度调制单元的调制系数, $J_1(m)$ 为第一阶贝塞尔函数, V_π 为强度调制单元的半波电压, V_B 为强度调制单元的直流偏置电压。

6.如权利要求4或5所述光学锁相装置,其特征在于,所述强度调制单元为工作在最小传输点的推挽式马赫-曾德尔调制器。

基于微波光子分频的光学锁相方法及装置

技术领域

[0001] 本发明涉及一种光学锁相方法,尤其涉及一种基于微波光子分频的光学锁相方法及装置。

背景技术

[0002] 光通信就是微波和光电子相结合,早期电话电报无线通讯、信号的产生、传播和接收,都是使用的微波器件。一开始使用低频电磁波,因为频率范围小,传输的信道容量少。解决的办法是增加传输信号的频率,频率越高,频谱资源就多。但高频信号在空中传播损耗大,也容易被障碍物遮挡。如果用有线传播,电缆的损耗大,远距离传输是个问题。光纤通讯的出现很好的解决了这些问题。光纤的传输损耗极低,是远距离传送信号的极佳载体。光波的频率范围远超过微波,可以同时传送很多个不同的信道。正因为光传输的这些优越性,光纤通讯已经成为当今信息传播的骨干。

[0003] 传统的微波毫米波主要是由微电子元件产生。其局限性有以下几点:第一,到高频例如100GHz以上,传统的微电子元件可产生的功率越来越小,到更高频的THz信号,他们就无能为力了。第二,为了降低相位噪声和提高频率稳定性,需要将原器件置于极低温环境。第三,难以实现大范围内的调频变频。

[0004] 利用双激光器产生高频微波信号的方法有两种,一种是通过两个不同频率激光信号的差频,使用高频的光电探测器转换产生微波信号,此方法的优点是结构简单,可以产生极高频毫米波乃至THz频率的信号,而且通过调节激光器的频率可以进行较大范围的快速的变频和扫频。但是两个不相干的激光信号所产生的差频信号的线宽或者说相位噪声比较大,频率稳定性不高,为了解决上一方法中两激光不相干,所产生信号相位噪声过大的问题,可以使用注入式锁频锁相的方法,或者是负反馈锁相电路获得两激光器之间的相干性。通过对半导体激光器直接注入高频电流信号,或者是应用相位调制器,可以产生频率等间距的多个不同频率的光信号,或称光频梳。当然现在常用的获得宽谱光频梳的方法是采用锁模激光器。将产生的光频梳其中任意两个梳齿信号通过滤波选择出来,分别注入到激光1和2从而分别实现锁频锁相。因为光频梳不同的梳齿信号之间的相位是相对稳定的,这样两激光器之间就获得了稳定的相对相位,再通过如前所述差频的方法便可以得到光频梳重复频率的多倍频微波信号了。

[0005] 另一个减小两激光相对相位噪声的方法是使用负反馈光锁相环,光锁相环原理类似于电子领域的锁相环。两个激光器的频率相位差由光电检测器转换为电信号,再与参考微波信号源做差频得到两激光之间的相位差,经过放大和滤波处理再反馈回其中一个激光的频率控制单元。通过这样一个负反馈的控制环路,两激光信号之间的相对频率相位与参考微波信号锁定。合并的光信号又可以通过光纤传送到别处的光电检测器再转化为微波信号。这样所产生的微波信号的相位噪声在锁相负反馈环路的带宽内和参考信号的相位噪声几乎相同。在带宽之外相位噪声则等于原来两不相干的激光器的相对相位噪声。另外,参考微波信号源也可以是别的信号源通过倍频或别的频率处理转化而来,从而可以将较低频率

的微波信号进行多倍频,或者是转换为高频的射频,THz信号等。

[0006] 然而,无论是利用两个不同频率激光信号的差频去产生高频微波信号,还是利用负反馈光锁相环的方式去减小两激光相对相位噪声,都有其电子瓶颈,产生的高频信号频率稳定性差,鉴相难度较大,控制其相对相位噪声抖动也很难达到理想状态,因此本发明提供一种基于微波光子分频的光学锁相方法,在分频的同时,也可对其相对相位噪声抖动进行优化,克服传统双激光器锁定相位抖动的问题并降低对鉴相器的要求,实现高频稳定微波信号输出。

发明内容

[0007] 本发明所要解决的技术问题在于克服现有技术不足,提供一种基于微波光子分频的光学锁相方法,可克服传统双激光器锁定相位抖动的问题并降低对鉴相器的要求,从而实现高频稳定微波信号输出。

[0008] 本发明具体采用以下技术方案解决上述技术问题:

[0009] 一种基于微波光子分频的光学锁相方法,将待锁相的两个单色光源所输出光信号的耦合信号输入一个由强度调制单元、微波放大器、移相器、微波滤波器、功分器所组成的光电振荡环路,所述微波滤波器对频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 的微波信号振荡模式为带通, ω_0 为所述两个单色光源的输出频率差, n 为正整数;令频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 的微波信号的振荡模式在所述光电振荡环路中形成正反馈振荡,从而获得稳定的频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 微波信号;对所述光电振荡环路输出的稳定的频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 微波信号与本振微波信号进行鉴相,并利用滤除高频分量后的鉴相结果对至少一个所述单色光源的相位进行反馈控制,从而实现所述两个单色光源的相位锁定。

[0010] 优选地,令所述光电振荡环路满足以下稳态条件,以使得 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 分频的振荡模式在所述光电振荡环路中形成正反馈振荡:

$$[0011] \begin{cases} V_1 = \alpha G E_1 E_2 \sin^2\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_1^2(m) \\ \theta_1 = \frac{\varphi(i_1(t)) - \varphi(i_2(t))}{4n-1} \\ m = \frac{\pi V_1}{V_\pi} \\ \omega_0 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{4n-1} \end{cases}$$

[0012] α 为光电振荡环路的系统衰减, G 为微波放大器增益, $\varphi(i_1(t))$ 、 $\varphi(i_2(t))$ 、 ω_1 、 ω_2 分别为所述两个单色光源输出光信号的相位和频率, V_1 、 θ_1 分别为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 分频的振荡模式的幅度、相位, m 为强度调制单元的调制系数, $J_1(m)$ 为第一阶贝塞尔函数, V_π 为强度调制单元的半

波电压。

[0013] 优选地,所述强度调制单元为工作在最小传输点的推挽式马赫-曾德尔调制器。

[0014] 根据相同的发明构思还可以得到以下技术方案:

[0015] 一种基于微波光子分频的光学锁相装置,该装置包括:

[0016] 光耦合器,用于对待锁相的两个单色光源所输出光信号进行耦合;

[0017] 光电振荡环路,由强度调制单元、微波放大器、移相器、微波滤波器、功分器所组成,强度调制单元的光输入端与所述光耦合器的输出端连接,所述微波滤波器对频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 的微波信号振荡模式为带通, ω_0 为所述两个单色光源的输出频率差, n 为正整数;鉴相

器,用于对所述光电振荡环路输出的稳定的频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 微波信号与本振微波信号进行鉴相;

[0018] 滤波器,用于滤除鉴相器输出信号中的高频分量;

[0019] 反馈控制器,用于利用滤除高频分量后的鉴相结果对至少一个所述单色光源的相位进行反馈控制,从而实现所述两个单色光源的相位锁定。

[0020] 优选地,所述光电振荡环路满足以下稳态条件,以使得 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 分频的振荡模式在所述光电振荡环路中形成正反馈振荡:

$$[0021] \begin{cases} V_1 = \alpha G E_1 E_2 \sin^2 \left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi} \right) J_1^2(m) \\ \theta_1 = \frac{\varphi(i_1(t)) - \varphi(i_2(t))}{4n-1} \\ m = \frac{\pi V_1}{V_\pi} \\ \omega_0 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{4n-1} \end{cases}$$

[0022] α 为光电振荡环路的系统衰减, G 为微波放大器增益, $\varphi(i_1(t))$ 、 $\varphi(i_2(t))$ 、 ω_1 、 ω_2 分别为所述两个单色光源输出光信号的相位和频率, V_1 、 θ_1 分别为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 分频的振荡模式的幅度、相位, m 为强度调制单元的调制系数, $J_1(m)$ 为第一阶贝塞尔函数, V_π 为强度调制单元的半波电压。

[0023] 优选地,所述强度调制单元为工作在最小传输点的推挽式马赫-曾德尔调制器。

[0024] 相比现有技术,本发明技术方案具有以下有益效果:

[0025] 本发明利用基于光电振荡环路(OEO)的微波光子分频技术,通过调节微波滤波器的带通响应,使得光电振荡环路稳定在 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 分频的振荡模式,然后利用该分频信号与本振信号的鉴相结果对光源进行反馈控制,从而实现两个光源的相位锁定。一方面可以大幅降低对鉴相器的要求,可以将双激光器产生的差频信号通过光电振荡环路分频为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$,大幅

降低鉴相器对高频信号鉴相的难度,克服鉴相器难以应用于高频微波信号的问题;另一方面也可以将原本为 $\varphi(i_1(t)) - \varphi(i_2(t))$ 相对相位抖动信号变为 $\frac{\varphi(i_1(t)) - \varphi(i_2(t))}{4n-1}$,通过光电振荡环路分频的方式,有效降低相对相位噪声带来的抖动,克服传统光锁相环相对相位噪声抖动过大的问题。

附图说明

[0026] 图1为本发明光学锁相装置的基本结构示意图。

具体实施方式

[0027] 针对现有技术所存在的相位抖动的问题以及难以对高频微波信号进行准确鉴相的问题,本发明的解决思路是利用基于OEO的微波光子分频技术对双光源的差频信号进行分频,然后利用该分频信号与本振信号的鉴相结果对光源进行反馈控制,从而实现两个光源的相位锁定。一方面可以大幅降低对鉴相器的要求,克服鉴相器难以应用于高频微波信号的问题;另一方面可以有效克服相位抖动的问题并降低相位噪声。

[0028] 具体而言,本发明的光学锁相方法具体如下:将待锁相的两个单色光源所输出光信号的耦合信号输入一个由强度调制单元、微波放大器、移相器、微波滤波器、功分器所组成的光电振荡环路,所述微波滤波器对频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 的微波信号振荡模式为带通, ω_0 为所述

两个单色光源的输出频率差, n 为正整数;令频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 的微波信号的振荡模式在所述光电振荡环路中形成正反馈振荡,从而获得稳定的频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 微波信号;对所述光电振荡环

路输出的稳定的频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 微波信号与本振微波信号进行鉴相,并利用滤除高频分量后的鉴相结果对至少一个所述单色光源的相位进行反馈控制,从而实现所述两个单色光源的相位锁定。

[0029] 上述技术方案中,光电振荡环路中的强度调制单元只要能够实现电光强度调制即可,可以是保留光载波的强度调制,也可以是光载波抑制的强度调制,优选采用光载波抑制的强度调制方式;光载波抑制的强度调制可采用各种方式实现,例如,可以通过将推挽式的马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)偏置在最小传输点实现,或者利用光滤波器滤除相位调制器的光载波方式实现,或者通过偏振调制器与检偏器组合形式实现。

[0030] 为了便于公众理解,下面通过一个具体实施例并结合附图来对本发明的技术方案进行详细说明:

[0031] 图1显示了本发明光学锁相装置一个具体实施例的结构及原理。如图1所示,待锁相的两个单色激光源分别带有用于调整相位的电流源,本发明光学锁相装置包括:光耦合器、强度调制单元、光电探测器、微波放大器、移相器、带通滤波器、功分器、鉴相器、反馈控制器。光耦合器将两个单色光源产生的光信号合束,产生光载波,强度调制单元将稳定震荡后的微波信号调制于光载波上,并输出光载波抑制强度调制信号;光载波抑制强度调制信

号通过光纤传输后,进入光电探测器,并在光电探测器中实现光信号到电信号的转化,产生频差为 ω_0 的待分频微波信号,该信号通过微波放大器、移相器以及微波滤波器注入到强度调制单元中,微波滤波器对频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 分频信号为带通;功分器一路输出信号注入到光载

波抑制强度调制单元中,使得频率为 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 分频的振荡模式在环路中形成正反馈振荡,并最终在功分器的另一路输出端口输出分频后的信号,将分频后的信号与本振信号鉴相,通过反馈控制器调节其中一个激光器的电流,改变输出相位,将该路激光器的相位锁定至另一个激光器,从而实现双激光器锁相,产生高频微波信号

[0032] 如图1所示,我们假设两个光源输出光信号分别为:

$$[0033] \quad E_{in1}(t) = E_1 \cos[\omega_1 t + \varphi(i_1(t))] \quad (1)$$

$$[0034] \quad E_{in2}(t) = E_2 \cos[\omega_2 t + \varphi(i_2(t))] \quad (2)$$

[0035] 其中 E_1 、 E_2 、 ω_1 、 ω_2 分别表示两个光信号的幅度、频率, $\varphi(i_1(t))$ 、 $\varphi(i_2(t))$ 分别表示两个输入光信号相位随电流变化而变化。

[0036] 当两个单色光源输出光信号通过光耦合器之后,输入至强度调制单元的合束光信号为:

$$[0037] \quad E_{in}(t) = E_{in1}(t) + E_{in2}(t) = E_1 \exp[j\omega_1 t + j\varphi(i_1(t))] + E_2 \exp[j\omega_2 t + j\varphi(i_2(t))] \quad (3)$$

[0038] 同时我们假设环路中振荡的信号为 $x_{in}(t)$,将该信号注入至MZM中,并在MZM中实现载波抑制强度调制。考虑到直流偏置电压 V_B 和射频调制电压 $V(t)$,MZM的调制传递函数表示为:

$$[0039] \quad \frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} = \cos\left(\frac{\pi V(t)}{2V_\pi} + \frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) \quad (4)$$

[0040] 其中 V_π 为MZM的半波电压, E_{in} 、 E_{out} 分别指输入和输出光信号。

[0041] 理想情况下,经过光电振荡器稳定后,假设进入强度调制单元的分频振荡信号为:

$$[0042] \quad x_{in}(t) = V_1 \cos\left(\frac{\omega_0 t}{4n-1} + \theta_1\right) \quad (5)$$

[0043] 其中 $\frac{\omega_0}{n}$ 、 V_1 、 θ_1 分别表示分频振荡信号频率、幅度、相位。此时调制器输出光信号为:

$$[0044] \quad E_{out}(t) = \cos\left(\frac{\pi}{2V_\pi} V_1 \cos\left(\frac{\omega_0 t}{4n-1} + \theta_1\right) + \frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) \quad (6)$$

[0045] 利用Bessel展开式,可得

$$[0046] \quad E_{out}(t) = E_1 \cos[\omega_1 t + \varphi(i_1(t))] \cdot \left[\cos\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_0(m) + 2 \sum_{k=1}^{+\infty} (-1)^k \cos\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_{2k}(m) \cos\left(\frac{2k\omega_0 t}{4n-1}\right) \right. \\ \left. + 2 \sum_{k=0}^{+\infty} (-1)^{k+1} \sin\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_{2k+1}(m) \cos\left(\frac{(2k+1)\omega_0 t}{4n-1}\right) \right] + E_2 \cos[\omega_2 t + \varphi(i_2(t))] \cdot \left[\cos\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_0(m) \right. \\ \left. + 2 \sum_{k=1}^{+\infty} (-1)^k \cos\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_{2k}(m) \cos\left(\frac{2k\omega_0 t}{4n-1}\right) + 2 \sum_{k=0}^{+\infty} (-1)^{k+1} \sin\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_{2k+1}(m) \cos\left(\frac{(2k+1)\omega_0 t}{4n-1}\right) \right]$$

[0047] 其中 $m = \frac{\pi V_1}{2V_\pi}$ 当MZM偏置在最小工作点时,输出光信号只包含奇数阶边带:

$$[0048] \quad E_{out}(t) = E_1 \cos[\omega_1 t + \varphi(i_1(t))] \bullet 2 \sum_{k=0}^{+\infty} (-1)^{k+1} \sin\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_{2k+1}(m) \cos\left(\frac{(2k+1)\omega_0 t}{4n-1}\right) + \\ E_2 \cos[\omega_2 t + \varphi(i_2(t))] \bullet 2 \sum_{k=0}^{+\infty} (-1)^{k+1} \sin\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_{2k+1}(m) \cos\left(\frac{(2k+1)\omega_0 t}{4n-1}\right) \quad (8)$$

[0049] 只保留正负一阶边带,则:

$$[0050] \quad E_{out}(t) = E_1 \cos[\omega_1 t + \varphi(i_1(t))] \bullet 2(-1) \sin\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_1(m) \cos\left(\frac{\omega_0 t}{4n-1}\right) + \\ E_2 \cos[\omega_2 t + \varphi(i_2(t))] \bullet 2(-1) \sin\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_1(m) \cos\left(\frac{\omega_0 t}{4n-1}\right) \\ = -2 \sin\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_1(m) \{E_1 \cos[\omega_1 t + \varphi(i_1(t))] \bullet \cos\left(\frac{\omega_0 t}{4n-1}\right) + \\ E_2 \cos[\omega_2 t + \varphi(i_2(t))] \bullet \cos\left(\frac{\omega_0 t}{4n-1}\right)\} \quad (9)$$

$$[0051] \quad = -2 \sin\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_1(m) \left\{ \frac{E_1 \cos[\omega_1 t + \varphi(i_1(t)) - \frac{\omega_0 t}{4n-1}] + \cos[\omega_1 t + \varphi(i_1(t)) + \frac{\omega_0 t}{4n-1}]}{2} + \right. \\ \left. \frac{E_2 \cos[\omega_2 t + \varphi(i_2(t)) - \frac{\omega_0 t}{4n-1}] + \cos[\omega_2 t + \varphi(i_2(t)) + \frac{\omega_0 t}{4n-1}]}{2} \right\} \\ E_{out}(t) = -2 \sin\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_1(m) \left\{ \frac{E_1 \cos[\omega_1 t + \varphi(i_1(t)) + \frac{\omega_0 t}{4n-1}]}{2} + \frac{E_2 \cos[\omega_2 t + \varphi(i_2(t)) - \frac{\omega_0 t}{4n-1}]}{2} \right\} \quad (10)$$

[0052] 输出光信号通过光电探测器,光信号转换为电信号,则电信号为:

$$[0053] \quad I(t) = E_{out}(t) \bullet E_{out}^*(t) = \left\{ -2 \sin\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_1(m) \left\{ \frac{E_1 \cos[\omega_1 t + \varphi(i_1(t)) + \frac{\omega_0 t}{4n-1}]}{2} + \frac{E_2 \cos[\omega_2 t + \varphi(i_2(t)) - \frac{\omega_0 t}{4n-1}]}{2} \right\} \right\}^2 \\ = \sin^2\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_1^2(m) \{E_1^2 \cos^2[\omega_1 t + \varphi(i_1(t)) + \frac{\omega_0 t}{4n-1}] + \\ 2E_1 E_2 \cos[\omega_1 t + \varphi(i_1(t)) + \frac{\omega_0 t}{4n-1}] \cos[\omega_2 t + \varphi(i_2(t)) - \frac{\omega_0 t}{4n-1}] + \\ E_2^2 \cos^2[\omega_2 t + \varphi(i_2(t)) - \frac{\omega_0 t}{4n-1}]\} \quad (11)$$

[0054] 通过放大系数为G的微波放大器和滤波器,频率大于等于 $\frac{\omega_0}{4n-1}$ 的分量将会被滤除,此时输出电信号通过功分器,一路输出至强度调制单元输入端作为射频输入, α 为衰减系数,则输出电信号为:

[0055]
$$x_{out}(t) = \alpha G E_1 E_2 \sin^2\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_1^2(m) \left\{ \cos\left[\omega_1 t - \omega_2 t + \frac{2\omega_0 t}{4n-1} + \frac{\varphi(i_1(t)) - \varphi(i_2(t))}{4n-1}\right] \right\} \quad (12)$$

[0056] 由于系统处于稳定状态, 可知: $x_{out}(t) = x_{in}(t)$

[0057] 于是可得:

[0058]
$$V_1 \cos\left(\frac{\omega_0 t}{4n-1} + \theta_1\right) = \alpha G E_1 E_2 \sin^2\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_1^2(m) \left\{ \cos\left[\omega_1 t - \omega_2 t + \frac{2\omega_0 t}{4n-1} + \frac{\varphi(i_1(t)) - \varphi(i_2(t))}{4n-1}\right] \right\} \quad (13)$$

[0059] 因此可知其稳态条件:

[0060]
$$\begin{cases} V_1 = \alpha G E_1 E_2 \sin^2\left(\frac{\pi V_B}{2V_\pi}\right) J_1^2(m) \\ \theta_1 = \frac{\varphi(i_1(t)) - \varphi(i_2(t))}{4n-1} \\ m = \frac{\pi V_1}{V_\pi} \\ \omega_0 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{4n-1} \end{cases} \quad (14)$$

[0061] 稳定的微波振荡信号通过功分器另外一路输出, 此时输出电信号为:

[0062]
$$x_{out1}(t) = V_1 \cos\left[\frac{\omega_0 t}{4n-1} + \frac{\varphi(i_1(t)) - \varphi(i_2(t))}{4n-1}\right] \quad (15)$$

[0063] 输出电信号与本振信号进行鉴相, 本振信号为:

[0064]
$$V_2(t) = V_2 \cos\left(\frac{\omega_0}{4n-1} t + \varphi_2\right) \quad (16)$$

[0065] 通过鉴相器后, 输出电信号为:

[0066]
$$\begin{aligned} V_{out}(t) &= V_2(t) \cdot x_{out1}(t) = V_2 \cos\left(\frac{\omega_0}{4n-1} t + \varphi_2\right) \cdot V_1 \cos\left[\frac{\omega_0 t}{n} + \frac{\varphi(i_1(t)) - \varphi(i_2(t))}{4n-1}\right] \\ &= V_1 V_2 \left\{ \frac{\cos\left[\frac{2\omega_0 t}{4n-1} + \varphi_2 + \frac{\varphi(i_1(t)) - \varphi(i_2(t))}{4n-1}\right]}{2} + \frac{\cos\left[\varphi_2 - \frac{\varphi(i_1(t)) - \varphi(i_2(t))}{4n-1}\right]}{2} \right\} \quad (17) \end{aligned}$$

[0067] 利用滤波器2滤除高频分量, 此时的输出电信号只与相位相关:

[0068]
$$V_{out}(t) = \frac{V_1 V_2}{2} \left\{ \cos\left[\varphi_2 - \frac{\varphi(i_1(t)) - \varphi(i_2(t))}{4n-1}\right] \right\} \quad (18)$$

[0069] 此时可知

[0070]
$$\varphi_2 = \frac{\varphi(i_1(t)) - \varphi(i_2(t))}{4n-1} \quad (19)$$

[0071] 通过反馈控制器, 调节其中一个单色激光源的电流 (或者两者同时调节), 即可实现相位锁定, 产生高频微波信号。

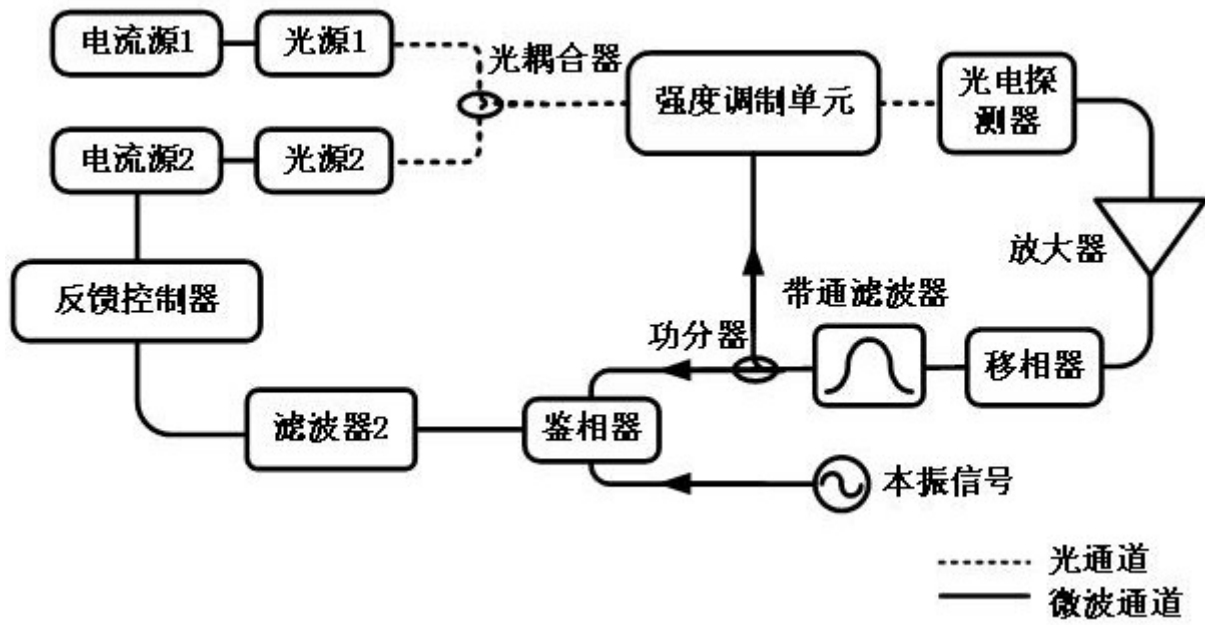


图1