

## 一种利用定向耦合调制器的循环干涉型光学陀螺改进方案

张勇刚, 孙娜, 李宁, 梁宏

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 循环干涉型光学陀螺的损耗随着循环次数的增加而增大, 并且耦合器对于光强的分配起着至关重要的作用, 文中提出了一种利用定向耦合调制器代替普通耦合器的改进方案, 利用定向耦合器可以通过调整工作电压获得交叉态与直通态的特性, 改变光脉冲信号进入光路时及光循环经过耦合器时的耦合态, 以此来增大信号光耦合进光路的光强, 并减少因循环所导致的额外损耗。仿真表明, 文中提出的方法可以明显增大检测到的光强, 提高光信号的信噪比, 从而提高检测精度。

**关键词:** 循环干涉型; 光学陀螺; 改进方案; 定向耦合调制器

**中图分类号:** V245.1   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1637-06

## An improved circulating interferometric optical gyro design method by using directional coupler modulator

Zhang Yonggang, Sun Na, Li Ning, Liang Hong

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The attenuation of light signal in circulating interferometric optical gyro increases with the increase of cycling loops due to the use of coupler. In this paper, an improved design method of circulating interferometric optical gyro was proposed by using directional coupling modulator to replace the ordinary coupler. The cross state and direct state in the directional coupler could be obtained by adjusting the working voltage. The coupling mode could be controlled to be different when the light pulse signal went into the cycling light path or the light cycles out of the coupler. The light signal amplitude in the cycling light path could then be improved, and the attenuation caused by coupler was reduced. Simulation results show that the proposed method can increase the detected light intensity and improve the signal to noise ratio, which will improve the measuring precision effectively.

**Key words:** circulating interferometric; optical gyro; improved design method; directional coupler modulator

收稿日期: 2013-09-08; 修订日期: 2013-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(61001154, 61201409, 61371173); 中国博士后科学基金(2013M530147);

黑龙江省博士后基金(LBH-Z13052); 哈尔滨工程大学中央高校基本科研业务费专项基金(HEUCFX41307)

作者简介: 张勇刚(1981-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事高精度光纤陀螺、惯性导航、组合导航等方面的研究。

Email: zhangyg@hrbeu.edu.cn

## 0 引言

光纤陀螺是基于 Sagnac 效应的角速度传感器,因其固态结构及动态范围大等优点被广泛使用。随着光纤陀螺的发展,对光纤陀螺的各类需求加大,光纤陀螺的高精度、小型化以及集成光学陀螺的研究已经成为了一种发展趋势。由 Sagnac 效应可知,敏感光路的长度越长,光纤陀螺的精度越高,但与此同时,光纤陀螺对温度的敏感也将增大,阻碍了光纤陀螺精度的进一步提高<sup>[1]</sup>;光纤陀螺的小型化也对光纤环的长度提出了要求,在保证敏感度及损耗的情况下减小光纤陀螺的体积是很难实现的;而集成光学陀螺对波导的长度及空间的要求更为苛刻<sup>[2]</sup>。

为了解决这一系列问题,得到高灵敏度且敏感环长度更短的光纤角速度传感器,循环干涉型光学陀螺被提出,其特点在于吸收了环形激光陀螺的优势,使光能够在敏感环(SSR)中运行多圈,通过检测第  $M$  次循环的光信号来提高灵敏度。参考文献[1]中,着重分析了该光学陀螺的分辨率、标度因数及零偏稳定性,并得到了光束在敏感环中循环 2~3 次时可以达到较好的零偏稳定性的结论;在参考文献[3]中,清华大学针对循环干涉型光学陀螺的光源及收发模块进行了研究,并提出了循环干涉型光学陀螺的信号检测方案;在参考文献[4]中,提出了一种新型非 0.5 占空比的方波调制方案,以达到使某阶次再入信号灵敏度最大的效果;参考文献[5]提出一种光路改进方案,以达到增大信号光传播路径及提高系统检测精度的目的。然而,循环干涉型光学陀螺仍然存在因耦合器分光所导致的检测光信号微弱等问题,最根本的原因是耦合进光路的光信号微弱,并且光每次循环耦合出光路时都造成额外损耗。

文中基于循环干涉型光学陀螺的原理及检测方法,首先从光功率的角度分析了循环干涉型光学陀螺所存在的问题,在此基础上提出了一种利用定向耦合调制器代替普通耦合器的改进方案,以此来增大信号光耦合进光路的光强,并减少因循环所导致的额外损耗,在同等光纤长度条件下,增加循环次数,增强 Sagnac 效应,从而提高检测精度。仿真验证了该方案的有效性。

## 1 循环干涉型光学陀螺的原理、结构及信号检测方法

### 1.1 循环干涉型光学陀螺的原理与结构

循环干涉型光学陀螺与传统干涉型光纤陀螺工作原理相同,结构也几乎相同,不同的是在 Y 波导与敏感光路之间增加了一个耦合器 C2<sup>[6]</sup>。循环干涉型光学陀螺的主要部件包括:低相干长度光源 SLD、耦合器 C1、耦合器 C2、Y 波导(分束器、起偏器和相位调制器)、光纤敏感环 SSR(或光波导环)和光电探测器。该系统方案的结构如图 1 所示。

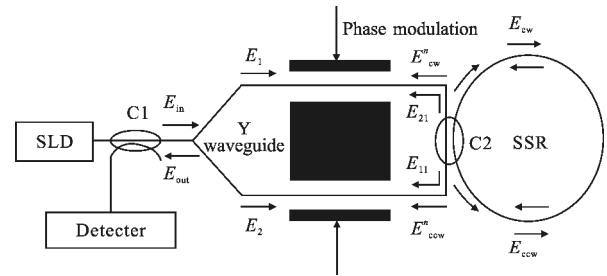


图 1 循环干涉型光学陀螺结构图

Fig.1 System model of circulating interferometric optic gyro

采用这样的结构可以使循环干涉型光学陀螺仅用较短的敏感环即可达到与普通干涉式光纤陀螺同样的分辨率<sup>[4]</sup>。具体工作原理如下:

光从超辐射发光二极管出射后经过耦合器 1 到达集成光学器件 Y 波导,在此光波被分成两束。两束光到达耦合器 2 时,一部分沿原方向继续传播;另一部分被耦合进光纤线圈,并在线圈中分别沿顺时针 CW 和逆时针 CCW 两个方向相向传播,传播一次后经过耦合器 2 时将有一部分光被耦合进 Y 波导并经过耦合器 1 到达探测器进行干涉,形成第一圈的干涉信号;而剩余部分光则在线圈光路中继续传播,循环进行下去,并依次形成第 2~n 圈的干涉信号<sup>[7]</sup>,最后利用空间梳状滤波器分离出需要的第 n 圈干涉信号作为有用信号,并进行分析。与传统干涉式光纤陀螺一样,为了增大陀螺的检测灵敏度,依然对陀螺施加幅值为  $\pi/2$  的方波进行调制。这样检测光强与相位差的关系为  $I=I_0(1+\cos\Delta\Phi)$ ,其中  $\Delta\Phi=\Phi_s\pm\frac{\pi}{2}$ ,  $I_0$  为光源光强,  $\Phi_s=\frac{4\pi lr}{\lambda c_0}\Omega$  为 Sagnac 相移,  $l$  为光纤环的长度,  $r$  为光纤环半径,  $\lambda$  为光源波长,  $c_0$  为光传播

速度, 则相邻两个半周期的干涉信号的差值  $\Delta I = 2I_0 \sin \Phi_s$ , 利用该差值作为反馈信号, 通过闭环检测方案测量 Sagnac 相移, 并依据 Sagnac 与角速率数学关系  $\Phi_s = \frac{4\pi L r}{\lambda c_0} \Omega$  计算获得输入角速率。

### 1.2 循环干涉型光学陀螺的信号检测方法

由循环干涉型光学陀螺的结构和原理可知, 光电探测器检测到的输出信号为多个不同敏感光路长度的输出信号之和, 它们的长度分别为  $N \times L$  ( $N = 1, 2, \dots, n$ ), 其中,  $L$  为光路线圈的长度,  $n$  为循环次数。为了实现对输入角速率的测量, 需要将循环第  $n$  次的有用信号提取出来, 文中介绍的是利用空间梳状滤波器分离有用信号的方法<sup>[7]</sup>。具体检测方法如下:

首先将 SLD 调制成一组脉冲信号, 若取  $n=5$ , 产生如图 2(a)所示的光源调制信号, 其脉冲宽度为光在光路线圈 SSR 中的渡越时间  $\tau$  ( $\tau=L/c$ ,  $c$  为光速), 其调制周期为  $n\tau$ , 图 2(b)为  $\pi/2$  方波调制信号, 调制周期为  $2n\tau$ 。图 2(c)为未耦合进入光路直接输出的光信号, 图 2(d)~(g)为在光纤线圈中循环 1, 2, 3, 4 次的顺、逆时针两束光在光电探测器中的独立干涉信号, 图 2(h)为光电探测器总输出信号<sup>[7]</sup>, 各次循环的有用信号无相互叠加和干扰。经过如图 2(i)所示的空间梳状滤波器采样信号采样, 可以得到所需要的循环第  $n-1$  次的光干涉信号, 采样结果如图 2(j)所示, 与图 2(g)一致。利用方波调制闭环光纤陀螺方案, 即可实现对输入角速率的测量。

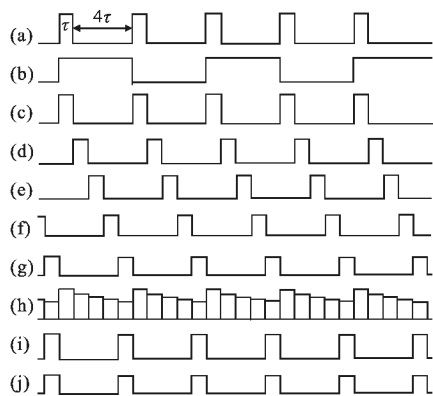


图 2 循环干涉型光学陀螺的信号检测原理  
Fig.2 Signal detecting principle of Re-FOG

## 2 循环干涉型光学陀螺信号损耗分析

为了分析循环干涉型光学陀螺的光波损耗, 我

们对系统光信号的传输进行了分析。

如图 1 所示, 输入光波可以表示为:

$$E_{in}(t) = E_0 e^{-j[\omega t - \varphi_0]} \quad (1)$$

式中:  $E_0$  为输入光波的幅度系数;  $\omega$  为光角频率;  $t$  为光传播的时间;  $\varphi_0$  为输入光波初始相位。进入 Y 波导后入射光按 1:1 比例分束, 此时输出光波幅度分为  $E_1$  和  $E_2$ , 有

$$E_1 = E_2 = (1/\sqrt{2}) E_{in} \quad (2)$$

当  $E_1$  和  $E_2$  进入耦合器 C2 后, 一部分沿原方向继续传播, 光波幅值分别表示为  $E_{11}$  和  $E_{21}$ ; 另一部分耦合进入光路线圈, 光波幅值表示为  $E_{ccw}$  和  $E_{cw}$ , 有

$$E_{11} = E_{21} = \alpha t_c E_1 \quad (3)$$

$$E_{ccw} = E_{cw} = \sqrt{1 - \alpha^2} t_c E_1 \quad (4)$$

式中:  $\alpha$ ,  $\sqrt{1 - \alpha^2}$ ,  $t_c$  分别为耦合器 C2 的直通光场幅值耦合比、叉通光场幅值耦合比和光场幅值传输系数。

由循环干涉型光学陀螺的检测原理可知, 系统仅提取第  $n$  次循环的光信号进行检测, 故只需讨论光波循环第  $n$  次的输出情况。当光波  $E_{ccw}$  和  $E_{cw}$  分别沿逆、顺时针完成  $n$  圈的传播后并通过耦合器 C2 输出的光场可表示为

$$E_{ccw}^n = (t_c \sqrt{1 - \alpha^2}) (t_f)^n (t_c \alpha)^{n-1} e^{-j[\omega n(\tau_f - \tau_s) - \varphi_0]} E_{ccw} = (t_c \sqrt{1 - \alpha^2})^2 (t_f)^n (t_c \alpha)^{n-1} e^{-j[\omega n(\tau_f - \tau_s) - \varphi_0]} \frac{1}{\sqrt{2}} E_{in} = R_f e^{-j[\omega n(\tau_f - \tau_s) - \varphi_0]} E_{in} \quad (5)$$

$$E_{cw}^n = (t_c \sqrt{1 - \alpha^2}) (t_f)^n (t_c \alpha)^{n-1} e^{-j[\omega n(\tau_f + \tau_s) - \varphi_0]} E_{cw} = (t_c \sqrt{1 - \alpha^2})^2 (t_f)^n (t_c \alpha)^{n-1} e^{-j[\omega n(\tau_f + \tau_s) - \varphi_0]} \frac{1}{\sqrt{2}} E_{in} = R_f e^{-j[\omega n(\tau_f + \tau_s) - \varphi_0]} E_{in} \quad (6)$$

其中,  $R_f = (1/\sqrt{2}) (t_c \sqrt{1 - \alpha^2})^2 (t_c \alpha)^{n-1} (t_f)^n$ ,  $t_f$  为光在敏感光路中环绕一周的幅值传输系数;  $\tau_f$  和  $\tau_s$  分别为光在光路环中的渡越时间和因转动产生的顺逆时间延迟之差的一半。

循环  $n$  次的光波经过 Y 波导后进行合束并干涉, 若忽略掉 Y 波导损耗, 干涉后的光波可以表示为  $E_{out}^n$ , 有

$$E_{out}^n = E_{ccw}^n + E_{cw}^n \quad (7)$$

则干涉后的光强  $I_{out}^n$  为:

$$I_{out}^n = \langle E_{out}^n * E_{out}^{n*} \rangle = \langle (E_{ccw}^n + E_{cw}^n) * (E_{ccw}^{n*} + E_{cw}^{n*}) \rangle =$$

$$\begin{aligned} & (R_f e^{-j[\omega n(\tau_1 - \tau_2) - \varphi_0]} E_{in} + R_f e^{-j[\omega n(\tau_1 + \tau_2) - \varphi_0]} E_{in})^* \\ & (R_f e^{j[\omega n(\tau_1 - \tau_2) - \varphi_0]} E_{in}^* + R_f e^{j[\omega n(\tau_1 + \tau_2) - \varphi_0]} E_{in}^*) \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $\langle E_{in}^* E_{in} \rangle = E_0^2 = I_{in}$ , 则:

$$I_{out}^n = R_f^2 I_{in} (1 + \cos 2\omega n \tau_s) = R_f^2 I_{in} [1 + \cos \varphi_{ns}] \quad (9)$$

式中:  $\varphi_{ns}$  为  $n$  倍长度的光路线圈所对应的 Sagnac 相移。对光学陀螺进行  $\pm \frac{\pi}{2}$  方波调制后, 当系统无转动时, 循环干涉型光学陀螺系统的零输入条件下输出为:

$$I_{out} = R_f^2 I_{in} = \frac{1}{2} (1 - \alpha^2)^2 \alpha^{2(n-1)} (t_c)^{2n+2} (t_i)^{2n} I_{in} \quad (10)$$

由表达式(10)可以看出, 造成该系统的光强损耗主要包含以下几个方面:

(1)  $(1 - \alpha^2)^2$  系数, 即耦合器 C2 直通耦合率的平方, 该系数体现了光波经耦合器 C2 耦合进入光路以及从光路中耦合输出的光强都过小的问题。对于循环干涉型光学陀螺来说, 一般选取耦合器 C2 的选取 97:3 的耦合率<sup>[6]</sup>, 即  $\alpha^2 = 0.97$ , 则  $(1 - \alpha^2)^2 = 0.0009$ , 将导致输出光信号大幅度衰减。

(2)  $\alpha^{2(n-1)}$  系数, 即耦合器 C2 直通耦合率的  $n-1$  次方, 该系数体现的是光波每次循环经耦合器耦合出光路的额外损耗。以  $\alpha^2 = 0.97$  为例, 则循环  $n$  次所造成的额外损耗为  $1 - 0.97^{n-1}$ 。由循环干涉型光学陀螺的结构和原理可知, 为了得到较高的陀螺精度, 需要增大敏感光路的长度, 即增大  $n$  的值, 然而随着循环次数  $n$  的增加, 额外损耗  $1 - 0.97^{n-1}$  更加严重。这就要求在实际应用中, 追求高精度的同时必须考虑到损耗的问题。

(3)  $(t_c)^{2n+2}$  系数, 为耦合器 C2 幅值传输系数的  $2n+2$  次方, 该系数由耦合器本身参数决定,  $1 - (t_c)^{2n+2}$  表征了耦合器 C2 传输  $n+1$  次的损耗。

(4)  $(t_i)^{2n}$  系数, 为光路幅值传输系数的  $2n$  次方,  $1 - (t_i)^{2n}$  表征了光路的传输  $n$  次的损耗, 该系数一般在集成光纤陀螺中占有较为重要的作用, 应尽量减少光路的损耗。

从对公式(10)的分析可以看出, 耦合器 C2 的耦合率对于循环干涉型光学陀螺输出的光强的影响不可忽略, 在实际应用中, 在选择了一定的循环系数  $n$  时, 可由  $\frac{dI_{out}}{d\alpha}$  计算求得最大输出光功率的最佳耦合比。然而仅仅这样的处理是不够的, 由公式(10)可知, 无论耦合器耦合率如何选择, 系统需要的有用光

信号都将损失严重, 这将最终导致光电探测器检测到的光强十分微弱, 甚至会被当作较强的噪声信号被滤除。因此现有的循环干涉型光学陀螺方案中, 光循环次数较少, 限制了其精度提升。

为了解决以上问题, 文中提出了一种利用定向耦合调制器代替普通耦合器的循环干涉型光学陀螺改进方案, 以此来增大信号光耦合进入光路的光强, 并减少因循环所导致的额外损耗。

### 3 循环干涉型光学陀螺改进方案

经上述分析可知, 耦合器 2 耦合进入光路的光功率以及循环耦合导致的额外损耗对于输出光功率的大小起着至关重要的作用, 因此, 文中从耦合光功率的角度出发, 对耦合器 2 进行了改进, 将耦合器 2 换成一种可电调的定向耦合调制器, 以此来减少光功率的损失。

#### 3.1 定向耦合调制器工作原理

定向耦合调制器为典型的集成光学调制器, 其结构示意图如图 3 所示, 使用电光调制方式, 通常选用铌酸锂单晶作为衬底。其中,  $R_0, S_0$  为输入光波的幅值,  $R, S$  为对应输入  $R_0, S_0$  直通输出端的光波的幅值。

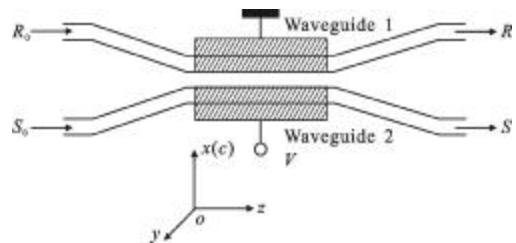


图 3 定向耦合调制器结构图

Fig.3 System model of directional coupler modulator

该定向耦合器波导间的耦合属于弱耦合, 根据耦合模理论分析知, 对于两完全相同的波导同向耦合的情况, 两模式之间的耦合波方程组可以简化为<sup>[8]</sup>:

$$\frac{dR(z)}{dz} - j\delta R(z) = -jKS(z) \quad (11)$$

$$\frac{dS(z)}{dz} + j\delta S(z) = -jKR(z) \quad (12)$$

其中,  $\delta = \frac{\Delta\beta}{2}$ ,  $\Delta\beta$  为相位失谐量, 在铌酸锂晶体中  $\Delta\beta$  表达式为  $\pi n_e^3 \gamma_{33} E_c / \lambda$ ,  $n_e$  为铌酸锂晶体非寻常光折射率,  $\gamma_{33}$  为电光系数,  $E_c$  是电极产生的电场在  $x$  轴上的分量,  $\lambda$  为光波长;  $K$  为耦合系数, 可由下式

计算求得

$$K = \frac{\omega \varepsilon_0}{4} \iint_{S_1} \Delta \varepsilon E_{1y}^*(x, y) E_{2y}(x, y) dx dy \quad (13)$$

式中:  $\omega$  为光角频率;  $\varepsilon_0$  为介电常数;  $\Delta \varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_3 = (n_1^2 - n_3^2)$  为波导 2 区内相对介电常数的微扰项,  $n_1, n_2, n_3$  分别为波导 1、波导 2 和两波导外的折射率;  $E_{1y}(x, y), E_{2y}(x, y)$  为波导 1、2 的本征模场。

该方程的通解可以写成实函数的形式:

$$R(z) = R_1 \cos(\sqrt{K^2 + \delta^2} z) + R_2 \sin(\sqrt{K^2 + \delta^2} z) \quad (14)$$

$$S(z) = -\frac{1}{jK} (R' - jKR) \quad (15)$$

对于输入条件为  $R_0=1, S_0=0$  的情况, 将边界条件代入上式得到

$$R(z) = \cos(\sqrt{K^2 + \delta^2} z) + \frac{j\delta}{\sqrt{K^2 + \delta^2}} \sin(\sqrt{K^2 + \delta^2} z) \quad (16)$$

$$S(z) = \frac{jK}{\sqrt{K^2 + \delta^2}} \sin(\sqrt{K^2 + \delta^2} z) \quad (17)$$

则输出端的耦合效率为:

$$\tau = \frac{|S|^2}{|R_0|^2} = \frac{K^2}{K^2 + \delta^2} \sin^2(\sqrt{K^2 + \delta^2} L) \quad (18)$$

式中:  $L$  为耦合区域的长度。

(1) 要想得到交叉工作状态, 由公式(18)可知, 必需使  $\tau=1$ , 则必需同时满足下述两个条件:

$$\delta=0, KL=(2v+1)\pi/2 \quad (19)$$

利用  $\delta=\Delta\beta/2, L_0=\pi/2K$ , 可以将上式写为:

$$\Delta\beta=0, L/L_0=2v+1 \quad (v=1, 2, \dots) \quad (20)$$

可以用图 4 中纵轴一系列孤立点  $L/L_0=1, 3, 5, \dots$  来表示。其中,  $L_0$  为  $v=0$  时交叉全耦合所需长度, 称为耦合长度。

通过以下设计即可实现交叉工作状态:(a) 不施加调制电压;(b) 定向耦合调制器的长度等于耦合长度  $L_0$  的奇数倍。

(2) 要想得到直通工作状态, 由公式(18)可知, 必需使  $\tau=0$ , 则必须满足以下条件:

$$(KL)^2 + (\delta L)^2 = (v\pi)^2 \quad (21)$$

利用  $\delta=\Delta\beta/2, L_0=\pi/2K$ , 可以将上式写为:

$$\left(\frac{L}{L_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\beta L}{\pi}\right)^2 = (2v)^2 \quad (22)$$

在  $L/L_0$  与  $\Delta\beta L/\pi$  平面上是一簇圆, 如图 4 所示。这就要求调整工作电压, 改变波导中外加电场的大小, 通过电光效应来使两波导间的  $\Delta\beta$  取恰当值,

获得直通态。例如, 若  $L/L_0=1$ , 则只需调节电压使得  $\Delta\beta = \sqrt{(2v)^2 - 1} \pi/L$  即可得到直通态。

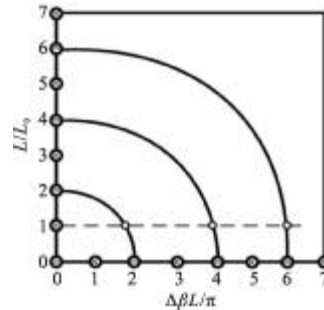


图 4 定向耦合调制器交叉、直通状态  $L/L_0 - \Delta\beta/\pi$  曲线图

Fig.4  $L/L_0 - \Delta\beta/\pi$  graphs in directional coupler modulator

因此, 理论上通过波导尺寸设计及调节调制电压可以实现定向耦合调制器的交叉耦合态和直通耦合态<sup>[9]</sup>。

### 3.2 基于定向耦合调制器的改进方案

由循环干涉型光学陀螺的分析可知耦合器 2 对于系统输出光功率的重要性, 可以利用定向耦合调制器通过调整工作电压获得交叉态与直通态的特性, 改变光脉冲信号进入光路时及光循环经过耦合器时的耦合态, 减少光功率的损耗, 具体利用定向耦合调制器的调制方案如图 5 所示。

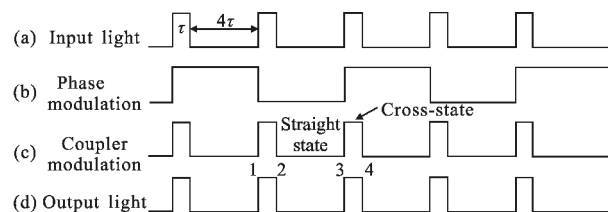


图 5 定向耦合调制器调制方案

Fig.5 Modulation scheme of directional coupler modulator

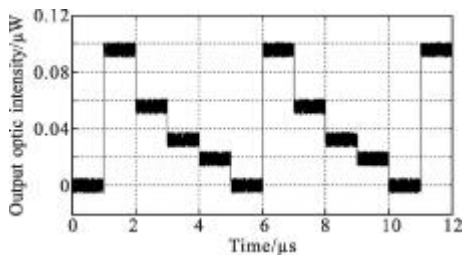
耦合器 2 由一个可以通过外加电场调制的定向耦合调制器代替, 记作 C3。当脉宽为光路跨越长度的光脉冲到达 C3 位置时(即 1 时刻), 调制器 C3 刚好调制至交叉态, 直至光脉冲全部进入(即 2 时刻), 此时定向耦合调制器调制为直通态, 使得光波在光路中循环时没有额外耦合损耗, 直至光在光路中循环  $n$  圈后, 达到 3 时刻, 此时调制器 C3 调制至交叉态, 3 到 4 时刻期间实现光波的输出以及第二次的脉冲光波输入, 完成了光信号的输入及输出过程。

使用改进方案得到的输出光功率可以表示为:

$$I_{\text{out}} = 1/2(t_c/t_c)^{2n}(t_c/t_c)^{2n+2}I_{\text{in}} \quad (23)$$

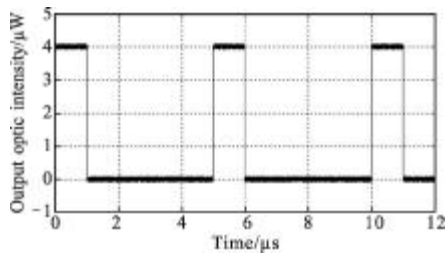
为原方案的  $(t_c/t_c)^{2n+2}/(1-\alpha^2)\alpha^{2(n-1)}$  倍。

依据参考文献[6]中循环干涉型光学陀螺的典型设置,取仿真参数如下:光源输出功率为  $500 \mu\text{W}$ ,波长为  $1310 \text{ nm}$ ,Y波导损耗为  $5.8 \text{ dB}$ ,耦合器 1 耦合比为  $50:50$ ,损耗为  $1.5 \text{ dB}$ ,耦合器 2 耦合比为  $97:3$ ,损耗为  $3 \text{ dB}$ ,取敏感光路为  $200 \text{ m}$ ,光路循环一次损耗设为  $0.6 \text{ dB}$ ,循环次数为 5 次。对于改进后定向耦合调制器,参照文献[10]中测试的集成光学耦合器的损耗值,取其损耗为  $4.8 \text{ dB}$ 。通过仿真可以得到改进前后检测信号的比较,如图 6 所示(为使检测信号比较清晰的显示,对于未改进方案中未耦合进入光路直接输出的光信号做滤除处理)。



(a) 改进前探测器检测信号

(a) Detected signal before improvement



(b) 改进后探测器检测信号

(b) Detected signal after improvement

图 6 改进前后检测信号比较

Fig.6 Detected signal comparison between before and after improvement

由图 6 仿真信号输出可以看出,在该仿真的典型循环干涉型光学陀螺参数设置条件下,改进后的方案相比于原方案检测到的有用信号大大增强,与公式(23)计算一致,光强增大了近两百倍。该方案成功的增大了耦合进入光路的光信号,又消除了原耦合器的  $1-n-1$  阶的额外耦合输出,有利于对输出有用信号的检测和分析。

## 4 结论

文中提出了一种利用可电调定向耦合调制器改善循环干涉型光学陀螺系统输出信噪比的方法,通过对定向耦合调制器电压调节改变耦合器的耦合态,以此来增强耦合器耦合进入光路的光信号,并消除了原耦合器的  $1-n-1$  阶的耦合输出损耗。仿真表明,文中所提出的方案能够有效的减少因耦合器所导致的光功率损失,对未来循环干涉型光纤陀螺以及集成光学陀螺的发展具有一定的意义。

## 参考文献:

- [1] Wu Xiaoming, Zhang Yanshen, Tian Wei, et al. Experiment on circulating interferometric FOG [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2002, 10(4): 50-66. (in Chinese)
- [2] Wang Wei. Interferometric Fiber Optic Gyroscope Technology [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010: 467-470. (in Chinese)
- [3] Zhang Yanshen, Wu Xiaoming, Tian Wei, et al. Circulating interferometric fiber optic gyro and its light source [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2002, 10(1): 45-50. (in Chinese)
- [4] Gao Feng, Zhao Lin, Tian Wei, et al. Investigation on the principle of re-entrant IOG [J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(3): 198-201. (in Chinese)
- [5] Wang Yujie, Li Zhengbin. One kind of reentry interferometric fiber optic gyro, China: 10182546513 [P]. Beijing University, 2010. (in Chinese)
- [6] Geng Fan, Sun Fengyu. Research on a new type of re-entry IFOG[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(1): 10-13. (in Chinese)
- [7] Yu Haiqun. Research on new type Re-FOG and TMD technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007: 29-30. (in Chinese)
- [8] Song Guicai, Quan Wei. Optic Waveguide Principle and Devices[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 121-124. (in Chinese)
- [9] Ma Chunsheng, Liu Shiyong. Optic Waveguide Model Theory [M]. Changchun: Jinlin University Press, 2007: 322-329, 448-456. (in Chinese)
- [10] Zhao Cezhou, Li Guozheng, Liu Enke, et al. Fabrication of SOI direction coupler[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1995, 16(12): 929-931. (in Chinese)