

四频差动激光陀螺左右旋模式光学解调分离方法研究

于文东 吕晚成 陈林峰 韩宗虎 李 龙

(中航工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

摘要 为了提高四频差动激光陀螺的精度,对其左右旋模式光学解调分离方法进行了理论分析和实验研究。根据陀螺输出光偏振特性,分析了椭圆偏振误差对左、右旋模式光学解调分离的影响机理。定义了分离后左、右旋模式输出信噪比,对该影响进行了量化,信噪比越大对解调输出影响越小。基于仿真计算和实验验证,给出光学解调系统中偏振片安装角度与输出信噪比的关系,指出调节偏振片安装角度是一种工程上有效提高信噪比的方法,并提出一种新的偏振片角度选取的分离方法——剔除法。与该陀螺研制初期的提取法获得的信噪比进行了对比,理论计算和实验结果一致表明,剔除法优于提取法。

关键词 激光光学;四频差动激光陀螺;光学解调;信噪比;偏振片

中图分类号 V241.5 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0814001

Study on Separate LCP from RCP Based on Multioscillator Ring Laser Gyroscope with Optical Signal Processing

Yu Wendong Lü Wancheng Chen Linfeng Han Zonghu Li Long

(Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, AVIC, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract In order to improve precision of multioscillator ring laser gyroscope (MRLG), the separation left-handed circular polarization (LCP) from right-handed circular polarization (RCP) based on MRLG with optical signal processing is studied both theoretically and experimentally. Considering that the polarizations of optical modes which are exported from MRLG influence the separation LCP from RCP, mechanism of influence is analyzed. After the separation, defining the signal-to-noise ratio(SNR) of the LCP or RCP, the value of the influence is derived. The higher of SNR, the smaller of the influence. Based on the study of theory and experimentation, the relationship between SNR and angle of sheet polarizer which is installed in the system of optical signal processing is presented. It is found that the SNR can be enhanced by adjusting the angle of sheet polarizer efficiently. A new method of separation LCP from RCP named "eliminating" is advanced by optimization installation of sheet polarizer. Compared with the earlier method named "extracting", the new method is better than the earlier one. The result is proved both by theory and experiment.

Key words laser optics; multioscillator ring laser gyroscope; optical signal processing; signal-to-noise ratio; sheet polarizer

OCIS codes 140.3370; 260.5430; 140.3560; 140.3430; 140.3410

1 引 言

激光陀螺是一种精密的光学角速度传感器,自 20 世纪 60 年代发展起来已进入实用阶段,广泛应用于军事和民用领域。采用法拉第偏频和非共面谐振腔的四频差动激光陀螺(MRLG)是新一代激光陀螺,具有全固态、腔内元件少、灵敏度高等优点^[1-2]。美国 Northrop Grumman 公司研制生产的 MRLG

(Zero-lock™ Laser Gyro)已广泛应用于西方现役装备,如 F-22 战斗机、RQ-4 无人机、C-130 运输机等^[3-4]。目前国内对 MRLG 的研究也已进入工程研制阶段,但其水平与美国相比仍存在较大差距。有很多工程问题需要解决,其中之一就是光学解调技术。

光学解调是基于 MRLG 输出光圆偏振特性,采

收稿日期: 2013-03-08; 收到修改稿日期: 2013-03-18

基金项目: 总装备部“十二五”装备预先研究项目

作者简介: 于文东(1984—),男,硕士,工程师,主要从事激光与光电子技术等方面的研究。

E-mail: yuwendongcc.student@sina.com

用光学器件实现左右旋模式光的分离,同时左右旋顺、逆时针光分别组成左旋模式拍频和右旋模式拍频,分别读出进而获得差动输出^[5]。光学解调具有可靠性高、后端电路简单、解调带宽大等优势,因此在 MRLG 上得到了广泛应用。

国内外文献[5-6]在光学解调方面的研究报道主要集中在解调方案及实现方法,一直没有对深层次系统误差的研究报道。在实际工程研制中,谐振腔加工误差、反射镜参数各向异性等因素都会导致 MRLG 输出光偏振态并非理想的圆偏振,通常为椭圆偏振光。这种偏振态误差将影响光学解调中对左右旋模式的分离效果,经过光电转换后导致信号的信噪比下降,增加了计数电路的难度及体积,造成电路的计数精度下降,甚至出现误计数。因此有必要对这一误差的影响机理及解决方法进行研究,避免解调误差引起的 MRLG 性能指标的下降。

本文将阐述 MRLG 输出光偏振态的椭圆误差对左右旋模式光学解调分离的影响机理及解决途径,通过对信噪比的仿真计算和实验验证,分析光学解调中偏振片安装角度对左右旋模式分离效果的影响,并对比了两种分离方法。

2 光学解调原理及方案

2.1 MRLG 原理

MRLG 是利用非共面谐振腔实现左、右旋圆偏振光频率的互易分裂,同时通过法拉第效应实现顺逆时针光之间的非互易偏频,避开闭锁效应。因此,谐振腔中包含有四个频率的模式。如图 1 所示,左旋顺(Lc)、逆时针(La)光构成左旋模式陀螺拍频,简称左旋模式拍频。右旋顺(Rc)、逆时针(Ra)光构成右旋模式陀螺拍频,简称右旋模式拍频。利用左右两个陀螺输出的差动,实现对惯性转动的 2 倍的敏感,等效于 2 倍的二频激光陀螺灵敏度。

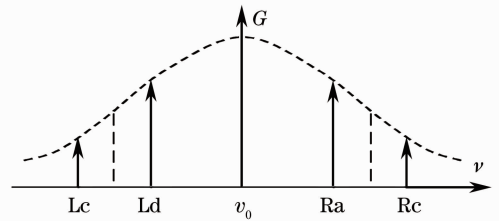


图 1 MRLG 四频模式分布

Fig. 1 Modes spectrum of MRLG

2.2 光学解调原理

光学解调是利用 MRLG 输出光圆偏振特性,通过光学器件使得左、右旋圆偏振光(LCP、RCP)转化为正交线偏振光。其次通过偏振过滤将包含左、右旋模式拍频的两种正交线偏振光分离,通常在这之前将顺、逆时针合成光分成两束,因此分别通过偏振过滤后得到一路为左旋模式拍频光,一路为右旋模式拍频光。最后经过光电转换后,直接输入到电路中计数。

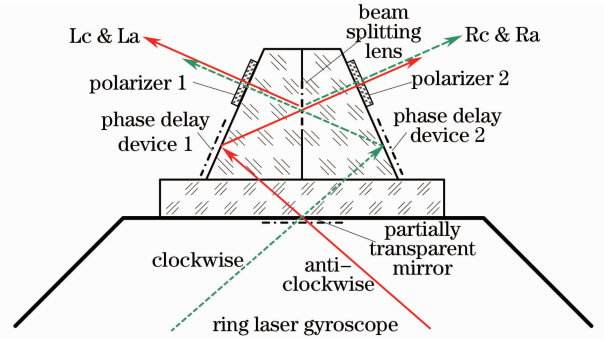


图 2 光学解调原理示意图

Fig. 2 Theory of optical signal processing

2.3 光学解调方案实现

光学解调通常采用棱镜、1/4 波片和偏振片来实现左、右旋模式光的分离,同时合成各自的顺、逆时针光束。随着光学薄膜技术的进步,工程中逐渐采用光学薄膜^[7]代替 1/4 波片和偏振片。这里研究的光学解调方案如图 2 所示,由两个对称棱镜和偏振片组成,棱镜上镀有相位延迟光学薄膜和半透半反

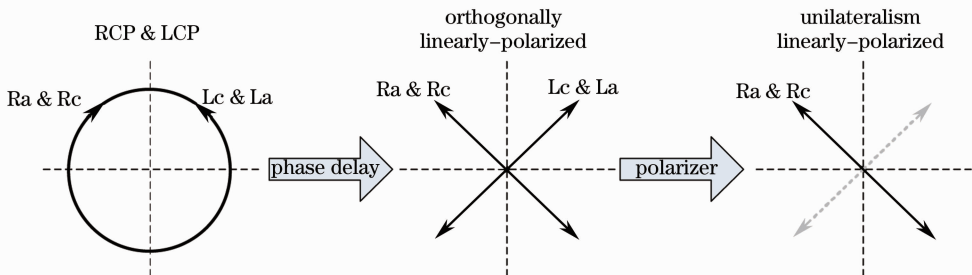


图 3 光学解调光偏振态变化

Fig. 3 Transformation of polarization in optical signal processing

膜。当谐振腔内圆偏振顺、逆光通过输出反射镜透射出来,射入棱镜镀膜有相位延迟薄膜的斜面反射后变成线偏振光,再入射到棱镜镀膜有半透半反薄膜的垂直面上,形成透射部分和反射部分。由于采用对称棱镜,因此顺、逆光经过半透半反膜之后,形成两路线偏振四频光束,再各自经过偏振片将其中的左旋或右旋模式线偏光过滤出来,实现左、右旋模式光的分离,最终得到独立的两路左、右旋模式拍频,通过电路分别计数。图3为左右旋模式在光学解调过程中的偏振态变化。

3 椭圆偏振对光学解调的影响

3.1 影响机理

上述的原理及方案都是针对理想圆偏振光而言的,在实际当中,由于MRLG谐振腔的加工误差、反射镜和法拉第旋光片参数各向异性^[8-9]等因素,导

致陀螺输出光出现椭圆偏振态。

这种情况下,如图4所示,椭圆偏振光经过相位延迟膜之后,变成接近线偏振的椭圆偏振光,或方位角夹角 Φ 偏离 90° ,此时以提取右旋模式为例,光再经过角度为 -45° 的偏振片之后,未能将右旋模式完全提取,同时未能将左旋模式完全剔除。因此,输出中既有左旋模式又有右旋模式,经过光电接收器和前置放大后的未完全分离的右旋模式拍频信号如图5所示。

受左旋模式的干扰,右旋模式拍频信号幅值受到了调制,调制频率为左、右旋模式拍频频差。根据文献中的波群理论,两个单色波幅值越接近,形成波群的调制深度越深。因此,左旋模式拍频信号的幅值越大,右旋模式信号幅值调制越深,受干扰影响越大。当这种调制深度达到电路计数阈值时,会出现误计数,如图5所示。

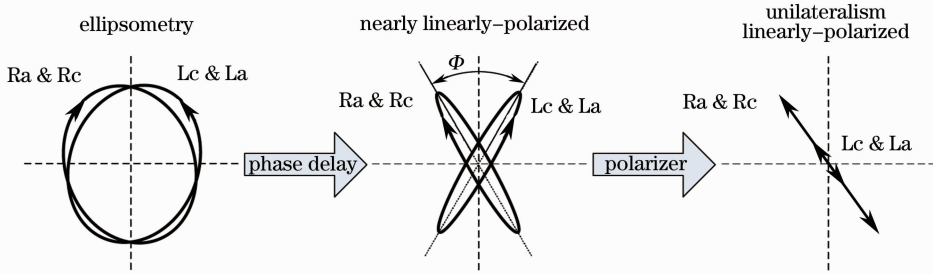


图4 偏振态误差对光学解调影响示意图

Fig. 4 Error of polarization in optical signal processing

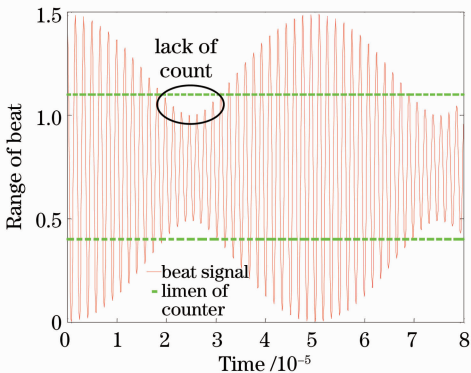


图5 未完全分离的拍频信号图像

Fig. 5 Signal of output while separating LCP from RCP incompletely

3.2 信噪比定义

为了表征光学解调左、右旋模式的分离效果,从广义角度定义经过偏振片后提取的左(右)旋模式拍频作为有用信号,定义未剔除掉的右(左)旋模式拍频作为噪声信号。两者能量之比称为光学解调

左、右旋模式分离信噪比(以下简称为“信噪比”)。因此,分离后左、右旋模式信噪比可以表示为

$$R_{\text{SNL}} = \frac{I_{\text{L}}}{I_{\text{R}}} = \frac{|\mathbf{E}_{\text{L}}|^2}{|\mathbf{E}_{\text{R}}|^2}, \quad (1)$$

$$R_{\text{SNR}} = \frac{I_{\text{R}}}{I_{\text{L}}} = \frac{|\mathbf{E}_{\text{R}}|^2}{|\mathbf{E}_{\text{L}}|^2}, \quad (2)$$

式中 I_{L} 和 \mathbf{E}_{L} 为经过偏振片后左旋模式拍频光强和电矢量幅值, I_{R} 和 \mathbf{E}_{R} 为经过偏振片后右旋模式拍频光强和电矢量幅值。

左、右旋模式拍频信噪比低会增加计数电路的难度和体积,导致输出精度下降,信噪比过小会出现误计数。因此,提高信噪比是提高MRLG的整体性能的一项重要基础研究。这里研究的目的是如何提高光学解调的信噪比。

4 提高信噪比的分离方法研究

根据陀螺输出光偏振态误差,通过调节光学解调系统参数可以获得信噪比的提高,其中偏振片角

度调节更适合工程实现,可以有效提高分离后左右旋模式的信噪比。

4.1 剔除法的提出

以获取左旋模式为例,将偏振片透光轴旋转至左旋模式光的方位角角度,实现左旋模式信号的最大提取,这种方法称之为提取法。由于该方法在操作中只要求提取出来的左旋模式拍频光强达到最大即可,比较简单。因此在四频差动激光陀螺研制初期常常采用提取法,但是该方法获得的信噪比并不是最大。

为了获取更高的信噪比,根据信噪比定义(1)式中的比值关系,提出将偏振片透光轴旋转至垂直于右旋模式光的方位角角度,实现右旋模式最大程度的剔除,来获得左旋模式信号,称这种方法为剔除法。

剔除法利用偏振片成倍地减小了(1)式中的分母值,而对分子值的减小一般不到一半,因此整个表达式值得到了很大的提高。因此理论上剔除法获得的信噪比要大于提取法获得的信噪比。这种方法操作中要求在获得信号调制深度最小的前提下,信号光强最大。虽然相对提取法操作复杂,但在工程中也很容易实现。

下面通过仿真分析和实验验证的方法研究偏振片角度对信噪比的影响关系,对比两种方法的分离效果。

4.2 仿真计算方法

基于光的 xy 电矢量分量在光学解调系统中传播时的幅值及相位变化,利用 Matlab 软件实现光传播过程中相位延迟膜、半透半反膜和偏振片等环节对 s 、 p 光的幅值和相位特性参数设置,因此通过光的三角函数表达式可以计算左右旋模式光经过光学解调系统各环节的偏振态变化及最终的信噪比。

以左旋顺时针光为例,电矢量 xy 分量 E_{LCx} 、 E_{LCy} 表达式为

$$\begin{cases} E_{LCx} = E_{0x} \cos \omega_{LC} t \\ E_{LCy} = E_{0y} \cos(\omega_{LC} t + \pi/2) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 E_{0x} 、 E_{0y} 为光电矢量 xy 分量幅值, ω_{LC} 为该模式光频率, t 为时间。经过某一环节后,表达式为

$$\begin{cases} E'_{LCx} = E_p E_{0x} \cos \omega_{LC} t \\ E'_{LCy} = E_s E_{0y} \cos(\omega_{LC} t + \pi/2 + \delta) \end{cases}, \quad (4)$$

式中 E_s 、 E_p 为 s 、 p 方向电矢量幅值变化率, δ 为 s 、 p 方向的相位变化量之差。

光的椭圆率角 β 和方位角 ψ 参量^[10]的定义如图 6 所示。用这两个参量可直观地描述光偏振态的变化。其与(4)式的电矢量参量满足

$$\sin 2\beta = \sin 2\alpha \sin \delta, \quad (5)$$

$$\tan 2\psi = \tan 2\alpha \cos \delta, \quad (6)$$

$$\cos 2\psi = \cos 2\alpha / \cos 2\beta, \quad (7)$$

式中 $\alpha = \arctan(E_{0y}/E_{0x})$ 。

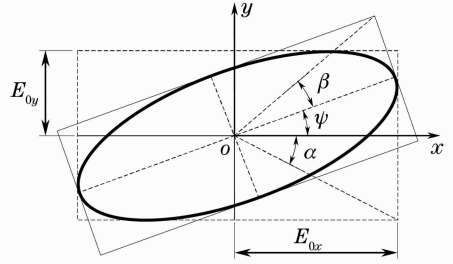


图 6 偏振态参数定义示意图

Fig. 6 Parameters of polarization

最后,当光通过偏振片^[11]时,将电矢量分别投影到偏振片的透光轴和垂直轴,垂直轴分量乘以消光比系数的平方根,再与透光轴分量合成,将得到通过偏振片后的电矢量幅值。根据(1)、(2)式计算得出最终输出信噪比。

4.3 仿真结果

根据上述仿真计算方法,仿真光偏振态变化,计算光学解调信噪比随偏振片角度的变化特性。仿真分析以 2.4 节中进行实验的某 MRLG 的实际输出光偏振态作为基准。经测试四个模式的光偏振态如图 7 所示,椭圆率角为 $\pm 38.2^\circ$,方位角均为 89° 。

该四频光经过相位延迟为 90° 的相位延迟膜,再经过透射率和反射率均为 50% 的半透半反膜,仿

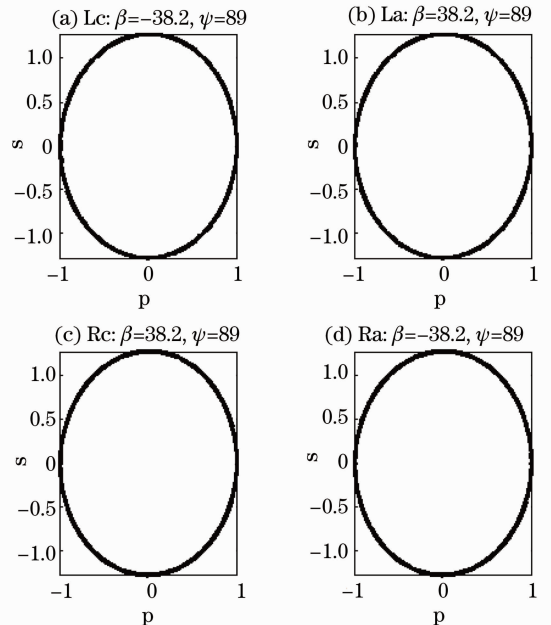


图 7 原始光偏振态示意图

Fig. 7 Original polarization

真计算得到合光棱镜一路输出光偏振态如图 8 所示,椭圆率角均为 $\pm 0.24^\circ$,且左旋模式顺、逆光方位角为 51.8° ,右旋模式光方位角为 -51.8° ,显然此时左右旋模式方位角并不垂直,夹角为 103.6° 。

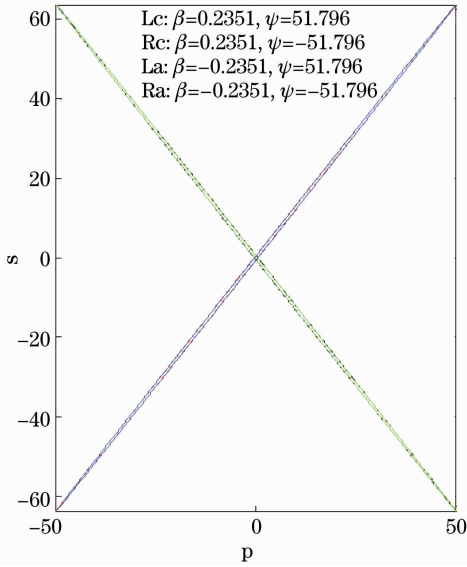


图 8 经相位延迟和半透半反膜后光偏振态示意图

Fig. 8 Polarization after phasic retarder and semipermeable mirror

根据偏振片标称消光比 1:500,进一步计算得到左旋模式信噪比随偏振片角度($36^\circ\sim 50^\circ$)的变化规律,如图 9 中“仿真结果”曲线所示。

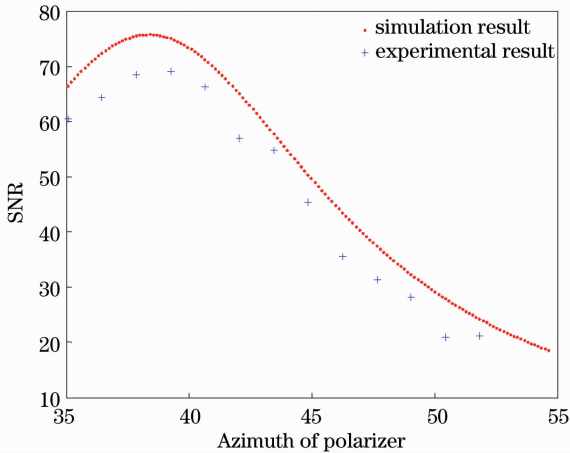


图 9 偏振片角度对信噪比影响的仿真及实验结果

Fig. 9 Results of simulation and experiment on the influence of sheet polarizer's orientation

从图 9 的仿真结果可以看出,偏振片角度为 38.2° 时对应剔除法,其信噪比明显大于角度为 51.8° 对应的提取法信噪比,结果如表 1 所示。

仿真结果显示信噪比极大值对应的偏振片角度为 38.4° ,与剔除法的 38.2° 存在微小偏差。其原因在于偏振片具有有限的消光比,按照(1)式的信噪比

定义,偏振片角度在过滤右旋模式拍频信号的同时,还要兼顾左旋模式拍频信号的提取才能获得最大信噪比。

表 1 两种分离方法的仿真与实验结果对比

Table 1 Results of both simulation and experiment by “eliminating” and “extracting”

Method	SNR	
	Simulation result	Experimental result
Extracting	26.8	22.4
Eliminating	75.7	69.2

4.4 实验验证

4.4.1 实验装置

根据上述仿真结果,对 2.3 节中测试的陀螺安装合光棱镜后进行左、右旋模式分离实验,实验装置如图 10 所示。将安装有光学解调棱镜的 MRLG 引燃,并施加稳流、稳频控制,待陀螺输出光强稳定后,输出光透过偏振片,利用光电接收器和前置放大器将光拍频信号转化为电信号,最后利用示波器检测拍频信号图像。

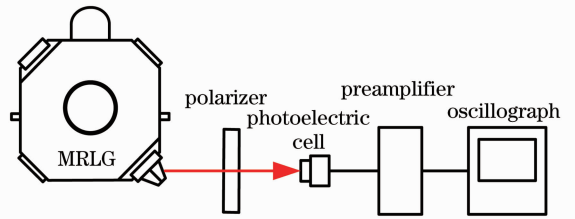


图 10 实验装置结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of experimental device

旋转偏振片,同时根据接收到图 11 所示的信号图像,计算信噪比。

$$R_{SN} = (A + B)/(A - B), \quad (8)$$

式中 A 、 B 分别为信号幅值的峰峰值和峰谷值。可以证明(8)式是符合 2.2 节中信噪比定义的,证明过程较为简单。

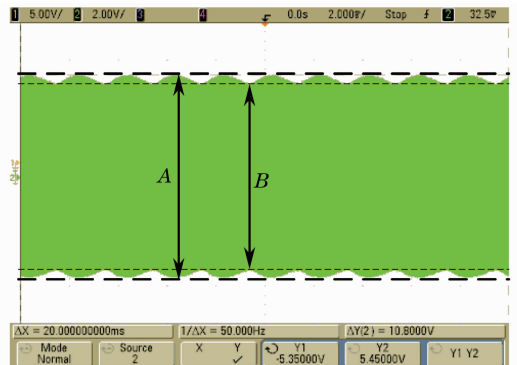


图 11 提取法获得的信号图像

Fig. 11 Signal of output by “extracting”

4.4.2 实验结果

实验中,在 $36^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 之间旋转偏振片角度,每隔 2° 测试其输出信噪比,实验结果如图9中“实验结果”所示。可以看出,实验结果与仿真结果变化趋势一致,实验结果略小于仿真结果,分析得到是由偏振片消光比出厂标称值偏大造成的。

同时测量提取法对应偏振片角度为 51.8° 的信噪比,信号图像如图11所示。剔除法对应偏振片角度为 38.2° 的信噪比,信号图像如图12所示。表1列出了两种分离方法信噪比的仿真结果与实验结果,考虑偏振片消光比引入的误差,仿真和实验的结果是吻合的。因此,充分证明了剔除法信噪比大于提取法信噪比。

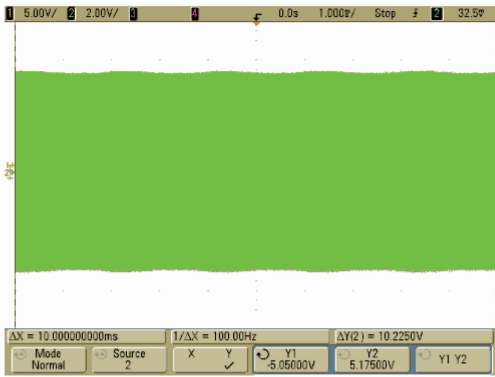


图12 剔除法获得的信号图像

Fig.12 Signal of output by “eliminating”

5 结 论

分析了MRLG输出光偏振态误差对左右模式光学解调分离效果的影响机理,利用信噪比定量描述其影响程度。通过仿真计算得出,光学解调系统中偏振片安装角度与分离后信噪比的关系,并通过实验得到了验证。同时提出了一种新的剔除法选择偏振片角度,与早期的提取法获得的信噪比对比,仿

真与实验结果均证明了剔除法优于提取法。这一结论在MRLG的工程制造中具有指导意义。

参 考 文 献

- 1 C H Volk, S C Gillespie, J G Mark, *et al.*. Multioscillator Ring Laser Gyroscopes and Their Applications [EB/OL]. http://www.es.northropgrumman.com/by_division/navigationssystem/whitepapers/assets/Multioscillator_Ring_Laser_Gyr.pdf, [2010-07-04].
- 2 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Overview of four-mode differential laser gyros [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 040005.
汪之国, 龙兴武, 王 飞. 四频差动激光陀螺综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(4): 040005.
- 3 Northrop Grumman. LN-100G Inertial Navigation System with Embedded GPS [EB/OL]. <http://132.228.182.15/solutions/ln100g-inertial-nacigation-system/index.html>, [2013-06-25].
- 4 A Fax, C Volk. The Role of NSD Technologies in Achieving Advantage in Asymmetrical Conflicts [EB/OL]. http://132.228.182.15/by-division/navigation%20systems/whitepapers/assets/NSD_Technologies_in_Achieving_.pdf, [2013-05-01].
- 5 I W Smith, T A Dorschner. Laser Gyroscope Output Optics Structure; U. S. , 4141651 [P]. [1979-02-27].
- 6 Wang Zhengping, Ruan Shunling, Sun Weimin, *et al.*. Reflecting prism-retarders with a single medium layer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 26(6): 556-560.
王政平, 阮顺龄, 孙伟民, 等. 单层介质膜反射棱镜式光学相位延迟器件研究[J]. *光子学报*, 1997, 26(6): 556-560.
- 7 D B Hall, R A Mitchell, K W Shafer. Ring Laser Gyroscope Output Optics Detection System; U. S. , 5116132 [P]. [1991-07-17].
- 8 D K Grobsky, S Lu. Partially Transparent Mirror for a Ring Laser; U. S. , 4904083 [P]. [1992-12-02].
- 9 Yang Zaifu, Yuan Xiaodong, Zhang Bin, *et al.*. The S-P anisotropy effects in differential laser gyros [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(9):1255-1260.
杨在富, 袁晓东, 张 斌, 等. 四频差动激光陀螺中的S-P各向异性效应[J]. *光学学报*, 1998, 18(9): 1255-1260.
- 10 Yan Jixiang, Wei Guanghui. *Matrix Optics* [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1995.
阎吉祥, 魏光辉. *矩阵光学*[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995.
- 11 Liao Yanbiao. *Polarized Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003.
廖延彪. *偏振光学*[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

栏目编辑: 何卓铭