

激光陀螺反射镜最佳透射率实验研究

梁可, 李龙, 陈林峰, 于文东, 韩宗虎, 张伟, 傅鑫

中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065

摘要 通过检测与计数电路可以将激光陀螺输出的光电信号进行放大、整形、鉴相, 输出与陀螺转角成正比的脉冲信号。由于激光陀螺输出的是微弱光电信号, 且检测电路存在散粒噪声和热噪声等干扰, 因此提高检测电路信噪比对保障计数电路功能正常来说至关重要。为提高检测电路信噪比, 需保证陀螺输出光功率尽可能大。根据激光器的功率输出公式推导计算了使陀螺输出光功率最大的反射镜最佳透射率, 并进行了实验验证。理论计算和实验结果均表明, 采用最佳透射率反射镜能够有效提高激光陀螺输出光功率。

关键词 激光物理; 激光陀螺; 信噪比; 最佳透射率; 输出光功率

中图分类号 V241.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0401003

Experimental Study on Optimal Transmittance of Mirror in Laser Gyro

Liang Ke, Li Long, Chen Linfeng, Yu Wendong, Han Zonghu, Zhang Wei, Fu Xin

Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract By detecting and counting the circuit, the photoelectric signal of laser gyro is amplified, shaped and the phase of it is discriminated. The pulse that are signals proportional to the rotating angle of gyro are obtained. Since the output signals of gyro are weak photoelectric ones, and shot noise and thermal noise disturbances exist in the detecting circuit, it is crucial to improve signal-noise ratio to ensure normal function of the counting circuit. To improve the signal-noise ratio of the detecting circuit, we have to guarantee that the output optical power is as large as possible. The optimal transmission of mirror for optimal optical power is derived and calculated according to the power formula of laser gyro, and experiments are followed to verify it. Both theoretical calculation and experimental results prove that, by using optimal transmittance, the output optical power of the mirror can be effectively improved.

Key words laser optics; laser gyro; signal-noise ratio; optimal transmittance; output optical power

OCIS codes 140.3460; 140.3370; 060.2800

1 引言

激光陀螺谐振腔内运行着顺、逆时针两束光, 通过光电检测设备可以将顺、逆时针光频率差转化为电信号。当陀螺相对惯性空间存在转动时, 根据萨格奈克效应^[1], 经过后续的信号处理可以得到频差和脉冲数, 从而求得瞬时转速和转动角度^[2]。

激光陀螺输出的是微弱的光信号(光电流为纳安级), 光斑直径很小(约1 mm), 其干涉条纹宽仅为0.7~1 mm。要将条纹移动信号转换成电信号, 光电管要满足光电转换的比宽度要求, 对一般陀螺而言, 光电管接收面宽约为0.3~0.5 mm; 如考虑鉴相时, 要求光电管接收面宽度更窄, 这使得光电信号很弱, 若再加上有背景光^[3]等因素影响, 条纹明暗对比度差, 光电信号就更弱^[4]。此外, 检测电路中光电二极管和放大电路存在散粒噪声和热噪声等干扰^[5], 当检测电路信噪比过低时会导致计数电路功能异常。

收稿日期: 2016-10-18; **收到修改稿日期:** 2016-12-21

基金项目: 总装备部“十三五”装备预先研究项目

作者简介: 梁可(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事零闭锁激光陀螺方面的研究。E-mail: lklk00lklk11@hotmail.com

导师简介: 韩宗虎(1961—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光陀螺的设计和研发方面的研究。

E-mail: hzh0587@facri.com

光电信号强度和激光输出光功率相关,而激光输出光功率和输出反射镜透射率相关^[6]。当透射率增大时,一方面提高了透射光的比例,有利于提高输出功率,同时却又使阈值增加,导致腔内光强下降,因此存在使谐振腔输出光功率达到极大值的反射镜最佳透射率^[7]。

本文根据激光器的功率输出公式推导计算了使陀螺输出光功率最大的反射镜最佳透射率,并进行了实验验证。理论计算和实验结果均表明,采用最佳透射率反射镜能够有效提高激光陀螺输出光功率^[8-9]。

2 激光陀螺反射镜最佳透射率推导

激光陀螺是由多普勒非均匀加宽工作物质组成的激光器,其光强输出功率 P 的表达式^[3]为

$$P = \frac{1}{2}ATI_s \left[\left(\frac{g_m}{T+a} \right)^2 - 1 \right], \quad (1)$$

式中 A 为激光束有效截面面积, T 为反射镜透射率, a 为净损耗率, I_s 为饱和光强, g_m 为陀螺增益^[6-7]。由(1)式可推导出增益表达式为

$$g_m = (T+a) \sqrt{\frac{2P}{ATI_s} + 1}. \quad (2)$$

激光陀螺增益具有经验公式^[3]:

$$g_m = \frac{l}{d} f(I), \quad (3)$$

$$f(I) = mI^2 + nI + p, \quad (4)$$

式中 l 为陀螺增益长度, d 为毛细孔直径, I 为放电电流值, m 、 n 、 p 为实验标定系数。

将(3)式代入(2)式可得到 $f(I)$ 的表达式:

$$f(I) = \frac{d}{l} (T+a) \sqrt{\frac{2P}{ATI_s} + 1}. \quad (5)$$

使用光功率计测量陀螺输出光功率 P , 在已知陀螺各参数值的条件下, 根据(5)式可以计算得到在设定放电电流下 $f(I)$ 的值。将不同放电电流下得到的 $f(I)$ 值代入(4)式, 采用最小二乘法拟合得到式中未知系数 m 、 n 、 p 的值, 再将(4)式代入(3)式可以得到不同放电电流 I 下增益 g_m 的表达式。将增益 g_m 表达式代入(1)式, 可以计算得到使输出功率 P 具有极大值的最佳透射率 T 。

3 实验方法与结果

3.1 陀螺输出光功率测量

测量步骤如下:

1) 选取实验陀螺, 接通测试设备, 设置陀螺参数使之正常工作。

2) 关闭外界光源营造暗室环境, 为防止陀螺辉光对光功率计读数产生影响, 采用黑色暗箱罩住陀螺腔体, 在暗室环境下对光功率计进行校零。

3) 在黑色暗箱上开小孔, 使陀螺反射镜输出光能够垂直入射到光功率计探头, 调整光功率计探头位置使其测量到的输出光功率最大并将其固定。

4) 通过测试设备使陀螺放电电流以 0.05 mA 的步长从 0.65 mA 变化至 1.0 mA, 待光功率计读数稳定后记录不同放电电流下陀螺反射镜输出光功率。

3.2 测试与计算结果

对实验陀螺共进行 5 组反射镜输出光功率测量实验, 光功率测量结果如表 1 所示。

实验陀螺参数如下: 反射镜透射率 $T = 120 \times 10^{-6}$, 净损耗率 $a = 226 \times 10^{-6}$, 增益长度 $l = 50$ mm, 毛细孔直径 $d = 3.4$ mm, 激光束有效截面面积 $A = 0.8$ mm²。

将实验测量得到的反射镜输出光功率值和陀螺参数代入(5)式可以计算得到在不同放电电流下 $f(I)$ 的值, 如表 2 所示。

表 1 不同放电电流下实验陀螺反射镜输出光功率

Table 1 Output optical power of experiment gyro's mirror with different discharge currents

Discharge current /mA	Optical power / μW				
	1 st experiment	2 nd experiment	3 rd experiment	4 th experiment	5 th experiment
0.65	9.03	8.89	8.88	8.77	8.64
0.70	9.80	9.66	9.64	9.53	9.38
0.75	10.54	10.39	10.37	10.25	10.10
0.80	11.25	11.08	11.07	10.95	10.78
0.85	11.93	11.76	11.74	11.62	11.44
0.90	12.59	12.42	12.40	12.27	12.09
0.95	13.24	13.06	13.04	12.90	12.71
1.00	13.89	13.70	13.69	13.54	13.35

表 2 不同放电电流下 $f(I)$ 值

Table 2 Value of $f(I)$ with different discharge currents

Discharge current /mA	$f(I) / 10^{-5}$				
	1 st experiment	2 nd experiment	3 rd experiment	4 th experiment	5 th experiment
0.65	3.0141	3.0051	3.0044	2.9973	2.9889
0.70	3.0632	3.0543	3.0531	3.0461	3.0365
0.75	3.1097	3.1003	3.0991	3.0916	3.0821
0.80	3.1536	3.1432	3.1426	3.1351	3.1246
0.85	3.1952	3.1848	3.1836	3.1763	3.1653
0.90	3.2350	3.2248	3.2236	3.2157	3.2049
0.95	3.2737	3.2630	3.2618	3.2535	3.2422
1.00	3.3120	3.3008	3.3002	3.2914	3.2802

采用最小二乘法对计算结果进行拟合可得到(4)式中不同放电电流下 $f(I)$ 的表达式如下:

第 1 组实验: $f_1(I) = -3.7822 \times 10^{-6} \cdot I^2 + 1.4705 \times 10^{-5} \cdot I + 2.2188 \times 10^{-5}$,

第 2 组实验: $f_2(I) = -3.7336 \times 10^{-6} \cdot I^2 + 1.4562 \times 10^{-5} \cdot I + 2.2172 \times 10^{-5}$,

第 3 组实验: $f_3(I) = -3.6039 \times 10^{-6} \cdot I^2 + 1.4349 \times 10^{-5} \cdot I + 2.2248 \times 10^{-5}$,

第 4 组实验: $f_4(I) = -3.7744 \times 10^{-6} \cdot I^2 + 1.4584 \times 10^{-5} \cdot I + 2.2096 \times 10^{-5}$,

第 5 组实验: $f_5(I) = -3.5308 \times 10^{-6} \cdot I^2 + 1.4103 \times 10^{-5} \cdot I + 2.2221 \times 10^{-5}$ 。

根据得到的 $f(I)$ 表达式,结合(1)式和(3)式,可得到放电电流和光强输出功率关系式。使用 Matlab 软件对不同放电电流下陀螺反射镜透射率与输出光功率关系进行仿真,结果如图 1 所示,其中反射镜最佳透射率用 TM 表示。

对仿真结果进行统计,结果如表 3 所示。

表 3 陀螺反射镜最佳透射率与最大光功率统计结果

Table 3 Results of optimal transmittance and optical power of the gyro mirror

Discharge current /mA	Optimal transmission / 10^{-5}					Optimal optical power / μW				
	1 st experiment	2 nd experiment	3 rd experiment	4 th experiment	5 th experiment	1 st experiment	2 nd experiment	3 rd experiment	4 th experiment	5 th experiment
0.65	7.9	7.8	7.8	7.8	7.8	9.73	11.02	12.28	13.49	14.62
0.70	8.2	8.2	8.2	8.2	8.1	9.62	10.90	12.14	13.33	14.45
0.80	8.6	8.6	8.6	8.5	8.5	9.62	10.89	12.12	13.31	14.44
0.90	8.9	8.9	8.9	8.8	8.8	9.52	10.79	12.02	13.20	14.31
1.00	9.2	9.1	9.1	9.1	9.1	9.43	10.67	11.87	13.04	14.14

从实验与仿真结果可以看出,在相同放电电流下 5 组实验计算得到的反射镜最佳透射率差值均在 1×10^{-6} 以内,计算结果具有较好的重复性。反射镜透射率与输出光功率关系仿真结果显示,采用最佳透射率反射镜可以提升陀螺反射镜的输出光功率。

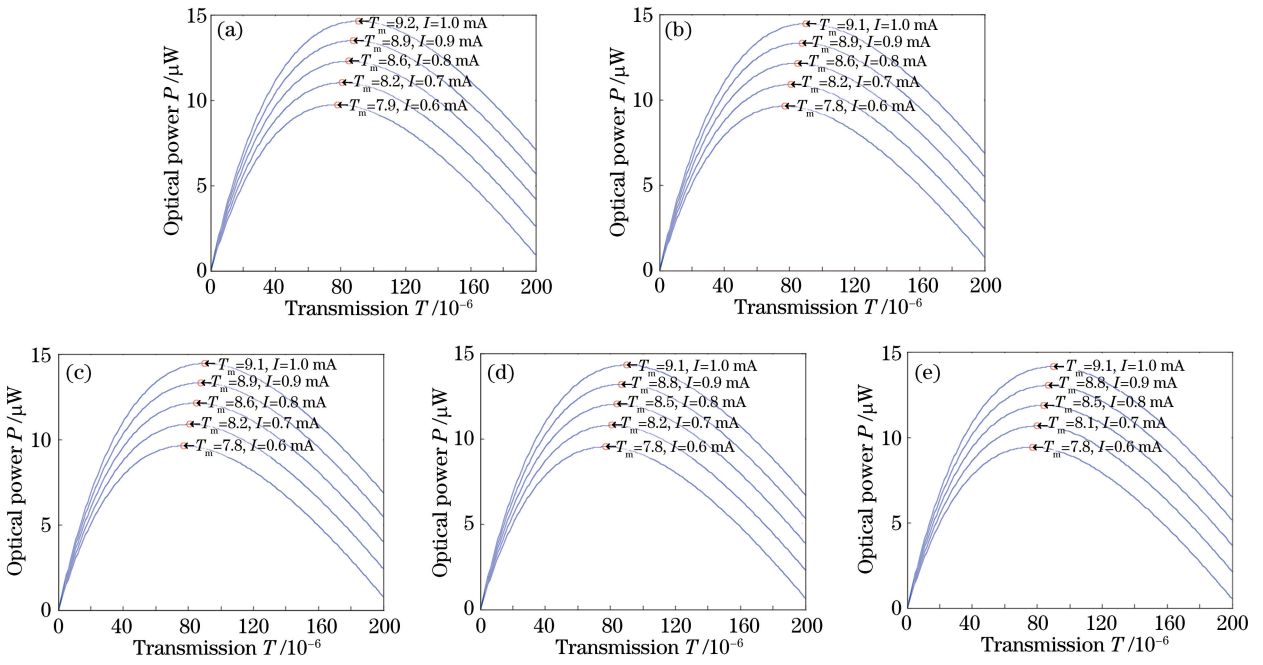


图 1 陀螺反射镜透射率与输出光功率关系仿真结果。(a)第一组实验;(b)第二组实验;
(c)第三组实验;(d)第四组实验;(e)第五组实验

Fig. 1 Simulation results of the relationship between gyro mirror's transmittance and output optical power.

(a) 1st experiment; (b) 2nd experiment; (c) 3rd experiment; (d) 4th experiment; (e) 5th experiment

3.3 最佳透射率计算结果验证

根据 3.2 节计算得到的反射镜最佳透射率分布值,选取 8.6×10^{-5} 为反射镜透射率参照值并生产出验证陀螺进行光功率测量,测量结果如表 4 所示,各个陀螺反射镜后的括号内为其透射率。

表 4 验证陀螺光功率测量结果

Table 4 Optical power measurement results of the verification gyro

Discharge current /mA	Optical power / μ W					Average (8.6×10^{-5})
	Gyro 1 (8.6×10^{-5})	Gyro 2 (8.4×10^{-5})	Gyro 3 (8.3×10^{-5})	Gyro 4 (8.8×10^{-5})	Gyro 5 (8.9×10^{-5})	
0.65	9.78	10.32	9.97	8.61	9.05	9.55
0.70	10.94	11.41	10.82	9.59	10.17	10.59
0.80	12.43	12.74	12.32	10.84	11.55	11.98
0.90	13.35	14.07	13.86	12.17	12.69	13.23
1.00	14.72	15.43	15.28	13.74	14.06	14.65

从测量结果可以看出,验证陀螺光功率测量均值相比实验陀螺具有一定提升,证明了计算得到的反射镜最佳透射率值对陀螺输出光功率的提升作用。同时观察到验证陀螺光功率测量值存在一定分布范围,推测该现象是由不同陀螺存在损耗差异引起的。

4 结 论

理论上推导了激光陀螺输出反射镜最佳透射率的实验测量方法,并进行了实验验证。理论计算和实验结果均表明,输出反射镜采用最佳透射率能够有效提高激光陀螺输出光功率。

参 考 文 献

[1] Post E J. Sagnac effect[J]. Review of Modern Physics, 1967, 39(2): 475-493.
 [2] Volk C H, Gillespie S C, Mark J G, et al. Multioscillator ring laser gyroscopes and their applications[C]. RTO AGAR Dograph 339, 1999.

- [3] Fu Xiuhua, Zhang Yushuai, Kou Yang, *et al.* Study and fabrication of multi-channel filter film in free-space laser communication system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0407001.
付秀华, 张于帅, 寇 洋, 等. 自由空间激光通信系统中多通道滤光膜的研制[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0407001.
- [4] Gao Bolong, Li Shutang. Laser gyro[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1984: 13.
高伯龙, 李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1984: 13.
- [5] Han Zonghu, Guo Xin, Chen Linfeng, *et al.* Study of laser gyro output noise characteristic[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(7): 1384-1386.
韩宗虎, 郭 昕, 陈林峰. 激光陀螺噪音特性试验研究[J]. 光子学报, 2008, 37(7): 1384-1386.
- [6] Zhu Guoli. Analysis and calculation of conversion efficiency in high-repetition-frequency Ho:YAG laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0802014.
朱国利. 高重频 Ho:YAG 激光器转换效率理论分析与计算[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0802014.
- [7] Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, *et al.* Laser principle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 170-172.
周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 170-172.
- [8] 李天初. He-Ne 放电小信号增益的电子饱和效应及其径向分布[J]. 中国激光, 1982, 9(1): 53-55.
- [9] Jiang Yanan. Ring laser gyro[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995: 47-51.
姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 47-51.