

文章编号 1004-924X(2012)08-1732-08

方波磁光调制测量在航天器对接中的应用

杨志勇*, 黄先祥, 周召发, 张志利

(第二炮兵工程大学 兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 陕西 西安 710025)

摘要:为了精确测量航天器对接过程中最终逼近段航天器间的滚转角,设计了基于方波磁光调制的滚转角测量系统。利用法拉第磁致旋光效应并结合马吕斯定律,建立了方波磁光调制后输出信号的模型;通过分析输出信号的特点,推导了输出信号与滚转角之间的关系方程;利用滚转角变化过程中输出信号的增减性组合去除了方程的增根,最终得到了基于方波磁光调制的滚转角测量模型。仿真结果表明:文中提出的方法理论测量精度高,可测量 $-90\sim 90^\circ$ 间的滚转角,优于传统方法。此外,利用方波信号调制具有数据采集简单、信号处理难度低等优势,是实现高精度大范围测量航天器间滚转角的一种新方案。

关键词:精密测量;滚转角测量;方波磁光调制;航天器对接

中图分类号:V249;TB922 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122008.1732

Application of square wave magneto-optic modulation to spacecraft docking

YANG Zhi-yong*, HUANG Xian-xiang, ZHOU Zhao-fa, ZHANG Zhi-li

(State Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory and Technology,
the Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

* Corresponding author, E-mail: yangzhiyong121@126.com

Abstract: To measure the roll angle between two spacecrafts at the last-phase of spacecraft-docking accurately, a roll angle measurement system based on square wave magneto-optic modulation was present. A model of the modulated signal was present according to the Faraday effect and Malous law, and the relationship equation between the modulated signal and the roll angle was established according to the character of modulated signal. The combination of the variation trend of the modulated signal was used to delete the extraneous roots of the equation, then the roll angle measurement model based on square wave magneto-optic modulation was acquired. Simulation results indicate that the new method has higher measurement precision, and the measurement scale is $-90\sim 90^\circ$, wider than that of the traditional method. Furthermore, the new method shows advantage on data acquisition and data process. In conclusion, the method can provide a new reference for measuring the roll angle between spacecrafts in higher precision and wider scale for spacecraft docking.

收稿日期:2012-06-08;修订日期:2012-07-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41174162)

Key words: precision measurement; roll angle measurement; square wave magneto-optic modulation; spacecraft docking

1 引言

“神舟八号”与“天宫一号”在太空的交会对接成功,标志着我国载人航天计划又向前迈进了一大步,但是与美国、俄罗斯等国家相比,我国仍然存在着一定的差距。就航天器对接过程中最终逼近段航天器间的相对位置姿态测量而言,现在普遍采用基于 CCD 相机的计算机视觉测量技术,即目标航天器上安装数量有限、几何尺寸及形状已知的特征点,在追踪航天器上安装 CCD 相机,通过对特征点在 CCD 相机上所成图像的分析处理得到航天器间的相对位置姿态。国内外专家学者针对这个问题已经开展了大量的研究工作,根据使用的 CCD 相机数量,基于 CCD 相机的计算机视觉测量技术可以简单地分为单目视觉法、双目视觉法、三目视觉法,这些方法各有利弊^[1-5]。为了更加精确测量航天器间存在的滚转角,本文利用法拉第磁致旋光效应,设计了基于方波磁光调制偏振光的航天器间滚转角测量系统。

针对磁光调制在无机机械连接的设备间滚转角测量中的应用,中国科学院西安光学精密机械研究所的高立民等已经研制了基于正弦波磁光调制的滚转角测量系统样机,但是此系统测量精度不高、测量范围有限^[6-9];西安第二炮兵工程大学近两年也针对正弦波磁光调制的滚转角测量系统展开了以提高测量精度、扩大测量范围为目的的研究^[10-13]。文献[10]虽然能够提高系统测量精度,但是某些局部点在精确测量时操作性差;文献[11]在小角度范围内测量时精度不高;文献[12]能够提高测量范围,但是测量精度不高,文献[13]只是扩大了滚转角的测量范围;文献[14-16]仅仅运用计算机模拟的方式,采用利萨如图形研究了方波磁光调制前后信号的关系,但没有将其应用到滚转角测量系统中;文献[17]虽然研究了方波调制在角度测量中的应用,但是建立的模型存在

误差,测量范围有限。

为了能够在大角度范围内高精度测量滚转角,本文首次将方波磁光调制引入到航天器间滚转角测量系统中。利用磁致旋光效应并结合马吕斯定律,建立了方波调制后的输出信号模型;通过分析方波调制后输出信号的特点,建立了输出信号与滚转角之间的关系方程;根据输出信号中两个直流分量增减性的组合解决了方程求解过程中的增根问题,并最终得到了滚转角的精确测量模型。

2 原理推导

航天器间滚转角测量原理如图 1 所示。追踪航天器上安装有发射器,目标航天器上安装有接收器。发射器中的激光器发出的激光经过起偏器后成为线偏振光,当线偏振光通过调制器中磁致旋光玻璃时,在方波激励信号产生的磁场作用下产生法拉第磁致旋光效应;接收器接收到磁光调制后的信号,经光电转换等一系列处理后得到与滚转角相关的电压信号,经过一定的运算获得滚转角;目标航天器在此滚转角信息的控制下逐渐转动,达到与追踪航天器精确对准。

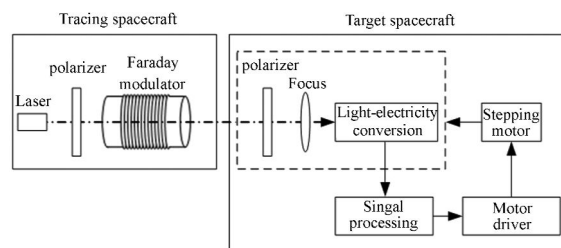


图 1 航天器间滚转角测量原理图

Fig. 1 Measurement principle of roll angle between spacecrafts

设方波调制信号 $f(t)$ 为:

$$f(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, T/2) \\ -1, & t \in [T/2, T) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: T 为方波调制信号的周期, t 是时间变化量。

设 θ 为方波磁光调制过程中光波偏振面的旋转角, 存在:

$$\theta = \frac{1}{2} m_f f(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} m_f, & t \in [0, T/2) \\ -\frac{1}{2} m_f, & t \in [T/2, T) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: m_f 为调制度, 单位为 rad。

根据马吕斯定律, 结合系统工作原理, 线偏振光穿过方波信号调制器后, 经光电转换、放大处理后的信号为:

$$u = k u_0 \sin^2(\alpha + \theta), \quad (3)$$

式中: $u_0 = \eta \cdot I_0$, I_0 代表追踪航天器上发射器发出的激光经过起偏器后的出射光强, η 称为量子效率, k 代表电路的放大倍数, α 为航天器间的滚转角。

将光波偏振面的旋转角 θ 代入式(3), 并经过二倍角公式转换后得到:

$$u = \frac{k u_0}{2} [1 - \cos(2\alpha + 2\theta)] = \begin{cases} \frac{k u_0 [1 - \cos(2\alpha + m_f)]}{2}, & t \in [0, T/2) \\ \frac{k u_0 [1 - \cos(2\alpha - m_f)]}{2}, & t \in [T/2, T) \end{cases}. \quad (4)$$

当滚转角为某一固定值时, 方波磁光调制后的输出信号为两个幅值不等、交替出现、与调制信号同频的方波信号, 以 $m_f = 0.0087 \text{ rad}$, $k = 10$, $u_0 = 1 \text{ V}$ 为例, 具体如图 2 所示。

采集调制后的信号, 并令 $u_1 = \frac{k u_0 [1 - \cos(2\alpha + m_f)]}{2}$, $u_2 = \frac{k u_0 [1 - \cos(2\alpha - m_f)]}{2}$ 。

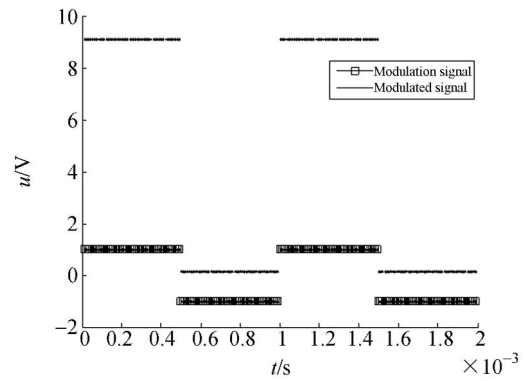
为了消除 k, u_0 对测量结果的影响, 令 u_1/u_2 得:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{1 - \cos(2\alpha + m_f)}{1 - \cos(2\alpha - m_f)} = \frac{1 - \cos(2\alpha) \cos(m_f) + \sin(2\alpha) \sin(m_f)}{1 - \cos(2\alpha) \cos(m_f) - \sin(2\alpha) \sin(m_f)}. \quad (5)$$

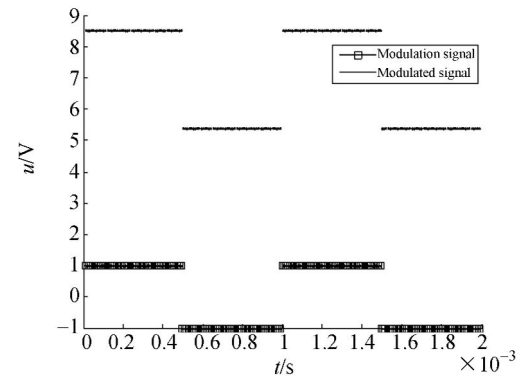
将二倍角公式 $\sin(2\alpha) = \frac{2 \tan \alpha}{1 + \tan^2 \alpha}$, $\cos(2\alpha) = \frac{1 - \tan^2 \alpha}{1 + \tan^2 \alpha}$ 代入式(5)并化简后得到方程:

$$(u_1 - u_2)[1 + \cos(m_f)] \tan^2 \alpha - 2 \sin(m_f) (u_1 + u_2) \tan \alpha + (u_1 - u_2)[1 - \cos(m_f)] = 0, \quad (6)$$

$$\Delta = b^2 - 4ac = 16 u_1 u_2 \sin^2(m_f). \quad (7)$$



(a) Azimuth = 50°



(b) Azimuth = 10°

图 2 滚转角分别为 50°, 10° 时调制前后信号对比图
Fig. 2 Comparison between modulation signals with azimuths of 50° and 10°, respectively

当滚转角在 $-90 \sim 90^\circ$ 变化时, 经计算得知, $u_1 \geq 0$, $u_2 \geq 0$, $\sin^2(m_f) > 0$, 所以 $\Delta \geq 0$ 恒成立, 方程始终有解:

$$\tan \alpha = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{\sin(m_f)(u_1 + u_2 \pm 2\sqrt{u_1 u_2})}{(u_1 - u_2)[1 + \cos(m_f)]}, \quad (8)$$

由此得到滚转角的计算公式:

$$\alpha' = \arctan \left[\tan(m_f) \frac{(\sqrt{u_1} \pm \sqrt{u_2})^2}{(\sqrt{u_1} + \sqrt{u_2})(\sqrt{u_1} - \sqrt{u_2})} \right]. \quad (9)$$

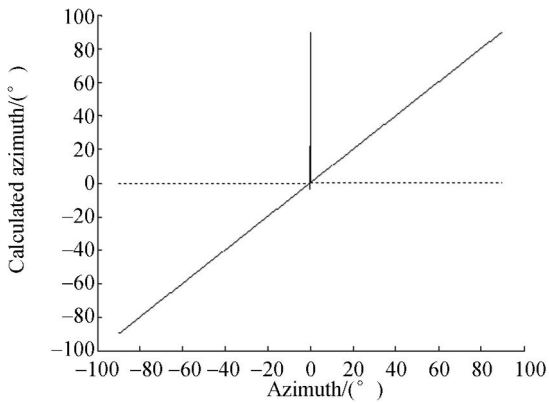
3 测量模型的确定

3.1 理论测量模型的确定

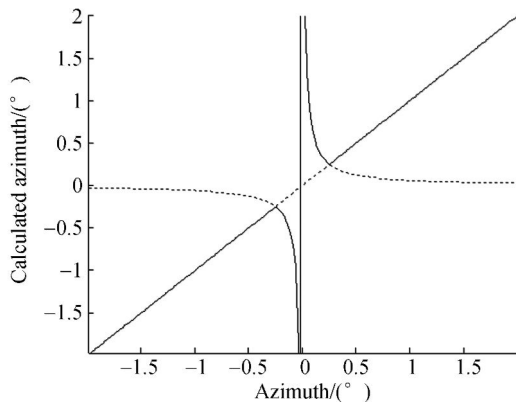
对于测量得到的每一组直流信号 u_1, u_2 , 根据式(9)可计算得到两个滚转角计算值 α' , 而实际情况中二者应该是一一对应关系, 可见利用式(9)

计算滚转角产生了增根,有必要对方程的根进行分析讨论以去除增根。

图 3 是方程根的分布情况,其中图 3(a)是 $-90\sim 90^\circ$ 的全局图,图 3(b)为 $-2\sim 2^\circ$ 的局部图,图中横坐标为滚转角真值 α ,纵坐标为滚转角计算值 α' ,图中实线为式(9)取正根的情况,虚线为式(9)取负根的情况。



(a) $-90\sim 90^\circ$



(b) $-2\sim 2^\circ$

图 3 方程根的分布情况

Fig. 3 Distribution of equation's roots

根据图 3 的绘图规则,理论上滚转角真值 α 与计算值 α' 应该是一一对应关系,且二者之间应该成斜率为 1 的线性关系,由此可以判断出图 3 中斜率为 1 的直线应该是方程的根,它明显被分为 3 部分,分界点在于:

$$\frac{(\sqrt{u_1} + \sqrt{u_2})^2}{(\sqrt{u_1} + \sqrt{u_2})(\sqrt{u_1} - \sqrt{u_2})} = \frac{(\sqrt{u_1} - \sqrt{u_2})^2}{(\sqrt{u_1} + \sqrt{u_2})(\sqrt{u_1} - \sqrt{u_2})} \quad (10)$$

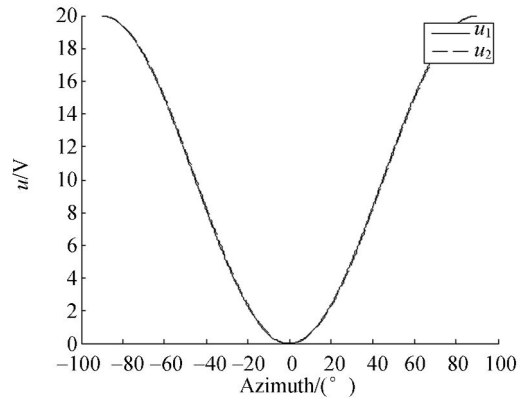
解得分界点为 $\pm \frac{1}{2} m_f$,所以式(9)在 $-90\sim 90^\circ$ 的根应该为:

$$\alpha' = \begin{cases} \arctan \left[\tan(m_f) \cdot \frac{\sqrt{u_1} - \sqrt{u_2}}{\sqrt{u_1} + \sqrt{u_2}} \right], & \alpha \in \left[-\frac{1}{2} m_f, \frac{1}{2} m_f \right] \\ \arctan \left[\tan(m_f) \cdot \frac{\sqrt{u_1} + \sqrt{u_2}}{\sqrt{u_1} - \sqrt{u_2}} \right], & \text{其它} \end{cases} \quad (11)$$

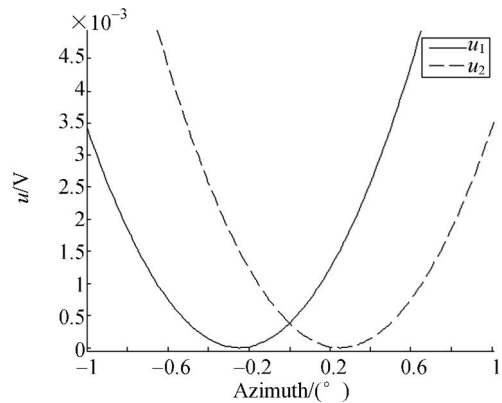
3.2 实际测量模型的确定

滚转角真值 α 是被测值,不可能事先获得真值 α 的信息并判断 α 是否在 $\left[-\frac{1}{2} m_f, \frac{1}{2} m_f \right]$ 范围内,所以式(11)的实际操作性较差。通过对磁光调制后直流信号 u_1, u_2 的分析发现,可以根据直流信号 u_1, u_2 的变化趋势判断出滚转角所处的区间,从而判断出方程的根。

当滚转角在 $-90\sim 90^\circ$ 变化时, u_1, u_2 的变化曲线如图 4 所示,其中图 4(a)为全局图,图 4(b)为 $-1\sim 1^\circ$ 的局部图。



(a) $-90\sim 90^\circ$



(b) $-1\sim 1^\circ$

图 4 u_1, u_2 的变化曲线

Fig. 4 Curves of u_1 and u_2

从图 4 可以明显看出 u_1, u_2 都存在零点: $u_1 = 0$ 时, 解得 $\alpha = -\frac{1}{2}m_f$; $u_2 = 0$ 时, 解得 $\alpha = \frac{1}{2}m_f$ 。

从而确定在 $-90 \sim 90^\circ$ 内 u_1, u_2 的变化趋势为:

$\alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}, -\frac{1}{2}m_f\right]$ 时, u_1 为减函数;

$\alpha \in \left[-\frac{1}{2}m_f, \frac{\pi}{2}\right]$ 时, u_1 为增函数。

$\alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{1}{2}m_f\right]$ 时, u_2 为减函数;

$\alpha \in \left[\frac{1}{2}m_f, \frac{\pi}{2}\right]$ 时, u_2 为增函数。

二者结合可得:

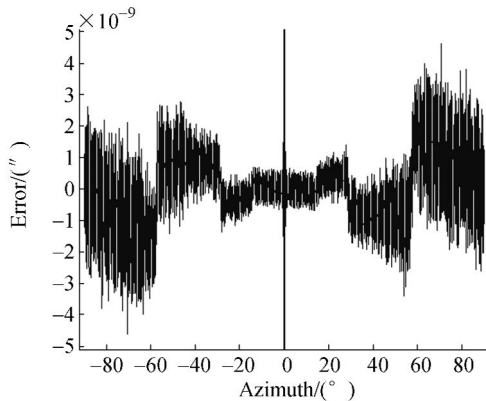
$$\alpha' = \begin{cases} \arctan \left[\tan(m_f) \cdot \frac{\sqrt{u_1} - \sqrt{u_2}}{\sqrt{u_1} + \sqrt{u_2}} \right], & u_1 \text{ 与 } u_2 \text{ 变化趋势相反} \\ \arctan \left[\tan(m_f) \cdot \frac{\sqrt{u_1} + \sqrt{u_2}}{\sqrt{u_1} - \sqrt{u_2}} \right], & u_1 \text{ 与 } u_2 \text{ 变化趋势相同} \end{cases} \quad (12)$$

4 仿真结果分析

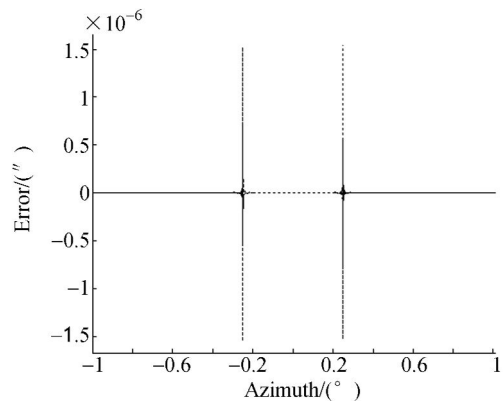
在实际测量过程中, 系统测量精度受硬件反正切计算能力、信号采集电路采样精度等多种因素影响。这里以 $m_f = 0.0087 \text{ rad}$, $k = 10$, $u_0 = 1 \text{ V}$ 为例, 通过仿真计算研究方法本身的理论测量精度。图 5 所示为计算得到的滚转角真值 α 在 $-90 \sim 90^\circ$ 变化时的系统理论测量误差分布情况。

图 5(a) 是对主要误差放大的结果, 可见主要测量误差多控制在 $(3 \times 10^{-9})''$ 内, 测量精度高; 同时可见理论测量范围达 $-90 \sim 90^\circ$, 测量范围广。

图 5(b) 是滚转角在 $-1 \sim 1^\circ$ 时误差信号分布的情况



(a) 误差放大结果
(a) Magnified error



(b) $-1 \sim 1^\circ$ 的误差分布
(b) Error ranges from $-1^\circ \sim 1^\circ$

图 5 系统测量误差

Fig. 5 Distribution of system measurement error

况, 可以明显看出滚转角计算值 α' 被分为 3 部分, $\alpha = \pm \frac{1}{2}m_f$ 为分界点, 并且此处的测量误差略有增加, 但是仍然控制在 $(1.5 \times 10^{-6})''$ 以内。

本方法理论测量误差与正弦波磁光调制的滚转角测量方法测量误差的比较如图 6 所示。由图可以明显看出, 文中提出的方法在测量精度方面远远高于传统方法, 测量范围比传统方法扩大了一倍。

通过仿真结果可以看出, 与传统的正弦波磁光调制方法相比, 本方法存在两个优点: (1) 正弦

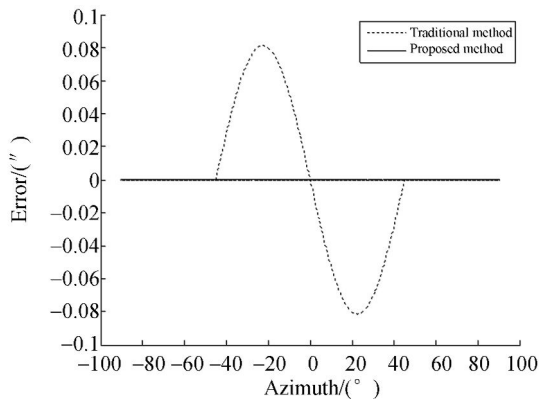


图6 新旧方法的测量误差对比图

Fig. 6 Comparison of measurement error between traditional and proposed methods

波磁光调制后信号成分复杂,处理难度大,而方波磁光调制后信号为同频的方波信号,容易处理;

(2)传统方法中要用取样积分电路对调制后信号

参考文献:

- [1] 张庆君,胡修林,叶斌,等. 基于双目视觉的航天器间相对位置和姿态的测量方法[J]. 宇航学报,2008,29(1):156-171.
ZHANG Q J, HU X L, YE B, *et al.*. Binocular vision-based relative position and attitude determination between spacecrafts [J]. *Journal of Astronautics*, 2008,29(1):156-171. (in Chinese)
- [2] 丁尚文,王惠南,刘海颖,等. 基于对偶四元数的航天器交会对接位姿视觉测量算法[J]. 宇航学报,2009,30(6):2145-2150.
DING SH W, WANG H N, LIU H Y, *et al.*. Algorithm of vision measure for relative position and pose of RVD spacecrafts based on dual-quaternion [J]. *Journal of Astronautics*, 2009,30(6):2145-2150. (in Chinese)
- [3] 钱萍,王惠南. 基于三目视觉测量的航天器交会对接相对位姿确定算法[J]. 宇航学报,2010,31(6):1576-1582.
QIAN P, WANG H N. A trinocular vision measurement based on relative attitude and position determination algorithm for RVD between spacecrafts [J]. *Journal of Astronautics*, 2010,31(6):1576-1582. (in Chinese)
- [4] HO C J, MCCLAMROCHN H. Automatic spacecraft docking using computer vision-based on guidance and control techniques [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1993,16(2):281-288.
- [5] PHILIP N K, ANANTHASAYANAMMR. Relative position and attitude estimation and control schemes for the final phase of an autonomous docking mission of spacecraft [J]. *Acta Astronautica*, 2003,52:511-522.
- [6] 董晓娜,高立民,申小军,等. 利用磁光调制实现方位角垂直传递[J]. 光子学报,2001,30(11):1389-1391.
DONG X N, GAO L M, SHEN X J, *et al.*. Passing azimuth vertically with the technique of magneto-optic modulation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001,30(11):1389-1391. (in Chinese)
- [7] 申小军,马彩文,董晓娜,等. 一种无机械连接的方位测量同步系统[J]. 光子学报,2001,30(7):892-896.
SHEN X J, MA C W, DONG X N, *et al.*. A kind of disconnected mechanically azimuth measuring and synchronizing system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001,30(7):892-896. (in Chinese)
- [8] 吴易明,高立民,陈良益,等. 基于偏振光的精密角度测量及传递技术[J]. 红外与激光工程,2008,37(3):525-529.

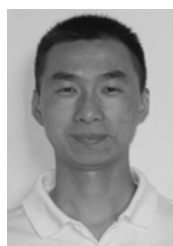
中的极值点采样,对采集电路要求较高,并且采集过程中需要追踪航天器上的正弦波调制信号;本方法中仅需要一般的采集电路对方波信号采样即可,降低了实现难度。

5 结 论

本文从准确测量航天器对接过程中最终逼近段航天器间的滚转角出发,首次将方波磁光调制引入到航天器间的滚转角测量系统中,提出并建立了基于方波磁光调制的滚转角测量模型。仿真结果表明,文中提出的方法理论测量精度高,可测量 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 间的回转角。优于传统方法。此外,与传统正弦波磁光调制相比,利用方波信号调制还存在数据采集简单、信号处理难度低等优势,这为实现航天器间滚转角高精度大范围测量提供了一种新方案。

- WU Y M, GAO L M, CHEN L Y, *et al.*. Precision measurement and transmission of azimuthal information based on polarization modulated light [J]. *Infrared and laser Engineering*, 2008, 37(3): 525-529. (in Chinese)
- [9] 郑宏志, 马彩文, 吴易明, 等. 无机械连接方位角测量系统中磁光调制的温度适应性研究[J]. 光子学报, 2004, 33(5): 638-640.
- ZHENG H ZH, MA C W, WU Y M, *et al.*. Temperature adaptability of magneto-optic modulation in a disconnect mechanically azimuth measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(5): 638-640. (in Chinese)
- [10] 杨志勇, 黄先祥, 周召发, 等. 基于磁光调制偏振光的方位角失调角高精度测量新方法[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1112008.
- YANG ZH Y, HUANG X X, ZHOU ZH F, *et al.*. New high-precision method of measuring spatial azimuth based on magneto-optic modulation polarized light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1112008. (in Chinese)
- [11] 杨志勇, 黄先祥, 周召发, 等. 利用原始光强信号实现方位角失调角高精度传递新方法[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0112006.
- YANG ZH Y, HUANG X X, ZHOU ZH F, *et al.*. New high-precision transmission method of spatial azimuth with original light intensity signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0112006. (in Chinese)
- [12] 周召发, 杨志勇, 张志利. 一种基于正弦波磁光调制的方位角大范围方位自动对准方法[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0408002.
- ZHOU ZH F, YANG ZH Y, ZHANG ZH L. Automatic alignment method based on sine wave magneto-optic modulation in spatial wide-angle scale [J]. *Chinese J. Laser*, 2012, 39(4): 0408002. (in Chinese)
- [13] 杨志勇, 周召发, 张志利. 基于正弦波磁光调制的方位角失调角传递技术的改进[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 692-698.
- YANG ZH Y, ZHOU ZH F, ZHANG ZH L. Improvement of transmitting spatial azimuth based on sine wave magneto-optic modulation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 692-698. (in Chinese)
- [14] 李永安, 李小俊, 李书婷, 等. 磁光调制的模拟与特性分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2007, 37(5): 719-723.
- LI Y A, LI X J, LI SH T, *et al.*. Analysis on magneto-optical modulation by modeling [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2007, 37(5): 719-723. (in Chinese)
- [15] 李永安, 李小俊, 白晋涛. 正弦波与方波磁光调制的比较分析[J]. 光子学报, 2007, 36(s): 192-197.
- LI Y A, LI X J, BAI J T. Analyze on sine wave and rectangular wave magneto-optical modulation by comparing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(s): 192-197. (in Chinese)
- [16] 李小俊, 李永安, 汪源源, 等. 基于矩形波信号的磁光调制偏振测量方法[J]. 光学学报, 2008, 28(8): 1533-1537.
- LI X J, LI Y A, WANG Y Y, *et al.*. Magneto-optical modulation method for polarization measurement based on rectangular wave signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1533-1537. (in Chinese)
- [17] SHI G L, CHANG X Y, EN Y Z, *et al.*. Compact optical roll-angle sensor with large measurement range and high sensitivity [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(3): 242-244.

作者简介:



杨志勇(1983—),男,河北保定人,博士研究生,2006年、2009年于第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士学位,主要从事定位定向与基准传递方面的研究。
E-mail: yangzhiyong121@126.com



黄先祥(1940—),男,江苏如东人,中国工程院院士,教授,博士生导师,主要从事兵器发射理论与技术方面的研究。



周召发(1973—),男,重庆人,副教授,硕士生导师,1996年、2002年、2007年于第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事定位定向与基准传递方面的研究。E-mail: zzftxy@163.com



张志利(1966—),男,河南濮阳人,教授,博士生导师,1988年、1991年、2001年于第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事兵器发射理论与技术方面的研究。E-mail: zhang-zl@126.com

●下期预告

1 m 望远镜主反射镜的支撑和装配方法

韩光宇^{1,2},曹立华^{1,2},高云国¹,乔健¹,薛向尧¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 长春理工大学,吉林 长春 130022)

大口径光学望远镜中主反射镜的支撑精度,直接影响光电探测设备的整机性能,合理的主镜支撑设计和装调是保证主镜面形精度的重要保障。本文根据光学系统对口径 $\Phi 1\ 000\ \text{mm}$ 主镜的支撑精度要求和光电设备中主镜的使用情况,采用轴向和径向组合支撑的结构形式实现对主镜的支撑,通过有限元法对支撑位置进行理论分析计算。在轴向 18 点浮动支撑、径向 3 点柔性支撑的情况下,主镜能够达到较高的面形精度。当传统装调工艺不能达到理想面形精度时,探索了新的主镜装调方法,用干涉仪对带有支撑状态下的主镜实时测量并进行修磨,使主镜在装配完成后,达到 $\lambda/18$ 的面形精度。该方法不仅达到了本项目的指标要求,同时为更大口径主镜的装调,提供了一种新的思路。