

基于三角波磁光调制的空间方位信息测量系统

杨志勇 蔡 伟 伍樊成

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 为了提高传统基于正弦波磁光调制的方位测量系统的精度,通过改变调制信号波形的方式提高系统测量精度,将三角波磁光调制引入了方位测量系统中,提出了基于三角波磁光调制的方位测量方法。建立了三角波调制信号模型,并根据法拉第磁致旋光效应和马吕斯定律推导出了调制后信号模型;通过分析调制后信号特点,掌握了调制后信号中与方位角相关的信息;利用取样积分电路采集了调制后交流信号中横坐标不变的极值点,并根据其与方位角的关系,建立了方位角测量模型。仿真分析以及与传统方法的对比表明:两种方法理论测量范围相当,但是三角波磁光调制方法的理论测量精度较高,这为实现方位角高精度测量提供了一种新方案,具有一定的指导意义。

关键词 测量;方位角;三角波;磁光调制

中图分类号 TH741 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s112003

Azimuth Measurement System Based on Triangle Wave Magneto-Optical Modulation

Yang Zhiyong Cai Wei Wu Fancheng

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

Abstract In order to improve the measurement precision of the traditional azimuth measurement system theoretically, as the new modulation signal, triangle wave is introduced into the system, and the method of measuring azimuth based on triangle wave magneto-optical modulation is present. In the new method, the model of modulation signal is present, and the model of the signal from modulator is present too according to the Faraday effect and Malous law. The signal from modulator is analyzed, its extremums is detected, the relationship between azimuth and extremums is present, and then the model of measuring azimuth is established. The measurement precision and scale of the new method is analyzed, simulation results show that the measurement precision of the new method is higher than the traditional one, and their measurement scale is same, it provides a new scheme to measuring azimuth in higher-precision.

Key words measurement; azimuth; triangle wave; magneto-optical modulation

OCIS codes 120.2130; 120.4640; 120.6085; 330.1710

1 引 言

在航天器交会对接过程中需要实时测量目标航天器与追踪航天器之间的位置姿态,在航天器编队指挥控制中需要测量不同航天器之间的相互位置,而在军用方位信息高精度传递中需要事先精密测量无机械连接的设备间的方位角,可见在众多领域均需要高精度测量无机械连的设备之间的方位信息^[1-3]。目前而言,能够实现上述目的主要方法是利用物理光学方法中光的偏振特性来测量不同设备间的方位信息^[4],其具体方法有电光调制法和磁光调制法,但是电光调制需要较高的调制电压、安全性差^[5-6],磁光调制法已经有了研究基础。

中国科学院西安光学精密机械研究所已经研制出了基于正弦波磁光调制的无机械连接的设备间的方位测量系统,但是针对该系统存在的问题,他们一直在进行研究^[7-12];陆卫国等^[12-16]针对正弦波磁光调制的方

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-02

作者简介: 杨志勇(1983-),男,博士,讲师,主要从事定位定向与基准传递方面的研究。E-mail: yangzhiyong121@126.com

位测量系统也展开了一系列提高测量精度、扩大测量范围的研究,文献[13]整体而言能够提高系统测量精度,但是在某些局部点精密测量时可操作性较差,文献[14]在小角度范围内测量时精度不高,文献[15]能够扩大系统测量范围,但是测量精度没有明显提高,文献[16]重点在于通过引入二倍角公式扩大系统测量范围;南京邮电大学最近也在研究如何扩大方位角测量范围的问题^[17]。

为了提高系统的方位测量精度,本文改变了调制信号的波形,提出了基于三角波磁光调制的方位测量方法。将三角波磁光调制引入方位测量系统,建立了三角波调制信号的模型,利用法拉第磁致旋光效应和马吕斯定律建立了调制后的信号模型,通过对调制后信号的成分分析,发现了调制后交流(AC)信号中极值点与方位角的关系,从而推导建立了三角波磁光调制的方位测量模型。

2 原理概述

图1为方位测量系统原理图,上仪器中激光器发出的激光经过起偏器后成为线偏振光,当它通过调制器中磁致旋光玻璃时,在三角波调制信号产生的磁场作用下,产生法拉第磁致旋光效应,光波偏振面发生旋转,实现了光信号调制。下仪器接收到调制后的光信号,经过检偏、聚焦、光电转换、放大等一系列处理得到与方位角相关的电压信号。同时上仪器的三角波调制信号以红外的形式传递到下仪器,与下仪器中的取样积分电路配合采集处理后的电压信号,并经过一定的运算得到上、下仪器之间的方位信息。

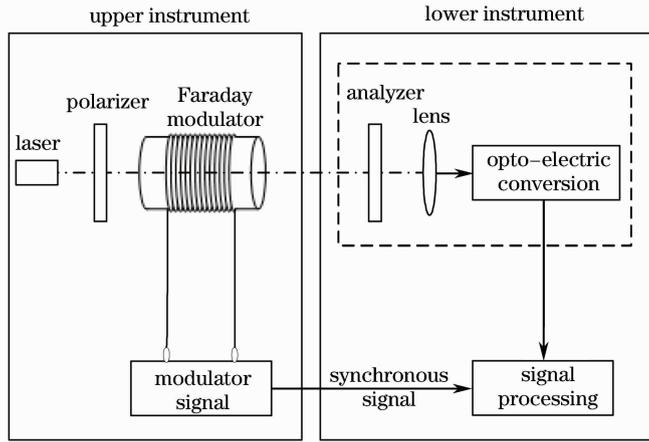


图1 方位测量系统原理

Fig.1 Principle of azimuth measurement system

设三角波调制信号 $f(t)$ 为

$$f(t) = \begin{cases} \frac{4}{T}t, & t \in [0, T/4] \\ -\frac{4}{T}t + 2, & t \in [T/4, 3T/4] \\ \frac{4}{T}t - 4, & t \in [3T/4, T] \end{cases} \quad (1)$$

式中 T 为三角波信号的周期, t 为时间变化量。

设 θ 为调制过程中光波偏振面的旋转角, 存在

$$\theta = \frac{1}{2}m_f f(t), \quad (2)$$

式中 m_f 为调制度, 单位为 rad, 一般是一个常数。

根据法拉第磁致旋光效应、马吕斯定律并结合系统工作原理, 得到磁光调制后的光信号经光电转换、放大后的电压信号

$$u = ku_0 \sin^2(\alpha + \theta), \quad (3)$$

式中 k 是电路的放大倍数, $u_0 = \eta \cdot I_0$, I_0 为激光器发出的激光经过起偏器后的出射光强信号, η 为量子效率,

α 为上、下仪器之间的方位角。

将(3)式展开得到

$$u = ku_0 (\sin^2 \theta \cos^2 \alpha + \cos^2 \theta \sin^2 \alpha + 2 \sin \theta \cos \theta \sin \alpha \cos \alpha). \quad (4)$$

将 $\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta$, $\theta = \frac{1}{2} m_f f(t)$ 代入(4)式得到

$$u = ku_0 \left\{ \sin^2 \alpha + \sin^2 \left[\frac{1}{2} m_f f(t) \right] \cos 2\alpha + \sin \left[\frac{1}{2} m_f f(t) \right] \cos \left[\frac{1}{2} m_f f(t) \right] \sin 2\alpha \right\}. \quad (5)$$

由于调制信号 $f(t)$ 为分段函数,为公式推导方便,假设 $f(t) = \pm \frac{4}{T}t + m$, 其中 $m = -4, 0, 2$, 此时

$$\sin \left[\frac{1}{2} m_f f(t) \right] = \pm \sin \left(\frac{2m_f}{T}t \right) \cos \left(\frac{m}{2} m_f \right) + \cos \left(\frac{2m_f}{T}t \right) \sin \left(\frac{m}{2} m_f \right), \quad (6)$$

$$\cos \left[\frac{1}{2} m_f f(t) \right] = \cos \left(\frac{2m_f}{T}t \right) \cos \left(\frac{m}{2} m_f \right) \mp \sin \left(\frac{2m_f}{T}t \right) \sin \left(\frac{m}{2} m_f \right). \quad (7)$$

从 $\sin \left[\frac{1}{2} m_f f(t) \right]$, $\cos \left[\frac{1}{2} m_f f(t) \right]$ 的展开式可以看出, $\sin \left(\frac{2m_f}{T}t \right)$ 中一定不含有常数项; 只有在个别偶然情况下, 仪器调制度 m_f 、调制信号周期 T 组成的系数 $\frac{2m_f}{T}$ 为偶数时 $\cos \left(\frac{2m_f}{T}t \right)$ 才含有常数项, 绝大部分情况下 $\frac{2m_f}{T}$ 为非偶数, 因此 $\cos \left(\frac{2m_f}{T}t \right)$ 在绝大部分情况下不含有常数项; 且 m 也存在一定的变化, 所以一般情况下 $\sin \left[\frac{1}{2} m_f f(t) \right]$, $\cos \left[\frac{1}{2} m_f f(t) \right]$ 均为 t 的函数且不含有常数项。

当方位角 α 不变而时间变量 t 变化时, (5) 式中仅有 $ku_0 \sin^2 \alpha$ 是恒量, 所以系统中磁光调制后的信号中直流分量为

$$u_d = ku_0 \cdot \sin^2 \alpha = \frac{ku_0}{2} (1 - \cos 2\alpha), \quad (8)$$

交流分量为

$$u_a = u - u_d = \frac{ku_0}{2} \{ \cos 2\alpha - \cos 2\alpha \cdot \cos [m_f f(t)] + \sin 2\alpha \cdot \sin [m_f f(t)] \}. \quad (9)$$

假设函数 $f(t)$ 连续可导, 存在导数 $f'(t)$, 当下仪器停在某一固定位置时, 方位角为一固定值, 此时令 $\frac{du_a}{dt} = 0$, 可得

$$\frac{ku_0}{2} \cdot m_f \cdot f'(t) \cdot \{ \cos 2\alpha \cdot \sin [m_f f(t)] + \sin 2\alpha \cdot \cos [m_f f(t)] \} = 0. \quad (10)$$

当 $\cos 2\alpha \cdot \sin [m_f f(t)] + \sin 2\alpha \cdot \cos [m_f f(t)] = 0$ 成立时, $f(t) = \frac{2n\pi - 2\alpha}{m_f}$ ($n = 0, 1, \dots$), 此时交流信号存在极值点 u_{aa} , 结合(1)式可知, 此时极值点 u_{aa} 的横坐标 t 是与方位角 α 相关的。随着下仪器的转动, 方位角 α 时刻在变化, 极值点 u_{aa} 的横坐标 t 也是在移动的, 所以极值点 u_{aa} 是不容易采集到的。

当 $f'(t) = 0$ 成立时, 表明此时交流信号 u_a 也存在极值点, 但是三角函数 $f(t)$ 并非在定义域内全部连续可导, 然而可以根据(1)式算出在一个周期范围内, 当 $t = \frac{T}{4}$ 时 $f(t)$ 存在极大值 u_{a1} , 当 $t = \frac{3T}{4}$ 时 $f(t)$ 存在极小值 u_{a2} 。

$$u_{a1} \Big|_{t=T/4} = \frac{ku_0}{2} (\cos 2\alpha - \cos 2\alpha \cdot \cos m_f + \sin 2\alpha \cdot \sin m_f), \quad (11)$$

$$u_{a2} \Big|_{t=3T/4} = \frac{ku_0}{2} (\cos 2\alpha - \cos 2\alpha \cdot \cos m_f - \sin 2\alpha \cdot \sin m_f). \quad (12)$$

为了验证上述论述的正确性, 以 $m_f = 2 \text{ rad}$, $k = 10$, $u_0 = 1 \text{ V}$, $T = 0.01 \text{ s}$ 为例, 图 2 所示为方位角分别为 10° 、 10° 、 20° 时, 两个周期范围内三角波调制后交流信号中极值点的分布情况, 图中黑线、红线、绿线分别代表方位角 10° 、 10° 、 20° 时情况, 图 2(a) 为全局图, 图 2(b) 为横坐标移动的极值点 u_{aa} 的局部图。

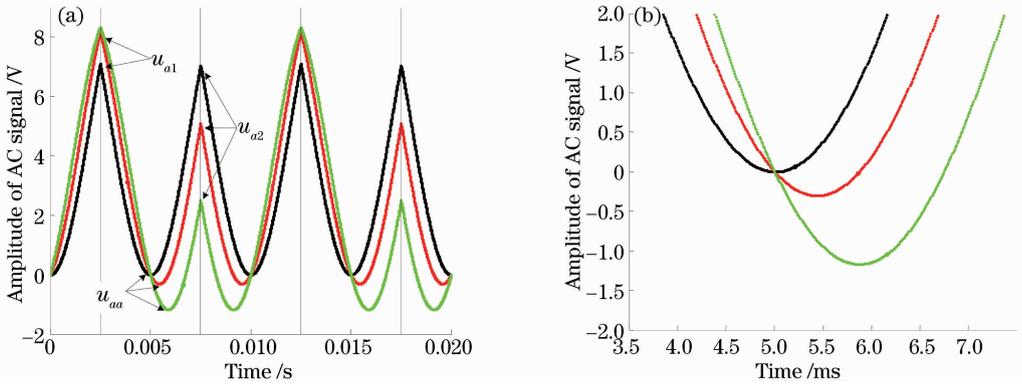


图 2 方位角分别为 10°, 10°, 20° 时调制后交流信号

Fig. 2 AC signal from modulator when the azimuth is 10°, 10°, 20°

从图 2 可以清楚看出,在单个周期范围内三角波调制后信号中的确存在三个极值点,其中两个极值点的横坐标是不变的,第三个极值点的横坐标是随着方位角的变化左右移动的,完全印证了上述理论推导。

在实际测量中 u_0 是难以精确测量的,为了消除 u_0 对测量结果的影响,利用取样积分电路分别采集极值点 u_{a1} 、 u_{a2} ,代入

$$u_{a1} - u_{a2} = ku_0 \sin 2\alpha \cdot \sin m_f, \quad (13)$$

$$u_{a1} + u_{a2} = ku_0 (\cos 2\alpha - \cos 2\alpha \cdot \cos m_f). \quad (14)$$

令 $(u_{a1} - u_{a2}) / (u_{a1} + u_{a2})$ 得到

$$\frac{u_{a1} - u_{a2}}{u_{a1} + u_{a2}} = \tan 2\alpha \cdot \cot \frac{m_f}{2}, \quad (15)$$

从而得到方位角计算模型

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{u_{a1} - u_{a2}}{u_{a1} + u_{a2}} \cdot \tan \left(\frac{m_f}{2} \right) \right]. \quad (16)$$

由于 m_f 是常数,所以 $\tan(m_f/2)$ 也是常数,因此在方位角计算模型(16)式中只需要分别测量调制后交流信号中的极值点 u_{a1} 、 u_{a2} 并代入模型,即可得到上、下仪器之间的方位信息,方法简单易行。

3 仿真结果分析

实际测量过程中,真实的测量精度要受计算反正切函数时所需要设计的硬件存储表格的存储位数、调制后交流信号中极值点的采样精度等因素影响。这里以 Matlab 为仿真工具,基于三角波磁光调制的方位测量系统的理论测量精度和范围具体如图 3 所示。

由图 3 可见,基于三角波磁光调制的方位测量系统理论测量范围为 $-45^\circ \sim 45^\circ$,理论测量精度很高,尤

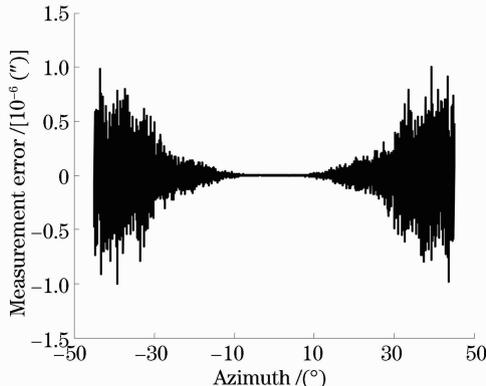


图 3 系统测量误差分布图

Fig. 3 Distribution of system measurement error

其是在小角度范围内测量精度更高,这是由于小角度范围内,反正切函数变化速率快,计算分辨率高,因此本方法很适合小角度精确测量。在测量范围内小于 -10° 和大于 10° 的区间内测量精度有所降低,是由于方位角较大时,反正切函数变化缓慢,计算分辨率下降的结果。为了提高大角度范围内的测量精度,建议在设计硬件存储表格时,增加数据的存储位数,提高查表精度。

4 与传统方法对比分析

在调制度等仪器参数相同的情况下,传统的基于正弦波磁光调制的、利用贝塞尔函数的方位测量方法^[7]与本方法的理论测量对比结果如图4所示。

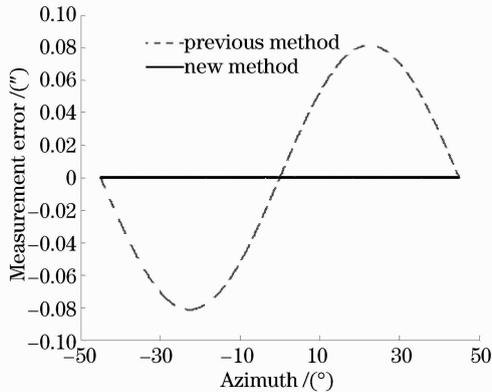


图4 三角波、正弦波磁光调制系统测量结果对比

Fig. 4 Comparison of measurement results by two methods

在图4中,横坐标为方位角的变化范围,纵坐标为方位角测量误差。由图4可见,两种方位测量方法的理论方位测量范围均为 $-45^\circ \sim 45^\circ$,这是由于反正切函数的值域为 $-90^\circ \sim 90^\circ$,但是模型(16)式中在反正切函数之前还存在一个系数 $1/2$,因此模型(16)式的理论方位测量范围缩小为 $-45^\circ \sim 45^\circ$,若需要扩大方位测量范围,需借助外界信息。

在测量精度方面,图4中虚线表示传统基于正弦波磁光调制的方位测量方法的测量误差,最大误差不超过 $0.1''$,实线表示三角波磁光调制的方位测量方法的误差,其误差很小,由二者对比可见,三角波磁光调制方法的方位测量精度较高。分析其原因,主要是传统基于正弦波磁光调制的方位测量方法中,采用第一类贝塞尔函数展开调制后信号表达式,并省略二阶以上高阶项后进行近似逼近时,产生的信号截断误差降低了系统的方位测量精度^[18]。

5 结 论

从提高基于磁光调制的无机械连接的设备间方位信息的测量精度出发,改变了调制信号的波形,将三角波磁光调制引入到了方位测量中。分别建立了调制信号模型和调制后信号模型,通过对调制后信号的成分分析,发现了调制后交流信号中极值点与方位角的关系,从而推导建立了基于三角波磁光调制的方位测量模型。通过仿真的方式进行了系统测量误差分析,并与传统正弦波磁光调制方法进行了对比,仿真结果表明,本文提出的方法理论测量精度高于传统方法,测量范围与传统方法相当,这为实现方位角高精度测量提供了一种新方案,研究成果具有一定的理论指导意义。

参 考 文 献

- Zhang Ze, Duan Guangren, Sun Yong. Algorithm for relative position and attitude of RVD based on dual-quaternion[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(3): 398-402.
- 张 泽,段广仁,孙 勇. 基于对偶四元数的交会对接相对位姿测量算法[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(3): 398-402.
- Chen Hao, Tan Jiubin, Liu Jian. Research on spacecraft formation relative position measurement based on laser tracking[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4): 908-1003.
- 陈 浩,谭久彬,刘 俭. 基于激光实时跟踪测量的航天器编队相对位置测量方法[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 908-1003.

- 3 Yang Yuchuan, Luo Hui. Laser transmission design on the three-dimension attitude calibration of subaerial aerostat[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 634-638.
杨雨川, 罗 晖. 近地浮空器三维姿态校准的激光传递设计[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 634-638.
- 4 Dong Xiaona. The Research on Technique of Passing Azimuth Angle Vertically[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, 2001:17-18.
董晓娜. 方位垂直传递技术的研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2001:17-18.
- 5 Fan Ling, Song Feijun. Polarization modulated light and model for an azimuthal information transmission system[J]. Physics, 2007, 36(5): 391-394.
范 玲, 宋非君. 调制偏振光及空间正交方位信息传递系统物理模型 [J]. 物理, 2007, 36(5): 391-394.
- 6 Wang Wenqian, Lü Fuyun, Sheng Qiuqin, *et al.*. Theory analysis of azimuth information transmission by using electro-optic effect[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2003, 20(5): 603-606.
王文倩, 吕福云, 盛秋琴, 等. 利用电光效应实现方位信息传递的理论与误差分析 [J]. 量子电子学报, 2003, 20(5): 603-606.
- 7 Dong Xiaona, Gao Limin, Shen Xiaojun, *et al.*. Passing azimuth vertically with the technic of magneto-optic modulation[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(11): 1389-1391.
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.
- 8 Shen Xiaojun, Ma Caiwen, Dong Xiaona, *et al.*. A kind of disconnected mechanically azimuth measuring and synchronizing system [J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(7): 892-896.
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.
- 9 Wu Yiming, Gao Limin, Chen Liangyi, *et al.*. Precision measurement and transmission of azimuthal information based on polarization modulated light[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(3): 525-529.
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.
- 10 Zheng Hongzhi, Ma Caiwen, Wu Yiming, *et al.*. Temperature adaptability of magneto-optic modulation in a disconnect mechanically azimuth measurement [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(5): 638-640.
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.
- 11 Lu Weiguang, Wu Yiming, Gao Limin, *et al.*. Rapid measurement of spatial azimuth by using polarized light [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(3): 539-545.
陆卫国, 吴易明, 高立民, 等. 利用偏振光实现空间方位角的快速测量[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(3): 539-545.
- 12 Lu Weiguang, Wu Yiming, Gao Limin, *et al.*. Square wave modulation to eliminate the influence of Wollaston prism nonlinear coefficients on spatial angle measurement[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2198-2203.
陆卫国, 吴易明, 高立民, 等. 方波调制消除 Wollaston 棱镜非线性系数对空间测角的影响[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2198-2203.
- 13 Yang Zhiyong, Huang Xianxiang, Zhou Zhaofa, *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.
杨志勇, 黄先祥, 周召发, 等. 基于磁光调制偏振光的方位角高精度测量新方法[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1112008.
- 14 Yang Zhiyong, Huang Xianxiang, Zhou Zhaofa, *et al.*. New high-precision transmission method of spatial azimuth with original light intensity signal[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 0112006.
杨志勇, 黄先祥, 周召发, 等. 利用原始光强信号实现方位角高精度传递新方法[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 0112006.
- 15 Zhou Zhaofa, Yang Zhiyong, Zhang Zhili. Automatic alignment method based on sine wave magneto-optic modulation in spatial wide-angle scale[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0408002.
周召发, 杨志勇, 张志利. 一种基于正弦波磁光调制的空间大范围方位自动对准方法[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0408002.
- 16 Yang Zhiyong, Zhou Zhaofa, Zhang Zhili. Improvement of transmitting spatial azimuth based on sine wave magneto-optic modulation[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(4): 692-698.
杨志勇, 周召发, 张志利. 基于正弦波磁光调制的方位角传递技术的改进[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(4): 692-698.
- 17 Shen Xiao, Liang Zhongcheng. Study on the technique of detecting the large angle of AC magneto-optical modulation[J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2014, 25(8): 1535-1539.
沈 晓, 梁忠诚. 交流磁光调制大角度检测技术研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(8): 1535-1539.
- 18 Yang Zhiyong, Zhou Zhaofa, Zhang Zhili. Influence of Bessel function expansions on spatial azimuth measurement error[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(3): 461-465.
杨志勇, 周召发, 张志利. 贝塞尔函数展开对方位角测量误差的影响[J]. 应用光学, 2012, 33(3): 461-465.

栏目编辑: 何卓铭