

利用原始光强信号实现空间方位失调角 高精度传递新方法

杨志勇 黄先祥 周召发 张志利

(第二炮兵工程学院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 现有基于正弦波磁光调制偏振光的方位失调角传递方法存在精度不高的问题, 提出了一种利用原始光强信号中极值点信息实现方位失调角高精度传递的新方法。建立了基于任意位置光强信号求解初始光强的模型, 推导了大角度范围内粗略失调角的计算公式并给出了实现方案, 提出了在小角度范围内比现有方法近似精度更高的获取失调角信息的方法。仿真结果以及误差分析表明: 利用该方法得出的方位失调角传递误差远远小于现有方法, 为实现空间方位失调角高精度传递提供了一种参考。

关键词 高精度传递; 方位角; 磁光调制; 偏振光

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0112006

New High-Precision Transmission Method of Spatial Azimuth with Original Light Intensity Signal

Yang Zhiyong Huang Xianxiang Zhou Zhaofa Zhang Zhili

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

Abstract As the precision of existing method based on sine wave magneto-optically modulated polarized light is low, a new high precision method of passing azimuth with the extremum of original light intensity signal is presented. The model of calculating initial light intensity based on discretional light intensity signal is established. The formula of calculating glancing azimuth in wide-angle range and its implemental project are provided and a new high precision method of calculating azimuth in small-angle range is proposed. Simulation results and system error analysis show that, the system error of the new method in the paper is less than those of the existing methods, and it provides a reference to passing spatial azimuth with higher precision.

Key words high-precision transmission; azimuth; magneto-optic modulation; polarized light

OCIS codes 120.4640; 120.6085; 120.2130; 350.6090

1 引 言

当前用于空间方位失调角传递的方法有几何光学法和物理光学法, 但是几何光学法难以克服空气的扰动, 不容易获得高精度传递^[1]。物理光学法根据信号调制方式的不同分为磁光调制、电光调制和组合光调制三种, 电光调制需要较高的调制电压, 安全性较差^[2~4], 组合光调制尚处于理论研究阶段^[5]。

磁光调制根据调制波形的不同分为正弦波调制、方波调制、三角波调制和锯齿波调制, 但是后三种调制方式尚处于计算机模拟的水平, 且方波调制信号在推动磁光调制器的过程中波形圆滑化, 使得输出信号波形发生较大畸变^[6~8], 所以这里以正弦波磁光调制为研究基础。

申小军等^[9,10]针对利用正弦波磁光调制偏振光

收稿日期: 2011-07-11; **收到修改稿日期**: 2011-08-09

作者简介: 杨志勇(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事武器系统仿真与自动检测等方面的研究。

E-mail: yangzhiyong121@126.com

导师简介: 黄先祥(1940—), 男, 中国工程院院士, 博士生导师, 主要从事兵器发射理论与技术等方面的研究。

实现不同水平面上的上下两台无机械连接的设备之间水平方位失调角的传递展开了研究,并取得了一些成绩,但是关于大角度范围内失调角如何传递还有一定的研究空间。如申小军^[9]提出:当失调角 $|\alpha| \leq 5^\circ$ 时, $\tan 2\alpha \approx 2\alpha$,系统输出信号与失调角成正比,方位测量系统可以作为线性系统来分析;当 $|\alpha| \geq 5^\circ$ 时,输出饱和电压 V_{sat} 控制电机转动,减小失调角至 $|\alpha| \leq 5^\circ$ 时,系统以测量到的高精度信号控制电机,达到方位失调角的准确传递。但是通过仿真发现当 $\alpha = 1^\circ$ 时,传递误差为 $1.5''$; $\alpha = 5^\circ$ 时,传递误差为 $185''$,并且 $|\alpha| \geq 5^\circ$ 时是如何具体实现的没有明确说明。关于小角度范围内失调角测量,现有的方法是利用 $y = x$ 代替 $y = \arctan x$ 近似计算的方法^[10],但是此方法的近似精度仍有提高空间。

本文提出了一种利用原始光强信号中极值点实现任意大小失调角高精度传递的方法:首先利用采

集到的两个任意位置磁光调制后光强信号中的极值点解算出初始光强,通过建立的任意位置光强信号与失调角的关系模型解算出大角度范围内的粗略失调角,在小角度范围内通过近似精度更高的逼近方法得到了失调角计算模型。仿真结果表明此方法的传递误差远远小于现有方法。

2 原理推导

图1为方位失调角传递原理示意图。激光器发出的激光经过起偏器成为线偏振光,当通过调制器中磁致旋光玻璃时,在正弦激励信号产生的同频交变磁场作用下,产生法拉第磁致旋光效应,实现了偏振光信号调制。信号检测与处理系统对经光电转换后的信号检测处理、提取与失调角相关的电压信号,下仪器在此信号的控制下转动至与上仪器精确对准^[10]。

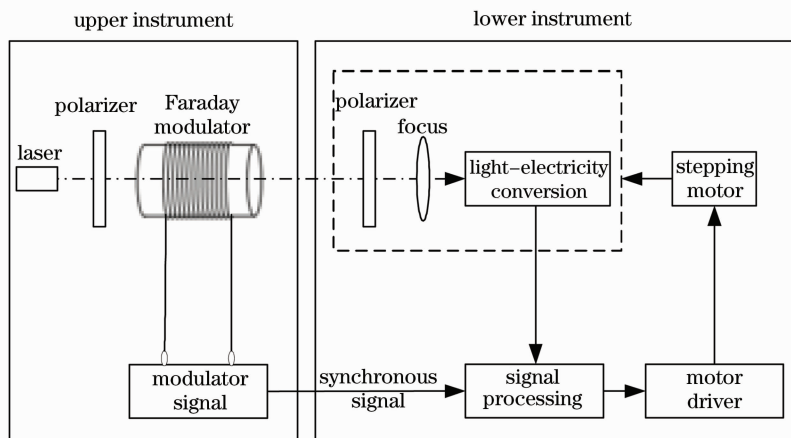


图1 方位失调角传递原理图

Fig. 1 Principle of azimuth-transmission system

设 I_0 为激光器发出的激光经过起偏器后的出射光强, ω 为在调制线圈上所加正弦激励信号调制角频率, L 为光在磁光介质中传播的有效距离, V 为磁光介质的维尔德常数, B_m 为磁感应强度的最大值, m_f 为调制度,存在 $m_f = 2VB_m L$, θ 为光波偏振面的旋转角度,存在 $\theta = VB_m L \sin \omega t = \frac{1}{2} m_f \sin \omega t$, α 为上、下仪器方位失调角。根据马吕斯定律结合系统工作原理,磁光调制后输出的光强信号经光电转换后,得到

$$u = ku_0 \sin^2(\alpha + \theta), \quad (1)$$

(1)式中 k 是放大电路的放大倍数; $u_0 = \eta I_0$, η 是光电转化及放大倍率或称量子效率。

经分析 u 为直流、交流叠加信号,且 $\theta = \frac{1}{2} m_f$ 时

取得极大值 $u_1 = ku_0 \sin^2\left(\alpha + \frac{1}{2} m_f\right)$, $\theta = -\frac{1}{2} m_f$ 时

取得极小值 $u_2 = ku_0 \sin^2\left(\alpha - \frac{1}{2} m_f\right)$ 。

2.1 初始光强信号的求解

将下仪器停放在上仪器正下方任意初始位置 α_1 处,测量得到 u 的极大值

$$u_{11} = ku_0 \sin^2\left(\alpha_1 + \frac{1}{2} m_f\right), \quad (2)$$

$$\cos(2\alpha_1 + m_f) = 1 - \frac{2u_{11}}{ku_0}, \quad (3)$$

在 α_1 的基础上转动 90° 至 α_2 处,测量得到相对应的 u 的极大值

$$u_{12} = ku_0 \sin^2\left(\alpha_1 + 90^\circ + \frac{1}{2} m_f\right), \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式得 u_0 的计算公式

$$u_0 = \frac{u_{11} + u_{12}}{k}. \quad (5)$$

2.2 大角度范围内失调角的求解

利用取样积分电路采集任意位置原始光强信号的极大值、极小值

$$u_1 = ku_0 \sin^2 \left(\alpha + \frac{1}{2} m_f \right) = \frac{ku_0}{2} [1 - \cos(2\alpha + m_f)], \quad (6)$$

$$u_2 = ku_0 \sin^2 \left(\alpha - \frac{1}{2} m_f \right) = \frac{ku_0}{2} [1 - \cos(2\alpha - m_f)], \quad (7)$$

由(6)式和(7)式可得

$$\alpha = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{u_1 - u_2}{ku_0 \sin m_f} \right), \quad (8)$$

将(5)式代入(8)式可得大角度范围内失调角的计算公式

$$\alpha = \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{u_1 - u_2}{(u_{11} + u_{12}) \sin m_f} \right]. \quad (9)$$

由于硬件不能直接进行反正弦函数的计算,下文中提出了基于查表法的反正弦函数计算,由于查表间隔的限制,计算得出的失调角是粗略值,下仪器在粗略失调角信号的控制下转动至小角度范围内。

2.3 小角度范围内失调角的求解

图2是在 $-1^\circ \sim 1^\circ$ 范围内用 $y=x$ 分别代替 $y = \arctan x, y = \arcsin x$ 引起的误差图,由图可见在现有算法中用 $y=x$ 代替 $y = \arctan x$ 引起的误差较大,而改用 $y=x$ 代替 $y = \arcsin x$ 引起的误差较小,所以在小角度范围内失调角的近似计算公式为

$$\alpha \approx \frac{u_1 - u_2}{2(u_{11} + u_{12}) \sin m_f}, \quad (10)$$

下仪器在此信号的控制下继续转动至与上仪器精确对准。

3 实现方案

在大角度范围内需要粗略计算反正弦函数值,这里采用了查表^[11]的方式实现,所以先给出表的设计、查表的相关内容,然后提供了系统总体实现方案。

3.1 大角度范围内反正弦函数的实现

为了最大限度地扩大失调角的测量范围,设计

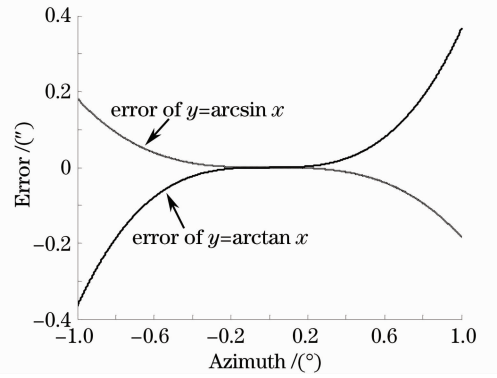


图2 用 $y=x$ 近似逼近引起的误差分布图
Fig. 2 Error distribution between $y=x$ and $y = \arctan x, y = \arcsin x$

失调角 α 的变化范围为 $-45^\circ \sim 45^\circ$,由于(9)式中系数 $\frac{1}{2}$ 的存在,反正弦函数 $y = \arcsin x$ 中 y 的变换范围应为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。为了节约硬件存储空间,根据 x 的符号将 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 分为两个区间:1区为 $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$,2区为 $-90^\circ \leq \alpha < 0^\circ$,具体如图3所示。设计的表格仅存储1区范围内的数据,2区内数据通过 $\sin \alpha = -\sin(-\alpha)$ 变换实现。

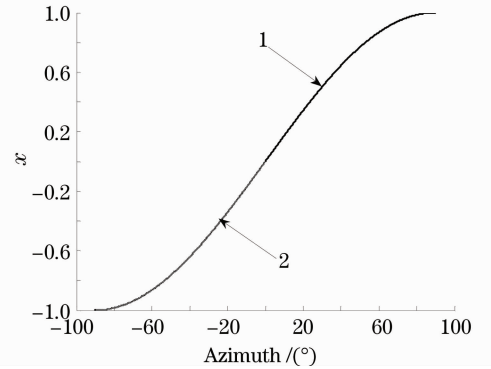


图3 x 的区间分布
Fig. 3 Distribution of x

对反正弦函数 $y = \arcsin x$ 设计表格时,为了将粗略失调角的计算精度控制在 1° 范围内,这里设计了间隔为 1° 、范围在 $1^\circ \sim 90^\circ$ 的表格, x 采用12位二进制表示, y 以度为单位,采用7位二进制表示。查表时查表值 $f(x)$ 的定义为

$$f(x) = \begin{cases} y(i) & x(i) \leq x < x(i+1), & x - x(i) \leq x(i+1) - x \\ y(i+1) & x(i) \leq x < x(i+1), & x - x(i) > x(i+1) - x \end{cases}, \quad (11)$$

具体表格如表1所示。

表 1 查表说明
Table 1 Explanation of look-up table

i	$x(i)$	Address of $x(i)$	Address of $y(i)$	True y according to $x(i)/(^{\circ})$	Theoretic $y(i)/(^{\circ})$	Maximal error/ $(^{\circ})$
1	0.017333984375	71	1	0.99321388907015	1	0.49691061891169
2	0.034912109375	143	2	2.000723093550889	2	0.50308938108831
3	0.05224609375	214	3	2.994844204713157	3	0.502310403437652
4	0.06982421875	286	4	4.003890990395944	4	0.50184575816075
...
44	0.694580078125	2845	44	43.993764303605495	44	0.509647899667904
45	0.70703125	2896	45	44.99388015045712	45	0.508321667108838
46	0.71923828125	2946	46	45.99162728684236	46	0.509455748166523
47	0.7314453125	2996	47	47.007696931921245	47	0.502711268468524
...
87	0.99853515625	4090	87	86.89839627091662	87	0.581569318657898
88	0.99951171875	4094	88	88.20943402685974	77	0.532345750534574
89	0.999755859375	4095	89	88.73390442073261	89	0.550659843212003
90	1	4096	90	90	90	0.895255662060947

3.2 系统总体实现方案

结合本系统的实际情况具体方案是：首先将下仪器放置在上仪器正下方任意位置测量得到 u_{11} 、以及转动 90° 后得到的 u_{12} ；然后依据采集到的 $-45^{\circ} \sim$

45° 范围内任意位置的磁光调制后初始光强信号中两个横坐标不变的极值点 u_1, u_2 ，并结合 u_{11}, u_{12} 计算得到 $y = \arcsin x$ 中 x 的值 $x = \frac{u_1 - u_2}{(u_{11} + u_{12}) \sin m_f}$ ，根据

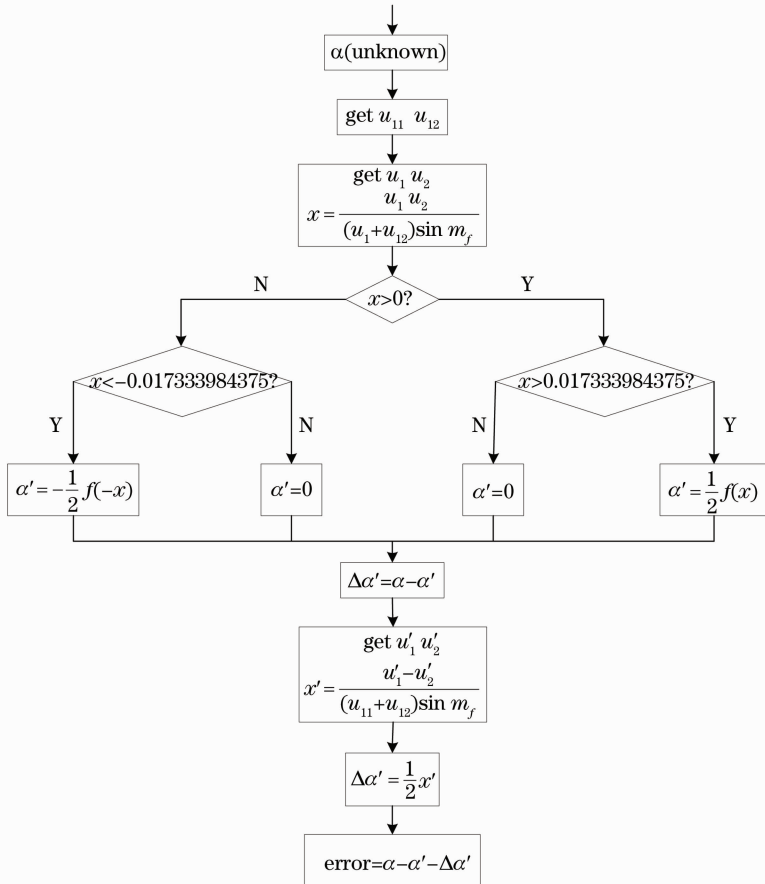


图 4 系统控制流程图

Fig. 4 Flow chart of system controll

x 的符号查表获得大角度范围内的粗略失调角 α' , 下仪器在粗略失调角信号的控制下转动至 1° 范围内; 再次, 系统在新状态下计算 $\Delta\alpha = \alpha - \alpha'$, 利用新状态下采集到的横坐标不变的极值点 u'_1, u'_2 以及 u_{11}, u_{12} 值计算出 $x' = \frac{u'_1 - u'_2}{(u_{11} + u_{12}) \sin m_f}$, 直接利用 $y = x$ 代替 $y = \arcsin x$ 得到小角度范围内失调角 $\Delta\alpha' = \frac{1}{2}x'$, 下仪器在此信号的控制下继续转动, 最终达到上下仪器精

确对准, 具体流程如图 4 所示。

4 结果分析

4.1 结果分析

基于上述原理和实现方案, 以 Matlab 软件为仿真工具, 计算得到了失调角在 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 范围内变化时粗略失调角计算值与真值的误差以及近似精确测量后计算值与真值的误差值, 如图 5 所示。

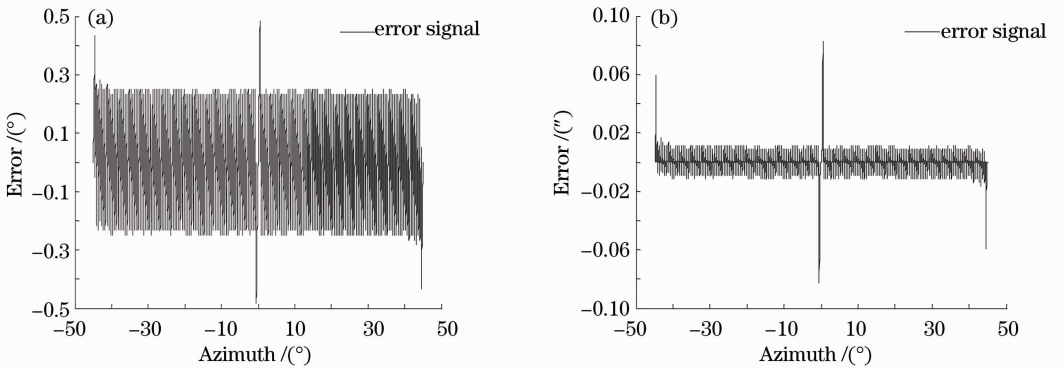


图 5 理想状态仿真结果图

Fig. 5 Simulation results under ideal state

由图 5(a)可以看出经过大角度范围内反正弦函数查表粗略计算后, 误差大部分控制在 0.25° 之内, 仅在 $-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$ 附近误差较大, 但都控制在 0.5° 之内; 同样从图 5(b)可以看出经过小角度范围内近似精确计算后, 误差大部分控制在 $0.01''$ 之内, 仅在 $-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$ 附近误差较大, 但都控制在 $0.1''$ 之内。

在 0° 左右产生相对较大误差主要是因为系统在检测到上下仪器之间的夹角小于 1° (实际是 0.9932°) 时, 不再采用查表计算粗略失调角, 而是直接使用小角度近似精确测量引起的结果; 在 -45° 和 45° 附近产生相对较大误差主要是在 $88^\circ \sim 90^\circ$ 范围内查表引起的误差。

本文提出的方法理论传递误差以及查表实现后传递误差与原有方法^[10]理论传递误差对比分别如图 6(a), (b) 所示。图 6(a)为两种方法理论传递误差的对比, 可见提出的方法在传递精度方面远远高于现有方法; 图 6(b)为文中提出的方法查表实现后的传递误差与原有方法理论误差的对比, 可见提出的方法传递精度亦然较高。

4.2 误差分析

图 5 的仿真结果是在完全理想的状态下进行的, 但是在实际中, 本文提出的方法主要受两个因素影响: 原始光强信号中极值点的采集精度、 u_0 计算中下仪器转动 90° 角度值的精确测量。

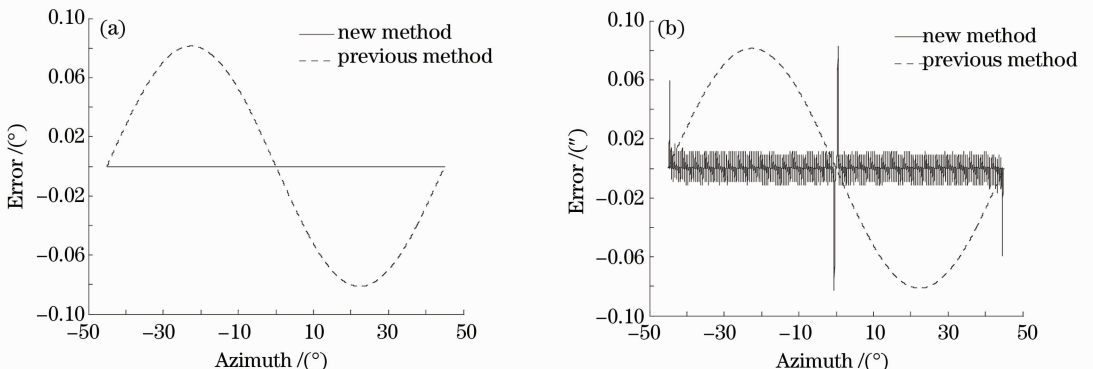


图 6 两种方法的误差对比图

Fig. 6 Comparison of errors between the two methods

原始光强信号中极值点的采集:采用取样积分电路实现极值点的获取,根据被采样信号的特点,经过计算设定门宽、阈值以及运行时间,即可得到信号中的极值^[12]。

初始 u_0 计算中下仪器转动 90° 角度值的精确测量:这里利用与下仪器固定相联的光栅盘测量下仪

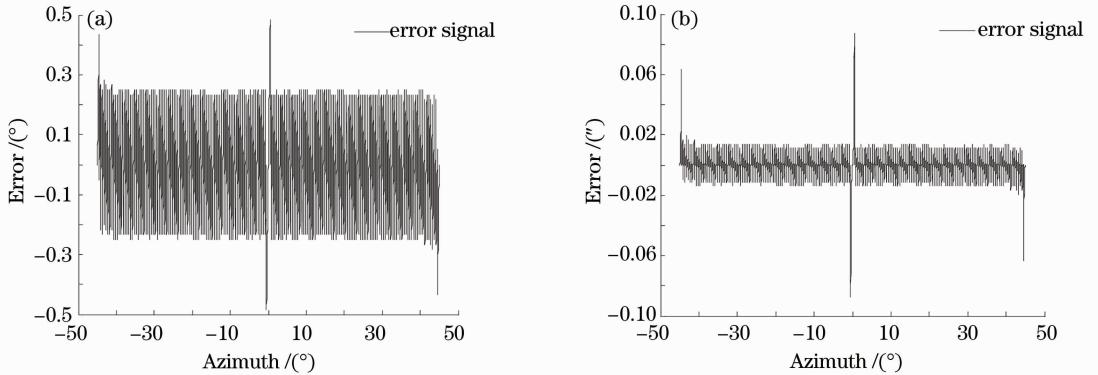


图 7 下仪器转动 $90^\circ \pm 3''$ 后仿真结果图

Fig. 7 Simulation results when the lower instrument runs by $90^\circ \pm 3''$

由图 7(a)可以看出经过大角度范围内反正弦函数查表粗略计算后,误差几乎没有变化,主要是因为查表时误差控制范围为 $1^\circ, 3''$ 远远小于 1° ;从图 7(b)可以看出经过近似精确计算后,系统传递误差略有增大,主要是因为下仪器转动 90° 时转动角度值误差引起 u_{12} 变化引起的,只要下仪器转动的角度精度控制在一定范围内,此误差是可以控制的。

5 结 论

针对现有基于正弦波磁光调制偏振光的方位失调角传递中存在精度不高的问题,提出了一种利用原始光强信号中信息控制上下仪器精度对准的新方法。建立了利用任意位置光强信号计算初始光强的模型,推导了大角度范围内控制信号的计算公式并给出了实现方案,在小角度范围内,提出了比现有方法精度更高的获取控制信号的近似逼近方法。仿真结果以及误差分析表明:本文提出的方法方位传递误差远远小于现有方法,为实现空间方位失调角高精度传递提供了一种新方法,具有一定的理论指导意义。

参 考 文 献

- 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

器转动的精确角度值,目前光栅测角的精度已经达到 $1''$,为稳妥起见,这里以下仪器转动 $90^\circ \pm 3''$ 为例得到了粗略失调角计算值与真值的误差以及近似精确测量后计算值与真值的误差值,分别如图 7(a), (b) 所示。

- Fan Ling. Research on Modulated Polarized Light and Its Applications for Optical Measurement and Azimuth Information Transmission [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006. 32~49
- 范玲. 调制偏振光在光学精密测量和方位信息传递中的应用研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2006. 32~49
- Fan Ling, Song Feijun. Azimuthal information transmitting system based on modulated polarization light [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(S1): 166~168
- 范玲, 宋菲君. 基于调制偏振光的空间正交方位信息传递系统[J]. *光学技术*, 2006, **32**(S1): 166~168
- Wang Wenqian, Lü Fuyun, Sheng Qiuqin *et al.*. Theory analysis of azimuth information transmission by using electro-optic effect [J]. *Chin. J. Quantum Electron.*, 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及误差分析[J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(5): 603~606
- Chen Xinqiao, Xü Shouxi, Liang Xianfeng. Study of combination optical modulation based on magneto-optical modulation and electro-optical modulation [J]. *J. South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2002, **21**(1): 32~35
- 陈新桥, 徐寿喜, 梁显锋. 基于电光调制和磁光调制的组合光调制的研究[J]. *中南民族大学学报(自然科学版)*, 2002, **21**(1): 32~35
- Li Yong'an, Li Xiaojun, Li Shuting *et al.*. Analysis on magneto-optical modulation by modeling [J]. *J. Northwest University (Natural Science Edition)*, 2007, **37**(5): 719~723
- 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 Yong'an, Li Xiaojun, Bai Jintao. Analyze on sine wave and rectangular wave magneto-optical modulation by comparing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(S1): 192~197
- 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**(S1): 192~197
- Li Xiaojun, Li Yong'an, Wang Yuanyuan *et al.*. Magneto-optical modulation method for polarization measurement based on rectangular wave signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1533~1537
- 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

- 9 Shen Xiaojun. The Research on Technique of Signal Detecting and Controlling in a Kind of Passing Azimuth Angle Vertically System [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, 2001. 11
申小军. 方位垂直传递装置中的信号检测与控制技术研究[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所, 2001. 11
- 10 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
- 11 Liu Ligang, Zeng Yan'an, Chang Dading. The design and optimization of arc tangent calculate circuit based on FPGA [J]. *Control & Automation*, 2007, **23**(17): 203~204, 289
刘礼刚, 曾延安, 常大定. 基于FPGA的反正切函数的优化算法[J]. *微计算机信息*, 2007, **23**(17): 203~204, 289
- 12 Jiao Guanglong, Fu Hongwei, Xiang Zhengyi *et al.*. Balanced sampling-a way to promote the stability of sampling integrator [J]. *J. Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2001, **2**(2): 85~87
焦光龙, 付红卫, 向正义等. 提高取样积分器稳定性的平衡取样法[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2001, **2**(2): 85~87

栏目编辑: 何卓铭