

方波磁光调制测量在无机机械连接的设备间方位传递中的应用

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 在航天、军事等领域往往需要传递无机机械连接的设备之间的空间方位信息,而传统的方位测量系统测量范围小、测量精度低,难以满足系统高精度大范围传递的要求,为此改变传统方法中的调制方式,将方波磁光调制引入了方位测量系统,建立了基于方波磁光调制的方位测量模型。根据马吕斯定律,建立了方波磁光调制后的输出信号模型,并分析了调制后信号的特点。根据调制后信号的表达式与方位角的关系,推导、建立了调制后信号与方位角之间的关系方程,并利用调制后信号的增减性去除了方程的增根,结合调制前后信号的相位对比扩大了方位角的测量范围,最终得到了基于方波磁光调制的方位测量模型,实现了无机机械连接的设备之间方位信息的传递。仿真结果表明,提出的基于方波调制的测量方法与传统方法比较,理论测量精度更高、测量范围更广,这为实现空间方位角高精度大范围测量提供了一种参考。

关键词 测量;方位测量;方波;磁光调制;余弦函数

中图分类号 TH741 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1212006

Application of Square Wave Magneto-Optic Modulation to Transmitting the Azimuth Between Equipments without Mechanical Connection

Yang Zhiyong Huang Xianxiang Zhou Zhaofa Zhang Zhili

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

Abstract The technique of transmitting spatial azimuthal information between equipments without mechanical connection is important in spaceflight, military and other fields. The precision of the traditional azimuth measurement system is low, and the measurement scale is narrow, so the traditional azimuth measurement system cannot meet the requirement of transmitting the azimuth in high precision and wide scale. The modulation wave of the traditional method is transformed, the square wave magneto-optic modulation is introduced into the azimuth measurement system, and the azimuth measurement model based on square magneto-optic modulation is established. The model of modulated signal is presented according to Malus law, and its characteristics are analyzed. The equation between azimuth and modulated signal is established according to their relationship, and the variation trend of modulated signal is used to delete the equation's extraneous roots. The phase comparison of modulation signal and modulated signal is used to widen the azimuth measurement scale. At last the azimuth measurement model based on square wave magneto-optic modulation is acquired, realizing the transmission of azimuth between equipments without mechanical connection. Simulation results show that compared with the traditional method, the theoretical measurement precision of the new method is higher, and the measurement scale is wider, which provides a reference to measure azimuth in high precision and wide scale.

Key words measurement; azimuth measurement; square wave; magneto-optic modulation; cosine function

OCIS codes 120.2130; 120.4640; 120.6085; 330.1710

收稿日期: 2012-06-04; 收到修改稿日期: 2012-08-10

作者简介: 杨志勇(1983—),男,博士研究生,主要从事定向与基准传递等方面的研究。

E-mail: yangzhiyong121@126.com

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

1 引 言

在航天器交会对接、军用方位信息高精度传递、生物医药等诸多领域常常需要测量无机械连接的不同设备之间的方位信息,目前的研究主要是利用物理光学方法中光的偏振特性来实现不同仪器间的方位测量^[1]。根据调制方式的不同,物理光学方法分为电光调制、磁光调制及组合光调制(电光调制和磁光调制的组合光调制)。电光调制需要较高的调制电压,安全性差^[2~4];组合光调制尚处于调制方式的研究阶段^[5]。这里着重研究物理光学中的磁光调制。

根据调制波形的不同,磁光调制可以分为正弦波调制、方波调制、三角波调制及锯齿波调制等^[6~8]。目前仅有中国科学院西安光学精密机械研究所的董晓娜等^[9~12]研制出了基于正弦波磁光调制的方位测量系统样机,但是该系统测量精度不高,测量范围有限;西安第二炮兵工程大学的杨志勇等^[13~16]近两年来也针对基于正弦波磁光调制的方位测量系统开展了提高系统的测量精度、扩大测量范围等方面的研究,虽然在测量范围方面有所突破,但是仍然存在测量精度不高的问题。另外,文献^[6~8]以李萨如图形的方式理论模拟研究了不同波形磁光调制前后信号的关系,但没有研究其在方位测量系统中的应用情况。

为了能够在大范围内高精度测量方位角,实现方位信息的传递,本文研究了方波磁光调制在方位传递系统中的应用。结合马吕斯定律,建立了调制后信号的模型,根据调制后信号的特点建立了其与方位角之间的关系方程,采用比较调制后信号中两个直流分量增减性的方法解决了方程求解过程中的增根问题,利用调制前后信号的相位对比扩大了方位角的测量范围,并最终得到了方位角的精确测量模型,实现了设备之间的方位信息传递。仿真结果表明:文中提出的方法理论上可以在 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的范围内高精度测量方位角,这为实现方位角的高精度大范围测量提供了一种简单易行的新方案。

2 原 理

方位测量系统原理如图 1 所示,上仪器中的激光作为光源,激光器发出的激光经过起偏器成为线偏振光,在方波激励信号产生的磁场作用下,当线偏振光通过调制器中维尔德常数较大的旋光材料时,产生法拉第磁致旋光效应。下仪器接收到磁光调制后的信号,经过光电转换、信号检测与处理系统的处理,提取出与方位角相关的电压信号,并经过一定的运算得到方位角,下仪器在此方位信息的控制下逐渐转动至与上仪器对准,达到上下仪器之间方位传递的目的。

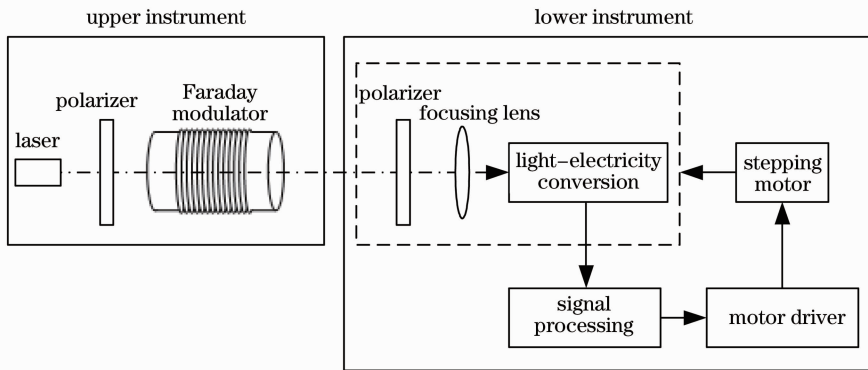


图 1 方位传递系统原理

Fig. 1 Principle of azimuth transmission system

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 为时间变化量。

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。

通过起偏器后的线偏振光经过方波信号磁光调制、光电转换以及放大电路的处理后得到信号

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

式中 k 为电路的放大倍数, $u_0 = \eta I_0$, I_0 为激光器发

出的激光经过起偏器后的出射光强, η 为量子效率, α 为上下仪器之间的方位角。

将光波偏振面的旋转角 θ 代入(3)式, 并经二倍角公式转换得到

$$u = \frac{ku_0}{2} [1 - \cos(2\alpha + 2\theta)] = \begin{cases} \frac{ku_0 [1 - \cos(2\alpha + m_f)]}{2}, & t \in [0, T/2) \\ \frac{ku_0 [1 - \cos(2\alpha - m_f)]}{2}, & t \in [T/2, T) \end{cases} \quad (4)$$

当方位角为某一固定值时, 输出信号为两个幅值不等、交替出现且与调制信号同频的方波信号, 具体如图 2 所示。但是在实际实验过程中, 随着方位角的增大, 调制后的输出信号会发生畸变, 实验中如何解决信号畸变问题是当前的一个难点。

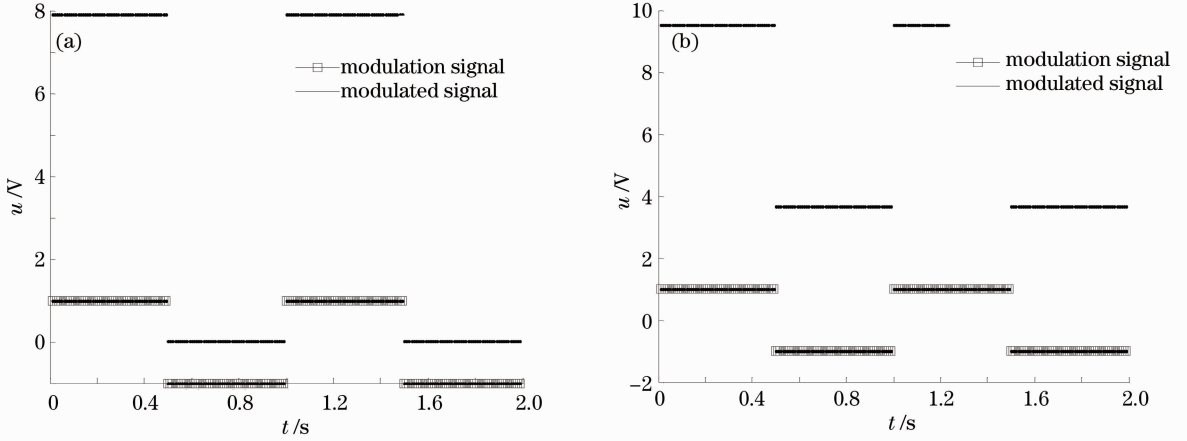


图 2 方位角分别为(a) 60° 和(b) 20° 时方波磁光调制信号与输出信号对比图

Fig. 2 Comparison of modulation signal and modulated signal when the azimuth is (a) 60° and (b) 20°

采集调制后信号并令 $u_1 = \frac{ku_0 [1 - \cos(2\alpha + m_f)]}{2}$, $u_2 = \frac{ku_0 [1 - \cos(2\alpha - m_f)]}{2}$, 得到

$$u_1 + u_2 = ku_0 (1 - \cos 2\alpha \cos m_f), \quad \cos 2\alpha = \frac{1 - \frac{u_1 + u_2}{ku_0}}{\cos m_f}, \quad (5)$$

$$u_1 - u_2 = ku_0 \sin 2\alpha \sin m_f, \quad \sin 2\alpha = \frac{u_1 - u_2}{ku_0 \sin m_f}. \quad (6)$$

根据 $\sin^2 2\alpha + \cos^2 2\alpha = 1$ 得到关于 ku_0 的一元二次方程

$$(ku_0)^2 \sin^4 m_f - 2(u_1 + u_2)(ku_0) \sin^2 m_f + u_1^2 + u_2^2 - 2u_1 u_2 \cos 2m_f = 0, \quad (7)$$

并得到两个不相等的实根

$$ku_0 = \frac{u_1 + u_2 \pm 2\cos m_f \sqrt{u_1 u_2}}{\sin^2 m_f}. \quad (8)$$

将(8)式代入(5)式得到方位角的计算公式

$$\alpha' = \frac{1}{2} \arccos \left\{ \left[1 - \frac{(u_1 + u_2) \sin^2 m_f}{u_1 + u_2 \pm 2\cos m_f \sqrt{u_1 u_2}} \right] / (\cos m_f) \right\}. \quad (9)$$

3 方位角计算模型的最终实现

3.1 方位角计算模型的确定

由(9)式可以看出, 对于实验中测量得到的每一组直流分量 u_1, u_2 , 根据(9)式都能计算得到两个方位角计算值 α' , 但是实际中二者应该是一一对应

关系, 可见根据(9)式计算方位角产生了增根, 为了得到方位角测量真值, 必须对方程的解进行分析, 去除增根。

在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内方程解的分布如图 3 所示, 其中图 3(a)为全局图, 图 3(b)为 $0^\circ \sim 1^\circ$ 范围内的局部

图,图中横坐标为方位角真值 α ,纵坐标为方位角计算值 α' ,实线表示方位角计算公式取正根,虚线表示

取负根。

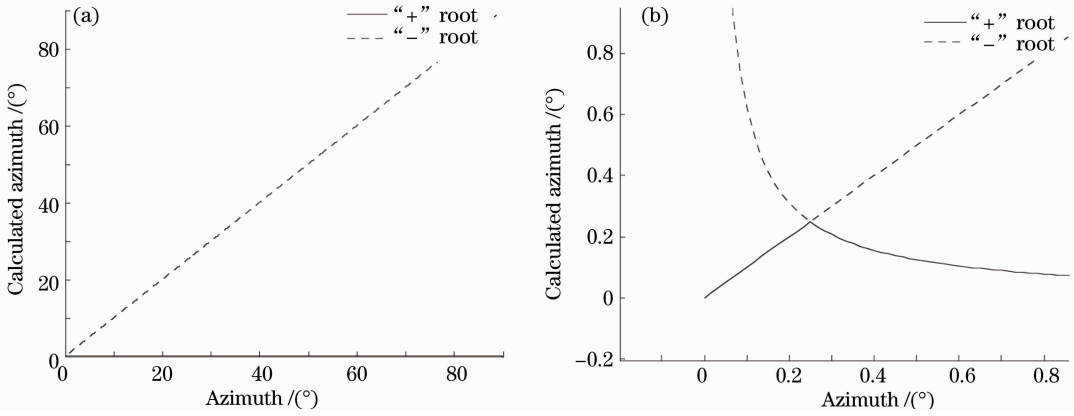


图 3 方程解的分布情况。(a) $0^\circ\sim 90^\circ$ 全局图; (b) $0^\circ\sim 1^\circ$ 局部图

Fig. 3 Distribution of the equation's roots. (a) $0^\circ\sim 90^\circ$; (b) $0^\circ\sim 1^\circ$

理论上方位角真值 α 应该与计算值 α' 一一对应,并且二者成斜率为 1 的线性关系,从而可以确定

图 3 中斜率为 1 的直线即为方程应该取得的解,显然它被分为了两部分,分界点在于

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

解得分界点为 $m_f/2$,所以在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内方程的解应该为

$$\alpha' = \begin{cases} \frac{1}{2} \arccos \left[\frac{(u_1 + u_2) \cos m_f + 2\sqrt{u_1 u_2}}{u_1 + u_2 + 2\sqrt{u_1 u_2} \cos m_f} \right], & \alpha \in \left(0, \frac{1}{2} m_f \right) \\ \frac{1}{2} \arccos \left[\frac{(u_1 + u_2) \cos m_f - 2\sqrt{u_1 u_2}}{u_1 + u_2 - 2\sqrt{u_1 u_2} \cos m_f} \right]. & \alpha \in \left(\frac{1}{2} m_f, \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (11)$$

但是在实际测量中方位角真值 α 是待测量,不可能事先得到方位角真值 α 的信息并且判断出 α 是否在 $(0, \frac{1}{2} m_f)$ 范围内。通过对调制后方波信号的分析发现,根据调制后信号中的直流分量 u_1, u_2 的增减性可以判断出方位角 α 的范围,从而判断出方程

的根,具体如下。

图 4 为方位角 α 在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内变化时 u_1, u_2 的变化曲线,其中图 4(a)为全局图,图 4(b)为 $0^\circ\sim 1^\circ$ 范围内的局部图,图中横坐标为方位角真值 α ,纵坐标为 u_1, u_2 ,实线表示 u_1 ,虚线表示 u_2 。

从图 4 可以看出在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内 u_2 存在零

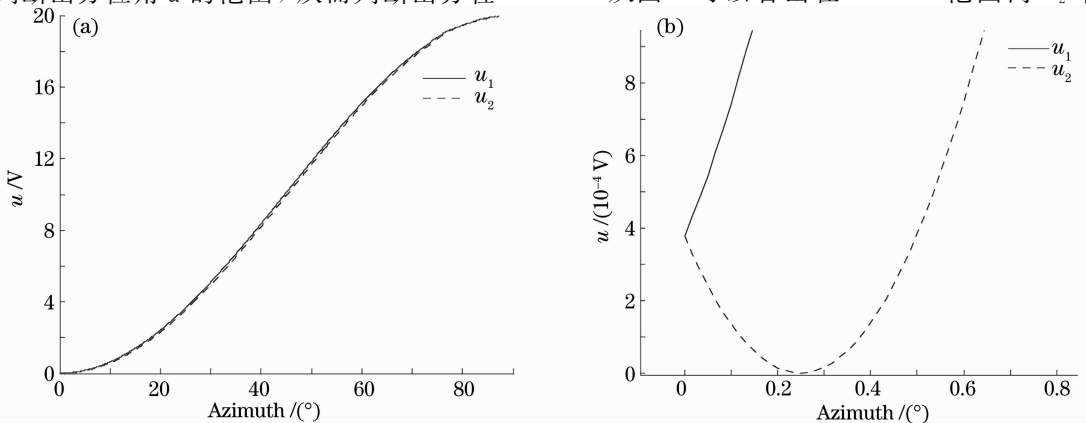


图 4 u_1, u_2 的变化曲线。(a) $0^\circ\sim 90^\circ$ 全局图; (b) $0^\circ\sim 1^\circ$ 局部图

Fig. 4 Curve of u_1 and u_2 . (a) $0^\circ\sim 90^\circ$; (b) $0^\circ\sim 1^\circ$

点： $u_2 = 0$ 时，解得 $\alpha = m_f/2$ 。当方位角 α 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内时 u_1, u_2 的增减性如下：

- 1) $\alpha \in (0, \frac{\pi}{2})$ 时， u_1 为增函数；
- 2) $\alpha \in (0, \frac{1}{2}m_f)$ 时， u_2 为减函数； $\alpha \in (\frac{1}{2}m_f, \frac{\pi}{2})$ 时， u_2 为增函数。

二者结合可得：

$$\alpha' = \begin{cases} \frac{1}{2} \arccos \left[\frac{(u_1 + u_2) \cos m_f + 2 \sqrt{u_1 u_2}}{u_1 + u_2 + 2 \sqrt{u_1 u_2} \cos m_f} \right], & u_1, u_2 \text{ have different change trends} \\ \frac{1}{2} \arccos \left[\frac{(u_1 + u_2) \cos m_f - 2 \sqrt{u_1 u_2}}{u_1 + u_2 - 2 \sqrt{u_1 u_2} \cos m_f} \right]. & u_1, u_2 \text{ have the same change trend} \end{cases} \quad (12)$$

针对计算模型中反余弦函数的实现问题，只需根据测量精度的需要设计不同的存储表格并存储在硬件中，利用查表法就可以通过硬件实现反余弦函数的计算。

3.2 方位角测量范围的扩大

考虑到余弦函数为偶函数，只要找到判断方位角正负的方法，就可以充分利用偶函数的性质扩大

1) $\alpha \in (0, \frac{1}{2}m_f)$ 时， u_1 为增函数， u_2 为减函数，二者趋势相反；

2) $\alpha \in (\frac{1}{2}m_f, \frac{\pi}{2})$ 时， u_1 为增函数， u_2 为增函数，二者趋势相同。

结合方程解的分布情况，可得方位角的计算模型为

方位角的测量范围至 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。

通过对磁光调制前后信号的相位对比发现：当二者相位相同时，方位角为正值；当二者相位相反时，方位角为负值，具体如图5所示。由此可以采用相位比较器采集、比较调制前后信号的相位，判断出方位角的正负区间，当方位角为负值时，将其取负转换为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内计算即可。

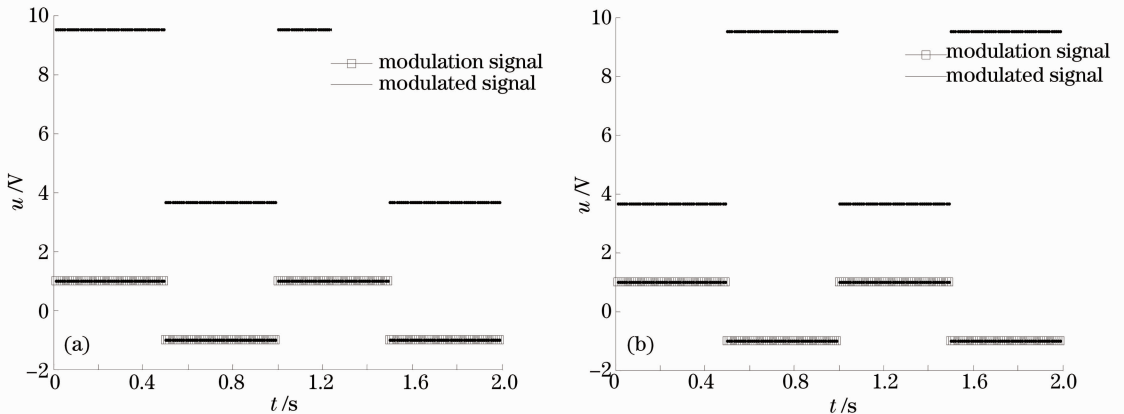


图5 方位角分别为(a) -20° 和(b) 20° 时调制信号和输出信号相位对比图

Fig. 5 Phase comparison of modulation signal and modulated signal when the azimuth is (a) -20° and (b) 20°

4 系统仿真结果分析

在实际的测量过程中，系统测量精度要受硬件反余弦计算能力、信号采集电路采集精度及磁光调制器调制度等多种因素影响，其中磁光调制度的影响是需要特别注意的，通常磁光调制度越大，调制后的信号强度越大，越有利于信号采集处理。这里以 $m_f = 0.0087 \text{ rad}$ 为例，通过仿真计算的方式对方法本身的理论计算精度进行分析，得到了方位角在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化时系统的理论测量误差，具体如图6

所示，图中实线表示方位角计算公式取正根，虚线表示取负根。

图6(a)为系统总的误差分布情况，可见测量范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ ，在 $\pm 90^\circ$ 附近误差较大是由反余弦函数计算引起的。图6(b)是方位角在 $-0.5^\circ \sim 0.5^\circ$ 范围内的误差信号分布情况，可以明显看出 α' 被分为三部分，在 $\alpha = \pm m_f/2$ 以及零点附近误差略有增加，但是仍然控制在 $5 \times 10^{-7} (")$ 范围内。

本方法与传统正弦波磁光调制的测量方法

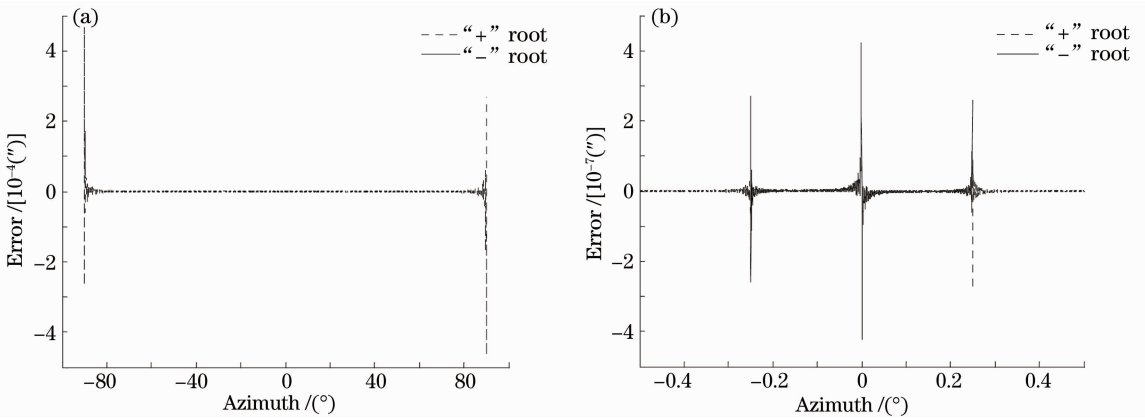


图 6 系统测量误差。(a) $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 全局图；(b) $-0.5^{\circ}\sim 0.5^{\circ}$ 局部图

Fig. 6 Measurement error of the system. (a) $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$; (b) $-0.5^{\circ}\sim 0.5^{\circ}$

$\alpha' = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{u'_1 - u'_2 \frac{J_2(m_i)}{J_1(m_i)}}{u'_1 + u'_2 \frac{J_2(m_i)}{J_1(m_i)}} \right]^{[10]}$ [J(·) 为贝塞尔函数的误差比较如图 7 所示, 图 7 中虚线为传统方法的测量误差曲线, 实线为本方法的测量误差曲线, 可见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 1 倍。

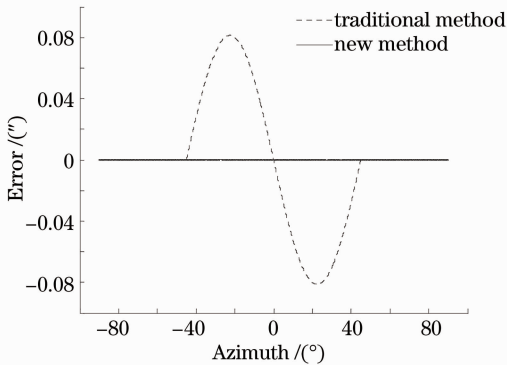


图 7 新旧方法的测量误差对比图

Fig. 7 Comparison of measurement error by two methods

5 结 论

本文从提高基于磁光调制的方位测量系统的测量精度、扩大测量范围的角度出发, 将方波磁光调制引入到了方位测量系统中, 建立了基于方波磁光调制的方位测量模型。仿真结果表明, 文中提出的基于方波调制的测量方法与传统方法比较, 理论测量精度更高, 测量范围扩大了 1 倍, 这为实现空间方位角高精度大范围测量提供了一种参考。

参 考 文 献

1 Dong Xiaona. The Research on Technique of Passing Azimuth Angle Vertically [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, 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
2 Fan Ling, Song Feijun. Polarization modulated light and model for an azimuthal information transmission system [J]. *Physics*, 2007, **36**(5): 391~394
范玲, 宋菲君. 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
3 Fan Ling, Song Feijun. Azimuthal information transmitting system based on modulated polarization light [J]. *Optical Technique*, 2006, **36**(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, **36**(s1): 166~168
4 Wang Wenqian, Lü Fuyun, Sheng Qiuqin *et al.*. Theory analysis of azimuth information transmission by using electro-optic effect [J]. *Chinese J. 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及误差分析 [J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(5): 603~606
5 Chen Xinqiao, Xu 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
6 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
7 Li Yong'an, Li Xiaojun, Bai Jintao. Analysis 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
8 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 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

- 10 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. 一种无机机械连接的方位测量同步系统[J]. *光子学报*, 2001, **30**(7): 892~896
- 11 Wu Yiming, Gao Limin, Chen Liangyi *et al.*. Precision measurement and transmission of azimuthal information based on polarization modulated light [J]. *Infrared & 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
- 12 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. 无机机械连接方位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
- 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空间方位失调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**(1): 0112006
杨志勇, 黄先祥, 周召发等. 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[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 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 & 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空间方位失调角传递技术的改进[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(4): 692~698

栏目编辑: 何卓铭