

基于正弦波磁光调制的方位失调角精确测量方法

杨志勇 周召发 黄先祥 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 针对传统基于正弦波磁光调制的方位失调角测量系统存在测量精度不高的问题,提出了一种新的系统方位失调角测量模型以提高系统测量精度。通过分析传统的基于正弦波磁光调制的方位失调角测量原理发现,由于采用省略高阶项的贝塞尔函数展开式表示磁光调制后的信号,引入了信号截断误差和方法误差,影响了系统测量精度。在分析基础上推导建立了一种基于纯三角函数表示的无理论误差的方位失调角测量新模型并进行了仿真。仿真结果表明,利用推导建立的失调角测量新模型,系统测量精度明显高于传统方法,这对重新理解基于正弦波磁光调制的方位失调角测量系统原理、提高系统测量精度具有一定的参考意义。

关键词 测量;方位测量系统;高精度测量;磁光调制;偏振光

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1012001

An Accurate Method of Measuring Azimuth Based on Sine Wave Magneto-Optic Modulation

Yang Zhiyong Zhou Zhaofa Huang Xianxiang Zhang Zhili

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

Abstract To solve the problem that the measurement precision of traditional azimuth measurement system based on sine wave magneto-optic modulation polarized light is low, a new model of measuring azimuth is presented to improve the measurement precision. The principle of traditional azimuth measurement system based on sine wave magneto-optic modulation polarized light is analyzed. As the signal from modulator is expressed with the omitted high-order term Bessel function expansions, the method error and truncation error are detected. A new model which does not include theoretic error is presented, and the new model expressed in simplex trigonometric function is established. Simulation results show that the system measurement precision of the new model is obviously higher than the traditional one. It provides a certain reference to apprehend the system principle and improve the system measurement precision.

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

OCIS codes 120.2130; 120.4640; 120.6085

1 引 言

基于磁光调制的空间方位失调角测量技术,是指利用光的偏振和法拉第磁致旋光效应测量位于不同水平面上的上下两台无机械连接的设备之间的水平方位失调角的技术^[1],此项技术的发展将大大促

进航天器对接、武器装备高精度方位测量等军用领域以及生物医药等多领域的发展。根据调制波形的不同磁光调制分为正弦波调制、方波调制、三角波调制和锯齿波调制,由于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

收稿日期: 2012-04-23; **收到修改稿日期**: 2012-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(41174162)资助课题。

作者简介: 杨志勇(1983—),男,博士研究生,主要从事定位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,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。

的过程中波形圆滑化,使得输出信号波形发生较大畸变^[2~4],因此本文以正弦波磁光调制为研究对象。

中国科学院西安光学精密机械研究所已经在此领域展开研究并初步取得了一些成果^[5,6],但是仍然存在系统方位失调角测量精度不高的问题。此外,近2年来第二炮兵工程大学的杨志勇等^[7~9]也在专注于提高系统方位失调角的测量精度的研究,文献[7]虽然能够提高测量精度,但是在某些局部点精密测量时存在可操作性差的问题;文献[8]在小角度范围内测量时精度不高;文献[9]虽然能够提高测量范围,但是测量精度不高。为有效提高系统的测量精度,本文分析了传统基于正弦波磁光调制的方位测量系统的工作原理,针对磁光调制后信号采用省略高阶项的贝塞尔函数展开式表示会引起方法误差和信号截断误差,从而影响系统测量精度的问题,推导建立了一种基于纯三角函数表示的无理论误差的方位失调角测量新模型并进行了仿真。仿真结果表明,利用推导建立的失调角测量新模型,系统测量精度明显高于传统方法,这为重新理解基于正弦波磁光调制的方位测量系统原理、提高系统测量精度提供了一定的参考价值。

2 原理分析

图1为方位失调角测量系统原理图。激光器发出的激光经过起偏器后成为线偏振光,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、提取出失调角对应的信号电压,并经过一定的运算得到方位失调角^[5]。

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,

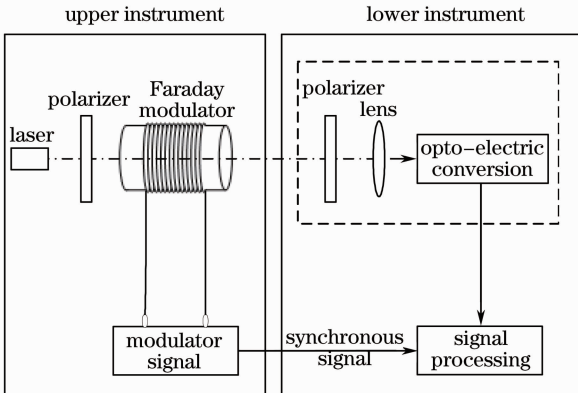


图1 方位失调角测量原理

Fig. 1 Principle of azimuth measurement system

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

式中 k 为放大电路的放大倍数, $u_0 = \eta I_0$ 为初始光强, 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^[10], α 为上、下仪器之间的方位失调角, θ 为光波偏振面的旋转角度, 并且

$$\theta = VB_m L \sin \omega t = \frac{1}{2} m_f \sin \omega t, \quad (2)$$

式中 ω 为加在调制线圈上的正弦激励信号的调制角频率, L 为光在磁致旋光玻璃中传播的有效距离, V 为磁致旋光玻璃的 Verdet 常数, B_m 为磁感应强度的最大值, m_f 定义为调制度, 单位为 rad, 存在 $m_f = 2VB_m L$ 。

将 $\theta = \frac{1}{2} m_f \sin \omega t$ 代入(1)式得到

$$u = \frac{ku_0}{2} [1 - \cos(m_f \sin \omega t) \cos 2\alpha + \sin(m_f \sin \omega t) \sin 2\alpha], \quad (3)$$

将(3)式中的 $\cos(m_f \sin \omega t)$ 和 $\sin(m_f \sin \omega t)$ 用贝塞尔函数展开, 由于展开式是无穷项使用不便, 且随着展开项数 n 的增加, 展开式中的系数 $J_n(m_f)$ 急剧减小, 所以目前普遍采用省略展开式中高阶项的方法表示^[5,6,11,12]:

$$\cos(m_f \sin \omega t) \approx J_0(m_f) + 2J_2(m_f) \cos 2\omega t, \quad (4)$$

$$\sin(m_f \sin \omega t) \approx 2J_1(m_f) \sin \omega t. \quad (5)$$

将(4)、(5)式代入(3)式, 分别得到磁光调制后信号中的直流分量 u_D 和交流分量 u_A 为

$$u_D = \frac{ku_0}{2} [1 - J_0(m_f) \cos 2\alpha], \quad (6)$$

$$u_A = ku_0 [J_1(m_f) \sin \omega t \sin 2\alpha - J_2(m_f) \cos 2\omega t \cos 2\alpha]. \quad (7)$$

分析发现随着失调角信号的变化, 交流分量 u_A 中始终存在两个横坐标不变的极值点 u_{A1} 、 u_{A2} , 其中

$$u_{A1} = ku_0 [J_1(m_f) \sin 2\alpha + J_2(m_f) \cos 2\alpha], \quad (8)$$

$$u_{A2} = ku_0 [-J_1(m_f) \sin 2\alpha + J_2(m_f) \cos 2\alpha], \quad (9)$$

利用取样积分电路分别获取 u_{A1} 、 u_{A2} 的值, 消除 k 的影响可得

$$\frac{u_{A1} - u_{A2}}{u_{A1} + u_{A2}} = \frac{J_1(m_f) \sin 2\alpha}{J_2(m_f) \cos 2\alpha}. \quad (10)$$

由此可得到方位失调角的测量模型

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{u_{A1} - u_{A2}}{u_{A1} + u_{A2}} \frac{J_2(m_f)}{J_1(m_f)} \right]. \quad (11)$$

由于原理推导中省略了贝塞尔函数展开式中的高阶项, 必然引起信号截断误差, u_A 不再是真正的交流信号; 由于贝塞尔函数展开式中的系数 $J_0(m_f)$ 为无穷项, u_D 也不再是真正的直流信号, 所以上述

原理推导中一定含有误差。

立了一种基于纯三角函数表示的方位失调角测量模型。

3 方法改进

将(1)式展开得到

为了在理论推导过程中消除各种误差,提出建

$$u = ku_0(\sin^2\theta\cos^2\alpha + \cos^2\theta\sin^2\alpha + 2\sin\theta\cos\theta\sin\alpha\cos\alpha). \quad (12)$$

将 $\cos^2\theta = 1 - \sin^2\theta$ 和 $\theta = \frac{1}{2}m_f\sin\omega t$ 代入(12)式得到

$$u = ku_0\left[\sin^2\alpha + \sin^2\left(\frac{1}{2}m_f\sin\omega t\right)\cos 2\alpha + \sin\left(\frac{1}{2}m_f\sin\omega t\right)\cos\left(\frac{1}{2}m_f\sin\omega t\right)\sin 2\alpha\right]. \quad (13)$$

从 $\cos\left(\frac{1}{2}m_f\sin\omega t\right)$ 和 $\sin\left(\frac{1}{2}m_f\sin\omega t\right)$ 的贝塞尔函数展开式^[13]可以看出仅有 $\sin\left(\frac{1}{2}m_f\sin\omega t\right)$ 单纯是以 ωt 为变量的函数,所以当失调角 α 不变而 ωt 变化时, u 中仅有 $ku_0\sin^2\alpha$ 是恒量。故系统中磁光调制后的信号中直流分量为

$$u_d = ku_0\sin^2\alpha = \frac{ku_0}{2}(1 - \cos 2\alpha). \quad (14)$$

交流分量为

$$u_a = u - u_d = \frac{ku_0}{2}[\cos 2\alpha - \cos 2\alpha\cos(m_f\sin\omega t) + \sin 2\alpha\sin(m_f\sin\omega t)]. \quad (15)$$

对交流信号求导

$$\frac{du_a}{d(\omega t)} = \frac{ku_0}{2}m_f\cos\omega t\sin(m_f\sin\omega t + 2\alpha) = 0. \quad (16)$$

若 $\cos\omega t = 0$, 可得交流信号中两个极值点的横坐标 $\omega t = 2m\pi + \pi/2, \omega t = 2m\pi + 3\pi/2 (m = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots)$ 以及它们分别对应的极值点 u_{a1}, u_{a2} 为

$$u_{a1} = \frac{ku_0}{2}(\cos 2\alpha - \cos 2\alpha\cos m_f + \sin 2\alpha\sin m_f), \quad (17)$$

$$u_{a2} = \frac{ku_0}{2}(\cos 2\alpha - \cos 2\alpha\cos m_f - \sin 2\alpha\sin m_f). \quad (18)$$

从 u_{a1}, u_{a2} 的横坐标 ωt 的表达式可以看出, 二者的横坐标位置不随失调角 α 的变化而变化。

若 $\sin(m_f\sin\omega t + 2\alpha) = 0$, 得到的极值点的横坐标 ωt 是与失调角有关联的, 所以相应的极值点的横坐标会随着失调角的变化而左右移动。

利用取样积分电路分别获取 u_{a1}, u_{a2} 的值, 消除 k 的影响可得

$$\frac{u_{a1} - u_{a2}}{u_{a1} + u_{a2}} = \frac{\sin m_f\sin 2\alpha}{(1 - \cos m_f)\cos 2\alpha}. \quad (19)$$

由此可得到方位失调角的测量新模型

$$\alpha = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{u_{a1} - u_{a2}}{u_{a1} + u_{a2}} \frac{1 - \cos m_f}{\sin m_f}\right), \quad (20)$$

可见, 在(20)式方位失调角测量新模型的推导建立过程中, 没有引入任何误差。

4 仿真结果分析

基于上述理论分析, 采用 Matlab 软件为仿真工

具, 以 $u_0 = 1 \text{ V}, m_f = 0.0087 \text{ rad}, k = 10$ 为例, 仿真得到了两种模型的失调角测量对比结果, 如图 2 所示。图 2(a)为两种模型的测量精度对比, 图 2(b)为两种模型测量结果与真值的对比结果。由图 2 可知, 传统模型的测量精度不高, 新模型的测量精度明显高于传统模型。

为了探讨传统测量模型计算误差较大的原因, 这里假设 u_D 为传统模型中磁光调制后信号中的直流分量, 图 3 为此情况下两种模型的测量结果对比。图 3(a)为两种模型的测量精度对比, 图 3(b)为两种模型测量结果与真值的对比结果。由图 3 可知新模型的测量精度仍然高于传统模型, 但是传统模型的测量精度已经明显提高。由此可知, 磁光调制后信号中的直流分量对系统的测量精度影响比较大, 由于 $J_0(m_f)$ 是无穷项, 所以传统模型仍然很难精确测量方位失调角。

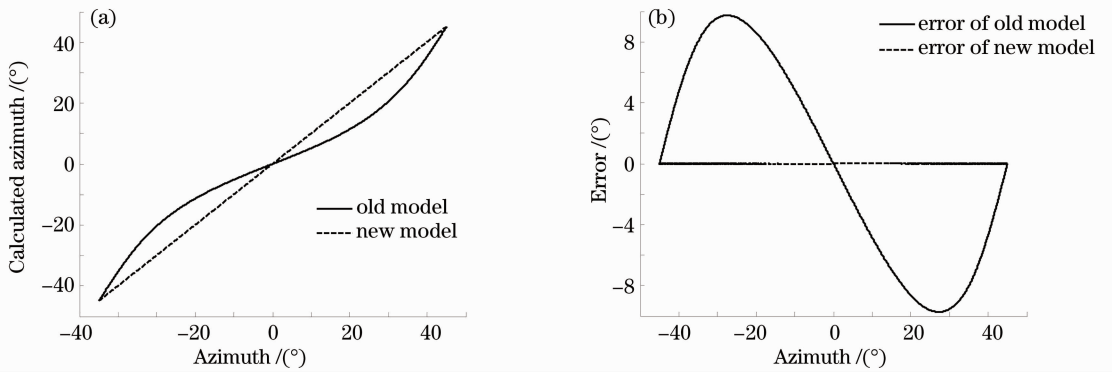


图 2 两种模型仿真结果对比图
Fig. 2 Simulation results of two model

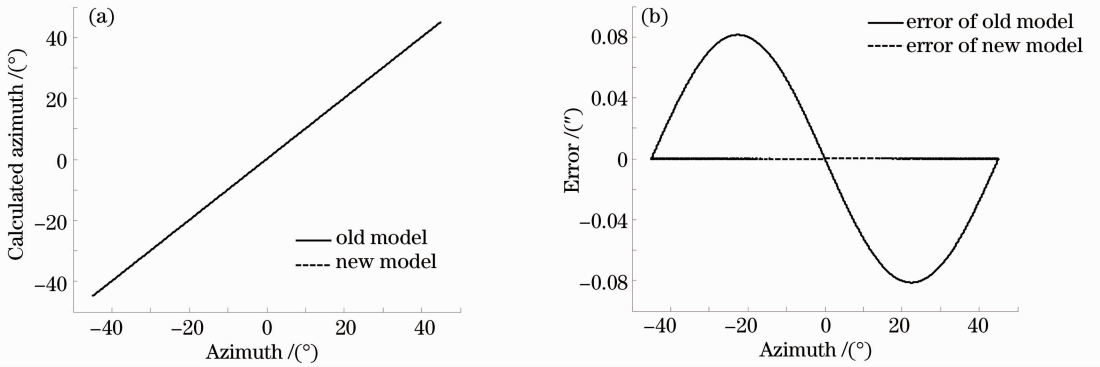


图 3 u_D 作为传统模型中直流分量情况下两种模型的测量对比图

Fig. 3 Comparison of simulation results when u_D is taken as theoretic DC signal of the traditional model

当假设 u_A 作为传统模型中磁光调制后信号中的交流分量时,图 4 为两种模型的测量结果对比。图 4(a)为两种模型的测量精度对比,图 4(b)为两种模型测量结果与真值的对比结果。由图 4 可知,两

种模型的测量精度基本相当。由图 3(b)和图 4(b)对比可知传统模型的测量误差主要是由磁光调制后信号采用省略高阶项的贝塞尔函数展开式表示引起的。

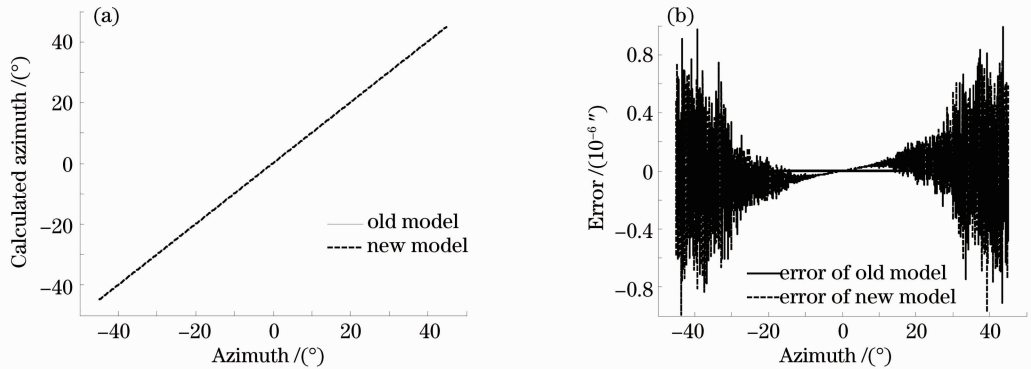


图 4 u_A 作为传统模型中交流分量情况下两种模型的测量对比图

Fig. 4 Comparison of simulation results when u_A is taken as theoretic AC signal of the traditional model

5 结 论

由于传统基于正弦波磁光调制的方位测量系统存在测量精度不高,本文分析了传统测量系统原理

(系统中磁光调制后信号采用省略高阶项的贝塞尔函数展开式表示会引起截断误差和方法误差)对模型测量精度的影响。提出建立了一种基于纯三角函

数表示的方位失调角测量新模型,从理论推导上消除了各种误差。仿真结果表明,建立的新模型测量精度明显高于传统模型,并且确定了传统模型测量误差较大的根本原因,这为重新理解基于正弦波磁光调制的方位测量系统原理、提高系统测量精度提供了一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Li Yongan, 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
- 3 Li Yongan, Li Xiaojun, Bai Jintao. Analyze on sine wave and rectangular wave magneto-optical modulation by comparing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(s): 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**(s): 192~197
- 4 Li Xiaojun, Li Yongan, 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
- 5 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测量[J]. *光子学报*, 2001, **30**(11): 1389~1391
- 6 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
- 7 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
- 8 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
- 9 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
- 10 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. 19~21
申小军. 方位垂直测量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. 19~21
- 11 Zhou Fuqiang, Sun Changku, Wang Chunhe *et al.*. A new method for simultaneous measuring five-dimensional geometric errors of the object[J]. *Acta Metrological Sinica*, 1999, **20**(4): 247~251
周富强, 孙长库, 王春和等. 同时测量物体五维几何偏差的新方法[J]. *计量学报*, 1999, **20**(4): 247~251
- 12 Sun Changku, Zhou Fuqiang, Liu Yue *et al.*. A six degree-of-freedom measuring system[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 1998, **19**(4): 362~365
孙长库, 周富强, 刘越等. 六自由度测试系统[J]. *仪器仪表学报*, 1998, **19**(4): 362~365
- 13 Liu Shishi, Liu Shida. Special Function[M]. Beijing: Weather Publishing Company, 2002
刘式适, 刘式达. 特殊函数[M]. 北京: 气象出版社, 2002

栏目编辑: 何卓铭