

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

周召发 杨志勇 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 针对基于正弦波磁光调制的方位对准系统存在方位失调角对准范围小的问题,在阐述了方位对准原理、分析磁光调制后混合信号成分的基础上,提出了一种空间大范围方位自动对准方法。通过磁光调制前后交流信号(AC)的相位对比得出了判断失调角正负的方法,利用方位对准系统中下仪器的初始架设位置和转动方式实现了初始光强的自主测量,在此基础上利用大角度范围内采集的磁光调制后的直流信号(DC)建立了粗略失调角的计算模型,并详述了具体实现方案,下仪器在粗略失调角信号的控制下逐渐转动至小角度范围内。之后,利用磁光调制后采集的交流信号实现了小角度范围内失调角的精确测量,两个模型紧密配合保证了空间大范围方位自动对准。仿真结果表明,提出的方法理论上可以实现 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围内较高精度的自动对准,有效扩大了方位失调角的对准范围,解决了传统的方位对准范围小的问题。

关键词 测量;方位失调角;大范围自动对准;磁光调制

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0408002

Automatic Alignment Method Based on Sine Wave Magneto-optic Modulation in Spatial Wide-Angle Scale

Zhou Zhaofa Yang Zhiyong Zhang Zhili

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

Abstract The azimuthal alignment scale of current azimuth alignment system based on sine wave magneto-optic modulation is narrow. The principle of azimuth alignment system and the mixed signal's component from the modulator are analyzed, then an azimuth automatic alignment method in spatial wide-angle scale is present. The method of estimate azimuth is established based on the phase comparison between the modulation signal and the alternating current (AC) signal from modulator, and the independent measurement model of the initial light intensity signal is established according to the lower instrument's initial setting place and running way, then the model of measuring glancing azimuth is presented based on the collected direct current (DC) signal from modulator in wide-angle scale, the lower instrument is controlled by the glancing azimuth signal and turned into the little-angle scale. The model of measuring azimuth accurately in little-angle scale is established based on the collected AC signal from modulator. Two models cooperate together to assurance the azimuth automatic alignment precision in wide-angle scale. The simulation results show that with the method, the system's theoretic automatical alignment scale is $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$, it can solve the current problem effectively.

Key words measurement; azimuth; automatic alignment wide-angle scale; magneto-optic modulation

OCIS codes 120.2130; 330.1710; 120.4640; 120.6085

1 引言

基于磁光调制的空间方位对准技术,是指利用光的偏振和法拉第磁致旋光效应使位于不同水平面

上的上下两台无机械连接的设备之间实现水平方位同步^[1],此项技术的发展成长将大大促进航天器对接、武器装备高精度方位对准等军用领域以及生物

收稿日期: 2011-11-07; 收到修改稿日期: 2011-12-20

作者简介: 周召发(1973—),男,副教授,主要从事定位定向与基准传递方向等方面的研究。E-mail: zzftxy@163.com

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,但是后3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^[2~4],所以这里主要以正弦波磁光调制为研究对象。

目前中国科学院西安光学精密机械研究所已在此领域展开相关研究,并初步取得了一些成绩,但是仍然存在系统方位失调角对准范围小等问题^[5,6];同时,杨志勇等^[7,8]也在此领域展开了相关研究。为了扩大方位失调角的对准范围,本文推导建立了大范围内方位失调角的计算模型,但是该方法严重受制于初始光强的精确计算,所以又提出了无需借助外界仪器的自主式初始光强测量方法,并结合磁光调制前后交流信号(AC)的相位对比得出了判断

失调角正负区间的方法,进一步扩大了失调角的对准范围。在小角度范围内,利用隔直后的交流信号中横坐标不变的极值点实现了失调角的测量。仿真结果表明,文中提出的方法有效地扩大了失调角的对准范围,解决了传统的方位对准范围小的问题。

2 原理概述及分析

图1为方位失调角对准系统原理图。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、提取出失调角对应的信号电压,并将输出的控制信号送往控制系统,而控制系统控制步进电机带动下仪器转动,实现上下仪器自动对准^[1]。

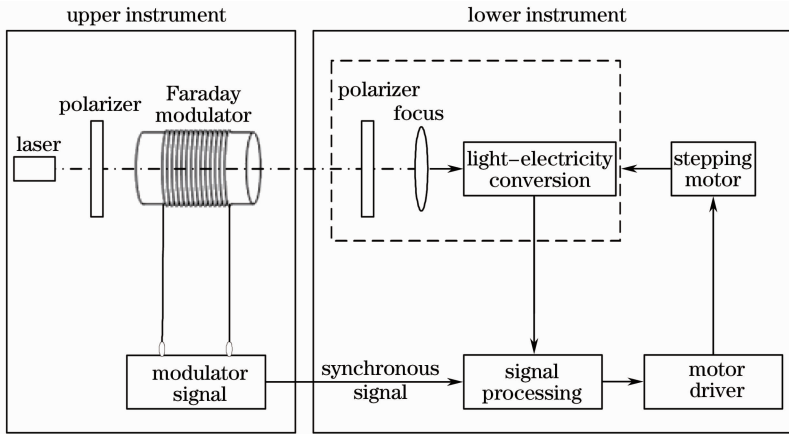


图1 方位对准系统原理

Fig. 1 Principle of azimuth-alignment system

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

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

式中 k 为放大电路的放大倍数; $u_0 = \eta I_0$,表示初始光强, 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^[9], 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、下仪器之间的方位失调角,其中 ω 为在调制线圈上所加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 为调制度,存在 $m_f = 2VB_m L$ 。申小军等^[9,10]提出将磁光调制后采集的信号进行隔直处理,利用取样积分电路分别获得隔直后交流信号中横坐标不变的极值点 u_{11} 、 u_{12} ,通过计算可获得方位失调角

$$\alpha \approx \frac{1}{2} \frac{J_2(m_f)}{J_1(m_f)} \frac{u_{11} + u_{12}}{u_{11} - u_{12}}, \quad (2)$$

式中 J_1 、 J_2 分别为贝塞尔函数一次项、二次项的系数。但是实验表明此方法只能应用在小角度范围内,实际有效方位对准范围非常有限。

为了分析失调角对准范围有限的原因,以 $k=100$ 、 $m_f=0.0087$ rad为例,得到了失调角在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 范围内磁光调制后采集的混合信号的成分分析情况,具体如图2所示。

图2(a)~(d)依次为磁光调制后被隔直的直流信号(DC)、隔直后的交流信号幅值最大值、交流信号幅值最大值与直流信号的比值以及 0° 附近交流信号幅值最大值与直流信号的比例情况。可以看出,随着失调角的增大直流信号越来越强;而隔直后的交流信号幅值最大值存在周期性,在 $\pm 45^\circ$ 处取得极大值,在 -90° 、 0° 、 90° 处取得极小值;但交流信号

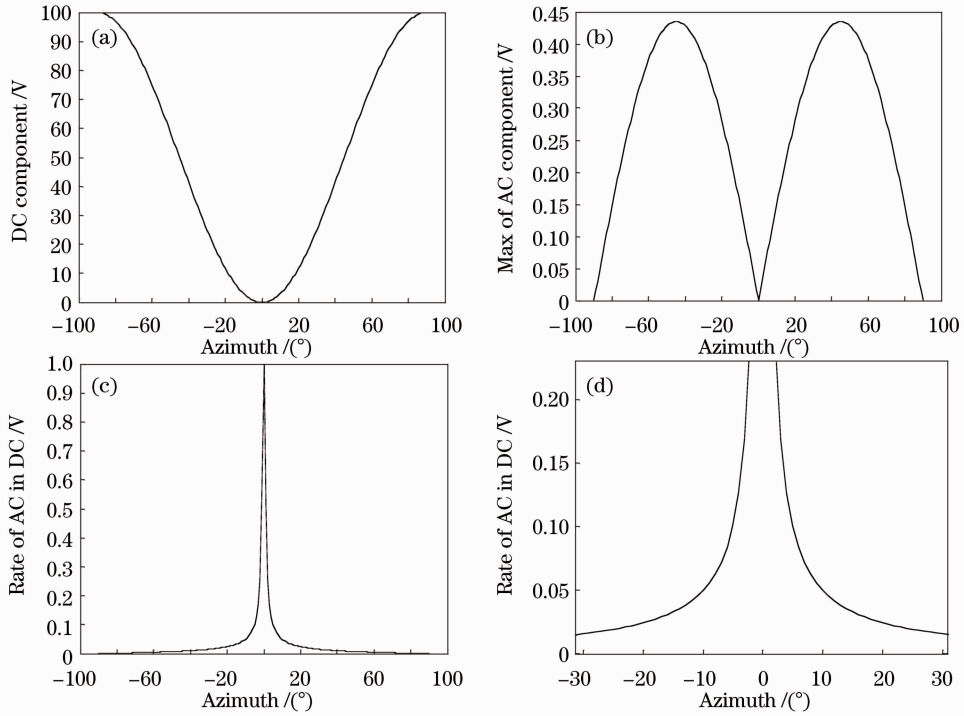


图2 磁光调制后的混合信号分析

Fig. 2 Analysis of mixed signal from modulator

幅值最大值与直流信号的比值随着失调角的增大急剧减小,在失调角为 10° 时,二者的比值已经不足5%。由此可见,随着失调角的增大,交流信号在混合信号中的比重越来越小,交流信号越来越微弱,交流信号的提取越来越困难,这就是申小军等^[9,10]提出的利用交流信号极大值实现方位对准中存在失调角对准范围小的根本原因。

3 测量模型的建立

根据上述磁光调制后混合信号成分分析可以看出,在大角度范围内,可以考虑利用混合信号中信号强度较强的直流信号计算失调角,在小角度范围内,利用隔直后的交流信号计算失调角。

3.1 大角度范围内粗略失调角计算模型

对(1)式中的信号进行低通滤波处理,得到磁光调制后采集的混合信号中直流分量 u_{00} 的表达式

$$u_{00} = ku_0 \sin^2 \alpha. \quad (3)$$

从而得到大角度范围内失调角的计算模型

$$\alpha = \begin{cases} \frac{1}{2} \arccos\left(1 - \frac{2u_{00}}{ku_0}\right), & \alpha \in [0^\circ, 90^\circ] \\ -\frac{1}{2} \arccos\left(1 - \frac{2u_{00}}{ku_0}\right), & \alpha \in [-90^\circ, 0^\circ] \end{cases} \quad (4)$$

式中 u_{00} 由(3)式可知,反余弦函数的计算可以通过

硬件查表法实现,查表间隔决定反余弦函数的计算精度,失调角正负的判断可由4.1提供的方法获得,唯有初始光强 u_0 不能确定,但它又直接影响失调角的计算精度,所以必须精确测量 u_0 。

3.2 大角度范围内初始光强的精确计算

在上下仪器前后基本对正的基础上,设下仪器转动的角度为 β ,当上下仪器之间的任意初始失调角 $\alpha_1 \in (-90^\circ, 90^\circ - \beta)$ 时,将下仪器架设在已经预先标定好的 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内 $\alpha_1 + 90^\circ$ 的初始位置处,并测量得到该处磁光调制后采集的混合信号经低通滤波处理后的直流信号 u_{01} ,建立 α_1 与 u_{01} 的关系式

$$u_{01} = ku_0 \sin^2(\alpha_1 + 90^\circ) = ku_0 \cos^2 \alpha_1. \quad (5)$$

之后下仪器在 $\alpha_1 + 90^\circ$ 的基础上转动角度 β 至 $\alpha_1 + \beta + 90^\circ$,利用与下仪器固定连接的光栅盘准确测量实际转动的角度,并获取 $\alpha_1 + \beta + 90^\circ$ 处磁光调制后采集的混合信号经低通滤波处理后的直流信号 u_{02} ,建立 α_1 与 u_{02} 的关系式

$$u_{02} = ku_0 \sin^2(\alpha_1 + \beta + 90^\circ) = ku_0 \cos^2(\alpha_1 + \beta). \quad (6)$$

(5),(6)式联立,并根据 $\alpha_1 \in (-90^\circ, 90^\circ - \beta)$ 得到 u_0 的计算公式

$$u_0 = \frac{u_{01} + u_{02} - 2\cos \beta \sqrt{u_{01}u_{02}}}{k \sin^2 \beta}. \quad (7)$$

此方法可以实现初始失调角在 $-90^\circ \sim 90^\circ - \beta$

范围内时 u_0 的精确计算,计算公式简单,对下仪器转动的角度要求不高,利用光栅盘精确测量转动的角度值容易实现,但是对下仪器的初始架设位置略有限制,操作时需要注意。

3.3 小角度范围内失调角计算模型

当下仪器在粗略失调角信号的控制下逐渐转动至预先设定的小角度范围内时,将磁光调制后采集的混合信号进行高通滤波处理获得交流信号,经分析交流信号中恒存在两个横坐标不变的极值点 u_{11} 、 u_{12} ,利用取样积分电路采集 u_{11} 、 u_{12} 并代入(2)式得到小角度范围内的失调角,下仪器在此信号的控制下继续转动至与上仪器对准。

4 具体方案

4.1 失调角正负的判断

从图2可以看出混合信号中各成分均在 0° 左右成对称分布,且考虑到余弦函数在整周期范围内也同

样在 0° 左右成对称分布,它们都不能实现失调角正负的区分,所以有必要寻找判断失调角正负的方法。

图3是方位对准系统中的正弦波调制信号,图4(a)~(f)依次是失调角分别为 -89° 、 -45° 、 -1° 、 1° 、 45° 、 89° 时磁光调制后采集的信号经高通滤波处理获得的交流信号。

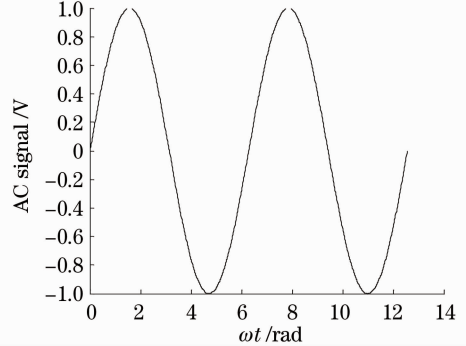


图3 磁光调制信号

Fig. 3 Modulation signal

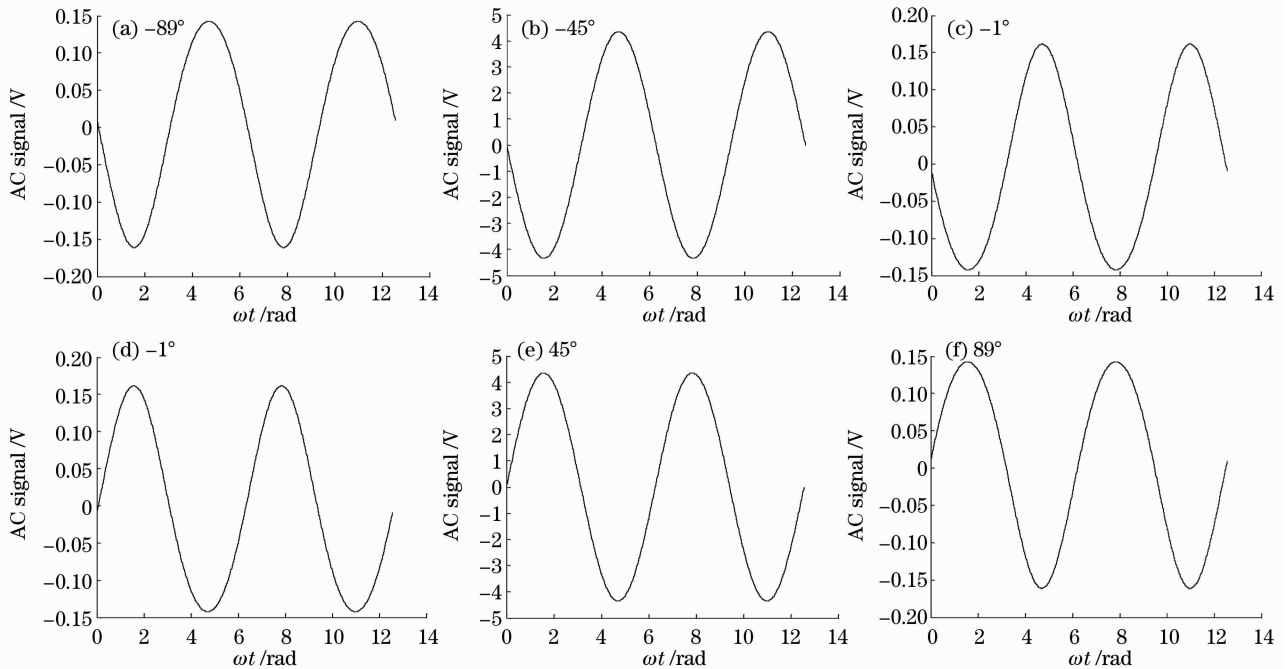


图4 磁光调制后采集的交流信号

Fig. 4 Collected AC signal from modulator

通过对调制信号与磁光调制后采集的混合信号经高通滤波处理后获得的交流信号的相位对比发现:当失调角为正值时,二者相位相同;当失调角为负值时,二者相位相反。因此,可以通过初始失调角处磁光调制前后交流信号的相位对比判断失调角的正负。

4.2 大角度范围内反余弦函数查表法的实现

由于已经解决了判断失调角正负的问题,所以

反余弦函数的计算只需要考虑正半轴即可,当失调角为负值时,利用正负区间的左右对称性即可。

为了最大限度地扩大失调角的测量范围,这里在正半轴设计失调角 α 的变化范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$,由于(4)式中系数 $1/2$ 的存在,反余弦函数 $y = \arccos x$ 中 y 的变换范围应为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。为了节约硬件存储空间,根据 x 的正负将 $0^\circ \sim 180^\circ$ 分为两个区间:1区, $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ 、2区, $90^\circ \leq \alpha < 180^\circ$,具体如图5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 $\cos \alpha = -\cos(180^\circ - \alpha)$ 变换实现。

对反余弦函数 $y = \arccos x$ 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 $0^\circ \sim 90^\circ$ 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,具体如表 1 所示。查表时查表值 $f(x)$ 的定义为

$$f(x) = \begin{cases} y(i), & x(i) \geq x > x(i+1) \text{ and} \\ & x(i) - x \leq x - x(i+1) \\ y(i+1), & x(i) \geq x > x(i+1) \text{ and} \\ & x(i) - x > x - x(i+1) \end{cases} \quad (8)$$

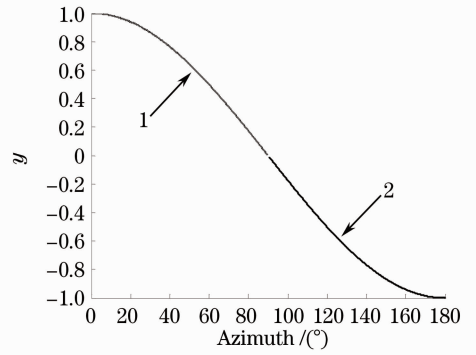


图 5 x 的区间分布

Fig. 5 Distribution of x

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	1	4096	1	0	0	0.895255662060943
2	0.999755859375	4095	2	1.266095579267397	1	0.550659843212012
3	0.99951171875	4094	3	1.790565973140261	2	0.532345750534577
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
44	0.7314453125	2996	44	42.99230306807876	43	0.502711268468531
45	0.71923828125	2946	45	44.00837271315764	44	0.509455748166523
46	0.70703125	2896	46	45.006119849542884	45	0.508321667108831
47	0.694580078125	2845	47	46.006235696394505	46	0.509647899667911
48	0.681884765625	2793	48	47.00889858160817	47	0.504126269126232
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
89	0.034912109375	143	89	87.99927690644911	77	0.503089381088316
90	0.017333984375	71	90	89.00678611092985	89	0.503411709434374
91	0	0	91	90	90	0.496588290565626

4.3 总体实施方案

结合本系统的实际情况具体方案是:在上下仪器前后基本对正的基础上,将下仪器放置在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内任意初始位置处测量得到 u_{01} ,之后转动 β 测量得到 u_{02} ,根据(7)式计算出精确的 u_0 ;然后将下仪器放置在任意被测位置处,通过调制信号与调制后采集的信号经高通滤波处理后得到的交流信号的相位对比判断出被测失调角的正负,并测量得到磁光调制后采集的信号经低通滤波处理得到的直流信号 u_{00} ,结合计算出的 u_0 得到 $y = \arccos x$ 中 x 的值 $x = 1 - \frac{2u_{00}}{ku_0}$,根据 x 的符号和失调角的正负,通过查表法得到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;在小角度范围内,利用新状态下磁光调制后采集的信号经高通滤波处理后获得的交流信号中的两个横坐标不变的极值点 u_{11} 、 u_{12} 的值,计算出 $x' = \frac{J_2(m_f)}{J_1(m_f)}$ 。

$\frac{u_{11} + u_{12}}{u_{11} - u_{12}}$,直接代入公式 $\Delta\alpha' \approx \frac{1}{2} x'$ 得到小角度范围内的失调角,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,具体如图 6 所示。

5 仿真结果及误差分析

5.1 仿真结果

基于原理和实现方案,以 Matlab 为仿真工具,计算得到了失调角在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化时粗略失调角的计算值与真值的误差以及失调角最终计算值与真值的误差,分别如图 7(a)、(b)所示。

由图 7(a)可以看出经过大角度范围内反余弦函数查表粗略计算后,大部分误差都控制在 0.3° 之内,仅在 -90° 、 0° 、 90° 附近误差较大,但都控制在 0.5° 之内;同样从图 7(b)可以看出经过小角度范围内计算后,误差大部分控制在 $0.02''$ 之内,仅在 -90° 、 0° 、 90° 附近误差较大,但都控制在 $0.15''$ 之内。对对准范围而言,此方法中 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 的对准

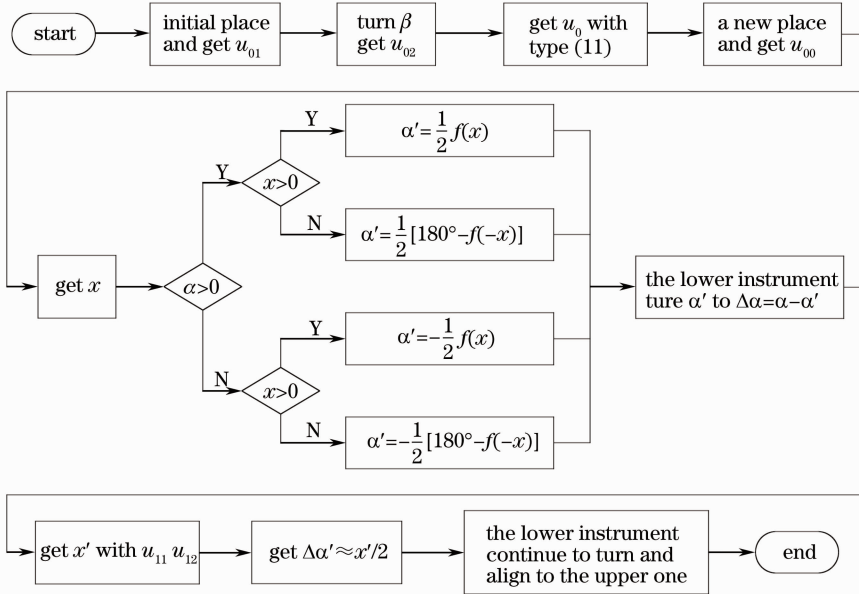


图 6 系统总流程图

Fig. 6 System flow chart

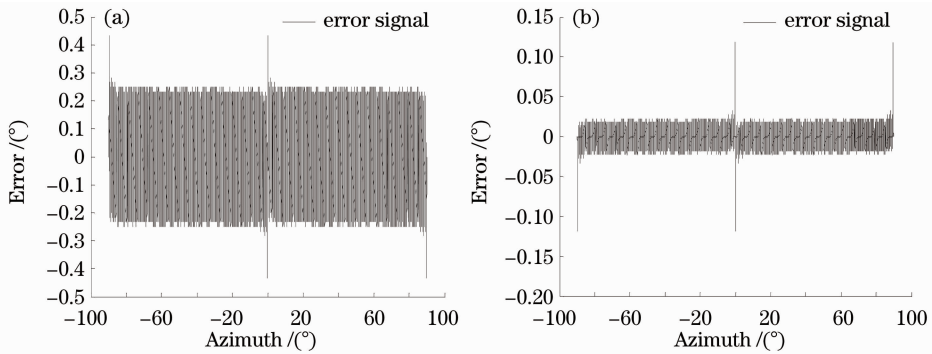


图 7 理论仿真结果

Fig. 7 Theoretic simulation results

范围远大于现有方法^[9,10]中的对准范围。

在 $-90^\circ, 0^\circ, 90^\circ$ 附近产生相对较大误差主要是因为 在 $0^\circ \sim 1^\circ$ 范围内查表或将 $-179^\circ \sim -180^\circ, 179^\circ \sim 180^\circ$ 范围内角度值转换为 $0^\circ \sim 1^\circ$ 范围内角度查表误差较大(约 0.9°)引起的。

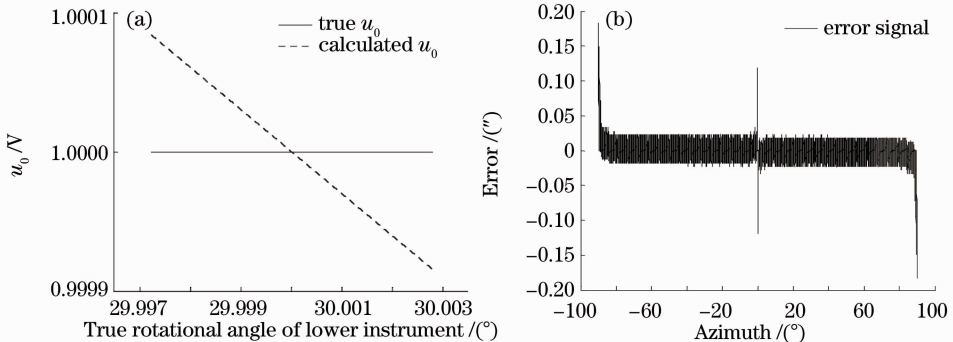


图 8 下仪器的转角测量误差引起的误差分析

Fig. 8 Error analysis of the lower instrument's rotational error

5.2 初始光强的计算误差引起的系统误差

本系统中主要的误差来源有:初始光强 u_0 的计算误差引起的误差以及硬件采集电路采集信号引起的误差。由于硬件电路可以随着主要元器件的性能改进而采集精度逐渐提高,不再赘述,这里主要分析

初始光强 u_0 的计算误差引起的系统误差。

初始光强 u_0 的计算误差主要来源于下仪器转动角度 β 的测量误差, 由于目前光栅测角的精度已经达到 $1''$, 为稳妥起见, 这里以 $k=100$ 、 $u_0=1\text{ V}$ 、 $\alpha_1=30^\circ$ 、 $\beta=30^\circ$ 、光栅测量得到的转动角度为 $30^\circ \pm 10''$ 为例, 得到了 u_0 的计算值与真值的对比图以及由此引起的系统对准误差图, 分别如图 8(a)、(b) 所示。由图 8 可见, 即使光栅测角的误差已经高达 $10''$, 但是初始光强的计算误差仍然控制在 0.01% 以内, 且系统的最终对准误差仍然大部分控制在 $0.02''$ 之内, 基本没有变化, 仅在 -90° 、 90° 附近小范围内误差略有增加, 估计是由 u_0 的计算误差引起的累积误差所致, 但仍然在 $0.2''$ 之内。所以由光栅测角误差引起的初始光强计算误差可以忽略不计。

6 结 论

本文以基于正弦波磁光调制的方位对准系统为研究背景, 针对现有系统方位失调角对准范围小的问题, 在阐述方位对准原理、剖析磁光调制后混合信号成分的基础上, 提出了一种空间大范围内无机械连接的上下仪器自动对准的方法。通过对磁光调制后采集的信号进行低通滤波处理, 建立了大范围内粗略失调角计算模型, 提出了一种自主式测量初始光强的方法, 消除了初始光强对大范围内粗略失调角计算的约束, 并结合磁光调制前后交流信号相位对比得出了判断失调角正负的方法; 在小角度范围内, 通过对磁光调制后采集的信号进行高通滤波、取样积分处理, 建立了信号中极值点与失调角的关系模型, 解决了小角度范围内失调角的计算问题。仿真结果表明, 两个计算模型紧密配合, 扩大了方位失调角的对准范围, 有效解决了失调角对准范围小的问题, 对改进当前方位对准系统、扩大方位失调角对准范围具有重要的理论指导意义。

参 考 文 献

- 1 Dong Xiaona, Gao Limin, Shen Xiaojun *et al.*. Passing azimuth vertically with the technique of magneto-optical 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
- 2 Li Yong'an, Li Xiaojun, Li Shuting *et al.*. Analysis on magneto-optical modulation by modeling [J]. *Journal of 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 Yong'an, 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 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
- 5 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
- 6 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
- 7 Yang Zhiyong, Huang Xianxiang, Zhou Zhaofa *et al.*. New high-precision method of measuring spatial azimuth based on magneto-optical 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 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, Chinese Academy of Sciences, 2001. 19~21
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. 19~21
- 10 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. 28~29
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. 28~29