

文章编号 1004-924X(2012)04-0692-07

## 基于正弦波磁光调制的 空间方位失调角传递技术的改进

杨志勇\*, 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:** 为了扩大基于正弦波磁光调制的方位传递系统的传递范围并提高传递精度, 对传统的方位失调角传递方法进行了改进。在分析当前方位失调角传递原理的基础上, 引入二倍角公式来扩大失调角的传递范围; 通过分析失调角与磁光调制后光强信号中横坐标不变的极值点的关系, 建立了失调角测量模型, 并利用信号中极值点的对比细化了测量模型。提出了大角度查表和小角度近似逼近的方法, 解决了测量模型中反正切函数的具体实现问题。仿真结果表明: 失调角的理论传递范围明显扩大, 精度较高; 实验结果表明: 实际的失调角可在 $-64^{\circ}\sim 64^{\circ}$ 传递, 传递误差在 $10''$ 以内, 优于当前方法。提出的方法可为大范围、高精度传递空间方位失调角提供参考。

**关键词:** 方位传递; 空间失调角; 二倍角公式; 磁光调制

**中图分类号:** TH741; TN761 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122004.0692

## Improvement of transmitting spatial azimuth based on sine wave magneto-optic modulation

YANG Zhi-yong\*, ZHOU Zhao-fa, ZHANG Zhi-li

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

\* Corresponding author, E-mail: yangzhiyong@126.com

**Abstract:** To enlarge the transmission scale and improve the transmission precision of an azimuth transmission system based on sine wave magneto-optic modulation, a new method of transmitting the azimuth in a large-scale and high-precision was established. The principle of the current azimuth transmission system was analyzed, and a double-angle formula was introduced to enlarge the transmission scale. A model to measure the azimuth was established according to analyzing the relationship between the azimuth and the extremum of the modulated light, and the measurement model was expatiated by comparing the extremums. A integrated method combined the approximation in little-scale with the looking-up table in large-scale was presented to calculate the arc tangent function in the model. Simulation results indicate that the theoretic transmission scale is widened obviously and the precision

收稿日期: 2011-07-27; 修订日期: 2011-11-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41174162)

is improved. Experiment results show that the actual transmission scale is  $-64-64^\circ$  and the transmission error is under  $10''$ , which is better than those of the current methods. The method provides a new way to transmit the spatial azimuth in large-scales and high-precision.

**Key words:** azimuth transmission; spatial azimuth; double-angle formula; magneto-optic modulation

## 1 引言

基于磁光调制偏振光的空间方位失调角传递技术,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<sup>[1]</sup>,此项技术将大大促进航天器对接、武器装备高精度方位传递等军用技术的发展。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四种方式,但是后三种尚处于计算机模拟阶段,而且由于方波调制信号在推动磁光调制器的过程中其波形圆滑化,这会使输出信号波形发生较大畸变<sup>[2-4]</sup>,所以本文以正弦波磁光调制为研究基础。

目前,中国科学院西安光学精密机械研究所的高立民、陈良益、马彩文等教授已经在此领域展开相关研究,并初步取得了一些成绩<sup>[5-6]</sup>,但是仍存在系统传递精度不高、失调角传递范围小等问题。为了能够在较大范围内传输失调角,申小军<sup>[7]</sup>提出:当失调角  $\alpha$  在  $|\alpha| \leq 5^\circ$  时,利用  $\tan(2\alpha) \approx 2\alpha$ ,方位传递系统作为线性系统来分析;当  $|\alpha| \geq 5^\circ$  时,先利用饱和电压控制下仪器转动至  $|\alpha| \leq 5^\circ$ ,然后把系统作为线性系统处理,最终控制下仪器转动至上、下仪器精确对准。不过,这样做依然存在系统传递误差过高的问题,并且没有明确说明  $|\alpha| \geq 5^\circ$  的情况具体是如何实现的。

本文在分析现有基于正弦波磁光调制偏振光的方位失调角传递技术原理的基础上,引入了二倍角公式来增大失调角传递范围;建立了失调角与磁光调制后光强信号中横坐标不变的极值点的关系方程;针对方程求解中遇到的增根问题,提出了利用信号中极值点对比的方法去除增根,最终获得了失调角的计算公式;针对计算公式中反正切函数的实现问题,提出了大角度范围硬件查表法和小角度范围近似逼近的综合方法。仿真和试验结果表明文中提出的方法可以明显扩大失调角的传递范围,提高传递精度。

## 2 原理推导

图1为方位失调角传递系统原理图。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检测处理经光电转换后的信号、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,完成方位同步过程<sup>[1]</sup>。

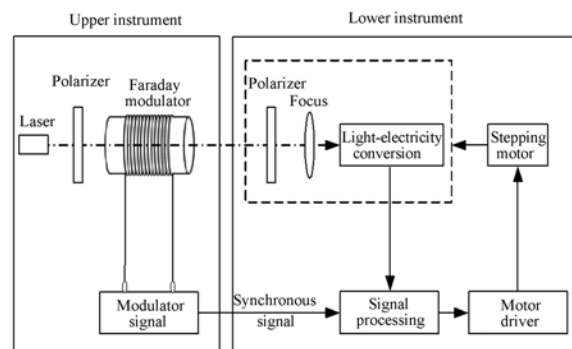


图1 方位传递系统原理

Fig. 1 Principle of azimuth transmission system

设激光器发出的激光经过起偏器后的出射光强为  $I_0$ ;在调制线圈上所加正弦激励信号的调制角频率为  $\omega$ ;光在磁致旋光玻璃中传播的有效距离为  $L$ ;磁致旋光玻璃的维尔德常数为  $V$ ;磁感应强度的最大值为  $B_m$ ;调制度为  $m_t$ ,单位是弧度,  $m_t = 2VB_m L$ ;光波偏振面的旋转角度为  $\theta$ ,  $\theta = VB_m \sin \omega t L = \frac{1}{2} m_t \sin \omega t$ ;上、下仪器之间的方位失调角为  $\alpha$ 。

根据马吕斯定律,结合系统的工作原理,得输出光强信号为

$$I = I_0 \sin^2(\alpha + \theta). \quad (1)$$

调制后的光信号经光电转换、隔直、放大后,

得到

$$u = \frac{k}{2} u_0 [2J_1(m_f) \sin 2\alpha \sin \omega t - 2J_2(m_f) \cos 2\alpha \cos 2\omega t], \quad (2)$$

其中,  $k$  是对信号的放大倍数以及光电转换率之积,  $u_0 = \eta \times I_0$ ,  $\eta$  是光电转化及放大倍数(或称量子效率)。

设  $U = k u_0 J_1(m_f) \sin 2\alpha$ ;  $V = k u_0 J_2(m_f) \cos 2\alpha$ , 则

$$u = U \sin \omega t - V \cos 2\omega t. \quad (3)$$

当  $m_f = 0.0087 \text{ rad}$ ,  $k = 1000$ ,  $\alpha = 1, 5, 10, 30, 60'$  时,  $u$  的极值分布如图 2 所示。

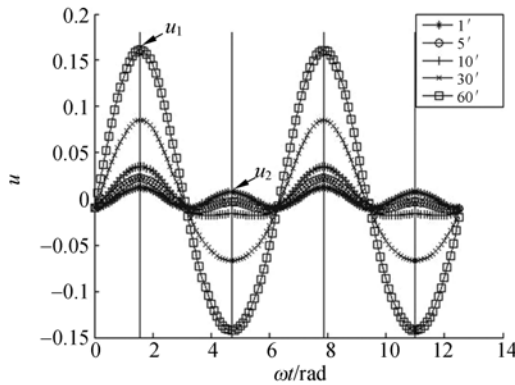


图 2  $u$  的极值分布图

Fig. 2 Distribution of extreme values of  $u$

由图 2 可见只有极值点  $u_1$  和  $u_2$  的横坐标位置不随  $\alpha$  的变化而变化, 利用取样积分电路分别获取  $u_1$  和  $u_2$  的值

$$\frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} = \frac{J_1(m_f)}{J_2(m_f)} \tan(2\alpha). \quad (4)$$

为了扩大失调角的测量范围, 将二倍角公式

$$\tan 2\alpha = \frac{2 \tan \alpha}{1 - \tan^2 \alpha} \text{ 代入式(4), 得}$$

$$\frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} \tan^2 \alpha + \frac{2J_1(m_f)}{J_2(m_f)} \tan \alpha - \frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} = 0, \quad (5)$$

$$\Delta = b^2 - 4ac = 4 \left[ \frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} \right]^2 + 4 \left[ \frac{J_1(m_f)}{J_2(m_f)} \right]^2 \geq 0. \quad (6)$$

方程(5)恒有解, 得失调角的计算公式:

$$\alpha' = \arctan \left\{ \frac{-\frac{J_1(m_f)}{J_2(m_f)} \pm \left[ \left( \frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} \right)^2 + \left( \frac{J_1(m_f)}{J_2(m_f)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2}} \right\}. \quad (7)$$

对于实际中每一失调角的真值  $\alpha$  都会对应测

得一组  $u_1, u_2$  数据, 但是根据方程却计算出两个失调角计算值  $\alpha'$ , 产生了增根, 必须对方程的解进行取舍。方程解的分布如图 3 所示。

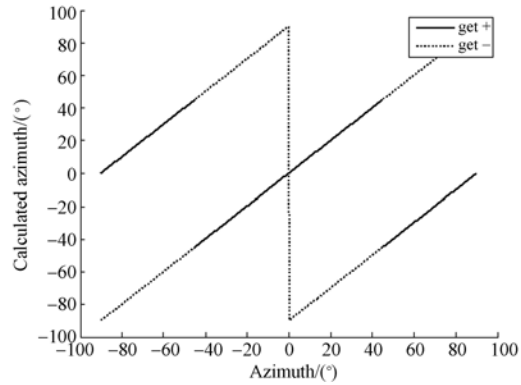


图 3 方程解的分布图

Fig. 3 Distribution of equation's roots

由图 3 可知, 横轴为失调角真值  $\alpha$ , 纵轴为计算值  $\alpha'$ , 每一个失调角真值对应两个计算值, 而理论上  $\alpha'$  应该与  $\alpha$  成斜率为 1 的直线关系, 从而确定在  $-90^\circ \sim 90^\circ$  方程的解被分为 3 部分:

$$\alpha' = \begin{cases} (-90^\circ, -45^\circ) & \text{方程的解取“一”} \\ (-45^\circ, 45^\circ) & \text{方程的解取“+”} \\ (45^\circ, 90^\circ) & \text{方程的解取“一”} \end{cases}. \quad (8)$$

但是在实际操作中失调角真值  $\alpha$  是未知量, 不能根据  $\pm 45^\circ$  来判断方程的解。所以令  $x =$

$$\frac{-\frac{J_1(m_f)}{J_2(m_f)} \pm \left[ \left( \frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} \right)^2 + \left( \frac{J_1(m_f)}{J_2(m_f)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2}}, \text{ 得到失}$$

调角在  $-90^\circ \sim 90^\circ$  内  $x$  的变化如图 4 所示。

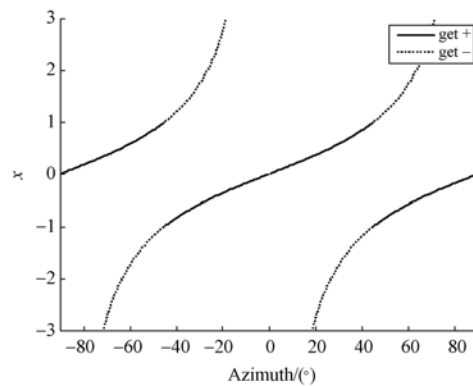


图 4  $x$  的分布图

Fig. 4 Distribution of  $x$

由图 4 可知:每一个失调角真值对应两个  $x$  值,其中中间的曲线为所需曲线。在这条曲线上,当失调角  $\alpha > 0$  时,  $x > 0$ ;当失调角  $\alpha < 0$  时,  $x < 0$ ,可见  $x$  的取舍可以转换为失调角正负区间的判断。由  $u_1 - u_2 = k u_0 J_1(m_f) \sin 2\alpha$  可知,当  $u_1 > u_2$  时,  $\alpha > 0$ ;当  $u_1 < u_2$  时,  $\alpha < 0$ 。而正负区间内部  $x$  的正负号的选择可根据  $x$  与  $\pm 1$  的对比结果判断。综上所述,根据  $u_1, u_2$  的比较结果以及  $x$  与  $\pm 1$  的比较结果可以决定  $-90 \sim 90^\circ$  内失调角的计算公式。具体情况如表 1 所示。

表 1 失调角计算公式判断表

Tab. 1 Judgement table of azimuth formula

	$u_1 > u_2$	$u_1 < u_2$
$x > 1$	—	×
$0 < x \leq 1$	+	×
$-1 \leq x < 0$	×	+
$x < -1$	×	—

注:“+”表示失调角计算公式中取正号;“—”表示失调角计算公式中取负号;“×”表示舍去不用。

### 3 具体实施方案

#### 3.1 大角度范围查表法

在失调角的计算公式中存在反正切函数的计算,但是硬件不能直接进行反正切计算,所以采用了基于大角度查表法的反正切计算方法。首先,按设计要求计算出所有可能的值并存储起来,然后根据输入条件进行判断查找,找到符合条件的值将它读出来并输出,此方法速度快、算法简单、容易实现。以查表精度控制在  $0.5^\circ$  范围内为例:由于  $y = \arctan x$  是奇函数,可以利用奇函数的性质,只需要考虑  $x > 0$  的情况,计算正半区  $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$  内的值;当  $x < 0$  时,设  $x = -x$ ,计算所得函数值取反即可。考虑到  $45^\circ < \alpha < 90^\circ$  时,  $x, y$  存储空间急剧增加,为了节约硬件资源,采用  $x = \frac{x-1}{x+1}$  将失调角转化至  $0^\circ < \alpha < 45^\circ$ <sup>[8]</sup>,这样只需要设计  $0^\circ < \alpha < 45^\circ$  内间隔为  $0.5^\circ$  的表格,  $x$  始终小于 1,采用 7 位二进制表示,  $y$  以度为单位,也采用 7 位二进制表示。查表时,查表值  $f(x)$  为:

$$f(x) = \begin{cases} y(i) & x(i) \leq x < x(i+1), \text{ 且 } x - x(i) \leq x(i+1) - x \\ y(i+1) & x(i) \leq x < x(i+1), \text{ 且 } x(i+1) - x < x - x(i) \end{cases} \quad (9)$$

具体情况如表 2 所示。

表 2 查表说明

Tab. 2 Designed table

$x$	Address of $x$	Address of $y$	$y/(\circ)$		Maximal error/ $(\circ)$
			According to $x$	Theoretical	
0.007 812 5	1	1	0.447 614 170 860 553	0.5	0.171 404 182 849 976
0.015 625	2	2	0.895 173 710 211 074	1.0	0.328 595 817 150 024
0.023 437 5	3	3	1.342 624 026 537 757	1.5	0.381 084 069 432 811
0.031 25	4	4	1.789 910 608 246 069	2.0	0.433 708 813 016 948
...	...	...	...	...	...
0.390 625	50	43	21.336 859 291 805 652	21.5	0.357 579 215 651 437
0.406 25	52	44	22.109 448 343 751 673	22	0.301 292 865 318 075
0.414 062 5	53	45	22.492 611 899 058 69	22.5	0.198 707 134 681 925
0.421 875	54	46	22.873 665 190 626 713	23	0.316 596 647 716 693
...	...	...	...	...	...
0.945 312 5	121	87	43.389 699 397 501 005	43.5	0.347 610 265 994 589
0.968 75	124	88	44.090 619 550 800 86	44	0.320 635 244 534 749
0.984 375	126	89	44.548 861 453 212 72	44.5	0.275 311 820 375 499
1	128	90	45	45	0.224 688 179 624 501

3.2 小角度范围近似逼近

通过对  $1^\circ$  范围内  $y = \arctan x$  与  $y = x$  的对比发现,二者误差很小,最大误差约为  $0.3565''$ ,因此,在  $1^\circ$  范围内用  $y = x$  代替  $y = \arctan x$  是可行的,在小角度范围内失调角的近似计算公式为:

$$\alpha' \approx \frac{-\frac{J_1(m_f)}{J_2(m_f)} - \left[ \left( \frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} \right)^2 + \left( \frac{J_1(m_f)}{J_2(m_f)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2}} \quad (10)$$

3.3 系统总体实施方案

结合系统实际情况,首先通过取样积分电路分别采集磁光调制后交流信号中横坐标不变的极值点  $u_1, u_2$ ,通过比较  $u_1, u_2$  确定  $x$  的取值:当  $u_1 > u_2$  时,失调角为正值,  $x$  取正值;当  $u_1 < u_2$  时,失调角为负值,  $x$  取负值;当  $u_1 = u_2$  时,失调角为 0。然后通过  $x$  与  $\pm 1$  的比较确定失调角的区间,

从而确定查表方式:当  $x < 0$  且  $x < -1$  时,  $-90^\circ < \alpha < -45^\circ$ ,通过  $x = -x, x = \frac{x-1}{x+1}$ ,获得粗略失调角  $-f(x) - 45^\circ$ ;当  $x < 0$  且  $x \geq -1$  时,  $-45^\circ \leq \alpha < 0^\circ$ ,通过  $x = -x$  获得粗略失调角  $-f(x)$ ;当  $x > 0$  且  $x \leq 1$  时,  $0^\circ < \alpha \leq 45^\circ$ ,通过直接查表获得粗略失调角  $f(x)$ ;当  $x > 0$  且  $x > 1$  时,  $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ ,通过  $x = \frac{x-1}{x+1}$  获得粗略失调角  $f(x) + 45^\circ$ 。

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。在小角度范围内,通过采集新状态下磁光调制后交流信号中横坐标不变的极值点  $u_1', u_2'$ ,可直接计算新状态下  $x'$  的值,利用小角度范围内失调角计算公式获得精确的失调角真值,下仪器在精确失调角信号的控制下继续转动至与上仪器精确对准。系统具体流程图如图 5 所示。

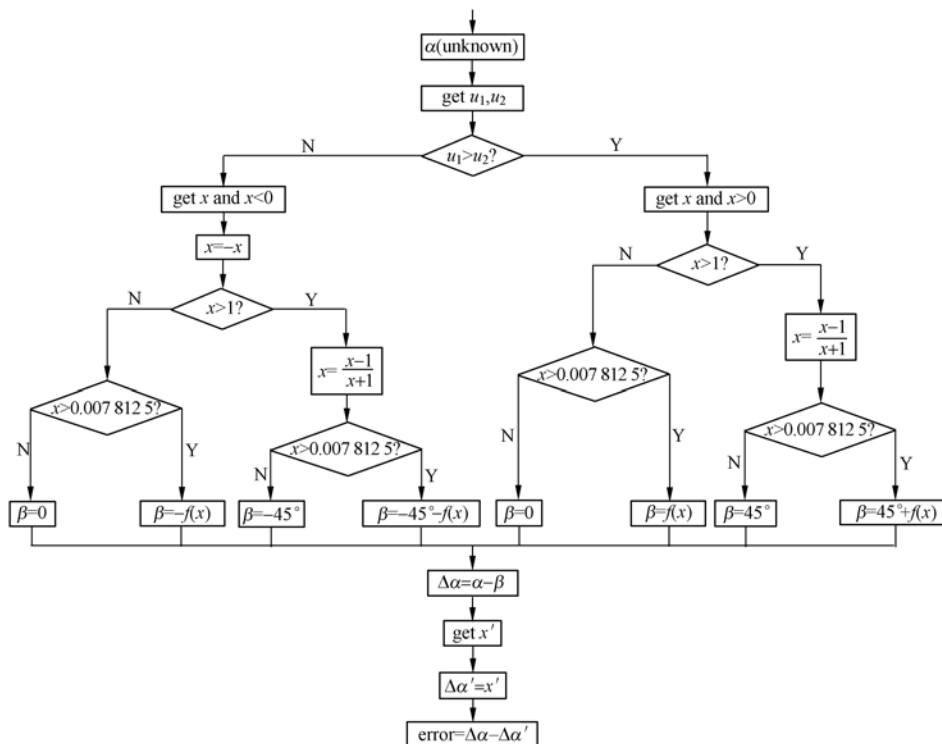


图 5 系统流程图

Fig. 5 Flow chart of system

### 4 结果分析

文中提出的方法在实际操作中主要受混和信号中微弱信号的提取水平和取样积分电路采样精度的影响。以 matlab 为仿真工具,设  $m_i=0.0087 \text{ rad}$ ,文中方法与现有方法<sup>[1]</sup>在同等条件下未查表时的理论传递误差比较如图 6 所示。

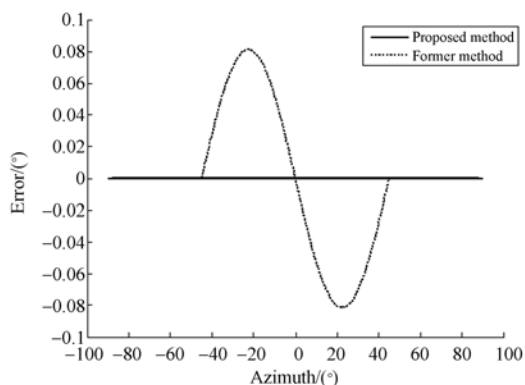


图 6 系统传递误差对比图

Fig. 6 Comparison of transmission error between two methods

由图 6 可知,与现有方法比较,文中提出的方法从理论上可以明显扩大失调角的传递范围,且精度较高,查表后的理论传递误差如图 7 所示。

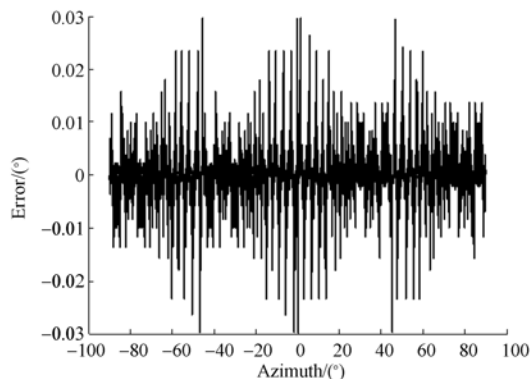


图 7 系统传递误差

Fig. 7 System transmission error

由图 7 可知,经过查表计算之后,系统传递误差有所增加。在  $0^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$  左右有较大的误差,主要是由于  $0 \sim 0.5^\circ$  内未查表而直接采用小角度范

### 参考文献:

[1] 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-

围内计算公式直接计算引起的。

以实验室中的基于正弦波磁光调制的方位传递系统为工具,自  $-90^\circ$  起每间隔  $1^\circ$  做一次试验,以最终的传递误差为评价标准,部分试验数据如表 3 所示。

表 3 实验数据表

Tab. 3 Experiment data

Initial azimuth/ $^\circ$	Transmission error/ $''$
-64	9.7
-30	8.3
-10	4.3
10	4.7
30	7.9
64	9.4

在实验中发现方位传递系统的实际应用范围为  $-64 \sim 64^\circ$ ,误差控制在  $10''$  以内,精度低于理论仿真结果,这主要是由取样积分电路的采集精度引起的。当失调角范围继续扩大时,系统传递误差较大,考虑是随着失调角的增大,交流信号在磁光调制后混合信号中的比重越来越低,微弱信号的提取与信号采集精度影响了系统的传递误差。

### 5 结 论

本文提出了一种基于正弦波磁光调制的大范围高精度空间方位失调角传递方法,详述了设计思想,给出了系统总流程图,设计了大角度查表法需要的表格,细化了大角度范围内的控制策略。仿真结果表明,本方法可以明显扩大失调角的传递范围且精度较高。试验结果表明,由于受实验室采集电路的采集精度和微弱信号提取水平的限制,实际的失调角可在  $-64 \sim 64^\circ$  传递,误差控制在  $10''$  以内,优于现有方法。

本文提出的方法采用了大角度查表法,计算速度快、算法简单、容易实现,为实现空间方位失调角大范围、高精度传递提供了一种切实可行的方法。

1391.

DONG X N, GAO L M, SHEN X J, *et al.*. Passing azimuth vertically with the technique of magne-

- tooptic modulation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001,30(11):1389-1391. (in Chinese)
- [2] 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 Y A, LI X J, LI SH T, *et al.*. Analysis on magneto-optical modulation by modeling [J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*,2007,37(5):719-723. (in Chinese)
- [3] 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(增):192-197.  
LI Y A, LI X J, BAI J T. Analyze on sine wave and rectangular wave magneto-optical modulation by comparing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36 (supp.):192-197. (in Chinese)
- [4] 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.  
LI X J, LI Y A, WANG Y Y, *et al.*. Magneto-optical modulation method for polarization measurement based on rectangular wave signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008,28(8):1533-1537. (in Chinese)
- [5] 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.  
SHEN X J, MA C W, DONG X N, *et al.*. A kind of disconnected mechanically azimuth measuring and synchronizing system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001,30(7):892-896. (in Chinese)
- [6] 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.  
WU Y M, GAO L M, CHEN L Y, *et al.*. Precision measurement and transmission of azimuthal information based on polarization modulated light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (3): 525-529. (in Chinese)
- [7] 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,2001.  
SHEN X J. *The research on technique of signal detecting and controlling in a kind of passing azimuth angle vertically system* [D]. Xi'an: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2001. (in Chinese)
- [8] 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.  
LIU L G, ZENG Y A, CHANG D D. The design and optimization of arc tangent calculate circuit based on FPGA[J]. *Control & Automation*,2007, 23(17):203-204,289. (in Chinese)

#### 作者简介:



杨志勇(1983—),男,河北保定人,博士研究生,2006年、2009年于第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士学位,主要从事定位定向与基准传递方面的研究。E-mail: yangzhiyong121@126.com



周召发(1973—),男,重庆人,副教授,硕士生导师,1996年、2002年、2007年于第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事定位定向与基准传递方面的研究。E-mail: zzftxy@163.com



张志利(1966—),男,河南濮阳人,教授,博士生导师,1988年、1991年、2001年于第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事兵器发射理论与技术方面的研究。E-mail: zhang-zl@126.com