

全捷联激光制导寻的器测角精度分析与优化

高思远^{1,2}, 刘慧¹, 朱明超¹, 张鑫¹, 白杨¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了降低激光制导武器系统成本并保证打击精度, 设计了全捷联激光制导寻的器, 并对影响打击精度的关键技术指标测角精度进行了研究。首先对影响测角精度的主要因素增益控制进行了分析, 通过对四通道可变增益放大器进行增益标定和最小二乘拟合得到增益控制曲线, 接着讨论了离散量控制下增益补偿的方法及误差, 仿真计算得到不同配置模式下增益补偿前和补偿后的光斑重心计算误差。对全捷联激光制导寻的器进行激光照射测角试验, 结果表明, 增益补偿后能够消除系统误差约 5.6 mrad, 在中心线性视场范围内, 测角精度达到 2 mrad。该系统满足某机载轻型空地导弹对激光制导寻的器测角精度的要求, 为精确末制导提供保障。

关键词: 激光制导; 四象限探测器; 可变增益放大器; 测角精度

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2169-06

Analysis and optimization of angle measurement accuracy of strap-down laser semi-active guidance seeker

Gao Siyuan^{1,2}, Liu Hui¹, Zhu Mingchao¹, Zhang Xin¹, Bai Yang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to reduce the cost of the laser guidance weapons system and improve its accuracy, the strap-down laser guided seeker was designed. The precision of angle measurement which affecting the attack precision was studied. First, the method of gain controlling affecting the precision of angle measurement was analyzed. Second, the four channel variable gain amplifier was calibrated and the least squares fitting curve of the gain was got. Then, the method of gain compensation and its error under the discrete control were discussed. Finally, the error of light spot between uncompensated and compensated in different amplified mode by simulation was got. Experimental results indicate that the system error is decreased by 5.6 mrad. The precision of angle measurement reach to 2 mrad in the linear field of view. It can satisfy the system requirements by semi-active laser guidance weapons system.

Key words: laser guidance; four-quadrant detector; variable gain amplifier;
angle measurement accuracy

收稿日期: 2014-11-05; 修订日期: 2014-12-06

基金项目: 中国科学院知识创新工程国防科技创新重要方向项目(YYYJ-1122); 中国科学院三期知识创新工程

作者简介: 高思远(1983-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事嵌入式系统方面的研究。Email: gaosiyuan2008@aliyun.com

0 引言

激光以其束散角小、能量集中、指向性强等优点被广泛应用于制导武器系统中。激光制导武器系统具有制导精度高,抗干扰能力强,武器效能高等特点,各国军方均对其开展了深入研究。目前成熟应用的激光制导的武器系统多为框架式激光半主动制导寻的。如美国马丁玛丽塔公司研制的海尔法激光制导导弹,其命中精度可达到 0.5 m(CEP)。以色列的格里芬,俄罗斯的红土地均性能优异。国内对激光制导武器的研究也取得一定进步,如 2009 年公开亮相的“雷霆”激光制导炸弹,其打击精度为 6.5 m(CEP)^[1-4]。

由于框架式激光制导寻的器需要速率陀螺和编码器测角测速传感器,因此系统结构复杂,成本高昂。为了降低武器系统成本并保证打击精度,文中设计了全捷联激光制导寻的器,并对影响打击精度的关键技术指标测角精度进行研究。为了提高测角精度,对寻的器内部四象限探测器信号处理系统进行优化设计,该系统采用可变增益放大器将高动态范围差分窄脉冲信号进行无失真放大或衰减,生成满足下一级输入范围的信号,最后通过四通道高速差分模数转换器对窄脉冲信号进行采样,提高了采样精度,同时减少了分立元件参数差异对系统造成的精度影响。在系统设计中,对可变增益放大器进行增益标定和最小二乘拟合,得到不同通道的增益控制曲线,讨论了离散量控制下增益补偿的方法及误差,通过对四通道可变增益放大器进行增益补偿,将通道间的增益差异降至最低。仿真计算得到不同配置模式下增益补偿前和补偿后的光斑重心计算误差。激光照射测角试验结果表明,增益补偿后能够消除系统误差约 5.6 mrad,在中心线性视场范围内,测角精度达到 2 mrad,系统测角精度满足某机载轻型空地导弹对激光制导寻的器的要求。

1 激光制导武器系统组成及工作原理

图 1 为激光半主动制导武器系统工作原理图。

激光半主动制导武器系统由激光照射器和激光制导导弹组成,激光照射器独立于导弹之外,可由单兵地面手持照射目标,也可由机载安装照射目标。激光制导武器接收激光照射器照射到目标上的激光光

斑漫反射回波,通过计算探测器上激光光斑重心位置,根据探测器靶面离焦量得到弹轴与目标夹角,发送给导弹制导控制系统,形成制导回路。

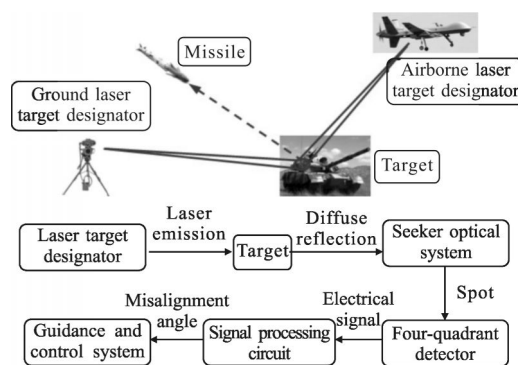


图 1 全捷联激光半主动制导武器系统工作原理图

Fig.1 Block diagram of strap-down semi-active laser guidance weapons system

激光制导武器系统的核心部件为激光制导寻的器,主要由光学系统、四象限探测器及其信号处理电路组成。该系统采用全捷联工作方式,与框架式寻的器相比,不需要速率陀螺和编码器,探测器和光学系统固定后整体安装于壳体之内,通过调整机构保证调焦及相对位置调整^[5-7],其结构布局如图 2 所示。

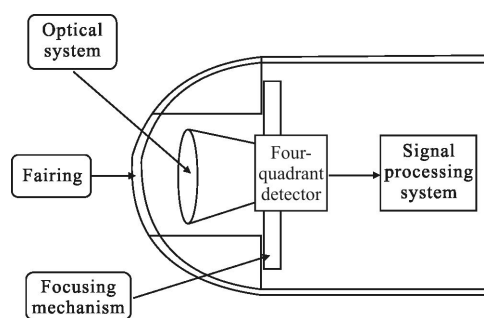


图 2 全捷联激光半主动制导寻的器结构组成图

Fig.2 Block diagram of strap-down semi-active laser guidance seeker

2 影响激光制导寻的器测角精度的主要因素分析

按照激光信号的传输路径和处理流程,可将影响激光制导寻的器测角精度的因素分为外部环境因素和系统内部因素。其中外部环境因素主要为大气湍流引起测角误差^[8-10]。系统内部因素主要包括探测

器安装误差、探测器性能引起的误差以及四象限信号处理电路导致的误差。下面主要讨论四象限信号处理电路引起的测角误差。

2.1 四象限探测器信号处理系统增益标定和补偿误差分析

四象限探测器信号处理系统如图 3 所示。

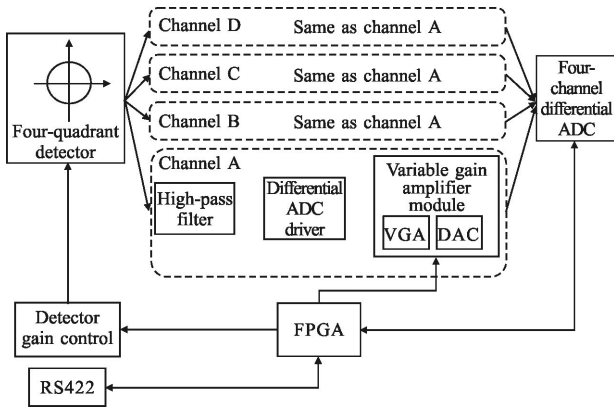


图 3 四象限探测器信号处理系统原理图

Fig.3 Block diagram of signal processing system of four-quadrant detector

四象限探测器输出的微弱电压信号经高通滤波器后由差分模数转换驱动器转换成差分信号输入至可变增益放大模块,可变增益放大模块由可变增益放大器(VGA)和数模转换器(DAC)组成,FPGA 通过 DAC 控制 VGA 的增益,对差分信号进行放大,然后送入四通道差分模数转换器(ADC)。FPGA 对四个通道的数字信号进行和差处理,计算出光斑重心和脱靶量,然后通过 RS422 传输给导弹制导控制系统。

由于受导弹与目标距离、大气传输条件以及目标漫反射率等影响,探测器接收到的激光信号强度变化很大,因此要求探测器与信号处理电路具有较高的动态范围。系统增益控制由探测器增益控制和放大器增益控制组成。探测器增益控制用于防止导弹距离目标较近时,激光能量过强而导致探测器输出饱和。放大器增益控制将激光脉冲信号在 ADC 采样前放大到适当的幅值,保证 AD 采样精度^[1]。

VGA 选用 ADRF6516ACPZ,其内部包含两个通道,由模拟电压控制增益。因为探测器具有四个象限信号输出,所以需要两片 VGA 同时工作,不同的 VGA 具有增益差异,这将导致测角误差增大,因此需要对其进行增益标定和补偿。

增益标定时,将信号发生器输出的 100 kHz,峰峰值 100 mV 的正弦信号输入至高通滤波器前端,通过四通道差分 ADC 采集 VGA 输出的信号,由此计算出 VGA 的当前增益。应用最小二乘拟合法得到的 1、2 路及 3、4 路的增益曲线如图 4 所示。

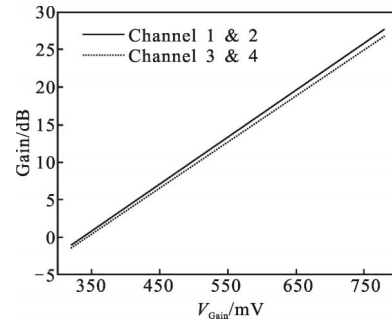


图 4 最小二乘拟合增益曲线

Fig.4 Least squares fitting curve of the gain of VGA

1、2 通道增益拟合曲线为:

$$\text{Gain} = V_{\text{Gain}} \times 0.0625 - 21.1306 \quad (1)$$

3、4 通道增益拟合曲线为:

$$\text{Gain} = V_{\text{Gain}} \times 0.0613 - 21.0586 \quad (2)$$

为了消除可变增益放大器增益差异,需要对其进行增益补偿。由拟合曲线公式可以得到不同增益下的模拟控制电压值,采用两个不同的增益-DAC 码值表来查表实现增益补偿,其补偿误差如图 5 所示。

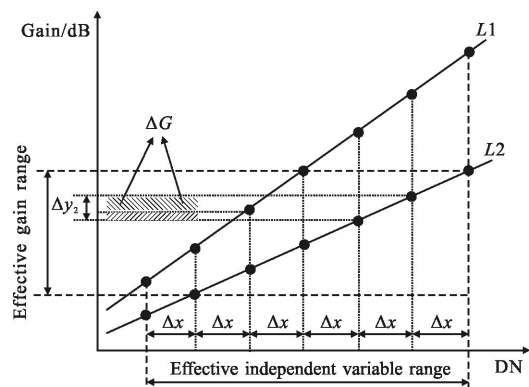


图 5 增益补偿误差

Fig.5 Error of gain compensation

有效增益区间定义为曲线 L1 和 L2 值域交集的某个子集,有效自变量区间定义为有效增益区间所映射的 L1 自变量区间和 L2 自变量区间的并集。因为 L1 斜率大于 L2 斜率,所以在有效自变量区间和

有效增益区间内,在相同采样间隔 Δx 下, $L1$ 采样点数小于 $L2$ 采样点数,因此为了减少系统误差,在增益补偿时将 $L1$ 映射到 $L2$ 上,此时系统误差的最大值 ΔG 为 $\Delta y_2/2$ 。

在系统设计中, VGA 增益控制电压范围为 100~900 mV, DAC 选用 LTC1665IGN, 其具有 8 个 8 bit 分辨率通道,因此 VGA 的增益控制步长为:

$$\Delta x = \frac{(900-100)\text{mV}}{2^8} = 3.125 \text{ mV} \quad (3)$$

由 $L2$ 斜率计算可知 $\Delta y_2 = 0.1916 \text{ dB}$, 因此增益补偿后可变增益放大器最大增益误差 ΔG 为 0.0958 dB。未进行增益补偿时 VGA 最大增益误差为 1.008 dB。

2.2 通道增益差异对测角精度的影响

光斑重心计算需用和差法获得二维误差信号,然后用查表法获得精确的光斑重心^[12-13]。四象限探测器工作原理如图 6 所示。

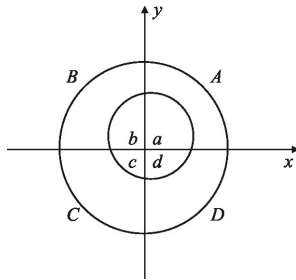


图 6 四象限探测器

Fig.6 Four quadrant detector

以象限对称中点为位置零点,以 4 个探测器的边界为 x 、 y 轴,4 个探测器面元分别对应 4 个象限,对应光电流分别为 I_a 、 I_b 、 I_c 、 I_d 。设光斑在每个象限上的面积分别为 S_a 、 S_b 、 S_c 、 S_d ,对应的光功率分别为 E_a 、 E_b 、 E_c 、 E_d 。设光斑重心为 (x_0, y_0) ,探测器半径为 r , d_x 、 d_y 为 x 和 y 轴上的位置误差信号。经过离焦和匀化处理,可近似地把光斑的分布看成是均匀的,则每个象限中的光能量和电流与光斑的面积成正比,有和差法计算公式:

$$d_x = \frac{(I_a + I_d) - (I_b + I_c)}{I_a + I_b + I_c + I_d} = \frac{(E_a + E_d) - (E_b + E_c)}{E_a + E_b + E_c + E_d} = \frac{(S_a + S_d) - (S_b + S_c)}{S_a + S_b + S_c + S_d} \quad (4)$$

$$d_y = \frac{(I_a + I_b) - (I_c + I_d)}{I_a + I_b + I_c + I_d} = \frac{(E_a + E_b) - (E_c + E_d)}{E_a + E_b + E_c + E_d} = \frac{(S_a + S_b) - (S_c + S_d)}{S_a + S_b + S_c + S_d} \quad (5)$$

因此, d_x 、 d_y 体现了光斑重心的变化,利用几何知识可以求出图 7 中各象限的光斑面积,代入公式(4)、(5)可得:

$$d_x = \frac{1}{\pi r^2} \left[2r^2 \arcsin\left(\frac{x_0}{r}\right) + 2x_0 \sqrt{r^2 - x_0^2} \right] \quad (6)$$

$$d_y = \frac{1}{\pi r^2} \left[2r^2 \arcsin\left(\frac{y_0}{r}\right) + 2y_0 \sqrt{r^2 - y_0^2} \right] \quad (7)$$

将公式(6)、(7)用分段线性插值表示,原非线性方程计算结果和 256 段线性插值法计算结果的偏差如图 7 所示, d_x 、 d_y 的最大偏差为 4.332×10^{-5} , 小于其数值精度 6.103×10^{-5} , 线性插值余项引起的计算方法误差可以忽略不计。

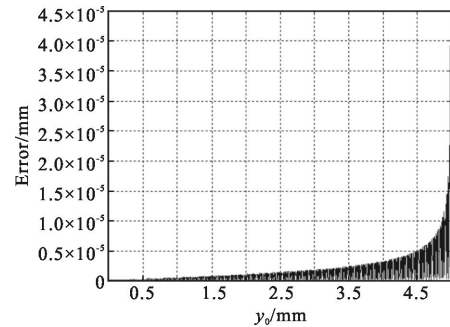


图 7 光斑重心计算方法误差

Fig.7 Computational method error of light spot center

因为探测器为圆形靶面,所以重心 x_0 与 y_0 中心对称,下面仅对 y_0 进行分析。设通道增益误差为 ΔG ,四象限信号放大分为三种情况:

- (1) 通道 a 和通道 b 增益大于通道 c 和通道 d ;
 - (2) 通道 a 和通道 c 增益大于通道 b 和通道 d ;
 - (3) 通道 a 和通道 d 增益大于通道 b 和通道 c ;
- d_{y1} 、 d_{y2} 、 d_{y3} 为以上三种情况下光斑重心计算公式。

$$d_{y1} = \frac{((1+\Delta G)S_a + (1+\Delta G)S_b) - (S_c + S_d)}{(1+\Delta G)S_a + (1+\Delta G)S_b + S_c + S_d} \quad (8)$$

$$d_{y2} = \frac{((1+\Delta G)S_a + S_b) - ((1+\Delta G)S_c + S_d)}{(1+\Delta G)S_a + S_b + (1+\Delta G)S_c + S_d} \quad (9)$$

$$d_{y3} = \frac{((1+\Delta G)S_a + S_b) - (S_c + (1+\Delta G)S_d)}{(1+\Delta G)S_a + S_b + S_c + (1+\Delta G)S_d} \quad (10)$$

图 8~图 10 分别为增益补偿后,即最大增益误差

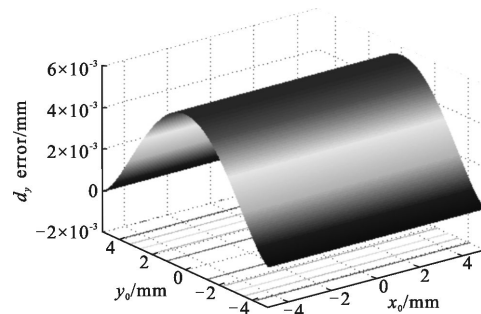


图 8 第一种放大模式引起的 d_y 误差

Fig.8 Error of d_y caused by amplifying mode 1

差 ΔG 为 0.095 8 dB 时, d_{y1} 、 d_{y2} 、 d_{y3} 与 d_y 的计算差值, 可见最大系统误差 Δy_0 为 0.005 2 mm。未进行增益补偿时 VGA 最大增益误差 $\Delta G=1.008$ dB, 代入公式(8)~(10)可得最大系统误差 Δy_0 为 0.06 mm。

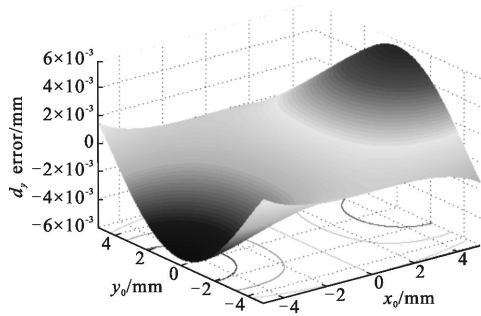


图 9 第二种放大模式引起的 d_y 误差

Fig.9 Error of d_y caused by amplifying mode 2

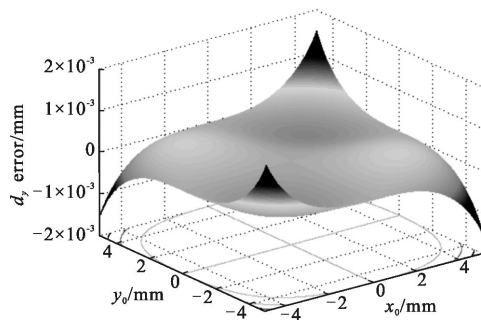


图 10 第三种放大模式引起的 d_y 误差

Fig.10 Error of d_y caused by amplifying mode 3

设系统视场角为 $\pm\alpha$, 则

$$\tan\alpha = \frac{r}{d} \quad (11)$$

式中: r 为探测器靶面半径; d 为探测器靶面到透镜主点的距离。设导弹视轴与目标夹角为 β , 则 x 方向有

$$\tan\beta = \frac{y_0}{d} \quad (12)$$

由 x_0 引起的测角误差为:

$$\Delta\beta = \frac{\Delta y_0}{d} \times \cos^2\beta \quad (13)$$

由公式(14)可知, 当光斑重心趋近于探测器靶面中心时, 即 β 趋近于 0 时, $\Delta\beta$ 具有最大值 $\frac{\Delta y_0}{d}$ 。已知视场角 α 为 25° , 探测器半径为 5 mm, 计算可得 d 为 10.722 5 mm, 将增益校正前后的 Δy_0 分别代入公式可得: 增益校正前, 通道增益误差引起的测角误差

可达 5.6 mrad; 增益校正后, 通道增益误差引起的测角误差仅为 0.48 mrad。

3 实验与结果

全捷联激光制导寻的器原理样机的测试装置如图 11 所示。

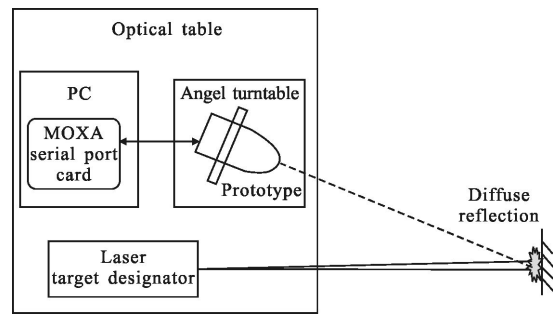


图 11 测试系统组成框图

Fig.11 Block diagram of the test system

激光器发射重复频率为 20 Hz, 波长 1 064 nm。激光器固定在光学平台上, 激光脉冲经准直扩束, 照射在漫反射目标上。待测激光制导寻的器原理样机固定在角度转台上, 初始角度对准漫反射目标。计算机通过 MOXA 串口卡与寻的器相连, 用于接收角度脱靶量输出结果。

激光照射在距离约为 10 m 的漫反射目标上, 光斑直径大小调至约 20 mm, 原理样机距离漫发射目标约为 10 m, 反射光斑对原理样机张角约为 2 mrad。等效于激光指示器发散角 0.2 mrad、照射距离 5 km 时, 导弹距离目标为 0.5 km 时的测试条件。

图 12 为测角误差曲线。图 12(a)为增益补偿前和增益补偿后 x 轴方向和 y 轴方向的总测角误差,

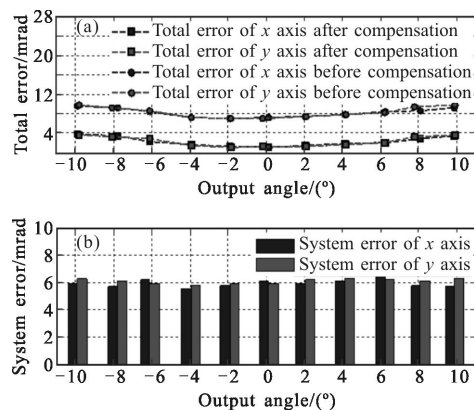
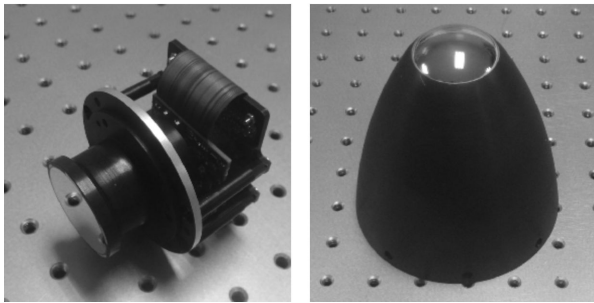


图 12 测角误差

Fig.12 Error of angle measurement

图 12(b)为增益补偿后减少的系统误差,可见增益补偿后能够消除系统误差约 5.6 mrad,测角误差在视轴附近较小,随着离轴角增大而增大,在 $-4^{\circ}\sim+4^{\circ}$ 之间,标准差小于 2 mrad;在 $-10^{\circ}\sim+10^{\circ}$ 之间,标准差小于 4 mrad。

激光制导寻的器原理样机如图 13 所示。



(a) 四象限探测器处理系统
(a) Four-quadrant detector and signal processing system

(b) 整机
(a) Seeker

图 13 原理样机

Fig.13 Prototype

3 结论

文中根据激光制导武器系统成本低、打击精度高的要求,设计了全捷联激光制导寻的器。首先介绍了激光制导武器系统的组成及工作原理,然后对影响测角精度的主要因素增益控制进行分析,通过对四通道可变增益放大器进行增益标定和最小二乘拟合得到增益控制曲线,讨论了离散量控制下增益补偿的方法及误差,仿真计算得到不同配置模式下增益补偿前和补偿后的光斑重心计算误差。实验结果表明:增益补偿后能够消除系统误差约 5.6 mrad,在中心线性视场范围内,测角精度达到 2 mrad。满足某机载轻型空地导弹对激光制导寻的器测角精度的要求。

参考文献:

- [1] Wang Kuangbiao. Status quo, key technology and development of laser guided weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 652-655. (in Chinese)
- [2] Bao Haige. Development of the laser semi-active homing guidance weapons [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2010, 30(5): 21-25. (in Chinese)
- [3] Zhao Xin, Tong Shoufeng, Liu Yunqing, et al. Application research on four-quadrant detector in space laser communication system[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(1): 47-49. (in Chinese)
- [4] Huang Jipeng, Wang Yanjie, Sun Honghai, et al. Precise position measuring system of laser spots [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 842-847. (in Chinese)
- [5] Wei Wenjian, Qin Shiqiao, Zhang Baodong, et al. Design on the optical system of laser semi-active seeking guided hardware-in-the-loop simulation seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 323-325. (in Chinese)
- [6] He Hengxiang, Chen Yiqing, Zhao Gang, et al. Analysis of the main parameters of the laser guided system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 429-432. (in Chinese)
- [7] Zhang Lei, Zhang Guoyu, Liu Yunqing. Affecting factor for detection accuracy of four-quadrant detector [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(6): 1-5. (in Chinese)
- [8] Zhang Wentao, Zhu Baohua. Research on the laser beam through turbulence atmosphere channel [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2007, 36(4): 785-787. (in Chinese)
- [9] Manojlovic L M, Babaric Z P. Optimization of optical receiver parameters for pulsed laser tracking system[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(3): 681-690.
- [10] Shen Hao, Qi Zaikang. Fluence of laser spot random flutter on the precision of laser semi-active guidance [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(2): 109-110. (in Chinese)
- [11] Long Pengyi, Wang Xu'an. The research and engineering realization for a certain high precision arithmetic of the target space position [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2007, 27(1): 13-17. (in Chinese)
- [12] Chen Yong, Zhu Tianrui, Li Rui. Design and realization of the angle-measurement algorithm of the four-quadrant detector based on the interpolation algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 545-547. (in Chinese)
- [13] Hu Xianlong, Zhou Shichun. Analysis and research on several angle measurement algorithms based on four quadrant detector[J]. *Laser and Infrared*, 2007, 37(6): 547-549. (in Chinese)