

四象限探测器解算模型误差分析

崔瑞青,王景文,李晓梅
(中国兵器工业第208研究所,北京 102202)

摘要:针对四象限探测器的解算精度问题,研究了基于不同光斑模型计算方法存在的误差,重点分析了基于高斯分布的光斑模型和基于均匀分布的光斑模型在解算结果上的差异,利用图像处理技术和建模仿真技术,从理论上得出,无论是哪种光斑模型,本身都存在计算模型误差,通过量化为工程应用提供重要参考。

关键词:激光制导;四象限探测器;均匀分布;高斯分布

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A

Model error analysis of quadrant photodetector

CUI Rui-qing, WANG Jing-wen, LI Xiao-mei
(No. 208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China)

Abstract: Aiming at the problem of the quadrant photodetector precision, this paper researches the error of different spot model, analyzes the difference of uniform spot and Gauss spot. Simulation is done by utilizing image processing technology and emulator technology. The result of simulation shows that the error always exists no matter what spot model is used and the errors are calculated. It provides important reference for engineering application.

Key words: laser guidance; quadrant photodetector; uniformity distributing; Gauss distributing

1 引言

国内外激光制导武器中的目标方位探测系统大量使用了四象限光电探测器,因它具有制导精度高、抗干扰能力强、结构较简单、成本低、使用方便等优点,被广泛应用于实战中,如俄罗斯的“红土地”炮弹、美国的“铜斑蛇”炮弹和“海尔法”导弹都在使用这类器件,可以说激光制导武器在现代战争中发挥了巨大的作用和威力,而其核心器件四象限探测器是其作用和威力发挥的重要保证条件之一。为此,文献[1]分析了背景光对四象限探测器探测精度的影响,文献[2]分析了四象限探测器组件在激光制导中的应用要求,文献[3]研究了四象限光电探测器信号处理技巧,而文献[4]就光学系统像差对四象限探测器目标方位探测精度影响进行了研究。在激光制导武器中,通常按照光斑能量分布相对均匀的情况下进行信号处理,而激光能量本身就是成高斯分布且光学系统也会引起光斑能量分布不均匀,这就不可避免地产生误差,而相关问题并没有见到详细的分

析和研究,因此,本文就这一问题进行研究。

本文通过进一步研究和分析激光器的光束能量分布特性,以及激光制导武器中四象限探测器目标方位探测的工作原理,将不同的激光成像光斑能量分布模型应用于该探测系统进行解算,其中重点研究了基于均匀分布和高斯分布模型两种不同假设条件下,目标方位角解算精度的差异。

2 激光制导武器中四象限探测器的工作原理

激光半主动导引原理是利用激光目标照射器照射目标,导引头上的激光接收器接收目标反射回来的激光信号,获得目标偏离火箭弹光轴的角度信息,其中的四象限探测器是利用集成电路光刻技术,将一个圆形或方形的光敏面(工程上多为圆形)划分为四个面积和形状相同、位置对称的区域,每个区域

作者简介:崔瑞青(1974-),男,硕士,工程师,主要从事导弹制导与控制系统设计、数字图像处理算法方面的研究。
E-mail: cuiruiqing@gmail.com

收稿日期:2010-12-28; **修订日期:**2011-02-18

相当于一只光二极管,其分布以光轴为对称轴,位于光学系统后焦点处(如图1所示)。若目标在光轴上,则其成像光斑是以光轴为对称轴的圆形,四只相互独立的光电二极管接收到相等的激光能量;若目标偏离光轴,则光斑中心就不在光轴,四只二极管被光斑覆盖的面积便不相同,其输出的光电流不再一样。其原理如图2所示:在理想条件下,每个光电器件的性能参数完全相同。

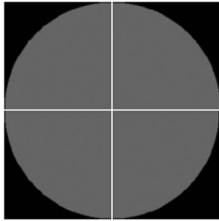


图1 四象限激光探测器的光敏面

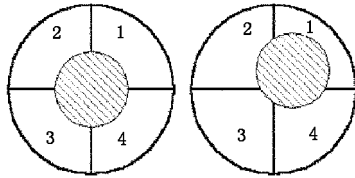


图2 光斑在探测器光敏面上的示意图

为了通过图像建模与仿真技术来验证光斑模型与解算精度的关系,将激光导引头目标方位探测系统参数设计如下:①工作波长:1.064 μm;②导引头视场:±10°;根据文献[5]的论证结果,光斑直径为光敏面直径的1/2为最佳,那么将光学系统和探测器设计成:①光学口径20 mm;②探测器光敏面距光学平面15 mm;③探测器光敏面直径10 mm,则光斑直径为5 mm(2)沟道宽度0.033 mm。根据以上设计好的参数,可通过数字图像处理技术还原在理想情况下,探测器的探测精度问题。

3 激光制导武器中四象限探测器的计算公式

基于图像处理技术的四象限探测器解算方法,是把光斑在空间上分割成MN的阵列,阵列中的每个点用一灰度值(代表能量值)来表示,借助于图像处理中元素的概念^[6],将光斑进行分割来代替探测器四个象限上的能量强度,由此来解算光斑能量中心在探测器上的位置。具体计算公式如下:

探测器四个象限对应的能量:

$$s_n = \sum_n I(i, j), n = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

式中, $I(i, j)$ 表示对应 (i, j) 点光斑的能量强度; s_n 表示第一、二、三、四象限的总能量强度。

光斑总能量值:

$$S = s_1 + s_2 + s_3 + s_4 \quad (2)$$

光斑中心在四象限探测器上的位置 (x, y) :

$$x = k \frac{s_1 + s_4 - s_2 - s_3}{S}, y = k \frac{s_1 + s_2 - s_3 - s_4}{S} \quad (3)$$

式中, k 为标定因子。

方位角的计算公式:

$$\alpha = \arctan \frac{y}{x} = \arctan \frac{s_1 + s_2 - s_3 - s_4}{s_1 + s_4 - s_2 - s_3} \quad (4)$$

式中, α 为能量中心在探测器上的方位角。

失调角的计算公式:

$$\theta = \arctan \frac{r}{f} = \arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{f} \quad (5)$$

式中, θ 为能量中在探测器上的失调角。

标定因子:

$$k = \frac{f \cdot \tan(\theta)}{\beta} = \frac{r}{\beta} \quad (6)$$

其中,

$$\beta = \frac{\sqrt{(s_1 + s_4 - s_2 - s_3)^2 + (s_1 + s_2 - s_3 - s_4)^2}}{S};$$

r 为光斑能量中心到通探测器中心的距离。

4 激光制导武器中四象限探测器的误差分析

基于均匀光斑模型和高斯光斑模型的图像如下(如图3、图4所示),到目前为止,看到的相关报道都是基于均匀光斑模型假设进行运算和相关数据处理,而这种假设下的模型与实际使用情况有较大的偏差,但是一般研究人员都会将偏差归结于器件误差,实际上通过全数字仿真可以发现误差很大一部分是源于假设以及在这一假设条件下推导的计算公式。为了进一步说明问题,文中建了两种模型,一个是均匀光斑模型(如图3所示),另一个是高斯光斑模型(如图4所示),通过这两种光斑模型在四象限探测器上的运动来模拟实际探测过程。

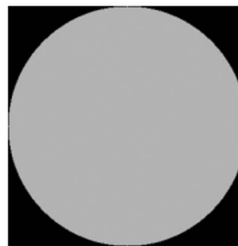


图3 能量均匀分布光斑模型

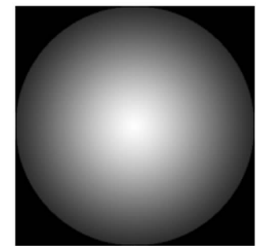


图4 能量高斯分布光斑模型

以上两个光斑模型都是基于图像处理技术所建的模型,其中灰度值代表激光信号的强弱,黑色灰度值为0,也就是没有激光信号,白色部为能量最强,最大值255,均匀分布光斑的灰度值同为180,高斯分布中心能量最高255,以高斯分布曲线向边缘逐渐衰减。

4.1 基于均匀光斑模型的探测器精度分析

表1是基于均匀光斑模型计算的结果,失调角偏转最大值9.463°,步长0.954°,失调角每偏转一次,方位角从0°旋转到90°,经过计算理论偏转角和实际偏转角之间的差值来验证基于这种模型的解算误差。

表1 均匀光斑模型在四象限探测器上不同位置的解算结果

(单位:度)

| 失调角 | 0.954 | 1.909 | 2.862 | 3.814 | 4.763 | 5.711 | 6.654 | 7.595 | 8.531 | 9.463 | |
|----------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 理想方位角及误差 | 方位角误差 = 理想方位角 - 实测方位角 | | | | | | | | | | |
| | 0 | 0.209 | 0.105 | 0.071 | 0.053 | 0.043 | 0.037 | 0.032 | 0.029 | 0.027 | 0.026 |
| | 15 | 0.692 | 0.381 | 0.711 | 0.713 | 0.279 | 0.596 | 1.1148 | 1.591 | 2.309 | 3.215 |
| | 30 | -1.973 | -0.073 | -0.466 | 0.258 | 0.150 | 0.760 | 0.878 | 1.553 | 1.930 | 2.834 |
| | 45 | -0.281 | -0.145 | -0.093 | -0.069 | -0.053 | -0.042 | -0.035 | -0.029 | -0.024 | -0.019 |
| | 60 | -1.897 | -0.204 | -0.812 | -0.392 | -0.908 | -0.845 | -1.412 | -1.612 | -2.333 | -2.875 |
| | 75 | -1.218 | -0.632 | -0.878 | -0.836 | -0.376 | -0.676 | -1.183 | -1.649 | -2.361 | -3.259 |
| 90 | -0.201 | -0.097 | -0.063 | -0.046 | -0.036 | -0.0302 | -0.025 | -0.022 | -0.020 | -0.019 | |

为更加直观地判断误差大小,从图5上可以清楚地看到,方位角最大偏差3.259°。每一条曲线对应一个失调角,在失调角相同的情况下,方位角从0°开始以15°为间隔增加到90°,整个解算误差变化规律呈近似正弦状,这也充分反应出光斑中心在探测器四个象限上的位置对方位角解算精度有很大的影响,方位角在0°,45°和90°测量精度比较高,而在15°,30°,60°和75°的精度相对较差,0°到45°和45°到90°呈中心对称状,反映出光斑模型在四个象限是非线性变化的,同时也说明了探测器沟道对解算精度也具有一定的影响,而这些在一般计算中是无法反映出来的。

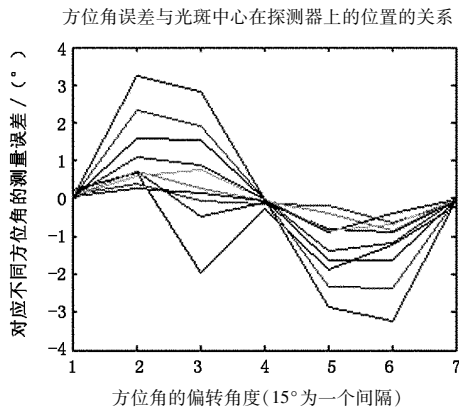


图5 均匀光斑在探测器不同位置的解算结果

4.2 基于高斯光斑模型的探测器精度分析

基于高斯光斑模型经过计算理论偏转角和实际偏转角之间的差值可以得到,方位角最大偏差7.653°,其他规律与均匀光斑模型基本一致。这说明光斑模型的不同,引起的方位角解算误差就不同,而且主要反应在偏差值的大小上,从以上两表可以看到基于均匀光斑模型要比基于高斯模型的解算精度高一倍,而实际使用中光斑其实更接近于高斯光斑模型,这也就决定了采用这种模式工作的激光导引头精度不会很高,仅模型误差就达到了将近8°。为了更加直观,从图6可以看到曲线规律与基于均匀光斑模型的基本一致,而误差值的大小是均匀光斑模型的两倍。

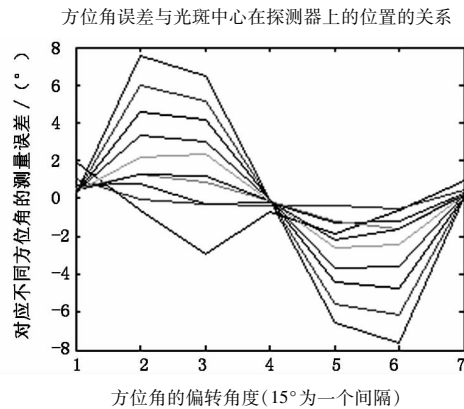


图6 高斯光斑在探测器不同位置的解算结果

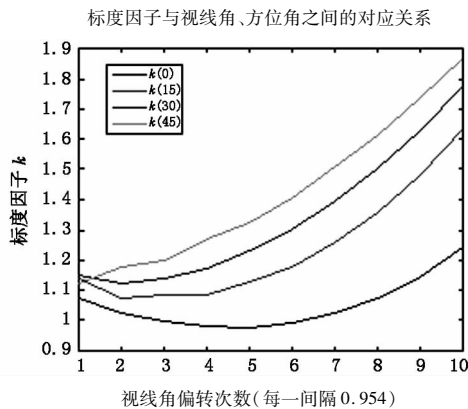
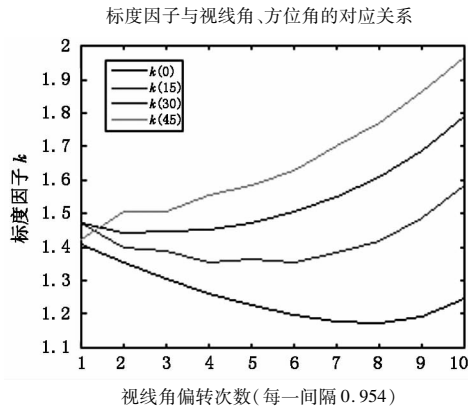
表2 高斯光斑模型在四象限探测器上不同位置的解算结果

(单位:度)

| 失调角 | 0.954 | 1.909 | 2.862 | 3.814 | 4.763 | 5.711 | 6.654 | 7.595 | 8.531 | 9.463 | |
|----------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 理想方位角及误差 | 方位角误差 = 理想方位角 - 实测方位角 | | | | | | | | | | |
| | 0 | 1.937 | 0.980 | 0.671 | 0.523 | 0.440 | 0.388 | 0.356 | 0.335 | 0.323 | 0.318 |
| | 15 | -0.635 | -0.057 | 0.758 | 1.268 | 1.295 | 2.207 | 3.352 | 4.539 | 5.951 | 7.507 |
| | 30 | -2.909 | -0.294 | -0.270 | 0.885 | 1.243 | 2.342 | 3.005 | 4.207 | 5.136 | 6.482 |
| | 45 | -0.693 | -0.356 | -0.232 | -0.177 | -0.140 | -0.115 | -0.098 | -0.084 | -0.074 | -0.063 |
| | 60 | -1.908 | -0.389 | -1.286 | -1.229 | -2.161 | -2.576 | -3.640 | -4.382 | -5.601 | -6.613 |
| | 75 | -0.641 | -0.561 | -1.181 | -1.591 | -1.561 | -2.436 | -3.555 | -4.723 | -6.118 | -7.653 |
| 90 | 0.954 | 0.481 | 0.331 | 0.259 | 0.218 | 0.193 | 0.178 | 0.168 | 0.162 | 0.159 | |

4.3 基于不同光斑模型的探测器标定因子分析

标度因子作为失调角解算中的一个关键参数,从器件的角度来说应该是一个恒定值,但是在实验中解算出来的 k 值并不恒定,而且随着失调角和方位角的变化而变化,为了验证这一现象的真实性,文中对标定因子的解算公式进行了推导(见前文),并分别用均匀光斑模型和高斯光斑模型对其进行了仿真计算。基于均匀光斑模型和高斯模型的 k 如图7、图8所示。



图中, $k(0)$ 表示光斑能量中心在探测器上的方位角为 0° ,以此类推,横坐标表示失调角偏转度数,其值为坐标值 $\times 0.954^\circ$,纵坐标就是所求的 k 值。结果显示 k 值是一个与失调角、方位角、光斑大小以及光斑能量模型都有关系的变量,而且具有一定的规律性,在使用中要根据实际情况对其进行选择和修正。

通过分析激光半主动寻的制导中四象限探测器目标方位探测的工作原理,以及激光光斑对探测精度的影响研究,得出以下结论:①不管采用哪种光斑模型,对目标方位的探测解算都存在误差;②均匀光斑模型较高斯光斑模型精度高一倍;③光斑能量中

心在探测器上的位置对探测精度有重大影响,且具有规律性;④由模型误差引起的目标方位误差可以通过算法进行修正。⑤标度因子 k 是一个变因子,它与光斑大小、光斑形状、光斑能量分布特性、能量中心在探测器上的位置都有一定关系。

5 结束语

本文就四象限探测器对不同光斑模型的测量精度问题进行了较为详细的研究。结合实际系统的构成情况,搭建了一套激光导引系统^[5],通过这套系统模拟了不同光斑在探测器上的位置变化情况,并解算了相关参数,得出就目前大量使用的四象限激光探测器的工作模式和解算方法,本身就存在着算法误差,这也决定了它的精度不会很高。

参考文献:

- [1] Kuang Cuifang, Feng Qibo, Liu Bin. Study on background light influences on four-quadrant detector[J]. Laser & Infrared, 2004, 34(6): 493-495. (in Chinese)
匡萃方,冯其波,刘斌.背景光对四象限探测器干扰的研究[J].激光与红外,2004,34(6):493-495.
- [2] Tan Qianli. The application of quadrant photodetector module on laser guidance technology[J]. Semiconductor Electro-optic, 2005, 26(2): 155-157. (in Chinese)
谭千里.四象限探测器组件在激光制导技术中的应用[J].半导体光电,2005,26(2):155-157.
- [3] Feng Longling. Simple analysis signal-processing skill for four-quadrant opto-electronic detective system[J]. Optical Technology, 1995, (3): 12-17. (in Chinese)
冯龙龄.浅析四象限光电探测系统中信号处理的技巧[J].光学技术,1995,(3):12-17.
- [4] Wei Wenjia, Qin Shiqiao. Influence of optical system aberration on precision of detecting target position in laser semi-active seeking guidance[J]. Optical Technology, 2007, 33(3): 142-144. (in Chinese)
魏文俭,秦石乔.像差对激光制导目标方位探测精度的影响[J].光学技术,2007,33(3):142-144.
- [5] Xu Daishen, He Zhiping. Optical design of laser seeker[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2004, 2(5): 1-4. (in Chinese)
徐代升,何志平.激光制导目标方位探测系统的光学设计[J].光学与光电技术,2004,2(5):1-4.
- [6] Wang Yunping. Laser facial measurement technology using detector array[J]. Laser Journal, 2007, 28(4): 22-23. (in Chinese)
王云萍.探测器阵列法测量激光光斑参数关键技术分析[J].激光杂志,2007,28(4):22-23.