

激光导引头角跟踪误差对激光精确制导的影响

邱雄, 刘志国, 王仕成

(火箭军工程大学精确制导与仿真实验室, 710025, 西安)

摘要: 为了使激光导引头能以较高的概率探测到制导激光且以较高的跟踪精度跟踪目标,评估了在制导过程中激光导引头对目标的视线角跟踪精度。在四象限探测器接收的光斑信号服从高斯分布的条件下,建立了光斑中心与偏差分量的关系,通过仿真验证了其正确性。将该关系作为试验标定拟合的关系,建立了光束偏转角关系。由于噪声干扰电流具有随机性,对光束偏转角在(0,0)处进行了二元泰勒展开,并得出了角跟踪误差的近似表达式,以角跟踪误差标准差作为激光导引头视线角跟踪精度的评价标准,结合制导激光在大气传输中的能量衰减,得出了角跟踪误差标准差与目标指示器参数、激光导引头参数以及作用距离的关系,研究了不同参数对角跟踪误差标准差的影响。结果表明:当信噪比一定时,角跟踪误差标准差随着光斑半径减小而减小,可通过调节光敏面的安装位置减小光斑半径,从而提高激光导引头的角跟踪精度;当光斑半径为1 mm、噪声干扰电流标准差为 $0.2\ \mu\text{A}$ 时,若目标指示器单脉冲能量为150 mJ,则激光导引头对8 km处目标的角跟踪误差标准差为 $0.973\ 7\times 10^{-3}\ \text{rad}$;角跟踪误差标准差随着单脉冲能量的增大而减小,可通过提高目标指示器单脉冲能量从而提高激光导引头在特定作用距离处对目标的角跟踪精度。

关键词: 激光导引头;角跟踪误差;目标指示器;单脉冲能量;四象限探测器

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202005017 **文章编号:** 0253-987X(2020)05-0124-09



OSID 码

Effects of Angular Tracking Error of Laser Seeker on Precise Laser Guidance

QIU Xiong, LIU Zhiguo, WANG Shicheng

(Precision Guidance and Simulation Laboratory, Rocket Army Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: To enable the laser seeker to detect the guidance laser with a higher probability and track the target with higher tracking accuracy, the tracking accuracy of the sight angle of the laser seeker to the target during the guidance process is evaluated. The relationship between the spot center and the deviation component is established under the condition that the spot signal received by four quadrant detector obeys the Gaussian distribution, and its correctness is verified by simulation. This relationship is taken as a test calibration fit, and a beam deflection angle model is constructed. Due to the randomness of the noise interference current, a binary Taylor expansion of the beam deflection angle at (0,0) is carried out and an approximate expression of the angular tracking error is obtained. The standard deviation of the angular tracking error is used as the evaluation standard of the sight angle tracking accuracy of the laser seeker. The relationship among the standard deviation of the angular tracking error, the parameters of the

收稿日期: 2019-08-30。 作者简介: 邱雄(1991—),男,硕士生;王仕成(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61673017,61673386)。

网络出版时间: 2019-12-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20191218.1429.012.html>

target indicator, the parameters of the laser seeker, and the working distance is established by combining the energy attenuation model of the guidance laser in the atmospheric transmission. The influences of different parameters on the standard deviation of angular tracking error are discussed. This approach shows that: when the signal-to-noise ratio is constant, the standard deviation of the angular tracking error decreases as the spot radius decreases; the spot radius can be reduced by adjusting the mounting position of the photosensitive surface, thereby improving the angular tracking accuracy of the laser seeker is improved; when the spot radius is 1 mm and the standard deviation of the noise interference current is $0.2 \mu\text{A}$, if the single pulse energy of the target indicator is 150 mJ, the standard deviation of the angular tracking error of the laser seeker to the target at a distance of 8 km is 0.9737×10^{-3} rad. The angular tracking accuracy of the laser seeker for the target at a specific working distance can be improved by increasing the single pulse energy of the target indicator.

Keywords: laser seeker; angular tracking error; target indicator; single pulse energy; four quadrant detector

激光制导武器的精确制导不仅要求激光脉冲编码可被导引头解码从而确保制导激光进入导引头波门内,也要求激光导引头能以较高的探测概率探测到制导激光且以较高的跟踪精度跟踪目标,所以研究激光导引头对目标的角跟踪误差十分重要。

文献[1-2]研究了采用对角线相减式定位方法的激光导引头角跟踪误差的计算方法;文献[3-4]研究了激光在大气中水平传输以及斜程传输的大气透射率计算方法;文献[5-8]研究了激光在大气传输中能量衰减的计算方法,并分析了不同环境对激光传输的影响;文献[9-15]分析了半主动导引头的激光制导原理和光学系统设计;文献[16-18]研究了光敏面上的光斑信号功率密度服从高斯分布时,光斑中心坐标的定位方法;文献[19-20]研究了影响四象限探测器位置检测精度和跟踪精度的主要因素。

目前,激光导引头普遍采用和差比幅式的定位方法,而对采用此定位方法的激光导引头角跟踪误差的定量分析以及基于角跟踪误差研究激光导引头角跟踪精度的文献较少。为深入研究激光导引头对目标的视线角跟踪精度,本文从计算分析的角度出发,建立了激光导引头角跟踪误差模型,得出了角跟踪误差均值为0、俯仰角和方位角跟踪误差标准差 $\sigma(\Psi_e)$ 和 $\sigma(\theta_e)$ 与信噪比 r_{sn} 的关系;分析了制导激光在大气传输中能量衰减,并得出了经大气衰减传递至导引头入瞳处的脉冲峰值功率密度 P_s 与目标指示器发射的制导激光参数及作用距离 R_2 之间的关系;基于角跟踪误差标准差研究了激光导引头角跟踪精度,并得出了角跟踪误差标准差与目标指示器发射的制导激光参数、激光导引头参数以及作用距离之间的关系,并以方位角跟踪误差标准差为例,结

合应用背景进行了具体分析。

1 半主动激光导引头角跟踪原理

激光信号经目标漫反射后,进入导引头光学系统。在探测器光敏面上,激光信号形成光斑信号。探测器光敏面共有4个象限,每个象限各具有一个光电二极管。光电二极管根据光斑信号在各象限内的功率产生输出电流,该电流经电流/电压转换、信号放大后产生电压信号。四象限探测器依据采用的定位方法分别在二维坐标系 x 轴、 y 轴上产生偏差分量,导引头信息处理系统依据预先通过试验拟合的偏差分量与光斑中心坐标的关系(近似线性关系)得出光斑中心坐标。根据光斑中心坐标,可确定目标相对于导引头光轴的方位角和俯仰角,进而根据导引头光学系统和探测器与弹体的耦合方式,通过控制光学系统、探测器或弹体运动,使导引头和目标连线与导引头光轴重合,从而实现激光导引头高精度瞄准目标。光斑信号在光敏面的位置如图1所示,图1中 R 表示光敏面半径, r 表示光斑半径, x_0 、 y_0 表示光斑中心坐标。

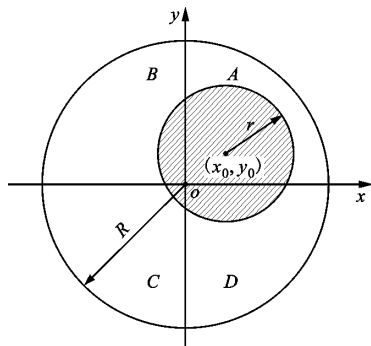


图1 光斑信号在光敏面的位置分布

当制导激光进入导引头光学系统后,各象限内光电二极管产生电流 $I_i (i=A, B, C, D)$ 。由于该电流信号比较弱,故需要进行电流/电压转换和信号放大。若记电流/电压转换系数为 $R_{A \rightarrow V}$,放大系数为 K_1 ,则此过程可描述为

$$U_i = K_1 R_{A \rightarrow V} I_i \quad (1)$$

式中 U_i 表示四象限探测器 i 象限输出的电压, $i=A, B, C, D$ 。当各象限输出电压为 U_i 时,坐标系 x 轴、 y 轴的偏差分量 $\Delta x, \Delta y$ 为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \frac{(U_A + U_D) - (U_B + U_C)}{U_A + U_B + U_C + U_D} \\ \Delta y &= \frac{(U_A + U_B) - (U_C + U_D)}{U_A + U_B + U_C + U_D} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

当获得偏差分量时,导引头信息处理系统依据预先通过试验拟合的偏差分量与光斑中心坐标的关系计算出此时的光斑中心坐标。假设某型激光导引头标定的偏差分量 $\Delta x, \Delta y$ 与光斑中心坐标 x_0, y_0 的关系为

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= a\Delta x + b \\ y_0 &= c\Delta y + d \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 a, b, c, d 是通过试验拟合的参数。下面具体分析如何得出参数 a, b, c, d 的近似取值。

假设四象限探测器接收到的光斑能量密度服从高斯分布,且激光总功率为 W ,则光敏面上任意点 (x, y) 处的功率密度 $P(x, y)$ 为

$$P(x, y) = \frac{2W}{\pi r^2} \exp \left\{ -\frac{2[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]}{r^2} \right\} \quad (4)$$

四象限探测器在各象限的激光功率 $W_i (i=A, B, C, D)$ 为

$$\left. \begin{aligned} W_A &= \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \frac{2W}{\pi r^2} \cdot \exp \left\{ -\frac{2[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]}{r^2} \right\} dx dy \\ W_B &= \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^0 \frac{2W}{\pi r^2} \cdot \exp \left\{ -\frac{2[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]}{r^2} \right\} dx dy \\ W_C &= \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^0 \frac{2W}{\pi r^2} \cdot \exp \left\{ -\frac{2[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]}{r^2} \right\} dx dy \\ W_D &= \int_{-\infty}^0 \int_0^{+\infty} \frac{2W}{\pi r^2} \cdot \exp \left\{ -\frac{2[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]}{r^2} \right\} dx dy \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

根据式(5)可得

$$\left. \begin{aligned} W_A + W_D &= \int_{-x_0}^{+\infty} \frac{\sqrt{2}W}{\sqrt{\pi}r} \exp \left(-\frac{2t^2}{r^2} \right) dt \\ W_B + W_C &= \int_{-\infty}^{-x_0} \frac{\sqrt{2}W}{\sqrt{\pi}r} \exp \left(-\frac{2t^2}{r^2} \right) dt \\ W_A + W_B &= \int_{-y_0}^{+\infty} \frac{\sqrt{2}W}{\sqrt{\pi}r} \exp \left(-\frac{2t^2}{r^2} \right) dt \\ W_C + W_D &= \int_{-\infty}^{-y_0} \frac{\sqrt{2}W}{\sqrt{\pi}r} \exp \left(-\frac{2t^2}{r^2} \right) dt \\ W_A + W_B + W_C + W_D &= W \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

为计算偏差分量 $\Delta x, \Delta y$ 与光斑中心坐标 x_0, y_0 的关系,将式(1)、 $I_i = R_p W_i (i=A, B, C, D, R_p$ 为探测器的脉冲响应率)和式(6)代入式(2),得到

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D} = \frac{2 \int_0^{x_0} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}r} \exp \left(-\frac{2t^2}{r^2} \right) dt}{I_A + I_B + I_C + I_D} \\ \Delta y &= \frac{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} = \frac{2 \int_0^{y_0} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}r} \exp \left(-\frac{2t^2}{r^2} \right) dt}{I_A + I_B + I_C + I_D} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由式(7)可知,当光敏面上光斑功率密度服从高斯分布时, $\Delta x, \Delta y$ 与 x_0, y_0 分别属于积分关系。考虑到激光导引头要求解算速率较快,工程上采用试验标定的方法确定 $\Delta x, \Delta y$ 与 x_0, y_0 的关系。由于在导引头跟踪上目标时,光斑中心与光敏面中心基本重合,所以研究激光导引头角跟踪精度更加关注光斑中心位于 $(0, 0)$ 点附近处的标定精度。对式(7)在 $(0, 0)$ 点处进行泰勒展开,取线性部分,得到

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &\approx \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}r} x_0 \\ \Delta y &\approx \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}r} y_0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

为了评价光斑中心位于 $(0, 0)$ 点附近时,式(8)对式(7)等效的误差,以 Δx 为例,通过 Matlab 仿真进行分析。

四象限探测器的最大测量范围为 $-r \leq x_0 \leq r$,本文取 $r=1.0$ mm。为讨论光斑中心在 $(0, 0)$ 点附近时式(8)对式(7)的等效误差,取 $-r/4 \leq x_0 \leq r/4$ 。通过 Matlab 仿真得出 Δx 与 x_0 的关系,结果如图2所示。

从图2可知,假设光敏面上的光斑能量密度服从高斯分布,当 $-r/4 \leq x_0 \leq r/4$ 时,光斑中心坐标与偏差分量的关系近似于线性,且式(8)与式(7)之间的误差非常小。随着光斑中心坐标的增大,式(8)

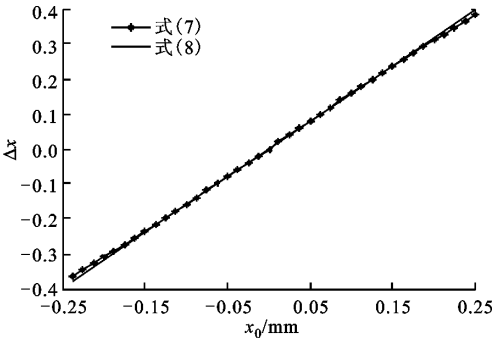
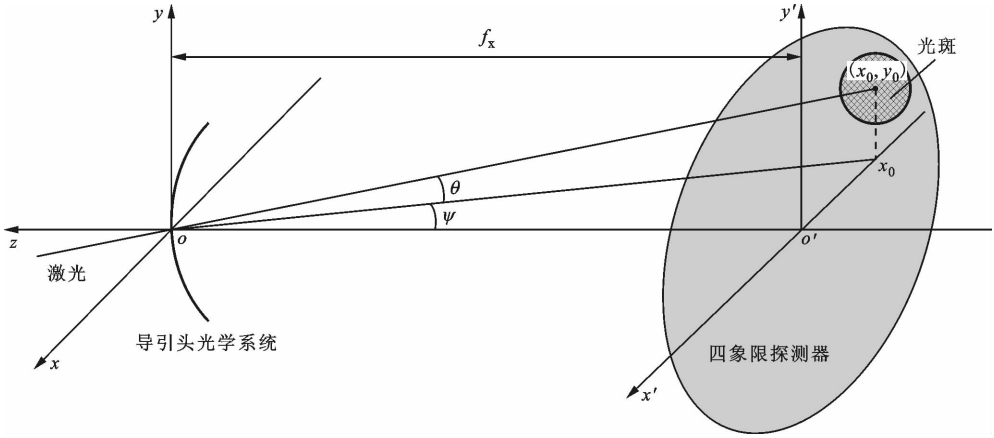


图 2 Δx 与 x_0 的关系

与式(7)之间的误差增大。根据仿真结果可知,当光斑半径 $r=1.0\text{ mm}$ 、偏差分量 $\Delta x=0.2$ 时,式(7)算出的 $x_0=0.192\text{ mm}$,式(8)算出的 $x_0=0.188\text{ mm}$,误差非常小,所以当光斑中心在 $(0,0)$ 点附近时,可用式(8)对式(7)进行线性等效,且将其作为试验标定的光斑中心与偏差分量的线性拟合关系。

当信息处理系统得到光斑中心坐标 $x_0、y_0$ 后,计算光束的俯仰角 θ 和方位角 Ψ , θ 和 Ψ 统称为光束偏转角,光束偏转角与光斑中心位置的关系如图 3 所示。



f_x —光学系统透镜中心距光敏面中心的距离。

图 3 光束偏转角与光斑中心位置的关系

在图 3 中:以导引头光学透镜中心为坐标原点 o ,以导引头光轴为 z 轴,垂直导引头光轴向上为 y 轴,按照右手螺旋关系确定 x 轴;绕 y 轴转动产生方位角 Ψ ,且方位角 Ψ 以 y 轴负向为正;绕 x 轴转动产生俯仰角 θ ,且俯仰角 θ 以 x 轴正向为正。将坐标系 $o-xyz$ 按照先方位角 Ψ 后俯仰角 θ 的顺序转动,得到

$$\left. \begin{aligned} \tan\Psi &= \frac{x_0}{f_x} \\ \tan\theta &= \frac{y_0}{\sqrt{f_x^2 + x_0^2}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由于 $x_0 \ll f_x$,所以式(9)可近似为

$$\left. \begin{aligned} \Psi &\approx \frac{x_0}{f_x} \approx \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}f_x} \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \\ \theta &\approx \frac{y_0}{f_x} \approx \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}f_x} \frac{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

2 激光导引头的角跟踪误差分析

2.1 理论分析

光电二极管的实际输出电流主要包含制导激光

引起的光电二极管输出电流、导引头内部放大电路引起的噪声电流、背景光引起的噪声电流以及暗电流。假设各象限输出的总噪声干扰电流分别为 $i_A、i_B、i_C、i_D$,则考虑噪声干扰时,光束方位角 Ψ_n 和俯仰角 θ_n 的表达式为

$$\left. \begin{aligned} \Psi_n &\approx \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}f_x} \frac{(I_A + i_A + I_D + i_D) - (I_B + i_B + I_C + i_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D + i_A + i_B + i_C + i_D} \\ \theta_n &\approx \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}f_x} \frac{(I_A + i_A + I_B + i_B) - (I_C + i_C + I_D + i_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D + i_A + i_B + i_C + i_D} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

当激光导引头跟踪上目标,即光斑中心位置为 $(0,0)$ 时,希望激光导引头输出的方位角 $\Psi_n=0$ 、俯仰角 $\theta_n=0$,但由于噪声干扰电流的影响,式(11)中的方位角 Ψ_n 和俯仰角 θ_n 并不等于 0,此时该物理量表示光斑中心和光敏面中心重合时的激光导引头角跟踪误差。为研究激光导引头角跟踪误差,令 $I_i + I_j = I_{ij}, i_i + i_j = i_{ij}$,对式(11)进行等效变换,并进行二元泰勒展开,得到

$$\left. \begin{aligned} \Psi_n &\approx \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}f_x} \frac{(I_{AD} + i_{AD}) - (I_{BC} + i_{BC})}{I_{AD} + i_{AD} + I_{BC} + i_{BC}} = \\ &\frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}f_x} \left[\frac{I_{AD} - I_{BC}}{I_{AD} + I_{BC}} + \frac{2(I_{BC}i_{AD} - I_{AD}i_{BC})}{(I_{AD} + I_{BC})^2} + \right. \\ &\left. o(\sqrt{i_{AD}^2 + i_{BC}^2}) \right] \approx \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}f_x} \left[\frac{I_{AD} - I_{BC}}{I_{AD} + I_{BC}} + \right. \\ &\left. \frac{2(I_{BC}i_{AD} - I_{AD}i_{BC})}{(I_{AD} + I_{BC})^2} \right] \\ \theta_n &\approx \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}f_x} \frac{(I_{AB} + i_{AB}) - (I_{CD} + i_{CD})}{I_{AB} + i_{AB} + I_{CD} + i_{CD}} = \\ &\frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}f_x} \left[\frac{I_{AB} - I_{CD}}{I_{AB} + I_{CD}} + \frac{2(I_{CD}i_{AB} - I_{AB}i_{CD})}{(I_{AB} + I_{CD})^2} + \right. \\ &\left. o(\sqrt{i_{AB}^2 + i_{CD}^2}) \right] \approx \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}f_x} \left[\frac{I_{AB} - I_{CD}}{I_{AB} + I_{CD}} + \right. \\ &\left. \frac{2(I_{CD}i_{AB} - I_{AB}i_{CD})}{(I_{AB} + I_{CD})^2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

当光斑中心和光敏面中心重合,即 $I_A = I_B = I_C = I_D$ 时,记方位角 Ψ_n 为方位角跟踪误差 Ψ_e ,记俯仰角 θ_n 为俯仰角跟踪误差 θ_e ,则式(12)变为

$$\left. \begin{aligned} \Psi_e &= \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}f_x} \frac{(i_A + i_D) - (i_B + i_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \\ \theta_e &= \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}f_x} \frac{(i_A + i_B) - (i_C + i_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

由于噪声干扰电流 i_A, i_B, i_C, i_D 的瞬时值不易测量,所以需研究角跟踪误差 Ψ_e, θ_e 的均值和标准差,并将其作为角跟踪误差的评价依据。假设4个光电二极管输出的噪声干扰电流相互独立,且分别服从参数为 $(\mu/4, \sigma^2/4)$ 的高斯分布,则有

$$\left. \begin{aligned} E(\Psi_e) &= 0 \\ E(\theta_e) &= 0 \\ \sigma(\Psi_e) &= \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}f_x} \sqrt{\frac{\sigma^2}{(I_A + I_B + I_C + I_D)^2}} = \\ &\frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}f_x} \frac{1}{r_{sn}} \\ \sigma(\theta_e) &= \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}f_x} \sqrt{\frac{\sigma^2}{(I_A + I_B + I_C + I_D)^2}} = \\ &\frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}f_x} \frac{1}{r_{sn}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: $E(\Psi_e), E(\theta_e)$ 分别表示角跟踪误差 Ψ_e, θ_e 的均值; $\sigma(\Psi_e), \sigma(\theta_e)$ 分别表示角跟踪误差 Ψ_e, θ_e 的标准差; $r_{sn} = (I_A + I_B + I_C + I_D)/\sigma$ 为信噪比,表示制

导信号引起的二极管输出电流与总噪声干扰电流标准差 σ (噪声干扰电流 i_A, i_B, i_C, i_D 之和的标准差) 的比值。激光导引头标定过程中,通常物镜半径 R_t 、光学系统焦距 f 均是固定的,所以光斑半径 r 由离焦量 Δf 确定,即可通过调节光敏面的安装位置改变光斑大小。假设光斑在焦平面前成像,则 f_x 和 r 的关系为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta f}{f} &= \frac{r}{R_t} \\ f_x &= f - \Delta f \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

将式(15)代入式(14),得到

$$\left. \begin{aligned} \sigma(\Psi_e) &= \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}(1-r/R_t)f} \frac{1}{r_{sn}} \\ \sigma(\theta_e) &= \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}(1-r/R_t)f} \frac{1}{r_{sn}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

要研究角跟踪误差标准差 $\sigma(\Psi_e), \sigma(\theta_e)$, 应分析不同光斑半径条件下, $\sigma(\Psi_e), \sigma(\theta_e)$ 与 r_{sn} 的关系。由于 $\sigma(\Psi_e)$ 和 $\sigma(\theta_e)$ 的表达式相同,因此本文仅分析方位角跟踪误差标准差 $\sigma(\Psi_e)$ 。

2.2 仿真分析

假设 $f=36$ mm, $R_t=25$ mm, $r=0.5, 0.7, 1.0$ mm。由于激光导引头可探测到制导激光时,信噪比通常大于7,因此取 $10 \leq r_{sn} \leq 400$ 。通过 Matlab 仿真得到 $\sigma(\Psi_e)$ 与 r_{sn} 的关系,如图4所示。

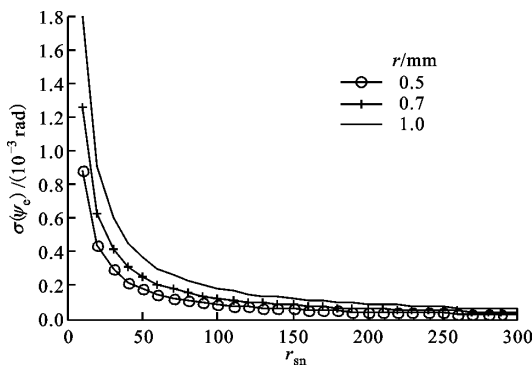


图4 $\sigma(\Psi_e)$ 与 r_{sn} 的关系

由图4可知:当 r 一定时, $\sigma(\Psi_e)$ 随着 r_{sn} 的增大而减小,所以可通过计算导引头在不同作用距离处的信噪比,来求解俯仰角和方位角跟踪误差标准差,进而分析激光导引头制导性能;当 $r=1.0$ mm 时,若 $r_{sn}=10$,则 $\sigma(\Psi_e)=1.8132 \times 10^{-3}$ rad,若 $r_{sn}=300$,则 $\sigma(\Psi_e)=0.0604 \times 10^{-3}$ rad;当 r_{sn} 一定时, $\sigma(\Psi_e)$ 随着 r 的减小而减小,所以可通过调节光敏面的安装位置减小光斑半径,从而增大导引头的角跟踪精度,但是光斑半径的减小会导致导引头视场范

围也减小,所以在光学系统设计中,要综合四象限探测器角跟踪精度和视场范围确定光斑半径以及光敏面半径。

激光制导的应用更多地关注位于地面的目标指示器在发射激光脉冲能量为多大、激光导引头距离目标为多远时,激光导引头对目标的角跟踪误差为多少。为研究这一问题,应建立信噪比与地面目标指示器发射的制导激光参数之间的关系,即需研究制导激光在大气中的能量衰减。

3 制导激光在大气传输中的能量衰减

3.1 半主动激光导引头的制导原理

半主动激光导引头的制导原理为:地面目标指示器发射激光信号,激光信号照射在目标上并通过目标漫反射而被激光导引头探测到,导引头对接收到的漫反射信号进行信号处理,从而实现对目标的稳定跟踪。半主动激光制导原理示意如图5所示。

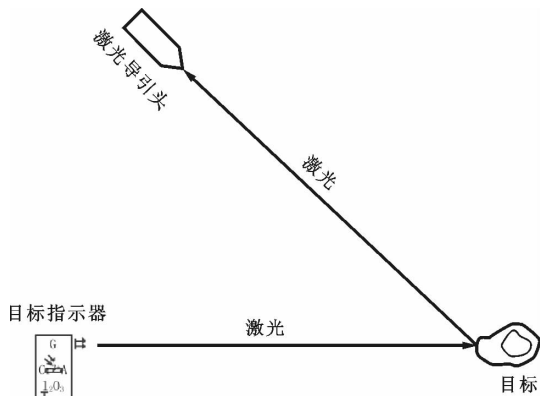


图5 半主动激光制导原理示意

当目标指示器确定后,通常脉冲宽度 τ 与单脉冲能量 E_t 为固定值。由于激光导引头接收到的制导激光形成的电压信号与激光单脉冲能量有关,所以应研究不同目标指示器的单脉冲能量对角跟踪误差标准差的影响。

3.2 导引头入瞳处脉冲峰值功率密度与单脉冲能量的关系

激光制导过程中,若目标指示器与目标之间的距离为 R_1 ,目标与导引头之间的距离为 R_2 ,目标指示器发射的单脉冲峰值功率为 P_t , P_t 经大气传输至导引头入瞳处的脉冲峰值功率密度为 P_s ,目标为均匀反射体,则有

$$P_s = \frac{P_t \rho T_1 T_2 \cos \alpha_s \cos \beta_s}{2\pi R_2^2} \quad (17)$$

式中: ρ 为目标的漫反射率; T_1 为目标指示器至目标之间的大气透射率; T_2 为目标至导引头之间的大

气透射率; α_s 为弹目连线与目标法线之间的夹角($^\circ$); β_s 为弹目连线与导引头光轴之间的夹角,当导引头处于跟踪阶段, β_s 很小,可认为 $\cos \beta_s \approx 1$ 。

为得到 P_s 与 E_t 的关系,将 $E_t/\tau = P_t$ 代入式(17),得到

$$P_s = \frac{E_t \rho T_1 T_2 \cos \alpha_s \cos \beta_s}{2\pi R_2^2 \tau} \quad (18)$$

式中: E_t 为的单位为 mJ; P_s 的单位为 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。

3.3 大气透射率分析

假设目标指示器至目标之间的激光能量传播属于水平传输,则 T_1 的表达式^[4]为

$$T_1 = \exp\left[-\frac{3.912}{V_t} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^q R_1\right] \quad (19)$$

式中: V_t 表示大气能见度(km),具体取值与气象条件有关; λ 表示传输激光的波长(μm); q 表示修正因子,具体取值与大气能见度 V_t 有关,表达式^[5]为

$$q = \begin{cases} 1.6, & V_t \geq 50 \text{ km} \\ 1.3, & 6 \text{ km} \leq V_t < 50 \text{ km} \\ 0.16V_t + 0.34, & 1 \text{ km} \leq V_t < 6 \text{ km} \\ V_t - 0.5, & 0.5 \text{ km} \leq V_t < 1 \text{ km} \\ 0, & V_t < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (20)$$

假设目标至激光导引头之间,激光能量传播属于斜程传输,则 T_2 的表达式^[4]为

$$T_2 = \exp\left\{\frac{K}{V_t \sin \theta_1} [\exp(-0.835h_1) - 1]\right\} \quad (21)$$

式中: θ_1 表示光路与水平面之间的夹角($^\circ$); K 表示区域常数,乡村取 2.828,城市取 3.132,海洋取 4.543,沙漠取 2.496; h_1 表示激光能量的传输高度(km), $h_1 = R_2 \sin \theta_1$ 。

4 不同参数对方位角跟踪误差标准差的影响

4.1 理论分析

制导激光引起的各象限光电二极管输出电流之和为

$$I_A + I_B + I_C + I_D = R_p S_A T_A P_s \quad (22)$$

式中: S_A 表示导引头入瞳处面积; T_A 表示导引头光学系统的透过率; P_s 可通过式(18)求解。根据式(22),可将信噪比 r_{sn} 表示为

$$r_{\text{sn}} = \frac{R_p S_A T_A P_s}{\sigma} \quad (23)$$

为建立导引头角跟踪误差标准差与制导激光参数、导引头参数以及作用距离之间的关系,将式(18)(23)及 $S_A = \pi R_t^2$ 代入式(16),得到

$$\left. \begin{aligned} \sigma(\Psi_e) &= \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}(1-r/R_t)f} \frac{1}{r_{sn}} = \\ &\frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}(1-r/R_t)f} \frac{R_p R_t^2 T_A E_t \rho T_1 T_2 \cos\alpha_s \cos\beta_s}{R_2^2 \tau} \\ \sigma(\theta_e) &= \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}(1-r/R_t)f} \frac{1}{r_{sn}} = \\ &\frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}(1-r/R_t)f} \frac{R_p R_t^2 T_A E_t \rho T_1 T_2 \cos\alpha_s \cos\beta_s}{R_2^2 \tau} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

由于 $\sigma(\Psi_e)$ 与 $\sigma(\theta_e)$ 的表达式相同,本文以方位角跟踪误差标准差为例进行具体研究,具体步骤如下。

(1)研究 $\sigma(\Psi_e)$ 与 E_t 的关系,可用于当导引头参数和作用距离确定后,分析 E_t 对 $\sigma(\Psi_e)$ 的影响,从而根据角跟踪误差标准差的要求设计目标指示器。

(2)研究 $\sigma(\Psi_e)$ 与 σ 的关系,可用于当制导激光参数和作用距离确定后,分析 σ 对 $\sigma(\Psi_e)$ 的影响。

(3)研究 $\sigma(\Psi_e)$ 与 R_2 之间的关系,可用于当制导激光参数和导引头参数确定后,分析制导激光在不同作用距离处的方位角跟踪误差标准差,也可根据激光导引头精确制导对角跟踪误差标准差的要求确定激光制导武器的有效精确制导距离。

4.2 仿真分析

当目标指示器与目标均在地面,且认为在同一水平面时,假设式(24)中部分参数如下: $R_1=5\text{ km}$, $\lambda=1.064\text{ }\mu\text{m}$, $V_t=10\text{ km}$, $q=1.3$, $K=3.132$, $\theta_1=50^\circ$, $\alpha_s=0$, $\beta_s=0$, $\tau=10\text{ ns}$, $\rho=0.7$, $r=1.0\text{ mm}$, $f=36\text{ mm}$, $T_A=0.5$, $R_p=0.5\text{ A/W}$, $R_t=25\text{ mm}$ 。

4.2.1 $\sigma(\Psi_e)$ 与 E_t 的关系 当 $R_2=8\text{ km}$ 、 $\sigma=0.2\text{ }\mu\text{A}$ 时,通常目标指示器单脉冲能量 $E_t \geq 50\text{ mJ}$,通过Matlab仿真得到的 $\sigma(\Psi_e)$ 与 E_t 的关系,如图6所示。

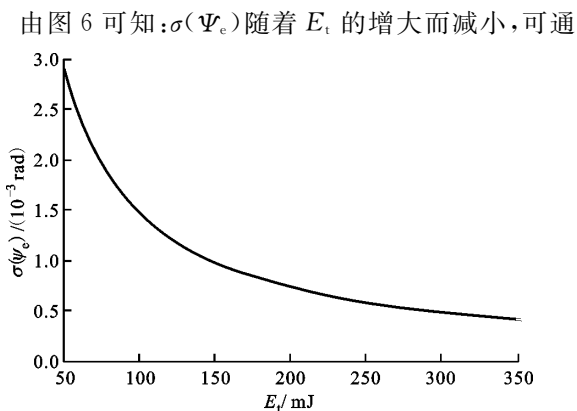


图6 $\sigma(\Psi_e)$ 与 E_t 的关系

过提高目标指示器单脉冲能量来提高激光导引头在特定作用距离处对目标的角跟踪精度;当已知激光导引头参数和最大作用距离时,可根据 $\sigma(\Psi_e)$ 设计目标指示器的单脉冲能量;由于 $E_t=150\text{ mJ}$ 时, $\sigma(\Psi_e)=0.9737 \times 10^{-3}\text{ rad}$,所以在 $\sigma=0.2\text{ }\mu\text{A}$ 的条件下,若要求激光导引头对距离 8 km 处的目标以方位角跟踪误差标准差不大于 $0.9737 \times 10^{-3}\text{ rad}$ 的精度跟踪,则应设计单脉冲能量 $E_t \geq 150\text{ mJ}$ 的目标指示器。

4.2.2 $\sigma(\Psi_e)$ 与 σ 的关系 当 $R_2=8\text{ km}$ 、单脉冲能量 $E_t=100, 200, 300\text{ mJ}$ 时,通过Matlab仿真得到的 $\sigma(\Psi_e)$ 与 σ 的关系,如图7所示。

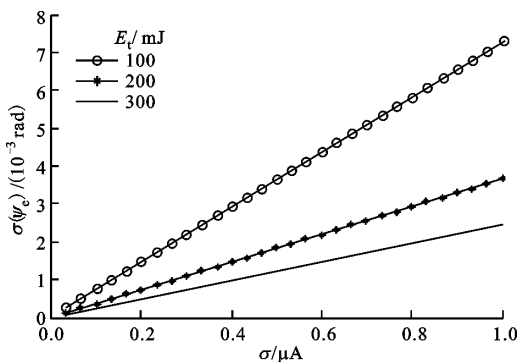
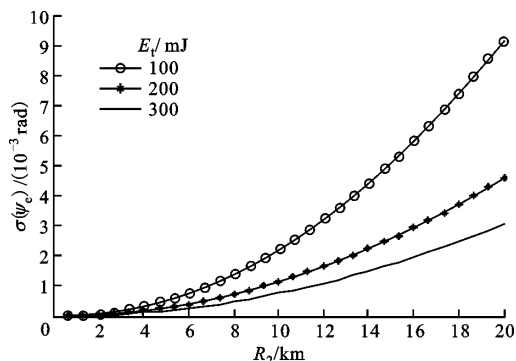


图7 $\sigma(\Psi_e)$ 与 σ 的关系

由图7可知:角跟踪误差标准差与噪声干扰电流标准差成正比,所以可通过降低噪声干扰电流标准差提高激光导引头的跟踪精度;由于在 $E_t=200\text{ mJ}$ 时,若 $\sigma=0.2\text{ }\mu\text{A}$,则 $\sigma(\Psi_e)=0.7303 \times 10^{-3}\text{ rad}$,所以当单脉冲能量 $E_t=200\text{ mJ}$ 时,若要求激光导引头可对距离 8 km 处的目标以方位角跟踪误差标准差为 $0.7303 \times 10^{-3}\text{ rad}$ 的精度跟踪,则应设计总噪声电流标准差 $\sigma \leq 0.2\text{ }\mu\text{A}$ 的激光导引头。

4.2.3 $\sigma(\Psi_e)$ 与 R_2 的关系 当 $\sigma=0.2\text{ }\mu\text{A}$ 、单脉冲能量 $E_t=100, 200, 300\text{ mJ}$ 时,通过Matlab仿真得到的 $\sigma(\Psi_e)$ 与 R_2 的关系,如图8所示。

由图8可知: $\sigma(\Psi_e)$ 随着作用距离 R_2 减小而减小;当 $E_t=200\text{ mJ}$ 时,若 $R_2=10\text{ km}$,则 $\sigma(\Psi_e)=1.1431 \times 10^{-3}\text{ rad}$,而通常激光导引头的盲区为 $R_2 \leq 0.1\text{ km}$,若 $R_2=0.1\text{ km}$,则 $\sigma(\Psi_e)=0.078 \times 10^{-6}\text{ rad}$,可以看出,随着激光制导武器接近目标,激光导引头对目标的角跟踪误差标准差从 10^{-3} rad 级变为 10^{-6} rad 级。所以,当激光导引头参数、目标指示器参数确定后,可研究激光导引头在不同作用距离处的角跟踪误差标准差,进而研究激光导引头的制导精度。同时,由于导引头进入盲区后保持惯性飞行,

图8 $\sigma(\Psi_e)$ 与 R_2 的关系

所以也可根据激光导引头在盲区处的角跟踪误差研究激光制导武器与地面目标的落点偏差。

5 结 论

激光导引头对目标的视线角跟踪精度是激光精确制导的关键因素。本文基于四象限探测器接收的光斑信号服从高斯分布,得出了光斑中心与偏差分量的线性关系,并通过有效验证将其作为试验标定拟合的关系,进而建立了光束偏转角模型。由于噪声干扰电流的随机性,对光束偏转角在(0,0)处进行了二元泰勒展开,并得出了角跟踪误差的近似表达式。以角跟踪误差标准差作为激光导引头视线角跟踪精度的评价标准,结合制导激光在大气传输中的能量衰减模型,得出了角跟踪误差标准差与目标指示器参数、激光导引头参数以及作用距离的关系,研究了不同参数对角跟踪误差标准差的影响。本文主要结论如下。

(1)当信噪比一定时,角跟踪误差标准差随着光斑半径减小而减小,可通过调节光敏面的安装位置减小光斑半径,从而提高激光导引头的角跟踪精度。

(2)当光斑半径为1.0 mm、噪声干扰电流标准差为 $0.2 \mu\text{A}$ 时,若目标指示器单脉冲能量为150 mJ,则激光导引头对8 km处目标的角跟踪误差标准差为 $0.9737 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 。 $\sigma(\Psi_e)$ 随着 E_i 的增大而减小,可通过提高目标指示器单脉冲能量来提高激光导引头在特定作用距离处对目标的角跟踪精度。

本文研究的应用如下:①根据导引头角跟踪精度和最大有效作用距离,可设计目标指示器的单脉冲能量;②在指定目标指示器和激光导引头的条件下,根据不同作用距离处的角跟踪误差标准差可研究激光武器的制导精度;③根据导引头在进入盲区时的角跟踪误差,可确定制导武器在地面落点与目标落点的偏差。

参考文献:

- [1] 李双刚,童忠诚.四象限探测器角跟踪误差对激光制导的影响[J].应用激光,2010,30(2):142-144.
LI Shuanggang, TONG Zhongcheng. Effect of angular tracking error of quadrant detector on laser guidance [J]. Applied Laser, 2010, 30(2): 142-144.
- [2] 曹昌东,季云飞,耿林.激光角跟踪误差来源分析[J].激光与红外,2009,39(5):480-482.
CAO Changdong, JI Yunfei, GENG Lin. Source analysis of laser angle tracking error [J]. Laser and Infrared, 2009, 39(5): 480-482.
- [3] 张雷,张国玉,刘云清.影响四象限探测器探测精度的因素[J].中国激光,2012,39(6):121-125.
ZHANG Lei, ZHANG Guoyu, LIU Yunqing. Factors affecting the detection accuracy of four-quadrant detectors [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(6): 121-125.
- [4] 贾建周,宋德安,贾仁耀,等.激光大气传输衰减的估算方法[J].电子信息对抗技术,2010,25(4):73-76,81.
JIA Jianzhou, SONG De'an, JIA Renyao, et al. Attenuation estimation of laser atmospheric transmission [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2010, 25(4): 73-76, 81.
- [5] 杜永成,杨立.制导武器激光在细水雾中的衰减特性[J].中国激光,2013,40(4):24-29.
DU Yongcheng, YANG Li. Attenuation characters of laser used for guided weapons in fine water sprays [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 24-29.
- [6] 杨瑞科,马春林,韩香娥,等.激光在大气中传输衰减特性研究[J].红外与激光工程,2007,36(S2):415-418.
YANG Ruike, MA Chunlin, HAN Xiang'e, et al. Study of the attenuation characteristics of laser propagation in the atmosphere [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(S2): 415-418.
- [7] 张莹路,王英民,黄爱萍.米氏理论下悬浮粒子对水下激光传输的影响[J].中国激光,2018,45(5):152-160.
ZHANG Yingluo, WANG Yingmin, HUANG Aiping. Effect of suspended particles on underwater laser transmission under Mie theory [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 152-160.
- [8] 郭婧,张合,王晓峰.降雨对532 nm和1 064 nm激光传输的衰减特性研究[J].光学学报,2011,31(1):24-30.
GUO Jing, ZHANG He, WANG Xiaofeng. Attenuation and transmission of laser radiation at 532 nm and

- 1 064 nm through rain [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 24-30.
- [9] 刘智颖, 邢天祥. 激光半主动导引头光学系统设计 [J]. 激光与红外, 2016, 46(5): 527-531.
LIU Zhiying, XING Tianxiang. Laser semi-active seeker optical system design [J]. Laser and Infrared, 2016, 46(5): 527-531.
- [10] 王云萍, 张海洋, 郑星元, 等. 高重频激光对激光制导武器的干扰机理分析 [J]. 激光技术, 2014, 38(1): 21-25.
WANG Yunping, ZHANG Haiyang, ZHENG Xingyuan, et al. Analysis of interference mechanism of high-frequency laser to laser guided weapon [J]. Laser Technology, 2014, 38(1): 21-25.
- [11] 黄科, 李松, 马跃, 等. 单光子模式激光测高探测概率模型与精度分析 [J]. 中国激光, 2016, 43(11): 235-240.
HUANG Ke, LI Song, MA Yue, et al. Single photon mode laser altimetry detection probability model and accuracy analysis [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 235-240.
- [12] 司栋森, 李增智, 王晓旭. 采用四象限探测器的智能跟踪定位算法 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(4): 13-17, 99.
SI Dongsan, LI Zengzhi, WANG Xiaoxu. Intelligent tracking and positioning algorithm using four quadrant detector [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(4): 13-17, 99.
- [13] 颜凡江, 杨策, 陈檬, 等. 高重频高峰值功率窄线宽激光放大器 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(2): 102-106.
YAN Fanjiang, YANG Ce, CHEN Meng, et al. High repetition rate high peak power narrow linewidth laser amplifier [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(2): 102-106.
- [14] 黄璐, 郭红莲, 屈娥, 等. 四象限探测器位移测量的标定方法 [J]. 光学学报, 2011, 31(10): 20-24.
HUANG Lu, GUO Honglian, QU E, et al. Calibration method for four-quadrant detector displacement measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 20-24.
- [15] 尚韬, 李曦, 刘增基, 等. 新型四象限设计及其光斑参数测量方法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1034-1040.
SHANG Tao, LI Xi, LIU Zengji, et al. Novel four-quadrant design and the method for obtaining spot parameters [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 1034-1040.
- [16] MATWYSCHUK A. Impact of a distance estimation error inducing a visualized zone gap on the target illuminance in range-gated active imaging [J]. Applied Optics, 2014, 53(1): 44.
- [17] ZHANG Z Y, MA Y, ZENG H M, et al. Theoretical ranging performance model that considers laser pointing errors for laser ranging systems in detecting diffusely reflecting targets [J]. Applied Optics, 2018, 57(36): 10426.
- [18] LIU J S, ZOU H, ZHANG M L, et al. Optical fiber positioning based on four-quadrant detector with Gaussian fitting method [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2017, 17(7): 075.
- [19] 肖韶荣, 周洁, 赵静, 等. 温度对激光光斑跟踪不确定度的影响 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 605-610.
XIAO Shaorong, ZHOU Jie, ZHAO Jing, et al. Effect of temperature on laser spot tracking uncertainty [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 605-610.
- [20] 张辉, 陈云善, 耿天文, 等. 四象限探测器位置检测精度的主要影响因素研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(12): 306-314.
ZHANG Hui, CHEN Yunshan, GENG Tianwen, et al. Research on the main influencing factors of the position detection accuracy of four-quadrant detectors [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 306-314.

(编辑 陶晴)