文章编号:1001-5078(2010)06-0628-04 ·光电对抗·

大气湍流对激光半主动制导精度的影响

叶顺流[1,2],朱少岚[1],孙启兵[1,2],阎德科[1,2]
(1.中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119;2.中国科学院研究生院,北京 100039)

摘 要:根据强度起伏导致的对数振幅方差和相位起伏导致的到达角方差,计算出由大气湍流引起的激光半主动制导跟踪系统的角误差,并通过专用软件仿真了大气湍流引起的角误差对激光半主动制导瞄准精度的影响。计算和仿真结果表明:大气湍流引起的跟踪误差可达几十微弧度,导致制导系统的瞄准精度下降10%左右。

关键词:激光半主动制导;强度起伏;相位起伏;跟踪误差;瞄准精度
中图分类号:TN977 **文献标识码**:A

Influence of atmospheric turbulence on the accuracy of semi-active laser guidance

YE Shun-liu[1,2],ZHU Shao-lan[1],SUN Qi-bing[1,2],YAN De-ke[1,2]
(1. Xi′an Institute of Optics and Precision Mechanics,CAS,Xi′an 710119,China;
2. Graduate University of CAS,Beijing 100039,China)

Abstract: Angle-tracking errors of semi-active laser guidance caused by atmospheric turbulence were calculated according to log-amplitude variance induced by intensity fluctuation and angle-of-arrival variance induced by phase fluctuation,and influences on pointing accuracy of semi-active laser guidance caused by the angle-tracking errors were simulated by using special software. Calculation and simulation results show that the tracking errors induced by atmospheric turbulence reach dozens of micro-radians,and result in the pointing accuracy of the guided system dropping by 10% or so.

Key words: semi-active laser guidance; intensity fluctuation; phase fluctuation; tracking error; pointing accuracy

1 引 言

目前装备最多的激光制导武器是激光半主动制导武器,其核心为激光半主动制导系统。该系统由弹上的激光导引头和弹外的激光目标指示器组成。激光目标指示器通过向目标发射制导信号,依靠目标漫反射信号引导制导武器对目标进行攻击[1]。影响激光半主动制导跟踪精度的因素很多,由于一般采用四象限光电探测系统对目标进行跟踪,大多数的研究从量子噪声、背景噪声、暗电流噪声、探测器和电子电路热噪声方面讨论了激光半主动制导系统的跟踪精度,但是没有考虑大气湍流的影响,认为大气湍流引起的强度起伏和相位起伏对激光半主动制导的影响并不大。但在实际的应用中,却发现湍流的影响不可忽视,特别是在低仰角实时跟踪情况下,跟踪系统往往会脱靶。这是由于在求解角脱靶量时假定光斑本身的强度分布是均匀的或呈高斯分布,四个象限上光强的不同仅是由于分配的份额即角位置不同,但实际上大气湍流造成光斑的相位起伏和光强的随机分布[2]。所以研究大气湍流对激光半主动制导精度的影响对国防建设具有重要的现实意义。

2 四象限光电探测工作原理

激光半主动制导利用目标产生的漫反射信号引

作者简介:叶顺流(1977-)男,在读博士研究生,主要从事光电对抗的研究。E-mail:shunliuye@163.com
收稿日期:2010-01-07

导激光制导炸弹到达预定的目标。弹上导引头一般采用四象限光电探测器的和差电路形式来测定光斑的中心位置。如图 1 所示，式(1)和式(2)给出了运算电路输出的角误差[3]，k_u 是比例因子，取决于接收光学系统的焦距和光斑半径。

$$\theta_x = k_u \frac{(u_A + u_D) - (u_B + u_C)}{(u_A + u_B) + (u_C + u_D)} \tag{1}$$

$$\theta_y = k_u \frac{(u_A + u_B) - (u_C + u_D)}{(u_A + u_B) + (u_C + u_D)} \tag{2}$$

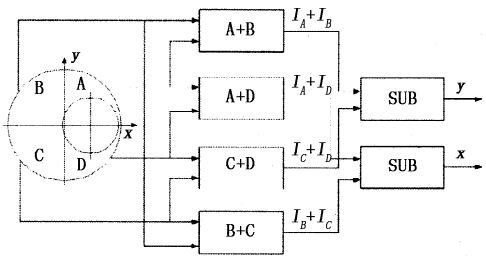

图 1　四象限探测器测角原理图

Fig. 1　The goniometric schematic diagram for using a quadrant detector

假设导引头与伺服系统本身的误差是确定的，方位轴和俯仰轴相当对称，并经常处于精确地瞄准状态下，此时角误差在 x 和 y 方向上是对称的，则有：

$$\theta = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2} = \sqrt{2}\theta_x \tag{3}$$

经过漫反射的激光束，在大气湍流中传输一段距离后，由于大气温度、折射率等参数的随机起伏，光束的强度和相位在空间和时间上出现随机分布，这就相当于信号光束上引入了强度起伏和相位起伏噪声，降低了接收传输光束的信噪比，并引起一定的跟踪误差[4]。角跟踪误差与信噪比 SNR 有如下关系：

$$\theta = K/\mathrm{SNR} \tag{4}$$

式中，K 为比例系数，它在数值上等于系统信噪比为 1 时，跟踪系统的角误差。

设大气传输所引起的总角误差为 θ_z，强度起伏和相位起伏引起的角误差分别为 θ_I 和 θ_S。这两部分是统计独立的，则有：

$$\theta_z = \sqrt{\theta_I^2 + \theta_S^2} \tag{5}$$

3　大气湍流噪声模型

在地球表面，热空气上升，冷空气下沉，形成空气对流。这样，在大气中各点的温度和密度是无规则变化的，这种变化随高度和风速而不同，变化较为剧烈时形成湍流。而大气的折射率取决于密度，因此大气的折射率也随空间和时间作无规则的变化，从而形成了大气湍流效应。湍流效应主要表现为强度起伏和相位起伏，在一定条件下，这些起伏足够引起较大的跟踪误差。

3.1　相位起伏

由于接收孔径上的相位起伏，波束将产生扩展和抖动，它将引起像斑在探测器上的抖动。这时的相位起伏是统计均匀各项同性的，用到达角起伏的方差来描述相位起伏，抖动和接收孔径的焦距决定了瞬时波束的到达角方差，如式(6)所示：

$$\langle \alpha^2 \rangle = \frac{D_s(\rho)}{k^2 \rho^2} \tag{6}$$

式中，$k = 2\pi/\lambda$；λ 为波长；ρ 为接收孔径的直径；$D_S(\rho)$是相位起伏结构函数，采用 Von Karman 湍流谱，对于球面波可表示成：

$$D_S(\rho) = 1.091 C_n^2 k^2 L_T \rho^{5/3} \left[1 - 0.8048 \left(\frac{\rho}{L_0} \right)^{1/3} + 0.136 \left(\frac{\rho}{L_0} \right)^2 \right] \tag{7}$$

到达角的方差可写成：

$$\langle \alpha^2 \rangle = 1.048 C_n^2 (\Delta A)^{-1/6} L_T \left[1 - 0.8048 \left(\frac{\rho}{L_0} \right)^{1/3} + 0.136 \left(\frac{\rho}{L_0} \right)^2 \right] \tag{8}$$

式中，C_n^2 是大气湍流的结构常数；ΔA 是接收孔径面积；L_T 是目标距离；L_0 为湍流外尺度。上式的成立条件是假定接收孔径大于$\sqrt{\lambda L_T}$。探测器上的均方根噪声电流为：

$$i_c = \sqrt{4\langle \alpha^2 \rangle} \frac{i_1}{K} \tag{9}$$

信噪比为：

$$\mathrm{SNR} = \frac{2 i_1}{i_c} \tag{10}$$

由式(3)、式(4)、式(6)～式(10)推导可得出相位起伏引起的角误差，如式(11)所示：

$$\sqrt{2}\theta_s = \sqrt{2\langle \alpha^2 \rangle} = \left\{ 2.096 C_n^2 (\Delta A)^{-1/6} L_T \left[1 - 0.8048 \left(\frac{\rho}{L_0} \right)^{1/3} + 0.136 \left(\frac{\rho}{L_0} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \tag{11}$$

3.2　强度起伏

大气湍流对光传输的另一个主要影响是在观察平面上产生光照度起伏，这是由光程差和不均匀体衍射的共同作用引起的。为了简单起见，不考虑接收过程的背景噪声、暗电流噪声、探测器和电子电路热噪声对探测系统的影响。设 y 为目标回波的贡献，只包含信号和强度起伏噪声。和研究相位起伏

的方法一样,通过推导信噪比得出由强度起伏引起的角误差。

由于光电探测器是平方律探测,其信噪比可由式(12)决定:

$$\mathrm{SNR} = \langle |y|^2 \rangle / \mathrm{Var}(|y|^2) \tag{12}$$

故只需求得$\langle |y|^2 \rangle$和 $\mathrm{Var}(|y|^2)$即可。假设大气传输路径是一个与时间无关的随机空间系统,不考虑来自目标的影响时:

$$\langle |y|^2 \rangle = |y_0|^2 \exp(4\sigma_I^2) \tag{13}$$

$|y_0|^2$ 表示无湍流的清澈大气中目标回波的贡献,强度起伏因子由指数项表示[5]。

$$\mathrm{Var}(|y|^2) = |y_0|^4 \exp(8\sigma_I^4) \{1 + 2[\exp(16\sigma_I^2) - 1]\} \tag{14}$$

由以上推导可知,振幅起伏对信噪比影响的分析归根于湍致对数强度起伏方差的计算。根据文献[5]:

$$\sigma_I^2 = 0.563 k^{7/6} C_n^2 \int \mathrm{d}z [h^{-2/3}] [(z/L_T)(L_T - z)]^{5/6} \tag{15}$$

式中,$h = h_0 + (L_T - z)(H - h_0)/L_T$;$C_n^2 = 10^{-14}\ \mathrm{m}^{-2/3}$(较强湍流情况下);$C_n^2 = 10^{-15}\ \mathrm{m}^{-2/3}$(较弱湍流情况下);$h_0$ 为导引头的高度;H 为目标的高度;L_T 为倾斜距离。

4 数值计算与仿真

4.1 跟踪误差定量计算

所用激光波长为 1.06 μm,脉冲的平均功率为 2 W,光电探测器量子效率为 0.5,光学系统接收孔径为 30 mm,大气吸收系数为 0.3 km^{-1},目标的漫反射系数为 0.02,湍流的外尺度为 2 m。计算结果如表 1 所示。

表 1 大气湍流导致的角误差

Tab. 1 tracking error induced by atmospheric turbulence

$C_n^2/\mathrm{m}^{-2/3}$	1×10^{-15}			1×10^{-14}		
L_T/km	θ_s	θ_I	θ_Z	θ_s	θ_I	θ_Z
1	2.37	7.76	8.11	7.51	20.28	21.62
2	3.36	10.45	10.97	10.61	25.05	27.21
3	4.11	13.00	13.63	13.01	29.19	31.96
4	4.75	15.47	16.19	15.01	32.64	35.93
5	5.31	17.77	18.55	16.78	35.42	39.20
6	5.81	19.93	20.76	18.38	37.52	41.78
7	6.28	22.05	22.93	19.85	38.97	43.73
8	6.71	23.98	24.90	21.22	39.75	45.06
9	7.12	25.72	26.69	22.51	39.84	45.76
10	7.51	27.54	28.55	23.73	39.31	45.92

计算结果表明:

1)大气湍流导致的跟踪误差是存在的,其中强度起伏所造成的跟踪误差占主要地位;

2)强度起伏引起的脱靶量 θ_I 随传输距离的增加而稍有增加,达到一定值后增加不再明显,这个现象可能是由强度起伏的饱和效应造成的;

3)在弱湍流情况下,在 10 km 的距离内,大气湍流引起的跟踪误差达 30 μrad,在强湍流情况下,跟踪误差更大,达 50 μrad 或者更大。

4.2 仿真结果

以某型激光制导炸弹为研究对象,利用该炸弹的弹道仿真软件,得到了有湍流影响和无湍流影响弹着点的分布图,如图 2 和图 3 所示,图中显示的是 200 次仿真的结果,然后对弹着点进行数学统计,得到了图 2 和图 3 所示的结果。坐标 X 表示目标与激光导引头的倾斜距离,Y 表示弹着点的半径。激光半主动制导的开始跟踪距离在 5 km ~ 10 km,有效命中目标在直径为 3 km 的圆内。

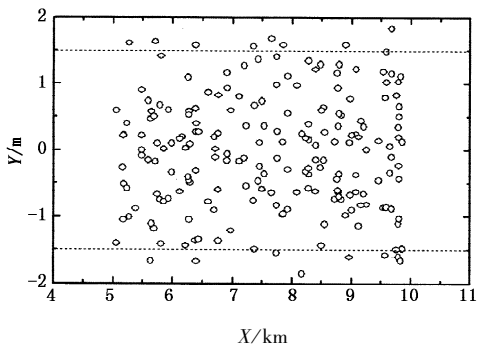

图 2 无大气湍流影响时弹着点分布

Fig. 2 the distribution of hitting points with no atmospheric turbulence

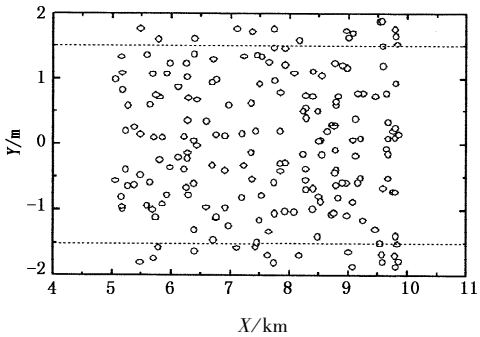

图 3 有大气湍流影响时弹着点分布

Fig. 3 the distribution of hitting points with atmospheric turbulence

从仿真结果可以看出:

1)在图 2 中,弹着点落在半径为 1.5 m 的圆以内时是有效地命中目标,否则脱靶。在仅受到电子

噪声、背景噪声等多方面的影响,而没有考虑大气湍流引起的角误差的影响时,激光半主动制导的瞄准精度达95%左右;

2)在图3中,由于考虑了大气湍流的影响,激光半主动制导的瞄准精度下降到85%左右,如果地面环境更恶劣,如高温时机场的跑道,会下降得更严重。而且跟踪距离越远,越容易脱靶,这是由于跟踪距离越远,受湍流影响的程度越大,产生的角误差越严重。

5　结　论

本文讨论了大气湍流引起的强度起伏和相位起伏对激光半主动制导精度的影响。根据强度起伏导致的对数振幅方差和相位起伏导致的到达角方差,计算出由大气湍流引起的激光半主动制导跟踪系统的角误差,并通过某种型号的弹道仿真软件仿真了大气湍流引起的角误差对激光半主动制导瞄准精度的影响。一般情况下,大气湍流引起的跟踪误差可达几十微弧度,导致系统的瞄准精度下降10%左右。

为了减少湍流引起的误差,可在光学接收系统中加上消湍流措施,如在第一成像面加上乳白玻璃再成像到四象限器件上,能使湍流影响抵消一部分;选择好的天气条件,适当的激光模式等也可达到较高的测角及跟踪精度,提高制导精度[6]。

参考文献:

[1]　王狂飙. 激光制导武器的现状,关键技术与发展[J]. 红外与激光工程,2007,36(5):651-655.

[2]　吴健,杨春平,刘建斌. 大气中的光传输理论[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2005.

[3]　安毓英,曾晓东. 光电探测原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2004.

[4]　范承玉,宋正方. 大气湍流对激光跟踪系统角精度的影响[J]. 强激光与粒子束,1995,7(5):543-547.

[5]　塔塔尔斯基. 湍流大气中波的传播理论[M]. 温景嵩,等译. 北京:科学出版社,1978.

[6]　田铁印,孙世维. 激光精密跟踪测角误差分析与计算[J]. 光学·精密工程,1996,4(3):68-74.