

## 干扰和噪声对激光制导性能及精度的影响

李 慧, 梁巍巍, 殷瑞光, 王 敏, 许振领, 王彦斌

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

**摘 要:** 针对某激光导引头检测中输出弹目视线角速度误差较大的情况, 分析指出弹目视线角速度噪声是角跟踪回路中探测器噪声、弹体扰动和摩擦等干扰力矩共同作用产生的。根据导引头控制原理建立了其稳定跟踪回路模型, 定量分析了这些误差因素对导引头稳定跟踪性能和弹目视线角速度输出指令的影响程度。然后实测分析了激光导引头输出弹目视线角速度噪声特性, 建立了其与弹目距离的函数关系, 并将其加入某制导武器制导模型中进行仿真。结果表明: 加入弹目视线角速度噪声后, 弹体滚转姿态角变化较大, 舵偏角变化也较大, 近距离时由于角速度指令噪声较小对全弹道及脱靶量的影响比较小, 这与实际检测结果相符较好。但近距时当角速度指令处于噪声峰值处, 弹偏离后来不及修正可能会对导弹的近距攻击区有影响, 研究方法及结论对导引头的实际研究测试及弹的战术使用均有一定的参考价值。

**关键词:** 激光导引头; 干扰力矩; 弹目视线角速度噪声; 跟踪性能; 制导精度

**中图分类号:** TJ765 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3783/IRLA201746.0206005

## Effect of disturbance and noise on laser guidance performance and precision

Li Hui, Liang Weiwei, Yin Ruiguang, Wang Min, Xu Zhenling, Wang Yanbin

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** In view of the fact that the output of line of sight angular rate error was big in the test of certain laser seeker, it was pointed out that line of sight angular noise root in the detector noise together with bomb disturbing and friction moment. Then stable tracking loop model was built based on the control principle of the laser seeker, the influence of above-mentioned error on tracking performance and los angular rate of the laser seeker was quantificationally analyzed. The characteristic of los angular rate noise of the laser seeker was analyzed, the function relationship with distance between missile and target was deduced by experiment method. Finally, the los angular rate noise was joined into control and guidance model of the laser guided missile. Simulation result showed that roll angle of missile and rudder departure angle varied obviously, angular noise changed small gradually along with the close up of missile and target and the miss distance varied less, which was accordant with actual test phenomenon. When the angular instruction was situated in the peak value of the angular noise, deviation of missile couldn't be modified timely, which possibly affected attack area of missile along with close up of missile

收稿日期: 2016-06-12; 修订日期: 2016-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(11504420); 总装重点课题(2014SY3310403)

作者简介: 李慧(1980-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光电对抗仿真试验技术方面的研究。Email: lihuiwch@163.com

and target. The research provides reference for further actual test of laser seeker and tactical application of missile.

**Key words:** laser seeker; disturbing moment; line of sight angular rate noise; tracking performance; guidance precision

## 0 引言

激光导引头是各类激光精确制导武器(炮弹,炸弹,导弹等)能够精确打击目标的核心部件,也是制导控制回路的重要测量敏感部件,从工程控制论角度可看成一反馈控制系统。它的主要功能:准确捕获并跟踪目标;为制导系统输出实现比例导引律所需的弹目视线角速度指令;消除弹体扰动对其光轴指向稳定的影响<sup>[1-2]</sup>。

为使激光导引头在各种干扰力矩和角速度噪声作用下光轴稳定随动目标视线的变化,并保证目标始终处在视场内,需要完成:(1)分析其受到的弹体角运动、摩擦等干扰力矩的特性及其如何影响光轴摆动;(2)在实战环境下弹目视线角速度指令通常含有各种噪声,研究角速度噪声特性及其对导引头跟踪性能与制导武器精度的影响。参考文献 [3] 理论分析了弹目视线角速度噪声对激光末制导炮弹制导精度的影响,指出末制导炮弹脱靶量随角速度噪声功率谱密度的增大而增大,也与弹目接近速度、比例导引系数和导引头时间常数成正比。参考文献[4]利用雷达制导系统伴随模型理论分析了角噪声和目标闪烁对制导精度的

影响。而弹目视线角速度噪声对速率稳定平台式激光制导导弹的影响目前很少有相关理论分析和实验研究的报道。

文中结合某速率平台式激光导引头检测中输出弹目视线角速度误差较大情况,在分析干扰及角速度噪声产生原因及其特性的基础上,建立了导引头角跟踪回路数学模型。定量研究了各种干扰力矩及角速度噪声对导引头稳定跟踪性能的影响。最后将实测的不同弹目距离处的角速度噪声数据加入到某激光制导导弹制导模型中,仿真分析了有无噪声状态下弹的制导性能与制导精度的变化,研究方法及其结论对导引头的实际研究测试及弹的战术使用均有一定的参考作用。

## 1 激光导引头受到的干扰及角速度噪声特性分析

### 1.1 激光导引头受到的干扰力矩

激光导引头要实现对目标的高精度跟踪和弹目视线角速度测量,一般采用速度稳定回路和跟踪回路组成的双闭环回路来完成,如图 1 所示。导引头平台光轴在随动目标视线的同时,需要考虑作用在系统上的干扰和噪声对弹目视线角速度输出指令信号

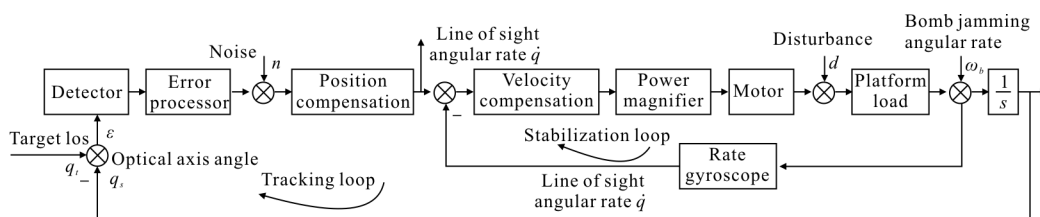


图 1 激光导引头角跟踪回路原理框图

Fig.1 Tracking loop principle of laser seeker

的影响。

由图 1 所示,通常导引头输出的弹目视线角速度既可取自角速率陀螺输出处,又可取自稳定回路的指令输入处,表示如下:

$$\dot{q}(s) = W_1(s)q_i + W_2(s)n + W_3(s)d + W_4(s)\omega_b \quad (1)$$

式中:  $W_i(s) (i=1,2,3,4)$  分别为输入视线指令,噪声,干扰和弹体扰动角速度单独作用时到弹目视线角速度输出的传递函数。

令输入  $q_i$  为零,弹目视线角速度噪声可表示为:

$$\dot{q}_n(s) = W_2(s)n + W_3(s)d + W_4(s)\omega_b \quad (2)$$

由此可知,弹目视线角速度噪声是角跟踪回路中噪声、弹体扰动和摩擦等干扰力矩共同作用产生的。

弹体扰动是激光导引头需要隔离的主要干扰力矩,此外干扰力矩还包括:(1)载体本身的角运动,包括俯仰、偏航方向上的角运动,它们通过万向支架的轴承摩擦,驱动器和电缆耦合到安装传感器的平台上,引起视轴的晃动;(2)由于稳定平台的质量不平衡引起视轴的扰动;(3)传感器内部组件(如扫描机构、驱动器、伺服系统)的振动引起视轴的扰动。对于导引头来说,干扰力矩主要用下述三种模型描述:弹簧力矩、粘滞阻尼力矩和库伦摩擦力矩。总的干扰力矩一般用干扰力矩回路中干扰力矩传递函数表示,如图 2 中  $G_D(s)$  所示,输入为框架角和框架角速度,输出为干扰力矩。

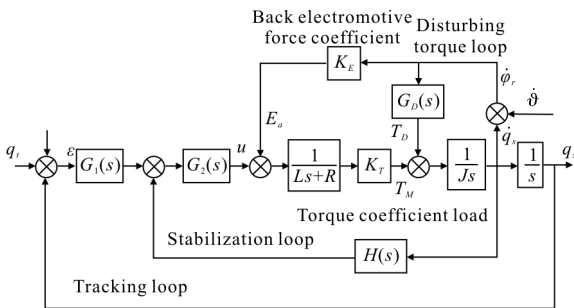


图 2 激光导引头角跟踪回路简化传递函数框图

Fig.2 Simplified tracking loop transfer function of laser seeker

图2中, $G_1(s)$ 为导引头跟踪回路前向传函,包括探测器传函、校正网络和运放; $G_2(s)$ 为稳定回路前向传函,包括校正网络和运放; $H(s)$ 为速率陀螺传函。当导引头输出弹目视线角速度取自稳定回路的指令输入处时,导引头跟踪传递函数为:

$$\dot{q}_n(s)/\dot{q}_i(s) = \frac{G_1(s)[(Ls+R)(Js+G_D(s))+K_E K_T]+G_1(s)G_2(s)K_T H(s)}{s[(Ls+R)(Js+G_D(s))+K_E K_T]+sK_T G_2(s)H(s)+G_1(s)G_2(s)K_T} \quad (3)$$

由公式(3)可得,忽略噪声、干扰的影响,角速率陀螺的带宽高于稳定回路带宽,在低频段可简化为一比例环节,在稳态情况下,导引头输出弹目视线角速度  $\dot{q}(s) = K \dot{q}_i$ ,这样平台输出弹目视线角速度指令与平台跟踪角速度成正比,即实现了弹目视线角速度的测量。

隔离度是指导引头稳定平台对弹体扰动的去耦

能力<sup>[5]</sup>,其表达式可写为:

$$S = (\Delta \dot{q}_i / \dot{\vartheta}(t)) \times 100\% \quad (4)$$

式中: $\Delta \dot{q}_i$ 为弹体运动引起的平台相对于惯性空间的附加转动角速度; $\dot{\vartheta}(t)$ 为弹体相对于惯性空间的转动角速度。有的文献中也把光电稳定平台的隔离度定义为弹体运动引起的平台相对于惯性空间的转动角与弹体姿态变化角之比的分贝数表示<sup>[6]</sup>。隔离度数值越小,表明导引头伺服系统对弹体扰动的隔离能力越强,对不同频率扰动信号有不同的隔离度要求。用数学模型描述(令导引头回路输入信号为零,将弹体运动作为扰动信号输入),可得隔离度传递函数为:

$$\frac{\Delta \dot{q}(s)/\dot{\vartheta}(s)}{s[(Ls+R)(Js+G_D(s))+K_E K_T]+sK_T G_2(s)H(s)+G_1(s)G_2(s)K_T} \quad (5)$$

令  $K_s$  为弹簧力矩系数,  $K_v$  为粘滞阻尼力矩系数,它们分别反映了弹簧力矩和粘滞阻尼力矩的大小。把粘滞阻尼力矩  $G_D(s) = K_v \dot{\varphi}$  和弹簧力矩  $G_D(s) = K_s / s \dot{\varphi}$  分别代入公式(5),可分析不同力矩系数对导引头光轴指向的影响。

### 1.2 激光导引头的角速度噪声特性

激光半主动导引头测得的弹目视线角速度含有各种噪声,将这些噪声统称为角速度噪声。噪声一般是由于回路中测量元件带来的,由公式(2)可知,激光导引头的角速度噪声主要包括探测器的散粒噪声和热噪声、干扰力矩引入误差,陀螺仪漂移误差和安装误差等。其中,探测器的噪声一般具有白噪声频谱特性,带有噪声的失调角信号是跟踪回路的输入,跟踪回路不能抑制这种跳动,使得弹目视线角速度指令的跳动加剧,严重时可能影响制导系统鲁棒性,使弹道发散。

某激光导引头在视线指令角速度分别为  $1(^{\circ})/s$ ,  $2(^{\circ})/s$ ,  $8(^{\circ})/s$  时偏航视线角速度的测试结果如图 3(a)、(b)、(c)所示。由导引头系统输出噪声含义,指的是当视线指令角速度为零时,导引系统输出的弹目视线角速度信号的均方差,反映了输出信号的波动量。对跟踪稳定后的偏航视线角速度先减去其真值( $1(^{\circ})/s$ ,  $2(^{\circ})/s$ ,  $8(^{\circ})/s$  等),可得到弹目视线角速度噪声数据。对角速度噪声数据进行频谱分析得到它们的频域特性,分析可知主要处于 10 Hz 以内低频段范围内。对

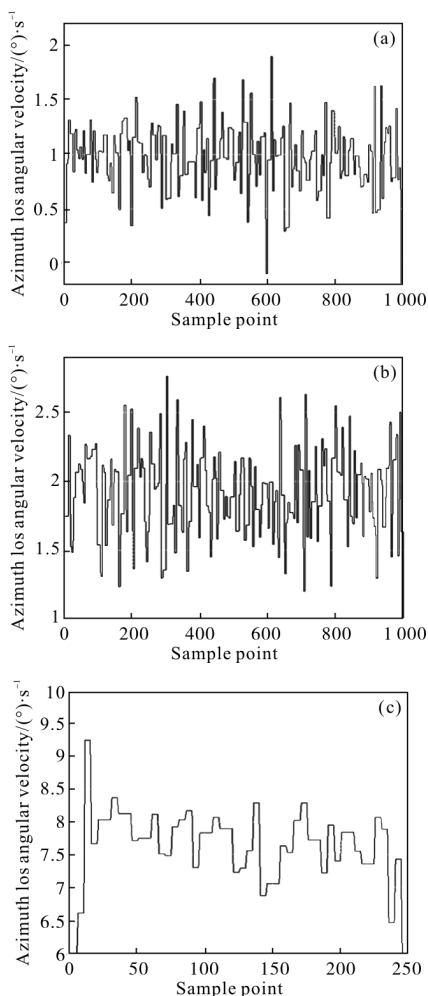


图 3 偏航视线角速度实测数据(含噪声)

Fig.3 Actual azimuth los angular velocity (with noise)

于白噪声信号,功率谱密度是其重要的一个数字特征量,表示了单位频率上平均功率的大小。它们的功率谱密度分别为: $2.67 \times 10^{-7}$ ,  $3.07 \times 10^{-7}$ ,  $7.53 \times 10^{-7}$ 。单位为  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。

## 2 角跟踪回路建模与制导控制系统建模

角度跟踪和弹目视线角速度测量任务是由激光导引头的角跟踪回路来完成。速率陀螺稳定式激光导引头角跟踪回路原理如图 1 所示,稳定回路主要抑制各种干扰力矩,保持稳定平台光轴相对惯性空间稳定;当平台光轴与目标视线不一致时,激光四象限探测系统测得目标失调角信号,经归一化处理转换为角速度指令电压驱动力矩电机带动稳定平台转动,使光轴随动目标视线,实现角度跟踪和弹目视线角速度测量功能。

在导引头跟踪伺服系统的建模分析领域,基于经典控制理论的对数频率综合法仍然是工程上最成熟的控制方法。采用机理建模和实验测试相结合的手段,分别建立了某激光导引头偏航框和俯仰框角跟踪回路的伺服控制模型<sup>[7-8]</sup>。在导引头稳定回路仿真模型中考虑了库伦摩擦、粘滞阻尼力矩、弹簧力矩及弹体扰动的影响。图 4 为俯仰框角跟踪回路仿真模型。

对某激光制导导弹的制导控制系统建模过程中

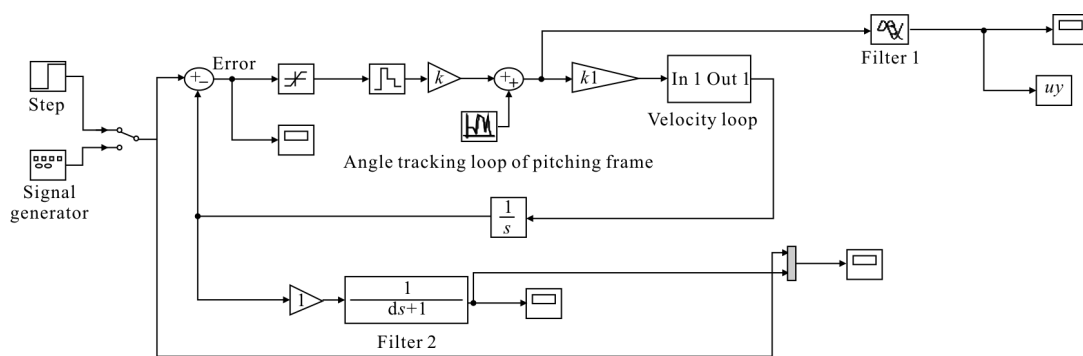


图 4 某导引头俯仰框角跟踪回路控制模型

Fig.4 Pitching tracking loop control model of laser seeker

综合考虑了弹的气动布局和外形设计、自动驾驶仪控制结构、舵机类型、导引头模型及各部分的性能指标,采用迭代建模和系统辨识相结合的建模技术,分别建立了较准确的制导律模型、舵机模型、发动机推力模型、气动参数模型和自动驾驶仪模型。

## 3 干扰噪声对制导性能及精度的影响分析

### 3.1 干扰噪声对导引头跟踪性能的影响

建立某激光导引头角跟踪回路的伺服控制模型后,在模型中分别加入不同频率干扰信号,不同功率

谱密度白噪声信号,可对干扰及噪声对激光导引头的跟踪性能的影响进行仿真分析。

图 5 所示为导引头角跟踪回路的阶跃响应,可以看出,加入幅值为  $1^\circ/\text{s}$ ,频率为  $1.5\text{ Hz}$  的弹体扰动和力矩系数为  $0.02$  的弹簧力矩干扰时,由于速度内回路对光轴的稳定作用以及在跟踪状态下外跟踪回路的对干扰的抑制作用,阶跃响应输出基本与理想情况下一致,过渡过程时间为  $0.26\text{ s}$ ,超调量略有下降为  $12\%$ ,输出能够快速跟踪输入的变化。在同时加入幅值为  $1^\circ$ ,频率为  $1.5\text{ Hz}$  的弹体扰动,力矩系数为  $0.02$  的弹簧力矩干扰和探测器高斯白噪声信号时,过渡过程时间为  $0.28\text{ s}$ ,超调量为  $12.6\%$ ,输出虽然也能够快速响应干扰和噪声信号,但同时也存在微小跳动,也说明导引头输出的弹目视线角速度信号中必然含有噪声。因此可得出干扰及噪声的存在对于激光导引头角跟踪回路的跟踪性能影响较小。

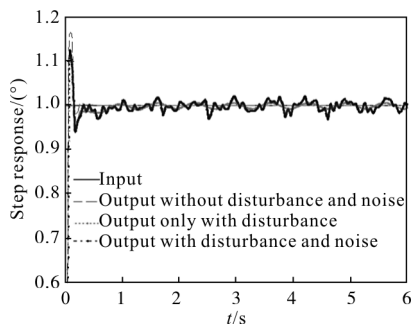


图 5 某导引头角跟踪回路阶跃响应

Fig.5 Step response of tracking loop of laser seeker

由于隔离度的存在,不仅影响导引头输出的弹目视线旋转角速度的信号品质,更严重的是它会在制导回路中引起一条额外的闭环反馈回路,即隔离度寄生回路。该寄生回路会严重削弱制导稳定性,降低导弹制导控制性能。下面分析不同干扰力矩对激光导引头隔离度传递函数的影响。

在不考虑干扰力矩时,对于幅值  $10^\circ/\text{s}$  频率  $1\text{ Hz}$  的弹体干扰输入,速率稳定回路输出框架角速度和光轴角速度如图 6(a)所示,当导引头受到弹体姿态扰动时,稳定平台会转动相应的框架角以平衡弹体扰动,稳定光轴指向。经过计算导引头对弹体扰动的隔离度为  $6.5\%$ 。在仅考虑弹簧摩擦力矩时,取弹簧力矩系数为  $0.02$  时,对于相同的弹体干扰输入,速率稳定回路输出框架角速度和光轴角速度如图 6 (b)所

示,导引头对弹体扰动的隔离度为  $22\%$ 。并且隔离度随着干扰力矩系数的增大而增大。当弹簧力矩系数为  $0.02$ ,对于高频  $20\text{ Hz}$  弹体扰动输入,速率稳定回路输出框架角速度和光轴角速度如图 6(c)所示,导引头对弹体扰动的隔离度为  $7\%$ 。这是由于平台动力学无法快速响应高频输入,隔离度也会下降很多。因此,低频弹体扰动、弹簧力矩等干扰力矩是影响隔离度进而影响速率稳定回路性能的主要因素。

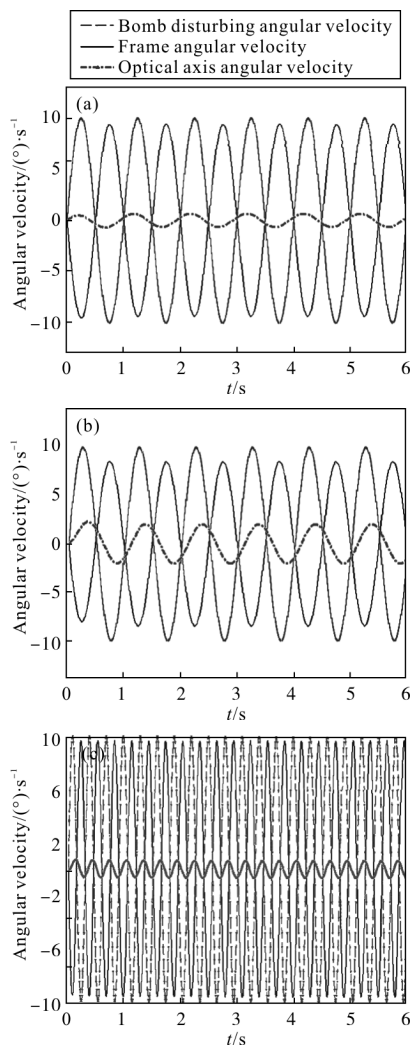


图 6 不同干扰输入时稳定回路输出角速度

Fig.6 Stabilization loop angular velocity under different disturbing input

### 3.2 干扰噪声对激光制导武器制导精度的影响

对于采用比例制导或其他先进制导律的激光制导武器,输出高品质的弹目视线旋转角速度是导引头的重要任务。根据制导律的要求,需要从导引头角跟踪回路提取与弹目视线角速度成正比的信号作为

制导信号，由于弹体扰动等干扰和弹目视线角速度输出噪声的存在，不仅影响导引头输出的弹目视线旋转角速度的信号品质，进而也会影响激光制导武器制导控制性能和制导精度。

激光导引头输出弹目视线角速度噪声与弹目距离有关。弹目距离为 1km 时，视线指令角速度为 1(°)/s 时实测的偏航视线角速度如图 7 所示，与图 3(a)相比较，可知远距离时噪声比较大，而在近距离时噪声水平比较小。而且主要在低频段，这种噪声水平是否影响全弹闭环运动，需要进行全弹道仿真分析。可将角跟踪回路输出的低频段噪声数据加入到建立的某激光制导导弹的制导控制系统仿真模型中进行分析。

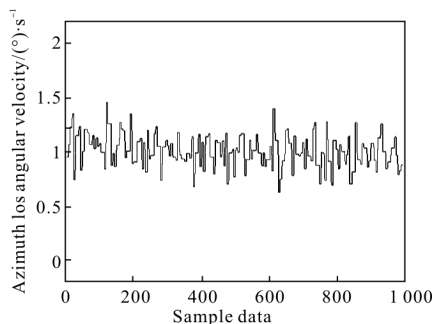


图 7 近距离大能量时实测偏航视线角速度

Fig.7 Actual azimuth los angular velocity (with noise under close quarters and high energy)

在仿真模型中加入的导引头输出弹目视线角速度噪声与距离有关，当弹目距离小于 1 km 时，为了系统冗余，加入 1 km 处的噪声数据，当弹目距离在 1~2.5 km 时，利用 1 km 和 2.5 km 处噪声数据进行线性插值得到，当弹目距离大于 2.5 km 时，对噪声进行适度放大。设提取 1 km 处噪声数据序列  $X_1$ ，和 2.5 km 处噪声数据序列  $X_2$ ， $RR$  为弹目距离，则噪声数据  $X$  如公式(6)所示。

$$X = \begin{cases} X_1 & RR \leq 1 \text{ km} \\ X_1 [(2.5 - RR)/1.5] + X_2 [(RR - 1)/1.5] & 1 \text{ km} < RR \leq 2.5 \text{ km} \\ X_2 [(RR - 2.5)/2.5 + 1] & RR > 2.5 \text{ km} \end{cases} \quad (6)$$

导弹位置(0, 3000, 0)m，导弹初始速度 350 m/s，目标位置(8000, 0, 500) m，目标弹道偏角 -45°，加入弹目视线角速度噪声后仿真脱靶量为 0.154 m。有无

噪声时仿真结果如图 8~图 11 所示，可知在加入导引头输出的弹目视线角速度噪声后，弹体滚转姿态角与俯仰舵偏角变化较大，但最终能够跟踪并命中目标，脱靶量变化较小，这与实际系统联调测试时是相符的，也说明近距离的低噪声对全弹道及脱靶量影响比较小。

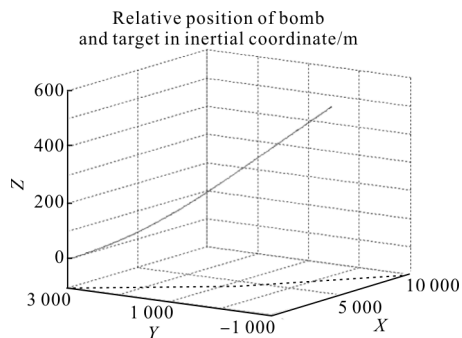


图 8 弹目相对位置

Fig.8 Relative position of bomb and target

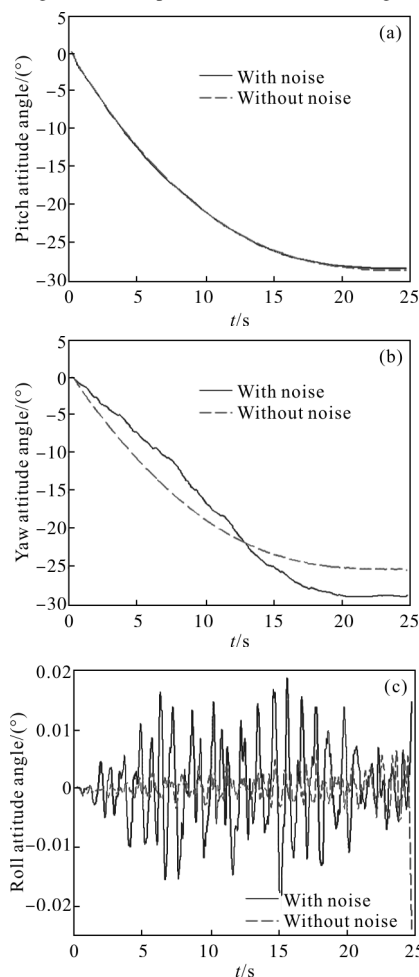


图 9 弹体姿态角

Fig.9 Attitude angle of bomb

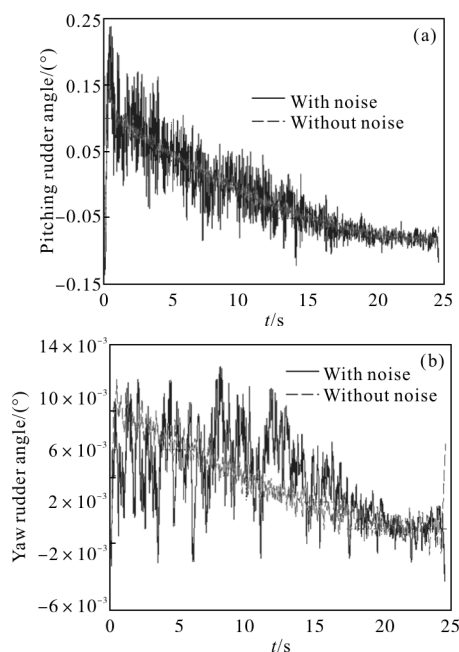


图 10 舵偏角  
Fig.10 Rudder angle

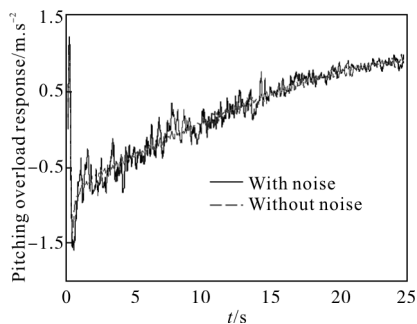


图 11 俯仰过载响应  
Fig.11 Pitching overload response

## 4 结论

分析了影响激光导引头输出弹目视线角速度噪声较大的误差源,指出弹目视线角速度噪声是角跟踪回路中探测器噪声、弹体扰动和摩擦等干扰力矩共同作用产生的。

建立了考虑干扰和噪声的某激光导引头稳定跟踪回路数学模型,仿真分析了不同的弹体扰动、噪声数据和干扰力矩对导引头隔离度传函及导引头跟踪性能的影响;指出低频弹体扰动和弹簧力矩是影响速度稳定回路的主要因素,而干扰及噪声的存在对于激光导引头角跟踪回路的跟踪性能影响较小。

将实测的不同弹目距离时某激光导引头弹目

视线角速度噪声加入到某制导武器制导控制模型中进行仿真,结果表明:除弹体滚转姿态角与俯仰舵偏角变化较大外,其余量均变化较小;由于制导过程的关键在近距离,近距离的低噪声对全弹道及脱靶量影响比较小。但是当制导指令处于角速度噪声峰值处时,指令抖动较大,弹偏离后可能不能及时修正,从而可能会对导弹的近距离攻击区产生影响,可进一步分析目标近距离(如 1 km 以内)时导弹攻击区的变化。

## 参考文献:

- [1] Li Hui, Wu Junhui, Zhu Zhen, et al. Analysis and simulation of stabilization and tracking principle for rate gyroscope laser seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1337-1341. (in Chinese)  
李慧, 吴军辉, 朱震, 等. 速率陀螺式激光导引头稳定跟踪原理分析与仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1337-1341.
- [2] Wu Hailong, Jia Hongguang, Wei Qun, et al. Optimization of angle increments in tracking loop for roll-pitch seekers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22 (10): 2787-2795. (in Chinese)  
吴海龙, 贾宏光, 魏群, 等. 滚仰式导引头跟踪回路角增量优化[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2787-2795.
- [3] Wang Wei, Wu Yu, Xu Ping, et al. Laser semiactive seeker angular rate noise characteristics and its influence analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (9): 2370-2374. (in Chinese)  
王伟, 吴宇, 徐平, 等. 激光半主动导引头角速度噪声特性及其影响分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2370-2374.
- [4] Zhang Hong, Lin Defu, Qi Zaikang, et al. Influence of radar guidance system noise on precision of guidance and control[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(5): 1295-1298. (in Chinese)  
张宏, 林德福, 祁载康, 等. 雷达制导系统噪声对制导精度的影响[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(5): 1295-1298.
- [5] Li Fugui, Xia Qunli, Cui Xiaoxi, et al. Effect of seeker disturbance rejection rate parasitic loop on line of sight rate extraction[J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(8): 1072-1077. (in Chinese)  
李富贵, 夏群利, 崔晓曦, 等. 导引头隔离度寄生回路对视线角速度提取的影响[J]. 宇航学报, 2013, 34(8): 1072-1077.
- [6] Zhao Chao. Study on disturbance rejection rate of a seeker servo system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, 15(7): 78-82. (in Chinese)  
赵超. 导引头稳定系统隔离度研究 [J]. 电光与控制, 2008, 15

- (7): 78–82.
- [7] Liao Hongbo, Fan Shixun, Hei Mo, et al. Modeling and parameter identification for electro–optical stabilized platform servo systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 477–484. (in Chinese)  
廖洪波, 范世珣, 黑墨, 等. 光电稳定平台伺服系统动力学建模与参数辨识[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(2): 477–484.
- [8] Meng Lijun, Li Yanjun. Parameter identification of seeker's noise model[J]. *Fire Control and Command Control*, 2007, 32(7): 27–29. (in Chinese)  
孟立军, 李言俊. 空空导弹导引头噪声模型参数辨识[J]. *火力与指挥控制*, 2007, 32(7): 27–29.