

# 多模制导仿真中合成目标视线法原理与仿真

李 慧,许振领,王重阳,苏振强,孙静泊  
(63892 部队,河南 洛阳 471003)

**摘要:**设计了一种多模复合制导仿真中利用三轴仿真转台实现弹体姿态和弹目视线运动的复合模拟方法。首先阐述了合成目标视线方法的技术原理,建立了仿真坐标系,给出了角速度矢量转换及其软硬件空间的映射关系,然后研究了合成目标视线半实物仿真的实现流程,推导了三轴仿真转台驱动数据解算和导引头稳定回路注入视线角速度解算方法;最后开展了合成目标视线法的数学仿真,与真实视线模拟方法相比,导引头跟踪目标的光轴运动规律以及目标偏差角和弹目视线角速度指令输出一致,为多模复合制导半实物仿真中弹目视线运动的模拟实现方案提供了一种新的技术手段,也为该方法的仿真应用提供了技术支撑。

**关键词:**多模复合制导;弹目视线运动;合成目标视线法;制导仿真

**中图分类号:**TJ765;TN977 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.05.018

## Principle and simulation of synthetic line of sight method in multi-mode combined guidance simulation

LI Hui, XU Zhen-ling, WANG Chong-yang, SU Zhen-qian, SUN Jing-bo  
(63892 Unit of PLA, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** In this paper, a composite realization method is designed which using a three-axis flight motion table simulates the bomb's attitude and the movement of line of sight in the multi-mode combined guidance system. Firstly, the technical principle of the synthetic line of sight method and coordinate system is summarized, the angular velocity vector conversion and its mapping relationship between software and hardware space is given. The realization process of the synthetic target line of sight semi-physical simulation is investigated, and the methods of solving the drive data of the three-axis simulation rotary table and injecting angular velocity into the line of sight of the guide head stabilizing loop are deduced. Finally, the mathematical simulation of the synthetic target line of sight method is carried out. The optical axis motion law of the guide head tracking the target as well as the target deviation angle and the command output of the bullet eye line-of-sight angular velocity are consistent compared with the real line-of-sight simulation method, which providing a new emulation means for the support application of the bullet eye line-of-sight motion in the semi-physical simulation of the multi-mode composite guidance, as well as the simulation application of the method to provide technical support.

**Keywords:** multi-mode combined guidance; line of sight movement; synthetic line of sight method; guidance simulation

### 1 引言

光学/雷达单模/多模制导半实物仿真是对光学/雷达导引头和制导武器性能设计和评估的有效手段,世界各国军事强国建立了大量的半实物仿真试验系统。目前,国内外对于此类半实物仿真系统的

设计,根据弹目视线运动模拟实现方案不同可分为两种实现方式:真实视线法和合成目标视线法<sup>[1-2]</sup>。真实视线法仿真时,针对光学导引头普遍采用五轴仿真转台方案,弹体的姿态角由内三轴转台模拟,弹目/干扰视线运动由外两轴转台或漫反射屏和两维

转镜来模拟,对于雷达导引头,一般采用三轴转台和大角度范围的天线阵列来实现,天线阵列通过三元组辐射单元模拟目标运动,两部分运动均为独立的,对于雷达/红外复合导引头,波束合成器和场景模拟器均安装于五轴转台外两轴,弹目/干扰视线运动由外两轴转台和天线阵列模拟,如图 1 所示,弹目视线模拟范围受限于五轴转台外两轴或天线阵列的角度范围。而合成目标视线法仿真时,目标/干扰固定在光学场景或天线阵列的确定位置处,弹目/干扰视线运动和弹体姿态运动均是由三轴转台模拟实现,由于大大节约了成本,降低了研制难度,在国外单模/多模复合导引头制导半实物仿真中得到了广泛应用。

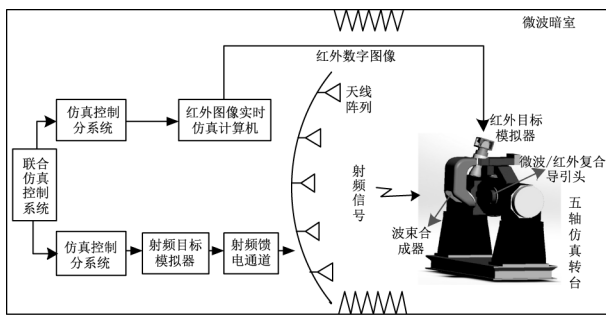


图 1 雷达与红外波束合成方法原理图  
Fig. 1 Principle diagram of beam form method for radar and infrared combined seeker simulation system

在长弓海尔法 AGM-114L 毫米波制导导弹半实物仿真系统中,毫米波信号辐射天线阵列角度范围仅为  $7.3^\circ$ ,采用合成目标视线法模拟弹目视线运动,可完成整个弹道攻击过程中视线角变化的动态模拟<sup>[3]</sup>。在某红外成像制导仿真中,由于场景产生器的视场无法满足与导引头匹配要求,采用了合成目标视线方法扩大了弹目视线运动模拟范围<sup>[4]</sup>。在 Ka 频段主动毫米波、中波红外、半主动激光三模复合半实物仿真系统中<sup>[5]</sup>,也采用了合成目标视线方法,用三轴转台的运动模拟弹目、弹干扰视线运动,模拟视场角仅受限于转台的运动范围,降低了系统设计难度和建设成本,如图 2 所示。

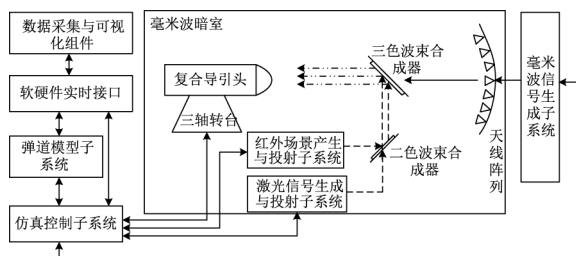


图 2 美陆军毫米波/中波红外/半主动激光三模复合半实物仿真系统  
Fig. 2 Tri-mode combined hardware-in-the-loop simulation system of USA Army

针对多模复合制导半实物仿真中弹目视线运动模拟方案的设计需求,设计了一种利用三轴仿真转台实现弹体姿态和弹目视线运动的复合模拟方法,即合成目标视线法。首先阐述了合成目标视线方法的原理,然后在进行仿真域和作战域坐标系建立及其转换映射关系分析基础上,提出了合成目标视线法半实物仿真实现流程,推导了真实视线法和合成目标视线法两种情况下速率陀螺稳定式导引头的目标视线角速度和跟踪偏差输出表达式,并进行了仿真比对,结果验证了一致性,为多模制导半实物仿真弹目视线运动模拟提供了新的解决方案,能够节约掉五轴仿真转台和大规模天线阵列的投入,具有较好的应用前景。

## 2 合成目标视线法原理

合成弹目视线运动算法的实现原理如图 3 所示。

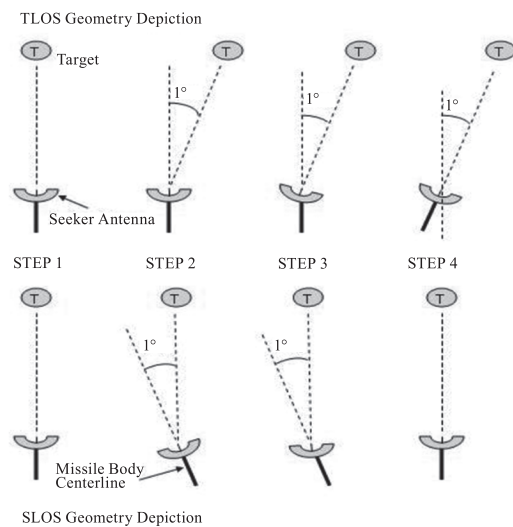


图 3 真实视线法与合成弹目视线法对比  
Fig. 3 Principle comparison of true and synthetic line of sight

图 3 中上半部分是真实视线法,目标相对导引头运动  $1^\circ$ ,首先是天线转动  $1^\circ$ 跟踪上目标,然后再调整弹体姿态,使目标位于弹轴正前方;而在合成视线法中为了模拟目标相对导引头  $1^\circ$ 的角度变化,首先向相反方向转动转台  $1^\circ$ ,然后天线再产生  $1^\circ$ 的角度调整,接着调整弹体的姿态,从而使弹轴对准目标。在两种实现方法上,导引头转动了相同的角度,测量的跟踪误差及视线角速度也相同,弹轴最终均能指向目标。因此,在单模或多模复合制导半实物仿真中,红外场景或雷达目标回波信号仿真生成时,目标可设置保持在场景或阵列中心不动,三轴转台反方向运动模拟真实的弹目视线角运动,即弹体的姿态运动和单模视线运动均通过三轴转台模拟实现<sup>[6]</sup>。

然而,在合成视线法的实现过程中,转动转台使目标偏离弹轴方向,对于普遍采用速率陀螺稳定平

台式的导引头来说,由于稳定平台的存在会自动克服转台转动影响,使光轴或天线指向在转台转动过程中保持不变,无法使导引头像真实视线法那样输出视线角速度变化。因此,在对具有稳定平台的导引头视线角速度输出采用综合视线法进行仿真时,需要计算惯性视线角速率并将其注入导引头稳定回路进行补偿,以消除稳定回路对模拟目标运动指令的隔离影响。对于捷联式导引头,不必进行补偿。

### 3 合成目标视线算法仿真

#### 3.1 坐标系及其转换映射关系

导引头位标器跟踪、光轴的运动及视线角速度输出的分析,以及合成弹目视线方案实现上的补偿方法涉及到多个坐标系的定义<sup>[7]</sup>,仿真软件空间包括地面坐标系(近似为惯性坐标系)、弹体坐标系、导引头测量坐标系、目标视线坐标系和弹上视线坐标系,硬件空间坐标系包含转台中心坐标系、导引头安装坐标系、场景产生器坐标系,变参考坐标系作为软硬件空间联系的桥梁。各个坐标系之间的变换关系如图4所示, $L_{ba}$ 为坐标系 $S_a$ 到坐标系 $S_b$ 的变换矩阵。

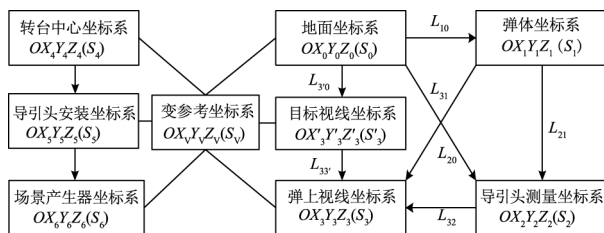


图4 仿真软硬件空间各坐标系及变换矩阵

Fig. 4 Coordinate system and transformation matrix of simulation space

下面以导引头测量坐标系和弹上视线坐标系为例进行坐标、角速度等矢量在两坐标系之间的转换计算。以地面坐标系和转台中心坐标系为例进行仿真软硬件空间之间角度、矢量等的映射计算。

弹体坐标系 $S_1$ 原点位于弹体质心,当位标器陀螺被锁定时,内外框架处于正交状态,令 $OX_1$ 轴与弹体纵轴及陀螺转子轴重合,指向头部为正, $OY_1$ 轴与陀螺外框架轴重合,在包含 $OX_1$ 轴的纵向对称平面内,垂直向上为正,则按右手坐标系原则, $OZ_1$ 轴与陀螺内框架轴重合。

弹上视线坐标系 $S_3$ 为固连在弹目视线上的三维正交直角坐标系,原点位于导引头位标器稳定平台旋转中心,可认为近似与弹体质心重合, $OX_3$ 轴与弹目视线重合,指向目标方向为正, $OY_3$ 轴在包含视线且垂直于 $X_1OZ_1$ 平面的平面内,垂直于 $OX_3$ 轴,指向上为正, $OZ_3$ 轴按右手坐标系原则确定。

弹上视线坐标系相对弹体坐标系 $S_1$ 的位置可

由表示弹目视线方位的两个角 $\phi_{Ay}$ 和 $\phi_{Az}$ 来确定,各角度定义如下:弹体视线俯仰角 $\phi_{Az}$ 为视线轴 $OX_3$ 与弹体系 $X_1OZ_1$ 平面之间的夹角,若视线在该平面上,则 $\phi_{Az}$ 为正,反之为负。弹体视线方位角 $\phi_{Ay}$ 为视线轴 $OX_3$ 在弹体系 $X_1OZ_1$ 平面上的投影线与轴 $OX_1$ 之间的夹角,迎着 $OY_1$ 轴俯视,若 $OX_1$ 轴绕 $OY_1$ 轴逆时针旋转至投影线时, $\phi_{Ay}$ 为正,反之为负。两坐标系之间的变换矩阵 $L_{31}$ 为:

$$L_{31} = L_z(\phi_{Az}) L_y(\phi_{Ay}) = \begin{bmatrix} \cos\phi_{Ay}\cos\phi_{Az} & \sin\phi_{Az} & -\sin\phi_{Ay}\cos\phi_{Az} \\ -\cos\phi_{Ay}\sin\phi_{Az} & \cos\phi_{Az} & \sin\phi_{Ay}\sin\phi_{Az} \\ \sin\phi_{Ay} & 0 & \cos\phi_{Ay} \end{bmatrix} \quad (1)$$

设弹体坐标系中弹体转动角速度矢量为 $\omega_1 = [\omega_{x1} \ \omega_{y1} \ \omega_{z1}]^T$ ,则该角速度在弹上视线系三个坐标轴上的投影分量为 $\omega_3 = L_{31} \omega_1$ 。并且根据图中关系,可得到弹体姿态角、导引头框架角、弹目视线角以及目标偏差角之间的解析表达式,如由 $L_{21} L_{10} L_{03'} = L_{23}$ ,能够得到导引头目标偏差角的计算模型,用于导引头数学模型仿真。

变参考系可根据实际使用状况,设置与仿真硬件空间的转台中心坐标系,仿真软件空间的弹上视线坐标系、导引头测量系等重合。当设置变参考系与转台中心坐标系一致时,目标、干扰等在地面坐标系中的角度和矢量,如方位角和俯仰角等,与仿真硬件空间中场景产生器、导引头等在转台中心坐标系中的角度和矢量进行相应映射。仿真硬件空间三轴转台的姿态角与软件空间中解算的弹体系相对地面坐标系的欧拉角进行映射。

#### 3.2 合成目标视线仿真实现流程

合成目标视线半实物仿真实现流程如下:

(1) 仿真初始化:仿真准备时,变参考坐标系可选择与目标视线系或导引头光轴矢量重合,根据仿真的导弹弹道计算弹目视线角运动范围。

(2) 仿真转台驱动数据实时解算:仿真开始导弹发射后,导引头计算机或弹道解算计算机由弹体的三个姿态角和弹上视线相对于惯性系的三个姿态角计算弹上视线相对于弹体的转换矩阵,根据式(2)求出三轴转台指向目标时俯仰、偏航和滚转需要的转动角度指令 $\phi_{Az}$ 、 $\phi_{Ay}$ 和 $\gamma'$ ,该指令为弹体姿态角和弹目视线运动的合成。

$$L_{13} = L_{10} L_{03} \quad (2)$$

对于卧式仿真转台,转台中心坐标系以 $z, y, x$ 的顺序旋转指向仿真目标。

$$\begin{cases} \phi_{Az} = \text{atan}(L_{13}(2,1)/L_{13}(1,1)) \\ \phi_{Ay} = -\text{asin}(L_{13}(3,1)) \\ \gamma' = \text{atan}(L_{13}(3,2)/L_{13}(3,3)) \end{cases} \quad (3)$$

对于立式仿真转台,转台中心坐标系以  $y, z, x$  的顺序旋转指向仿真目标。

$$\begin{cases} \phi_{Az} = \text{asin}(L_{13}(2,1)) \\ \phi_{Ay} = -\text{atan}(L_{13}(3,1)/L_{13}(1,1)) \\ \gamma' = -\text{atan}(L_{13}(2,3)/L_{13}(2,2)) \end{cases} \quad (4)$$

弹上视线坐标系与导引头光轴矢量重合时,则根据当前弹目相对位置、导引头光轴角度信息计算两者的差值,将该偏差值乘以一个常数增益形成新的视线角速率,积分得到该时刻弹上视线位置,根据下式计算  $L_{21}$ ,并代入(3)式和(4)式中,计算得到三轴转台指向目标时的驱动姿态角。

$$L_{21} = L_{20} L_{01} \quad (5)$$

(3) 场景仿真生成与投射:

对于红外场景,图像仿真生成计算机根据最新获取的弹上视线指向、导弹在惯性系的位置数据和背景数据,渲染完成导引头视场内红外场景图像,生成驱动红外场景产生器的灰度图像数据,并通过红外场景产生器转换为场景信号投射进入导引头视场中。对于雷达场景,雷达回波与干扰模拟计算机仿真生成目标回波、杂波和干扰信号及其空间辐射位置、功率、极化等控制信息,通过天线阵列的对应位置辐射进入导引头视场。

(4) 导引头视线角速度解算与注入:

导引头框架角更新时,控制程序根据导弹、目标在惯性系下的位置计算获取惯性系下新的视线角速率信息,并将该速率经过坐标转换到导引头光轴坐标系中(坐标转换时注意框架角转动顺序),用以激励驱动导引头框架运动,使导引头感受到与真实视线法仿真时相同的弹目视线角速率和弹目视线角信息,导引头跟踪场景中的目标闭合跟踪回路,产生并输出跟踪偏差和目标视线角速度指令。

(5) 弹道实时解算仿真:

导引头输出弹目视线角速度给弹道模型,弹道解算后输出更新后的弹目相对位置、弹体姿态角信息,分别驱动三轴转台和场景生成计算机。

导引头搜索、跟踪投射场景中的红外或雷达目标,输出框架角和框架角速度作为导引信号,弹道解算计算机获取导引信号、战情参数、大气参数、空气动力学参数、控制参数等完成弹道数据的实时解算,并输出更新的弹道数据。弹道解算的主要工作流程如下:

①仿真初始化(清除碰撞检测点数据、导引头指令数据、导引头和转台驱动数据、给主控和战情反馈数据,上报仿真准备指令)。

②战情参数载入及弹道模型初始输出(获取战情参数,分别解算转台姿态角、弹目视线相对角度、图像驱动数据弹景视线角初值,并向主控和战情计算机输出,上报仿真准备好)。

③弹道实时解算及驱动数据更新(根据设定的发射规则和发射模式判断导弹是否发射,实时获取导引头的框架角、框架角速度数据和转台姿态角数据,实时解算弹道模型并输出六自由度弹道数据,转台角速度更新,驱动数据解算、滤波延迟后更新,图像驱动数据更新等)。

④截止条件判断,仿真结束(根据导弹与目标之间的距离或导引头盲距判断导弹是否落地和碰撞目标)。

3.3 导引头回路注入视线角速度产生方法

上述仿真实现流程中,关键是导引头控制回路注入视线角速度的生成与解算方法,设某红外成像导引头为两框架伺服平台式结构,内框为方位框,外框为俯仰框,位标器光学系统探测器安装在内框上,并不滚转。则实际情况下,导引头输出的导引指令为速率陀螺经过初始对准后,测量的惯性空间角速度在导引头测量坐标系中的投影<sup>[8-9]</sup>。

在仿真过程中,注入角速度的推导方法如下:设变参考坐标系中的弹目视线角速度为  $\omega_v = [\omega_{xv} \ \omega_{yv} \ \omega_{zv}]^T$ ,将其变换到导引头测量坐标系中  $\omega_{v2} = L_{2v} \omega_v$ ,再根据导引头输出的目标偏差角信息,变换到弹上视线坐标系中  $\omega_{v3} = L_{32} \omega_{v2} = [\omega_{xv3} \ \omega_{yv3} \ \omega_{zv3}]^T$ ,得到  $\omega_{yv3}$ 、 $\omega_{zv3}$  即为导引头方位和俯仰轴的注入视线角速度。导引头稳定回路注入视线角速度以及三轴转台和天线阵列角度驱动数据解算方法详细过程如图 5 所示。

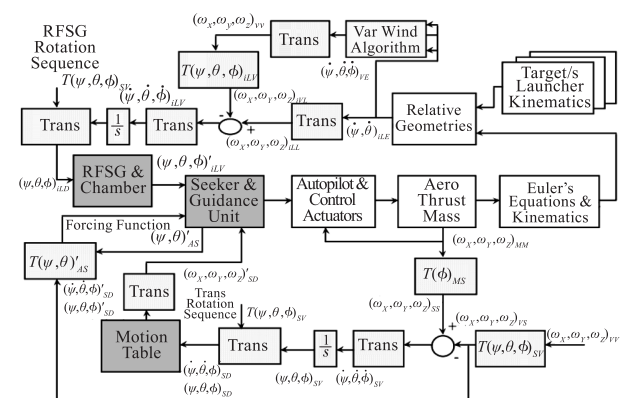


图 5 导弹合成视线法半实物仿真数学模型关系

Fig. 5 Mathematical module in synthetic hardware-in-the-loop simulation



解算得到的视线角速度实际注入时要考虑转台响应特性、导引头噪声及响应延迟的影响,进行必要的滤波处理后方可使用。

### 3.4 真实视线法与合成目标视线两种方法下视线角速度和跟踪偏差输出对比

以陀螺稳定框架平台导引头进行说明,导引头要实现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6所示。导引头平台光轴在跟踪目标视线的同时,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的影响。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:

$$\dot{q}(s) = W_1(s)q_i + W_2(s)n + W_3(s)d + W_4(s)\dot{\vartheta} \quad (6)$$

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。

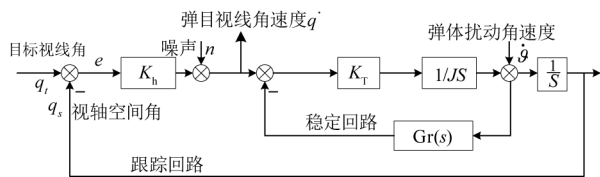


图6 导引头控制回路框图

Fig.6 Control loop diagram of seeker in true Los simulation mode

导引头的目标视线角速度和跟踪偏差输出分别表示如下:

$$\begin{aligned} \dot{q}(s) &= \frac{K_h s}{s + K_h G_s} q_i(s) + \frac{s}{s + K_h G_s} n(s) + \frac{K_h(1 - G_s G_r)}{s + K_h G_s} \dot{\vartheta}(s) \\ e(s) &= \frac{s}{s + K_h G_s} q_i(s) + \frac{G_s}{s + K_h G_s} n(s) + \frac{(1 - G_s G_r)}{s + K_h G_s} \dot{\vartheta}(s) \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $G_s$  为稳定回路的闭环传函。

而在合成目标视线法仿真试验时,目标保持在场景或阵列中心不动,等效的弹目视线角速度  $\dot{q}_i$  输入导引头稳定回路,相应的导引头闭环回路框图如图7所示。

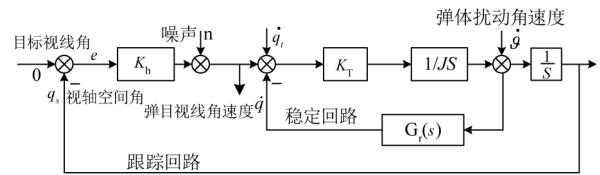


图7 合成目标视线法仿真时导引头控制回路框图

Fig.7 Control loop diagram of seeker in synthetic Los simulation mode

此时,导引头的目标视线角速度和跟踪偏差输

出表示为:

$$\begin{aligned} \dot{q}(s) &= \frac{K_h G_s s}{s + K_h G_s} q_i(s) + \frac{s}{s + K_h G_s} n(s) + \frac{K_h(1 - G_s G_r)}{s + K_h G_s} \dot{\vartheta}(s) \\ e(s) &= \frac{G_s}{s + K_h G_s} \dot{q}_i(s) + \frac{G_s}{s + K_h G_s} n(s) + \frac{(1 - G_s G_r)}{s + K_h G_s} \dot{\vartheta}(s) \end{aligned} \quad (8)$$

对比式(7)和式(8)可知,两种方式下导引头输出的目标视线角速度和跟踪偏差相差不大,差别在于视线角单独输入时的角速度和跟踪偏差输出,并且差别取决于稳定回路闭环传函  $G_s$  的特性。某红外成像导引头稳定回路闭环伯德图如图8所示,闭环带宽约60 Hz,对于1 Hz ~ 6 Hz 低频的弹体扰动和跟踪低频的弹目视线运动来说,闭环传函可进行合理简化。

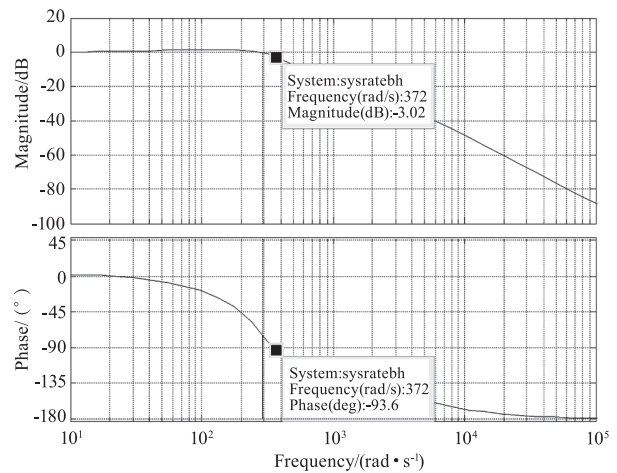


图8 稳定回路闭环波德图

Fig.8 Closed loop bode diagram of stabilization loop

以该红外成像导引头伺服控制模型为例进行仿真说明,当输入真实视线角为  $1^\circ/0.16$  Hz 变化的正弦曲线时,真实视线法和合成目标视线法的弹目视线角速度和跟踪偏差输出分别如图9和图10所示,可看出两者一致性较好,均能够跟踪真实视线角速度的变化。

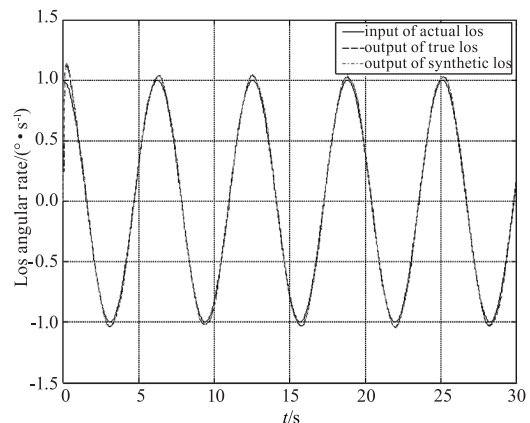


图9 弹目视线角速度输出对比

Fig.9 Comparison of line of sight angular velocity

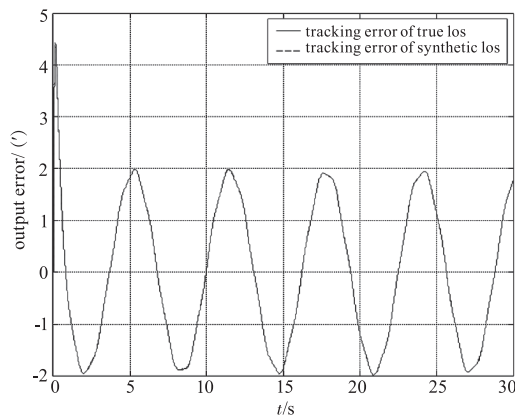


图10 跟踪偏差输出对比

Fig. 10 Comparison of tracking error

#### 4 结论

阐述了采用合成目标视线法开展多模复合制导半实物仿真弹目视线运动的模拟方案,给出了实现原理,仿真实现流程,导引头回路注入视线角速度计算方法,以某陀螺稳定式红外导引头为例,理论推导和仿真计算了真实视线法和合成目标视线法两种情况下,导引头跟踪目标输出视线角速度和目标偏差角数据的变化情况,结果证明了两者输出结果的一致性,为该方法的仿真应用提供了技术支撑。

需要说明的是,合成目标视线方法虽不再需要建设五轴仿真转台和大规模天线阵列,能够大量节约成本,但是重点是需要导引头研制单位高度配合,设计预留必要的软硬件接口以便于测试,在数字图像注入接口、框架角数据输出接口和速率陀螺数据输出接口以外,增加一个导引头跟踪回路的激励信号注入接口。

#### 参考文献:

[1] D Bucco, R Gerecki, C Munn. Further development to the HFM toolbox[C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, California, Aug, 2005.

- [2] Wang Yankui, Zheng Qiang, Ji Shuang. Research on synthetic line-of-sight method for laser strapdown seeker based on semi-physical simulation[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(10): 1278 - 1282. (in Chinese)  
王艳奎, 郑强, 姬爽. 激光捷联导引头半实物仿真合成视线法研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(10): 1278 - 1282.
- [3] Jerry A Raya, Gerald A Larson, John E Terry. Hardware-in-the-loop support of the longbow/HELLFIRE modular missile systems pre-planned product improvement program [J]. Proc. of SPIE, 2001, 4366: 519 - 527.
- [4] W J Sholes, J A Buford. System description and applications of the imaging infrared simulation system III at the U. S. army aviation and missile command [J]. Proc. of SPIE, 2000, 4027: 22 - 29.
- [5] Daniel A Saylor, Joseph Morris, William Lowry. The infrared and semi-active laser simulation capabilities at the AMSTAR tri-mode system simulation HWIL facility [J]. Proc. of SPIE, 2006, 6208: 6208040.
- [6] Henri Richard, Alan Lowman, Gary Ballard. Synthetic line-of-sight algorithms for hardware-in-the-loop simulations [J]. Proc. of SPIE, 2005, 5785: 258 - 216.
- [7] Wang Mingguang. Design of guided control system for surface to ground missile [M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2019. (in Chinese)  
王明光. 空地导弹制导控制系统设计 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2019.
- [8] Gan Lin, Li Hui, Liu Yanfang. Modeling and verifying of line of sight of laser guided weapon in HWIL simulation system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11): 1106002. (in Chinese)  
甘霖, 李慧, 刘艳芳. 激光制导武器半实物仿真系统弹目视线建模与验证 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 1106002.
- [9] Zhou Lili, Li Haifeng, Tong Jiahui. Research of Hardware-in-the-loop technology for IR imaging guidance and control system [J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(9): 51 - 55. (in Chinese)  
周莉莉, 李海凤, 佟佳慧. 红外成像制导半实物仿真技术研究 [J]. 上海航天, 2019, 36(9): 51 - 55.