

高旋弹卫星导航接收机半实物仿真

王文虎^{1,2}, 高敏¹, 王毅¹, 江舵³

(1. 陆军工程大学石家庄校区 导弹工程系精确制导技术教研室, 石家庄 050003;

2. 中国人民解放军 66400 部队, 北京 100010; 3. 中国人民解放军 66029 部队, 内蒙古 011200)

摘要: 半实物仿真是测试卫星导航接收机在高旋外弹道环境条件下工作性能的有效手段; 为测试卫星导航接收机在高旋外弹道环境条件下的性能, 阐述了二维弹道修正引信实现弹道修正的工作原理和北斗卫星导航接收机的基本工作原理; 建立了高旋 7 自由度弹道模型; 设计了半实物仿真系统, 编写了仿真模型, 并在 RT-LAB 实时仿真平台上运行; 分别在非旋转条件和旋转条件下对卫星导航接收机进行了半实物仿真测试, 仿真测试结果显示仿真机数据与弹上机转换后数据曲线重合; 实验表明: 半实物仿真系统可有效检验高旋炮弹卫星导航接收机功能和准确度。

关键词: 二维弹道修正; 卫星导航接收机; 半实物仿真

Hardware-in-the-loop Simulation of High-rotation Projectile Satellite Navigation Receiver

Wang Wenhui^{1,2}, Gao Min¹, Wang Yi¹, Jiang Duo³

(1. Department of Missile, Precision Guidance Technology Research Institute, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; 2. Army 66400, Beijing 100010, China; 3. Army 66029, Neimenggu 011200, China)

Abstract: Hardware in the loop simulation is an effective way to test the performance of satellite navigation receiver in high rotating external ballistic environment. In order to test the performance of the satellite navigation receiver under the high spin environment conditions, the working principle of the two-dimensional trajectory correction fuze and the basic principle of the Beidou satellite navigation receiver are expounded. A high spin 7 degree of freedom ballistic model is set up. The simulation model is written and running on the RT-LAB real time simulation platform. The hardware in the loop simulation test of satellite navigation receiver is carried out under non rotating conditions and rotation conditions respectively. The simulation results show that the data of the simulator coincide with the data curve after the conversion. Experiments show that the hardware in the loop simulation system can effectively test the function and accuracy of the high rotation rocket's satellite navigation receiver.

Keywords: two dimension trajectory correction; satellite navigation receiver; hardware-in-the-loop simulation

0 引言

在现代军事斗争中, 为实现对固定点目标的精确打击、适应未来城区作战和反恐作战的需求, 并大幅减少弹药消耗量, 减轻后勤供应压力, 提高中大口径高旋弹的射击精度是近年来世界各军事强国不懈追求的目标^[1]。高旋弹的二维弹道修正组件采用弹载卫星导航定位接收机实时感知弹丸位置和速度信息, 结合高精度地磁滚转测角信息, 由弹载计算机完成弹道偏差解算和弹道修正控制量计算, 进而实现弹道修正。其中卫星导航接收机准确测量弹丸速度和位置是二维弹道修正组件的关键技术和先决条件。

半实物仿真是将部分产品实物引入到仿真回路的一种仿真技术^[2-5], 广泛应用于航天、化工、通信等领域, 特别是军事领域发挥着重要的作用。针对高旋弹二维弹道修正组件在高旋转、高动态环境下的应用需求, 采用利用半实物仿真技术对外弹道条件下的卫星导航接收机进行实验, 检测卫星导航接收机性能, 对缩短高旋弹研制周期具有重要意义^[6-8]。

本文阐述了二维弹道修正引信实现弹道修正的工作原理和

北斗卫星导航接收机的基本工作原理, 建立了高旋 7 自由度弹道模型, 设计了卫星导航接收机半实物仿真系统, 并在非旋转条件和旋转条件下对卫星导航接收机进行了半实物仿真测试。

1 二维弹道修正引信工作原理及弹道建模

1.1 二维弹道修正引信组成和工作原理

固定鸭舵式二维弹道修正引信在原引信的基础上增加了卫星天线、固定鸭舵、弹上机系统和制动器等, 使其内部结构和外形尺寸发生了明显变化, 如图 1 所示。制动器内部安装了轴承, 故制动器在结构上可分为转子和定子。转子与引信尾部固连, 称该部分为引信尾部组件; 定子与弹上机系统、固定鸭舵和卫星天线等固连, 因该部分集成了与弹道修正控制相关的部组件, 称其为修正组件。引信可通过尾部组件上的螺纹与弹体固连^[9-10]。

图 2 为固定鸭舵式二维弹道修正引信的外形示意图。舵 1 和舵 3 具有相同的舵偏角, 但舵偏方向不同, 称其为一对差动舵; 舵 2 与舵 4 舵偏角与舵偏方向均相同, 称其为一对操纵舵。弹丸飞行过程中, 在空气作用下差动舵上形成了导转力矩, 使修正组件左旋(从弹尾向弹头看), 而引信尾部组件随弹体右旋(从弹尾向弹头看), 形成了修正组件与弹体(以下, 弹体皆为引信尾部组件与未安装引信的弹体的总称)滚转角速度的隔离。称该结构为双旋结构。

收稿日期: 2018-04-18; 修回日期: 2018-04-26。

作者简介: 王文虎(1986-), 山西应县人, 硕士研究生, 主要从事弹箭外弹道理论及应用技术方向的研究。

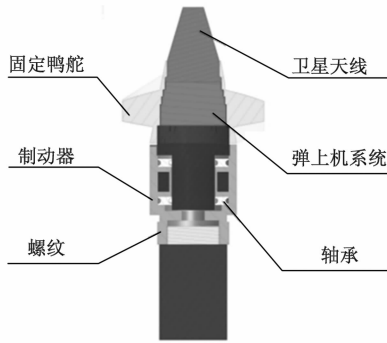


图 1 固定鸭舵式二维弹道修正引信结构示意图

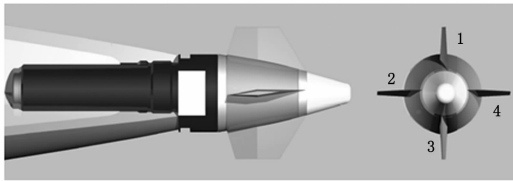


图 2 固定鸭舵式二维弹道修正引信外形示意图

安装修正引信后的普通榴弹称为二维弹道修正榴弹。引信与弹体通过螺纹固连, 不计安装误差, 则引信与弹体同轴, 即修正组件与弹体同轴, 因而, 修正组件与弹体具有相同的俯仰和偏航角速度。在弹丸飞行过程中, 当其处于无控状态时, 修正组件在导转力矩作用下克服滚转阻尼力矩、摩擦力矩和修正组件与弹体间的相互作用力矩自由滚转。当操纵舵自由滚转一个整周期时其产生的控制合力矩为 0, 认为其对弹丸运动状态的影响很小; 当弹丸处于有控状态时, 舵片被稳定在某一控制角度, 空气在操纵舵作用形成控制力和控制力矩, 改变弹丸姿态进而改变弹丸的受力, 从而实现弹道修正。

1.2 高旋 7 自由度弹道模型

对于一个普通弹丸而言, 6 自由度模型可以完全描述其在空间的运动状态, 但对于修二维弹道修正组件而言, 由于存在引信头部(翼面部分)与弹丸主体之间的相互转动, 带有二维弹道修正组件的弹丸不是一个刚体, 6 自由度外弹道模型无法完全描述其在空间的运动状态。由于二维弹道修正组件由弹体部分和翼面部分两个刚体组成, 要描述二维弹道修正组件的运动状态, 最直接的方法是对头部和尾部两部分分别建立相应的模型, 形成共 12 个自由度的运动模型, 其中包括弹体部分三个质心运动、三个转动、翼面部分三个质心运动、三个转动^[11]。其中头部和尾部分别受到空气动力、重力、科氏力以及两部分相互的作用和反作用力。对于质心运动, 考虑到两部分之间不存在相对位移, 可以作为一个整体进行建模, 这样弹体部分的三个质心运动和翼面部分的三个质心运动可以合并考虑, 这时头部和尾部之间的作用属于内力, 对弹体的质心运动没有影响, 只需考虑两部分所受重力、科氏力、空气动力之和, 当然此处存在一个假设: 翼面和弹体所受空气动力不存在相互影响, 其整体所受空气动力等于两部分所受空气动力之和。质心运动初始状态由弹丸射角、射向和初速决定, 之后在整体所受合外力的作用下运动, 质量采用弹丸与翼面两部分质量之和, 事实上翼面部分相对弹丸质量基本可以忽略。

为构建高旋 7 自由度弹道模型, 引入固定舵坐标系和固定舵速度坐标系。

固定舵坐标系 $O_f X_{f1} Y_{f1} Z_{f1}$: 原点位于固定舵(含引信旋转变组件)质心, $O_f X_{f1}$ 沿固定舵轴线, $O_f Y_{f1}$ 在固定舵纵向对称面内垂直于 $O_f X_{f1}$, $O_f X_{f1}$ 、 $O_f Y_{f1}$ 、 $O_f Z_{f1}$ 构成右手系;

固定舵速度坐标系 $O_f X_{f2} Y_{f2} Z_{f2}$: 原点位于固定舵质心, $O_f X_{f2}$ 沿固定舵速度方向, $O_f Y_{f2}$ 在固定舵纵向对称面内垂直于 $O_f X_{f2}$, $O_f X_{f2}$ 、 $O_f Y_{f2}$ 、 $O_f Z_{f2}$ 构成右手系。

攻角 α_f : 固定舵速度矢量在固定舵纵向对称面内的投影与 $O_f X_{f1}$ 夹角, 规定 $O_f X_{f1}$ 轴在上时攻角 α_f 为正;

侧滑角 β_f : 固定舵速度矢量与固定舵纵向对称面夹角, 规定速度矢量指向固定舵纵向对称面右侧时侧滑角 β_f 为正。

几何关系方程为:

$$\begin{cases} \sin\beta_f = \cos\theta[\cos\gamma_f \sin(\Psi - \sigma) + \sin\varphi \sin\gamma_f \cos(\Psi - \sigma)] - \sin\theta \cos\varphi \sin\gamma_f \\ \sin\alpha_f \cos\beta_f = \cos\theta[\sin\varphi \cos\gamma_f \cos(\Psi - \sigma) - \sin\gamma_f \sin(\Psi - \sigma)] - \sin\theta \cos\varphi \cos\gamma_f \end{cases} \quad (1)$$

弹丸质心动力学方程:

$$m \begin{bmatrix} \frac{dV_x}{dt} \\ \frac{dV_y}{dt} \\ \frac{dV_z}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{fx} \\ R_{fy} \\ R_{fz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{ax} \\ R_{ay} \\ R_{az} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ mg \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

弹丸绕质心的动力学方程:

$$\begin{cases} J_{fx} \frac{d\omega_{fx}}{dt} + (J_{fz} - J_{fy})\omega_y \omega_z = M_{fx} + M f a x \\ J_{ax} \frac{d\omega_{ax}}{dt} + (J_{az} - J_{ay})\omega_y \omega_z = M_{ax} + M a f x \\ J_y \frac{d\omega_y}{dt} + [(J_{ax} - J_{az})\omega_{ax} + (J_{fx} - J_{fz})\omega_{fx}] \omega_z + (J_{fz} \dot{\gamma}_f + J_{az} \dot{\gamma}_a) \omega_z = M_{fy} + M_{ay} \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} + [(J_{ay} - J_{ax})\omega_{ax} + (J_{fy} - J_{fx})\omega_{fx}] \omega_y - (J_{fy} \dot{\gamma}_f + J_{ay} \dot{\gamma}_a) \omega_y = M_{fz} + M_{az} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $J_y = J_{fy} + J_{ay}$, $J_z = J_{fz} + J_{az}$ 。

弹丸质心运动方程为:

$$\begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \\ \frac{dz}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

弹丸角运动方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\gamma}_f \\ \dot{\gamma}_a \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -\tan\varphi \\ 0 & 1 & 0 & -\tan\varphi \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\cos\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{fx4} \\ \omega_{ax4} \\ \omega_{z4} \\ \omega_{y4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

对于弹体的横滚自由度, 除受到其自身的空气力矩之外, 还受到翼面部分对弹体的轴向力矩, 包括轴承摩擦力矩和电磁力矩。由于翼面部分转动惯量相对于弹体部分而言很小(约 1/200), 故整体的俯仰、偏航和弹体的滚转可以按照制式弹 6 自由度弹道模型进行解算, 当然其中所受外力矩需要增加翼面部分的影响。这三个自由度的初始状态由弹丸初始转速、射

角、射向决定，初始横滚角可假设为 0，由于横滚转速较高，其初始横滚角对仿真结果没有影响。

对于翼面部分的横滚自由度解算，其所受外力矩主要有空气力矩和弹体的反作用力矩，空气力矩包括导转翼面产生的导转力矩以及与转速对应的极阻力矩，弹体对其的反作用力矩为轴承摩擦力矩和电磁力矩。翼面部分横滚处在这些力矩的共同作用下，其初始横滚角可假设为 0，由于初始转速较高，该初值不影响仿真结果。这样通过整体三个质心运动、整体俯仰、偏航，弹体横滚、翼面横滚共 7 个自由度即可完全描述修正弹运动状态。

高旋 7 自由度弹道模型如 3 所示。

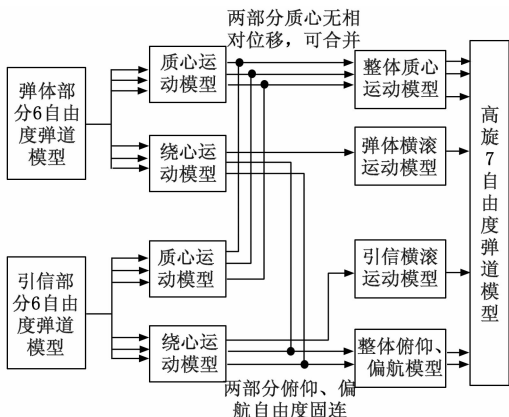


图 3 高旋 7 自由度弹道模型

2 卫星导航接收机组成和工作原理

卫星导航系统由有源天线、射频通道、基带、导航处理单元组成，系统设计结构如图 4 所示。卫星信号到达地面后，被天线接收，经前置放大器放大、进入变频模块下变频并数字化为基带信号，由基带模块进行处理搜索、跟踪解调。

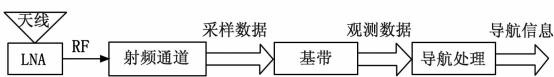


图 4 系统设计结构图

其中有源天线由接收天线和低噪声放大器组成，完成卫星天线辐射信号的接收选择和放大。射频通道采用专用射频芯片，完成卫星信号的变频、选择、放大处理，以满足数字信号处理要求。基带信号处理单元，完成信号的搜索、捕获、跟踪、位同步、帧同步、纠错译码、导航电文的提取拼接、伪距测量、积分多卜勒测量。导航处理单元根据导航模式要求完成用户的 PVT 解算并输出导航信息。导航信息处理单元利用基带信号处理单元获得的测量信号、卫星导航电文完成导航解算，实现对用户的位置、速度和系统时间 (PVT) 的解算，并按规定的格式输出。

3 卫星导航接收机半实物仿真系统设计

为实现对卫星导航接收机的半实物仿真，设计了半实物仿真系统。该系统主要由仿真测试转台和仿真控制台等组成。利用仿真测试转台、卫星导航模拟器、二维弹道修正引信、仿真计算机、仿真电缆、数据记录仪等开展飞行控制系统半实物仿真试验，其基本构成如图 5 所示。

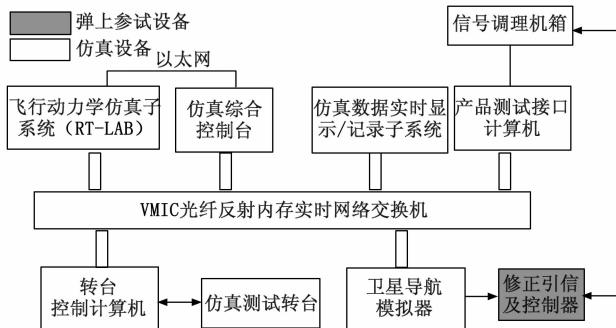


图 5 半实物仿真系统构成示意图

3.1 仿真测试转台

仿真测试转台仿真弹丸飞行过程中弹体与引信部反向旋转。仿真测试转台具备以下功能：①能够驱动弹体高速旋转，模拟弹丸飞行过程中滚转速度和方向；②根据设定不同的滚转力矩，能够驱动固定鸭舵反向旋转；③固定舵执行机构将引信部制动后，能够准确测量固定鸭舵的制动角度，以方便和地磁测量组件的滚转角进行对比分析。

3.2 卫星导航模拟器

卫星导航模拟器通过光纤反射内存实时通讯网接收仿真计算机发送的弹丸质心的 WGS-84 坐标系下的速度位置信息，并将其转换为卫星信号。

3.3 仿真综合控制台

仿真综合控制台由控制计算机、实时数字通信接口扩展器、高速电机远端控制器、低速电机远端控制器、力矩控制器、力矩采集显示器、相关上位机软件等组成。

3.4 反射内存实时网络交换机

半实物仿真过程中，为了确保数据通讯的实时性，半实物仿真系统选用了光纤反射内存实时通讯网 (VMIC)，当用户在建立其半实物仿真系统时，应将系统信号进行整理后录入该文件，以便程序模块对信号的详细信息访问，建立信号的物理映射关系，而系统中各个模块之间通过信号编号对信号进行输入、输出或运算等基本操作。

3.5 半实物仿真计算机及仿真软件

针对二维弹道修正引信动力学和运动学模型，采用 Matlab/Simulink/Stateflow 编写了仿真模型，并在 RT-LAB 实时仿真平台上运行，与卫星模拟器、双轴转台、弹上制导控制系统等构成闭环半实物仿真系统。基于 7 自由度弹道模型所形成的飞行动力学仿真子系统 RT-LAB 如 6 所示。

4 实验结果

卫星导航接收机半实物仿真分为非旋转条件下仿真测试和旋转条件下仿真测试。其中，非旋转条件下北斗导航模块测试目的是确保天线和数据转换模块工作正常。在旋转条件下，卫星导航定位接收机在测试过程中，固定舵随弹体一起转动，转动速率可调。卫星信号采用高动态卫星导航模拟器来模拟。由于卫星接收机真实运行状态为高动态的环境，加载的仿真激励也应当是高动态的场景。

4.1 非旋转条件下仿真测试实验

测试流程如下：仿真计算机进行弹道解算，同时向仿真控制台发送 84 系下弹丸质心的速度位置信息；仿真控制台将弹

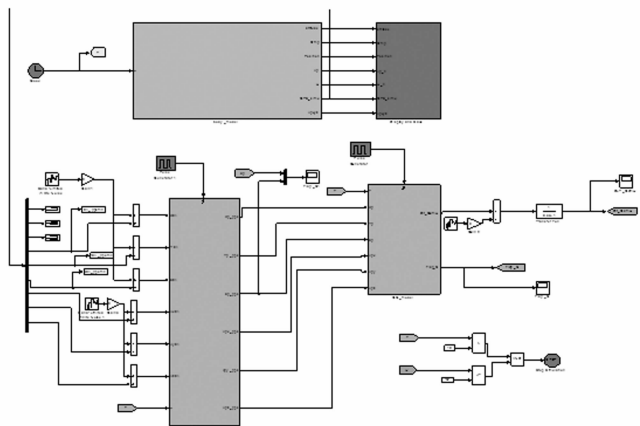


图 6 基于 7 自由度弹道模型所形成的飞行动力学仿真子系统

丸的速度位置信息发送给卫星导航模拟器, 并由卫星导航模拟器将数据信息转换成卫星信号; 在卫星导航模拟器输出卫星信号的同时, 启动卫星导航模块, 由卫星导航模块接收卫星信号并由弹上计算机转换, 同时, 弹上计算机将转换后的信息存入记录仪中。若弹上计算机转换后的数据与仿真计算机的数据相同或误差很小, 则卫星导航模块测试结果满足要求。

利用卫星导航模拟器对卫星导航接收机的导航性能进行测试, 测试数据采用某型底凹弹的弹道, 测试结果如图 7 所示。

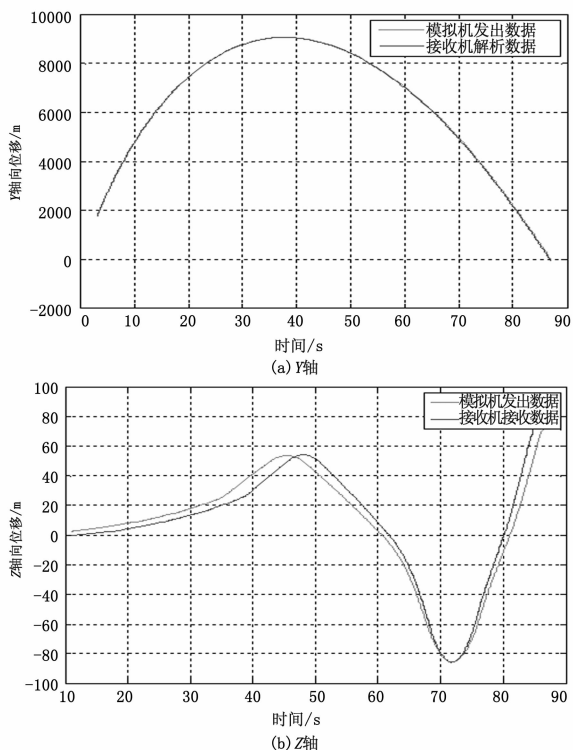


图 7 导航定位接收机测试曲线

由图 7 可以看出, 卫星导航接收机在热启动条件下, 能够在 5 秒内实现收星定位, 并对弹丸轨迹进行持续跟踪, 弹上计算机转换后的数据与仿真计算机的数据误差很小, 导航定位结果满足技术指标要求。

4.2 旋转条件下仿真测试实验

测试流程如下: 仿真启动后, 仿真计算机开始弹道解算,

并向卫星导航模拟器发送 84 系下的弹丸质心的速度、位置信息, 同时向综合控制台发送固定舵和弹体的滚转角速度; 仿真控制台控制双轴仿真测试台上的头部电机和尾部电机进行滚转, 从而模拟固定舵和弹体的滚转状态; 与此同时, 天线实时接收卫星导航模拟器发射的卫星信号, 待定位后北斗导航模块将速度、位置信息传送给弹上计算机; 弹上计算机根据制导控制算法解算出控制信号并将其传送给制动器, 并由制动器输出控制力矩使固定舵稳定在相应的控制角上; 弹上机系统的地磁模块采集到固定舵的滚转角后将其通过仿真控制台发送给仿真计算机, 用于仿真计算机的下一步迭代计算。

试验中, 分别采用某型底排弹和某型底凹弹的仿真程序对卫星导航接收机性能进行了测试。

图 8 是基于某型底凹弹仿真程序的卫星导航接收机测试结果。图中弹上计算机转换后的射程弹道高曲线在 5 km 处与仿真计算机输出的射程弹道高曲线重合, 说明卫星导航模块能准确接收卫星信息, 同时证明弹上计算机的数据转换过程是正确的。需要指出的是, 由于室内干扰较多, 卫星导航模块定位在 5 km 处定位 (9.7 s)。定位前, 弹上计算机获得的速度、位置信息均为 0, 因而, 在弹上机转换后数据的射程弹道高曲线的 0~5 km 段为一直线。

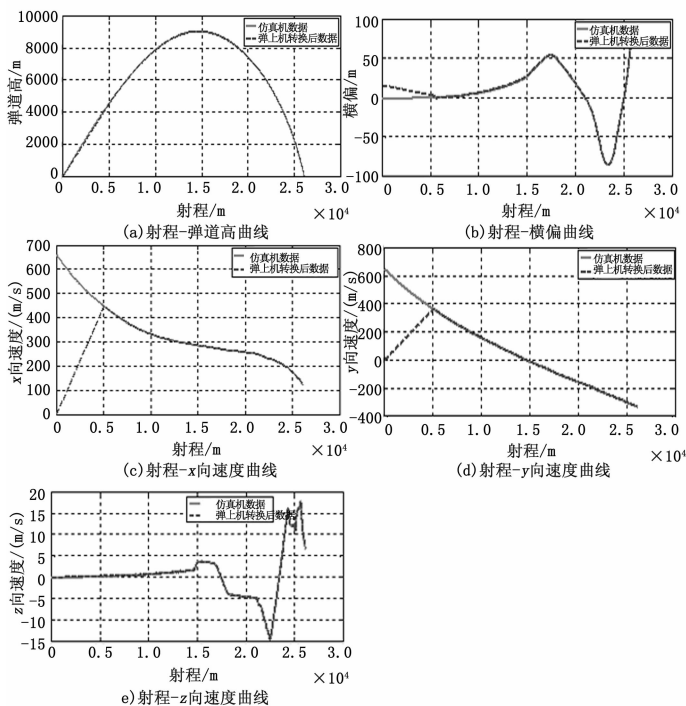


图 8 某型底凹弹仿真程序的仿真与基准曲线

图 9 是基于某型底排弹仿真程序的卫星导航接收机测试结果。仿真机数据与弹上机转换后数据曲线重合, 说明卫星导航接收机能无误差的接收卫星导航数据, 满足要求。

5 结论

本文设计了高旋炮弹卫星导航接收机半实物仿真系统, 在非旋转条件和旋转条件下进行了仿真实验测试, 其中, 在非旋转条件下, 卫星导航接收机能够在 5 秒内实现收星定位, 并对弹丸轨迹进行持续跟踪, 弹上计算机转换后的数据与仿真计算机的数据误差很小; 在旋转条件下, 仿真机数据与弹上机转换

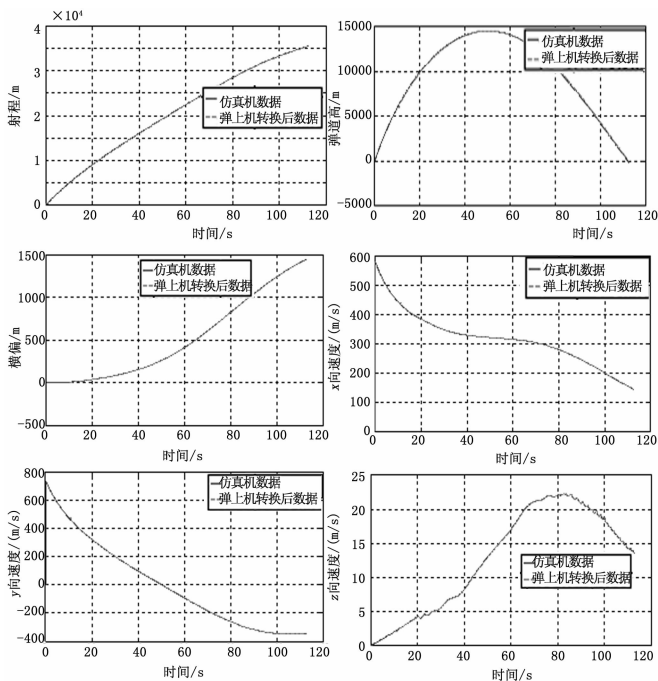


图 9 某型底排弹仿真程序的仿真与基准曲线

后数据曲线重合, 可实现定位跟踪。实验结果表明: 半实物仿真系统设计可有效检验高旋炮弹卫星导航接收机功能和准确度, 通过仿真实验可对卫星导航接收机进行有效验证。

(上接第 251 页)

内实验的有效性及本文算法的鲁棒性。

3 结语

本文结合图像复原、超分辨率重建及 KCF 算法, 提出了一种基于像素位移估计的水下湍流退化图像畸形校正算法。通过参考帧选取、像素配准和二维配准算法, 抑制畸变退化。针对图像复原重建算法速度慢的问题, 采用核相关滤波算法提高算法的速度和效率。通过实验室模拟的湍流环境和海洋真实的湍流环境进行实验验证。本文提出的算法能有效抑制畸变, 且客观评价指标参数在处理两种环境下获得的样本图像中都明显优于传统的复原和重建算法, 且改善了算法的效率。其中本文复原方法适合微湍流情况, 本文重建方法适合强湍流情况。

参考文献:

[1] 孙立颖, 夏珉, 韩捷, 等. 湍流环境中水下成像系统的调制传递函数研究 [J]. 光学学报, 2016, 36 (8): 18 - 25.

[2] 蒲欢, 季小玲. 海洋湍流中光学成像相关问题研究 [J]. 光学学报, 2016, 36 (10): 175 - 181.

[3] Weilin H, Sarah W, Ewa J, et al. Optical turbulence on underwater image degradation in natural environments [J]. Applied optics, 2012, 52 (14).

[4] 鲁啸天, 杨天鸣, 金伟其, 等. 水面波动和水体湍流退化图像的复原方法 [J]. 应用光学, 2017, 38 (1): 42 - 55.

[5] Fried D L. Probability of getting a lucky short-exposure image through turbulence [J]. JOSA, 1978, 68 (12): 1651 - 1657.

[6] Kanaev A V, Hou W, Restaino S R, et al. Correction methods for underwater turbulence degraded imaging [J]. SPIE Remote Sensing, 2014, 9242IP-9242IP-9.

参考文献:

[1] 吴汉洲, 宋卫东, 王毅, 等. 一维弹道修正弹飞行稳定性研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (1): 132 - 136.

[2] 郑国, 杨锁昌, 张宽桥. 半实物仿真技术的研究现状及发展趋势 [J]. 舰船电子工程, 2016, 36 (11): 8 - 11.

[3] 黄建强, 鞠建波. 半实物仿真技术研究现状及发展趋势 [J]. 舰船电子工程, 2011, 31 (7): 5 - 9.

[4] 徐平, 王伟, 林德福, 等. 基于无人机平台的制导控制半实物仿真系统研究 [J]. 中北大学学报 (自然科学版), 2012, 33 (4): 420 - 424.

[5] 谢燕武, 红外成像寻的导弹半实物仿真系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (2): 394 - 395.

[6] 贡学平, 费海伦. 红外成像制导半实物仿真现状与发展 [J]. 红外与激光工程, 2000, 29 (2): 51 - 56.

[7] 苏建刚, 付梦印. 激光末制导炮弹半实物仿真系统 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18 (9): 2469 - 2473.

[8] Ray J A, Larson G A, Terry J E. Hardware in the loop support of the Longbow HELLFIRE modular missile systems pre-planned product improvement program [A]. Proceeding of SPIE, Technologies for Synthetic Environments: Hardware in the loop Testing [C]. 2001 (4366): 519 - 527.

[9] 王毅, 宋卫东, 宋谢恩, 等. 二维弹道修正引信制导控制系统半实物仿真 [J]. 中国测试, 2016, 42 (9): 83 - 87.

[10] 王毅, 宋卫东, 郭庆伟, 等. 固定鸭舵式二维弹道修正弹稳定性分析 [J]. 军械工程学院学报, 2015, 27 (3): 16 - 23.

[11] 张开创, 刘秋生, 王龙. 基于固定鸭舵的弹道修正弹建模与仿真 [J]. 弹道学报, 2015, 27 (1): 40 - 43.

[7] Kanaev A V, Hou W, Restaino S R, et al. Restoration of images degraded by underwater turbulence using structure tensor oriented image quality (STOIQ) metric [J]. Optics Express, 2015, 23 (13): 17077 - 17090.

[8] Hua W, Xiea Y, Zhanga W, et al. Removing water fluctuation via motion field-based Kernel regression [J]. Journal of Information & Computational Science, 2014, 11 (15): 5289 - 5296.

[9] Murase H. Surface shape reconstruction of a nonrigid transport object using refraction and motion [J]. IEEE Trans, 1992, 14 (10): 1045 - 1052.

[10] Holohan M L, Dainty J C. Low-order adaptive optics: A possible use in underwater imaging? [J]. Opt. Laser Technol, 1997, 29 (1): 51 - 55.

[11] Milder D M, Carter P W, Flacco N L, et al. reconstruction of through-surface underwater imagery [J]. Wave Random Complex, 2006, 16 (4): 521 - 530.

[12] Wen Z, Lambert A, Fraser D, et al. Bispectral analysis and recovery of images distorted by a moving water surface [J]. Appl Opt, 2010, 49 (33): 6376 - 6384.

[13] Halder K K, Paul M, Tahtali M, et al. Correction of geometrically distorted underwater images using shift map analysis [J]. Journal of the Optical Society of America, 2010, 49 (33): 6376 - 6384.

[14] 陈蓝钰, 常严, 王雷, 等. 基于正则化迭代的并行磁共振图像重建算法 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (12): 4177 - 4179.

[15] Hansen G M. Mie scattering as a technique for the sizing of air bubbles [J]. Applied optics, 1985, 24 (19): 3214 - 3220.

[16] Han H, Zhang X, Ge W. Performance evaluation of underwater range-gated viewing based on image quality metric [A]. International Conference on Electronic Measurement & Instruments 2009 (ICEMI 09) [C]. Beijing, 2009: 441 - 444.