

1-3-2019

Method of Missile Salvo Hardware-in-the-loop Simulation Based on Multi Scattering Center Analog Measurement

Baiting Liu

1. Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China; ;2. Beijing Complex Product Advanced Manufacturing Engineering Research Center, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

Xiaolei Wang

1. Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China; ;2. Beijing Complex Product Advanced Manufacturing Engineering Research Center, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

Chaolei Wang

1. Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China; ;2. Beijing Complex Product Advanced Manufacturing Engineering Research Center, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

Yuhui Tao

1. Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China; ;2. Beijing Complex Product Advanced Manufacturing Engineering Research Center, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Method of Missile Salvo Hardware-in-the-loop Simulation Based on Multi Scattering Center Analog Measurement

Abstract

Abstract: For the verification requirements of the hardware-in-the-loop simulation test of a missile salvo guidance control system, this paper proposes a hardware-in-the-loop simulation test method for anti-aircraft missile based on multi-scattering center simulation to *study the simulation method of missile salvo and the control method of multi-scattering center simulation of complex radio frequency target*. The hardware-in-the-loop simulation verification test was carried out by constructing a hardware-in-the-loop simulation verification system. The verification test results show that the method can simulate the first missile and the target. The seeker can stably track the multi-scatter target, the target analog signal output maintains high quality, and the seeker angle error is smoothly converged, which can effectively support the design and verification of guidance control algorithm for a certain type of missile.

Keywords

hardware-in-the-loop simulation test, missile salvo, multi scattering center, first missile

Authors

Baiting Liu, Xiaolei Wang, Chaolei Wang, Yuhui Tao, and Zhaowei Yang

Recommended Citation

Liu Baiting, Wang Xiaolei, Wang Chaolei, Tao Yuhui, Yang Zhaowei. Method of Missile Salvo Hardware-in-the-loop Simulation Based on Multi Scattering Center Analog Measurement[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(12): 4732-4737.

基于多散射中心模拟的导弹连射半实物仿真方法

刘柏廷^{1,2}, 王晓雷^{1,2}, 王超磊^{1,2}, 陶渝辉^{1,2}, 杨召伟^{1,2}

(1. 航天系统仿真重点实验室 北京仿真中心, 北京 100854;

2. 北京市复杂产品先进制造系统工程技术研究中心 北京仿真中心, 北京 100854)

摘要: 针对某型导弹制导控制半实物仿真试验对双发连射状态的验证需求, 提出一种基于多散射中心模拟的防空导弹连射半实物仿真试验方法, 研究了双发连射状态的仿真方法和复杂射频体目标多散射中心仿真的控制方法。通过构建半实物仿真验证系统, 进行了半实物仿真验证试验, 验证试验结果表明, 该方法可实现前发导弹及目标的体目标模拟, 导引头可稳定跟踪多散射目标, 目标模拟信号输出保持高质量, 导引头测角误差平稳收敛, 可有效支撑某型导弹制导控制算法的设计与验证。

关键词: 半实物仿真; 连射; 多散射中心; 前发导弹

中图分类号: TJ43+9.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 12-4732-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201812030

Method of Missile Salvo Hardware-in-the-loop Simulation Based on Multi Scattering Center Analog Measurement

Liu Baiting^{1,2}, Wang Xiaolei^{1,2}, Wang Chaolei^{1,2}, Tao Yuhui^{1,2}, Yang Zhaowei^{1,2}

(1. Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

2. Beijing Complex Product Advanced Manufacturing Engineering Research Center, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China)

Abstract: For the verification requirements of the hardware-in-the-loop simulation test of a missile salvo guidance control system, this paper proposes a hardware-in-the-loop simulation test method for anti-aircraft missile based on multi-scattering center simulation to study the simulation method of missile salvo and the control method of multi-scattering center simulation of complex radio frequency target. The hardware-in-the-loop simulation verification test was carried out by constructing a hardware-in-the-loop simulation verification system. The verification test results show that the method can simulate the first missile and the target. The seeker can stably track the multi-scatter target, the target analog signal output maintains high quality, and the seeker angle error is smoothly converged, which can effectively support the design and verification of guidance control algorithm for a certain type of missile.

Keywords: hardware-in-the-loop simulation test; missile salvo; multi scattering center; first missile

引言

防空导弹连射是指防空武器系统连续发射导

弹以打击敌方目标的作战状态。连射作战是当前战术上的常用方法, 对于单套武器系统的导弹连射以两发连射较多, 两发导弹之间有一定时间间隔^[1]。防空导弹连射具有很强的战略意义, 可有效提高导弹对目标的毁伤概率、提高对目标命中点的选择概率、提高导弹突防敌方防御系统和电子对抗系统的概率, 同时也可有效缩短作战反应时间^[2]。

随着武器系统技战术要求的不断提高和探测



收稿日期: 2018-06-30

修回日期: 2018-08-01;

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0820100);

作者简介: 刘柏廷(1986-), 男, 辽宁, 硕士, 工程师,

研究方向为制导控制半实物仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 4732 •

技术的不断发展,对制导控制半实物仿真的技术要求也越来越高。以美国为首的西方军事强国重点针对更精确地模拟各类复杂目标及背景,高度重视武器装备研制与鉴定中半实物仿真技术的应用,建立了一大批半实物仿真系统。尤其是毫米波仿真方面,美国 1995 年研制出共孔径的(Common-aperture)毫米波和红外双模制导的半实物仿真系统。美国 Lockheed Martin 公司在 PAC-3/3 导弹 15 年的研制过程中,建立起了一个从系统级到分系统级的统计型全数学仿真 SSS (System/Subsystem Simulation) 模型,可进行非实时和接近实时的统计仿真,评估 PAC-3 导弹从发射至与目标遭遇全过程的性能。PAC3-SIM 能够进行爱国者导弹系统从雷达设备目标探测到杀伤效果评估的全程仿真,成为第四代防空导弹 PAC-3 系统仿真的基本手段^[3-4]。

而现代高科技战争中具有大带宽的高距离分辨雷达,对信号回波进行变换处理后能够得到目标高分辨距离像,从而提取出目标特征信息参量。在此特性背景下,连射作战中的前发导弹会对后方导弹的高分辨雷达探测产生影响,进而影响制导控制规律设计^[5]。近年来,国内在武器装备仿真的建模理论与方法、仿真支撑软件技术、半实物仿真设备技术、毫米波制导仿真技术等仿真关键技术取得重大突破,有力地支撑了武器装备仿真系统的建设和运行^[6-7],但在连射状态的半实物仿真,尤其是体目标探测制导技术方面仍有待发展。

传统半实物仿真验证工作中,大多只针对单发导弹进行设计验证,在实现上采用多通道点源模拟的方法。但该方法存在局限性,无法满足对目标的高分辨探测验证需求,也无法有效验证连射状态下前发导弹对后发导弹探测的影响。

本文以新一代某型导弹为研究背景,着重研究双发连射作战条件下的高分辨射频成像制导半实物仿真关键技术及系统实现。

1 双发连射状态的仿真方法

本节主要描述连射状态的仿真方法。双发连射状态下,两发导弹之间有一定时间间隔,前发导弹

的运行轨迹会出现在后发导弹的探测视场中,因此,在仿真的时间序列上需要先完成前发导弹的仿真。由于后发导弹与目标的相对关系与以往单发导弹仿真类似,本节重点研究前发导弹的模拟方法。

对于前发导弹的模拟,可采用两种方法,一种方法是采用一套独立的半实物仿真模飞系统,包括仿真计算机、弹上计算机,通过实时解算完成对阵列、射频源等目标模拟设备的控制;另一种方法是采用数字、半实物仿真相结合的异类异构拓扑结构,将前发导弹的运动以数字化形式描述,并完成对阵列、射频源等目标模拟设备的控制。第一种方法的优点是前发导弹运动由独立的模飞系统模拟,对导弹运动细节的设置等较为方便。但这种方法需要构建两套仿真系统,包括参试的弹上计算机设备,同时也需要完成两套仿真系统的时间对齐、频率同步。该方法的经济性、可操作性差。第二种方法将前发导弹的运动轨迹以数据的方式融合进当前导弹仿真的仿真流程。该方法系统简单,时统由一台工控机统一控制,经济性好,可操作性强。

考虑连射半实物仿真试验的目的和性质,基于多散射中心模拟的防空导弹连射半实物仿真试验对前发导弹的模拟采用了第二种方法。图 1 为双发连射状态的仿真系统示意图。

在实现层面上,通过构建光纤网络交互集,完成全仿真系统层面的数据交换。通过综合管理中间件,实现前发导弹仿真数据、当前导弹仿真系统运行逻辑的统一控制。

在总体架构基础上制定完善的模型接口输出规则,由前发导弹仿真数据提取出导弹的位置、速度等简单信息,可计算得到当前导弹与前发导弹的相对视线角,及当前导弹观测到的前发导弹能量信息。

上述功能通过综合管理中间件的逻辑设计实现。针对前发导弹,综合管理中间件采用“数字孪生”技术概念,只在设备控制层面复制出前发导弹运行状态,并将“孪生前发导弹”重新融合进全系统仿真流程,进而转化为实时数据以完成大型仿真设备的控制。在此流程方面,半实物仿真试验时序等逻辑控制以导弹仿真系统为主体。

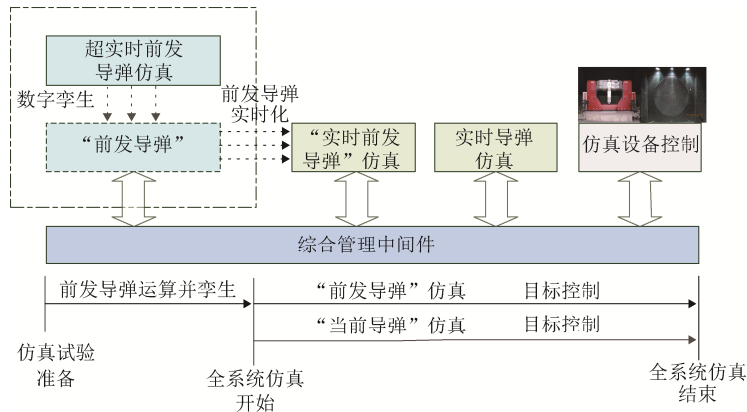


图1 双发连射状态的仿真系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the simulation system for two consecutive firing states

2 复杂射频体目标多散射中心仿真控制方法

由于背景型号导引头具有高分辨探测特性,为更真实的复现作战场景,本节提出复杂射频体目标多散射中心仿真控制方法,对目标和前发导弹的目标特性模拟进行模拟。对当前导弹而言,目标和前发导弹均可视为“目标”,除相对关系外,仿真控制方法是一致的,因而本节只给出前发导弹的多散射中心模拟方法,目标的模拟参照执行。

在半实物仿真试验中,仿真系统需要为高分辨导引头提供前发导弹的多散射中心电磁模拟环境。该环境需表征导弹和前发导弹的多散射中心间实时动态变化的相对运动关系,以及导引头探测到的实时动态变化的电磁特性。因此需要开展宽带高分辨射频成像制导半实物仿真的复杂射频体目标动态观测模型,以及复杂射频体目标多散射中心散射特性动态仿真控制模型建模。通过在仿真计算机上实时解算得到复杂射频体目标多散射中心模拟的动态控制参数,控制射频目标模拟系统实现制导仿真所需的动态射频体目标多散射中心模拟,实现对前发导弹的模拟。

2.1 阵列系统的仿真控制方法

设前发导弹有 n 个多散射中心,多散射中心在目标固联坐标系下的分布位置为 $[X_{mi} \ Y_{mi} \ Z_{mi}]$ $i=1,2,\dots,n$,发射坐标系下的目标姿态角为 ϑ_m 、

ψ_m 和 γ_m ,发射坐标系到目标固联坐标系的转换矩阵为 $L(\psi_m, \vartheta_m, \gamma_m)$,导弹在发射坐标系下的位置为 X_d, Y_d, Z_d 。

前发导弹的多散射中心位置从目标固联坐标系转换到发射坐标系:

$$\begin{bmatrix} X_{mfi} \\ Y_{mfi} \\ Z_{mfi} \end{bmatrix} = L^T(\psi_m, \vartheta_m, \gamma_m) \begin{bmatrix} X_{mi} \\ Y_{mi} \\ Z_{mi} \end{bmatrix} \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

发射坐标系下前发导弹的多散射中心与导弹之间的相对位置和相对距离为:

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{fi} \\ \Delta Y_{fi} \\ \Delta Z_{fi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{mfi} \\ Y_{mfi} \\ Z_{mfi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \end{bmatrix} \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

由此可得到发射坐标系下前发导弹的多散射中心与导弹之间的弹目视线角为:

$$q_{\varepsilon fi} = \sin^{-1} \left(\frac{\Delta Y_{fi}}{\Delta X_{fi}^2 + \Delta Y_{fi}^2 + \Delta Z_{fi}^2} \right) \quad (3)$$

$$q_{\beta fi} = \arctan \left(-\frac{\Delta Z_{fi}}{\Delta X_{fi}} \right) \quad i=1,2,\dots,n$$

由于实际实验室条件下相对视线范围等因素限制,对目标的控制不能直接使用式(3)计算得到的相对视线角。定义发射坐标系转到实验室坐标系的角度为 $(\psi, \vartheta, \gamma)$,由于采用卧式转台采用了先俯仰、再偏航、后滚转的转序,根据欧拉公式,其转换矩阵为 $A_D^T(\psi, \vartheta, \gamma)$,因此在计算目标控制角度时,需要将发射坐标系下的相对视线角转到实验室坐标系下,即

$$A_D^M = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \vartheta & \cos \psi \sin \vartheta & -\sin \psi \\ \sin \gamma \sin \psi \cos \vartheta - \cos \gamma \sin \vartheta & \sin \gamma \sin \psi \sin \vartheta + \cos \gamma \cos \vartheta & \sin \gamma \cos \psi \\ \cos \gamma \sin \psi \cos \vartheta + \sin \gamma \cos \vartheta & \cos \gamma \sin \psi \sin \vartheta - \sin \gamma \cos \vartheta & \cos \gamma \cos \psi \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \cos q_{\varepsilon Ti} \cos q_{\beta Ti} \\ \sin q_{\varepsilon Ti} \\ -\cos q_{\varepsilon Ti} \sin q_{\beta Ti} \end{bmatrix} = A_D^{T-1}(\psi, \vartheta, \gamma) \begin{bmatrix} \cos q_{\varepsilon fi} \cos q_{\beta fi} \\ \sin q_{\varepsilon fi} \\ -\cos q_{\varepsilon fi} \sin q_{\beta fi} \end{bmatrix},$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

由式(4)、(5)计算可得控制阵列馈电系统的控制角度 $q_{\varepsilon Ti}$ 、 $q_{\beta Ti}$ 。

2.2 射频源系统的仿真控制方法

同 2.1 节的计算方法, 计算得到导弹与多散射中心目标固联坐标系弹目视线角, 通过目标特性计算, 可得各散射中心目标散射截面积 RCS_i ($i = 1, 2, \dots, n$)。

由此得到各散射中心 RCS 起伏功率衰减为:

$$Pow_i = 10 * \lg(RCS_i / RCS_0) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

各散射中心的回波延时为:

$$Delay_i = 2 * \Delta R_i / c - Delay_0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

多普勒频率为:

$$Fd = 2 * \Delta \dot{R} / \lambda$$

式中: RCS_0 为目标等效散射截面积; $Delay_0$ 为仿真系统固有延时; c 为光速; $\Delta \dot{R}$ 为弹目相对速度; λ 为发射信号波长。以此完成射频源系统的控制。

3 仿真系统构建及应用

3.1 仿真系统构建

设计半实物仿真试验系统, 选用适当的仿真设备和弹上设备, 完成闭环验证试验。基于多散射中心模拟的防空导弹连射半实物仿真试验系统框图见图 2。

参试仿真设备: 仿真主控计算机、发控/遥测模拟计算机、V/I 变换接口设备、三轴飞行转台、配套电缆、电源、毫米波目标模拟系统、射频暗室等。

参试弹上设备: 弹上信息处理器、惯性测量装置、毫米波主动导引头。

系统工作原理如下: 导弹飞行过程中, 三轴转台搭载惯性测量装置运动形成导弹角运动环境, 通过加速度模拟装置形成导弹线运动环境, 由仿真计算机实时计算生成导弹动力学、运动学环境, 计算目标运动环境, 融合前发导弹试验数据, 并完成仿真控制设备指令生成。三轴转台搭载导引头运动并探测目标信息。弹上计算机通过解算导引头探测的目标信息, 形成制导指令, 直至末制导杀伤, 完成试验。

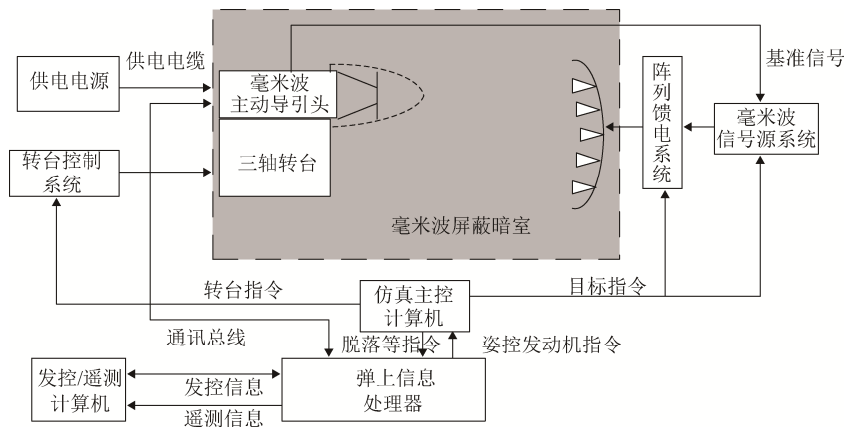


图 2 半实物仿真试验系统框图

Fig. 2 Block diagram of hardware in the loop simulation test system

3.2 验证结果分析

基于3.1节构建的仿真系统，完成了双发连射状态下的仿真控制模型设计，并依此完成测试环境下的仿真验证试验。

验证试验中，依据目标模型及弹道特性，按第2节的多散射中心仿真控制模型对各散射点RCS、起伏功率、延时值进行控制。

图3~4为多点RCS和合成RCS的控制结果。系统合成的RCS功率与单点模拟的目标RCS值吻合。

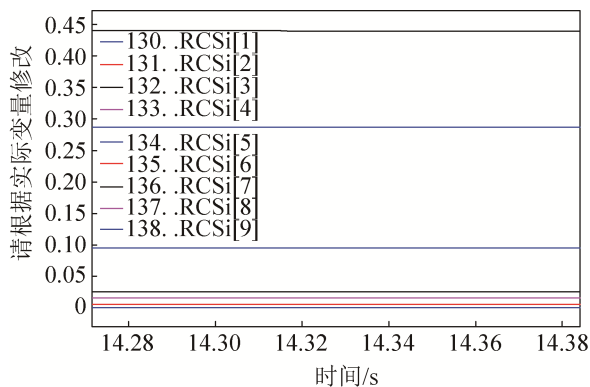


图3 目标多散射点RCS控制值

Fig. 3 RCS control value of target multiple scattering point

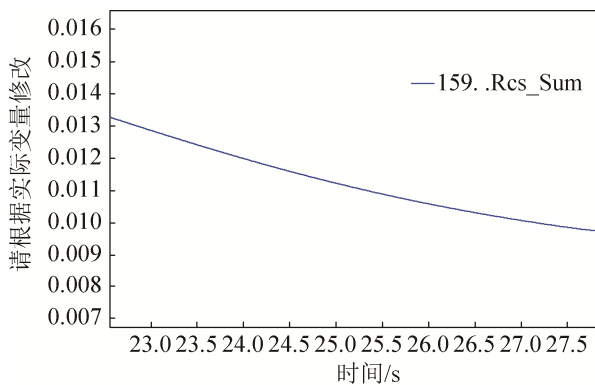


图4 多点合成RCS控制值

Fig. 4 RCS control value of multipoint synthesis

图5为导引头运行状态字，图6为导引头输出的信号电平量，图7为导引头测距误差曲线。由此可见，导引头可稳定跟踪多散射目标，在复杂的目标变换和前发导弹信号影响下，探测信号正常，目标模拟信号输出保持高质量，导引头测角误差平稳收敛。在导引头高分辨处理情况下，导引头进行了

目标点选择，信号电平有起伏。由以上导引头输出结果可见，体目标多散射中心模拟状态正确。

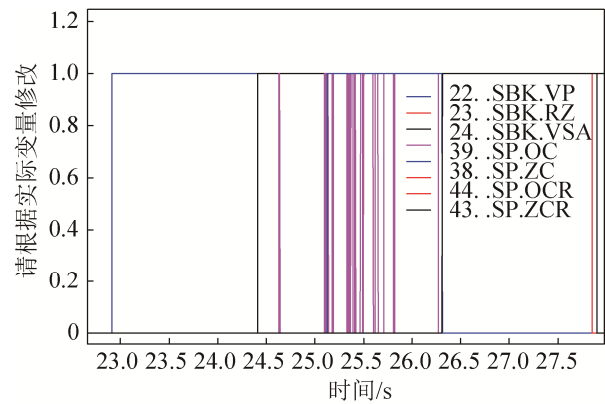


图5 导引头运行状态字

Fig. 5 Seeker running status word

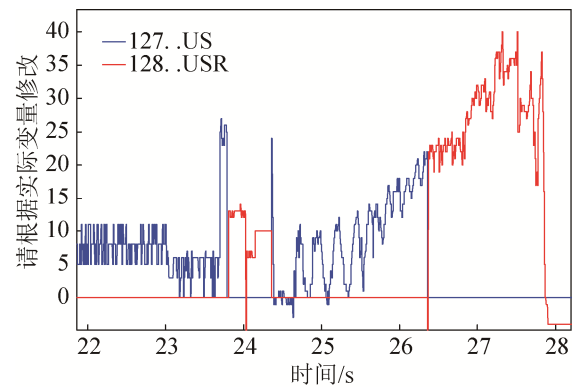


图6 导引头信号电平

Fig. 6 Seeker signal level

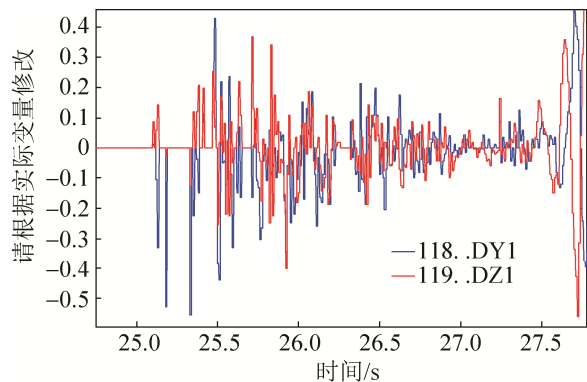


图7 导引头测角误差

Fig. 7 Seeker angle measurement error

4 结论

综上所述，本文针对某型导弹制导控制半实物仿真试验对双发连射状态的验证需求，提出一种基

于多散射中心模拟的防空导弹连射半实物仿真试验方法,研究了双发连射状态的仿真方法和复杂射频目标多散射中心仿真的控制方法。通过构建半实物仿真验证系统,进行了半实物仿真验证试验,验证试验结果表明,该方法可实现前发导弹及目标的体目标模拟,可有效支撑某型导弹制导控制算法的设计与验证。

参考文献:

- [1] 沙基昌. 数理战术学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 14-20.
SHA Jichang. Mathematical tactics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 14-20.
- [2] 董受全. 战术导弹技术[M]. 1009-1300(2001)05-0007-04. 2001(5): 7-10.
Dong Shouquan. TACTICAL MISSILE TECHNOLOGY [M]. 1009-1300(2001)05-0007-04. 2001(5): 7-10.
- [3] Vincenzo Delli Colli, Roberto Di Stefano, Fabrizio Marignetti. Hardware in the Loop Simulation of a FPGA-based Speed and Position Observer for non-Salient Permanent Magnet Synchronous Motors[C]// The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. USA: IEEE, 2007.
- [4] Michael Short, Michael J Pont. Hardware in the Loop Simulation of Embedded Automotive Control Systems [C]// The 8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. USA: IEEE, 2005.
- [5] 王辉, 王力, 胡浩, 等. 高分辨成像雷达半实物仿真技术研究[J]. 计算机仿真, 2014(2): 349-352.
Wang Hui, Wang Li, Hu Hao, et al. Study on High-Resolution Imaging Radar Loop Simulation[J]. Computer Simulation, 2014(2): 349-352.
- [6] 张武龙. 基于 MATRIXx 和 RTX 的导弹系统半实物仿真平台[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(20): 307-311.
Zhang Wulong. A Missile System Hardware-in-loop Simulation Platform based on MATRIXx and RTX[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(20): 307-311.
- [7] 刘延斌, 金光. 半实物仿真技术的发展现状[J]. 光机电信息, 2003(1):27-32.
Liu Yanbin, Jin Guang. Development status of hardware in the loop simulation technology[J]. OME Information, 2003(1): 27-32.
- [4] Lin W C, Sun S W, Cheng W H, et al. Compass fusion: High Precision indoor people localization and identification[C]// HH Chu. Proc. of the 11th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, Taipei, Taiwan, China. NY, USA: ACM New York, 2013: 497-498.
- [5] 谷阳. 基于鞋载惯性传感器的地图辅助人员定位方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(7): 1633-1637.
Gu Yang. Map-assisted personnel positioning method based on shoe inertial sensors[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(7): 1633-1637.
- [6] S Rajagopal. Personal dead reckoning system with shoe mounted inertial sensors[D]. Stockholm, Sweden: Royal Institute Technology, 2008.
- [7] Grover Robert, P Y C Hwang. Introduction to random signals and applied Kalman filtering[M]. Canada: Hamilton Printing Company, 1992.
- [8] 胡安冬. 一种基于地图匹配辅助行人航迹推算的室内定位方法[J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(5): 530-537.
Hu Andong. An indoor positioning method based on map matching for assisting pedestrian track estimation[J]. Journal of Surveying and Mapping Science, 2014, 31(5): 530-537.
- [9] 王凯龙. 基于微机电系统的室内行人航向修正算法[J]. 科学技术与工程学报, 2018, 18(6): 263-267.
Wang Kailong. The indoor pedestrian heading correction algorithm based on MEMS[J]. Journal of Science Technology and Engineering, 2018, 18(6): 263-267.
- [10] Shin E H. Estimation techniques for low cost inertial navigation[D]. Canada: University of Calgary, 2005.
- [11] 赵正平. 典型 MEMS 和可穿戴传感技术的新发展[J]. 微纳电子技术, 2015, 52(2): 69-74
Zhao Zhengping. The new development of typical MEMS and wearable sensing technology [J]. Micronanoelectronic technology, 2015, 52(2): 69-74.
- [12] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2015.
Qin Yongyuan, Zhang Hongjun, Wang Shuhua. Principles of Kalman Filtering and Integrated Navigation[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2015.

(上接第 4731 页)