

1-3-2019

Construction and Application of Low Altitude Multi-path Simulation System Based on Volume Distributive Target Simulation

Xiaolei Wang

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

Baiting Liu

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

Chaolei Wang

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

Zhaowei Yang

Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, 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.

Construction and Application of Low Altitude Multi-path Simulation System Based on Volume Distributive Target Simulation

Abstract

Abstract: With the continuous development of broadband high-resolution radar technology, the existing simulation technology cannot meet the needs of complex RF target and low altitude multi-path simulation with multi scattering center characteristics. The paper takes broadband high-resolution RF imaging guidance system as application background. *A method for constructing a low altitude multi-path semi-physical simulation system based on volume distributive target simulation is put forward. The RF complex volume distributive target control model and low altitude multi-path simulation control model are developed. A hardware-in-the-loop system with low altitude multi-path simulation is constructed.* The experimental results show that the simulation model is reasonable and the simulation system is feasible, which can effectively realize the low altitude multi-path simulation.

Keywords

volume distributive target, low altitude multi-path, broadband high-resolution, simulation system

Authors

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

Recommended Citation

Wang Xiaolei, Liu Baiting, Wang Chaolei, Yang Zhaowei, Tao Yuhui. Construction and Application of Low Altitude Multi-path Simulation System Based on Volume Distributive Target Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(12): 4802-4807.

基于体目标模拟的低空多路径仿真系统构建与应用

王晓雷, 刘柏廷, 王超磊, 杨召伟, 陶渝辉

(航天系统仿真重点实验室, 北京仿真中心, 北京 100854)

摘要: 随着宽带高分辨雷达技术的不断发展, 现有仿真技术已不能满足具有多散射中心特征的复杂射频体目标及低空多路径回波模拟需求。以宽带高分辨射频成像制导系统为应用背景, 提出一种基于体目标模拟的低空多路径半实物仿真系统构建方法, 开展了复杂射频体目标及低空多路径仿真控制建模研究, 构建了基于体目标模拟的低空多路径半实物仿真系统, 进行了仿真试验验证。试验结果表明, 仿真模型建模合理, 仿真系统构建可行, 可有效实现基于体目标的低空多路径仿真模拟。

关键词: 体目标; 低空多路径; 高分辨; 仿真系统;

中图分类号: TJ43+9.2 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 12-4802-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201812039

Construction and Application of Low Altitude Multi-path Simulation System Based on Volume Distributive Target Simulation

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

(Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China)

Abstract: With the continuous development of broadband high-resolution radar technology, the existing simulation technology cannot meet the needs of complex RF target and low altitude multi-path simulation with multi scattering center characteristics. The paper takes broadband high-resolution RF imaging guidance system as application background. A method for constructing a low altitude multi-path semi-physical simulation system based on volume distributive target simulation is put forward. The RF complex volume distributive target control model and low altitude multi-path simulation control model are developed. A hardware-in-the-loop system with low altitude multi-path simulation is constructed. The experimental results show that the simulation model is reasonable and the simulation system is feasible, which can effectively realize the low altitude multi-path simulation.

Keywords: volume distributive target; low altitude multi-path; broadband high-resolution; simulation system;

引言

防空导弹作战时会面临复杂的电磁干扰环境, 当导弹拦截低空目标时, 多路径效应成为了低空电

磁干扰的核心问题^[1]。半实物仿真试验具有电磁干扰场景设置灵活、全面的特点, 是导弹研制过程中抗干扰性能设计和验证必不可少的试验手段。

目前, 防空导弹探测低空目标的多路径回波信号模拟, 一般都是将目标视为点目标, 多路径回波模拟控制模型只需考虑点目标对应的四条路径即可。现有经典的射频仿真系统是基于三元组相位配平幅度调制、一路馈电只能模拟一个等效散射中心



收稿日期: 2018-06-30 修回日期: 2018-08-01;
作者简介: 王晓雷(1983-), 女, 吉林, 硕士, 高工, 研究方向为制导控制半实物仿真; 刘柏廷(1986-), 男, 辽宁, 硕士, 高工, 研究方向为制导控制半实物仿真; 王超磊(1986-), 男, 河北, 博士, 高工, 研究方向为制导控制半实物仿真。

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

• 4802 •

的工作原理。但随着宽带高分辨雷达技术^[2]的不断发展, 现有仿真系统与模拟技术已不能满足具有“多散射中心”特征的复杂射频体目标及低空多路径回波模拟需求, 严重制约了新一代宽带高分辨射频成像制导弹技术的发展。

现提出一种基于体目标模拟的低空多路径仿真系统构建方法, 以宽带高分辨射频成像制导系统^[3]为应用背景, 基于复杂射频体目标多散射中心模拟, 建立了体目标低空多路径回波模拟仿真控制模型, 构建了低空多路径半实物仿真系统, 并通过仿真试验有效验证了仿真系统的合理性和正确性。

1 复杂射频体目标仿真控制模型

仿真系统需要为高分辨导引头提供目标多散射中心与多路径干扰的电磁环境, 该环境需表征导弹、目标多散射中心与多路径干扰之间的相对运动关系和实时动态变化的电磁特性^[4]。为了实现体目标模拟, 本系统采用了基于矢量控制的阵列馈电系统和复杂射频体目标模拟源。其中, 复杂射频体目标模拟源能够产生高逼真度的目标多散射中心与多路径干扰的电磁信号, 基于矢量控制的阵列馈电系统能够模拟导弹、目标多散射中心和多路径干扰的相对运动关系。

通过建立体目标仿真控制模型, 控制和模拟实战中的导弹与目标多散射中心之间的相对运动关系、信号强度、距离延迟和多普勒频率等特性。

设目标有 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 $[X_{mi} \ Y_{mi} \ Z_{mi}]$, $i=1,2,\dots,n$, 导弹在发射坐标系下的位置为 X_d, Y_d, Z_d , 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 $L(\psi_m, \vartheta_m, \gamma_m)$ 。

目标的多散射中心分布位置从目标固联坐标系转换到发射坐标系:

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

发射坐标系下目标的多散射中心与导弹之间的相对位置和相对距离为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta X_{fi} \\ \Delta Y_{fi} \\ \Delta Z_{fi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{mfi} + X_m \\ Y_{mfi} + Y_m \\ Z_{mfi} + Z_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \end{bmatrix} \\ \Delta R_i = \sqrt{\Delta X_{fi}^2 + \Delta Y_{fi}^2 + \Delta Z_{fi}^2} \end{cases} \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

由此可得发射坐标系下目标的多散射中心与导弹之间的弹目视线角为:

$$\begin{cases} q_{\varepsilon fi} = \arcsin(\Delta Y_{fi} / \Delta R_i) \\ q_{\beta fi} = \arctan(-\Delta Z_{fi} / \Delta X_{fi}) \end{cases} \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

将发射坐标系下的多散射中心弹目视线角 $q_{\varepsilon fi}, q_{\beta fi}$ 转换到实验室坐标系下, 控制阵列馈电系统, 实现目标多散射中心与导弹的角位置关系模拟。

设目标各散射中心的散射截面积为 $RCS_i (i=1,2,\dots,n)$ 。由此得到各散射中心 RCS 起伏功率衰减为:

$$Amp_i = 10 \times \lg(RCS_i / RCS_0) \quad i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

各散射中心的回波延时为:

$$RF_tuo_i = 2 \times \Delta R_i / C - RF_tuo_0 \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

多普勒频率为:

$$RF_fd = 2 \times \Delta \dot{R} / \lambda \quad (6)$$

式中: RCS_0 为等效散射面积模拟基准; RF_tuo_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。

上述公式中计算得到的目标各散射中心的视线角、功率衰减、回波延时和多普勒频率, 作为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回波信号模拟。

2 体目标低空多路径回波模拟仿真控制模型

当导弹拦截低空/超低空飞行目标时, 导引头天线在接收直接回波信号的同时也会接收来自平坦的地面或海面的镜面反射回波, 从而形成多路径效应^[5], 使得接收信号的电平出现闪烁现象, 造成导引头系统对目标位置和速度的测量产生较

大误差。

如图1所示,多路径效应下的电磁波传播途径一般为以下四种情况:路径1(M->T->M)、路径2(M->T->O->M)、路径3(M->O->T->M)、路径4(M->O->T->O->M)。其中,路径1为目标回波信号的直接传播路径,路径2为目标至导弹段信号经反射面反射,路径3为导弹至目标段信号经反射面反射,路径4为两段信号均经反射面反射。

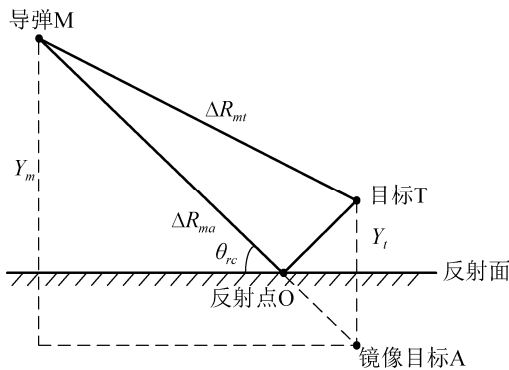


图1 低空多路径效应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of low altitude multi-path effect

当目标视为点目标时,多路径回波模拟控制模型只需考虑点目标对应的四条路径即可^[6];当模拟体目标的多路径效应时,需要分别建立各散射中心对应的四条路径的控制模型。

2.1 考虑地球曲率修正的镜像目标模型

要建立体目标的低空多路径回波模拟仿真控制模型,首先需要得到各散射中心对应的镜像目标的位置速度信息。一般简化模型中将发射坐标系的XOZ坐标面视为反射面,镜像目标与真实目标相对称。但由于地球曲率的存在,照射在地球表面上的波束发生了球面反射,使得简化模型描述的镜像目标信息并不准确,因此需要建立考虑地球曲率修正的镜像目标模型。考虑地球曲率的低空多路径效应见图2。

设体目标的多散射中心在发射系下的位置分量为 $[X_{ti} \ Y_{ti} \ Z_{ti}] \ i=1,2,\dots,n$,其中 n 为多散射中心个数。

首先计算真实目标在地心坐标系下的位置分量:

$$\begin{bmatrix} X_{thi} \\ Y_{thi} \\ Z_{thi} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} X_{ti} \\ Y_{ti} \\ Z_{ti} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{hx} \\ R_{hy} \\ R_{hz} \end{bmatrix} \quad i=1,2,\dots,n \quad (7)$$

式中: A 为发射坐标系到地心坐标系的转换矩阵; HF_t 为发射点海拔高度; $[R_{hx} \ R_{hy} \ R_{hz}]$ 为发射点海平面在地心坐标系分量。

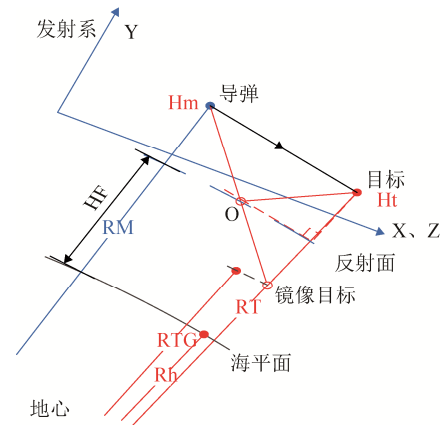


图2 考虑地球曲率的低空多路径效应示意图

Fig. 2 Schematic diagram of low altitude multi-path effect considering the curvature of the earth

目标的海拔高度为:

$$H_{ti} = \sqrt{X_{thi}^2 + Y_{thi}^2 + Z_{thi}^2} - R_h \quad i=1,2,\dots,n \quad (8)$$

镜像目标到地心距离:

$$R_{TGi} = \sqrt{X_{thi}^2 + Y_{thi}^2 + Z_{thi}^2} - 2(H_{ti} - HF_t) \quad i=1,2,\dots,n \quad (9)$$

镜像目标在地心坐标系分量:

$$\begin{cases} R_{axi} = R_{TGi} \cos(\lambda_t) \cos(\beta_t) \\ R_{ayi} = R_{TGi} \sin(\lambda_t) \\ R_{azi} = R_{TGi} \cos(\lambda_t) \sin(\beta_t) \end{cases} \quad i=1,2,\dots,n \quad (10)$$

式中: λ_t 为目标的纬度; β_t 为目标相对发射点经度。

最后,得到发射坐标系下的各散射中心对应的镜像目标位置和速度:

$$\begin{bmatrix} X_{ai} \\ Y_{ai} \\ Z_{ai} \end{bmatrix} = A^{-1} \cdot \begin{bmatrix} R_{axi} - R_{hx} \\ R_{ayi} - R_{hy} \\ R_{azi} - R_{hz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ HF_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad i=1,2,\dots,n \quad (11)$$

$$[VX_{ai} \ VY_{ai} \ VZ_{ai}] = [\dot{X}_{ai} \ \dot{Y}_{ai} \ \dot{Z}_{ai}] \quad (12)$$

2.2 低空多路径控制模型

通过建立导弹、目标多散射中心与镜像目标的角位置关系模型,以及多路径信号的幅度、延迟和

多普勒频率模型, 控制和模拟导弹、目标与多路径干扰的相对运动关系、信号强度、距离延迟和多普勒频率等特性。

首先建立多路径回波信号的角位置关系模型。

由于路径 1 和路径 3 的回波均是经过目标直接返回, 所以路径 1 和路径 3 的角位置关系模型即为第一节公式 3 中得到的目标多散射中心与与导弹之间的弹目视线角 $q_{\varepsilon fi}$ 、 $q_{\beta fi}$ 。

路径 2 和路径 4 的回波信号均是经过反射面返回, 所以需建立镜像目标与导弹的角位置关系模型。发射坐标系下镜像目标与导弹之间的相对位置和相对距离为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta X_{afi} \\ \Delta Y_{afi} \\ \Delta Z_{afi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ai} \\ Y_{ai} \\ Z_{ai} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \end{bmatrix} & i=1,2,\dots,n \\ \Delta R_{ai} = \sqrt{\Delta X_{afi}^2 + \Delta Y_{afi}^2 + \Delta Z_{afi}^2} & i=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (13)$$

由此可得发射坐标系下镜像目标与导弹之间的弹目视线角为:

$$\begin{cases} q_{\varepsilon ai} = \arcsin(\Delta Y_{afi} / \Delta R_{ai}) \\ q_{\beta ai} = \arctan(-\Delta Z_{afi} / \Delta X_{afi}) & i=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (14)$$

多路径回波模拟信号的功率衰减控制量为:

$$\begin{cases} P_{r1i} = P_{ri} + G_{a1i} \\ P_{r2i} = P_{ri} + G_{a1i} + 20\lg(\Delta R_{ai} / \rho_i / \Delta R_i) \\ P_{r3i} = P_{ri} + G_{a2i} + 20\lg(\Delta R_{ai} / \rho_i / \Delta R_i) \\ P_{r4i} = P_{ri} + G_{a2i} + 40\lg(\Delta R_{ai} / \rho_i / \Delta R_i) \end{cases} \quad i=1,2,\dots,n \quad (15)$$

式中: P_{ri} 为目标多散射中心回波模拟信号的功率

衰减; ρ_i 为地面反射系数 G_{a1i} ; 和 G_{a2i} 为目标、镜像目标视线偏离导引头天线指向的归一化功率增益, 由实测天线方向图查表得到。

多路径回波模拟信号的延时控制量为:

$$\begin{cases} RF_tu_{0i} = 2 \times \Delta R_i / C - RF_tu_{00} \\ RF_tu_{2i} = (\Delta R_i + \Delta R_{ai}) / C - RF_tu_{00} \\ RF_tu_{3i} = (\Delta R_i + \Delta R_{ai}) / C - RF_tu_{00} \\ RF_tu_{4i} = 2 \times \Delta R_{ai} / C - RF_tu_{00} \end{cases} \quad i=1,2,\dots,n \quad (16)$$

多路径回波模拟信号的多普勒频率控制量为:

$$\begin{cases} RF_fd_{1i} = 2 \times \Delta \dot{R} / \lambda \\ RF_fd_{2i} = (\Delta \dot{R} + \Delta \dot{R}_a) / \lambda \\ RF_fd_{3i} = (\Delta \dot{R} + \Delta \dot{R}_a) / \lambda \\ RF_fd_{4i} = 2 \times \Delta \dot{R}_a / \lambda \end{cases} \quad i=1,2,\dots,n \quad (17)$$

式中: $\Delta \dot{R}_a$ 为镜像目标与导弹的相对运动速度。

3 基于体目标模拟的低空多路径仿真系统构建

3.1 仿真系统构建

结合某背景型号需求, 构建了基于体目标模拟的低空多路径仿真系统^[7]。图 3 为仿真系统结构框图。该半实物仿真系统主要由仿真设备和参试弹上设备组成。仿真设备主要包括仿真计算机、模拟发控/遥测计算机、三轴飞行转台、毫米波体目标模拟系统等。参试弹上设备包括高分辨毫米波导引头、弹上信息处理器和惯性测量装置等。

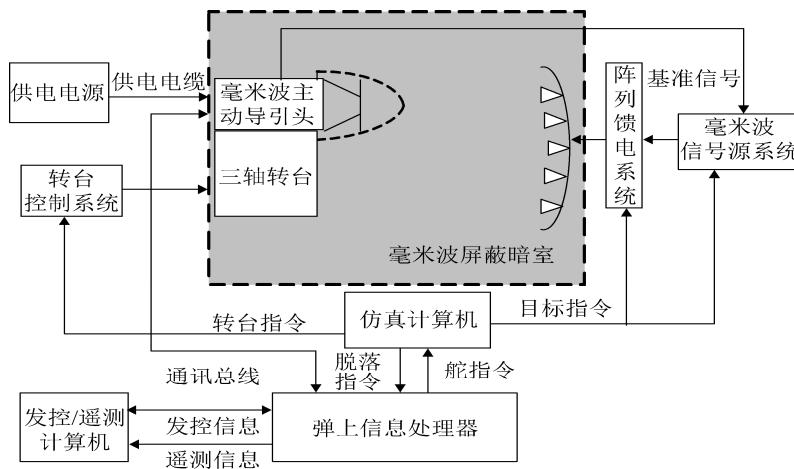


图 3 基于体目标模拟的低空多路径仿真系统

Fig. 3 Low altitude multi-path simulation system based on volume distributive target simulation

仿真计算机是半实物仿真试验的核心控制设备,其主要实现弹体模型计算、体目标仿真控制计算、多路径仿真控制计算、时间调度、接口通信、仿真试验的人机交互等功能。

模拟发控/遥测计算机用于仿真试验时模拟发控系统完成弹地通讯,模拟遥测系统采集弹上信息处理器数字遥测量。

三轴飞行转台接收仿真计算机发送的转台控制指令,用于模拟导弹的飞行姿态运动。

毫米波体目标模拟系统接收仿真计算机发送的体目标仿真控制参量和多路径仿真控制参量,为高分辨毫米波导引头提供低空多路径模拟环境下的体目标信号辐射和视线运动模拟。毫米波体目标模拟系统是由毫米波信号源和基于矢量控制的阵列馈电系统组成,其中毫米波信号源可以模拟脉冲多普勒体制、线性脉压体制和高距离分辨体制的体目标信号,阵列馈电系统可以实现对体目标多源阵列天线角位置的矢量控制。

3.2 仿真试验验证

结合某背景型号需求,构建了基于体目标模拟的低空多路径半实物仿真系统,以一个等效散射中心为例,开展了低空多路径半实物仿真验证。

由图4和图5仿真结果可见,在不考虑多路径干扰影响时,导引头可稳定跟踪目标,探测信号正常,目标模拟信号输出保持高质量。

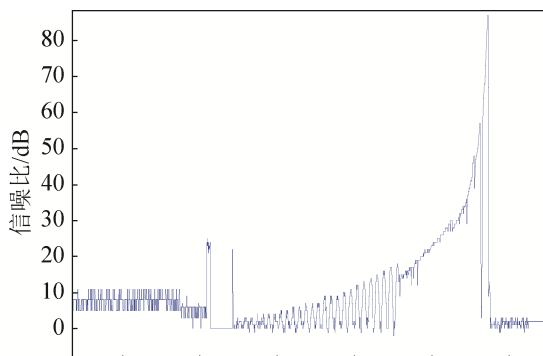


图4 不考虑多路径效应的导引头接收信号

Fig. 4 Seeker receiver signal without considering multi-path effect

由图6和图7仿真结果可见,在考虑多路径效应时,导引头的探测信号受到了低空多路径的干扰影响,目标测量角误差明显增大。

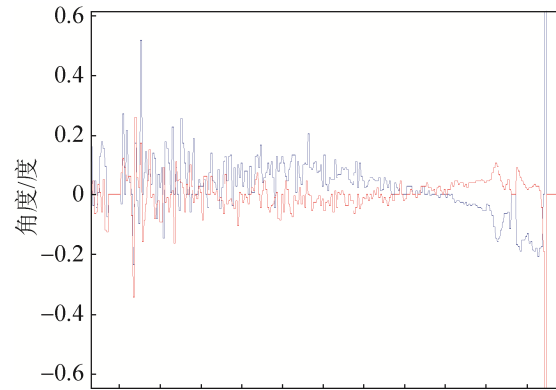


图5 不考虑多路径效应的目标测量角偏差

Fig. 5 Angle error of target without considering multi-path effect

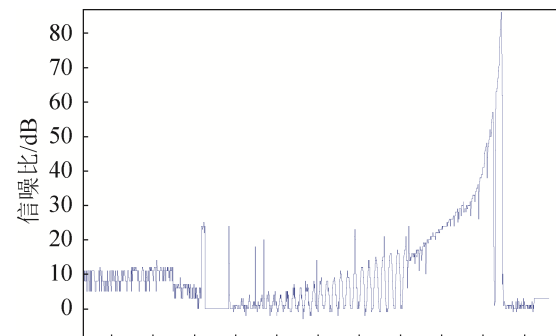


图6 考虑多路径效应的导引头接收信号

Fig. 6 Seeker receiver signal with considering multi-path effect

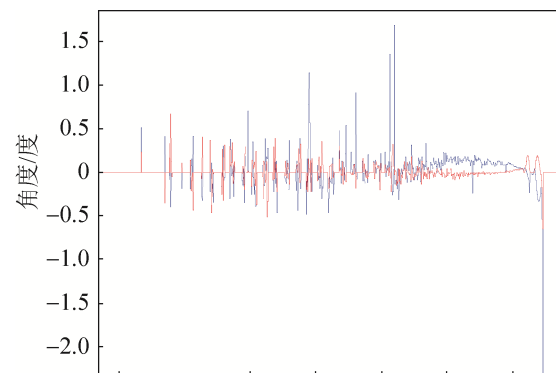


图7 考虑多路径效应的目标测量角偏差

Fig. 7 Angle error of target with considering multi-path effect

试验结果表明,仿真模型建模合理,仿真系统构建可行,有效实现了低空多路径仿真模拟,可满

足背景型号对低空多路径干扰环境下的目标探测需求。

4 结论

针对体目标低空多路径半实物仿真需求, 本文以宽带高分辨射频成像制导系统为应用背景, 开展了复杂射频体目标及低空多路径仿真控制建模研究, 构建了基于体目标模拟的低空多路径半实物仿真系统, 进行了仿真验证试验, 为新一代宽带高分辨成像制导导弹的抗干扰技术奠定了基础。

参考文献:

- [1] 李莉, 孙振华, 李立伟, 等. 装备定性试验中复杂电磁环境研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 20(2): 73-76.
LI Li, SUN Zhen-hua, LI Li-wei, et al. Research on Complex Electromagnetic Environment of Equipment Stereotype Test[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2009, 20(2): 73-76.
- [2] 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.
- [3] 刘峥, 陈建军, 孙雪, 等. 弹载高分辨雷达跟踪建模与仿真[J]. 信号处理, 2009(8): 507-511.
LIU Zheng, CHEN Jian-jun, SUN Xue, et al. Tracking Modeling and Simulation for Missile-Borne High Resolution Radar[J]. Signal Processing, 2009(8): 507-511.
- [4] 张媛, 张林让, 马剑英. 超宽带雷达低空多路径回波建模与仿真[J]. 信号处理, 2005(4A): 571-574.
ZHANG Yuan, ZHANG Lin-rang, MA Jian-ying. Modeling and Simulation for Low Altitude Multi-path Echo of UWB Radar[J]. Signal Processing, 2005(4A): 571-574.
- [5] 马贤明. 短波通信抗干扰试验内场仿真系统构建与应用[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(15): 4186-4190.
MA Xian-ming. Construction and Application of Infield Simulation Systems for HF Communication Anti-jamming Test[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(15): 4186-4190.
- [6] 曾茂生, 修继信. 多路径效应对低空箔条云 RCS 的影响[J]. 航天电子对抗, 2008(6): 54-55.
ZENG Mao-sheng, XIU Ji-xin. Multi-path effect on the RCS of the low altitude chaff[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2008(6): 54-55.
- [7] 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(8): 307-310, 332.
ZHANG Wu-long. A Missile System Hardware-in-loop Simulation Platform based on MATRIXx and RTX[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(8): 307-310, 332.
- [8] 沈林成, 陈璟, 王楠. 飞行器任务规划技术综述[J]. 航空学报, 2014, 35(3): 593-606.
SHEN Lincheng, CHEN Jing, WANG Nan. Overview of Air Vehicle Mission Planning Techniques[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(3): 593-606.
- [9] 曾文权, 余爱民. 基于改进 PSO 算法的任务分配研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(13): 51-55.
ZENG Wenquan, YU Aimin. Research on improved PSO algorithm based task allocation[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(13): 51-55.

(上接第 4801 页)