

船载天线雷达系统优化建模与仿真研究

薛佳盛¹, 厉刚², 单梁¹, 苏智勇¹

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094; 2. 徐州九鼎机电总厂, 江苏 徐州 221002)

摘要: 由于船载天线雷达系统结构较为复杂, 其伺服系统和机械结构虽然存在较多耦合, 但是在仿真过程中往往被分开进行建模和研究, 这使得建模得到的天线系统模型的整体性和逼真度不足。针对上述情况, 提出了一种将天线伺服机理与动力学结合的建模仿真方法。首先根据先验知识搭建了天线伺服系统机理模型并通过系统辨识进行优化, 再根据天线运动特性搭建了天线系统的动力学模型, 最后在软件仿真环境中将上述模型模块进行整合联调并测试。通过与实装设备进行实验比较和数据对比, 结果表明建模得到的天线系统模型的逼真度较高, 能够满足船载天线系统仿真的需要。

关键词: 仿真建模; 系统辨识; 动力学建模

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** B

Research on Optimization Modeling and Simulation of Shipborne Radar Antenna System

XUE Jia-sheng¹, LI Gang², SHAN Liang¹, SU Zhi-yong¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China;

2. Xuzhou Jiuding Mechanical and Electrical Plant, Xuzhou Jiangsu 221002, China)

ABSTRACT: Because the structure of Shipborne antenna radar system is complex, although its servo system and mechanical structure are very coupled, they are often modeled and researched separately in the simulation process, which makes the antenna system model lack of integrity and fidelity. In this case, a modeling and simulation method which combines the antenna servo mechanism with the dynamics is proposed. First, the mechanism model of antenna servo system which is optimized by system identification is constructed according to prior knowledge. Then, the dynamic model of antenna system is built according to the antenna motion characteristics. Finally, the model modules are integrated and tested in the software simulation environment. Through the experiment data comparison and contrast with the actual equipment, the results show that the antenna system model has high fidelity, which can meet the need of shipborne antenna system simulation.

KEYWORDS: Simulation modeling; System identification; Dynamic modeling

1 引言

船载天线雷达系统作为航天测控网的核心主力, 承担着火箭、飞船和卫星等测控通信任务。各项任务中, 一项十分重要的任务就是操作天线伺服系统以实现对目标飞行器的跟踪和监测。目前, 船载天线系统主要依靠伺服操作手在等待点以手动的方式来捕获目标飞行器, 这对操作手的业务水平提出了很高的要求。通过对船载天线系统进行仿真建模, 利用仿真技术, 搭建一个可以用于训练伺服操作手的仿真训练系统, 对于保障训练任务、培养操作员具有重要的意义^[1]。

目前, 国内外针对天线伺服系统仿真的研究通常将伺服机理建模和动力学仿真分开进行, 对于基于机理建模建立天

线伺服仿真系统的研究还不多见。例如文献[2]着重研究了机械结构的近似动力学模型, 而文献[3]则主要研究了天线伺服系统的机理特性。但是实际的天线系统之中天线伺服系统的输出即为天线动力学的输入, 所以天线的伺服机理与其动力学有着十分紧密的联系^[4-5]。本文采用将天线伺服系统机理建模和天线动力学建模相结合的方式, 分别对两者进行建模, 并将天线伺服系统的输出作为天线动力学模型的输入, 从而搭建完整的天线仿真系统。

天线伺服系统建模有直接按照系统机理建模或根据数据进行系统辨识等方法。对于结构和参数明确、先验知识充分的系统, 可以从内部机理出发, 采用数学方法推导出模型。对于结构和参数不明确或复杂的系统, 可采用系统辨识的建模方法^[6]。通过机理搭建的模型虽符合实际系统的结构和

收稿日期: 2018-01-17 修回日期: 2018-01-30

原理,但是由于缺乏实际数据的支撑,在仿真应用中会与实际系产生偏差;而通过实测数据辨识出的模型虽然运行结果与实际相似,但是由于无法得到其模型内部参数,想要对其内部参数和机理进行研究或仿真就十分困难。本文通过将理论建模和系统辨识相结合的方法对天线伺服系统模型进行建模,充分利用了先验知识和数据,提高了模拟仿真系统的逼真度。同时,由于模型的结构和机理已知,所以系统能够实现模拟仿真出系统操作运行过程中的各种情况,也能够实现模型的参数可调,充分提高了系统的应用性。

2 船载天线系统

船载天线系统是指能够完成船载天线测控工作的整体系统,主要由天线、天线座、馈源、馈线、跟踪接收机、驱动机柜、天线控制单元、监控计算机、标校塔等设备组成。天线系统的整体结构框图如图1所示。

天线系统仿真过程中,根据不同的需求,通常主要研究船载天线伺服系统和天线机械动力学结构。

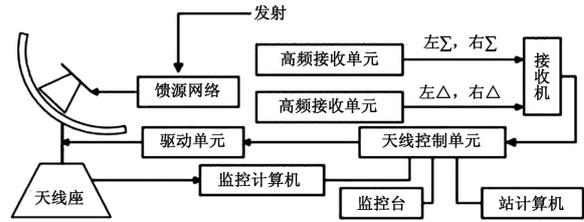


图1 船载天线系统原理框图

2.1 天线伺服系统原理

天线伺服系统主要包括天线驱动单元和天线控制系统。本文研究的天线伺服系统采用典型的三环控制模型,具有较高的测量精度和动态性能等特点^[7]。天线伺服系统的控制环路如图2所示,三环控制模型由内至外分别是电流环、速度环和位置环,陀螺环位于速度环与位置环之间。本文研究的某型天线伺服系统安装设备方位和俯仰采用的是双电机驱动,采用的电机是直流永磁电机。该型伺服系统分为方位、俯仰两个支路,由于两个支路的指标要求并不相同,在环路的参数选择上也有所不同。

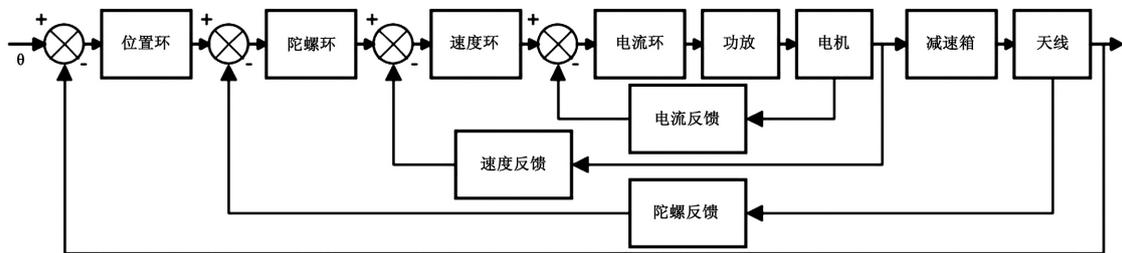


图2 天线伺服系统原理框图

2.2 天线机械结构

某型船载天线系统的整体机械结构如图3所示,天线系统机械结构主要是由天线、天线座体、安全保护装置以及一些附加的设备所组成。天线实际机械结构较为复杂且其特性及参数众多,但是模拟仿真中只关注其主要的机械机构和运动特性。因此,仿真模拟训练系统中采用将天线机械结构加以简化的方法,得到其简化模型,以提高仿真效率。

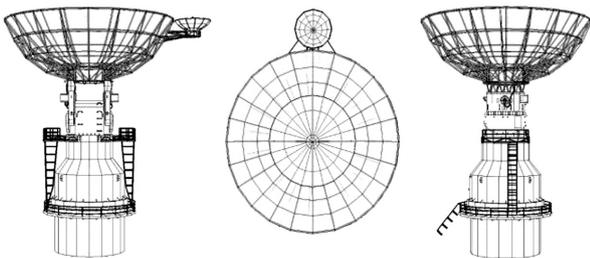


图3 天线机械结构三视图

3 天线伺服系统建模

3.1 伺服系统机理建模

伺服系统机理建模采用分级建模和仿真的原则和方法,按照系统结构框架由内至外的顺序进行了系统的数学传递函数建模。通过机理建模搭建的天线伺服系统模型符合实际系统的结构和原理。在仿真过程中,其内部结构明确,各控制环路参数能够实现灵活调整。

3.1.1 控制对象特性分析

控制对象是控制系统的重要组成部分。通过分析控制对象的特性,能够取得控制对象的数学模型,这是进行伺服系统分析的基础,也是伺服系统设计和建模的前提。

针对本文研究的天线伺服系统双电机驱动模型,在仿真模拟中,假设天线的转动惯量为集中惯量,天线的结构刚度集中在齿轮箱之上。并且,理想地认为系统不受齿轮箱齿隙以及电机和齿轮箱的摩擦等非线性因素的影响。双电机通过并联的方式驱动天线运转,为了使系统建模简单,将双电机系统进行简化,即双电机系统可以简化为一台电机。简化后的单电机驱动物理模型如图4所示。

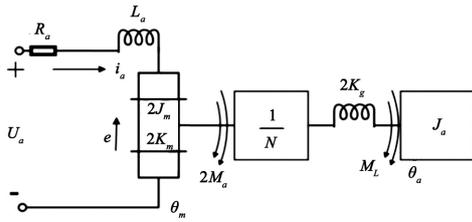


图4 简单位电机驱动物理模型

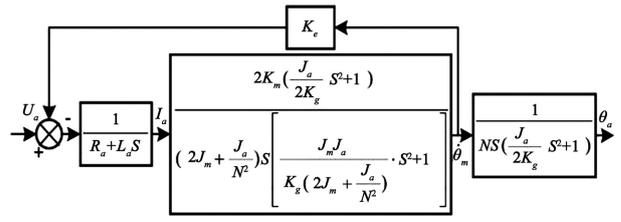


图5 天线系统控制对象框图

其中,参数含义如表1所示。

表1 模型参数含义

参数	含义
U_a	电机电枢端电压
i_a	电机电枢电流
R_a	电机电枢回路总电阻
L_a	电机电枢回路总电感
e	电机反电势
J_m	电机转动惯量
M_a	电机电磁力矩
$\theta_m, \dot{\theta}_m, \ddot{\theta}_m$	电机轴角位置、角速度和角加速度
N	齿轮箱变比
K_g	单链齿轮箱输出轴端等效刚度
J_a	天线转动惯量
M_L	齿轮箱输出轴端加速天线的力矩
$\theta_a, \dot{\theta}_a, \ddot{\theta}_a$	天线轴角位置、角速度和角加速度

根据简化后的单电机驱动物理模型,可以列出系统的运动微分方程,简化后能够得到系统的控制对象框图,如图5所示。

由于电流环对速度环控制对象的改造作用,环路中的反电势影响可以忽略不计。所以电流环的控制对象传递函数为式(1)

$$\frac{I_a}{U_a} = \frac{1}{R_a + L_a S} \quad (1)$$

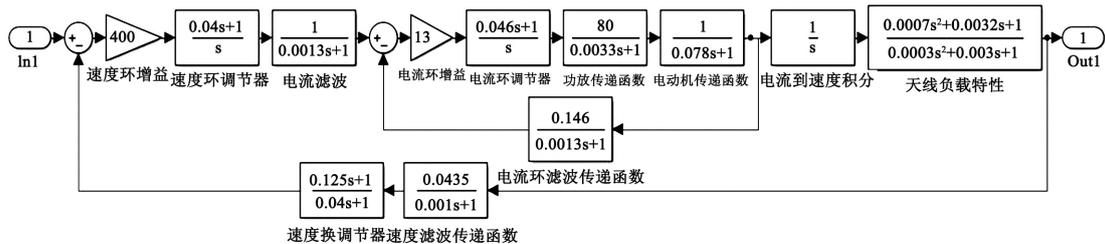


图7 速度环控制框图

电流环可以等效为一个小的惯量环节。速度环控制对象传递函数可以转化为式(2)

$$\frac{K_I}{T_i S + 1} \cdot W_m(s) = \frac{K_I}{T_i S + 1} \cdot \frac{K_m \left(\frac{J_a}{2K_g} S^2 + 1 \right)}{\left(J_m + \frac{J_a}{2N^2} \right) S \cdot \left[\frac{J_m J_a}{2K_g \left(J_m + \frac{J_a}{2N^2} \right)} S^2 + 1 \right]} \quad (2)$$

其中 T_i 为等效时间常数, K_I 为电流环闭环增益。

3.1.2 天线环路建模

根据相关的天线伺服系统设计先验知识可知天线伺服系统的电流环采用串联PI调节控制。按照天线控制对象的特性,结合天线伺服系统的相关系数和控制参数,在仿真环境下搭建了电流环的控制框图,如图6所示。

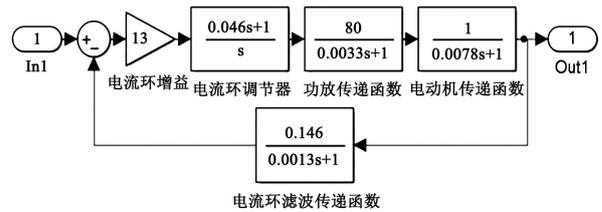


图6 天线系统电流环的控制框图

天线伺服系统的速度环采用并联PID调节控制,并且采用测速负反馈作为反馈回路。根据速度环的控制对象特性,结合天线伺服系统的相关控制参数,在仿真环境下搭建了速度环的控制框图,如图7所示。

天线三环控制系统的位置环的闭环是在天线控制单元 ACU 中实现的。天线伺服系统为了满足能够隔离船摇和适

应近距离目标跟踪的实际应用需求,设置了加舵与无舵、高带与低带的不同工作方式。由于这些工作方式只在系统控制参数上有所不同,对系统整体结构影响并不大,所以本文只选取其中较为典型的无舵高带方式进行建模和仿真的

说明。根据相关的天线伺服系统设计先验知识,天线伺服系统的位置环采用普通数字PID调节控制。本文结合天线伺服系统的相关控制参数,在仿真环境下搭建了位置环的控制框图,如图8所示。

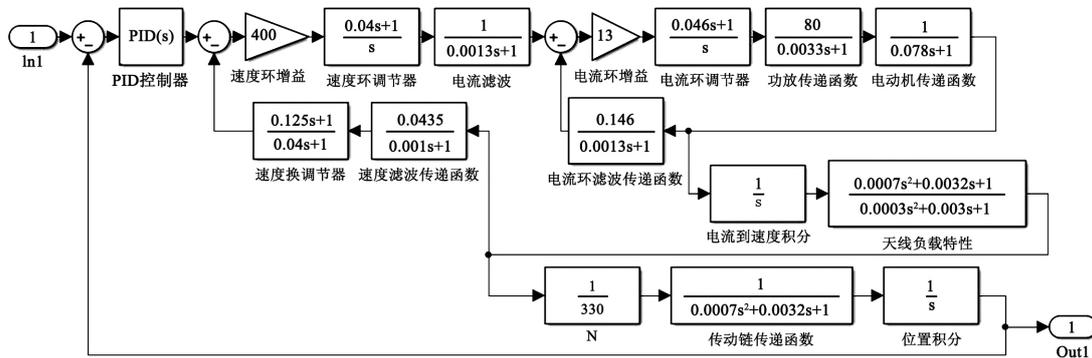


图8 位置环控制框图

3.2 伺服系统参数辨识

由于系统仿真模型与实际系统之间存在一定的差异,比如实际系统中的变量在仿真中会被离散化处理,这就导致了系统运行的输出与实际存在一定的误差。因此需要通过辨识的方法将模型中的参数进行辨识,以达到较好的仿真效果。

根据相关先验知识,结合天线伺服系统的初步模型,经分析可知,天线伺服系统的待辨识环节主要是天线负载特性传递函数以及天线传动链传递函数。根据机理搭建的天线伺服模型中,天线负载特性和天线传动链传递函数为式(3)

$$G_A(s) = \frac{0.0007s^2 + 0.0032s + 1}{0.0003s^2 + 0.003s + 1} \quad (3)$$

$$G_C(s) = \frac{1}{0.0007s^2 + 0.0032s + 1}$$

按照一定的仿真采样时间将传递函数离散化的到离散传递函数模型式(4)

$$G_A(z) = \frac{b_{A0}z^2 + b_{A1}z + b_{A2}}{z^2 + a_{A1}z + a_{A2}} = \frac{2.333z^2 - 4.651z + 2.321}{z^2 - 1.987z + 0.99} \quad (4)$$

$$G_C(z) = \frac{b_{C0}z^2 + b_{C1}z + b_{C2}}{z^2 + a_{C1}z + a_{C2}} = \frac{0.0007131z + 0.000712}{z^2 - 1.994z + 0.9954}$$

通过向系统中输入信号让系统进行稳定工作,等到系统稳定的时候加入干扰序列,之后通过定时采样非线性环节的输入输出数据,从而得到参数辨识中所需要的观测值序列。根据系统非线性环节的观测信号输出序列,利用递推最小二乘算法得到天线伺服系统非线性环节的参数值

$$\hat{\theta}_A = \begin{cases} a_{A1} = -1.9868 \\ a_{A2} = 0.9901 \\ b_{A0} = 2.3322 \\ b_{A1} = -4.6505 \\ b_{A2} = 2.3216 \end{cases} \quad \hat{\theta}_C = \begin{cases} a_{C1} = -1.9289 \\ a_{C2} = 0.9304 \\ b_{C0} = 0.00002 \\ b_{C1} = 0.000727 \\ b_{C2} = 0.000766 \end{cases} \quad (5)$$

4 天线动力学建模

根据实际需求,在仿真中对天线机械结构并不需要十分细化,因此在不影响天线整体结构和特性的前提下,为了提高仿真效率,缩短工程周期,可以对天线机械结构进行简化建模。由于仿真过程中,主要涉及到天线俯仰和方位的运动仿真,所以将天线结构按照其各自的运动特性,简化为天线底座、天线方位运动和天线俯仰运动三个部分如图9。

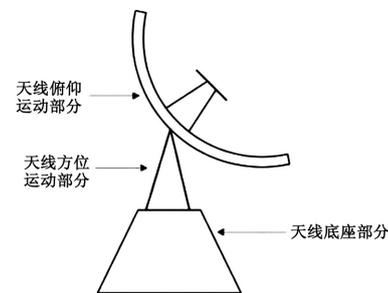


图9 天线机械简化模型

天线各动力学部分在受到天线伺服电机扭矩和外界因素(如重力、空气阻力等)的作用后,会产生包括方位和俯仰方向在内的各种运动。在实际系统中,天线机械结构在运动过程中会受到外界因素而产生形变。但是一般而言,这样的形变都比较轻微,所以在天线动力学建模过程中,各分块可以近似的通过刚体来模拟。刚体在运动过程中当受到作用

力或者扭矩等作用时,理想地认为其形状和大小保持不变,并且其内部结构也是保持不变。同时,天线各动力学分块之间相互关联,因此它们之间都存在一定的动力学运动关系。天线动力学分块间的连接关节本质上都是旋转关节,因此都可以通过铰链关节加以实现。

基于天线简化机械结构搭建的动力学模型如图 10 所示。其中,数字代表天线各动力学分块刚体,罗马数字代表分块间的关节。1 为天线底座分块,2 为天线方位运动部分,3 为天线俯仰运动部分;I 为天线底座与方位运动部分之间的连接关节,能够实现方位运动部分在 XOY 平面内绕着 Z 轴的旋转,II 为天线方位运动部分与俯仰运动部分之间的连接关节,能够实现天线俯仰运动部分在天线方位运动部分的相对坐标系 X'O'Z' 中绕 Y' 轴的旋转。

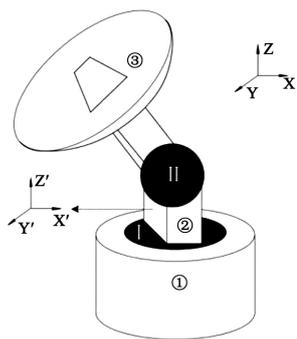


图 10 天线动力学模型

5 仿真分析

对于天线系统的仿真模型,首先通过 MATLAB Simulink 仿真环境验证了其伺服系统机理模型,然后利用实测数据验证了辨识得到的相关参数,之后通过 MATLAB 的模型代码功能将伺服系统机理模型添加到 LabVIEW 之中。同时,在三维引擎 Unity 3D 环境下搭建了天线动力学模型并配置了相关参数。最后对伺服系统模型与天线动力学模型在 LabVIEW 与 Unity 3D 的联合仿真环境下进行了仿真验证。

利用仿真软件对天线伺服各环节进行阶跃响应分析,得到如图 11 所示的阶跃响应曲线。

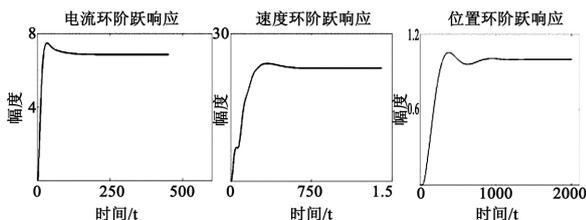


图 11 各环路阶跃响应曲线

电流环的阶跃响应的超调量为 9.28%,上升时间约为 13ms;速度环的阶跃响应的超调量为 7.08%,上升时间约为

160ms;位置环的阶跃响应的超调量为 5.38%,上升时间约为 180ms。上述指标与实际系统状态相符。

将天线伺服系统辨识得到的参数与真实值比较,得到如表 2 所示结果:

表 2 参数辨识结果

参数	真值	辨识值	误差(%)
a_{A1}	-1.9870	-1.9868	0.01
a_{A2}	0.9900	0.9901	0.01
b_{A0}	2.3330	2.3322	0.03
b_{A1}	-4.6510	-4.6505	0.01
b_{A2}	2.3210	2.3216	0.03
a_{C1}	-1.9940	-1.9289	3.26
a_{C2}	0.9954	0.9304	6.53

根据辨识天线伺服系统得到的相关非线性环节参数值,重新代入模型中,得到辨识后的天线伺服系统数学模型,对该数学模型进行脉冲响应分析,与机理模型系统脉冲响应作比较分析,如图 12 所示。

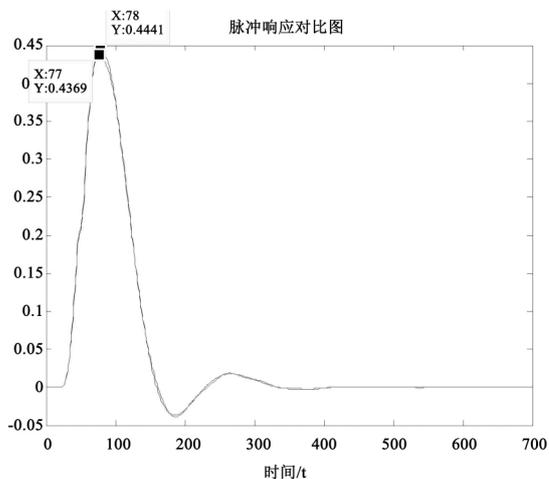


图 12 系统脉冲响应对比

通过与机理模型系统脉冲响应作比较分析可知,响应曲线的幅值也稍微低于机理模型系统,后面逐渐和机理模型曲线重合。通过参数比较不难发现,辨识出的参数与原系统机理模型的各项参数在数值上非常接近,各个参数的误差都在 10% 以内。

将天线伺服系统模型的天线方位和俯仰指向输出作为天线动力学模型的运动控制输入信号,在三维引擎 Unity 3D 下搭建出天线三维模型并根据天线动力学模型设置其属性和配置各项参数,利用 Unity 3D 的脚本功能驱动天线运动,最终模拟出天线运动的状态,天线运动三维效果与实际天线设备状态基本相符,如图 13 所示。

(下转第 25 页)

参考文献:

- [1] 雷宇曜,等. 海军要地防空作战任务及威胁分析[C]. 2013 中国指挥控制大会论文集,北京:中国指挥与控制学会,2013:401-404.
- [2] 徐品高. 三道防线是防空领域的重大军事变革[J]. 现代防御技术,2004,32(5):1-7.
- [3] 徐宇茹,龚伟,姜文志. 基于 OODA 过程的岛礁防空 CGF 模型[J]. 海军航空工程学院学报,2015,30(1):83-86.
- [4] 隋江波,孙学锋,朱良明. 海军要地防空多武器系统协同作战[J]. 指挥控制与仿真,2015,37(6):78-81.
- [5] 李永刚. 舰艇编队防空防御队形优化配置模型[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术,2004,26(4):65-67.
- [6] 刘兵,李相民. 舰艇编队协同反导队形配置优化研究[J]. 现代防御技术,2014,42(6):59-65.
- [7] 姜鲁东,孙建华,余家祥. 舰艇护航编队防空队形配置方法研究[J]. 舰船电子工程,2014,34(2):19-21.
- [8] 粘松雷,陈榕,林云. 编队区域防空舰配置距离模型仿真[J]. 兵工自动化,2011,30(11):39-42.
- [9] 朴成日,沈治河. 航母编队防空哨戒舰阵位配置方法[J]. 舰船科学技术,2013,35(5):128-133.
- [10] 姜辉,等. 航母编队防空舰阵位配置优化研究[J]. 兵工自动化,2014,33(4):1-4.
- [11] 刘志强. 未来近海防御对防空导弹巡逻艇的需求[J]. 现代防御技术,2001,29(2):16-18.

- [12] 徐品高. 现代防空体系对防空导弹的需求分析[J]. 现代防御技术,2002,30(5):1-8.
- [13] 刘健. 地空导弹营离保卫目标配置距离确定方法[J]. 弹箭与制导学报,2006,26(2):1196-1197.
- [14] 张小东,方立恭. 舰空导弹杀伤区目标最大航路捷径对水面舰艇编队防空的影响[J]. 战术导弹技术,2011,(5):19-22.
- [15] 马拴柱,刘飞. 地空导弹射击学[M]. 西安:西北工业大学出版社,2012:262-264.
- [16] 赵建印,刘芳. 海上编队双舰防空队形部署优化研究[J]. 兵工学报,2010,31(6):865-869.
- [17] 沈治河,杜一平. 关于水面舰艇防空队形的研究[J]. 海军大连舰艇学院学报,1996,19(3):17-19.

[作者简介]



马新星(1983-)男(汉族),江苏省如皋市人,博士研究生,主要研究领域为精确制导、作战仿真;
滕克难(1962-)男(汉族),山东省济南市人,教授,博士研究生导师,主要研究领域为武器装备发展论证;

代进进(1984-)男(汉族),湖北省天门市人,讲师,博士,研究方向为武器装备与作战指挥一体化技术。

(上接第 20 页)

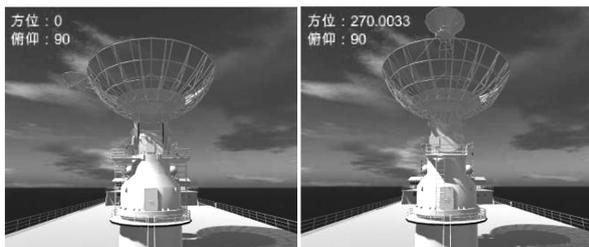


图 13 天线运动效果图

6 结论

本文通过将天线伺服系统机理建模和天线动力学建模相结合的方法建立了天线系统的整体仿真模型。在伺服系统建模过程中,不仅通过利用已有的先验知识进行了机理建模,同时还采用基于数据的模型辨识方法将得到的机理模型进行优化,从而提高了模型与实际系统的拟真程度。

参考文献:

- [1] 刘鹏,姜国华,刘玉庆. 航天员虚拟训练系统评估指标研究[J]. 计算机仿真,2017,34(7):363-368.
- [2] 魏雪梅. 超大型全可动反射面天线近似动力学模型的建立[D]. 西安电子科技大学,2014.

- [3] 崔凤鸣. 雷达伺服系统非线性动力学仿真[D]. 西安电子科技大学,2010.
- [4] 汪正龙. 某雷达结构的模型简化方法研究[J]. 机械工程师,2014-6:112-114.
- [5] D Qiu, et al. Practical Wind-Disturbance Rejection for Large Deep Space Observatory Antenna[J]. IEEE Transaction on Control system technology. 2014,22(5):1983-1990.
- [6] 薛晓东. 建模方法综述[J]. 科技情报开发与经济,2009,19(16):169-171.
- [7] 蒲迎英,等. 统一微波测控系统测角分系统讲义[M]. 电子工业部第三十九研究所,1996.

[作者简介]



薛佳盛(1993-)男(汉族),江苏苏州人,硕士研究生,研究方向为系统仿真、控制理论与控制工程;

厉刚(1978-)男(汉族),江苏徐州人,研究方向为计算机仿真、电路仿真、单片机仿真;

单梁(1979-)男(汉族),江苏南通人,博士,副教授,主要研究方向为非线性混沌系统、伺服系统的智能控制;
苏智勇(1981-)男(汉族),江苏泰州人,博士,副教授,主要研究方向为计算机视觉、图像视频处理、计算机图形学。