

射频仿真目标回波的天线方向图调制方法

徐海 崔连虎

(中国人民解放军 91336 部队 秦皇岛 066326)

摘要:针对雷达制导射频半实物仿真试验系统目标回波模拟逼真度问题,分析了传统做法中未考虑雷达天线方向图的目标回波模拟方法的弊端。采取利用雷达天线方向图调制目标回波功率的方法,对仿真试验系统的回波功率控制算法进行改进,实现了更为真实的目标回波功率变化模拟。仿真结果证明,该方法有效解决了未制导雷达半实物仿真试验过程中,特别是在多目标的环境下频繁出现的副瓣跟踪问题,大大提高了射频半实物仿真系统仿真结果的可信度。

关键词:天线方向图;雷达制导;回波模拟;射频仿真;半实物仿真

中图分类号: TJ765.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1040

Method of target echo modulated by antenna pattern in RF simulation system

Xu Hai Cui Lianhu

(91336 unit of the PLA, Qinhuangdao 066326, China)

Abstract: Aims at the target echo simulation fidelity issues of Radar-guided radio frequency hardware in the loop simulation test system, the defects of the traditional approach does not take into account antenna pattern of radar echo simulation are analyzed. Target echo power is modulated by the radar antenna pattern and control algorithm of the simulation test system is improved, a more realistic simulation of target echo power change is realized. Simulation results shows that the method effectively solves the side lobes tracking problem during the test, particularly in the multiple targets situation, the credibility of simulation results is greatly improved.

Keywords: antenna pattern; radar guidance; target echo modeling; RF simulation; HWILS

1 引言

射频半实物仿真试验与数字仿真试验手段相比,由于有了实物的参与,且目标回波及干扰信号经过空间实际辐射产生,消除了复杂建模带来的仿真结果可信度降低的影响;而与外场试验相比,半实物仿真具有环境可控、样本量大、安全保密性强、效费比高等优点。因此,射频半实物仿真在雷达制导导弹的研制测试及试验鉴定中的地位 and 作用发挥越来越突出,并已经得到了广泛的应用。

然而,随着射频仿真应用的不断深入,各类型的试验对仿真结果的可信度要求也不断提高,特别是面向未来的作战试验应用需求,传统的忽略细节、单纯的跑流程式的仿真试验已经远远不能满足要求。因此,对于射频半实物仿真系统而言,也不再仅仅要求其试验回路可以闭环,还要求其对于目标以及干扰信号具有更加精细化的模拟,尽可能地接近外场实际辐射环境。而在射频仿真系统对目标

回波的模拟中,普遍重视对目标特性的研究,往往忽视了未制导雷达天线搜索过程带来的回波功率变化,导致仿真结果与外场实际情况差异较大。本文从未制导雷达天线方向图与目标回波模拟之间的关系入手,将天线方向图的影响叠加到目标回波功率的控制上,通过对目标回波模拟功率变化控制算法的改进,以较小的代价提高半实物仿真试验系统对目标模拟的逼真度。

2 射频仿真原理及回波模拟问题分析

2.1 射频仿真基本原理

导弹制导射频半实物仿真试验系统主要由微波暗室、指挥控制系统、目标模拟系统、试验转台、仿真计算机、接口及数据采集设备、数据库以及通信网络等组成。其中,目标模拟系统是整个射频半实物仿真系统中最关键、最复杂、也是难度最大的部分,主要由射频信号生成系统、阵列馈电系统以及目标阵列组成。在仿真过程中,未制导雷达

收稿日期:2017-03

发射的射频信号通过空间辐射或者注入的方式,作为射频信号生成系统的激励信号,射频信号生成系统对接收到的激励信号进行存储转发,并对信号的距离延时信息、多普勒频率信息、幅度变化信息等进行调制,再经由阵列馈电系统控制角度变化信息并通过目标阵列向微波暗室中进行辐射,最后被末制导雷达接收,从而为末制导雷达模拟出目标的回波信息,实现末制导雷达对目标搜索跟踪的射频半实物仿真^[1-5]。图1所示为射频仿真的基本原理(重点突出目标模拟系统原理,部分环节已经略去)。

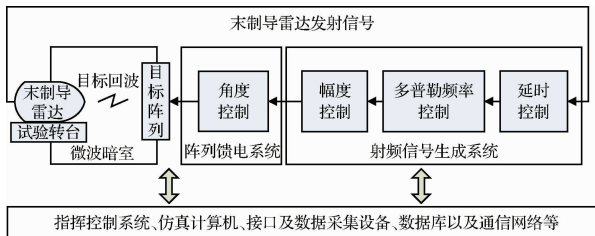


图1 射频仿真基本原理

2.2 天线方向图对目标回波模拟影响分析

基于上述射频仿真的基本原理,仿真系统模拟产生的目标回波,其功率主要是利用雷达方程,根据需要模拟的目标实际距离(弹目距离)进行计算并折算到内场条件进行等效,其实现方法已经十分成熟,在文献[6]中也有所阐述,在此不作赘述。然而,这种单纯的依靠距离进行回波模拟功率解算的方法,在仿真过程中,与真实的末制导雷达搜索过程存在着较大的差异。

末制导雷达多采用单脉冲测角体制,其天线的波束是具有一定宽度的,末制导雷达在角度上的搜索过程实际上就是波束的搜索过程,只有在雷达波束照射到目标时,目标才会产生回波,并被雷达接收,如图2所示。

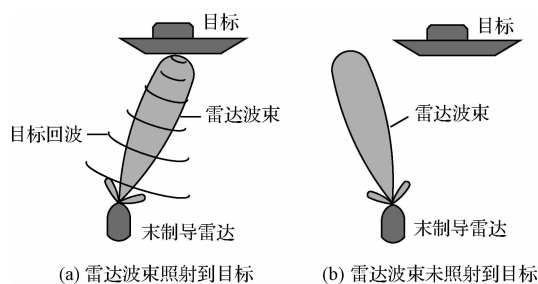


图2 真实情况下的目标回波

然而在仿真系统中,往往没有考虑到波束宽度这一要素,即没有考虑到天线方向图对回波功率模拟的影响。在末制导雷达的搜索过程中,仍单纯采用距离解算的功率结果进行回波模拟,这就会导致无论雷达波束是否照射到目标,仿真系统始终会依据目标距离产生一定功率的目标回波,如图3所示。

从图2和3中可以看出,仿真系统模拟的目标回波与真实情况存在着较大的差异。在仿真系统中,由于目标回

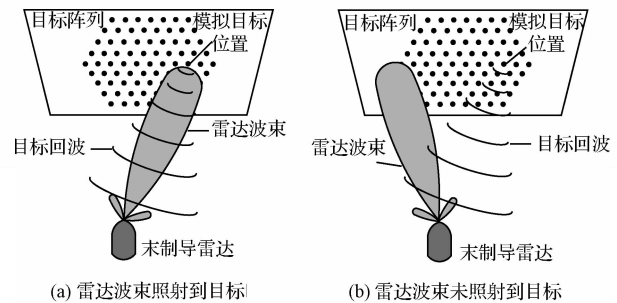


图3 仿真系统模拟的目标回波

波的始终存在,导致了按照雷达主瓣解算生成的目标回波能量会从雷达天线的副瓣进入并被雷达接收,因此容易产生目标的增批现象,严重时还会出现副瓣跟踪,使雷达跟踪角度出现错误。特别是在进行多目标以及箔条质心干扰试验中,受副瓣进入的能量影响,极易产生错误的质心跟踪结果,严重影响了仿真系统的可信度,甚至导致在某些战情想定下仿真结果完全不可用^[7-9]。因此,射频仿真系统在目标回波模拟上的这一问题必须得到重视并加以解决。

3 目标回波的天线方向图调制方法

由于仿真系统的特性,目标回波并非由目标实际的反射生成,上述问题的产生,归根结底是目标回波功率的变化问题。因此要解决该问题,需要从仿真系统的目标回波生成入手,将末制导雷达天线的搜索过程映射到仿真系统并利用其对模拟的目标回波功率进行控制^[10-11]。

3.1 目标回波模拟

由2.2节的分析不难发现,假设目标距离不变,当末制导雷达天线波束正好照射到目标时,即天线的主波束的最大增益处对准目标时,目标的回波功率达到最大值,设此时通过射频信号生成系统解算出的目标回波功率为 P_{max} ,在射频仿真系统中 P_{max} 通常解算为用dB表示的到达末制导雷达天线口面处的功率。按照传统的不考虑天线方向图的方法,仅仅将目标的距离变化当作变量,而将末制导雷达天线的增益 G 当作固定值来处理。据此,只要目标距离不发生变化,解算出的回波功率就始终为 P_{max} 。这样,虽然在对单个目标的稳定跟踪状态下,目标回波功率的模拟是正确的,即为 P_{max} ;但是在雷达的搜索状态下,则无法体现出天线“增益”的变化,即无法体现出目标回波功率随着天线指向的变化而变化的过程,所以才会导致2.2节中问题的发生。因此,在仿真系统中计算目标回波功率时,有必要将末制导雷达天线的增益看作随着搜索过程而变化的变量来进行处理,即要考虑天线方向图的影响。

3.2 天线方向图

以单平面工作的末制导雷达为例,通常采用振幅等信号法测角的方式,利用两个相同而且彼此部分重叠的波束合成和、差两路波束,以完成对目标角度的测量,其中与目

标回波功率相关的是和波束,代表着天线的方向性,是本文重点研究的对象。天线的方向性可用其方向性函数或根据方向性函数画出的方向图表示,由于天线的方向性函数较为复杂,为便于工程计算,常用一些简单的函数来近似,如余弦函数、高斯函数以及辛格函数等,也可以采用实测天线方向图进行更为真实的模拟。天线方向图^[12-14]的主要技术指标是半功率波束宽度以及副瓣电平,在常用的函数中,辛格函数可同时为主瓣和副瓣进行较好的描述。因此,认为末制导雷达的和波束天线方向图的变化规律近似符合辛格函数,见式(1),可以其为基础通过拟合的方式对天线方向图进行模拟。

$$F(\theta) \approx \frac{\sin\theta}{\theta} \quad (1)$$

3.3 目标回波的天线方向图调制

在射频仿真系统中,对目标回波功率的控制主要是由射频信号生成系统完成的,回波功率的解算主要是依赖软件算法,再通过程控衰减器实现。因此只要对射频信号生成系统中的相关软件算法进行改造即可实现对目标回波的天线方向图调制。即,需要在原有算法计算得出的 P_{\max} 基础上进一步考虑天线的功率方向图 $G(\theta)$ (单位为 dB),从而得到通过天线方向图调制后的目标回波功率 $P_{\theta} = P_{\max} + G(\theta)$, 这样只需把重点放在对 $G(\theta)$ 的求解上,对原有系统的改动最小。

如采用实测天线方向图,只需将实测天线方向图数据以查表的方式在仿真过程中对 $G(\theta)$ 进行赋值即可,在此不作详细阐述。

用辛格函数对天线方向图进行模拟,其重点是要尽可能真实的体现出被模拟的天线方向图的半功率波束宽度以及第一副瓣电平,因此可采用分段拟合的方法。

设在仿真过程中,经过弹目相对空间位置关系解算得到了目标相对天线指向的夹角为 θ , 天线半功率波束宽度为 $\theta_{0.5}$, k 为拟合系数,因此当 $\theta = \theta_{0.5}/2$ 时,式(1)的值应该为其最大值的 $\sqrt{2}/2$ 倍^[15],即:

$$\frac{\sin\left(k \frac{\theta_{0.5}}{2}\right)}{k \frac{\theta_{0.5}}{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (2)$$

求解式(2)得出 $k \approx 2.7831/\theta_{0.5}$, 所以处于半功率波束宽度范围内时,天线功率方向图函数表示为:

$$G(\theta) = 10\log_{10} \frac{\sin^2(k\theta)}{(k\theta)^2} = 10\log_{10} \frac{\sin^2\left(2.7831 \frac{\theta}{\theta_{0.5}}\right)}{\left(2.7831 \frac{\theta}{\theta_{0.5}}\right)^2} \quad (3)$$

同理,设天线波束零功率宽度为 θ_0 , 第一副瓣位置为 θ_{L1} , 第一副瓣电平为 L_{L1} (单位为 dB), 以辛格函数为基础进行拟合,可分别得到半功率波束宽度到零功率波束宽度以及第一副瓣以后的天线功率方向图函数,最后得到天线功率方向图函数 $G(\theta)$ 为:

$$G(\theta) = \begin{cases} 10\log_{10} \frac{\sin^2\left(2.7831 \frac{\theta}{\theta_{0.5}}\right)}{\left(2.7831 \frac{\theta}{\theta_{0.5}}\right)^2}, & \theta \in \left[0, \frac{\theta_{0.5}}{2}\right] \\ 10\log_{10} \frac{\sin^2\left(2\pi \frac{\theta}{\theta_0}\right)\theta_{0.5}^2}{8\sin^2\left(\pi \frac{\theta_{0.5}}{\theta_0}\right)\theta^2}, & \theta \in \left(\frac{\theta_{0.5}}{2}, \frac{\theta_0}{2}\right] \\ -0.754L_{L1} \log_{10} \frac{\sin^2\left(1.43 \frac{\theta}{\theta_{L1}}\right)}{\left(1.43 \frac{\theta}{\theta_{L1}}\right)^2}, & \theta \in \left(\frac{\theta_0}{2}, \pi\right] \end{cases} \quad (4)$$

在仿真过程中,只需要根据被试末制导雷达天线的基本参数进行设定,并实时获取末制导雷达的天线框架角参与解算,利用式(4)即可解算出更为真实的目标回波功率。同样,对于双平面雷达也可用类似方法进行拟合。

4 仿真实验

根据式(4)对射频仿真系统中的射频信号生成系统软件代码进行改造,用某型末制导雷达模拟器并开展半实物仿真试验验证。假设被试末制导雷达天线的半功率波束宽度为 4° , 零功率波束宽度为 8° , 第一副瓣位置为 6° , 第一副瓣电平为 -20 dB, 设置单目标闭环仿真试验态势,模拟导弹向目标逼近过程中的开机搜索及跟踪全过程,并增加噪声压制干扰,以延长末制导雷达的搜索时间,便于验证。分别记录改造前后射频仿真系统生成的目标回波功率进行比对。图4所示为根据上述末制导雷达天线的基本参数利用式(4)拟合出的天线方向图,图5所示为仿真系统改造前后目标回波功率随着弹目逼近仿真过程的变化曲线对比。

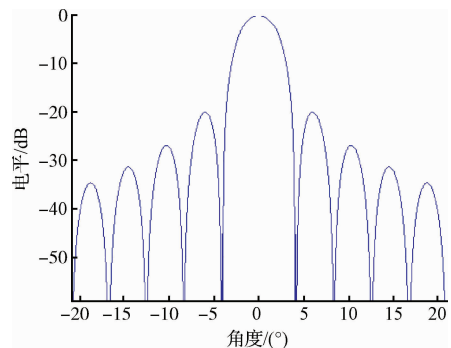


图4 利用天线基本参数拟合的天线方向

可见,在改造前目标回波功率只随着弹目距离的变化而变化,不能体现出末制导雷达的搜索过程;改造后目标回波功率在受弹目距离影响的同时,在搜索过程中还受到天线波束扫描位置变化的影响,其曲线能够较为近似的反映出天线方向图的实际形状。仿真结果证明,该方法能够利用天线方向图的关键参数并实时根据天线波束的扫描位置对射频仿真系统目标回波功率进行有效的调制,使目标回波功率的模拟更加真实可靠。

(下转第37页)

方法及其测量不确定度评定[J]. 中国计量, 2009(7): 93-95.

- [16] 朱建荣, 胡学刚. 大螺距螺纹及多头螺纹的检测方法探讨[J]. 工业计量, 2017(2): 25-28.
- [17] 仇谷烽, 余景池, 黄启泰, 等. 接触式三坐标测量自由曲面轮廓的数据处理模型[J]. 光学精密工程, 2013(11): 2813-2820.
- [18] 欧协峰. 螺纹检测技术的发展趋势[J]. 中国计量, 2014(1): 68-70.
- [19] 刘力岩, 郎景梅, 刘琦, 等. 基于轮廓扫描法的螺纹测

量功能的实现[J]. 机械工程, 2009(8): 142-143.

- [20] 潘芳煜, 白跃伟, 聂黎, 等. 三坐标测量机几何误差的建模及测量[J]. 上海第二工业大学学报, 2017(1): 37-42.

作者简介

张欣, 1983年出生, 天津大学工程硕士, 天津市计量监督检测科学研究院工程师, 主要从事几何量计量工作.
E-mail: tjilyzhangxin@126.com

(上接第33页)

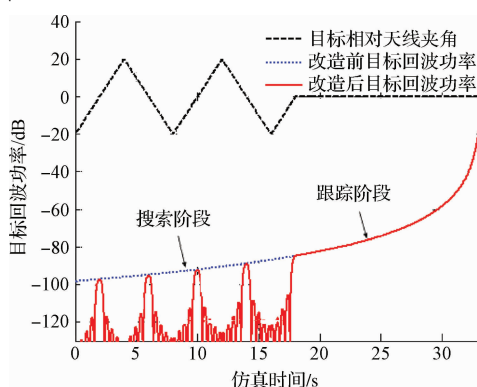


图5 改造前后目标回波功率变化曲线对比

5 结论

随着雷达制导射频仿真试验系统应用的不断深入, 原本粗放式的信号模拟方法已经无法满足贴近实战仿真任务的需求, 对电磁环境的细微特征逼真模拟将是射频仿真系统不断追求的目标。本文从半实物仿真实践中发现的末制导雷达目标增批、副瓣跟踪问题入手, 找到了产生该问题的根本原因, 并采取辛格函数分段拟合的方法, 利用末制导雷达天线方向图对目标回波功率解算进行了调制, 实现了更为真实的目标回波功率变化过程模拟。实践证明, 该方法可有效的解决雷达制导射频半实物仿真过程中的目标增批以及副瓣跟踪问题, 特别是在抗干扰试验过程中, 能够更为真实的体现出干信比的变化过程, 大大地提高了仿真结果的可信度, 并具有较强的通用性。同时, 该方法也可用于通过功率控制消除由于近场效应带来的阵列天线方向图的主瓣展宽、副瓣抬升现象, 用以提升仿真系统对有源干扰模拟的逼真度。

参考文献

- [1] 顾振杰, 刘宇. 射频仿真系统目标模拟关键技术研究[J]. 雷达与对抗, 2010, 30(4): 5-8.
- [2] 任明秋, 革革新, 朱勇, 等. 复杂电磁环境下雷达抗干

扰性能测试方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 35(6): 1277-1282.

- [3] 顾振杰. 反舰导弹导引头仿真试验电磁环境模拟方法研究[J]. 雷达与对抗, 2015, 35(3): 8-11.
- [4] 王永青. 基于DRFM的雷达目标回波信号模拟器设计[J]. 电子信息与计算机科学, 2014, (6): 9-11.
- [5] 赵立, 谢军伟, 盛川. 基于数字射频存储的雷达干扰环境仿真[J]. 计算机仿真, 2014, 31(10): 35-39.
- [6] 刘宇, 顾振杰. 阵列式射频仿真系统中目标特性仿真与实现[J]. 火控雷达技术, 2013, 42(3): 52-56.
- [7] 曲长文, 李亚南. 箔条对毫米波末制导雷达波束的切割效应研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(2): 356-360.
- [8] 李华, 周建江, 龚树凤, 等. 阵列式半实物射频仿真系统误差建模与分析[J]. 现代雷达, 2013, 35(6): 77-81.
- [9] 刘宇, 顾振杰, 孙志朋. 阵列式射频仿真系统中箔条运动模型研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(3): 513-516.
- [10] 刘宇, 李亭, 顾振杰. 阵列式射频仿真系统中目标全极化回波模拟方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(1): 33-38.
- [11] 倪虹, 路军杰, 倪汉昌. 射频仿真系统天线阵设计方案评述[J]. 战术导弹技术, 2010, (4): 104-109.
- [12] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春, 等. 雷达原理[M]. 第四版, 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [13] 刘兴明, 沈建锋, 杨大鹏. 单脉冲雷达天线方向图的BP神经网络建模[J]. 计算机仿真, 2007, 24(8): 133-136.
- [14] 郭琳. 射频雷达模拟器天线方向图的实现[J]. 中国科技信息, 2012(3): 97-98.
- [15] 陈志杰, 李永祯, 戴幻尧, 等. 相控阵天线方向图的建模与实时仿真方法[J]. 计算机仿真, 2011, 28(3): 31-35.

作者简介

徐海, 1978年出生, 本科、工程师, 主要研究方向为导弹武器系统仿真。
E-mail: xuhai_td@163.com