

具有天线扫描特性的雷达信号算法设计与实现^{*}

高训兵

(中国电子科技集团第四十一研究所 青岛 266555)

摘要:在暗室中,搭建雷达导引头抗干扰性能测试所需的复杂电磁环境具有一定难度,其中目标雷达发射信号的产生尤其困难;对此提出了一种具有天线扫描特性的雷达发射信号产生算法。首先,分析了雷达天线方向图类型和天线扫描方式,并建立了对应数学模型;其次,将建立的数学模型与雷达方程结合,提出了雷达发射信号功率计算方法;最后,以该算法为基础开发雷达信号模拟软件,并借助于矢量信号发生器生成具有天线扫描特性的雷达发射信号。测试结果表明,该算法产生的雷达信号具有天线扫描的特性,为暗室环境下导引头抗干扰性能的测试提供了信号保障。

关键词:雷达信号模拟;天线模型;虚拟仪器

中图分类号: TP301.6 TN955+.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.1040

Design and implementation of the algorithm of radar signal with the characteristic of antenna scanning

Gao Xunbing

(The 41st Institute of CETC, Qingdao 266555, China)

Abstract: In the dark room, It is difficult to build complex electromagnetic environment to test the performance of radar seeker anti-interference, especially producing the target radar signal with the antenna scanning features; In this paper, the algorithm of radar signal with the antenna scanning features was proposed. First, the radar antenna pattern types and the antenna scanning mode were analyzed, and the corresponding mathematical models were built; Second, the mathematical models and radar equation were combined to put forward the radar signal power calculation method; Finally, based on the method the radar signal simulation software was developed, and the radar signal was generated by vector signal generator. The test shows that signal has the feature of antenna scanning and provides protection for testing the radar seeker anti-interference in the darkroom.

Keywords: radar signal simulation; antenna model; virtual instrument

1 引言

被动雷达导引头在研制过程中,需要对导引头雷达抗干扰性能进行测试^[1],在测试过程中具有天线扫描特性的雷达发射信号是导引头性能测试的关键^[2];对此,金朝等人^[3]介绍了雷达新能外场测试方法,但由于受到场地和电磁环境的限制,造成外场测试周期过长,所需设备数量较多,测试费用过高;郭金良等人^[4]利用数字仿真模型模拟战场态势,开发了雷达对抗作战推演平台,并进行了仿真实验分析,但仿真得到的实验结果无法反应雷达的真实性能;任明秋等人^[5]提出了一种基于指标计算模型的半实物仿真系统的测试方法,该方法可用于暗室环境下小型化测

试,且可产生干扰信号,但缺少雷达目标信号的产生。

针对目前导引头雷达抗干扰性能测试中雷达发射信号获取困难问题,提出了一种具有天线扫描特性的雷达发射信号产生算法,并基于虚拟仪器开发雷达信号模拟软件,该软件与矢量信号发生器组成雷达信号模拟器,产生雷达发射信号,最后通过对产生的信号进行测试,证明了算法的正确性。

2 雷达天线模型

天线是任何雷达不可缺少的一部分,雷达信号与雷达天线密切相关^[6],为保证雷达信号模拟的真实性,从模拟信号的样式和信号功率两方面建模将天线模型分为天线

收稿日期:2017-03

^{*} 基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ200607)资助

方向图模型和天线运动模型两部分。

2.1 天线方向图模型

天线方向图主要影响雷达的信号幅度样式,本文对常用的 Sinc 型和高斯型天线方向图^[7]分别进行建模。

Sinc 型天线方向图数学模型如下:

$$F(\theta) = \text{Sinc}\left(2\pi\frac{\theta}{\theta_{0.5}}\right) \quad (1)$$

式中: $\theta_{0.5}$ 为半功率波束宽度, θ 为目标与天线轴之间的夹角。Sinc 型天线方向图如图 1 所示。

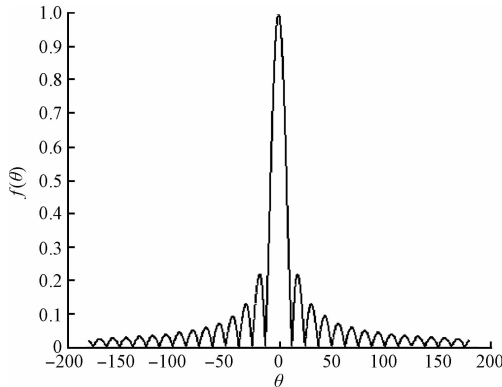


图 1 Sinc 型天线方向图

高斯型天线方向图数学模型如下:

$$F(\theta) = \exp\left(-1.4\frac{\theta^2}{\theta_{0.5}^2}\right) \quad (2)$$

式中: $\theta_{0.5}$ 为半功率波束宽度, θ 为目标与天线轴之间的夹角。高斯型天线方向图如图 2 所示。

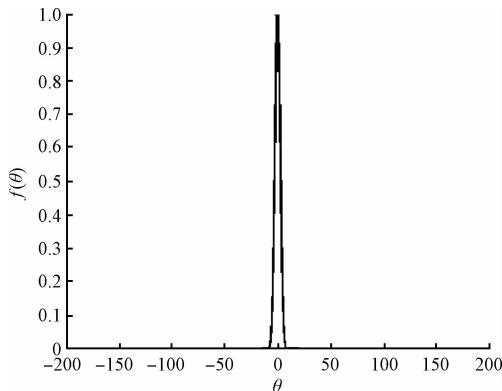


图 2 高斯型天线方向图

2.2 天线运动模型

天线运动模型,指雷达天线的扫描样式,反应雷达天线在方位和俯仰两个维度^[8]上相对于导引头位置变化情况;天线运动模型影响雷达模拟信号幅度大小。本文对雷达天线圆周扫描、扇扫描、圆锥扫描和螺旋扫描 4 种不同机械扫描^[9]方式分别建立模型。

圆周扫描指波束在水平面内做 360°圆周运动,俯仰角保持不变,圆周扫描在一个周期内的方位角和俯仰角的数学模型为:

$$azi(t) = 2\pi ft + azi_0 \quad (3)$$

$$ele(t) = ele_0 \quad (4)$$

式中: f 为天线扫描频率, t 为天线扫描时间, azi_0 为天线初始化方位角, ele_0 为天线初始俯仰角。

扇扫描指天线在一个扫描周期内来回扫过一个扇形区域,方位角在一定的范围内变化,而俯仰角保持不变。扇扫描在一个周期内方位角和俯仰角变化的数学模型如下:

$$azi(t) = \begin{cases} 2\pi ft + azi_0, & 0 \leq t \leq t_1 \\ azi_{\max} - 2\pi f_{azi}(t - t_1), & t_1 \leq t \leq t_1 + \frac{T}{2} \\ azi_{\min} + 2\pi f_{azi}\left(t - t_1 - \frac{T}{2}\right), & t_1 + \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases} \quad (5)$$

$$ele(t) = ele_0 \quad (6)$$

式中: t_1 为天线方位角从初始方位角扫描到最大方位角的时间, T 为天线扫描一个周期的时间, azi_{\min} 、 azi_{\max} 分别表示扇扫描的最小方位角和最大方位角。

圆锥扫描指天线扫描时形成一个圆锥,起锥角固定不变,随着时间的变化天线在圆锥表面做周期性扫描。为方便计算,本位以天线旋转轴为左边系,建立方位角和俯仰角数学模型如下:

$$azi(t) = \theta \cos(2\pi ft + azi_0) \quad (7)$$

$$ele(t) = \theta \cos(2\pi ft + ele_0) \quad (8)$$

式中: θ 为波束偏角, f 为天线扫描频率。

螺旋扫描指天线方位角作圆周性快扫,俯仰角做步进性慢扫^[10];建立的螺旋扫描时的方位角和俯仰角随时间变化的数学模型如下:

$$azi(t) = 2\pi f_{azi}t + azi_0 \quad (9)$$

$$ele(t) = \begin{cases} 2\pi f_{ele}t + ele_0, & 0 \leq t \leq t_1 \\ 2\pi f_{ele}(t - t_1) + ele_{\min}, & t_1 \leq t \leq T \end{cases} \quad (10)$$

式中: t_1 为天线从初始俯仰角扫描到最大俯仰角时间, T 表示天线从最小俯仰角扫描到最大俯仰角的时间。 f_{azi} 表示天线方位角扫描频率。 f_{ele} 为天线俯仰角扫描频率, ele_{\min} 为天线扫描最小俯仰角。

3 算法设计与实现

根据雷达方程基本公式^[11]的推导可知,导引头端接收的信号功率 P 为:

$$P = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \quad (11)$$

式中: P_t 表示雷达发射信号功率, G_t 表示雷达发射天线增益, R 表示导引头与雷达之间的距离。

其中,雷达信号发射功率对导引头接收信号功率影响为固定值,而雷达发射天线增益和导引头与雷达之间的距离变化是造成导引头接收信号功率变化的主要因素。

雷达发射天线增益由雷达天线方向图和导引头与雷达相关位置决定,为了增加方向图的精度,在算法中将雷达方位图在方位上和俯仰上分别均为 3 600 份,方向图中

θ 取值为范围为 $[-180^\circ, 180^\circ]$, 步进为 0.1° , 每个角度的取值由式(1)或(2)计算确定并存储于数组 $G_search_azi[]$ 和 $G_search_ele[]$ 中; 某 t 时刻雷达发射天线在方位和俯仰上的增益可通过数组 $G_search_azi[]$ 和 $G_search_ele[]$ 获取。

雷达与导引头位置关系, 由雷达天线扫描方式与导引头所在位置决定, 在某 t 时刻, 雷达天线方位角 azi 和俯仰角 ele 的值可由不同天线扫描模型公式计算获得^[12], 而导引头方位角 azi_re 和俯仰角 ele_re 的值可由导引头运动模型计算获得, 在本算法设计中, 引入了导引头匀加速径向直线运动模型, 模型数学表达式如下:

$$\begin{cases} r_x = r_0 \sin\theta_r \cos\varphi_r + v_0 \sin\theta_r \cos\varphi_r t + \frac{1}{2} a_x t^2 \\ r_y = r_0 \sin\theta_r \sin\varphi_r + v_0 \sin\theta_r \sin\varphi_r t + \frac{1}{2} a_y t^2 \\ r_z = r_0 \cos\theta_r + v_0 \cos\theta_r t + \frac{1}{2} a_z t^2 \\ \theta_r = \arctan\left(\frac{r_z}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}}\right) \\ \varphi_r = \arctan\left(\frac{r_y}{r_x}\right) \end{cases} \quad (12)$$

式中: r_0, θ_r, φ_r 分别表示导引头与雷达距离初始值大小、 t 时刻导引头与直角坐标中 XY 平面夹角即 ele_re 、导引头在 XY 平面投影与 X 轴夹角 azi_re , r_x, r_y, r_z 分别表示 t 时刻导引头与雷达距离在 X 轴、 Y 轴和 Z 轴分量。

导引头与雷达之间的实时距离 $R(t)$ 为:

$$R(t) = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} \quad (13)$$

由天线扫描模型和导引头运动模型可知, 在 t 时刻雷达天线与导引头在方位和俯仰上的相关位置为:

$$\Delta_{azi} = azi - azi_re;$$

$$\Delta_{ele} = ele - ele_re.$$

则 $G_search_azi[\Delta_{azi}]$ 和 $G_search_ele[\Delta_{ele}]$ 分别为 t 时刻雷达天线相对导引头在方位和俯仰上的增益。根据式(11)和(13)可计算 t 时刻导引头接收信号功率。通过该算法将描述天线运动和导引头运动的时间因素转化为离散量从而完成具有天线扫描特性雷达发射信号的计算。

以上述算法为基础, 在基于 LabWindows/CVI 虚拟仪器^[13]平台上利用 C 语言开发雷达信号模拟软件, 在软件中引入了仿真步长和仿真时长的概念^[14], 仿真时长指模拟产生雷达信号的时长, 表示从仿真开始到仿真结束的整个时间; 仿真步长指两次仿真时间的间隔, 仿真时长和仿真步长决定了仿真次数和仿真时刻。软件流程如图 3 所示。

在软件中最终产生方位和俯仰两个维度上的雷达发射信号功率, 最后将两个维度上的数据进行合并成为最终信号数据^[15], 并将模拟产生的信号数据通过具有矢量功能的信号发生器仪器加载播放, 产生雷达发射信号。

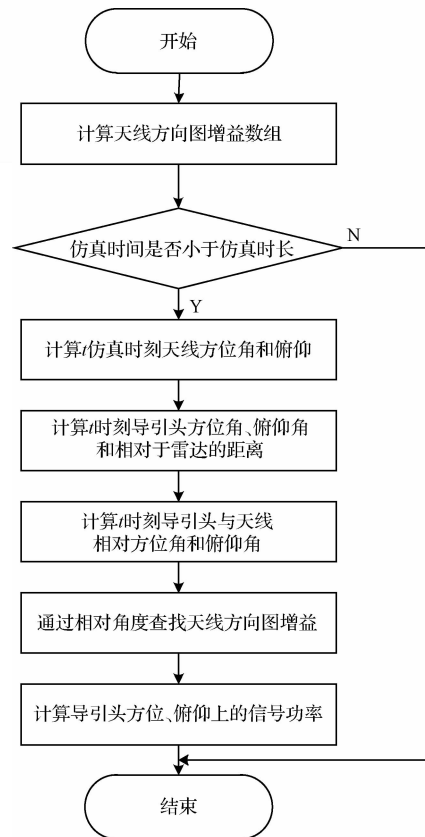


图 3 算法流程

4 测试结果

将雷达信号模拟软件和矢量信号发生器产生的雷达发射信号通过示波器进行测试, 测试结果如图 4 所示。

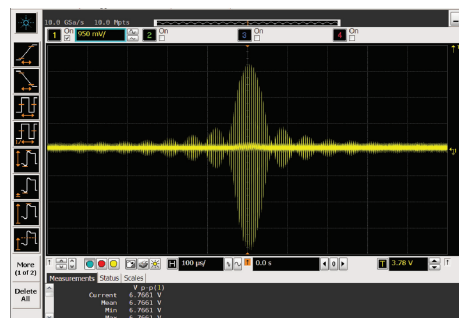


图 4 Sinc 型天线方向图信号

图 4 为 Sinc 型天线方向图静止指向导引头, 脉冲宽度较窄时, 模拟产生的导引头接收信号样式; 由图可知天线方向图与分析结果一致。图 5 为圆周扫描方式下, 导引头静止状态时雷达模拟器模拟导引头接收到的信号波形, 由测试结果可知, 模拟信号在周期和信号功率特征上与实际雷达产生的信号一致, 因此证明了算法的正确性; 为暗室环境导引头抗干扰性能测试提供了信号保障。

(下转第 102 页)