

文章编号: 2095-4980(2016)02-0186-04

高分辨单脉冲雷达距离像回波建模仿真

李思奇

(中国电子科技集团公司 第 10 研究所, 四川 成都 610036)

摘要: 为了有效模拟和分析雷达目标回波特点, 提出了一种数字仿真方法来建模和设计雷达目标回波。通过对高分辨单脉冲雷达的原理分析, 设计雷达目标回波仿真系统框架, 将系统分解成多个模块, 针对每个模块建立相应的数字模型, 并利用计算机软件实现, 仿真表明该方法能有效建立雷达目标三通道一维距离像回波, 并对后续单脉冲跟踪数据处理的研究具有指导意义。

关键词: 高分辨; 单脉冲雷达; 距离像回波; 建模仿真

中图分类号: TN955.1

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0186

Modeling and simulation of high resolution monopulse radar range profile echo

LI Siqi

(No.10 Institute, China Electronic and Technology Corporation, Chengdu Sichuan 610036, China)

Abstract: For efficiently simulating and analyzing the characteristics of radar target echo, a digital simulation method of modeling and designing radar echo is proposed. By analyzing theory of high resolution monopulse radar, radar target echo simulation system frame is designed and decomposed to several modules. Aiming at every module, digital model is set up and achieved by computer software. Simulation results show that the method can model the three-channel range profile echo of radar target, which can provide guidance for monopulse track data processing.

Key words: high resolution; monopulse radar; range profile echo; modeling and simulation

高分辨单脉冲雷达^[1-2]是宽带雷达高距离分辨技术和单脉冲测角技术的结合, 可以获得比常规雷达更高的距离分辨率和测角精确度, 因此在精确制导中得到了非常广泛的应用^[3]。在雷达处理算法研究中, 真实的战场目标和雷达回波是验证其有效性的方法之一。然而获取真实数据的试验成本较高, 所以采用数字仿真技术^[4]: 建立雷达探测目标回波数学模型, 用计算机软件设计实现, 复现雷达目标信号的动态过程。另外可以根据应用需要, 相应修改其模型和参数, 并不断完善它, 无疑将提高系统开发效率, 缩短研制周期。因此, 利用数字仿真技术进行系统设计和论证, 不失为一种好的途径。

为了有效模拟和分析雷达目标回波特点, 解决单脉冲跟踪数据处理的雷达回波源问题, 本文提出了一种数字仿真方法来建模和设计雷达目标回波。通过对高分辨单脉冲雷达的原理分析, 设计雷达目标回波仿真系统框架, 将系统分解成天线方向图、扩展目标散射特性、弹体与目标的相对运动、目标回波信号等模块, 针对每个模块建立相应的数字模型, 并利用计算机软件实现, 仿真表明该方法能有效地建立雷达目标三通道一维距离像回波, 并对后续单脉冲跟踪数据处理的研究具有指导意义。

1 雷达回波仿真系统模型

根据雷达系统各组成部分的工作原理^[5-6], 建立雷达各模块的数学仿真模型。同时, 为了保证正常工作, 需建立雷达外围工作环境及雷达搭载平台和待打击目标的数学仿真模型。

收稿日期: 2014-11-16; 修回日期: 2015-03-14

本文针对高分辨单脉冲雷达信号^[7]的原理，建立了雷达三通道一维距离像回波仿真系统，如图 1 所示。由天线方向图、目标散射特性、弹目运动模拟、雷达回波产生、噪声等模块组成。限于篇幅，只对其中重要模块的数学仿真模型进行描述。

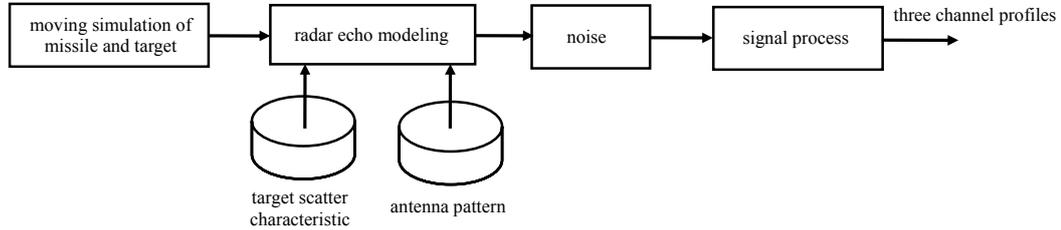


Fig.1 Block diagram of radar echo simulation system model

图 1 雷达回波仿真系统模型组成框图

2 模块的数字模型及原理

2.1 基于相控阵天线的和差波束方向图

相控阵阵列天线^[8]的工作原理是采用数字波束合成技术控制每个辐射阵元的幅度或相位，合成天线方向图，实现对波束指向的控制。以间距为 d 的 N 个单元所组成的线阵为例，各单元采用同幅等相激励，相邻 2 个单元间由于距离差而引起的相位差为：

$$\phi = (2\pi / \lambda) d \sin(\theta) \quad (1)$$

式中： λ 为雷达信号波长； θ 为波达方向。假定每个单元上激励的幅度为 1，相位为零，第 k 单元相对于第一个单元的辐射为 $e^{jk\phi}$ ，则 N 个单元在天线阵面上合成的波束方向图^[9]为：

$$F(\theta) = \frac{\left| \sin \frac{N\phi}{2} \right|}{\left| \sin \frac{\phi}{2} \right|} = \frac{\left| \sin \left(\frac{N\pi d}{\lambda} \sin \theta \right) \right|}{\left| \sin \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right) \right|} \quad (2)$$

在同相馈电时，最大辐射方向就是阵面的法线方向。为了实现调整波束指向，可以在每个辐射单元后面接一个相位从 0 到 2π 之间调整的可变移相器，通过调整辐射单元的相位，可以在偏离法线角度 θ_0 方向获得最大辐射，其波束方向图表达式为：

$$F(\theta, \theta_0) = \frac{\left| \sin \left(\frac{N\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right) \right|}{\left| \sin \left(\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right) \right|} \quad (3)$$

振幅和差式单脉冲测角技术的原理是在平面形成两个对称且部分交叠的子波束，分别与零轴方向偏离 $\pm\theta_0$ ，其方向图为 $F(\theta+\theta_0)$ 与 $F(\theta-\theta_0)$ ，接收信号经和差网络形成和通道和差通道信号，等效的和差波束方向图为：

$$F_{\text{sum}}(\theta) = F(\theta+\theta_0) + F(\theta-\theta_0) \quad (4)$$

$$F_{\text{diff}}(\theta) = F(\theta+\theta_0) - F(\theta-\theta_0) \quad (5)$$

2.2 利用 SAR 提取扩展目标散射特性

SAR 图像具有很高的距离维和方位维分辨力，一维距离像的原理与 SAR 有相似之处，考虑从 SAR 图像中提取扩展目标散射特性，作为生成距离像的目标散射特性库。

假定 SAR 图像每个像素代表实际大小为 $M \times N$ m，所选取目标的中心像素为 (x_0, y_0) ，第 i 个散射点像素为 (x_i, y_i) ，灰度值 G ，则该散射点在目标中心地理坐标系的具体位置表示如下：

$$(r_x, r_y)_i = ((x_i - x_0) \times M, (y_i - y_0) \times N)_i \quad (6)$$

从雷达距离方程 $P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$ 可以看出，雷达散射截面积 σ 与接收信号功率 P_r 成正比，同时 SAR 图像灰度

G 是接收信号强度量化而成，所以散射截面积 $\sigma \propto kG$ 。

2.3 弹目运动模型

导弹制导是利用导弹-目标的相对位置和相对运动参数,形成控制信号,指引导弹飞向目标。常见制导模型很多,如追踪法、平行接近法和比例导引法等,原理可参考相关文献[10],这里介绍一种曲线拟合的方法。

在目标地理坐标系下,建立弹目的相对运动模型。导弹初始位置坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,选取标绘 L 个点,第 i 标绘点坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,通过 n 阶多项式拟合的方法,建立导弹的运动模型。以 x 轴为例,构造向量 $\mathbf{X}=[x_0, x_1, \dots, x_L, 0]^T$, $\mathbf{T}=[0, t_1, \dots, t_{L+1}]^T$ (上标 T 表示矩阵转置),建立二阶多项式,待估计的系数 $\mathbf{A}=[a_0, a_1, a_2]^T$,采用最小二乘估计^[11]求解,如下所示:

$$\mathbf{A}=(\mathbf{T}^T\mathbf{T})^{-1}\mathbf{T}^T\mathbf{X} \quad (7)$$

2.4 雷达目标回波及信号处理模型

雷达发射信号需经过调制,这里采用线性调频信号,是一种脉内频率调制信号。假定脉冲宽度 t_p ,带宽 B ,调频斜率 $\mu=2\pi B/t_p$,则线性调频信号表示为:

$$x(t)=\exp\left(j\frac{1}{2}\mu t^2\right) \quad (8)$$

发射信号遇到目标后,经过目标后向散射形成雷达目标回波信号。假设天线波束内共有目标的 M 个散射点,其中任意一个散射点 i 的雷达散射截面为 σ_i ,利用已知的弹目地理位置,计算相对距离 R_i ,与波束中心的夹角方位 θ_i 和俯仰 φ_i ,对应的天线方向图增益 $F(\theta_i, \varphi_i)$,则可知雷达在 t 时刻的目标各散射点合成回波为:

$$s_i(t)=\sum_{i=1}^M\sigma_i F(\theta_i, \varphi_i)\exp\left[j\pi\frac{1}{2}\mu\left(t-2\frac{R_i}{c}\right)^2\right]\exp\left[j4\pi\frac{R_i}{\lambda}\right] \quad (9)$$

式中 c 为光速。实际系统中,目标信号会受到噪声干扰,仿真采用均值为0、方差为 σ_n^2 的高斯白噪声 $n(t)$ 表示,则带噪声的信号 $s_i(t)$ 为:

$$s_i(t)=s_r(t)+n(t) \quad (10)$$

信号处理最重要的功能就是脉冲压缩,脉冲压缩是大时宽带宽积信号通过一个脉冲压缩滤波器实现的,该滤波器的脉冲响应为 $h(t)=Kx^*(t_d-t)$, t_d 为脉冲压缩滤波器的延迟, K 为增益常数。脉冲压缩滤波器的输出 $s_o(t)$ 为输入信号 $s_i(t)$ 与滤波器脉冲响应 $h(t)$ 的卷积,可表示为:

$$s_o(t)=s_i(t)*h(t) \quad (11)$$

3 软件仿真分析

根据高分辨单脉冲雷达的原理,构建雷达目标回波仿真系统,建立各模块的数字模型,通过计算机软件实现各模块,进行各模块的仿真结果分析。

天线模型仿真:阵元数行 $12\times$ 列 12 ,阵元间距 5.2×3.5 cm,发射频率 32 GHz,波束方位和俯仰偏置角度为 0.5° ,天线三维方向图如图2所示,和差波束如图3所示。差波束方向图在角度 $[-1^\circ, 1^\circ]$ 范围,构建一次函数,采用最小二乘拟合算法估计出方位和俯仰角偏差斜率: $K_{\text{slope}}=0.3558$ 。

目标散射特性提取:基于SAR图像的目标散射特性自动提取,被提取的SAR图像见图4,每个像素代表实际大小为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$,选取目标在 $26\text{ m}\times 30\text{ m}$ 方框内,经自动提取,产生共25个目标的散射点列表。

弹目运动仿真:以目标为原点建立北天东地理坐标系,弹目相对初始位置为 $x=-2682\text{ m}$, $y=4000\text{ m}$, $z=5485\text{ m}$,初始速度为 $v_x=-326\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $v_y=-800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $v_z=-1571\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,加速度为 $a_x=9.21\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, $a_y=0\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, $a_z=-5.07\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,偏航角为 101.7° ,俯仰角为 -26.48° ,横滚角为 0° ,经式(7)拟合后得到弹目运动轨迹如图5所示。

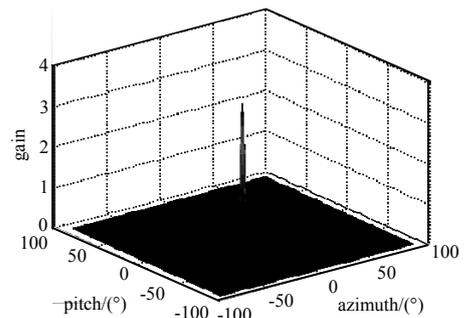


Fig.2 Three dimensional pattern of antenna
图2 天线三维方向图

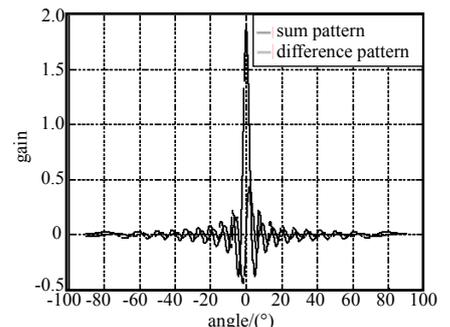


Fig.3 Sum and difference beam pattern
图3 和差波束图

雷达回波产生及信号处理模型：雷达脉冲宽度 $0.5 \mu\text{s}$ ，脉冲重复频率 1 kHz ，工作频率 32 GHz ，采样频率 450 MHz ，信噪比 8 dB ，信号调制方式为线性调频。根据目标参数、天线参数和雷达参数，由式(9)得到和波束、方位差和俯仰差通道回波信号，仿真得到带目标信号的三通道一维距离像回波如图 6 所示。



Fig. 4 Extracted SAR figure
图 4 被提取的 SAR 图

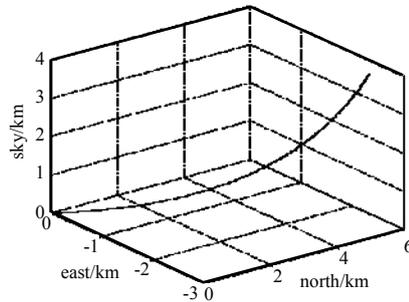


Fig. 5 Missile and target motion trajectory
图 5 弹目运动轨迹

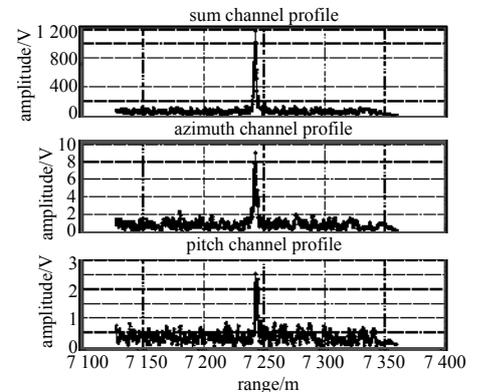


Fig. 6 Three-channel HRRP echo
图 6 三通道一维距离像回波

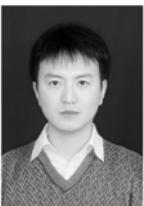
4 结论

本文为了仿真和分析雷达目标回波特点，研究了一种建模和设计雷达目标回波的数字仿真方法。首先，对高分辨单脉冲雷达的原理分析，设计雷达目标回波仿真系统框架，将系统分解成天线方向图、扩展目标散射特性、弹目相对运动模拟、目标回波信号等模块，然后，针对每个模块建立相应的数字模型，利用计算机软件仿真实现，得到了雷达目标三通道一维距离像回波，为系统设计和论证以及后续处理研究提供了一种有效方法。当然随着雷达体制改变和复杂环境变化，需要继续添加或完善模块数字模型。

参考文献：

- [1] DONALD Wehner. High Resolution Radar[M]. Norwood,United States:Artech House, 1987.
- [2] SHERMAN S M. Monopulse Principles and Techniques[M]. Norwood,United States:Artech House, 1984.
- [3] 邢孟道,王彤,李真芳. 雷达信号处理基础[M]. 北京:电子工业出版社, 2010:40-84. (XING Mengdao,WANG Tong,LI Zhenfang. Fundamentals of Radar Signal Process[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2010:40-84.)
- [4] IEEE-SA Standards Board. IEEE Standard for Modeling and Simulation(M&S) High Level Architecture(HLA):IEEE Std 1516-2000[S]. New York,USA:IEEE, 2000.
- [5] FARINA A,STUDER F A. Radar Data Processing[M]. [S.l.]:John Wiley, 1985.
- [6] SKOLNIK M I. Radar Handbook[M]. 2nd ed. New York,USA:McGraw-Hill Publishing Company, 1990:18,30.
- [7] 王德纯,丁家会,程望东. 精密跟踪测量雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2007:72-82. (WANG Dechun,DING Jiahui,CHEN Wangdong. Precision Tracking Radar Technology[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2007:72-82.)
- [8] HAYKIN S,LITVA J,SHEPHERD T J. Radar Array Processing[M]. Berlin:Springer, 1993.
- [9] 蔡庆宇,张伯彦,曲洪权. 相控阵雷达数据处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2011:3-4. (CAI Qingyu,ZHANG Boyan,QU Hongquan. Phased-Array Radar Data Processing[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2011:3-4.)
- [10] 周纪元,童幼堂,张磊,等. 典型导引规律三维弹道仿真分析[J]. 舰船电子工程, 2008,2(28):110-112. (ZHOU Jiyuan, TONG Youtang,ZHANG Lei,et al. Simulation and analysis of three-dimensional trajectory on typical guide method[J]. Ship Electronic Engineering, 2008,2(28):110-112.)
- [11] 陈希孺,王松桂. 线性模型中的最小二乘法[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2003:23-31. (CHEN Xiruo,WANG Songui. Linear Least Squares of Linear Model[M]. Shanghai:Shanghai Science and Technology Press, 2003:23-31.)

作者简介：



李思奇(1986-), 男, 四川省仁寿县, 硕士, 工程师, 主要研究方向为雷达信号与数据处理。
email:li7si8qi1@163.com.