

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.10.015

引用格式:孟路稳,周沫,曾浩,等.高分辨雷达目标回波信号模拟与分析[J].电讯技术,2014,54(10):1396-1400. [MENG Lu-wen,ZHOU Mo,ZENG Hao, et al. Simulation and Analysis of Target Echo Signal of High-resolution Radar[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(10):1396-1400.]

高分辨雷达目标回波信号模拟与分析*

孟路稳^{1,**},周沫¹,曾浩²,察豪¹,张润哲¹

(1. 海军工程大学 电子工程学院,武汉 430033;2. 海军装备研究院 系统所,北京 100161)

摘要:对高频区复杂目标的散射特性进行分析,建立了基于多散射中心的高分辨雷达目标回波模型,在此基础上对线性调频信号进行模拟,生成目标的回波数据,同时给出了脉冲体制雷达数据采集和存储方法的模型。为验证回波模型的有效性,对仿真的回波数据分别进行脉冲压缩和多普勒处理,处理结果正确反映出目标特征,表明模型可行有效。研究结果可为目标特征提取、目标识别提供技术基础。

关键词:高分辨雷达;回波模型;多散射中心;脉冲压缩;多普勒处理;目标特征提取
中图分类号:TN955 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)10-1396-05

Simulation and Analysis of Target Echo Signal of High-resolution Radar

MENG Lu-wen¹,ZHOU Mo¹,ZENG Hao²,CHA Hao¹,ZHANG Run-zhe¹

(1. College of Electronic Engineering,Naval University of Engineering,Wuhan 430033,China;
2. System Department of Naval Academy of Armament,Beijing 100161,China)

Abstract:The paper analyzes the scattering properties of complex targets of high-frequency region and establishes the high-resolution radar echo model based on multi-scattering centers. On this basis,the target echo data is generated after simulation of chirp signal and the model of data collection and storage of pulse-radar is also given. The simulated echo data is processed by pulse-compression and Doppler processing to verify the validity of echo models. The result reflects the characteristics of targets and so the model is feasible and effective. The conclusion provides a technical basis for target feature extraction and object recognition.

Key words:high-resolution radar;echo model;multi-scattering centers;pulse compression;Doppler processing;target feature extraction

1 引言

为适应现代战争的需要,高分辨雷达得到越来越多的应用。高分辨雷达具有较宽的带宽,有着抗干扰、强识别能力、反隐身等优点^[1]。而对高分辨雷达目标回波的仿真是高分辨雷达设计、研制、实验等方面的一个重要调试工具,同时目标回波特征的

研究是目标检测和识别的基础。但是外场实测目标回波数据代价较高,同时实测环境中电磁干扰等各种因素的影响使得每一次的测量结果不相同,从而使每一次的的测量结果都不具代表性,为正确研究目标特性和识别目标带来了很大的困难,故对目标回波的仿真研究具有重要的价值^[2-4]。

* 收稿日期:2014-03-03;修回日期:2014-06-11 Received date:2014-03-03;Revised date:2014-06-11
基金项目:国防专项基金资助项目
Foundation Item:The National Defense Special Foundation

** 通讯作者:mengluwen66@163.com Corresponding author:mengluwen66@163.com

关于高分辨雷达目标回波信号的仿真,已有文献给出了相关的论述和研究。文献[5]对线性调频信号进行模拟,并生成了扩展目标的回波数据,但模型所用的目标为刚性细长体,不具有普遍性;文献[6]对目标模拟器进行了设计,通过脉冲调制信号延时和多普勒频移产生了回波信号,但只适合于点目标的情况;文献[7]以 Boeing 747-200 为对象研究了宽带甚高频(VHF)雷达目标回波模型,并用频域方法仿真了目标回波数据,但目标的频率响应函数不容易获得。

针对以上情况,本文建立了基于多散射中心的目标回波模型,在此基础上对线性调频雷达的目标回波信号进行仿真,并对仿真的回波进行验证,给出了仿真目标的一维距离像以及对目标的速度进行提取。对仿真结果进行了分析,表明模型是可行和有效的。

2 基于多散射中心的目标回波模型

宽带雷达具有高的距离分辨能力,对于舰船、飞机等复杂目标,目标尺寸远大于信号波长,此时雷达工作在高频区。理论计算和实验表明^[8]:在高频区,目标散射不是全部目标表面所贡献的。目标总的电磁散射可认为是某些局部位置电磁散射的合成,满足局部性原理^[9]。局部性原理是指一个散射体的散射场只取决于散射点的入射场以及该点附近的几何性质,而与散射体的其他部位无关,故可把散射点的散射看作是孤立的,散射体的散射场可由各部件散射场的简单叠加得到^[10]。这些局部性的散射源通常被称为多散射中心,雷达目标的散射特性可由一组散射中心近似表示。因为静止目标是运动目标速度 $v=0$ 的特殊情况,所以本文只对运动目标进行讨论,假设研究的目标由 M 个散射中心组成。为方面讨论,此时暂不考虑天线方向性的情况。

设雷达发射信号为

$$\psi_r(t) = u(t) e^{j2\pi f_0 t} \quad (1)$$

式中, $u(t)$ 为发射信号的复包络, f_0 为载频。

若设目标以恒定的径向速度 v 向雷达运动,第 i 个散射中心距离雷达的初始径向距离为 R_{i0} 。则经过时间 t 后,目标与雷达的径向距离为 $R_i(t) = R_{i0} - vt$ 。设发射波相对于径向距离 $R_i(t)$ 的往返时间为 $\tau_i(t)$, r_i 为对应的回波幅度,则此时目标上第 i 个散射中心的目标回波信号可表示为

$$\psi_{ir}(t) = r_i u(t - \tau_i(t)) e^{j2\pi f_0 [t - \tau_i(t)]} \quad (2)$$

回波信号到达接收端的时刻为 t ,则发射信号达到第 i 个散射中心的时刻为 $(t - \tau_i(t)/2)$,则在时刻 $(t - \tau_i(t)/2)$ 第 i 个散射中心与雷达的径向距离为

$$R_i(t - \tau_i(t)/2) = R_i(t) + v \cdot \frac{\tau_i(t)}{2} = R_{i0} - v \cdot [t - \frac{\tau_i(t)}{2}] \quad (3)$$

同时有

$$\tau_i(t) = \frac{2R_i(t - \tau_i(t)/2)}{c} \quad (4)$$

式中, c 为光速。

结合式(3)和式(4)可得

$$\tau_i(t) = \frac{2R_i(t)}{c - v} \quad (5)$$

因为通常情况下 $v \ll c$, 所以有

$$\tau_i(t) = \frac{2R_i(t)}{c} = \frac{2(R_{i0} - vt)}{c} = \tau_{i0} - \frac{2vt}{c} \quad (6)$$

结合式(2)和式(6)可得第 i 个散射中心的回波表达式为

$$\psi_{ir}(t) = r_i u[(1 + \frac{2v}{c})t - \tau_{i0}] e^{-j2\pi f_0 \tau_{i0}} e^{j2\pi(f_0 + \frac{2v}{c}f_0)t} \quad (7)$$

其中, $f_d = \frac{2v}{c}f_0$ 为运动目标的多普勒频移。由于 $v \ll c$, 则脉宽变化量 $a = 1 + \frac{2v}{c}$ 可取值 $a \approx 1$ 。则第 i 个散射中心的回波表达式可近似为

$$\psi_{ir}(t) = r_i u(t - \tau_{i0}) e^{j2\pi(f_0 + f_d)(t - \tau_{i0})} \quad (8)$$

则根据多散射中心理论,总回波表达式为

$$\psi_R(t) = \sum_{i=1}^M \psi_{ir}(t) \quad (9)$$

3 LFM 雷达回波信号分析

3.1 LFM 回波信号表达式

线性调频(LFM)信号是目前宽带雷达设计中被普遍采用的调制方式,研究 LFM 的目标回波信号模型对 LFM 雷达系统设计非常重要。下面对 LFM 雷达的回波信号进行分析研究。

雷达发射的线性调频信号可表示为

$$\Phi_r(t) = \text{rect}(\frac{t}{T}) \exp[j2\pi(f_0 t + \frac{1}{2}kt^2)] \quad (10)$$

式中, f_0 为线性调频信号的中心频率, $\text{rect}(\frac{t}{T}) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T/2 \\ 0, & |t| > T/2 \end{cases}$, T 为脉冲宽度, $k = B/T$ 为信号的调频斜率, B 为带宽。

根据式(9)可得线性调频雷达的回波信号为

$$\Phi_R(t)=\sum_{i=1}^Mr_i\text{rect}\left(\frac{t-\tau_{i0}}{T}\right)\cdot\exp\left[j2\pi\left((f_0+f_d)(t-\tau_{i0})+\frac{1}{2}k(t-\tau_{i0})^2\right)\right]\tag{11}$$

3.2 LFM 回波信号仿真

在高分辨率雷达中,目标的散射特性主要通过散射中心来反应目标的几何结构,可用目标的一维距离像来体现目标的散射中心^[11]。散射中心在一维距离像中体现为峰值特征,并且在不同观测方位,从目标回波中提取的散射中心的个数、幅度以及在径向上的相对距离往往会发生变化,如图 1 所示。目前有很多文献给出了提取目标散射中心的方法,在此不在赘述。同时,由于本文是基于目标一维散射中心模型的回波仿真,所以不考虑观测方位角变化对回波仿真的影响。

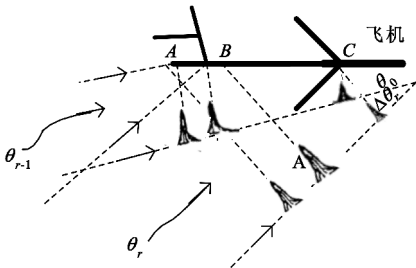


图 1 散射中心分布示意图
Fig. 1 Schematic distribution of scattering centers

故可合理假设在确定方位角下从某目标一维距离像中提取的散射中心数为 7,各散射中心的空间分布如图 2 所示,其中第一个散射点与雷达的距离为 800 m。因为不同目标甚至同一目标在不同观测方位角下的散射中心分布情况也不一样,故这里设定的目标并不是某一固定类型的目标,只是根据实际情况基于一维距离像理论合理假想的目标(其中点目标是散射中心数为 1 的特殊情况),这也说明了本文模型适用的普遍性。

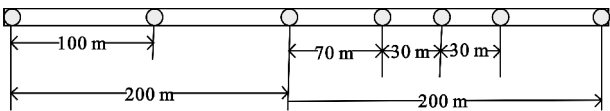


图 2 散射中心的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of scattering centers

如图 2 所示,各散射中心的散射强度由左至右分别为 0.2、0.4、0.8、0.5、1、0.9、0.7。线性调频雷达的参数设置为: $f_d=2\text{ GHz}$, $T=10\text{ }\mu\text{s}$, $B=60\text{ MHz}$, $c=800$ 。

结合推导的理论公式以及设置的参数,可得发

射信号的波形图、发射信号的频谱图以及目标的回波信号波形,分别如图 3~5 所示。

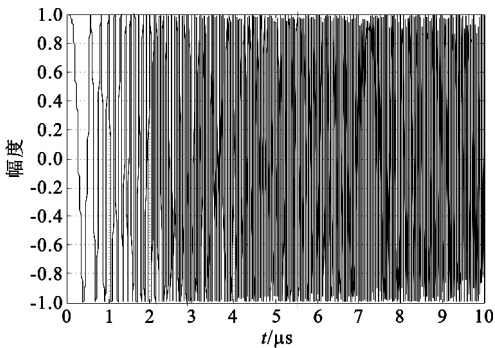


图 3 发射信号波形
Fig. 3 Transmitted signal waveform

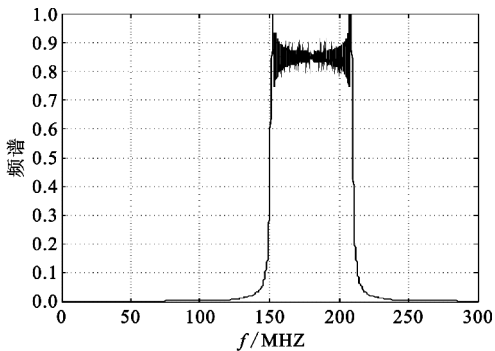


图 4 发射信号频谱
Fig. 4 Transmitted signal spectrum

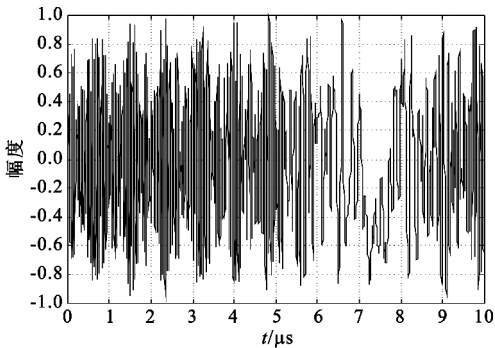


图 5 回波信号波形
Fig. 5 Echo signal waveform

比较图 3 和图 5 可以看出,目标对发射信号进行了调制,幅度和相位都发生了变化,并且仿真的回波信号在时间域上无法分辨出各个散射中心点的分布,实际上需要对回波信号进行后续相应的处理才能体现出高分辨雷达对目标外形物理结构的探测能力。

4 回波信号的采集和处理

雷达接收机对接收到的信号高速采样,然后将采样后的数据储存起来,存储的数据可以表示成数

据矩阵 $y[l,m]$ 的形式。图 6 给出了脉冲雷达对采集数据存储方法的模型。如图 6 所示,给定行中所存储的雷达测量数据之间的间隔是脉冲重复间隔 T ,给定列中所存储的雷达数据之间的间隔是距离采样单元 l ,而每一单元格中所存储的雷达测量数据即是回波的同相(I)和正交(Q)分量。因为给定行中连续列的数据采样间隔与给定列中连续行的数据采样间隔往往相差很大,有时将 $y[l,m]$ 的 l 维(图 6 中的竖直方向)称为快时间,而将水平方向的 m 维称为慢时间。雷达接收机对回波信号处理的过程就是在多种数据维上对数据块中的一维子向量或二维子矩阵进行处理运算的过程^[12]。对快时间域(即距离维)的数据序列进行脉冲压缩处理即可得到探测目标的一维距离像,并且脉冲压缩可以对每个脉冲或接收信道的各个距离向量独立地进行。脉冲多普勒处理是对每一个距离单元内的慢时间数据序列的一个谱分析,而离散傅里叶变换是最常用的谱分析方法。对慢时间域(即脉冲数维)的数据序列进行离散傅里叶变换则能得到多普勒维,从而经过转换得到探测目标的运动速度。

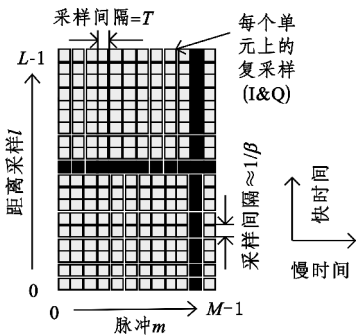


图 6 脉冲雷达数据采集和存储方法模型
Fig. 6 The model of pulse radar data collection and storage methods

本文就是依据上述模型对仿真得到的目标回波数据进行处理、分析和验证,得到的仿真结果如图 7~9 所示。

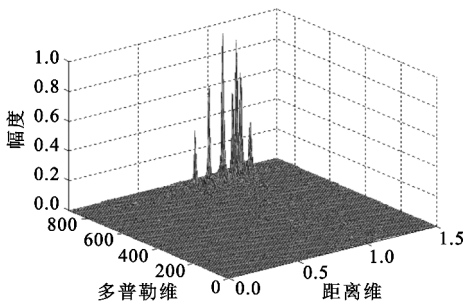


图 7 目标距离-速度二维成像效果图
Fig. 7 Target distance-speed dimensions

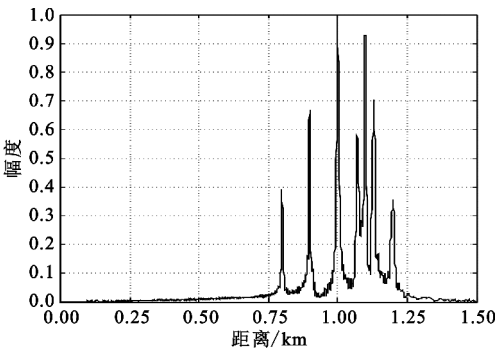


图 8 目标一维距离像
Fig. 8 Target HRRP

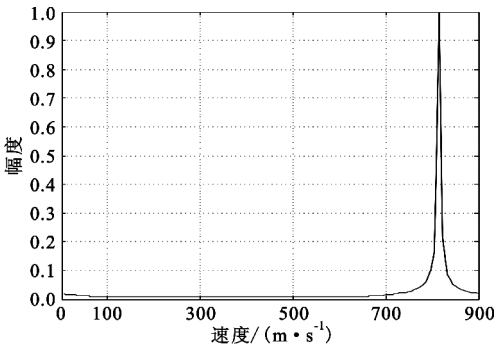


图 9 目标速度维
Fig. 9 Target speed dimension

从图 8 可以看出,经过脉压处理后,高分辨雷达能较好地分辨出目标的各个散射中心,图中的峰值点所对应的径向距离分别为 0.8 km、0.899 5 km、0.999 5 km、1.071 km、1.099 km、1.129 km 和 1.2 km,与图 2 的目标散射中心分布情况基本一致,并且峰值点的幅度信息也能很好地反应目标散射中心的散射强度。从图 9 可以看出,经过多普勒处理后得到的目标运动速度为 801 m/s,与实际的 $v = 800$ m/s 基本一致,从仿真的回波信号中能较好地提取出目标的速度信息,这在一定程度上验证了仿真回波的准确性。

5 结 论

本文基于多散射中心对高分辨雷达目标回波进行建模,依托线性调频体制雷达对所建目标回波模型进行仿真,并详细论述了雷达系统中对接收信号采集和处理的原理和方法,通过对仿真的回波数据进行距离维和多普勒维处理,成功地复现了目标的一维距离像和对目标速度的估计,所得结果与所设置的目标参数基本一致,验证了所建模型的有效性和可行性,为后续的目标特征提取、目标识别提供了

基础。下一步将对高速运动情况下本文目标回波模型的适用性做进一步的研究。

参考文献:

- [1] 费元春. 超宽带雷达理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
FEI Yuan-chun. Ultra Wideband Radar Theory and Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press,2010. (in Chinese)
- [2] 袁菲. 线性调频雷达回波建模与仿真[D]. 成都:电子科技大学,2012.
YUAN Fei. Echo Modeling and Simulation of LFM Radar [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2012. (in Chinese)
- [3] 刘敬兴,叶春令,王华. 基于FPGA的脉冲压缩雷达目标模拟器设计[J]. 电讯技术,2013,53(9):1238-1242.
LIU Jing-xing, YE Chun-ling, WANG Hua. Design of A Pulse-compress Radar Target Simulator Based on FPGA [J]. Telecommunication Engineering,2013,53(9):1238-1242. (in Chinese)
- [4] 李华敏,王瑛,李晓松. 多站制CW雷达目标动态模拟器设计[J]. 电讯技术,2012,52(1):58-61.
LI Hua-min, WANG Ying, LI Xiao-song. Design of Dynamic Target Simulator for Multi-station Continuous Wave Radar Measurement System [J]. Telecommunication Engineering,2012,52(1):58-61. (in Chinese)
- [5] 于洪波,王国宏,王娜. 一种高分辨雷达扩展目标信号的模拟方法[J]. 火力与指挥控制,2011,36(6):138-140.
YU Hong-bo, WANG Guo-hong, WANG Na. A Simulation Method of Extended Targets Echo[J]. Fire Control & Command Control,2011,36(6):138-140. (in Chinese)
- [6] 龚涛. 脉冲雷达目标和背景噪声模拟器设计[D]. 成都:电子科技大学,2013.
GONG Tao. The Hardware Design of Pulse Radar Target Simulator in Background Noise [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2013. (in Chinese)
- [7] 尤君,万显荣,龚子平,等. 宽带甚高频雷达目标回波模型与检测性能研究[J]. 电子与信息学报,2013,35(12):2795-2801.
YOU Jun, WAN Xian-rong, GONG Zi-ping, et al. Echo Modeling and Detection Performance of Wideband VHF Radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2013,35(12):2795-2801. (in Chinese)
- [8] 黎海涛,徐继麟. 超宽带线性调频雷达目标回波模型[J]. 电波科学学报,1999,14(4):440-444.
LI Hai-tao, XU Ji-lin. Modeling of Ultra-wide Band Linear Frequency Modulated Radar[J]. Chinese Journal of

Radio Science,1999,14(4):440-444. (in Chinese)

- [9] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
HUANG Pei-kang, YIN Hong-cheng, XU Xiao-jian. The Characteristics of Radar Target [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2005. (in Chinese)
- [10] McClure M, Qiu R C, Carin L. On the Super-Resolution of Observables from Swept-Frequency Scattering Data [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997,45(4):631-641.
- [11] 孙佳佳,童创明. 基于一维距离像序列的弹道目标融合识别研究[J]. 微波学报,2013,29(3):72-76.
SUN Jia-jia, TONG Chuang-ming. Study on Ballistic Target Fusion Recognition Based on HRRP [J]. Journal of Microwaves,2013,29(3):72-76. (in Chinese)
- [12] Richards M A. Fundamentals of Radar Signal Processing [M]. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2005.

作者简介:



孟路稳(1990—),男,河南汝南人,硕士研究生,主要研究方向为雷达信号与信息处理;

MENG Lu-wen was born in Runan, Henan Province, in 1990. He is now a graduate student. His research concerns radar signal and information processing.

Email: mengluwen66@163.com

周沫(1971—),男,浙江金华人,副教授、硕士生导师,主要研究方向为雷达信号处理和雷达工程;

ZHOU Mo was born in Jinhua, Zhejiang Province, in 1971. He is now an associate professor and also the instructor of graduate students. His research concerns radar signal processing and radar engineering.

曾浩(1971—),男,湖南邵阳人,2001年获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为雷达系统工程;

ZENG Hao was born in Shaoyang, Hunan Province, in 1971. He received the M. S. degree in 2001. He is now an engineer. His research concerns radar system engineering.

察豪(1966—),男,山西太原人,教授、博士生导师,主要研究方向为雷达总体技术;

CHA Hao was born in Taiyuan, Shanxi Province, in 1966. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns radar system technology.

张润哲(1990—),男,天津人,硕士研究生,主要研究方向为雷达信号与信息处理。

ZHANG Run-zhe was born in Tianjin, in 1990. He is now a graduate student. His research concerns radar signal and information processing.