

# 一种探测低飞目标的 PD 雷达仿真系统

李 磊, 谢拥军, 李晓峰, 陈博韬, 陈 潇

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 针对相参体制的脉冲雷达波形, 在综合考虑雷达平台及低飞目标运动规律的基础上, 采用半空间物理光学结合图形电磁学, 快速准确地计算了半空间低飞复杂目标的雷达散射截面, 并按照真实地形的地形高程数据和地形地物特征, 生成地杂波模拟数据。最后, 采用频域信号处理方法对包含目标和杂波信息的雷达回波信号进行研究, 实现对目标探测、测速、测距的功能。给出了仿真系统的总体架构和各模块的功能原理, 并用仿真实例进行验证。

**关键词:** 半空间物理光学方法; 真实地形; 脉冲多普勒雷达; 杂波仿真

**中图分类号:** TN 955.1

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.06.006

## Pulse Doppler radar simulation system for detecting low altitude targets

LI Lei, XIE Yong-jun, LI Xiao-feng, CHEN Bo-tao, CHEN Xiao

(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** According to the coherent pulse waveform of the narrowband radar, the radar cross sections (RCS) of low altitude flying targets in half space can be calculated quickly and accurately using a new algorithm which combines the half-space physical optics method with the graphical electromagnetic computing (GRECO) method. Simultaneously the motion laws of the radar platform and radar targets are fully considered in this algorithm. Then the ground clutter in actual landform environment is produced. Finally, the radar echo signals including target and clutter information are studied with frequency domain signal processing methods. The functions of detecting radar targets and measuring distance and speed of them are realized in this simulation system. The architecture of the system, the functions and principles of each module, as well as demonstrating examples are given.

**Keywords:** half-space physic-optics method; real terrain data; pulse Doppler radar; clutter simulation

## 0 引言

在复杂多变的战场电磁环境中, 由于低空目标和环境的相互作用, 雷达回波会随着背景环境杂波的变化而变化。在特殊情况下, 目标的雷达散射截面信息甚至会被环境杂波完全淹没。所以, 需要对雷达目标和环境回波同时进行仿真, 以达到真实复现雷达回波信号的目的。近年来, 许多学者在复杂雷达系统和目标、环境的模拟方面已做了一定的工作<sup>[1-11]</sup>。有些研究者根据几何光学理论用 OpenGL 可视化方法计算复杂目标的雷达截面积来生成目标回波, 用不同类型的平面散射体的后向散射系数得到干扰杂波<sup>[3]</sup>。还有些研究者采用既包含振幅又包含相位的相干视频信号的方法来模拟回波信号<sup>[4]</sup>。然而, 由于现有 CPU 计算能力和内存的限制, 上述方法尚不能较好地处理半空间电大尺寸

复杂目标的散射问题, 在计算地杂波时通常采用概率统计算法。

本文以相参体制的脉冲多普勒 (pulse Doppler, PD) 雷达为平台, 采用航天飞机雷达地形测绘使命 (shuttle radar topography mission, SRTM) 数据建立真实地形环境, 对半空间低空飞行目标的雷达回波信号进行仿真。仿真中采用结合半空间并矢格林函数的物理光学计算方法, 能够快速有效地计算半空间目标的雷达散射截面。按照真实地形的地形高程数据和地形地物特征, 生成地杂波模拟数据。考虑雷达平台及低飞目标坐标转换和运动规律等因素, 模拟出包含目标特性和杂波特性的回波信号。而后在频域对受到噪声干扰后回波信号进行滤波与检测, 通过同步检波、距离门重排、杂波处理、横虚警处理等信号处理步骤, 实现对目标探测、测速、测距的功能。系统仿真流程如图 1 所示。

收稿日期: 2009-03-01; 修回日期: 2009-08-13。

基金项目: 国家自然科学基金 (60771040) 资助课题

作者简介: 李磊 (1980-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为计算电磁学、雷达仿真。E-mail: leili@mail.xidian.edu.cn

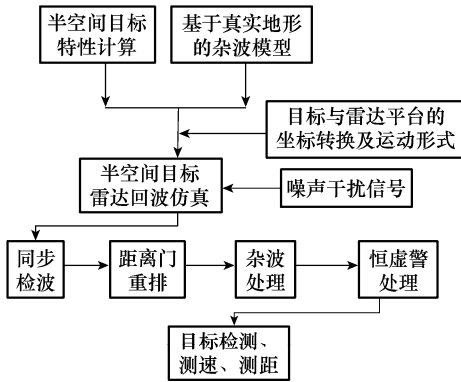


图 1 仿真系统流程图

## 1 回波信号模拟

### 1.1 真实地形环境数据

在电磁散射特性研究中,地物分类方法可概括为:依据地面上方介质形态(植被、雪或人造物)和地面本身形态(土壤、水面或路面)将地貌环境分类,每类呈现相似的雷达后向散射特性。本文采用 SRTM 数据,并制作相应的地形地物数字特征分析数据(digital feature analysis data, DFAD)。SRTM 数据为每经纬度方格提供精度分为 1 arc-second 和 3 arc-seconds 两种文件格式,称作 SRTM1 和 SRTM3。SRTM1 的文件里面包含 3 601×3 601 个采样点的高度数据, SRTM3 的文件里面包含 1 201×1 201 个采样点的高度数据。其中,SRTM3 文件可以免费获取,文件中记录了 90 m×90 m 单元的高度数据。通过对 SRTM3 数据中每个单元所属的地形环境进行辨别记录,即可获得相应的地形地物 DFAD 文件。

### 1.2 回波信号模型

相干视频信号模拟可以逼真地复现既包含振幅又包含相位的相干视频信号。以 PD 雷达为平台,考虑到雷达发射信号形式,目标的回波信号为

$$S(\theta, \varphi, t) = A(\theta, \varphi) \cdot e^{j\psi(\theta, \varphi, t)} \cdot e^{j\varphi(t)} \quad (1)$$

式中,  $A(\theta, \varphi)$  为回波信号幅度;  $\psi(\theta, \varphi, t)$  为回波信号多普勒相位;  $\varphi(t)$  为由雷达发射脉冲信号波形确定的相位。根据雷达方程,雷达接收到的回波信号幅度可表示为

$$A(\theta, \varphi) = \left( \frac{P_i \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 L} \right)^{1/2} \cdot \frac{G(\alpha_T, \beta_T)}{R^2} \quad (2)$$

式中,  $P_i$  为雷达发射信号峰值功率;  $\lambda$  为雷达工作波长;  $\sigma$  为目标雷达散射截面积;  $G(\alpha_T, \beta_T)$  为雷达天线电压增益;  $\alpha_T$ 、 $\beta_T$  为目标在天线坐标系下的方位角和俯仰角;  $L$  为雷达发射接收综合损耗;  $R$  为雷达到该散射单元中心距离。目标回波信号的多普勒相位可表示为  $\psi(\theta, \varphi, t) = 2\pi f_d t + \phi_0$ ,  $f_d$  为该目标的径向多普勒频率,  $\phi_0$  为随机相位。根据目标与载机的运动矢量数据,计算相对运动速率,求得目标的多普勒频率为  $f_d = 2V_r/\lambda$ ,  $V_r$  为目标与载机的相对运动速率,  $\lambda$  为此时雷达工作频率。

### 1.3 雷达目标特性分析

快速准确地计算低空飞行目标的雷达截面积是模拟雷达回波信号的基础。首先,考虑位于半空间环境中的电大尺寸导体目标,在平面入射波照射下,半空间金属目标与地面经过直接或间接的反射产生不同的散射场  $E^s$

$$E^s(r') = -j\omega A(r') - \nabla F(r'), \quad r' \in S \quad (3)$$

式中,  $r'$  表示源点位置;  $A$  和  $F$  表示由面电流产生的磁矢位和电标位。半空间并矢格林函数可由矢量位和标量位表示,矢量位函数并不是可以唯一定义的,本文使用文献[5]中的形式,其中  $G_A^{xx}$ 、 $G_A^{xy}$ 、 $G_A^{yx}$ 、 $G_A^{yy}$  为半空间矢量位函数,  $G_z^x$ 、 $G_z^y$ 、 $G_z^z$  为半空间标量位函数。当引入半空间格林函数对半空间导体目标散射进行考虑后,由于采用物理光学近似,必须对半空间目标的遮挡和消隐进行处理。结合图形电磁学,采用硬件加速卡对目标和背景像素进行显示和自动消隐,然后根据像素的分辨率实现面元的自动剖分,同时利用光照模型对目标进行着色渲染,显卡内存中为每个像素点均匀的保存颜色值和深度值等信息。提取单位像素的法矢量和深度值后,利用物理光学方法给散射体像素单元赋予简单明确的电流值。利用远场近似条件,引入半空间格林函数,得到半空间导体目标散射场  $E^s$

$$E^s(r) = -j\omega \iint_V \bar{G}_A \cdot J(r') d r' + \frac{k \cdot \hat{s}}{\omega} \cdot$$

$$\iint_V \left[ G_x^x \frac{\partial}{\partial x} J(r') + G_y^y \frac{\partial}{\partial y} J(r') + G_z^z \frac{\partial}{\partial z} J(r') \right] d r' \quad (4)$$

根据目标表面上各个散射部件之间的相对相位关系以及散射场的极化关系,可将雷达散射截面重新定义为

$$\sqrt{\sigma} = \lim_{R \rightarrow \infty} 2\sqrt{\pi R} \frac{E_s \cdot \hat{e}_r}{E_0} \exp(jkR) \quad (5)$$

### 1.4 地杂波分析

相干杂波模型利用了杂波的相位信息,包含了雷达环境较为全面的信息,可以满足雷达信号级仿真的需要。模型中地面散射单元的划分应满足每个散射单元的天线增益、多普勒频移、距离、入射角、杂波反射率(这些参数都与杂波回波相关)为均匀常量的标准。来自不同散射单元的散射信号是统计独立的,在空间上没有相干性。

相干杂波为所有杂波散射单元回波信号的相干叠加,首先确定单个散射单元的回波信号。每个散射单元可记作一个点散射体,其回波信号的形式与目标回波形式相同。

杂波散射单元的雷达散射截面积  $\sigma = \sigma_0 \Delta A$ 。其中  $\sigma_0$  为服从高斯谱对数正态分布的随机数,其均值为  $\sigma_m^0$ ,  $\sigma_m^0$  为单位面积的雷达截面积,  $\Delta A$  为散射单元的面积。

F. T. Ulaby 归纳了九种地形环境分类,并对每种分类进行了数据统计,建立了经验公式。为了利用该公式,在计算每个单元散射截面时,需要根据地形数据信息,获得较精确局部入射角  $\theta$ ,并判断 DFAD 文件中该散射单元对应的地形环境。此过程需要进行坐标转换,从而获得每个杂波单元所在的经纬度。

坐标系转换运算中,可以将地球采用 WGS-84 椭圆近

似表示。根据距离环地面散射单元划分法,在计算每个小单元时,雷达到小单元的斜距  $R$ 、仰角  $\theta$  及方位角  $\epsilon$  都是确定的。而雷达的经纬度及高程(雷达大地坐标)均能实时获得,这样可求得目标以雷达为参考点的大地直角坐标,由雷达的大地坐标可得其地心直角坐标。最后把目标地心直角坐标转换为大地坐标,从 SRTM 数据中可以得到杂波单元所在经纬度位置的高度,再利用地形地物特征分析数据就可以得到该散射单元地形种类。

将以地面坐标为参考的数据转换到机载雷达的球坐标  $(R, \theta, \varphi)$  中,地面任意节点的位置矢量为  $\mathbf{R}_i = x_i \mathbf{x} + y_i \mathbf{y} + z_i \mathbf{z}$ , 其中  $z_i = h_i - H$ ,  $h_i$  为地形高度,  $H$  为雷达运动载体高度;  $x_i, y_i$  由雷达投影相对节点位置决定。在计算过程中,根据 PD 雷达距离分辨率和多普勒分辨率划分的杂波散射单元的范围通常小于 SRTM3 数据中  $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$  的单元,当散射单元恰好处于 SRTM3 数据不同单元中时,取 SRTM3 数据不同单元的算数平均值。

## 2 雷达信号处理

### 2.1 距离门处理

实际中雷达的接收波形主要包括目标回波、杂波以及噪声三部分。为了测距的需要,必须在窄带滤波器处理之前加上距离选通放大器,根据距离选通来识别目标的距离。增加距离选择以后,还可以抑制距离门以外的干扰。图 2 给出了实现距离门重排的二维存储器图以及读入和读出顺序<sup>[6]</sup>。首先对第一个距离门的数据进行分析,接着再分析来自第二个距离门的数据,如此类推。

		距离门				
		1	2	3	...	$M$
脉冲数	1	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$	...	$S_{1M}$
	2	$S_{21}$	$S_{22}$	$S_{23}$	...	$S_{2M}$
	...	...	...	...	...	...
	$N$	$S_{N1}$	$S_{N2}$	$S_{N3}$	...	$S_{NM}$

图 2 距离门重排示意图

输入数据按照距离门进行重新排列。脉冲压缩体制的雷达距离门通常取为脉冲压缩后的脉冲宽度,因此一个脉冲重复周期通常可以被分成多个距离门单元。图中的行表示每一脉冲重复周期分割成不同的距离单元,列表示同一距离单元的不同脉冲数。每一列相邻两个数据之间的时间差恰好是脉冲重复周期。采样数据按照上面的格式进行重排后,通过对当前帧数据的处理,就可以得到目标距离与速度信息。

### 2.2 杂波处理

将经过距离门选通后的回波信号进行傅里叶变换,可以得到目标回波的频域信号,从中截取出带宽为脉冲重复频率即信息量最大的单根谱线,加上之前根据真实地形产生的相应频带的杂波信号,构成了回波信号的频谱。杂波信号主要由主瓣杂波、副瓣杂波以及高度线杂波构成<sup>[6]</sup>。

主瓣杂波是雷达天线主瓣照射地面得到的散射回波,主瓣杂波多普勒频移取决于飞机速度以及速度矢量与雷达天线视轴间的夹角。主瓣杂波的中心频率为  $f_{MB} = (2V_R \cos \phi) / \lambda$ , 其幅度取决于雷达平台的高度、地面的后向散射特性、发射机功率、天线主波束增益等雷达参数。雷达天线的旁瓣以各种角度照射地面,被地面散射后,有一部分能量进入接收机形成旁瓣杂波。雷达天线中沿垂直方向照射地面的能量被地面反射后进入接收机形成高度线杂波。

杂波处理模块包含零多普勒频率抑制滤波器以及主瓣杂波抑制滤波器。零多普勒频率抑制滤波器主要用于滤除高度杂波。高度杂波是由地面的垂直反射所形成的杂波,通常比漫反射所形成的旁瓣杂波要强得多。当载机水平飞行时,高度杂波的多普勒频移为零,所以可以加上一个零多普勒滤波器来滤除它,滤波器的凹口需对准频谱中与中心频率频移为零的地方。主瓣杂波的干扰最强,通常比目标回波能量高出  $60 \text{ dB} \sim 80 \text{ dB}$ 。由于主瓣杂波的位置与载机速度和天线的指向有关,因此抑制主瓣杂波常用的方法是首先确定它的中心频率,然后用一个固定频率的滤波器将其滤除。主瓣杂波抑制滤波器的幅频特性应是主瓣杂波频谱包络的倒数,以使通过滤波器后输出的杂波频谱可近似为平坦的特性。

### 2.3 恒虚警处理及检测

由于杂波处理过的回波频谱除了包含目标信号以外,还含有一定的副瓣杂波和噪声,因此需采用恒虚警处理对其进行抑制,保证目标能够被检测出来。雷达信号检测的基本准则即是在保持恒虚警率和其他条件不变的情况下使目标的发现概率最大,本文选用较为常用的选大统计恒虚警 GO-CFAR。首先将滤波后的输入信号分成若干单元,对其中某一单元进行处理,则将其作为检测单元,除去相邻的两个保护单元,在其左右各取  $n$  个单元  $X_1 \cdots X_n, Y_1 \cdots Y_n$ , 并求和,得到

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (6)$$

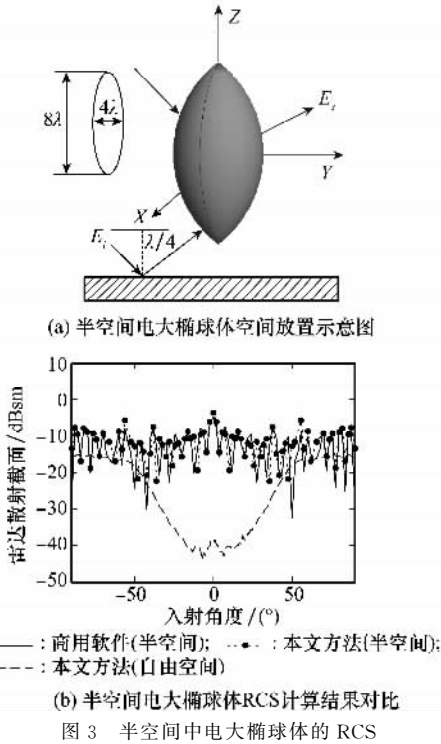
令  $Z = \max(X, Y)$ , 乘以门限因子  $T$ , 得到比较单元  $S$ , 若检测单元超过  $S$  则判为有目标,否则为无目标。根据目标所在单元可以得到其多普勒频移  $f_d$ , 则目标的速度为

$$V_{\text{target}} = (f_d \lambda - V_{\text{radar}}) / \cos \theta \quad (7)$$

式中,  $\theta$  为目标方位角。

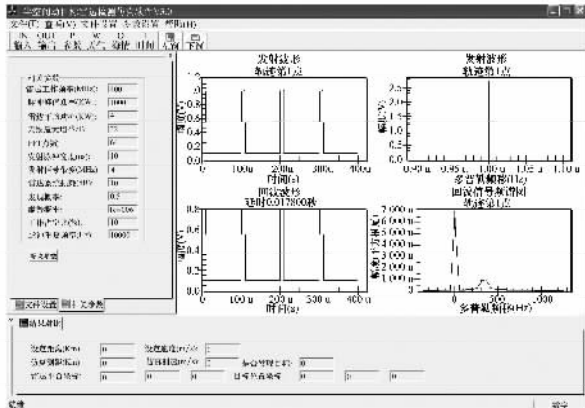
## 3 仿真计算结果

首先以半空间环境下电大椭球体为例对半空间多重散射影响进行验证,图 3 为距离地面  $\lambda/4$  的电大椭球体,土壤的相对介电常数  $\epsilon_r = 4.0$ , 相对磁导率  $\mu_r = 1.0$ , 频率  $f = 10 \text{ GHz}$ , 设定  $X$  轴正方向为  $0^\circ$  入射方向,入射波在  $XOZ$  平面内,将计算结果与仿真结果进行比较验证,结果如图 3 所示。



从图 3 中可知,本文方法和商用软件的计算结果基本相同,这证明了本文方法的有效性。对照自由空间与半空间图形曲线变化趋势,可以发现在入射角为 $\pm 45^\circ$ 的区间内半空间目标散射结果要明显高于自由空间。这表明半空间与自由空间之间的目标散射特性还是存在较大差异的,不能忽视半空间环境因素对目标的影响。

最终实现的雷达仿真软件界面如图 4 所示,在输入模块中确定以下参数:雷达平台经度  $116^\circ$ ,纬度  $31.6^\circ$ ,高度  $5\ 000\text{ m}$ 。目标经度  $117.7^\circ$ ,纬度  $31.9^\circ$ ,高度  $30\text{ m}$ 。雷达发射功率  $1\ 000\text{ kW}$ ,雷达工作频率  $400\text{ MHz}$ 。发射信号形式脉冲线性调频信号,发射信号脉冲宽度  $10\ \mu\text{s}$ 。脉冲压缩比  $10\ \mu\text{s}/220\text{ ns}$ ,雷达载机速度  $168\text{ m/s}$ ,载机偏航角  $10^\circ$ ,载机倾斜角  $0^\circ$ ,载机滚转角  $5^\circ$ ,天线偏航角  $0^\circ$ ,天线倾斜角  $0^\circ$ ,天线最大增益  $30\text{ dB}$ ,半功率点波束宽度  $6.5^\circ$ ,脉冲重复频率 (PRF):  $10\text{ kHz}$ ,  $800\text{ Hz}$ 。由参数设定可得出距离门是  $33\text{ m}$ ,而目标与雷达的实际距离应该是  $167.707\text{ km}$ 。



仿真中雷达目标的速度为  $300\text{ m/s}$ 。PRF 为  $800\text{ Hz}$  时,目标频移是  $650\text{ Hz}$ ,最大不模糊距离是  $187.5\text{ km}$ ,目标谱线落在第  $5\ 082$  个距离门。但由于频率严重模糊,目标谱线被湮没。PRF 为  $10\text{ kHz}$  时,目标频移是  $650\text{ Hz}$ ,由于距离模糊,最大不模糊距离是  $15\text{ km}$ ,所以目标谱线落在第  $83$  个距离门。图 5 给出了两种 PRF 时的时距离门-频移二维功率图。

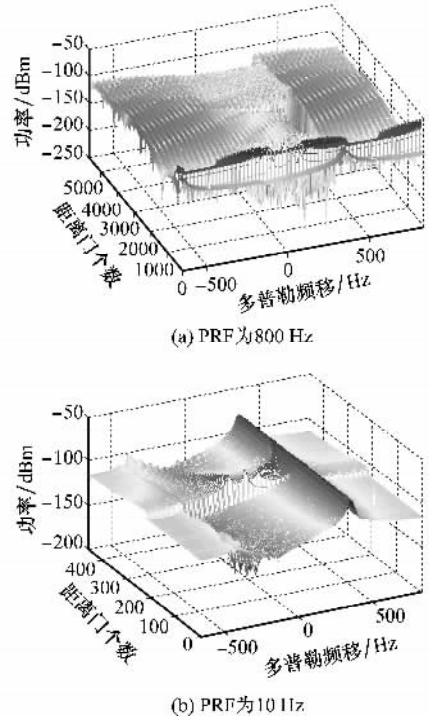


图 5 距离门-频移二维功率图

利用雷达回波中目标与杂波背景多普勒频移的不同,可以将动目标和固定背景区分开,如图 6 所示。图中实线表示含雷达目标和各类杂波的回波频谱,虚线表示该回波频谱经过主瓣滤波、副瓣滤波和高度线滤波后的结果。在图 6(a)中,雷目径向速度为  $75\text{ m/s}$ ,多普勒频移为  $201\text{ Hz}$ ,恰好被主瓣杂波淹没,经各种滤波处理后也无法发现目标。而在图 6(b)中,在其他环境变量不变的前提下,设定雷目径向速度为  $243\text{ m/s}$ ,对应多普勒频移为  $648\text{ Hz}$ ,避开了背景杂波区域。在经过适当滤波和恒虚警处理后,目标可以被准确识别。

最后的例子给出了设定目标速度为  $240\text{ m/s}$ 、雷达平台与目标距离为  $160\text{ km}$  时的本系统的仿真结果。如表 1 所示,本文方法能够准确地解决 PD 雷达系统在真实地形条件下建模的信号处理仿真问题。

表 1 测速测距结果

目标距离/ km	检测距离/ km	距离偏差/ m	目标速度/ (m/s)	检测速度/ (m/s)	速度偏差/ (m/s)
30	30.005 2	5.2	240	245.1	5.1
60	60.007 3	7.3	280	283.3	3.3
90	90.002 1	2.1	320	317.5	2.5

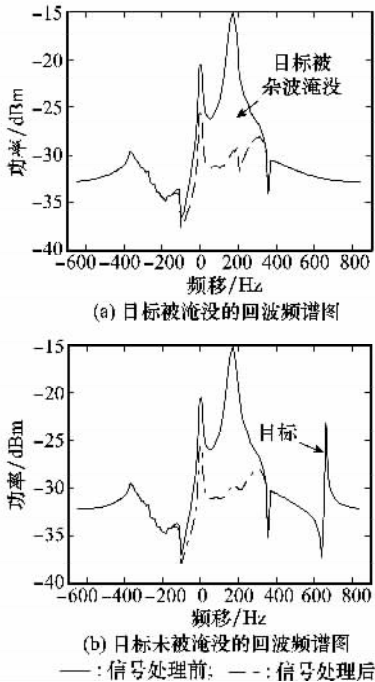


图6 回波频谱图

## 4 结 论

现有仿真文献在计算地杂波时通常采用概率统计算法,而计算雷达回波时主要针对自由空间环境进行计算。本文以脉冲多普勒雷达为平台,利用SRTM数据建立真实地形环境,生成地杂波模拟数据,并采用半空间物理光学结合图形电磁学,快速准确地计算了半空间低飞复杂目标的雷达回波信号。最后采用频域信号处理方法对雷达回波信号进行研究,通过同步检波、距离门重排、杂波处理、恒虚警处理等信号处理步骤,实现对目标探测、测速和测距的功能。基于本文的工作基础,下一步工作将研究地形遮蔽以及多径传播的影响,建立更切合实际的脉冲多普勒雷达仿真系统。

## 参考文献:

- [1] Li X F, Xie Y J, Wang P, et al. High-frequency method for scattering from electrically large conductive targets in half-space[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2007,6(11):259-262.
- [2] Prasad N N, Shameem V, Desai U B. Improvement in target detection performance of pulse coded Doppler radar based on multicarrier modulation with fast Fourier transform[J]. *IEE Proc. of Radar, Sonar and Navigation*, 2004,151(1):11-17.
- [3] 叶红霞,汪文秉,金亚秋. 预警雷达信号模拟的研究[J]. *现代雷达*, 2004,26(6):1-3.
- [4] 胡居荣,曹宁,鹿浩. 雷达杂波视频信号实时仿真与系统实现[J]. *舰船电子对抗*, 2007,30(6):74-95.
- [5] Chen Yongpin, Nie Zaiping, Hu Jun. Fast and accurate analysis of electromagnetic scattering from targets situated in dielectric half space [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010,21(1):37-40.
- [6] Sun S B, Song J M, Zhang J. Target tracking algorithm of low altitude interceptors based on UKF-IMM[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009,31(10):2367-2371.
- [7] Guo L X, Wang A Q, Ma J. Study on EM scattering from 2-D target above 1-D large scale rough surface with low grazing incidence by parallel MOM based on PC clusters[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2009,89:149-166.
- [8] Guan B, Zhang J F, Zhou X Y. Electromagnetic scattering from objects above a rough surface using the method of moments with half-space green's function[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2009,47(10):3399-3405.
- [9] Hu Y Q, Ding D X, Fan Z H, et al. Well-conditioned mlfma for electromagnetic scattering from dielectric objects above a lossy half-space [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010,52(2):381-386.
- [10] Liao S L, Vernon R J. A fast algorithm for computation of EM wave propagation in half-space[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2009,57(7):2068-2075.
- [11] Chen R S, Hu Y Q, Fan Z H, et al. An efficient surface integral equation solution to EM scattering by chiral objects above a lossy half space source[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2009,57(11):3586-3593.