

# 任意姿态机载 PD 雷达三维地杂波算法研究

康士峰<sup>1,2</sup>, 罗贤云<sup>1</sup>, 葛德彪<sup>2</sup>, 张忠治<sup>1</sup>

(1. 中国电波传播研究所青岛分所, 青岛 266071; 2. 西安电子科技大学物理系, 西安 710071)

**摘 要:** 地海面杂波特性对主要采用下视工作方式的机载脉冲多普勒(PD)雷达具有十分重要的影响. 本文在具体分析 PD 雷达工作体制的基础上, 详细研究了载机处于任意飞行姿态下, 利用三维数字地形高程图和对应地物散射特征分类, 模拟产生多频段多极化雷达距离-多普勒杂波图的方法. 仿真结果证明了该算法的有效性.

**关键词:** 3D 地形; 杂波; 机载 PD 雷达; 算法

**中图分类号:** TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 03-0021-04

## Study on Algorithm of 3D Terrain Clutter for Airborne PD Radar with Arbitrary Postures

KANG Shi-feng<sup>1,2</sup>, LUO Xian-yun<sup>1</sup>, GE De-biao<sup>2</sup>, ZHANG Zhong-zhi<sup>1</sup>

(1. China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266071, China; 2. Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The characteristics of the ground and sea clutter have some important effects on the airborne PD radars with look-down mode. Based on the analysis of the PD radar system, this paper studies in detail the modeling method of distance-doppler clutter graph of the radar by using an elevation graph of 3D digital terrain and the corresponding classification of terrain with arbitrary postures of the aeroplane. Finally, the validity of the method has been proved by the simulation results.

**Key words:** 3D terrain; clutter; airborne PD radar; algorithm

## 1 引言

对于采用下视工作方式的机载预警雷达来说, 环境特别是地海面杂波对目标检测和识别的影响十分突出, 需要认真研究, 以便采用有效的系统设计和信号处理方法, 提高雷达整体性能. 近年来, 一方面随着理论分析和实验研究工作的不断深入, 电磁波和复杂介质(目标和环境)相互作用的物理机理和定量计算方法、统计特性已逐渐为人们所理解和掌握, 并应用于解决实际问题; 另一方面, 计算机技术、遥感技术的发展和地理信息系统(GIS)的建立和完善为人们提供了先进的数据处理工具和自然、人为环境的大量信息. 在此基础上, 行之有效的计算机数值分析和模拟技术正得到越来越多的重视. 在复杂雷达系统和目标、环境的模拟方面国外已作了一定的工作, 用来对系统设计和信号处理方法提供仿真数据和性能评估、跟踪预测、飞行计划等<sup>[1~4]</sup>. 国内也在进行相关技术的研究, 包括数值分析方法、模拟软件和设备的研制, 并已取得进展. 但对载机由于各种原因处于任意姿态和三维真实复杂地形情况下的杂波影响还少有分析. 本文主要针对载机实际可能的任意姿态飞行情况, 研究真实地形、地貌所产生的 PD 雷达距离-多普勒杂波, 详细分析根据雷达参数、飞机姿态、几何关系和地表状况等因素计算杂波平均功率的方法, 并对某

地区数字地形作了实况模拟, 检验了算法的有效性, 最后就存在的问题作了进一步的探讨. 本文算法虽针对机载雷达功率模拟, 但某些处理方法对地面雷达和相干杂波模拟也有一定的借鉴意义.

## 2 机载 PD 雷达体制及地杂波特点

机载雷达预警范围广, 为了抗拒由于下视所产生的严重地海环境杂波, 有效提取雷达回波中所包含的目标距离和速度信息, 一般采用脉冲多普勒体制. 根据实际需要, 分为低、中、高三种脉冲重复频率(PRF)工作方式, 对应有不同的距离和多普勒频率(速度)分辨能力. 其接收回波处理方式为: 微波信号首先被下变频至中频, 然后经 IQ 检波和采样进行距离门选通和多普勒分析(由滤波器组或  $N$  个脉冲采样点 FFT 处理)<sup>[2]</sup>.

设雷达脉冲重复频率为  $f_r$ , 脉冲宽度为  $\tau$ , 则距离分辨率  $R = c/2$ , 多普勒滤波器带宽  $f = f_r/N$  ( $N$  表示总滤波器数或 FFT 同时处理的脉冲数), 不模糊距离和不模糊频率表示为:  $R_u = c/(2f_r)$ ,  $f_u = f_r$ . 在同一距离门和多普勒带宽内满足距离模糊和频率模糊的目标和地面单元应满足如下距离和多普勒频率条件:

$$R_0 + mR_u \leq R \leq (R_0 + R) + mR_u \quad (1)$$

$$f_0 + nf_r \leq f \leq (f_0 + f) + nf_r$$

其中  $m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$   $R_0, f_0$  为回波对应的距离门和多普勒频移, 若选取  $R_0 = (I-1)R, f_0 = (J-1)f$ , 则  $I, J$  分别对应距离门数和多普勒滤波器数  $(1, 2, \dots)$ .

图 1 表示当载机水平飞行时根据式 (1) 应叠加的平地面积杂波单元, 当载机呈任意姿态、地面为真实地形地貌时形状将极不规则, 十分复杂.

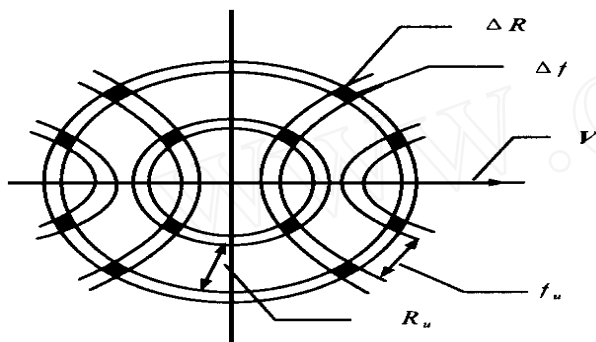


图 1 地面叠加杂波单元

机载 PD 雷达地杂波频谱的主要特点是: 主瓣杂波的频谱中心位于  $(2V/\lambda) \cos \theta$ , 其中  $V, \lambda, \theta$  分别为载机速度、雷达波长和天线波束轴线与速度方向夹角; 旁瓣杂波最大多普勒频宽为  $4V/\lambda$ ; 高度杂波则因不存在相对运动, 无多普勒频移, 频谱位于载频上.

### 3 三维地杂波功率的计算方法

雷达杂波的模拟主要有功率模拟和相干信号模拟两种基本方法. 后者利用了杂波的相位, 包含了有关雷达环境的全部信息, 但比前者复杂的多, 实现较为困难. 功率模拟是对杂波平均功率的一种描述, 它对系统大规模的模拟和某些实时模拟用途较大, 实现该方法的基础是雷达距离方程, 进一步由信杂比和目标、杂波起伏统计特性可得出雷达目标发现概率或虚警概率.

#### 3.1 三维数字地理信息的描述

为了根据真实地形地物对相关地面单元的杂波贡献进行计算, 首先需要提取特定地区的地理信息, 制作数字地图, 其中包括数字地形高程数据 (DTED) 和地形地物特征分析数据 (DFAD, 含自然和人为环境、扩展目标和点目标), 这些数据是杂波计算的基础. 若地面以正方形网格划分, 则每对数据代表了以网格节点为中心具有一定地形分辨率的地面海拔高度和地物散射特征.

#### 3.2 雷达距离-多普勒功率方程

基于以上分析, 一个距离门-多普勒带宽内所包含的杂波功率是所有满足式 (1) 的大量节点单元的杂波贡献, 雷达方程表达式为:

$$P_r = \frac{2 P_t}{(4\pi)^3} \sum_m \sum_n \sum_i \frac{G^2(\theta_i, \phi_i) R_i^4}{R_i^4} \quad (2)$$

其中:  $P_t, P_r$  分别表示雷达发射和接收功率;  $\theta_i, \phi_i$  分别

表示满足距离模糊和频率模糊的杂波之和;  $\sum_i$  表示每一距离多普勒单元中各节点对应杂波之和;  $G(\theta_i, \phi_i), R_i$  分别表示节点处的天线增益和节点至雷达的距离;  $\sigma_i$  表示节点处的散射截面 (孤立目标) 或  $\sum_j \sigma_j A_j$  (扩展目标),  $\sigma_j$  为地物散射系数, 由模型给出,  $A_j$  则视节点区域划分而定.

#### 3.3 雷达-地面几何关系与坐标变换

如图 2 所示, 将以地面坐标为参考的数据转换到机载雷达的球坐标  $(R, \theta, \phi)$  中, 设地面任意节点的位置矢量为:

$$R_i = x_i x + y_i y + z_i z \quad (3)$$

则:

$$R_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$$

$$\sin \theta = z_i / R_i \quad (4)$$

$$\tan \phi = y_i / x_i$$

其中:  $z_i = h_i - H$ ,  $h_i$  为地形高度,  $H$  为雷达高度;  $x_i, y_i$  由雷达投影相对节点位置决定.

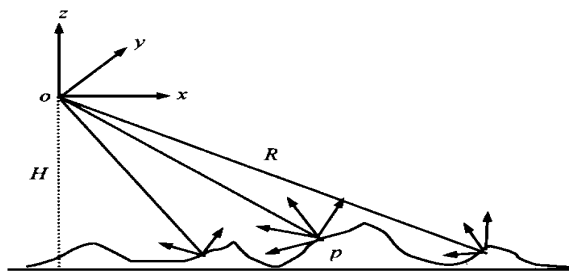


图 2 雷达与地面散射关系

设载机速度矢量在  $xoy$  平面上的投影与  $x$  轴夹角为  $\alpha$ , 与水平面夹角为  $\beta$  (俯冲), 载机速度坐标系为  $x_v y_v z_v$ , 则速度矢量和节点位置矢量为:

$$V = V \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha \cos \beta \\ -\sin \beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R_i = R \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi \\ \cos \theta \sin \phi \\ -\sin \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

点  $(x_i, y_i, z_i)$  的多普勒频移为:

$$f_d = (2V/\lambda) \cos(\alpha, R_i) \quad (7)$$

由于偏流和侧滚的影响, 载机在空中的实际飞行姿态十分复杂, 需作相应坐标变换并最终和以机身作为参考的天线坐标系相一致, 求取地形节点位置的天线方向性因子.

(1) 偏流影响 由于偏流, 设机身正方向相对航速方向逆时针方位偏转  $\delta$ , 上仰  $\alpha$ , 可导出偏流时机身坐标系  $x_d y_d z_d$  与速度坐标系  $x_v y_v z_v$  的关系式:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{bmatrix} = [T_d] \begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[T_d] = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \delta & \sin \alpha \cos \delta & \sin \alpha \\ -\sin \delta & \cos \delta & 0 \\ -\cos \alpha \sin \delta & -\sin \alpha \sin \delta & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (9)$$

(2)侧滚影响 由于侧滚,机身侧垂线已不再位于空间水平面内,设侧滚角 绕  $x$  轴顺时针旋转,  $y$  轴偏离水平面,此时,侧滚坐标系  $x_r y_r z_r$  即同天线坐标系  $x_d y_d z_d$  重合:

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = [T_r] \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[T_r] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos & -\sin \\ 0 & \sin & \cos \end{bmatrix} \quad (11)$$

(3)总变换关系 综合考虑航速、偏流和侧滚后,以地面为参考的雷达坐标变换到了以机身参考的天线坐标,其关系为:

$$XYZ \xrightarrow{d, d} X_v Y_v Z_v \xrightarrow{d, d} X_d Y_d Z_d \xrightarrow{X_d Y_d Z_d} X_r Y_r Z_r (X_d Y_d Z_d)$$

即:

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[T] = [T_r][T_d][T_v] \quad (13)$$

### 3.4 地形遮蔽处理方法

因地形起伏且存在自然或人造地物,每一地面单元有可能被其它单元或自身遮挡,需作出雷达可见性判断,类似计算机图形学中的消隐分析。

利用射线跟踪并采用如下原则和判断:

(1)可能遮挡点(称相关点)存在于被判断点雷达射线管的前方投影区域内,在被判断点处半径设为一个地形分辨率(网格长度)。

(2)进一步比较节点对雷达的仰角大小,若存在仰角小的相关点则被遮蔽。

(3)对不被遮挡的节点根据适当划分的小三角形计算局部入射角  $\theta$ ,若  $\theta \geq \theta_c$  则该小面被自身遮挡,处于局部阴影区。

### 3.5 地形地物分类与散射模型

目标散射截面直接与地形地物类别、频段、极化和局部入射角有关,恰当的分类并进一步选择合适的依赖形式关系到杂波输出的有效性,这是杂波模拟与理论研究、实验测量相联系并服务于应用的实质性问题。

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。Anderson 提出的四种主要分类及特征是:(1)荒地和稀疏植被:植物不生长或极少;(2)植被覆盖:生长自然植被或农作物;(3)城市:人造开阔表面或人造结构显著;(4)雪地:植被或地面被连续雪层覆盖。基于此,F. T. Ulaby 归纳了九种地形环境分类:土壤和岩石表面;树林;草地;灌木丛;短植被;路面;城市地区;干雪;湿雪。并对每种分类进行了数据统计,建立了经验模型<sup>[5]</sup>:

$$\sigma_{\text{mean}}^0 = P_1 + P_2 e^{(P_3)} + P_4 \cos(P_5 + P_6) \quad (\text{dB}) \quad (14)$$

其中  $P_1 - P_6$  为统计参数,  $\theta$  为局部入射角(弧度)。

以上形式在 L, S, C, X, Ku 频段 HH, VV, HV 极化基本上都已给出了参数,但在 Ka 和 W 频段以及开阔水面(如湖、河流和海面)数据尚缺,需补充合适模型。我国也有一些自己特色的模型和数据可供采用,如<sup>[7]</sup>:

$$\sigma^0(\text{dB}) = P_1 + P_2 \lg \cos \theta + e^{-P_3(\theta - P_4)} \quad (15)$$

对于不同特点的地形地物也可选用有针对性的更加实用的模型形式<sup>[6]</sup>。

## 4 算法实现与模拟结果

为了检验算法的有效性,分别采用分形地形、真实地形数据和各种载机、雷达参数对距离-多普勒二维杂波图进行了仿真计算。下面给出一组真实数字地形(草地)的模拟结果(图 3~9 所示),使用参数如下表。

雷达参数		载机参数	
频率	L 波段	速度	100m/s
极化	HH	速度方位	90 度
PRF	2kHz	速度俯仰	5 度
脉宽	1μs	偏流方位	5 度
距离门	150m	偏流俯仰	5 度
滤波器	64	侧滚	5 度
功率	2kW	高度	5000m
天线	侧视相控阵 24 * 24,增益 30dB		

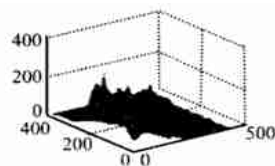


图 3 真实数字地形

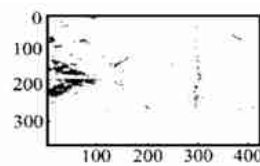


图 4 雷达可见与遮蔽区

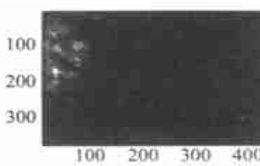


图 5 地形灰度图像

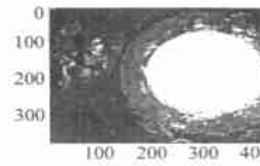


图 6 雷达散射系数图像

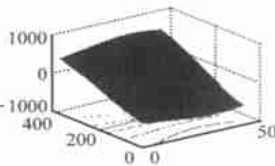


图 7 多普勒频移

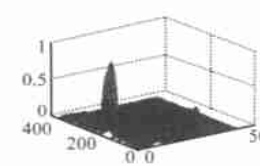


图 8 地面天线因子

地形分辨率为 25m, 面积  $9.25 \times 10.7 \text{ km}^2$ , 载机坐标 (180, 300, 5000)。由于实际地形整体较为平坦, 从雷达高度看, 地面大部分区域是可见的, 遮蔽区主要存在于较大起伏位置(图 4); 比较图 5 和图 6 可以看出, 模拟的地面雷达散射截面图像与地形灰度图像吻合得很好, 能表现出丰富的地形纹理特征。由图 9 杂波图, 高度杂波远大于主瓣杂波和旁瓣杂波, 频移范围小, 这主要是因为载机下方地形平坦以及天线为相控阵点波束的缘故。所模拟的结果与理论分析和类似环境机载杂波

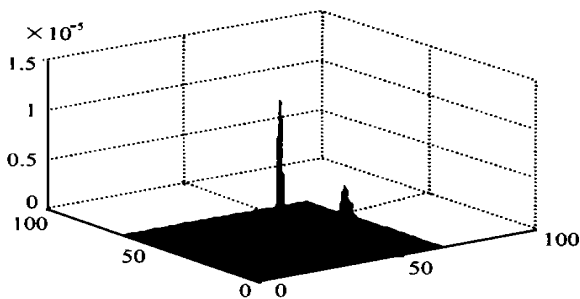


图9 距离-多普勒杂波图

实测数据基本一致。

## 5 问题与讨论

本文详细研究了三维数字地形机载 PD 雷达杂波功率的算法,地面孤立目标的信息可加入相应地形单元中。地形遮蔽的分析处理计算量大,是算法实现的关键之一,特别是对于具有较大起伏的复杂地形地貌,如丘陵、山区、城市等,有效的遮蔽算法直接关系到模拟数据的实用性。本文算法利用载机和数字地形数据的几何关系能够直观地给出雷达可见区与被遮挡区,但也存在一定的局限,如对于近距离照射区由于地形的网格离散化以及网格大小的限制,在某些特殊方位上几何投影关系有一定的变形,这种近似对于机载雷达的影响较小,因为地形和目标一般位于雷达的远区,但对于地面雷达就需采用更好的方法。另外,在模拟更多地形数据或需要更精确模拟(区域大或分辨率高)以及要求实时性时,计算量必须考虑,对大气折射和地球曲率影响也需作出修正。解决以上问题的可能途径是进一步优化程序设计、采用计算机图形学中的消隐算法以及采用更先进的计算机硬件和软件环境。

## 参考文献

- [1] [美]R.L. 米切尔. 雷达系统模拟. 北京:科学出版社,1982
- [2] [美]G.V. 莫里斯等. 机载脉冲多普勒雷达. 北京:航空工业出版社,1990
- [3] M. Diani, G. Corsini, F. Berizzi, D. Calug. Ground clutter model for airborne MPRF radars in look-down search mode. IEE Proc. - Radar Sonar Navig., 1996, 143(2): 113 ~ 120
- [4] C. A. Darrah, D. W. Luke. Site-specific clutter modeling using DMA digital terrain elevation data (DTED), digital feature analysis data (DFAD), and lincoln laboratory five frequency clutter amplitude data. IEEE National Radar Conference, Michigan, 1996
- [5] F. T. Ulaby and M. C. Dobson. Hand Book of Radar Scattering Statistics for Terrain. Artech House, 1989
- [6] 罗贤云, 张忠治. 小麦水稻后向地磁散射建模研究<sup>0</sup>与入射角的关系. 新乡:电波科学学报, 1994, 9(2): 20 ~ 29
- [7] 汤明, 尹志盈. 地物散射特性的实验研究. 北京:科学通报, 1996, 41(7): 662 ~ 664



康士峰 高级工程师,1987年毕业于成都电讯工程学院电磁场工程系,1993年在中国电波传播研究所获工学硕士学位,1997年开始在西安电子科技大学攻读博士学位,现主要从事电磁散射理论、测试和模拟工作。



罗贤云 高级工程师,1990年毕业于国防科技大学应用物理系,1993年在中国电波传播研究所获硕士学位,1998年获西安交通大学博士学位,主要研究方向为海面散射理论建模、信号处理及其在雷达系统中的应用。

葛德彪 1961年毕业于武汉大学物理系,现为西安电子科技大学教授、博士生导师,中国电子学会会士,主要从事逆问题与电磁成像、电磁散射和数值方法研究。

张忠治 研究员,1962年毕业于武汉大学物理系,国防科工委军用目标特性和传输特性专业组成员,电科院军事电子专家委员会委员,主要从事对流层传播、雷达目标与杂波方面的研究。