

基于数字高程模型数据的机载认知雷达地杂波建模方法研究

饶妮妮¹, 陈星波¹, 周加兵¹, 邱朝阳², 刘丁贇¹

(1. 电子科技大学生命科学与技术学院 成都 610054; 2. 中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所 江苏 无锡 214063)

【摘要】针对机载认知雷达信号处理的特点,设计了一种基于数字高程模型数据的地杂波建模方法。该方法首先从数字高程模型数据中提取对杂波功率谱有影响的地形因子,然后结合地理地貌学理论和地形因子对数字高程模型提供的真实地貌类型进行量化分类;设计动态数据库来存储量化后的地貌信息,以提高杂波建模过程的实时性;最后基于地貌信息和后向散射系数模型构建地杂波。仿真结果表明,采用该方法构建的地杂波模型符合机载雷达所处的地貌实际情形,用作机载认知雷达的先验信息时具有真实、稳定和可靠的优势,可有效地辅助机载认知雷达提高工作性能和生存力。

关键词 机载认知雷达; 数字高程模型; 地杂波; 知识辅助的自适应技术; 先验信息
中图分类号 TN959.1 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2016.04.003

Research on Ground Clutter Modeling of Airborne Cognitive Radar Based on Digital Elevation Model Data

RAO Ni-ni¹, CHEN Xing-bo¹, ZHOU Jia-bing¹, QIU Zhao-yang², and LIU Ding-yun¹

(1. School of Life Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Radar and Avionics Institute, Aviation Industry Corporation of China Wuxi Jiangsu 214063)

Abstract Airborne cognitive radar uses priori clutter knowledge-aided adaptive technique to suppress the clutter. Thus, the authenticity and validity of clutter model has a great influence on the detection performance of airborne cognitive radar. Considering the characteristics of signal processing technologies in airborne cognitive radar, this paper designs a clutter modeling method based on the digital elevation model data. The new method extracts the terrain factors influencing the power spectrum of clutter from DEM data. By combining the geographical landscape theory with the terrain factors, the real landforms provided by DEM are quantifiably classified. In order to increase the real-time in modeling clutter, a dynamic database is designed to store the quantized landform information. Finally, the ground clutter model is constructed based on the topography information and backscattering coefficient model. The simulation results show that the ground clutter model we constructed fits with the actual topography where the airborne radar locates. The model has the real, stable and reliable advantages when it is used to obtain the priori information of airborne cognitive radar and it can effectively aid airborne cognitive radar to improve detection performance and survivability.

Key words airborne cognitive radar; digital elevation model; ground clutter; knowledge-aided adaptive technology; priori information

当机载雷达工作在下视模式时,强度很大的地杂波信号将导致其在探测低空、微小和慢速运动目标时性能恶化,因此,地杂波抑制是提高机载雷达工作性能的重要关键技术之一。认知雷达引入了生命科学中“认知”的概念^[1],其接收机能够将从雷达回波中提取的相关信息与环境数据库里的先验知识结合,通过反馈结构传送到其智能发射机,发射机再针对获取的信息调整接下来的发射波形,以适应当前的电磁环境及杂波背景。由于机载认知雷达

采用了基于先验杂波知识辅助的自适应技术来抑制杂波,所以它在探测低空、微小和慢速运动目标上比现代机载雷达更具优势,其生存能力和抗干扰能力更强。由此可知,构建符合真实环境的地杂波模型,对于提高机载认知雷达在复杂地杂波背景下的检测性能和工作效率具有十分重要的意义。

迄今为止,研究者围绕机载雷达的地杂波构建开展了大量的研究。其中,基于统计模型(满足一定概率分布和某种相关模型)的杂波建模方法^[2-4]模拟

收稿日期: 2016-05-15

基金项目: 航空科学基金(20142080011)

作者简介: 饶妮妮(1963-),女,教授,主要从事信号与图像处理及医学基因组学和雷达等方面的研究。

的杂波数据与实际有一定的偏差,不能很好地符合实际复杂多变的地形,应用于机载认知雷达时存在较大的局限性。文献[5]提出了利用地形数字信息来进行雷达杂波的建模仿真,利用地形起伏和地表环境特征来计算镜面反射系数,然后用镜面反射系数计算地表场景的雷达散射截面,最后利用雷达方程获得杂波数据。文献[6]将数字地形高程数据(digital terrain elevation data, DTED)和数字特征分析数据(digital feature analysis data, DFAD)结合来获得地形分类信息,然后与MIT林肯实验室的杂波幅度模型结合进行杂波建模仿真;然而限于当时技术的原因,存在仿真处理速度缓慢以及信息存储空间大的不足。文献[7]将实际地面环境的机载雷达遥感图像和数字地形数据结合,仿真地基雷达杂波;然而因选择的后向散射系数模型较为适合于陆基雷达,不适合于机载雷达的扫描特性。文献[8]针对强离散的杂波源,设计了地理信息系统(geographic information system, GIS)选择器,利用地貌信息删除固定孤立散射体来提高雷达检测性能。文献[9]对数字高程模型(digital elevation model, DEM)信息做了平滑处理和着色,在此基础上将地面划分为许多简单的散射单元,通过叠加每个单元的功率实现整个地杂波的计算。文献[10]针对机载PD雷达,通过给出利用DEM数据地貌类型信息确定杂波散射单元后向散射系数,并计算雷达散射截面积的方法,最后实现了单一地貌的地杂波仿真,该方法产生的杂波有一定实际价值。文献[11]提出了基于NVIDIA的通用并行计算架构(compute unified device architecture, CUDA)和DEM的地杂波仿真快速算法,在杂波仿真速度上有较明显的提高。然而,由于计算机技术和DEM数据来源等原因,上述方法存在不足:1)没有很好地利用DEM中包含的地形信息,对地貌类型的划分比较粗糙;2)后向散射系数模型较为简单,没有考虑雷达具体使用环境;3)对获得的地貌信息的存储管理以及使用没有与杂波建模过程进行紧密结合。迄今为止,满足认知雷达系统需求的动态杂波先验信息数据库还鲜有报道。

本文针对机载认知雷达信号处理的特点,设计了一种基于数字高程模型数据的杂波建模方法。该方法首先从DEM数据中提取对杂波功率谱有影响的地形因子,然后结合地理地貌学理论对DEM提供的真实地貌类型进行量化分类;设计动态数据库来存储量化后的地貌信息,以提高杂波建模过程的实

时性;最后基于地貌信息和后向散射系数模型构建地杂波。本文方法构建的地杂波用作机载认知雷达的先验信息时具有真实、稳定和快速的优势,可有效地辅助机载认知雷达提高工作性能和生存力。

1 方法

1.1 从DEM数据中提取地形因子

DEM是实际地形高程信息的离散模型,主要描述地表地貌形态的空间分布。有别于传统地形图,DEM将表征实际地形的地理信息以离散的数字形式按照一定的结构组织在一起。对DEM数据进行分析 and 计算可以提取出海拔、坡度、地面起伏和地表粗糙度等描述地貌类型的地形因子。根据这些地形因子,可以对地表的地貌类型进行划分,并根据划分结果计算散射单元的后向散射系数,最终实现杂波的建模。考虑到计算的便捷性,选择以规则栅格数据形式存储的DEM数据来提取海拔、坡度、地面起伏和地表粗糙度等描述地貌类型的地形因子。这类数据网格间距相等,可以直接根据原始坐标和网格间距确定每一栅格的平面坐标。

1.1.1 海拔及坡度的提取

DEM是由一系列的离散数据点组成,每一个数据点表示该地点的高程值,即海拔。因此,可以直接利用DEM数据获得每一个地面点的海拔数据。

地面坡度是一个矢量,由地面各点的坡度组成,可用过该点的切平面与水平地面的夹角表示,反映了地面在该点的倾斜程度。地面每一个点都有坡度,它是点上的概念。若用 $H = f(x, y)$ 表示地表曲面函数, H 为地面某点的高程值, x 为东西方向, y 为南北方向,则坡度为:

$$S = \arctan \sqrt{p^2 + q^2} \quad (1)$$

式中, $p = \partial H / \partial x$, $q = \partial H / \partial y$ 分别是高程 H 在 x 方向和 y 方向上的变化率。

表1 坡度的分析窗口

参数		
$H_{i-1,j-1}$	$H_{i-1,j}$	$H_{i-1,j+1}$
$H_{i,j-1}$	$H_{i,j}$	$H_{i,j+1}$
$H_{i+1,j-1}$	$H_{i+1,j}$	$H_{i+1,j+1}$

对于每一个地面栅格点,首先确定其分析窗口的大小,本文以栅格点 $H_{i,j}$ 为中心,以包含周围相邻8个栅格点的 3×3 窗口作为坡度的分析窗口,如表1所示。采用文献[12]提出的三阶反距离平方权差分

算法来计算 x 和 y 方向上的高程变化率 p 、 q ，再代入式(1)中，就可以得到该点的坡度。

由于采用的DEM数据是以矩阵形式存储的规则栅格数据，因此，将分析窗口进行上下左右平移就可方便地获得整块区域的坡度数据。

1.1.2 地形起伏的提取

地形起伏描述的是一定区域内地形的起伏变化情况，是一个区域地形特征的一个宏观指标。地形起伏是用一定区域内高程值的最大值与最小值之间的差值来描述的，有：

$$TR_i = H_{\max} - H_{\min} |_{H_{\max}, H_{\min} \in A_i} \quad (2)$$

式中， TR_i 代表该区域的地形起伏； A_i 为分析区域； H_{\max} 、 H_{\min} 分别是该区域的最大和最小高程值。

由式(2)可以看出，分析区域 A_i 对地形起伏因子的值有直接的影响，因此，选择一个合适的分析区域，对地形起伏信息的有效性起着关键性的作用，直接影响到对地面起伏特征的描述是否准确。文献[13]表明分析区域的形状对地形起伏的影响较小，而分析区域的大小则对地形起伏有明显的影 响，甚至可能影响到地形的分类。地形起伏最大值与分析区域的面积之间存在着某种依赖关系，且存在一个明显的分界点，使分析区域超过分界点后，地形起伏不再有明显的变化。因此，以分界点界定的区域作为分析区域是一种最佳选择。文献[14]表明全中国区域内的最佳分析统计区域单元面积为 21 km^2 。考虑到分析区域形状对地形起伏的影响不大和DEM数据的特点，将分析区域设置为矩形且单元面积取为 21 km^2 ，来提取地形起伏因子 TR_i 。

1.1.3 地表粗糙度的提取

地表粗糙度主要用来描述一定区域内的地表侵蚀程度，也是一个区域地形特征的一个宏观指标。它被定义为地形单元中4个点 ($H_{i-1,j-1}$ 、 $H_{i-1,j+1}$ 、 $H_{i+1,j-1}$ 、 $H_{i+1,j+1}$)组成的矩形的两条对角线的两个中点之间的距离，本文用 D 表示地表粗糙度。

根据 D 的定义可得：

$$D = R_{i,j} =$$

$$\frac{1}{2} |(H_{i+1,j+1} - H_{i-1,j-1}) - (H_{i-1,j+1} - H_{i+1,j-1})| \quad (3)$$

类似地，可以取一个分析窗口从DEM数据中提取地表粗糙度因子，窗口的大小根据DEM数据的水平分辨率来决定。

1.2 基于地形因子量化分类地貌类型

本文主要根据地貌对杂波功率谱的实质性影响

对地形进行分类，与常规根据地理地貌学分类地形的的方法不同。如按地理地貌学、平原和草原应该分类为不同的地貌，但这两种地貌对杂波功率谱(后向散射系数)产生的影响几乎没有差别，因此把两者划分为同一类。根据提取出的海拔高度、地面坡度、地形起伏和地表粗糙度等地形因子数据，再结合中国陆地基本地貌形态类型的分类类别^[13-18]，把地貌分为5种类型，分别为海面、平原、森林、丘陵以及高山，并分别量化编码为0、1、2、3、4。地貌类型编码及其对应的地形因子数值如表2所示。

表2 地貌类型编码及其对应的地形因子数值

地貌类型	量化编码	对应的地形因子数值			
		海拔/m	坡度/(°)	地形起伏/m	地表粗糙度/m
海面	0	0	0	0	0
平原	1	<30	<25	<200	<20
		30~500			
森林	2	500~1 200	25~40	200~300	20~40
丘陵	3	30~500	5~40	300~1 000	40~120
		500~1 200			
高山	4	>1 200		>1 000	>120

根据表2可以看出，在地貌类型分类中，平原、森林和丘陵之间存在着交叉，这是由于实际场景中很少存在单一的地形，丘陵地区一般都覆盖着树木等植被。因此，在根据地形因子进行地貌分类时，首先依据海拔高度进行粗划分，然后根据坡度、地形起伏和地表粗糙度等其他地形因子进行细划分。

1.3 经纬度计算

一个地点的方位主要由经度和纬度决定。由于每一份DEM数据是以该份数据的经纬度起始点为名保存的，本身不包含经纬度信息，又考虑到每份数据的经纬度跨度是确定的，因此，根据起始点经纬度、横向和纵向的数据点数以及终点经纬度信息，可以计算得到每一份DEM数据中每个高程数据对应的经纬度信息，即：

$$N_i = (N_0 + L_d / N_k) \quad (4)$$

式中， N_i 为具体的经度(或纬度)信息； N_0 为该份DEM数据的起始点的经度(或纬度)； L_d 是该份DEM数据的经度(或纬度)终点与起始点的差值； N_k 为该份DEM数据的经度(或纬度)方向上的数据点数。

1.4 地貌信息存贮与管理

由于地貌在较大的时间跨度内可认为是稳定不变的，并且计算不同地形因子的数据在来源、类型和格式等方面存在差异性，再加上一些地形因子的

计算十分耗时,因此需要把构建杂波模型的地貌信息事先存贮起来,建立不同信息之间的内在联系,提高先验信息的利用率和后续杂波建模的实时性。本文主要采用开源数据库MySQL平台来存贮和管理地貌信息。

由于需要存储的信息是未处理的DEM数据和经过处理之后获得的地形分类信息,所以库中一条数据记录被设计为由编号、经度、纬度、高程值和地形类型码(ID)等字段构成。其中,经度和纬度主要用于确定一个地点的方位,高程值和地形用于后续杂波建模,如擦地角的计算。为了方便存储和数据管理,数据表设计为二维数组,每行代表一条记录,每列由一个字段组成。由于知识辅助的机载认知雷达自适应处理过程具有读多写少操作的特点,所以选择MyISAM为存储引擎对信息进行更新、删除、添加和提取等操作。

在实际应用中,本文仅从该数据库中提取与载机当前位置和雷达扫描范围相关的记录,并重组为DEM数据和地形分类编码信息后用于杂波功率的计算,以降低运算量和提高处理的实时性。

1.5 计算杂波功率

假设目标信号和干扰信号均为零,收发共用同一天线,雷达发射功率为 P_t ,雷达收发天线增益为 $G_t = G_r = G$,收发天线的有效接收面积为 $A_r = A_t$,信号波长为 λ ,散射单元截面积为 σ ,则根据雷达方程^[19],天线接收的杂波功率计算模型为如下形式:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} = \frac{P_t A_t A_r \sigma}{4\pi \lambda^2 R^4} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (5)$$

由式(5)可知,基于DEM数据进行杂波建模的关键是如何利用DEM提供的真实地貌信息计算杂波散射单元的截面积 σ 。 σ 主要与杂波散射单元的散射系数和杂波散射单元的几何面积有关,有:

$$\sigma = \sigma^0 S_m \quad (6)$$

式中, σ^0 为该杂波单元的后向散射系数; S_m 为该杂波单元的几何面积。

1.5.1 杂波后向散射系数的计算方法

影响杂波后向散射系数的因素有很多,包括雷达工作频率、波束擦地角以及地面环境等。而地面环境因素又包括波束照射区域的地貌类型和天气情况等。后向散射系数模型就是后向散射系数与这些影响因素之间的关系模型。

与地形相关的散射系数模型有F.T.Ulaby模型、Morchin模型、修正的Morchin模型^[20]以及Barton模

型^[21]等。这几种散射模型都包含了与地面场景有关的参数,得到的散射系数将随地形的变化而变化。考虑载机在实际环境中的擦地角为 $0^\circ \sim 90^\circ$,采用修正的Morchin模型来估算地杂波散射系数。

修正的Morchin模型为^[20]:

$$\sigma^0 = \frac{A\sigma_c^0 \sin \theta_g}{\lambda} + \mu \cot^2 \beta_0 \exp \left[-\frac{\tan^2(B - \theta_g)}{\tan^2 \beta_0} \right] \quad (7)$$

式中, θ_g 为擦地角;当地面类型为沙漠并且 $\theta_g < \theta_c$ 时, $\sigma_c^0 = \theta_g / \theta_c$;对于其他地面类型或地面类型为沙漠,而 $\theta_g > \theta_c$ 时, $\sigma_c^0 = 1$; $\theta_c = \arcsin(\lambda / 4\pi h_e)$; $h_e \approx 9.3\beta_0^{2.2}$; $\mu = \sqrt{f_0 / 4.7}$; f_0 为雷达工作频率,单位为GHz; A 、 B 和 β_0 是与地貌类型密切相关的参数,其数值可以利用第2.2节提供的地形分类信息确定。

由此可知,只要获得波束擦地角,可计算出杂波的后向散射系数。然而,实际雷达波束照射的区域存在起伏,地面某一散射单元的擦地角并不一定等于雷达下视角,擦地角的计算需要考虑到杂波散射单元与载机的位置关系。为了获得准确的地面场景散射系数,需要计算场景中每个散射单元(DEM数据点)相对于载机位置的擦地角。为此,本文首先从数据库中提取出散射单元的高程和坐标信息,再根据散射单元到载机位置的向量与散射单元平面的法线向量之间的关系,确定散射单元的擦地角,具体方法如下:从DEM数据中取任意相邻的3个点,假设分别为 $A(x_a, y_a, z_a)$, $B(x_b, y_b, z_b)$, $C(x_c, y_c, z_c)$,这3个点组成一个三角形平面。令平面法向量 $\mathbf{u} = (x, y, z)$ 。由于该法向量 \mathbf{u} 分别与三角形平面的 \overline{AB} 和 \overline{AC} 边垂直,则有:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(x_b - x_a) + \mathbf{y}(y_b - y_a) + \mathbf{z}(z_b - z_a) = 0 \\ \mathbf{x}(x_c - x_a) + \mathbf{y}(y_c - y_a) + \mathbf{z}(z_c - z_a) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

通过变换可以得到平面法向量为:

$$\mathbf{u} = \left(\frac{z_a - z_b}{d_s}, \frac{z_a - z_c}{d_s}, 1 \right) \quad (9)$$

式中, d_s 为DEM数据的分辨率。

根据载机位置 (x_p, y_p, z_p) 与散射单元坐标 (x_t, y_t, z_t) ,可得它们之间的视线向量 \mathbf{w} 。 \mathbf{w} 与 \mathbf{u} 之间的夹角即为雷达波束入射角,其计算公式如下:

$$\mathbf{w} = (x_p - x_t, y_p - y_t, z_p - z_t) \quad (10)$$

一个散射单元的 \mathbf{u} 与 \mathbf{w} 之间的关系为:

$$\cos \varepsilon = \mathbf{u} \cdot \mathbf{w} / \|\mathbf{u}\| \|\mathbf{w}\| \quad (11)$$

式中, ε 为雷达波束入射角。因此,该散射单元的

擦地角为:

$$\theta_g = \pi/2 - \varepsilon \quad (12)$$

1.5.2 杂波散射单元面积的计算方法

在获得了各点的后向散射系数之后, 只要计算出散射单元面积, 就可求得杂波散射单元的几何面积 S_m 。为此, 设计了一种网格映像法来计算 S_m , 具体步骤如下:

1) 对雷达照射区域进行网格划分。采用等距离环划分法, 在雷达照射区域内将地表划分为多个 $\Delta R \times \Delta \varphi$ 的栅格单元, 其中 ΔR 为最小距离环宽度, $\Delta \varphi$ 为最小方位角间隔。如图1中的扇形代表一个栅格单元。

2) 统计一个栅格单元内点散射体的个数。图1中黑色点代表来自于DEM的杂波数据, 只有落入一个栅格单元内的杂波数据, 才对杂波散射单元的几何面积有贡献。由于距离环按弧形划分, 使一个栅格单元呈环形, 难以用计算方法统计其中的数据点数, 因此以一个栅格单元为基础划定一个最小矩形, 把一个栅格单元内的数据点映像到最小矩形中, 将最小矩形中的数据点个数视为一个栅格单元内的数据点数, 如图1所示。

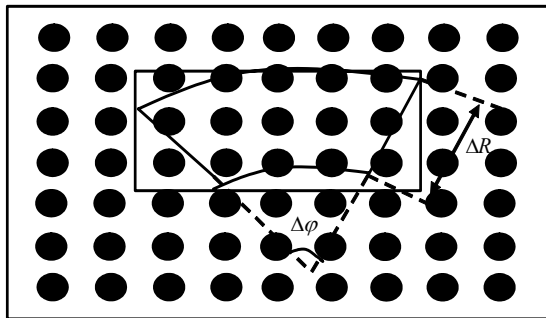


图1 杂波散射单元几何面积计算过程示意图

3) 将一个栅格单元的点散射体相加, 形成一个新的散射体。因此, 杂波散射单元的几何面积就转化为栅格单元内所有点散射体面积的相干叠加。根据DEM数据的特点, 一个栅格单元对应的散射体面积为:

$$S_m = \sum_{i=1}^N d_s \cdot d_s \quad (13)$$

式中, d_s 是DEM数据分辨率; N 表示散射单元内点散射体的个数。

最后, 将计算得到的杂波后向散射系数和单元几何面积代入式(6), 得到杂波单元的雷达散射截面 σ , 再将结果代入式(5)便可计算出杂波功率。

综上所述, 本文提出的杂波建模方法流程如图2

所示。

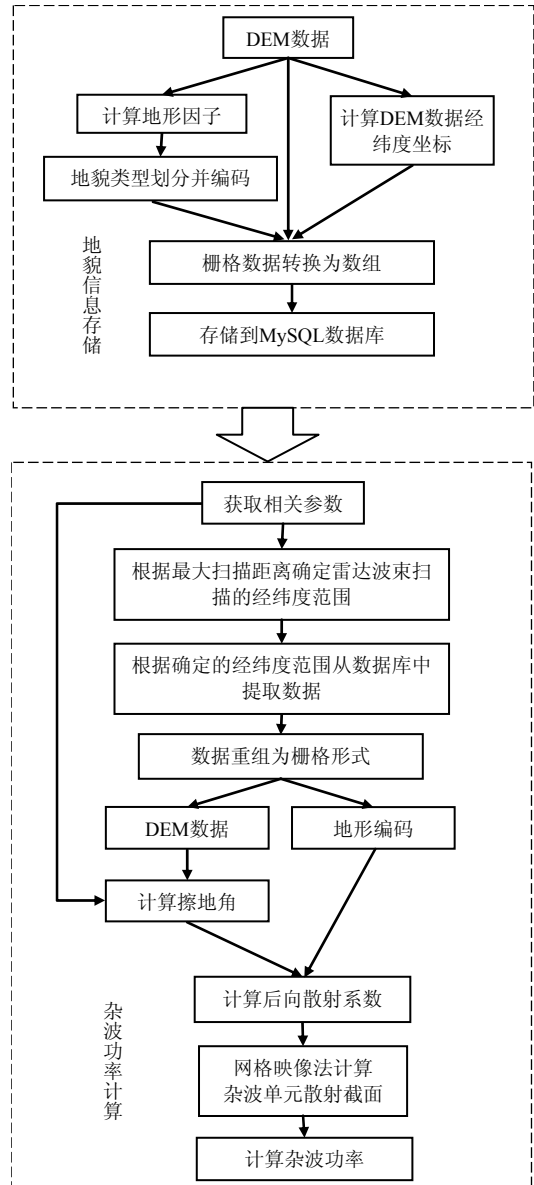


图2 杂波建模方法流程图

2 计算机仿真结果

本文对上述杂波建模的主要过程进行了仿真实验, 以说明本文方法的可行性和有效性。首先, 为了验证地貌类型划分的有效性, 本文对地形因子算法以及地形量化分类算法进行了仿真。为了验证数据库设计的合理性, 对数据库数据的存贮以及读取重组算法进行了仿真。为了验证选择的后向散射系数模型是否符合实际, 本文仿真了擦地角对地形后向散射系数的影响。最后对选定范围内的杂波功率进行了仿真, 用以验证整个算法流程的可行性以及杂波建模方法的准确性。

2.1 地形因子反映真实地貌的效果分析

本文根据某地的DEM数据形成的原始地形图如图3所示。该地形图范围为：北纬26°~27°，东经119°~120°。所选区域为沿海某地，在该区域内既存在海洋环境，同时也有山地等地形的存在，基本覆盖了大部分地形类型，具有较好的普适性。

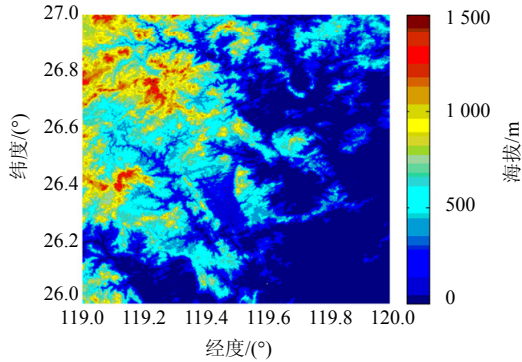
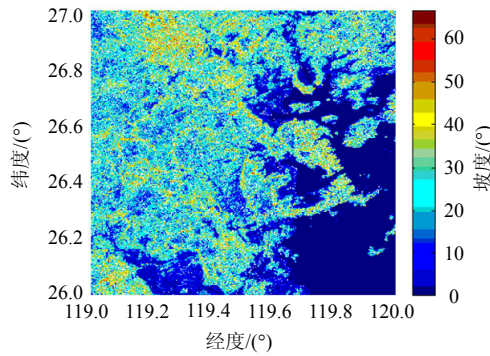
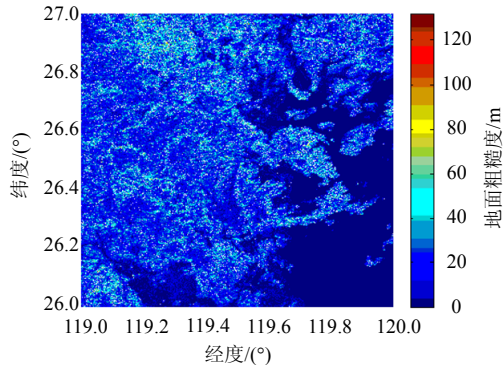


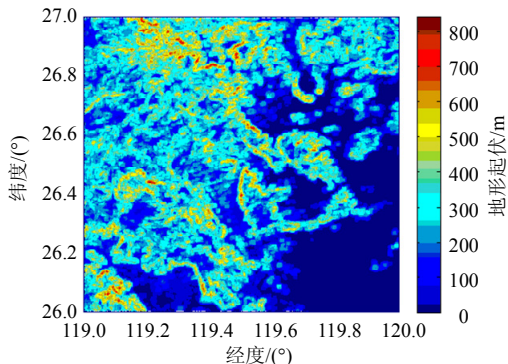
图3 根据某地DEM数据形成的原始地形图



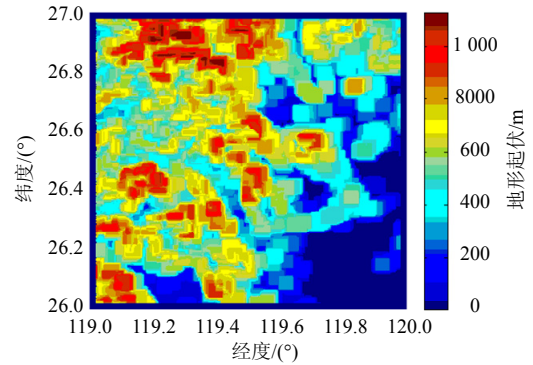
a. 坡度图



b. 地表粗糙度



c. 分析区域1 km²的地形起伏图



d. 分析区域21 km²的地形起伏图

图4 基于地形因子显示的地形图

图4是图3分别基于坡度、地表粗糙度和地形起伏因子显示的地形图。从图4a的坡度图可以看出，对于山地地形，由于地形复杂，坡度的变化也较大，根据坡度值的大小可以大致区分出陡峭区域和平缓区域。坡度值较小的为平缓区域(图中蓝绿色所示)，较大的为陡峭区域(图中橙色所示)。海平面高程值为0，因此，其坡度值也显示为0(图中深蓝色所示)。从图4b的地表粗糙度图可以看出，地势平缓区域的地表粗糙度变化比较平缓，相对值较小(图中蓝色所示)，而山区丘陵地带的地表粗糙度变化明显，相对值较大(图中蓝绿色所示)。海岛地区由于区域面积小，地表粗糙度变化不明显，相对值也较小(图中右下角蓝色所示)。1 km²和21 km²的地形起伏图分别如图4c和图4d所示。对比分析可知，当分析单元面积为21 km²时，地形起伏因子图(图4d)可以较明显地体现图3中的几个山体，但是对于其右下角部分的海岛，显示效果却很一般，这是由于此时的分析区域面积相对于海岛面积过大而导致的。然而，当分析单元面积为1 km²时，图3中的海岛信息则可以在地形起伏图(图4c中被明显的显示出来。因此，分析区域的大小对地形起伏影响比较大。

2.2 地形地貌类型量化分类的效果分析

根据表2的分类依据，本文对图3所示的DEM地形图进行地貌类型划分，结果如图5所示。图5中，深蓝色的区域为海面，淡蓝色的区域为平原，浅绿色的区域为森林，橙黄色的区域为丘陵，红棕色区域为高山。从地貌类型划分结果看，图5中大部分地区为丘陵地带，森林基本伴随着丘陵边缘分布，平原以一定的块状区域分布在丘陵中。通过与该地区的卫星地图进行比较，发现基于地貌类型量化分类地貌的结果与实际区域的地貌类型基本吻合，只是在平原的分类中存在微小差别。其主要原因是把农田、草地以及水泥地等地貌均划分到平原的类型中，

没有细分。事实上,把平原划分为大类是有科学依据的,后面的仿真表明,农田、草地和水泥地等地形随擦地角的变化和数值大小基本一致,因此从杂波建模的角度,它们可以被划分到平原地形中。

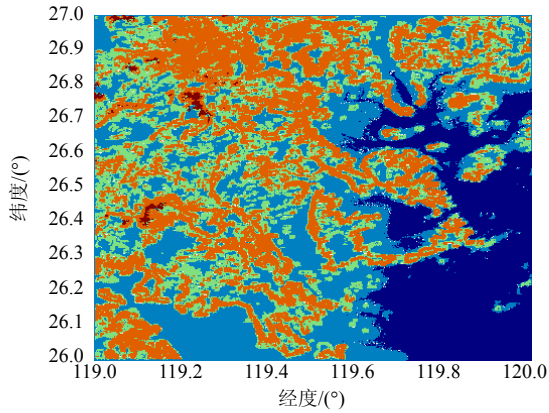


图5 基于地貌量化分类的地形图

2.3 地形地貌信息存贮效果与读取效率分析

在载机坐标为 $[26.623^{\circ}N, 119.210^{\circ}E]$ 和雷达扫描范围为20 km的条件下,本文从数据库中提取出DEM地形图和量化分类的地形图,并与完整的原图进行比较,发现提取的地形图特征和经纬度范围与原地形的一致。因此,本文数据库存储的信息能够准确地反映载机所处的真实地貌,可以有效地提高杂波建模的准确性。

本文进一步测试了MyISAM存储引擎存取一份DEM数据样本(数据点数为 $1\ 601 \times 1\ 601$)的时间,并在相同运行环境下与InnoDB存储引擎进行了比较,结果如表3所示。由此可知,本文采用MyISAM的读取效率明显优于InnoDB。

表3 不同存储引擎读取效率比较

存储引擎	所需时间/s
InnoDB	241.040 5
MyISAM	30.809 1

2.4 擦地角对地形散射系数的影响分析

不同地形散射系数随擦地角的变化曲线如图6所示。除了高山地形以外,大部分地形的散射系数与擦地角之间的关系曲线走势相同。当雷达波束擦地角较小时,高山的反射系数最大,其他几种地形的差异比较小;当擦地角较大时,大部分地形的反射系数增大很快,而高山增大不多,甚至略有降低。这主要是由于擦地角较小时,高山对雷达波速的镜面反射起主要作用;当擦地角较大时,大部分地形的镜面反射成分占了主导地位,因此散射系数迅速增加。图6结果符合实际情况,说明采用修正的Morchin模型计算地杂波散射系数具有合理性。

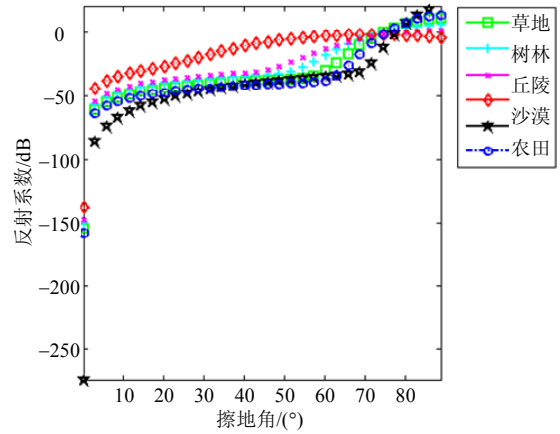
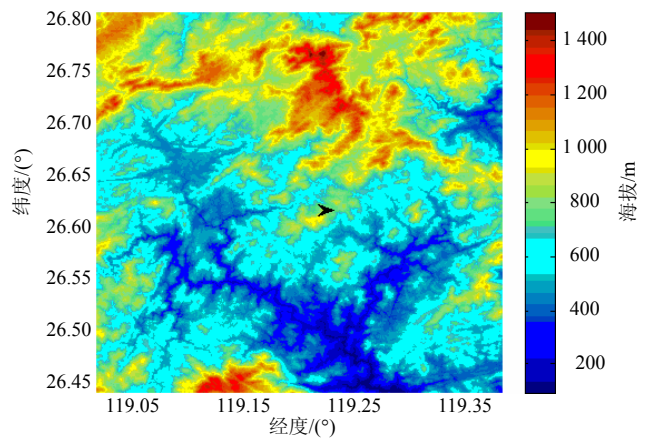


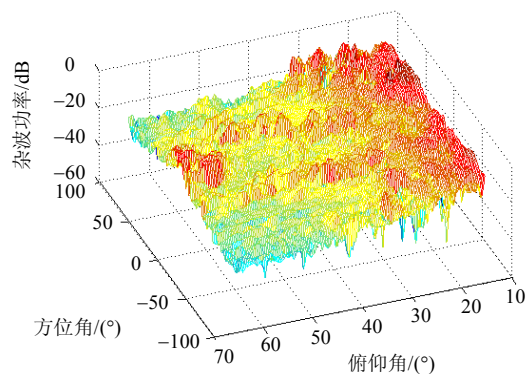
图6 不同地形散射系数随擦地角的变化曲线

2.5 基于DEM数据的杂波功率谱

假设载机坐标为 $[26.623^{\circ}N, 119.210^{\circ}E]$,载机高度为5 000 m,最大扫描距离为20 000 m,最小扫描距离为5 500 m,发射频率为1 GHz,距离分辨率为90 m,方位角划分为100份。基于DEM数据提取的地形图及其对应的空间杂波功率谱如图7所示。



a. 提取的DEM地形图



b. 地形图对应的空间杂波功率谱

图7 基于DEM数据计算的杂波功率谱

根据载机的坐标数据可以看出,载机位于图7a的中点(图中箭头所示),且由西向东进行扫描(箭头

指向方向)。由于设定了扫描距离的范围,使得俯仰角范围缩小为($15^{\circ}\sim 16^{\circ}$),因此该仿真实验只模拟了载机俯仰角范围内的杂波功率谱,如图7b所示。对比图7a和图7b可知,在接近载机处,该区域地形相对平坦,镜面反射占主导地位,因此在图7b中出现了强杂波。当俯仰角在 $25^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 区间时,在方位角为 30° 和 -30° 左右,存在两条较强杂波区域,对应到图7a中,刚好此时在载机方位角 30° 线上存在一条山脊,而在载机方位角 -30° 线存在一条峡谷,这两种地貌的存在产生了较强的杂波。进一步从图7b中可知,在俯仰角 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 范围内有比较强烈的杂波,此时波束扫描距离接近最大值,而雷达波束以半圆形向外发射,对应到图7a中,该区域的地形起伏剧烈,上半部分(方位角 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$)基本由山地构成(红色区域),下半部分(方位角 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$)海拔落差达到了300 m左右,上下部分结合,近似形成了一圈山脊,而这圈山脊起到了类似于镜面反射的作用,因此会有较剧烈的杂波存在。综上所述,本文构建的杂波谱与真实地貌之间存在一一对应关系,能够反映真实地貌的变化。

3 结束语

本文通过分析和挖掘DEM数据,提取了海拔、坡度、地面起伏和地表粗糙度等4种地形因子用于划分地貌类型,并在MySQL平台上建立了地形信息数据库,存储DEM数据和相关地貌信息。仿真结果表明,本文提取的地形因子和划分的地貌类型符合实际场景地形,数据存取方便快捷。在此基础上,本文建立了一种基于DEM数据的地杂波建模方法。仿真结果表明,采用该方法构建的地杂波模型符合机载认知雷达所处的实际场景,具有真实、稳定和可靠的优势,当用作机载认知雷达的先验信息时可有效辅助机载认知雷达提高工作性能和生存力。

参 考 文 献

- [1] HAYKIN S, YANBO X, SETOODEH P. Cognitive radar: Step toward bridging the gap between neuroscience and engineering[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(11): 3102-3130.
- [2] PICARDI G, SEU R, ZEI D. Log-normal clutter cancellation[J]. *IEE Proceedings F of Communications, Radar and Signal Processing*, 1987, 134(1): 35-42.
- [3] WATTS S, WARD K D. Spatial correlation in K-distributed sea clutter[J]. *IEE Proceedings F of Communications, Radar and Signal Processing*, 1987, 134(6): 526-532.
- [4] FARINA A, RUSSO A, SCANNAPIECO F. Radar detection in coherent Weibull clutter[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1987, 35(6): 893-895.
- [5] HELLARD L D, HENRY J P, AGNESINA E, et al. Ground clutter simulation for surface-based radars[C]//Record of IEEE International Radar Conference. New York, USA: IEEE, 1995: 579-582.
- [6] DARRAH C A, LUKE D W. Site-specific clutter modeling using DMA digital terrain elevation data (DTED), digital feature analysis data (DFAD), and Lincoln laboratory five frequency clutter amplitude data[C]//Record of IEEE National Radar Conference. New York, USA: IEEE, 1996: 178-183.
- [7] KUREKIN A, RADFORD D, LEVER K, et al. New method for generating site-specific clutter map for land-based radar by using multimodal remote-sensing images and digital terrain data[J]. *IET Radar Sonar and Navigation*, 2011, 5(3): 374-388.
- [8] CONTE E, MAIO DE A, FARINA A, et al. Design and analysis of a knowledge-aided radar detector for doppler processing[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(3): 1058-1079.
- [9] 李壮志, 张尤赛. 基于DEM的雷达地杂波仿真[J]. *计算机仿真*, 2007, 24(5): 176-178.
LI Zhuang-zhi, ZHANG You-sai. Simulation of landform echo wave based on DEM[J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(5): 176-178.
- [10] 洪丽娜. 雷达地杂波建模仿真研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003.
HONG Li-na. Modeling and simulation of radar ground Clutter[D]. Changsha: National Defense Science and Technology University, 2003.
- [11] 范国忠, 黄志强, 张先义, 等. 基于CUDA和DEM数据的地杂波快速仿真[J]. *现代雷达*, 2010, 32(9): 79-83.
FAN Guo-zhong, HUANG Zhi-qiang, ZHANG Xian-yi, et al. Fast ground clutter simulation based on CUDA & DEM data[J]. *Modern Radar*, 2010, 32(9): 79-83.
- [12] 朱红春. 数字高程模型(DEM)空间数据挖掘研究—以在陕北黄土高原的实验为例[D]. 西安: 西北大学, 2003.
ZHU Hong-chun. DEM based spatial data mining: a case study in the loess plateau of north shanxi province[D]. Xi'an: Northwest University, 2003.
- [13] 张磊. 基于地形起伏度的地貌形态划分研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2009.
ZHANG Lei. A study of geomorphologic forms classification based on relief[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2009.
- [14] 涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度研究[J]. *测绘学报*, 1991, 20(4): 311-319.
TU Han-ming, LIU Zhen-dong. A study on relief degree of China[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1991, 20(4): 311-319.
- [15] 宋佳. 基于DEM的我国地貌形态类型自动划分研究[D]. 西安: 西北大学, 2006.
SONG Jia. Research on automated relief form types classification of China based on DEM[D]. Xi'an: Northwest University, 2006.
- [16] 程维明, 周成虎, 柴慧霞, 等. 中国陆地地貌基本形态

- 类型定量提取与分析[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(6): 725-736.
- CHENG Wei-ming, ZHOU Cheng-hu, CHAI Hui-xia, et al. Quantitative extraction and analysis of the basic morphological types of land geomorphology in China[J]. Geo-Information Science, 2009, 11(6): 725-736.
- [17] 李炳元, 潘保田, 韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 535-543.
- LI Bin-yuan, PAN Bao-tian, HAN Jia-fu. Discussion on the basic landform types and their dividing indexes in China[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(4): 535-543.
- [18] 周访滨. 基于栅格DEM自动划分微观地貌形态的研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2006.
- ZHOU Fang-bin. Automated classification of micro landform based on grid digital elevation model[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2006.
- [19] 丁鹭飞. 雷达原理[M]. 第三版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.
- DING Lu-fei. Principles of radar[M]. Third Ed. Xi'an: Xi'an Electronic Science & Technology University Press, 2006.
- [20] 彭世蕤, 汤子跃. 地(海)杂波反射率模型研究[J]. 空军雷达学院学报, 2000, 14(4): 1-4.
- PENG Shi-ru, TANG Zi-yue. Reflectivity model of ground/sea clutter[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2000, 14(4): 1-4.
- [21] BARTON D K. Land clutter models for radar design and analysis[J]. Proceedings of the IEEE, 1985, 73(2): 204.

编辑 黄莘



饶妮妮(1963—), 教授, 博士生导师。主要从事信号与图像处理及其在医学、基因组学和雷达等方面的应用研究。发表学术论文140多篇, 申请发明专利4项。入选四川省学术与技术带头人, 获得四川省有突出贡献的优秀专家称号, 获四川省科技进步三等奖1项, 担任“生物医学信号处理”国家级精品资源共享课程负责人。