

运用 SAR 图像和 TM 热红外图像定量反演地表空气动力学粗糙度的二维分布*

朱彩英^{①②} 张仁华^{①**} 王劲峰^① 孙晓敏^① 朱治林^①

(①中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ②解放军信息工程大学测绘学院, 郑州 450052)

摘要 在分析“陆地表面与大气相互作用”研究领域对地表空气动力学粗糙度二维分布的科学需求后, 确定以 SAR (Synthetic Aperture Radar) 图像的后向散射系数与地表的几何特征参数、介电常数等参数具有定量关系的 SPM (Small Perturbation Model) 模型为基础, 提出了运用 TM 热红外图像和地面同步观测的微气象数据相结合的热惯量-土壤湿度反演模型, 获取了试验区内土壤表层的湿度信息, 通过与介电常数的链结, 从 SAR 图像的后向散射的复合信息中解析出像元尺度的非体散射地表的几何特征信息; 经过形态因子的转换, 在 SAR 图像和 TM 图像空间尺度转换的基础上得出非植被区的等效几何粗糙度信息, 再应用作物高度的光谱模型, 计算出试验区的作物高度后, 转换为等效几何粗糙度。采用分层镶嵌等图像处理方法, 生成了试验区像元尺度的地表等效几何粗糙度的二维分布图。根据大气湍流理论和大气稳定度订正方法, 对测量的大气温度剖面数据和风速剖面数据进行迭代运算, 获取了试验区内裸土及小麦植被等类型地表风浪区的空气动力学粗糙度实测值。在分析风浪区等效几何粗糙度、动力因子、热力因子对空气动力学粗糙度的共同作用后, 建立了由地表等效几何粗糙度向空气动力学粗糙度转换的尺度转换模型。运用实测值验证了这一系列模型最终反演结果, 表明整个研究思路是可行的, 并可望应用于与空气动力学粗糙度有关的地-气相互作用的区域化研究领域。

关键词 几何粗糙度 空气动力学粗糙度 SAR 后向散射模型 水分反演模型

地表通量研究已取得了长足进展, 成为区域化甚至全球化地气相互作用研究领域的突破点。然而, 计算地表通量的遥感模型均需要参考高度的地表动

量、热量和水汽阻抗等参数, 这些参数均是地表空气动力学粗糙度 z_{ad} 的函数。研究表明 z_{ad} 对地表通量模型的反演计算灵敏度很高。所以 z_{ad} 在地-气的相互作

2003-06-26 收稿, 2003-11-12 收修稿

* 中国科学院知识创新工程项目(编号: CXIOG-E01-04)、国家重点基础研究发展规划项目(编号: 2000077900)和国家自然科学基金重大项目(批准号: 49890330)共同资助

** E-mail: Zhangrh@igsnrr.ac.cn

SCIENCE IN CHINA Ser. D Earth Sciences

用中,特别是在区域地表通量反演中起着重要作用。

所谓的空气动力学地表粗糙度 z_{ad} 是指在中性稳定大气条件下,地表上方风速为零的高度。在非中性稳定大气条件时,它受到热力学因子的影响。这概念是在风浪区地表完全均匀的条件下建立的。因此,以风速和气温梯度确定均匀地表的风浪区空气动力学粗糙度的方法一直延续到现在,这也是人们认识和确定地表粗糙度的第 1 阶段^[1]。随着研究区域地表通量学科的发展,对快速准确估算区域尺度的非均匀地表(具有许多不同类型的风浪区)的空气动力学粗糙度的分布有着强烈的需求。而微气象学野外测量的尺度的局限性和随机湍流所引起的不确定性,使得测量方法费时、费力,根本不可能在大范围内展开。权宜办法是利用地表分类信息的经验查找表进行大概的估算,因此误差很大。80 年代末,文献^[2,3]研究发现对于水平尺度与垂直尺度相当的规则波浪起伏地对气流有拖拉作用,不能运用上述均匀风浪区的粗糙度确定方法。因此在上述第一阶段认识的基础上提出了在较大尺度上的等效几何粗糙度的概念,发展了从这种起伏地形的等效几何粗糙度估算模型。在地面粗糙元素均匀分布时,一些计算 z_{ad} 的经验模型得到应用^[4]。那时人们的认识进入第 2 阶段。

但由于地表粗糙元素的结构、种类、分布的复杂性,对多地物、不规则、非均匀地表的等效几何粗糙度估算仍然无能为力,更没有考虑如何从等效几何粗糙度转换到空气动力学粗糙度的方法和模型。研究复杂地表结构的空气动力学粗糙度的理论和方法是一个前沿课题。这种思路表明研究已进入第 3 阶段。

能否应用遥感数据估算 z_{ad} 的空间分布? 至今这方面的研究成果很少,目前几乎只集中在 Blumberg 和 Greeley 两位科学家的一些研究成果上。他们的研究成果表明, SAR 后向散射系数 σ^0 与空气动力学粗糙度 z_{ad} 的相关度较高。他们的文献^[5-7]报道了利用 σ^0 与 z_{ad} 之间的统计关系模型,可以在大范围内,近似画出 z_{ad} 的二维分布图。但这些统计关系模型的局限性在于缺乏对地物目标的 SAR 后向散射系数 σ^0 与几何粗糙度 z_0 以及与空气动力学粗糙度 z_{ad} 之间关系的机理性论述。鉴于统计模型缺乏机理分析,从而不能举一反三,触类旁通。此类模型的应用就受到限制。

本文拟用 SAR 和 TM 遥感数据和地面定标同步观测数据,根据空气动力学粗糙度第 3 阶段研究需要,反演可用区域尺度的多地物、非均匀的下垫面的空气动力学粗糙度。重点突出模型的建立和机理性研究。

1 研究过程及野外试验

1.1 3 种地表粗糙度的概念

本文旨在从 SAR、TM 图像和地面同步观测数据反演气象学中的空气动力学粗糙度 z_{ad} 。其过程包括从几何粗糙度 z_0 转换到等效几何粗糙度 z_{eff} , 又从 z_{eff} 转换到 z_{ad} 。在此首先应阐明这三种粗糙度在概念和尺度上的区别。 z_0 在概念上与 SAR 像元表面的高度均方差即标准离差一致,其数量级通常在几厘米到十几厘米,对气流具有拖拉作用(drag)。当地表平面尺度很大时,完全均匀的植被或台地,其高度对气流没有拖拉作用(drag),它们就相当于把地面抬高一个高度,即所谓的抬高层高度,几何粗糙度仍然可以用 z_0 来衡量。但当大尺度内植被或台地(包括房屋)的水平尺度与其本身的高度相当时,会对气流产生明显的拖拉作用。本文以等效几何粗糙度 z_{eff} 衡量这种拖拉作用,其数量级可以从几厘米到几米。不难理解,等效几何粗糙度 z_{eff} 是尺度转换的产物,也可以说是较大尺度内非均匀地物高度的标准离差。

z_{ad} 是针对气象学中的风浪区尺度而言的。传统定义的风浪区是完全均匀的地表。因此 z_{ad} 是风浪区内各个单元(像元)的几何粗糙度 z_0 、动力学因子和热力学因子的综合结果。当风浪区非均匀时, z_{ad} 应该是等效几何粗糙度 z_{eff} 、动力学因子和热力学因子的综合结果。因此 z_{ad} 的数量级可从 z_0 的变化到 z_{eff} 的数量级。

1.2 试验资料和试验区情况

2002 年 4 月 22 日左右,我们同时展开了野外观测工作和卫星遥感数据的选择。本文所用的卫星遥感数据包括 2002 年 4 月 22 日中国遥感卫星地面站接收并处理的 Radarsat C 波段、F3 模式、HH 极化、SLC 类型的降轨右侧视图像,像元地面尺寸为 $4.84\text{ m} \times 4.84\text{ m}$, 以及同时相的 TM(陆地卫星 5) 7 个波段的数据,像元尺寸为 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ 。试验区在北京小汤山精准农业区,纵横约 1 km^2 , 中心点经纬度为

E116°43', N40°23'。在 2002 年 4 月 22 日前后, 试验区有裸地、精准农业小麦地、普通小麦地、荒草地、干鱼塘、新旧房屋、部分建筑中的房屋; 周围有较大的村庄、公路、裸地、小麦地、田间行道树, 有宽约 30 m 两旁有几十米高行道树的河道。试验区及风速剖面测站点在 TM 的 5, 4, 3 三个波段合成的图像上的分布如图 1(a), 用 ERDAS 图像处理系统, 对该图像作非监督分类, 与野外调查的地类匹配后, 得到地表类别图如图 1(b), 其中裸地的成份较大。

野外勘查工作包括以下几部分的观测内容: (i) 用 GPS 接收机测量了试验区及周围各地类边界点的位置、建筑物的位置、独立树的位置、明显地物点的位置及所有测点的位置。这些位置数据用于 SAR 图像、TM 图像及野外观测目标之间的地理配准; (ii) 用测高仪和皮尺精确测量了树高及间距、建筑物的高度、精准农业区小麦和普通小麦的高度; 实地估计了小麦地的覆盖率、树冠的半径; (iii) 土壤物理性质的调查: 包括土壤类型、样本土壤的重量含水量百分比、容重等; (iv) 几种地物的地表温度测量: 用红外测温仪和热像仪每隔 30 分钟测量了干裸地、湿裸地、水泥地的温度, 转换成表观热惯量后用于定标确定 TM 像元尺度的土壤的容积含水量; (v) 裸耕地土壤表面几何剖面测量: 根据文献^[8], 地表的几何粗糙度可以用地表高度的标准离差和自相关长度来描述, 该两个参数决定雷达后向散射理论模型的适用范畴。该项测

量的目的是为了获取试验区内裸地几何粗糙度的一般统计特征, 以便选择合适的后向散射理论模型。我们在干、湿两块裸地里分别抽样测量了 4 个方向上约 1 m 度的剖面, 在一定的数值标志背景下, 用近景垂直摄影的方法, 记录了各剖面图, 其中一个方向的剖面摄影图局部如图 2; (vi) 不同地表类型的空气动力学地表粗糙度(野外风速剖面)测量。我们在 9 个地块上设立了测站, 地块的分布如图 1(a)。每个测站在 0.3, 0.65, 1.3, 2.2, 3.5, 5 m 的 6 个高度上, 同方向安置了 6 台风速温度仪, 如图 3, 图中最低高度的风速仪已被小麦淹没。可以同时获得 6 个高度上的风速和空气温度, 从而获得了风速梯度和空气温度梯度。每个测站的观测时间为两个小时左右, 每 10 s 记录一次瞬时值。

2 选择 SPM 模型为 SAR 后向散射的理论模型

本节阐明选择由 SAR 图像信息转换为地表几何粗糙度的计算模型的理由。根据雷达方程, SAR 成像系统获取的是地面目标的后向散射系数。由于地表几何特征是 SAR 后向散射系数的第 1 决定因素^[8], 在地表几何特征因子的不同假设条件下, SAR 后向散射系数有多种理论模型的表达式。本文首先对试验区裸耕地的地表几何特征作了精细的测量与分析, 然后选择 SPM 后向散射模型作为试验计算的理论模型。

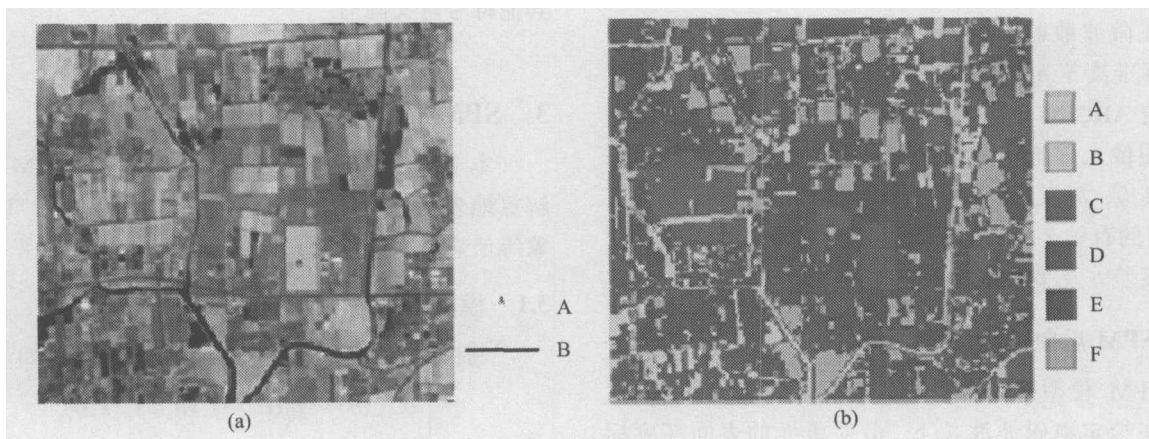


图 1

(a) 试验区及周围 TM 3 个波段合成图。A 示风速温度剖面测站点; B 示试验区边界; (b) 试验区地表类别图。A 示水域; B 示树; C 示小麦; D 示居民地与道路; E 示裸耕地; F 示硬质空地

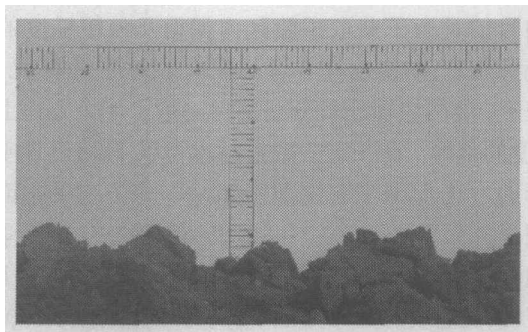


图 2 土壤表面几何剖面摄影图像

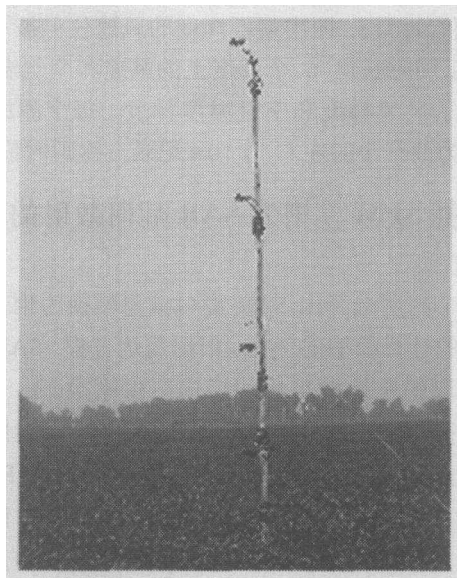


图 3 风速剖面测量实景

2.1 裸地表面几何特征分析

在微波散射理论中,地表的几何特征用地表高度的标准离差 h 及相关长度 l 来描述. 本文用地理信息系统 ARC/INFO 数据采集工具,从裸地表面的剖面摄影图像上采集了各剖面上离散点相对于背景水平线的高度,离散点之间的水平距离为 0.5 cm,参考文献^[5]中的有关公式,可以计算得到每一个剖面的高度标准离差 h 及平均相关长度 l ,见表 1.

2.2 SPM 后向散射模型

SPM 模型是一种所谓的小扰动法经典模型,它要求在给定电磁波波长下,散射单元的表面高度标准离差小于该波长、表面平均斜度(标准离差/相关长度),并且波数与表面高度标准离差之积有同一数量级. 这个理论模型的适用条件可参考公式:

表 1 土壤表面几何特征统计/cm

剖面号	干裸地		湿裸地	
	标准离差	相关长度	标准离差	相关长度
1 (东西向)	0.14327	13.89568	0.08744	12.47183
2 (南北向)	0.18326	12.53311	0.07824	12.35563
3 (西北-东南)	0.21239	9.478102	0.10800	19.98227
4 (东北-西南)	0.16602	10.97635	0.13055	10.95935

$k \cdot h < 0.3$ 及 $\sqrt{2}h/l < 0.3$ 而定,但是也不绝对,实际适用条件较灵活. 上式中, $k = 2\pi/\lambda$ 称为电磁波的波数. 将表 1 中的参数及 $\lambda = 5.6 \text{ cm}$ 代入该式,可以得出结论: 本文试验区中的裸地散射场符合 SPM 模型的假设条件. 由于适用条件较灵活,也拟在下文中试用于起伏尺度较大的居民区、道路和水域. SPM 后向散射模型可以表达为:

$$\sigma_{p,q}^0(\theta) = 8k^4 h^2 \cos^4 \theta |\alpha_{p,q}|^2 W(2k \sin \theta), \quad (1)$$

其中,下标 $p \cdot q$ 代表发射与接收的极化方式, θ 是入射角, $\alpha_{p,q}$ 为菲涅耳功率反射系数,下标也可用 h, v 表示水平和垂直极化. 由(2)式详细表示:

$$\begin{cases} \alpha_{hh} = \frac{\epsilon_r - 1}{(\cos \theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta})^2}, \\ \alpha_{vv} = \frac{(\epsilon_r - 1) \cdot (\sin^2 \theta - \epsilon_r - \epsilon_r \cdot \sin^2 \theta)}{(\epsilon_r \cos \theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta})^2}, \\ \alpha_{vh} = \alpha_{hv} = 0, \\ \epsilon_r \text{ 是地表单元的相对介电常数.} \end{cases} \quad (2)$$

(1)式中的 $W(2k \sin \theta)$ 是表面高度相关系数的傅里叶变换,理解为归一化粗糙度频谱,表达式为(3)式,其他符号意义同前.

$$W(2k \sin \theta) = (l^2/2) \cdot e^{-(kl \sin \theta)}. \quad (3)$$

3 SPM 后向散射模型的计算

本节阐明从 SAR 图像信息模型——SPM 模型,解算地表几何粗糙度的计算过程及用单时相 TM 图像等信息转换为相对介电常数的途径和方法.

3.1 模型分解

将(3)式代入(1)式,SPM 模型可以改写成如下形式

$$\begin{cases} \sigma_{p,q}^0(\theta) = f_\theta(\theta, \lambda) f_r(h, l) f_\epsilon(\epsilon, \theta), \\ f_r(h, l) = 0.5 h^2 l^2 / \exp(kl \sin \theta), \\ f_\epsilon(\epsilon, \theta) = |\alpha_{p,q}|^2, \\ f_\theta(\theta, \lambda) = 8k^4 \cos^4 \theta, \end{cases} \quad (4)$$

(4)式将后向散射系数在理论上分解成 3 个因子作用的乘积. 其中 $f_r(h, l)$ 为几何特征因子, $f_d(\varepsilon, \theta)$ 为特定入射角和极化方式时的土壤介电常数因子, $f_d(\theta, \lambda)$ 为成像参数(入射角、波长)因子. 从(4)式可知, 当已知地表的介电常数 ε_r 和成像参数 λ, θ , 极化方式 vv 或 hh 时, 可以用(2)式计算 $|\alpha_{pq}|^2$, 并从后向散射模型中解析出几何特征复合因子 $f_r(h, l)$.

3.2 相对介电常数 ε_r 的确定

本文用 SPM 模型计算除了小麦和树以外的分布目标的后向散射系数. 为了排除 SPM 模型中介电常数因子, 从而获得分布目标的几何特征复合因子, 本节分别确定各类目标的相对介电常数.

首先根据土壤的相对介电常数主要取决土壤湿度的原理^[8], 用单时相的 TM 图像数据及地面定标数据获取土壤湿度信息后, 再计算裸露土壤的介电常数.

根据热红外遥感原理及定量遥感的实践^[9-12], 裸露土壤的湿度可以通过地表温度、辐射通量和热惯量模型定量反演获得. 非植被地物的表观热惯量模型如下:

$$p = \frac{S(1-\alpha)\Delta t}{\sqrt{\Delta t}(T_p - T_o)} = \frac{S(1-\alpha)\sqrt{\Delta t}}{(T_p - T_o)}, \quad (5)$$

其中, p 为表观热惯量, 量纲为 $\text{Cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1/2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, S 为太阳总辐射, 量纲应转换为 $\text{Cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$, α 为地物反照率, Δt 为 TM 卫星过境时间与日出时间差, 以秒计算, T_p 为 TM 卫星过境时地物的辐射温度, T_o 是日出前的地表温度.

通常为了获取热惯量, 应该每天要有两个时相的热影像图. 但是与 SAR 影像图的尺度较相近的 TM 影像图只有一个时相. 为此本文首次提出利用单时相 TM 影像图获取表观热惯量的方法. 长期实践表明, 凌晨日出前的地表净辐射通量为零时, 除深水体外各类地物表面温度相当接近^[11]. 因此, 首先在日出前的地表净辐射通量为零时准确获取土壤表面温度; 然后运用陆地卫星 TM 过境时同步观测的多点地面红外辐射温度对 TM6 波段的灰度进行地面定标, 从

而获得辐射温度的二维分布. 以后者减去前者就可得到(5)式中需要的 $T_p - T_o$. (5)式所需要的 S 是陆地卫星 TM 过境时采用“太阳直接辐射表”进行同步观测获取的. 由于本文的研究区范围不大, S 不需要进行经纬度纠正. 再根据 TM1, 2, 3, 4, 5, 7 波段的平均或加权平均灰度和地面定标的反照率值作出地表反照率分布影像图, 就可获取(5)式所需要的地物反照率 α . 2002 年 4 月 22 日的 Δt 为 12600 s. 各项参数及表观热惯量的定标值列于表 2.

表 2 试验区温度及表观热惯量的定标值

定标点类型	10 时 30 分 定标反照率	表面定标 温度/ $^\circ\text{C}$	地表表观热惯量/ ($\text{Cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1/2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
水泥场	0.503	20.41	0.0512
干土	0.211	25.65	0.0539
湿土	0.104	18.01	0.0990
太阳总辐射	622.8 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	日出前表面温度	3.2 $^\circ\text{C}$

在计算表观热惯量(5)式的所有参数得到后, 即获取了反照率分布图、辐射温度分布图、日出前的地表温度图、太阳总辐射和日出到 TM 卫星过境的时间差值, 可算出被测定区逐点像元的热惯量分布图.

由于土壤类型、容重等土壤物理参数的差异, 建立试验区土壤热惯量与土壤重量含水量的实验模型是必须的. 小汤山试验区的热惯量与土壤重量含水量的定标方程为(6)式,

$$W = 2.0804P - 0.0081, \quad (6)$$

其中, P 为表观热惯量, W 为土壤重量含水量(百分比), 由(6)式计算试验区的土壤水分分布图(有植被部分除外). 得到试验区的水分含量分布图后, 再参考土壤相对介电常数与含水量的关系^[10], 计算土壤的相对介电常数. 试验区中水域的介电常数为 80, 水泥场的介电常数及居民地和道路的介电常数定为 5^[1].

3.3 SAR 图像后向散射系数的计算

SAR 图像具有机理性的光斑噪声, 这种噪声降低了 SAR 后向散射测量的准确度, 因此在应用 SAR 图像数据之前必须进行光斑去噪. 采用单视强度图像 I 的负指数分布密度函数模型及贝叶斯后验估计方法^[13,14], 从 SAR 图像的乘法噪声模型中直接估计出

1) 根据 <http://www.mc21st.com/techfield/techwin/mobilecom/2002/k0925-42.htm> 上资料: RFWaves 公司 Adi Shamir, 无线电传播简介: 专用术语, 室内传播和路径损耗计算及实例

试验区 Radarsat 单视 C 波段去噪后的强度图像 I .

参考图像数据的有关文档, 像元后向散射系数按下列公式计算: 像元入射角:

$$\theta_j = \arccos \left[\frac{(H^2 - (RS_j)^2 + 2rH)}{2RS_j r} \right]. \quad (7)$$

像元后向散射系数:

$$\sigma_j^0 = 20 \log_{10}(\sqrt{I_j} / A2_j) + 10 \log_{10}(\sin(\theta_j)). \quad (\text{DB}) \quad (8)$$

其中, (7)式中 H 为卫星轨道高度, r 是图像中心的地球半径, RS_j 是距离向第 j 个像元的斜距. 在(8)式中, I_j 是经过去噪处理后的距离方向第 j 个像元的强度值, $A2_j$ 是依赖于距离的系统增益. 用(7), (8)式可以计算试验区每一个 SAR 像元的入射角及后向散射系数, 构成像元入射角余弦图及后向散射系数图.

3.4 试验区像元尺度的几何特征复合因子计算

由于试验区土壤及其它要素的介电常数的计算是基于 TM 图像的, 因此在用 SPM 模型计算地表几何特征复合因子时, 需要将 SAR 图像的像元尺寸及方位与 TM 图像配准. 本文确定了均匀分布于 TM 图像和 SAR 图像上 9 对配准点的像平面坐标, 建立了一个几何变换的二次多项式模型, 并用来对试验区 SAR 后向散射系数图及入射角余弦图相对于 TM 图像作几何变换. 几何变换后的像元值是变换前图像像元值的立方体卷积. 配准后的入射角余弦图及后向散射系数图与 TM 图像完全对应. 参考试验区地类的图 1(b), 对非树、非小麦类地表像元, 用“3.2 节”确定的相对介电常数 ϵ_r 及配准后的入射角余弦图代入(2)式的第一式, 计算 hh 极化方式下的试验区基于 TM 像元尺度的菲涅耳功率反射系数图. 将配准后的后向散射系数图代入(4)式第一式的左边, 再用配准后的入射角余弦图、电磁波波数及上述计算的菲涅耳功率反射系数确定介电常数因子 $f_e(\epsilon_r, \theta)$ 和成像参数因子 $f_d(\theta, \lambda)$. 因此能从(4)式第一式反解出试验区非树、非小麦类 TM 像元尺度的几何特征复合因子 $f_r(h, d)$, 如图 4 所示. 图中树和小麦类像元的几何特征复合因子暂时缺省为“0”.

4 考虑大气稳定度的地表空气动力学粗糙度确定

本节旨在表达在动力和热力因素综合影响下空

气动力学粗糙度的微气象学确定方法. 所迭代出的结果是某点空气动力学粗糙度的真值, 作为本文提出的遥感反演结果的验证标准. 在中性稳定的大气条件下, 野外测量的风速与测量高度的对数成线性关系^[1]. 当地物是大片(风浪区尺度)均匀的植被、建筑物等粗糙元素时, 需要将地表面抬高一个高度 d 后, 才有这种线性关系. 这个线性关系用公式(9)表示:

$$u(z) = a [\ln(z-d) - \ln z_{ad}], \quad (9)$$

式中, $u(z)$ 是离裸地表面高度 z 处的风速, 由野外测量获取; $a = u^*/K$ (摩擦速度/卡曼常数)未知; z_{ad} 为空气动力学粗糙度, 未知. 根据本文“研究过程”中关于风浪区粗糙元素分布的特点, 本文试验区是非均匀的, 应运用等效几何粗糙度的概念. 有些离散地物的高度对气流有拖拉作用而具有等效几何粗糙度效应, 不作为抬高高度 d 处理. 一般的大气状态是非稳定、非中性的, 因此用同一时刻测得的 3 个以上不同高度的风速值, 直接代入(9)计算出的 z_{ad} 是不正确的, 有时甚至是无解的. 本文采用 6 个不同高度的同一时刻测量的风速剖面和温度剖面数据, 根据微气象学原理及其一系列计算公式, 在显热通量稳定收敛的条件下, 迭代计算出 9 个测点的风浪区空气动力学粗糙度 Z_{ad} ^[15]. 事实上, 这里的 Z_{ad} 是在湍流和水平平流的作用下, 风浪区各个像元等效几何粗糙度影响下的综合结果. 最后的结果是利用 2 h 内每隔 10 s 钟记录的所有观测值计算的发生概率大于 5% 的结果的平均值. 地块的野外勘查情况及空气动力学粗糙度 Z_{ad} 计算值列于表 3 中.

5 TM 像元尺度的等效几何粗糙度向空气动力学粗糙度的尺度转换模型

本节论述由 SAR 和 TM 图像等信息获取的 TM 像元尺度的等效几何粗糙度以及相应的热力因子综合转换为风浪区尺度的空气动力学粗糙度的过程和模型. 并将反演结果用上节获取的实测值验证.

5.1 TM 像元尺度的等效几何粗糙度

本文的第 3 节以 TM 图像的分类图为索引^[16], 在 SAR 图像与 TM 图像尺度转换的基础上, 用 SPM 模型计算出了裸地类、居民地及道路类、水域类的

表 3 野外勘查及空气动力学粗糙度 Z_{ad} 计算

地块号	地类	野外勘查			Z_{ad} /cm
		地表高度标准离差/cm 相关长度/cm	地块半径/m	植被覆盖率/% 平均高度/cm	
1	干裸地	0.18/11.72(精确测量)	100	0/0	3.72
2	小草地	0.05/15 (估计)	10	20/5	2.31
3	湿裸地	0.10/13.90(精确测量)	100	0/0	8.42
4	精准小麦地	/	500	85/50	43.82
5	普通小麦地	/	50	75/40	31.32
6	鱼塘岸	0.05/15 (估计)	80	5/5	3.03
7	芦苇地	0.05/15 (估计)	20	50/160 (枯死)	36.80
8	路边小树林	0.05/15 (估计)	15	30/400	11.12
9	乱砖地	25/400 (估计)	20	0/0	2.72

TM 像元尺度的几何特征复合因子如图 4。为了从几何特征复合因子中提取等效几何粗糙度，我们需要确定地表高度的水平相关长度。精确测量每个像元的地表高度的水平相关长度是不现实的，因此本文对不同的地表类别，给以不同的相关长度。在分析了正弦函数、三角波函数、方波函数值的相关长度后，将土壤、水域及道路类像元的地表高度的相关长度用正弦函数与锯齿波函数的相关长度的平均值(0.29 周期)来代替，居民地像元地表高度相关长度用方波函数的相关长度(0.33 周期)来代替，这些相关长度再代入(4)式的第二式，从中反演出裸地类、居民地及道路类、水域类的 TM 像元尺度的高度标准离差 h ，并将这个高度标准离差 h 当作 TM 像元尺度考虑地表形态的等效几何粗糙度。



图 4 几何特征复合因子
A 示最高值 7.75; B 示最低值 0.00

小麦和树类目标，对 SAR 微波存在体散射效应，

因此不能用 SPM 模型计算它们的几何粗糙度因子。本文利用 TM3 红外波段和 TM4 近红外波段的图像数据，计算出植被指数 NDVI，再应用作物高度光谱模型^[9]以及若干树木和小麦高度的野外定标数据，计算出了所有小麦类、树木类目标的高度。最后将小麦类、树类非刚体像元的高度乘以 66.7%，转化为非均匀风浪区像元高度的标准离差。根据等效几何粗糙度的概念，这种高度标准离差，对气流具有拖拉作用，是 TM 像元尺度的等效几何粗糙度。

试验区内所有地物的 TM 像元等效几何粗糙度分布图按平面位置镶嵌复合，生成总体的 TM 像元等效几何粗糙度分布图，见图 5。

5.2 TM 像元等效几何粗糙度向空气动力学粗糙度的转换

由于湍流的扩散混合和水平平流的共同作用，测点的微气象参数迭代出来的空气动力学粗糙度是



图 5 像元等效几何粗糙度
A 示最高值 2714.99(cm); B 示最低值 0.50(cm)

代表一定风浪区(fetch)的空气动力学粗糙度. 该风浪区位于测量空气动力学粗糙度测点的上风处. 因此, 风浪区是有方向的, 取决于风向. 风浪区长度与测量空气动力学粗糙度测点的传感器离地面的高度有关, 通常认为是该高度的 100 倍. 本文设计的传感器最高高度为 5 m, 因此, 风浪区长度约为 500 m. 由于风向有一定角度的摆动, 实际上, 风浪区是一个具有扇形特征的作用区(图 6). 当地表完全均匀时, 风浪区任何像元的等效几何粗糙度经传递后, 均等于该区的空气动力学粗糙度 z_{ad} . 但本试验区是非均匀的, 有多种地物共存, 它们的等效几何粗糙度各不相同. 测点周围等效几何粗糙度对空气动力学粗糙度 z_{ad} 的确定有很大影响. 如何从风浪区内的所有 TM 像元等效几何粗糙度转换为微气象学中的用风速剖面测量得到的空气动力学粗糙度 z_{ad} ? 这是一个尺度转换新课题. 这种尺度转换不能用风浪区内各组份的等效几何粗糙度的简单平均传递, 而应该考虑气流在风浪区内的动力学和热力学作用过程. 本文分析认为这种动力学和热力学作用与测点的迎风方向、风浪区粗糙

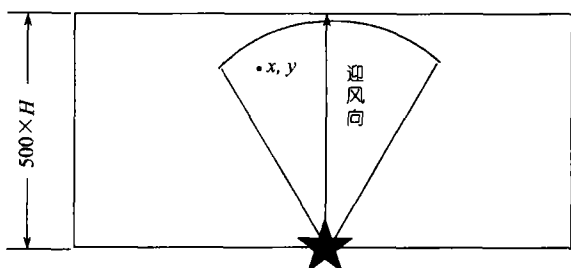


图 6 空气动力学模型作用区示意

像元与测站点的距离、风浪区的大小以及稳定度因子(热力学因子)有关. 在此分析的基础上, 本文建立了 TM 像元尺度的等效几何粗糙度向风浪区空气动力学粗糙度 z_{ad} 的转换模型, 用公式表达如下:

$$\begin{cases} z_{ad} = \xi \cdot \eta + \xi_0, \\ \text{令: } \eta = \frac{\sum_x \sum_{y=0}^{100H} h(x, y) \cdot \left(\frac{1}{D(x, y)} \right)^n \cdot \left(\frac{\Delta T(x, y) + \delta}{T} \right)^m}{\sum_x \sum_{y=0}^{100H} \left(\frac{1}{D(x, y)} \right)^n \cdot \left(\frac{\Delta T(x, y)}{T(x, y)} \right)^m} \end{cases} \quad (10)$$

参考图 6, 公式(10)中, y 指向迎风向; x 与 y 垂直,

位于扇形区域 Ω 内, 本文用迎风向左右 30 度角规定了扇形区域 Ω 的大小; $h(x, y)$ 是点“·”处的像元等效几何粗糙度; $D(x, y)$ 是点“·”与测点“★”之间的距离; H 是风速剖面的测量高度, 在这里用“100”“ H ”规划风速剖面测量场 y 方向的作用范围; $\Delta T(x, y)$ 是点“·”处的 5 m 高的空气温度与地面温度 T 之差; δ 是加入的一个小常数, 使 $\Delta T(x, y)$ 大于 0; m, n 是热力和动力因子有关的待定指数; ξ, ξ_0 为模型转换系数.

按照图 6, 本文分别确定了 9 个风速剖面 and 温度剖面测站点的作用场, 计算了 9 个测站点的转换模型(10)式中的 η 值, 结果列于表 4 中, 表 4 中的地块号与表 3 的相同.

图 7 表示的转换模型输出的 η 值与野外测量值之间的比对关系. 粗黑直线的斜率可以理解为转换模型(10)式的系数 ξ . 图 7 中的“枯死芦苇地”测点值偏离粗黑直线较远, 原因是这个测点位于一片枯死的芦苇地中, 根据表 3 的野外调查结果, 枯死的芦苇高约 1.6 m、覆盖率约有 50%, 对雷达微波存在体散射效应, 但是在 TM 图像上不能将它与裸地区别, 因此仍然采用 SPM 散射模型来计算其高度标准离差, 所以与实际情况不符. 图 7 中其他对比点偏离粗黑直线应是风速剖面测量误差、TM 图像分类误差等误差所致.

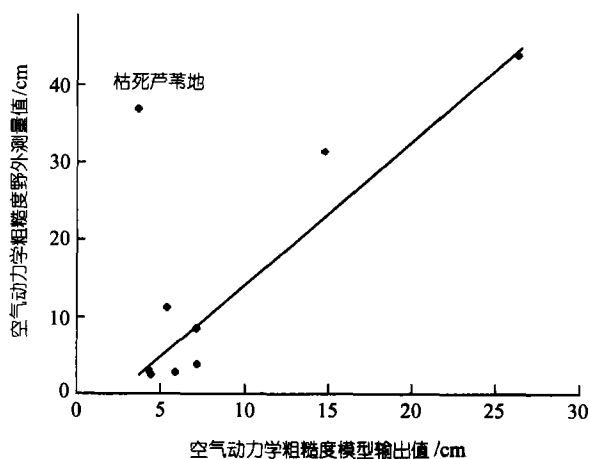


图 7 空气动力学粗糙度模型输出值和测量值对比

根据图 2, 确定模型中热力因子的指数 $m = 0.5$, 动力因子的指数 $n = 2.5$, 并确定转换模型(10)式的系数 ξ, ξ_0 应该是常数. 本文利用表 4 的数据(7 号点——

表4 空气动力学粗糙度模型粗糙度的验证/cm

地块号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
模型输出 η	7.24	4.46	7.13	26.36	14.79	4.31	3.69	5.39	5.96
野外实测值 Z_{ad}	3.72	2.31	8.42	43.82	31.32	3.03	36.80	11.12	2.72

“枯死芦苇地”除外), 建立标定方程:

$$Z_{ad} = 2.10 \cdot \eta - 7.48. \quad (11)$$

因此, 当用 SAR 图像和 TM 图像以及一系列的模型计算得到区域的等效几何粗糙度的二维分布后, 参考当地气象台的风向及气温数据, 即能够按(11)式计算风浪区空气动力学粗糙度的二维分布。

6 结论与展望

本文利用同时相的雷达后向散射测量图像数据及 TM 热红外波段图像数据, 确定了非植被类的每一个像元几何粗糙度, 又用 TM 红外、近红外波段的图像数据, 反演计算出了小麦、树类植被的高度(几何粗糙度), 得到了试验区 TM 像元尺度的等效几何粗糙度的二维分布; 在分析地表等效几何粗糙度与空气动力学粗糙度的相互联系以及不同含义、不同影响因素、不同获取方法的基础上, 创新性地建立了 TM 像元等效几何粗糙度向空气动力学粗糙度转换的模型, 并根据野外试验数据和遥感图像数据, 初步确定了这个转换模型的参数性质。由于地表结构的复杂性, 当前定量遥感领域尚缺乏一个完整的由 TM 像元尺度等效几何粗糙度直接转换为空气动力学粗糙度的模型, 本文利用了微波后向散射测量能够提取地表几何粗糙度的优势, 再结合 TM 卫星图像信息, 首次实现了地表几何粗糙度向空气动力学粗糙度的转换。本文的研究成果可望用于区域化定量研究全球变化、水分平衡、碳平衡和天气数值预报等最新研究热点中。

本文的研究思路还可以得到进一步的扩展: 可以用同时相的两幅单极化 SAR 图像或单时相的多极化 SAR 图像来确定地表的介电常数; 对于离散地物的几何高度和要素类别, 还可以用光学图像的数字摄影测量方法, 全自动测量和确定; 转换模型适用的尺度还可以进一步扩大。本文所涉及的图像分类技术、转换模型中参数的普适性, 还需进一步实践和优化。

致谢 感谢李召良研究员和唐新斋助理研究员在有关方面的帮助。

参 考 文 献

- 1 Monteith J L. Principles of Environmental Physics. London: Edward Arnold, 1973
- 2 Taylor P A. On the parameterization of drag over small-scale topography in neutrally-stratified boundary-layer flow. Boundary-Layer Meteorology, 1989, 48: 409~422
- 3 Blumberg D G, Greeley R. Field studies of aerodynamic roughness length. Journal of Arid Environment, 1993, 25: 39~48
- 4 Williams K K, Greeley R M C. Venus: Aerodynamic roughness of wind streaks. Lunar Planetary Science, 1997, 28: 1559~1560
- 5 Greeley R, Blumberg D G. Preliminary analysis of shuttle radar laboratory (srl-1) data to study aeolian features and processes. IEEE TGARS, 1995, 33(4): 927~933
- 6 Blumberg D G, Greeley R. Estimating aerodynamic roughness length from wind data and remote sensing. Western U. S., International Symposium Evolution of Deserts, 1992, 22~23
- 7 McHone G R, Blumberg D. G. Comparison of aerodynamic roughness (Z_0) values from wind measurements and SRL radar; Western U. S. and Namibian deserts. Lunar and Planetary Science, 1997, 28: 917~918
- 8 Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave remote sensing: active and passive, volume ii: Radar remote sensing and surface scattering and emission theory. Boston: Artech House Publishers, 1982
- 9 张仁华. 实验遥感模型与地面基础. 北京: 科学出版社, 1996
- 10 张仁华, 孙晓敏, 刘纪远, 等. 定量遥感反演作物蒸腾和土壤水分利用率的区域分异. 中国科学, D 辑, 2001, 31(11): 959~968
- 11 张仁华, 苏红波, 李召良, 等. 地表受光面和阴影温差的潜在信息及遥感土壤水分的新途径. 中国科学, E 辑, 2000, 30 (增刊): 45~53
- 12 张仁华, 孙晓敏, 朱治林, 等. 以微分热惯量为基础的地表蒸发全遥感模型及在甘肃沙坡头地区的验证. 中国科学, D 辑, 2003, 33(12): 1041~1050
- 13 Chirs Oliver, Shaun Quegan. Understanding Synthetic Aperture Radar Images. British: Crown Copyright, 1997. 157~193
- 14 Zhu Cai-ying, Zhang Ren-hua, Wang Jingfeng, et al. The retrieval of aerodynamic surface roughness from SAR remote sensing image. Jose A. Sobrino edited: First international symposium on recent advances in quantitative remote sensing. Spain: Guada Impresores S.L. Publishers, 2002. 818~822
- 15 Pieri P, Fuchs M. Comparison of Bowen ratio and aerodynamic estimates of evapotranspiration. Agricultural and Forest Meteorology, 1990, 49: 243~256
- 16 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. 中国科学, D 辑, 2002, 32(12): 1031~1040