

引用格式:Sha Minmin,Zhang Fengli,Fu Xiyu,*et al.* Research on Aerodynamic Roughness in Urban Areas based on SAR Data[J].Remote Sensing Technology and Application,2016,31(5):855-863.[沙敏敏,张风丽,符喜优,等.基于 SAR 数据的城市空气动力学粗糙度研究[J].遥感技术与应用,2016,31(5):855-863.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.5.0855

基于 SAR 数据的城市空气动力学粗糙度研究

沙敏敏^{1,2},张风丽¹,符喜优¹,王国军¹,邵 芸¹

(1.中国科学院遥感与数字地球研究所,北京 100101;2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:空气动力学粗糙度是表征下垫面空气动力学特征的重要参数。雷达遥感是空气动力学粗糙度研究的一种有效手段。利用 2006~2011 年的 22 景多时相 ALOS PALSAR 数据,分析了北京市北部地区后向散射系数的方向及尺度特征,同时利用多层风速、风向观测资料计算得到了空气动力学粗糙度,并在不同尺度和方向上分析了两者的相关性,得出上风向扇形区域半径为 2 500 m,夹角为 30°时扇形区域内的后向散射系数与空气动力学粗糙度的相关性最大,表明 SAR 图像可以有效表征城市下垫面地表的空气动力学粗糙特性。这一结论为城市空气动力学粗糙度雷达遥感反演提供了重要基础,将为大气边界层模型和区域气候模型提供更精确的输入。

关键词:SAR;城市;后向散射系数;空气动力学粗糙度;相关性

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2016)05-0855-09

1 引言

城市是人口密集、社会经济活动集中和资源相对聚集的空间地域。我国正处于快速城镇化发展阶段,快速增加的建筑物、道路网等人工目标极大地改变了地表的粗糙特性,导致了非常复杂的城市边界层结构。城市区域的地气相互作用成为当前研究的热点^[1]。下垫面的粗糙特征影响大气湍流和微气象,改变湍流的传输、扩散和大气污染物的沉降。城市气象和大气环境监测无一例外地都需要空气动力学粗糙度参数^[2]。

空气动力学粗糙度(Aerodynamic Roughness)定义为地表上方风速为 0 的高度,是表征空气动力学特征的重要参数,其大小在一定程度上反映了地表与大气的物质能量交换^[3]。定量描述城市下垫面空气动力学特征对于正确理解城市物质和能量交换

起着关键性作用。然而,城市是地表最粗糙的下垫面类型,对于城市下垫面而言,粗糙元的分布非常复杂,下垫面粗糙元高度在几十米左右,空间分布也存在较大的非均匀性,要在空气动力学粗糙度与地表形态特征间建立关系是非常复杂的。城市下垫面空气动力学粗糙度的研究仍处于初始阶段^[4-5]。

计算空气动力学粗糙度的常规方法多为气象学方法,根据通量塔或者气象站获取的资料计算得到空气动力学粗糙度,需要风温梯度数据或三维风速数据,成本高、难度大、且只能获取特定范围内的空气动力学粗糙度^[5]。另外常采用的一种方法是形态学方法,建立空气动力学粗糙度与地面粗糙元高度、粗糙元分布密度以及迎风面积等参数的关系模型。但现有的城市空气动力学粗糙度计算模型多假设粗糙元具有相同的高度且空间分布均匀,这与城市高度异质性的实际情况有很大出入。目前如何确定城

收稿日期:2015-09-18;修订日期:2016-08-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目“城市下垫面粗糙特性时空特征雷达遥感监测及气候环境影响研究”(41671359)、“复杂散射机制场景的 SAR 图像认知方法研究”(61471358)、“可控环境下多层介质目标微波特性全要素测量与散射机理建模”(41431174),中国科学院知识创新工程重要方向项目“典型地物微波特性知识库构建与开发”(KZCX2-EW-320),国家 863 计划项目“典型地物目标后向散射特性数据库”(2011AA120403)。

作者简介:沙敏敏(1990—),女,山东德州人,硕士研究生,主要从事城市下垫面粗糙度特性方面的研究。E-mail:shamin0656@163.com。

通讯作者:张风丽(1978—),女,山东泰安人,副研究员,主要从事城市雷达遥感方面的研究。E-mail:zhangfl@radi.ac.cn。

市下垫面空气动力学粗糙度尚无最佳方案^[6],迫切需要针对城市下垫面发展适用的方法。

基础地理信息数据和 LiDAR 数据可用于获取城市粗糙元的形态学参数,但数据更新慢、成本高的问题限制了其在城市下垫面粗糙特性研究方面的应用。而合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有全天时全天候对地观测能力,数据获取较为方便,并且能够有效地反映下垫面的粗糙特征,这与空气动力学粗糙度直接相关^[7],因此雷达遥感是空气动力学粗糙度反演的有效手段^[8]。

利用 SAR 数据反演均匀下垫面空气动力学粗糙度的研究已取得较多进展,如沙漠区、植被区等。Greeley 等^[5]在沙漠地区空气动力学粗糙度与雷达后向散射系数之间建立了指数关系式;Saatchi 等^[9]利用 InSAR 数据获取了植被区域的空气动力学粗糙度;Hegarat-Masclé 等^[8]利用突尼斯干旱地区的 ERS-1 数据和地面观测资料,建立了空气动力学粗糙度与后向散射系数之间的对数模型。城市由于下垫面粗糙元的分布具有高度异质性,其空气动力学粗糙度的反演相对较为困难。现有方法可以分为 3 类:第一种是分类查表法,即利用 SAR 图像进行分类,利用查找表确定每种地物类型的空气动力学粗糙度,进而得出某个区域的空气动力学粗糙度分布图^[10-13]。这是目前最常用的方法,但这种方法通常用于中尺度模型,当用于城市区域时要求非常精细的分类结果;二是直接建立空气动力学粗糙度与 SAR 图像后向散射系数之间的关系模型。Jeyachandran 等^[14]于 2009 年对美国休斯顿地区 SAR 图像后向散射系数与空气动力学粗糙度的相关性进行了研究,建立了两者之间的指数关系模型。但现有研究忽略了城市下垫面粗糙元空间分布的异质性,缺乏深入细致的尺度和方向分析,因此不能有效刻画城市空气动力学粗糙度的时空分布特征。另外一种方法是基于粗糙元空间分布的形态学方法,主要是结合 InSAR 数据获取城市建筑物等人工目标的空间分布,然后结合空间分析建立粗糙元高度方差与空气动力学粗糙度的关系模型^[10,15],这类方法对干涉测量的精度提出了很高的要求。

由此可见雷达遥感为城市下垫面粗糙特性研究提供了重要手段,但城市区域下垫面粗糙元的分布具有高度的异质性,方向与尺度效应显著,现有研究很少系统地分析这一问题,限制了其在城市气象和气候研究中的深入应用。本文以北京市北部为实验区,利用 2006~2011 年 22 景 ALOS PALSAR 数据

分析了该区域后向散射系数的方向及尺度特征,同时利用多层风速风向观测资料计算得到了空气动力学粗糙度,在不同尺度和方向上分析了后向散射系数与空气动力学粗糙度之间的相关性。

2 试验区及数据介绍

北京市作为我国的首都和政治文化中心,人口规模大、经济活动发达,是世界特大城市之一。改革开放之后,随着北京城市化进程的不断加快,城市结构和建筑物高度都发生了很大变化,北京市的城市规模迅速扩大,土地利用类型变化非常迅速,且内部差异很大。北京的城市化发展对边界层的风速、温度及动力学参数产生了非常大的影响^[16]。目前对于北京市空气动力学粗糙特性的研究多基于北京气象塔的观测数据。这类方法仅能获取气象塔附近小范围区域的空气动力学粗糙度,对于整个北京市的气象和气候研究来讲是远远不够的^[17]。

本文选择北京 325 m 气象塔附近 14 km × 14 km 范围的区域作为试验区,如图 1(a)所示。北京气象塔位于北京市德胜门以北约 2.7 km 的中国科学院大气物理研究所分院院内,地理位置为 116°22'E,39°58'N^[18],其在实验区的分布如图 1(a)五角星位置所示。图 1(b)为北京气象塔近图,气象塔垂直共有 15 层,观测高度分别为 9、15、32、47、65、80、103、120、140、160、180、200、240、280、320 m。气象塔在每层都装有风速仪、风向仪、温度仪和相对湿度仪。为减小塔体阻挡气流对测风仪的影响,分别在西北和东南两个盛行风向各安装一台测风仪。气象塔观测资料的采样间隔为 20 s 一次,观测资料主要包括 15 层的水平风速、风向、相对湿度和温度。利用气象塔观测的风速风向梯度数据,可以计算周边的空气动力学粗糙度,有利于与雷达遥感数据的对比分析。本文获取并利用了 SAR 图像成像时间前后 5 天,除去 4 天数据缺测外共 106 天的气象塔观测数据。

气象塔建成初期,塔址所处的地区还属于北京市的城郊,周围没有高大的建筑群,地表当时所反映的仍是城郊均匀下垫面的特征。随着城市的快速扩展和 2008 奥运场馆的大范围建设,该区域近十几年土地利用情况发展了巨大变化,气象塔周围下垫面由较均匀的城郊下垫面逐渐变为复杂的城市非均匀下垫面。图 1(c)、(d)分别为气象塔东北方向(0~45°)及西南方向(180°~225°)的土地利用情况

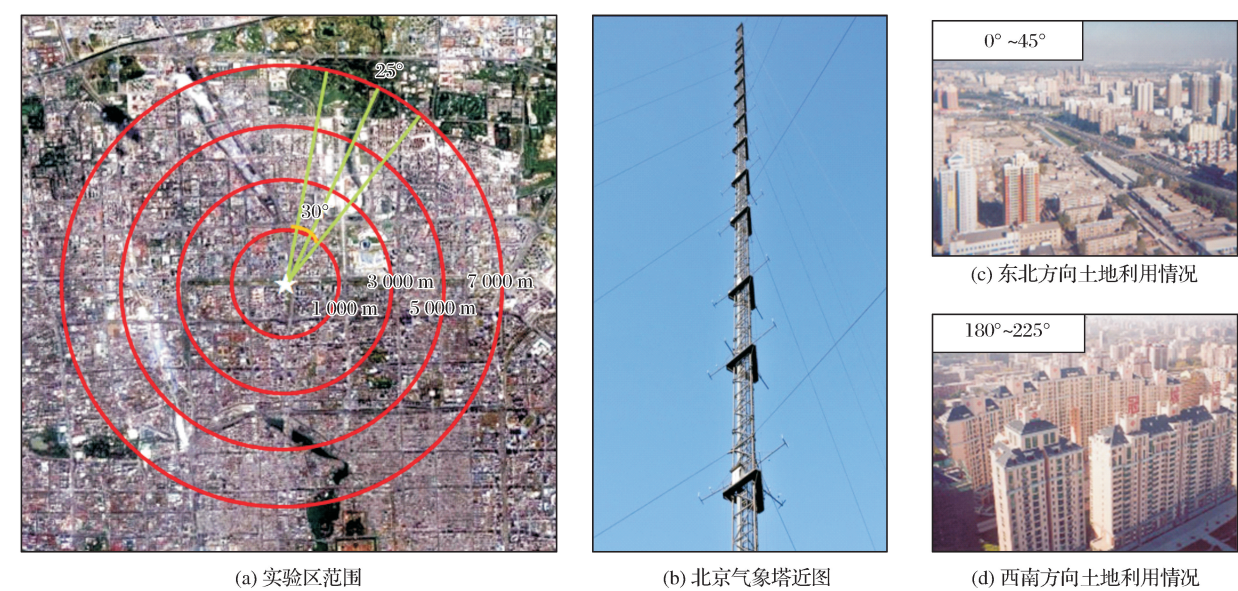


图 1 实验区范围及北京气象塔周边下垫面特征

Fig.1 Extent of the study area and distribution of surface features surrounding around Beijing

图,可见两地区下垫面特征有很大区别。

本文利用 2006~2011 年获取的 22 景 ALOS-PALSAR 图像进行后向散射特性的分析。ALOS 卫星于 2006 年发射,其所携带的 PALSAR 传感器

具有高分辨率、扫描式合成孔径雷达、极化 3 种观测模式。实验采用的 ALOSPALSAR 数据包括 10 景单极化数据和 12 景双极化数据,入射角为 38.7° 。各景图像的主要参数如表 1 所示。

表 1 ALOSPALSAR 图像主要参数

Table 1 Main parameters of ALOSPALSAR images

编号	成像时间	极化方式	距离向分辨率/m	方位向分辨率/m	编号	成像时间	极化方式	距离向分辨率/m	方位向分辨率/m
1	2006/6/23	HH	4.68	3.44	12	2010/5/14	HH,HV	9.36	3.05
2	2007/1/17	HH	4.68	3.07	13	2010/6/12	HH,HV	9.36	3.06
3	2007/6/21	HH,HV	9.36	3.06	14	2010/6/29	HH,HV	9.36	3.07
4	2008/2/6	HH	4.68	3.06	15	2010/7/28	HH,HV	9.36	3.07
5	2008/7/22	HH,HV	9.36	3.08	16	2010/8/14	HH,HV	9.36	3.06
6	2009/2/8	HH	4.68	3.07	17	2010/9/29	HH,HV	9.36	3.07
7	2009/8/11	HH,HV	9.36	3.06	18	2010/10/28	HH,HV	9.36	3.07
8	2010/1/25	HH	4.68	3.08	19	2010/11/14	HH,HV	9.36	3.08
9	2010/3/12	HH	4.68	3.08	20	2010/12/13	HH,HV	9.36	3.08
10	2010/3/29	HH	4.68	3.06	21	2010/12/30	HH	4.68	3.06
11	2010/4/27	HH	4.68	3.06	22	2011/3/15	HH	4.68	3.08

3 基本原理与方法

3.1 基本原理

由于各地物散射机理不同,不同土地利用类型的后向散射系数差别很大。Jeyachandran 等^[14]在 2009 年对 SIR-C 数据进行处理,分析了城市典型地物类型的后向散射系数,结果显示,光滑表面的后向散射系数变化范围为 $-19\sim-27$ dB,而粗糙表面的

后向散射系数变化范围为 $0\sim19$ dB,城市下垫面越粗糙,后向散射系数越大。本文利用 ALOSPALSAR 图像对北京市典型地物类型的后向散射系数进行了分析,结果如表 2 所示。住宅区、高层建筑区、中央商务区等粗糙度较大的地物类型的后向散射系数较大,而公路、水体等较为平滑的地物类型的后向散射系数偏低,结论与 Jeyachandran 的研究基本一致,表明后向散射系数可以有效地表征城市地

表粗糙度特性,而空气动力学粗糙度与地表粗糙特性是直接相关的。

表 2 城市典型地物类型后向散射系数分布
Table 2 Radar Backscatter(dB) variation across urban land use classes

地物类型	最小值/dB	最大值/dB	平均值/dB
住宅区	-15.04	6.99	-6.23
中央商务区	-13.99	6.99	-0.53
高层建筑区	-15.26	6.99	0.07
公园绿地	-16.92	-3.07	-11.09
道路	-15.97	3.61	-11.16
水体	-17.41	-9.09	-12.95

3.2 实验方法

本文采用的实验流程图如图 2 所示。首先对 22 景 ALOSPALSAR 图像进行处理,包括多视处理、配准、滤波、地理编码和辐射校正等,进而提取得到各个像元在不同时相的后向散射系数。另一方面,利用气象塔获得的多层风速风向观测资料,基于拟合迭代法计算空气动力学粗糙度 z_0 ,以此作为地面真值。最后借助尺度与方向性分析,探讨 SAR 图像提取的后向散射系数与空气动力学粗糙度之间的相关性。具体实验过程如下:

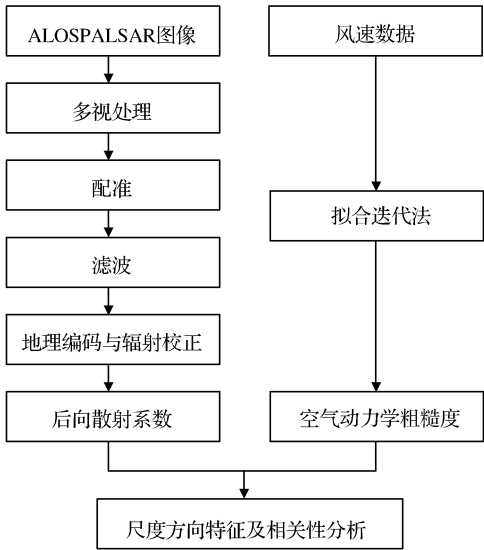


图 2 实验流程图
Fig.2 Flow chart of the experiment

(1)对 22 景 ALOSPALSAR 图像进行处理,包括多视处理、配准、滤波、地理编码和辐射校正。ALOSPALSAR 数据为 1.1 级的单视复数(SLC)数据。单视复数 SAR 图像产品包含很多的斑点噪声,为抑制斑点噪声的影响,需在图像的距离向和方位向上做平

均,即为多视处理。对于 ALOSPALSAR 图像,单极化数据方位向视数与距离向视数之比为 2 : 1,多极化数据方位向视数与距离向视数之比为 5 : 1。覆盖同一地区的多幅雷达图像,如果进行时间序列分析等处理,需要进行图像间的配准。为了降低由斑点噪声引起的波动,需在后处理时采用非相干平均技术。为更好地对比 SAR 图像几何和辐射特征,对配准后的多时相 SAR 图像进行地理编码和辐射定标。

(2)对 106 天风速风向梯度数据进行处理,以理查逊数确定大气稳定度,选用中性层结条件下的风速梯度数据,用拟合迭代法进行计算^[18],得出不同方向、不同年份的空气动力学粗糙度参数。

根据莫宁—奥布霍夫相似理论,中性层结条件下近地面层水平风速分布满足对数律^[8],即:

$$u_{(z)} = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z - d_0}{z_0} \right) \tag{1}$$

其中: u_* 为近地面层摩擦速度; k 为 Von Karman 常数,一般取为 0.4; z 为离地面的实际高度; z_0 为空气动力学粗糙度; d_0 为零平面位移; $u_{(z)}$ 为离地面实际高度 z 时的风速。

由式(1) 可以通过拟合迭代法计算 z_0 和 d_0 ,具体步骤是:选取不同 d_0 值 d_i ,由 $u_{(z)}$ 和 $\ln(z - d_i)$ 做线性回归,直到 $u_{(z)}$ 和 $\ln(z - d_i)$ 相关系数达到最大时 d_i 为 d_0 的真值,由线性斜率取 u_* / k 可得 u_* ,由截距 $u_* / k \cdot \ln(z_0)$ 可得到 z_0 的真值。

为保证水平风速满足对数规律^[19],本文使用气象塔 100 m 以下的风速数据,即 32、47、65、80 m 的风速梯度数据。

(3)空气动力学粗糙度不仅与下垫面粗糙元特性相关,还与风场本身相关,由于湍流的扩散混合和水平平流的共同作用,测点的风速数据迭代出来的空气动力学粗糙度是代表上风向扇形风场区的空气动力学粗糙度,该扇形区域一般用半径和夹角进行定义^[20]。朱彩英等^[24]认为扇形风场区半径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,同时将迎风向左右各 30°定为扇形风场区的夹角大小。Bechtel 等^[21]认为扇形风场区半径与周边粗糙元高度有关,应为粗糙元平均高度的 20 倍。城市下垫面异质性高,地物结构特征差异大,方向和尺度效应特别明显。

因此,本文定义沿不同方向的不同半径和夹角的扇形区域开展后向散射特征及其与空气动力学粗糙度的相关性的分析。定义正北为 0°方向,以顺时针方向为正,分别定义了 13 种半径(1 000 ~

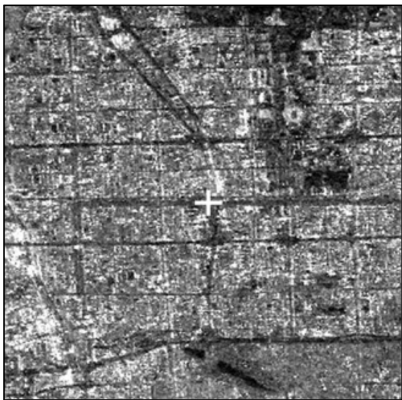
7 000 m, 步长 500 m), 3 种夹角(30° 、 45° 、 60°)的扇形区域, 每个扇形区域以 5° 为步长, 依次分析各个扇形区域在不同方向上后向散射系数的分布规律, 并结合由多层风速风向资料计算得到的空气动力学粗糙度对两者进行了相关性分析。图 1(a) 为 25° 方向上不同半径的 30° 夹角扇形区域的分布示例图。

4 实验结果及分析

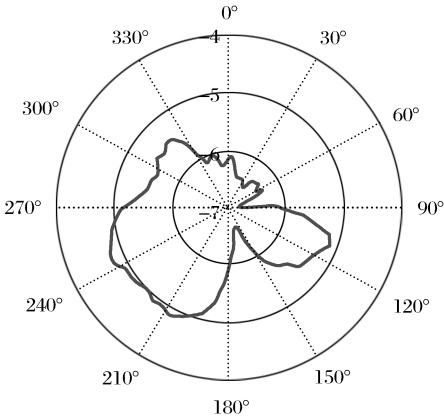
4.1 后向散射特征规律分析

如前所述, 城市下垫面具有很大的异质性, 因此

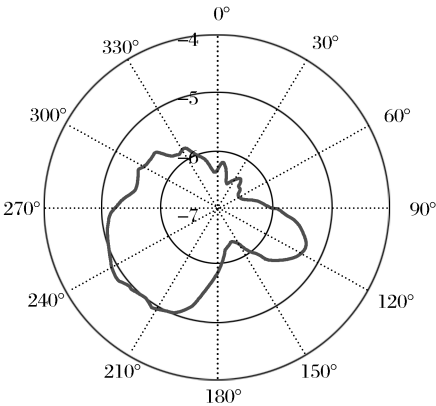
以气象塔所在位置为顶点, 对 2007 年 6 月 21 日 ALOSPALSAR 图像进行分析, 分别以 30° 、 45° 、 60° 为夹角, 4 500 m 为半径, 以 5° 为步长分析各个扇形区域在不同方向上后向散射特征的变化规律, 得到结果如图 3 所示。图 3(a) 为以北京气象塔为中心的 ALOSPALSAR 图像。图 3(b)、(c)、(d) 分别为 30° 、 45° 、 60° 夹角的扇形区域的后向散射系数分布图。极轴为后向散射系数的数值, 以图 3(b) 15° 方向为例, 该方向的极径值表示以 15° 方向为中心, 夹角为 30° 的扇形区域后向散射系数值。



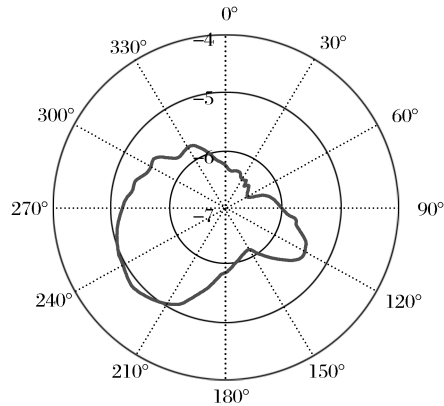
(a) 以北京气象塔为中心的 ALOSPALSAR 图像



(b) 30° 夹角扇形区域后向散射系数分布图



(c) 45° 夹角扇形区域后向散射系数分布图



(d) 60° 夹角扇形区域后向散射系数分布图

图 3 北京气象塔周边不同扇形区域后向散射系数分布图

Fig.3 Variation of backscattering coefficient of different sector areas around the Beijing meteorological tower

由图 3 可以看出, 后向散射系数在不同方向的分布有较大区别, 后向散射系数对方向较为敏感。由图 3(b) 可以看出, 西南方向 ($180^{\circ} \sim 270^{\circ}$) 后向散射系数较高, 这是因为西南方向建筑物高度较高, 且建筑物分布较为密集, 而由于东北方向 ($0^{\circ} \sim 90^{\circ}$) 植被较多, 且建筑物分布密度较低, 故东北方向的后向散射系数较低。由图 3(a) 也可看出, 气象塔东北部及西南部两地区的地物类型差别较大, 西南地区的建筑物分布明显比东北部密集。另外, 对比图 3

(b)、(c)、(d), 可以看出, 与 45° 和 60° 相比, 30° 夹角能反映下垫面后向散射方向特征的更多细节信息。

如前所述, 空气动力学粗糙度是一个与风场相关的物理量, 上风向的粗糙元仅对一定距离范围内的空气动力学粗糙度有影响, 一般这个作用距离与测点观测高度和周围粗糙元高度相关。为了分析实验区在 SAR 图像上后向散射系数的尺度特征, 以气象塔所在位置为中心, 提取了不同方向上、13 种半径扇形区域内的后向散射系数, 分析表明在各个方

向上后向散射系数随扇形区域半径的变化缺乏普遍规律,这主要是由于城市下垫面异质性高,当作用半径不同时,所包含的下垫面粗糙元的类型不同。为了确定 SAR 图像分析的上风向扇形区域的最优尺度,需要结合多层风速风向测量数据计算得到的空气动力学粗糙度开展进一步的分析。

4.2 空气动力学粗糙度计算结果及分布规律

对风速梯度数据用拟合迭代法进行处理后得出

不同时期的空气动力学粗糙度。按是否符合中性层结条件对数据进行筛选,共获得 86 组有效空气动力学粗糙度数据。对空气动力学粗糙度随时间及方向的变化规律进行分析,结果如图 4 及图 5 所示。图 4 为空气动力学粗糙度随方向的变化规律。330°~360°空气动力学粗糙度数据较多,故选择该区域对空气动力学粗糙度随时间的变化规律进行分析。图 5 为 330°~360°区域内空气动力学粗糙度随时间的变化趋势。

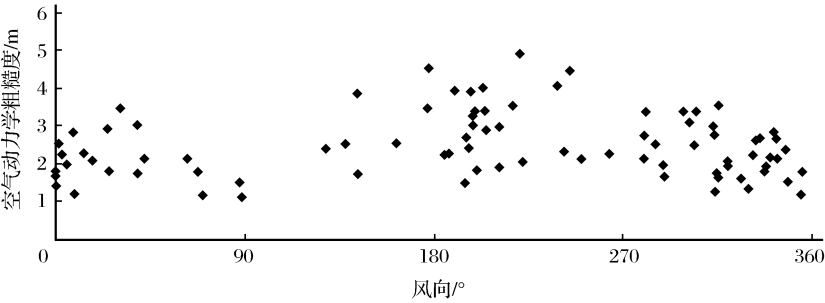


图 4 2006~2011 年空气动力学粗糙度随方向的变化规律

Fig.4 Variation of aerodynamic roughness with orientations from 2006 to 2011

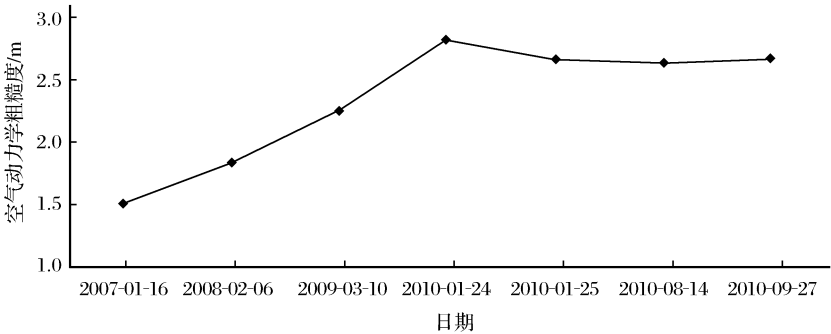


图 5 330°~360°区域空气动力学粗糙度随时间的变化规律

Fig.5 Variation of aerodynamic roughness with time in angle range of 330°~ 360°

由图 4 可以看出,实验区空气动力学粗糙度大小为 0~6 m,大部分数值分布在 1~3 m 之间。高志球等^[22]在 2002 年计算得到的北京市空气动力学粗糙度为 1.75 m,李倩等^[18]在 2003 年计算得到的 z_0 分布在 0~7 m,徐阳阳等^[16]在 2009 年计算的 z_0 范围为 1~5 m,与本文结论基本一致。

对于均匀、平坦的下垫面来说,空气动力学粗糙度是不随风向变化的,而对于城市下垫面,由于粗糙元在不同方向分布是不均匀的,空气动力学粗糙度与风向有关^[18]。由图 4 可以看出空气动力学粗糙度在西南方向(180°~240°)有较大值,原因是西南方向有很多高度大于 50 m 的建筑物,与李倩等^[18]在 2003 年得出的结论一致。

图 5 给出了 330°~360°方向上空气动力学粗糙度值随时间的变化规律,由图 5 可以看出,空气动力

学粗糙度的值是逐年递增的,由 2007 年的 1.5 m 增加至 2010 年的 3.5 m,与高志球等^[22]、李倩等^[18]、徐阳阳等^[16]得出的结论一致,表明了快速的城镇化发展对城市下垫面空气动力学粗糙度有非常明显的影响,随着建筑物密度及高度的增加,空气动力学粗糙度也随之增加。由图 5 中 2010 年空气动力学粗糙度的变化规律也可以看出,城市空气动力学粗糙度随季节的变化没有明显的规律,这表明引起城市空气动力学粗糙度变化的主要原因是城市建筑物高度及密度的变化。

4.3 相关性分析

为了分析多大尺度的上风向扇形区域内粗糙元对空气动力学粗糙度的影响更大,开展以下相关性分析。

利用气象塔测量得到的多层风速风向资料,利

用迭代拟合法计算空气动力学粗糙度 z_0^{i,θ_i} , 其中 i 表示 86 个有效空气动力学粗糙度的个数, θ_i 表示第 i 个空气动力学粗糙度对应的风向。

针对 22 景 ALOSPALSAR 图像,按 86 个有效空气动力学粗糙度数据的时间及风向设定不同大小的扇形区域 (θ_i, r, α) , 提取每个空气动力学粗糙度数据对应的 SAR 图像扇形区域的后向散射系数 $\sigma_{\theta_i, r, \alpha}^i$, 其中 θ_i 对应第 i 个空气动力学粗糙度对应的风向, 即扇形区域中心线的方向, r 对应扇形区域的半径, 取值分别为 1 000、1 500、2 000、2 500、3 000、

3 500、4 000、4 500、5 000、5 500、6 000、6 500、7 000 m, α 对应扇形区域的夹角, 取值分别为 30°、45°及 60°。

得到与 z_0^{i,θ_i} 相应的不同尺度大小扇形区域内的后向散射系数的 $\sigma_{\theta_i, r, \alpha}^i$ 之后, 计算 $\sigma_{\theta, r, \alpha} = \{\sigma_{\theta_1, r, \alpha}^1, \sigma_{\theta_2, r, \alpha}^2, \dots, \sigma_{\theta_i, r, \alpha}^i, \dots, \sigma_{\theta_{85}, r, \alpha}^{85}, \sigma_{\theta_{86}, r, \alpha}^{86}\}$ 与 $z_0^\theta = \{z_0^{1,\theta_1}, z_0^{2,\theta_2}, \dots, z_0^{i,\theta_i}, \dots, z_0^{85,\theta_{85}}, z_0^{86,\theta_{86}}\}$ 的相关系数, 图 6 给出了不同作用半径上提取的不同夹角扇形区域内后向散射系数与空气动力学粗糙度的相关系数的分布。

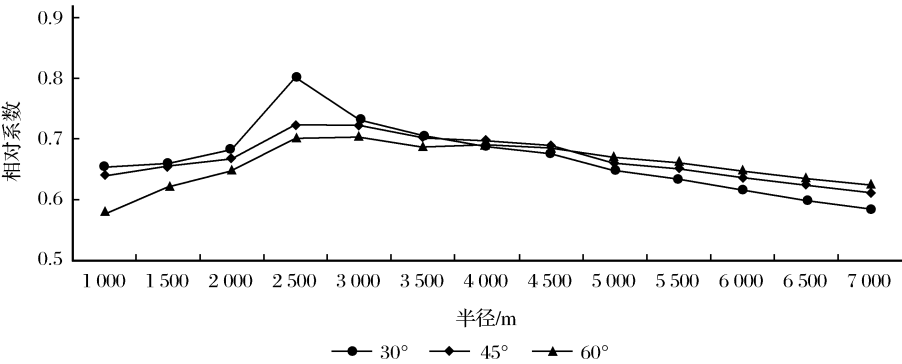


图 6 不同夹角扇形区域后向散射系数与空气动力学粗糙度的相关性随半径变化规律
Fig.6 Variation of correlation coefficient between backscattering coefficient and aerodynamic roughness with radius in sector areas of different angles

由图 6 可以看出,当半径小于 2 500 m 时, σ_0 与 z_0 的相关性随半径的增大而增大, 夹角为 30°时相关性较大, 60°时相关性较小, 而当半径大于 2 500 m 时, σ_0 与 z_0 的相关性随半径的增大而减小。当半径大于 5 000 m 时, 相对于 30°和 45°, 角度为 60°时相关性较大。当半径为 2 500 m、夹角为 30°时相关性最大, 为 0.802。故选择半径 2 500 m 为最优半径, 角度 30°为最优夹角。由此可见, 当扇形区域半径为 2 500 m, 夹角为 30°时, 上风向的粗糙元对空气动力学粗糙度的影响最大。表明 SAR 图像可以有效表征城市下垫面地表的空气动力学粗糙特性, 可以建立后向散射系数与空气动力学粗糙度的定量关系模型。

5 结 语

本文选取 2006~2011 年 22 景 ALOSPALSAR 图像及相应日期的风速梯度数据, 以北京 325 m 气象塔为中心, 分析了不同尺度扇形区域后向散射系数的分布规律以及空气动力学粗糙度的时域分布特征, 并对后向散射系数与空气动力学粗糙度的相关

性进行了分析。

本研究得出如下结论: 实验区空气动力学粗糙度的变化范围为 0~6 m, 多数分布于 1~3 m, 具有明显的方向性, 且随着城市扩展呈逐渐增大的趋势。由于城市下垫面的高度异质性, 在不同方向和空间尺度上提取的后向散射系数具有很大差异。通过对空气动力学粗糙度和后向散射系数的相关性分析, 得出上风向扇形区域半径为 2 500 m、夹角为 30°时, 后向散射系数与空气动力学粗糙度的相关性最大, 即此区域内粗糙元对空气动力学粗糙度的影响最大。这为利用雷达遥感数据进行空气动力学粗糙度反演提供了重要的基础, 下一步将建立两者的定量关系模型和发展区域尺度上的空气动力学粗糙度反演方法, 为大气边界层模型和区域气候模型提供更精确的输入。

致谢: 感谢中国科学院大气物理研究所在观测资料方面给予的帮助!

参考文献 (References):

[1] Crago R D, Okello W, Jasinski M F. Equations for the Drag

- Force and Aerodynamic Roughness Length of Urban Areas with Random Building Heights[J].Boundary-Layer Meteorology, 2012, 145(3): 423-437.
- [2] Ketterer C, Gangwisch M, Fröhlich D, *et al.* Comparison of Selected Approaches for Urban Roughness Determination based on Voronoi Cells[J].International Journal of Biometeorology, 2016, (7): 1-10.
- [3] Hu Zhangbao, Yu Bingfeng. Review on Methods Calculating Aerodynamic Parameters over Urban Underlying Surface[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2008, 24(5): 55-60. [胡张宝, 俞炳丰. 城市下垫面空气动力学参数确定方法综述[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(5): 55-60.]
- [4] Sugawara H. Measurement of Roughness Parameters over Urban Heterogeneous Canopy [C]//9th International Conference on Urban Climate, Toulouse, France, 2015: 5-7.
- [5] Greeley R, Blumberg D G. Preliminary Analysis of Shuttle Radar Laboratory (SRL-1) Data to Study Aeolian Features and Processes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(4): 927-933.
- [6] Grimmond C S B, King T S, King M, *et al.* Aerodynamic Roughness of Urban Areas Derived from Wind Observations [J]. Boundary-layer Meteorology, 1998, 89(1): 1-24.
- [7] Remond A, Deroin J P. Empirical and Theoretical Backscattering Behavior as a Function of Roughness for Arid Land Surfaces[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1997, (4): 1612-1614.
- [8] Le Hegarat-Masclé S, Zribi M, Marticorena B, *et al.* Use of ERS/SAR Measurements for Soil Geometric and Aerodynamic Roughness Estimation in Semi-arid and Areas[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, (4): 2272-2274.
- [9] Saatchi S, Rodriguez E. Relating Vegetation Aerodynamic Roughness Length to Interferometric SAR Measurements[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999, (3): 1643-1645.
- [10] Langkamp T. Contributions Towards a Downscaling Scheme for Urban Climate Modeling Integrating Mobile Measurements and Improved Roughness Representation for Hamburg [D]. Germany: University of Hamburg, 2013.
- [11] Basly L, Cauneau F, Ranchin T, *et al.* ERS SAR Imagery for Urban Climate Studies [C]//Third ERS Symposium on Space at the Service of Our Environment, Florence, Italy, 1997: 233-236.
- [12] Bidaut S, Ranchin T, Wald L. Mapping the Aerodynamic Roughness Length Using SAR Images [C]//25th Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratorie, 2006: 145-150.
- [13] Zoran M. Remote Sensing Data for Urban Air Quality Assessment [C]//6th Conference on Optics, 2000: 729-735.
- [14] Jeyachandran I, Burian S J, Stetson S W. Estimating Urban Canopy Parameters Using Synthetic Aperture Radar Data [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2009, 49(4): 732-747.
- [15] Zoran M, Pavelescu G, Nkolae D. N, *et al.* Surface Biophysical Parameters Derived from Remote Sensing Data for Urban Changes Assessment [C]//2th Environmental Physics Conference, Alexandria, 2006: 185-195.
- [16] Xu Yangyang, Liu Shuhua, Hu Fei, *et al.* Influence of Beijing Urbanization on the Characteristics of Atmospheric Boundary Layer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(4): 859-864. [徐阳阳, 刘树华, 胡非, 等. 北京城市化发展对大气边界层特性的影响[J]. 大气科学, 2009, 33(4): 859-864.]
- [17] Peng Zhen. Statistical Analysis of Observation Data at Beijing 325 m Meteorological Tower [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2005. [彭珍. 北京 325 m 气象塔观测资料的统计分析 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.]
- [18] Li Qian, Liu Huizhi, Hu Fei, *et al.* The Determination of the Aerodynamic Parameters over Urban Land Surface [J]. Climatic and Environmental Research, 2003, 8(4): 443-450. [李倩, 刘辉志, 胡非, 等. 城市下垫面空气动力学参数的确定[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(4): 443-450.]
- [19] Li Qian, Liu Huizhi, Hu Fei, *et al.* Characteristic of the Urban Boundary Layer Under Strong Wind Condition in Beijing City [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2004, 21(1): 40-44. [李倩, 刘辉志, 胡非, 等. 大风天气下北京城市边界层阵风结构特征[J]. 中国科学院研究生院学报, 2004, 21(1): 40-44.]
- [20] Zhu Caiying, Zhang Renhua, Wang Jinfeng, *et al.* The Retrieval of Two-dimensional Distribution of the Earth's Surface Aerodynamic Roughness Using SAR Image and TM Thermal Infrared Image [J]. Science in China, 2004, 34(4): 385-393. [朱彩英, 张仁华, 王劲峰, 等. 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[J]. 中国科学, 2004, 34(4): 385-393.]
- [21] Bechtel B, Langkamp T, Ament F, *et al.* Towards an Urban Roughness Parameterisation Using Interferometric SAR data Taking the Metropolitan Region of Hamburg as an Example [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2011, 20(1): 29-37.
- [22] Gao Zhiqiu, Bian Lin'gen, Lu Changgui, *et al.* Estimation of Aerodynamic Parameters in Urban Areas [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002, 13(Sup.): 26-33. [高志球, 卞林根, 逯昌贵, 等. 城市下垫面空气动力学参数的估算[J]. 应用气象学报, 2002, 13(增刊): 26-33.]

Research on Aerodynamic Roughness in Urban Areas based on SAR Data

Sha Minmin^{1,2}, Zhang Fengli¹, Fu Xiyu¹, Wang Guojun¹, Shao Yun¹

(1. *Institute of Remote Sensing and Digital Earth Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Aerodynamic roughness is a very important parameter to represent the aerodynamic characters in urban areas. Radar remote sensing is considered to be an effective means for aerodynamic roughness retrieval. This paper analyzed the direction features and scale characteristics of backscattering coefficient in northern Beijing by using 22 ALOSPALSAR images from 2006 to 2011. And aerodynamic roughness was calculated by the gradient data of wind speed and direction. The relationship between aerodynamic roughness and backscattering coefficient was analyzed in different scales and orientations. The results showed that the correlation coefficient was reached maximum when the radius of windward sector domain was 2 500 m and included angle was 30°. It indicated that the SAR images can effectively characterize the aerodynamic characters. The results provided important basis for the inversion of aerodynamic roughness by using SAR images, which will provide more accurate parameters for regional climate model and atmospheric boundary layer model.

Key words: SAR; Urban areas; Aerodynamic roughness; Backscattering coefficient; Correlation

.....
(上接第 854 页)

spectra of organic compounds. Mathematical morphology filtering was used to remove spectral noise of wheat. Intuitive analysis was made according to the spectrum similarity and spectral denoising effects; Moreover, the quantitative evaluation in practical application was made by adopting different vegetation indices to invert the biophysical and biochemical parameters. The results show that, compared with the traditional Savitzky-Golay filter, the mathematical morphology filtering can keep the inherent characteristics in visible and near-infrared region, and improve the accuracy of inverting Leaf Area Index and Chlorophyll slightly, which is caused mainly by the low spectral noise in the range of the spectrum. The mathematical morphology filtering can remove the noise in shortwave infrared (SWIR) region effectively, improving the accuracy of inverting foliar water content of wheat. But the traditional Savitzky-Golay filter can only weaken the large scale noise in SWIR region. After generalized morphology filtering, the determination coefficient of regression (R^2) between the vegetation index and foliar water content can reach 0.5130, while R^2 is 0.3753 before filtering; R^2 between inverted value and the measurement of foliar water content can reach 0.4221 with a root mean square error (RMSE) of 0.0243, while the corresponding values are 0.3097 and 0.0318 for R^2 and RMSE before filtering. The results of the mathematical morphology filter are better than those of the traditional Savitzky-Golay filter.

Key words: Hyperspectral remote sensing; Spectral denoising; Mathematical morphology filtering; Physiological and biochemical parameters inversion