

农田表面粗糙度参数的测量与精度分析

郑兴明^{1,2}, 赵 凯^{1,2*}, 李晓洁¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 2. 中国科学院长春净月潭遥感实验站, 长春 130102)

摘要: 表面粗糙度是有效解释雷达后向散射系数和微波辐射亮度温度的关键参数之一。表面粗糙度参数的测量精度受到测量方法、测量仪器、数据预处理等的影响, 如何获取到表面粗糙度的“真”值是地表粗糙度测量急需解决的问题, 并且有助于提高利用微波遥感技术反演地表参数的能力。本文利用激光扫描仪的二维高度数据和蒙特卡罗方法模拟的一维表面高度数据, 分析了重复采样次数、采样间隔、采样剖面长度、空间自相关函数类型和大尺度结构(数据倾斜和农田垄行结构)对表面粗糙度精度的影响, 研究表明: 在大于20次重复采样、小于10mm的采样间隔、200倍相关长度的剖面长度的条件下, 农田表面粗糙度参数的测量精度约为80%; 分形相关函数与实测农田表面的空间自相关系数的吻合性要高于高斯函数和指数函数; 数据倾斜和农田垄行结构严重影响表面粗糙度参数的结果, 在进行表面粗糙度参数的计算之前, 需从剖面高度分布数据中去除以上两个因素的影响。

关键词: 表面粗糙度; 微波遥感; 相关长度; 农田

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00752

1 引言

表面粗糙度不仅可以表示表面的起伏状况, 而且也是影响雷达后向散射系数和地表微波发射率的重要因素。由于表面粗糙度会影响地理学家对雷达影像后向散射系数和被动微波亮温数据的解释, 因此, 表面粗糙度的定量描述与测量越来越受重视^[1]。对于微波遥感而言, 通常用表面均方根高度(root mean square Height, rms H)、表面相关长度(Correlation length, Cl), 以及二者的比值(rms H/Cl)来描述农田表面的粗糙程度, 并利用这些参数来解释与量化粗糙表面对入射电磁波能量的散射作用, 如电磁波表面散射理论模型(IEM和AIEM)和半经验模型(HP模型、QH模型和QP模型)都需要表面粗糙度参数(表面均方根高度和相关长度)作为输入参数^[2-6]。

在利用微波遥感进行地表参数(如土壤湿度)反演时, 各种表面散射和辐射模型都需要表面粗糙度参数。对地表粗糙度的测量方法, 可以概括为两大类: 接触式和非接触式。接触式方法指栅格板和针式剖面仪; 非接触式方法指激光扫描、摄影成

像和笔束天线微波辐射计采样^[7-10]。每种测量方法都有各自的精度及适用范围。对于表面粗糙度参量测量来说, 除了测量仪器固有误差和数据预处理过程的误差外, 表面粗糙度参数估算误差还与最小测量间隔 Δx (如栅格板的格网尺寸、针式剖面仪 x 向的最小分辨率、激光扫描仪的水平向分辨率)、测量的剖面长度 L , 以及测量的重复次数 n 有关^[1]。Oh和Kay研究结果表明, 表面均方根高度和相关长度的误差要小于10%, 需要测量的剖面长度为40~200倍相关长度, 最大测量间隔 Δx 应小于0.2倍相关长度, 同时也表明当测量重复次数增加时, 在不影响粗糙度参数测量精度的条件下可以适当缩短测量剖面长度^[11]。

在粗糙度参数和表面相关长度计算时, 通常假设粗糙表面为单一尺度的平稳随机过程, 即均值为0, 方差为常数的高斯分布表面。实际自然表面比较复杂, 可能不满足平稳随机过程的假设, 并具有多尺度效应^[1,7]。为描述这种表面的粗糙程度, 引入了分形函数。由于分形粗糙表面模型具有自仿射性, 表面轮廓满足关系式 $h(ax) = a^H h(x)$, 其中,

收稿日期: 2012-07-10; 修回日期: 2013-07-12.

基金项目: 国家“863”计划子专题(2012AA12A305-5-2); 中科院知识创新项目(KZCX2-YW-340)。

作者简介: 郑兴明(1984-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事被动微波遥感辐射传输理论及地表参数反演研究。

E-mail: zxm984913@163.com

*通讯作者: 赵 凯(1962-), 男, 研究员, 主要从事微波辐射计研制及微波遥感基础理论研究。E-mail: zhaokai@neigae.ac.cn

$x > 0, a > 0$, H 为一维分形布朗模型 (Fractional Brownian Model, FBM) 表面的 Hurst 指数, 取值范围为 $(0, 1)$, Hurst 指数 H 与 FBM 粗糙表面的分维数 D 之间满足关系式 $H = 2 - D$ 。分形粗糙表面及其空间相关函数能更好地表示自然表面的高度起伏情况^[12], 分维表面空间相关函数值位于高斯和指数函数之间, 按照该相关函数模拟的雷达后向散射系数与 SIRC 数据更为接近。

本文针对农田表面的粗糙度计算精度进行研究, 分析不同条件下的粗糙度采样精度, 以及满足粗糙度采样精度需要达到的采样要求。首先, 介绍了表面粗糙度的意义以及采样方法; 然后, 说明本文中用到的数据来源及测量方法, 以及数据预处理方法, 并讨论了不同取样方法对粗糙度计算结果的影响; 最后, 分析了数据倾斜、周期性结构和采样剖面长度对粗糙度的影响。

2 实验数据与方法

为说明地表粗糙度的有效测量方法与评价标准, 于 2012 年 4 月 19 日对翻耕后的农田进行了表面粗糙度的测量。测试区域位于吉林省长春市吉林农业大学科技试验田, 该区域土壤为砂质壤土, 土壤容重为 1.35 g/cm^3 。在测量区域选择了具有不同表面形态的 2 块土壤区域进行表面粗糙度测试, 测试完成之后对测试区域进行平整, 然后, 再次进行表面粗糙度测量。因此, 本次实验一共对 2 个区域, 进行了 4 次粗糙度测量, 为方便表示, 定义为测试 1 (Test 1)、测试 2 (Test 2)、测试 3 (Test 3)、测试 4 (Test 4)。测试 1 和测试 3 分别测量的是第 1 和第 2 个测试区域的原始表面; 测试 2 和测试 4 分别测量的是第 1 和第 2 个测试区域被平整后的表面。

本次实验利用推扫式激光扫描仪进行地表粗糙度的测量。推扫式激光扫描仪利用半导体激光器向待测地表发射出垂直方向的激光束并在被测曲面上结成激光线, 在机械系统的带动下, 激光线自左向右运动, 完成对被测区域的扫描, 通过位于激光器两侧的摄像机获取光线图像; 基于几何光学三角形原理的激光三角形法, 通过对光点的特征分析、坐标变换等步骤, 提取出被测表面的高程分布信息^[13]。表 1 列出了激光扫描仪测量的表面高程数据的具体指标。

为去除测量高程信息的趋势 (如倾斜和周期性垄行结构), 先对表面高度分布数据进行最佳直线

表 1 激光扫描仪的技术指标 (mm)

Tab.1 Technical specifications of the laser scanner (mm)

坐标轴	X	Y	Z
测量范围	500	600	400
分辨率	0.78	1	0.83

(对于激光扫描数据而言为平面) 拟合, 将表面高度分布数据减去拟合的直线 (或平面) 得到均值为 0 的高度起伏表面。进行该操作的目的在于强调粗糙表面的小尺度变化信息。一般来说, 小尺度定义为平均尺度小于剖面长度的 10%, 大尺度为剖面长度 L 的 10%~100%^[1]。粗糙表面的趋势 (或者说倾斜) 可能有 2 个方面的原因: (1) 测量过程的操作不当引起; (2) 表面自身具有趋势性。若是原因 (1), 去趋势操作将消除测量过程中的误差, 有利于提高粗糙度参数的计算; 若是原因 (2), 去趋势操作将会移除表面的大尺度粗糙度, 造成测量的表面粗糙度将明显小于原始高度剖面数据。在去除趋势过程中, 趋势线的斜率越大, 造成的误差也就越大。无论是上述何种原因引起的土壤剖面高度数据倾斜, 小尺度粗糙度受去趋势操作的影响都比较小。

3 农田表面粗糙度参数的测量

3.1 随机过程取样理论

表面粗糙度参数为一随机变量, 在某一区域内可假设为平稳随机过程。每一次粗糙度参数取样都只表示随机过程的一个状态, 因此, 需要利用多次采样信息来估计雷达或者微波辐射计天线足印内的表面粗糙度的“真”值, 采样的精确与否可以用粗糙度的估计值和其完全集的真值之差来度量, 这个差值依赖于采样数目、采样间隔、采样点空间分布和区域异质性。在自然界中, 表面粗糙度参数的真值不可能获取, 针对小区域而言, 在平稳随机过程的假设下, 可以通过多次重复采样来获取其“真”值。一般来说, 采样次数越多, 计算的粗糙度参数均值越来越接近“真”值, 并且采样的粗糙度参数方差将越来越小, 趋近于常数。因此, 本文用多次采样的粗糙度参数的方差来衡量采样的准确性, 即采样的粗糙度参数方差越小, 采样精度越高。

3.2 粗糙表面生成方法

根据粗糙表面的平稳随机过程假设与非平稳

随机过程的分形假设,粗糙表面的生成方法可分为两类:蒙特卡罗方法和分形方法^[14-15]。蒙特卡罗方法是生成平稳随机粗糙表面的常用方法,认为粗糙表面由大量的谐波叠加形成,谐波的振幅是独立的高斯随机变量,其方差正比于特定波数的功率谱 $S(k)$,那么,长度为 L 的一维粗糙表面可以表示为:

$$f(x_n) = \frac{1}{L} \sum_{j=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}} F(k_j) e^{ik_j x_n} \quad (1)$$

其中, $x_n = n \Delta x$; n 表示粗糙面上的第 n 个取样点,取值范围为 $[-N/2+1, N/2]$ 。 $F(k_j)$ 与 $f(x_n)$ 为傅里叶变换对,定义为:

$$F(k_j) = \frac{2\pi}{\sqrt{2\Delta k}} \sqrt{S(k_j)} \cdot \begin{cases} [N(0, 1) + iN(0, 1)], & j = [-N/2 + 1, -1] \\ N(0, 1), & j = [0, N/2] \end{cases} \quad (2)$$

公式(2)中参数的详细表达式见参考文献[15]。高斯粗糙表面和指数粗糙表面的不同,在于功率谱密度函数和空间自相关函数的形式不同(粗糙表面的生成算法相同)。

分形表面作为零均值的随机过程,其自相关函数为:

$$R(x_1, x_2) = \frac{s^2}{2} (|x_1|^{2H} + |x_2|^{2H} - |x_1 - x_2|^{2H}) \quad (3)$$

由公式(3)看出,分形表面的空间自相关函数不仅与 x_1 和 x_2 两点之间的距离差有关,还与 x_1 和

x_2 两点的坐标有关系。这说明分形表面不是平稳随机过程,但分形粗糙表面的增量为平稳的高斯随机过程,即有关系 $z(x) - z(x') \sim N(0, s^2 |x - x'|^{2H})$ 。因此,可采用增量 Fourier 合成方法生成分形布朗表面^[16]。

3.3 参数实验结果

(1) 粗糙度参数

对利用三维激光扫描仪测量的高度分布数据的每个剖面数据分别进行表面粗糙度参数的计算,计算结果如图1所示。图1(a)、(b)和(c)分别表示表面均方根高度、表面相关长度和二者比值的计算结果,其统计结果如表2所示。由图1可知,Test 2 和 Test 4 的 rms H 和 rms H/Cl 都明显小于 Test1 和 Test3,这说明平整之后的表面粗糙度变小。同时也可发现即使针对同一表面利用单一高度剖面数据计算的表面粗糙度参数(rms H, Cl 和二者比值)相差也很大。Test1, Test2, Test3 和 Test4 的高度剖面数目分别是 128、150、135、98 次。经过多个剖面的测量和表面粗糙度计算,发现均方根高度最大值约为最小值的 2 倍,相关长度的最大值约为最小值的 3 倍左右, rms H/Cl 的最大值约为最小值的 3 倍左右。这种变化对微波辐射亮温和雷达后向散射系数的影响很大,因此,合理地测量能够代表一个区域的表面粗糙度“真”值,是改善地表微波辐射/散射模型,以及改进利用微波遥感数据反映地表参数的关键问题。

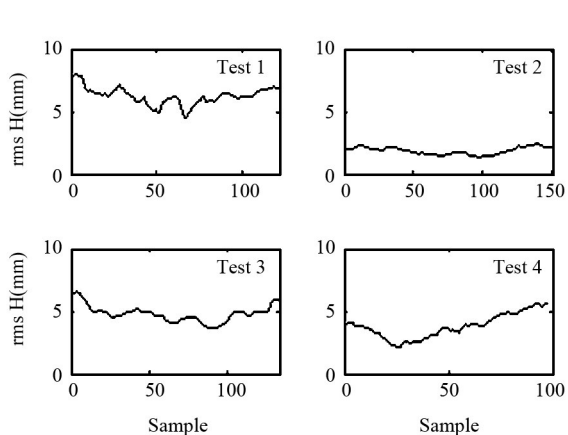
表2 表面粗糙度参数测量结果
Tab.2 parameter of surface roughness

	均方根高度(mm)			相关长度(mm)			均方根高度与相关长度的比值		
	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
Test 1	6.2	8.0	4.5	23.4	34.6	10.3	0.299	0.637	0.148
Test 2	1.9	2.4	1.3	18.7	30.5	10.9	0.106	0.185	0.054
Test 3	4.8	6.6	3.6	18.4	29.8	8.9	0.287	0.568	0.177
Test 4	3.8	5.7	2.1	34.2	60.8	12.9	0.13	0.266	0.082

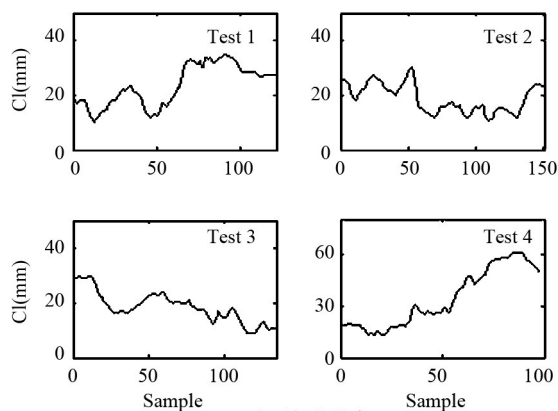
(2) 取样次数

表面粗糙度参数满足随机过程,可以用多个剖面粗糙度参数的平均值来表示表面粗糙度参数“真”值。一般来说,取样次数越多,结果就越趋近于真值,同时工作量也呈指数级增加。如何权衡粗糙度计算的精度与取样次数之间的关系,将是本节需要说明的问题。即针对某一粗糙表面获取满足取样精度条件下的最小取样次数。图2为4个粗糙

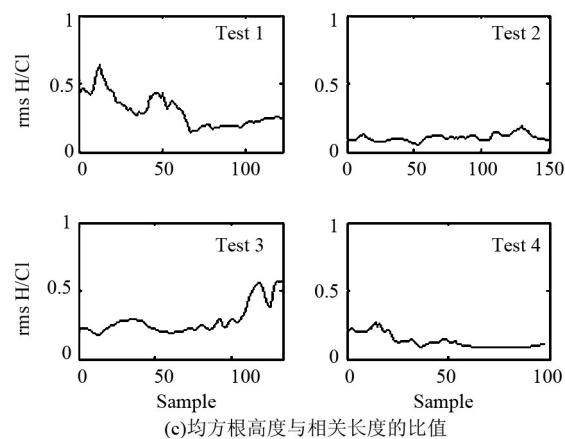
度测试区域的不同取样次数下计算的表面粗糙度统计结果,根据上述参数计算结果,从表面均方根高度和表面相关长度中随机选取 n 个数, $n \leq N$, N 为每个测试区域的粗糙度剖面取样数目, n 表示重复取样次数,取值范围为 $[1, 50]$, 重复该过程 100 次可以统计出不同取样次数(如重复 10 次取样)的粗糙度参数的均值与方差。从表面相关长度和表面均方根高度的统计结果可以看出,随着取样次数的



(a)表面均方根高度



(b)表面相关长度

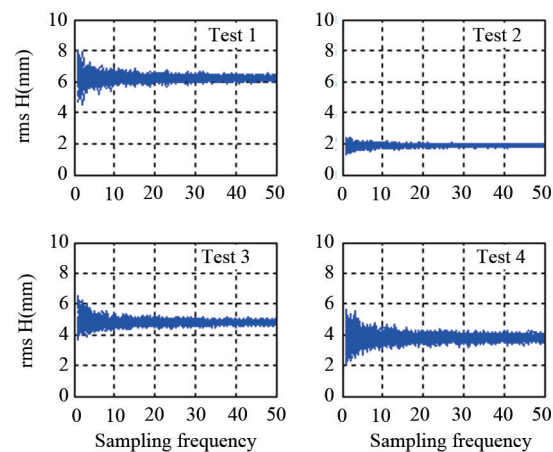


(c)均方根高度与相关长度的比值

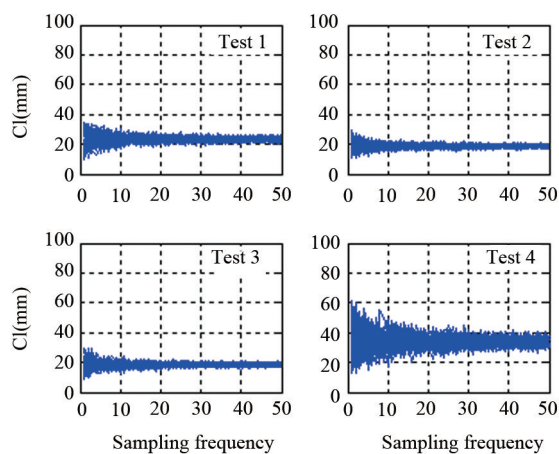
图1 每个剖面的表面粗糙度参数

Fig.1 Surface roughness for each profile

增加,粗糙度参数的均值基本不变,方差出现减小趋势,这说明增加取样次数可以降低表面粗糙度参数的取样误差。图3为不同取样次数下的地表粗糙度参数的误差,从图中看出表面均方根高度对取样次数的要求较低,只要取样次数大于10次都可使其误差低于20%,表面相关长度对取样次数的要求较高,一般要求取样次数大于20次才能是表面相关长度的误差低于20%,其中,Test 4的取样次数更是高



(a) Rms H



(b) Cl

图2 不同采样次数下的表面粗糙度

Fig.2 Surface roughness parameter under different repeats

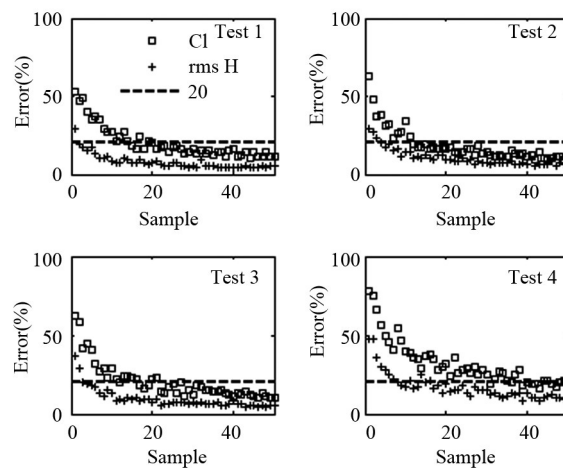


图3 不同采样次数下的粗糙度参数误差

Fig.3 Surface roughness parameter errors under different repeats

于40次,这是因为Test 4的相关长度基本呈单调增加,不满足随机过程。

(3) 采样间隔

表面高度的空间采样间隔是影响表面粗糙度的一个重要方面, 本文将每个样点测量的二维高度分布数据重新合成一维剖面高度数据, 每个剖面数据的最小采样间隔为 1mm, 新生成的剖面采样长度超过 50m。按取样间隔从 1mm 变化到 40mm (1mm 变化间隔) 对表面进行重新取样, 生成新的不同取样间隔的表面高度剖面, 计算不同取样间隔下的表面粗糙度参数。从图 4 中可见, 随着取样间距的增加, 表面均方根高度 (rms H)、表面相关长度 (Cl) 和

二者的比值波动幅度越来越大, 取样间距小于 10mm 时, 以上 3 个粗糙度参数的变化幅度都不大; 取样间距大于 10mm 时, 以上 3 个粗糙度参数随着取样间隔的增加越来越分散。

(4) 相关函数的形式

用于描述地表粗糙度的空间自相关函数比较常用的有高斯函数和指数函数, 最近也有学者指出地表高度起伏满足分形理论, 也有利用基于分维数的自相关函数来表示地表起伏的自相关特征。本文就这 3 种相关函数与实测的空间自相关系数进行

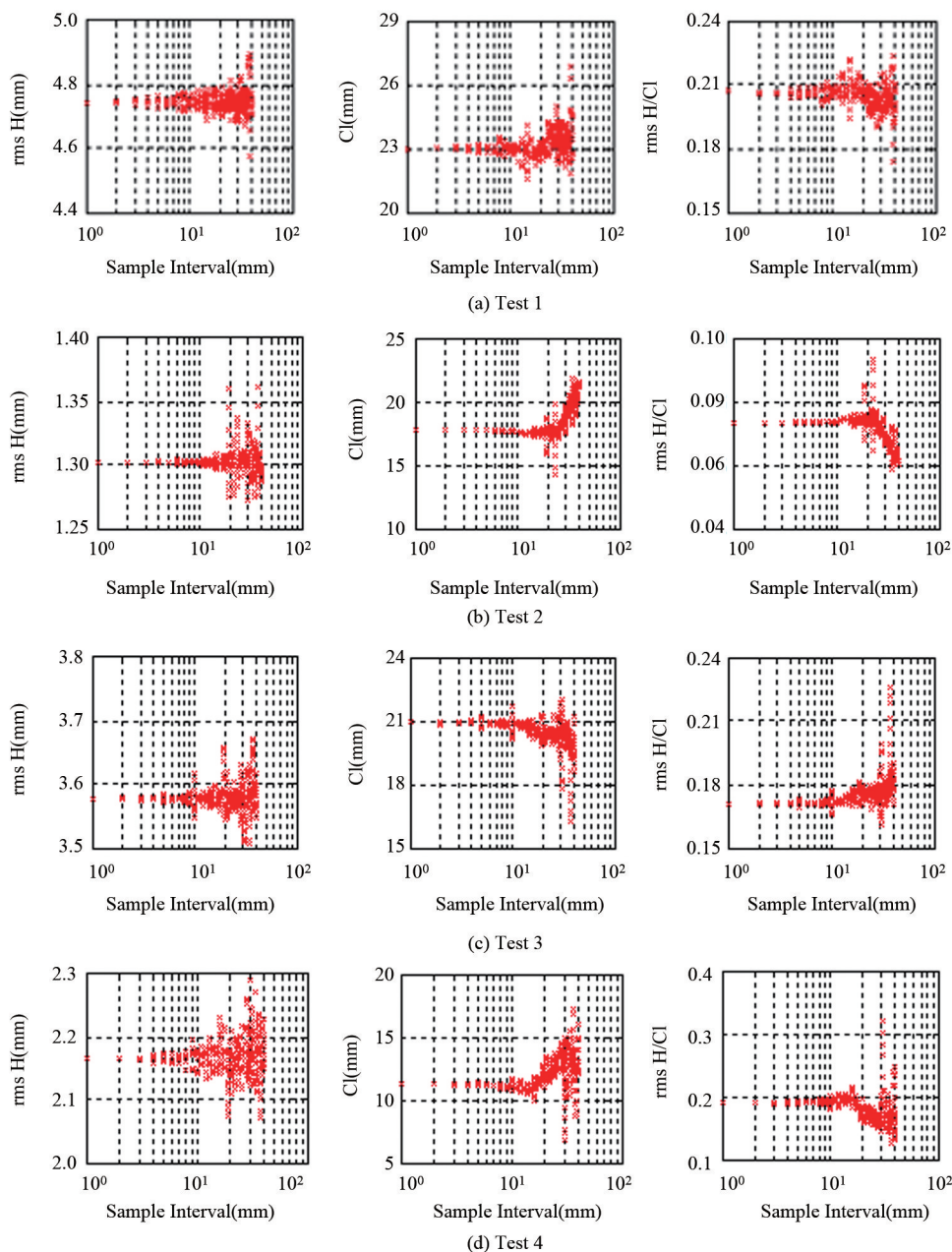


图 4 不同取样间隔下的表面粗糙度参数

Fig.4 Surface roughness parameters under different sampling interval

比较,发现基于分形的相关函数拟合值与实测自相关系数更为接近(图5)。通过比较拟合参数(表3),发现基于分形的相关函数与高斯型相关函数的拟合系数 R^2 要优于指数相关函数,RSME要低于指数相关函数,基于分形的相关函数拟合结果与高斯型相关函数接近,但比较图5中两种函数的拟合效果,分形相关函数与实测值更为接近。

4 参数测量精度分析与讨论

最常用的粗糙度数据源为剖面高度数据,是由沿着一条直线上的等间隔的高度数据组成的系列。当然,为获取更多用于计算表面粗糙度参数的数据高程点,也应用等间距的网格高度数据。这2

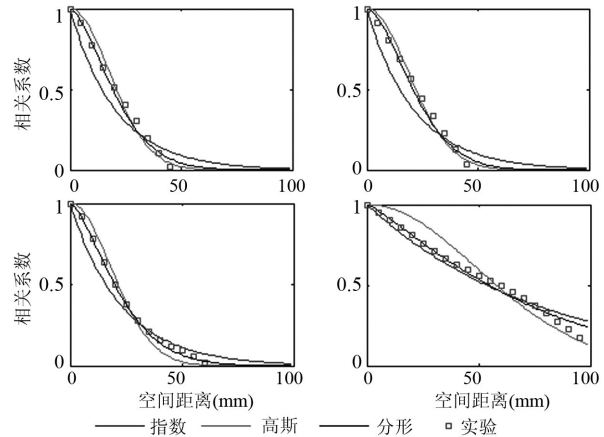


图5 不同相关函数类型条件下的实验相关系数拟合结果

Fig.5 Experimental correlation coefficients fitting results under different correlation function

表3 不同自相关函数条件下的拟合结果(D表示分维数)

Tab.3 The fitting results under different autocorrelation function (D denotes the fractal dimension)

参数	分形函数				指数函数			高斯函数		
	D	CI	R^2	RMSE	CI	R^2	RMSE	CI	R^2	RMSE
Test1	1.6	24.3	0.91	0.11	20.6	0.84	0.15	25.1	0.91	0.11
Test2	1.7	25.9	0.88	0.14	21.4	0.80	0.18	26.6	0.88	0.14
Test3	1.5	25.6	0.93	0.09	22.9	0.89	0.12	25.9	0.92	0.10
Test4	1.2	73.5	0.98	0.03	76.9	0.96	0.05	69.6	0.91	0.07

种数据均可通过相同的方法计算表面粗糙度,但网格数据可计算不同方位的表面粗糙度参数,说明表面粗糙度的各向异性。

4.1 数据倾斜

地表倾斜或者数据处理过程中引起的高度数据倾斜会给表面均方根高度和相关长度的计算引入偏差。因此,在进行表面粗糙度参数之前需要进行数据的去倾斜过程。去除数据的趋势,就是将测量数据减去最佳拟合直线(或者平面)得到均值为0的剖面高度数据。之所以这样做是强调高度剖面数据的小尺度变化信息,这里的小尺度信息是指小于剖面长度10%的信息。一般来说,可以假设地形表面是“水平”的,但各种来源的表面高度数据可能存在许多倾斜,因此,可通过去趋势的方法来去除高度数据的倾斜成分。去除表面的总体趋势意味着表面的大尺度粗糙度将小于原始表面,表面数据的斜率越大,原始表面与去趋势后表面的粗糙度参数相差越大。尽管如此,去趋势操作对小尺度粗糙度的影响非常小。通过人为地对均值为0的表面高程分布数据分别增加一个倾斜为5°和倾斜为10°的

斜面,通过比较去趋势表面数据和原始数据的RMS Deviation证实了去趋势操作对小尺度粗糙度影响比较微小这一观点(图6)。图6(a)和(b)分别表示倾斜的角度为5°和10°的情形,图6(a)去除趋势和原始数据的RMS Deviation在小尺度时非常接近,只有在尺度很大的情况下才出现差异;从图6(b)可见,即使在尺度较小时,原始数据与去趋势数据之间的RMS Deviation就出现不一致性。去趋势和原始剖面数据的RMS Deviation的计算结果哪一个更为“准确”?去除趋势就是去掉在真实表面采样过程中产生的人为偏差。即使一个具有负向趋势的粗糙表面也一定具有不同尺度的正向趋势,如果不利用去趋势操作去除数据的负向趋势或者说补充数据的正向趋势,那么,粗糙度的测量结果将会出现很大的偏差。某一个区域的地形数据的某一剖面可能具有正向或者负向的趋势,但不能说明该区域的所有剖面都具有相同的趋势,因此,去趋势操作是去除粗糙度计算误差的近似、可行的方法。

4.2 垄行结构

农田表面粗糙度的计算除受数据倾斜的影响

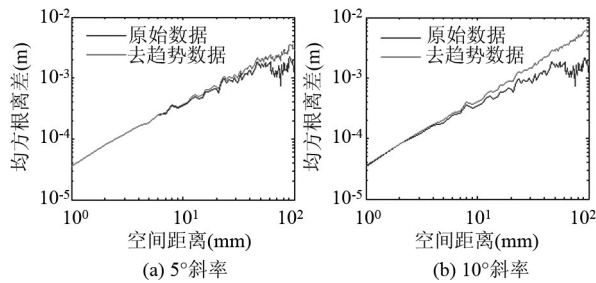


图6 去掉数据趋势之后的RMS Deviation。(a) 5°斜率; (b) 10°斜率

Fig.6 RMS Deviation after removing the data trends. (a) The top figure is for 5° slope; (b) the following figure is for 10° slope

外,还与周期性垄行结构有关。为说明周期性垄行结构对表面粗糙度计算的影响,利用蒙特卡罗方法生成exponential自相关函数的粗糙表面,并叠加上周期为65cm,垄高为10cm的周期性结构,形成具有周期性结构的粗糙表面。计算原始表面数据与周期表面数据的RMS Deviation,对比发现,周期性结构与倾斜表面的作用相似,都将引起RMS Deviation与原始数据出现差异,这种差异随着空间尺度的增加变得越来越大。此外,通过计算和比较这两种表面的空间自相关系数,发现原始表面的空间自相关系数与周期表面的空间自相关系数差别很大,从而造成二者的空间自相关长度值也差别很大。原始表面的空间自相关长度为51mm(与模拟输入值的50mm非常接近),而叠加上周期性表面之后的空间自相关长度131mm,与正弦周期性表面(65cm周期,10cm高度)的相关长度125mm非常接近,而且空间自相关函数的类型也由exponential函数变为gaussian函数,这些都说明在计算粗糙度参数时,起主要作用的是大尺度的周期性结构,而非小尺度的粗糙表面(图7)。周期性结构表面对电磁波散射与辐射的影响机理不同于粗糙表面^[17],不去除表面周期结构或倾斜而计算的表面粗糙度将会给模型模拟的被动微波亮度温度或者雷达后向散射系数引入误差。同时,农田表面周期性垄行结构具有方向性,如果不去除表面的周期性特征,表面粗糙度参数的各向异性将非常严重。在平行垄向和垂直垄向的2个垂直方向上呈现出截然不同的粗糙度计算结果。因为在垂直垄向方向上,表面粗糙度受大尺度垄结构特性影响,而在平行垄向方向上,表面粗糙度主要受表面的小尺度起伏影响。因此,去除垄行结构的影响,有利于提高表面粗糙度的计算精度。

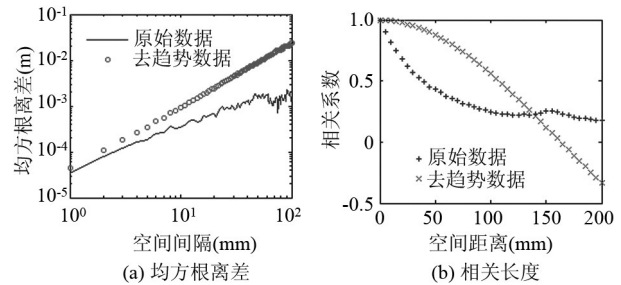


图7 周期表面与平坦表面的相关长度(CI)和均方根离差(RMS Deviation)

Fig.7 Surface correlation length and RMS deviation for periodic and flat surface

4.3 剖面长度

在进行表面高度的地面采样过程中,采样的剖面长度到底为多长才能计算出精确的表面粗糙度参数。为说明这一问题,本文模拟了相关长度的为100mm、均方根高度为5mm的不同剖面长度高度分布数据,分别计算不同剖面长度的空间自相关长度,结果如图8所示,其随着剖面长度的增加,计算的空间自相关长度与用于模拟的空间自相关长度越来越接近。当剖面长度为200倍空间自相关长度或者更大时,自相关长度的计算精度约为80%。在实际测量过程中,实现200倍相关长度的剖面高度测量相当困难,因此,考虑能否通过提高采样次数来弥补采样剖面长度不足引起的误差。为说明这一问题,本文模拟了4种不同长度的剖面,分别为10m、4m、2m和1m。图9为利用剖面数据计算的相关长度的平均值,随着剖面数量的增加,相关长度的平均值越来越趋近于“真实”值。这说明增加测量的次数可以增加表面相关长度的计算精度。比较图9结果发现10m长度的剖面数据需要更少的重复量就可以达到较好的相关长度计算结果,而1m

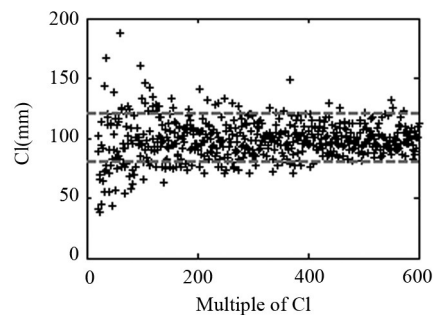


图8 不同剖面长度下的相关长度结果

Fig.8 Correlation length results in the different profile lengths (Exponential)

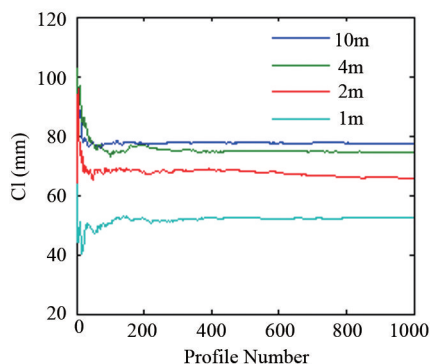


图9 不同长度剖面的相关长度与重复次数

Fig.9 Different profile length and the number of repetitions

长度的剖面数据则需要更多的重复量,这说明在相同的测量精度要求下,测量的剖面越长,需要测量的次数就越少。也可以说成为通过增加粗糙表面的采样次数,可以弥补测量长度不足引起的相关长度计算误差。

5 结论

本文通过激光扫描仪对农田表面进行扫描获取了表面高程分布数据,结果发现,单一剖面的农田表面粗糙度参数(如表面均方根高度、表面相关长度及均方根高度和相关长度的比值)的最大值约为最小值的2倍,这一变动范围对雷达后向散射系数和地表微波辐射亮度温度的影响很大,因此,我们需要对地表进行多次重复采样以获取地表粗糙度参数的真实值。对于粗糙地表而言,表面粗糙度参数的计算精度不仅与取样次数有关,还与取样间隔,剖面长度,以及数据的预处理有关。本文通过对农田表面粗糙度参数的计算与分析,取得如下结论:

(1)通过比较不同取样次数的均方根高度和相关长度的误差,发现对于农田粗糙表面而言,只要取样次数大于20次,二者的误差都将小于20%,但对于非自然状态表面,这一采样次数可能需要增加到40次(如Test4),原因是人为影响的表面粗糙度参数在空间上可能不满足随机过程。

(2)分析4种不同粗糙度表面的取样间隔对表面粗糙度计算精度的影响,发现对于农田表面而言只要取样间隔小于或等于10mm,就能取得一致性的表面粗糙度参数计算结果。一旦取样间距超过1cm,表面粗糙度参数就会出现呈现较强的上下波动,误差可能超过20%,随着取样间距的增大,误差

也越来越大,因此,本文建议农田表面粗糙度的取样间隔不能大于10mm。这也说明利用10mm为取样间隔的粗糙度剖面仪测量数据具有可信度。

(3)分别用高斯函数、指数函数和分形函数对表面的空间自相关系数进行拟合,分形函数在4个测试样点中的表现最好,即与实测数据的拟合关系最好,这说明农田表面高度分布具有分形特性。

(4)本文重点讨论了表面高度数据的预处理过程对粗糙度参数计算精度的影响,发现周期性结果和数据倾斜表示农田表面大尺度结构,去除大尺度结构与否对表面粗糙度的计算结果影响非常大。因此,在计算表面粗糙度参数之前需要去除这些大尺度信息,保留小尺度粗糙度信息,此时的粗糙度参数计算结果更能体现小尺度粗糙度对电磁波散射与辐射的影响。

(5)本文最后利用蒙特卡罗方法模拟了不同剖面长度的一维粗糙表面,分析了剖面长度对粗糙度参数的影响,发现取样剖面越长,计算的粗糙度参数越趋近于“真”值,需要200倍表面相关长度甚至更长的剖面长度才能达到80%的粗糙度取样精度,但在实际粗糙度取样过程中很难获取如此长的剖面,本文发现通过增加采样次数可以弥补由于取样长度不足引起的误差,且剖面长度越短需要的采样次数越多。值得注意的是,取样长度不能太短,不能低于空间相关长度。

参考文献:

- [1] Shepard M K, Campbell B A, Bulmer M H, *et al.* The roughness of natural terrain: A planetary and remote sensing perspective[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(12):32777-32795.
- [2] Fung A K, Li Z, Chen K S. Back scattering from a randomly rough dielectric surface[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992,30(2):356-369.
- [3] Chen K S, Wu T D, Tsang L, *et al.* Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three dimensional moment method simulation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003,41(1):90-101.
- [4] Wang J R and Choudhury B J. Remote sensing of soil moisture content over bare field at 1.4 GHz frequency[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86: 5277-5282.
- [5] Wigneron J P, Laguerre L, Keer Y H. A simple parameterization of the L-band microwave emission from rough agricultural soil[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Re-*

- mote Sensing, 2001,39(8):1697-1707.
- [6] Shi J C, Jiang L M, Zhang L X, *et al.* A parameterized multifrequency-polarization surface emission model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005,43(12): 2831-2841.
- [7] Verhoest N EC, Lievens H, Wagner W, *et al.* On the soil roughness parameterization problem in soil moisture retrieval of bare surfaces from synthetic aperture radar[J]. Sensors, 2008(8):4213-4248.
- [8] Davidson M W J, Le Toan T, Mattia F, *et al.* On the characterization of agricultural soil roughness for radar remote sensing studies[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000(38):630-640.
- [9] Zribi M, Ciarletti V, Taconet O, *et al.* Characterisation of the soil structure and microwave backscattering based on numerical three-dimensional surface representation: analysis with a Brownian model[J]. Remote Sensing of Environment, 2000(72):159-169.
- [10] Zheng X M, Zhao K. A method for surface roughness parameter estimation in passive microwave remote sensing [J]. Chinese Geographical Science, 2010,20(4):345-352.
- [11] Oh Y, Kay Y C. Condition for precise measurement of soil surface roughness[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998,36(2):691-695.
- [12] Zribi M, Ciarletti V, Taconet O. Validation of a rough surface model based on fractional Brownian geometry with SIRC and ERASME radar data over Orgeval[J]. Remote Sens Environ, 2000(73):65-72.
- [13] Li X J, Zhao K, Zheng X M. Development of surface roughness tester based on laser triangulation method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012,28(8):116-121.
- [14] Tsang L, Kong J A, Ding K H. Scattering of electromagnetic waves: numerical simulations[C]. New York: John Wiley & Sons Inc., 2001.
- [15] 郭立新,王蕊,吴振声.随机粗糙面散射的基本理论与方法[M].北京:科学出版社,2010.
- [16] Lance M K. Texture roughness analysis and synthesis via extended self-similar(ESS) model[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995,17(11):1043-1056.
- [17] Kong J A, Lin S L, Chuang S L. Microwave thermal emission from periodic surfaces[J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1984,GE-22(4):377-382.

Accuracy Analysis of Agriculture Soil Surface Roughness Parameter

ZHENG Xingming^{1,2}, ZHAO Kai^{1,2*} and LI Xiaojie¹

(1. Northeast Institute of Geographical and Agroecology, CAS, Changchun 130102, China;

2. Changchun Jingyuetan Remote Sensing Test Site, CAS, Changchun 130102, China)

Abstract: Agricultural soil surface roughness parameters including surface root mean square height (rms h) and surface correlation length (cl) are key for effectively explaining radar backscattering coefficient and passive microwave brightness temperature, and its measurement accuracy is affected by measured method, measured instruments and data preprocessing. For surface roughness field measurement, the urgent problem is how to evaluate its measurement accuracy. This paper uses two-dimension surface height data from laser scanner and one-dimensional surface height data from Monte Carlo simulation, and analyzes the factors which influence the accuracy of surface roughness including sampling times, sampling interval, profile length, correlation function and large-scale structure (data skew and row structure). Four regions with different surface rough condition are used in this paper for analyzing surface roughness measurement method and accuracy. The result shows that, the measurement accuracy of agriculture soil surface roughness is about 80% under the condition of more than 20 samples, less than 10mm sampling interval and more than 200 cl profile length; the agreement between fractal correlation function and experimental spatial correlation coefficient is higher than Gaussian and exponential correlation function; and the skew and row structure of surface height data seriously affect the result of surface roughness parameter which needs to be removed before surface roughness calculation.

Key words: surface roughness; microwave remote sensing; correlation length; agriculture soil

*Corresponding author: ZHAO Kai, E-mail:zhaokai@neigae.ac.cn