

基于分形理论与 GEOEYE-1 影像的 NDVI 连续空间尺度转换模型构建及应用

栾海军^{1,2}, 田庆久^{1,2*}, 顾行发³, 余涛³, 胡新礼³

(1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210023;

2. 南京大学 江苏省地理信息技术重点实验室, 江苏 南京 210023;

3. 中国科学院遥感与数字地球应用研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 基于 GEOEYE-1 多光谱影像、以归一化差分植被指数(NDVI)为研究对象继续就分形方法在高空间分辨率基础图影像中的适用性进行研究, 并就分形模型构建最合理尺度层级的确定进行细致探讨. 实验表明, 基于分形理论的 NDVI 连续空间尺度转换模型构建方法适用于高空间分辨率遥感影像; 在给定的条件下, NDVI 尺度转换分形模型构建时最合理尺度层级存在且可计算. 研究使得分形方法所适用的反演量类型及基础图空间分辨率范围皆有大的扩展.

关键词: 定量遥感; 尺度转换; 分形; 归一化差分植被指数(NDVI); GEOEYE-1; 真实性检验

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

Establishing continuous scaling of NDVI based on fractal theory and GEOEYE-1 image

LUAN Hai-Jun^{1,2}, TIAN Qing-Jiu^{1,2*}, GU Xing-Fa³, YU Tao³, HU Xin-Li³

(1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing
and Digital Earth of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The continuous spatial scaling model (CSSM) of NDVI based on fractal theory was proposed and implemented. Based on GEOEYE-1 image and taking NDVI as experimental object, the paper studied the availability of fractal methodology for high-resolution image, and discussed the selection of the best reasonable scale-level for establishing NDVI's CSSM. It was concluded that the fractal methodology is suitable for high-resolution RS image. In some definite conditions, the best reasonable scale-level for establishing NDVI's CSSM exists and can be computed. For the fractal methodology, the results in the paper extended its available range of retrievals and image's resolutions.

Key words: quantitative remote sensing, scale transformation, fractal, NDVI, GEOEYE-1, validation

PACS: 95. 75 Fg

引言

尺度效应是定量遥感领域一个重要而基础的科

学问题. 该问题的解决对于定量遥感理论体系发展及应用具有重要意义. 尺度效应的解决方法为尺度转换. 学者们从统计方法^[1-2]及物理模型^[3-9]两方

收稿日期:2013-02-22, 修回日期:2013-09-14

Received date: 2013-02-22, revised date: 2013-09-14

基金项目: 国家科技重大专项项目(30-Y20A01-9003-12/13); 高等学校博士学科点专项科研基金(20100091110012); 国家自然科学基金(41105017, 40971186); 国家重点基础研究发展计划项目“973”(2010CB950800); 中国科学院战略性先导科技专项项目(Y1Y02200XD)

Foundation items: Supported by National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China(30-Y20A01-9003-12/13), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20100091110012), National Natural Science Foundation of China(41105017, 40971186), National Basic Research Program(2010CB950800), and “Strategic Priority Research Program” of the Chinese Academy of Sciences(Y1Y02200XD)

作者简介(Biography): 栾海军(1984-), 男, 河南鹿邑人, 博士生. E-mail: luanhaijun1984@yahoo.com.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: tianqj@nju.edu.cn

面,对反演量的尺度效应及其在生态学、水文学等领域的应用^[10-13]进行深入研究探索。

已有的尺度转换研究取得了重要成果,但总体上仍面临涉及的空间分辨率离散、有限及传感器间成像参数多元归一化的干扰等问题。Li X W 等^[3]及徐希孺^[14]提倡利用分形理论的数学方法解决定量遥感中尺度转换等重要问题,Zhang R H 等^[15]实践了这一方法,其基于分形方法讨论了叶面积指数(LAI)的连续尺度转换模型的构建。Zhang 研究中存在部分问题:(1)实验对象选择不甚适当;(2)未对所构建模型在真实性检验中的适用性进行分析。针对这些问题,栾海军等^[16]利用 ETM + 影像、以归一化植被指数(NDVI,且利用其地表辐亮度计算模型)为研究对象,通过实验证明了:(1)基于分形理论可构建 NDVI 的连续空间尺度转换模型;(2)所构建分形模型可应用于真实性检验中。

然而,栾海军等的研究^[16]仍存在部分重要问题有待解决:(1)ETM + 影像属于中空间分辨率数据,以此作为底图进行真实性检验,对于底图自身的高精度实测验证仍有一定的困难;(2)所利用的 ETM + 影像存在坏条带,导致约 25% 的影像信息量的丢失,条带补偿算法虽然可以部分降低影像信息量的损失,但无法完全克服影像失真,这造成实验结果存在一定的误差。GEOEYE-1 传感器是目前高空间分辨率传感器的重要代表之一,它拥有目前商用遥感卫星中最高空间分辨率(全色影像为 0.5m,多光谱影像为 2m)。由于该传感器可获取精确的几何定位信息和辐射信息,已在地表重点目标识别、变化监测等众多领域得到广泛应用。故本文将 GEOEYE-1 多光谱影像为例,以 NDVI 为研究对象,继续就基于分形理论利用高空间分辨率遥感影像构建反演量连续空间尺度转换模型进行研究,并就尺度转换分形模型构建的最佳或最合理尺度层级确定进行深入探讨。

1 实验区及实验数据描述

研究区位于广西壮族自治区的北海市合浦县东部的沙田半岛,包括山口镇和沙田镇,沙田半岛内有以种植桉树林为主的山口林场;地理范围为东经 109°42'3" ~ 109°45'36",北纬 21°29'0" ~ 21°33'25",东西长约 6 km,南北长约 8 km;地物类型主要包括桉树、陆生天然林、红树林、木薯、水稻、宜林地、人工设施以及水体等;水体主要包括海水、水库、湖泊、池塘及养殖水体等。其中,人工设施主要包括城镇、居民区及公路等;农田包括木薯和水稻;宜林地主要为

桉树的采伐基地。

研究数据为该研究区 2009 年 10 月 16 日 GEOEYE-1 传感器的多光谱遥感影像,大小为 3036 像元 × 3036 像元,空间分辨率为 2 m。对原始影像进行辐射定标;并根据影像成像时的大气、成像几何及地表状况,利用 ENVI FLAASH 模块对其进行大气校正;并根据地表辐亮度与地表反射率关系模型^[17]计算得到实验区地表辐亮度数据。考虑到 GEOEYE-1 影像自身的定位精度较高,实验区内地形起伏相对较小;同时影像并不用于地类识别、专题信息提取等方面,而是侧重于本文方法适用性的研究上,故在未获取充分地面控制点及高空间分辨率 DEM 的条件下,未对实验影像进行几何校正与正射校正。预处理后的实验影像如图 1 所示。



图 1 实验区 GEOEYE-1 假彩色合成影像(R:4,G:3,B:2)

Fig. 1 The GEOEYE-1 false color composite image (R: 4, G: 3, B: 2) of experimental area

2 实验方法

继续利用文献[16]中的实验方法,简述如下。

分形模型构建的具体流程如图 2 所示:由最小尺度(这里是 GEOEYE-1 的尺度)的地表辐亮度(如 r_{11} 、 r_{12} 、 r_{21} 、 r_{22})通过面积加和的方法得到大尺度下的地表辐亮度 rad,进而计算相应尺度下的 NDVI 值,最终可以得到各大尺度下的 NDVI 数组;以 GEOEYE-1 影像尺度 $scale_2$ 为基数,上推尺度为 $scale_up$,将它对尺度基数的比值 $scale_up / scale_2$ 定义为分形计算所需的尺度因子 $scale$;对尺度的倒数($1/scale$)与 NDVI 数组分别取以 2 为底的对数,并对处理结果进行直线拟合,此过程为分形计算,计算结果为分维数与评价参数。

设拟合直线方程为:

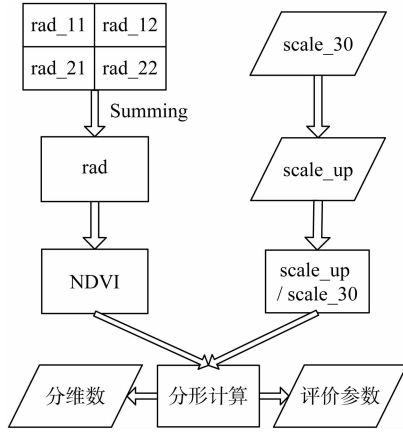


图2 NDVI 连续尺度转换模型的构建流程图
Fig. 2 The flowchart of establishing NDVI's CSSM based on fractal method

$$\log_2 \text{NDVI} = d \log_2 \frac{1}{\text{scale}} + b, \quad (1)$$

则所求的分维数 D 与拟合直线的斜率 d 有如下的关系:

$$D = 2 - d \quad (2)$$

利用上面的公式对实验影像进行计算.

3 实验与结果分析

3.1 NDVI 连续空间尺度转换模型构建

以 2 m 分辨率 GEOEYE-1 多光谱影像为尺度的第一层级 (level = 1), 令空间分辨率以等差数列的形式递增 (公差为 2 m, 即基础影像 GEOEYE-1 影像的尺度), 则可依次得到 2 × 2 m、2 × 3 m、……、2 × 11 m、2 × 12 m、……、2 × 19 m、2 × 20 m 的空间分辨率, 这些分辨率分别对应于尺度的第 2 层级 (level = 2)、第 3 层级 (level = 3)、……、第 11 层级 (level = 11)、第 12 层级 (level = 12)、……、第 19 层级 (level = 19)、第 20 层级 (level = 20). 此时总的尺度层级 Level = 20. 依照此方法, 可以得到 Level = 3、Level = 4、……、Level = 2001、Level = 2002、……、Level = 3035、Level = 3036 各个尺度层级.

在获得各尺度层级 Level 的条件下, 依照流程图 2 及相应的分形计算公式对影像进行计算, 可以构建 NDVI 连续空间尺度转换模型, 以及分形模型的评价参数 r 、 p 、 r_{lo} 、 r_{up} (注: r 表示拟合直线与真实曲线的相关系数, r_0 表示当样本数量为 n 时所得拟合直线可以接受的最小相关系数值. $r > r_0$ 表明线性拟合程度良好, $\log_2 \frac{1}{\text{scale}} - \log_2 \text{NDVI}$ 数组适宜线性拟合, NDVI 随尺度变化具备分形特征; r 不等于 1 表

明此分形结构非理想的完全自相似分形. 当 p 较小 (小于 0.05) 时说明计算的 r 值是有意义的. r_{lo} 、 r_{up} 为相关系数 95% 置信区间的下界与上界值, 表明 r 的真实值不足 r_{lo} 的概率小于 5%). 对尺度层级-评价参数进行绘图, 可得图 3.

对评价参数结果进行分析. 在 p 、 r_{lo} 、 r_{up} 满足要求的条件下, 首先以 r 值作为判断指标, 将最大 r 值所对应的尺度层级确定为最佳尺度层级. 图 3 计算结果中, 当 Level ≥ 3 时, 各尺度层级下 $p > 0.0031$, 符合要求; 此时, r_{lo} 、 r_{up} 亦满足要求, 则依照上述标准: 在 $r = 1$ (此时, 尺度层级-评价参数可进行一元线性拟合的相关系数起码值 $r_0 = 1$) 即 Level = 3 时的尺度层级为最佳尺度层级. 此尺度层级下的分形模型计算可图形化为图 4, 图中横坐标 scale = level * 2 m, level = 1, 2, 3.

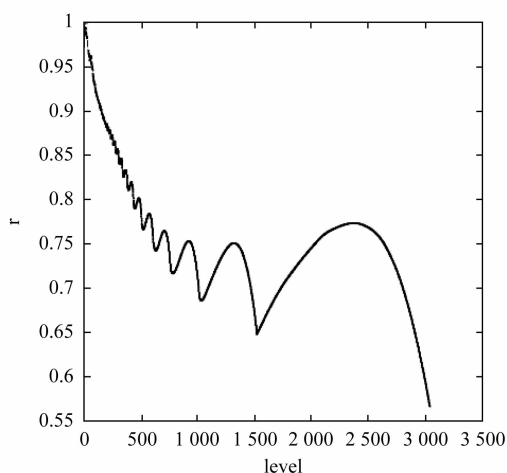
分析图 4 可知: 最佳尺度层级下所得分形模型虽对应于最大 r 值, 但是模型的尺度适用范围却很小 (这里为 2 ~ 6 m), 这限制了模型适用的遥感影像尺度范围. 故在 p 、 r_{lo} 、 r_{up} 符合要求的条件下, 仅以 r 值作为最佳尺度层级确定的唯一指标不甚合理. 下面将在满足 r 值足够高 (大于等于 0.8) 的前提下, 以尽可能广的尺度适用范围选取分形计算的最合理尺度层级. 考察所有尺度层级下计算所得 r , 在取最大尺度为 100 m 整数倍的条件, 可确定出最合理尺度层级为 488 (此时 $r = 0.80$, $r_0 < 0.80$), 即分形模型的尺度适用范围为 2 ~ 976 m. 该尺度层级下的分形模型计算可图形化为图 5, 图中横坐标 scale = level * 2 m, level = 1, 2, …, 488.

图中分维数 D 比较小, 说明 $\log_2 \frac{1}{\text{scale}} - \log_2 \text{NDVI}$ 曲线的结构不复杂.

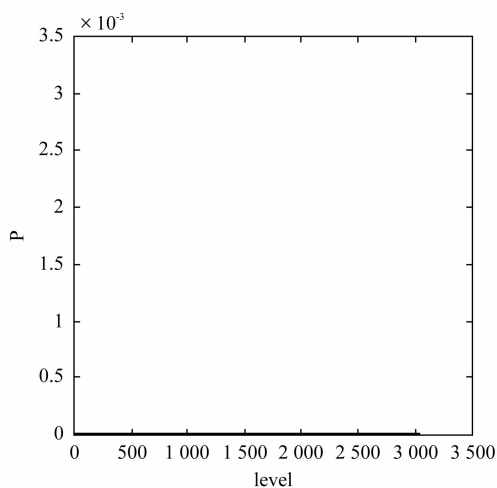
基于上述分析, 比较不同尺度层次下的分形模型的评价参数, 认为选取 Level = 488 (对应最大尺度为 2 × 488 m, 即 976 m) 时的计算结果作为最终的分形计算结果比较合适. 原因是: 此时的 r 值为 0.80, 表明线性拟合程度良好, NDVI 随尺度变化具备典型的分形特征, 但非完全自相似分形; p 值为 7.03e-110, 说明计算的 r 值有意义; r 的真实值不足 0.80 的概率小于 5%. 故所确定的 NDVI 连续空间尺度转换模型为 $\log_2 \text{NDVI} = -0.0120 \log_2 \frac{1}{\text{scale}} - 1.1118$. 根据此模型, 给出适用尺度范围 (2 ~ 976 m) 内任一 scale 值, 即可得到上推尺度影像的 NDVI 均值.

3.2 分形模型在反演量真实性检验中的适用性分析

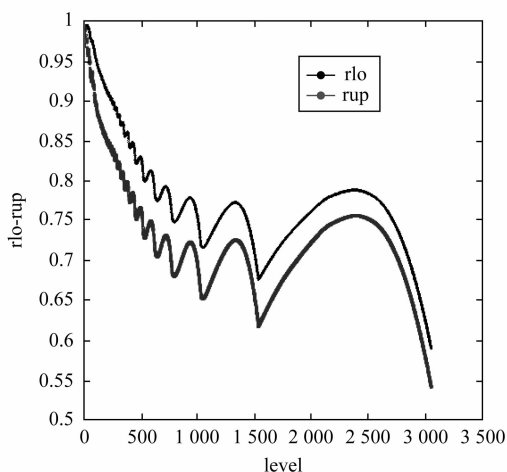
为了证明基于高空间分辨率遥感影像所构建的



(a)



(b)



(c)

图3 各尺度层级分形模型评价 (a) r, (b) p, (c) rup-rlo
Fig.3 Estimation of NDVI's CSSM on each level (a) r, (b) p, and (c) rup-rlo

尺度转换分形模型在真实性检验中的适用性,同样需要对此适用性进行实验分析。

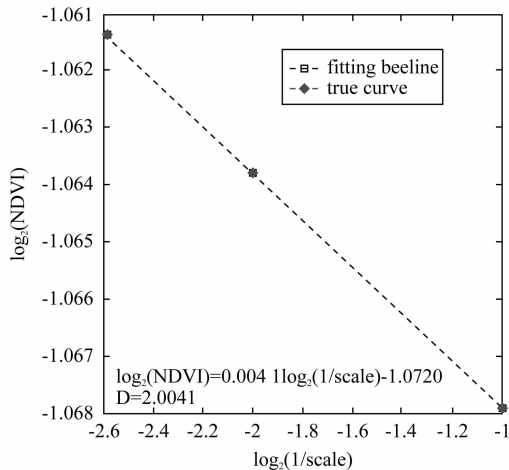


图4 最佳尺度层级下 (Level = 3) NDVI 空间尺度转换分形模型构建

Fig.4 Establishing NDVI's CSSM on the optimal upper level (Level = 3)

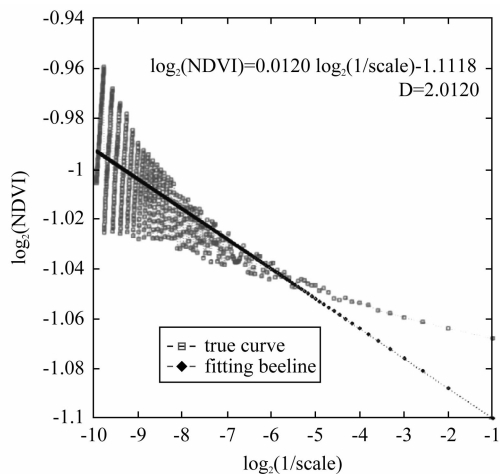


图5 最合理尺度层级下 (Level = 488) NDVI 空间尺度转换分形模型构建

Fig.5 Establishing NDVI's CSSM on the most reasonable level (Level = 488)

这里将直接引用文献[16]中所推演出的反映分形模型计算值与各上推尺度影像的“近真值”两者差异的公式:

$$\text{Diff} = \text{NDVI}_1 - \text{NDVI}_2 \quad (3)$$

$$\text{ratio} = \text{Diff} / \text{NDVI}_2 \quad (4)$$

式中, NDVI_1 为利用分形模型计算得到的某尺度下影像 NDVI 均值, NDVI_2 为各上推尺度 NDVI 影像的均值(该值可认为是“近真值”), Diff 代表 NDVI_1 、 NDVI_2 的差值, ratio 代表差值 Diff 在 NDVI_2 中所占的比重。

在 Level = 488 条件下, 分别计算各尺度 (scale) 下的 Diff、ratio, 并对结果进行图形化显示, 得图 6。

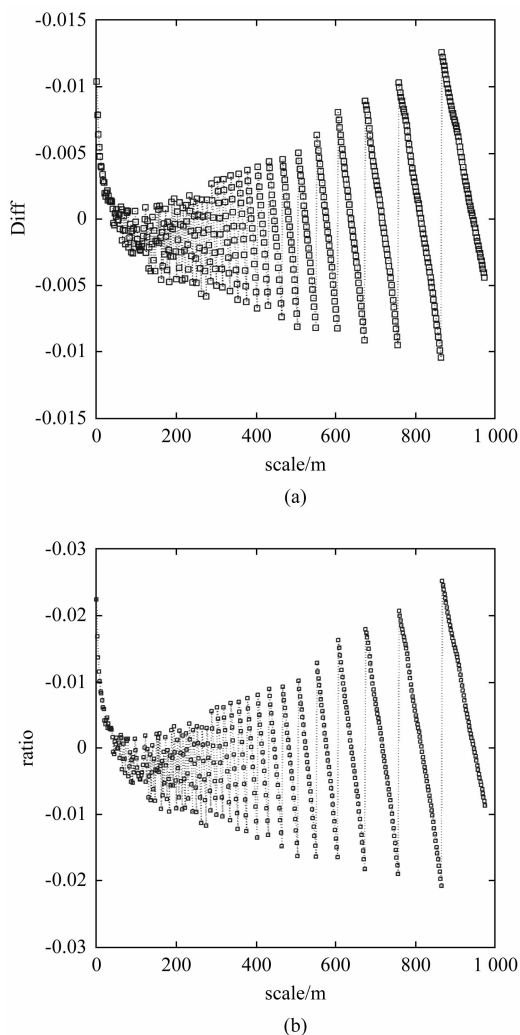


图6 两种方法所得影像 NDVI 结果的差异 (Level = 488) (a) scale-Diff 曲线, (b) scale-ratio 曲线

Fig. 6 Difference between the NDVI results of the two methods (Level = 488) (a) scale-Diff curve, (b) scale-ratio curve

由图6(a)可知:在不同上推尺度下,两种方法得到的 NDVI 差异 Diff 绝对值通常不为 0;且在不同上推尺度下的差异不同,此差异 Diff 绝对值的最小值为 $4.6737e-006$ (对应于 scale = 122 m)、最大值为 0.0126 (对应于 scale = 868 m). 由图6(b)可知:在不同上推尺度下,两种方法所得结果差异 ratio 绝对值通常不为 0;此差异 ratio 绝对值的最小值为 $9.5370e-006$ (对应于 scale = 122 m)、最大值为 0.0252 (对应于 scale = 868 m). 则分形模型所得结果与各上推尺度 NDVI 影像的均值(“近真值”)的差异可以接受. 故所得分形模型可用于 NDVI 真实性检验中.

NDVI 尺度转换分形模型在真实性检验中的应用流程可以描述于图7中.

上述流程已阐述得比较清晰,这里不做过多分析. 由此流程可知,反演量尺度转换分形模型在真实性检验中的重要价值就是利用推进其实施的自动化与智能化,可以加强定量反演产品获取、验证及应用的整体过程的科学性与系统性,促进反演产品的深入而广泛的应用.

需要交代的是:此分形模型是影像整体特征的反映,描述了各尺度影像反演量均值间的关系,而非像元间的关系. 分形模型所验证的是上推尺度影像反演量均值的准确性. 均值是影像的一种十分重要的统计特征,故整体验证是一种可信的方法;但单一的均值特征又是不完备的,影像特性的完整反映需要多种统计特征综合作用. 如何综合利用多种统计特征、及如何建立和利用各尺度影像反演量像元级关系,以进行真实性检验也是今后需要认真考虑的问题.

由上述实验及分析可知:基于高空间分辨率遥感影像所构建的 NDVI 空间尺度转换分形模型同样适用于真实性检验中,这是对于该尺度转换构建方法基础影像空间分辨率适用范围研究的重要支持.

4 讨论

4.1 尺度效应存在原因分析

论文以分形模型的形式简单、深刻地揭示了 NDVI 尺度效应的存在. 进一步, NDVI 存在尺度效应的根本原因可以从三方面进行论述: (1) 像元内部存在 NDVI 的空间变化 GEOEYE-1 多光谱影像的空间分辨率为 2 m, 较之 30 m ETM+ 影像, 该影像像元内部更为纯净, 像元内出现 NDVI 异质的现象不显著; (2) 相邻像元间存在 NDVI 的空间变化这是影像地物呈现不连续分布所造成的, 研究区内存在多种地类, 其分布存在一定程度的不均一性, 相邻像元间 NDVI 异质的现象较为显著; (3) NDVI 反演模型的非线性 NDVI 与红色波段、近红外波段地表反射率均呈非线性, NDVI 模型的非线性是导致其存在尺度效应的另一个重要因素. 其中, (1) 与 (2) 两点又可以统一归结为 NDVI 的空间异质性. 可以认为, 它是尺度效应产生的根源. 下面将对这一属性进行重点分析.

为定量描述实验区 NDVI 空间异质性的存在, 本文采用影像平均空间异质性指数 (Spatial Heterogeneity Index, SHI)^[18] 评价影像的空间异质性. 某像元 $f(i, j)$ 空间异质性指数定义为该像元与其八邻域的像素值差的绝对值之和:

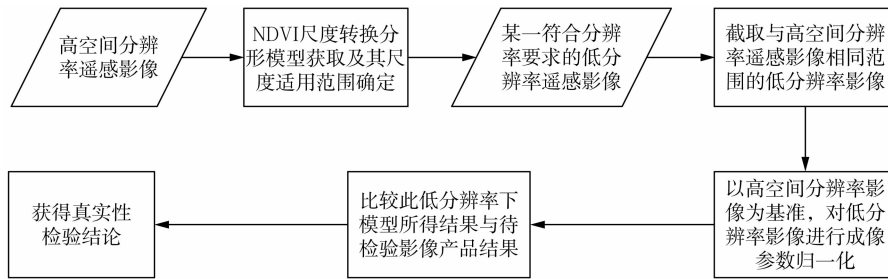


图7 NDVI 尺度转换分形模型在真实性检验中的应用流程
 Fig. 7 The flowchart of NDVI's CSSM applied into validation

$$SHI_{ij} = \sum_{a=-1}^1 \sum_{b=-1}^1 |f(i, j) - f(i + a, j + b)| \quad (5)$$

影像大小为 $m \times n$ 的实验区的空间异质性指数 SHI 定义为:

$$SHI = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} SHI_{ij} \quad (6)$$

基于式(5)、式(6),在 Level = 488 的条件下,可计算得到不同上推尺度影像的 SHI,对尺度-SHI 数组绘图,可得图 8.

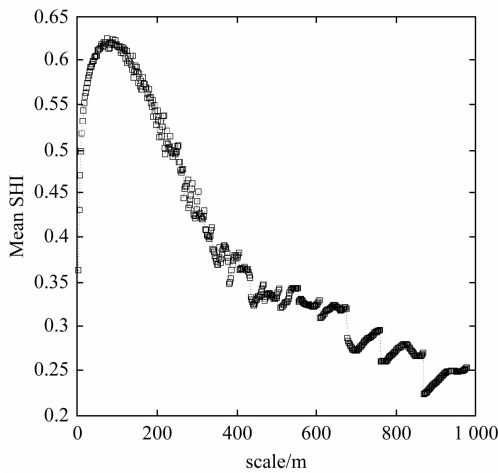


图8 影像尺度-影像 SHI 曲线(Level = 488)
 Fig. 8 The scale-SHI curve of the image (Level = 488)

若 GEOEYE-1 影像 NDVI 空间分布均一,不存在异质性,则各上推尺度影像 SHI 相同.分析图 8 可知,不同上推尺度影像间 SHI 变化显著,这说明 GEOEYE-1 影像 NDVI 存在显著的空间异质性.下面对图中的曲线进行深入分析.

影像平均异质性指数与地类复杂性及地类的破碎程度密切相关.当地类简单、分布集中时,由于地类分布空间相关性的存在,影像尺度较小时,相邻像

元性质相近,像元 SHI 较小,影像的平均 SHI 较小;影像尺度上推时,相邻、性质相近的像元聚合,上推影像像元间差异增大,像元 SHI 增大,影像的平均 SHI 增大.当地类复杂、分布破碎时,影像尺度较小时,相邻像元性质差异表现显著,像元 SHI 较大,影像的平均 SHI 较大;影像尺度上推时,相邻、性质相异的像元聚合,上推影像像元间差异弱化,像元 SHI 减小,影像的平均 SHI 减小.影像主要地类及其尺度决定了影像尺度-影像 SHI 曲线拐点的位置及其所对应的特征尺度.这与通常的,随着尺度上推、空间分辨率的增大,影像空间异质性降低的简单直观认识不相同.

在实验区内,GEOEYE-1 影像属于高空间分辨率数据,当尺度逐渐增大时,由于桉树及红树林面积广阔且分布集中,相对均一的纯像元(2 m)聚合为混合像元,上推尺度影像像元间性质差异增大,像元的空间异质性指数增大,影像平均空间异质性指数增大.随着尺度继续增大,混合像元的增多将削弱影像地类简单、分布集中的特性,影像地类复杂、分布破碎特性增强,据上述分析可知,影像平均 SHI 减小.故图 8 中曲线先增大后减小的变化趋势符合上述分析,印证了分析的合理性;拐点 (Mean_SHI = 0.6243) 所对应的特征尺度(74 m)为影像主要地类桉树、陆生天然林及红树林等林类斑块的尺度.

4.2 分形模型分析

针对分形模型,有如下的思考:

1) 分形模型构建存在最合理尺度层级,此尺度层级确定后,模型的尺度适用范围亦被确定.该范围对实验影像范围、传感器类型(空间分辨率及波段设置等)、下垫面类型(地物空间布局)等因子存在不同的依赖程度.分形模型构建最合理尺度层级对诸因子的敏感性分析是接下来需要研究的内容.

2) 如文献[16]所言,对于统计分形,一个重要

特性就是“无标度区间”的存在,即针对实验区,理论上 NDVI 应该在某一最小尺度与某一最大尺度之间具备最适宜的分形特征。“无标度区间”的确定仍是需要解决的重要问题。

3) 分形尺度转换方法的反演量使用范围分析

类似于地表辐亮度,土壤水分、叶绿素 a、黄色物质含量等符合面积加和规律的反演量,可以通过尺度上推获取其各上推尺度的“真实”反演量影像。得到了反演量各尺度影像,便可以分析各尺度下反演量的变化规律,探讨其尺度转换分形模型,并加以应用。

以被动微波土壤水分反演为例,其尺度转换分形模型获取及模型在真实性检验中的应用流程可以概要描述于图 9 中。

分析上图可知:参考该图的操作流程,即可实现被动微波土壤水分尺度转换分形模型的获取及低分辨率影像反演产品的真实性检验。适用于本方法的其它类型反演量的应用方法与此相似。这将拓展分形尺度转换研究方法所适用的反演量类型范围。可预测,本文方法在定量遥感反演量尺度转换研究及真实性检验的应用中具备巨大潜力。

5 结论

论文基于分形理论,以 GEOEYE-1 影像为例对 NDVI 的连续空间尺度转换模型构建及应用进行研究。获得如下成果与结论:(1)基于分形理论的连续空间尺度转换模型构建方法适用于高空间分辨率遥感影像;(2)在给定的条件下,尺度转换分形模型构建存在最合理尺度层级,且此尺度层级可计算;(3)以影像异质性指数为指标,细致论证了空间异质性是 NDVI 尺度效应存在的重要原因;(4)本文的研究使得分形方法在适用的反演量类型及基础图空间分辨率范围两方面皆有大的扩展。

需要说明的是:文中已就 NDVI 连续尺度转换

模型在真实性检验中的适用性进行论证,并证明了模型的有效性。但在实际应用中,不同尺度传感器影像不具备如文中所述的各上推尺度影像那样理想的特性(与基础影像具有相同的成像参数)。利用该模型对实际影像进行应用验证时,一个重要前提就是基于基础影像对待检验影像进行成像参数归一化。此模型的应用验证也是接下来的研究内容。

本文的方法尚存在以下不足:(1)反演量尺度转换存在分形规律的生物物理原因有待深入研究;(2)如上所述,本文的研究使得分形方法的反演量适用范围获得较大程度地拓展,然而反演量物理模型及尺度上推技术的发展依旧不成熟,这是该方法使用范围继续扩展的限制。

可以预见,随着如数学、物理学等多学科知识的深度融入,定量遥感反演等理论将得到发展与完善,上述问题亦将得到进一步解决。

REFERENCES

- [1] Liang S L. Numerical experiments on the spatial scaling of land surface albedo and leaf area index [J]. *Remote Sens Rev*, 2000, **19**(1-4): 225-242.
- [2] Jin Z Y, Tian Q J, Chen J M, et al. Spatial scaling between leaf area index maps of different resolutions [J]. *J Environ Manage*, 2007, **85**(3): 628-637.
- [3] Li X W, Wang J D, ALAN S. Scale effect of Planck's law over nonisothermal blackbody surface [J]. *Sci China Ser E*, 1999, **42**(6): 652-656.
- [4] Chen J M. Spatial scaling of a remotely sensed surface parameter by contexture [J]. *Remote Sens Environ*, 1999, **69**(1): 30-42.
- [5] Zhang R H, Li Z L, Tang X Z, et al. Study of emissivity scaling and relativity of homogeneity of surface temperature [J]. *Int J Remote Sens*, 2004, **25**(1): 245-259.
- [6] Wen J G, Liu Q, Liu Q H, et al. Scale effect and scale correction of land-surface albedo in rugged terrain [J]. *Int J Remote Sens*, 2009, **30**(20): 5397-5420.
- [7] Xu X R, Fan W J, Tao X. The spatial scaling effect of continuous canopy Leaves Area Index retrieved by remote sensing [J]. *Sci China Ser D*, 2009, **52**(3): 393-401.
- [8] Zhang X, Yan G, Li Q, et al. A measuring device for studying scaling of emissivities from sub-pixel to pixel

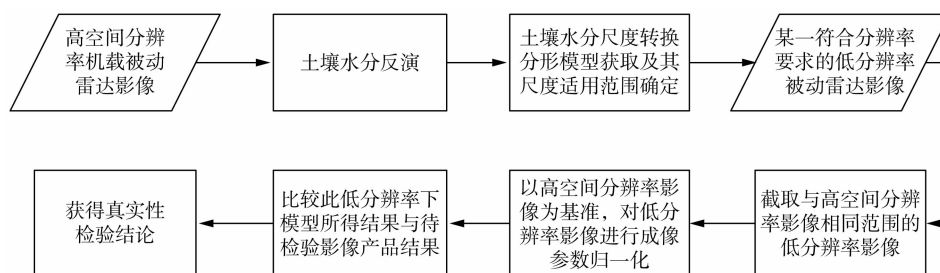


图 9 被动微波土壤水分尺度转换分形模型在真实性检验中的应用流程

Fig. 9 The flowchart of soil moisture's CSSM in passive radar applied into validation (下转第 549 页)

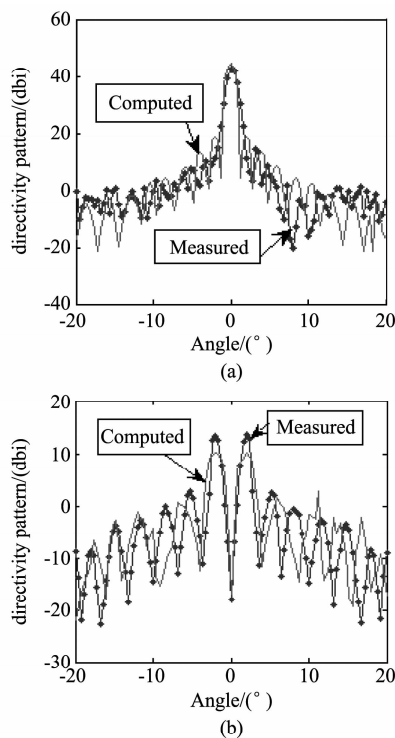


图 8 主极化和交叉极化方向图的理论与实测结果
(a)主极化方向图, (b)交叉极化方向图
Fig. 8 Theoretical and measured results of (a) main polarization, and (b) cross-polarization pattern

平实测值与理论值基本吻合,证明天线理论分析的正确性,天线系统设计及多模馈源设计都是成功的。

REFERENCES

- [1] Sharma S B, Pujara D, Chakrabarty S B, *et al.* Cross-polarization cancellation in an offset parabolic reflector antenna using a corrugated matched feed [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, **8**:861-864.
- [2] Sharma S B, Pujara D, Chakrabarty S B, *et al.* Improving the cross-polar performance of an offset parabolic reflector antenna using a rectangular matched feed[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, **8**: 513-516.
- [3] Chan K K, Raab A R. Surface-current analysis of distorted reflector antennas[J]. *IEE PROC*, 1981, **128**(4) :206-212.
- [4] LIN Chang-Lu. *Antenna engineering handbook* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry (林昌禄. 天线工程手册. 北京:电子工业出版社), 2002:551-610.
- [5] Bem D J. Electric-field distribution in the focal region of an offset paraboloid[J]. *PROC. IEE*, 1969, **116**(5) : 679-684.
- [6] YANG Ke-Zhong, YANG Zhi-You, ZHANG Ri-Rong. *New technology for modern reflector antennas* [M]. Beijing: People Post and Telecommunications Press (杨可忠, 杨智友, 章日荣. 现代面天线新技术. 北京:人民邮电出版社), 1993:447-488.
- [7] Bateman D G, Hay S G, Bird T S, *et al.* Method of moments analysis of offset reflector antennas [J]. *Electronics Letters*, 1995, **31**(22):1889-1890.
- [8] Huang K, He Z L, Zhang H W, *et al.* Efficient analysis of antenna around electrically large platform with improved non-uniform rational B-spline hybrid method of moments and physical-optics method [J], *IET Microw. Antennas Propag*, 2011, **5**(2):136-141.
- [9] Roman M O, Gatebe C K, Schaaf C B, *et al.* Variability in surface BRDF at different spatial scales (30~500 m) over a mixed agricultural landscape as retrieved from airborne and satellite spectral measurements [J]. *Remote Sens Environ*, 2011, **115**(9) : 2184-2203.
- [10] Liang L, Schwartz M D, Fei S L. Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest [J]. *Remote Sens Environ*, 2011, **115**(9):143-157.
- [11] Hilker T, Hall F G, Coops N C, *et al.* Remote sensing of photosynthetic light-use efficiency across two forested biomes: Spatial scaling [J]. *Remote Sens Environ*, 2010, **114**(12) : 2863-2874.
- [12] Nagler P L, Brown T, Hultine K R, *et al.* Regional scale impacts of Tamarix leaf beetles (*Diorhabda carinulata*) on the water availability of western U.S. rivers as determined by multi-scale remote sensing methods [J]. *Remote Sens Environ*, 2012, **118**(15) : 227-240.
- [13] Chasmer L, Barr A, Hopkinson C, *et al.* Scaling and assessment of GPP from MODIS using a combination of airborne lidar and eddy covariance measurements over jack pine forests [J]. *Remote Sens Environ*, 2009, **113**(1) : 82-93.
- [14] XU Xi-Ru. *Physical Principles of Remote Sensing* [M]. Beijing: Peking University Press (徐希孺, 遥感物理. 北京:北京大学出版社), 2005: 13-14.
- [15] Zhang R H, Tian J, Li Z L, *et al.* Principles and methods for the validation of quantitative remote sensing products [J]. *Sci China Ser Earth Sci*, 2010, **53**(5) : 741-751.
- [16] Luan H J, Tian Q J, Yu T, *et al.* Modeling continuous scaling of NDVI based on fractal theory [J]. *Spectrosc Spect Anal.* (栾海军, 田庆久, 余涛, 等. 基于分形理论的NDVI连续空间尺度转换模型研究. 光谱学与光谱分析), 2013, **33**(7) : 1857-1862.
- [17] John V M, Carol J B, Alan H S. A review of reflectance nomenclature used in remote sensing [J]. *Remote Sensing Reviews*, 2000, **19**(1-4) : 9-20.
- [18] Zhang X H. Study on spatial heterogeneity and scale effect of eucalyptus forest based on high resolution remote sensing [D]. Nanjing: Nanjing University (张雪红. 基于高分辨率遥感的桉树林空间异质性与尺度效应研究. 南京:南京大学), 2012: 49-50.

(上接 544 页)