

直方变差图理论在卫星产品质量检验空间配准中的应用

刘瑞霞^{1, 2, 3}, 师春香², 刘 杰⁴

1 中国科学院 大气物理研究所中层大气与全球环境观测实验室, 北京 100029;

2 中国气象局 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081;

3 中国科学院 研究生院, 北京 100049;

4 中国气象报社, 北京 100081

摘 要: 将直方变差图中的“驻点”理论引入卫星产品质量验证中, 用于解决不同资料对比中的空间配准问题。提出了直方变差图理论用于卫星资料质量检验中驻点、边界点的定义以及应用原理, 以中国风云 2 号 C 星海面温度产品为例, 对这种方法进行了应用试验, 结果表明, 可以减少卫星产品检验空间配准过程中由于降尺度 (downscaling) 或升尺度 (upscale) 导致像元性质改变而引入的伪误差; 通过卫星资料与离散常规观测资料的对比, 可以不严格进行空间配准, 也可得到相对准确的精度检验结果。

关键词: 直方变差图, 驻点, 质量检验, 空间配准

中图分类号: TP732

文献标识码: A

1 引 言

卫星产品真实性检验是卫星资料应用的基础和保证。对卫星资料进行质量检验, 常用的方法是将要检验数据与其他类型数据进行对比分析, 得到相对精度, 包括与同类卫星资料和数值预报格点场数据的比较以及离散常规观测数据的对比分析 (康建成等, 2004; 朱华忠等, 2003)。对比分析过程中, 需要对不同空间分辨率以及不同格式 (格点、散点) 数据进行空间配准。空间配准包括对低分辨率数据插值 (朱会义等, 2004; 孟鲁闽等, 2003), 即降尺度 (downscaling), 插值方法包括双线性内插、三次卷积内插等, 从低空间分辨率数据中提取亚像元成分的信息 (彭晓鹏等, 2003); 或者对高分辨率数据采样 (中心值法、平均值法和抽样等) (刘明亮等, 2001), 即升尺度 (upscale), 将高空间分辨率的数据复合或平均变成大尺度、低空间分辨率的数据 (彭晓鹏等, 2003)。尺度转换过程中会导致一些数据特性的改变, 或者空间匹配不准确 (如点与面资料的匹配) 而影响数据检验精度。

地学研究中尺度转换问题尤为关注, 李小文 (2002)、张颢 (2002) 等通过定义驻点和边界点, 提出研究地物空间分布规律的直方变差图分解方法, 进行了地表特性的空间分析。直方变差图在一定程度上可以反映图像代表的地形是否“崎岖”, 以及“台地”的破碎程度等, 即图像像元性质是否均匀。

本文通过地表分类、地表尺度效应中直方变差图方法的研究, 借用了“直方变差图”理论中的“驻点”概念, 提出将直方变差图理论用于卫星产品质量检验, 一定程度上解决了由于不同空间分辨率格点场数据以及格点和散点数据空间匹配不准而影响质量检验精度的问题。

2 直方变差图理论在卫星产品质量检验中应用原理

直方变差图是分析数字图像最常用的工具, 多用于地表分类以及地表尺度效应研究。李小文 (2002)、张颢 (2002) 给出了它的基本原理与公式, 并解释了驻点和边界点的涵义。

对于卫星产品, 设有一 $M \times N$ 大小的图像, 高度

收稿日期: 2007-06-18; 修订日期: 2008-04-14

基金项目: 国家科技部基础条件平台工作 (编号: 2005DKA31700)、基金项目 (编号: 40501048) 和中国气象局开放课题 (编号: CCSF2007-2) 共同支持。(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

第一作者简介: 刘瑞霞 (1975—), 女, 大气物理研究所在职博士, 副研究员。主要从事卫星产品反演及应用研究, 发表文章 10 篇。E-mail: liurx@ma.gov.cn

分辨率 DN, 空间分辨率 d 当对该图像采用 $m \times n$ 的聚合窗进行向上的尺度转换后, 空间分辨率变为 $md \times nd$ 图像大小变为 $(M/m) \times (N/n)$ 。

经过向上的尺度转换后, 生成的新图像会出现 2 种情况:

当原始图像中 $m \times n$ 聚合窗中各像元具有相同值时, 在 $md \times nd$ 分辨率下的新像元值保持不变, 在地表特征尺度效应研究中称该像元为“驻点”, 代表着平坦的地表像元 (张颢等, 2002)。在此, 我们也称这样的点为“驻点”, 即在尺度转换之后保持性质不变的点。

如图 1, 假设原始图像分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$, 那么当用一个 2×2 的聚合窗对它进行向上尺度转换, 得到新图像分辨率是 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 。如果像元性质很均匀, 那么在图像尺度转换过程中, 产生的新像元的性质没有变化, 这样的点称驻点。



图 1 驻点示意图
Fig 1 Sketch map of standing pixel

当原始图像中 $m \times n$ 聚合窗中各像元值不同时, 在 $md \times nd$ 分辨率下新像元性质发生变化, 称该新像元为边界点。边界点代表了在尺度转换之后性质容易发生改变的点。

图 2 给出了边界点的示意图, 原图像中各像元的值差异较大, 在降低分辨率以后, 新像元的值相对原分辨率图像像元值发生了改变, 丢失了原图像的信息。

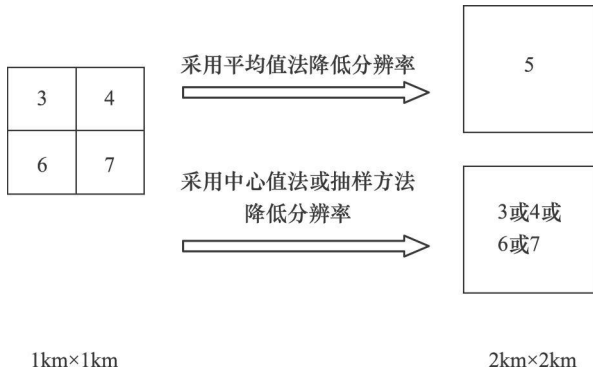


图 2 边界点示意图
Fig 2 Sketch map of contour pixel

卫星资料与其他资料的比对验证, 包括卫星资料与格点资料 (同类卫星产品以及再分析资料) 的对比验证和与散点资料 (常规的点观测数据) 的对比验证。下面分别针对这两种情况说明驻点和边界点在尺度转换过程中的不同, 解释直方变差图寻找驻点的方法在卫星产品质量验证中的理论依据。

2.1 卫星资料与格点资料的对比

由于相互比对的格点数据空间分辨率不同, 首先需要尺度转换以统一分辨率。

卫星接收到的是地表或大气的辐射值, 卫星产品反演的过程是将卫星接收的辐射值转换成亮度温度或反照率, 然后进一步计算得到产品。以卫星红外通道 $11\mu\text{m}$ 为例, 说明驻点与边界点在尺度转换过程中的不同。

由图 3 假设被检验数据空间分辨率为 2km , 检验源数据空间分辨率为 1km 。假定 1km 分辨率检验源数据的 4 个像元的辐射值均为 $5\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \mu\text{m}$, 计算得到每个像元的亮度温度为 261.4K 。采用平均值法、中心值法或抽样的方法降低分辨率到 2km , 计算得到亮度温度为 261.4K 。被检验数据与检验源数据的辐射值相同, 也为 $5\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \mu\text{m}$, 计算得到其亮度温度为 261.4K , 与检验源数据降低分辨率后点的值完全相同, 通过亮度温度进一步反演得到的卫星产品性质也是相同的, 因此, 对于驻点, 降低分辨率后点像元值能真实反映原分辨率每个像元的性质, 采用平均值或其他降尺度的方法不改变原像元的性质。

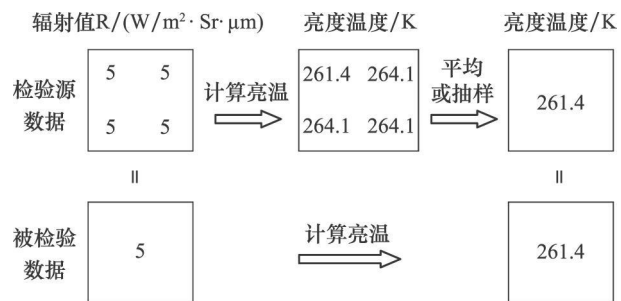


图 3 驻点在尺度转换过程中性质不变原理图
Fig 3 Standing pixel characteristics unchanged during scale transformation

同样对于边界点, 如图 4, 假设 1km 分辨率检验源数据 4 个像元的辐射值分别为 $3, 4, 6, 7\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \mu\text{m}$, 计算得到 4 个像元的亮度温度分别为 $237.3, 250.3, 271.2, 280.1\text{K}$ 。采用平均值法降低分辨率到 2km , 得到亮度温度值为 259.7K 。 2km 被检

验数据的辐射值为 $5W/m^2 \cdot Sr \cdot \mu m$, 与检验源数据平均辐射值相同, 计算得到 $2km$ 分辨率像元的亮度温度为 $261.4K$; 与检验源数据降低分辨率后的亮度温度值不同。可见, 即使卫星接收的原始辐射值相同, 尺度转换过程中像元的亮度温度已经发生了改变, 而由亮度温度计算得到的卫星产品的性质也会改变。因此, 采用平均法降低分辨率是存在问题的, 采用中心值法或抽样的方法进行尺度转换, 不能代表原始分辨率时每个像元的性质。

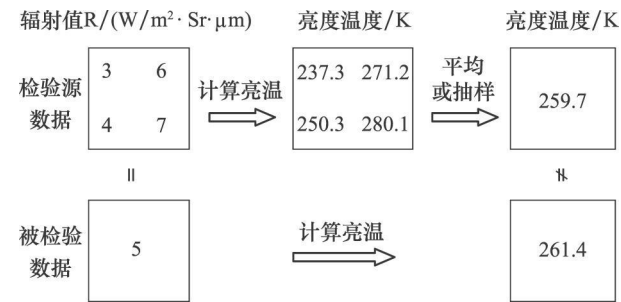


图 4 边界点在尺度转换过程中性质改变原理图

Fig 4 Contour pixel characteristics changed during scale transformation

对于边界点, 由高分辨率图像向低分辨率转换的过程中, 会丢失很多原图像信息, 甚至使像元性质完全改变, 这些像元进行尺度转换要非常谨慎, 对这样的资料进行质量检验对空间配准的精度要求很高, 通常的平均值法、中心值法或其他方法改变分辨率的方法存在问题。反之, 对于驻点, 采用中心法或其他方法改变分辨率是科学的, 这些点在尺度转换后, 不会明显改变原图像性质。

如果剔除边界点, 仅对驻点范围内的点进行比对分析, 可最大限度剔除改变了性质的点, 避免由于尺度转换导致像元性质改变而引起的误差, 对空间配准精度要求也相对较低。

2.2 卫星产品与散点观测数据的对比

对于卫星产品与常规观测资料的对比分析, 通常方法是采用一定范围内最邻近的点进行匹配。如果最邻近的 2 个点性质本来不同, 则会得到错误的质量检验信息, 如图 5(a), 不能判断要检验点与最邻近点是否真的性质相同, 容易带来检验误差。如果被检验的点落在检验源数据驻点范围内, 如图 5(b), 要检验点的值和驻点范围内所有像元的值相同或相近, 与驻点范围内任一个点比较的结果是一样的, 这样就不需要非常严格的空间匹配, 便可以得到准确的质量检验结果。

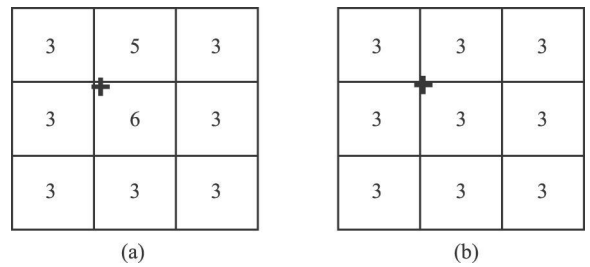


图 5 落在边界点范围内的点 (a) 及落在驻点范围内的点 (b) 观测资料

Fig 5 The point fell into standing pixels (a) and the point fell into contour pixels (b)

总之, 由于目前没有正好的数据精确配准的方法, 采用驻点范围的点比对可以降低对数据配准的要求, 得到相对精确的数据对比结果。

对于卫星遥感产品, 由于聚合窗中不可能有绝对相同的值, 在实际应用中, 需要设一个阈值, 将聚合窗中各点差在阈值范围内的点确定为驻点。如果像元在尺度扩展后的图像上对应的是驻点像元, 则此像元在更细尺度上也是驻点像元。

3 直方变差图理论在卫星产品质量检验中的应用

以中国风云 2 号 C 星 (FY2-C) 静止气象卫星海面温度 (SST) 产品为例, 选取美国国家环境预报中心 (NCEP) 的最优插值海面温度 (OISST) 资料, 对船舶 浮标观测海面温度资料与其进行比对分析, 诊断了 2 种相互比对资料的绝对误差、相对误差、偏差、误差标准差和相关系数来定量描述对比分析结果 (徐萃薇, 1991; 施能, 2002)。

3.1 FY2-C 卫星遥感 SST 数据与格点资料的对比分析

随机选取了 2006 年 7 月 6—12 日的 FY2-C SST 数据及同时段 OISST 数据。FY2-C SST 是 $3h/$ 次的 $4km \times 4km$ 分辨率的数据, OISST 是全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 的周数据, 首先对 FY2-C SST 求周平均, 进行时间配准, 然后采用直方变差图的方法寻找驻点。

对 FY2-C SST 采用中心值法进行 25×25 聚合窗聚合, 降低分辨率到 $1^\circ \times 1^\circ$, 然后将 $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率下的新像元的值与聚合窗中对应的 25×25 个点逐一比较, 如果新像元与 25×25 聚合窗中所有点的差均在 $0.3C$ 范围内, 则认为该像元是驻点, 相应原始数据 25×25 聚合窗中每个像元也为驻点像元, 这

样将 FY2-C SST中所有驻点像元找出来,然后寻找与驻点像元相对应的 OISST进行对比分析。

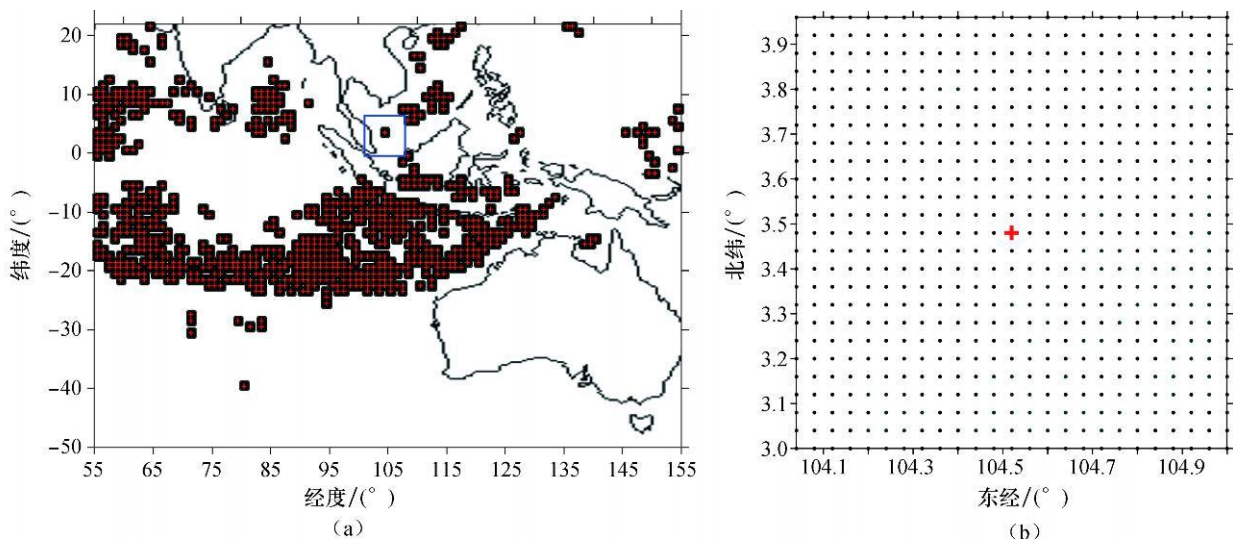


图 6 4km FY2-C SST降低分辨率到 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 得到的驻点分布图 (a)及像元放大图 (b)
Fig 6 The distribution of FY2-C SST standing pixels in upscaling transformation (a) and the enlarged figure of pixels within blue box(b)

图 6(a)是获得的 FY2-C SST的驻点分布图,其中黑色点为 4km 分辨率时的 SST值,红色点为 25×25 聚合窗聚合后得到的 SST值,图 6(b)给出了图 6 (a)蓝色框内像元的放大图,如前所述,由于红色点是驻点取中心值得到的结果,基本代表 25×25 范围内每个点的性质,红色点也代表了与 FY2-C SST相匹配的 OISST的位置,于是 OISST落在了 FY2-C SST驻点的范围内。

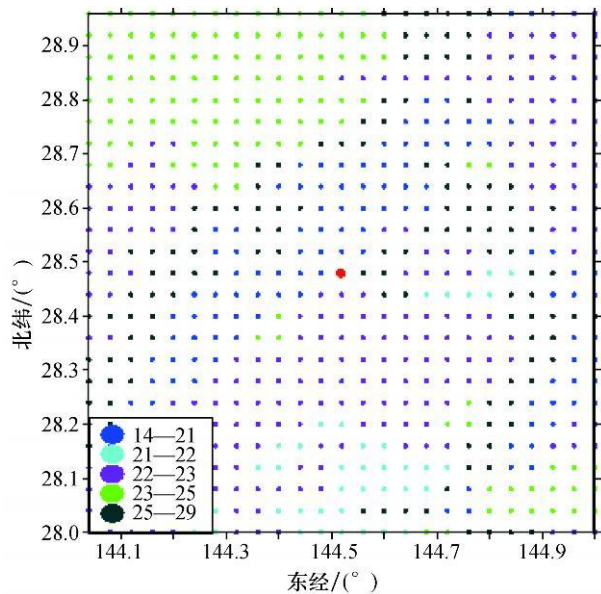


图 7 4km FY2-C SST降低分辨率到 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的边界点示意图

任意选取边界点如图 7,其中红色点为降低分辨率到 1° 的点,其他点为原始 4km 分辨率的点。可以看到,原始分辨率点的值从 $19^{\circ}\text{C}-29^{\circ}\text{C}$,范围非常大,红色点无法代表原始分辨率图像中每个像元的值。在降低分辨率过程中,采用中心值法、平均法或采样的方法,均不能科学地反映原像元的性质。对这样的点我们抛弃处理。

对样本数据得到驻点 779个,对驻点范围内的 FY2-C SST和 OISST比对分析,计算得到二者的绝对误差为 2.8°C ,相对误差为 0.10,偏差为 -1.87°C ,误差标准差为 3.22°C 。如果不求驻点,对所有点进行匹配比对得到二者绝对误差为 3.82°C ,相对误差为 0.23,偏差为 1.01°C ,误差标准差为 4.84°C 。可见由于降低分辨率引起的像元性质的改变一定程度上影响了卫星资料检验的精度。寻找 2种资料中的驻点进行对比分析,剔除由于降低分辨率处理引起的资料性质明显改变的点,可以在一定程度上减少在尺度转换过程中像元性质改变和不严格空间匹配引起的误差,使对比结果更能代表原始资料的性质,使精度检验的结果更为科学可信。

3.2 FY2-C卫星遥感 SST 数据与船舶 浮标观测资料的对比分析

由于卫星产品是一个面观测的概念,船舶 浮标资料是点的观测。如果将卫星观测面资料与点资料进行比较验证,二者的空间匹配是一个难题,采用直方变差

图驻点理论可以一定程度上克服这个难题。

随机选取 2006 年 7 月 FY2-C 3h 次的数日的 SST 资料,与船舶 浮标 SST 比对分析。首先选择不同聚合窗 (1×1, 2×2, 3×3, 4×4, …) 对 FY2-C SST 进行降低分辨率处理,寻找各种分辨率下的驻点分布,然后搜索

船舶 浮标观测的同时段 (时间匹配) 落在驻点范围内的 SST 值。根据搜索得到的船舶 浮标观测值确定 FY2-C SST 升尺度过程中聚合窗的大小,保证得到足够数量的资料进行比较;最后对驻点范围内的 FY2-C 和船舶 浮标 SST 比对分析。

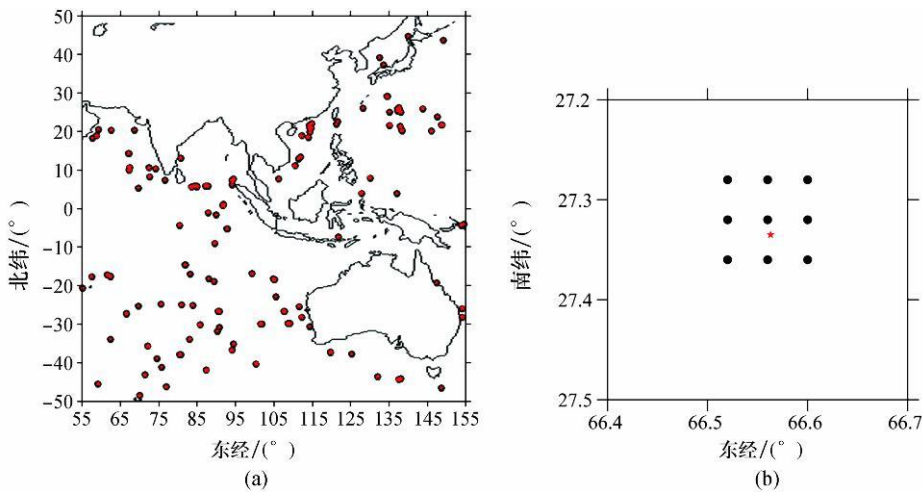


图 8 FY2-C SST 驻点范围内浮标 船舶观测点分布 (a) 与像元放大图 (b)
(红色点表示船舶观测点, 黑色点表示 FY2-C 海面温度探测值)
Fig. 8 The distribution of buoy/ship point fell into FY2-C SST standing pixel
(a) and the enlarged figure of pixel within blue box (b)
Red: buoy/ship SST; Black: FY2-C SST

图 8(a) 给出了落在 FY2-C SST 驻点范围内的浮标 船舶观测点示意图, 其中红色点表示船舶观测点, 黑色点表示 FY2-C 海面温度探测值, 图 8(b) 给出蓝色框中像元的放大图。可以看出, 由于船舶观测点周围的任一点为 FY2-C 的驻点, 那么它与任一点进行匹配比较的结果是一样的, 这样可以避免最邻近法匹配中像元达不到完全匹配而产生的比较误差。如果船舶 浮标观测点落在 FY2-C SST 边界点范围内 (图 9), 边界点的范围由 14—18 不等, 采用临近点匹配将引入误差。

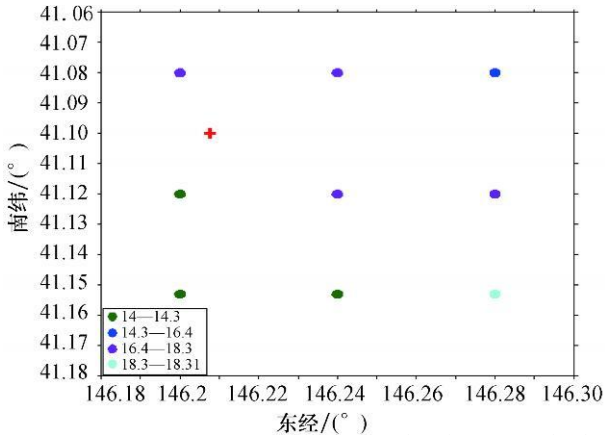


图 9 落在 FY2-C SST 边界点内的船舶浮标 SST

Fig. 9 Buoy/ship SST fell into contour pixels of FY2-C SST

对所取样本求驻点, 获得 221 个匹配点 (图 8 (a)), 计算得到 FY2-C SST 相对浮标 船舶 SST 的绝对误差为 3.02℃, 相对误差为 0.15, 偏差为 -0.12℃, 误差标准差为 3.48℃。二者的相关系数为 0.83, 通过为 99.9% 信度检验。

4 结 论

本文将直方变差图中的驻点理论引入卫星产品质量检验中, 提出一种新的卫星产品质量检验中空间匹配不准问题的解决办法。对于卫星资料与同类卫星以及再分析格点场资料的比对, 在空间匹配过程中, 利用驻点范围内的点比对, 将减少由于降尺度 (downscaling) 或升尺度 (upscaling) 导致像元性质改变引入的伪误差; 对于卫星资料与离散常规观测资料的比对, 寻找常规观测中对应卫星资料驻点范围内的点比对, 可以不严格进行空间配准, 便得到相对准确的精度检验结果。因此, 这种方法可以更精确地反映卫星资料的质量信息。

由于卫星产品的质量检验是产品应用的前提和基础, 因此, 这种方法有很好的实用价值, 具有很广阔的应用前景。但是如果资料性质非常不均一, 则不适于使用这种方法。

REFERENCES

- Kang J H, Tang S L and Liu L B. 2004. Satellite remote sensing validation experiment at sea ice zone east antarctica. Chinese Journal of Polar Research, **15**(4): 310– 317
- Li X W, Zhao H R, Zhang H and Wang J D. 2002. Global change study and quantitative remote sensing for land surface parameter. Earth Science Frontiers, **9**(2): 365– 370
- Liu M L, Tang X M, Liu J Y and Zhuang D F. 2001. Research on scaling effect based on 1km cell data. Journal of Remote Sensing, **5**(3): 183– 190
- Meng L M and Xi J. 2003. Spatial matching of difference images using geometric correction. Bulletin of Surveying and Mapping, **6**: 14– 15
- Peng X J, Deng R R and Liu X P. 2004. A review of scale transformation in remote sensing. Geography and Geo-Information Science, **20**(5): 6– 14
- Shi N. 2002. Polybasic statistics analytical method in the middle of weather research and forecast. Beijing: Weather Publishing House
- Xu C W. 1991. Introduction of numerical calculation method. Beijing: High Education Press
- Zhang H, Jiao Z T and Yang H. 2002. Research on scale effect of histogram. Science in China (Series D), **45**(10): 949– 961
- Zhu H Z, Luo T X and Christopher D. 2003. Validation of simulated grid data sets of China's temperature and precipitation with high spatial resolution. Geographical Research, **22**(3): 349– 359

- Zhu H Y, Liu S L and Jia S F. 2004. Problem of the spatial interpolation of physical geographical elements. Geographical Research, **23**(4): 425– 432

附中文参考文献

- 康建成, 唐述林, 刘雷保. 2004. 南极海冰遥感现场对比实验. 极地研究, **15**(4): 310– 317
- 李小文, 赵红蕊, 张颢, 王锦地. 2002. 全球变化与地表参数的定量遥感. 地学前缘, **9**(2): 365– 370
- 刘明亮, 唐先明, 刘纪远, 庄大方. 2001. 基于 1km 格网的空间数据尺度效应研究. 遥感学报, **5**(3): 183– 190
- 孟鲁闽, 席晶. 2003. 利用几何校正法进行不同影像间空间配准. 测绘通报, **6**: 14– 15
- 彭晓鹏, 邓孺孺, 刘小平. 2004. 遥感尺度转换研究进展. 地理与地理信息科学, **20**(5): 6– 14
- 施能. 2002. 气象科研与预报中的多元分析方法. 北京, 气象出版社
- 徐萃薇. 1991. 计算方法引论. 北京, 高等教育出版社
- 张颢, 焦子锦, 杨华. 2002. 直方图尺度效应研究. 中国科学 D 辑, **32**(4): 307– 316
- 朱华忠, 罗天祥, Christopher Daly. 2003. 中国高分辨率温度和降水模拟数据的验证. 地理研究, **22**(3): 349– 359
- 朱会义, 刘述林, 贾绍凤. 2004. 自然地理要素空间插值的几个问题. 地理研究, **23**(4): 425– 432

The application of Histogram method in spatial matching of satellite data validation

LIU Rui-xia^{1,2,3}, SHI Chun-xiang², LIU Jie⁴

1. Lab for Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Institute of the Atmospheric Physics, China Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellite, China Meteorological Administration, National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;

3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. China Meteorological press, Beijing 100081, China

Abstract A new method for spatial matching of data with different resolution was proposed by introducing the concept of standing and contour pixels in histogram theory, and was examined in quality validation using the sea surface temperature data obtained by FY2-C satellite. For comparing satellite data with grid data, this method can reduce the spurious error resulting from changed pixel characteristics in downscaling and upscaling. For comparing satellite data with station data, this method can give relatively accurate results while requiring less precise spatial matching.

Key words histogram, standing pixels, satellite product quality validation, spatial matching