

敦煌场地像元尺度地表反射率采样方法及 准确度研究

孙晗¹, 潘军¹, 高海亮^{2*}, 姜鹏¹, 豆新格¹, 王凯司¹, 陈林³, 刘李⁴, 韩启金⁴

¹吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130012;

²中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

³中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081;

⁴中国资源卫星应用中心, 北京 100094

摘要 敦煌国家辐射校正场每年都开展大量实验, 为国内外对地观测卫星提供定标服务, 但多年来敦煌场进行像元尺度地表反射率获取工作时, 有关地面光谱采样方案准确度的研究较少。为定量评估不同地面采样方法的准确度, 确定不同像元尺度地表反射率获取时采样点的最佳位置, 实现敦煌场高精度高效率业务化测量, 利用敦煌高分辨率无人机数据与 GF-1 卫星 2 m 全色数据对不同像元尺度地表反射率采样方法准确度进行定量分析。研究结果表明: 获取陆地卫星像元尺度地表反射率, 建议在敦煌 150 m 国家场的位置用 5 点系统采样方案初步标定 2 m 样方位置, 并用光谱仪在各 2 m 样方内用 5 点系统采样法进行测量; 对于气象卫星像元尺度, 建议在新选 3 km 场地用 5 点模拟退火采样方案确定 2 m 样方位置, 并用光谱仪在各 2 m 样方内用 5 点系统采样法进行测量。

关键词 遥感; 敦煌辐射校正场; 像元尺度; 地表反射率; 采样方法; 采样准确度

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1028009

Sampling Method and Accuracy of Pixel-Scale Surface Reflectance at Dunhuang Site

Sun Han¹, Pan Jun¹, Gao Hailiang^{2*}, Jiang Peng¹, Dou Xinge¹, Wang Kaisi¹, Chen Lin³,
Liu Li⁴, Han Qijin⁴

¹College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China;

²Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

³National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

⁴China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China

Abstract A large number of experiments are conducted at Dunhuang national radiometric correction field every year to provide calibration services for earth-observation satellites at home and abroad. However, over several years, there are only few studies regarding the accuracy of the ground spectral sampling scheme when Dunhuang field obtains pixel-scale surface reflectance. To quantitatively evaluate the accuracy of different ground sampling schemes, the best sampling point locations were determined to obtain the surface reflectance at different pixel scales and realize high-precision and high-efficiency operational measurement of Dunhuang field. The accuracy of surface reflectance sampling methods at different pixel scales was analyzed quantitatively using Dunhuang's high-resolution

收稿日期: 2021-08-10; 修回日期: 2021-08-19; 录用日期: 2021-08-25

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2018YFB0504800, SQ2018YFB0504803)

通信作者: *gaohl@radi.ac.cn

unmanned aerial vehicle data and 2 m panchromatic data from the GF-1 satellite. Based on the results, a five-point system sampling scheme is suggested to obtain pixel-scale surface reflectance from Landsat by preliminarily calibrating a 2 m quadrat within the 150 m national field in Dunhuang. For the pixel-scale resolution of meteorological satellites, the five-point-simulated annealing sampling scheme is suggested to determine the position of the 2 m quadrat in the newly selected 3 km site. In both the cases, a spectrometer is used to measure the five-point system sampling method in each 2 m quadrat.

Key words remote sensing; Dunhuang radiometric calibration site; pixel scale; surface reflectance; sampling method; sampling accuracy

1 引言

中国遥感卫星辐射校正场敦煌场以敦煌市郊戈壁滩为场地,具有表面均匀、气候干燥、方向特性较好等得天独厚的特性,是国际上公认的有利于传感器在轨辐射定标的戈壁场^[1]。自 2002 年通过国家验收以来,敦煌场每年都为我国在轨运行遥感卫星上仪器辐射校正提供支撑,是推动我国遥感技术及其应用定量化发展必不可少的基础设施之一^[2]。经多年建设发展,敦煌场地设施逐步完善,已成为国产对地观测遥感卫星(气象卫星、资源卫星、海洋卫星、环境减灾卫星、测绘地震及侦察卫星等)真实性检验与辐射定标的最重要场地^[3],与此同时也为一些国外对地观测卫星服务,敦煌场对国内外在轨卫星辐射定标和真实性检验都具有重要意义。

地面光谱采样是获取像元尺度地表反射率的重要方式^[4-5],其准确度会直接影响传感器定标结果和反射率产品真实性检验结果^[6]。采样点的位置分布会对地面光谱采样准确度产生影响,可以通过优化采样方案提高地面光谱采样准确度,令地面测量点尺度数据更高精度聚合到像元尺度^[7]。

已有像元尺度地面采样方法主要分为基于参考影像的采样方法与无需参考影像的采样方法两类。无需参考影像的采样方法是指不需要样区的任何先验数据,直接按照某种规律进行地面采样的方法,这类方法包括随机采样^[8]、系统采样^[9-11]、对角线采样^[12]等。在敦煌场获取陆地卫星像元尺度地表反射率时,中国资源卫星应用中心常用这类方法,在 550 m 测试区每隔 50 m 设置一个样方进行地面光谱测量^[13]。进行气象卫星像元尺度地面光谱采样时,国家卫星气象中心也常用这类方法,对 11 个均匀分布在 10 km 中心场的目标点进行观测^[14]。基于参考影像的采样方法是指需要样区历史影像作为先验数据,针对样区地表设计采样点布

局的采样方法,这类方法中具有代表性的有分层采样^[15]、四叉树采样^[16]和模拟退火采样法^[17,18]。

当前采样方法虽多,但对采样方法准确度的研究开展较少。上述两类采样方法中哪种更适合敦煌场地、哪种能满足尺度转换和定标精度要求?敦煌场地现有针对陆地卫星采样方法需要对上百个点进行观测,是否有必要?针对气象卫星在 10 km 场地内仅设 11 个目标点是否足够?这些样区能否适当减少采样点数量,从而减小进出场地造成的破坏^[19]?若能实现对采样方法准确度的定量分析,这些问题就能够得到解决。

本文参考了其他地表参数和其他场地采样思想及陆地卫星、气象卫星现有定标方法,开展了不同采样方法、不同采样点数量对点面尺度转换影响的相关研究,利用高分辨率影像作为参考数据,定量评价不同采样方法、不同采样点数量引起的点面尺度转换误差,从而评价采样方法的准确度、确定不同像元尺度的最优采样方法。

2 场地与方法

2.1 敦煌场地

敦煌国家辐射校正场位于甘肃省敦煌市西约 30 km 处(40.04° N~40.28° N, 94.17° E~94.5° E, 海拔约为 1200 m),为党河冲击扇叶戈壁,地势平坦,表层基本无植物生长,由多种砾石、砂及少量黏土组成,戈壁表面粒径分布比较均匀^[3,20]。且该校正场具有太阳辐射性强、光照充足、降水量少、蒸发强烈、能见度好等特点^[21]。

同步观测区面积往往根据卫星产品的分辨率设定,考虑临近像元效应通常将其设为 3×3~5×5 个像元大小。早期敦煌陆地卫星同步观测区面积常设为 550 m×550 m^[13]、气象卫星同步观测区常设为 10 km×10 km^[14,22]。随着卫星传感器技术的发展,卫星产品分辨率较早期已有很大提高,现有陆地卫星以 30 m 分辨率居多、气象卫星以 1 km 分辨率居

多,为了降低采样难度并提高采样准确度,本实验组将观测区面积分别设为 150 m×150 m(5×5 个像元大小)和 3 km×3 km(3×3 个像元大小)。

分别划定两块 150 m 陆地卫星同步观测区与两块 3 km 气象卫星同步观测区,对陆地卫星与气象卫星像元尺度地表反射率采样方法开展研究。首先在敦煌原 550 m 陆地卫星同步观测区内划出 150 m 区域(即“150 m 国家场”),在原 10 km 气象卫星同

步观测区内划出 3 km 区域(即“3 km 国家场”);然后以高分一号 2 m 分辨率卫星影像作为参考数据、空间变异系数为评价指标,在整个敦煌校正场范围内分别择出一块 150 m×150 m 最均匀区(后文称“150 m 新选场地”)和 3 km×3 km 最均匀区(后文称“3 km 新选场地”)。上述 150 m 国家场、150 m 新选场地、3 km 国家场与 3 km 新选场地位置分布如图 1 所示,经纬度信息如表 1 所示。

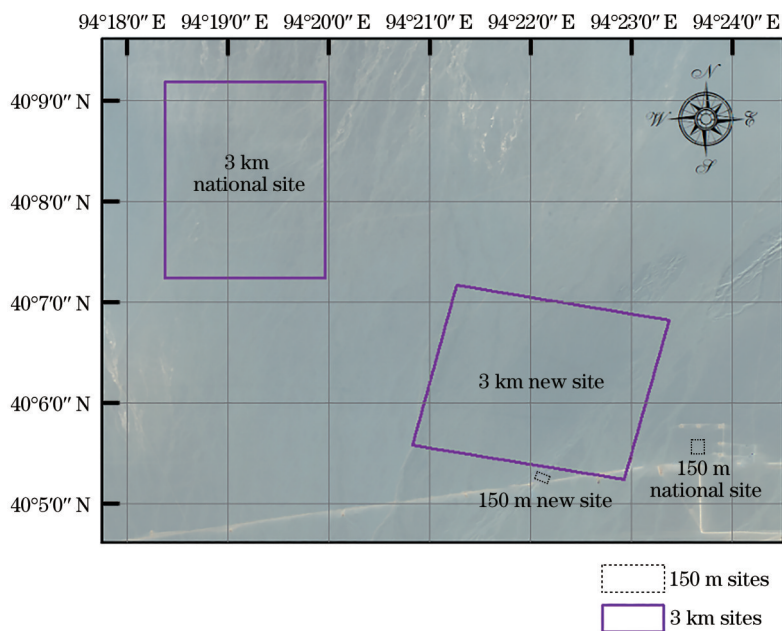


图 1 场地位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of site location

表 1 场地经纬度坐标信息

Table 1 Site longitude and latitude coordinate information

unit: (°)

Site corner		Northwest corner	Southwest corner	Southeast corner	Northeast corner
150 m national site	Longitude	94. 39355	94. 39355	94. 39485	94. 39485
	Latitude	40. 0936	40. 09198	40. 0936	40. 09198
150 m new site	Longitude	94. 36781	94. 36745	94. 36919	94. 36955
	Latitude	40. 08849	40. 08718	40. 08692	40. 08821
3 km national site	Longitude	94. 30625	94. 30625	94. 33271	94. 33271
	Latitude	40. 15317	40. 12079	40. 15317	40. 12079
3 km new site	Longitude	94. 35431	94. 34690	94. 38210	94. 38953
	Latitude	40. 11939	40. 09293	40. 08729	40. 11376

2.2 采样方法

在地面光谱采样工作中,测量人员常在场地内初步确定多个 2 m×2 m 的基本采样单元,在基本采样单元内用光谱仪进行多点测量。本实验组在进行采样方法研究时,分别对 2 m 基本采样单元在场地内的布设方案和 2 m 基本采样内光谱仪的测量方案开展研究。

确定样区内 2 m 基本采样单元的位置分布时,应使多个采样单元能更好地代表整个样区,在进行这部分采样方法研究时本实验组用到系统采样法与模拟退火采样法;确定光谱仪在 2 m 基本采样单元内的最佳测量方案时,要令多个测点的反射率数据更好地代表 2 m 采样单元反射率,对其开展研究时本实验组用到随机采样法与系统采样法。

2.2.1 系统采样

系统采样按照一定的空间间隔布设样点,令样点均匀分布在目标区域。2 m 基本采样单元内,地

面光谱测量点个数分别为 1,5,9,16,25 的系统采样方案如图 2 所示。像元尺度内,基本采样单元个数为 1,5,9,16,25 的系统采样方案如图 3 所示。

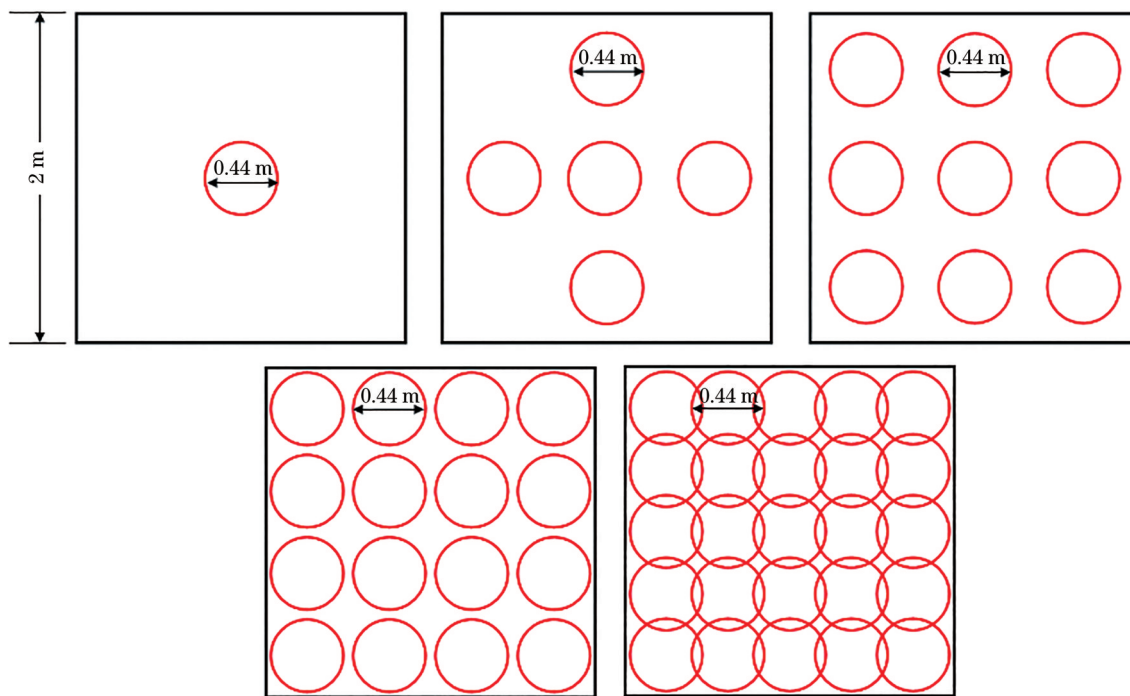


图 2 2 m 基本采样单元内光谱测量点系统采样分布

Fig. 2 Sampling distribution of spectrometer system in 2 m basic sampling unit

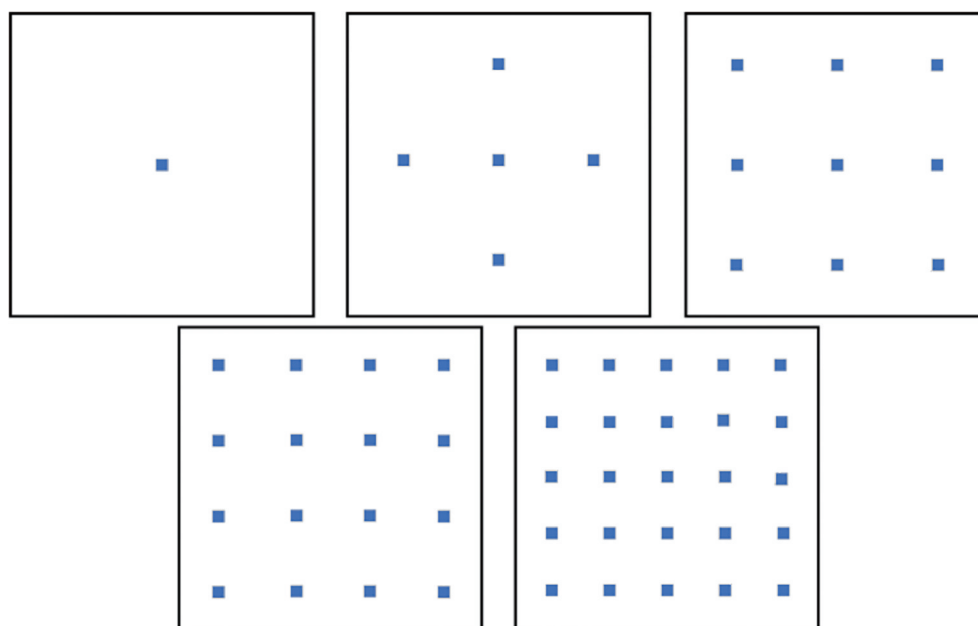


图 3 像元尺度内基本采样单元系统采样分布

Fig. 3 Sampling distribution of basic sampling unit system in pixel scale

2.2.2 模拟退火采样

1982 年, Kirkpatrick 等首次提出模拟退火算法用于解决大规模组合优化问题^[18]。该算法受到

Metropolis 等于 1953 年提出的 Metropolis 准则启发, 基于物理中固体物质退火过程与一般组合优化问题之间的相似性, 对固体退火过程的物理图像和

统计性质进行模拟,从而求出组合优化问题的近似最优解^[23]。模拟退火算法在迭代过程中以一定概率接受较差解,可有效避免陷入局部极小并最终趋于全局最优,是解决组合优化问题的有效近似算法^[24]。

采样点布局优化问题属于组合优化问题,即求在整个样区具有最优代表性的采样点组合,可以利用模拟退火算法实现对各场地样点布局的优化^[25]。本实验组进行 2 m 面尺度到像元面尺度采样方法研究时用到模拟退火采样。将样区的多时相历史影像作为参考数据模拟真实地表,将每个像元位置视为一个可采样点,用模拟退火算法对参考影像进行计算,在采样点个数确定的情况下,求出令采样准确度最高的采样点布局^[17-18]。采样相对误差是评价采样方案准确度的重要指标,将模拟退火算法目标函数设为采样点在多景参考影像上的采样相对误差之和。单景影像上的采样相对误差 E_{RS} 与目标函数 $f(E_{RS})$ 的表达式为

$$E_{RS} = \frac{|m_{\text{allpoints}} - m_{\text{sample}}|}{m_{\text{allpoints}}}, \quad (1)$$

$$f(E_{RS}) = \sum_{k=1}^N E_{RS,k}, \quad (2)$$

式中: $m_{\text{allpoints}}$ 为参考影像所有像元均值; m_{sample} 为采样点均值; N 为参考影像数量; $E_{RS,k}$ 为第 k 景参考影像的相对误差。

2.3 基于高分辨率影像的采样准确度分析方法

采样准确度是指采样结果与场地真值间的一致程度,相对误差与平均相对误差是评价准确度的常用指标^[26],相对误差与平均相对误差值小,采样准确度高,反之采样准确度低。本实验组基于这两个指标用高分辨率影像模拟真实地表,对不同采样方案的准确度开展定量评估。优化采样是为了减小由采样点代表性有限引起的后续尺度转换过程的误差,由于敦煌场地较均匀,本实验组选择这类场地常用的尺度转换方法——算术平均法对采样数据进行升尺度转换^[27-28]。该方法用地面多个点测量的算术平均值作为像元尺度相对真值与待检验产品估算值进行对比,这种尺度转换方法的相对误差计算公式与采样相对误差的计算公式恰好一致,所以本实验中采样点的尺度转换相对误差相当于采样方案的相对误差。

通过高分辨率影像分析地面光谱采样准确度对影像幅宽和分辨率都有一定要求。地面光谱测

量时,光谱仪视场直径约为 0.44 m,而高分一号全色卫星影像数据分辨率为 2 m,像元覆盖区域比光谱仪视场范围大得多,所以仅采用卫星影像进行不确定度分析所得结果缺乏可靠性;无人机(UAV)遥感技术可以快速获取区域的遥感图像,数据可以满足分辨率方面的要求,但无人机飞行高度有限,捕捉地面的范围有限^[29],数据无法覆盖整个样区大小,所以不能仅通过无人机数据对整个像元尺度采样准确度进行分析。为了克服影像数据的限制从而实现对采样方法准确度的定量评估,可以将尺度转换分解为地面点尺度到 2 m 面尺度和 2 m 面尺度到像元面尺度两个步骤,地面点尺度到 2 m 面尺度的采样准确度分析需要分辨率远高于 0.44 m、数据覆盖范围不小于 2 m 的影像,无人机数据可以充分满足该条件;而 2 m 面尺度到像元面尺度的采样准确度分析需要分辨率不低于 2 m、覆盖范围达到千米级的影像数据,高分一号全色数据与该要求吻合。因此本实验组分别利用高分辨率无人机影像与卫星数据计算这两部分采样相对误差,衡量采样方法准确度。

2.3.1 地面点尺度到 2 m 面尺度采样准确度分析方法

地面点尺度指光谱仪捕捉地面点范围尺度,根据光谱仪视场角与测量时的高度推算,点尺度约为直径为 0.44 m 的圆。地面点尺度到 2 m 面尺度的采样准确度即地面测量准确度,对其进行定量计算需借助高分辨率无人机影像模拟真实地表,将 2 m 基本采样单元的无人机影像所有像元值均值作为该基本采样单元真值,在采样单元内选取多个地面光谱测量点并求其均值作为采样单元的地面测量值,计算测量值与真值相对误差,用于衡量点到 2 m 面尺度的采样准确度,过程如图 4 所示。

地面光谱测量过程在无人机影像上进行模拟,将模拟值作为地面光谱测量值:光谱仪视场角通常固定为 25°,故根据光谱仪到地面距离可推算光谱仪测量范围,例如图 5,光谱仪距地面 1 m,推算出光谱仪测量范围是直径约为 0.44 m 的圆。在 2 m 范围无人机数据内选取像元作为地面测量点中心做圆,采用反距离加权法模拟出地面光谱测量的像元灰度值。设无人机数据分辨率为 0.08 m,光谱仪测量范围直径为 0.44 m,单点地面光谱测量模拟值计算范围如图 6 所示。将地面光谱测量的各个单点模拟值取均值作为 2 m 采样单元的地面光谱测量值。

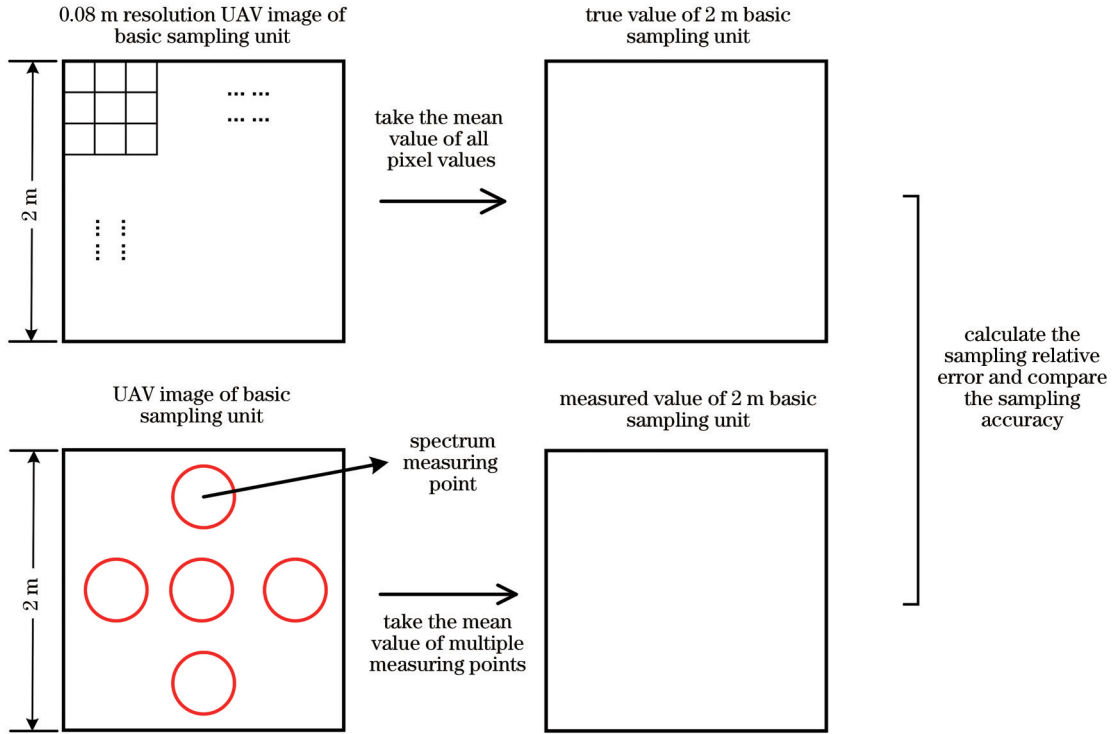


图 4 地面测量准确度分析示意图

Fig. 4 Schematic diagram of ground measurement accuracy analysis

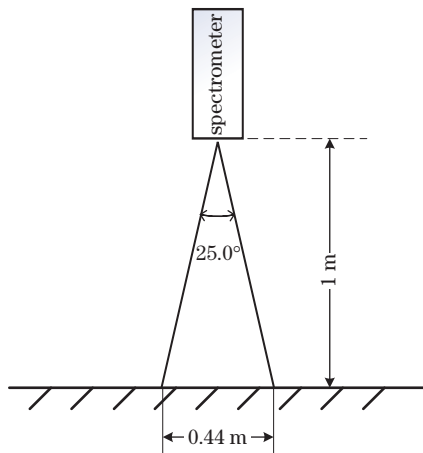


图 5 地面光谱测量示意图

Fig. 5 Schematic of ground spectrum measurement

无人机数据有 3 个波段(RGB), 根据上述步骤模拟计算得到的单个采样点在 n 波段的模拟值为 $V_{SV,n}$, 将其取均值得到样点均值 $V_{SM,n}$, 影像所有像素在 n 波段均值为 $V_{AM,n}$, 此时单景影像上 n 波段的采样相对误差的表达式为

$$E_{RE,n} = \frac{|V_{AM,n} - V_{SM,n}|}{V_{AM,n}} \quad (3)$$

本实验组用多景无人机数据评估各个采样方案准确度, 将多景影像在多个波段的平均采样相对

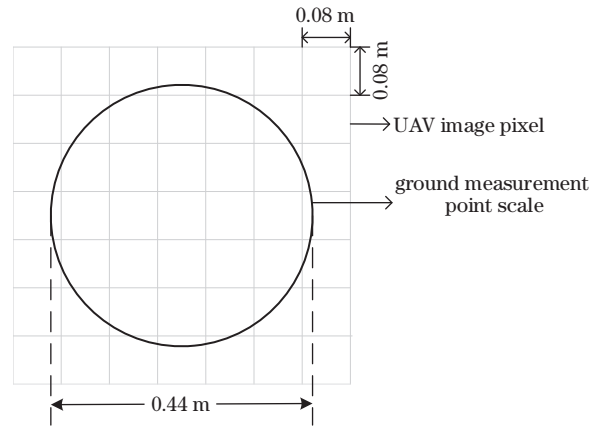


图 6 无人机数据模拟地面测量点尺度

Fig. 6 UAV data simulation ground measurement point scale

误差(MSRE)作为采样方案的准确度衡量标准, 采样方案的单波段平均相对误差 $MSRE_n$ 与 MSRE 的表达式为

$$E_{MSRE_n} = \frac{\sum_{p=1}^P E_{RE,n-p}}{P} \quad (4)$$

$$E_{MSRE} = \frac{\sum_{n=1}^3 E_{MSRE_n}}{3} \quad (5)$$

式中: $E_{RE,n-p}$ 指第 p 景影像上第 n 波段的采样相对误差; P 为影像数量。

2.3.2 2 m 面尺度到像元面尺度采样准确度分析方法

像元面尺度分为陆地卫星像元尺度与气象卫星像元尺度,分别为 150 m×150 m 与 3 km×3 km。2 m 到像元面尺度的采样准确度借助 2 m 分辨率卫星数据定量评估。用高分辨率卫星影像模拟真实地表,在影像上进行采样模拟计算准确度,将影像上目标场地范围内所有 2 m 像元 Digital Number(DN)值取平均作为场地真值;根据 2 m 采样单元坐标位置找出其在目标场地影像中对应的 2 m 像元位置,将所有 2 m 采样单元对应的像元 DN 值取平均作为目标场地观测值;求出观测值与真值的相对误差,作为 2 m 面尺度到目标场地尺度采样准确度评价指标。

进行这部分采样准确度计算时,本实验组采用成

像日期在参考影像之后的多时相真值影像衡量不同采样方案准确度,将多景真值影像上的最大采样相对误差(E_{MRS})作为这部分采样准确度的评价指标。

$$E_{MRS} = \text{Max}(E_{RS,k}), k = 1, \dots, N. \quad (6)$$

3 结果分析

3.1 地面点尺度到 2 m 面尺度的采样准确度

为了分析不同采样方法的准确度,对比采样方法优劣并找到 2 m 采样单元内的最佳测量方案,本实验组将 2020 年 9 月 18 日在敦煌辐射校正场拍摄的 11 景高分辨率无人机数据裁剪成 137 幅 2 m 大小影像对不同采样方法进行分析,裁剪过程如图 7 所示。无人机数据含 RGB 三个波段,根据影像上靶标的大小估算其分辨率约为 0.0035 m。

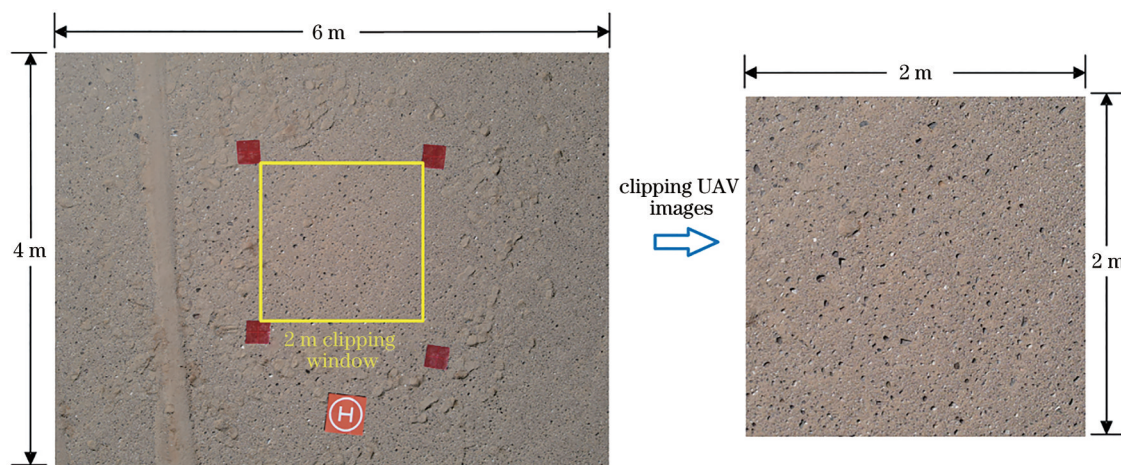


图 7 无人机数据裁剪示意图

Fig. 7 Schematic diagram of UAV data clipping

将 2 m 基本采样单元内的光谱采样点个数设为 1, 5, 9, 16, 25, 分析随机采样与系统采样两种方法的准确度,比较两种方法优劣。在 2 m 的无人机影像上模拟随机采样过程中,需注意在距离 2 m 边界不小于 0.22 m(光谱仪视场半径)的范围内随机选择视场中心位置,以保证光谱仪测量视场完全落在 2 m 采样单元内。计算得到采样方案在 137 幅无人机数据上的 137 组采样相对误差值(RGB 三个波段,每个波段 137 个值),将各波段的多个相对误差取均值,得到采样方案在不同波段的采样平均相对误差,结果如图 8 所示。

地面点尺度到 2 m 面尺度采样相对误差结果表明,在采样点数相同情况下,系统采样准确度明显高于随机采样,在 2 m 基本采样单元内进行光谱测量应优先选用系统采样法。在 RGB 三个波段上,不

同采样方法对采样相对误差的影响趋势大致相同,采样误差都随采样点个数增多而下降;同种采样方法在 R 波段的误差略大于 G 波段, G 波段的误差略大于 B 波段。

系统样点数为 1 时仅增设 4 个点至 5 个采样点, R 波段的采样平均相对误差即可从 1.183% 降至 0.563%、减小了 0.62 个百分点, G 波段采样平均相对误差从 1.041% 降至 0.507%、减小了 0.534 个百分点, B 波段采样平均相对误差可从 0.968% 降至 0.498%、减小了 0.47 个百分点; 25 个点较 5 个点的采样方案多设了 20 个样点,误差降低幅度却很小, R 波段采样平均相对误差由 0.563% 降至 0.266%、仅减小了 0.337 个百分点, G 波段采样平均相对误差由 0.507% 降至 0.201%、仅减小了 0.306 个百分点, B 波段采样平均相对误差由

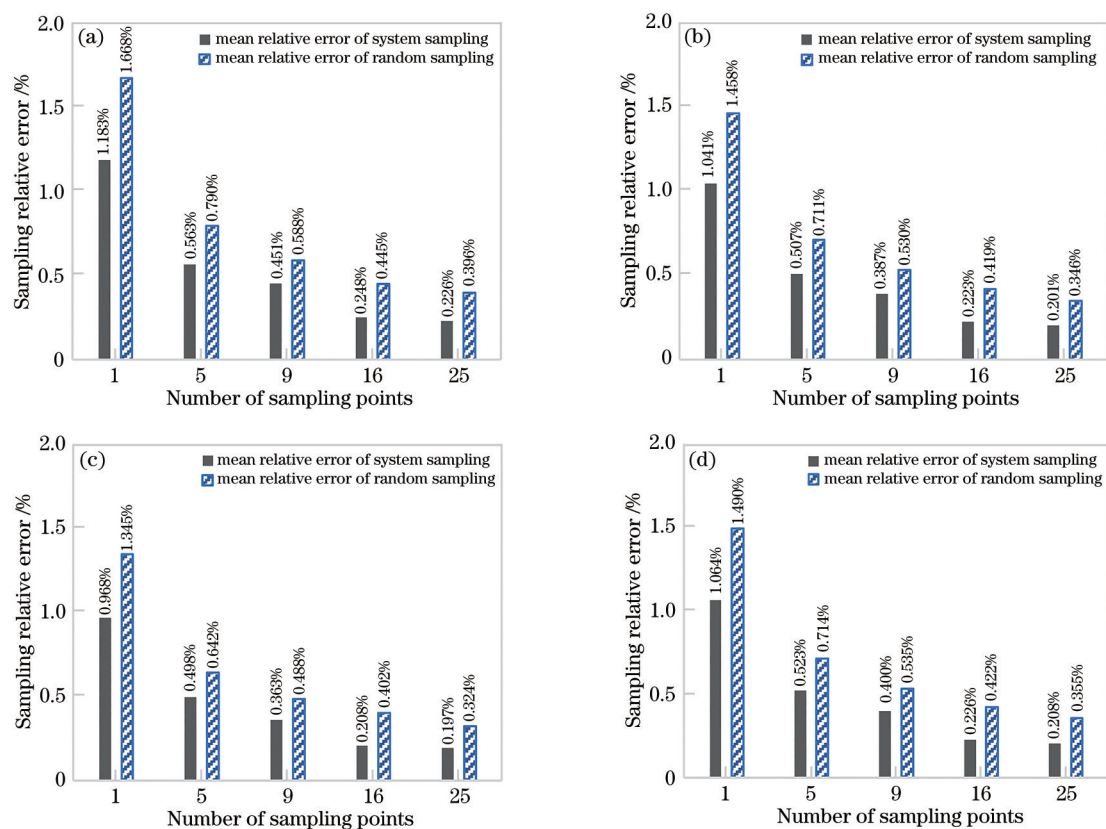


图 8 地面点尺度到 2 m 面尺度采样平均相对误差。(a) R 波段; (b) G 波段; (c) B 波段; (d) RGB 波段
 Fig. 8 Sampling average relative error from ground point scale to 2 m surface scale. (a) R band; (b) G band; (c) B band; (d) RGB bands

0.498% 降至 0.197%、仅减小了 0.301 个百分点。

除了 RGB 波段各自的采样误差外,将采样方法在三个波段的平均相对误差取均值作为衡量采样方法准确度的另一个参考指标。5 点系统采样较 1 点系统采样仅多 4 个点,三个波段平均相对误差均值由 1.064% 降至 0.523%,减小了 0.541 个百分点;25 点系统采样三个波段平均相对误差均值为 0.208%,较 5 点系统采样多了 20 个样点,平均相对误差仅减小了 0.315 个百分点。

以上结果说明:样点个数为 5 的系统采样方案准确度较高,采样平均相对误差仅为 0.523%,也可以保证较高的采样效率。

3.2 2 m 面尺度到像元面尺度的采样准确度

分析像元面尺度内 2 m 基本采样单元的最佳布设方案时,将基本采样单元个数设为 1,5,9,16,25,分别采用系统采样法和模拟退火采样法进行对比分析。

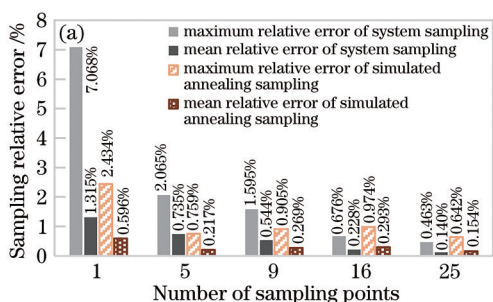
本实验组利用 4 块研究场地 2013 年—2019 年的晴天高分一号 2 m 分辨率数据对 2 m 到像元面尺度的采样方法准确度进行分析,其中以 2013 年—2015 年数据作为参考影像用于计算模拟退火采样法的样点布局,2016 年—2019 年的数据作为真值影像用于模拟真实地表采样、计算系统采样与模拟退火采样方案准确度,具体情况如表 2 所示。

表 2 四块场地高分一号数据列表
 Table 2 Data list of GF-1 in four sites

Site	From 2013 to 2015	From 2016 to 2019	Total number of images
150 m	National site	4	15
	New site	7	15
3 km	National site	11	9
	New site	5	13

3.2.1 2 m 到 150 m 面尺度的采样准确度

计算各采样方案在 150 m 场地的多景真值影像上采样相对误差,将多景影像上的采样相对误差取



均值与最大值,得到采样方案的平均相对误差与最大相对误差,对比采样方法准确度时以最大相对误差为主要参考指标,结果如图 9 所示。

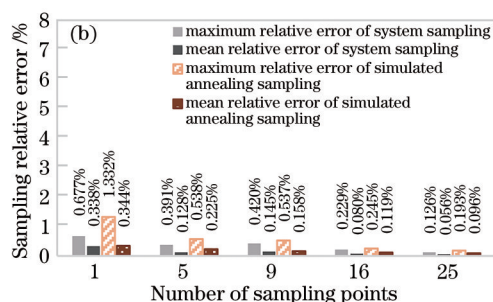


图 9 2 m 到 150 m 尺度采样相对误差。(a) 150 m 新选场地;(b) 150 m 国家场

Fig. 9 Sampling relative error from 2 m to 150 m scale. (a) 150 m new site; (b) 150 m national site

从图 9 可以看出,两块 150 m 场地中国家场采样准确度明显优于新选场地,在进行陆地卫星验证时,建议在原国家场进行地面光谱采样。150 m 国家场在采样点数相同情况下,系统采样准确度明显高于模拟退火采样,选用系统采样法较便捷且采样准确度高。当采样相对误差需控制在 0.5% 时,建议用 5 点系统采样法(最大相对误差为 0.391%),与 1 点系统采样的 0.677% 相比仅多 4 个点就可以将采样最大相对误差降低 0.286 个

百分点;当相对误差需控制在 0.3% 时,选用 16 个样点的系统采样法即可,采样最大相对误差可低至 0.229%。

3.2.2 2 m 到 3 km 面尺度的采样准确度

计算得到采样方案在 3 km 场地多景真值影像上采样相对误差,将这些值取均值和最大值作为评价采样方法准确度的指标,并以最大采样相对误差为主要评价指标,采样平均相对误差与最大相对误差结果如图 10 所示。

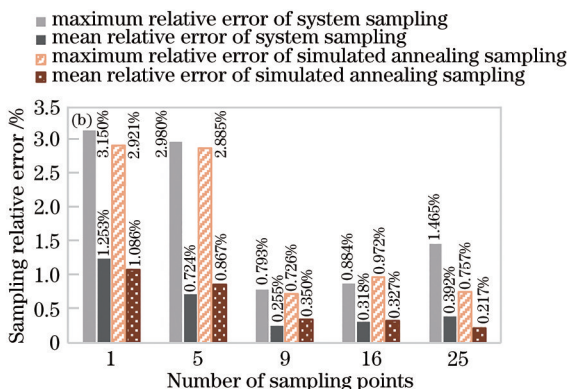
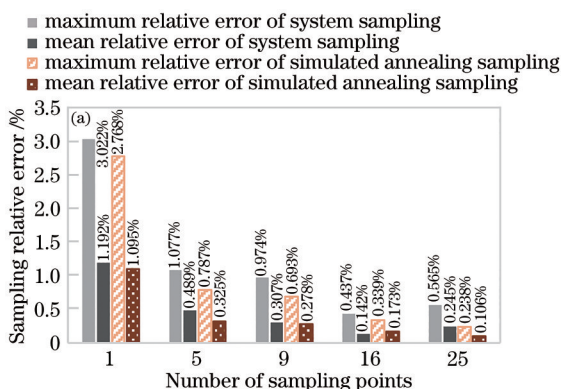


图 10 2 m 到 3 km 尺度采样相对误差。(a) 3 km 新选场地;(b) 3 km 国家场

Fig. 10 Sampling relative error from 2 m to 3 km scale. (a) 3 km new site; (b) 3 km national site

由 3 km 场地采样相对误差结果可以看出,新选 3 km 场地的采样稳定性与规律性明显好于 3 km 国家场,在进行气象卫星验证时,建议在新选 3 km 场地进行地面光谱采样。3 km 新选场地在采样点数相同情况下,模拟退火采样准确度明显优于系统采样,建议选用模拟退火采样法。当采样相对误差需控制在 1% 以内时,选用 5 点模拟退火采样方法即可将最大采样相对误差控制在 0.787%,较 1 点模拟退火采样法(最大采样不确定度为 2.768%)多 4 个点即可

将最大相对误差降低 1.981 个百分点,样点个数为 25 时,模拟退火采样最大相对误差为 0.238%,较 5 点增设 20 个点相对误差却仅降低 0.549 个百分点,此时选用 5 点的模拟退火采样法不仅准确度高还可以保证较高的采样效率。当采样相对误差需控制在 0.5% 时,选用 16 个点的模拟退火采样方法即可将最大采样相对误差控制在 0.339%。当采样相对误差需控制在 0.3% 时,选用 25 个点的模拟退火采样方法即可将最大采样相对误差控制在 0.238%。

4 讨 论

针对敦煌场获取不同分辨率像元尺度地表反射率应如何采样的问题,基于高分辨率影像的采样准确度分析法对不同采样方法进行了定量比较。本实验组将采样准确度分析过程拆解为地面测量点尺度到 2 m 面尺度采样准确度分析与 2 m 面尺度到像元面尺度采样准确度分析两个步骤,通过不同尺度下的各采样方法的准确度分析结果做以下四方面讨论:

样区的均匀程度等条件对采样准确度有很大影响,在大小相同位置不同的样区采样结果有较大差异,获取高分辨率像元尺度地表反射率建议在 150 m 国家场、低分辨率像元尺度则建议在新选 3 km 场地。这是因为选择新选场地时仅采用了一个日期的参考影像,影像日期前后时段场地可能会发生变化,但 150 m 国家场所在区域常年被围栏保护不易遭到破坏,场地均匀性与稳定性都比较好,所以其采样准确度整体较 150 m 新选场地好;而

3 km 国家场与 3 km 新选场地都没有围栏保护,两块场地都比较容易发生变化,单景参考影像选择的场地有一定参考价值,所以 3 km 新选场地的采样准确度优于国家场。

地面测量点尺度到 2 m 面尺度采样,采用系统 5 点采样法可以保证较高的采样准确度和采样效率,采样平均相对误差为 0.523%。

获取高分辨率陆地卫星像元尺度真值,建议在 150 m 国家场按 5 点系统采样方案进行 2 m 基本采样单元的布设测量地面反射率,此时采样准确度可以满足定标要求,最大采样相对误差为 0.391%,最短采样路径仅约为 238 m,工作量较小。若有特殊要求,需将 2 m 到 150 m 尺度的采样相对误差限制在 0.3% 以内,可以按照 16 点系统采样方案布设 2 m 基本采样单元,最大采样相对误差为 0.229%。150 m 场地采样方案样点分布如图 9 所示,5 点系统采样点经纬度坐标如表 3 所示,16 点系统采样如表 4 所示。

表 3 150 m 国家场 5 点系统采样经纬度坐标

Table 3 Longitude and latitude coordinates of sampling points in 5-point system of 150 m national site unit:(°)

Sample number	1	2	3	4	5
Longitude	94.3942	94.3942	94.39376	94.39464	94.3942
Latitude	40.09333	40.09225	40.09279	40.09279	40.09279

表 4 150 m 国家场 16 点系统采样经纬度坐标

Table 4 Longitude and latitude coordinates of sampling points in 16-point system of 150 m national site unit:(°)

Sample number	1	2	3	4	5	6	7	8
Longitude	94.39371	94.39404	94.39436	94.39469	94.39371	94.39404	94.39436	94.3947
Latitude	40.0934	40.0934	40.0934	40.0934	40.09299	40.09299	40.09299	40.09299
Sample number	9	10	11	12	13	14	15	16
Longitude	94.39371	94.39404	94.39436	94.3947	94.39371	94.39404	94.39436	94.3947
Latitude	40.09259	40.09259	40.09259	40.09259	40.09219	40.09219	40.09219	40.09219

获取低分辨率气象卫星像元尺度真值,建议在 3 km 新选场地用 5 点模拟退火采样测量,该方案采样时间较短效率高且采样准确度较高满足相对误差低于 1% 的定标要求,能将 2 m 到 3 km 尺度转换相对误差控制在 0.787% 以内,样点的经纬度坐标如表 5 所示,遍历这些样点的最短路径长度约 5.16 km,按人的慢行速度 3 km/h、每个 2 m 采样单元的测量时

长为 3 min 估算,约 2 h 可以完成全部测量工作。若需将采样相对误差控制在 0.5% 或 0.3% 以内,可以采用 16 点模拟退火采样法和 25 点模拟退火采样法,采样最大相对误差分别为 0.339% 和 0.238%。3 km 场地采样方案样点分布如图 11 所示,5 点模拟退火采样点经纬度如表 5 所示,16 点、25 点模拟退火采样点具体位置如表 6、7 所示。

表 5 3 km 新选场地 5 点模拟退火采样经纬度坐标

Table 5 Longitude and latitude coordinates of 5 simulated annealing sampling points in 3 km new site unit:(°)

Sample number	1	2	3	4	5
Longitude	94.35794	94.38047	94.38589	94.35839	94.36292
Latitude	40.11092	40.09074	40.10985	40.10998	40.10344

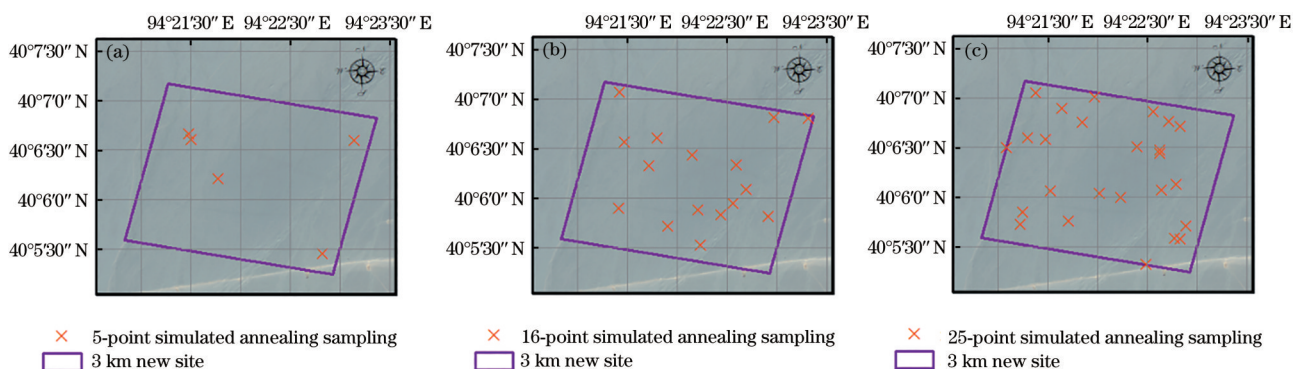


图 11 2 m 到 3 km 像元尺度采样方案。(a) 5 点模拟退火采样点分布；(b) 16 点模拟退火采样点分布；(c) 25 点模拟退火采样点分布

Fig. 11 Sampling scheme from 2 m to 3 km. (a) Distribution of 5-point simulated annealing sampling points; (b) distribution of 16-point simulated annealing sampling points; (c) distribution of 25-point simulated annealing sampling points

表 6 3 km 新选场地 16 点模拟退火采样经纬度坐标

Table 6 Longitude and latitude coordinates of 16 simulated annealing sampling points in 3 km new site unit:(°)

Sample number	1	2	3	4	5	6	7	8
Longitude	94. 37661	94. 38198	94. 3633	94. 37024	94. 36929	94. 36194	94. 38296	94. 37824
Latitude	40. 10553	40. 09679	40. 11004	40. 09793	40. 10714	40. 10528	40. 1134	40. 10137
Sample number	9	10	11	12	13	14	15	16
Longitude	94. 35699	94. 37405	94. 35687	94. 37615	94. 36508	94. 37066	94. 38875	94. 35792
Latitude	40. 11773	40. 09708	40. 09814	40. 09909	40. 0952	40. 09207	40. 11327	40. 10937

表 7 3 km 新选场地 25 点模拟退火采样经纬度坐标

Table 7 Longitude and latitude coordinates of 25 simulated annealing sampling points in 3 km new site unit:(°)

Sample number	1	2	3	4	5
Longitude	94. 38061	94. 37741	94. 35877	94. 35501	94. 37336
Latitude	40. 11184	40. 10114	40. 10091	40. 10985	40. 10837
Sample number	6	7	8	9	10
Longitude	94. 37999	94. 38068	94. 35145	94. 38157	94. 36702
Latitude	40. 10211	40. 09279	40. 10821	40. 09507	40. 10055
Sample number	11	12	13	14	15
Longitude	94. 36422	94. 36182	94. 3538	94. 35416	94. 36628
Latitude	40. 11244	40. 0959	40. 09527	40. 09735	40. 11672
Sample number	16	17	18	19	20
Longitude	94. 37871	94. 35798	94. 3797	94. 37064	94. 36068
Latitude	40. 11257	40. 10956	40. 09297	40. 09979	40. 11481
Sample number	21	22	23	24	25
Longitude	94. 37714	94. 37607	94. 37491	94. 37724	94. 35638
Latitude	40. 10784	40. 11427	40. 08861	40. 10723	40. 11746

5 结 论

经上述分析讨论,考虑采样效率与采样准确度两种因素,敦煌场地获取陆地卫星像元尺度地表反射率时,在 150 m 国家场用 5 点系统采样方案标定 2 m 样方位置最佳;获取气象卫星像元尺度地表反射率时,在 3 km 场地 2 m 样方布设用 5 点模拟退火

采样方案最佳;在 2 m 样方内建议用光谱仪进行 5 点系统采样测量。

参 考 文 献

[1] 郭建宁, 闵祥军, 傅俏燕, 等. CBERS-02 CCD 和 SPOT-4 HRVIR1 两个传感器的敦煌场地在轨绝对辐射定标及对比分析[J]. 遥感学报, 2006, 10(5):

- 624-629.
- Guo J N, Min X J, Fu Q Y, et al. The in-flight absolute calibrations for CBERS-02 CCD and SPOT-4 HRVIR1 sensors at Dunhuang test site and the comparison based on their coefficients[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 624-629.
- [2] 李元, 张勇, 胡丽琴, 等. 中国遥感卫星辐射校正场敦煌戈壁场区光环境变化研究[J]. *中国光学*, 2021, 14(5): 1231-1242.
- Li Y, Zhang Y, Hu L Q, et al. Investigation of optical environment changes in the Dunhuang Gobi site of the Chinese radiometric calibration sites[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1231-1242.
- [3] 庞伟伟, 郑小兵, 陆俊桦, 等. 敦煌辐射校正场地表反射率稳定性分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2015, 10(6): 472-481.
- Pang W W, Zheng X B, Lu J H, et al. Reflectance characteristics of Dunhuang radiometric calibration test site[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, 10(6): 472-481.
- [4] 胡秀清, 张玉香, 邱康睦. 采用辐照度基法对 FY-1C 气象卫星可见近红外通道进行绝对辐射定标[J]. *遥感学报*, 2003, 7(6): 458-464.
- Hu X Q, Zhang Y X, Qiu K M. In-flight radiometric calibration for VIR channels of FY-1C satellite sensor by using irradiance-based method[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(6): 458-464.
- [5] 吕佳彦, 何明元, 陈林, 等. 基于敦煌辐射校正场的自动化辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0801003.
- Lü J Y, He M Y, Chen L, et al. Automated radiation calibration method based on Dunhuang radiometric calibration site[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0801003.
- [6] 包诗薇, 陈洪耀, 张黎明, 等. 基于灰阶靶标的光学传感器绝对辐射定标及反射率反演验证[J]. *光学学报*, 2021, 41(4): 0428001.
- Bao S W, Chen H Y, Zhang L M, et al. Absolute radiometric calibration of optical remote sensor based on gray-scale targets method and reflectance inversion validation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0428001.
- [7] 吴小丹, 闻建光, 肖青, 等. 关键陆表参数遥感产品真实性检验方法研究进展[J]. *遥感学报*, 2015, 19(1): 75-92.
- Wu X D, Wen J G, Xiao Q, et al. Advances in validation methods for remote sensing products of land surface parameters[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(1): 75-92.
- [8] 家淑珍. HiWATER 试验中叶面积指数地面采样方法的优化[J]. *山西师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 32(3): 56-64.
- Jia S Z. Optimization of ground sampling method of leaf area index in HiWATER[J]. *Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, 32(3): 56-64.
- [9] 赵理, 欧阳涛, 刘振华, 等. 基于泛克里金插值法的 Landsat8 热红外数据的高空间分辨率地表温度反演[J]. *科技通报*, 2019, 35(4): 135-141, 145.
- Zhao L, Ouyang T, Liu Z H, et al. The land surface temperature retrieved from Landsat8 thermal infrared data based on the universal kriging interpolation method[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2019, 35(4): 135-141, 145.
- [10] 廖嫣然, 盖颖颖, 姚延娟, 等. 尺度效应的叶面积指数产品真实性检验方法[J]. *遥感学报*, 2015, 19(1): 143-152.
- Liao Y R, Gai Y Y, Yao Y J, et al. Validation methods of LAI products on the basis of scaling effect[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(1): 143-152.
- [11] 刘婷. 不同空间尺度森林 LAI 遥感估算及真实性检验[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019: 28-41.
- Liu T. Remote sensing estimation and authenticity test of forest LAI at different spatial scales[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019: 28-41.
- [12] 黄彦. 不同生育期小麦叶面积指数遥感反演对光谱和空间尺度的响应研究[D]. 南京: 南京大学, 2015: 21-26.
- Huang Y. The response of remotely sensed retrieval of wheat leaf area index to spectral and spatial scale in different growth stages[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015: 21-26.
- [13] 余晓磊, 巫兆聪. 环境卫星 CCD 传感器场地辐射定标与交叉定标的比较[J]. *传感技术学报*, 2011, 24(10): 1435-1439.
- Yu X L, Wu Z C. The comparison between HJ satellite's CCD sensors field calibration and cross calibration[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2011, 24(10): 1435-1439.
- [14] 戎志国, 张玉香, 邱康睦, 等. 利用敦煌辐射校正场对 FY-2B 静止气象卫星进行可见光通道的在轨辐射定标[J]. *应用气象学报*, 2004, 15(3): 266-272.
- Rong Z G, Zhang Y X, Qiu K M, et al. Radiometric calibration on orbit for fy-2b meteorological satellite's visible channels with the radiometric calibration site of Dunhuang[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2004, 15(3): 266-272.
- [15] 王春梅, 占玉林, 魏香琴, 等. 非均质中低分辨率像元土壤含水量地面采样方法研究进展[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(4): 1414-1419.

- Wang C M, Zhan Y L, Wei X Q, et al. Ground sampling strategy for surface soil moisture in heterogeneous remote sensing pixels[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(4): 1414-1419.
- [16] 李慧宇. 遥感温度产品真实性验证及空间尺度转换研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 36-40.
Li H Y. The research of validation of remote sensing temperature products and spatial scale[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 36-40.
- [17] 晋锐, 李新, 阎保平, 等. 黑河流域生态水文传感器网络设计[J]. 地球科学进展, 2012, 27(9): 993-1005.
Jin R, Li X, Yan B P, et al. Introduction of eco-hydrological wireless sensor network in the Heihe River Basin[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(9): 993-1005.
- [18] 李亭亭. 基于时序遥感数据的水环境时空采样布局优化方法研究: 以鄱阳湖叶绿素为例[D]. 武汉: 武汉大学, 2018: 64-67.
Li T T. Spatio-temporal sampling schemes optimization for aquatic environment based on time-series remote sensing data: a case study of chlorophyll in Poyang Lake[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018: 64-67.
- [19] 杜沈达, 张运杰, 韦玮, 等. 太阳天顶角对反演高光谱地表反射率影响分析[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0229001.
Du S D, Zhang Y J, Wei W, et al. Analysis of influence of solar zenith angle on reconstruction of hyperspectral surface reflectance[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0229001.
- [20] 张允祥, 李新, 韦玮, 等. 基于多通道温度与发射率分离算法的敦煌场地红外特性研究[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1028003.
Zhang Y X, Li X, Wei W, et al. Infrared characteristics of Dunhuang site based on multichannel temperature and emissivity separation algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1028003.
- [21] 傅肖燕, 闵祥军, 李杏朝, 等. 敦煌场地 CBERS-02 CCD 传感器在轨绝对辐射定标研究[J]. 遥感学报, 2006, 10(4): 433-439.
Fu Q Y, Min X J, Li X C, et al. In-flight absolute calibration of the CBERS-02 CCD sensor at the Dunhuang test site[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(4): 433-439.
- [22] 韦玮. 基于全球定标场网的卫星传感器长时间序列定标方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
Wei W. Research on long time series radiometric calibration of satellite sensor based on global calibration site network[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [23] 康立山, 谢云, 尤矢勇, 等. 非数值并行算法-第一册-模拟退火算法[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
Kang L S, Xie Y, You S Y, et al. Non numerical parallel algorithms-volume 1-simulated annealing algorithm[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [24] 谢云. 模拟退火算法综述[J]. 微计算机信息, 1998, 14(5): 66-68.
Xie Y. A summary on the simulated annealing algorithm [J]. Control & Automation, 1998, 14(5): 66-68.
- [25] 韩宗伟, 黄魏, 罗云, 等. 基于路网的土壤采样布局优化: 模拟退火神经网络算法[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 891-900.
Han Z W, Huang W, Luo Y, et al. Application of simulated annealing method and neural network on optimizing soil sampling schemes based on road distribution[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 891-900.
- [26] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 遥感产品真实性检验导则: GB/T 36296—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Guide for the validation of remote sensing products: GB/T 36296—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [27] 李新, 马明国, 王建, 等. 黑河流域遥感—地面观测同步试验: 科学目标与试验方案[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 897-914.
Li X, Ma M G, Wang J, et al. Simultaneous remote sensing and ground-based experiment in the Heihe River Basin: scientific objectives and experiment design [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(9): 897-914.
- [28] 彭菁菁, 刘强, 闻建光, 等. 卫星反照率产品的多尺度验证与不确定性分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(1): 66-82.
Peng J J, Liu Q, Wen J G, et al. Multi scale verification and uncertainty analysis of satellite albedo products[J]. Scientia Sinica (Terra), 2015, 45(1): 66-82.
- [29] 李加慧, 谭奋利, 曾晨欣, 等. 无人机载超低空宽覆盖遥感相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1422001.
Li J H, Tan F L, Zeng C X, et al. Design of optical system for UAV-borne ultralow-altitude wide-coverage remote sensing camera[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1422001.