

面向高分卫星遥感共性产品真实性检验的 无人机空港布局

刘俊伟^{1,2}, 陈鹏飞¹, 鹿明³, 廖小罕^{1,4}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 安徽大学农业生态大数据分析与应用技术国家地方联合工程技术研究中心, 合肥 230601;
3. 钱学森空间技术实验室, 北京 100094; 4. 天津中科无人机应用研究院, 天津 301800)

摘要: 针对高分卫星遥感共性产品真实性检验对无人机数据的需求, 本文以已有野外台站为依托, 开展无人机空港布局研究。首先, 综合考虑影响卫星产品空间变异的因素, 构建了地理背景覆盖率的物理模型; 其次, 基于地理背景覆盖率改进覆盖模型提出最大地理背景覆盖模型, 并利用简单随机抽样中的样本容量确定方法确定合理的空港数量, 分别利用本文提出的最大地理背景覆盖模型和已有最大面积覆盖模型进行空港布局的研究; 最后, 对两种模型下的空港布局结果进行对比, 并利用MODIS EVI数据产品对布局结果进行验证。结果表明, 在空港数有限的条件下($n=60$), 最大面积覆盖模型选择的空港, 其服务范围内的地理背景覆盖率为26.66%, 能代表70.37%的中国陆地区域, 而最大地理背景覆盖模型选择的空港, 其服务范围内的地理背景覆盖率为38.32%, 能代表73.36%的中国陆地区域。最大地理背景覆盖模型比最大面积覆盖模型能获得更优的空港布局结果, 可用于支撑中国区域面向高分卫星遥感共性产品真实性检验的无人机观测网络建设。

关键词: 无人机空港布局; 最大地理背景覆盖模型; 最大面积覆盖模型; 高分卫星遥感共性产品
DOI: 10.11821/dlxb202111002

1 引言

高分卫星遥感共性产品是指符合高分卫星数据应用产品3~5级分级要求, 超过2个行业专题产品生产所需要的、且可利用同步实测数据或同类产品、模型进行直接或间接真实性检验的数据应用产品, 它包括地表反射率等45种产品^[1]。高分卫星遥感共性产品是许多行业应用产品生产所需的中间数据, 保证其生产精度与规范化对推动中国遥感技术应用具有重要意义。

为保证卫星产品的质量, 其中一个关键步骤就是要对产品进行真实性检验。它是指通过机载或地面同步观测得到的“真值”与遥感产品的观测结果进行对比分析, 从而正确评估遥感产品的精度^[2-4]。多尺度逐级检验是引入高分辨率数据作为尺度转换的过渡桥梁, 先由地面实测数据检验高分辨率遥感数据产品, 然后再通过高分辨率遥感数据产品检验卫星产品的真实性检验方法^[5]。它是观测点不充足且观测数据的尺度与遥感数据的像元尺度不匹配、地面观测结果与遥感产品像元值无法直接进行对比开展直接检验情况

收稿日期: 2020-09-07; 修订日期: 2021-09-12

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项(21-Y20B01-9001-19/22); 中国科学院战略先导科技专项(XDA23100100)

[Foundation: Major Project of High-resolution Earth Observation System, No.21-Y20B01-9001-19/22; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA23100100]

作者简介: 刘俊伟(1996-), 男, 安徽合肥人, 硕士生, 研究方向为定量遥感。E-mail: liujunwei19961102@163.com

通讯作者: 陈鹏飞(1982-), 男, 河南许昌人, 博士, 副研究员, 研究方向为遥感应用。E-mail: pengfeichen@igsrr.ac.cn

下,主要采用的卫星产品真实性检验手段^[6-8]。无人机遥感数据可作为这种尺度转换的高分辨率数据的数据源。

中国幅员辽阔,土地类型多样,若只以单一地点进行无人机观测,无法实现对短期过境、覆盖范围广阔的卫星数据产品进行检验。因此,需要在全国多地同时设置多个观测地点,建设空港基地,形成无人机观测网,来实现对大尺度卫星产品的真实性检验。廖小罕等^[9]提出无人机空港的概念,它应具有机库、验证场等基础设施条件,并具备支撑一定距离内进行无人机遥感观测的能力。空港布局本质上是一个设施选址的问题。Webber在1909年最早提出选址问题^[10]。根据选址目标区域的特征其可分为连续选址和离散选址两类问题。连续选址问题是假设可以在平面上任意点进行选址,其代表性模型包括交叉中值法和重心法;离散选址问题是备选地点是确定的几个地点,从这几个有限的产所中选择最优的点作为建设中心,其代表性模型包括混合—整数规划法、最大覆盖模型、集合覆盖模型、P中值模型法等^[11-13]。无人机空港的建设需要消耗一定的人力、财力,如果能依托成熟的站点将会大大节约建设成本。自20世纪50年代开始,为科学研究需要,中国各研究单位在全国各地建立了多个野外观测实验站,这些野外台站分布广泛,类型多样,具有典型的地域代表性^[14]。无人机作为一种高效的数据来源,目前许多野外台站也配置了无人机作为实验数据的获取手段,因此可依托野外观测台站建设无人机空港中心。基于野外观测台站来选择无人机空港就是离散选址问题,目前关于这方面的研究还很少,仅见鹿明等^[15]针对洪涝灾害应急监测研究了无人机空港的布局方式。但他们仅考虑用洪涝灾害风险等级作为影响空港布局的因子,来修正最大覆盖模型建立解析方程,因此结果仅适合洪涝灾害应急监测应用。高分共性产品的空间变异情况显然与洪涝灾害分布不同,其受土地覆被状况、地形地貌条件等多种因素的影响,怎样综合考虑各种因素,针对高分共性产品真实性检验建立一种高效的空港布局解析方程,还未有人研究。另外,鹿明等^[15]在确定空港数量时并没有给出确切的计算依据,也没有对选择的空港位置利用实测数据进行验证,而这些都是保障无人机空港切实支撑实际应用的先决条件。

因此,本文基于土地利用数据和生态地理分区数据,在提出地理背景覆盖率概念模型,定量评价区域地理单元空间变异性的基础上,以已有野外台站为基础,围绕如何构建面向高分遥感卫星共性产品真实性检验的无人机遥感观测网络开展相关模型构建研究,并基于相关卫星产品对模型计算结果进行验证。

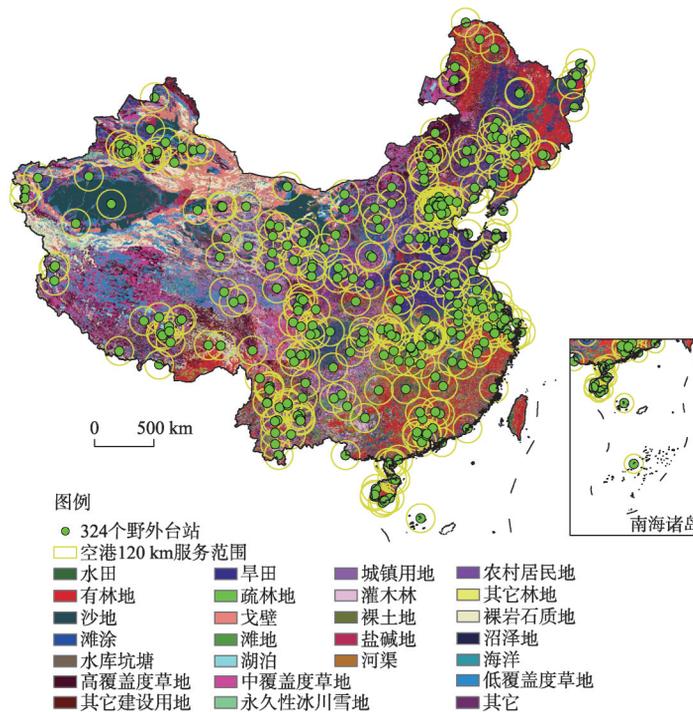
2 材料与方法

2.1 数据收集

本文收集的数据包括野外台站数据、土地利用数据、生态地理分区数据和MODIS EVI (Enhanced Vegetation Index) 数据。其中,前3种数据用来研究面向高分卫星遥感共性产品真实性检验的无人机空港布局方式,而MODIS EVI数据用来对结果进行验证。

2.1.1 野外台站数据 中国科学院、林业科学院以及农业部的野外观测台站数量较多,建设也较为完备,因此本文主要选择了这3家单位建设的野外台站作为无人机空港的备选建设地。其中,选择的中国科学院的野外台站数量为268个,中国林业科学院的台站数量为32个,农业部野外台站数量为24个。324个野外台站的空间分布如图1所示。

2.1.2 土地利用数据 土地利用数据收集自中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>) 的中国土地利用现状遥感监测数据库。数据年份为2015年,空间分辨率



注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2021)5447号地图绘制,底图边界无修改。

图1 2015年土地利用背景下中国324个野外台站空间分布

Fig.1 Spatial distribution of 324 field stations based on the land use map in 2015

为1 km, 主要采用目视解译的方式依托Landsat OLI影像制作, 包括6个1级类, 25个2级类(图1)。中国土地利用现状遥感监测数据库每5年更新一次, 是目前中国精度较高的一套土地利用数据库。2015年土地利用数据出版至今得到了广泛验证, 在精度有保证的前提下时效性较强, 且公里格网是研究国家尺度资源环境变异常采用的尺度, 因此选择该数据作为研究空港布局的数据源之一。

2.1.3 生态地理分区数据 生态地理区划是根据地域分异规律和其自然整体性, 从生态学的角度, 利用自然地理区划的原理和方法对某一区域进行系统分类和规划, 它为分析生态环境问题和生物多样性等研究提供了科学依据^[14]。由于不同生态地理区域的内部特征不同, 因此生态地理区划反映了自然环境及其区域差异性。本文使用的中国生态地理分区由郑度院士提出^[16], 是根据气温、湿度、地形等因子将中国划分为48个生态地理区域, 各区域内气候和植被具有最大的均质性。目前, 该区划已被广泛应用于已有研究工作中。本文通过中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>) 获取相关数据, 数据格式为矢量。

2.1.4 MODIS EVI数据 高分遥感共性产品的分发目前还不畅通, 获取时间及流程较长。为对设计的无人机空港位置进行验证, 本文采用了MODIS EVI光谱指数数据。EVI是人们反演陆表参数时, 经常采用的数据源。它与多种高分共性产品具有相同的空间分异规律。本文所用EVI数据为2018年8月月度合成数据, 空间分辨率为1 km, 数据来源于美国航天局NASA网站 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)。

2.2 数据分析方法

2.2.1 地理背景覆盖率的物理模型 针对高分卫星共性产品真实性检验来选择无人机空港

位置,需要明确空间每块土地对真实性检验的重要性。地理背景指构成一个区域的自然和人文地理要素,包括地形、气候、土壤、植被等众多要素。如前所述,共性产品包括地表反射率等45种产品。它们的空间变异大多与地理背景相关。怎样将地理背景用数字化的公式来衡量,是解决空港布局问题的关键之一。

由于在空间上找不到两块具有完全一致地理背景的土地,往往只能找到具有相似特征的区域,为衡量任意一块土地所具有的地理背景对验证高分遥感共性产品的作用,本文定义了地理背景覆盖率的概念模型。其中,地理背景覆盖率定义为某地理单元所具有的地理背景信息占一个区域内所有地理背景信息的百分比。本文认为其可用该地理单元所具有的土地利用特征和其所代表的生态系统状况来衡量,计算方法如公式(1)~(4)所示。地理背景覆盖率的计算以生态地理分区数据为主,因为它综合考虑了大尺度温度、湿度、地形地貌和植被特征,然后以土地利用数据为辅,对每个划分的地理单元进行评估。特殊地,当地理单元同时处于多个生态地理分区中,它的地理背景覆盖率按照其不同区域所在的生态地理分区分别计算,然后进行累加。

$$F_k = \sum_{j=1}^N F_{kj} \quad (1)$$

$$F_{kj} = \frac{E_{kj}}{\sum_{k=1}^m E_{kj}} \times \frac{100}{N} \quad (2)$$

$$E_{kj} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_{ki}}{H_k} \times B_{ij} \right) \quad (3)$$

$$B_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sum_{i=1}^n C_{ij}} \quad (4)$$

式中: F_k 为地理单元 k 的地理背景覆盖率; F_{kj} 为地理单元 k 在生态地理分区 j 中的地理背景覆盖率,考虑了一些地理单元同时分布于多个生态地理分区的情景; E_{kj} 为地理单元 k 在生态地理分区 j 中的权重; m 为生态地理分区 j 中地理单元的个数; N 为生态地理分区个数,本文认为整个研究区的地理背景覆盖率为100,各生态地理分区的地理背景覆盖率均相等为 $100/N$; D_{ki} 代表在地理单元 k 中土地类型 i 的面积; H_k 代表地理单元 k 的面积; B_{ij} 代表土地类型 i 在生态地理分区 j 中的权重; n 为生态地理分区 j 中土地利用类型的数量; C_{ij} 表示土地利用类型 i 在生态地理分区 j 中的面积。

2.2.2 最大面积覆盖模型和最大地理背景覆盖模型 最大覆盖模型(Maximal Covering Location Problem, MCLP)用于解决在有限的服务设施点下,服务总价值最大的问题,其最早由Church和Revelle提出^[17]。无论在理论上还是实践中,它都被证明是选址问题最有用的模型之一^[18-20]。定义设施的最大覆盖距离为 R ,且 d_{pq} 为需求点 p 至候选设施点 q 的距离。当 $d_{pq} \leq R$ 时,即为候选设施点 q 覆盖需求点 p 。 x_q 和 y_p 为二元变量, $x_q = 1$ 表示设施点 q 被选中, $x_q = 0$ 表示设施点 q 未被选中; $y_p = 1$ 表示需求点 p 被覆盖, $y_p = 0$ 表示需求点 p 未被覆盖。最大覆盖模型如公式(5)所示。当设施总数(u)、覆盖距离(R)及需求点价值(w_p)都给定时,求使总价值 $\max(f)$ 最大的解即为设施的最优位置。

$$\max(f) = \sum w_p y_p, \quad u = \sum x_q \quad (5)$$

式中: w_p 表示第 p 个需求点的价值; I 为所有需求点集合; J 为所有设施点集合; x_q 和 y_p 为二元变量, $x_q \in [0, 1]$ 、 $y_p \in [0, 1]$ 、 $p \in I$ 、 $q \in J$ 。

最大覆盖模型最常用的形式就是设定 $w_p = 1$ ^[15], 此时模型认为所有需求点的服务价值都相等, 计算结果要求覆盖的区域面积最大, 可称为最大面积覆盖模型。本文选择最大面积覆盖模型作为无人空港位置布局采用的模型之一, 此时认为空间每个地理单元对高分共性产品验证的价值都相同。另外, 针对卫星产品真实性检验, 本文基于地理背景覆盖率作为权重改进最大覆盖模型, 设定 $w_p = F_k$, 此时的最大覆盖模型计算结果要求覆盖的地理背景最大, 在此称为最大地理背景覆盖模型。最大地理背景覆盖模型在本文中同样作为选择空港布局方式采用的模型之一。

2.2.3 基于最大面积覆盖模型和最大地理背景覆盖模型的空港布局解析 为基于最大面积覆盖模型和最大地理背景覆盖模型解析无人空港布局方式, 还需要明确设施总数 (u) 和覆盖距离 (R) 的值。其中, 在同时考虑市面常用固定翼和旋翼无人机的续航时间以及以空港为中心用车辆向四周机动运输能力的基础上, 覆盖距离 (R) 设定为 120 km。另外, 考虑到建设成本和效益, 显然不能将所有野外台站建设成无人空港, 只适合选择少量效益高的台站进行建设。为确定合适数量的空港, 本文采用数理统计中不重复抽样的样本容量确定方法来计算^[21], 计算如公式 (8) 所示。其中, 总体容量 (w) 为 324 个野外台站; 总体标准差 (S) 以地理背景覆盖率为参数计算; 误差界限 (e) 设为 0.1; 分位数 (z) 设为 95% 置信度下的分位数 1.96。最终计算获得最优的空港数量为 60 个。

在利用不同模型解析无人空港布局方式时, 首先将中国陆地区域按 40 km×40 km 进行离散化, 每个格网单元作为一个地理单元, 提取中心作为需求点集合; 其次, 以野外观测台站作为待选空港位置, 以 120 km 为空港覆盖最大距离, 并进行缓冲区分析, 落在缓冲区内的需求点即空港能覆盖的需求点; 然后, 以前面构建的最大面积覆盖模型、最大地理背景覆盖模型来分别建模并求解不同方法下的无人空港位置选址; 最后, 对不同方法的结果进行对比与验证。技术路线如图 2 所示。

$$U = \frac{z^2 S^2}{e^2 + \frac{z^2 S^2}{w}} \quad (8)$$

式中: U 为空港数; w 为总体数 (此时为所有野外台站数); S 为总体的标准差; e 为误差界限; z 为服从正态分布的置信区间对应的分位点。

2.2.4 基于最大面积覆盖模型和最大地理背景覆盖模型的空港布局结果验证 本文基于 MODIS EVI 数据从空间代表性来评价不同模型筛选空港位置的优劣。评价时, 采用了简单外推法^[22]。简单外推法的基本原理是通过设定阈值, 以待评价站点为中心不断扩张,

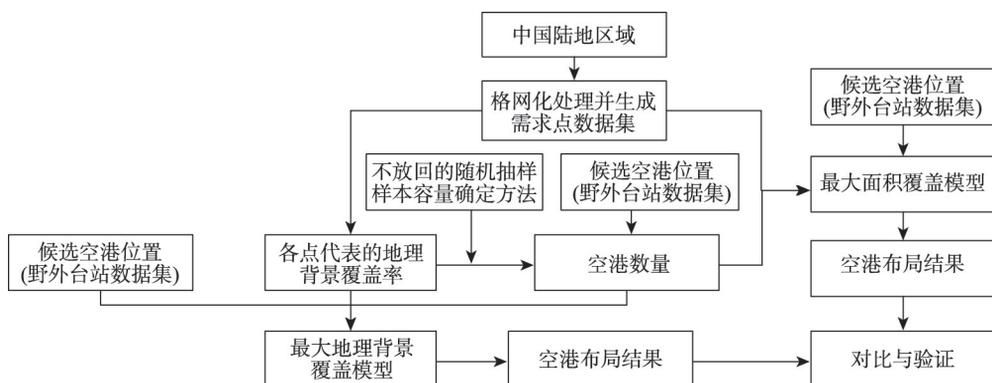


图2 技术路线图

Fig. 2 Technical roadmap

并统计符合阈值条件的区域的面积作为站点代表的区域^[23]。本文选择空港位置 120 km 服务范围内 EVI 平均值的 5% 作为变化阈值, 然后以 10 km 为步长将空港的服务半径自 120 km 不断进行扩张, 并统计每种模型选择的空港位置在阈值控制下所能代表的国土面积, 具体计算如公式 (9)~(10) 所示。

$$|v_q - \bar{v}_q| < threshold, (q = 1, 2, \dots, u) \quad (9)$$

$$T = \sum_{q=1}^u l_q \quad (10)$$

式中: *threshold* 为设置的阈值, 这里为空港 *q* 位置 120 km 内 EVI 平均值的 5%; \bar{v}_q 为空港 *q* 位置 120 km 覆盖下 EVI 的平均值; v_q 为以空港 *q* 位置为中心不断范围扩增后, 覆盖范围内 EVI 的平均值; l_q 为到达空港 *q* 阈值时, 空港 *q* 最终可代表的区域大小; *u* 为空港数 60; *T* 为所有空港代表的区域大小 (不计重叠部分)。

3 结果与分析

3.1 所有野外台站都使用时的地理背景覆盖率

涉及中国科学院、林业科学院以及农业部的 324 个野外台站主要分布在中国中、东部地区 (图 1), 西部和北部地区由于其荒漠、戈壁的地形, 台站建设难度较大, 因此台站分布较少。另外, 还可看出许多台站都分布的较为集中, 导致服务范围存在交叉。以 120 km 作为台站的服务范围, 所有野外台站覆盖的中国陆地面积占总面积的 64.34%, 地理背景覆盖率达到 58.82%。

3.2 基于最大面积覆盖模型的无人机空港布局

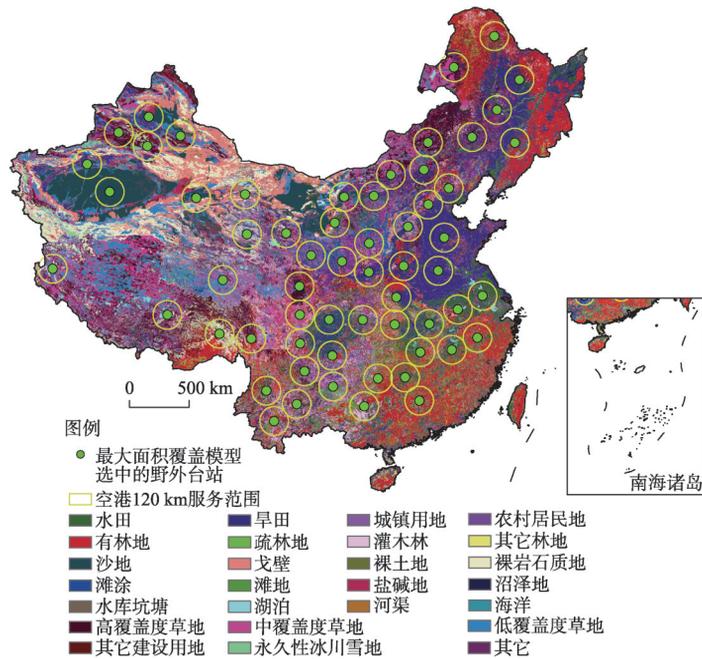
基于最大面积覆盖模型选择的 60 个无人机空港布局情况如图 3 所示。此时, 空港服务区域覆盖的陆地面积占中国陆地总面积的 28.15%, 而地理背景覆盖率总和为 26.66%。从图 3 中可看出, 选出的作为空港位置的野外台站在全国范围内分布的较为均匀, 台站之间的间隔距离较远。因此, 基于最大面积覆盖模型的空港布局, 其 120 km 服务范围之间的重叠交叉区域较小。这是因为该模型未考虑不同地理单元地理背景的差异, 只以覆盖最大面积为前提, 选取的台站只要求覆盖尽可能多的区域。最大面积覆盖模型的布局方案保障了每个地区的公平性, 使得在有限的无人机空港数量下, 服务范围覆盖到最大区域, 扩大了无人机的观测面积, 但是对高分产品验证的价值未有所考虑。例如选取西部地区的有些空港位置, 虽然它们覆盖了较多的地理单元, 但是这些地理单元的土地类型只有一种, 包含的地理背景信息较少。

3.3 基于最大地理背景覆盖模型的无人机空港布局

基于最大地理背景覆盖模型选择的 60 个无人机空港布局情况如图 4 所示。此时, 空港服务区域覆盖陆地面积占中国陆地总面积的 24.47%, 而地理背景覆盖率总和为 38.32%。这是因为在最大地理背景覆盖模型中, 本文使用了地理背景覆盖率作为权重来选择空港位置, 因此在这种模型下选取的台站要求地理背景覆盖率总和最高, 而不是覆盖的地理单元数量最多。地理背景覆盖率的主要影响因素为植被类型的数量和其在所在生态地理分区中面积占比, 此时选出的空港位置周围的土地利用类型相对丰富。最大地理背景覆盖模型的布局方案使得区域观测价值达到最高, 增加了无人机空港的实际意义。

3.4 基于最大面积覆盖模型和最大地理背景覆盖模型的空港布局结果对比与验证

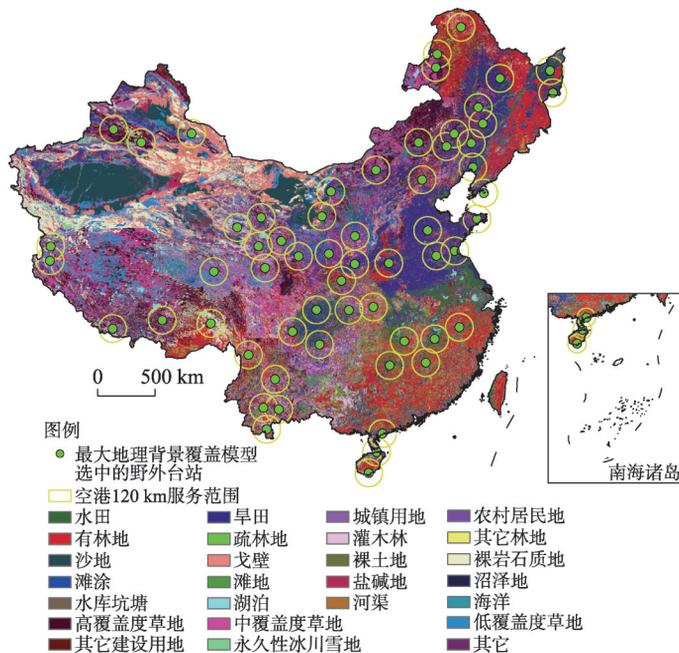
基于最大面积覆盖模型和最大地理背景覆盖模型的地理背景覆盖率随选择的无人机空港数量增加变化曲线如图 5 所示。从图 5 中可看出, 随着空港数量的不断增加, 两种模



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2021)5447号地图绘制,底图边界无修改。

图3 基于最大面积覆盖模型确定的无人机空港位置及服务覆盖区域

Fig. 3 Spatial distribution of unmanned aerial vehicle airports selected by maximal area covering model and its service coverage



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2021)5447号地图绘制,底图边界无修改。

图4 基于最大地理背景覆盖模型确定的无人机空港位置及服务覆盖区域

Fig. 4 Spatial distribution of unmanned aerial vehicle airports selected by geographical background covering model and its service coverage

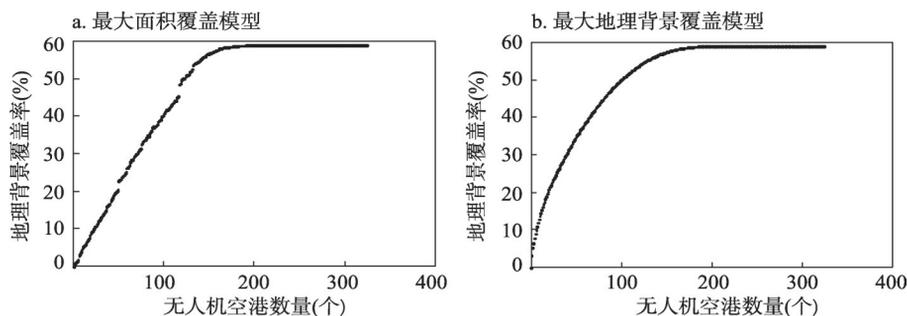


图5 地理背景覆盖率随无人机空港数量增加的变化曲线

Fig. 5 Variation of geographical background coverage with the increase in the number of unmanned aerial vehicle airports

型选择空港的地理背景覆盖率不断增加,且二者都在空港数量达到198个时,地理背景覆盖率达到最高为58.82%。这表明当无人机空港数量在没有限制的条件下,分别基于两种模型选择的空港布局服务效果是相似的,并无显著差异。而在无人机空港数量有限的条件下,最大地理背景覆盖模型明显比最大面积覆盖模型更具有针对性,其选择的无人机空港会导致地理背景覆盖率更快的增长。

基于MODIS EVI数据,利用简单外推法对两种模型下获得空港位置服务区域的代表性进行评价,结果表明基于最大面积覆盖模型选择空港位置,其服务范围所能代表的陆地面积占国土面积的比例为70.37%,而基于最大地理背景覆盖模型选择空港位置,其服务范围所能代表的陆地面积占国土面积的比例为73.36%。综上所述,相较于最大面积覆盖模型,最大地理背景覆盖模型其选择空港位置的真实性更强,对高分卫星共性产品的真实性检验作用更大。

4 讨论

地面观测数据由于尺度问题,通常无法直接与卫星产品的数据进行对比验证,因此需要在二者之间引入高分辨率的无人机遥感数据作为过渡,然后进行逐级检验。但由于飞行高度和续航能力的约束,无人机无法随时待命,其获取数据的空间范围有限,因此在地面建设无人机空港,依托无人机空港网络在卫星过境时,短时间内获取较大区域无人机影像,来实现对卫星产品验证很有必要。高分遥感共性产品的空间变异主要受地表覆盖情况的影响,本文基于地理背景信息进行无人机空港的布局,对构建全国网络化、长期运行的高分遥感共性产品验证网络具有重要的意义。

本文以中国科学院、中国林业科学院、农业部野外观测台站作为无人机空港的备选地具有一定的现实依据。这是因为单独选址建设无人机空港来构建高分遥感共性产品验证网络,其建设成本较大,而这些已有的野外台站经过多年发展已具备较为成熟的软、硬件条件和网络体系,并且一些台站由于研究需求,已经配备了一定数量的无人机,在资源配备上具有先天优势。因此,依托这些已有野外台站来建立高分遥感共性产品验证网络可大大节省开支。但是依托野外台站建设空港也有局限性,西部地区由于地势、资源等限制,野外台站分布不均且数量较少,因此以这些台站为服务中心的无人机空港,其服务能力会受到限制。为此,今后也可考虑在主要依托已有野外台站作为空港基地的基础上,结合实际需求适当在西部一些地理背景丰富地区,新建一些空港基地,以满足高分共性产品验证需求。

如前所述,目前还未有针对高分卫星遥感共性产品验证需求,从及时获取无人机数据的角度来开展空港布局的研究。仅见鹿明等针对中国洪涝灾害应急监测开展的无人机空港布局方面的工作。在他们的工作中,基于洪涝风险灾害等级来作为权重构建最大洪涝覆盖模型,结果表明在空港数量为81个时,最大洪涝覆盖模型比最大面积覆盖模型在面向洪涝监测方面选择的空港位置更有针对性^[15]。洪涝风险是一种单因素的应急监测,而高分卫星遥感产品的验证需要考虑的因素显然要更多,需要构建复合模型来综合各因素的影响。本文首先根据高分卫星遥感共性产品空间变异的影响因素,提出地理背景覆盖率的物理模型来综合各因素的影响,然后基于地理背景覆盖率提出最大地理背景覆盖模型,并基于科学的统计学方法来确定空港的合理数量,同时利用卫星产品数据对空港布局结果进行验证,因此本文针对高分卫星遥感产品真实性检验,提出了更为科学的无人机观测网络布局形式。

针对高分遥感共性产品验证,空港的业务运行需要有标准化的流程。首先,应通过高分项目办与台站建立合作,采用双方共建或者多方共建的形式来进行空港基地建设,使其拥有无人机、传感器、飞手等各种软、硬条件;其次,搭建一套完备的任务规划系统,在获取卫星过境时间的前提下,通过系统确定卫星观测的区域,根据区域迅速协调周边空港开展无人机数据和地面数据采集工作;最后,对各种观测数据进行质量校对,在质量合格的前提下按照既定算法生成无人机数据产品,并将无人机数据产品进行尺度转换,进一步对卫星产品进行验证。

5 结论

针对高分卫星遥感共性产品真实性检验需求,本文以已有科研院所建设的野外台站作为无人机待选空港位置,考虑到地理背景信息是影响卫星产品变异的主要因素,依托土地利用和生态地理分区数据提出地理背景覆盖率的物理模型,并基于地理背景覆盖率改进覆盖模型形成最大地理背景覆盖模型,利用简单随机抽样样本容量确定方法获得空港数量的基础上,分别基于最大地理背景覆盖模型和最大面积覆盖模型确定无人机空港的空间布局,并基于MODIS EVI数据对空港布局结果进行验证,结果表明空港数为60时,最大面积覆盖模型选择的空港,其地理背景覆盖率为26.66%,而最大地理背景覆盖模型选择空港,其地理背景覆盖率为38.32%;利用MODIS EVI数据产品的验证结果表明最大面积覆盖模型选择的空港,其服务区域可代表中国70.37%的陆地区域,而最大地理背景覆盖模型选择空港,其服务区域可代表中国73.36%的陆地区域。本文提出的最大地理背景覆盖模型可更好的用于无人机空港选择。对于空港的业务运行,可以在实现空港软、硬件建设的前提下,搭建完备的任务规划与数据分析系统,从而根据卫星过境时间及区域,协调无人机观测和地面采样,并按标准生产相关数据产品对共性产品进行验证。

参考文献(References)

- [1] China National Space Administration. China National Report on High-Score Satellite Applications in 2018 (Common Product Volume). 2018. [中国国家航天局. 2018年中国高分卫星应用国家报告(共性产品卷). 2018.]
- [2] Liu Qiyue, Yu Tao, Gao Hailiang, et al. Methods and application for the validation of remote sensing geometrical products. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2018, 27(10): 7-10, 17. [刘其悦, 余涛, 高海亮, 等. 遥感卫星几何产品真实性检验方法与应用. *测绘工程*, 2018, 27(10): 7-10, 17.]

- [3] Wang Weihe, Zhang Xingying, An Xingqin, et al. Analysis for retrieval and validation results of FY-3 Total Ozone Unit (TOU). *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(17): 1726-1733. [王维和, 张兴赢, 安兴琴, 等. 风云三号气象卫星全球臭氧总量反演和真实性检验结果分析. *科学通报*, 2010, 55(17): 1726-1733.]
- [4] Justice C, Belward A, Morisette J, et al. Developments in the "validation" of satellite sensor products for the study of the land surface. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(17): 3383-3390.
- [5] Wu Xiaodan, Wen Jianguang, Xiao Qing, et al. Advances in validation methods for remote sensing products of land surface parameters. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(1): 75-92. [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. *遥感学报*, 2015, 19(1): 75-92.]
- [6] Peng Jingjing, Liu Qiang, Wen Jianguang, et al. Multi-scale validation strategy for satellite albedo products and its uncertainty analysis. *Scientia Sinica: Terrae*, 2015, 45(1): 66-82. [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. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(1): 66-82.]
- [7] Zhang Yuan, Jia Zhenzhen, Liu Shaomin, et al. Advances in validation of remotely sensed land surface evapotranspiration. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(8): 975-999. [张圆, 贾贞贞, 刘绍民, 等. 遥感估算地表蒸散发真实性检验研究进展. *遥感学报*, 2020, 24(8): 975-999.]
- [8] Liu S M, Li X, Xu Z W, et al. The Heihe integrated observatory network: A basin-scale land surface processes observatory in China. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 1-21.
- [9] Liao Xiaohan, Zhou Chenghu, Su Fenzhen, et al. The mass innovation era of UAV remote sensing. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, 18(11): 1439-1447. [廖小罕, 周成虎, 苏奋振, 等. 无人机遥感众创时代. *地球信息科学学报*, 2016, 18(11): 1439-1447.]
- [10] Weber A, Friedrich C J. *Theory of the Location of Industries*. Chicago: University of Chicago Press, 1929.
- [11] Zhong Qing, Dai Teqi. Stratified estimation of the total number and location of Chinese civil airports based on population coverage using revised LSCP and MCLP models. *Progress in Geography*, 2014, 33(12): 1642-1649. [钟晴, 戴特奇. 中国机场总规模分层优化测算研究: 基于人口覆盖角度. *地理科学进展*, 2014, 33(12): 1642-1649.]
- [12] Shang Chunjian, Ning Aibing, Peng Dajiang, et al. Backtracking algorithm with reduction for P-center location problem. *Application Research of Computers*, 2021, 38(3): 734-737, 769. [尚春剑, 宁爱兵, 彭大江, 等. P中值选址问题的一种降阶回溯算法. *计算机应用研究*, 2021, 38(3): 734-737, 769.]
- [13] Tong Xu, Liang Huan, Zheng Lina, et al. Research on logistics center location problem based on p-median model. *Advances in Applied Mathematics*, 2016, 5(2): 276-281. [童旭, 梁欢, 郑丽娜, 等. 基于p中值模型的物流中心选址问题研究. *应用数学进展*, 2016, 5(2): 276-281.]
- [14] Fu Shenglei, Fu Bojie. Concept clarification of eco-geography and analysis of related classical studies. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(1): 70-79. [傅声雷, 傅伯杰. 生态地理学概念界定及其经典案例分析. *地理科学*, 2019, 39(1): 70-79.]
- [15] Lu Ming, Liao Xiaohan, Yue Huanyin, et al. Determining the distribution of unmanned aerial vehicles airports for the emergency monitoring of floods in China. *Journal of Geo-information Science*, 2019, 21(6): 854-864. [鹿明, 廖小罕, 岳焕印, 等. 面向中国洪涝灾害应急监测的无人机空港布局. *地球信息科学学报*, 2019, 21(6): 854-864.]
- [16] Zheng Du. *Chinese Ecological Geographic Area System Research*. Beijing: The Commercial Press, 2008: 105-288. [郑度. 2008. *中国生态地理区域系统研究*. 北京: 商务印书馆, 2008: 105-288.]
- [17] Church R, Revell C. The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association*, 1974, 32: 101-111.
- [18] Wan Bo. Study on the public service facility location problem [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. [万波. 公共服务设施选址问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.]
- [19] Zhao Di, Liang Xu, Zhang Siwen, et al. Location problem based on maximum coverage model and AHP: Taking Liaoning agricultural products logistics center location as an example. *Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 37(2): 114-119. [赵迪, 梁旭, 张思文, 等. 基于最大覆盖模型与AHP的选址问题: 以辽宁省农产品物流中心选址为例. *沈阳师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 37(2): 114-119.]
- [20] Zhan Qingming, Yang Shuang. Optimization of emergency facilities layout in villages. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(5): 641-653. [詹庆明, 杨爽. 村镇应急公共设施选址布局优化研究. *地球信息科学学报*, 2019, 21(5): 641-653.]
- [21] Shao Zhiqiang. Determine the sample size of sampling survey. *Statistics and Decision*, 2012, 22(370): 12-14. [邵志强. 抽样调查样本容量的确定方法. *统计与决策*, 2012, 22(370): 12-14.]
- [22] Santiago J L, Martín F, Martilli A. A computational fluid dynamic modelling approach to assess the representativeness

of urban monitoring stations. *Science of the Total Environment*, 2013, 454/455: 61-72.

- [23] Jiang Chengsheng. Evaluation and calculation of representative of spatial samples [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2009. [姜成晟. 空间样点代表性评价与计算方法[D]. 北京: 中国科学院大学, 2009.]

Unmanned aerial vehicle airports for verification of common products from China High-resolution Earth Observation System (CHEOS)

LIU Junwei^{1,2}, CHEN Pengfei¹, LU Ming³, LIAO Xiaohan^{1,4}

- (1. State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. National Engineering Research Center for Agro-Ecological Big Data Analysis and Application, Anhui University, Hefei 230601, China; 3. Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, Beijing 100094, China; 4. Tianjin Institute of Application and Research on Unmanned Aerial Vehicles, Tianjin 301800, China)

Abstract: Aiming at the requirement to use unmanned aerial vehicle (UAV) data to verify common products from China High-resolution Earth Observation System (CHEOS), this research examines the distribution of UAV airports using the existing ecological observation stations. Firstly, to comprehensively consider the factors affecting the satellite products, a physical model of the geographical background coverage was proposed. Secondly, a maximal geographic background model is designed based on the improved the coverage model with geographic backgrounds, and the number of UAV airports was determined using the sample size determination method of random sampling. Then, the maximal geographic background covering model and a maximal area covering model were used to study the distribution of UAV airports. Finally, the results of the airport layout under the two models were compared, and MODIS EVI (Enhanced Vegetation Index) data products were used to verify the results. The results showed that for a limited number of airports ($n = 60$), the geographical background coverage of the service areas of the airports selected by the maximal area coverage model was 26.66%, which represents 70.37% of China's land area. The geographical background coverage of the service areas of the airports selected by the maximal geographical background covering model was 38.32%, which represents 73.36% of China's land area. The layout of the UAV airports selected by the maximal geographic covering model is better than that selected by the maximal area covering model. The results can lay a foundation for the design of an unmanned aerial vehicle observation network for the verification of common products from CHEOS.

Keywords: unmanned aerial vehicle airport distribution; maximal area covering model; maximal geographical background covering model; CHEOS common product