

# 光学学报

## 森林生物量遥感卫星发展综述

曹海翊\*, 邱心怡, 贺涛

中国空间技术研究院遥感卫星总体部, 北京 100094

**摘要** 森林生物量探测是评估森林生态系统固碳能力的基础,对研究陆地生态系统碳循环具有重要意义,遥感技术的发展为快速准确地获取森林生物量提供了有效途径。首先,介绍了国内外森林生物量遥感卫星的发展情况,讨论了光学遥感、激光雷达和微波雷达数据在森林生物量估算上的适用性,并总结了现存问题。然后,提出了我国新一代森林生物量遥感卫星的需求和任务,并针对高精度定量化遥感测量森林生物量过程中的技术难点,给出了任务分析过程和载荷配置方案,该方案可实现多载荷同平台观测和三维大气气溶胶探测。最后,对森林生物量遥感卫星后续发展情况进行了展望。

**关键词** 遥感; 碳中和; 森林生物量; 遥感卫星

中图分类号 V474.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1728001

### Review on Development of Forest Biomass Remote Sensing Satellites

Cao Haiyi\*, Qiu Xinyi, He Tao

*Institute of Remote Sensing Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China*

**Abstract** Forest biomass detection is the assessment basis of the carbon sequestration capacity of forest ecosystems, and it is of great significance for research on the carbon cycle of terrestrial ecosystems. The development of remote sensing technology provides an effective way to obtain forest biomass quickly and accurately. The paper first introduces the development of forest biomass estimation by remote sensing satellites in China and abroad, discusses the applicability of optical remote sensing, lidar and microwave radar data in forest biomass estimation, and summarizes the existing problems. Then, the requirements and tasks of the new generation of remote sensing satellite for forest biomass estimation in China are put forward. Considering the technical difficulties in high-precision and quantitative remote sensing measurement of forest biomass, the task analysis process and the load allocation scheme are given. The scheme can realize the multi-load observation on the same platform and three-dimensional atmospheric aerosol detection. Finally, the future development of forest biomass remote estimation by sensing satellites is predicted.

**Key words** remote sensing; carbon neutrality; forest biomass; remote sensing satellites

## 1 引言

2020年9月22日,习近平总书记在第75届联合国大会上承诺:中国将在2030年前实现“碳达峰”(二氧化碳的排放不再增长,达到峰值之后逐步降低),2060年前实现“碳中和”(通过植树造林、节能减排等形式抵消产生的二氧化碳,实现二氧化碳的“零排放”)。森林是重要的陆地碳库,也是人类唯一可控的天然碳汇。目前,我国森林生态系统的碳汇潜力是每年吸收 $1.0 \times 10^9 \sim 1.3 \times 10^9$  t二氧化碳,经生态管理后有望增加到每年吸收 $1.5 \times 10^9$  t二氧化碳。森林可以吸收经

济建设和生产生活中不得不排放的二氧化碳,对于我国实现“碳中和”目标有着重要作用。

森林生物量是评价森林生态系统固碳能力的重要指标,与森林生态系统的碳源和碳汇息息相关,因此准确地估算大区域森林生物量对研究陆地生态系统碳循环具有重要意义。遥感具有宏观、综合、动态、快速和可重复等特点,其波段信息和森林生物量结构具有一定的相关性,已经成为区域森林生物量估算的主要方法<sup>[1]</sup>。本文从卫星观测角度论述了遥感技术估算森林生物量的发展现状,并针对存在的问题,提出了我国新一代森林生物量遥感卫星设计。

收稿日期: 2022-06-20; 修回日期: 2022-07-26; 录用日期: 2022-08-08

基金项目: “十四五”中国民用航天预研项目

通信作者: haiyicao66@163.com

## 2 森林生物量遥感卫星发展现状

### 2.1 国外发展概况

#### 2.1.1 光学遥感

光学遥感是最早应用于生物量估测的技术手段,其利用不同类型植物或处于不同生长阶段的同类型植

物在反射光谱上的差异建立生物量估测模型。国外较为典型的卫星有美国的 Landsat-5、Landsat-7、Terra、Aqua 和印度的 CartoSat-1,各卫星概况如表 1 所示<sup>[2-4]</sup>。其中,Terra、Aqua 和 CartoSat-1 搭载多角度相机系统,通过提供地表在不同方向的反射特性构建立体模型,为改善森林生物量反演精度提供参考。

表 1 国外卫星应用于森林生物量估测的光学传感器概况  
Table 1 Overview of optical sensors used in forest biomass estimation by foreign satellites

Satellite	Country	Instrument	Swath /km	Bandwidth / $\mu\text{m}$	Spatial solution /m	View angle /( $^{\circ}$ )
Landsat-7	USA	Enhanced Thematic Mapper + (ETM+)	185	0.450-0.515	30	
				0.525-0.605	30	
				0.630-0.690	30	
				0.775-0.900	30	
				1.550-1.750	30	
				10.40-12.50	60	
				2.080-2.350	30	
Terra	USA	Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer (MISR)	360	0.425-0.467	275	0
				0.543-0.572		
				0.661-0.683		
				0.847-0.886	275 (band 3)	$\pm 26.1$
				0.425-0.467		
				0.543-0.572		
				0.661-0.683		
0.847-0.886	1000 (other bands)	$\pm 60.0$				
Terra/ Aqua	USA	Moderate-resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS)	2330	0.4-14.4 (36 bands)	250 (bands 1-2)	
					500 (bands 3-7)	
					1000 (bands 8-36)	
CartoSat-1	India	Panchromatic Forward-pointing Camera (PAN-F)	29			26
		Panchromatic Aft-pointing Camera (PAN-A)	26	0.50-0.85	2.5	-5

#### 2.1.2 激光雷达

激光雷达是一种主动遥感技术,其发射激光脉冲与地物作用后,根据回波信息可计算出树木的高度。根据地面调查数据建立了各种林木生物量与树高的关系模型,利用该模型即可反演得到生物量。搭载于 ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) 的 GLAS (the Geoscience Laser Altimeter System) 是全球首个激光测高系统,已被广泛应用于森林生物量的估测中。此后发射的搭载于 ICESat-2 (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2) 的 ATLAS (The Advanced Topographic Laser Altimeter System) 与搭载于 ISS (International Space Station) 的 GEDI (Global Ecosystems Dynamics Investigation Lidar) 系统相比 GLAS 在光斑尺寸和密度等方面都有较大改善,为获取高分辨率森林结构信息提供了数据支撑。各卫星概况如表 2 所示<sup>[5-6]</sup>。

#### 2.1.3 微波雷达

合成孔径雷达具备全天时全天候的观测能力,其

相比光学遥感使用了波长更长的微波波段,可穿透森林冠层,与树干、树枝发生作用,得到森林对电磁波的后向散射信号。利用后向散射强度与生物量的相关关系即可反演得到生物量。典型的代表主要有欧洲航天局 (ESA) 的 ENVISAT (Environmental Satellite) 和日本的 ALOS-2 (Advanced Land Observing Satellite-2),各卫星概况如表 3 所示<sup>[7-8]</sup>,其中 H 为水平方向、V 为垂直方向。

### 2.2 国内发展概况

资源三号卫星 (ZY-3) 是我国自主研制的首颗民用高分辨率立体测绘卫星,扭转了我民用航天测绘业务依赖国外遥感数据的局面。卫星采用三线阵立体测绘体制,用于长期、连续、稳定和快速地获取覆盖全国的高分辨率立体影像和多光谱影像以生产全国 1:50000 基础地理信息产品。利用其多角度遥感影像构建立体模型,可完成对生物量等信息的估测<sup>[9-10]</sup>。

高分七号卫星 (GF-7) 是我国自主研制的首颗 1:10000 比例尺立体测绘卫星,主载荷是国内首套长焦

表 2 国外卫星应用于森林生物量估测的激光雷达概况  
Table 2 Overview of lidar used in forest biomass estimation by foreign satellites

Satellite	ICESat	ICESat-2	ISS
Country	USA	USA	USA
Launch date	2003. 01	2018. 09	2018. 12
Instrument	GLAS	ATLAS	GEDI
Number of beams	1	6	4 (8 ground tracks)
Footprint in diameter /m	70	17. 5	25
Operating frequency /Hz	40	10000	242
Laser wavelength /nm	1064/532	532	1064
Spacing (along track) /m	170. 0	0. 7	60
Spacing (across track) /m		90/3200	600
Laser pulse energy /mJ	74/30	0. 25-1. 2	10
Laser lifetime			3. 2×108
Accuracy /m			0. 5
Laser pulse width /ns	5	1. 5	14
Coverage	86°N-86°S	88°N-88°S	51. 6°N-51. 6°S

表 3 国外卫星应用于森林生物量估测的微波雷达概况  
Table 3 Overview of microwave radar used in forest biomass estimation by foreign satellites

Satellite	ENVISAT	ALOS-2
Country or space agency	ESA	Japan
Launch date	2002. 03	2014. 05
Instrument	Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR)	Phased-Array L-band Synthetic Aperture Radar-2 (PALSAR-2)
Band	C	L
Center frequency /GHz	5. 331	1. 2
Polarization	VV, HH, VH, HV	VV, HH, VH, HV
Spatial solution /m	30/150/950	3/6/10/100
Swath /km	5/100/400	25/50/70/350

距、大口径、无畸变双线阵立体测绘相机。卫星采用了双线阵相机与激光测高仪主被动复合测绘的新体制，融合多角度信息与激光测高数据在生物量反演中具有很大优势。各卫星光学传感器概况如表 4 所示<sup>[11]</sup>。

表 4 国内卫星应用于森林生物量估测的光学传感器概况  
Table 4 Overview of optical sensors used in forest biomass estimation by domestic satellites

Satellite	Launch date	Instrument	Swath /km	Bandwidth / $\mu\text{m}$	Spatial solution /m	View angle / $^{\circ}$	
ZY-3	2012. 01	Three-line array mapping camera	51. 1	0. 50-0. 80	2. 08	0	
			52. 3		3. 46	$\pm 22$	
		Multispectral camera	51. 0	0. 45-0. 52	5. 78	0. 77-0. 89	
				0. 52-0. 59			
GF-7	2019. 11	Two-line array mapping camera	21. 8	0. 454-0. 903	0. 77	26	
				0. 454-0. 903	0. 65	2. 59	-5
				0. 451-0. 520			
				0. 522-0. 591			
0. 632-0. 690							
0. 773-0. 892							

高分七号同时搭载了国内首套星载长寿命对地全波形激光测高仪,可实现亚米级的对地距离测量精度。卫星在双线阵立体测图基础上,增加同时相高精度激光测高能力,并配置一台足印相机实现激光数据与相机数据的精密关联,完成主被动复合测绘,可在获取高精度森林结构参数和林下地形信息方面发挥重要作用。其激光雷达概况如表 5 所示<sup>[11]</sup>。

表 5 GF-7 应用于森林生物量估测的激光雷达概况  
Table 5 Overview of lidar used in forest biomass estimation by GF-7

Indicator	Description
Country	China
Launch date	2019. 11
Instrument	Laser altimeter
Number of beams	2
Footprint in diameter / m	21. 2
Operating frequency / Hz	3
Laser wavelength / nm	1064
Spacing (along track) / km	2. 4
Spacing (across track) / km	12
Laser pulse energy / mJ	100-180
Laser lifetime	$1 \times 10^8$
Accuracy / m	0. 3
Laser pulse width / ns	4-8
Coverage	80°N-80°S

然而,目前用于森林生物量探测的遥感卫星均未针对生物量任务展开设计,故难以保证森林生物量的测量精度。除搭载于国际空间站进行科学实验的 GEDI 激光雷达外,世界上没有专门用于森林生物量探测的卫星,森林生物量遥感探测只能依赖现有的资源调查、测绘和陆地探测等卫星开展。森林生物量探测遥感卫星主要存在三个方面的问题。

#### 1) 卫星参数与森林生物量遥感任务不匹配

由于卫星在设计之初没有重点考虑森林生物量遥感探测的需求,故其载荷配置、关键技术指标通常与森林生物量遥感任务不匹配。如 ICESAT 卫星的 GLAS 载荷,主要任务目标是两极的冰盖高程测量,为了能够更好地反映冰盖平均高程,其光斑尺寸较大,达到了 70 m<sup>[12]</sup>,而较大的光斑尺寸在生物量测量任务中,将引入很大的地形误差,进而会造成生物量测量结果精度下降。

#### 2) 无法从单颗卫星得到全部种类的遥感数据

生物量遥感需要依赖多种类型遥感数据,由于卫星没有针对生物量探测进行载荷搭配设计,因此无法从单颗卫星得到全部种类的遥感数据。目前,主要采用多个卫星平台数据融合进行生物量反演的方法,这将不可避免地引入数据间的配准误差,造成生物量测量精度下降,例如:当采用 ICESAT 激光数据配合 TM 多光谱图像数据进行反演时<sup>[13]</sup>,两种数据获取时间存

在一定差异,表征了不同时间点的森林状态,因此难以保证融合反演精度;激光测点和图像之间的配准需要依赖两颗卫星各自的轨道和姿态测量结果,通常难以实现单木级(10 m 以内)探测,这会严重影响生物量估算精度。

#### 3) 缺少同步观测三维大气气溶胶的能力

大气气溶胶主要影响地表反射率的反演,从而引起森林多角度反射率测量误差增大,造成生物量探测精度下降。在卫星多角度遥感中,大角度斜视观测的成像光线在大气中倾斜传播,会受到不同位置、不同高度的大气影响。因此,无法采用同一位置的大气气溶胶柱浓度信息进行校正,而需要根据三维大气气溶胶分布信息进行校正。在目前遥感卫星搭载的少数大气气溶胶观测载荷中,基本以测量大气气溶胶柱浓度为主,难以获取包括粒子大小、粒子形状和垂直廓线等在内的同时相大气气溶胶三维分布信息,故无法支撑多角度遥感的高精度地表反射率测量。

## 3 我国新一代森林生物量遥感卫星任务分析

针对高精度定量化森林生物量卫星遥感测量过程中的技术难点,本文开展了我国新一代森林生物量遥感卫星任务分析。从森林生物量探测需求出发,分解得到探测要素,并选取合适的探测手段(有效载荷)实现基于同一卫星平台的多载荷、多要素联合观测。通过多种类型观测数据的融合反演,达到高精度定量化测量森林生物量的目标。

### 3.1 探测要素分析

森林生物量遥感主要面向生态建设、生态管理的实际应用需求。一方面,需关注森林生态系统碳储量,厘清森林资源的现状,即现存量。另一方面,需关注生态系统的质量和稳定性,揭示生态系统能量平衡、养分循环和生产力等变化规律,即变化量。为实现高精度定量化遥感测量,还需要校正大气环境对结果的影响。因此,森林生物量遥感卫星的主要探测要素有以下三个。

#### 1) 现存量

通过观测生态系统植被的垂直结构获取高度信息和观测水平结构获取面积信息来反演蓄积量,再结合植被类型获取植被种类的密度信息。最终,通过参与反演生物量,揭示森林生物量资源现状。

#### 2) 变化量

通过对生态系统开展周期性观测来监测和估算变化情况,并分析变化驱动因素(植被胁迫、植被生产力等健康状态)来预测后续的变化趋势。

#### 3) 辅助量

通过对大气气溶胶开展同步观测,得到大气气溶胶光学厚度等参数,对地物反射率光谱曲线等进行校正,从而提高森林探测精度。

卫星需要同时具备上述三类要素的观测能力,才能够实现对森林生物量的高精度定量化测量。

### 3.2 探测手段分析

#### 3.2.1 现存量

森林生物量现存量需要以树木自身的结构参数、

基于光学遥感的植被特征指数等数据作为主要输入变量,结合相关的反演模型计算求得。植被生物量观测手段原理如图 1 所示。

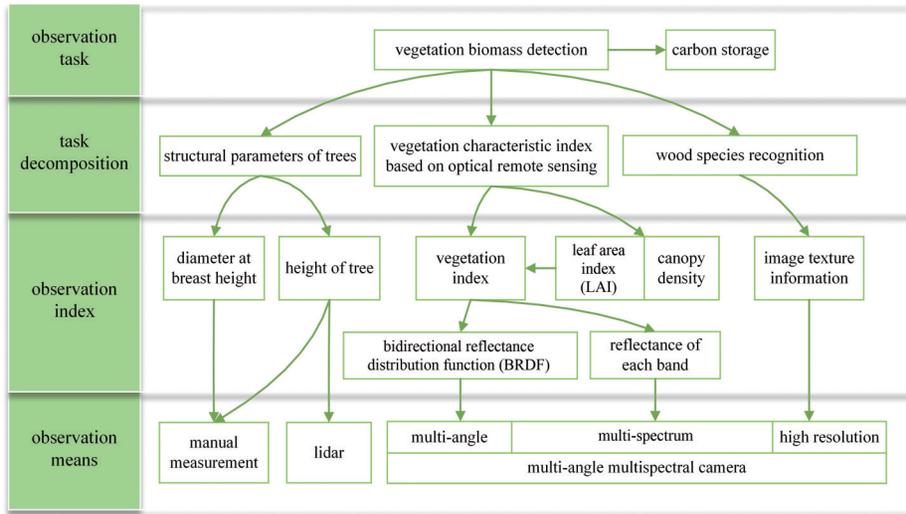


图 1 植被生物量观测手段原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vegetation biomass observation means

#### 1) 利用树木结构参数估算植被生物量

传统的生物量实测方法是人工实地测量单木的树高和胸径,并根据树种信息,利用生物量异速生长模型计算求解,相应公式为

$$B = a(D^2H)^b, \quad (1)$$

式中: $B$ 为实测生物量; $D$ 为胸径; $H$ 为树高; $a$ 和 $b$ 均为与树种相关的常数。在结构参数中,胸径通常较小,且树干受树冠遮挡严重,因此难以通过卫星遥感手段获取胸径。

树高作为树木的垂直结构参数,可以采用主动激光雷达遥感手段对其进行精确测量。森林的激光回波波形指示从上到下依次为树顶、树冠、林下植被和地面。根据激光雷达接收到树木顶层回波信号与地面回波信号之间的时间间隔,可以计算出树顶与地面之间的高度。

目前已经发展了诸多星载全波形树高反演模型,其中常用模型<sup>[14]</sup>为

$$H = b_0(\omega - b_1S + b_2k), \quad (2)$$

式中: $\omega$ 为波形长度,指第一有效回波与地面回波之间的垂直距离; $S$ 为地形指数,表征了激光光斑周围的坡度或高程变化范围; $k$ 为波形前沿的上升斜率; $b_0$ 、 $b_1$ 和 $b_2$ 为回归系数,其中 $b_0$ 对波形高度进行纠正, $b_1$ 对地形效应进行纠正, $b_2$ 对不同树种的冠形引起的信号开始位置判断误差等因素进行修正。

#### 2) 利用基于光学遥感的植被特征指数反演生物量

对森林的光学遥感图像进行光谱信息分析,能够在一定程度上反映出森林的生物物理特性。以森林光学遥感数据为基础,可以构建出多种植被指数。常用植被指数通常是两个或多个波段的光谱反射率比值、

线性或非线性组合,能够将多个维度的光谱信息压缩到一个植被指数通道中,可以用来诊断植被生长状态与绿色植被活力,以及反演各种植被参数。

对各种植被指数进行统计回归,可以进一步估算出森林郁闭度、叶面积指数等结构参数。基于统计回归的方法,可以将光学遥感影像提供的各谱段反射率和由此推算出的信息(各类植被指数、森林郁闭度和叶面积指数等)与植被生物量建立关系,进而估测出区域植被生物量。

#### 3) 多角度光学遥感

森林植被在地表分布的不均匀性会造成其对太阳的反射具有二向性,即反射不仅具有方向性,还依赖于入射方向。一般用二向反射分布函数(BRDF)来描述入射光与地物反射的相互作用,即

$$F_{\text{BRDF}}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{dL(\theta_r, \phi_r)}{dE(\theta_i, \phi_i)}, \quad (3)$$

式中: $\theta_i$ 和 $\phi_i$ 为入射光的天顶角和方位角; $\theta_r$ 和 $\phi_r$ 为反射光的天顶角和方位角; $dE(\theta_i, \phi_i)$ 为入射方向上辐照度的增量; $dL(\theta_r, \phi_r)$ 为反射方向上辐射亮度的增量<sup>[15]</sup>。

为进一步提高植被生物量的反演精度,需要针对不同植被特征指数寻找敏感角度,再利用敏感性较强的角度的BRDF值反演得到可靠的植被特征指数。因此,采用多角度观测的光学遥感手段获取植被的BRDF信息(BRDF信息中包含大量地面目标的立体结构特征信息),具有求解植被结构特征参数的潜力。

#### 4) 森林类型识别

在上述植被生物量的探测和反演方法中,都需要用到与森林类型相关的回归系数,以确保反演精度。高分辨率多光谱相机对于树种识别是一种常用的遥感

手段,利用图像、纹理和光谱等信息,基于最大似然分类法、控制聚类法等算法,能够有效识别阔叶林、针叶林、混交林和灌木林等森林类型,并且具备进一步识别树木种类的能力。该部分功能可以在多角度多光谱相机中通过提高相机的地面像元分辨率来实现。

综上所述,为完成植被生物量的观测任务,需要采用主被动遥感相结合的方式,配置一台植被测量激光雷达和一套多角度多光谱相机。利用植被测量激光雷达的离散光斑点数据反演足印点的树高和生物量。利用多角度多光谱相机获取森林类型、角度信息和植被指数等植被光学遥感特征参数。利用激光雷达反演的光斑尺度的生物量和对应的光学遥感特征参数构建生物量估算模型,从而实现区域尺度的森林生物量制图。

### 3.2.2 变化量

森林生物量的变化量主要是由光合作用引起的。植物在光合作用光反应的过程中,吸收光能有一部分损耗,这部分能量会以一种更长波长的光信号被叶绿素分子发射出来,该信号被称为日光诱导的叶绿素荧

光(SIF)。植被的叶绿素荧光强度可以表征植被光合作用的强弱,从而反映出生物量的变化量。

荧光发射光谱覆盖了 650~800 nm 波长区间,且具有分别位于 685 nm 和 740 nm 附近的两个峰值。在卫星遥感获取的辐射光谱中,荧光光谱能量占比非常低(一般不超过 2%),故为实现较高的探测信噪比,需利用背景光较弱的太阳光 O2-B 吸收带和 O2-A 吸收带的 Fraunhofer 暗线进行探测。在自然光照条件下, Fraunhofer 暗线吸收井内荧光信号占比升高,故可通过观测植被荧光光谱辐射对 Fraunhofer 暗线吸收井的填充情况和暗线相邻谱区的辐射强度来解算出植被冠层的荧光强度。

综上所述,为完成植被生物量变化量的观测任务,需要配置一台具备亚纳米级光谱分辨率的超光谱探测仪来进行荧光遥感观测。

### 3.2.3 辅助量

大气校正需要以大气气溶胶三维分布为主要输入变量,结合大气辐射传输模型,实现对地表反射率谱线的校正。大气气溶胶三维观测手段原理如图 2 所示。

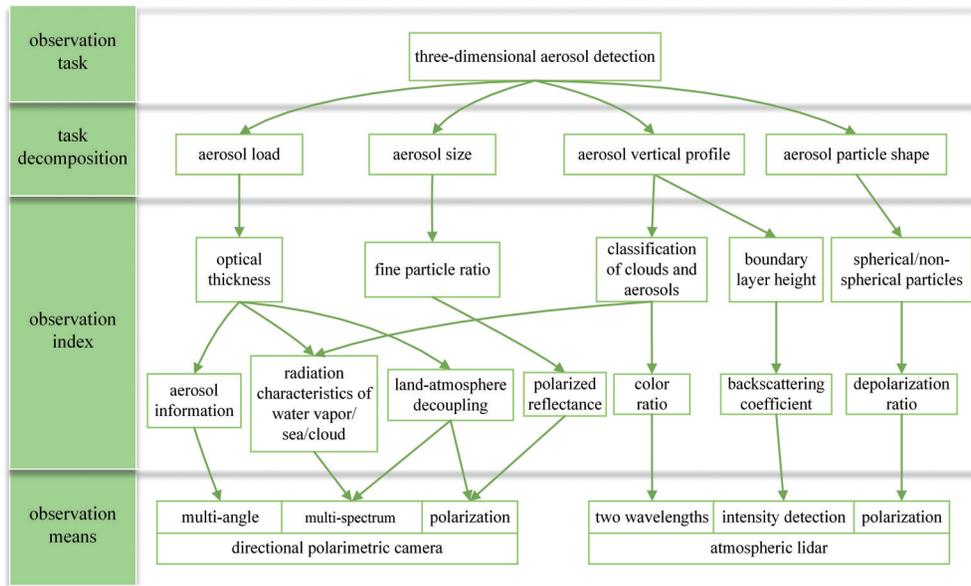


图 2 大气气溶胶三维分布观测手段原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three-dimensional atmospheric aerosol distribution observation means

#### 1) 气溶胶总量和粒径探测

卫星接收到的观测信号大气顶辐亮度由两部分组成:大气中的气溶胶和分子对入射太阳光散射形成的大气程辐射项;到达地表的太阳直射光经地表反射后再次经大气中的气溶胶和分子散射后形成的地表辐射项。观测参数主要包括以下三个。

##### a. 多光谱

基于特征谱段的多光谱成像可获得更高精度的大气气溶胶信息。大气散射辐射不仅具有偏振性,还具有波长选择性。大气散射辐射所表现的光学和微物理性质与其光谱特性密切相关,大气散射辐射是波长的函数,多光谱偏振信息是高精度解析大气性质的根本保证。不同光谱波段偏振信息的利用,有利于提

高大气特性参数的反演精度。

##### b. 偏振

利用光学偏振信息可以实现地气解耦,并获得粒径分布。太阳光作为一个自然光源,在进入地球大气层之前是没有偏振的。在进入大气之后,太阳光在传输过程中经气溶胶粒子散射、吸收等作用产生大量的偏振光,而偏振光会在大气介质中发生散射作用,且不同介质的光学特性不同。

##### c. 多角度

通过多角度观测可获得多维度气溶胶信息。多角度观测增加了观测数量,可获取更多的应用目标信息,从而能更好地约束参数反演。

根据上述分析,需配置多角度偏振成像仪载荷,综

合利用“多角度+偏振+多光谱”的多维信息探测,实现大气气溶胶总量和粒径探测。

#### 2) 气溶胶大气边界层高度探测

垂直分布探测需要依赖主动的激光雷达探测手段。利用激光雷达系统收集激光与大气中气溶胶和云粒子作用后产生的后向散射信号,反演气溶胶和云参数。相应的激光雷达方程为

$$P(r) = \frac{1}{r^2} E_0 \xi \beta(r) \exp\left[-2 \int_0^r \sigma(r') dr'\right], \quad (4)$$

式中: $r$ 为激光雷达到卫星的距离; $P(r)$ 为测量的去除背景和人为影响的信号; $E_0$ 为平均激光能量; $\xi$ 为激光雷达系统参数; $\beta(r)$ 为距离 $r$ 处的后向散射系数; $\sigma(r)$ 为距离 $r$ 处的消光系数<sup>[16]</sup>。通过求解激光雷达方程,得出后向散射系数,再由后向散射系数垂直廓线得出行星边界层高度(PBLH)参数。

#### 3) 云和气溶胶分类

不同波长后向散射的回波信息表征了云和气溶胶的不同特点,故可应用两个不同通道的强度比值(即雷达色比)来区分云和气溶胶粒子。雷达色比 $\chi$ 的表达式为

$$\chi = \frac{\beta_{1064}}{\beta_{532}}, \quad (5)$$

式中: $\beta_{1064}$ 和 $\beta_{532}$ 分别为两个通道的后向散射系数。由于云粒子的尺度远大于1064 nm,故在两个通道中发生对波长不敏感的非选择性散射,色比接近1,而气溶胶粒子在两个通道中发生米散射,散射强度随波长增加迅速减小,色比远小于1,因此可将云和气溶胶粒子分类。

#### 4) 粒子形状

利用特定波长的垂直通道和平行通道的偏振回波信号,可直接获取该波长通道的退偏比 $\delta$ ,该参数表征了大气粒子形状信息,可用于区分球形粒子和非球形粒子。 $\delta$ 的表达式为

$$\delta = \frac{\beta_{\parallel}}{\beta_{\perp}}, \quad (6)$$

式中: $\beta_{\parallel}$ 和 $\beta_{\perp}$ 分别为水平通道和垂直通道的后向散射强度。

综上所述,为观测大气气溶胶三维分布,需要配置一台多角度偏振成像仪和大气探测激光雷达载荷。获取气溶胶三维空间分布信息可实现对多角度反射光谱的大气校正和激光指向定位误差修正。

## 4 结束语

新一代森林生物量遥感卫星针对生物量探测任务展开设计,实现了多载荷同平台观测和三维大气气溶胶探测,是我国首颗专门用于森林生物量探测的遥感卫星。受限于现阶段工程技术和项目预算,新一代生物量测量卫星在观测效率、植被分类和高郁闭度林下地表探测方面还存在较大提升空间。随着工程技术的进步和项目投入的增加,生物量测量卫星的后续发展方向如下。

#### 1) 采用星座组网手段提升观测效率

高分辨率影像的幅宽一般在20 km左右,在不考虑云影响的条件下,需要半年时间才有可能实现全球覆盖。然而,森林呈现明显的季节性变化,半年的覆盖周期无法满足森林季节性变化的探测需求。卫星观测幅宽受限于探测器规模,在短期内难以大幅提升,因此通过多颗卫星组网观测是目前提升观测效率的主要手段。

#### 2) 采用更多波束数量、更高重复频率的激光雷达实现更高密度的测量

激光雷达测量为离散点的方式,是对连续分布森林的离散化采样测量。当前激光采样点密度为 $1 \text{ km}^{-2}$ 左右,通过1个点的测量结果,结合相机的多角度观测数据,外推得到连续区域中森林的树高存在较大的不确定性。激光测量点密度由激光波束数量和测量重复频率决定,故有必要进一步提升激光的波束数量和重复频率,进而实现森林树高测量准确度的提高。

#### 3) 采用更多观测谱段实现更高精度的植被分类

森林生物量反演过程需要根据植被种类构建相对应的模型,目前一般使用森林地面调查获得的植被种类信息,而对于缺少调查数据的区域,需要依赖卫星影像进行植被分类。目前,卫星以4谱段影像为主,分类的细致程度和精度均有限。后续将增加植被敏感的红外波段,实现高精度植被分类。

#### 4) 增加P波段微波雷达探测手段实现茂密森林的穿透测量

光学手段使用的电磁波波长较短,对茂密森林的穿透能力不足,无法获取冠层以下的森林结构和地表位置信息,导致生物量探测精度不足。主要的解决手段是使用波长更长的P波段微波雷达穿透森林冠层,从而获取林下地表的雷达反射回波,确定冠层以下森林结构和地表位置。将P波段微波雷达与激光雷达、光学遥感等手段结合使用,可实现对茂密森林的生物量探测。

## 参 考 文 献

- [1] 李德仁,王长委,胡月明,等. 遥感技术估算森林生物量的研究进展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(6): 631-635.  
Li D R, Wang C W, Hu Y M, et al. General review on remote sensing-based biomass estimation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(6): 631-635.
- [2] Masek J G. Landsat Science[EB/OL]. [2022-04-18]. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>.
- [3] Frazier S. MODIS[EB/OL]. [2022-04-18]. <https://modis.gsfc.nasa.gov/>.
- [4] Thome K. Terra| the EOS flagship[EB/OL]. [2022-04-18]. <https://terra.nasa.gov/>.
- [5] Platnick S. NASA's Earth Observing System[EB/OL]. (2021-10-12)[2022-04-18]. <https://eospo.nasa.gov/>.
- [6] 徐国权,张一帆,万建伟,等. 高分辨率三维成像激光雷达的应用[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1628002.

- Xu G Q, Zhang Y F, Wan J W, et al. Application of high-resolution three-dimensional imaging lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1628002.
- [7] ASAR Overview[EB/OL]. [2022-04-18]. <https://earth.esa.int/eogateway/instruments/asar/description>.
- [8] JAXA. ALOS-2 solution book: proposals for “DAICHI 2” SAR data utilization[EB/OL]. [2022-02-04]. [https://global.jaxa.jp/projects/sat/alos2/pdf/daichi2\\_Solution\\_Book\\_3rd\\_En.pdf](https://global.jaxa.jp/projects/sat/alos2/pdf/daichi2_Solution_Book_3rd_En.pdf).
- [9] 曹海翊, 刘希刚, 李少辉, 等. “资源三号”卫星遥感技术[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(3): 7-16.  
Cao H Y, Liu X G, Li S H, et al. ZY-3 satellite remote sensing technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(3): 7-16.
- [10] 高洪涛, 罗文波, 史海涛, 等. 资源三号卫星结构稳定性设计与实现[J]. 航天器工程, 2016, 25(6): 18-24.  
Gao H T, Luo W B, Shi H T, et al. Structural stability design and implementation of ZY-3 satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(6): 18-24.
- [11] 曹海翊, 张新伟, 赵晨光, 等. 高分七号卫星总体设计与技术创新[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(5): 1-9.  
Cao H Y, Zhang X W, Zhao C G, et al. System design and key technologies of the GF-7 satellite[J]. Chinese Space Science and Technology, 2020, 40(5): 1-9.
- [12] Palm S P, Hart W D, Hlavka D L, et al. The algorithm theoretical basis document for the GLAS atmospheric data products[R]. Greenbelt: Goddard Space Flight Center, 2012.
- [13] 廖凯涛, 齐述华, 王成, 等. 结合 GLAS 和 TM 卫星数据的江西省森林高度和生物量制图[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(4): 713-720.  
Liao K T, Qi S H, Wang C, et al. Estimation of forest aboveground biomass and canopy height in Jiangxi Province using GLAS and Landsat TM images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(4): 713-720.
- [14] Lefsky M A, Harding D J, Keller M, et al. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(22): L22S02.
- [15] 李俊麟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0528002.  
Li J L, Zhang L M, Chen H Y, et al. Development of BRDF absolute measuring device[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0528002.
- [16] 于思琪, 刘东, 徐继伟, 等. 激光雷达反演大气边界层高度的优化方法[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0728002.  
Yu S Q, Liu D, Xu J W, et al. Optimization method for planetary boundary layer height retrieval by lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0728002.

#### 约稿专家简介:



曹海翊(1962—), 硕士, 教授/博士生导师, 中国航天科技集团有限公司学术技术带头人, 享受国务院政府特殊津贴。1980年考入浙江大学光学仪器工程学系学习, 1984年毕业并获学士学位。2008年至今, 任资源三号01~03卫星总设计师; 2015年至今, 任高分七号卫星总设计师; 2017年至今, 任陆地生态系统碳监测卫星总设计师。获国家科技进步奖二等奖1项、国防科技进步奖一等奖3项, 获中国航天基金奖、中国航天科技集团有限公司创新奖、五院功勋奖和国防科技工业武器装备型号研制一等功等荣誉。E-mail: [haiyicao66@163.com](mailto:haiyicao66@163.com)。