

多角度光学定量遥感

阎广建, 姜海兰, 闫凯, 程诗宇, 宋婉娟, 童依依, 刘雅楠,
漆建波, 穆西晗, 张吴明, 谢东辉, 周红敏

北京师范大学 地理科学学部 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875

摘要: 随着遥感技术的发展, 出现了从两个或两个以上的方向对同一目标进行观测的方式, 即多角度遥感。多角度遥感有助于提高植被生物物理参数的反演精度, 可为生态环境和气候变化研究提供更好的数据支持。本文围绕多角度光学遥感, 总结了多角度遥感的发展、特点与优势, 回顾了相关概念, 系统总结了从地面到航空、航天的多角度观测手段, 以及辐射传输模型、几何光学模型、混合模型、计算机模拟模型等多角度遥感模型的发展。在此基础上, 梳理了多角度遥感在反照率、植被参数、气溶胶反演及冰冻圈遥感中的应用。最后, 对多角度光学定量遥感的发展趋势及研究方向进行了展望。与单一角度遥感相比, 多角度遥感提供了角度维信息, 提高了遥感对地球表层参数的获取能力。随着星机地不同平台的多角度遥感观测手段越来越丰富, 未来多角度遥感的主要研究方向集中在发展复杂地表多角度反射/辐射模型, 增强多角度遥感数据预处理能力和提高多源数据综合应用能力等方面。

关键词: 多角度遥感, 二向性反射率分布函数 (BRDF), 传感器, 辐射传输模型, 几何光学模型

引用格式: 阎广建, 姜海兰, 闫凯, 程诗宇, 宋婉娟, 童依依, 刘雅楠, 漆建波, 穆西晗, 张吴明, 谢东辉, 周红敏. 2021. 多角度光学定量遥感. 遥感学报, 25(1): 83-108

Yan G J, Jiang H L, Yan K, Cheng S Y, Song W J, Tong Y Y, Liu Y N, Qi J B, Mu X H, Zhang W M, Xie D H and Zhou H M. 2021. Review of optical multi-angle quantitative remote sensing. National Remote Sensing Bulletin, 25(1): 83-108 [DOI: 10.11834/jrs.20218355]

1 引言

二向性反射是自然地表与光线作用的基本宏观现象, 即反射不仅依赖观测方向, 还依赖于入射方向 (李小文和王锦地, 1995), 呈现各向异性特征。各向异性的主要来源是地物表面的三维结构 (Liang等, 2000)。传统单一角度光学遥感传感器多采用近天底观测的方式, 只能获取某一固定方向上的地表辐亮度, 难以获取二向性反射特征。

多角度遥感是指利用传感器从两个或两个以上的方向对同一目标进行非接触远距离观测的技术, 是准确获得地表反射各向异性的唯一手段。不同角度的观测对于捕捉地表真实反射特性和空间结构具有重要作用, 与传统的空间维、时间维和光谱维信息形成互补, 在定量遥感研究中具有重要的理论地位和应用前景。

多角度光学遥感相比单一角度光学遥感具有明显的特点与优势 (Barnsley等, 1997; 李小文等, 2001; 汪骏发等, 2001; Pinty等, 2002), 观测数量的增多增加了信息量, 有利于降低反演中的欠定问题和不确定性。很多参数的准确提取都依赖于多角度观测, 例如地表的植被结构 (Sandmeier和Deering, 1999; Chen等, 2003; Gao等, 2003)、反照率 (Stroeve和Nolin, 2002)、气溶胶的形状和微物理特性 (King等, 1999)、云顶高度、云形态 (Di Girolamo和Wilson, 2003)、海冰形态 (Nolin等, 2002) 等。

从20世纪中叶开始, 国外学者开始研究方向性问题 (Middleton和Mungall, 1952)。Steiner和Gutermann (1966) 发现要想得到一棵树或者森林冠层的可靠的反射率, 应该从几个有利位置进行测量。Nicodemus于1965年阐述了不透明表面的方

收稿日期: 2020-10-11; 预印本: 2020-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42090013)

第一作者简介: 阎广建, 1972年生, 男, 教授, 研究方向为多角度遥感、地表辐射收支、植被结构参数卫星反演与地面测量。E-mail: gjyan@bnu.edu.cn

向性反射率和发射率, 相关术语的标准化完成于1977年, 并给出了被沿用至今的二向性反射率分布函数BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 较为完备的定义 (Nicodemus等, 1977), 推动了反射方向性研究的发展 (Schaepman-Strub等, 2006)。

卫星对地综合观测能力的提高是多角度遥感发展的重要推动力。1979年出现的高级甚高分辨率辐射计AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 具有很宽的视场角, 可通过多天不同轨道位置的观测采集地面目标二向性反射数据, 前提是目标特性在此期间不发生变化, 而1991年出现的沿轨扫描辐射计ATSR (Along Track Scanning Radiometer) 则可近实时直接获得两个角度的遥感数据。美国国家航空航天局NASA (National Aeronautics and Space Administration) 于1991年发起了地球观测系统EOS (Earth Observing System) 计划, Terra和Aqua两颗卫星分别于1999年和2002年发射升空, 极大地提高了卫星对地综合观测能力, 获取了大量的多角度观测数据。随着星载多角度传感器的发展, 探测波段从可见光、近红外发展到热红外, 使得多角度遥感在建模和反演方面的能力得到了很大的提升。

多角度遥感机理模型是多角度遥感定量利用的基础。20世纪70年代以来, 许多科学家将经典的数理方法与遥感实践相结合, 发展了一系列表征地表二向性反射和目标特征参数之间关系的BRDF模型 (李小文等, 2001)。早期的BRDF模型研究主要集中于植被覆盖地表, 后来发展到冰、雪、土壤及水体等地表覆盖 (Liang等, 2000)。从适用于大气和均匀地表的辐射传输模型, 到适用于树冠的几何光学模型、适用于行播作物的间隙率模型及基于真实结构模拟的计算机模拟模型, 多角度遥感模型的快速发展使遥感研究从传统的图像解译和分类走向地物空间结构特征的定量反演 (高峰和朱启疆, 1997)。

为满足多角度遥感的发展需要, 从20世纪90年代开始, 针对BRDF研究举办了一系列会议。第一次国际BRDF研讨会于1990-11在美国亚利桑那州举办; 紧接着分别在1992、1996和1998年举办了BRDF国际论坛, 总结了多角度遥感的研

究进展, 讨论和展望了未来重要的研究课题。从1996年开始, 陆续召开了多角度测量与建模的国际研讨会IWMMM (International Workshop on Multiangular Measurements and Models)。第一届在北京召开, 提出应将多角度测量与模型研究结合 (李小文等, 2001)。后续会议分别在意大利和澳大利亚等国召开, 均在不同阶段回顾了多角度遥感发展历程、讨论和总结了多角度遥感的发展现状, 并分析和展望了未来的发展方向, 对多角度遥感的发展具有重要的推动作用。

在Web of Science中以多角度遥感和BRDF等为关键词, 检索截至2020-10-21前发表的相关文献。Web of science所有数据库中检索结果为3221篇, 中国科学引文数据库共343篇。图1为按上述关键词统计出来的中英文文献的发表 (图1(a)) 和引用情况 (图1(b)), 可以看出, 近30年来国内外关于多角度遥感的研究总体上呈上升趋势, 被引数约为发文数的20—30倍。

此外, 基于CiteSpace软件对以Web of Science核心合集数据中的检索结果进行了文献分析。文献分析结果表明, 研究热度较大的两个研究方向是半经验BRDF模型和冠层结构参数反演。领域内比较有影响力的文章是Schaaf等发表于2002的关于中分辨率成像光谱辐射计MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 反照率产品反演算法的文章 (Schaaf等, 2002)、Schaepman-Strub (2006) 发表的关于反射率的相关术语的定义的文章, 以及Diner等 (1998) 关于MISR传感器的实验和仪器介绍的文章。国际期刊共引分析结果表明, 比较有影响力的期刊是《Remote Sensing of Environment》、《IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing》、《Journal of Geophysical Research-Atmospheres》以及《International Journal of Remote Sensing》等。此外, 对中国科学引文数据库内的中文文章进行了期刊共引分析, 分析结果表明除了上述在国际上比较具有影响力的期刊外, 《遥感学报》、《遥感信息》、《国土资源遥感》在领域内也比较有影响力。

下面本文将分别介绍多角度遥感相关基本概念、多角度遥感观测、多角度遥感机理建模及多角度遥感的应用, 并在此基础上对多角度光学定量遥感的发展趋势及研究方向进行展望。

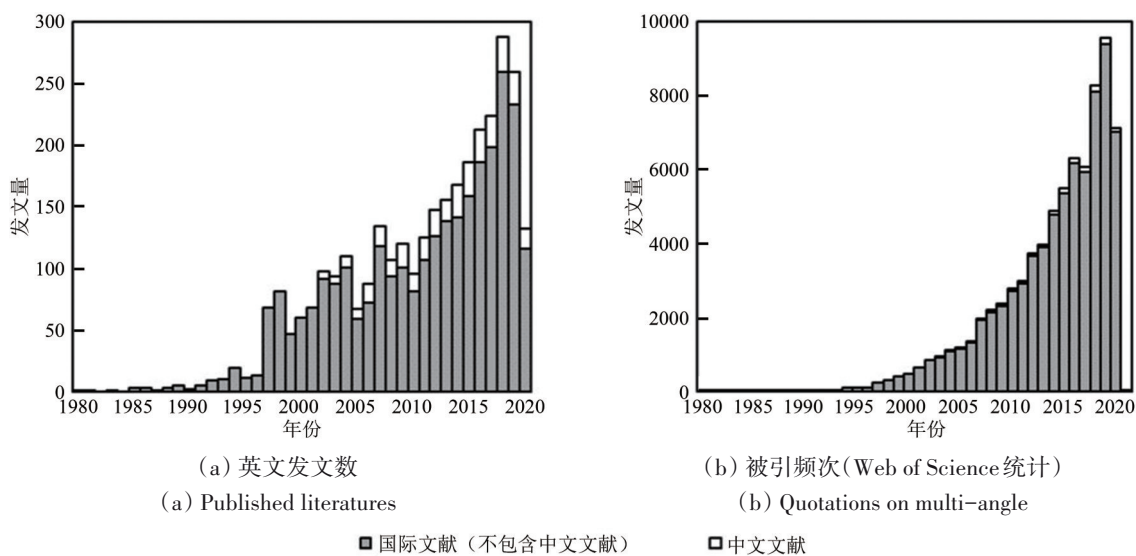


图 1 多角度遥感研究中中英文发文数及被引频次(Web of Science统计)

Fig.1 Statistics in web of science of the number of published literatures and quotations on multi-angle remote sensing research

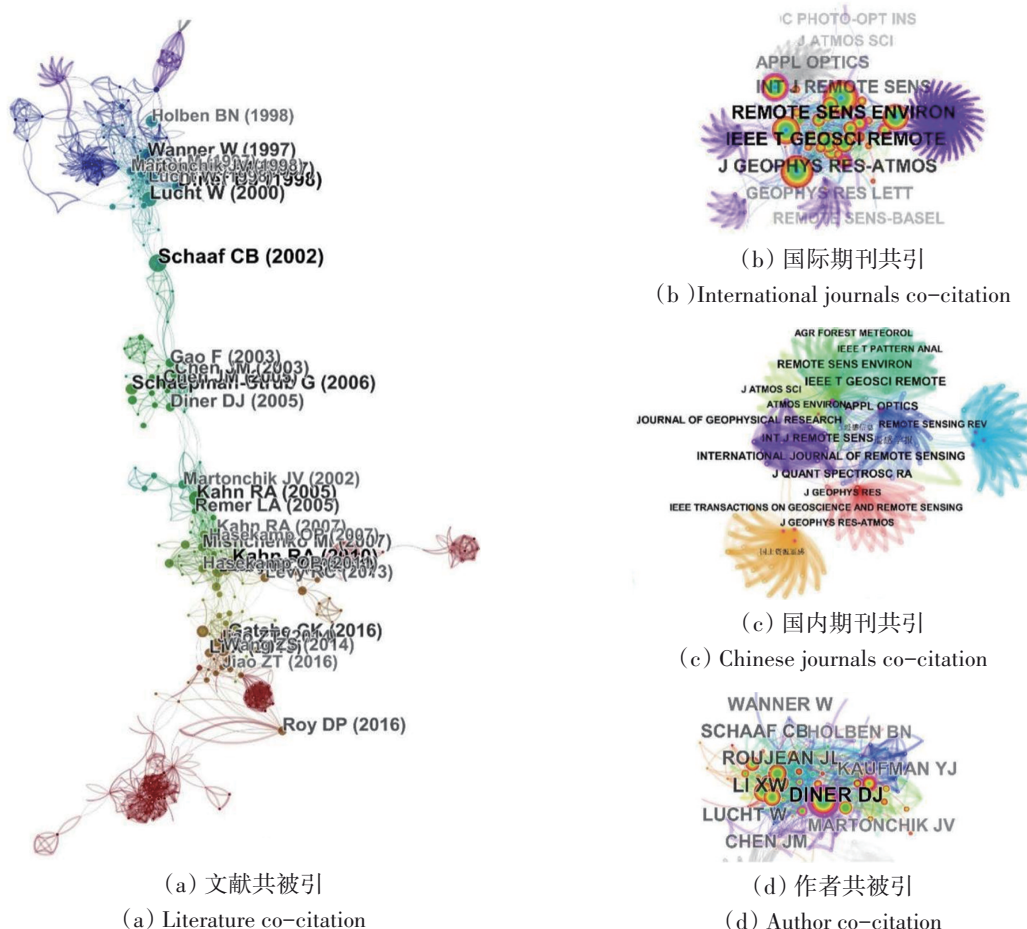


图 2 基于 CiteSpace 软件的多角度遥感文献分析结果(图中点和字体的大小以及字体深浅均代表被引量的多少,线代表共被引,其颜色从蓝到红代表时间上的推进)

Fig.2 Literature analysis of multi-angle remote sensing based on citespace (The size of the dots and fonts and the darkness of fonts in the figure represent the amount of the quotation, the lines represent the co-citation, and the colors from blue to red represent the advance of time)

2 基本概念

电磁波与地表的相互作用包括反射、吸收和透射3种过程,且反射率、吸收率和透过率三者之和为1,遵循能量守恒定律。地物对电磁波的反射有3种形式:镜面反射(图3(a))、漫反射(图3(b))和各向异性反射(图3(c)),反射的类型与地物的粗糙度和波长有关。瑞利最早提出了表面光滑的判别准则。Peake和Oliver(1971)将其修改为当 $h \leq \lambda/(25\cos\theta)$ 时(h 为表面粗糙高度的标准差, λ 为波长, θ 为入射角),地物可以看作是平滑表面,发生镜面反射(图3(a));而当 $h \geq \lambda/(4.4\cos\theta)$ 时,地物可以看作是粗糙表面,发生漫反射(图3(b));介于两者之间发生的是各向异性反射(图3(c))。

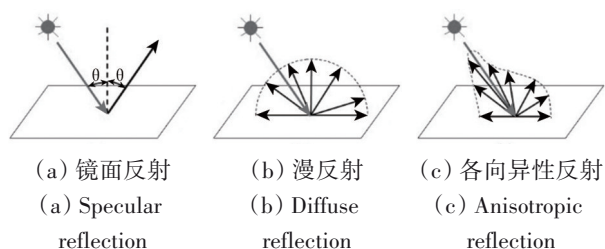


图3 电磁波的3种基本反射

Fig.3 Three basic reflections of the electromagnetic waves

镜面反射光线与反射平面法线的夹角(反射角)和入射光线与反射平面法线的夹角(入射角)相等,且入射和反射光线及平面法线同处于一个平面内。朗伯表面是一个理想化的表面,它被假定为各向同性的均一介质,各角度观察到的辐亮度相同,相应的反射体也叫漫反射体,其表面反射能力的大小与观测方向无关。李小文等(2000)用一个V形谷证明了朗伯特性的尺度效应,说明了像元内部处处朗伯,但整体非朗伯的现象。虽然一些遥感模型中的朗伯假定不考虑物体的方向反射特性,但实际上自然界大多数地表既不是完全光滑的理想镜面,也不是完全朗伯的表面,而是介于二者之间的非朗伯表面,其反射不是各向同性的,而是与太阳入射方向和观测方向有关,具有明显的方向性(Kimes等,1987;赵英时,2013)(图3(c))。从对地多角度观测数据中提取地面目标的空间结构等参数,机理上主要依赖于地物本身的二向性反射特性(汪骏发等,2001)。二向性反射是自然界物

体对电磁波反射的基本现象,一般用BRDF来表达。

Nicodemus等(1977)给出了BRDF的完备定义,即地表来自某方向辐照度的微增量与所引起的观测方向上反射辐亮度增量之间的比值:

$$f_r = f(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (1)$$

式中, θ_i 和 θ_r 分别代表入射天顶角和观测天顶角, φ_i 和 φ_r 分别代表入射方位角和观测方位角。 E_i 代表入射辐照度, L_r 为反射辐亮度。BRDF被广泛应用于反照率(Schaaf等,2002)、叶面积指数(Myneni等,2002)、聚集指数(Chen等,2003,2005)、光合有效辐射吸收比(Ranson等,1994)等参数的反演,甚至在组分温度反演(阎广建等,2000;徐希孺等,2001)及地形校正(闻建光,2008)等研究中也是关键的概念。

光线入射与观测方向属于遥感几何(图4(a))。遥感几何描述的是光源、观测和地物之间的相对位置关系,与此相关概念及定义见表1。

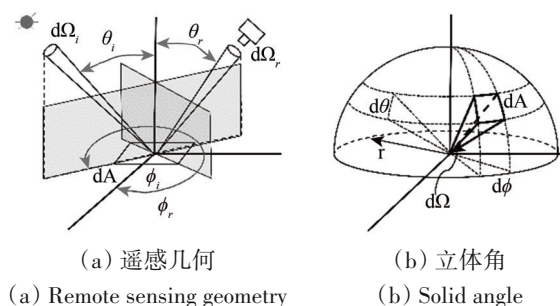


图4 遥感几何示意

Fig.4 Illustration of remote sensing geometry

BRDF虽能较好地描述非朗伯体表面反射特性的空间变化特征,但不易测量,因此往往采用另一种描述表面二向反射特性的无量纲物理量—二向性反射率因子BRF(Bidirectional Reflectance Factor)来替代(图5(a))。BRF是在一定的辐照和观测方向下,目标地物的反射辐亮度与处于同等光照条件下理想漫反射板的反射辐亮度 $L_r^{id}(\theta_i, \varphi_i)$ 之比。BRF在数值上等于二向性反射率 ρ ,而二向性反射率则定义为观测方向的辐亮度乘以 π 再和入射的辐照度相比。BRF和 ρ 的公式如下:

$$\text{BRF} = R(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dL_r^{id}(\theta_i, \varphi_i)} = \pi \cdot \text{BRDF} \quad (2)$$

$\pi \cdot \text{BRDF}$

$$\rho(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \pi \cdot \frac{L(\theta_r, \varphi_r)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (3)$$

式中, $L(\theta_r, \varphi_r)$ 为遥感器在一定方向上观测到的辐射亮度, $E_i(\theta_i, \varphi_i)$ 为辐照度。实际上BRF依然难以测量,这是因为在真实的光照条件下,天空光是半球入射,同时传感器观测时总会有一个张角,不可能只观测到一个无限小的立体角的反射辐射。

针对天空光半球入射的影响,科研人员在测量BRF时一般采用单遮挡和双遮挡法来进行消除。如果光源仅仅来自于天空,测得的是半球一方向反射因子 HDRF (Hemispherical-Directional Reflectance Factor):

$$\text{HDRF} = R(\theta_i, \varphi_i, 2\pi; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, 2\pi; \theta_r, \varphi_r)}{dL_r^{id}(\theta_i, \varphi_i, 2\pi)} \quad (4)$$

表 1 遥感几何相关概念

Table 1 Concepts related to remote sensing geometry

相关概念	英文名称	解释
天顶角	Zenith	太阳入射方向或传感器观测方向与当地天顶方向的夹角
方位角	Azimuth	从正北方向到太阳入射或传感器观测方向在水平面上投影的顺时针夹角
相位角	Phase Angle	太阳入射和传感器观测方向之间的夹角
主平面	Principal Plane	太阳入射平面即主平面,在主平面内观测到的地表的亮暗变化最为鲜明
垂直主平面	Perpendicular Plane	与主平面垂直的平面是垂直主平面
主锥面	Principally Conical Plane	绕天顶方向以太阳天顶角旋转一周形成的锥面,在主锥面上,天顶角不变,方位角变化
前向散射	Forward Scattering	顺太阳入射方向的散射,散射方向与入射方向夹角小于90°
后向散射	Backward Scattering	逆太阳入射方向的散射,散射方向与入射方向夹角介于90°与180°之间
热点	Hotspot	顺着太阳方向看时,没有阴影,观测到的地表往往最为明亮,该方向为热点方向,热点方向地表最亮这一现象被称为热点效应
暗点	Darkspot	主平面内,在前向散射方向上观测到的阴影最多,对应亮度最低的方向

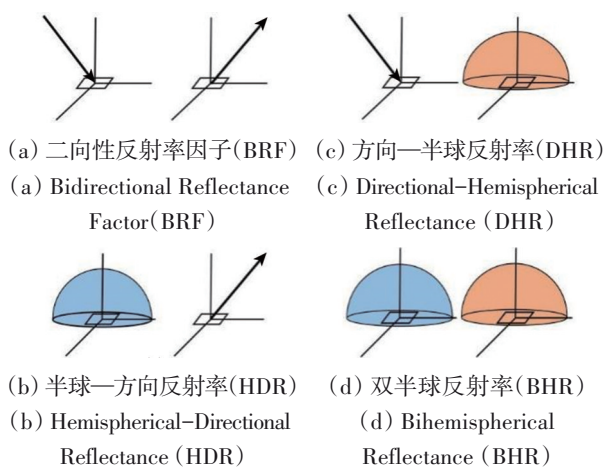


图 5 几种反射率概念示意图(蓝色一半球入射,橙色一半球出射)

Fig.5 Diagram of reflectances (Blue-Hemispherical incidence, Orange-Hemispherical Exitance)

与HDRF对应的是半球一方向反射率HDR (Hemispherical-Directional Reflectance) (图5(b))。此外,根据入射能的照射方向和反射的出射方向,与反射率相关的概念还有方向一半球反射率DHR (Directional-Hemispherical Reflectance) (图5(c))和双半球反射率BHR (Bi-hemispherical Reflectance) (图5(d))。方向一半球反射率也叫直入扇出反照率,是方向性反射率在观测半球空间

的加权平均,表达的是入射光只有太阳直射光时地表总的反射能力,也叫黑空反照率(Black Sky Albedo); BHR也称双半球反射率或扇入扇出反照率,是方向一半球反射率在入射半球空间的加权平均,表达的是只有天空光照射时地表总的反射能力,也叫白空反照率(White Sky Albedo)。黑空反照率和白空反照率都是理想情况下定义的,根据直射光与天空散射光的比例对二者进行线性加权可获得蓝空反照率(Blue Sky Albedo),也就是地表的真正反照率(Martonchik等,2000;赵英时,2013)。

3 多角度遥感观测

多角度的观测可以在不同的平台上进行,对应于不同的测量尺度,按照观测平台分类,可分为地面、航空和航天3个层次,对应的测量设备分别为地面多角度观测设备、机载传感器和星载传感器。地面和航空多角度测量只适用于小区域观测,成本较高,但灵活性较好,可以用于卫星观测结果的验证和定标。航天多角度观测的优势是可快速获取全球数据,但受到大气条件的影响,需要进行大气纠正。因此,在一定程度上,三者之间相互补充。

3.1 地面多角度观测

地面测量多角度反射率需要将光谱仪、参考板和多角度观测平台配合使用。根据BRDF的定义,应固定入射光的角度不变,将光谱仪搭载在多角度观测平台上,通过调整光谱仪在观测平台上的位置来测量处于相同的辐照和观测条件下不同观测天顶角和方位角下被测目标和参考板的辐亮度,二者的比值乘以标准参考板的反射率校正因子,即可得到近似的BRF。当入射与反射立体角趋于无穷小时,BRF为BRDF的 π 倍,进而获得整个半球空间的BRDF的分布。考虑到测量周期内太阳角度和光照条件的变化将会影响多角度数据集的规范化,一般优先在地物的二向反射特性最为明显的太阳主平面和垂直主平面方向上进行测量,测量时需要考虑光照和观测几何的精确控制,并提高采样间隔,减轻劳动强度。

鉴于早期的多角度测量完全由试验人员手持光谱仪进行观测,较为费力且难以精确测定成像角度,因此,国内外陆续发展了多种多角度观测系统,总体上可分为固定视场模式和可变视场模式两种。固定视场模式在地面观测视场保持一致的情况下,通过多角度观测架在半球空间内转动光谱仪来实现多角度观测,由于观测到的始终是同一目标,因此对观测范围内地物的均匀度要求不高,且测量过程也更符合BRDF的定义;可变视场模式是使光谱仪在一个静止的平台上向不同角度观测,不同角度看到的视场不同,因此这种方式需要保证观测范围内地物差别不大。图6所示为两类设备中的几种代表性观测装置。

固定视场模式的多角度观测系统,最早可追溯到1952年,当时科研人员研制了一台采用“天顶半圆弧”结构对积雪进行观测的多角度观测架(Middleton和Mungall,1952)。20世纪90年代以来,适用于测量冠层尺度方向反射率的多角度设备相继出现,典型的如瑞士的野外测角系统FIGOS(Field-Goniometer System)(Sandmeier等,1995),英国的测角辐射光谱系统GRASS(Gonio Radiometric Spectrometer System)(Pegrum等,2006)、加拿大莱斯布里奇大学测角系统ULGS(University of Lethbridge Goniometer System)系列(Coburn和Peddle,2006)、地基波谱—方向观测手动可移动平台ManTIS(Manual Transportable Instrument platform

for ground-based spectro-directional observations)(Buchhorn等,2013)等。其中,FIGOS使用电机控制的方位角导轨和天顶角导轨来自动调节光谱仪的位置,其“方位圆+天顶半圆”的设计结构被后续的很多多角度观测架所沿用和发展,但其结构笨重导致拆装费时费力。GRASS在集成FIGOS的优点的基础上,在观测架上安装36台传感器,可以在不同角度进行同步测量,避免了导轨的使用且有效消除了不同时间内观测环境的变化带来的观测误差,但同步安装的多台传感器会产生阴影,昂贵的造价限制了它的推广和应用。ULGS系列的工作原理与以上二者类似,早期需要全手动操作,最新的ULGS在设计上采用了悬空的轻便圆弧来减少测量架阴影对目标的影响,可由电机驱动光谱仪进行全自动的观测,但其观测天顶角最大只能达到 30° 。ManTIS在设计上未采用“方位圆+天顶半圆”的方式,而是模仿了螳螂的身体结构,手动调整传感器的角度,在稳定和便携性上具有优势,但这种设计的缺陷在于,由于杠杆原理,大天顶角观测时受力过大会造成设备的平衡性问题,导致其观测的天顶角范围比“方位圆+天顶半圆”方式的设备小,最大只能达到 30° 。

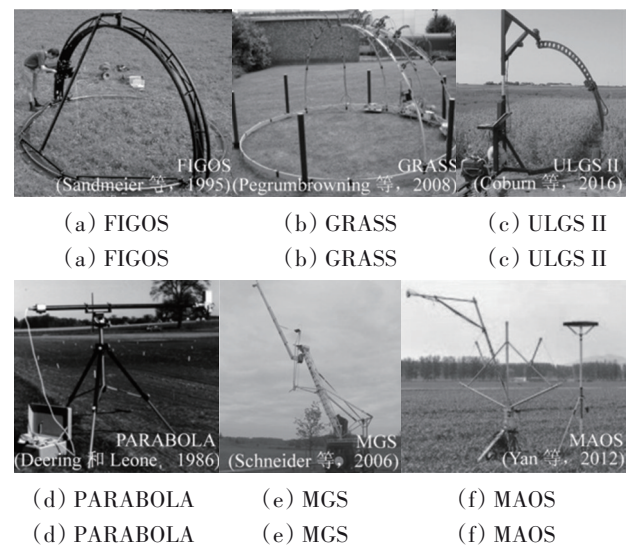


图6 典型的地面多角度观测设备((a)–(c)为固定视场模式;(d)–(f)为可变视场模式)

Fig.6 Typical Ground-based Multi-angle Observation Equipment: (a)–(c) are representations of the fixed field of view mode; (d)–(f) are representations of the changeable field of view mode

典型的可变视场模式的多角度地面测量系统中,NASA在1986年研制了便携式陆—气快速二

向观测仪 PARABOLA (Portable Apparatus for Rapid Acquisition of Bi-directional Observation of the Land and Atmosphere) (Deering 和 Leone, 1986), 该装置采用旋转扫描方式, 将探测器固定在三角支架上, 由计算机控制不同角度的旋转可实现两个轴向的任意角度扫描, 假设地表均一, 在选择假设位置时要求比较严格; 德国慕尼黑大学于2004年研制了大型的移动测角仪系统 MGS (Schneider 等, 2006), 该系统针对以往模式无法在同一方位平面始终保持对同一地面目标进行观测的问题, 通过调节天顶悬臂高度的方式来达到改变天顶角的目的, 能快速改变观测位置, 对环境的适应性强; 国内北京师范大学从2000年开始设计了系列便携式多角度观测平台, 代表性的是2012年设计的多角度观测系统 MAOS (Multi-angle Observation System) (Yan 等, 2012)。MAOS的突出特点如下: 一是在结构上未采用典型的天顶弧与方位圆轨道, 而是改用连杆结构, 重量较轻, 便携性较好; 二是采用电机驱动来实现观测角度的自动切换, 可在任一方位角上进行不同天顶角的观测; 三是光谱仪旁边安装了摄像头, 光谱测量与相机拍摄同步进行, 对理解地物的 BRDF 特性有重要作用。MAOS兼具便携性和自动观测的优点, 但在不同方位观测的依然是不同的视场范围。

总体上, 二向反射地面测量数据具有精度高且角度采样密集等优点, 但由于仪器探头的遮挡, 地面多角度测量难以观测到“热点”效应, 常规的“方位圆+天顶半圆”的结构的观测架产生的阴影大, 对热点测量造成的影响更大。针对天顶悬臂或观测架本身产生的阴影导致热点难以准确测量的问题, 应考虑如何校正地面观测的热点反射率。此外, 在行播作物的 BRDF 地面测量中, 存在视场变化所引起的不确定性问题 (陈玲等, 2009)。研究表明大视场角会在一定程度上平滑并歪曲地物的方向反射特征, 因此, 需要对视场变化所引起的二向反射特性测量的误差进行分析, 并针对特定地物给出测量的合理化建议。

由于一般情况下地面测量要与卫星过境和航空飞行同步进行且应避免观测时段内太阳角度的变化及天气变化带来的影响, 所以对地物的多角度测量应尽快完成, 并减轻多角度观测设备的重量, 使其方便携带与搬运。由于测量过程需要多

角度观测架和光谱仪协同工作, 已有研究开发了软硬件结合的 BRDF 自动测量系统 (余谭其, 2018), 无人值守的自动化观测设备已成为地面多角度观测的努力方向。

3.2 机载传感器

从机载多角度数据中提取地表的二向性反射, 是通过航线内或多条航线的飞行图像中对同一目标的重叠部分来获得的, 前提是多角度遥感图像的自动配准和几何校正。在飞行前一般需要进行传感器的辐射定标, 得到每个波段的定标系数, 以便于根据图像的 DN (Digital Number) 值计算辐射亮度。在观测时应根据实际需要设计航高、选择合适的传感器并设计重复周期, 并根据传感器的重量和大小, 将其搭载在有人机或无人机上获取数据, 具有灵活性高的优点。航空多角度观测介于地面观测和航天多角度观测之间, 获取的影像空间分辨率较高, 可作为地面观测和航天测量的桥梁, 在遥感尺度转换和真实性检验方面具有重要意义。

在众多国内外的机载传感器中, 国外应用较多的主要有 AirMISR、高级固态阵列光谱辐射计 ASAS (Advanced Solid-state Array Spectroradiometer)、云吸收辐射计 CAR (Cloud Absorption Radiometer)、AirPOLDER、MODIS 机载模拟器等。其中, AirMISR 是多角度成像光谱辐射计 MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer) 的机载试验传感器, 其辐射和光谱特性与 MISR 相似, 用于 MISR 的真实性检验 (Abdou 等, 2001); 类似地, AirPOLDER 是地球反射偏振及方向性测量仪 POLDER (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances) 的机载试验传感器。ASAS 是 NASA 研制的较早的能获得多角度遥感数据的机载传感器, 能实现可见光到近红外波段 62 个光谱通道内 8 个角度的观测, 可快速且大面积地探测地表二向反射特性, 为模型的验证和反演提供有效数据 (Irons 等, 1991); CAR 是 NASA 于 1983 年研制的多光谱 (0.34—2.3 μm) 扫描辐射计, 最初有 13 个窄波段光谱通道, 2000 年通道数量升级到 14 个, 瞬时视场角为 1° , 从天顶到天底可扫描 190° 的范围 (King 等, 1986; Gatebe 和 King, 2016), 从而用于研究云的反照率和地表的 BRDF 特性。

国内典型的机载多角度观测平台包括机载多角度多光谱成像系统 AMTIS (Airborne Multi-angular TIR/VNIR Imaging System) 和广角红外双模式成像仪 WiDAS (Wide-Angle Infrared Dual-model line/area Array Scanner)。AMTIS 是中国自主研发的第一台机载多角度成像系统, 它采用画幅式的成像方式, 通过摆动装置, 使其沿航线方向从前向后摆动, 可同时获取可见光、近红外和热红外 3 个波段 9 个观测方向的多角度遥感图像, 是国际上第一个在热红外波段具有 9 个观测角度的多角度传感器 (李小文等, 2001)。应用 AMTIS 可方便地获得各种地表的二向性反射和热辐射数据, 结合多角度模型可提高反照率、叶面积指数、植被高度及组分温度等参数的计算精度, AMTIS 对推动中国二向性反射建模与地表热辐射方向性建模的研究具有重要作用 (李小文等, 2001; 何立明等, 2006)。WiDAS 采用多线阵组推扫成像和画幅式成像两种模式, 在面阵相机中选取多个线阵组, 可同时获取可见光/近红外波段 5 个角度、中红外/热红外波段 7 个角度的数据。在黑河生态水文遥感综合实验中, 使用 WiDAS 获取的多角度影像为发射率、雪面温度、组分温度等参数的反演提供了数据支持 (李新等, 2012)。

总体上, 早期的一些机载传感器多为星载传感器的试验机, 对于星载传感器的前期测试和论证工作具有重要作用, 且都是搭载在有人机上获取数据的, 在进行遥感实验时, 使用有人机需要提前申请空域, 手续复杂, 申请到的飞行时段内天气状况不一定适于飞行且成本较高。近年来, 随着无人机技术的高速发展, 无人机已成为近距离 (数十米到数百米) 多角度测量的新平台, 将轻便的多光谱或高光谱相机搭载在无人机上正成为一个新的方向, 可采用半球飞行模式利用云台的转动来旋转相机, 或采用航线飞行模式利用航向重叠和旁向重叠获得多角度数据 (Grenzdörffer 和 Niemeyer, 2011; Burkart 等, 2015)。无人机遥感因其灵活性好、空间分辨率高、易于实施且运行成本低等特点, 正逐渐成为获取航空多角度数据的重要手段。

3.3 星载传感器

地物的方向反射特性既受观测方向也受入射

方向变化的影响, 就广义的多角度星载传感器而言, 太阳入射方向的改变也能造成传感器接收信号的变化, 如静止气象卫星 Meteosat 等通过太阳入射角的日变化获取方向性信息, 属于不同太阳入射方向的多角度。较为特殊的传感器如位于拉格朗日 1 号点 (L1) 上的深空气候观测站 DSCOVR (Deep Space Climate Observatory), 始终保持和太阳相对位置的一致, 通过地球自转来改变观测方向, 每个观测角度都是热点, 属于入射方向和观测方向同时变化的多角度。本文主要总结观测方向变化的多角度传感器。

近年来已有很多卫星具有多角度观测能力, 主要的星载传感器有 ATSR 系列、POLDER、VEGETATION、MISR、紧凑式高分辨率成像光谱仪 CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer)、AVHRR、MODIS、可见光红外成像辐射仪 VIIRS (Visible Infrared Imager Radiometer Suite,) 等, 它们的数据获取方式可分为同步多角度观测和时间序列多角度观测两种 (Diner 等, 1999, 2005)。

同步多角度观测是指沿飞行方向在几分钟内直接获得几个角度的数据, 如 ATSR 系列 (Stricker 等, 1995)、POLDER (Deschamp 等, 1994)、MISR (Diner 等, 1998)、CHRIS (Barnsley 等, 2004)、CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) (Wielicki 等, 1998)、ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance radiometer) (Abrams, 2000) 以及中国于 2016 年发射的碳卫星上搭载的 CO₂ 探测仪和云与气溶胶偏振成像仪 CAPI (Cloud and Aerosol Polarization Imager) (蔺超等, 2017) 和高分五号卫星上搭载的大气气溶胶多角度偏振探测仪 DPC (Directional Polarization Camera) 等。其中, ATSR 系列采用圆锥扫描的方式获取两个观测角度; POLDER 采用宽幅二维 CCD, 一轨最多可以获得 16 个角度的观测数据, 在所有的星载多角度传感器中, 这种方式的角度的采样能力最好; CAPI 和 DPC 的数据获取方式与 POLDER 类似, 以气溶胶探测为主要目标; MISR 是通过 9 个传感器沿轨同时成像; CHRIS 较为特殊, 其卫星平台 PROBA 上安装了 4 个反作用轮, 可在沿轨和垂直轨道方向转动来实现多角度观测, 属于高光谱多角度星载传

传感器。未来,参考 CHRIS 传感器的方式,采用小型的敏捷型卫星星座可能会在角度采样方面具有更大的灵活性。

时间序列多角度观测是指传感器固定,利用其宽视场角导致的轨道重叠获取多时相数据,累积形成多角度数据集,如 AVHRR (Privette 等, 1996)、SPOT-VGT、MODIS (Salomonson 等, 2002)、中分辨率成像分光计 MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer)、VIIRS 等。宽视场角传感器的主要问题在于难以直接在主平面观测,观测到热点的概率很小。而在热点区域,观测角度的微小改变会导致反射强度剧烈变化,宽视场角传感器难以捕捉到这种变化 (Sandmeier 等, 1998; 焦子铎, 2008),一般只能通过模型拟合的方式得到热点反射率,拟合精度直接影响跟热点反射率相关的结构参数(如聚集指数)的估算精度。

总体上,与同步多角度观测相比,由于时间序列多角度是通过卫星连续多天运行所产生的轨道漂移构成的多角度,不是真正意义上的多角度传感器,存在以下几方面问题:一是这种观测方式不适用于在构成多角度数据集的时间段内较容易随时间变化的地面目标(如降雪、融雪、洪水和火灾等)的观测,应用范围受限;二是获取的多角度数据的观测角可能不理想,角度采样能力有限;三是要经过严格的采样、配准以及大气校正,数据预处理困难。

图7为几种典型星载传感器的多角度数据获取方式,其中,图7(a)、(b)、(c)、(d)均为同步多角度观测,图7(e)为时间序列多角度观测。表2所列是目前典型的多角度星载传感器及详细参数。

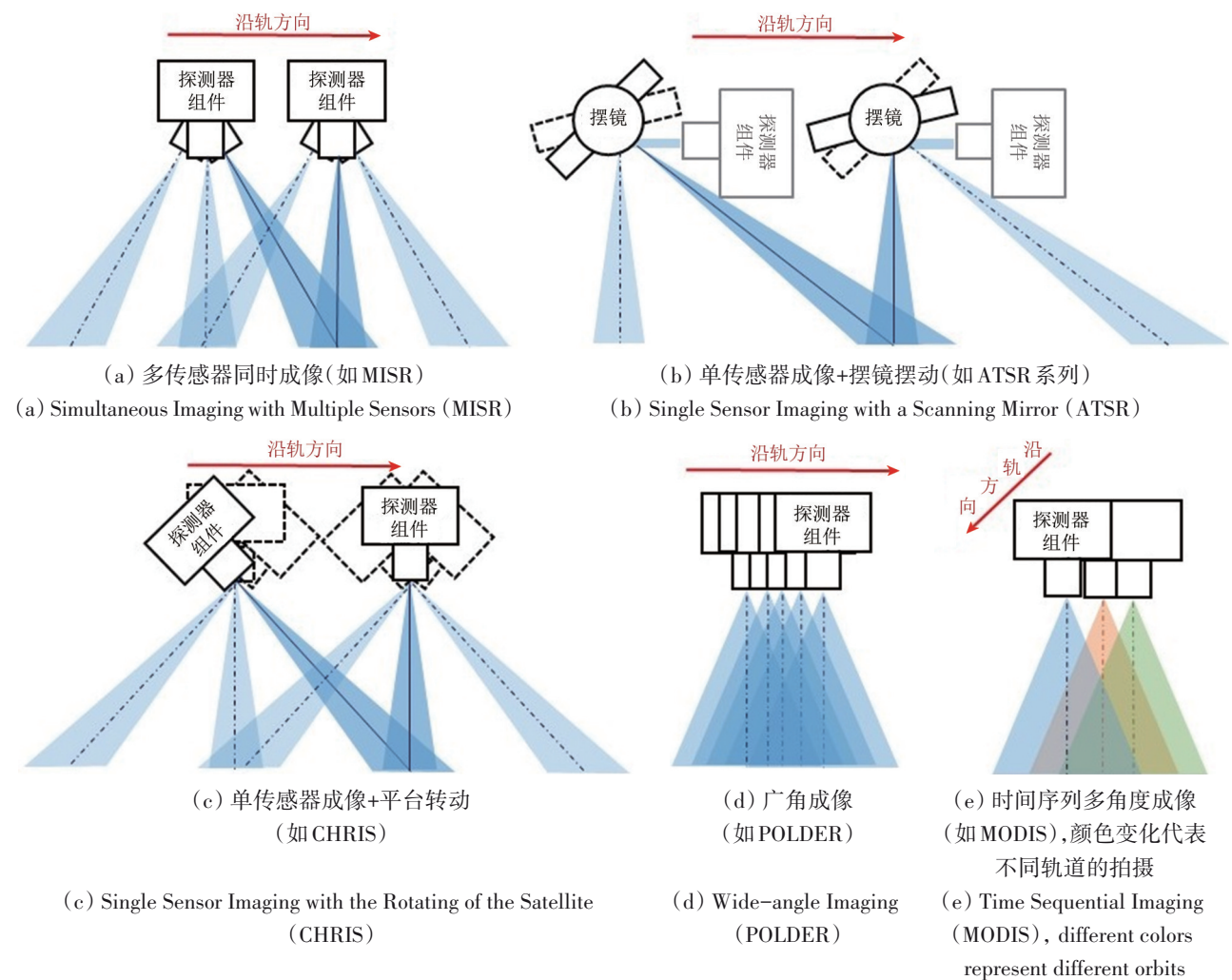


图7 多角度数据获取方式示意图

Fig.7 Ways of acquiring multi-angle data

表 2 典型的多角度星载传感器
Table 2 Typical multi-angle spaceborne sensors

星载传感器	ATSR 系列	POLDER	MISR	CHRIS	CAPI	CERES	MODIS	VIIRS	AVHRR 系列	VEGETATION	MERIS
搭载卫星	ERS-1 ERS-2 ENVISAT	ADEOS-1 ADEOS-2 PARASOL	Terra	PROBA-1	碳卫星	TRMM Terra Aqua Suomi NPP JPSS-1	Terra Aqua	Suomi NPP	NOAA 气象卫星	SPOT-4 SPOT-5	ENVISAT
最早发射时间	1991-07-17	1996-08-17	1999-12-18	2001-10-22	2016-12-21	1997-11-27	1999-12-18	2011-09-28	1979-09	1998-03-23	2002-03-01
现在是否在轨	否	否	是	是	是	是	是	是	是	否	否
获取方式 (如图 7)	(b)	(d)	(a)	(c)	(b)	(c)	(e)	(e)	(e)	(e)	(e)
角度数/ 重复周期	2°	约 12°	9°	5°	可调节	至少 1—2 d, 1 d 最多获得 4 个观测轨道 资料	至少 14 h	至少 12 h	至少 2—3 d	至少 3 d	
最大观察角 (前后向)	55° (仅前向)	43° (前后向)	70.5° (前后向)	55° (前后向)	60° (前后向)	—	—	—	—	—	—
波段	ERS-1 为 4 个波段 其余为 7 个波段, 中心波长: (0.55, 0.66, 0.87) 1.6, 3.7, 10.85, 12 μm	8 个波段, 中心波长: 0.443, 0.490, 0.565, 0.670, 0.763, 0.765, 0.865, 0.910 μm	4 个波段, 中心波长: 0.446, 0.558, 0.672, 0.866 μm	5 个波段, 中心波长: 0.38, 0.67, 0.87, 1.375, 1.64 μm	3 个波段: 短波段 段: 0.3—5 μm, 地球热辐射窗口 波段: 8—12 μm, 总 波段: 0.3—200 μm	36 个可见光到 热红外波段	22 个可见光到 热红外波段	从 4 个波段 发展到 5 个, 再发展到 现在的 6 个 波段, 中心 波长: 0.63, 0.863, 1.61, 3.74, 10.8, 12 μm	4 个波段, 中心波 长: 0.48, 0.645, 0.835, 1.665 μm	15 个可见 光与近红 外波段	
星下点 空间分辨率	1 km×1 km	6 km×7 km	275 m×275 m	17 m×17 m	500 m×500 m	250 m×250 m 500 m×500 m 1 km×1 km	370 m×370 m 740 m×740 m	1.1 km×1.1 km	1.15 km×1.15 km	300 m×300 m 1.2 km×1.2 km	
扫描带宽/km	500	2200	380	13	400	—	2330	3040	2800	2250	1150

3.4 数据特点

除了利用广角焦平面成像系统所获取的数据, 所有的多角度数据具有如下特点: (1) 视场效应和分辨率变化。对于光机扫描式传感器, 当传感器以固定的瞬时视场角对地成像时, 其观测到的地面范围随着观测天顶角的增加而增大 (图 8(a)), 存在视场效应并导致分辨率的变化。视场效应的存在, 使得遥感观测到的BRF存在误差 (陈玲等, 2009), 不能很好地反映地物真实的二向反射特性。(2) 全景畸变和图像畸变。对于光机扫描式传感器, 不同观测角度具有相同的探测立体张角, 随着观测角度的增加, 遥感像元在地面上看到的范围越来越大的现象称为全景畸变,

将数据显示在屏幕上时, 发生扭曲变形, 产生图像畸变 (图 8(b))。对于随着观测角度的增大所导致的空间分辨率降低的问题, VIIRS采用像元聚合策略来减小分辨率的变化 (Schueler等, 2013); 对于广角焦平面成像系统, 只要垂直于地面拍摄, 理论上水平地表不同角度所获取的像元大小是一样的, 但是会存在边缘减光效应 (图 8(c)), 即越远离中心, 瞬时视场角越小, 接收到的能量越少, 获取的图像越到4个角越暗。针对大多数边缘减光效应的校正方法都需要从均匀照明的场景中获取参考图像的问题, Kordecki等 (2016) 提出了一种不依赖于参考图像的基于非径向光晕局部抛物模型的方法来对图像中亮度的不均匀性进行补偿, 取得了很好的校正效果。

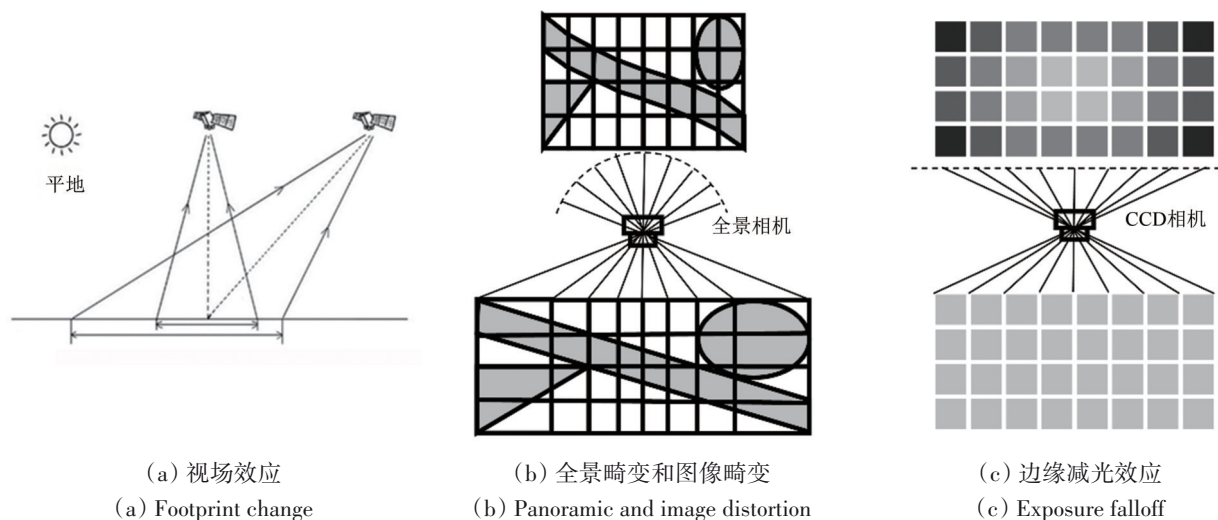


图 8 多角度数据的特点

Fig.8 Characteristics of multi-angle data

以上数据特点导致多角度数据预处理的复杂性。在图像配准上, 难点在于多角度观测获得的影像之间的几何形变和光谱变化复杂, 且在几何校正的同时必须把角度信息适当保留。因此, 针对多角度数据的图像配准算法必须具有较强的几何形变和光谱变化的适应能力, 为此刘强等提出了基于B样条函数的金字塔匹配方法 (刘强等, 2002); 在大气校正上, 与一般的星下点大气校正方案不同, 多角度遥感图像的大气校正还要考虑另外3个因素: 一是地面的非朗伯特特性, 多角度大气校正时如果依然假设地表朗伯存在逻辑上的合理性问题, 而地表的BRDF特性只有在大气校正之后才能精确知道, 所以胡宝新、何立明等提出了

大气纠正环的思路, 采用迭代的方式逐渐进行大气纠正 (胡宝新等, 1996; 何立明等, 2004); 二是邻近像元的影响, 这种影响随观测高度角的改变而变化, 它使得不同地物的反射对比度下降, 当邻近像元是非均质目标时, 其影响变得更为复杂 (高峰和朱启疆, 1997); 三是随着观测角度的增加, 电磁波穿过大气的路径变长, 程辐射增加, 多角度图像的大气校正算法需要定量地衡量和校正以上影响。

4 多角度遥感机理建模

BRDF模型是对地表非朗伯特性的数学描述, 一般可分为经验模型、物理模型和半经验模型, 其

研究对象可分为植被冠层、土壤和水体等。本文以植被冠层BRDF模型为例分别介绍这几类模型。其中,经验模型直接建立观测数据与遥感几何之间的经验函数关系,具有简单、易于计算的优点,但模型依赖于大量实测数据且缺乏明确的物理机制,时空外延性差。物理模型是基于物理过程对客观世界的数学描述,模型中的每一个参数都具有明确的物理意义。目前关于物理模型的研究在类别上可分为辐射传输模型、几何光学模型、混合模型和计算机模拟模型。经验一半经验模型综合了经验模型和物理模型的优点,模型中的参数是具有一定物理意义的经验参数,表达简洁。半经验模型中最为著名的是线性核驱动模型,该模型被MODIS反照率产品业务化算法所采用。目前,随着计算机技术的高速发展,适用于大范围场景的BRDF模拟模型有望得到快速发展(冷疏影,2016)。本文不涉及经验模型的内容,侧重于模型的物理机制,主要介绍在研究中广泛应用的物理模型和经验一半经验模型。

4.1 辐射传输模型

辐射传输RT(Radiative Transfer)模型的理论基础是辐射传输理论,通过分析光子与介质之间的相互作用过程从而描述介质的辐射特性,并用数学的形式将其表达出来,其核心是辐射传输方程。辐射传输理论早期被应用于天体物理学和大气科学领域,1960年以后辐射传输理论逐渐被用于陆地遥感,并成为主流学派,广泛应用于大气、海洋、土壤、植被、冰雪等研究领域。其优点在于从辐射传输理论角度解决植被遥感的量化问题,充分考虑了多次散射作用,适用于连续植被冠层的反射状况,缺点是复杂的微分方程求解困难,须借助一定的简化方法。植被RT模型具体可分为叶片和冠层辐射传输模型。

叶片辐射传输模型将叶片反射的辐射分为叶片表面反射的辐射和叶片内部多次散射的辐射两部分,代表性的模型为专为针叶设计的LIBERTY模型(Leaf Incorporating Biochemistry Exhibiting Reflectance and Transmittance Yields)和适用于阔叶的PROSPECT模型(the leaf optical PROPERTIES SPECTra model)。LIBERTY模型属于紧凑球形粒子模型,是针对针叶的特殊性而发展起来的单叶尺度的辐射传输模型(Dawson等,1998),被广泛

应用于针叶叶片反射率和透过率的模拟。由于LIBERTY没有考虑针叶的边缘效应,Wang和Ju(2017)对其进行了改进,提高了模型的适用性。PROSPECT模型属于多层平板模型,自提出以来经历了一系列改进,Vilfan等(2016)引入荧光的概念发展了适用于叶绿素荧光反演的Fluspect-B模型;Féret等(2017)将花青素引入PROSPECT中,提出了PROSPECT-D模型。将PROSPECT-D与SAIL(Scattering by Arbitrary Inclined Leaves)模型或DART(Discrete Anisotropic Radiative Transfer)模型结合,可以实现此前无法模拟的一些植被类型的光学特性的模拟。

早期代表性的冠层模型为基于KM(Kubelka-Munk)理论的Suits和SAIL模型,属于一维植被辐射传输模型。Suits模型考虑太阳和观测角度的变化,将冠层理想化为水平和垂直各向同性的叶片的混合体并将其参数化(Suits,1971)。SAIL模型在Suits模型的基础上进行了改进,使得其适用于任意叶倾角分布的情况(Verhoef,1984)。Suits和SAIL模型虽然可以有效表达光线穿过介质过程中所发生的变化并刻画碗边效应,但是KM理论未考虑镜面反射且无法表达热点效应。针对早期的辐射传输模型无热点的问题,科研人员发展了一系列模型,代表性的SAILH模型引入了双向间隙率来描述热点效应(Kuusik,1995;Verhoef,1998)。Verhoef和Bach后来还将Hapke(1981)土壤BRDF模型及冠层聚集效应引入,形成4SAIL2模型(Verhoef和Bach,2003);Jacquemoud Baret(1990)将叶片光谱模型PROSPECT与SAILH相耦合得到PROSAIL模型(Jacquemoud等,2009)。由于一维的植被辐射传输模型不能描述森林等离散植被,Shabanov等(2000,2007)引入随机场的思想,利用相关函数描述介质分布的不均匀性,提出随机辐射传输模型,用一维模型的形式达到了接近于三维模型的精度的效果,从而将辐射传输模型的适用对象扩展到森林。SCOPE(Soil-Canopy-Observation of Photosynthesis and Energy fluxes)模型将辐射传输和能量平衡耦合在一起,经过十年的发展,可以用反射率、荧光光谱和能量通量的计算(van der Tol等,2018)。

4.2 几何光学模型

与辐射传输模型从微体积元到离散植被的思

路不同,几何光学模型始于较大尺度上的宏观现象。几何光学模型假设树冠是具有规则几何形状的物体,通过光线与树冠间的几何关系,借助可见光照目标、可见光照背景、可见阴影目标、可见阴影背景4个分量的线性组合来表示不同角度下传感器所接收到的辐亮度。事实上,在一定的入射条件下,光照和阴影都是客观存在的,但不同观测角度下传感器所观测到的上述4个分量的面积比例有差异,这一差异与植被结构参数有关。几何光学模型的几个主要假设为:(1)4个分量各向同性;(2)太阳光线平行入射,和观测方向共同决定四分量的面积比例;(3)不考虑各分量内部的相互作用;(4)目标场景中,目标物的分布具有一定统计规律,可用概率分布进行描述。当从不同方向观测目标场景时,目标物亮度的差异是由四分量的面积比例所决定。几何光学模型考虑了太阳—目标—传感器之间的几何位置关系,可以合理解释热点现象,具有简单明晰的优点(李小文等,1993),对于离散植被的单次散射项的描述效果较好。

经典的Li-Strahler几何光学模型用圆锥来模拟树冠,适用于离散的针叶林。鉴于圆锥的数学表达十分繁杂,自1986年以后,将对树冠的假设简化为椭球。为了使模型更适用于浓密森林, Li和Strahler(1992)进一步考虑了入射和反射方向相互遮蔽和阴影重叠,发展了最具有代表性的几何光学相互遮蔽模型GOMS(Geometric Optical Model with Mutual Shadowing)。Chen和Leblanc(1997)考虑了树冠尺度、大于树冠、小于树冠和冠层内部四种不同尺度上的冠层几何结构以及树冠为非随机分布的情况,发展了四尺度模型,并进一步考虑叶片尺度生化组分的影响发展了五尺度模型。Leblanc等(1999)将四尺度模型推广到两层模型,能考虑垂直方向的异质性。垄行种植的农作物与森林植被冠层的几何结构有很大差异, Kimes(1983)将行播作物近似为实心无限长箱体,建立了适用于任意观测方向的几何光学模型,后被国内多名学者拓展,考虑了双向间隙率的影响(Chen等,2002; Yan等,2003; Yu等,2004)。Zhao等(2010)进一步将垄行结构与SAIL模型结合同时考虑行结构与多次散射的影响。

上述模型都是在平地假设下发展的,在复杂地形区,地形的起伏使得坡面所接收的辐射变化

剧烈,遮挡效应使得目标接收的直射辐射消失且大气向下漫射辐射减少,邻近地形的影响又会使目标接收的辐射增加。这些因素使得山区的BRDF建模具有特殊性。Schaaf等(1994)发现BRDF的形状由于地形导致的观测几何的变化而发生扭曲,在Li-Strahler几何光学模型的基础上考虑了地形的影响,将GOMS模型在坡地上进行了修正,但该模型认为树木垂直于坡面生长的假设存在一定的不合理性,且仅适用于椭球形假设的树冠。Fan等(2014a)基于树木垂直生长的假设,提出了基于四尺度模型的GOST(A Geometric-Optical Model for Sloping Terrains)模型,能较好地表达坡面倾斜对像元BRDF带来的影响。适用于粗分辨率多坡面遥感观测的山地BRDF模型也已发展了一些(Hao等,2018,2020),但是复杂山地的多角度建模和检验仍有待进一步研究(Wen等,2018)。

4.3 混合模型

由于传统的几何光学模型只能刻画单次散射特性,而近红外波段多次散射的贡献不可忽略,因此几何光学模型存在波段适用性不足的问题,鉴于此,陆续发展了几何光学模型和辐射传输模型优势互补的混合模型。

辐射传输模型的优点是在均匀连续植被的假设下,可以考虑多次散射作用,其缺点在于求解困难,对于复杂的三维空间微分方程只能得到数值解或近似解。几何光学模型的优点在于其适用于离散植被及粗糙地表,然而对阴影区的多次散射描述困难,因而当植被趋于连续,阴影区与非阴影区之间反差较小时,模型精度较低。鉴于几何光学模型和辐射传输模型在不同的场景假设下具有各自的优点和不足,李小文和Strahler充分利用几何光学模型在解释光照及阴影投射面积和地物表面空间相关性上的优势,在纯几何光学模型的基础上引入不连续植被间隙率模型,将光线在冠层中的多次散射引入几何光学模型中,用辐射传输方法求解多次散射,用几何光学求解冠层尺度的单次散射,分两个层次来建立光照面与阴影区反射强度的辐射传输模型,发展了既适用于稀疏植被也适用于离散植被的几何光学—辐射传输混合模型(GORT)(李小文等,1994)。模型对不同太阳高度时森林反照率和BRDF计算获得了较好

的结果。Fan 等将 GOST 模型和辐射传输模型结合, 发展了一种适用于坡地的混合模型, 通过模拟坡地森林中的多次散射, 克服了几何光学模型中阴影组分计算的困难 (Fan 等, 2014b), 这将有助于提高坡地上森林参数的反演精度。

徐希孺等 (2017) 指出, 稳定、准确且普适性强的植被冠层 BRDF 模型是遥感反演植被冠层结构参数的基础, 并发展了太阳短波范围内适用于多种植被类型和不同大气条件的植被二向性反射统一模型。统一模型首先将一次散射从冠层尺度转向叶片尺度, 利用叶片尺度的几何光学模型计算单次散射, 进而基于再碰撞概率的光谱不变性推导出多次散射的近似表达, 使植被 BRDF 用近似解析公式表达成为可能。最后, 在植被元素近似朗伯反射和透射的假设前提下, 通过聚集指数和间隙率实现了不同类型植被建模的统一。统一模型为植被参数遥感反演创造了更有利的条件, 其建模思想代表植被 BRDF 研究的长期发展方向。

4.4 计算机模拟模型

辐射传输模型和几何光学模型在建模时使用了多种简化假设, 因此忽略了冠层内部的精细结构特征。随着计算机技术的飞速发展, 可以精确刻画复杂冠层辐射分布的计算机模拟模型应运而生 (刘良云, 2014)。计算机模拟很早就被用于求解大气的辐射传输方程, 以及地气之间的相互作用, 模拟方法主要包括光线追踪和辐射度方法。

光线跟踪的主要思想是对进入场景的光线传输路径进行跟踪, 确定其与场景内组分是否相交, 以及相交后是否产生透射、反射或折射现象, 然后继续跟踪这些透射、反射或折射光线。光线追踪模型的基础是对光子路径采样, 所以如何有效的采样成为了问题的关键。蒙特卡罗方法是光线追踪过程中路径选择、光子状态判定等的基础 (Disney 等, 2000), 实质是对研究的系统进行随机观察抽样, 通过对样本值的观察统计, 求得所研究系统的某些参数。光线追踪模型的优点是可精细刻画光线在冠层中的辐射传输过程, 典型的模型有 FLIGHT (North, 1996)、FLiES (Forest Light Environmental Simulator) (Kobayashi 和 Iwabuchi, 2008)、librat (Lewis, 1999)、DIRSIG (Digital Imaging and Remote Sensing Image Generation) (Goodenough 和 Brown, 2012)、DART (Gastellu-

Etchegorry 等, 2015)、LESS (Large-Scale remote sensing data and image simulation framework over heterogeneous 3D scenes) (Qi 等, 2017, 2019) 和 Raytran (Govaerts 和 Verstraete, 1998) 等。

这些光线追踪模型按照其实现原理可分为前向和后向两种模式。前向光线追踪是指从光源发射光线, 追踪其到达传感器的过程。DART 模型是前向模型的典型代表之一, 通过将 4π 空间离散为固定方向, 可以跟踪能量传播的全部过程, 从而可以更为方便地计算各种能量平衡问题。目前 DART 模型可以模拟从可见光到热红外波段的地表-大气辐射相互作用, 如三维辐射分布, 卫星、航空、地基等的光谱影像以及离散、全波形和光子计数的地面和机载激光雷达点云。后向光线追踪是指从传感器发射光线, 通过光线的传播路径计算沿该光线进入传感器的辐亮度。后向追踪的主要优点是可以快速地模拟传感器的成像过程, 生成影像, 例如 DIRSIG 模型, 其主要用途是用于传感器的模拟与设计。值得一提的是, 近年来新发展的 LESS 模型, 主要针对大场景模拟进行了优化, 可以模拟大尺度的遥感影像以及复杂地形条件下的上下行辐射。LESS 模型是目前众多模型中少有的既可以进行前向光线追踪又可以进行后向光线追踪的模型。

辐射度模型由热辐射工程中的能量传递和守恒理论发展而来, 描述在封闭环境中的能量经多次反射以后, 最终会达到一种平衡状态。这种能量平衡状态可以用一系列方程来定量表达, 求解方程便可得到整个场景内的辐射度分布。早期的辐射度原理主要用于计算机图形学中, Borel 等 (1991) 将其引入遥感领域, 用于植被冠层反射率的计算。辐射度模型需要计算叶子之间及叶子与地表之间的相互遮阴的比例, 可以产生热点。优点是模型中没有过多的简化和假设, 可模拟任意方向的反射, 缺点是计算量大, 即使使用了加速运算的算法, 构建可视因子矩阵和求解辐射传输方程依旧是该方法的主要局限之一。利用辐射度进行计算及模拟的模型主要有 DIANA 模型 (Goel 等, 1991) 和结构真实模型 (Qin 和 Gerstl, 2000) RGM (Radiosity - graphics combined model)。目前随着计算机计算能力的迅速提高, 辐射度模型逐渐受到重视, 适用于大场景的 BRDF 模拟模型得到快速发展, 有望直接将计算机模拟模型用于查找

表的构建和遥感反演。

4.5 半经验模型

半经验模型综合了经验模型参数化和物理模型的物理机制，在描述地表二向反射分布时具有稳定、简洁且较为灵活的特点。这其中广为应用的是线性核驱动模型，该模型最早由 Roujean 等 (1992) 提出，随后由 Wanner, Li, 以及 Strahler 完善。Roujean 等 (1992) 将复杂的几何光学模型和辐射传输模型进行简化形成几何光学核和体散射核，同时将模型中与方向无关的变量分离作为常数，称为各向同性核，并将三者线性结合，形成了半经验的线性核驱动模型。半经验的核驱动模型既保留了辐射传输模型在描述体散射特性上的优势，又继承了几何光学模型刻画面散射特性的优点，它可以表达为

$$R(\theta_i, \theta_v, \phi, \lambda) = f_{iso}(\lambda) + f_{geo}(\lambda)k_{geo}(\theta_i, \theta_v, \phi, \lambda) + f_{vol}(\lambda)k_{vol}(\theta_i, \theta_v, \phi, \lambda) \quad (5)$$

式中， R 为地表二向性反射率； k_{geo} 为几何光学核； k_{vol} 为体散射核； f_{iso} 、 f_{geo} 、 f_{vol} 分别为 3 个核的核系数。半经验的线性核驱动模型由于形式简单、拟合能力强、易于快速反演，被广泛应用于卫星产品的生产当中。其中最为成熟的就是 MODIS BRDF/反照率产品业务化运行的模型算法，即 AMBRALS (Algorithm for MODIS Bidirectional Reflectance Anisotropies of the Land Surface)。目前业务化的算法选用 Ross_thick 体散射核和 Li_sparseR 几何光学核的组合，通常简称为 RTLSR 算法。由于 Ross_thick 体散射核未考虑热点效应，该模型普遍低估了热点方向的反射率，Jiao 等 (2016) 使用热点因子对 MODIS 业务化算法的 Ross_thick 体散射核进行修正，提高了热点反射率的拟合精度。针对核驱动模型很难刻画冰雪表面强烈前向散射的问题，Jiao 等 (2019) 进一步发展了一个雪核，使该模型可适用于冰雪覆盖地表。

受大气情况影响，单传感器数据反演地表二向反射特性往往存在角度采样有限的问题，如 MODIS 在 16 d 内可用数据超过 7 次的概率仅为 75.8% (闻建光等, 2015)，若能将多传感器数据融合，可提高角度采样的分布和数量。Liu 等基于核驱动模型的基本思想，引入组分波谱作为已知的驱动变量，将核系数中与波谱有关的量分离重组到核函数中，发展了多角度多光谱核驱动模型

ASK (Angular and Spectral Kernel Model)。模型中核函数是遥感几何与波长的函数但核系数与传感器波段无关，因此适合于所有传感器的所有波段，是多传感器综合反演陆表二向反射和反照率的有效方法 (Liu 等, 2010)。

5 多角度遥感的应用

随着卫星对地观测能力的提高、模型及反演方法研究的不断深入，多角度遥感技术的应用正蓬勃发展，在反照率、植被结构参数、云和气溶胶参数的反演以及冰冻圈遥感中都有大量的研究。

5.1 反照率

地表反照率是指地表向各个方向反射的全部光通量与总的入射光通量之比。反照率的计算中，单角度观测所获得的反射率难以外延到整个半球，在朗伯地表的假设下一般用天底方向的反射率来代替严格意义上的半球反照率。Kimes 和 Selleds (1985) 的研究表明朗伯反射的假定会引起反照率计算高达 45% 的误差；Vogt 等 (2000) 也在研究中证明朗伯假设会造成红光和近红外波段 BRDF/反照率的误差高达 35%—50%；Stroeve 和 Nolin (2002) 在研究中发现，与只使用光谱信息的模型相比，利用 MISR 数据将光谱和角度结合可以提高反照率的反演精度，因此考虑地表的方向反射特性对于提高 BRDF/反照率的反演精度有重要作用 (杨华等, 2002)。

目前在轨运行的星载传感器的陆表反照率产品大多是基于地表二向反射特性进行估算的，POLDER、MISR、MODIS 和 MERIS 等传感器都有反照率产品，但这些产品都是基于单一传感器，时间分辨率相对较低，不能反映冰雪等地表反照率的快速变化。若能联合多传感器数据，则可以在较短时间内获得足够数量的多角度观测数据集，生产高时间分辨率的多传感器联合的反照率产品。但是，不同传感器之间在空间分辨率、波段设置上的不一致，定标不准确等问题将会增加多传感器联合反演反照率的难度 (梁顺林等, 2013)。地表反照率产品的反演精度在冰雪和山地等区域依然有待提高。Jiao 等 (2019) 在现有 MODIS 业务化算法中发展的雪核有望提高冰雪反照率的反演精度。在山地反照率反演上，反演精度的提高依赖于山地 BRDF 模型的构建。现有的单坡面假设的

BRDF模型 (Schaaf等, 1994; Fan等, 2014a, 2014b) 可以适用于诸如TM影像的高分辨率数据, 但由于这类模型不考虑亚像元的影响, 将整个像元看成是具有单一坡度坡向的山坡, 对于粗分辨率遥感观测, 不能很好的刻画地形对BRDF的影响。发展适用于粗分辨率遥感观测数据的参数化山地BRDF模型是提高山区反照率反演精度的可行方向。

经过数十年的研究, 人们已经逐渐认识到“热点”观测是陆表BRDF中最特殊且不可忽视的一个角度。热点方向反射率远高于半球空间其它角度的反射率, 包含了丰富的信息, 对于地表BRDF的刻画具有重要影响 (Lacaze等, 2002), 并直接影响根据BRDF估算的反照率精度。由于热点方向具有角度特殊性, 传统的极轨卫星和地球同步卫星单一角度的观测很难捕捉到这一现象。2015年2月由美国国家海洋和大气管理局NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 和NASA联合负责的DISCOVER借助高轨道 (约150万km) 实现了全天多次对地热点方向观测, 这是一套全新的多角度遥感数据, 将有助于对地表BRDF的精确刻画, 从而提高反照率的估算精度。

5.2 植被参数

植被冠层结构影响光的利用率, 冠层吸水量和氮循环等, 相关参数是生态系统生产力模型和全球气候、水文模型的关键输入参数。多角度遥感增加了角度维信息, 有利于探测冠层结构所引起的反射率微小变化, 为反演植被结构信息提供了可能。Deering等的研究表明冠层的BRDF特性既受冠层结构也受叶片光学特性的影响 (Sandmeier等, 1998; Sandmeier和Deering, 1999), 若能消除叶片光学特性的影响, 则可据此提取植被结构参数。目前, 多角度遥感在聚集指数CI (Clumping Index) 反演、叶面积指数LAI (Leaf Area Index) 反演、植被类型划分、植被垂直分层覆盖度和冠层高度反演上都有一定的应用。

(1) CI反演: CI用来描述冠层中叶片分布的聚集情况, 在LAI的地面间接测量和遥感反演中具有重要作用。Chen等 (2003, 2005) 利用近红外波段的热点和暗点二向性反射率的差异构造了一个角度指数NDHD (Normalized Difference between Hotspot and Darkspot) 来消除叶片光学特性的影

响, 使得该指数只与冠层的几何结构有关, 进而建立了NDHD与CI之间的关系, 并利用POLDER数据生产了6 km分辨率的全球8个月的CI产品。He等 (2012) 生产了MODIS的全球CI产品, 将该产品的空间分辨率从6 km提高到了500 m, 但在时间分辨率上全年只给出一个值, 难以满足相关陆表和生态模型的应用需求。此外, 针对MODIS BRDF产品的热点低估问题, 采用了一种基于NDVI和太阳天顶角对热点反射率进行校正的方法, 该方法的前提假设是NDVI不存在尺度效应, 可能会对产品精度造成一定影响。Jiao等 (2018) 基于改进热点效应后的模型生产了500 m分辨率的每月和8 d的MODIS CI产品, 既提高了产品精度也提高了其时间分辨率。今后的研究可以基于不同冠层结构和密度的高空间分辨率遥感数据探究500 m尺度MODIS像元内CI的尺度效应, 并探讨复杂地形对CI的影响 (Jiao等, 2018)。

(2) LAI反演: LAI是描述植被冠层结构的重要参数 (Yan等, 2019), 植被冠层的异质性、聚集性、密闭性及其下垫面的BRDF特性对于LAI的反演具有显著影响 (Gemmell, 2000; Chen等, 2005; Chopping等, 2008)。LAI反演已从经验统计模型拟合 (Wang等, 2005) 发展到像元尺度参数化模型反演。经验统计模型一般是建立LAI和植被指数之间的回归关系, 优势是简单易用, 但不具有普适性且容易受大气效应、土壤背景和植被本身BRDF特征的影响。基于参数化模型的方法一般是基于植被冠层BRDF模型, 需要输入较多参数, 但由于模型是在生物、物理学基础上建立起来的, 普适性较好。目前得到广泛应用的MODIS LAI产品是利用随机辐射传输模型基于查找表方法生产的, 在产品生产中利用了MODIS的土地覆盖分类数据和BRF数据 (Myneni等, 2002; Yan等, 2016), 时间分辨率为8 d。此外, 其他的多角度传感器也有LAI产品, 如POLDER、VEGETATION的每月全球LAI产品, 空间分辨率分别为1 km和10 km; 基于AVHRR和MODIS数据生产的8 d GLASS LAI产品的空间分辨率为5 km和1 km。总体上, 对于全球LAI产品来说, 面临的主要挑战是如何提高其时空连续性以满足诸多领域的应用需求。

(3) 植被类型划分: Bicheron等 (1997) 基于机载POLDER数据对森林进行分类, 研究表明,

只使用多光谱数据的分类精度仅为79%，由于多角度观测对森林结构的敏感性，将多光谱与多角度数据结合可使分类精度提高到91% (Hyman和Barnsley, 1997)。Engelsen等(1996)利用半经验的三参数RPV模型以及改进的MRPV模型，用3个参数分别描述整体的反射强度，刻画BRDF碗形或钟形的深度，使得通过BRDF形状区分冠层类型成为可能。基于密集的喜平型植被具有更高的体散射，稀疏的喜直型植被以单次散射为主的特点，Gao等利用半经验核驱动模型的核心系数构建了结构散射指数SSI (Structural Scattering Index) 来区分植被类型 (Gao等, 2003)，但未将该方法应用于土地覆盖分类中；Jiao等(2014)利用核驱动模型中的权重系数构建了各向异性平整指数AFX (Anisotropic Flat Index) 等几个指数来衡量BRDF的整体形状，可反映植被结构的三维信息并可作为光谱信号的补充来提高土地覆盖分类精度。总体上，多角度遥感用于植被类型分类的研究主要是基于半经验的模型建立能刻画BRDF形状的数字，来提高植被类型甚至土地覆盖的分类精度，但不同模型的参数在分类效果上的对比工作仍有待进一步开展。同时，这些方法一般只适用于POLDER、MODIS等影像，由于很多高分辨率卫星难以获得多角度数据，一定程度上限制了BRDF特性在精细尺度植被类型划分上的应用。

(4) 植被垂直分层覆盖度估算：传统的植被覆盖度遥感提取只停留在水平尺度上的提取，忽略了植被在垂直方向上的异质性。植被垂直覆盖度在生物多样性、林火防治中具有重要作用，考虑覆盖度在垂直方向上的异质性能提高水土流失模型的计算精度，但是，目前该领域的研究尚未受到足够重视。两层结构的森林冠层反射模型可以分别从几何光学和辐射传输角度研究林上和林下两层的辐射物理传输过程，为反演植被垂直分层覆盖度提供了可能。Leblanc等(1999)考虑到植被垂直分层的重要性，在四分量的基础上加入林下冠层光照和阴影两个分量，发展了两层结构的四尺度几何光学模型，在植被垂直分层参数的反演中具有一定的应用潜力。研究表明利用Kuusk等(2004)提出的两层结构冠层反射模型ACRM (A two-layer Canopy Reflectance Model) 先获得林下植被的光谱曲线，再分别反演林上和林下的LAI，可以利用植被覆盖度与LAI之间的转换公式

获得植被垂直分层的覆盖度信息 (黄健熙等, 2005)。总体上，若能建立准确、合适的森林两层结构反射模型并提高模型参数反演的精度，将会为提取植被垂直分层覆盖度带来突破性进展 (黄健熙等, 2005)。此外，无人机及激光雷达等新兴观测技术也为植被垂直分层覆盖度的估算提供了新的可能。Li等(2020)利用无人机数码照片生成的三维点云，将树冠点云反向投影到超像元分割的二维影像上以区分上层树冠和下层植被，发展了一种估算上层树冠盖度和下层植被覆盖度的方法并取得了较高的精度。机载激光雷达点云数据包含丰富的植被垂直结构信息，但目前的研究多集中于利用植被回波和地面回波计算森林样方的覆盖度上 (Morsdorf等, 2006; Hu等, 2018)，若能利用回波强度信息 (Wing等, 2012) 直接区分下层植被或非植被回波信息，将是不依赖于物理模型，直接获取垂直分层覆盖度信息的另一种可行的方法。

5.3 云和气溶胶

在地表能量平衡研究中，云和气溶胶是影响入射到地表的太阳辐射的主要因素。多角度遥感在云参数以及气溶胶的光学特性反演方面均有一定的应用。

在云层类型、云形态特征和云的几何厚度反演等方面，多角度遥感具有一定的优势。(1) 在云层类型识别及云检测上，传统的单角度遥感通常会造成高薄云的漏检。多角度遥感进行云层类型的识别时，根据云和地表、不同类型云之间的散射特性差异及云顶散射的贡献，利用前向和后向的视差区分层状云和积云。Di Girolamo和Davies(1994)将角度信息应用于云遥感中，用模拟的方式证明蓝光(0.44 μm)和近红外通道(0.86 μm)之间的波段差异角度特征指数BDAS (Band-differenced Angular Signature) 可用于识别薄卷云 (Di Girolamo和Davies, 1994)，并在其后续的研究中将该方法应用于MISR数据进行云检测，显著提高了冰、雪、沙漠等高亮地表的云检测精度 (Di Girolamo和Wilson, 2003)。(2) 在云的形态特征检测方面，利用MISR不同角度的观测可以获得云顶高度 (Moroney等, 2002; Zong等, 2002)、云的垂直形态结构以及云的平流速度 (Horváth和Davies, 2001)。(3) 在云几何厚度的反演上，

Kassianov 等 (2003) 发现云量是角度的函数, 可以利用 MISR 数据提取热带太平洋地区积云的几何厚度。

除了云之外, 气溶胶也是大气的重要组成部分, 多角度遥感用于反演气溶胶的光学特性的优势在于: 一是地表和大气对大气层顶部卫星信号贡献比例随观测角度的不同而存在差异, 角度增大时电磁波穿过大气的路径变长, 气溶胶的影响变大。多角度信息可以更好地分离地表和大气的贡献 (Martonchik 和 Diner, 1992; Martonchik 等, 2000)。由于观测角度的增加, 多角度遥感在沙漠等高亮地表以及受太阳闪耀影响的水面上, 也能反演气溶胶, 克服了传统暗目标法的局限性; 二是多角度遥感增加了气溶胶散射角度的覆盖范围, 使得区分不同组成和大小的气溶胶类型成为可能。如 MISR 可从 9 个方向以近实时的方式同时观测地表, 其优势在于散射角的分布范围广, 并且多光谱信息与多角度信息的结合使其在反演气溶胶粒子的结构和形状方面具有较大的应用潜力 (Liang 等, 2000)。

5.4 冰冻圈

冰冻圈具有高反照率、低热传导率和季节性差异大的特点, 是气候系统中一个极其重要的组成部分。过去 30 年来, 地球冰冻圈变化迅速, 北极圈及其周边的海冰厚度明显下降, 对冰冻圈进行有效的遥感监测显得尤为重要。多角度遥感在冰冻圈监测的优势主要体现在极地地区云制图、海冰粗糙度特征的反演及海冰形态研究中。

在极地地区云制图上, 云在前向和后向散射相近, 而对于冰雪覆盖地表, 粗糙表面以后向反射为主、平坦表面以前向反射为主, 在不同观测角度上云与冰雪具有明显散射差异, 因此通过假彩色合成 MISR 的前向 60° 、天底方向和后向 60° 的数据, 可以将云和冰雪区分出来 (Diner 等, 2005); 在海冰粗糙度的反演上, Nolin 等 (2002) 利用 MISR 数据在红光波段前向 60° 和后向 60° 的散射辐射构建了一个归一化角度指数 NDAI (Normalized Difference Angular Index), 并建立其与粗糙度之间的关系, 若后向散射大于前向散射, 则认为是粗糙海冰, 否则为光滑海冰 (Nolin 等, 2002; Nolin 和 Payne, 2007)。但 NDAI 只是海冰粗糙度的指示因子, 太阳和观测几何对粗糙度的

探测能力的影响及粗糙度的尺度效应仍有待进一步研究; 在海冰形态的研究中, 由于海冰的内部结构、厚度和形态会影响海冰的 HDRF 和各向异性因子 ANIF (Anisotropy Factor) 的分布特征, 因此可以从不同方向的 HDRF 和 ANIF 的差异来获得海冰的形态和厚度等物理属性 (刘成玉 等, 2013), 但这只是一种定性的分析方法, 进一步的研究应考虑如何建立海冰的形态、厚度等物理属性与 HDRF 和 ANIF 之间的定量关系。

6 结 语

随着遥感观测技术的发展, 遥感研究从定性转向定量, 对地观测方式从传统的单一角度转向多角度。由于现有文献中对于“多角度遥感”多为概括性的描述, 未见明确定义, 故本文给出了多角度遥感的定义, 回顾了多角度遥感的发展, 介绍了多平台的多角度遥观测, 并总结了目前被广泛应用的多角度遥感机理模型的发展以及多角度遥感的应用。得到的认识如下:

(1) 与单一角度遥感相比, 多角度遥感增加了角度维信息, 可以获取地表三维结构信息, 解决传统遥感所不能解决的问题, 成为定量遥感研究的重要方向; (2) 多平台观测设备发展快速, 极大地提高了星、机、地协同观测能力, 为多角度遥感研究提供了重要的数据保障, 设备的便携化和观测的自动化是目前的发展方向; (3) 目前的多角度遥感机理模型的研究多集中在对上世纪一些经典模型的融合、改进和完善上, 多适用于单一植被类型场景, 对山区等复杂情况考虑不足, 需要发展能描述多种地物类型的复杂地表二向性反射机理模型; (4) 多角度遥感技术被应用于多个方面, 主要集中在反照率、植被参数、云参数和气溶胶光学特性的反演和海冰纹理等研究中。

尽管多角度定量遥感研究近年来发展迅速且取得了一定的进展, 但在以下方面可以进一步深入研究:

(1) 建立复杂地表多角度反射/辐射模型, 尤其是针对多角度观测的视场变化问题, 开展复杂地表多角度观测的视场不确定性研究。陈玲等 (2009) 在研究中指出大视场角会在一定程度上平滑并歪曲地物的方向反射特征。目前已有研究通过计算机模拟的方式分析了传感器的视场和距离对行播作物 BRDF 地面测量的影响并给出了一定的

测量建议 (Ren 等, 2013; Zhao 等, 2015), 针对其他地物的相关研究仍有待进一步开展。建模时, 多角度观测视场效应所带来的误差在复杂地形区尤为严重, 需要仔细考虑不同角度对应视场目标的一致性问题的。

(2) 综合利用多传感器数据反演地表的二向反射特性。单传感器反演地表的二向反射特性往往存在采样角度有限的问题, 因此, 若能将多传感器数据融合, 将会提高角度采样的分布和数量。但是, 不同传感器之间的辐射定标、光谱响应函数的差异以及几何配准的问题等都将增加数据预处理的难度。

(3) 充分开展基于航天和航空平台的高光谱多角度遥感研究。高光谱遥感能探测到地表植被精细的光谱信息, 与角度信息的结合将会提高植被类型识别及结构参数反演的精度, 但目前在该领域的研究仍然不足。例如, CHRIS 数据的最大特点是集多角度与高光谱于一体, 空间分辨率为 30 m, 但目前国内针对 CHRIS 开展的研究多将其作为高光谱数据来使用, 角度信息未得到充分利用 (曹斌, 2010)。此外, 近年来无人机技术发展迅速, 将高光谱传感器搭载在无人机上通过云台的转动或利用航向和旁向重叠获得高光谱多角度数据, 兼具高空间分辨率、高光谱分辨率以及可直接获取多角度观测的特点, 为高光谱多角度遥感的研究带来新的机遇。

(4) 进一步开展与摄影测量或 LiDAR 技术相结合的多角度遥感研究。其实摄影测量也是一种多角度遥感技术, 但关注的是获取地物的三维结构及坐标位置, 在实际应用中若能将多角度定量遥感与摄影测量结合, 将会实现物理信息和几何信息的互补。另外, BRDF 模型中对于植被的三维结构通常会进行一定的简化处理, 应充分利用地基、机载和星载 LiDAR 在获取植被结构参数上的优势, 得到相对精细的结构信息, 获得更为准确的几何光学模型中四分量的面积比例以及辐射传输模型中的结构参数 (苏伟等, 2016)。

参考文献 (References)

Abdou W A, Conel J E, Pilorz S H, Helmlinger M C, Bruegge C J, Gaitley B J, Ledebor W C and Martonchik J V. 2001. Vicarious calibration: a reflectance-based experiment with AirMISR. *Remote Sensing of Environment*, 77(3): 338-353 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00213-9]

- Abrams M. 2000. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote Sensing*, 21(5): 847-859 [DOI: 10.1080/014311600210326]
- Barnsley M J, Allison D and Lewis P. 1997. On the information content of multiple view angle (MVA) images. *International Journal of Remote Sensing*, 18(9): 1937-1960 [DOI: 10.1080/014311697217963]
- Barnsley M J, Settle J J, Cutter M A, Lobb D R and Teston F. 2004. The PROBA/CHRIS mission: a low-cost smallsat for hyperspectral multiangle observations of the earth surface and atmosphere. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(7): 1512-1520 [DOI: 10.1109/Tgrs.2004.827260]
- Bicheron P, Leroy M, Hauteceur O and Bréon F M. 1997. Enhanced discrimination of boreal forest covers with directional reflectances from the airborne polarization and directionality of Earth reflectances (POLDER) instrument. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D24): 29517-29528 [DOI: 10.1029/97jd01330]
- Borel C C, Gerstl S A W and Powers B J. 1991. The radiosity method in optical remote sensing of structured 3-D surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 36(1): 13-44 [DOI: 10.1016/0034-4257(91)90028-5]
- Buchhorn M, Petereit R and Heim B. 2013. A manual transportable instrument platform for ground-based spectro-directional observations (ManTIS) and the resultant hyperspectral field goniometer system. *Sensors*, 13(12): 16105-16128 [DOI: 10.3390/S131216105]
- Burkart A, Aasen H, Alonso L, Menz G, Bareth G and Rascher U. 2015. Angular dependency of hyperspectral measurements over wheat characterized by a novel UAV based goniometer. *Remote Sensing*, 7(1): 725-746 [DOI: 10.3390/rs70100725]
- Cao B. 2010. Study on Estimation of Forest Leaf Area Index using Multi-Angle Hyperspectral CHRIS Data. Beijing: Chinese Academy of Forestry (曹斌. 2010. 多角度高光谱 CHRIS 数据森林叶面积指数反演研究. 北京: 中国林业科学研究院)
- Chen J M and Leblanc S G. 1997. A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(5): 1316-1337 [DOI: 10.1109/36.628798]
- Chen J M, Liu J, Leblanc S G, Lacaze R and Roujean J L. 2003. Multi-angular optical remote sensing for assessing vegetation structure and carbon absorption. *Remote Sensing of Environment*, 84(4): 516-525 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00150-5]
- Chen J M, Menges C H and Leblanc S G. 2005. Global mapping of foliage clumping index using multi-angular satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 97(4): 447-457 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.05.003]
- Chen L, Yan G J, Li J, Yu Y J. 2009. Footprint uncertainty analysis for ground-based multiangular measurement of row crops. *Advances*

- in *Earth Science*, 24(7): 793-802 (陈玲, 阎广建, 李静, 余莹洁. 2009. 行播作物地面方向性测量的视场不确定性分析. *地球科学进展*, 24(7): 793-802) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2009.07.013]
- Chen L F, Liu Q H, Fan W J, Li X W, Xiao Q, Yan G J and Tian G L. 2002. A bi-directional gap model for simulating the directional thermal radiance of row crops. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 45(12): 1087-1098 [DOI: 10.1360/02yd9106]
- Chopping M, Su L H, Rango A, Martonchik J V, Peters D P C and Laliberte A. 2008. Remote sensing of woody shrub cover in desert grasslands using MISR with a geometric-optical canopy reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 112(1): 19-34 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.04.023]
- Coburn C A and Peddle D R. 2006. A low-cost field and laboratory goniometer system for estimating hyperspectral bidirectional reflectance. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32(3): 244-253 [DOI: 10.5589/M06-021]
- Dawson T P, Curran P J and Plummer S E. 1998. LIBERTY - Modeling the effects of leaf biochemical concentration on reflectance spectra. *Remote Sensing of Environment*, 65(1): 50-60 [DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00007-8]
- Deering D W and Leone P. 1986. A sphere-scanning radiometer for rapid directional measurements of sky and ground radiance. *Remote Sensing of Environment*, 19(1): 1-24 [DOI: 10.1016/0034-4257(86)90038-6]
- Deschamps P Y, Bréon F M, Leroy M, Podaire A, Bricaud A, Buriez J C and Seze G. 1994. The POLDER mission: instrument characteristics and scientific objectives. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(3): 598-615 [DOI: 10.1109/36.297978]
- Di Girolamo L and Davies R. 1994. A band-differenced angular signature technique for cirrus cloud detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(4): 890-896 [DOI: 10.1109/36.298017]
- Di Girolamo L and Wilson M J. 2003. A first look at band-differenced angular signatures for cloud detection from MISR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7): 1730-1734 [DOI: 10.1109/TGRS.2003.815659]
- Diner D J, Asner G P, Davies R, Knyazikhin Y, Muller J P, Nolin A W, Pinty B, Schaaf C B and Stroeve J. 1999. New directions in earth observing: scientific applications of multiangle remote sensing. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(11): 2209-2228 [DOI: 10.1175/1520-0477(1999)080<2209:NDIEOS>2.0.CO;2]
- Diner D J, Beckert J C, Reilly T H, Bruegge C J, Conel J E, Kahn R A, Martonchik J V, Ackerman T P, Davies R, Gerstl S A W, Gordon H R, Muller J, Myneni R B, Sellers P J, Pinty B and Verstraete M M. 1998. Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) instrument description and experiment overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1072-1087 [DOI: 10.1109/36.700992]
- Diner D J, Braswell B H, Davies R, Gobron N, Hu J N, Jin Y F, Kahn R A, Knyazikhin Y, Loeb N, Muller J P, Nolin A W, Pinty B, Schaaf C B, Seiz G and Stroeve J. 2005. The value of multiangle measurements for retrieving structurally and radiatively consistent properties of clouds, aerosols, and surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 97(4): 495-518 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.06.006]
- Disney M I, Lewis P and North P R J. 2000. Monte Carlo ray tracing in optical canopy reflectance modelling. *Remote Sensing Reviews*, 18(2/4): 163-196 [DOI: 10.1080/02757250009532389]
- Engelsen O, Pinty B, Verstraete M M and Martonchik J V. 1996. Parametric bidirectional reflectance factor models: evaluation, improvements and applications. Report EUR (16426EN, European Commission, Joint Researches Center, Space Application Institute, ISPR, Italy)
- Fan W L, Chen J M, Ju W M and Nesbitt N. 2014b. Hybrid geometric optical-radiative transfer model suitable for forests on slopes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(9): 5579-5586 [DOI: 10.1109/Tgrs.2013.2290590]
- Fan W L, Chen J M, Ju W M and Zhu G L. 2014a. GOST: a geometric-optical model for sloping terrains. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(9): 5469-5482 [DOI: 10.1109/Tgrs.2013.2289852]
- Féret J-B, Gitelson A A, Noble S D and Jacquemoud S. 2017. PROSPECT-D: towards modeling leaf optical properties through a complete lifecycle. *Remote Sensing of Environment*, 193: 204-215 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.004]
- Gao F, Schaaf C B, Strahler A H, Jin Y and Li X. 2003. Detecting vegetation structure using a kernel-based BRDF model. *Remote Sensing of Environment*, 86(2): 198-205 [DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00100-7]
- Gao F and Zhu Q J. 1997. The advance in multi-angle remote sensing of vegetation canopy. *Scientia Geographica Sinica*, 17(4): 346-355 (高峰, 朱启疆. 1997. 植被冠层多角度遥感研究进展. *地理科学*, 17(4): 346-355)
- Gastellu-Etchegorry J P, Yin T, Laurent N, Cajgfinger T, Gregoire T, Grau E, Feret J B, Lopes M, Guilleux J, Dedieu G, Malenovsky Z, Cook B.D, Morton D, Rubio J, Durrieu S, Cazanave G, Martin E and Ristorcelli T. 2015. Discrete anisotropic radiative transfer (DART 5) for modeling airborne and satellite spectroradiometer and LIDAR acquisitions of natural and urban landscapes. *Remote Sensing*, 7(2): 1667-1701 [DOI: 10.3390/rs70201667]
- Gatebe C K and King M D. 2016. Airborne spectral BRDF of various surface types (ocean, vegetation, snow, desert, wetlands, cloud decks, smoke layers) for remote sensing applications. *Remote Sensing of Environment*, 179: 131-148 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.03.029]
- Gemmell F. 2000. Testing the utility of multi-angle spectral data for reducing the effects of background spectral variations in forest reflectance model inversion. *Remote Sensing of Environment*, 72(1): 46-63 [DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00091-7]
- Goel N S, Rozehnal I and Thompson R L. 1991. A computer graphics based model for scattering from objects of arbitrary shapes in the optical region. *Remote Sensing of Environment*, 36(2): 73-104 [DOI: 10.1016/0034-4257(91)90032-2]

- Goodenough A A and Brown S D. 2012. DIRSIG 5: core design and implementation//Proceedings Volume 8390, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XVIII. Baltimore, Maryland, United States: SPIE [DOI: 10.1117/12.919321]
- Govaerts Y M and Verstraete M M. 1998. Raytran: a Monte Carlo ray-tracing model to compute light scattering in three-dimensional heterogeneous media. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(2): 493-505 [DOI: 10.1109/36.662732]
- Grenzdörffer G and Niemeyer F. 2011. UAV-based BRDF-measurements of agricultural surfaces with PFIFFikus//International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Zurich, Switzerland: [s.n.]: 229-234 [DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-229-2011]
- Hao D L, Wen J G, Xiao Q, Wu S B, Lin X W, You D Q and Tang Y. 2018. Modeling anisotropic reflectance over composite sloping terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(7): 3903-3923 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2816015]
- Hao D L, Wen J G, Xiao Q, You D Q and Tang Y. 2020. An improved topography-coupled kernel-driven model for land surface anisotropic reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(4): 2833-2847 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2956705]
- Hapke B. 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. Theory. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4): 3039-3054 [DOI: 10.1029/Jb086ib04p03039]
- Harrison E F, Minnis P, Barkstrom B B, Ramanathan V, Cess R D and Gibson G G. 1990. Seasonal variation of cloud radiative forcing derived from the Earth Radiation Budget Experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95(D11): 18687-18703 [DOI: 10.1029/Jd095id11p18687]
- He L M, Chen J M, Pisek J, Schaaf C B and Strahler A H. 2012. Global clumping index map derived from the MODIS BRDF product. *Remote Sensing of Environment*, 119: 118-130 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.008]
- He L M, Li X W, Yan G J, Wang H and Wang J D. 2004. Atmospheric correction for AMTIS based on BRDF loop and MODTRAN4.1. *Journal of Remote Sensing*, 8(5): 389-396 (何立明, 李小文, 阎广建, 王华, 王锦地. 2004. AMTIS大气订正算法——基于MODTRAN4.1与BRDF大气订正环. *遥感学报*, 8(5): 389-396) [DOI: 10.3321/j.issn:1007-4619.2004.05.002]
- He L M, Yan G J, Li X W, Wang Q and Wang W J. 2006. Atmospheric correction for AMTIS single-channel multi-angular thermal-infrared imagery. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 25(6): 429-433 (何立明, 阎广建, 李小文, 王桥, 王文杰. 2006. AMTIS单通道多角度热红外图像的大气订正. *红外与毫米波学报*, 25(6): 429-433) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-9014.2006.06.008]
- Heiskanen J. 2006. Tree cover and height estimation in the Fennoscandian tundra-taiga transition zone using multiangular MISR data. *Remote Sensing of Environment*, 103(1): 97-114 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.03.015]
- Horváth Á and Davies R. 2001. Simultaneous retrieval of cloud motion and height from polar-orbiter multiangle measurements. *Geophysical Research Letters*, 28(15): 2915-2918 [DOI: 10.1029/2001GL012951]
- Hu B X, Li X W, Zhu C G and Strahler A H. 1996. A new method for atmospheric correction: BRDF-atmospheric correction loop. *Remote Sensing of Environment China*, 11(2): 151-160 (胡宝新, 李小文, 朱重光, Strahler A H. 1996. 一种大气订正的方法: BRDF——大气订正环. *环境遥感*, 11(2): 151-160)
- Hu R H, Yan G J, Nerry F, Liu Y S, Jiang Y M, Wang S R, Chen Y M, Mu X H, Zhang W M and Xie D H. 2018. Using airborne laser scanner and path length distribution model to quantify clumping effect and estimate leaf area index. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(6): 3196-3209 [DOI: 10.1109/Tgrs.2018.2794504]
- Huang J X, Wu B F, Zeng Y and Tian Y C. 2005. Review of tree, shrub, grass cover of horizontal and vertical scale retrieval from remotely sensed data. *Advances in Earth Science*, 20(8): 871-881 (黄健熙, 吴炳方, 曾源, 田亦陈. 2005. 水平和垂直尺度乔、灌、草覆盖度遥感提取研究进展. *地球科学进展*, 20(8): 871-881) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2005.08.008]
- Hyman A H and Barnsley M J. 1997. On the potential for land cover mapping from multiple-view-angle (MVA) remotely-sensed images. *International Journal of Remote Sensing*, 18(11): 2471-2475 [DOI: 10.1080/014311697217747]
- Irons J R, Ranson K J, Williams D L, Irish R R and Huegel F G. 1991. An off-nadir-pointing imaging spectroradiometer for terrestrial ecosystem studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29(1): 66-74 [DOI: 10.1109/36.103294]
- Jacquemoud S and Baret F. 1990. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34(2): 75-91 [DOI: 10.1016/0034-4257(90)90100-Z]
- Jacquemoud S, Verhoef W, Baret F, Bacour C, Zarco-Tejada P J, Asner G P, François C and Ustin S L. 2009. PROSPECT + SAIL models: a review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 113(S1): S56-S66 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.01.026]
- Jiao Z T. 2008. The Use of MODIS BRDF/Albedo Products to Recover Land Surface Properties. Beijing: Beijing Normal University (焦子铤. 2008. 利用MODIS BRDF和反照率产品进行地表特性的研究. 北京: 北京师范大学)
- Jiao Z T, Ding A X, Kokhanovsky A, Schaaf C, Bréon F M, Dong Y D, Wang Z S, Liu Y, Zhang X N, Yin S Y, Cui L, Mei L L and Chang Y X. 2019. Development of a snow kernel to better model the anisotropic reflectance of pure snow in a kernel-driven BRDF model framework. *Remote Sensing of Environment*, 221: 198-209 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.001]
- Jiao Z T, Dong Y D, Schaaf C B, Chen J M, Román M, Wang Z S, Zhang H, Ding A X, Erb A, Hill M J, Zhang X N and Strahler A. 2018. An algorithm for the retrieval of the clumping index (CI) from the MODIS BRDF product using an adjusted version of the kernel-driven BRDF model. *Remote Sensing of Environment*, 209: 594-611 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.041]
- Jiao Z T, Hill M J, Schaaf C B, Zhang H, Wang Z S and Li X W. 2014.

- An Anisotropic Flat Index (AFX) to derive BRDF archetypes from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 141: 168-187 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.10.017]
- Jiao Z T, Schaaf C B, Dong Y D, Román M, Hill M J, Chen J M, Wang Z S, Zhang H, Saenz E, Poudyal R, Gatebe C, Bréon F M, Li X W and Strahler A. 2016. A method for improving hotspot directional signatures in BRDF models used for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 186: 135-151 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.08.007]
- Kassianov E I, Ackerman T, Marchand R T and Ovtchinnikov M. 2003. Satellite multiangle cumulus geometry retrieval: case study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D3): 4117 [DOI: 10.1029/2002jd002350]
- Kimes D. 1983. Remote sensing of row crop structure and component temperatures using directional radiometric temperatures and inversion techniques. *Remote Sensing of Environment*, 13(1): 33-55 [DOI: 10.1016/0034-4257(83)90026-3]
- Kimes D S and Sellers P J. 1985. Inferring hemispherical reflectance of the Earth's surface for global energy budgets from remotely sensed nadir or directional radiance values. *Remote Sensing of Environment*, 18(3): 205-223 [DOI: 10.1016/0034-4257(85)90058-6]
- Kimes D S, Sellers P J and Diner D J. 1987. Extraction of spectral hemispherical reflectance (albedo) of surfaces from nadir and directional reflectance data. *International Journal of Remote Sensing*, 8(12): 1727-1746 [DOI: 10.1080/01431168708954813]
- King M D, Kaufman Y J, Tanré D and Nakajima T. 1999. Remote sensing of tropospheric aerosols from space: past, present, and future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(11): 2229-2259 [DOI: 10.1175/1520-0477(1999)080<2229:Rsotaf>2.0.Co;2]
- King M D, Strange M G, Leone P and Blaine L R. 1986. Multiwavelength scanning radiometer for airborne measurements of scattered radiation within clouds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 3(3): 513-522 [DOI:10.1175/1520-0426(1986)003<0513:Msrfam>2.0.Co;2]
- Kobayashi H and Iwabuchi H. 2008. A coupled 1-D atmosphere and 3-D canopy radiative transfer model for canopy reflectance, light environment, and photosynthesis simulation in a heterogeneous landscape. *Remote Sensing of Environment*, 112(1): 173-185 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.04.010]
- Kordecki A, Palus H and Bal A. 2016. Practical vignetting correction method for digital camera with measurement of surface luminance distribution. *Signal, Image and Video Processing*, 10(8): 1417-1424 [DOI: 10.1007/s11760-016-0941-2]
- Kuusik A. 1995. A fast, invertible canopy reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 51(3): 342-350 [DOI: 10.1016/0034-4257(94)00059-V]
- Kuusik A, Lang M and Nilson T. 2004. Simulation of the reflectance of ground vegetation in sub-boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126(1/2): 33-46 [DOI: 10.1016/j.aggformet.2004.05.004]
- Lacaze R, Chen J M, Roujean J L and Leblanc S G. 2002. Retrieval of vegetation clumping index using hot spot signatures measured by POLDER instrument. *Remote Sensing of Environment*, 79(1): 84-95 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00241-3]
- Leblanc S G, Bicheron P, Chen J M, Leroy M and Cihlar J. 1999. Investigation of directional reflectance in boreal forests with an improved four-scale model and airborne POLDER data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3): 1396-1414 [DOI: 10.1109/36.763304]
- Leblanc S G and Chen J M. 2000. A windows graphic user interface (GUI) for the five-scale model for fast BRDF simulations. *Remote Sensing Reviews*, 19(1/4): 293-305 [DOI: 10.1080/02757250009532423]
- Leng S Y. 2016. *Thirty Years of Geoscience: from Classics to Frontiers*. China: The Commercial Press (冷疏影. 2016. 地理科学三十年: 从经典到前沿. 北京: 商务印书馆)
- Lewis P. 1999. Three-dimensional plant modelling for remote sensing simulation studies using the Botanical Plant Modelling System. *Agronomie*, 19(3/4): 185-210 [DOI: 10.1051/agro:1999 0302]
- Li L Y, Chen J, Mu X H, Li W H, Yan G J, Xie D H and Zhang W M. 2020. Quantifying understory and overstory vegetation cover using UAV-based RGB imagery in forest plantation. *Remote Sensing*, 12(2): 298 [DOI: 10.3390/rs12020298]
- Li X, Li X W, Li Z Y, Wang J, Ma M G, Liu Q, Xiao Q, Hu Z Y, Che T, Wang J M, Liu Q H, Chen E X, Yan G J, Liu S M, Wang W Z, Zhang L X, Wang J D, Niu Z, Jin R, Ran Y H and Wang L X. 2012. Progresses on the watershed allied telemetry experimental research (WATER). *Remote Sensing Technology and Application*, 27(5): 637-649 (李新, 李小文, 李增元, 王建, 马明国, 刘强, 肖青, 胡泽勇, 车涛, 王介民, 柳钦火, 陈尔学, 阎广建, 刘绍民, 王维真, 张立新, 王锦地, 牛铮, 晋锐, 冉有华, 王亮绪. 2012. 黑河综合遥感联合试验研究进展: 概述. 遥感技术与应用, 27(5): 637-649)
- Li X W, Wang J D and Strahler A H. 1994. A hybrid geometric Optical-Radiative Transfer Approach for Modeling Light Absorption and Albedo of Discontinuous Canopies. *Science in China (Scientia Sinica) Series B* 38, 807-816 (李小文, 王锦地, Strahler A H. 1994. 不连续植被及其下地表面对光辐射的吸收与反照率模型. 中国科学: B辑, 24(8): 828-836)
- Li X W and Strahler A H. 1992. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 276-292 [DOI: 10.1109/36.134078]
- Li X W and Wang J D. *The vegetation optical remote sensing models and the structures parameters*. Beijing: Science Press, 1995. (李小文, 王锦地. 1995. 植被光学遥感模型与植被结构参数化. 北京: 科学出版社)
- Li X W, Wang J D, Liu Y, Zhu X Y and Strahler A H. 1993. A hybrid geometric optical and radiative transfer approach for modeling BRDF of discontinuous canopies. *Remote Sensing of Environment China*, 8(3): 161-172 (李小文, 王锦地, 刘毅, 朱晓艳, Strahler A H. 1993. 不连续植被二向性反射的几何光学与辐射传输一体化综合模型初探. 环境遥感, 8(3): 161-172)

- Li X W, Wang J D and Strahler A H. 2000. Scale effects and scaling-up by geometric-optical model. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 43(1): 17-22 (李小文, 王锦地, Strahler A H. 2000. 尺度效应及几何光学模型用于尺度纠正. *中国科学: E 辑*, 30(增刊): 12-17) [DOI: 10.1007/BF02916574]
- Li X W, Wang J F, Wang J D and Liu Q H. 2001. *Multi-Angle and Thermal Infrared Remote Sensing*. Beijing: Science Press (李小文, 汪骏发, 王锦地, 柳钦火. 2001. 多角度与热红外对地遥感. 北京: 科学出版社)
- Liang S L, Strahler A H, Barnsley M J, Borel C C, Gerstl S A W, Diner D J, Prata A J and Walthall C L. 2000. Multiangle remote sensing: past, present and future. *Remote Sensing Reviews*, 18(2/4): 83-102
- Liang S L, Li X W, Wang J D, et al. 2013. *Quantitative Remote Sensing: Theory and Algorithms*. Beijing: Science Press (梁顺林, 李小文, 王锦地, 等. 2013. 定量遥感: 理念与算法. 北京: 科学出版社)
- Lin C, Li C L, Wang L, Bi Y M and Zheng Y Q. 2017. Preflight spectral calibration of hyperspectral carbon dioxide spectrometer of TanSat. *Optics and Precision Engineering*, 25(8): 2064-2075 (蔺超, 李诚良, 王龙, 毕研盟, 郑玉权. 2017. 碳卫星高光谱 CO₂ 探测仪发射前光谱定标. *光学精密工程*, 25(8): 2064-2075) [DOI: 10.3788/OPE.20172508.2064]
- Liu C Y, Gu W, Li L T and Xu Y J. 2013. The characteristics of a level sea-ice multiangle reflection spectrum in the Bohai sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 35(3): 112-118 (刘成玉, 顾卫, 李澜涛, 许映军. 2013. 渤海平整海冰多角度反射光谱特征. *海洋学报*, 35(3): 112-118) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2013.03.013]
- Liu L Y. 2014. *Principle and Application of Vegetation Quantitative Remote Sensing*. Beijing: Science Press (刘良云. 2014. 植被定量遥感原理与应用. 北京: 科学出版社)
- Liu Q, Liu Q H, Xiao Q and Tian G L. 2002. Research on the geometric correction method of airborne multi-angle remote sensing image. *Science in China (Series D)*, 32(4): 299-306 (刘强, 柳钦火, 肖青, 田国良. 2002. 机载多角度遥感图像的几何校正方法研究. *中国科学: D 辑*, 32(4): 299-306) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-7240.2002.04.005]
- Liu S H, Liu Q, Liu Q H, Wen J G and Li X W. 2010. The angular and spectral kernel model for BRDF and albedo retrieval. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(3): 241-256 [DOI: 10.1109/Jstars.2010.2048745]
- Martonchik J V, Bruegge C J and Strahler A H. 2000. A review of reflectance nomenclature used in remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, 19(1/4): 9-20 [DOI: 10.1080/02757250009532407]
- Martonchik J V and Diner D J. 1992. Retrieval of aerosol optical properties from multi-angle satellite imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 223-230 [DOI: 10.1109/36.134073]
- Middleton W F K and Mungall A G. 1952. The luminous directional reflectance of snow. *Journal of the Optical Society of America*, 42(8): 572-579 [DOI: 10.1364/Josa.42.000572]
- Moroney C, Davies R and Muller J P. 2002. Operational retrieval of cloud-top heights using MISR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(7): 1532-1540 [DOI: 10.1109/Tgrs.2002.801150]
- Morsdorf F, Kötz B, Meier E, Itten K I and Allgöwer B. 2006. Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction. *Remote Sensing of Environment*, 104(1): 50-61 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.04.019]
- Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, Privette J L, Glassy J, Tian Y, Wang Y, Song X, Zhang Y, Smith G R, Lotsch A, Friedl M, Morisette J T, Votava P, Nemani R R and Running S W. 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 214-231 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00074-3]
- Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J, Ginsberg I W and Limperis T. 1977. *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*. Washington D.C.: US Department of Commerce, National Bureau of Standards
- Nolin A W, Fetterer F M and Scambos T A. 2002. Surface roughness characterizations of sea ice and ice sheets: case studies with MISR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(7): 1605-1615 [DOI: 10.1109/Tgrs.2002.801581]
- Nolin A W and Payne M C. 2007. Classification of glacier zones in western Greenland using albedo and surface roughness from the Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR). *Remote Sensing of Environment*, 107(1/2): 264-275 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.11.004]
- North P R J. 1996. Three-dimensional forest light interaction model using a Monte Carlo method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(4): 946-956 [DOI: 10.1109/36.508411]
- Peake W H and Oliver T L. 1971. *The response of terrestrial surfaces at microwave frequencies*. Ohio: Defense Technical Information Center
- Pegrum H, Fox N, Chapman M and Milton E. 2006. Design and testing a new instrument to measure the angular reflectance of terrestrial surfaces//2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing. Denver, CO, USA: IEEE, 1119-1122 [DOI: 10.1109/IGARSS.2006.289]
- Pinty B, Widlowski J L, Gobron N, Verstraete M M and Diner D J. 2002. Uniqueness of multiangular measurements. I. An indicator of subpixel surface heterogeneity from MISR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(7): 1560-1573 [DOI: 10.1109/Tgrs.2002.801148]
- Privette J L, Emery W J and Schimel D S. 1996. Inversion of a vegetation reflectance model with NOAA AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 58(2): 187-200 [DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00066-1]
- Qi J B, Xie D H, Guo D S and Yan G J. 2017. A large-scale emulation system for realistic three-dimensional (3-D) forest simulation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(11): 4834-4843 [DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2714423]
- Qi J B, Xie D H, Yin T G, Yan G J, Gastellu-Etcheberry J P, Li L Y,

- Zhang W M, Mu X H and Norford L K. 2019. LESS: Large-Scale remote sensing data and image simulation framework over heterogeneous 3D scenes. *Remote Sensing of Environment*, 221: 695-706 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.036]
- Qin W H and Gerstl S A W. 2000. 3-D scene modeling of semidesert vegetation cover and its radiation regime. *Remote Sensing of Environment*, 74(1): 145-162 [DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00129-2]
- Ramanathan V, Cess R D, Harrison E F, Minnis P, Barkstrom B R, Ahmad E and Hartmann D. 1989. Cloud-radiative forcing and climate: results from the Earth radiation budget experiment. *Science*, 243(4887): 57-63 [DOI: 10.1126/science.243.4887.57]
- Ranson K J, Irons J R and Williams D L. 1994. Multispectral bidirectional reflectance of northern forest canopies with the advanced solid-state array spectroradiometer (ASAS). *Remote Sensing of Environment*, 47(2): 276-289 [DOI: 10.1016/0034-4257(94)90161-9]
- Ren H Z, Yan G J, Liu R Y, Nerry F, Li Z L and Hu R H. 2013. Impact of sensor footprint on measurement of directional brightness temperature of row crop canopies. *Remote Sensing of Environment*, 134: 135-151 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.02.025]
- Roujean J L, Leroy M and Deschamps P Y. 1992. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97 (D18): 20455-20468 [DOI: 10.1029/92JD01411]
- Salomonson V V, Barnes W, Xiong J, Kempler S and Masuoka E. 2002. An overview of the Earth Observing System MODIS instrument and associated data systems performance//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toronto, Ontario, Canada: IEEE, 1174-1176 [DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1025812]
- Sandmeier S and Deering D W. 1999. Structure analysis and classification of boreal forests using airborne hyperspectral BRDF data from ASAS. *Remote Sensing of Environment*, 69(3): 281-295 [DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00032-2]
- Sandmeier S, Sandmeier W, Itten K I, Schaepman M E and Kellenberger T W. 1995. Acquisition of bidirectional reflectance data using the Swiss Field-Goniometer System (FIGOS)//Proceedings of EARSeL Symposium. Basel, Switzerland: [s.n.]: 55-61
- Sandmeier S, Müller C, Hosgood B and Andreoli G. 1998. Physical mechanisms in hyperspectral BRDF data of grass and watercress. *Remote Sensing of Environment*, 66(2): 222-233 [DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00060-1]
- Schaaf C B, Gao F, Strahler A H, Lucht W, Li X W, Tsang T, Strugnell N C, Zhang X Y, Jin Y F, Muller J P, Lewis P, Barnsley M, Hobson P, Disney M, Roberts G, Dunderdale M, Doll C, d'Entremont R P, Hu B X, Liang S L, Privette J L and Roy D. 2002. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote sensing of Environment*, 83(1/2): 135-148 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00091-3]
- Schaaf C B, Li X W and Strahler A H. 1994. Topographic effects on bidirectional and hemispherical reflectances calculated with a geometric-optical canopy model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(6): 1186-1193 [DOI: 10.1109/36.338367]
- Schaepman-Strub G, Schaepman M E, Painter T H, Dangel S and Martonchik J V. 2006. Reflectance quantities in optical remote sensing-definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment*, 103(1): 27-42 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.03.002]
- Schneider F D, Letterer R, Morsdorf F, Gastellu-Etchegorry J P, Lauret N, Pfeifer N and Schaepman M E. 2014. Simulating imaging spectrometer data: 3D forest modeling based on LiDAR and in situ data. *Remote Sensing of Environment*, 152: 235-250 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.06.015]
- Schneider T, Dorigo W, Huber K, Schneider W. 2006. Field goniometer measurements for biophysical parameter retrieval in support of Chris data evaluations//Proceedings of the 4th ESA CHRIS/Proba Workshop. Frascati: [s.n.]
- Schueler C F, Lee T F and Miller S D. 2013. VIIRS constant spatial-resolution advantages. *International Journal of Remote Sensing*, 34(16): 5761-5777 [DOI: 10.1080/01431161.2013.796102]
- Shabanov N V, Huang D, Knjazikhin Y, Dickinson R E and Myneni R B. 2007. Stochastic radiative transfer model for mixture of discontinuous vegetation canopies. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 107(2): 236-262 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2007.01.053]
- Shabanov N V, Knyazikhin Y, Baret F and Myneni R B. 2000. Stochastic modeling of radiation regime in discontinuous vegetation canopies. *Remote Sensing of Environment*, 74(1): 125-144 [DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00128-0]
- Steiner D and Gutermann T. 1966. Russian data on spectral reflectance of vegetation, soil and rock types. Zurich Univ (Switzerland) Geographisches Institut.
- Stricker N C M, Hahne A, Smith D L, Delderfield J, Oliver M B and Edwards T. 1995. ATSR-2: the evolution in its design from ERS-1 to ERS-2. *ESA Bulletin*, 83: 32-37
- Stroeve J C and Nolin A W. 2002. New methods to infer snow albedo from the MISR instrument with applications to the Greenland ice sheet. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40 (7): 1616-1625 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.801144]
- Su W, Guo H, Zhao D L, Liu T and Zhang M Z. 2016. Leaf area index retrieval for maize canopy using optimized leaf angle distribution function of PROSAIL model. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 47(3): 234-241, 271 (苏伟, 郭皓, 赵冬玲, 刘婷, 张明政. 2016. 基于优化PROSAIL叶倾角分布函数的玉米LAI反演方法. *农业机械学报*, 47(3): 234-241, 271) [DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.033]
- Suits G H. 1971. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. *Remote Sensing of Environment*, 2: 117-125 [DOI: 10.1016/0034-4257(71)90085-X]
- van der Tol C, Vilfan N R, Yang P Q, Bayat B and Verhoef W. 2018. Modeling reflectance, fluorescence and photosynthesis: development of the scope model//IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia, Spain: IEEE: 5968-5971
- Verhoef W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to

- canopy reflectance modeling: the sail model. *Remote Sensing of Environment*, 16(2): 125-141 [DOI: 10.1016/0034-4257(84)90057-9]
- Verhoef W. 1998. *Theory of Radiative Transfer Models Applied in Optical Remote Sensing of Vegetation Canopies*. Wageningen, Netherlands: Wageningen Agricultural University
- Verhoef W, Bach H. 2003. Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment*, 87(1): 23-41 [DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00143-3]
- Vilfan N, van der Tol C, Muller O, Rascher U and Verhoef W. 2016. Fluspect-B: a model for leaf fluorescence, reflectance and transmittance spectra. *Remote Sensing of Environment*, 186: 596-615 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.09.017]
- Vogt P, Verstraete M M, Pinty B, Menent M, Caramagno A, Rast M and Lajas D. 2000. The impact of multi-angular measurements on the accuracy of land-surface Albedo retrieval: preliminary results for the proposed ESA LSPIM mission. *Remote Sensing Reviews*, 19(1/4): 191-204 [DOI: 10.1080/02757250009532418]
- Wang B and Ju W M. 2017. Limitations and Improvements of the Leaf Optical Properties Model Leaf Incorporating Biochemistry Exhibiting Reflectance and Transmittance Yields (LIBERTY). *Remote Sensing*, 9(5): 431 [DOI: 10.3390/Rs9050431]
- Wang J F, Gao X P, Chen Z F, Xiao J C and Yang F. 2001. Remote sensing in multi-angle and airborne imaging system. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 20(5): 329-334 (汪骏发, 高晓萍, 陈志峰, 肖金才, 杨帆. 2001. 多角度遥感及其航空成像仪. *红外与毫米波学报*, 20(5): 329-334) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-9014.2001.05.003]
- Wang Q, Adiku S, Tenhunen J and Granier A. 2005. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment*, 94(2): 244-255 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.10.006]
- Wen J G. 2008. *Remote Sensing Inversion and Scale Effect Study of Surface BRDF/Albedo in Complex Terrain Conditions*. Beijing: (Institute of Remote Sensing Applied Research, Chinese Academy of Sciences 闻建光. 2008. 复杂地形条件下地表BRDF/反照率遥感反演与尺度效应研究. 北京: 中国科学院遥感应用研究所)
- Wen J G, Liu Q, Liu Q H, Xiao Q and Li X W. 2015. *Remote Sensing Modeling and Albedo Inversion of BRDF Characteristics of Land Surface*. Beijing: Science Press (闻建光, 刘强, 柳钦火, 肖青, 李小文. 2015. 陆表二向反射特性遥感建模及反照率反演. 北京: 科学出版社)
- Wen J G, Liu Q, Xiao Q, Liu Q H, You D Q, Hao D L, Wu S B and Lin X W. 2018. Characterizing land surface anisotropic reflectance over rugged terrain: a review of concepts and recent developments. *Remote Sensing*, 10(3): 370 [DOI: 10.3390/rs10030370]
- Wielicki B A, Barkstrom B R, Baum B A, Charlock T P, Green R N, Kratz D P, Lee R B, Minnis P, Smith G L, Wong T, Young D F, Cess R D, Coakley J A, Crommelynck D A H, Donner L, Kandel R, King M D, Miller A J, Ramanathan V, Randall D A, Stowe L L and Welch R M. 1998. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): algorithm overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1127-1141 [DOI: 10.1109/36.701020]
- Wing B M, Ritchie M W, Boston K, Cohen W B, Gitelman A and Olsen M J. 2012. Prediction of understory vegetation cover with airborne lidar in an interior ponderosa pine forest. *Remote Sensing of Environment*, 124: 730-741 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.06.024]
- Xu X R, Chen L F and Zhuang J L. 2001. Genetic inverse algorithm for retrieval of component temperature of mixed pixel by multi-angle thermal infrared remote sensing data. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 44(4): 363-372 (徐希孺, 陈良富, 庄家礼. 2001. 基于多角度热红外遥感的混合像元组分温度演化反演方法. *中国科学: D辑*, 31(1): 81-88) [DOI: 10.1007/BF02907107]
- Xu X R, Fan W J, Li J C, Zhao P and Chen G X. 2017. A unified model of bidirectional reflectance distribution function for the vegetation canopy. *Science China Earth Sciences*, 60(3): 463-477 (徐希孺, 范闻捷, 李举材, 赵鹏, 陈高星. 2017. 植被二向性反射统一模型. *中国科学: 地球科学*, 47(2): 217-232) [DOI: 10.1360/N072016-00082]
- Yan G J, Hu R H, Luo J H, Weiss M, Jiang H L, Mu X H, Xie D H and Zhang W M. 2019. Review of indirect optical measurements of leaf area index: recent advances, challenges, and perspectives. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265: 390-411 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.11.033]
- Yan G J, Jiang L M, Wang J D, Chen L F and Li X W. 2003. Thermal bidirectional gap probability model for row crop canopies and validation. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(12): 1241-1249 [DOI: 10.1007/BF02883250]
- Yan G J, Li X W, Wang J D and Zhu C G. 2000. Modeling directional effects of thermal emission in wide band measurements. *Journal of Remote Sensing*, 4(3): 189-193 (阎广建, 李小文, 王锦地, 朱重光. 2000. 宽波段热红外方向性辐射建模. *遥感学报*, 4(3): 189-193) [DOI: 10.3321/j.issn:1007-4619.2000.03.005]
- Yan G J, Ren H Z, Hu R H, Yan K and Zhang W M. 2012. A portable multi-angle observation system//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, Germany: IEEE: 6916-6919 [DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6352572]
- Yan K, Park T, Yan G J, Chen C, Yang B, Liu Z, Nemani R R, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2016. Evaluation of MODIS LAI/FPAR product collection 6. Part 1: consistency and improvements. *Remote Sensing*, 8(5): 359 [DOI: 10.3390/Rs8050359]
- Yang H, Li X W and Gao F. 2002. An algorithm for the retrieval of albedo from space using new GO kernel-driven BRDF model. *Journal of Remote Sensing*, 6(4): 246-251 (杨华, 李小文, 高峰. 2002. 新几何光学核驱动BRDF模型反演地表反照率的算法. *遥感学报*, 6(4): 246-251) [DOI: 10.3321/j.issn:1007-4619.2002.04.002]
- Yu T, Gu X F, Tian G L, Legrand M, Baret F, Hanocq J F, Bosseno R and Zhang Y. 2004. Modeling directional brightness temperature over a maize canopy in row structure. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(10): 2290-2304 [DOI: 10.1109/Tgrs.2004.834196]
- Yu T Q. 2018. *Control Software Design of BRDF Measurement Sys-*

- tem and Processing and Analyzing Measured Data of Dunhuang Test Site. Hefei: University of Science and Technology of China (余谭其. 2018. BRDF 测量系统控制软件设计与敦煌场地实测数据处理及分析. 合肥: 中国科学技术大学)
- Zhao F, Gu X F, Verhoef W, Wang Q, Yu T, Liu Q, Huang H G, Qin W H, Chen L F and Zhao H J. 2010. A spectral directional reflectance model of row crops. *Remote Sensing of Environment*, 114 (2): 265-285 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.09.018]
- Zhao F, Li Y G, Dai X, Verhoef W, Guo Y Q, Shang H, Gu X F, Huang Y B, Yu T and Huang J X. 2015. Simulated impact of sensor field of view and distance on field measurements of bidirectional reflectance factors for row crops. *Remote Sensing of Environment*, 156: 129-142 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.09.011]
- Zhao Y S. 2013. *Principle and Method of Remote Sensing Application Analysis*. 2nd ed. Beijing: Science Press (赵英时. 2013. 遥感应用分析原理与方法. 2版. 北京: 科学出版社)
- Zong J, Davies R, Muller J P and Diner D J. 2002. Photogrammetric retrieval of cloud advection and top height from the multi-angle imaging spectroradiometer (MISR). *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(8): 821-829

Review of optical multi-angle quantitative remote sensing

YAN Guangjian, JIANG Hailan, YAN Kai, CHENG Shiyu, SONG Wanjuan, TONG Yiyi, LIU Yanan, QI Jianbo, MU Xihan, ZHANG Wuming, XIE Donghui, ZHOU Hongmin

State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Land Surface Remote Sensing Data Product Engineering Technology Research Center, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: With the development of remote sensing technology, two or more viewing directions become available for the same target, and thus a new research field – multi-angle remote sensing appears. Compared with the traditional remote sensing which only views the ground surface in one direction, multi-angle remote sensing provides angle-dimensional information and improves the capability of obtaining vegetation structure parameters. It helps to improve the retrieval accuracy of key biophysical parameters and provides better data support for the research of ecological environment and climate change. After a detailed analysis of the publications in multi-angle remote sensing, we summarize the basic concepts, characteristics, advantages and developments of multi-angle remote sensing. Multi-angle remote sensing platforms vary from ground-based, airborne to spaceborne observation equipment. The first ground-based observation equipment appeared in 1952. All the ground-based equipment is classified as the fixed field of view mode or the changeable field of view mode. For the airborne or spaceborne platforms, only the fixed field of view mode is acceptable due to the heterogeneity of the land surfaces. With the development of UAV technique, the airborne multi-angle remote sensing is becoming more and more popular due to its flexibility and high spatial resolution. The multi-angle models play important roles in parameters inversion. Classic multi-angle remote sensing models include radiative transfer models, geometric optical models, hybrid models, and computer simulation models. They are all physical models which are developed based on some assumptions and theoretical analysis. Semi-empirical models combine the advantages of the empirical model and the physical model, as a result, they are simple and stable in inversion. The most widely used semi-empirical model is the linear kernel driven model used by the operational MODIS BRDF/albedo products algorithm. With the development of observing equipment and models, multi-angle remote sensing is widely used in many applications. Due to the anisotropic reflection characteristic, land surface albedo can only be retrieved by multi-angle remote sensing with high accuracy. Multi-angle remote sensing shows great potentials in vegetation structural parameters inversion which include the clumping index, LAI, FVC profile and canopy height. It has been found to be superior in vegetation type identification than the traditional vertical observation. Multi-angle remote sensing is also very useful in the cloud and aerosol parameters retrieval, such as the cloud albedo, height and types, as well as the aerosol optical depth and shapes. Large difference of optical scattering between the cloud and ice/snow in different viewing directions makes the identification of these covers easier with multi-angle remote sensing. The sea ice roughness can also be retrieved by multi-angle observations. In the last of this paper, we put forward the prospects of multi-angle optical quantitative remote sensing. As the multi-angle remote sensing observation data based on spaceborne, airborne, and ground platforms become more and more abundant, the main research direction of multi-angle remote sensing in the future should focus on the following aspects: developing multi-angle reflection/radiation models for complex surfaces, enhancing the preprocessing capabilities of multi-angle remote sensing data, and promoting the comprehensive abilities of multi-source data integration in application, etc.

Key words: multi-angle remote sensing, Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF), sensor, radiative transfer model, geometric optical model

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.42090013)