

“偏振遥感”专栏编者按

偏振是电磁波的特性,是地表物体反射或散射信号中的组成部分,也是光学遥感的一个重要参量。但长期以来在波长较短的电磁波范畴光学偏振特性的研究却相对薄弱,近年来由于技术的进步和需求的激励,光学偏振遥感又重新进入人们的视线并受到重视,逐渐成为当今光学遥感科技中一个有影响的前沿科学技术研究方向之一。

近年来,国外许多学者及其科研团队将研究方向聚焦在对地观测中偏振遥感的科学理论和实践问题上,在研究探索中做出了不懈的努力以期从本质上解决偏振遥感中的重大科学技术问题。十分欣慰的是与国际同行同步,我国的遥感科技工作者也对此进行了不断的探索和研究,在偏振遥感的研究和发展方面取得了重要进展。研究发现,光在植被冠层内的多次反射和散射存在明显的偏振效应,如能在定量遥感模型中有效地予以考虑,将有助于提高地表植被反演模型的精度;研究表明,在充分考虑偏振影响后,可大幅度降低对大气影响估算的误差;此外,对光学观测仪器多次散射和透射中偏振光效应的扣除,也有利于提高光学遥感系统的空间和光谱分辨率以及定标精度。对光学偏振效应的研究对于高分辨率遥感具有特别重要的意义,它有助于遥感的精确定量化和应用的深化。

“偏振遥感”专栏是《遥感学报》首次以高分辨率定量遥感中的光学偏振效应研究为聚焦点,刊载了我国遥感科技研究者在偏振遥感领域的部分理论、技术、方法的一些最新研究成果,其目的是为增进和提高读者对地表、大气、仪器系统的偏振光效应及其在遥感应用中作用的认识,并为我国在偏振遥感领域的进一步探索、研究和应用起到一定的促进作用。我们期待广大学者和科技人员在今后的研究中继续努力,不断创新,为在遥感领域出现更多的突破与进步做出我们新的贡献!



2018年9月28日

高分辨率定量遥感的偏振光效应与偏振遥感新领域

晏磊¹, 顾行发², 褚君浩³, 尤政⁴, 刘世元⁵, Hugh Motimor⁶,
V.Chandrasekar⁷

1. 北京大学 地球与空间科学学院遥感与地理信息系统研究所 空间信息集成与3S工程应用北京市重点实验室, 北京 100871;

2. 中国科学院 遥感与数字地球研究所, 北京 100101;

3. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

4. 清华大学精密仪器系, 北京 100084;

5. 华中科技大学 数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074;

6. Rutherford Appleton Laboratory Space, Science and Technologies Facilities Council, Harwell Oxford, United Kingdom, OX110QX;

7. Colorado State University, Fort Collins, Colorado 80523

收稿日期: 2017-09-03; 预印本: 2017-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 49771057, 40572167, 40671135, 40771153, 61174220, 41101328, 60971086, 60808035); 北京市自然科学基金(编号: 1093016)

第一作者简介: 晏磊, 1956年生, 男, 教授, 研究方向为偏振与无人机仿生遥感、高分辨率成像与遥感定标、仿生导航。E-mail: lian@pku.edu.cn

摘要: 随着航空航天高分辨率观测手段的逐步成熟, 定量遥感在有效解决了光学地表多尺度效应后, 更高分辨率的光学偏振效应在地表、大气、仪器3大要素方面逐步全面凸显出来, 并直接决定或影响高分辨率观测系统的定量遥感效能实现和质量保障。例如, 植被冠层极其微弱的多次散射反射偏振效应, 如果不加扣除其模型误差达到136%; 大气衰减本质是大气偏振效应, 是遥感反演的最大误差源, 误差达到5%—30%, 偏振手段扣除大气误差目前已可以降低一半以上的误差; 观测仪器扣除多次散射透射偏振光后, 可以实现5 nm分辨率下0.1—0.3 nm高光谱定标能力, 并借助偏振强化光噪声分离出中心波长偏移和带宽退化的误差根源。借助偏振“强光弱化, 弱光强化”, 能够实现稳定度达 10^{-8} 月球辐亮度基准观测, 为遥感辐亮度定标不确定度由7%到1%—2%跨越提供可能。

关键词: 高分辨率定量遥感, 偏振光效应, 地表偏振效应, 大气偏振效应, 仪器偏振效应, 偏振遥感

中图分类号: TP701 **文献标志码:** A

引用格式: 晏磊, 顾行发, 褚君浩, 尤政, 刘世元, Hugh Motimor, V.Chandrasekar. 2018. 高分辨率定量遥感的偏振光效应与偏振遥感新领域. 遥感学报, 22(6): 901–916

Yan L, Gu X F, Chu J H, You Z, Liu S Y, Motimor H and V.C. 2018. Optical polarized effects for high-resolution quantitative remote sensing and new polarization remote sensing fields. Journal of Remote Sensing, 22(6): 901–916
[DOI:10.11834/jrs.20187380]

1 引言

偏振遥感是近来倍受关注的一种新兴对地观测手段, 中国科研工作者通过30余年持续不断地与国际同行研究跟踪、学习、探索与超越, 在新理论、新技术、新方法、新仪器等各个方面取得了系统全面的突破, 在国际上取得了引领性成果并推动了偏振遥感的发展。具体表现在如下3个方面。

1.1 偏振遥感物理理论的初步形成

偏振是太阳辐射的四大基本物理属性之一。太阳辐射在到达这些介质表面发生反射、散射或折射后, 呈现出不同程度的偏振状态, 而该偏振状态恰恰对应着界面或介质的某种物理状态和化学性质。偏振遥感探测可以得到目标的偏振态信息, 除能得到常规遥感测量的辐射量数据外, 还能得到与目标本征特性有关的偏振度差异, 从而可以在一定程度上把目标的本质差异“强化”出来, 提取常规遥感方法不易得到的信息, 因此可以进一步提高地物识别的精度和定量化水平; 地物目标的反射同时具备偏振和光谱特征, 偏振光谱含有目标地物更丰富的信息, 可提供更多的、更有效的识别特征, 大幅提升对地物物理性质的认知水平与探测能力。由此获得地物偏振遥感的五大规律: 多角度反射物理特征、多光谱化学特征、粗糙度与密度结构特征、信息—背景高反差比滤波特征和多次散射能量辐射传输特征, 并形成地物偏振遥感物理理论; 获得全天空偏振模式图规律及物理特性、大气偏振中性点区域规律与地

一气参量分离方法、全天空偏振矢量场规律下的大气粒子多角度观测立体层析方法, 由此形成大气偏振遥感物理理论; 获得基于地球偏振矢量场的仿生偏振自主导航、先进空间探测与全球变化研究的偏振遥感新应用, 以证明偏振遥感物理的客观性、独特性和稳定可重复性, 中国在国际偏振遥感物理理论、方法、应用上已处于引领地位。

1.2 高分辨率定量遥感的偏振效应发现及其定量精化能力的效能体现

国际著名学者李小文院士20世纪提出的光学观测地表多尺度效应成为定量遥感的重要基石。21世纪航空航天高分辨率观测手段的逐步成熟, 定量遥感在有效解决了光学地物多尺度效应后, 更高分辨率的光学偏振效应逐步凸显出来, 并全面反映在地物、大气和观测仪器这3个遥感要素方面, 直接决定或影响高分辨率观测系统的定量遥感效能实现和质量保障。例如, 植被冠层极其微弱的多次散射反射偏振效应, 如果不加扣除其模型误差达到136%; 大气衰减本质是大气偏振效应, 是遥感反演的最大误差源, 达到误差5%—30%, 偏振手段扣除大气误差目前已可以降低一半以上的误差; 观测仪器扣除多次散射透射偏振光后, 可以实现5 nm分辨率下0.1—0.3 nm高光谱定标能力, 并借助偏振强化光噪声分离出中心波长偏移和带宽退化的误差根源。借助偏振“强光弱化, 弱光强化”, 能够实现 10^{-8} 月球辐亮度基准观测, 为遥感辐亮度定标不确定由7%到1%—2%跨越提供可能。

1.3 偏振遥感观测手段的逐步形成

自1977年美国发射了装有光度偏振计PPS的旅行者1号以来,美国、法国、日本卫星搭载了多颗偏振探测传感器,国际学术界也有多次专门的学术研讨会。中国多家科研部门也正在开展相关的工作,并取得相当可喜的进展,组织开展了多次全国偏振光学会议,偏振遥感器也列入了中国高分计划、天宫二号、国家空间基础设施等重大计划中。

2 高分辨率定量遥感与偏振光效应的电磁波方程参量分解

2.1 电磁波标量方程与经典参量

光是电磁波,偏振与振幅、相位、频率一起,构成了光波的4个本质特征。1864年,麦克斯韦在总结前人工作的基础上建立了一组关于电场与磁场相互耦合的方程组,即著名的麦克斯韦方程组。在一定的传播介质中,例如在均匀介质中没有电流和自由电荷的区域,麦克斯韦方程可以直接推导出波动方程,其最简单的标量解为简谐平面波,可以描述为

$$E(z, t) = E_0 \exp(i(kz - \omega t + \varphi)) \quad (1)$$

式中, z 为传播方向, t 为时间, E_0 为波的振幅, $k=2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长, ω 为圆频率, φ 为相位, i 为虚数。该简谐波的物理性质完全由3个参量所决定,即振幅 E_0 (或强度)、频率 ω (或波长 λ)、相位 φ 。其中,振幅 E_0 对应辐射亮度,频率 ω 对应光谱,相位 φ 与强度共同决定光强的空间分布,上述三者是辐射、光谱、空间分辨率的物理基础。

2.2 电磁波矢量方程与偏振参量

根据麦克斯韦方程,还可以推导出光波是矢量横波,即光矢量与光波传播方向垂直。因此,要完全描述光波还需要指明光在任一位置、任一时刻光矢量的方向。光的偏振现象是这种矢量横波特性的表现,是光波的第4个基本特性。所谓偏振,是指光矢量振动方向相对于传播方向的不对称性。根据偏振程度(通常简称为偏振度)不同,光波可以分为非偏振光(如自然光)、部分偏振光和完全偏振光(简称偏振光)。偏振光波振动的不同状态,称为偏振态,根据偏振态不同,偏振光可以

进一步分为线偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光等。描述偏振光的方法有三角函数、琼斯向量、斯托克斯向量和庞加莱球等,在偏振光学书籍中有详细描述(Azzam和Bashara, 1977; Bass和Mahajan, 2010; Gil和Ossikovski, 2016; 廖延彪, 2003)。

偏振光最常用的表示方法为琼斯向量,即将式(1)所示的标量形式扩展为包含2个互相垂直分量的矢量形式:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{x0} \exp(i(kt - \omega t + \varphi + \Delta)) \\ E_{y0} \exp(i(kt - \omega t + \varphi)) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, E_{x0} 和 E_{y0} 分别为 x 和 y 方向的振幅, Δ 为 x 和 y 方向的相位差角。如果不考虑光波的绝对振幅、相位、频率等特性,而是单独考虑光波的偏振特性,可以将式(2)简化为更为简洁的琼斯向量表达式:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = E_y \begin{bmatrix} \tan \psi \exp(i\Delta) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $\psi = \tan^{-1} \left(\frac{E_{x0}}{E_{y0}} \right)$ 称为振幅比角,它与相位差角 Δ 一起,完整描述了完全偏振光的偏振特性。

对于部分偏振光或完全非偏振光(即自然光)而言,琼斯向量无法对其进行完整描述,常用的表示方法是斯托克斯向量:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x E_x^* + E_y E_y^* \\ E_x E_x^* - E_y E_y^* \\ E_x E_y^* + E_y^* E_x \\ i(E_x E_y^* - E_y^* E_x) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $(*)$ 表示复数的共轭, S_0 一般表示偏振光的总光强, S_1 、 S_2 和 S_3 分别表示 x 与 y 方向线偏振光、 $\pm 45^\circ$ 方向线偏振光以及右旋与左旋圆偏振光光强之差。

当光波在介质中传播并与介质发生相互作用,其偏振态会发生改变,可以用 2×2 阶的琼斯矩阵 $\mathbf{J}$ 或 4×4 阶的穆勒矩阵 $\mathbf{M}$ 来描述偏振态的改变:

$$\mathbf{E}' = \mathbf{J} \mathbf{E} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M} \mathbf{S} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \mathbf{S} \quad (6)$$

斯托克斯向量(或琼斯向量)完整描述了光波本身的偏振特性(即偏振态),穆勒矩阵(或琼斯矩阵)则完整描述了介质本身的偏振响应特性(即偏振

态改变)。琼斯向量和琼斯矩阵中的元素为复数,通常只能用于描述完全偏振光的偏振态和偏振态改变;而斯托克斯向量和穆勒矩阵中的元素均为实数,斯托克斯向量元素对应于不同偏振态的光强信息,可用探测器直接获取,它们既可以用来描述偏振光的偏振态和偏振态改变,也可用于描述非完全偏振光的偏振态和退偏等。因此,在分析光波的偏振特性时,斯托克斯向量和穆勒矩阵具有相对的优势。

2.3 电磁波相关参量的高分辨率遥感意义

显然,矢量形式的斯托克斯向量 $\mathbf{S}$ 对比标量形式的总光强 S_0 ,矩阵形式的穆勒矩阵 $\mathbf{M}$ 对比标量形式的总光强响应 M_{11} ,其信息含量都要丰富得多。事实上,在地物遥感中,太阳辐射与地表相互作用,光波在各个介质表面和界面发生透射、反射、散射和折射,除了表现出振幅(或强度)、频率(或波长)、相位等基本特性外,还体现出独特的偏振特性,即光波在地表反射前后发生偏振态改变(用穆勒矩阵来表征),或者地表反射后的光波呈现出独特的偏振态(用斯托克斯向量来表征)。这种偏振态或偏振态改变特性可以看作是地物遥感研究的一个新维度,是区别于振幅(或强度)、频率(或波长)、相位之外的一个独立维度。当然,这种偏振特性也可以与波长、空间强度、相位分布等维度相结合,体现出光谱型、空间成像型的偏振特性。因此,地物偏振遥感相比传统地物遥感而言,包含了更为丰富的物理效应与观测信息。

3 高分辨率定量遥感的地物偏振光效应

辐射与地表相互作用之后,光会在两种介质表面发生反射和折射,体现出偏振特性。地物偏振遥感与高分辨率地表反演偏振光效应主要包括地表偏振光光谱反射效应与植被冠层生化组分遥感精确反演及误差剔除、地表偏振光多角度反射物理效应与植被遥感偏振观测方法与规律、地表偏振光粗糙度—密度结构特征反射效应与岩—土参量—密度遥感测估、地表偏振光反射信息—背景反差比滤波特征效应与雪—水—植被遥感探测和地表偏振强光弱化—弱光强化辐射传输效应与遥感辐亮度月球基准验证共5部分。

地物偏振的第一个特性为光谱反射效应。对于植被冠层,偏振主要由辐射与叶片的表面镜面反射造成。当入射辐射与叶片相互作用时,有部分辐射直接在叶片表面被反射(Vanderbilt和Grant, 1985),这部分辐射并没有进入叶片内部,因而不包含叶片内部的生化组分信息(Knyazikhin 等, 2013; Yang 等, 2016),根据菲涅尔公式,这部分辐射是部分偏振光(Vanderbilt 等, 1991)。对于这部分辐射,在可见光近红外波段内是光谱稳定的,也就是说,其值在可见光近红外波段内保持稳定(Yang 等, 2016)。依据这一特性,构建了包括物理模型(Vanderbilt和Grant, 1985; Rondeaux和Herman, 1991; Bréon 等, 1995),半物理的偏振反射率模型(Diner 等, 2012; Litvinov 等, 2011; Maignan 等, 2009; Nadal和Bréon, 1999; Waquet 等, 2009; Xie 等, 2017),这些模型也因此作为地表边界条件,被广泛应用于陆地上空气溶胶反演研究中(Cheng 等, 2011, 2012; Deuzé 等, 2001; Xie 等, 2013)。另外,由于表面反射的存在,一定程度上降低了叶片内部生化组分信息遥感反演的精度,引起了美国科学院院刊上关于氮含量与冠层光学特性相关性的争议(Knyazikhin 等, 2013; Ollinger 等, 2008)。通过研究中国东北地区的红松和云杉的偏振反射特性与吸收光谱的关系发现,如果不去除表面反射的影响,与叶片生化组分含量高度相关的吸收光谱遥感估测将带来一定影响,这个影响随波长的改变而改变,在蓝光波段的影响达到最大,可达140%(Yang 等, 2016)。

地表的偏振除了光谱稳定的特性外,还表现出一定的角度特征,此为地表偏振的第2个特性。从菲涅尔公式可知,入射和观测几何影响参与表面镜面反射和折射的辐射比例,而镜面反射中偏振部分也与入射观测几何相关。为了获得这一特征,地表常采用室内或室外的多角度观测系统获得,这样的系统常包括多角度观测架、光谱仪和偏振片及其相关配件(Suomalainen 等, 2009; Sun和Zhao, 2011)。利用高空间分辨率多角度偏振相机可以获取城市区域典型地表多角度航空数据,反演得到3种半经验双向反射率模型的参数(谢东海等, 2012)。研究的对象主要包括典型地表物质,如植被、冰雪、沙土等(Sun和Zhao, 2011; Lyu和Sun, 2014; Sun 等, 2017, 2014)。常规地表的偏

振反射特性彼此之间的差异不大,除了裸土和冰雪之外,这两种地物类型的偏振反射率一般会 是植被等其他地物的2倍左右(Maignan 等, 2009),这主要是由于地物的结构决定的,一般情况下, 植被地表的结构更复杂,因而发生镜面反射的概 率相对于裸土和冰雪表面的要低。但是,相关研 究也表明,冰雪的粒径会影响雪的偏振反射特性 (Sun和Zhao, 2011),叶倾角分布函数影响植被的 偏振反射特性(Rondeaux和Herman, 1991),特定入 射观测几何产生负偏振反射率等(Sun 等, 2014; Maignan 等, 2009)。

地物偏振的第3个特性为地表偏振光粗糙度— 密度结构特征反射效应。自然界的表面均介于理 想镜面与理想的朗伯面之间。其表面粗糙度、纹 理结构、化学成分、含水量等物理化学特性,均 会影响散射光波的偏振特征。对于岩石而言,表 面粗糙度影响岩石偏振度波谱,且有偏振度在镜 面反射方位探测天顶角方向达到的最大峰值与表 面粗糙度呈幂函数关系(相云, 2010);偏振度峰值 所在的探测天顶角与表面粗糙度也有很强的相关 关系。另外,相关研究表明可通过偏振测量获取 岩石的密度,其基本原理为测定与计算岩石表面 反射光谱中的偏振度,计算该岩石的折射率;然 后从岩石的折射率计算岩石的密度(赵虎 等, 2004a, 2004b),这对利用偏振探测远端星体密度提供理论 支撑。

地物偏振的第4个特性为高信号—背景反射 比。国内外研究常通过对典型地物(植被、水、积 雪)的偏振光谱测量,分析植被、水和积雪的偏振 反射规律并将其与常规非偏振反射的观测结果进 行对比,并进行物理解释。对于植被,通过地基 光谱测量及空基多角度偏振数据研究分析了不同 观测尺度上的植被偏振反射及滤波特征,从偏振 角度观测了植被遥感的热点效应以及植被对不同 波段光波的吸收、单次散射和多次散射强度特点 (Suomalainen 等, 2009; 焦健楠, 2016; Yang 等, 2017),发现通过改进归一化植被指数,可以 提高偏振反射率模型精度(王雪琪, 2017);对于积 雪和水,通过室内、室外积雪和水偏振测量数据 分析,发现不同几何条件下的积雪和水偏振反射 规律及滤波特征,在相似观测几何条件下,分析 了偏振反射对周围环境的敏感性,说明了将偏振

技术引入遥感对地观测具有很广阔的应用前景(焦 健楠, 2016)。同时,也为后续继续深入研究地表 偏振反射规律与模型奠定了一定基础。

地物偏振的第5个特性为高强度弱化—弱光强 化辐射传输效应。长期以来,困扰地球遥感探测 的一个重要问题是在轨卫星的辐射定标的精度 (Kieffer和Stone, 2005)。星上常用的定标设备主要 有积分球和黑体。然而,随着时间的推移,定标 设备将会衰减老化或者遭受空间环境的污染,导 致在轨辐射定标精度的下降。相对于这些定标设 备,月球的反射能量随着时间的推移基本保持不 变(Kieffer, 1997)。利用月球作为稳定的标准辐射 源,对其进行长期准确的地基观测,建立月面辐 亮度及辐照度模型,将为今后地球卫星的辐射定 标提供稳定的定量化参考,极大地提高地球卫星 长期在轨定标精度(Cramer 等, 2013)。

4 高分辨率定量遥感的大气偏振光 效应

大气是人类赖以生存的重要地理环境,是人 类不可缺少的自然资源。地球辐射收支平衡由大 气中的气溶胶、云、大气气体及地表反射辐射共 同决定(Levy 等, 2005)。太阳辐射通过大气层 时,被大气粒子散射,产生偏振现象。一般来 讲,大气粒子的一次散射使天空偏振产生正值, 而多次散射使天空偏振产生负值,天空中的正负 偏振的交点为零偏振点,这个点即所谓的大气中 性点(Neutral point),也就是天空中偏振度为零的点 (Berry 等, 2004)。由于空气分子、气溶胶粒子对 入射太阳光的散射吸收使得在一天的某一时刻、 某一位置,天空中具有相对稳定的偏振模式,即 为天空偏振模式图(Smith, 2007)。1809年, Arago 第一次发现了天空光具有的偏振现象,并发现天 空中存在偏振度为零的点,也就是太阳中性点; Strutt(1871)提出了Rayleigh散射理论,该理论模型 科学解释了天空散射光的偏振现象,可以较为准 确地描述晴朗天空散射光的偏振状态分布。

由于大气散射具有强烈的偏振特性,国内外 针对气溶胶的偏振特性开展了一系列研究,并于 20世纪90年代相继提出了一系列的偏振传感器 计划,包括法国的POLDER(POLarization and

Directionality of Earth Reflectance)和美国的EOSP(Earth Observing Scanning Polarimeter, 后改称为APS, Aerosol Polarimetry Sensor)。偏振信息的引入使得POLDER可以进一步反演气溶胶的复折射系数及形状(球形与非球形)(Bréon 等, 2002)。目前POLDER算法假设陆地气溶胶的偏振信息完全是由细模态气溶胶引起的, 其计算的气溶胶光学厚度为细模态气溶胶。但实际上粗模态与细模态气溶胶均对传感器有贡献。中国科学院遥感与数字地球研究所Cheng等人(2012)利用基于NASA AERONET太阳光度计观测值所提出的东亚气溶胶模型, 及POLDER观测值对东亚地区的陆地气溶胶进行了反演, 并与北京及香河的地面观测站点数据进行了比对。北京航空航天大学孙夏和赵慧洁(2009)也利用了POLDER数据对北京地区的气溶胶进行算法研究, 并与北京、香河等地的地面光度计测量进行了比对。中国科学院大气物理研究所段民征和吕达仁(2007)利用POLDER进行陆地气溶胶反演研究中发现, 单纯利用偏振信息进行大气气溶胶信息反演可能会有一定的误差, 需要利用光强信息对反演结果进行校正, 并提出了理论与方法。

在利用全天空偏振信息进行导航方面, Szaz等人(2016)指出, 利用全天空偏振可使得太阳高度角估计误差优于 1° , 证明了在古代航海中利用全天空偏振信息可用效地进行航海导航。晏磊等人(2009)与关桂霞等人(2011)从理论与实验上深入研究了全天空偏振光的分布, 并提出了利用天空偏振光进行导航的方法与初步模型。Tang 等人(2016)研制了一种可以在严酷条件下使用的全天空偏振成像仪, 其偏振角的精度优于 1° , 使得全天空偏振信息可以在林下、云下情况得到应用。Pomozi等人(2001)指出实际上在非晴空条件下也存在一定的固定偏振模式图使得昆虫在非晴空条件下进行导航成为可能, Zhang 等人(2015)采用偏振片组在不需要旋转偏振片的条件下模拟了昆虫复眼获取的全天空偏振信息, 并进行了实践导航验证。

美国的Pust和Shaw(2008)研究表明, 相对晴朗天气条件, 由于云分子多次散射的影响, 多云天气较晴朗天气偏振度有明显的降低, 但偏振方位角的分布几乎不发生变化。设计制作了一种全自

动的成像式全天空偏振光测试仪器, 对有云天气条件下天空偏振模式的实际分布进行了仿真, 仿真结果与测试结果相符合(Pust和Shaw, 2012)。利用Mie散射理论分析了云粒子尺寸对大气散射的影响, 以及云中多次散射的退偏现象。

合肥大学高隼等人(2009)率先开展大气偏振模式的研究, 申请并获得了大气偏振模式探测装置的相关专利。中国科学院上海光学精密机械研究所黄旭锋等人(2010), 基于Mie散射理论研究了散射粒子半径与散射光偏振度的关系。美国华盛顿大学圣路易斯工程学院的Sarkar(2010)发明了用于获取全天空大气偏振模式的偏振传感阵列, 之前的检测装置因为相机镜头的视角有限, 只能获取非全局区域内的偏振信息, 而该装置可以用于获取全天空大气偏振模式。清华大学赵开春等人(2013)设计了一种天空光偏振模式自动探测装置, 用于获取大量的天空光偏振模式信息并构建天空光偏振模式模型。

大连理工大学Cui等人(2009)依据Rayleigh散射理论, 对太阳光偏振模式和月光偏振模式进行仿真分析, 得到了太阳光和月光的偏振分布特性和规律。用自动化天空光偏振测试仪器对太阳光和暮光偏振模式进行了测试分析, 分析了偏振分布模式中中性点的变化规律(崔岩 等, 2013); 发现多云天气下天空光偏振分布模式和晴天的相同, 但是偏振度要小于晴朗天气的偏振度。崔岩等人(2014)验证了晴朗天气下满月夜间天空仍然存在规律性的月光偏振模式。

孙洁等人(2016)设计了全天空大气偏振模式实时测量系统, 实现了单个主光路下, 三路通道不同偏振方向的同时成像。外场实验结果表明, 在晴朗少云的气象条件下, 中心波长为520 nm的分布与Rayleigh模型最接近。

在全天空偏振遥感方面, 陈伟等与吴太夏等分别在理论上与实验上对全天空偏振信息进行分析, 指出全天空偏振信息与大气气溶胶信息关系密切, 而利用中性点信息对进行对地探测可最大程度获得地表遥感信息(吴太夏 等, 2013; 陈伟 等, 2013)。Li等人(2014)基于太阳光度计测量的全天空偏振分布模式图, 引入偏振角信息用于气溶胶光学信息的反演。Boesche等人(2006)则对不同

气溶胶模型的全天空偏振特性进行了分析,指出气溶胶的谱分布与粒子性质对全天空偏振性质影响较大。Kreuter 和Blumthaler(2013)等通过实验发现,利用全天空偏振成像比非偏振手段更能有效地提取气溶胶光学性质。Emde等人(2010)则通过Monte Carlo方法模拟了气溶胶对全天空偏振信息的影响,发现偏振信息可能会有效地利用于气溶胶信息反演。Zhang等人(2016a)利用PARASOL/POLDER数据利用偏振信息对气溶胶信息进行了反演。此外,全天空偏振信息也可以应用于仪器的定标,如Swindle和Kuhn(2015)利用全天空偏振遥感信息对大型望远镜等光学设备的光学波段进行标定,其精度可达3%。

5 高分辨率定量遥感的仪器偏振光效应

人眼无法直接感知光的偏振信息,建立快速、高精度的偏振测量仪器,是国内外研究的热点之一。因为偏振作为光的基本属性之一,其中蕴含着被测物的许多特征信息,所以在光学测量领域,偏振检测是一种不可忽视的基本测量手段。随着偏振仪器的不断发展,偏振测量也在众多领域发挥越来越重要的作用。

国内外多个科研团队都在从事光学偏振遥感理论、技术、实验和基础应用等研究工作,从光学偏振遥感仪器研制情况看,为满足基于光谱偏振信息解译研究的需求,人们研制了可见、近红外至短波红外、中波红外和长波红外光谱偏振探测系统,并且这些系统已经在大气探索、地物遥感、天文研究等相关领域得到应用(孙晓兵等, 2010)。红外偏振遥感是近十年来开发的一种新型红外检测技术,红外偏振遥感具有独特的优势越来越得到认可与重视,信噪比可以通过偏振测量进行优化,有效降低其带来的误差。例如其可在红外夜视中应用,因在中波红外和长波红外下直接影响信噪比的是环境温差噪声,故在成像系统中并入夜视性能综合模型(NV-IPM),输入Stokes矢量模型,利用Mueller矩阵计算,可显示典型红外成像信噪比大于偏振红外成像信噪比,此方法的优点在于简单快捷,但仍需更多的研究和测量(Zhang等, 2016b; Preece等, 2014)。

气溶胶是遥感观测最大的误差源,光学偏振检测被证实在此领域能显著减小其误差,故气溶胶遥感探测仪将偏振检测作为一项重要测量手段。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的偏振多谱段云与气溶胶探测仪(CAPI)是中国首颗二氧化碳监测科学实验卫星的有效载荷之一,能获得空间分辨率优于1 km、覆盖宽度大于400 km的高精度的云与气溶胶多光谱数据,包括紫外线,可见光和短波红外以检索气溶胶光学和微物理性质,进而增加温室气体的回归精度(张军强等, 2015; Zhang等2014)。由此可见,新一代云与气溶胶遥感探测仪的发展趋势是将大视场、中等分辨率、多角度、多光谱、宽谱段、长寿命的高精度偏振测量技术集成到一台遥感仪器上。

截止目前,CAPI不断获取9个通道的全球图像,但仍处于在轨测试阶段,通过使用统一的线性化矢量辐射传递模型(UNL-VRTM)模拟合成CAPI观测,且该模拟考虑了细和粗气溶胶的不同组合,结果显示出线性偏振度比反射率对气溶胶性质更敏感(Chen等, 2017)。同时,为了解决多通道型偏振成像仪的偏振定标问题,提出了一种基于积分球无偏光源的偏振定标方法,可有效提高多通道型偏振成像仪的偏振定标效率,且经偏振定标后仪器在目标偏振度低于20%时的偏振测量误差小于1%,满足大气气溶胶测量精度的要求(杨斌等, 2017)。将光谱范围扩展到紫外和短波红外,并以亚公里分辨率增加高精度偏振成像的技术在国外已成熟;许多学者充分认识到光学遥感仪器偏振光效应对定量遥感的重要作用,研制包括MISR (Multiangle Imaging SpectroRadiometer)和MAIA (MultiAngle Imager for Aerosols)等在内的多角度成像仪(Diner和Garay, 2017)。

目前偏振遥感测量技术包括全Stokes矢量遥感和线偏振遥感,相比而言,全Stokes矢量遥感可以测量偏振相位信息及相关的全偏振参数等包含更多信息更多细节的数据。在高光谱遥感方面,应用线偏振遥感和非共线声光可调滤波器组成高光谱偏振成像系统,不仅可以确保成像的精度,也可获得高光谱和偏振特征;在宽光谱遥感方面,基于电光调制器的双CCD成像装置,并由数字信号处理器进行全Stokes参数的计算,可实时得到宽

光谱范围的全偏振图像(李宇波等, 2010; Wang等, 2017)。成像式全偏振系统(全偏振仪)可测量的直接结果是Stokes矢量图像, 也可显示偏振度 P 、偏振角 A 、椭圆率角 χ 等偏振参数图像, 从而利用多偏振参量表征被测物信息, 可以用于区分不同材质、不同粗糙度的物体, 测量物体的表面形状分布和表面微小形变, 还可以消除强反光对成像的影响。根据偏振参数图像的数值分布特点, 对其进行非线性映射, 提高了偏振参数图像对细节的分辨能力, 扩展了其应用范围。关于国外研制的三色全Stokes相机, 该设计结合了一层滤色器阵列和一层偏振片阵列, 均是利用优化的平铺功能来解决单传感器的敏感问题(Tu和Pau, 2016)。

以描述全部或部分偏振光的偏振状态(SOP)的 4×1 斯托克斯矢量和描述SOP如何变化即光与材料或系统相互作用的 4×4 穆勒矩阵为基础的偏振光学和椭偏仪, 经过近50年向快速、自动化、成像、光谱仪器方向的发展, 使得它们在物理、化学、材料、生物、天文、海洋、遥感、导航等多个领域都有着越来越广泛的应用(Azzam, 2016): 通过高精度的偏振传感器测量散射光的斯托克斯参量来反演光学元件的表面粗糙度, 以量化光学器件表面的灰尘和刮痕所带来的极化误差(Shibata等, 2015); 相关研究证明椭偏仪在纳米结构计量学中是强大的工具并将在半导体制造业中获得了广泛的应用和发展(Liu等, 2015); 相移成像椭偏仪使用液晶可变延迟器作为光学相位, 使得空间分布可以相对于相移强度图像来测量椭圆参数, 使得其能够测量2维薄膜材料的物理性质(Yu等, 2015); 微型高精度偏振仪(Mini-HIPPI), 一种重量仅为650 g但能够测量线偏振的恒星偏振仪, 可安装在一个小的望远镜上来观测亮星的极化水平(Bailey等, 2017); 工作于红外范围 $3\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$ 的椭偏仪, 光学结构包括偏振态发生器和偏振态分析仪, 该设计以期消除色差影响并得到高精度与高准度(Garcia-Caurel等, 2015); 穆勒矩阵分析方法对于混浊系统成像也十分有利, 一种快速基于光弹调制器宽视场穆勒矩阵成像系统可对任意混浊样品进行成像, 利用空间滤波可保留宽视场信息且无运动部件, 未来可进行量化和优化以进行生物组织分析(Alali等, 2016)。由此可见, 以椭偏仪

为核心的偏振测量系统是一类重要的光学传感器, 必将得到更加广泛地应用。

支撑偏振传感器发展革新的即是仪器定标, 故关于高分辨率偏振传感器的定标问题显得尤为重要。其中, 有关于宽视场光学仪器的定标中的偏振光效应是个典型例子。以多角度多通道光学遥感器的光学通道为例, 利用积分球参考光源和偏振片, 开展了偏振特性的测试实验(采用傅里叶变换的方法计算了起偏度和偏振特性的校正精度)经过分析, 校正前后, 偏振特性引起辐射定标不确定度由8%下降至2.2%以内, 满足高精度的辐射定标要求。再举一例, 星载多角度偏振成像仪(DPC)自身的光学系统有一定的偏振效应, 会影响光学通道的辐射测量精度。根据DPC的原理和光路结构特点, 即反远距型像方远心光路结构, 考虑超广角镜头的偏振效应, 以Stokes-Mueller矩阵的方式给出了仪器非偏振通道的辐射测量模型, 并通过实验验证了此方法可高精度定标出仪器的显式起偏效应(钱鸿鹄等, 2017; 杨伟锋等, 2015)。因此, 光学传感器的偏振光效应是偏振测量精度和宽视场成像重要的误差来源之一, 消除其影响提高偏振传感器的定标精度是偏振传感器的发展必不可少的一步。

过去40年, 研究表明了偏振光是作为增强各种遥感信息的有用信号。在测量过程中, 通常使用斯托克斯参数来描述从目标表面反射的光的偏振状态, 全Stokes参量测量技术能得到更多的有用信息, 得到与目标的本征特性有关的偏振度差异, 从而对这些差异进行“强化”以提高地物识别精度和定量化水平; 气溶胶是遥感信息的最大误差源, 其有望通过光学偏振从理论和实验两方面进行定量化处理; 光学仪器定标凸显出的偏振光效应和偏振传感器的设计与发展近来也是重点发展方向, 并有一系列的丰硕成果。因此, 针对目标表面的偏振测量不仅提供给我们偏振信息也提供了一个可靠信号, 是现代光学遥感不可或缺的一部分(Sun等, 2017a)。

6 偏振遥感交叉新领域

偏振遥感作为近年来新兴的一种遥感技术, 在国际上已经成为一种快速发展的领域, 依据偏

振技术特有的技术, 与其他领域交叉, 为偏振遥感提供应用多层次、全方位的支撑, 奠定偏振遥感的应用推广。

光指的是波长在毫米以下的电磁波, 光学遥感是接受地物反射的电磁波来记录地物信息。由于不同物体或者同意物体的不同状态产生的偏振态不同, 产生不同的偏振波普, 利用偏振光这一特性(Peltoniemi 等, 2015), 可以解决传统光学遥感无法解决的问题; 微波的波长一般在毫米水平, 微波遥感则是主动发射电磁波并接受地物反射回来的电磁波来对地物进行探测。相比之下, 微波遥感能够全天时全天候的工作, 对冰、雪、森林和土壤等有一定的穿透能力。两种方法的原理基本相同, 但是硬件差距很大, 尤其是探测器有本质的差别。在目前的国内外研究中, 将微波与偏振光的特性比较的研究甚少, 但是对于偏振光和微波的研究已经很成熟, 偏振光和微波在医学(Chou 等, 1977)、农业、国防等方面应用广泛, 就微波遥感来讲, 其应用很广泛, 如国外研究通过微波特性预测通信理论(Kanellopoulos, 1985)、利用微波诱导听觉脑干反应, 通过实验观察到特征符合先前获得的理论预测中考虑到入射微波脉冲宽度和频率, 吸收微波能量模式, 振动频率, 和感觉阈限等(Lin 等, 2016); 对于偏振这一领域, 偏振光的应用甚广, 在偏振遥感方面是近年来得到广泛关注的新兴观测方法, 多波段偏振成像在各个领域的应用包括大气观测、目标探测和分类、医学诊断、监视和3维物体重建(Zhao 等, 2016)。已经在国际上成为一种快速发展的领域, 文章通过从多个角度比较微波与偏振光的异同, 得出微波和偏振光在遥感领域的不同研究与应用。

偏振遥感作为一种新型的遥感技术, 其利用不同地物的偏振特性为遥感目标提供信息。偏振遥感可实现强光弱化与弱光强化的信息增强(晏磊等, 2014)。激光雷达被称为是激光探测距离光学雷达, 作为主动遥感技术应用在光学范围内检测目标物体(Diaz 等, 2013)。激光雷达遥感可获取地物的3维分布信息, 两者组合为下一代遥感模式的研发提供了一种可能。然而通过文献调研发现, 对于大气偏振激光雷达系统的研制已有研究(Ghalumyan和Ghazaryan, 2016), 偏振激光雷达遥

感这一概念虽然提出较早, 但其早期应用主要集中在大气遥感领域, 基于激光雷达探测方程的极化激光雷达探测数据的反演, 利用极化多样性的方法感知空气中水凝物的存在, 对水凝物粒子进行分类, 反映了层状云的相态结构分布特点(潘昱冰等, 2015), 从而区分大气中水汽和冰晶云的形状与方位, 并进一步发展到反演中层大气的气溶胶含量及针对相关任务的信息增强技术研发(Di 等, 2017; Seifert 等, 2015)。事实上, 偏振遥感不论是在植被遥感, 还是在军事侦察等其他领域具有重要价值, 偏振激光雷达具有推广到复杂地物遥感的可能性, 本文从两种模式的遥感原理角度分析了其可能实现的机理基础, 为后续偏振激光雷达遥感技术的研究及在农业、地质、空间探测等不同领域中的应用指出了可能的切入点。

对近地空间和深空目标、事件和环境进行感知, 编目、识别目标进而确定空间事件是构建空间态势感知系统的技术基础; 根据传感器、多源情报和数据源, 融合监视数据、人工情报、地理空间情报, 通过先验知识和算法, 得到基础情报和作战情报进行特征描述是实现空间态势感知系统的技术关键(曾德贤和李智, 2015)。然而太空态势感知系统研究并没有相对成熟, 针对太空态势感知系统核心技术的迫切需求。在目前研究中, 已经提出了多波段偏振成像技术, 仿生多波段偏振视觉系统(Zhao和Xu, 2016)。已经拥有了模拟昆虫的视觉系统的偏振导航传感器, 仿生偏振导航传感器的定标方法较为成熟(Zhao和Xu, 2016; Kirschfeld, 1988; Evangelista 等, 2014)。在以往的研究中, 偏振导航系统精度较高应用广泛(Wallace, 2012)。偏振视觉可以简化一些在强度和颜色处理上更复杂或实际上不可行的视觉任务(Sarkar和Theuwissen, 2014), 通过模拟自然界的昆虫、鸟类及鱼类偏振视觉系统的信息感知与高精度导航机制, 探索基于仿生偏振视觉环境信息感知与位置姿态测量中的科学问题, 构建仿生偏振光栅阵列成像器件与敏感模型, 提出基于生物偏振视觉的仿生信息感知与导航的误差分析、多信息融合等关键算法, 建立基于神经网络处理机制的仿生信息感知与导航模型, 提出基于生物偏振视觉的仿生信息感知与导航的信息融合与误差分析关键算法, 综合利用多源信息探测与导航技

术,设计实现一种能够连续可靠进行空间环境信息感知及高精度导航偏振探测系统,提出基于生物偏振视觉的仿生信息感知与导航的信息融合与误差分析关键算法。

多波段偏振成像在各个领域的应用包括大气观测、目标探测和分类、医学诊断、监视和3维物体重建(Zhao等,2016)。偏振成像技术及偏振摄影测量的测量图像是3维重构的主要数据获取来源,点云数据是3维重建技术的数据基础,而精确3维点云技术是精确3维点云数据及衍生出来表面等模型数据是数字城市构建基础数据,广泛应用于医学(Costa等,2014)、航空、国土资源、城市建模等领域。其中,基于可见光影像视觉3维重建技术方法是目前工业及学界构建3维点云常用方案,诞生出包括Photoscan、Pixel4D和Smart3D等工业级摄影测量软件。目前关于立体视觉偏振融合的摄影测量技术国际上已较成熟。主要是通过偏振技术提高对目标的探测能力,通过偏振信息可视化与3维重构的融合来增强对于目标地物的认识。完整的激光点云需要对物体进行多角度扫描,像点精度和配准精度会直接影响3维重建的精度。在国际上,研究者基于特征点的3维重建方法,得到如IPC等点云配准算法,提高重建精度(Takimoto等,2016)。由于依靠有误差的像点匹配技术实现3维重建方法无法有效保证精度,造成表面不连续、不广泛情况出现。为了解决此技术带来问题,依靠偏振信息可以有效反演出精确法向量信息。

利用激光雷达获取地物3维分布特征,与偏振遥感的强光弱化弱光强化的信息增强特征相结合,可在农业、地质、空间探测等领域发挥作用。依据偏振遥感探测微弱目标的特性,结合空间态势感知系统和仿生技术,可以获得多角度成像的角度信息,预见测绘、摄影测量、偏振仿生新领域。将偏振遥感多角度本质与3维重构领域相结合,依靠精确的点云技术,开拓偏振遥感在摄影测量的新领域。

7 综述

本期“偏振遥感”专栏是首次系统介绍中国学者在偏振遥感领域的研究和应用成果,对偏振光遥感的物理原理进行分析,对高分辨率定量遥感的偏振光效应进行总体性阐述,对偏振遥感新领域进行了概述。

(1) 地物偏振光效应。侧重阐述地物偏振遥感与高分辨率定量遥感的地表偏振光效应的理论方法,提出地物偏振的5个规律:1)地物偏振光谱反射效应,为高分辨率地物遥感定量反演机理解释和模型修改奠定基础;2)地物偏振光多角度反射效应,由此得到水—土—岩—植被4大地物偏振光效应探测的系统化方法和规律;3)地物偏振光粗糙度、密度结构反射效应,为星月密度遥远探测和地表非接触式探测提供新手段;4)地表偏振光高信息—背景比反射效应,填补极强或极弱反照度特性无法探测的空白,为水体如海洋、雪的定量探测提供新手段,也对光学遥感植被反演模型提供高精度修正提供物理化学基础;5)地物偏振“强光弱化、弱光强化”辐射传输效应,为高精度遥感辐亮度(能量)探测提供月球观测基准,将现有的 10^{-3} 稳定度提高到 10^{-6} 以上即高分辨率影像3个字长的精度基准。

(2) 大气偏振光效应。基于地物偏振光效应克服后,高分辨率定量遥感的“大气窗口”偏振光效应凸显,成为定量遥感3个环节地表、大气、仪器误差之首,其不确定度可达到50%以上。为此获得大气偏振遥感的3个规律,形成大气偏振遥感理论和系统观测方法,可以实现高分辨率气溶胶刻画,为大气污染源、汇和扩散机理分析提供手段;实现海基、陆基观测,例如利用卫星影像实现对海洋上空的快速云检测。1)研究天空偏振光模式图效应,通过仿生偏振导航证明其客观有效性,实现无漂移自主导航 0.1° ;2)研究大气偏振中性区效应,即以太阳为中心的太阳同步轨道区域,其偏振光上下行效应抵销形成“中性点区域”,实验证明这个区间的偏振探测可实现地表反射最大化,由此形成遥感观测最小衰减的新“大气窗口”偏振光效应模型理论,通过大气偏振中性点区域航飞,实现高分辨率定量遥感地—气分离,大气段遥感探测精度成倍提高;3)将大气偏振中性点区域理论与天空偏振模式图理论结合,形成天空偏振矢量场效应理论,对大气粒子的精确刻画和大气分布实现地基—天基上下对偶观测立体层析,大气遥感定标不确定度提高到2%—4%。

(3) 仪器偏振光效应。着重介绍高分辨率定量遥感仪器偏振光效应与系统定标。高分辨率定量遥感的偏振光效应同样影响地球观测仪器平台的精度,因为仪器任何微小的光路变化或损耗直接

影响了光学强度和角度参数的变化,进而直接影响高分辨率遥感仪器的高精度性能实现。以成像仪器系统的红外偏振效应、全偏振参量效应、光谱偏振效应为例阐述其机理及应用,并对高精度偏振传感测量一体化方法和遥感光学载荷的高精度偏振定标测量方法进行了实际应用介绍。

(4) 交叉领域应用。高分辨率定量遥感的偏振光效应可以形成新的领域交叉。通过研究基于偏振探测的空天态势感知方法、偏振立体成像的摄影测量方法,实现领域交叉,扩展领域应用。同时,首次给出微波(主动)极化与光学(被动)偏振遥感的物理本质比较贯通与机理的异同,阐述两者数学物理关联本质,以及偏振激光雷达成像机理及激光集束和偏振分光关联关系,由此形成基于遥感偏振光效应的高分辨率地球观测的新领域、新方法、新手段。

参考文献(References)

- Alali S, Gribble A and Alex Vitkin I. 2016. Rapid wide-field Mueller matrix polarimetry imaging based on four photoelastic modulators with no moving parts. *Optics Letters*, 41(5): 1038–1041 [DOI: [10.1364/OL.41.001038](https://doi.org/10.1364/OL.41.001038)]
- Azzam R M A. 2016. Stokes-vector and Mueller-matrix polarimetry [Invited]. *Journal of the Optical Society of America A*, 33(7): 1396–1408 [DOI: [10.1364/JOSAA.33.001396](https://doi.org/10.1364/JOSAA.33.001396)]
- Bailey J, Cotton D V and Kedziora-Chudczer L. 2017. A high-precision polarimeter for small telescopes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 465(2): 1601–1607 [DOI: [10.1093/mnras/stw2886](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2886)]
- Berry M V, Dennis M R and Lee R L Jr. 2004. Polarization singularities in the clear sky. *New Journal of Physics*, 6: 162 [DOI: [10.1088/1367-2630/6/1/162](https://doi.org/10.1088/1367-2630/6/1/162)]
- Boesche E, Stammes P, Ruhtz T, Preusker R and Fischer J. 2006. Effect of aerosol microphysical properties on polarization of skylight: sensitivity study and measurements. *Applied Optics*, 45(34): 8790–8805 [DOI: [10.1364/AO.45.008790](https://doi.org/10.1364/AO.45.008790)]
- Bréon F M, Tanre D, Lecomte P and Herman M. 1995. Polarized reflectance of bare soils and vegetation: measurements and models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2): 487–499 [DOI: [10.1109/36.377949](https://doi.org/10.1109/36.377949)]
- Bréon F M, Tanre D and Generoso S. 2002. Aerosol effect on cloud droplet size monitored from satellite. *Science*, 295(5556): 834–838 [DOI: [10.1126/science.1066434](https://doi.org/10.1126/science.1066434)]
- Chen W, Yan L and Yang S Q. 2013. Multi-angular polarized characteristics of ocean aerosol. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 33(3): 600–607 (陈伟, 晏磊, 杨尚强. 2013. 海洋气溶胶多角度偏振辐射特性研究. *光谱学与光谱分析*, 33(3): 600–607) [DOI: [10.3964/j.issn.1000-0593\(2013\)03-0600-08](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2013)03-0600-08)]
- Chen X, Wang J, Liu Y, Xu X G, Cai Z N, Yang D X, Yan C X and Feng L. 2017. Angular dependence of aerosol information content in CAPI/TanSat observation over land: effect of polarization and synergy with A-train satellites. *Remote Sensing of Environment*, 196: 163–177 [DOI: [10.1016/j.rse.2017.05.007](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.007)]
- Cheng T, Gu X, Xie D, Li Z, Yu T and Chen H. 2012. Aerosol optical depth and fine-mode fraction retrieval over East Asia using multi-angular total and polarized remote sensing. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(3): 501–516 [DOI: [10.5194/amt-5-501-2012](https://doi.org/10.5194/amt-5-501-2012)]
- Cheng T H, Gu X F, Xie D H, Li Z Q, Yu T and Chen X F. 2011. Simultaneous retrieval of aerosol optical properties over the Pearl River Delta, China using multi-angular, multi-spectral, and polarized measurements. *Remote Sensing of Environment*, 115(7): 1643–1652 [DOI: [10.1016/j.rse.2011.02.020](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.020)]
- Chou C K, Guy A W and Galambos R. 1977. Characteristics of microwave-induced cochlear microphonics. *Radio Science*, 12(6S): 221–227 [DOI: [10.1029/RS012i06Sp00221](https://doi.org/10.1029/RS012i06Sp00221)]
- Costa P, Zolfagharnasab H, Monteiro J P, Cardoso J S and Oliveira H P. 2014. 3D reconstruction of body parts using RGB-D sensors: challenges from a biomedical perspective//5th International Conference on 3D Body Scanning Technologies. Lugano, Switzerland: [s.n.]: 378–389
- Cramer C E, Lykke K R, Woodward J T and Smith A W. 2013. Precise measurement of lunar spectral irradiance at visible wavelengths. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 118: 396–402 [DOI: [10.6028/jres.118.020](https://doi.org/10.6028/jres.118.020)]
- Cui Y, Cao N N, Chu J K, Zhao K C and Wang T C. 2009. Design of skylight polarization measurement system. *Optics and Precision Engineering*, 29(5): 1732–1738
- Cui Y, Gao Q S, Chu J K and Chen C. 2013. Influence of sunlight and moonlight on polarization patterns during twilight. *Optics and Precision Engineering*, 21(1): 34–39 (崔岩, 高启升, 褚金奎, 陈辰. 2013. 太阳光与月光对曙暮光偏振模式的影响. *光学精密工程*, 21(1): 34–39) [DOI: [10.3788/OPE.20132101.0034](https://doi.org/10.3788/OPE.20132101.0034)]
- Cui Y, Chen X L, Chu J K, Chen C, Li C M and Guan L. 2014. Study on polarization pattern of full moonlight in clear sky. *Acta Optica Sinica*, 34(10): 139–147 (崔岩, 陈小龙, 褚金奎, 陈辰, 李晨牧, 关乐. 2014. 晴朗天气下满月偏振模式的研究. *光学学报*, 34(10): 139–147)
- Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, Goloub P, Herman M, Lafrance B, Maignan F, Marchand A, Nadal F, Perry G and Tanré D. 2001. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-I polarized measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D5): 4913–4926 [DOI: [10.1029/2000JD900364](https://doi.org/10.1029/2000JD900364)]

- Di H G, Hua H B, Cui Y, Hua D X, He T Y, Wang Y F and Yan Q. 2017. Vertical distribution of optical and microphysical properties of smog aerosols measured by multi-wavelength polarization lidar in Xi'an, China. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 188: 28–38 [DOI: [10.1016/j.jqsrt.2016.05.027](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.05.027)]
- Diaz J C F, Carter W E, Shrestha R L and Glennie C L. 2013. *Lidar Remote Sensing*. New York: Springer [DOI: [10.1007/978-1-4419-7671-0_44](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7671-0_44)]
- Diner D J, Xu F, Martonchik J V, Rheingans B E, Geier S, Jovanovic V M, Davis A, Chipman R A and McClain S C. 2012. Exploration of a polarized surface bidirectional reflectance model using the ground-based multiangle SpectroPolarimetric imager. *Atmosphere*, 3(4): 591–619 [DOI: [10.3390/atmos3040591](https://doi.org/10.3390/atmos3040591)]
- Diner D J and Garay M J. 2017. Looking back, looking forward: scientific and technological advances in multiangle imaging of aerosols and clouds//*Radiation Processes in the Atmosphere & Ocean*. AIP Publishing LLC: 495–518 [DOI: [10.1063/1.4975497](https://doi.org/10.1063/1.4975497)]
- Duan M Z and Lyn D R. 2007. Simultaneously retrieving aerosol optical depth and surface albedo over land from POLDER's multi-angle polarized measurements I: theory and simulations. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 31(5): 757–765 (段民征, 吕达仁. 2007. 利用多角度POLDER偏振资料实现陆地上空大气气溶胶光学厚度和地表反照率的同时反演I. 理论与模拟. 大气科学, 31(5): 757–765) [DOI: [10.3878/j.issn.1006-9895.2007.05.01](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2007.05.01)]
- Emde C, Buras R, Mayer B and Blumthaler M. 2010. The impact of aerosols on polarized sky radiance: model development, validation, and applications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(2): 383–396 [DOI: [10.5194/acp-10-383-2010](https://doi.org/10.5194/acp-10-383-2010)]
- Evangelista C, Kraft P, Dacke M, Labhart T and Srinivasan M V. 2014. Honeybee navigation: critically examining the role of the polarization compass. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 396: 20130037 [DOI: [10.1098/rstb.2013.0037](https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0037)]
- Gao J, Fan Z G, Wei J M and Qian L L. 2009. Atmospheric polarization mode detection device and its detection method. China Patent, No. 200610040467.4 (高隽, 范之国, 魏靖敏, 钱乐乐. 2009. 大气偏振模式检测装置及其检测方法. 中国专利, 200610040467.4)
- Garcia-Caurel E, Lizana A, Ndong G, Al-Bugami B, Bernon C, Al-Qahtani E, Renguez F and de Martino A. 2015. Mid-infrared Mueller ellipsometer with pseudo-achromatic optical elements. *Applied Optics*, 54(10): 2776–2785 [DOI: [10.1364/AO.54.002776](https://doi.org/10.1364/AO.54.002776)]
- Ghalumyan A S and Ghazaryan V R. 2016. Development of atmospheric polarization LIDAR system//5th International TEPA Symposium: Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration. Armenia: 28–30
- Guan G X, Yan L, Chen J B, Wu T X and Wu B. 2011. Research on sky polarized light distribution. *Acta Armamentarii*, 32(4): 459–463 (关桂霞, 晏磊, 陈家斌, 吴太夏, 吴波. 2011. 天空偏振光分布的实验研究. 兵工学报, 32(4): 459–463)
- Huang X F, Bu Y and Wang X C. 2010. Skylight polarization patterns based on Mie theory for scattering. *Chinese Journal of Lasers*, 37(12): 3002–3006 (黄旭锋, 步扬, 王向朝. 2010. 基于米氏散射理论的太阳光散射偏振特性. 中国激光, 37(12): 3002–3006) [DOI: [10.3788/CJL20103712.3002](https://doi.org/10.3788/CJL20103712.3002)]
- Jiao J N. 2016. Study on polarimetric reflection filter characteristics of typical objects-taking vegetation and snow as an example. Beijing: Peking University (焦健楠. 2016. 典型地物的偏振反射滤波特征研究——以植被与雪为例. 北京: 北京大学)
- Kanellopoulos J D. 1985. Theoretical prediction of the operational characteristics of a double polarized microwave communication system. *Radio Science*, 20(2): 203–211 [DOI: [10.1029/RS020i002p00203](https://doi.org/10.1029/RS020i002p00203)]
- Kieffer H H and Stone T C. 2005. The spectral irradiance of the moon. *The Astronomical Journal*, 129(6): 2887–2901 [DOI: [10.1086/430185](https://doi.org/10.1086/430185)]
- Kirschfeld K. 1988. Navigation and compass orientation by insects according to the polarization pattern of the sky. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 43: 467–469
- Knyazikhin Y, Schull M A, Stenberg P, Mottus M, Rautiainen M, Yang Y, Marshak A, Latorre Carmona P, Kaufmann R K, Lewis P, Disney M I, Vanderbilt V, Davis A B, Baret F, Jacquemoud S, Lyapustin A and Myneni R B. 2013. Hyperspectral remote sensing of foliar nitrogen content. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(3): E185–E192 [DOI: [10.1073/pnas.1210196109](https://doi.org/10.1073/pnas.1210196109)]
- Kreuter A and Blumthaler M. 2013. Feasibility of polarized all-sky imaging for aerosol characterization. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(7): 1845–1854 [DOI: [10.5194/amt-6-1845-2013](https://doi.org/10.5194/amt-6-1845-2013)]
- Levy R C, Remer L A, Martins J V, Kaufman Y J, Plana-Fattori A, Redemann J and Wenny B. 2005. Evaluation of the MODIS aerosol retrievals over ocean and land during CLAMS. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(4): 974–992 [DOI: [10.1175/JAS3391.1](https://doi.org/10.1175/JAS3391.1)]
- Li L, Li Z, Li K, Blarel L and Wendisch M. 2014. A method to calculate Stokes parameters and angle of polarization of skylight from polarized CIMEL sun/sky radiometers. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 149: 334–346 [DOI: [10.1016/j.jqsrt.2014.09.003](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.09.003)]
- Li Y B, Zhang P, Zeng Y X, Yang J Y, Zhou Q, Jiang X Q and Wang M H. 2010. Remote sensing measurement by full-Stokes-vector based on opto-electronic modulator. *Infrared and Laser Engineering*, 39(2): 335–338 (李宇波, 张鹏, 曾宇晓, 杨建义, 周强, 江晓清, 王明华. 2010. 基于电光调制器的全Stokes矢量的遥感测量. 红外与激光工程, 39(2): 335–338)
- Lin J C, Meltzer R J and Redding F K. 2016. Comparison of measured and predicted characteristics of microwave-induced sound. *Radio Science*, 17(5S): 159S–163S [DOI: [10.1029/RS017i05Sp0159S](https://doi.org/10.1029/RS017i05Sp0159S)]

- Litvinov P, Hasekamp O and Cairns B. 2011. Models for surface reflection of radiance and polarized radiance: comparison with airborne multi-angle photopolarimetric measurements and implications for modeling top-of-atmosphere measurements. *Remote Sensing of Environment*, 115(2): 781–792 [DOI: [10.1016/j.rse.2010.11.005](#)]
- Liu S Y, Chen X G and Zhang C W. 2015. Development of a broadband Mueller matrix ellipsometer as a powerful tool for nanostructure metrology. *Thin Solid Films*, 584: 176–185 [DOI: [10.1016/j.tsf.2015.02.006](#)]
- Lyu Y F and Sun Z Q. 2014. The reflectance and negative polarization of light scattered from snow surfaces with different grain size in backward direction. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 133: 472–481 [DOI: [10.1016/j.jqsrt.2013.09.010](#)]
- Maignan F, Bréon F M, Fédèle E and Bouvier M. 2009. Polarized reflectances of natural surfaces: spaceborne measurements and analytical modeling. *Remote Sensing of Environment*, 113(12): 2642–2650 [DOI: [10.1016/j.rse.2009.07.022](#)]
- Nadal F and Bréon F M. 1999. Parameterization of surface polarized reflectance derived from POLDER spaceborne measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3): 1709–1718 [DOI: [10.1109/36.763292](#)]
- Ollinger S V, Richardson A D, Martin M E, Hollinger D Y, Frolking S E, Reich P B, Plourde L C, Katul G G, Munger J W, Oren R, Smith M-L, Paw U K T, Bolstad P V, Cook B D, Day M C, Martin T A, Monson R K and Schmid H P. 2008. Canopy nitrogen, carbon assimilation, and albedo in temperate and boreal forests: functional relations and potential climate feedbacks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(49): 19336–19341 [DOI: [10.1073/pnas.0810021105](#)]
- Pan Y B, Lyn D R, Pan W L and Wang Y N. 2015. A case study of cirrus cloud over Geermu city using two-wavelength polarization lidar. *Climatic and Environmental Research*, 20(5): 581–588 (潘昱冰, 吕达仁, 潘蔚琳, 王一楠. 2015. 地基双波长偏振激光雷达对格尔木地区卷云观测的个例研究. *气候与环境研究*, 20(5): 581–588) [DOI: [10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15031](#)]
- Peltoniemi J I, Gritsevich M and Puttonen E. 2015. Reflectance and polarization characteristics of various vegetation types//*Light Scattering Reviews 9*. Berlin Heidelberg: Springer: 257–294 [DOI: [10.1007/978-3-642-37985-7_7](#)]
- Pomozi I, Horváth G and Wehner R. 2001. How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: full-sky measurements and implications for animal orientation. *Journal of Experimental Biology*, 204(17): 2933–2942 [DOI: [10.5167/uzh-688](#)]
- Preece B, Hodgkin V A, Thompson R, Leonard K and Krapels K. 2014. Predicted NETD performance of a polarized infrared imaging sensor//*Proceedings Volume 9071, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXV*. Baltimore, Maryland, United States: SPIE [DOI: [10.1117/12.2052960](#)]
- Pust N J and Shaw J A. 2008. Digital all-sky polarization imaging of partly cloudy skies. *Applied Optics*, 47(34): H190–H198 [DOI: [10.1364/AO.47.00H190](#)]
- Pust N J and Shaw J A. 2012. Wavelength dependence of the degree of polarization in cloud-free skies: simulations of real environments. *Optics Express*, 20(14): 15559–15568 [DOI: [10.1364/OE.20.015559](#)]
- Qian H H, Meng B H, Yuan Y L, Hong J, Zhang M M, Li S and Qiu Z W. 2017. Full field of view polarization effect measurement and error analysis of non-polarized channels of spaceborne directional polarimetric camera. *Acta Physica Sinica*, 66(10): 100701 (钱鸿鹄, 孟炳寰, 袁银麟, 洪津, 张苗苗, 李双, 裴桢伟. 2017. 星载多角度偏振成像仪非偏通道全视场偏振效应测量及误差分析. *物理学报*, 66(10): 100701) [DOI: [10.7498/aps.66.100701](#)]
- Rondeaux G and Herman M. 1991. Polarization of light reflected by crop canopies. *Remote Sensing of Environment*, 38(1): 63–75 [DOI: [10.1016/0034-4257\(91\)90072-E](#)]
- Sarkar M and Theuwissen A J P. 2014. Integrated polarization analyzing CMOS image sensors for detection and signal processing//*Smart Sensors and MEMS*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited: 124–202
- Sarkar M, Bello D S S, Van Hoof C and Theuwissen A. 2010. Integrated polarization analyzing CMOS Image sensor for autonomous navigation using polarized light//2010 5th IEEE International Conference Intelligent Systems. London: IEEE: 224–229 [DOI: [10.1109/IS.2010.5548344](#)]
- Seifert P, Kunz C, Baars H, Ansmann A, Bühl J, Senf F, Engelmann R, Althausen D and Artaxo P. 2015. Seasonal variability of heterogeneous ice formation in stratiform clouds over the Amazon Basin. *Geophysical Research Letters*, 42(13): 5587–5593 [DOI: [10.1002/2015GL064068](#)]
- Shibata S, Hayasaki Y, Otani Y, Yatagai T and Bellouard Y. 2015. High precision stokes polarimetry for scattering light using wide dynamic range intensity detector. *MATEC Web of Conferences*, 32: 05005 [DOI: [10.1051/mateconf/20153205005](#)]
- Smith G S. 2007. The polarization of skylight: an example from nature. *American Journal of Physics*, 75(1): 25–35 [DOI: [10.1119/1.2360991](#)]
- Strutt H J W. 1871. XV. On the light from the sky, its polarization and colour. *Philosophical Magazine*, 41(271): 107–120
- Sun J, Gao J, Huai Y, Bi R and Fan Z G. 2016. Real-time measurement system for the pattern of all skylight polarization. *Opto-Electronic Engineering*, 43(9): 45–50 (孙洁, 高隼, 怀宇, 毕冉, 范之国. 2016. 全天域大气偏振模式的实时测量系统. *光电工程*, 43(9): 45–50) [DOI: [10.3969/j.issn.1003-501X.2016.09.008](#)]
- Sun X and Zhao X J. 2009. Retrieval algorithm for optical parameters of aerosol using polarized remote sensing. *Journal of Beijing Uni-*

- versity of Aeronautics and Astronautics, 35(8): 1027–1030 (孙夏, 赵慧洁. 2009. 气溶胶光学特性偏振遥感反演算法. 北京航空航天大学学报, 35(8): 1027–1030)
- Sun X B, Qiao Y L and Hong J. 2010. Review of polarization remote sensing techniques and applications in the visible and infrared. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 5(3): 175–189 (孙晓兵, 乔延利, 洪津. 2010. 可见和红外偏振遥感技术研究进展及相关应用综述. 大气与环境光学学报, 5(3): 175–189)
- Sun Z Q, Huang Y H, Bao Y L and Wu D. 2017a. Polarized remote sensing: a note on the stokes parameters measurements from natural and man-made targets using a spectrometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(7): 4008–4021 [DOI: [10.1109/TGRS.2017.2686485](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2686485)]
- Sun Z Q, Wu D, Lv Y F and Zhao Y S. 2017b. Polarized reflectance factors of vegetation covers from laboratory and field: A comparison with modeled results. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(2): 1042–1065 [DOI: [10.1002/2016JD025892](https://doi.org/10.1002/2016JD025892)]
- Sun Z Q and Zhao Y S. 2011. The effects of grain size on bidirectional polarized reflectance factor measurements of snow. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 112(14): 2372–2383 [DOI: [10.1016/j.jqsrt.2011.05.011](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2011.05.011)]
- Sun Z Q, Zhang J Q, Tong Z J and Zhao Y S. 2014. Particle size effects on the reflectance and negative polarization of light backscattered from natural surface particulate medium: soil and sand. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 133: 1–12 [DOI: [10.1016/j.jqsrt.2013.03.013](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.03.013)]
- Suomalainen J, Hakala T, Puttonen E and Peltoniemi J. 2009. Polarised bidirectional reflectance factor measurements from vegetated land surfaces. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 110(12): 1044–1056 [DOI: [10.1016/j.jqsrt.2009.02.017](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2009.02.017)]
- Swindle R and Kuhn J R. 2015. Haleakalā sky polarization: full-sky observations and modeling. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 127(956): 1061–1076 [DOI: [10.1086/683177](https://doi.org/10.1086/683177)]
- Száz D, Farkas A, Barta A, Kretzer B, Egri Á and Horváth G. 2016. North error estimation based on solar elevation errors in the third step of sky-polarimetric Viking navigation. *Proceedings of the Royal Society A*, 472(2191): 20160 [DOI: [10.1098/rspa.2016.0171171](https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0171171)]
- Takimoto R Y, Tsuzuk M D S G, Vogelaa R, Martins T D C, Sato A K, Iwao Y, Gotoh T and Kagei S. 2016. 3D reconstruction and multiple point cloud registration using a low precision RGB-D sensor. *Mechatronics*, 35: 11–22 [DOI: [10.1016/j.mechatronics.2015.10.014](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.10.014)]
- Tang J, Zhang N, Li D L, Wang F, Zhang B Z, Wang C G, Shen C, Ren J B, Xue C Y and Liu J. 2016. Novel robust skylight compass method based on full-sky polarization imaging under harsh conditions. *Optics Express*, 24(14): 15834–15844 [DOI: [10.1364/OE.24.015834](https://doi.org/10.1364/OE.24.015834)]
- Tu X Z and Pau S. 2016. Optimized design of N optical filters for color and polarization imaging. *Optics Express*, 24(3): 3011–3024 [DOI: [10.1364/OE.24.003011](https://doi.org/10.1364/OE.24.003011)]
- Vanderbilt V C and Grant L. 1985. Plant canopy specular reflectance model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23(5): 722–730 [DOI: [10.1109/TGRS.1985.289390](https://doi.org/10.1109/TGRS.1985.289390)]
- Vanderbilt V C, Grant L and Ustin S L. 1991. Polarization of light by vegetation//*Photon-Vegetation Interactions*. Berlin, Heidelberg: Springer: 191–228 [DOI: [10.1007/978-3-642-75389-3_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-75389-3_7)]
- Wallace J. 2012. POLARIZATION: Sky conditions for Viking polarization navigation are under test. *Laser Focus World*, S48(1), 20
- Wang Q C, Shi J M, Wang J C, Zhao D P and Liu Y. 2017. Design and characterization of an AOTF hyper-spectral polarization imaging system. *Journal of Modern Optics*, 64(1): 1–7 [DOI: [10.1080/09500340.2016.1200682](https://doi.org/10.1080/09500340.2016.1200682)]
- Wang X Q. 2017. Study on polarization reflectance of polarization based on POLDER data. Beijing: Peking University (王雪琪. 2017. 基于POLDER数据的地物偏振反射率研究. 北京: 北京大学)
- Waquet F, Léon J F, Cairns B, Goloub P, Deuzé J L and Auriol F. 2009. Analysis of the spectral and angular response of the vegetated surface polarization for the purpose of aerosol remote sensing over land. *Applied Optics*, 48(6): 1228–1236 [DOI: [10.1364/AO.48.001228](https://doi.org/10.1364/AO.48.001228)]
- Wu T X, Zhang L F, Cen Y, Huang C P, Zhao H Q and Sun X J. 2013. Neutral point consideration for atmosphere correction in polarization remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 17(2): 241–247 (吴太夏, 张立福, 岑奕, 黄长平, 赵恒谦, 孙雪剑. 2013. 偏振遥感的中性点大气纠正方法研究. 遥感学报, 17(2): 241–247)
- Xiang Y. 2010. Study on multi-angle polarized spectral measurement of rock and its influence on correlative characteristics. Beijing: Peking University (相云. 2010. 岩石多角度偏振光谱测量及相关特性影响初探. 北京: 北京大学)
- Xie D H, Cheng T H, Zhang W, Yu J, Li X J and Gong H L. 2013. Aerosol type over east Asian retrieval using total and polarized remote Sensing. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 129: 15–30 [DOI: [10.1016/j.jqsrt.2013.05.028](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.05.028)]
- Xie D H, Cheng T H, Wu Y, Fu H, Zhong R F and Yu J. 2017. Polarized reflectances of urban areas: analysis and models. *Remote Sensing of Environment*, 193: 29–37 [DOI: [10.1016/j.rse.2017.02.026](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.02.026)]
- Xie D H, Gu X F, Cheng T H, Yu T, Li Z Q, Chen X F, Chen H and Guo J. 2012. Research on the bidirectional reflectance of typical urban surface types measured by the directional polarimetric camera. *Acta Physica Sinica*, 61(7): 452–458 (谢东海, 顾行发, 程天海, 余涛, 李正强, 陈兴峰, 陈好, 郭婧. 2012. 基于多角度偏振相机的城市典型地物双向反射特性研究. 物理学报, 61(7): 452–458)

- Yan L, Chen W, Yang B, Xiang Y and Zhao Y S. 2014. Polarized remote sensing physics. Beijing: Science Press: 12 (晏磊, 陈伟, 杨彬, 相云, 赵云升. 2014. 偏振遥感物理. 北京: 科学出版社: 12)
- Yan L, Guan G X, Chen J B, Wu T X and Shao X. 2009. The bionic orientation mechanism in the skylight polarization pattern. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 45(4): 616–620 (晏磊, 关桂霞, 陈家斌, 吴太夏, 邵轩. 2009. 基于天空偏振光分布模式的仿生导航定向机理初探. 北京大学学报(自然科学版), 45(4): 616–620)
- Yang B, Knyazikhin Y, Lin Y, Yan K, Chen C, Park T, Choi S, Möttus M, Rautiainen M, Myneni R B and Yan L. 2016. Analyses of impact of needle surface properties on estimation of needle absorption spectrum: case study with coniferous needle and shoot samples. *Remote Sensing*, 8(7): 563 [DOI: [10.3390/rs8070563](https://doi.org/10.3390/rs8070563)]
- Yang B, Yan C X, Zhang J Q and Ju X P. 2017. Polarization calibration of multi-channel polarimetric imager. *Optics and Precision Engineering*, 25(5): 1126–1134 (杨斌, 颜昌翔, 张军强, 鞠学平. 2017. 多通道型偏振成像仪的偏振定标. 光学精密工程, 25(5): 1126–1134) [DOI: [10.3788/OPE.20172505.1126](https://doi.org/10.3788/OPE.20172505.1126)]
- Yang B, Zhao H M and Chen W. 2017. Semi-empirical models for polarized reflectance of land surfaces: intercomparison using spaceborne POLDER measurements. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 202: 13–20 [DOI: [10.1016/j.jqsrt.2017.07.014](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.07.014)]
- Yang W F, Hong J and Qiao Y L. 2015. Optical design of spaceborne directional polarization camera. *Acta Optica Sinica*, 35(8): 822005 (杨伟锋, 洪津, 乔延利. 2015. 星载多角度偏振成像仪光学系统设计. 光学学报, 35(8): 822005)
- Yu C J, Hung C H, Hsu K C and Chou C. 2015. Phase-shift imaging ellipsometer for measuring thin-film thickness. *Microelectronics Reliability*, 55(2): 352–357 [DOI: [10.1016/j.microrel.2014.10.014](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2014.10.014)]
- Zeng D X and Li Z. 2015. Frontier issues of space situational awareness. *Journal of Equipment Academy*(4): 71–76 (曾德贤, 李智. 2015. 太空态势感知前沿问题研究. 装备学院学报(4): 71–76)
- Zhang J Q, Shao J B and Yan C X. 2014. Cloud and aerosol polarimetric imager//Proceedings Volume 9142, Selected Papers from Conferences of the Photoelectronic Technology Committee of the Chinese Society of Astronautics: Optical Imaging, Remote Sensing, and Laser-Matter Interaction 2013. Suzhou, China: SPIE [DOI: [10.1117/12.2054572](https://doi.org/10.1117/12.2054572)]
- Zhang J Q, Xue C, Gao Z L and Yan C X. 2015. Optical remote sensor for cloud and aerosol from space: past, present and future. *Chinese Optics*, 8(5): 679–698 (张军强, 薛闯, 高志良, 颜昌翔. 2015. 云与气溶胶光学遥感仪器发展现状及趋势. 中国光学, 8(5): 679–698)
- Zhang W J, Cao Y, Zhang X Z and Liu Z J. 2015. Sky light polarization detection with linear polarizer triplet in light field camera inspired by insect vision. *Applied Optics*, 54(30): 8962–8970 [DOI: [10.1364/AO.54.008962](https://doi.org/10.1364/AO.54.008962)]
- Zhang Y, Li Z Q, Qie L L, Zhang Y, Liu Z H, Chen X F, Hou W Z, Li K T, Li D H and Xu H. 2016a. Retrieval of aerosol fine-mode fraction from intensity and polarization measurements by PARASOL over East Asia. *Remote Sensing*, 8(5): 417 [DOI: [10.3390/rs8050417](https://doi.org/10.3390/rs8050417)]
- Zhang Y, Shi Z G, Chen X T and Song S L. 2016b. The analysis of long-wave infrared polarization signal of typical material targets//Proceedings Volume 9970, Optics and Photonics for Information Processing X. San Diego, California, United States: SPIE [DOI: [10.1117/12.2239318](https://doi.org/10.1117/12.2239318)]
- Zhao H, Yan L and Zhao Y S. 2004a. Multi-angle polarized reflectance spectrum of peridotite. *Geology and Exploration*, 40(2): 51–54 (赵虎, 晏磊, 赵云升. 2004a. 橄榄岩的多角度偏振反射光谱研究. 地质与勘探, 40(2): 51–54)
- Zhao H, Yan L and Zhao Y S. 2004b. Study on multi-angle polarized reflectance spectrum of granite. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(2): 9–13 (赵虎, 晏磊, 赵云升. 2004b. 花岗岩的多角度偏振反射光谱研究. 矿物岩石, 24(2): 9–13)
- Zhao H J and Xu W J. 2016. A bionic polarization navigation sensor and its calibration method. *Sensors*, 16(8): 1223 [DOI: [10.3390/s16081223](https://doi.org/10.3390/s16081223)]
- Zhao K C, Lu H and You Z. 2013. Automatic detection system for skylight polarized pattern. *Optics and Precision Engineering*, 21(2): 239–245 (赵开春, 卢皓, 尤政. 2013. 天空光偏振模式自动探测装置. 光学精密工程, 21(2): 239–245) [DOI: [10.3788/OPE.20132102.0239](https://doi.org/10.3788/OPE.20132102.0239)]
- Zhao Y Q, Peng Q N, Yi C and Kong S G. 2016. Multiband polarization imaging. *Journal of Sensors*, 2016: Article ID 5985673 [DOI: [10.1155/2016/5985673](https://doi.org/10.1155/2016/5985673)]
- Azzam R M A and Bashara N M. 1977. *Ellipsometry and Polarized Light*. North-Holland: Elsevier Science Publishing Co., Inc.
- Bass M and Mahajan V N. 2010. *Handbook of Optics* (3rd edition): Vol. 1, Chapters 15 and 16. New York: McGraw-Hill.
- Gil J J and Ossikovski R. 2016. *Polarized Light and the Mueller Matrix Approach*. CRC Press.
- Liao Y B. 2003. *Polarized Light*. Beijing: Science Press. (廖延彪. 2003. 偏振光学. 北京: 科学出版社.)

Optical polarized effects for high-resolution quantitative remote sensing and new polarization remote sensing fields

YAN Lei¹, GU Xingfa², CHU Junhao³, YOU Zheng⁴, LIU Shiyuan⁵, HUGH Motimor⁶, V. Chandrasekar⁷

1. Beijing Key Laboratory of Spatial Information Integration and 3S Application, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

4. Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

5. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

6. Rutherford Appleton Laboratory Space, Science and Technologies Facilities Council, Harwell Oxford, United Kingdom, OX110QX;

7. Colorado State University, Fort Collins, Colorado 80523

Abstract: The optical multi-scale effect proposed by Academician Li Xiaowen in the last century has become an important cornerstone of quantitative remote sensing. The high-resolution optical polarization effect is gradually highlighted and directly determines or affects the high-resolution observation system, that is, implementation of quantitative remote sensing effect and quality assurance, given the development of the aerospace high-resolution observation in this century, namely, quantitative remote sensing, after effectively solving the optical multi-scale effect. For example, Chinese scholars found that the vegetation canopy has an extremely weak scattering reflection polarization effect when its model error of 136% is not deducted. Atmospheric attenuation is the atmospheric polarization effect and is the largest error source of remote sensing inversion; the error reaches 5%—30%. Polarization means deducting the atmospheric error can reduce the error by more than half. Observation instrument subtracts multiple scattered transmission polarized light, thereby attaining 5 nm resolution and 0.1—0.3 nm hyperspectral scalability, through polarization-enhanced light noise separation of the central wavelength offset and bandwidth degradation of the root causes of error. The system can achieve 10^{-8} spherical radiance benchmark observation for remote sensing radiance calibration uncertainty from 7% to 1%—2% across the provision of possibility given the polarization of “strong light weakening, weak light enhancement”.

Key words: quantitative remote sensing, polarization effect, surface polarization, atmospheric polarization, polarization instrument, new method of polarization observation

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 49771057, 40572167, 40671135, 40771153, 61174220, 41101328, 60971086, 60808035); Beijing Municipal Natural Science Foundation(No. 1093016)