

光在不同浓度介质中散射传输的偏振特性分析

徐敬一,高 隽,张阳阳,范之国

(合肥工业大学计算机与信息学院,安徽合肥 230009)

摘 要: 文中以典型偏振蒙特卡罗模型为基础,引入了一种介质浓度系数的表征方法,设计实现了一个光在不同浓度介质中散射传输的三维仿真系统,分析了引入浓度系数方法的可行性,并讨论了光在不同浓度介质中散射传输的偏振特性影响.仿真实验结果表明,文中方法实现了散射介质浓度的表征.散射介质浓度对斯托克斯矢量各分量强度和偏振度有着直接影响;斯托克斯矢量各分量的强度随散射介质浓度增加呈近似指数衰减;光在散射介质中传输后,偏振度随浓度系数变化总体趋势呈“倒N”型.

关键词: 散射;偏振特性;蒙特卡罗;浓度系数

中图分类号: O436.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)08-1604-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.08.020

A Study on Polarization Properties for Light Scattering and Transmission in Different-Concentration Media

XU Jing-yi, GAO Jun, ZHANG Yang-yang, FAN Zhi-guo

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: Based on typical polarization Monte Carlo model, this paper proposed a media concentration coefficient representation, and developed a 3D simulation system of the light scattering transmission in the different concentration media. The feasibility of the concentration coefficient, and the polarization properties of light scattering and transmission in the different concentration media are further analyzed. Simulation experimental results showed that, the proposed method can be used to represent the scattering media concentration coefficient in the typical polarization Monte Carlo model. Scattering media concentration directly affects the intensity of each component of the Stokes vector and degree of polarization. Each component intensity of Stokes vector is approximate to the exponential decay as the media concentration increases. Polarization degree is “inverted N” as the concentration coefficient increases during the light transmission in the scattering media.

Key words: scattering; polarization properties; Monte Carlo; concentration coefficient

1 引言

当光在不同浓度介质中传输时,由于传输过程中散射事件的发生,会导致一系列偏振特性的变化,利用这一特性能够有效地分析散射介质的内部特征,进而获取目标参数等信息.例如,在医用光学领域,根据不同浓度葡萄糖的光学旋转角度不同,可以利用偏振角度调制测量血糖浓度^[1];利用不同散射体浓度下偏振态的差异,能有效提高光学成像分辨率^[2];此外,光在介质中散射传输时偏振特性的变化在大气气溶胶,去雾,有害物质检测,目标识别,遥感探测等领域都有重要的应用价值^[3~10].

目前,光在不同浓度介质中的散射传输过程这一方面的研究主要是通过实验测量来实现的,缺乏通过模型仿真手段模拟光在不同浓度介质中的散射传输过程.以往有研究人员根据矢量传输理论数值求解的方式研究粒子浓度对散射光偏振度的影响^[11],但是矢量传输理论计算复杂且解析困难.目前解决光线在大气中的辐射传输问题比较有效的方法是蒙特卡罗方法,其能较方便地应用到实际计算中.Wilson和Adam首次将蒙特卡罗思想引入激光同组织相互作用的方面^[12],随后,蒙特卡罗模拟方法就被广泛地应用到光在组织中的传输模拟.Wang和Jacques等人在处理多层散射介质中光的散射

与吸收方面做了大量的工作^[13],其 MCML 算法的源代码已成为蒙特卡罗仿真的标准. Sebastian Bartel 应用斯托克斯-穆勒形式模拟了偏振光在半无限介质中的传输,将蒙特卡罗模拟方法的应用扩展到了偏振领域^[14]. Jessica 总结并给出了半无限介质中的偏振光传输的三种蒙特卡罗模拟方法^[15],但是,偏振蒙特卡罗模型中并未涉及直接表征散射介质浓度(文中介质浓度均指单位体积粒子数)的变量,本文根据偏振蒙特卡罗模型中的子午面模型提出了一种介质浓度的表征方法,为分析介质浓度对散射及其偏振特性的影响关系提供了新的模拟仿真方法.通过本文研究,对后续浑浊介质中的目标探测的理论研究与实际检测具有指导性意义.

本文通过分析介质浓度与散射步长的影响关系,在偏振蒙特卡罗模型中引入浓度系数表征的方法;并设计实现了光散射传输的三维仿真系统.根据仿真结果,给出了介质浓度和传输距离的正相关对应关系,对这种引入浓度系数的方式进行了进一步验证说明,最后根据模拟系统分析了介质浓度对光的散射传输过程中偏振度的影响.

2 偏振蒙特卡罗模型中散射介质浓度的表征

在介质运动平衡状态下,由于光子散射碰撞运动的随机性,一个光子在任意连续两次散射碰撞之间所运动的距离是不同的.一定条件下,一个光子在任意连续两次散射碰撞之间可能通过的各段运动距离的平均值,称为平均散射步长 $\bar{\lambda}$.

假设光子以平均相对速率 \bar{v} 在单一介质中运动,介质中粒子静止且均匀分布,跟踪该光子,计算在一段时间 Δt 内与其相碰的粒子数.如图 1 所示,以该光子的运动轨迹为轴,以光子有效碰撞直径 d 为半径,作曲折圆柱体,则凡质心在该圆柱体内的粒子都将与该光子相碰. Δt 内介质中粒子与该光子的平均散射碰撞的次数等于圆柱体体积中的粒子数.为便于处理计算,本文将曲折圆柱体理想化为直线圆柱体.

设圆柱体的截面积为 σ ,即光子的碰撞截面, $\sigma = \pi d^2$.在 Δt 内,光子所运动的距离为 $\bar{v}\Delta t$,相应圆柱体体积为 $\sigma\bar{v}\Delta t$,设介质单位体积粒子数为 n ,则中心在此圆

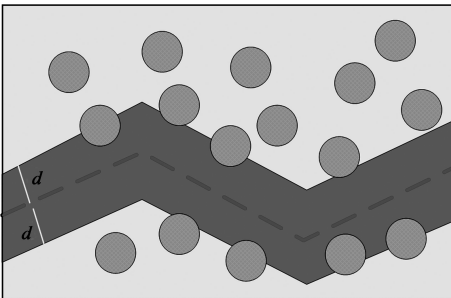


图1 光子散射碰撞示意图

柱体内的粒子总数,亦即在 Δt 时间内与光子散射碰撞的粒子数为 $n\sigma\bar{v}\Delta t$.

故平均碰撞频率为:

$$\bar{Z} = \frac{n\sigma\bar{v}\Delta t}{\Delta t} = n\sigma\bar{v} \quad (1)$$

光子的平均散射步长为:

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{v}}{\bar{Z}} = \frac{1}{n\sigma} = \frac{1}{\pi d^2 n} \quad (2)$$

不难看出,平均散射步长 $\bar{\lambda}$ 与单位体积粒子数 n 是呈反比的.用 Δs 表征光子在连续两次散射碰撞之间的运动距离,即散射步长;用一无量纲系数 C 来表征单位体积粒子数 n 的大小,系数 C 即为散射介质浓度系数,则有:

$$\begin{cases} \bar{\lambda} \propto \frac{1}{n} \\ \Delta s \propto \frac{1}{C} \end{cases} \quad (3)$$

由以上分析知,光子散射步长 Δs 与系数 C 是呈反比的,根据 Jessica 总结的偏振蒙特卡罗子午面模型^[15],光子连续两次散射碰撞之间的运动距离,即散射步长 Δs ,为:

$$\Delta s = -\frac{\ln(\zeta)}{u_i} \quad (4)$$

ζ 是随机生成的 $(0, 1]$ 之间的数,其中 $u_i = u_a + u_s$ (u_a 为吸收系数, u_s 为散射系数), Δs 是一个 0 到正无穷的随机数.

散射系数 u_s 中已隐含介质单位体积内的粒子数,为了保证后续仿真实验结果的一致性,即介质层厚度与接收器的宽度的比例要使接收器接收光子的前向散射的主要角度范围不变,且在浓度改变时介质层厚度保持不变,不适宜直接改变介质浓度.由上所述,采用改变光子散射步长 Δs 来表征介质浓度的大小,两者成反比,则式(4)修改为:

$$\Delta s = -\frac{\ln(\zeta)}{u_i * C} \quad (5)$$

在统计趋势上,系数 C 越大,散射步长 Δs 越小,介质浓度越大.系数 C 是一无量纲系数并没有实际物理单位,只是表征介质浓度的大小,介质浓度系数 C 的数值与介质浓度的实际大小呈正相关关系.即介质浓度系数 C 的增减可以等效为实际介质浓度的增减.

3 可变介质浓度的偏振蒙特卡罗模型

偏振蒙特卡罗模型中粒子运动示意图如图 2 所示,其描述的是光子在半无限单一介质层中的散射传输过程,并用一定数量的光子依次循环来模拟现实光束散射的效果.其中,光子散射过程是基于米氏散射理论的^[8,9].

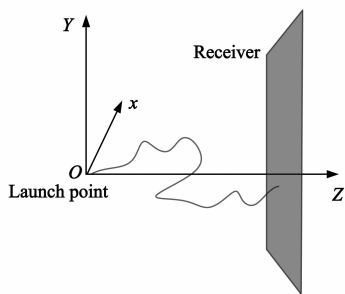


图2 偏振蒙特卡罗模型中粒子运动示意图

光子用斯托克斯矢量 $[I, Q, U, V]$ 来描述. 由于斯托克斯矢量具有可加性, 斯托克斯矢量非常适合对光线的分析工作. 其偏振度可表示为: $P = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2} / I$. 显然, 四个斯托克斯参数给定后, 光束的强度及偏振状态就完全确定了.

散射介质层可以看作是一个无限大但厚度有限的面板, 在本文中厚度取 $14/u_s$ (u_s 为散射系数), 介质层中为同一介质. 如图 2 所示, 沿着 Z 轴正方向从 $Z = 0$ (即 X - Y 面) 到 $Z = 14/u_s$ 面为介质层, 可以认为在发射点 O 有一个光子发射器, 沿 Z 轴正方向发射光子, 在 $Z = 14/u_s$ 面上放置一个正方形接收器 (图中灰色区域所示), 本文中接收器的边长取 $14/u_s$, 即接收范围为 $(-7/u_s < x < 7/u_s, -7/u_s < y < 7/u_s)$. 为了更真实的反应一束光穿过介质层之后偏振态的变化情况, 在本文中, 如果没有特殊说明, 取 1×10^6 个光子连续发射. 接收器取 100×100 个方格点采样接收.

蒙特卡罗方法的算法框图如图 3 所示, 其中浅灰色

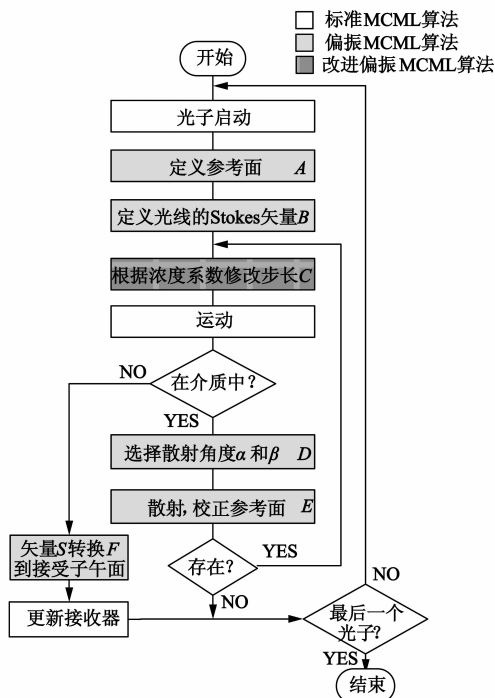


图3 蒙特卡罗算法流程图

步骤只有在偏振蒙特卡罗模型^[15]中需要. 深灰色步骤为改进的偏振蒙特卡罗算法中新增的, 引入了浓度系数, 用来分析散射介质浓度对散射传输过程的影响.

下面对蒙特卡罗随机算法的关键步骤做简要解释 (其中除步骤 3 外的其他步骤可参考 Jessica 总结的偏振蒙特卡罗子午面模型^[15]):

步骤 1 初始参考平面为 X - Z 平面.

步骤 2 启动时刻光的 E 矢量是在 X - Z 平面内定义的.

步骤 3 如式 (5) 所示, 通过修改光子运动距离来表征介质浓度的大小.

步骤 4 根据已知的散射物质和拒绝方法的相位函数, 随机确定角度 α (散射角, 即入射光线与出射光线的夹角) 和角度 β (旋转到散射平面的角, 即入射平面和散射平面夹角). 这是和偏振信息计算相关的蒙特卡罗算法的一个基本问题.

步骤 5 根据散射参数确定穆勒矩阵计算出射光. 在散射前, 要确定光束是以入射面为参考子午面, 在散射时, 将光束旋转到以散射面为参考子午面, 在散射后, 将光束旋转到以出射面为参考子午面. 这样在下一次散射时, 上一次的出射面就是当前的入射面, 且此时就是以入射面为参考子午面的. 依此循环直至粒子散射出介质层.

步骤 6 在光子散射出介质层后, 若没有打在接收器上 (即向后散射), 不予考虑; 若打在接收器上, 将光子旋转到以接收器所在面为参考子午面, 进行累计直至所有光子散射完.

此外, 当光子的权重低于设定的阈值时, 光子运动终止.

按照上述过程改进后的蒙特卡罗方法, 利用 VC 和 OpenGL 工具设计实现了三维仿真系统, 可以快速直观的在三维空间中查看光子在介质中的传输过程和接收器的光子累积过程.

4 介质浓度在光的散射传输过程中的偏振影响分析

4.1 介质浓度对散射光强的影响分析

光在介质中散射传输后, 由于粒子散射吸收, 能量会有所减弱, 且对于不同介质浓度系数, 散射次数也不尽相同故而减弱程度也有所区别. 为了详细的分析说明不同偏振状态入射光的斯托克斯矢量 $[I, Q, U, V]$ 与散射介质浓度之间的影响关系, 利用上述仿真系统进行模拟.

文中仿真过程涉及参数皆为: 光线波长为 0.6328 微米; 粒子半径 1 微米; 介质层中为同一种粒子, 粒子复折射系数为 $1.59 - 0.01i$; 权重阈值为 0. 本文仅为分析

改进模型后介质浓度对偏振特性的影响情况,上述参数选择符合一般实际情况即可,读者可根据实际需求选择其它参数.

仿真入射光分别为自然光(a) $[1,0,0,0]$,横向线偏振光(b) $[1,1,0,0]$,45度线偏振光(c) $[1,0,1,0]$,圆偏振光(d) $[1,0,0,1]$ 时,计算接收面上所有光子 $[I, Q, U, V]$ 的平均值.如图4所示,为随浓度系数增大的光子强度均值曲线,浓度系数以0.2为步进,从0.1递增到4.0.

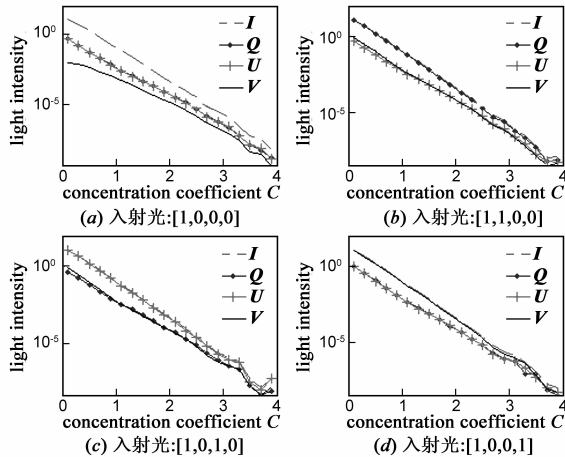


图4 $[I, Q, U, V]$ 随介质浓度系数 C 变化的曲线

图4中,纵轴表示接收面所有光子的斯托克斯矢量 $[I, Q, U, V]$ 各分量的强度平均值,采用对数分布,横轴为介质浓度系数.对于图中四种入射状态,随着浓度系数均匀增加,其均值对数曲线均近于线性递减,说明强度随介质浓度增加呈近似指数衰减.

图4(a)和图4(d)中, Q 和 U 分量变化曲线基本重合,因为 Q 和 U 分量二者本质上描述的都是线偏振,是一致的.在图4(a)中, V 分量要比 Q 和 U 分量较小的多,说明自然光经粒子散射产生线偏振的能力要强于产生圆偏振.但是当入射光为圆偏振光 $[1,0,0,1]$ 时,如图4(d)所示,其圆偏振分量 V 和强度分量 I 保持一致,强度较大.圆偏振光具有良好的透雾能力^[16],但是自然环境下其含量是很少的,所以在需要充分利用此特性时,可以发射圆偏振光进行主动探测.

由于是通过修改光子散射步长,来表征介质浓度系数的,而介质浓度系数的增加也可以认为是散射步长不变,介质层厚度的增加,因为二者散射次数都是相应增加的.同时,介质层厚度的增加,即光的发射点到接收器平面的垂直距离的增加,亦可表征为宏观上光束的直线传输距离的增加.因此,按照本文模型修改方式,浓度系数的变化可以认为宏观上光束在散射介质中传输距离的变化,二者存在正相关对应关系.由图4得,斯托克斯矢量 $[I, Q, U, V]$ 各分量的强度随传输距

离增加亦呈近似指数衰减的.

根据朗伯定律,光波从场景传播到观测点之间的削弱过程可以用式(6)来描述. D 表示观测点接收到的场景光强,则

$$D = L^{obj} e^{-\beta d} \quad (6)$$

其中, L^{obj} 是景物的辐射强度, β 表示大气的散射系数, d 是场景到观测点的距离.可以看出场景光强 D 随距离呈指数衰减.结果与上述模拟仿真一致.不但说明光强 I 是呈指数衰减的,还可以说明光的偏振分量强度亦是呈指数衰减.

由此可证明,本文中通过修改步长大小来表征浓度系数的大小是可行的;而且可以说明,按照此方式浓度系数与传输距离之间是正相关关系,即散射传输与介质浓度的影响关系亦可以认为是其与光传输距离的影响关系;同样也辅证了利用蒙特卡罗随机统计方法来模拟光在介质中的散射传输过程是合理有效的;且通过蒙特卡罗方法模拟仿真不但可以描述光强 I 的变化,还可以描述偏振信息(Q, U, V)的变化,均是呈指数衰减的,相对于朗伯定律的描述具有一定的优势.

4.2 介质浓度对散射光偏振度的影响分析

为了分析经过介质散射传输偏振度与介质浓度的影响关系,利用上述系统仿真模拟.当入射光分别为自然光(a) $[1,0,0,0]$,横向线偏振光(b) $[1,1,0,0]$,45度线偏振光(c) $[1,0,1,0]$,圆偏振光(d) $[1,0,0,1]$,横向部分线偏振光(e) $[1,0.5,0,0]$ 时,计算接收面上所有光子偏振度的平均值,对应的偏振度随浓度(传输距离)系数变化的均值曲线如图5所示.纵轴表示接收面所有光子的偏振度平均值,横轴为介质浓度系数.

图5中,对于无偏自然光(a),当介质浓度(传输距离)较小时,光束进入介质层中后,由于粒子的散射作用,会形成部分偏振光,并且当浓度(传输距离)在一定范围内增大时,总体粒子的散射作用增强,产生的偏振光部分随之增强,即偏振度增大.当浓度(传输距离)增大到一定程度时,散射次数大量增加各方向振动强度趋于均匀,会出现退偏,故此时随着浓度(传输距离)增

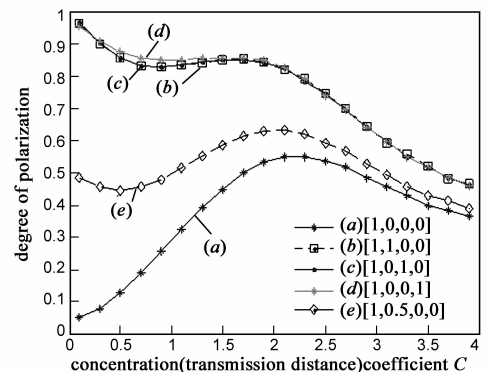


图5 偏振度随浓度(传输距离)系数 C 变化的均值曲线

加偏振度会有所降低. 对于自然光(a), 浓度(传输距离)系数 C 小于 2 时, 散射传输过程起偏效应占主导地位, 在 C 大于 2 时, 消偏效应占主导地位.

对于完全偏振光(b, c, d), 由于粒子散射作用, 会变成部分偏振光, 即消偏现象, 且随着浓度(传输距离)系数 C 的增加, 消偏程度并非单调变化. 当 C 小于 0.9 或大于 1.7 时, 偏振度单调递减, 当 C 大于 0.9 且小于 1.7 时, 偏振度单调递增. 即随着浓度(传输距离)系数 C 增加, 先消偏, 再起偏, 而后再消偏.

对于部分偏振光(e), 趋势与完全偏振光类似. 在浓度(传输距离)系数 C 小于 0.5 和大于 2 时, 偏振度单调递减, 在 0.5 至 2 间单调递增.

综上, 偏振度随浓度(传输距离)系数的变化并不是单调变化的, 根据不同入射光, 趋势也不一样, 总体呈“倒 N”型. 且在浓度(传输距离)系数大于一定阈值之后, 对于任何偏振态入射光, 随着系数 C 增大, 偏振度持续减小. 这也是实际大气偏振测量中, 云层区域出现消偏现象的原因.

可以发现对于完全偏振光(b, c, d)入射, 偏振度变化趋势基本一样, 尤其是入射横向线偏振光(b) $[1, 1, 0, 0]$ 和 45 度线偏振光(c) $[1, 0, 1, 0]$ 基本重合, 因为二者本质上是一致的, 描述的都是线偏振的程度. 但是圆偏振光(d) $[1, 0, 0, 1]$ 在浓度(传输距离)系数 C 为 0.3 至 1.7 间略微较大, 说明圆偏振光在此间范围内消偏能力弱于线偏振光, 即相对线偏振光来说, 圆偏振光有更好的保持偏振状态的能力.

5 结论

文中根据散射步长与散射介质浓度系数的影响关系, 修改了典型偏振蒙特卡罗模型, 引入了浓度系数表征的方法. 利用 VC 和 OpenGL 等工具设计实现了光散射传输的三维仿真系统, 并根据文中提出的模型修改方式, 分析了光散射传输过程中介质浓度和传输距离的正相关对应关系, 由此分析了介质浓度对光的散射传输过程中强度的影响, 并与朗伯定律的描述进行了比较分析, 验证了本文提出的方法可行性. 最后, 根据本文提出的模拟方法仿真结果, 分析了介质浓度系数对光的散射传输过程中偏振度的影响. 本文为分析介质浓度对散射传输过程及其偏振特性的影响关系提供了新的模拟方法, 为大气光学特性分析和偏振遥感探测等方面提供了新的理论仿真手段, 对偏振特性的实际检测具有指导性意义.

参考文献

[1] Chou C, Han C Y, Kuo W C, et al. Noninvasive glucose monitoring in vivo with an optical heterodyne polarimeter[J]. *Ap-*

plied Optics, 1998, 37(16): 3553 – 3557.

- [2] Morgan S P, Khong M P, Somekh M G. Effects of polarization state and scatterer concentration on optical imaging through scattering media [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(7): 1560 – 1565.
- [3] Coulson K L. *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere*[M]. Hampton, VA, the USA, A Deepak Pub, 1988. 81 – 124.
- [4] Wehner R. Polarization vision—a uniform sensory capacity? [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(14): 2589 – 2596.
- [5] 王莲芬, 刘光斌, 郑重. 球形粒子球形粒子对平面偏振光散射数值计算与分析[J]. *光电工程*, 2008, 35(9): 66 – 69. Wang Lianfen, Liu Guangbin, Zheng Zhong. Numerical calculation and analysis on plane polarized light scattering by spherical particles[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(9): 66 – 69. (in Chinese)
- [6] 田柳, 高隽, 范之国. 基于大气偏振模式分布规律的导航方向角计算方法[J]. *电子学报*, 2012, 40(1): 141 – 146. Tian Liu, Gao Jun, Fan Zhiguo. The method of the navigation direction angle calculation with the distribution of the atmospheric polarization pattern[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(1): 141 – 146. (in Chinese)
- [7] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Polarization-based vision through haze[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511 – 525.
- [8] 黄旭锋, 步扬, 王向朝. 基于米氏散射理论的太阳光散射偏振特性[J]. *中国激光*, 2010, 37(12): 3002 – 3006. Huang Xufeng, Bu Yang, Wang Xiangzhao. Skylight polarization patterns based on Mie theory for scattering[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(12): 3002 – 3006. (in Chinese)
- [9] 吴良海, 高隽, 范之国, 等. 大气粒子散射特性及其对空间偏振分布的影响[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 21 – 33. Wu Lianghai, Gao Jun, Fan Zhiguo, et al. Scattering of particles in the atmosphere and their influence on celestial polarization patterns[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 21 – 33. (in Chinese)
- [10] 汪震, 洪津, 乔延利, 等. 热红外偏振成像技术在目标识别中的实验研究[J]. *光学技术*, 2007, 33(2): 196 – 201. Wang Zhen, Hong Jing, Qiao Yanli, et al. Study of thermal polarization imaging measurement in target recognition [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(2): 196 – 201. (in Chinese)
- [11] Jin Y Q. *Electromagnetic Scattering Modelling for Quantitative Remote Sensing*[M]. Singapore: World Scientific, 1994. 87 – 145.
- [12] Wilson B C, Adam G. A Monte Carlo model for the absorption and flux distributions of light in tissue [J]. *Medical Physics*, 1983, 10(6): 824.
- [13] Wang L, Jacques S L, Zheng L. MCML-Monte Carlo model-

ing of light transport in multi-layered tissues [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 1995, 47(2): 131 - 146.

- [14] Bartel S, Hielscher A H. Monte Carlo simulations of the diffuse backscattering Mueller matrix for highly scattering media [J]. Applied Optics, 2000, 39(10): 1580 - 1588.
- [15] Ramella-Roman J, PrahI S, Jacques S. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media; part I [J]. Optics Express, 2005, 13(12): 4420 - 4438.
- [16] Treibitz T, Schechner Y Y. Instant 3descatter [A]. Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. New York, NY: IEEE, 2006. 2: 1861 - 1868.

作者简介



徐敬一 男, 1989 年生于安徽合肥. 合肥工业大学计算机与信息学院硕士. 研究方向为智能信息处理与大气偏振等.

E-mail: xujingyi46@163.com

高隽 男, 1963 年生于安徽淮南. 中国科学技术大学信息与通信工程专业博士. 研究方向为图像处理与分析、模式识别与人工智能、智能信息处理等.

范之国(通信作者) 男, 1979 年生于安徽霍山. 合肥工业大学信号与信息处理专业博士. 研究方向为智能信息处理、信息获取、仿生导航等.

E-mail: ibcshfut@163.com