

## 光学学报

## 激光遥感斜程能见度探测技术研究进展(特邀)

王玉峰, 华灯鑫\*

西安理工大学机械与精密仪器工程学院激光雷达大气遥感研究中心, 陕西 西安 710048

**摘要** 以斜程能见度精确探测为目标,综述了激光遥感在斜程能见度测量中的主要技术及其研究进展,分析了现有探测技术在斜程能见度测量中的不足与局限性,重点介绍了一种新型的激光雷达结合辐射传输模式的斜程能见度测量方法,剖析了基于拉曼-米散射激光雷达的气溶胶精细探测技术、基于辐射传输模式的大气散射辐射亮度解析方法以及大气散射辐射亮度校正的斜程能见度测量技术与应用案例,突破了当前白天斜程能见度测不准的技术瓶颈。最后,展望了激光遥感技术在全球斜程能见度测量中的应用潜力。

**关键词** 大气光学; 激光遥感; 斜程能见度; 辐射传输模式; 散射辐射亮度

**中图分类号** TN958.98 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS231558

## 1 引言

能见度是指视力正常的人能将目标物从背景中识别出来的最大距离。能见度是气象观测的要素之一,是了解大气稳定性和垂直结构的天气指标,是保证航空、航海、交通运输安全的一个重要因素<sup>[1-2]</sup>。通常所说的能见度是指水平能见度,而在空间目标探测领域实际涉及的是斜程能见度。

由于大气垂直方向分布并不均匀,斜视方向的能见度与水平测量得到的能见度会有较大差异。尤其是在航空交通运输领域,飞机及其他飞行器的起降中往往更关注斜程能见度。斜程能见度是航空器安全起降及各类光学引导式武器精确打击的关键因素之一,也是保障飞行安全的重要气象要素之一,因此,斜程能见度的测量和研究在航空、航天等领域具有重要的科学意义和较高的应用价值<sup>[3-4]</sup>。

国内外对能见度的测量主要采用目测法和仪器观测法。经过培训的专业人员通过目测可估算能见度值,但是该方法易受测量人员的生理特征、目标物与背景的光学特性等因素的影响,测量误差大,且不能进行持续测量。在测量仪器方面,相应的技术已经较为成熟,在机场、高速公路、港口等交通运输部门都安装了不同类型的能见度产品,如透射式能见度仪、散射式能见度仪等,它们能够较为准确地测量水平方向的能见度,但是无法提供斜程能见度的测量结果<sup>[5-6]</sup>。随着激光雷达技术的发展,出现了少数的激光雷达能见度仪,它们虽然可实现对斜程能见度的测量,但是测量或计

算原理忽略了斜程路径中大气散射辐射亮度的影响,并简单照搬均匀路径的结果,探测的精确度存在一定的误差<sup>[7-8]</sup>。

斜程能见度的测量受到多种因素的影响,包括大气消光系数、太阳天顶角、观测角度和天空亮度等,目前相关的深入研究工作并不多,其主要原因在于,斜程能见度的计算涉及复杂的辐射传输方程的求解,尤其是缺乏对大气散射辐射亮度路径分布的实际观测。若忽略大气散射辐射亮度的影响,将导致目标物和背景视亮度对比度测量不准确,从而影响斜程能见度的准确测量,这也是当前斜程能见度测不准的主要技术因素。

本文综述了近些年国内外激光遥感在斜程能见度测量中的研究现状和进展,分析了现有技术在斜程能见度测量中的不足和局限性。从斜程能见度测量理论出发,介绍了一种新型的斜程能见度激光遥感探测技术,并给出了应用范例,最后展望了激光遥感技术在全球斜程能见度测量中的应用潜力与解决方案。

## 2 斜程能见度的测量理论

在观察一个具有足够大视角的目标物时,只有当目标物和背景之间有相当程度的亮度或色彩差异时,才能将目标物从背景中识别出来。设目标物和背景的光亮度分别为 $L_o$ 和 $L_b$ ,也称为固有亮度,则光亮度对比度 $C$ 定义<sup>[3,9]</sup>为

$$C = \left| \frac{L_o - L_b}{L_b} \right| \quad (1)$$

收稿日期: 2023-09-15; 修回日期: 2023-12-18; 录用日期: 2023-12-26; 网络首发日期: 2024-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(U1733202, 41627807)、陕西省创新能力支撑计划项目(2020-TD014)

通信作者: \*dengxinhua@xaut.edu.cn

$C$  越大,目标物看得越清楚,当  $C$  减小时,目标物逐渐模糊。当开始不能从背景中分辨目标物时的对比度称为对比度阈值,用  $\epsilon$  表示,一般取值为 0.02 或者 0.05。

在实际观测中,沿着斜程路径观察目标物时,具有决定意义的是视亮度。大气对视亮度的影响主要包含两个部分:1)大气的削弱作用;2)大气对光的散射作用。设大气透过率为  $\tau_R$ ,气柱亮度为  $D_R$ ,则目标物和背景的视亮度<sup>[9]</sup>  $L_o^*$  和  $L_b^*$  可表示为

$$\begin{cases} L_o^* = \tau_R L_o + D_R \\ L_b^* = \tau_R L_b + D_R \end{cases} \quad (2)$$

相应的视亮度对比度<sup>[9]</sup> 用  $C^*$  表示,应表述为

$$C^* = \left| \frac{L_o^* - L_b^*}{L_b^*} \right| = \left| \frac{L_o - L_b}{L_b} \right| \times \left( 1 + \frac{D_R}{L_b \tau_R} \right)^{-1} \quad (3)$$

式(3)中第一项就是光亮度对比度  $C$ ,也被称为固有对比度;第二项定义为对比度传输系数  $Y$ ,它反映了固有对比度在大气中的传输变化,具体表示为

$$Y = \left( 1 + \frac{D_R}{L_b \tau_R} \right)^{-1} = \frac{L_b \tau_R}{L_b \tau_R + D_R} \quad (4)$$

可以看出,只要气柱亮度  $D_R$  不为 0,对比度传输系数  $Y$  是一个小于 1 的正数,而且随着距离的增大,  $Y$  将逐渐减小,即视亮度对比度逐渐减小。为了识别目标物,视亮度对比度应大于对比度阈值。一般来说,观测路径上的气柱亮度  $D_R$  可由辐射传输方程求出,大气透过率  $\tau_R$  直接依赖于气溶胶光学厚度,背景亮度  $L_b$  可由地面辐照度和地面反射率计算得到。

根据上述公式,要获得斜程能见度的准确测量值,必须得到以下几个重要参量:1)斜程路径大气透过率;2)斜程路径上的气柱亮度,即地球大气的散射辐射亮度;3)目标物和背景的固有对比度。尤其是,大气散射辐射亮度的分布是白天斜程能见度精确测量的关键影响要素。若忽略大气散射辐射亮度的影响,将导致目标物和背景视亮度对比度的测量不准确,在这种情况下很难获得准确的斜程能见度结果。

### 3 基于 Koschmieder 定律的激光遥感斜程能见度反演方法

常见的透射式能见度仪和散射式能见度仪等仪器仅能提供水平能见度信息,无法提供斜程能见度的测量结果。在航空、气象等业务应用中,专业人员基于经验,采用粗略目测的方法来提供斜程能见度信息,观测结果具有较大的不确定性。近些年出现的少数激光雷达能见度仪,通常是基于单波长米散射激光雷达探测技术对斜程能见度进行估算测量,其相关的反演方法可归纳为以下两类:一类是基于柯斯密德(Koschmieder)定律的斜程能见度反演方法<sup>[10-11]</sup>;另一类是基于大气光学厚度的斜程能见度反演方法。

利用米散射激光雷达探测技术,反演获得斜程路径的大气气溶胶消光系数,并结合著名的 Koschmieder

能见度公式来计算斜程能见度<sup>[12]</sup>,表示为

$$V_s = \frac{2.97}{\sigma_p} \left( \frac{0.55}{\lambda} \right)^q \quad (5)$$

式中: $V_s$  为斜程能见度; $\lambda$  为激光波长; $\sigma_p$  为斜程路径大气气溶胶消光系数; $q$  为修正系数。目前广泛使用的各类能见度仪也是基于式(5)进行水平能见度的测量。20世纪80年代初 Gaumet 等<sup>[13]</sup> 和 Werner<sup>[14]</sup> 就开始使用激光雷达技术,利用斜率法或者简化的两点斜率法测量了水平能见度和斜程能见度。然而,受到现有反演算法的制约,斜程能见度的计算精度不高,因此,准确反演气溶胶消光系数成为提高斜程能见度计算精度的关键。

随后,学者们相继开展了利用迭代算法的平均气溶胶消光系数研究工作。1993年,Streicher 等<sup>[15]</sup> 采用人眼安全的激光遥感技术,结合 Klett 算法和迭代法,实现了对低能见度天气条件下斜程能见度的测量,并与商用能见度仪的测量结果进行了比较。2006年,Werner 等<sup>[16]</sup> 提出了求取平均气溶胶消光系数的稳定迭代算法。2010年,中国科学院安徽光机所的唐磊等<sup>[17-18]</sup> 成功研制了一台便携式半导体激光雷达能见度探测仪[图1(a)],并采用基于 Fernald 法的消光系数迭代算法得到斜程能见度(图2)。2012年,中国民航大学的熊兴隆等<sup>[19]</sup> 采用基于不动点原理的迭代算法进行大气气溶胶消光系数的反演,图3(a)为不动点迭代反演算法的流程图。同年,中国工程物理研究院的田飞等<sup>[20]</sup> 提出了一种基于 Klett 法和 Collis 斜率法的平均斜程能见度迭代算法,实现了在非均匀大气条件下大气能见度的快速反演,但是,其反演结果较依赖于参考距离,所获得的平均斜程能见度结果可靠性也有待探讨。2017年,Pantazis 等<sup>[21]</sup> 提出一种基于激光雷达信号和噪声处理的新算法(NOSUB-S/R ALGORITHM),并将其应用于 3D 扫描激光雷达系统[图1(b)],期望为塔台管制员和飞行员提供大气分层和能见度的估计值。

为提高大气气溶胶消光系数的反演精度,中国民航大学的熊兴隆研究团队对斜程能见度反演中的边界值和激光雷达比选取进行了较为深入的研究:2012年,熊兴隆等<sup>[22]</sup> 提出了一种基于改进牛顿法的大气消光系数边界值确定方法,能够较为准确地反演低层大气的气溶胶消光系数;2019年,该团队又提出一种基于 Fernald-PSO 求解气溶胶激光雷达比的方法[图3(b)],获得对气溶胶消光系数的反演结果,并用来计算斜程能见度,从而提高了斜程能见度的计算精度<sup>[23]</sup>。

总体来看,基于 Koschmieder 定律的激光遥感斜程能见度反演方法的关键技术是基于单波长米散射激光雷达的大气气溶胶消光系数反演,从根本上讲,其测量原理忽略了大气散射辐射亮度的影响,并简单照搬了均匀路径的结果,存在一定的反演缺陷<sup>[3]</sup>。

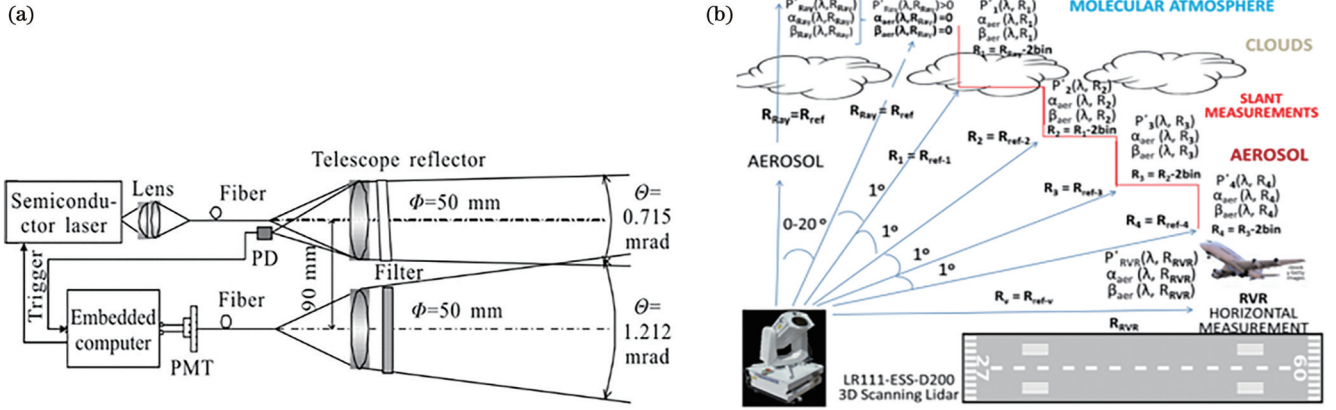


图 1 典型的激光雷达能见度仪结构示意图。(a) 905 nm 便携式半导体激光雷达能见度探测仪<sup>[18]</sup>；(b) 3D 扫描激光雷达<sup>[21]</sup>  
 Fig. 1 Schematic of typical lidar visibility meters. (a) 905 nm portable semiconductor lidar visibility meter<sup>[18]</sup>; (b) 3D-scanning lidar system<sup>[21]</sup>

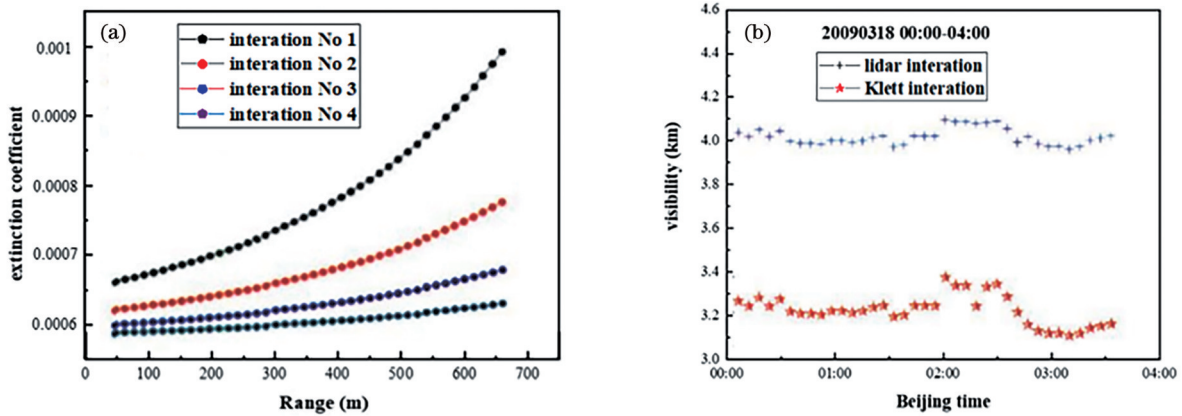


图 2 消光系数的迭代<sup>[17]</sup>。(a) 消光系数迭代过程；(b) 不同迭代方法计算的能见度对比  
 Fig. 2 Iteration of extinction coefficient<sup>[17]</sup>. (a) Iterative process of extinction coefficient; (b) comparisons of visibility results by different iteration methods

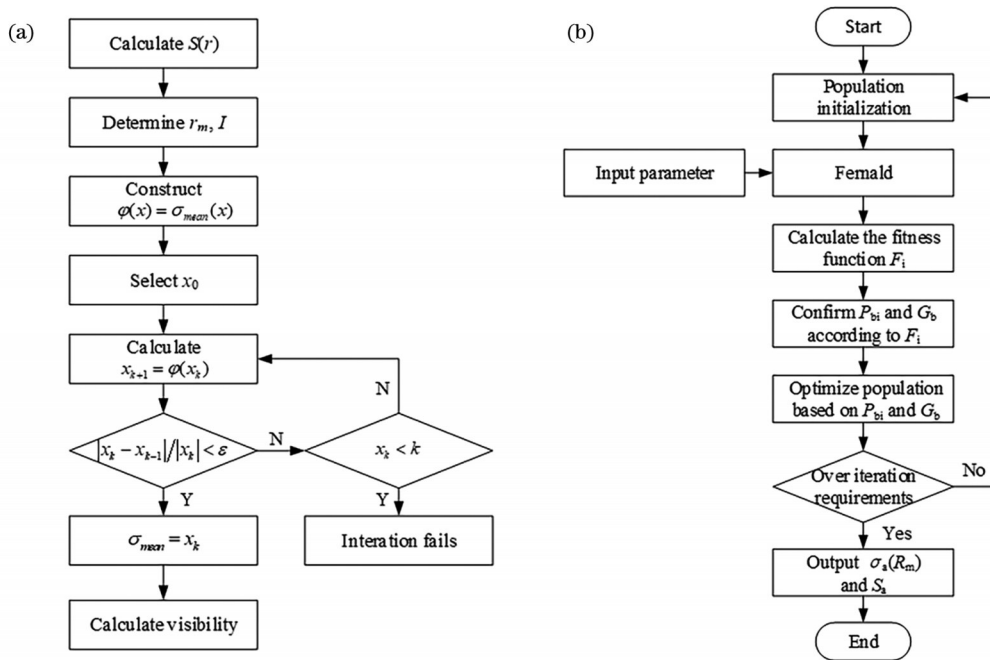


图 3 迭代反演算法流程图。(a) 不动点迭代法<sup>[19]</sup>；(b) Fernald-PSO 法<sup>[23]</sup>  
 Fig. 3 Flow chart of iterative inversion algorithms. (a) Fixed point iterative inversion algorithm<sup>[19]</sup>; (b) Fernald-PSO algorithm<sup>[23]</sup>

## 4 基于大气光学厚度的激光遥感斜程能见度反演方法

除了利用大气气溶胶消光系数,还可以利用大气光学厚度进行斜程能见度计算,因此,逐渐发展形成了基于大气光学厚度的斜程能见度反演方法。早在 20 世纪 70 年代,中国科学院大气物理研究所的吕达仁院士团队就提出了利用激光雷达测定大气水平和

斜程能见度的理论方案,并通过实验对比验证了该方案的可行性。此外,该团队还对实验数据进行了统计平均,得到水平能见度和平均消光系数的线性关系,并给出二者乘积  $A$  为 3.4 的结果<sup>[24]</sup>。1980 年,中国科学院大气物理研究所的赵燕曾等<sup>[25]</sup>提出了在水平均一假定下探测大气光学厚度及平均消光系数的简化方案,并推导出从空中斜视地面的斜程能见度简化计算公式,即

$$\int_0^R \sigma(r) dr = \ln \left[ \frac{B_t^*}{B_w(I_0, \varphi_0, \phi_0, B_s, \varphi, \phi)} \left( \frac{1}{\epsilon} \frac{B_t^* - B_g^*}{B_t^*} - 1 \right) + 1 \right] \equiv A, \quad (6)$$

式中:  $\int_0^R \sigma(r) dr$  表示在  $0 \sim R$  路程上的斜程大气光学厚度。式(6)仅适用于能见度为  $1 \sim 5$  km 的气象条件,并且缺乏复杂天气条件和不同地区的多次验证,具有一定的局限性。2006 年,陈敏等<sup>[26]</sup>基于 1064 nm 米散射激光雷达(图 4),利用多仰角法获得大气光学厚度,进而求解斜程能见度。2014 年,中国民航大学的熊兴隆等<sup>[27]</sup>基于激光雷达双仰角法反演得到大气光学厚度(图 5),并探讨了考虑多次散射影响的斜程能见度反演方法,该方法对复杂天气条件下的斜程能见度反演具有重要意义。2022 年,熊兴隆等<sup>[28]</sup>又提出一种基于多次散射激光雷达的斜程能见度反演方法,得到改进前后的大气光学厚度分布,并提高了斜程能见度结果的准确度。

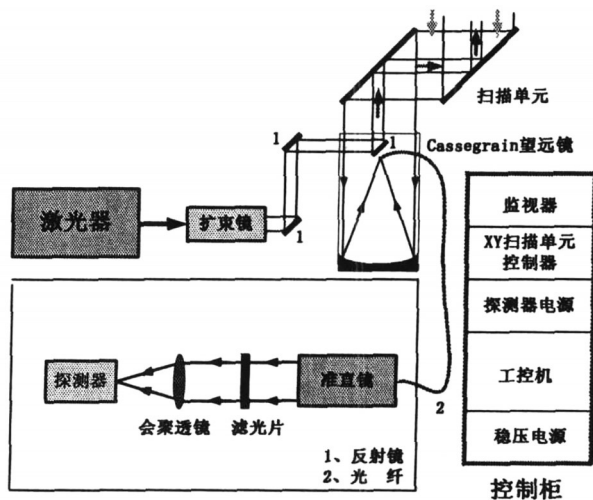


图 4 1064 nm 米散射激光雷达系统结构示意图<sup>[26]</sup>

Fig. 4 Schematic of 1064 nm Mie-scattering lidar system<sup>[26]</sup>

总的来看,大气光学厚度也反映了大气特性,基于大气光学厚度的激光遥感斜程能见度反演方法主要是利用激光雷达的多仰角探测技术获得任意斜程方向上的大气光学厚度,进而实现对斜程能见度的估算。但是,目前这方面的研究总体偏少,相应的算法仍需不断发展和优化。大气水平非均匀条件会对斜程能见度的估算结果带来较大误差,同时,不

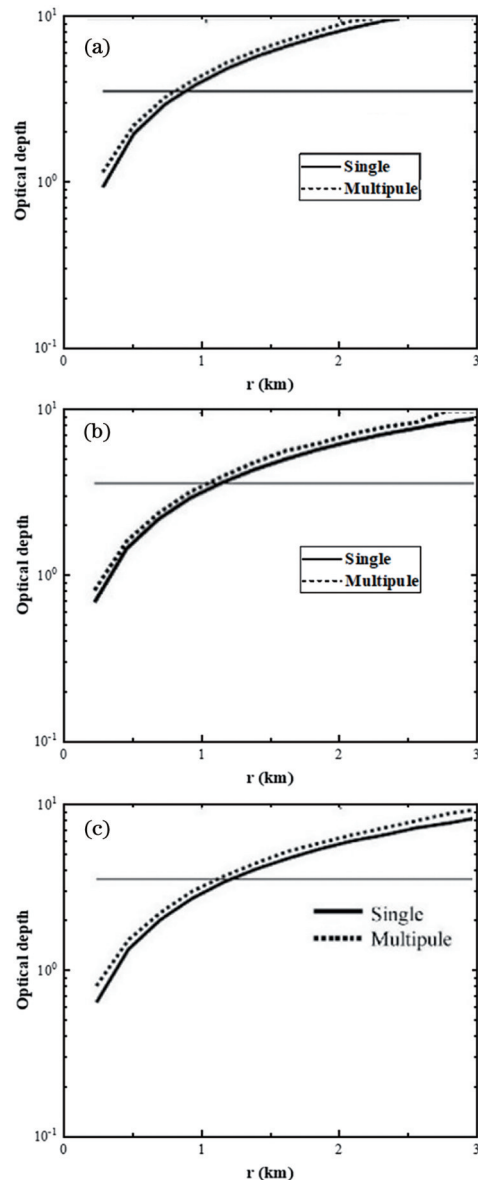


图 5 3 种天气下的斜程大气光学厚度<sup>[27]</sup>。(a)浓雾;(b)轻雾;(c)霾

Fig. 5 Slant atmospheric optical thickness under three weather conditions<sup>[27]</sup>. (a) Thick fog; (b) light fog; (c) haze

同天气条件下光学厚度阈值的选取也有待于深入探讨。

## 5 基于辐射传输模式的斜程能见度反演方法

斜程能见度的测量受到大气消光系数、太阳天顶角、观测角度和大气散射辐射亮度等因素的影响。自 20 世纪 80 年代以来,大气物理领域的科学家和学者们开始关注大气散射辐射亮度的测量及其对斜程能见度的影响。1987 年前后,中国科学院大气物理研究所的邱金桓等<sup>[29-30]</sup>从辐射传输方程出发,研究了斜视视程对大气消光系数分布、散射相函数、总光学厚度、太阳天顶角和方位角以及目标物和背景的反照特性的敏感性,提出了一个计算斜视视程的近似表达式,但是,该公式采用了“朗伯反射体”的假设,更适用于大气光学厚度较大的情况。2003 年,中国科学院安徽光机所的王毅和饶瑞中<sup>[31]</sup>利用  $\delta$ -Eddington 近似求解辐射传输方程,推导了斜程能见度的近似表达式,探讨了斜程能见度与太阳天顶角、大气光学特性等因素之间的关系,但是,由于假设较多,同时也忽略了目标本身的辐射、云以及其他辐射源造成的影响,计算精度有待进一步提高。2010 年,饶瑞中<sup>[3]</sup>从辐射传输方程出发研究了斜程大气能见度问题,给出了水平能见度为 5 km 和 23 km 大气条件下斜程能见度的基本特征,着重比较了斜向上观察和斜向下观察时能见度的区别,并指出了在实际求解视亮度对比度中存在的问题。

## 6 基于激光雷达和辐射传输模式的斜程能见度测量技术

上面提到的斜程能见度反演方法中,利用单波长米散射激光雷达斜程能见度探测技术虽可实现对斜程能见度的测量,但是其测量或计算原理从根本上忽略了大气散射辐射亮度的影响,并简单照搬了

均匀路径的结果,存在一定的反演缺陷<sup>[3]</sup>。早先的研究工作虽然已经关注大气散射辐射亮度的测量及其对斜程能见度的影响,但是多聚焦于理论建模和仿真分析。

大气散射辐射亮度的分布是白天斜程能见度精确测量的关键影响要素。由于大气散射辐射亮度的计算涉及复杂的辐射传输方程,因此大气散射辐射亮度的精确测量成为斜程能见度测量技术的关键。辐射传输模式是当前大气散射辐射亮度模拟的主流方法,利用 6S、SBDART、LibRadtran 等成熟的实用辐射传输模式,可获得太阳辐射传输、热辐射以及辐射亮度等参数的计算结果。但是,实际大气散射辐射亮度的计算和测量仍然是一个难题,如何利用辐射传输模式实现实际大气散射辐射亮度的近似模拟逐渐成为大气科学等领域的研究热点。

针对大气散射辐射亮度测量的技术难题,西安理工大学提出一种激光雷达结合辐射传输模式的斜程能见度测量方法<sup>[32-33]</sup>,通过拉曼-米散射激光雷达的气溶胶精细探测技术、辐射传输模式的大气散射辐射亮度解析方法以及大气散射辐射亮度校正的斜程能见度测量技术,实现了考虑大气散射辐射亮度影响的斜程能见度精确测量。该方法充分利用激光遥感的探测优势,基于激光遥感进行大气气溶胶的高时空分辨率和高精度探测,提供实时的气溶胶光学、微物理和散射特性参量信息;利用辐射传输模式求解辐射传输方程,实现大气散射辐射亮度路径分布的实际观测,从根本上解决了目前斜程能见度测量的技术问题。在实现过程中,同时辅助一套目标物和背景的反照率测量系统,实现目标物和背景的固有对比度计算,最终实现大气散射辐射亮度校正的斜程能见度测量。图 6 给出了该测量方法的思路框图。

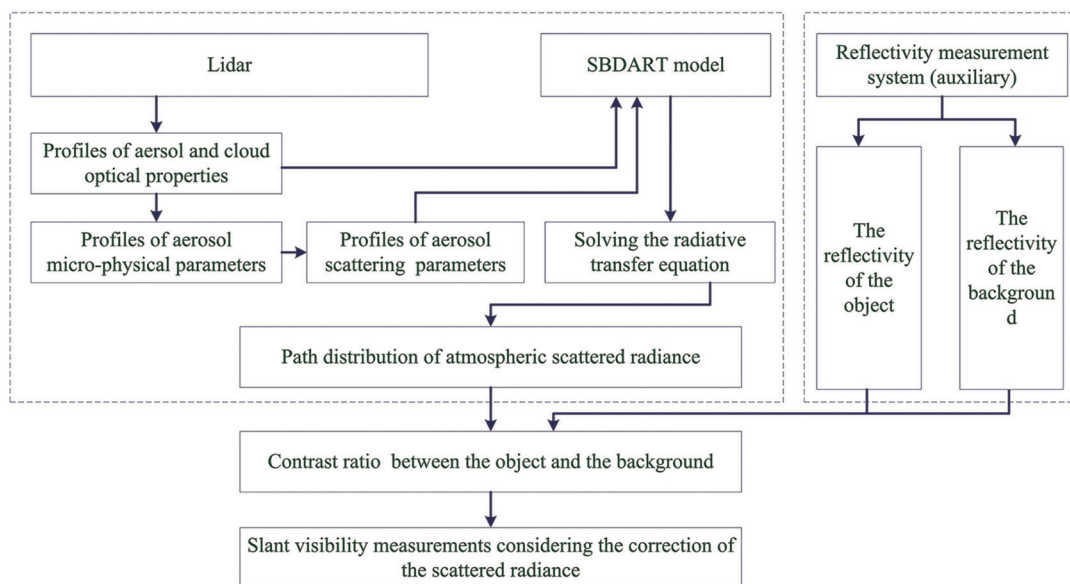


图 6 激光雷达结合 SBDART 辐射传输模式的斜程能见度测量方法<sup>[32-33]</sup>

Fig. 6 Measurement method for slant visibility combining lidar technique with SBDART radiative transfer model<sup>[32-33]</sup>

### 6.1 激光雷达结合 SBDART 模式的大气散射辐射亮度模拟

区别于目前的单波长米散射激光雷达能见度仪,利用基于双波长拉曼-米散射的气溶胶精细探测激光雷达技术构建的大气气溶胶精细探测激光雷达系统<sup>[33-34]</sup>如图 7 所示。通过获取紫外和近红外波段的米-瑞利散射和氮气拉曼散射回波信号(中心波长为 355、

386.7、1064、852.7 nm),在无需激光雷达比假设的情况下,反演得到大气气溶胶消光系数、后向散射系数、气溶胶粒子谱和复折射率、单次散射反照率和不对称因子的廓线,实现从气溶胶光学参量到微物理参量和散射特性参量的递进反演,为辐射传输模式提供了亟需的实际大气气溶胶状态信息,这是现有方法和手段无法提供的。

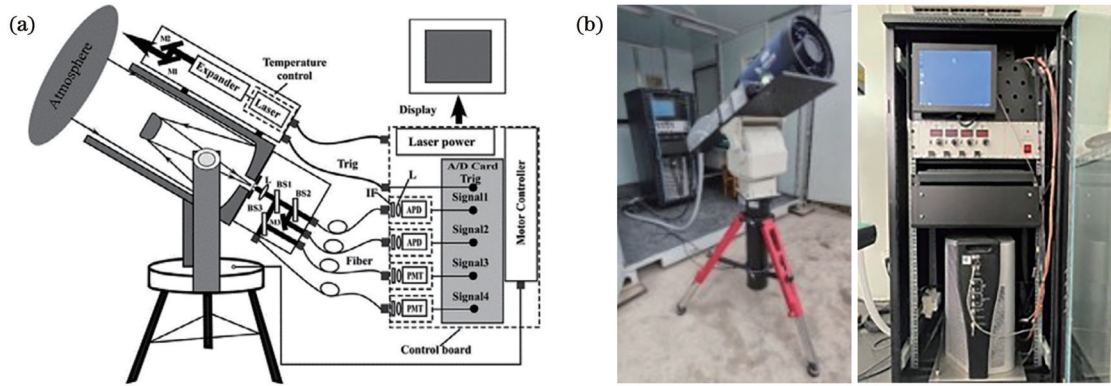


图 7 双波长拉曼-米散射激光雷达系统<sup>[33]</sup>。(a)结构示意图;(b)实物图

Fig. 7 Two-wavelength Raman-Mie scattering lidar system<sup>[33]</sup>. (a) Configuration; (b) physical map

将激光雷达反演结果构成的气溶胶参数列表作为 SBDART 模式的自定义气溶胶输入文件,运行 SBDART

模式,获得不同高度层上的大气散射辐射亮度分布。图 8 给出了一组有云天气条件下 SBDART 模式的输出

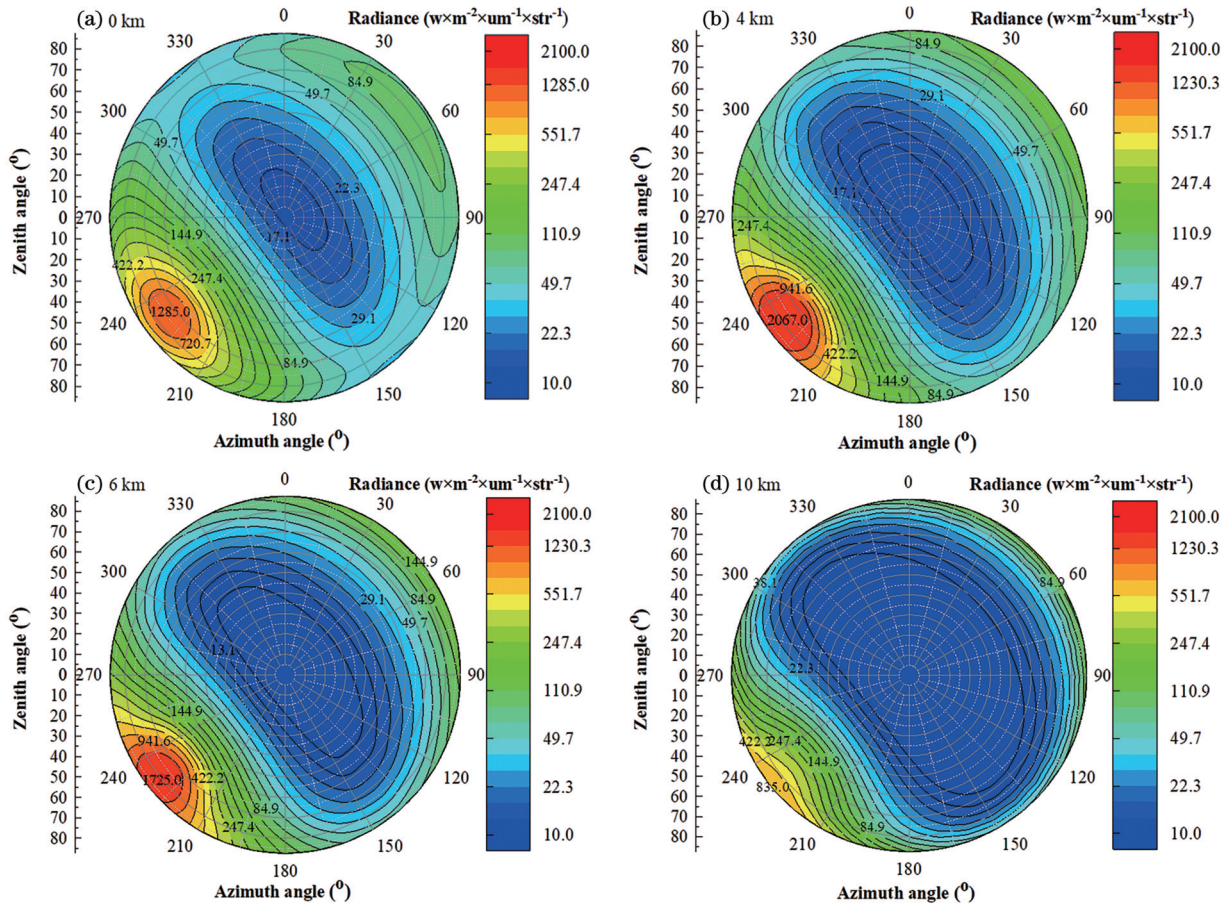


图 8 不同高度层上的实际大气散射辐射亮度分布<sup>[34-35]</sup>。(a) 0 km;(b) 4 km;(c) 6 km;(d) 10 km

Fig. 8 Atmospheric scattered radiance distribution at different height layers<sup>[34-35]</sup>. (a) 0 km; (b) 4 km; (c) 6 km; (d) 10 km

结果,分别对应 0、4、6、10 km 高度层上的大气散射辐射亮度分布,其中纵坐标表示天顶角,横坐标表示方位角。可以看出:在各个高度层上,全天空大气散射辐射亮度呈现以太阳为中心的对称分布方式,峰值基本位于太阳附近;从地面向上,大气散射辐射亮度随着高度发生变化。受到大气底部气溶胶的强散射作用,地面处的散射辐射亮度较大,约为  $1300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{str}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ;

受 3.8 km 云层的影响,云上 4 km 高度层的大气散射辐射亮度明显增大,最大值超过  $2000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{str}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ;在 10 km 的高度层上,大气散射辐射亮度较小,小于  $900 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{str}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 。图 9 给出了不同观测方向上大气散射辐射亮度随距离的变化曲线及其距离高度强度(RHI)图,可以清晰地看到,不同斜程路径上大气散射辐射亮度随距离的变化明显不同。

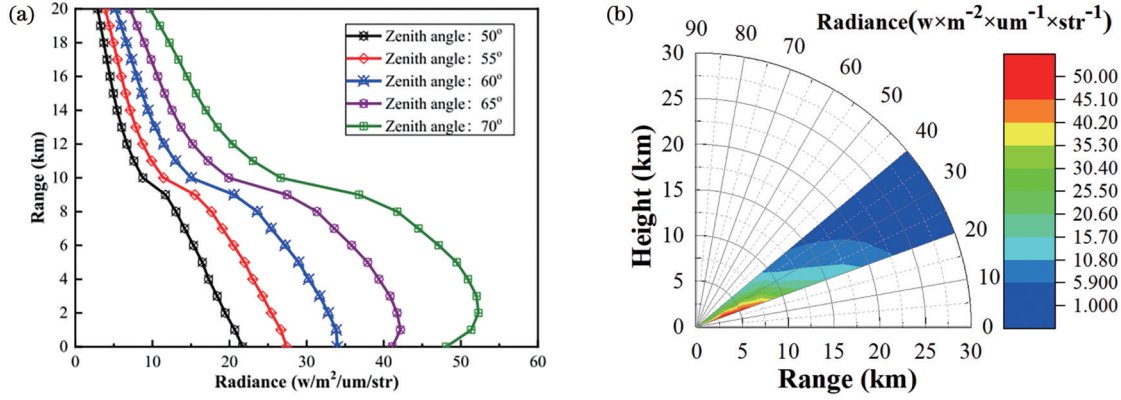


图 9 大气散射辐射亮度分布<sup>[33]</sup>。(a)不同斜程方向上的大气散射辐射亮度曲线;(b) RHI

Fig. 9 Distribution of the scattered radiance<sup>[33]</sup>. (a) Curves of scattered radiance in different directions; (b) RHI

## 6.2 考虑斜程路径散射辐射亮度校正的斜程能见度反演

在结合激光雷达和 SBDART 模式获得斜程路径上的大气散射辐射亮度分布后,可根据斜程能见度测量原理,实现对斜程能见度的准确反演。假设目标物和背景均为朗伯体,目标物亮度  $L_o$  和背景亮度<sup>[9]</sup>  $L_b$  可表示为

$$L_o = \frac{I_o \cdot \rho_o}{\pi}, \quad (7)$$

$$L_b = \frac{I_o \cdot \rho_b}{\pi}, \quad (8)$$

式中:  $I_o$  为地面辐照度,包括到达地面的太阳直接和散射辐照度,可由 SBDART 模式得到;  $\rho_o$  和  $\rho_b$  分别为目标物和背景的反射率。结合式(3)和式(4),目标物和背景的视亮度对比度<sup>[27-28]</sup>  $C^*$  可表示为

$$C^*(R, \theta, \varphi) = \left| \frac{(\rho_o - \rho_b)}{\left[ \rho_b + \frac{\pi}{I_o} \cdot \frac{D(R, \theta, \varphi)}{\tau(R, \theta, \varphi)} \right]} \right|, \quad (9)$$

式中:  $R$  为斜程路径上的距离;  $\theta$  和  $\varphi$  分别为观测天顶角和方位角;  $\tau$  为大气透过率;  $D$  为斜程路径上的大气散射辐射亮度。式(9)为考虑斜程路径大气散射辐射亮度校正的目标物和背景视亮度对比度的公式。可见,根据观测方向上的大气散射辐射亮度变化,再结合该方向上的斜程路径大气透过率,可直接计算得到目标物和背景的视亮度对比度曲线,取对比度阈值为 0.05 时,对应的距离即为斜程能见度。图 10(a) 所示为一组以跑道为目标物、草地为背景的对比度曲线示例,在不同的斜程观测方向(不同的天顶角)得到了不同的斜程能见度。在  $20^\circ$  观测天顶角方向上,斜程能见度约为 4.2 km; 在  $40^\circ$  观测天顶角方向上,得到的斜程能见

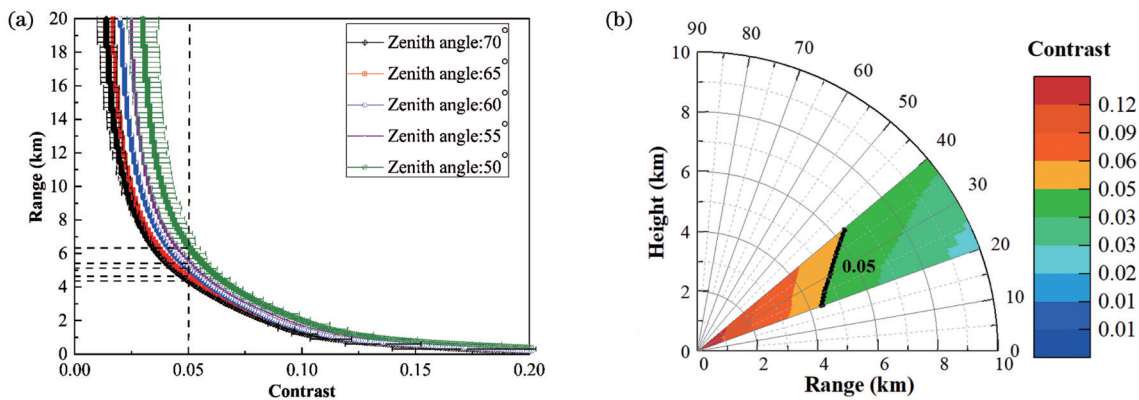


图 10 目标物和背景对比度分布<sup>[33]</sup>。(a)不同斜程方向上的对比度曲线;(b) RHI

Fig. 10 Distribution of contrast ratio between the object and the background<sup>[33]</sup>. (a) Curves in different directions; (b) RHI

度约为 6.2 km。图 10(b)则清晰给出了整个激光雷达扫描探测范围内的斜程能见度随观测方向的变化趋势。

总体来看,这方面的研究工作已经取得了不错的结果,但仍有进一步发展的空间。例如,在大气散射辐射亮度模拟过程中,目前主要采用平行平面辐射传输模式——SBDART 模式,该模式具有计算精度高、灵活性和可扩展性强等优势,但是该模式在对大天顶角观测方向的辐射亮度模拟时可能存在过量评估的问题,造成反演得到的斜程能见度略低于实际结果。此外,激光雷达结合辐射传输模式的斜程能见度反演算法涉及多个反演步骤,尤其是作为辐射传输模式输入的激光雷达气溶胶参数列表的建立,直接影响大气散射辐射亮度的快速、准确模拟,希望可以建立一个大气气溶胶散射特性参量的查算表,这对于快速准确地获得斜程能见度图谱时空分布信息至关重要。

## 7 卫星遥感全球斜程能见度的展望和思考

卫星遥感技术的迅猛发展将人类带入一个多层、立体、多角度、全方位和全天候的对地观测时代,特别

是星载激光遥感卫星的出现,显著增强了激光遥感在环境监测和气候变化研究中的作用。星载激光雷达可在全球范围内进行大尺度、长时序、高空间分辨率的大气和环境观测,提供高精度的全球探测数据,已成为空间探测领域的重要发展趋势,在全球探测活动中发挥着越来越重要的作用<sup>[36-41]</sup>。例如,2006年发射并运行至今的美国 CALIPSO 气溶胶-云激光雷达、2018年发射的欧空局 ALADIN 星载多普勒测风激光雷达卫星、2022年我国成功发射的全球首颗大气环境监测卫星(DQ-1 卫星)都取得划时代的创新跨越和应用效果<sup>[42-44]</sup>。作为 DQ-1 卫星的主载荷,中国科学院上海光机所研制的大气探测激光雷达(ACDL)是国际首个星载二氧化碳探测激光雷达和首个高光谱气溶胶探测激光雷达<sup>[44-45]</sup>。尤其是在气溶胶和云探测方面,ACDL 设计了 532 nm 平行通道、532 nm 垂直通道、532 nm 分子通道和 1064 nm 散射信号通道,测量了大气气溶胶、云的高垂直分辨率和高精度的光学特性参数剖面(图 11),这些全球探测数据在研究云与气溶胶相互作用、云对全球变暖的影响等方面发挥了重要作用,同时也为全局斜程能见度的测量提供了强大的数据支持。

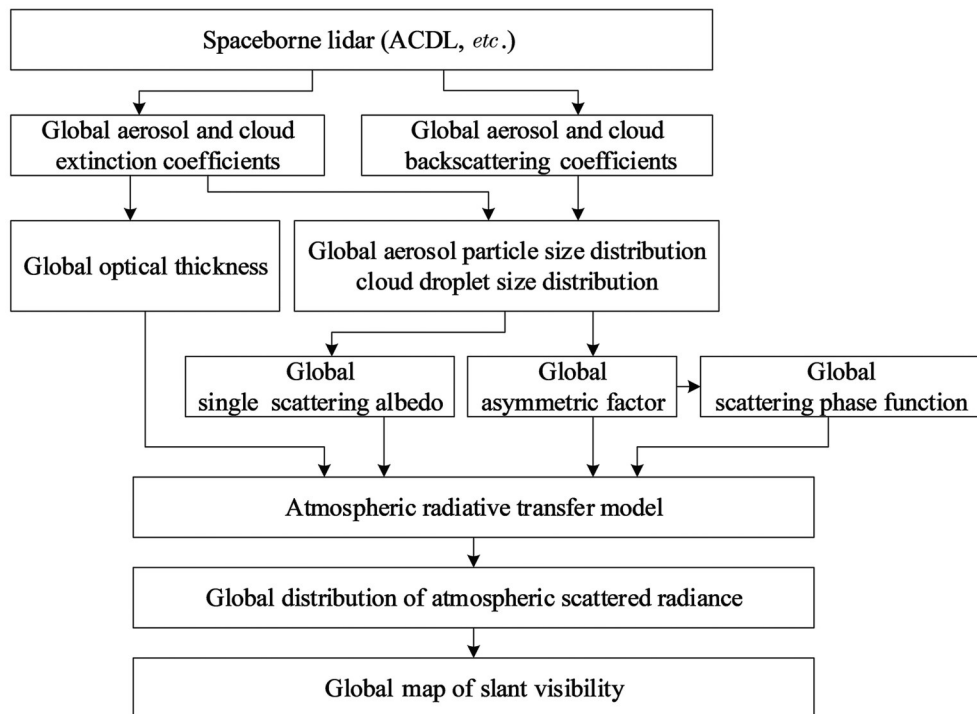


图 11 全球斜程能见度测量的技术路线

Fig. 11 Technical route for global slant visibility measurements

借助星载激光雷达如 ACDL,利用不同波长的消光系数和散射系数,有望获得全球气溶胶光学厚度、全球气溶胶粒子谱分布和气溶胶散射特性等数据,进一步结合大气辐射传输模式,不仅可模拟全球范围内的大气散射辐射亮度分布,还可以得到全球斜程能见度的信息,对于航空、航天等领域具有重要的研究意义和

较大的应用价值。未来可借助庞大的卫星网络进行多卫星协同观测,为全球斜程能见度的精确测量提供可靠的数据支持和技术保障。

## 8 总结

斜程能见度的探测和研究在航空、航天和天文观



测等领域具有重要的科学研究意义和较大的应用价值。从斜程能见度测量理论出发,综述了近些年国内外激光遥感在斜程能见度测量中的主要技术和研究进展,梳理了几种主流的斜程能见度反演方法,分析了现有技术在斜程能见度测量中的不足和局限。针对大气散射辐射亮度对白天斜程能见度测量的重要影响,重点介绍了一种新型的斜程能见度激光遥感探测技术,以激光雷达为探测技术,结合辐射传输模式解决实际大气散射辐射亮度的路径观测问题,并给出斜程能见度的应用范例。最后,展望了激光遥感技术在全球斜程能见度测量中的应用潜力。

## 参 考 文 献

- [1] Horvath H. Atmospheric visibility[J]. *Atmospheric Environment*, 1981, 15(10/11): 1785-1796.
- [2] Charlson R J. Atmospheric visibility related to aerosol mass concentration: review[J]. *Environmental Science & Technology*, 1969, 3(10): 913-918.
- [3] 饶瑞中. 大气中的视觉和大气能见度[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2486-2492.  
Rao R Z. Vision through atmosphere and atmospheric visibility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2486-2492.
- [4] Pantazis A, Papayannis A. Set of algorithms and techniques for accurate 3D, single beam-single pointing, lidar measurements for slant range visibility, planetary boundary layer height and wind speed retrieval, atmospheric layers spatial distribution and categorization in real time[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2020, 237: 02031.
- [5] 程绍荣, 魏全忠, 吕军. 一种实用型大气透射式能见度仪的研制[J]. *光电工程*, 2011, 38(2): 144-150.  
Cheng S R, Wei Q Z, Lü J. The development of a new atmosphere transmittance meter[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(2): 144-150.
- [6] 李孟麟, 段发阶, 欧阳涛, 等. 前向散射式能见度测量技术研究[J]. *传感技术学报*, 2008, 21(7): 1281-1285.  
Li M L, Duan F J, Ouyang T, et al. Research on the forward scattering visibility detection[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(7): 1281-1285.
- [7] 冯帅, 蒋立辉, 熊兴隆, 等. 后向散射式激光雷达能见度探测研究[J]. *激光与红外*, 2009, 39(12): 1283-1287.  
Feng S, Jiang L H, Xiong X L, et al. Backward scattering lidar for visibility detection[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(12): 1283-1287.
- [8] 庄子波, 黄炜, 符超, 等. 后向散射式小型激光雷达能见度仪探测研究[J]. *激光技术*, 2015, 39(1): 119-123.  
Zhuang Z B, Huang W, Fu C, et al. Portable visibility detector based on backward scattering lidar[J]. *Laser Technology*, 2015, 39(1): 119-123.
- [9] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 2版. 北京: 北京大学出版社, 2013: 470-477.  
Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al. *Atmospheric physics*[M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2013: 470-477.
- [10] Koscmieder H. Theorie der horizontalen Sichtweite[J]. *Beitr Physik fr Atmos*, 1924, 12: 33-55.
- [11] Lee Z P, Shang S L. Visibility: how applicable is the century-old koscmieder model? [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(11): 4573-4581.
- [12] Ångström A, Angstrom A. On the atmospheric transmission of Sun radiation. II [J]. *Geografiska Annaler*, 1930, 12: 130-159.
- [13] Gaumet J L, Petitpa A. Lidar-transmissometer visibility comparisons over slant and horizontal paths[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1982, 21(5): 683-694.
- [14] Werner C. Slant range visibility determination from lidar signatures by the two-point method[J]. *Optics & Laser Technology*, 1981, 13(1): 27-36.
- [15] Streicher J, Münkel C, Borchardt H. Trial of a slant visual range measuring device[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1993, 10(5): 718-724.
- [16] Werner C, Streicher J, Leike I, et al. Visibility and cloud lidar [M]//Weitkamp C. Lidar. Springer series in optical sciences. New York: Springer-Verlag, 2006, 102: 165-186.
- [17] 唐磊, 舒志峰, 董吉辉, 等. 半导体激光雷达斜程能见度观测和反演方法[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(5): 963-967.  
Tang L, Shu Z F, Dong J H, et al. Measurement of slant visibility and its iteration method with diode-laser lidar[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(5): 963-967.
- [18] 岳斌, 董晶晶, 孙东松, 等. 便携式激光雷达能见度仪的研制[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S3): 129-132.  
Yue B, Dong J J, Sun D S, et al. Development of portable visibility lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S3): 129-132.
- [19] 熊兴隆, 蒋立辉, 冯帅. Mie 散射激光雷达回波信号处理方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 89-95.  
Xiong X L, Jiang L H, Feng S. Return signals processing method of Mie scattering lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 89-95.
- [20] 田飞, 罗佳, 胡大平, 等. 激光雷达观测斜程能见度反演方法[J]. *激光与红外*, 2012, 42(11): 1239-1243.  
Tian F, Luo J, Hu D P, et al. Inversion algorithm for slant visibility based on lidar technique[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(11): 1239-1243.
- [21] Pantazis A, Papayannis A, Georgousis G. Lidar algorithms for atmospheric slant range visibility, meteorological conditions detection, and atmospheric layering measurements[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(23): 6440-6449.
- [22] 熊兴隆, 蒋立辉, 冯帅, 等. 改进的牛顿法确定大气消光系数边界值[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1744-1749.  
Xiong X L, Jiang L H, Feng S, et al. Using improved Newton method to determine the boundary value of atmospheric extinction coefficient[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1744-1749.
- [23] 马愈昭, 刘嘉琪, 王强强, 等. 基于 Fernald-PSO 法反演气溶胶激光雷达比及其对斜程能见度的影响[J]. *光子学报*, 2019, 48(3): 301001.  
Ma Y Z, Liu J Q, Wang Q Q, et al. Inversion of aerosol lidar ratio and its effect on slant visibility based on Fernald-PSO method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(3): 301001.
- [24] 吕达仁, 魏重, 张健国. 激光探测能见度的实验研究[J]. *大气科学*, 1976(1): 55-61.  
Lü D R, Wei C, Zhang J G. An experimental study of the visibility detection by laser[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1976(1): 55-61.
- [25] 赵燕曾, 陶丽君, 郝南军. 激光测斜视能见度的初步试验[J]. *大气科学*, 1980, 4(2): 168-175.  
Zhao Y Z, Tao L J, Hao N J. An experiment of slant visibility measurement by lidar[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1980, 4(2): 168-175.
- [26] 陈敏, 孙东松, 李洪敬, 等. 激光雷达斜程能见度的一种探测方法及其分析[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(2): 156-160.  
Chen M, Sun D S, Li H J, et al. Detective method and analysis of atmospheric slant visibility for lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 156-160.
- [27] 熊兴隆, 刘雯箐, 蒋立辉, 等. 考虑多次散射影响的斜程能见度反演方法研究[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(9): 1742-1748.  
Xiong X L, Liu W Q, Jiang L H, et al. Slant-range visibility retrieve considering multiple-scattering effects[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2014, 25(9): 1742-1748.
- [28] 熊兴隆, 王婕, 刘遼, 等. 多次散射影响的激光雷达斜程能见度反演方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(4): 0429001.

- Xiong X L, Wang J, Liu K, et al. Lidar slant-range visibility retrieval method based on effect of multiple scattering[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(4): 0429001.
- [29] 邱金桓. 机场斜视视程的数值模拟实验及其计算公式[J]. *大气科学*, 1987, 11(4): 404-411.
- Qiu J H. Numerical experiment on slant visibility and its calculation formula[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1987, 11(4): 404-411.
- [30] 邱金桓, 黄其荣, 赵红接, 等. 激光探测机场斜视跑道视程的实验研究[J]. *大气科学*, 1988, 12(3): 292-300.
- Qiu J H, Huang Q R, Zhao H J, et al. An experimental study of airport-runway slant visual range measurement by lidar[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1988, 12(3): 292-300.
- [31] 王毅, 饶瑞中. 空间斜程能见度的影响因素分析[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(10): 945-950.
- Wang Y, Rao R Z. Slant visibility: multi-factor analysis[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2003, 15(10): 945-950.
- [32] Wang Y F, Jia L S, Li X X, et al. Measurement method for slant visibility with slant path scattered radiance correction by lidar and the SBDART model[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 837-853.
- [33] Wang Y F, Li X X, Qin Y D, et al. Investigation and analysis of actual atmospheric scattered radiance and slant visibility by two-wavelength Raman-Mie lidar[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 288: 108250.
- [34] 杜嘉敏, 王玉峰, 秦一丁, 等. 基于激光雷达和SBDART模式的大气散射辐射亮度计算[J]. *光学学报*, 2022, 42(12): 1201005.
- Du J M, Wang Y F, Qin Y D, et al. Calculation of atmospheric scattered radiance based on lidar and SBDART model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(12): 1201005.
- [35] 陆川, 刘文清, 王玉峰, 等. 斜程能见度计算中的天空背景辐射亮度仿真与分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1401001.
- Lu C, Liu W Q, Wang Y F, et al. Simulation and analysis of sky background radiance in slant visibility calculation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1401001.
- [36] Tao Z, McCormick M P, Wu D. A comparison method for spaceborne and ground-based lidar and its application to the CALIPSO lidar[J]. *Applied Physics B*, 2008, 91(3): 639-644.
- [37] Ismail S, Browell E V. Airborne and spaceborne lidar measurements of water vapor profiles: a sensitivity analysis[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(17): 3603-3615.
- [38] Magruder L, Neumann T, Kurtz N. ICESat 2 early mission synopsis and observatory performance[J]. *Earth and Space Science*, 2021, 8(5): e01555.
- [39] Winker D M, Vaughan M A, Omar A, et al. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(11): 2310-2323.
- [40] Baron P, Ishii S, Okamoto K, et al. Feasibility study for future spaceborne coherent Doppler wind lidar, part 2: measurement simulation algorithms and retrieval error characterization[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 2017, 95(5): 319-342.
- [41] 寇蕾蕾, 郝海阳, 林正健, 等. 星载主动遥感测云现状与展望[J]. *遥感学报*, 2023, 27(9): 2041-2059.
- Kou L L, Gao H Y, Lin Z J, et al. Status and prospect of cloud measurement by satellite active remote sensing[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(9): 2041-2059.
- [42] Winker D M, Hunt W H, McGill M J. Initial performance assessment of CALIOP[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(19): L19803.
- [43] Kanitz T, Ciapponi A, Mondello A, et al. ESA's lidar missions Aeolus and EarthCARE[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2020, 237: 01006.
- [44] 陈卫标, 刘继桥, 侯霞, 等. 大气环境监测卫星激光雷达技术[J]. *上海航天(中英文)*, 2023, 40(3): 13-20, 110.
- Chen W B, Liu J Q, Hou X, et al. Lidar technology for atmosphere environment monitoring satellite[J]. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2023, 40(3): 13-20, 110.
- [45] 高雪洁, 刘继桥, 樊纯臻, 等. 1.57  $\mu\text{m}$  IPDA 激光雷达云回波信号  $\text{CO}_2$  柱浓度测量研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(23): 2310001.
- Gao X J, Liu J Q, Fan C C, et al. Carbon dioxide column concentration measurement based on cloud echo signal of 1.57  $\mu\text{m}$  IPDA lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(23): 2310001.

## Research Progress of Laser Remote Sensing in Slant Visibility Measurements (Invited)

Wang Yufeng, Hua Dengxin\*

*Laser Radar Center of Remote Sensing of Atmosphere, School of Mechanical and Precision Instrument  
Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China*

### Abstract

**Significance** Visibility is a basic meteorological parameter and is regarded as a weather index to understand atmospheric stability and vertical structure. Unlike horizontal visibility, slant visibility is a crucial parameter that pilots are actually concerned about, and it directly determines the safety of aircraft take-off and landing in the aviation field. In addition, slant visibility is an important parameter for space target recognition and plays an important role in the field of weather analysis, sea, land, and air traffic, astronomical observation, sea fog warning, and so on. Therefore, slant visibility, as a highly concerned atmospheric optical and meteorological parameter in recent years, has shown important scientific research significance and application value in atmospheric research, civil aviation, space exploration aerospace, military, and other fields.

**Progress** Atmospheric visibility can be measured by visual methods or visibility instruments. Both the forward-scattering-type and the transmission-type visibility meters can measure horizontal visibility. However, they are unable to provide information on slant visibility.

With the development of lidar technology, few lidar visibility meters have appeared in recent years, with single-wavelength Mie-scattering lidar as the core, and two types of inversion algorithms have been developed. One is the slant visibility inversion method based on Koschmieder's visibility law, in which the measurement of slant visibility only depends on the inversion of atmospheric aerosol extinction coefficients; the other is the inversion method based on optical thickness, in which the atmospheric optical thickness obtained by multi-elevation angle lidar detection is used to estimate the slant visibility. However, the main limitation lies in the neglect of the influence of scattered radiance and the uniform path assumption. As a result, these inversion methods have certain inversion defects. In addition, previous research has begun to pay attention to the atmospheric scattered radiance. However, most of them focus on theoretical modeling and simulation analysis, and thus in-depth study and further exploration are greatly required.

To solve the difficulty of atmospheric scattered radiance, the research team of Xi'an University of Technology recently developed a new slant visibility measurement method by lidar and the radiative transfer model (Fig. 6). By taking full advantage of laser remote sensing, aerosol lidar detection was carried out with the high spatial-temporal resolution and high-precision, and the real-time aerosol information including optical, micro-physical, and scattering parameters was provided. The radiative transfer model realized the path distribution of actual atmospheric scattered radiance (Fig. 9), which fundamentally solved the current technical bottleneck of slant visibility measurements. Moreover, a reflectance measurement system was supplemented to provide the intrinsic contrast of the object and the background, and the slant visibility measurement considering the correction of atmospheric scattered radiance was ultimately achieved (Fig. 10).

**Conclusions and Prospects** We comprehensively review the main techniques and research progress of laser remote sensing in slant visibility measurements, and several slant visibility inversion methods are sorted out. The shortcomings and limitations of the existing techniques are investigated as well. In view of the difficulty of actual atmospheric scattered radiance, a new remote sensing technique combining lidar and the radiative transfer model is mainly introduced, which has effectively broken through the bottleneck of slant visibility measurements. In the future, with the development of satellite remote sensing technology, it is envisioned to achieve the global map of slant visibility by laser remote sensing technology.

**Key words** atmospheric optics; laser remote sensing; slant visibility; radiative transfer model; scattered radiance