

激光雷达斜程能见度的一种探测方法及其分析

陈 敏¹, 孙东松², 李洪敬¹, 沈法华¹, 夏海云¹

(1.苏州大学 物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006;

2.北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘要: 提出利用激光雷达多仰角探测方法对大气斜程积分能见度测量的方案。该方案以大气光学厚度替代传统的利用大气消光系数分布求解斜程能见度, 从而克服了在低能见度下, 由于大气多次散射, 斜程能见度难以测准的缺点, 提高了探测精度, 为飞机起飞着陆提供了较为准确的气象参数。利用 Monte-Carlo 方法模拟计算了 3 种大气消光分布情况下采用该方法测量的积分能见度。结果表明: 在激光探测区域内和垂直高度相同的大气消光分布均匀的假设条件下, 只要在设计激光雷达时, 恰当选择系统参数(如激光脉冲能量、积分累计时间、窄带滤光片带宽等)使得信噪比满足一定的条件, 该方法是可行的, 且能见度探测误差不超过 4.3%。

关键词: 斜程能见度; 激光雷达; 大气光学厚度; 大气消光

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2006)02-0156-05

Detective method and analysis of atmospheric slant visibility for lidar

CHEN Min¹, SUN Dong-song², LI Hong-jing¹, SHEN Fa-hua¹, XIA Hai-yun¹

(1.School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;

2.School of Instrument Science and Photo-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: A new detection method taking advantage of multi-elevation angles with lidar is presented for measuring atmospheric slant integral visibility. In this method, the extinction coefficient was replaced by optical depth in order to solve slant visibility. This method overcomes the defect wherein values of slant visibility are hard to detect precisely because of multi-scatter of atmosphere under low-visibility. The method also improves the precision of meteorological parameters for the take flying-off and landing of airplanes. Moreover, the Monte-Carlo method was used to simulate integral visibility measured by the above method on the three different conditions of atmospheric extinct distribution. The results show that if appropriate system parameters, such as laser pulse energy, integral accumulated time, narrowband light filter bandwidth, etc., are selected for a satisfactory signal-to-noise ratio, this method is valid and the error is less than 4.3%, providing the lidar is designed in the field of laser exploration as well as homogeneous

收稿日期: 2005-07-09; 修订日期: 2005-08-08

作者简介: 陈敏(1980-), 女, 江苏苏州人, 硕士生, 主要从事激光遥感测量技术的研究。

atmospheric extinct distribution.

Key words: Slant visibility; Lidar; Atmosphere optical depth; Atmosphere extinction

0 引言

激光雷达是一种工作在从紫外到红外光谱段的雷达系统, 由于其具有识别能力强, 测量精度高等优点, 而成为大气参数探测的一个有效工具。能见度, 特别是斜程能见度是大气参数测量中一个难以测得准的气象参数, 这个参数对于飞机的起飞着陆具有非常重要的意义。能见度一般定义为在一定的天气透明度下, 正常人眼能发现以水平天空为背景的黑色目标物(视场角大于 30°) 的最大距离^[1], 它取决于人眼的生理特点、目标物和背景物的光学特性、目标物和背景物与观测者之间大气气柱的光学特性以及大气消光系数的分布等因素。

在水平大气均匀的条件下, 水平能见度与消光系数的倒数成正比。而斜程能见度要复杂得多, 斜程方向上大气消光系数是变化的并存在多次散射效应等, 很难求得斜程能见度的普遍解析表达式。目前机场一般采用透射式跑道能见度激光测量仪测量斜程能见度^[2], 通过测量水平大气消光系数并代入普遍采用的经验公式得到的。

早在 1972 年, 中国科学院大气物理研究所的吕达仁、赵燕曾等人就提出了用激光雷达测定大气水平和斜程能见度的原理和方案^[3], 并在 1972~1977 年期间陆续进行了原理试验。结果发现, 该方案对于能见度低于 1 km 的天气是不适用的, 这是由于利用了激光雷达观测推算的大气消光系数垂直分布来确定斜程能见度。本文提出采用激光雷达多仰角方法探测斜程能见度, 无需将大气消光系数垂直分布求出, 直接利用斜程光学厚度进行计算。这样能够避免在低能见度下, 由于大气多次散射, 难以用激光雷达求得较远处的消光系数分布的缺点, 进而求得较准确的积分能见度。

1 激光能见度测量原理

1.1 水平能见度的测量^[4]

水平能见度的测量是以水平大气消光均匀, 且在

阳光或均匀的天空照明下为前提的。根据 Koschmieder 定律^[5]:

$$= \exp(-\omega V_h) \quad (1)$$

式中: V_h 是视觉反应阈值, 即人眼将目标物从背景中区别出来的最小亮度对比; V_h 是水平能见度; ω 是白光的大气消光系数。人眼正常视觉反应阈值 $V_h = 0.02$, 将此值代入公式 (1), 即可推导出水平能见度方程:

$$V_h = -\frac{\ln 0.02}{\omega} = \frac{3.912}{\omega} \quad (2)$$

由水平能见度方程可知, 只要水平方向的大气平均消光系数 ω 已知, 即可求取水平能见度。

1.2 斜程能见度的测量

斜程能见度的计算比水平能见度的计算复杂得多, 但可通过能见度定义推导出从空中斜视地面的斜程能见度方程:

$$\int_0^R (r) dr = \ln \left[\frac{B_t}{B_w(I_0, \phi_0, \theta_0, B_s, \phi_s)} \left(\frac{1 - \frac{B_t - B_g}{B_t} - 1}{\frac{B_t - B_g}{B_t}} + 1 \right) \right] A \quad (3)$$

式中: $B_t(I_0, \phi_0, \theta_0, B_s, \phi_s)$ 是目标物真亮度; B_g 是背景物真亮度; $B_w(I_0, \phi_0, \theta_0, B_s, \phi_s)$ 是大气气柱的真亮度;

$\int_0^R (r) dr$ 是从 0~R 路程上的大气光学厚度。由斜程能见度方程可知: 当斜程大气光学厚度等于 A 时, 相应的距离即为斜程能见度。利用激光雷达测得斜程方向的大气光学厚度, 再配合目标物、背景物和大气的

光学特性, 就可以由公式 (3) 求取斜程能见度。

1.3 斜程大气光学厚度的测量

假设在激光探测的区域内水平大气消光是均匀的, 脉冲激光雷达发射的两个不同仰角的激光(激光束与水平面夹角为 θ_1 和 θ_2), 其大气后向散射的回波信号(高度为 z) 所对应的激光大气回波功率分别满足激光雷达方程^[6,7]:

$$P_i(z, \theta_i) = \frac{C(z)}{z^2 \csc^2 \theta_i} \exp \left(-2 \csc \theta_i \int_0^z (z) dz \right) \quad (4)$$

$$P_2(z, \theta_2) = \frac{C}{z^2 \text{csc}^2 \theta_2} \exp \left(-2 \text{csc} \theta_2 \int_0^z (z) dz \right) \quad (5)$$

式中: C 是与激光雷达系统和结构有关的参数; θ_1 是包含大气分子和气溶胶粒子的后向散射系数; θ_2 是包含大气分子和气溶胶粒子大气消光系数。采用光子探测器单波长单脉冲激光雷达系统, 其接收到距离 r 处的光电子数 N(r) 与回波功率 P(r) 之间的关系是:

$$N(r) = \frac{P(r)}{hc} \eta \quad (6)$$

式中: η 是光电子探测器的量子效率; λ 是激光发射波长; h 是 Planck 常数; c 是光速; t 是激光雷达的采集时间。由公式(4)、(5)和(6)可获得垂直方向从地面至高度 z 的大气光学厚度:

$$\int_0^z (z) dz = \frac{\ln \frac{\text{csc}^2 \theta_1 N_1(z, \theta_1)}{\text{csc}^2 \theta_2 N_2(z, \theta_2)}}{2(\text{csc} \theta_2 - \text{csc} \theta_1)} \quad (7)$$

式中: $N_1(z, \theta_1)$ 和 $N_2(z, \theta_2)$ 分别表示仰角为 θ_1 和 θ_2 两个斜程路径上接收到的某一高度 z 处的光电子数。根据公式(7), 可求得仰角为 θ_1 时斜程光学厚度为:

$$\int_0^R (r) dr = \text{csc} \theta_1 \int_0^z (z) dz \quad (8)$$

式中: r 表示仰角为 θ_1 时斜程路径上的距离。

2 模拟分析

根据激光雷达的应用背景, 文中采用了 3 种大气消光模式^[8]: 从弱大气消光到强大气消光、局部的强大气消光和从强大气消光到弱大气消光。选取最大和最小的大气消光系数分别为 7.824/km 和 0.782/km, 对应的水平能见度分别为 0.5 km 和 5 km。模拟采用的激光器波长为 532 nm (Nd:YAG), 脉冲重复频率为 10^6 Hz, 单个脉冲的能量为 10 μ J。

(1) 模式 1 从弱大气消光到强大气消光, 如图 1(a) 所示, 图中实线和虚线分别表示仰角为 θ_1 和 θ_2 时的大气消光分布 (文中模拟 θ_1 为 15°, θ_2 为 25°)。根据激光雷达系统参数^[9] (如表 1 所示), 利用激光雷达公式(4)和(5)以及光电子数与回波功率之间的关系式(6), 可得回波信号的模拟计算结果, 如图 1(b) 所示, 图中 r 是激光脉冲的斜程传输距离, n_{11} 和 n_{22} 是探测仰角分别为 θ_1 和 θ_2 时回波信号的光电子数。

表 1 直接接收激光雷达系统参数

Tab.1 Parameters of direct detection lidar

Item	Parameter	
Transmitter	Maximum range	5 000 m
	Laser wavelength	532 nm(Nd:YAG)
	Pulse energy	10 μ J/pulse
	Pulse width	12 ns
	Optical efficiency	95%
Receiver	Optical efficiency	90%
	Telescope diameter	200 mm
	Interference filter	0.1 nm@1 064 nm
Detector	Quantum efficiency	20%
	Dark count	50 c/s

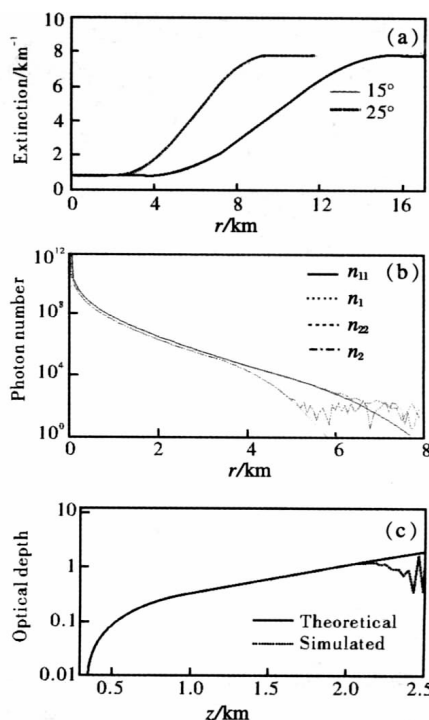


图 1 模式 1 的模拟结果

Fig.1 Simulated results of model- 1

由于系统噪声或大气湍流的起伏, 实际接收信号不是一个光滑的曲线分布, 而是含有各种噪声在内的信号, 这些噪声包括背景噪声、探测器的暗电流噪声和信号的散粒噪声等, 这些噪声将对反演的结果产生一定的影响, 为了使反演结果更接近于真实值, 在回波信号中加入了采用 Monte-Carlo 方法模拟的噪声。图 1(b)中的 n_1 和 n_2 是加入模拟噪声后的回波光电子数。根据上述大气消光分布下得到的激光雷达接收信

号, 利用垂直大气光学厚度公式 (7), 可以获得垂直方向从地面至高度 z 的大气光学厚度, 如图 1(c) 所示, 实线和虚线分别表示理论 (未加噪声) 与模拟 (含有噪声) 的光学厚度。可以看出, 在信噪比较高时 (垂直高度在 0~1.75 km 左右), 两条曲线比较吻合, 随着大气消光系数以及激光传输距离的不断增大, 大气透过率逐渐下降, 在 2.1 km 处, 信噪比降至 0.12% 时 (信号几乎已被噪声湮没), 公式 (7) 的解很不稳定, 表现出很大的起伏误差, 与未加噪声的光学厚度偏离较大。

(2) 模式 2 局部的强大气消光, 如图 2(a) 所示, 该模式下反演得到的垂直大气光学厚度与模式一的结果相似, 1.8 km 前公式 (7) 的解比较稳定, 之后随着信噪比的降低, 解变得发散。

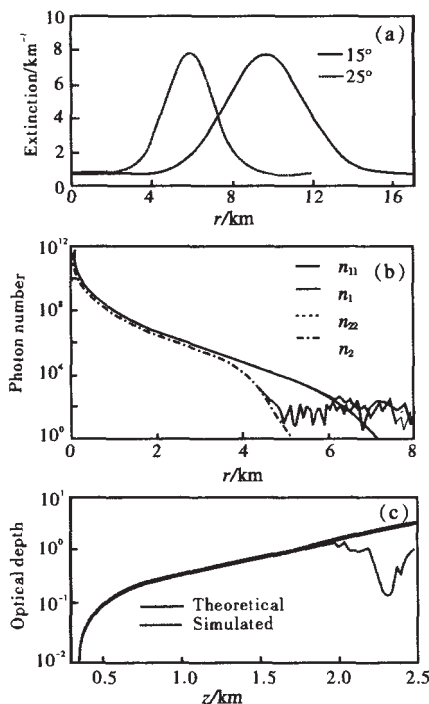


图 2 模式 2 的模拟结果
Fig.2 Simulated results of model-2

(3) 模式 3 从强大气消光到弱大气消光, 如图 3(a) 所示。由于近地面消光系数很大 (相当于薄雾的消光), 大气透过率明显下降, 垂直高度在 0.4 km 左右, 信噪比已降至 0.12%, 见图 3(c)。但在 0.3 km 之前, 信噪比较高, 斜程光学厚度的模拟值与理论值仍然很接近, 误差不超过 4.3%。说明在信噪比满足一定条件下, 该方法对于低能见度天气仍可行。

利用公式 (8), 可得到任意仰角 θ 时的斜程光学

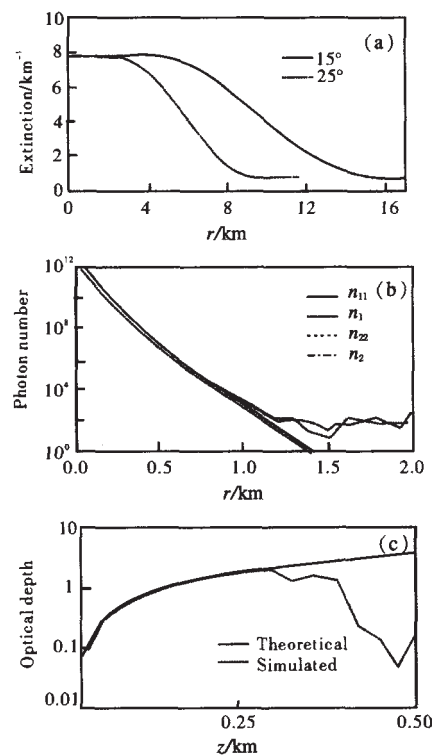


图 3 模式 3 的模拟结果

Fig.3 Simulated results of model-3

厚度。模拟了上述 3 种消光模式下仰角为 15° 时斜程路径上的大气光学厚度, 如图 4 所示, 同时结合公式 (3), 假定 A 已知, 则在曲线上可找到一点, 其纵坐标为值 A , 对应的横坐标就是要求的斜程能见度。文中在推算能见度时, 取 A 为 3.4 (当观测员处于高速运动时 A 比 3.4 小得多)^[10]。通过图 4 看出在信噪比降得较低之前, 均能在虚线上找到一点 P , 其 A 值为 3.4, 对应的横坐标分别是 5.10、4.87、0.51 km, 这就是本文模拟的 3 种模式下的斜程能见度。

但由于 B_s 、 B_g 和 B_w 随太阳直接辐射和散射辐射强度、视线与太阳的相对位置低空大气光学特性而变, A 不是常数, 因而同一时刻、同一消光系数, 不同方位的能见度可有显著差异, 但可通过实际测量 B_s 、 B_g 和 B_w , 求出 A 值, 这样能提高能见度计算结果的精度。

仰角 θ_1 和 θ_2 之间夹角的大小能够任意改变, 这对求解能见度的影响很小, 误差不超过 4%。本文计算斜程能见度时, 采用仰角 θ 为 15°, 这是由于飞行员报告能见度时视线俯角都比较低, 一般在 15° 以下, 符合实际需要。

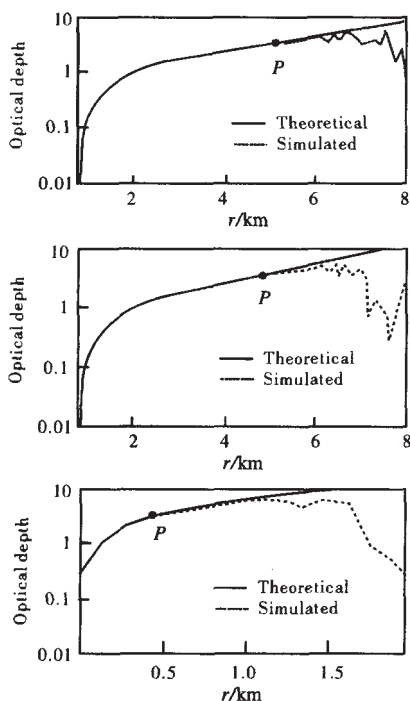


图 4 3 种模式下的斜程大气光学厚度
Fig.4 Slant optical depth of three models

从前面的模拟结果可以看出,地面水平能见度在 0.5~5 km 左右时,根据多仰角法探测斜程能见度的效果是较为理想的。对于能见度低于 0.5 km 的天气情况,只要激光雷达的系统参数(激光脉冲能量,脉冲数等)达到一定水平,探测的信噪比满足一定的条件,该方法同样可行。

3 结论

文中模拟由激光雷达两个仰角时探测的大气回波信号,求取斜程能见度的方法虽比较简单,但可能因实际水平大气不均匀而使探测结果误差较大,为此,可以采用激光雷达多仰角探测大气回波的大量观测值统计平均的方法,以提高探测精度。

民航机的临界着陆条件约在离地 100~200 m 斜程能见度 1~2 km 范围内,由上述模拟可以预料激光探测斜程能见度可能起到的重要作用。如果激光雷达采用数据处理系统,直接输出能见度的实时探测结果,则可作为能见度的客观探测方法应用于实际工作中。

参考文献:

- [1] YAN Ning, XU Rong-pu. A light laser multipurpose test instrument for detecting visibility and target range[J]. Laser Technology (阎宁, 徐容甫. 一种激光便携式大气能见度、目标距离综合测试仪. 激光技术), 1992, 16(3): 1299-1302.
- [2] SHI De-heng. Study on transmission laser detection instrument for runway visibility[J]. Laser Technology (施德恒. 一种透射式跑道能见度激光测量仪. 激光技术), 2003, 27(5): 419-422.
- [3] LÜ Da-ren, WEI Chong, ZHANG Jian-guo. Laser remote sensing of visibility[J]. Atmospheric Sciences (吕达仁, 魏重, 张建国. 激光探测能见度的实验研究. 大气科学), 1976, 55.
- [4] COHEN A. Horizontal visibility and the measurement of atmosphere optical depth of lidar[J]. Appl Opt, 1985, 24(11): 1638-1643.
- [5] LENSCHOW D H, VIEZEE V, LEWIS R, et al. The detection of atmospheric boundary layer [M]. Beijing: Meteorological Press (LENSCHOW D H, VIEZEE V, LEWIS R, et al. 大气边界层探测. 北京: 气象出版社), 1990: 104-122.
- [6] JORGENSEN H E, MIKKELSEN T, JUERGEN S, et al. Lidar calibration experiments[J]. Appl Phys B, 1997, 64: 355-361.
- [7] YANG Yang, ZHAO Yuan, QIAO Li-jie. Atmosphere transmission property of 1.06 μm laser[J]. Infrared and Laser Engineering (杨洋, 赵远, 乔立杰, 等. 1.06 μm 激光的大气传输特性. 红外与激光工程), 1999, 28(1): 15-19.
- [8] YANG Zhao, SUN Dong-song, LI Qiang. Retrieval of atmosphere extinction coefficient for imaging laser radar[J]. Infrared and Laser Engineering (杨昭, 孙东松, 李强. 成像激光雷达大气消光系数的反演方法. 红外与激光工程), 2004, 33(3): 239-242.
- [9] XUE Guo-gang, SUN Dong-song, YANG Zhao. Modeling and performance simulation of direct detection laser radar[J]. Infrared and Laser Engineering (薛国刚, 孙东松, 杨昭. 直接探测激光雷达模型及其性能模拟. 红外与激光工程), 2003, 32(3): 244-247.
- [10] ZHAO Yan-zeng, TAO Li-jun, HAO Nan-jun. The preliminary study on laser remote sensing of slant visibility[J]. Atmospheric Sciences (赵燕曾, 陶丽君, 郝南军. 激光测斜视能见度的初步试验. 大气科学), 1980, 4(2): 175.