

机载双波长米散射激光雷达大气回波信号与 信噪比的模拟计算

季承荔, 周 军

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 为了研究机载双波长米散射激光雷达的技术参数对其探测性能的影响, 为该激光雷达的设计与研制提供理论分析依据, 使用合适的大气消光模式和机载米散射激光雷达方程, 对其接收的大气后向散射回波信号以及信噪比进行了模拟计算, 讨论了几何重叠因子和不同消光模式对回波信号的作用, 分析了激光脉冲能量、累积激光脉冲数、接收视场、滤光片半宽度等技术参数对信噪比的影响。结果表明设计的机载激光雷达完全可以进行 10 km 高度以下大气气溶胶和云的探测。

关键词: 机载激光雷达; 模拟计算; 回波信号; 信噪比

中图分类号: P412

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2008)04-0250-12

Simulation of Signal and Signal-to-noise Ratio Received by an Airborne Dual-wavelength Mie Lidar

Ji Cheng-li, ZHOU Jun

(Center for Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Hefei 230031, China)

Abstract: For studying the effects of technical parameters of the airborne dual-wavelength Mie lidar on its detection performance, offering theoretic evidence for the lidar's design and development, the airborne Mie scattering lidar equation, appropriate atmospheric extinction model, as well as the design parameters of the lidar are used to calculate atmospheric backscattering signal profiles and the signal-to-noise ratio(*SNR*) profiles received by the lidar. The effects of overlap function and different atmospheric models on the signal are discussed, and the influences of some technical parameters of the lidar on the *SNR* are analyzed, such as laser pulse energy, number of accumulated laser pulses, field of view, and filter bandwidth. The results show that the lidar with these design parameters is capable of detecting aerosol and clouds below 10 km altitude.

Key words: airborne lidar; simulation; signal; signal-to-noise ratio

收稿日期: 2008-05-14; 修改日期: 2008-05-22

E-mail: jjcl@mail.ustc.edu.cn

1 引言

大气气溶胶和云是两个影响气候变化和大气环境的重要因子。激光雷达以其精细的垂直分辨率、时间上可连续测量和较高的测量精度成为探测大气气溶胶和云的最有效手段之一^[1-3]。地基单站激光雷达仅能反映其上空小范围内的信息, 而机载大气探测激光雷达能在航行区域内快速连续地对大气气溶胶和云进行探测, 获得它们三维空间分布特征的定量数据。它可用于同一地区的重复探测及不同地区的探测, 包括海洋、高山及荒无人烟的沙漠地带等, 因此在探测数据和处理方法上具有一致性和可比性。而且它还是星载大气探测激光雷达技术的验证平台。

美国和西欧等发达工业国家已经研制出各种类型的机载大气探测激光雷达^[4-8]。我国起步晚一些, 2005 年中国科学院安徽光学精密机械研究所研制了机载单波长米散射激光雷达, 并且成功地在青岛地区开展了大气气溶胶探测方面的实验

研究^[9]。目前, 在国家重大科技基础设施建设项目—航空遥感系统中, 该所承担了机载双波长偏振米散射激光雷达的研制任务, 用于进一步的探测研究。

机载大气探测激光雷达的设计应以大气气溶胶和云的探测性能为依据, 要符合探测对系统信噪比的要求, 要满足飞机平台在体积、重量和功耗等各方面条件的约束。为了研究机载双波长米散射激光雷达的技术参数对其探测性能的影响, 为该激光雷达的设计与研制提供理论分析依据, 本文对其回波信号与信噪比进行了模拟计算。

2 机载激光雷达性能指标、技术参数指标和大气消光模式

2.1 机载激光雷达的性能指标

研制机载双波长偏振米散射激光雷达是为了获得航行区域内大气气溶胶和卷云的光学性质及其结构的空分布。表 1 列出了它的各项性能指标。

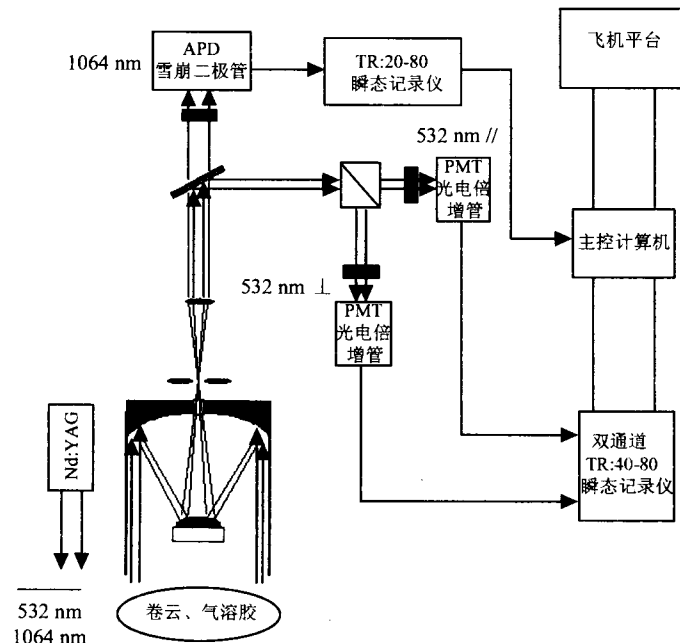


图 1 机载双波长偏振米散射激光雷达总体结构

Fig.1 Overall structure of airborne dual-wavelength polarization Mie lidar

表 1 机载双波长偏振米散射激光雷达性能指标

Table 1 Performance of airborne dual-wavelength polarization Mie lidar

Item	Performance
Backscattering coefficient of aerosol	vertical distributing
Range of backscattering coefficient	$10^{-5} \sim 10^{-2} \text{km}^{-1} \text{Sr}^{-1}$
Relative error of backscattering coefficient	10~20%
Aerosol layer, atmospheric boundary layer	$\pm 30 \text{ m}$
Height of cirrus's top, bottom and peak	$\pm 30 \text{ m}$
Relative error of sand and cirrus's depolarization ratio	10%
Range of detect altitude	10 km~ground surface
Vertical/horizontal resolution	30 m/400 m

2.2 机载激光雷达的总体结构和技术参数

根据上述探测性能指标,设计了该激光雷达的总体结构和主要的技术参数,它们分别由图 1 和表 2 所示。

2.3 机载双波长米散射激光雷达方程

机载激光雷达接收到的距离 r 处的大气在波长 λ 的后向散射回波信号功率 $P(r, \lambda)$ 和光电子数 $N_s(r, \lambda)$ 由 (1) 式表示^[10]

$$\begin{cases} P(r, \lambda) = P_0(\lambda)C(\lambda)\eta(r)r^{-2}[\beta_a(z, \lambda) + \beta_m(z, \lambda)]T_a^2(z, z_L, \lambda)T_m^2(z, z_L, \lambda) \\ N_s(r, \lambda) = \frac{\xi(\lambda)\lambda}{hc}P(r, \lambda)\Delta t \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $r = z_L - z$, z_L 为机载激光雷达高度 (km); z 为被探测的大气高度 (km); $P_0(\lambda)$ 是激光发射功率 (W); $C(\lambda)$ 是激光雷达系统常数 ($\text{km}^3 \text{Sr}$); $\eta(r)$ 是几何重叠因子; $\beta_a(z, \lambda)$ 和 $\beta_m(z, \lambda)$ 分别是大气气溶胶和空气分子后向散射系数 ($\text{km}^{-1} \text{Sr}^{-1}$); $T_a(z, z_L, \lambda) = \exp[-\int_z^{z_L} \alpha_a(z', \lambda)dz']$ 是激光雷达至高度 z 处之间大气气溶胶对波长 λ 的透过率; $T_m(z, z_L, \lambda) = \exp[-\int_z^{z_L} \alpha_m(z', \lambda)dz']$ 是相应的空气分子的透过率; $\alpha_a(z, \lambda)$ 和 $\alpha_m(z, \lambda)$ 分别为大气气溶胶和空气分子的消光系数 (km^{-1}); $\xi(\lambda)$ 是信号探测器的量子效率; h 是普朗克常数 ($6.626276 \times 10^{-34} \text{ J s}$); c 为光速 (m/s); $\Delta t = 2\Delta r/c$

是信号的采集时间 (s); Δr 为垂直距离分辨率 (km)。

机载激光雷达除了接收大气对激光的后向散射光以外,还同时接收机下大气散射的天空背景光。后者可表示为^[11]

$$N_b(\lambda) = \left[\frac{\xi(\lambda)\lambda}{hc} \right] P_b(\lambda) \pi \left(\frac{\theta}{2} \right)^2 \Delta\lambda(\lambda) A_r T_r \Delta t, \quad (2)$$

式中, $N_b(\lambda)$ 是激光雷达接收天空背景光在波长 λ 的光电子数; θ 是望远镜的接收视场 (rad); $\Delta\lambda(\lambda)$ 是中心波长为 λ 的滤光片半宽度 (nm); A_r 是望远镜的接收面积 (m^2); T_r 是接收光学单元的透过率; $P_b(\lambda)$ 是在波长 λ 的天空背景辐射光亮度

表 2 机载双波长偏振米散射激光雷达技术参数

Table 2 Technical parameters of airborne dual-wavelength polarization Mie lidar

Laser transmitter	
laser/wavelength	Nd:YAG/532,1064 nm
pulse energy	100 mJ
pulse repetition frequency	30 Hz
expansion ratio of expander	5 X
transmission	0.6
Receiving optics	
telescope/diameter	Cassegrain/200 mm
field of view	1 mrad
overlap function	1.5 km
filter bandwidth	0.3 nm/0.5 nm
transmission	0.1
Signal detection and acquisition	
signal detector	PMT(532 nm)/ APD(1064 nm)
quantum efficiency	11% /38%
dark counts	3000 CPS
signal acquisition	transient recorder
sample rate	5 Hz
accuracy	12 bits
Airplane	
altitude	10 km
velocity	100 m/s

($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$), 该值与机载激光雷达探测时的太阳高度角、地表反照率以及大气气溶胶和云的分布状况等大气参数有关。根据 MODTRAN 大气模式, 选取中纬度地区城市气溶胶, 能见度 5 km, 太阳高度角 20° , 计算得到 $P_b(532\text{ nm})=0.12\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$, $P_b(1064\text{ nm})=0.068\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ 。在地基激光雷达接收天空背景辐射光的研究中, 一般取 $P_b(532\text{ nm})=0.2\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$, $P_b(1064\text{ nm})=0.08\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$, 夜晚均取零^[12-13]。

由于上述两组数值比较接近, 而且机载激光雷达对地大气探测时接收到的是机下大气层对天空背景辐射的散射光, 其值应该比地基激光雷达地对空探测时接收天空背景辐射光小^[14]。但是, 为了给信噪比的计算留有一定的余地, 本文在模拟计算中仍然使用了后一组数值。

2.4 大气消光模式

大气分子瑞利散射的消光模式可以由 (3) 式表示^[15]

$$\begin{cases} \beta_m(z, \lambda) = 1.54 \times 10^{-3} \exp(-\frac{z}{7}) (\frac{532}{\lambda})^4 \\ \alpha_m(z, \lambda) = \beta_m(z, \lambda) \frac{8}{3} \pi \end{cases}, \quad (3)$$

大气气溶胶粒子米散射的消光模式可以由 (4) 式表示^[15]

$$\begin{cases} \beta_a(z, \lambda) = \left\{ 2.47 \times 10^{-3} \exp(-\frac{z}{2}) + 5.13 \times 10^{-6} \exp\left[-\frac{(z-20)^2}{36}\right] \right\} \frac{532}{\lambda} \\ \alpha_a(z, \lambda) = \beta_a(z, \lambda) \times S_a(\lambda) \end{cases}, \quad (4)$$

式中, $S_a(\lambda)$ 是大气气溶胶在波长 λ 的消光后向散射比, 它依赖于发射的激光波长、气溶胶的尺度谱分布和折射率指数, 数值一般在 20 Sr 到 70 Sr 之间. $\lambda=532$ nm 时, $S_a(532 \text{ nm})=50$ Sr; $\lambda=1064$ nm 时, $S_a(1064 \text{ nm})=40$ Sr^[16]. 其他各项意义如前所述.

3 大气后向散射回波信号的模拟计算

3.1 模拟算法结果的验证

为了验证模拟计算结果的合理性与可靠性, 选取中科院安徽光机所研制的机载单波长 (532 nm) 米散射激光雷达的技术参数, 模拟计算了该激光雷达在高度 3.6 km 时接收的大气后向散射信号廓线, 将模拟计算的结果与该激光雷达于 2005 年 11 月 11 日 15: 58 时在青岛地区探测的大气后向散射信号廓线进行了比较^[9], 图 2 给出二者的比较结果.

从图 2 可以看出, 模拟计算与实际探测的大气后向散射信号廓线的变化趋势基本上是一致的, 二者在 2.8 km 高度以下的数值上呈现出一定的差别. 这种差别是可以理解的, 模拟计算使用的大气气溶胶消光模式毕竟是在大量探测结果统计的基础上建立的一种通用模式, 它不可能与某一局地某一时刻大气气溶胶粒子消光特性完全相符, 尤其是在对流层的低层大气层里, 常呈现气溶胶

粒子层 (elevated aerosol layer) 的分层结构, 而模式的廓线通常是比较平滑的. 因此, 如果模拟计算与实际探测的结果具有一致的信号廓线变化趋势和较为接近的数值量级, 可以表明模拟计算的方法是正确可行的, 所得的结果是比较合理可靠的.

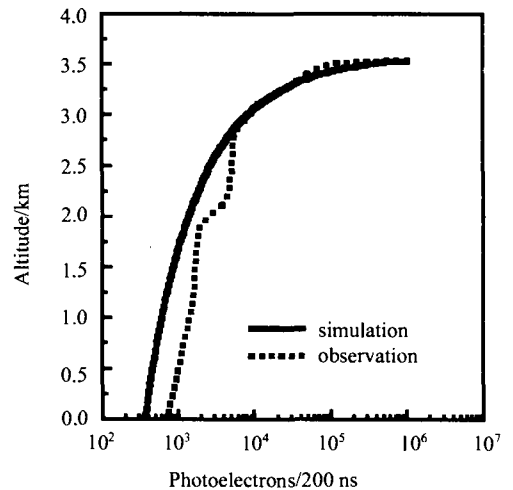


图 2 模拟信号与实测信号的比较

Fig.2 Comparison of simulation signal with lidar observation signal

3.2 机载激光雷达接收的大气回波信号

图 3 分别给出了机载激光雷达在夜晚和白天的接收的 532 nm 和 1064 nm 波长的大气回波信号廓线.

从图 3 中可以看出, 处于 10 km 高度处的机载激光雷达接收的 532 nm 和 1064 nm 波长的大

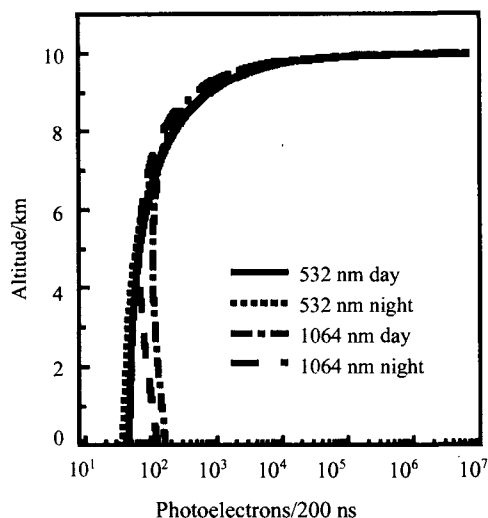


图 3 机载激光雷达接收的 532 nm 和 1064 nm 波长的大气回波信号

Fig.3 The received signal for airborne lidar at 532 nm and 1064 nm wavelength

气回波信号廓线具有以下特点:

1) 在距离激光雷达 3 km 以内的近距离区域, 大气气溶胶和空气分子浓度均很低, 它们的后向散射系数 $\beta_a(z, \lambda)$ 、 $\beta_m(z, \lambda)$ 都比较小; 而近距离 r^2 因子的增加对大气回波信号的衰减起着主导作用, 所以在此高度范围内大气回波信号急速减弱接近 5 个数量级。随着探测高度愈接近地面, 大气气溶胶和空气分子浓度逐渐增高, 它们的后向散射系数逐渐增大, 而且远距离 r^2 因子的增加对大气回波信号衰减的影响也小了, 这就导致大气回波信号减弱的幅度变得缓慢, 从 7 km 高度至地面, 532 nm 波长大气回波信号仅仅衰减半个数量级左右。

2) 在高度 5 km 以下的区域, 随着距离激光雷达越来越远, 1064 nm 波长大气回波信号强度反而越来越大。造成这种现象的主要原因是: 1064 nm 波长的大气气溶胶和空气分子消光系数要比 532 nm 波长的消光系数小 (从大气消光模式 (3) 式、(4) 式可以得知), 相应的在同样探测距离的大气透过率就会比较高。这样, 该波长的大气回

波信号衰减的程度也比较小, 随着探测高度愈接近地面, 大气气溶胶和空气分子浓度逐渐增高, 它们的后向散射作用又随之增强, 导致该波长的大气回波信号廓线在低空略有增大。

3) 机载激光雷达接收的大气回波信号的动态范围较地基激光雷达小。地基激光雷达是地对空大气探测, 其接受地面至 10 km 高度范围的大气回波信号的动态范围高达 6 个多数量级。相比之下, 处于 10 km 高度的机载激光雷达的空对地大气探测, 其接受 10 km 至地面高度范围的大气回波信号的动态范围为 5 个数量级, 这对于信号的探测与采集是比较有利的。

4) 无论是 532 nm 波长还是 1064 nm 波长, 机载激光雷达白天接收的大气回波信号仅仅比夜晚略大一点。这是由于在机载激光雷达下面的近距离区域里, 大气气溶胶和分子的浓度低, 这种弱消光导致激光的大气透过率高, 激光雷达接收的大气后向散射回波信号保持着较强的势头, 天空背景光对接收总的大气回波信号的影响甚微。以 532 nm 波长为例, 距离飞机下方 1 km 处, 天空背景光的光电子数仅占总的大气回波信号的 1.15%; 而随着探测高度接近地面, 其接收的大气后向散射信号虽然减弱了不少, 但是衰减的幅度却在变慢, 在这种情况下, 天空背景光对其接收总的大气回波信号的影响也不会显著, 同样以 532 nm 波长为例, 在距离地面 1 km 处, 天空背景光的光电子数占总的大气回波信号的 18.42%。由此可见, 天空背景光对整条大气回波信号廓线的影响都不是太大。

3.3 几何重叠因子

设计的机载激光雷达为一双轴系统, 存在几何重叠因子 $\eta(r)$ 。这是激光雷达一个很重要的系统参数, 合适的几何重叠因子可以有效地减小接收的大气回波信号的动态范围, 防止近距离强的大气后向散射光引起信号探测器的饱和。

图 4(a) 显示的是模拟计算使用的机载激光雷

达的几何重叠因子,可以看出,它在距离机载激光雷达 500 m 处的值不到 0.5,到了 1.5 km 以远才为 1。图 4(b) 则显示出该几何重叠因子对机载激光雷达接收的大气回波信号的影响。

从图 4(b) 中可以看到,如果机载激光雷达没有几何重叠因子,即 $\eta(r)$ 在整个探测距离上一直为 1,则 532 nm 波长大气回波信号的动态范围有 5 个数量级;如果几何重叠因子 $\eta(r)$ 在距离激光

雷达 r 为 1.5 km 以远才为 1,则大气回波信号动态范围缩小到 2 个多数量级。这样,对于机载激光雷达,使用采集精度 12 bits 以上的瞬态记录仪可以实现对大气回波信号的采集。

3.4 不同大气消光模式计算结果的比较

为了分析机载激光雷达在不同大气气溶胶消光廓线下的探测能力,在机载激光雷达技术参数和大气分子消光模式保持不变的情况下,选取了

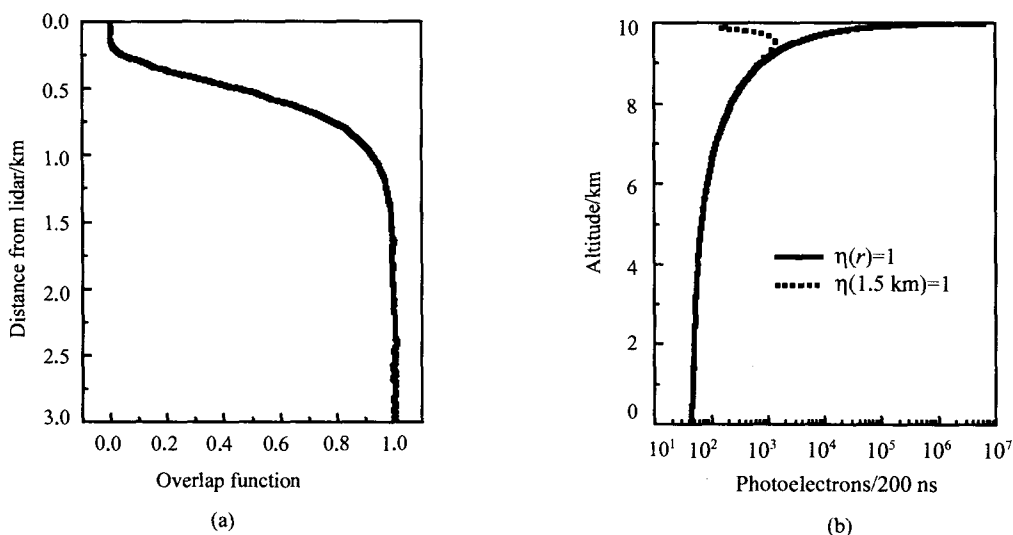


图 4 模拟计算使用机载激光雷达的几何重叠因子 (a),
该几何重叠因子对机载激光雷达接收的大气回波信号的影响 (b)

Fig.4 (a) The overlap function used in simulation for airborne lidar (b) the effect of overlap function on the received signal for airborne lidar

三种不同的大气气溶胶消光模式,对机载激光雷达接收的大气后向散射回波信号廓线进行了模拟计算。

第一种模式即 2.3 节的 (4) 式。该模式是星载

激光雷达进行全球大气气溶胶与卷云探测的模拟计算中使用的^[17]。

第二种模式是 Spinhirne 的大气气溶胶消光模式^[13],由 (5) 式表示

$$\begin{cases} \alpha(z) = \frac{\alpha_0(1+a)^2 \exp(\frac{z}{b})}{[a + \exp(\frac{z}{b})]^2} + \frac{f(1+a')^2 \exp(\frac{z}{b'})}{[a' + \exp(\frac{z}{b'})]^2} \\ \beta(z) = \frac{\alpha(z)}{S_a} \end{cases} \quad (5)$$

式中 α 、 β 和 z 的意义同前, 各项常数取值分别为: $\alpha_0=0.025 \text{ km}^{-1}$, $a=0.4$, $a'=2981$, $b=1.6 \text{ km}$, $b'=2.5 \text{ km}$, $f=1.5 \times 10^{-7}$; 对于 532 nm , 对流层气溶胶消光后向散射比 S_a 取 30 Sr 。在边界层 $0\sim 1 \text{ km}$ 处, $\alpha(z) = \alpha(z) + 0.05 \text{ km}^{-1}$ 。

该模式应用于地基微脉冲激光雷达 (micro pulse lidar, MPL) 设计时的模拟计算。目前, 微脉冲激光雷达已在全球建网 (micro pulse lidar net, MPLNET)。

第三种模式使用的是我国安徽省合肥地区 1997 年 6 月至 2000 年 8 月 L300 激光雷达测量的近 400 天平均的 532 nm 波长对流层气溶胶消光系数垂直廓线。它可以代表中纬度地区大气气溶胶消光的垂直分布状况。

从图 5(a) 可以看出, 第一种大气模式和合肥地区激光雷达测量的大气气溶胶消光廓线是比较接近的, 在 6 km 以上的高空和近地面处, 激光雷达测量的结果要大一些; 而 Spinhirne 模式的大气气溶胶消光系数比上述两种模式要偏小, 而在地面至 1 km 高度范围里特别加入的边界层气溶胶

消光与上述两种模式的结果比较接近。

图 5(b) 表明, 对这三种大气气溶胶消光模式, 模拟计算的机载激光雷达接收的大气后向散射回波信号相互间总体趋势是一致的, 信号动态范围都在设计的探测能力之内, 表明这台机载激光雷达可以满足不同气溶胶消光分布情况下的大气回波信号的接收。同时, 三条大气回波信号廓线的数值由于大气气溶胶消光廓线的不同而又具有差异, 说明该激光雷达对不同的气溶胶消光廓线具有区分能力。

4 回波信号的信噪比

4.1 机载激光雷达探测信号的信噪比公式

机载激光雷达探测大气回波信号的信噪比可由 (6) 式表示^[18]

$$SNR(r, \lambda) = \frac{N_s(r, \lambda)}{\sqrt{N_s(r, \lambda) + 2[N_b(\lambda) + N_d]}} \sqrt{M}, \quad (6)$$

式中: $N_s(r, \lambda)$ 是机载激光雷达接收的大气后向散射回波光电子数, 可由 (1) 式计算得到; $N_b(\lambda)$

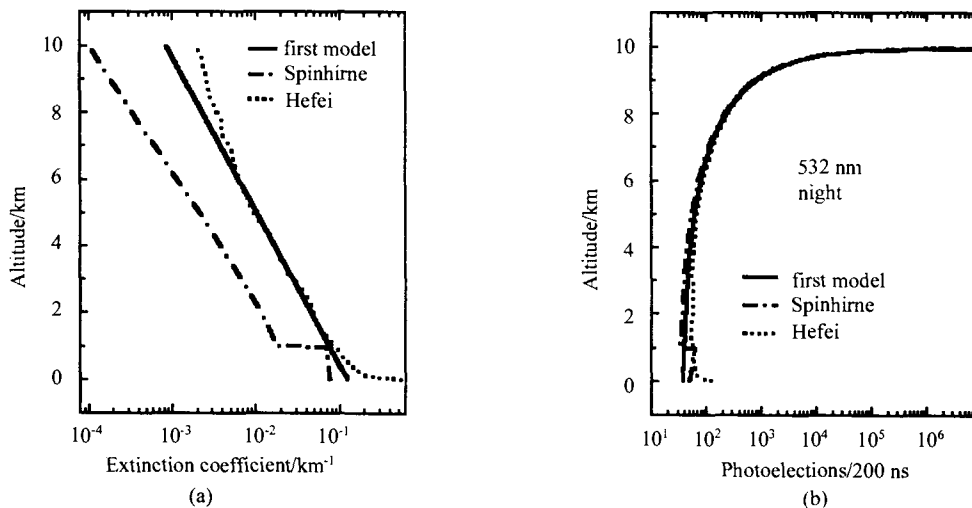


图 5 三种大气气溶胶消光模式 (a) 及其计算的大气回波信号廓线 (b)

Fig.5 (a) Comparison of the three different atmospheric models (b) comparison of the calculated signal by three different atmospheric models

是波长 λ 的天空背景光, 可由 (2) 式计算得到; $N_d = CPS \cdot \Delta t^{[1]}$ 是信号探测器产生的暗计数; CPS 是探测器的暗计数, 由表 2 给出; M 是获得一条大气回波信号廓线累积的激光脉冲数, 由表 2 给出。

(6) 式表明, 大气后向散射回波信号 $N_s(r, \lambda)$ 愈强, 天空背景光 $N_b(\lambda)$ 愈弱, 探测器的暗计数 CPS 愈低, 累积的激光脉冲数 M 愈多, 其探测的该距离处的大气回波信号的信噪比就愈高。

4.2 信噪比的计算结果

机载激光雷达探测 532 nm 和 1064 nm 两个波长大气后向散射回波信号的信噪比廓线分别由图 6(a) 和图 6(b) 给出。

从图 6 中可以看到, 无论是夜晚还是白天, 两

个波长信噪比廓线的变化趋势与它们的大气后向散射回波信号廓线的变化趋势基本相同, 说明在机载激光雷达空对地的大气探测中, 大气对激光的后向散射回波信号是控制信噪比的主要因子, 天空背景光和探测器的暗计数对信噪比的影响不大。

对表 2 列出技术参数的机载激光雷达, 在从 10 km 高度至地面的整个探测范围里, 两个波长大气回波信号的信噪比都比较高。即使到了近地面, 532nm 波长的信噪比在 50 以上, 1064 nm 波长的信噪比在 60 以上。因此, 这样配置的机载激光雷达是能够进行 10 km 以下大气气溶胶和云的探测的。

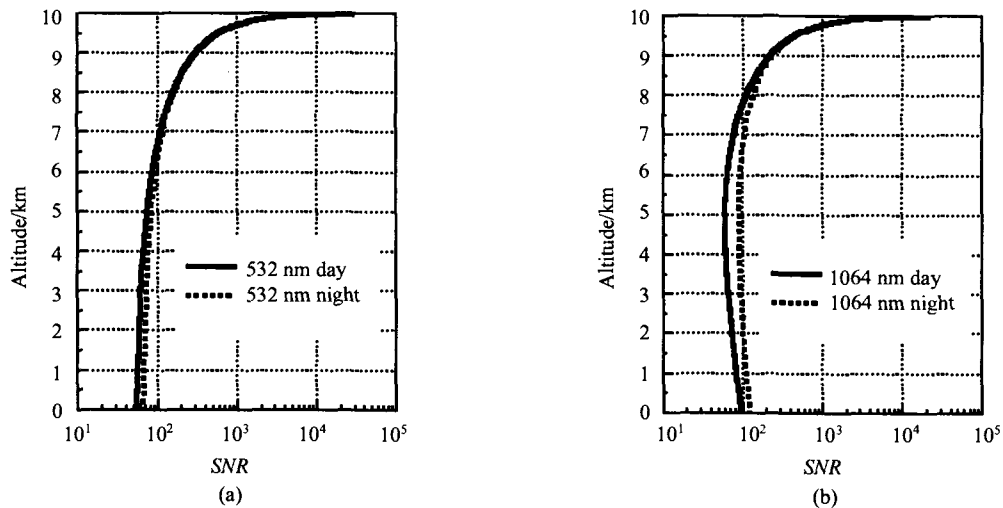


图 6 (a)532 nm 回波信号信噪比 (b)1064 nm 回波信号信噪比

Fig.6 (a) The calculated SNR for signal of 532 nm (b) the calculated SNR for signal of 1064 nm

4.3 激光脉冲能量、累积激光脉冲数、接收视场、滤光片半宽度对信噪比廓线的影响

从 (6) 式可以看到, 激光脉冲能量、累积激光脉冲数、接收视场、滤光片半宽度与信噪比的大小都有关系。这里以机载激光雷达白天接收的 532 nm 波长大气回波信号为例, 分析以上因子对信噪比的影响。

图 7(a) 是在激光脉冲能量分别为 100 mJ 和

50 mJ、其他参数都不改变的情况下计算得到的两条信噪比廓线。可以看出, 激光脉冲能量降低为原来的一半, 信噪比为 100 的高度便从 6.5 km 高度上升到 8 km, 近地面处的信噪比也由原来的 50 而降低到 20。由此可见, 激光脉冲能量对信噪比的影响还是比较大的。

图 7(b) 是仅将累积的激光脉冲数从 120 发增

加为 400 发 (对应的水平分辨率分别为 400 m 和 1000 m) 时计算得到的两条信噪比廓线。可以看到, 累积的激光脉冲数增加 3 倍, 信噪比为 100 的高度便从 6.5 km 高度下降到 3 km, 近地面处的信噪比也由原来的 50 而增加到接近 100。由此可见, 增加累积的激光脉冲数有利于信噪比的提高。但是也要考虑到, 用这种方法提高信噪比的同时, 降低了探测的水平分辨率。

图 7(c) 是在接收视场分别为 1 mrad 和 0.5

mrad、其他参数不变的情况下计算得到的两条信噪比廓线。从图中可以看到, 信噪比对接收视场的减小不是十分敏感。因此设计的 1 mrad 的接收视场是合适的。

图 7(d) 是在滤光片半宽度分别为 0.3 nm 和 1 nm、其他参数不变的情况下计算得到的两条信噪比廓线。从图中可以看到, 增加滤光片半宽度会降低信噪比, 但也不是十分敏感。因此, 对于机载激光雷达, 不必追求太高窄带的干涉滤光片。

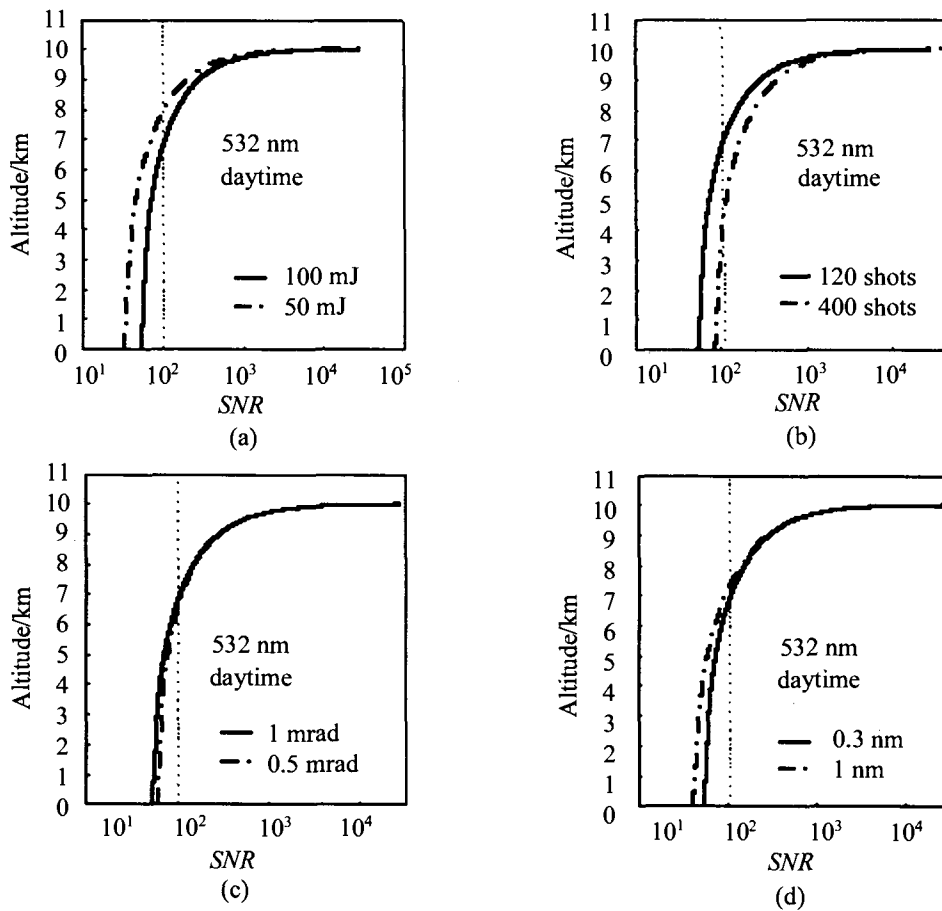


图 7 (a) 不同激光脉冲能量计算所得信噪比 (b) 不同累积激光脉冲数计算所得信噪比 (c) 不同接收视场计算所得信噪比 (d) 不同滤光片半宽度计算所得信噪比

Fig.7 (a) The calculated SNR for signal with different laser energy, (b) the calculated SNR for signal with different numbers of accumulated laser pulses, (c) the calculated SNR for signal with different receiver fields of view and (d) the calculated SNR for signal with different filter bandwidth

5 结 论

上述模拟计算结果表明:

1) 无论是白天还是夜晚, 532 nm 和 1064 nm 两个波长的大气回波信号在整个 10 km 的探测范围内, 动态范围约为 5 个数量级。而几何重叠因子可以有效地将其减小到 2 个多数量级。因此, 只要选择合适的几何重叠因子, 采用单个通道信号的探测与采集是可行的。

2) 机载激光雷达白天探测时, 大气对激光的后向散射信号是决定大气回波信号信噪比的主要因子, 天空背景光对接收的大气回波信号的影响不是十分显著。

3) 设计的机载激光雷达可以满足不同气溶胶消光分布情况下的大气回波信号的接收, 同时对不同的气溶胶消光廓线具有区分能力。

4) 对于设计的技术参数, 两个波长大气回波信号的信噪比在白天和夜晚都比较高。说明这样配置的机载激光雷达是能够进行高度 10 km 以下大气气溶胶和云的探测的。

5) 增大发射激光脉冲的能量或增加累积的激光脉冲数均有利于回波信号信噪比的提高。由于天空背景光对机载激光雷达接收的大气回波信号的影响比较小, 信噪比对接收视场和滤光片半宽度的变化不是十分敏感。

参考文献:

- [1] Du Qicheng, Ji Yufeng, Xu Chidong. Data processing method of aerosol horizontal distribution detected by MPL [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(1): 23-27(in Chinese).
杜其成, 纪玉峰, 徐赤东. MPL 探测气溶胶水平分布数据处理方法研究 [J]. *大气与环境光学学报*, 2008, **3**(1): 23-27.
- [2] Strawbridge K B, Snyder B J. Daytime and nighttime aircraft lidar measurements showing evidence of particulate matter transport into the Northeastern valleys of the Lower Fraser Valley, BC [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(34): 5873-5886.
- [3] Zhou Xiuji, Tao Shanchang, Yao Keya. *Advanced Atmospheric Physics*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991, 1200-1242(in Chinese).
周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 1991, 1200-1242.
- [4] Cyrille F, Jacques P, Partrick C, et al. Airborne lidar measuments of aerosol spatial distribution and optical properties over the Atlantic Ocean during a European pollution outbreak of ACE-2 [J]. *Tellus B*, 2000, **52**(2): 662-677.
- [5] Kenji T, Tadashi I, Yasuaki K. Atmospheric observation by airborne lidar using a Si-APD single photon counting module[C]. *SPIE*, 1998, **3494**, 286-294.
- [6] Khattatov V U, Tyabotov A E, Alekseev A P. An aircraft lidar method of studying aerosol in the free troposphere over Siberia [J]. *Atmospheric Research*, 1997, **44**, 89-98.
- [7] Winker D M, Couch R H, McCormick M P. An overview of LITE: NASA's lidar in-space technology experiment [J]. *IEEE*, 1996, **84**(2): 164-180.
- [8] Kevin B S. Airborne and scanning lidar results obtained during Pacific 2001 in the lower Fraser Valley of British Columbia [C]. *SPIE*, 2004, **5235**: 525-536.
- [9] Mao Minjuan, Zhang Yinchao, Fang Haitao, et al. Detection of aerosol distribution by atmospheric environment airborne lidar over Qingdao and adjacent sea area [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2007, **50**(2): 370-376(in Chinese).
毛敏娟, 张寅超, 方海涛, 等. 机载激光雷达对青岛及周边海域的气溶胶探测 [J]. *地球物理学报*, 2007, **50**(2): 370-376.

- [10] Sun Jingqun. *Atmospheric Sounding and Observing by Laser* [M]. Beijing: Science Press. 1986: 269(in Chinese).
孙景群. 激光大气探测 [M]. 北京: 科学出版社. 1986: 269.
- [11] Takashi Y N, Tadashi I, Osamu U, et al. Influence of daylight and noise current on cloud and aerosol observations by space borne elastic scattering lidar [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**: 5219-5220.
- [12] Smith E V P, Gottlieb D M. Solar flux and its variations [J]. *Space Science Reviews*, 1974, **16**: 771-802.
- [13] Spinhirne J D. Micro pulse lidar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, **31**(1): 48-54.
- [14] Whiteman D N, Schwemmer G, Rush K, et al. Raman airborne spectroscopic lidar(RASL)-final report [R], 2002. [http://ramanlidar.gsfc.nasa.gov/instruments/raman airborne spectroscopic lidar/rasl-final-report.pdf](http://ramanlidar.gsfc.nasa.gov/instruments/raman%20airborne%20spectroscopic%20lidar/rasl-final-report.pdf).
- [15] Sasano Y, Kobayashi T. Feasibility study on space lidars for measuring global atmospheric environment [R], No. 4 Final Report, F-82, 1995/NIES, 1995.
- [16] Sasano Y. Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurements over Tsukuba, Japan, from 1990 to 1993 [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(24): 4941-4952.
- [17] Tatsumi K. Hardware design and development plan of experimental lidar in space equipment (ELISE) [C]. *Proceedings of the First Workshop on Mission Demonstration Satellite Lidar*, Hakone, Japan, March, 1998, 16-28.
- [18] Measures R M. *Laser Remote Sensing* [M]. New York: John Wiley and Sons. 1984. 223-233.

作者简介: 季承荔 (1983-), 女, 江苏常州人, 硕士研究生, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究.