

文章编号: 1001-3806(2008)06-0614-04

星载激光雷达探测能力的数值模拟分析

刘厚通,王珍珠,李超,黄威,周军*

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气光学重点实验室,合肥 230031)

摘要: 为了研究星载大气探测激光雷达的技术参量对其探测性能的影响,采用合适的大气模式和星载大气探测激光雷达设计参量,对其接收的大气后向散射回波信号和探测回波信号的信噪比进行了数值模拟计算;同时模拟分析了星载大气探测激光雷达对沙尘和卷云的探测能力。结果表明,星载大气探测激光雷达对气溶胶的探测水平分辨率应设置为 75km,且仅夜晚的探测能力能够达到信噪比大于 10 的要求;对卷云和沙尘探测水平分辨率应设为 7.5km。该结果为该星载大气探测激光雷达的研制提供参量设置的基本依据。

关键词: 大气与海洋光学;星载大气探测激光雷达;数值模拟;信噪比;卷云

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Numerical simulation analysis for detectability of spaceborne lidars

LIU Hou-tong, WANG Zhen-zhu, LI Chao, HUANG Wei, ZHOU Jun

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

Abstract: In order to study the effect of the technical parameters of a spaceborne atmosphere sounding lidar on its aerosol detectability, atmosphere backscattering returned signals and signal-to-noise ratio of sounding signal were numerically analyzed by making use of appropriate atmosphere pattern and setting parameters of a spaceborne atmosphere sounding lidar. The detectability of a spaceborne atmosphere sounding lidar about dust and cirrus was simulated. The simulation results revealed that a spaceborne atmosphere sounding lidar's horizontal resolution setting for aerosol detection should be 75km, and its sounding ability for detecting aerosol could achieve the detection requirement at night only and that the horizontal resolution for cirrus and dust detection should be 7.5km. The obtained results offer academic foundation of parameters, setting for manufacture of a spaceborne atmosphere sounding lidar.

Key words: atmospheric and ocean optics; spaceborne atmosphere sounding lidar; numerical simulation; signal-to-noise ratio (SNR); cirrus

引 言

目前,大气气溶胶与云的探测资料主要来源于星载被动遥感探测,但是星载被动遥感探测的垂直分辨率较低、探测能力及应用范围有限。星载被动遥感可以探测海洋上空的大气气溶胶,由于探测时海洋作为暗背景目标出现在探测视场中,对于海洋上空低气溶胶浓度的区域及海面明亮区域上空的气溶胶,其探测灵敏度是不够的;即使是新一代的被动遥感器仍将很难探测明亮陆地上空的大气气溶胶分布;对于云的星载被动遥感探测,其探测资料仅能分辨有云和无云以及云量的多少,尚不

能给出云高、云厚和云的层次方面的信息;夜间对低云的探测困难,将冷的地表与低云进行区分及确定如薄卷云等半透明云层的存在有一定的难度。

星载云和大气气溶胶激光雷达能够弥补上述被动遥感器探测大气气溶胶和云方面的不足^[1-2]。它作为一种大气气溶胶和云的主动遥感探测工具^[3],具有较高的垂直分辨率和测量精度,并能在全球范围内(包括海洋和陆地上空)快速、连续、实时和长期地进行大气气溶胶光学性质和形态特征的探测;它能够十分精确地给出卷云的形态、云顶高度、云厚和云的层次信息,且对薄卷云等半透明云层的探测特别有效。

1 计算方法和标准

1.1 星载大气探测激光雷达方程

当星载大气探测激光雷达由空中 500km 处的卫星轨道向地球发射 532nm 波长的激光脉冲时(见图 1),对每一发激光脉冲,卫星上的接收望远镜接收到

基金项目:国家九七三重点基础研究发展计划资助项目(2006CB403702);国家自然科学基金资助项目(40475052)

作者简介:刘厚通(1969-),男,博士研究生,主要从事机载激光雷达研制及激光大气遥感方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jzhou@aiofm.ac.cn

收稿日期:2007-09-10;收到修改稿日期:2008-02-20

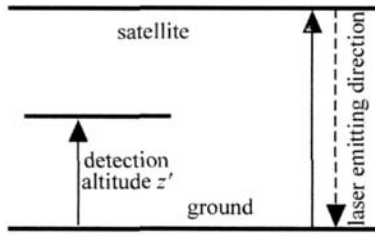


Fig 1 Location parameters of spaceborne atmosphere sounding lidar
离地面 z 高度处大气后向散射回波功率 $P(z')$ 可以用米散射激光雷达方程表示^[4]:

$$P(z') = \frac{cE_0 Y(z') A_r \beta(z') T^2(z') T_l T_r}{2(z-z')^2} \quad (1)$$

式中, z 为卫星高度, c 是光速 (m/s); E_0 是激光器发射的激光脉冲能量 (J); $Y(z')$ 是星载大气探测激光雷达的几何因子; $\beta(z')$ 为高度 z 处波长 λ 的大气后向散射系数, $\beta(z') = \beta_m(z') + \beta_a(z')$, 其中 $\beta_m(z')$, $\beta_a(z')$ 分别是大气分子、气溶胶粒子后向散射系数 ($\text{km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$); A_r 是接收望远镜的有效接收面积 (m^2); T_l 和 T_r 分别为星载大气探测激光雷达发射和接收光学系统的透过率, $T(z')$ 是从星载大气探测激光雷达所在的高度 z 到被测大气高度 z' 的透过率:

$$T(\lambda, z') = \exp\left[-\int_{z'}^z \alpha(\lambda, z') dz'\right] \quad (2)$$

式中, $\alpha(z')$ 为高度 z 处的大气消光系数, 有 $\alpha(z') = \alpha_m(z') + \alpha_a(z')$, $\alpha_m(z')$ 和 $\alpha_a(z')$ 分别是大气分子、气溶胶粒子的消光系数 (km^{-1})。由 (1) 式, 便可以得到星载大气探测激光雷达接收的大气后向散射回波光电子数 $N_s(z')$:

$$N_s(z') = \left(\frac{\eta\lambda}{h\nu}\right) P(z') \Delta t \quad (3)$$

式中, η 是探测器的量子效率; λ 是发射激光的波长 (nm); h 是普朗克常数, $h = 6.626276 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; $\Delta t = \frac{2\Delta z}{c}$ 是星载大气探测激光雷达的采集时间 (s), Δz 是星载大气探测激光雷达的垂直分辨距离 (m)。

星载大气探测激光雷达接收到 532nm 波长大气后向散射光的同时, 也接收到这个波长的天空背景光 N_b , 还有探测器产生的暗计数 N_d , 它们可分别表示为:

$$\begin{cases} N_b = \left(\frac{\eta\lambda}{h\nu}\right) P_b \pi \left(\frac{\theta}{2}\right)^2 \Delta\lambda A_r T_l T_r \Delta t \\ N_d = N_{\text{CPS}} \cdot \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

式中, P_b 是 532nm 波长天空背景辐射光亮度, 星载大气探测激光雷达是空对地大气探测激光雷达, 其接收到的天空背景光亮度通常较地对空大气探测激光雷达的小, 为了给数值模拟计算结果的评估留下更多的余地, 则仍取地对空探测时的 P_b 值, 白天设为 $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$, 夜晚可视为 0 ^[11]; θ 是接收望远镜的接

收视场 (rad); $\Delta\lambda$ 是 532nm 波长滤光片的半峰全宽 (nm); T_r 是接收光学单元的透过率; N_{CPS} 是探测信号中的探测器的暗计数 (s^{-1}); 其余参量的意义同前。

星载大气探测激光雷达探测的回波信号信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 由下式给出:

$$R_{\text{SNR}}(z') = \frac{N_s(z')}{\sqrt{N_s(z') + 2(N_b + N_d)}} \sqrt{M} \quad (5)$$

式中, M 为星载大气探测激光雷达发射的激光脉冲数。

1.2 模拟计算所采用的大气模式和星载大气探测激光雷达技术参量

数值模拟计算采用的 532nm 波长大气分子消光模式和气溶胶粒子消光模式来自参考文献 [4], 数值模拟计算使用的星载大气探测激光雷达技术参量如表 1 所示。它们与即将研制的星载大气探测激光雷达技术参量基本相同。

Table 1 Primary technology parameters of spaceborne atmospheric detection lidar

parameter	value	parameter	value
laser	ultra Nd YAG	filter center wavelength/nm	532
wavelength/nm	532	bandwidth/nm	0.1
repetition ratio/Hz	20	quantum efficiency/%	30
divergence/mrad	0.1	receiving transmission	0.4
emission transmission	0.8	detecting plane aviation horizontal area	area
vertical resolution/m	150	detecting uprightness span/km	0~500
diameter/mm	500	$N_{\text{CPS}}/\text{s}^{-1}$	500

2 数值模拟结果及分析

2.1 模式大气的模拟结果

2.1.1 接收的大气回波光电子数 由 (3) 式可得星载大气探测激光雷达在夜晚和白天接收到的大气后向散射光电子数的垂直分布廓线^[15-16], 如图 2 所示。从图

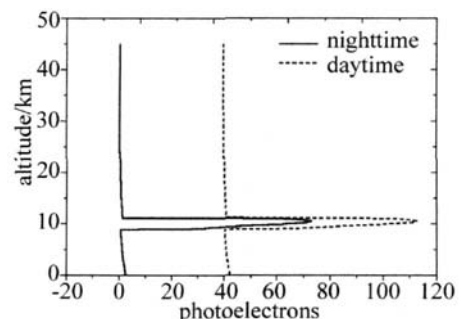


Fig 2 Photoelectron profiles of spaceborne atmosphere sounding lidar's detecting channels

2中可以看出,在白天,气溶胶部分的回波光子数基本被淹没在背景噪声中,但对卷云而言,仍然可以探测到。在晚上,星载大气探测激光雷达单脉冲接收到的光子数约70个,对于每一发激光脉冲,在1μs的时间内(相当于150m的垂直分辨率)星载大气探测激光雷达采集到近地面45km范围内大气后向散射回波光子数的动态范围可达5个数量级,已经非常接近光子计数器的100M计数率,建议采用计数率为150M光子计数器。

2.1.2 探测模式大气回波信号信噪比 图3是根据(5)式模拟计算的星载大气探测激光雷达探测带卷云的气溶胶时,白天与夜晚的信噪比廓线。从图3中的

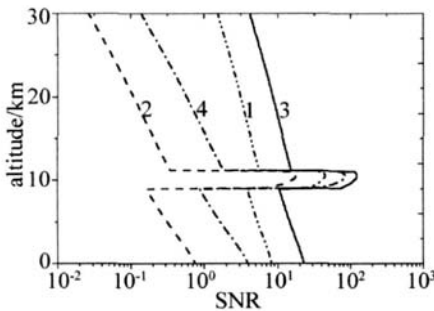


Fig 3 SNR of spaceborne atmosphere sounding lidar detecting model atmosphere, 1—nighttime, 100mJ, 20pulse; 2—daytime, 100mJ, 20pulse average; 3—nighttime, 100mJ, 200pulse average; 4—daytime, 100mJ, 200pulse average

曲线1和曲线2可以看出,在白天,当滤光片的半峰全宽为0.1nm、累计激光脉冲数为20pulse时,星载大气探测激光雷达探测卷云信噪比的最大值为17.58361;而在相同的条件下的夜晚,从离卫星486km的探测点到地面星载大气探测激光雷达的信噪比几乎都大于10,探测卷云的信噪比可达44.05045。

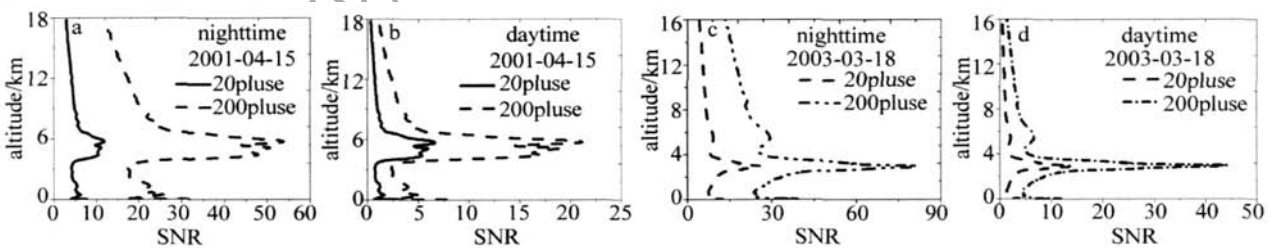


Fig 5 SNR of spaceborne atmosphere sounding lidar when dust is detected

暴粒子时的信噪比^[7-8]。

在晚上,当持续发射脉冲数为20pulse,单脉冲激光能量为100mJ时,星载大气探测激光雷达探测2001-04-15沙尘时的信噪比基本都大于10,最大信噪比为11.98,在相同的条件下探测2003-03-18沙尘的信噪比可达26,这说明当单脉冲激光能量为100mJ,水平分辨率设为7.5km时,星载大气探测激光雷达在夜晚能够基本满足对沙尘探测的信噪比要求;当持续发射脉冲数为200pulse,单脉冲激光能量为100mJ时,星载大气探测激光雷达探测信号信噪比大于10的高度

由图3中的曲线3、曲线4可知,在白天,当滤光片的半峰全宽为0.1nm、累计激光脉冲数为200pulse时,星载大气探测激光雷达探测卷云的信噪比最大为83.28327;而在相同的条件下的夜晚,星载大气探测激光雷达的信噪比从离卫星486km的探测点到地面几乎都大于10,而探测卷云的信噪比可达120.63691。

由于星载激光雷达所处的高度较高,而气溶胶后向散射系数相对较小,再加上白天的背景光较强,给星载大气探测激光雷达在白天对气溶胶的探测工作带来很大的困难。从图3中可以看出,在白天,假定测量时刻天空背景辐射光亮度 $P_b = 0.2W/(m^2 \cdot sr \cdot nm)$,电流暗计数为 $500s^{-1}$,滤光片的带宽为0.1nm,累计激光脉冲为200pulse以内时,星载大气探测激光雷达对气溶胶探测信噪比大于10的高度范围几乎为0。

2.2 对沙尘的信噪比模拟

图4是2001-04-15和2003-03-18地基米散射激光雷达探测得到的合肥地区沙尘消光系数的垂直分布(取信噪比为40)。图5是以图4的数据为依据反演得到的星载大气探测激光雷达夜晚和白天探测该沙尘

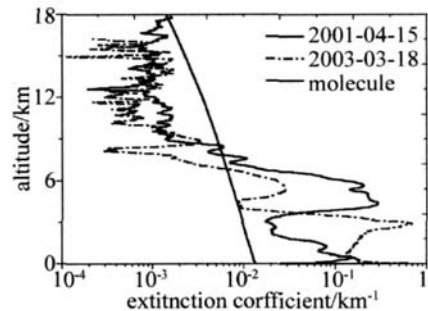


Fig 4 Extinction profiles of dust of Hefei

范围为18km,其中探测2003-04-15沙尘的信噪比可达50,探测2001-03-18沙尘的信噪比可达80,基本满足沙尘的探测的要求。

但是在白天,当水平分辨率设为7.5km,持续发射脉冲数为20pulse时,单脉冲激光能量为100mJ时,星载大气探测激光雷达探测2001-04-15沙尘时信噪比小于10,在相同的条件下对2003-03-18的沙尘进行探测的最大信噪比为13.99,这说明当单脉冲激光能量为100mJ,水平分辨率设为7.5km时,星载大气探测激光雷达在白天能够探测到强沙尘暴粒子,对中小沙尘

暴粒子的探测却没有足够的信噪比。

当持续发射脉冲数为 200pulse,单脉冲激光能量为 100mJ 时,星载大气探测激光雷达在白天探测 2001-04-15 沙尘的信噪比可达 20.93,探测 2003-03-18 沙尘的信噪比可达 45,基本满足对沙尘的探测要求,但对气溶胶的探测没有足够的信噪比。

2.3 对卷云的探测能力分析

图 6 是地基米散射激光雷达探测得到的大气气溶胶与卷云消光系数廓线,图 7 是根据表 1 参量模拟计算的星载激光雷达探测卷云的信噪比^[7-8]。对于卷云

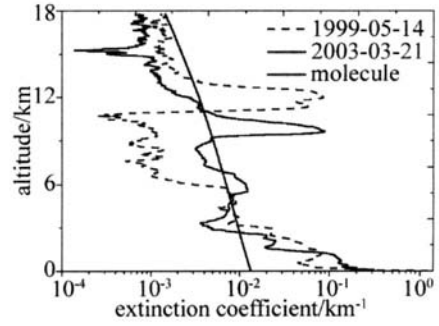


Fig 6 Extinction coefficient profiles of aerosol and cirrus of Hefei

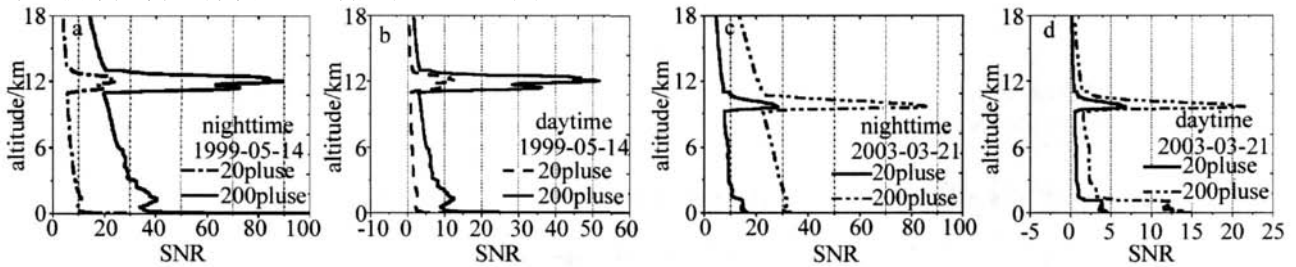


Fig 7 SNR of spaceborne atmosphere sounding lidar when cirrus is detected

的测量,当水平分辨率为 7.5km,持续发射脉冲数为 20pulse 时,在夜晚探测 1999-05-14 和 2003-03-21 的卷云,信噪比最大值分别为 24.46 和 28.30,但在此分辨率下探测气溶胶信噪比大于 10 的高度范围几乎为 0;在白天,探测 1999-05-14 和 2003-03-21 卷云的信噪比最大值分别为 12 和 6,这表明,在白天当水平分辨率为 7.5km,持续发射脉冲数为 20pulse 时,星载大气探测激光雷达对有些卷云探测的信噪比达不到 10。

水平分辨率为 75km,持续发射脉冲数为 200pulse 时,在夜晚探测 1999-05-14 和 2003-03-21 的卷云,信噪比最大值分别为 90 和 88,在此分辨率下探测气溶胶的信噪比大于 10 的高度范围可达 18km 以上;在白天探测 1999-05-14 和 2003-03-21 的卷云,信噪比最大值分别 52 和 22,基本能够满足对卷云信噪比探测的要求。

3 结论

水平分辨率是星载大气探测激光雷达的一项重要指标^[9]。上述模拟计算的结果表明:星载大气探测激光雷达对气溶胶(不含沙尘)探测的水平分辨率与对卷云和沙尘探测的水平分辨率相差很大。激光雷达设计及数据反演中应根据探测目标来设置水平分辨率,在反演结果满足探测所需信噪比的条件下,使水平分辨率的设置尽可能小。

要提高星载大气探测激光雷达的探测能力特别是水平分辨率,就要想法提高激光器的能量和发射脉冲重复频率^[9],激光单脉冲发射能量越大,单位时间内

脉冲的重复频率越高,探测的水平分辨率也就越高,可见提高激光器的性能是提高星载大气探测激光雷达探测能力的关键。

参考文献

- [1] NAKAJIMA T Y, MAI T, UCHINO O, *et al* Influence of daylight and noise current on cloud and aerosol observations by spaceborne elastic scattering lidar [J]. *Appl Opt*, 1999, 38 (24): 5218-5228
- [2] MALM W C, SISLER J F, HUFFMAN D, *et al* Spatial and seasonal trends in particulate concentration and optical extinction in the United States [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99 (D1): 1347-1370.
- [3] WHITEMAN D N, SCHWEMMER G BERKOFF T, *et al* Performance modeling of an airborne Raman water-vapor lidar [J], *Appl Opt*, 2001, 40 (3): 375-390.
- [4] SASANO Y, KOBAYASHI T Study on space lidars for measuring global atmospheric environment [R]. Tsukuba: National Institute for Environmental Studies 1995: 33-34, 60-66 (in Japanese).
- [5] ZHONG Zh Q, ZHOU J, SUN D S, *et al* The research of error analysis and simulation of aerosol detected by MPL [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (3): 232-234 (in Chinese).
- [6] ZHOU J, LU D, WANG Zh Zh Measurement of capability parameter for polarization-Mie lidar [J]. *Jiangsu Qixiang*, 2005 (3): 19-24 (in Chinese).
- [7] LU D. Development of polarization-Mie lidar and lidar observation of atmosphere boundary layer [D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2005: 21-28 (in Chinese).
- [8] SASANO Y, SHIMIZU H, TAKEUCHI N, *et al* Geometrical form factor in the laser radar equation: an experimental determination [J]. *Appl Opt*, 1979, 18 (23): 3908-3910.
- [9] ANSMANN A, WANDNER U, RIEBESELM, *et al*. Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined raman elastic-backscatter lidar [J]. *Appl Opt*, 1992, 31 (33): 7113-7131.