

文章编号: 0253-2239(2007)11-1913-7

机载激光雷达沙尘探测能量优化配置的统计研究^{*}

刘厚通 钟志庆 李 超 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: 依据美国 ANSI 标准, 结合 1999~2004 年间地基激光雷达探测的合肥地区沙尘暴消光廓线, 统计分析了机载大气探测激光雷达探测沙尘时偏振 532 nm 垂直通道和 1064 nm 通道所需的最小激光能量, 模拟计算了机载大气探测激光雷达探测沙尘暴时在 0~12 km 高度范围内不同激光束发散角和激光脉冲能量比例的 532 nm 和 1064 nm 激光脉冲眼睛安全最大阈值能量。以合肥地区沙尘暴消光特性的统计结果、地面人眼安全标准和两个“瓶颈”通道的探测能力为依据提出两种激光脉冲能量配置方案。

关键词: 应用光学; 机载大气探测激光雷达; 激光脉冲眼睛安全最大阈值能量; 眼睛安全系数; 信噪比

中图分类号: TN249; P427.1 文献标识码: A

Statistical Study of Energy-Optimized Distribution for Sand-Dust Detection Using Airborne Lidar

Liu Houtong Zhong Zhiqing Li Chao Zhou Jun

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

Abstract: The minimum laser pulse energy to detect sand-dust with the polarized 532 nm perpendicular channel and 1064 nm channel with airborne atmospheric lidar are analyzed statistically according to American ANSI standard and sand-dust extinction coefficient profiles detected by ground-based lidar from 1999 to 2004 year in Hefei area. The laser pulse eye-safety maximal energy with different beam divergence angles and energy ratio (532 nm and 1064 nm) are simulated in 0~12 km altitude is simulated for the airborne atmospheric lidar. Two laser pulse energy distribution schemes are presented according to the eye-safety standard on the ground, detection ability for two “bottle-neck” channels and statistical results of sand-dust extinction profile in Hefei.

Key words: applied optics; airborne atmospheric detection lidar; laser pulse eye-safety maximal energy; eye-safe coefficient; signal-noise-ratio

1 引 言

机载大气探测激光雷达是双波长偏振米氏散射激光雷达, 具有进行偏振探测的 532 nm 通道和 1064 nm 通道, 其中 532 nm 垂直通道和 1064 nm 通道是探测的“瓶颈”通道。本文利用 1999~2004 年间地基激光雷达探测得到的合肥地区沙尘暴粒子消光特性的统计结果, 结合美国有关眼睛安全的 ANSI 标准, 给出两个“瓶颈”通道探测沙尘所需的最小激光能量和激光脉冲的眼睛安全最大阈值能

量, 并以此为依据提出两种机载激光雷达激光脉冲能量分配方案。沙尘暴的层厚、粒子大小、粒子形状及散射特性变化的概率很大, 探测不同类型的沙尘层时对激光脉冲能量的要求有很大的差异。进行沙尘暴探测能量配置的统计研究, 能准确预测两个“瓶颈”通道在不同能量配置下对不同沙尘类型的探测能力, 鉴别各种机载激光雷达能量配置方案的优劣, 对优化机载大气探测激光雷达能量配置有重要的理论及现实意义。

^{*} 国家重大科技基础设施建设项目(航空遥感系统)资助课题。

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

E-mail: liuhoutong6@163.com

导师简介: 周 军(1945—), 男, 安徽人, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光雷达技术和激光大气遥感探测等方面的研究。E-mail: jzhou@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2007-01-03; 收到修改稿日期: 2007-04-13

万方数据

2 计算方法和标准

2.1 眼睛安全度的计算方法和标准

机载大气探测激光雷达大气探测的位置参量如图 1 所示。设 Nd:YAG 激光器输出的 532 nm 和 1064 nm 两个波长的激光光束均为 TEM₀₀ 模,该激光束经大气传输到地面足印(Foot print)上的能量密度 $I_{\lambda}(r)$ 沿足印半径 r 的分布^[1]为

$$I_{\lambda}(r) = T_{\lambda} T_{a\lambda} \frac{2E_{0\lambda}}{\pi r_f^2} \exp\left[-2\left(\frac{r}{r_f}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中 λ 为激光波长, T_{λ} 为发射光学单元在波长 λ 的透射率, $T_{a\lambda}$ 为飞机高度 Z 至地面的大气层对波长 λ 的透过率, $E_{0\lambda}$ 为 Nd:YAG 激光器在波长 λ 的输出能量, r_f 为地面足印的半径。

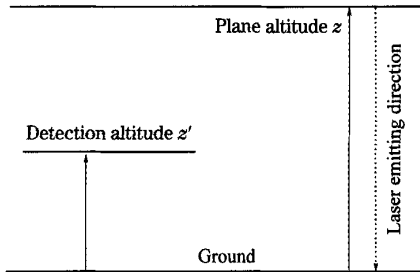


图 1 机载激光雷达位置参量

Fig. 1 Parameters of airborne lidar-location

根据上式,在 $r = 0$ 的地面足印中心,入射的激光能量密度 $I_{\lambda}(0)$ 最大:

$$I_{\lambda}(0) = T_{\lambda} T_{a\lambda} \frac{2E_{0\lambda}}{\pi r_f^2}, \quad (2)$$

若该激光能量密度不会对处于足印中心处人的眼睛造成伤害,则照射的激光束也不会对处于足印范围内其它位置的人眼造成伤害,就表明该能量发射是安全的。

当机载大气探测激光雷达同时向下发射上述两个波长的激光时,入射到地面上的总能量密度必须满足^[1]

$$\frac{I_{532}}{F_{532}} + \frac{I_{1064}(0)}{F_{1064}} \leq \frac{1}{S_K}, \quad (3)$$

式中 F_{λ} 是对应于波长 λ 的最大允许曝光量,按照美国 ANSI 标准,对于 532 nm 波长, $F_{532} = 5 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$; 对于 1064 nm 波长, $F_{1064} = 5 \times 10^{-2} \text{ J/m}^2$. S_K 为眼睛安全系数,对于人裸眼 $S_K = 1$ ^[1].

设 Nd:YAG 激光器输出的 532 nm 和 1064 nm 两个波长的激光脉冲能量之比为 1:1. 则激光器输出的激光脉冲眼睛安全最大阈值能量为^[1]

$$E_{0532} = E_{01064} = \frac{1}{\frac{8T_{532}T_{a532}}{0.005\pi(Z\theta_1)^2} + \frac{8T_{1064}T_{a1064}}{0.05\pi(Z\theta_1)^2}}, \quad (4)$$

偏振激光雷达方程为^[2]

$$P_p = K_p P_0 \frac{A_r h}{8\pi Z^2} \beta_p \exp\left[-2 \int_0^Z \alpha_p(Z) dZ\right], \quad (5)$$

$$P_s = K_s P_0 \frac{A_r h}{8\pi Z^2} \beta_s \exp\left\{-\int_0^Z [\alpha_p(Z) + \alpha_s(Z)] dZ\right\}, \quad (6)$$

式中下标 p 和 s 分别表示与发射激光偏振方向平行和垂直的两个方向, P_0 是激光发射功率, P_p 和 P_s 分别为激光雷达接收到的大气后向散射平行分量和垂直分量的回波功率, K_p 和 K_s 分别是接收平行分量和垂直分量通道的雷达系统常数, β_p 和 β_s 分别表示大气后向散射系数的平行分量和垂直分量, α_p 和 α_s 分别表示大气消光系数的平行分量和垂直分量, A_r 为接收望远镜的有效接收面积, h 为普朗克常量。

偏振激光雷达探测的退偏振比 $\delta(z)$ 可表示为^[3]

$$\delta(Z) = \frac{P_s/K_s}{P_p/K_p} = \frac{\beta_s}{\beta_p} \exp\left[\int_0^Z (\alpha_p - \alpha_s) dZ\right], \quad (7)$$

一般情况下, $\alpha_p(z) = \alpha_s(z)$, 所以(7)式可以写成

$$\delta = \frac{\beta_s}{\beta_p} = K \frac{P_s}{P_p}. \quad (8)$$

2.2 机载激光雷达信噪比的计算方法

处于高度 Z 的机载大气探测激光雷达垂直向地面发射 532 nm 和 1064 nm 波长的激光脉冲,对波长为 λ 的激光脉冲,其接收到离地面 Z' 高度处大气后向散射回波功率 $P(\lambda, Z')$ 可以用米散射激光雷达方程表示:

$$P(Z') = \frac{cE_0 Y(Z') A_r \beta(Z') T^2(Z') T_t T_r}{2(Z - Z')^2}, \quad (9)$$

式中 c 是光速, $E_0(\lambda)$ 是发射波长 λ 的激光脉冲能量, $Y(\lambda, Z')$ 是机载大气探测激光雷达波长 λ 探测通道的几何因子; $\beta(\lambda, Z')$ 为高度 Z' 处波长 λ 的大气后向散射系数, $\beta(\lambda, Z') = \beta_m(\lambda, Z') + \beta_a(\lambda, Z')$, 其中 $\beta_m(\lambda, Z')$, $\beta_a(\lambda, Z')$ 分别是大气分子、大气气溶胶后向散射系数; $T(\lambda, Z')$ 是从机载大气探测激光雷达所在的高度 Z 到被测大气高度 Z' 的大气在波长 λ 的

透射率, $T(\lambda, Z') = \exp\left[-\int_{Z'}^Z \alpha(\lambda, Z') dZ'\right]$, 其中 $\alpha(\lambda, Z')$ 为高度 Z' 处的大气消光系数,有 $\alpha(\lambda, Z') =$

$\alpha_m(\lambda, Z') + \alpha_a(\lambda, Z')$, $\alpha_m(\lambda, Z')$ 和 $\alpha_a(\lambda, Z')$ 分别是大气分子、大气气溶胶的消光系数; $T_t(\lambda)$ 和 $T_r(\lambda)$ 分别为机载大气探测激光雷达发射与接收光学单元在波长 λ 的透射率。

由(9)式便可以得到机载大气探测激光雷达接收的大气后向散射回波光电子数

$$N_s(Z') = \left(\frac{\eta\lambda}{hc} \right) P(Z') \Delta t, \quad (10)$$

式中 $\eta(\lambda)$ 是探测器在波长 λ 的量子效率, $\Delta t = 2\Delta z/c$ 是机载大气探测激光雷达的采集时间, ΔZ 是机载大气探测激光雷达的垂直分辨距离。

机载激光雷达接收 532 nm 和 1064 nm 波长大气后向散射光同时, 也接收这两个波长的地面或低层云上面反射的太阳光 $N_b(\lambda)$, 还有探测器产生的暗计数 $N_d(\lambda)$, 分别表示为^[3]

$$N_b(\lambda) = \frac{\eta(\lambda)\lambda}{hc} P_b(\lambda) \pi \left(\frac{\theta}{2} \right)^2 \Delta \lambda A_r T_r(\lambda) \Delta t, \quad (11)$$

$$N_d(\lambda) = C(\lambda) \cdot \Delta t,$$

表 1 机载大气探测激光雷达主要技术参量

Table 1 Primary technological parameter of airborne atmospheric detection lidar

Parameter	Value	Parameter	Value
Laser	Ultra Nd: YAG	Filter center wavelength /nm	532/1064
Wavelength /nm	532/1064	Bandwidth /nm	0.3/0.5
Repetition ratio /Hz	20	Quantum efficiency /%	12/2
Divergence /mrad	0.3	receiving transmittance	0.4
Emission transmittance	0.8	Detecting horizontal area	Plane aviation area
Vertical resolution /m	30	Detecting uprightness span /km	0~12
Diameter /mm	200	Horizontal resolution	200 m/s, 100 pulses
Field of view /mrad	1	Voltage/power consumption	AC100V/400Hz
C /s ⁻¹	500/100		DC 2.7V/<1000

3 计算结果和讨论

3.1 探测沙尘时激光脉冲的眼睛安全最大阈值能量统计分析

1999~2004 年间地基激光雷达对合肥地区沙尘暴粒子进行了观测, 得到大量的沙尘消光与偏振特性数据。图 2 列出了 1999~2004 年内具有代表性的几个沙尘消光系数廓线: 1999 年 4 月 15 日和 2000 年 5 月 12 日探测的沙尘消光系数廓线中, 地面附近的消光系数在 1 km^{-1} 左右, 从地面延伸到 4 km 高度, 是一个厚度较大的沙尘层。2000 年 3 月 28 日沙尘在 3 km 高度上消光系数达到 0.7 km^{-1} , 在这一高度上如此大消光系数的沙尘是不多见的, 同时这一沙尘由两层组成, 高度一直延伸到 7.5 km。2001 年 1 月 31 日和 2004 年 3 月 30 日的消光廓线中, 在 3~6 km 的高度有一个沙尘层, 其

式中 $P_b(\lambda)$ 是 532 nm 或 1064 nm 波长地面或低层云上的光亮度, 白天分别设为 $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ 和 $0.043 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$, 夜晚可视为零^[1]; θ 是接收望远镜的接收视场; $\Delta \lambda$ 是 532 nm 或 1064 nm 波长滤光片的半峰全宽; $T_r(\lambda)$ 是接收光学单元在波长 λ 的透过率; $C(\lambda)$ 是探测波长 λ 信号的探测器的暗计数。

机载大气探测激光雷达探测的回波信号信噪比

$$R_{\text{SN}}(\lambda, Z') = \frac{N_s(\lambda, Z')}{\sqrt{N_s(\lambda, Z') + 2[N_b(\lambda) + N_d(\lambda)]}} \sqrt{M}, \quad (12)$$

式中 M 为机载大气探测激光雷达发射的激光脉冲数。

模拟计算中大气分子和大气气溶胶模式见参考文献[1], 计算中沙尘的消光后向散射比取 40, 卷云的消光后向散射比取 29, 沙尘的退偏振比取 0.2, 机载大气探测激光雷达技术参量如表 1 表示。

中 2001 年 1 月 31 日的数据在 9 km 处有弱消光特性的卷云存在。2001 年 4 月 14 日沙尘层覆盖了高度 3~7 km 的广阔区域, 如此之厚的沙尘层在合肥地区实为罕见, 在中心位置 4.5 km 处, 沙尘消光系数的峰值达到了 0.3 km^{-1} , 在这一高度上有如此大的气溶胶消光系数也是几年来首次被激光雷达探测到。

图 3 给出了机载大气探测激光雷达对合肥地区 1999~2004 年的沙尘进行探测时, 所在的高度与 532 nm 和 1064 nm 波长激光脉冲眼睛安全最大阈值能量的关系曲线。下面的计算中采用 2004 年 3 月 30 日的沙尘激光脉冲眼睛安全最大阈值能量作为沙尘探测时激光脉冲眼睛安全最大阈值能量(统计结果中最小的激光脉冲眼睛安全最大阈值能量)。

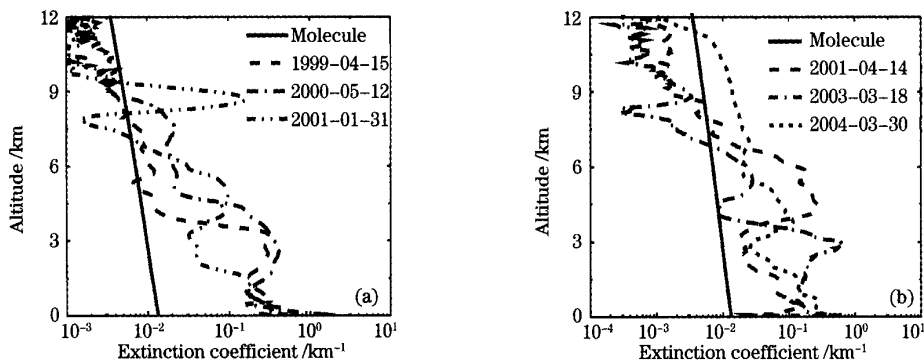


图 2 地基激光雷达探测得到的合肥地区沙尘暴
Fig. 2 Sand-dust storm detected by ground-based lidar in Hefei area

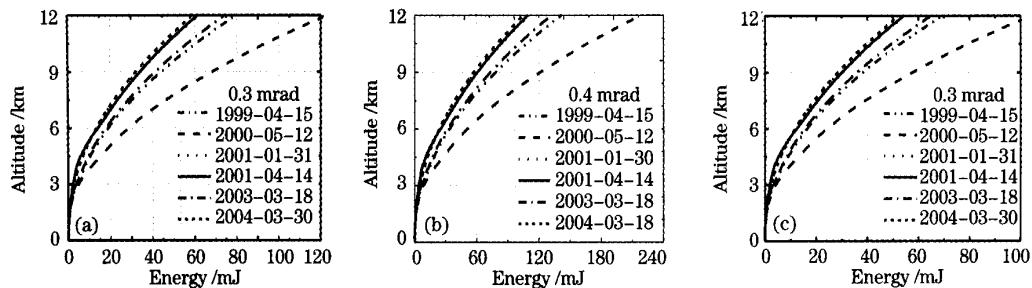


图 3 机载激光雷达探测沙尘时激光脉冲眼睛安全最大阈值能量。(a),(b),(c)分别为 $E_{0532}:E_{01064}=1:1,1:2$ 和 $1:1$
Fig. 3 Laser pulse eye-safe maximal energy detected by airborne lidar in sand-dust storm weather,
in (a), (b), (c) $E_{0532}:E_{01064}=1:1,1:2$ and $1:1$ respectively.

图 3(a)和图 3(b)给出了不同激光光束发散角对激光雷达激光脉冲眼睛安全最大阈值能量的影响。 $E_{0532}:E_{01064}$ 的比值为 $1:1$, 激光束发散角 θ_i 分别取 0.3 mrad 和 0.4 mrad 时, 得到激光脉冲眼睛安全最大阈值能量与高度关系的统计结果。从图中可以看出, 机载大气探测激光雷达所在的高度愈高, 其发射的激光光束发散角越大, 满足人眼安全的激光脉冲眼睛安全最大阈值能量就愈高。

532 nm 与 1064 nm 两波长的能量分配比率对激光雷达激光脉冲眼睛安全最大阈值能量有较大的影响。图 3(a)和图 3(c)分别给出了在激光束发散角为 0.3 mrad , 不同的 E_{0532} 与 E_{01064} 比值情况下, 高度 Z 与 E_{0532} 的关系曲线。从图中可以看出, 机载大气探测激光雷达两个波长激光脉冲眼睛安全最大阈

值能量之比对高度 Z 与 E_{0532} 的关系影响不大, 这主要是因为 532 nm 波长的最大允许曝光量 F_{532} 比 F_{1064} 小一个数量级, 因此满足人眼安全的激光脉冲眼睛安全最大阈值能量主要由 532 nm 波长决定, 1064 nm 波长的影响比较小; 但对应不同的激光脉冲能量比, 1064 nm 的激光脉冲眼睛安全最大阈值能量可以发生很大的变化, 而 532 nm 波长激光脉冲眼睛安全最大阈值能量变化却很小。

3.2 探测沙尘时 532 nm 垂直通道和 1064 nm 通道所需的最小能量统计

根据 1999~2004 年地基激光雷达对合肥地区的沙尘探测结果, 对 532 nm 垂直通道和 1064 nm 通道在各个高度上的探测最小能量(信噪比为 10)进行了统计, 统计的结果如表 2 所示。

表 2 1064 nm 和 532 nm 垂直通道探测沙尘所需要的最小能量

Table 2 Minimum energy of 1064 nm and 532 nm perpendicular channels to detect dust					
Z/km		6	8	10	12
1064 nm minimum energy /mJ		3.15~3.21	6.19~8.77	10~20	15.9~36.9
532 nm minimum energy /mJ	Air and dust detection	6~13.72	17.2~37.7	34~56.2	55~104
	Dust detection only	0.8~3	2.21~7	2.28~12	3~25

偏振探测是机载大气探测激光雷达的一项重要任务, 而 532 nm 垂直通道的探测能力是机载偏振万方数据

激光雷达实行偏振探测的“咽喉”, 设计激光雷达时需对它的探测能力有充分的估计。从表 2 可以看

出,飞机在 12 km 的高度上,532 nm 能量要大于 100 mJ 才能满足其垂直通道整个路径上信噪比大于 10 的探测要求。但只对沙尘层的退偏比进行测量时,532 nm 垂直通道的激光脉冲能量大于 30 mJ 就能满足探测要求。

3.3 机载激光雷达能量优化配置的原则

根据(7)式、(9)式、(10)式~(12)式,当 532 nm 垂直通道的探测能力和 1064 nm 通道的探测能力相等时,其能量配置比例满足

$$E_{532} = \frac{0.5(-m_{1064}^2 E_{1064}^2 + m_{1064} E_{1064} \sqrt{4.8477 + m_{1064} E_{1064}} \sqrt{71.1451 + m_{1064} E_{1064}}}{m_{532\perp}(4.53846 + m_{1064} E_{1064})}, \quad (13)$$

式中

$$m_{\lambda} = \frac{\eta \lambda Y(z') A_r \beta(\lambda, z') T^2(\lambda, z') T_r T_t \Delta t}{2h(z - z')^2}. \quad (14)$$

最大阈值能量的配置比例是由两个“瓶颈”通道的探测目标决定的:532 nm 通道的偏振探测是用来测量卷云和沙尘等目标的偏振特性,1064 nm 通道是用来测量大气气溶胶、卷云和沙尘的消光特性,能量的配置比例必须满足各自的探测要求。根据(13)式模拟结果可知:532 nm 垂直通道的能量配置能够满足沙尘的探测要求时,就满足卷云的探测要求,而 1064 nm 通道探测大气气溶胶的能量配置要求比探测卷云和沙尘的能量配置要求高。两通道的能量分配比例正是利用两通道探测能力相等时,532 nm 垂直通道对沙尘进行探测所需的能量和 1064 nm 通道对模式大气探测所需能量的比值得出的。利用 1999~2004 年间合肥地区沙尘暴粒子消光特性对两通道的能量比例进行了统计,发现其能量比值中心在 0.90~1.25,考虑激光器等硬件的原因,两波长的能量比例设为 1:1。

3.4 激光脉冲两种能量配置方案的信噪比

由图 3 和表 2 及两波长能量配置原则可知,要在激光束发散角等于 0.3 mrad 或 0.4 mrad 的情况下满足飞机在 12 km 的高度上对沙尘进行探测信噪比不小于 10 的要求, $E_{0532}:E_{01064}$ 的值应在 1 左右且 1064 nm 激光脉冲能量应不小于 40 mJ。根据上述机载大气探测激光雷达能量优化配置的原则与 532 nm 垂直通道和 1064 nm 通道所需的最小能量的统计结果及信噪比的定量分析,提出两种激光脉冲眼睛安全最大阈值能量配置方案。

第一种方案:激光发散角 θ_0 为 0.3 mrad, $E_{0532}:E_{01064}=1:1$ 。

由图 3 可知,当激光束发散角为 0.3 mrad 时, $E_{0532}:E_{01064}=1:1$ 能保证 1064 nm 的激光脉冲眼睛安全最大阈值能量在 0~12 km 的高度范围内对 1999~2004 年间合肥地区沙尘探测信噪比都大于 10 时

10;同时也能够保证 532 nm 垂直通道的激光脉冲眼睛安全最大阈值能量在 0~12 km 的高度范围内对沙尘层的探测信噪比都大于 10。由于机载大气探测激光雷达主要在白天执行探测任务,所以本文只计算机载大气探测激光雷达白天探测的信噪比。

根据第一种机载大气探测激光雷达激光脉冲眼睛安全最大阈值能量配置方案和(7)式~(12)式,对飞机在 6 km、8 km、10 km 和 12 km 的高度上对 1999~2004 年间地基激光雷达探测得到的合肥地区沙尘暴进行探测时,532 nm 垂直通道和 1064 nm 通道激光脉冲眼睛安全最大阈值能量对应的信噪比进行了统计分析(图 4)。飞机在上述高度上进行探测时,1064 nm 的激光脉冲近地面的信噪比相差不大。1999 年 4 月 5 日、2000 年 5 月 12 日、2001 年 1 月 31 日、2001 年 4 月 14 日、2003 年 3 月 18 日和 2004 年 3 月 30 日沙尘暴近地面的信噪比浮动范围分别为 44.42~46.28、58.70~61.86、38.48~39.78、33.53~35.04、40.39~42.39 和 52.45~53.07;飞机在相应的高度上探测且满足激光脉冲眼睛安全最大阈值能量配置方案时,532 nm 垂直通道近地面信噪比在相应年份分别为 14.41~14.79、13.37~14.36、14.22~17.00、7.23~8.03、11.86~13.84 和 23.10~25.94,可以看出不同的沙尘层对应的信噪比存在较明显的差别。

这种方案总的激光脉冲眼睛安全最大阈值能量较小,最大值为 117.10 mJ,在 10 km、8 km 和 6 km 高度上的激光脉冲眼睛安全最大阈值能量分别为 81.26 mJ、49.74 mJ 和 26.72 mJ,基本能满足对沙尘层偏振探测的要求;对一部分类型的沙尘,532 nm 垂直通道激光脉冲眼睛安全最大阈值能量接近对其探测时整个光程上的信噪比都大于 10 时所需的能量,使探测时激光脉冲能量几乎没有可以

自由调节的余地。严格计算表明,这种能量配置也不能满足相应高度上退偏振比为 0.1 的模式大气退

偏振比的探测要求,这对大气探测来说无疑是一很大的缺陷。

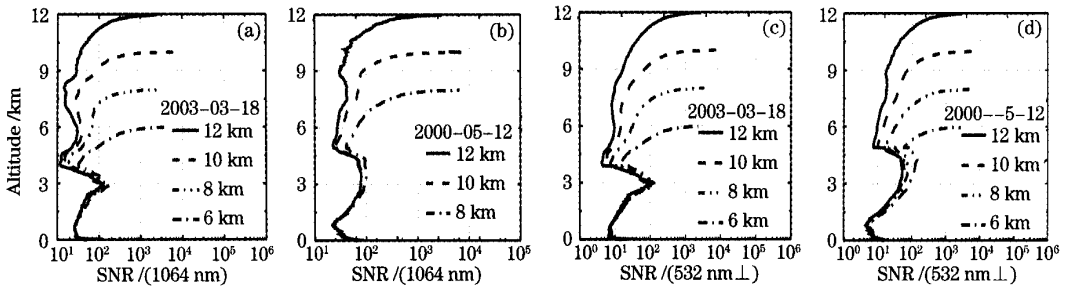


图 4 $\theta_i=0.3$ mrad 且 $E_{0532}:E_{01064}=1:1$ 时,白天机载大气探测激光雷达探测沙尘的信噪比

Fig. 4 Signal-noise-ratio (SNR) of airborne atmosphere detection lidar measuring dust with $\theta_i=0.3$ mrad and $E_{0532}:E_{01064}=1:1$ in the daytime

第二种方案:激光束发散角 θ_i 为 0.4 mrad, $E_{0532}:E_{01064}=1:1$ 。

由图 3 可知:激光束发散角为 0.4 mrad,当 $E_{0532}:E_{01064}$ 满足 1:1 时就能满足飞机在 12 km 高度处 532 nm 激光脉冲垂直通道眼睛安全最大阈值能量为 104 mJ 的要求。图 5 给出了与图 4 类似的计算结果:飞机在高度 6~12 km 的高度上进行探测时,1064 nm 的激光脉冲近地面的信噪比相差不大。1999 年 4 月 5 日、2000 年 5 月 12 日、2001 年 1 月

31 日、2001 年 4 月 14 日、2003 年 3 月 18 日和 2004 年 3 月 30 日飞行高度上近地面的信噪比浮动范围分别为 67.26~81.34、86.98~87.66、87.05~88.50、53.05~54.25、91.10~94.93 和 78.36~79.21;地面附近 532 nm 垂直通道的信噪比变化幅度分别为 14.41~14.79、13.37~14.36、14.22~17.00、7.23~8.03、11.86~13.84 和 23.10~25.94。垂直通道除个别沙尘类型及个别探测点外,基本满足对全光程退偏振比的探测要求。

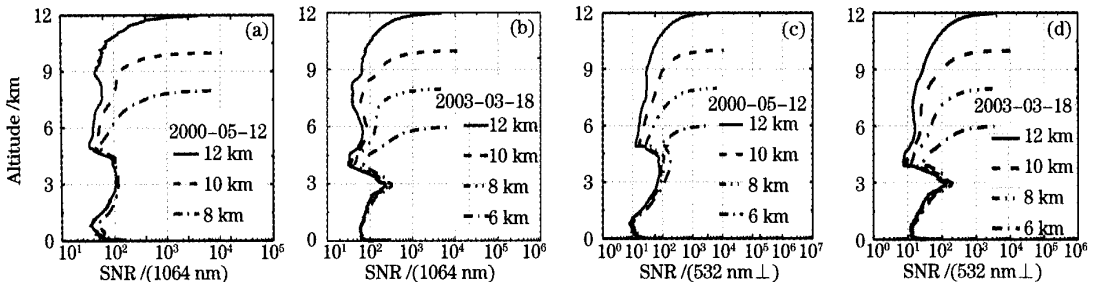


图 5 机载大气探测激光雷达白天探测信噪比, $\theta_i=0.4$ mrad 且 $E_{0532}:E_{01064}=1:1$

Fig. 5 Signal-noise-ratio (SNR) of airborne atmosphere detection lidar with $\theta_i=0.4$ mrad and $E_{0532}:E_{01064}=1:1$ in the daytime

这种设计,大大强化了 532 nm 垂直通道眼睛安全最大阈值能量的探测能力和 1064 nm 通道眼睛安全最大阈值能量的探测能力,使 532 nm 垂直通道的眼睛安全最大阈值能量能够满足大部分类型沙尘暴全光程偏振探测的要求;同时使激光器输出的总激光脉冲眼睛安全最大阈值能量增加 1 倍,如机载大气探测激光雷达在 12 km 高度上探测时,输出的总激光脉冲眼睛安全最大阈值能量为 208 mJ,比前一种配置多了 104 mJ。用以反演大气气溶胶和沙尘暴全光程退偏振比的机载大气探测激光雷达应采用这种设计思路。

4 结 论

机载大气探测激光雷达设计方案时,飞机飞行的最大高度是预先设定的。理论计算表明,对 532 nm 垂直通道和 1064 nm 通道,只要满足飞机在最高高度上的探测要求,就能满足飞机在较低高度上的探测要求;1999~2004 年间地基激光雷达探测得到的合肥地区沙尘暴消光特性的分布基本能够代表中原地区的沙尘暴的基本类型,又因模拟计算中采用沙尘退偏振比的下限值 0.2 (实际沙尘暴的退偏振比为 0.2~0.45),统计分析的结果对机载大气

探测激光雷达的能量设置有极其重要的参考价值^[4~7]。

综合考虑上述因素,第二种方案要优于第一种方案^[8,9]。它不仅基本满足 532 nm 垂直通道和 1064 nm 通道沙尘层和大气气溶胶探测时全光程退偏振比的探测要求,而且其能量可调范围实际上包含第一种方案。在探测时,它既能适应消光系数或退偏比较小的探测目标的探测,又能满足消光系数或退偏比较大的探测目标的探测。两种能量设置方案和国外机载大气探测激光雷达能量的实际配置基本一致。

参 考 文 献

- 1 Y. Sasano, T. Kobayashi. Feasibility study on space lidars for measuring global atmospheric environment[R]. *Final Report*, 1995/NIES, 1995, (3): 33~34, 60~66 (in Japanese)
- 2 Osamu Uchino, Isao Tabata, Kenji Kai *et al.*. Polarization properties of middle and high lever clouds observed by lidar[J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1988, **66**: 607~616
- 3 Yasuhiro Sasano. 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
- 4 Kenneth Sassen. Lidar backscatter depolarization technique for cloud and aerosol research, In: Michael I. Mishchenko, Jop W. Hovenier, Larry D. Travis. *Light Scattering by Nonspherical Particles, and Applications*[M], San Diego, Academic Press, 2000, 393~416
- 5 Albert Ansmann, Ulla Wandinger, Maren Riebesell *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
- 6 James B. Abshire, Chester S. Gardner. Atmospheric refractivity corrections in satellite laser ranging[J]. *IEEE Trans Geos. & Remote Sensing*, 1985, **GE-23**(4): 414~419
- 7 Takashi Y. Nakajima, Tadashi Imai, Osamu Uchino *et al.*. Influence of daylight and noise current on cloud and aerosol observations by space borne elastic scattering lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(24/20): 5219~5220
- 8 Zhou Jun, Yue Guming, Jin Chuanjia *et al.*. Two-wavelength Mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1412~1417
周 军,岳古明,金传佳 等. 探测对流层气溶胶的双波长米氏散射激光雷达[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1412 ~1417
- 9 Hu Shunxing, Hu Huanling, Wu Yonghua *et al.*. L625 differential absorption lidar system for tropospheric ozone measurements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 597~601 (in Chinese)
胡顺星,胡欢陵,吴永华 等. L625 差分吸收激光雷达探测对流层臭氧[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 597~601