

文章编号:1002-2082(2007)02-0195-06

大气消光特性与机载激光雷达眼睛安全关系的研究

刘厚通, 李超, 王珍珠, 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, 安徽 合肥 230031)

摘要: 依据美国ANSI标准, 定量分析了气溶胶、卷云和沙尘的垂直消光特性对机载激光雷达激光脉冲眼睛安全最大阈值能量的影响; 以地基激光雷达探测得到的合肥上空沙尘暴为例, 定量给出了大气中各成分消光特性对飞机眼睛安全最低高度的影响; 模拟计算了各种大气成分的消光特性对激光脉冲眼睛安全系数的影响随高度的变化规律。计算结果表明: 沙尘层对激光脉冲眼睛安全最大阈值能量的影响幅度可达几十毫焦。该结果为我国第一台机载大气探测激光雷达激光脉冲能量设置提供了基本依据。

关键词: 机载大气探测激光雷达; 激光脉冲眼睛安全系数; 飞机眼睛安全最低高度

中图分类号: TN249

文献标志码: A

Relationship between atmosphere extinction feature and eye safety of airborne atmosphere detection lidar

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

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

Abstract: The effect of the vertical extinction characteristics of aerosol, cirrus and dust on laser pulse maximal threshold energy of the airborne lidar for eye safety is analyzed quantitatively according to U. S. A. ANSI standard. Airplane minimum altitude for eye safety was calculated and analyzed quantitatively according to the dust detected by the ground-based lidar in Hefei. The variation rule of laser pulse eye safety coefficient with altitudes was simulated and calculated with the characteristics of all kinds of atmospheric compositions detected by airborne lidars. The calculation result indicates that the influence amplitude of the dust on laser pulse maximum threshold energy for eye safety reaches tens of millijoules. The conclusion forms a baseline for the maximal energy setting of 532 nm & 1 064 nm laser pulse for the airborne lidar design for eye safety.

Key words: airborne atmosphere detection lidar; eye safety coefficient of laser pulse; minimum flight altitude for eye safety

引言

近年来, 探测云、大气气溶胶和空气分子(如 O_3 , H_2O 等)的机载激光雷达^[1-8]有了较快发展。这

主要是由于其可以探测大气成分的三维空间分布特征具有很强的机动性。用于同一地域的重复探测或不同地域的探测时, 探测数据有着一致性和可比

收稿日期: 2006-11-23; 修回日期: 2007-01-05

基金项目: 国家重大科技基础设施建设项目(航空遥感系统)

作者简介: 刘厚通(1969—), 男, 山东新泰人, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事机载激光雷达研制及激光大气遥感研究工作。E-mail: liuhoutong6@163.com

性。但机载激光雷达向下发射的激光脉冲照射到地面上有可能对人的眼睛造成伤害, 那么, 飞机在不同高度进行大气探测时, 机载激光雷达发射的激光脉冲能量最大值是多少时对地面人眼是安全的呢? 本文根据美国 ANSI 标准, 对机载激光雷达探测各种大气成分时眼睛安全性问题进行了定量分析, 模拟计算了机载大气探测激光雷达 532 nm 和 1064 nm 2 个波长在探测大气气溶胶、沙尘粒子和卷云等大气成分时对地面人眼安全的影响。这些结果可以作为机载大气探测激光雷达设计和研制的基本依据。

1 眼睛安全度的计算方法和标准

机载激光雷达大气探测的位置参数如图 1 所示。设 Nd : YAG 激光器输出的 532 nm 和 1064 nm

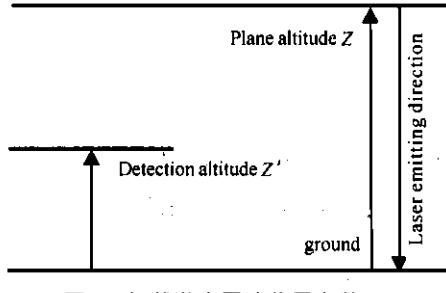


图 1 机载激光雷达位置参数

Fig. 1 Airborne lidar Location parameters

2 个波长的激光光束(均为 TEM_{00} 模)经大气传输到地面足印(Foot print)上的能量密度 $I_{f\lambda}(r)$ 沿足印半径 r 的分布^[1]为

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

式中: λ 为激光波长, 分别为 532 nm 或 1064 nm; $T_{t\lambda}$ 为发射光学单元在波长 λ 的透过率; $T_{a\lambda}$ 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。

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

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

如果该激光能量密度不会对处于足印中心的人的眼睛造成伤害的话, 则对处于足印范围内其他位置的人眼睛也应是安全的。

设地面足印的直径 $d_f = 2r_f$, 机载激光雷达向下发射的激光束发散角为 θ_t , 则有 $\pi r_f^2 = \pi(d_f/2)^2 =$

$\pi d_f^2/4 = \pi(Z\theta_t)^2$ 。这样, (2) 式可写为

$$I_{f\lambda}(0) = \frac{8E_{0\lambda} T_{t\lambda} T_{a\lambda}}{\pi(Z\theta_t)^2} \quad (3)$$

为了保证处于地面足印内人眼睛安全, 机载激光雷达发射的激光入射到地面上的能量密度 $I_{f\lambda}(r)$ 必须满足下列条件^[1]:

$$\frac{I_{f\lambda}(0)}{MPE_\lambda} \leq \frac{1}{S_K} \quad (4)$$

当机载激光雷达同时向下发射上述 2 个波长的激光时, 入射到地面上的总能量密度必须满足下列条件^[10]:

$$\frac{I_{f532}(0)}{MPE_{532}} + \frac{I_{f1064}(0)}{MPE_{1064}} \leq \frac{1}{S_K} \quad (5)$$

式中: MPE_λ (Maximum Permissible Exposure) 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, $MPE_{532} = 5 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$; 对于 1064 nm 波长, $MPE_{1064} = 5 \times 10^{-2} \text{ J/m}^2$; S_K 为眼睛安全系数, 对于人裸眼, $S_K = 1$ ^[1]。

(5) 式的左边项表示激光脉冲对地面人眼安全的影响。为讨论方便, 用 S_L 表示激光脉冲人眼安全系数:

$$S_L = \frac{1}{\frac{I_{f532}(0)}{MPE_{532}} + \frac{I_{f1064}(0)}{MPE_{1064}}} \quad (6)$$

可以看出, S_L 值越大, 激光脉冲人眼安全性能越高。

2 大气模式及机载激光雷达参数

在模拟计算中, 532 nm 和 1064 nm 2 个波长大气分子和气溶胶粒子透过率分别由(7)和(8)式^[1]给出:

$$\begin{cases} \beta_m(Z') = 1.54 \times 10^{-3} \left(\frac{532}{\lambda}\right)^4 \exp(-Z'/7) \\ \alpha_m(Z') = \beta_m(Z') \times 8\pi/3 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \beta_a(Z') = \{2.47 \times 10^{-3} \exp(-Z'/2) + 5.13 \times 10^{-6} \cdot \exp[-(Z' - 20)^2/36]\} \cdot \frac{532}{\lambda} \\ \alpha_a(Z') = \beta_a(Z') \times 50 \end{cases} \quad (8)$$

式中: Z 为飞机高度; $\beta_m(Z')$ 和 $\beta_a(Z')$ 分别是离地面高度为 Z' 处的大气分子和气溶胶粒子的后向散射系数($\text{km}^{-1} \cdot \text{Sr}^{-1}$); $\alpha_m(Z')$ 和 $\alpha_a(Z')$ 分别是高度 Z' 处的大气分子和气溶胶粒子的消光系数(km^{-1}); λ 为激光发射波长。机载大气探测激光雷达技术参数如表 1 所示。

表 1 机载大气探测激光雷达的主要技术参数

Table 1 Primary technology parameters of airborne atmospheric detection lidar

| Parameter | Value |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| laser | Ultra Nd:YAG |
| wavelength/nm | 532/1064 |
| repetition ratio/Hz | 20 |
| divergence/mrad | 0.3 |
| emission transmission | 0.8 |
| vertical resolution/m | 30 |
| diameter/mm | 200 |
| field of view/mrad | 1 |
| CPS/s ⁻¹ | 500/100 |
| filter center wavelength/nm | 532/1064 |
| bandwidth/nm | 0.3/0.5 |
| quantum efficiency/% | 12/2 |
| receiving transmission | 0.4 |
| detecting horizontal area | plane aviation area |
| detecting uprightness span/km | 0~12 |
| horizontal resolution | 200 m/s, 100 pulse |
| voltage/power consumption | AC 100 V/400 Hz DC 2.7 V/<1000 |

3 计算结果及讨论

3.1 激光脉冲眼睛安全最大阈值能量(E_{\max})与大气消光特性的关系

机载大气探测激光雷达在执行探测任务时,有

时需要在一定的高度上飞行,由于机载大气探测激光雷达需要对气溶胶粒子、卷云、沙尘等多种大气成分进行探测,而气溶胶粒子、卷云、沙尘等大气成分的消光特性差别很大;同时由于污染等原因,同一种类型如由分子和气溶胶粒子组成的大气成分,其消光特性随时间的改变也有较大的变化。

图2是地基激光雷达测得的不同类型大气成分的消光系数廓线:2003年3月21日20:07合肥上空气溶胶的消光系数廓线,2003年3月21日19:33合肥上空卷云的消光系数廓线和2001年4月15日合肥上空沙尘的消光系数廓线。根据(5)式有

$$E_{\max} = \frac{1}{\frac{8T_a T_{a532}}{\pi(Z\theta_t)^2 \times MPE_{532}} + \frac{8T_a T_{a1064}}{\pi(Z\theta_t)^2 \times MPE_{1064}}} \quad (9)$$

式中: $T_{a/532\text{nm}} = \exp(-\int_0^{Z'} \alpha_{532\text{nm}} dz')$; $T_{a/1064\text{nm}} = \exp(-\int_0^{Z'} \alpha_{1064\text{nm}} dz')$ 。

取 $Z=12\text{ km}$,利用图2中的消光系数廓线所含的数据和(9)式模拟出图2中3种大气消光系数廓线中每一部分对 E_{\max} 的影响,如图3所示。图中横坐标采用532 nm的消光系数,纵坐标的能量取 $E=E_{532}=E_{1064}$,1064 nm的消光系数廓线由(10)、(11)式和532 nm的消光系数值得到。

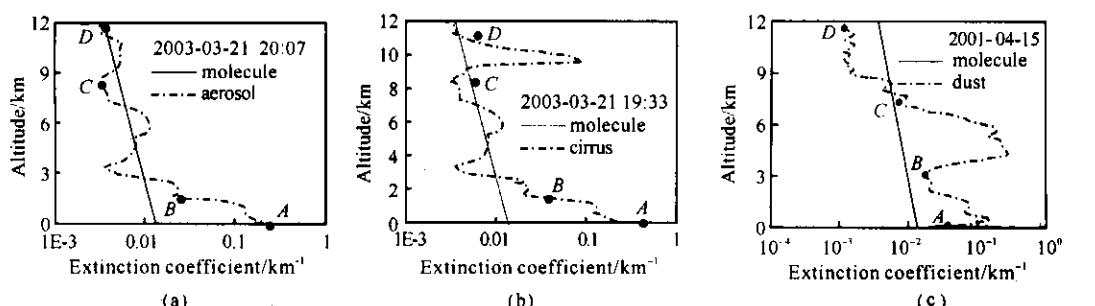


图2 地基激光雷达测得的大气消光系数廓线

Fig. 2 Atmosphere extinction coefficient profiles detected by lidar on the ground

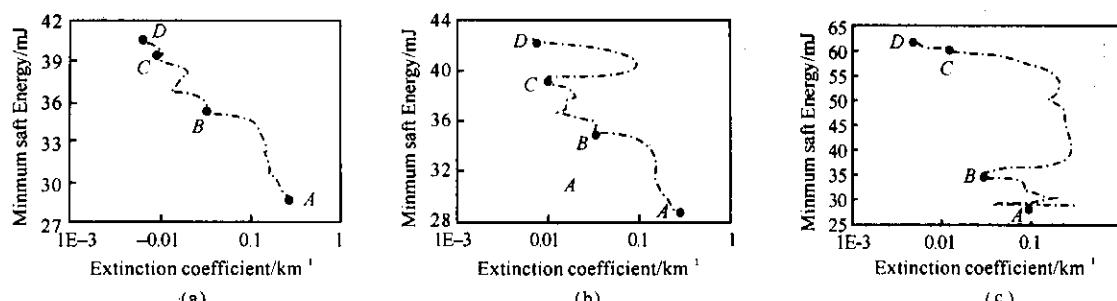


图3 机载大气探测激光脉冲眼睛安全最大阈值能量与大气消光特性的关系

Fig. 3 Maximal eye-safe threshold energy of airborne lidar laser pulse versus atmosphere extinction characteristics

为了便于定量分析, 把图2中每条消光系数廓线和图3中 E_{\max} 与 α 的关系曲线对应地分为AB, BC和CD三段。从图2和图3可以看出, 纯气溶胶对 E_{\max} 的影响主要在地面附近。以2003年3月21日20:07合肥上空的气溶胶为例, AB段高度为1.6 km, 但由于地球表面附近气溶胶的消光系数较大, 对 E_{\max} 的影响幅度为6.41 mJ, 而CD段, 尽管高度范围为4.761 km, 但由于其高度较高且消光系数较小, 故

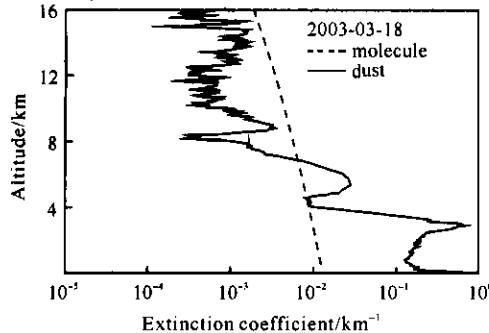


图4 合肥地区上空沙尘粒子消光系数的垂直分布

Fig. 4 Extinction coefficient uprightness distributing in Hefei

对 E_{\max} 的影响幅度较小, 只有1.53 mJ; 卷云层对

E_{\max} 的影响幅度也不大, 2003年3月21日19:33的卷云层对 E_{\max} 的影响幅度为2.94 mJ, 和图3(a)相比可以看出来, 卷云层的存在使 E_{\max} 仅增加了1.98 mJ; 沙尘层对 E_{\max} 的影响幅度较大, 2001年4月15日的沙尘层对 E_{\max} 的影响幅度为24.43 mJ, 相对于激光脉冲的探测能量来说, 是一个不可忽视的量。

3.2 飞机眼睛安全最低飞行高度(Z_{\min})与大气消光特性关系

3.2.1 大气成分的消光特性对机载大气探测激光雷达 Z_{\min} 的影响

为了定量给出大气中每一部分的消光特性对 Z_{\min} 的影响, 利用地基激光雷达探测得到的沙尘消光系数廓线(图2(c)和图4)反演大气成分中每一部分的消光特性对 Z_{\min} 的贡献(假定1064 nm与532 nm激光脉冲能量保持20 mJ不变)。机载大气探测激光雷达在激光脉冲眼睛安全最低高度上进行探测时应满足:

$$\frac{8E_{0532}T_tT_{a532}}{\pi(Z_{\min}\theta_t)^2 \times 0.005} + \frac{8E_{01064}T_tT_{a1064}}{\pi(Z_{\min}\theta_t)^2 \times 0.05} = 1 \quad (10)$$

由(10)式得:

$$Z_{\min} = \sqrt{\frac{8E_{0532\text{nm}}T_t\exp(-\int_0^{z'}\alpha_{532}dz')}{\pi\theta_t^2 \times 0.005} + \frac{8E_{01064}T_t\exp(-\int_0^{z'}\alpha_{1064}dz')}{\pi\theta_t^2 \times 0.05}} \quad (11)$$

式中: $E_{0532\text{nm}} = E_{01064} = 20$ mJ, $\theta_t = 0.0003$ rad, $T_t = 0.8$ 。 z' 的取值范围为从飞机眼睛安全最低飞行高度 Z_{\min} 到地面。

沙尘对飞机的激光脉冲眼睛安全最低飞行高度的影响幅度是很大的。根据(11)式作出大气中各成分的消光特性对 Z_{\min} 的影响幅度图5。从图5中可以看出: 机载激光雷达在探测2001年4月15的沙尘和2000年3月18日的沙尘时 Z_{\min} 分别为6.96 km和6.22 km; 没有AB段的沙尘时, 机载激光雷达探测2001年4月15的沙尘时 Z_{\min} 从6.96 km变化到8 km, 探测2000年3月18的地面沙尘时 Z_{\min} 从6.22

km变化到8 km; 当不存在AC段的大气成分时, 机载激光雷达探测2001年4月15的沙尘时 Z_{\min} 从6.96 km变化到9 km; 探测2000年3月18的沙尘时 Z_{\min} 从6.22 km变化到9 km。

3.2.2 大气消光系数对机载大气探测激光雷达激光脉冲眼睛安全系数 S_L 的影响

S_L 受高度和大气消光系数2因素的共同影响, 而高度对 S_L 的影响是不随时间变化的, 变化的是大气消光系数对激光脉冲眼睛安全系数的影响, 所以定量分析大气消光系数对机载大气探测激光雷达 S_L 的影响是非常必要的。根据(6)式有:

$$S_L = \frac{1}{\frac{8E_{0532}T_t\exp(-\int_0^{z'}\alpha_{532}dz')}{\pi(Z\theta_t)^2 \times 0.05} + \frac{8E_{01064}T_t\exp(-\int_0^{z'}\alpha_{1064}dz')}{\pi(Z\theta_t)^2 \times 0.05}} \quad (12)$$

模拟计算中设532 nm和1064 nm的激光脉冲万方数据能量均为20 mJ, 取

$$\exp(-\int_0^z\alpha_{532}dz') = \exp(-\int_0^z\alpha_{1064}dz') = 1$$

这时(12)式变为

$$S_L = \frac{1}{\frac{8E_{0532}T_t}{\pi(Z\theta_t)^2 \times 0.005} + \frac{8E_{01064}T_t}{\pi(Z\theta_t)^2 \times 0.05}} \quad (13)$$

利用(13)式可以计算出大气消光系数和高度对 S_L 的影响 $S_{L/\text{extinction coefficient}}$ 和 $S_{L/\text{altitude}}$ 及其相对值 $S_{L/\text{extinction coefficient}} / S_{L/\text{altitude}}$, 如图 6(a) 和 6(b) 所示。

从图 6(a) 可以看出, 只有空气分子和气溶胶粒子的大气和带有卷云的大气对 S_L 的影响幅度较沙尘小, 在 12 km 处 S_L 分别为 0.51 和 0.67。2001 年 4 月 15 日和 2000 年 3 月 18 日的沙尘的消光特性对 S_L 的影响较大, 分别在 9.48 km 和 8.07 km 的高度上使 S_L 达到 1, 在 12 km 的高度上 S_L 分别为 1.63 和 2.26。

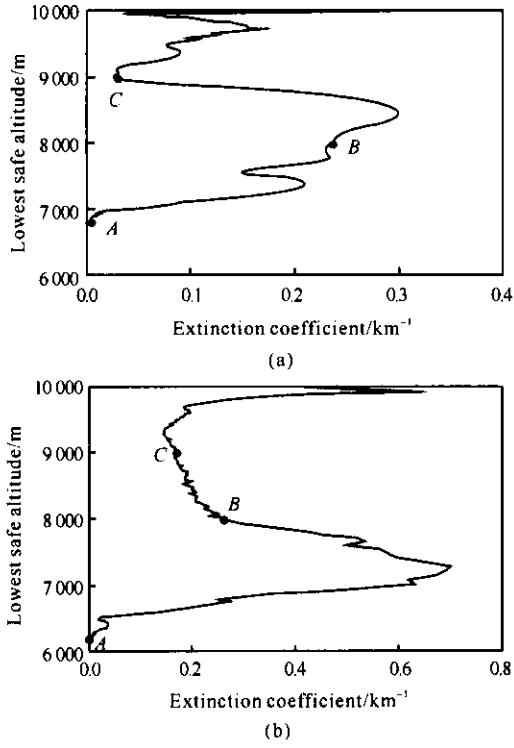


图 5 飞机最低安全高度与大气消光系数的关系

Fig. 5 Plane minimum eye-safe altitude versus atmosphere extinction coefficient

从图 6(b) 可以看出, 当飞机飞行高度较低(小于 3 km)时, 高度对 S_L 的影响较大气成分的消光特性的影响幅度大, 即 $S_{L/\text{extinction coefficient}} / S_{L/\text{altitude}}$ 的值较小; 但 $S_{L/\text{extinction coefficient}} / S_{L/\text{altitude}}$ 值随着飞机飞行高度的增加而增大, 增大的幅度取决于所测大气成分的消光特性; 当分子和气溶胶粒子的大气的 $S_{L/\text{extinction coefficient}} / S_{L/\text{altitude}}$ 值最小, 且飞机飞行高度为 12 km 时, $S_{L/\text{extinction coefficient}} / S_{L/\text{altitude}} = 0.35$; 2003 年 3 月 21 日 19:33 的卷云层对 $S_{L/\text{extinction coefficient}} / S_{L/\text{altitude}}$ 值影响幅度范围为 0.37~0.46; 2001 年 4 月 15 日

沙尘层和 2000 年 3 月 18 日沙尘层对 $S_{L/\text{extinction coefficient}} / S_{L/\text{altitude}}$ 值影响幅度范围分别为 0.25~1.04 和 0.54~1.33。卷云层对 $S_{L/\text{extinction coefficient}} / S_{L/\text{altitude}}$ 值影响幅度范围远小于 2000 年 3 月 18 日和 2001 年 4 月 15 日沙尘层, 这是因为卷云的消光系数相对较小。2001 年 4 月 15 日和 2000 年 3 月 18 日沙尘的消光系数最大分别为 0.29 和 0.69, 而 2003 年 3 月 21 日 19:33 卷云的消光系数最大只有 0.087。

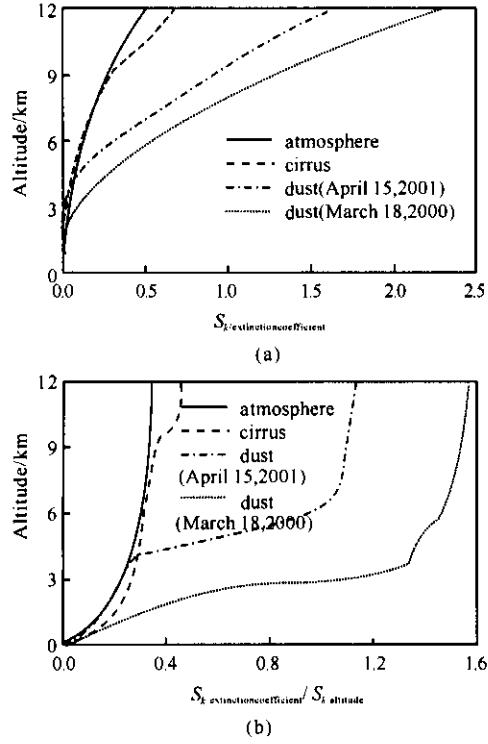


图 6 大气消光系数与激光脉冲眼睛安全系数的关系

Fig. 6 Atmosphere extinction coefficient versus eye-safe coefficient

4 结论

根据激光雷达对合肥地区大气消光特性的测量结果可知: 大气消光特性对某一高度上进行探测的机载大气探测激光雷达的激光脉冲人眼安全最大阈值能量 E_{\max} 的影响与测量时的大气成分有关。气溶胶和卷云对 E_{\max} 的影响较小, 而且影响主要集中在近地面附近; 沙尘对 E_{\max} 的影响较大, 影响幅度可达几十毫焦。在测量卷云及气溶胶时, 由于它们对 E_{\max} 的影响幅度较小, 可以不考虑其成分变化对眼睛安全的影响。但探测沙尘时, 则必须考虑它对 E_{\max} 的影响, 并根据探测需要相应调节激光脉冲的输出能量。具体测量时, 应以气溶胶的激光脉冲安全能量为标准进行激光脉冲发射能量定标。测量沙尘时, 可在定标能量的基础上根据沙尘类型相应调大激光器能量。

参考文献:

- [1] SASANO Y, KOBAYASHI T (ed). Feasibility study on space lidars for measuring global atmospheric environment [J]. NIES, 1995(4): 33-34, 60-66.
- [2] OSAMU Uchino, ISAO Tabata, KENJI Kai, et al. Polarization properties of middle and high lever clouds observed by lidar [J]. Meteor Soc., 1988, 66: 607-616.
- [3] RUSSEL P B, SWISSER T J, McCormick M P. Methodology for error analysis and simulation of lidar aerosol measurements [J]. Appl. Opt., 1979, 18 (22): 3783-3797.
- [4] NSMANN A, WANDINGER U, RIEBESELL M, 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.
- [5] ABSHIRE J B, GARDNER C S. Atmospheric refractivity corrections in satellite laser ranging [J]. IEEE, Trans Geos & Remote Sensing, 1985, GE-23: 414-419.
- [6] YASUHIRO Sasano. Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurements over Tsukuba [J]. Appl. Opt., 1996, 35(24): 4941-4952.
- [7] 尹治国, 何俊, 黄常春, 等. 用实验方法分析大气随机信道对激光传输的影响 [J]. 应用光学, 2005, 26(4): 33-35.
- YIN Zhi-guo, HE Jun, HUANG Chang-chun, et al. Experiment analysis of influence of atmosphere stochastic channel on laser transmission [J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(4): 33-35. (in Chinese)
- [8] 刘维慧, 吴健. 多高斯-榭尔光束通过强湍流对光强闪烁的影响 [J]. 应用光学, 2005, 26(1): 25-28.
- LIU Wei-hui, WU Jian. Effect of Mutiple Gaussian-shell beams through strong turbulence on log-intensity variance [J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(1): 25-28. (in Chinese)

诺斯罗普·格鲁曼公司将为以色列提供“天空卫士”激光战术防御系统

2007年1月24日, RADA电子工业公司宣布与诺斯罗普·格鲁曼公司签署协议,合作建造和安装“天空卫士”高能激光防御系统,用于以色列对敌方火箭和导弹的拦截。诺斯罗普·格鲁曼公司在去年7月才推出了“天空卫士”系统。

“天空卫士”是在美以合作研制的战术高能激光器(Tactical High Energy Laser, THEL)试验台以及由诺斯罗普·格鲁曼公司为美国陆军和以色列国防部研发的早期型号的基础上发展起来的。与传统系统相比,“天空卫士”的功率更高、光束更大,因而性能也更强。其他任何一种武器或现在开发的任何系统都无法提供象“天空卫士”系统一样的防御能力,该系统有望成为第一种可以对付各种威胁的实用型激光武器系统。一套“天空卫士”系统就可对部署的军队、大型军事实施、大的平民或工业区域提供防护,防护区域的直径约为10 km。据称,覆盖以色列北部需要5套“天空卫士”系统。

作为诺·格公司的子承包商, RADA公司将会支持“天空卫士”在以色列的安全销售,参与系统的建造、安装和运作,并在部署期间为“天空卫士”提供装备和维修服务。首批“天空卫士”系统将会在18个月内配置到以色列。

(昌 强)