

文章编号: 1001-3806(2015)03-0372-05

MPL 反演南京北郊气溶胶光学厚度准确度的研究

石玉立¹, 杨丰恺¹, 曹念文²

(1. 南京信息工程大学 遥感学院 遥感系, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 大气物理学院 大气探测系, 南京 210044)

摘要: 微脉冲激光雷达是探测气溶胶的有效工具。为了验证探测的准确度, 对一台微脉冲激光雷达观测数据采用 Fernald 算法进行反演, 得到了南京北郊上空的气溶胶光学厚度, 并将反演结果同太阳光度计观测数据、喇曼-瑞利-米雷达观测数据和中分辨率成像光谱仪的标准气溶胶产品进行了比较。结果表明, 它们之间具有一定相关性。微脉冲激光雷达是反演气溶胶光学厚度的有效手段, 可以用于其它观测手段的地面验证。

关键词: 大气光学; 微脉冲激光雷达; 气溶胶光学厚度; 南京北郊

中图分类号: TN958.98

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.03.020

Study on inversion accuracy of aerosol optical depth with micropulse lidar in northern suburb of Nanjing

SHI Yuli¹, YANG Fengkai¹, CAO Nianwen²

(1. Department of Remote Sensing, School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Department of Atmospheric Sounding, School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Micropulse lidar (MPL) is an effective tool for aerosol detection. To verify the accuracy of detection, MPL was used to calculate the aerosol optical depth (AOD) in the northern suburb of Nanjing with the Fernald inversion method. The inversion results were compared with those obtained with a sun-photometer, a Raman-Rayleigh-Mie lidar and a standard aerosol detection instrument (a moderate-resolution imaging spectroradiometer). The results show good correlation among them. The MPL is useful for AOD inversion and can be used to verify other measurement data effectively.

Key words: atmospheric optics; micropulse lidar; aerosol optical depth; northern suburb of Nanjing

引 言

南京地处长江三角洲地区, 这一区域是我国的经济核心地带, 城市密集、人口众多、工业发达。大量工业燃烧以及秸秆焚烧产生的黑碳、硫酸盐等不同化学成分气溶胶颗粒, 大量排放的汽车尾气, 北方来袭的沙尘等使得该区域空气污染非常严重。统计结果显示, 2012年, 南京有8个月霾日数过半, 2013年南京霾日出现的天数更是高达242天。可以说灰霾、雾的存在成为南京地区天气的一大特点, 极大影响了人们的交通出行和身体健康, 因此, 对该区域进行气溶胶光学特性遥感具有重要的意义。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40801139; 41175077)

作者简介: 石玉立(1973-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为遥感反演地表参量。

E-mail: ylshi_nuist@gmail.com

收稿日期: 2014-04-14; 收到修改稿日期: 2014-04-24

传统地基遥感以及环境监测手段往往难以连续、精确地获取大气成分垂直分布情况, 卫星遥感手段可方便获得大范围气溶胶信息, 但是精度受到很大限制。激光雷达作为一种具有高时空分辨率和高探测高度、能连续监测大气变化的主动遥感设备, 可以有效探测气溶胶光学特性垂直廓线。微脉冲激光雷达(micropulse lidar, MPL)由于体积小易携带、造价低廉、雷达辐射小对人眼来说更安全、可实现连续不间断观测等诸多优点, 得到越来越广泛的应用^[1]。美国国家航空航天局已经布设了微脉冲激光雷达观测网(micropulse lidar network, MPLNET), 可全天候、长时间地观测气溶胶和云, 其结果可用来反演云高、云的厚度及垂直结构、气溶胶光学特性和垂直分布等, 对气候变化研究和卫星资料验证提供重要帮助^[2]。LIU等人利用微脉冲激光雷达在西藏那曲和北京郊区测量并分析了大气气溶胶的分布特性, 给出了两测量站点上空大气对流层气溶胶消光系数的垂直分布, 表明微脉冲激光雷达是大气气溶胶的一种高效的探测工具^[3]。

1 微脉冲激光雷达系统

本文中使用的微脉冲激光雷达位于南京信息工程大学综合观测基地(118.7°E, 32.2°N), 型号为 Sigma MPL-4B, 置于恒温条件下工作。雷达主要由激光器、信号接收装置、数据采集系统三部分组成。系统结构如图 1 所示, 主要系统参量见表 1。

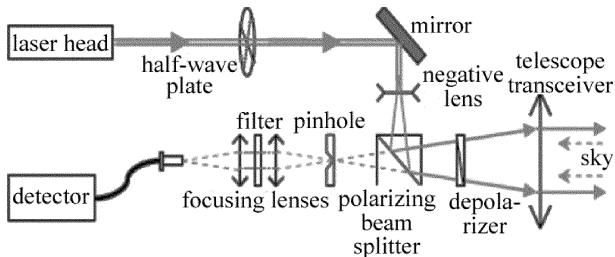


Fig. 1 MPL system structure
Table 1 Main parameters of MPL

instrument configuration	value
laser emission wavelength	527nm
optimal laser output range	(6 ~ 8) μJ
laser repetition rate	2500Hz
telescope diameter	200mm
field of view	(90 ~ 100) μrad
range resolution	15m, 30m, 75m

MPL 开始工作后, 分成同偏振和交叉偏振两个通道同时进行, 通过调节采样时间和采样分辨率来提高雷达数据的信噪比, 望远镜接收到的回波信号经过滤波后由光子计数卡采集后存储在连接的计算机中。

MPL 发射接收系统为一体结构, 采集到的数据需要经过延时校正、寄生脉冲校正、几何重叠因子校正和去背景噪声处理。探测器延时的产生是因为计数速率很快, 部分有限宽度的单光子会发生雪崩事件导致探测器饱和, 设延时校正函数值约为 1。寄生脉冲是激光

$$\sigma(r) = \frac{X(r) \exp\left[-2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right) \int_{r_0}^r \sigma_2(r') dr'\right]}{\sigma_2(r_0) + \frac{S_1}{S_2} \sigma_2(r_0)} - \frac{S_1}{S_2} \sigma_2(r) \quad (2)$$

式中, $X(r)$ 为距离平方校正信号, 气溶胶消光后向散射比一般在 20 ~ 70 之间, 具体到南京北郊, 实际计算时取 50^[5]。使用 2011-01-15T13:00 的 1 组观测数据进行反演, 得到消光系数如图 2 所示, 可以看到 2km 处有气溶胶存在。

将微脉冲激光雷达反演得到的消光系数 $\sigma(z)$ 进行积分得到气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) τ , 公式如下:

$$\tau = \int_0^z \sigma(z) dz \quad (3)$$

在雷达内部光学器件如光纤、望远镜等设备中传输时产生的噪声造成的, 虽然在近地表, 驻留脉冲噪声比正常雷达回波能量小几个量级, 但在高空位置上它的影响不容忽视, 可以通过实验来获得寄生脉冲函数。背景噪声区选择在 30km 以上的高层大气, 认为此时分子和气溶胶散射信号几乎不存在。以上校正均可在微脉冲雷达系统软件中设置进行。

2 气溶胶光学厚度反演

米激光雷达有效探测范围一般在 6km 以下, 在这一范围内分子相比于气溶胶, 对消光的影响很小可忽略。MPL 的有效探测高度一般可达到 12km, 此时进行消光系数反演需要考虑到高层大气中分子对消光的影响, 反演采用 Fernald 方法^[4], 反演消光系数时分开考虑分子和气溶胶的贡献, 此时激光雷达方程为:

$$P(r) = \frac{P_0 C}{r} [\beta_1(r) + \beta_2(r)] T_1^2(r) T_2^2(r) \quad (1)$$

式中, P_0 为激光雷达发射功率, C 为雷达常数, $\beta_1(r)$ 和 $\beta_2(r)$ 分别为距离 r 处的气溶胶和大气分子的后向散射系数, 分别设距离 r 处气溶胶的透射率为: $T_1(r) = \exp\left[-\int_0^r \sigma_1(r) dr\right]$, 距离 r 处大气分子的透射率为:

$T_2(r) = \exp\left[-\int_0^r \sigma_2(r) dr\right]$, 其中, $\sigma_1(r)$ 为气溶胶消光系数, $\sigma_2(r)$ 为分子消光系数。气溶胶消光后向散射比 $S_1 = \frac{\sigma_1(r)}{\beta_1(r)}$, 分子的消光后向散射比由瑞利散射

公式可以确定为: $S_2 = \frac{\sigma_2(r)}{\beta_2(r)} = \frac{8\pi}{3}$, 若能确定某一参考高度 r_0 上的气溶胶消光系数和分子消光系数, 则可通过后向积分解得高度 r_0 以上的气溶胶消光系数为:

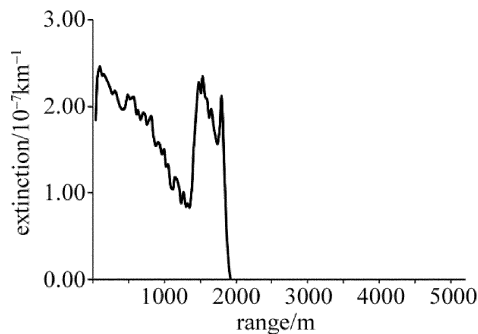


Fig. 2 Extinction coefficients by MPL inversion on 2011-01-15T13:00

考虑到在4km的高度以上,气溶胶对消光的贡献极其微弱,可以忽略不计,故对激光雷达反演的消光系数做0km~4km范围内的积分。将MPL反演得到的2011-01-15T 13:00到16:33的消光系数进行积分得到AOD,将结果与约1km外的一台CE-318太阳光度计观测到的1.5级500nm AOD进行比较,结果如图3所示,任意一点的x坐标为某时刻MPL反演的AOD结果,y坐标为同一时刻CE-318反演得到的AOD结果。从趋势线可以看出,同一时刻太阳光度计反演得到的AOD比微脉冲激光雷达反演结果偏大,相关系数 $R=0.71$ 。

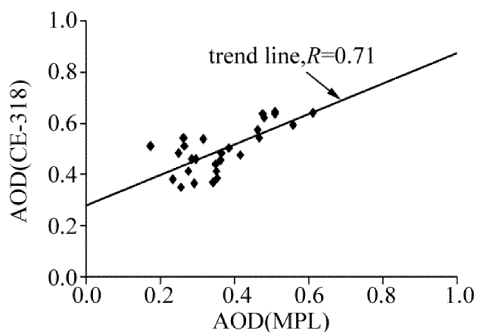


Fig. 3 Comparison of AOD(MPL) and AOD(CE-318)

由于微脉冲激光雷达可以连续不间断工作,画出

Table 2 Observed record in Nanjing on 2011-01-15

time	temperature	relative humidity	barometric pressure	visibility	wind direction	wind speed	weather
1:00PM	2.0°C	28%	1036hPa	—	north	5.0m/s	fine
2:00PM	2.0°C	24%	1035hPa	18km	north	4.0m/s	fine
3:00PM	2.0°C	22%	1035hPa	—	north	5.0m/s	fine
4:00PM	2.0°C	20%	1035hPa	—	north	4.0m/s	fine
5:00PM	1.0°C	22%	1035hPa	17km	north	3.0m/s	fine

从图4中可以看出,同一时刻的CE-318观测值总是大于微脉冲激光雷达反演结果,其原因可能是:(1)CE-318观测到的是500nm AOD,微脉冲激光雷达发射波长为527nm,根据波长消光比可以知道,500nm的结果应该大于527nm的结果;(2)微脉冲激光雷达反演消光系数结果的积分区域是0km~4km,而太阳光度计观测的是整层大气的消光系数总值,此时微脉冲激光雷达的反演结果小于太阳光度计是合理的;(3)两台仪器相距约1km,仪器上空大气气溶胶分布情况会有差异。

综上所述,微脉冲激光雷达的反演结果是准确可靠的,其与太阳光度计相比优势在于可以获取消光系数的垂直分布,可连续不间断观测且频率很高,可以更有效地反映气溶胶分布的时空变化。

3 两台激光雷达反演结果的比较

南京信息工程大学综合观测基地内还有一台喇

整个观测时段内所有观测结果的值可以看出AOD的变化趋势,如图4所示,微脉冲激光雷达的观测频率大于太阳光度计,两台仪器的观测结果量级相同,虽然部分时刻的值差距较大,但它们随时间变化的总体趋势大致相同,都是在15:00之前逐渐减少,而在15:00之后开始显著增大,可能是因为此时存在一次扩散过程。

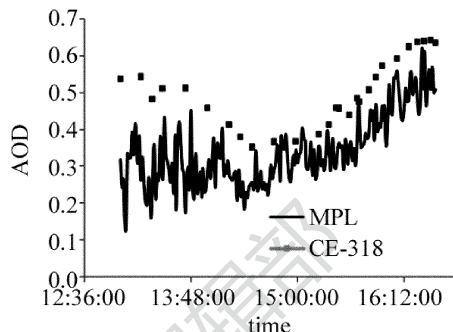


Fig. 4 AOD observations of MPL and CE-318 from 13:00 to 16:33

表2为2011-01-15的地面观测记录。可以看出,17时能见度小于14时,13:00~17:00这段时间内,风向始终为北风,14:00~15:00时风速增大,加速了气溶胶的扩散,此后风速开始减低,气溶胶又逐渐累积起来。综上所述可以认为观测结果符合实际大气中气溶胶的变化情况。

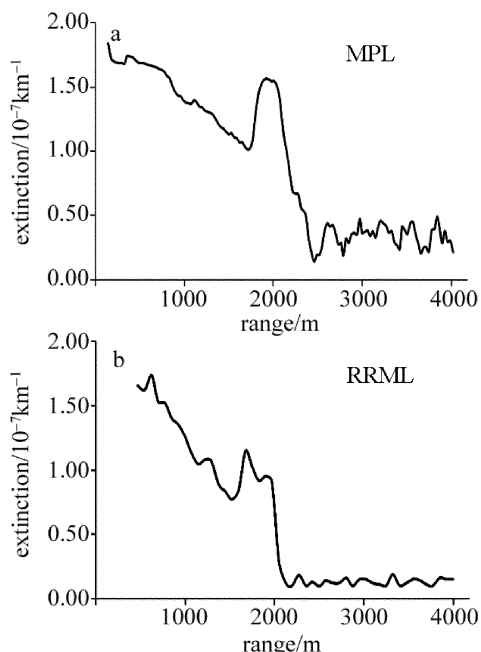


Fig. 5 Extinction coefficient of MPL and RRML on 2010-05-19T21:00

曼-瑞利-米三通道激光雷达 (Raman-Rayleigh-Mie lidar, RRML), 从 2009 年开始积累了大量观测数据, 已经对南京北郊上空的气溶胶进行了一系列卓有成效的研究工作^[6-8]。两台激光雷达相距约 20m, 选择 2010-05-19T21:00 时刻两台雷达观测结果进行比较, 观测结果如图 5 所示。消光系数随高度变化的走势大致相近, 认为它们反映了低层大气气溶胶分布情况。

表 3 是 21:00 ~ 21:06 两台激光雷达反演的 AOD 结果, 量级相同, 数值有一定差异。从表 3 中可以看出, 喇曼-瑞利-米激光雷达反演结果略大于微脉冲激光雷达, 这可能是因为在进行反演时, 微脉冲激光雷达的盲区为 250m 以下, 而喇曼-瑞利-米激光雷达米通道数据经过系统重叠因子校正后, 盲区为 120m 以下, 这样在进行 AOD 积分计算时, 两台雷达的积分区域不同, 在 120m ~ 250m 这一近地面区域气溶胶含量往往很大, 对消光系数有重要影响, 另外, 喇曼-瑞利-米激光雷达发射波长为 532nm, 微脉冲激光雷达发射波长为 527nm, 因此微脉冲激光雷达的反演结果会相对较小。在设计对比试验时, 为了消除误差, 两台激光雷达的观测时间和频率要尽可能同步。

Table 3 AOD inversion of MPL and RRML from 21:00 to 21:06

time	AOD(MPL)	AOD(RRML)
21:00	0.271	0.358
21:02	0.318	0.367
21:04	0.279	0.363
20:06	0.298	0.356
average	0.292	0.361

4 MOD04 产品与激光雷达反演结果的比较

MOD04 是中分辨率成像光谱仪 (moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 监测全球海洋和绝大部分陆地上空大气气溶胶的标准产品, 其每日产品为 L2 级, 光学厚度反演采用暗像元法, 空间分辨率 10km^[9], 计算时假定 2.12 μ m 的表观反射率为地表反射率, 这也是该产品误差的主要来源。研究表明, MOD04 产品精度基本处于期望内, 但在 AOD 较小时存在高估, 在 AOD 较大时会出现高估^[10]。

将微脉冲激光雷达反演 AOD 结果同 2010 年上半年 Terra-MODIS 的 MOD04 产品进行比较, 由于观测资料较少, 建立了 14 组比较, 见表 4。数据匹配时, MOD04 产品选取南京北郊 (118.7°E, 32.2°N) 为中心、半径为 10km 的平均值, 微脉冲激光雷达反演 AOD 结果取卫星成像时刻 ± 0.5 h 内的平均值, 结果表明二者相关系数 $R = 0.6$ 。

可以看出, 大多数激光雷达反演结果小于卫星反

Table 4 A comparison between AOD(MPL) and MOD04

date	AOD(MOD04)	AOD(MPL)
2010-01-17	0.795	0.652
2010-01-19	0.830	0.920
2010-01-24	0.924	0.793
2010-04-05	0.580	0.572
2010-04-09	0.752	0.425
2010-05-11	0.572	0.816
2010-05-12	0.921	0.968
2010-05-19	0.730	0.543
2010-05-20	0.640	0.810
2010-05-24	0.844	0.865
2010-05-25	0.697	0.320
2010-05-30	1.194	0.904
2010-06-06	1.292	1.062
2010-06-07	0.791	0.620

演产品, 这是因为激光雷达在计算 AOD 时只对 0km ~ 4km 高度范围内的消光系数进行积分, 而卫星得到的是整层大气的光学厚度。两种反演结果之间的差异一是波段范围不同, 卫星反演得到 550nm 结果, 激光雷达发射波长 527nm, 二是 AOD 的主动遥感和被动遥感机理不同。

在 2010-05-11 ~ 2010-06-07 这一时段内, 匹配到的数据较多, 画出激光雷达和卫星各自反演结果的时间序列如图 6 所示。可以看出, 在这段时间内, 两种结果的变化趋势基本一致, 说明两种反演结果有效反映了这段时间内的 AOD 日变化。

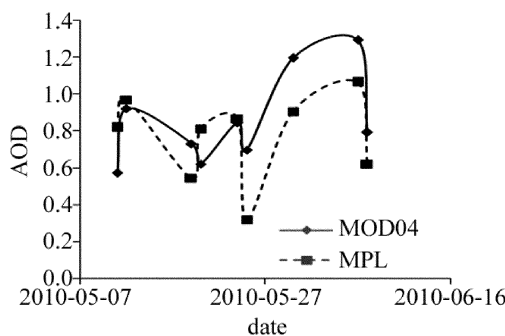


Fig. 6 A comparison between AOD(MPL) and MOD04 from 2010-05-11 to 2010-06-07

5 结 论

利用微脉冲激光雷达对南京北郊上空气溶胶光学厚度进行反演, 反演算法采用 Fernald 方法, 积分区间选择 0km ~ 4km。

(1) 同一时刻 MPL 观测结果与太阳光度计和 RRML 观测结果大致相近, 有一定相关性。

(2) 同一时期内, MPL 观测结果的变化趋势同太阳光度计和 MOD04 产品 AOD 值的变化趋势相同, 说

明 MPL 观测结果合理,可以用来对其它观测手段进行验证分析。

参 考 文 献

- [1] SPINHIRNE J D. Micro pulse lidar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 48-55.
- [2] WELTON E J, CAMPBELL J R, SPINHIRNE J D, *et al.* Global monitoring of clouds and aerosols using a network of micropulse lidar systems[J]. Proceedings of the SPIE, 2001, 4153: 151-158.
- [3] LIU Ch, MING H, WANG P, *et al.* Measurements of aerosol over Naqu of Tibet and sunurb of Beijing by micro pulse lidar(MPL)[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(9): 1435-1439(in Chinese).
- [4] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observations; some comments[J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652-653.
- [5] SASANO Y. Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurements over Tsukuba, Japan, from 1990 to 1993[J]. Applied Optics, 1996, 35(24): 4941-4952.
- [6] SHI J Zh, CAO N. Tropospheric aerosol measurement by lidar in northern suburbs of Nanjing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012(10): 73-81(in Chinese).
- [7] CAO N, SHI J Zh, ZHANG Y, *et al.* Aerosol measurements by Raman-Rayleigh-Mie lidar in north suburb area of Nanjing city[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012(6): 56-61(in Chinese).
- [8] CAO N W, YANG F K, SHI J Zh. Low altitude fog-haze measurements by Raman-Rayleigh-Mie lidar in Nanjing[J]. Proceedings of the SPIE, 2012, 8526: 85260P.
- [9] KING M D, MENZEL W P, KAUFMAN Y J, *et al.* Cloud and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and water vapor from MODIS[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(2): 442-458.
- [10] LEVY R C, REMER L A, MARTINS J V, *et al.* Evaluation of the MODIS aerosol retrievals over ocean and land during CLAMS[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2005, 62(4): 974-992.