

文章编号: 1007-5461(2002)06-0550-05

# 光子并合作用对激光雷达测量臭氧的影响分析

胡顺星, 胡欢陵, 吴永华, 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** 在激光雷达测量平流层下部臭氧时, 我们发现光电倍增管接收到较低高度的强信号后, 回波信号会产生光子并合现象。数据处理分析表明, 光子并合现象对平流层下部臭氧测量的影响很大。为避免产生光子并合现象的产生, 可以利用在接收光路上加装中性衰减片、提高光电倍增管开始工作的高度和降低光电倍增管增益等措施来分段测量, 提高臭氧测量的精度。

**关键词** 激光雷达; 光子并合; 臭氧

**中图分类号**: TN249, P412.25

**文献标识码**: A

## 1 引言

激光雷达是许多大气参数主动式测量的有效手段, 以其测量的范围大、快速实时、精度较高等优点而得到广泛的研究和应用<sup>[1]</sup>。激光雷达垂直测量时, 接收信号的跨度可以从地面到高空几十公里范围, 信号大小覆盖几个量级。因而, 对测量仪器的动态范围要求很大。Hunt 和 Poultney<sup>[2]</sup>指出: 激光雷达垂直接收大气的后向散射信号时, 如果光电倍增管 (PMT) 接收到低层很强的回波信号, 会产生一个称为 SIN (signal-induced noise) 的尾巴, 接收的远处弱信号里加上了 SIN 的影响。因而, 远处的信号看起来要比实际的信号强。这是因为光电倍增管靶面受到强光照射后, 探测器产生非线性响应, 使接收的信号失真<sup>[3,4]</sup>。为克服低层的强回波影响, Shimizu 等<sup>[5]</sup>在测量气溶胶分布时 (532 nm 波长) 采用了电子门控的装置来控制 PMT 的增益。即在激光束发出后的一段时间内, 在光电倍增管的阴极和第一阳极间, 加一偏置电压, 降低光电倍增管的增益。使近处强信号到达光电倍增管靶面时, 光电倍增管处于不工作状态。经过一段时间后, 光电倍增管开始工作, 使某一距离后的信号能够在光电倍增管中被接收。这一方法对波长较长的 532 nm 来说是有效的。但对测量平流层臭氧来说, 采用的波长是 308 nm 和 355 nm。如果激光能量相同, 短波长的 308 nm 和 355 nm 的激光受到大气分子和气溶胶的散射要比 532 nm 波长的散射信号强得多。因而, 我们发现在光电倍增管开始工作的高度较低时, 仍存在光子并合 (photon overlap) 现象。本文就光子并合现象对平流层下部臭氧测量的影响进行分析, 揭示光子并合现象对平流层下部臭氧测量的影响过程, 同时利用了多种措施来克服光子并合的影响。

## 2 光子并合现象

测量平流层臭氧分布的差分吸收激光雷达一般采用光子计数法。通常情况下, 差分吸收激光雷达以光电倍增管作为将光信号转化为电信号的器件。当光通量变得很弱时, 在光电倍增管的时间分辨率内 (脉冲宽度) 几乎没有两个以上光电子存在的状态, 称为单光子状态。光子计数法应用于单光电子领域。由于光电倍增管接收的光子是随机发生的, 在时间分辨率内, 若有多个光子产生时, 光子产生并合, 会使光子计数产生误差, 光子计数产生明显减少的并合现象<sup>[4]</sup>。L625 紫外差分吸收激光雷达利用光子计数技术进行回波信号的数据采集。为了避免近距离的强回波对光电倍增管的影响, 在接收光路中设置了机械光开关。另外, 为了避免较

基金项目: 国家 863 计划激光技术领域资助课题。

收稿日期: 2001-11-13; 修改日期: 2002-03-12

强回波信号引起光电倍增管饱和以及光子计数时产生明显的光子并合作用, 还采用了电子门控装置。通过调节电子门控装置的延迟时间来控制光电倍增管的工作状态。图 1 是 L625 激光雷达接收光路中与光电倍增管

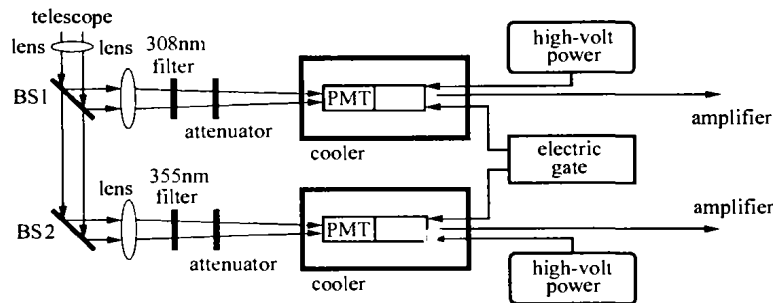


Fig.1 Schematic diagram of the assembly link to PMT

相连的部件框图。当光电倍增管的开始工作高度较低时, 由于接收到的回波信号仍然较强, 接收到的回波信号仍会产生光子并合现象。图 2 是 L625 紫外差分吸收激光雷达连续采集的波长为 355 nm 的三组回波信号, 激光脉冲累加数均为 6000 个, 分辨率为 150 m。调节电子门控的延迟时间, 使光电倍增管开始工作的高度分别为 9.45 km、10.95 km 和 14.25 km。表 1 给出了三组回波一些高度上平均单脉冲的光子数。可以看到, 光电倍增管开始工作的高度越低, 受照射的回波信号越强, 引起的光子并合程度就越严重。在 18 km 以上三组回波的光子数基本相同。该实验表明, 提高光电倍增管的开始工作高度, 可以避免光子并合的产生。因为激光束穿过大气以指数衰减, 高度愈高, 回波信号的强度愈小。

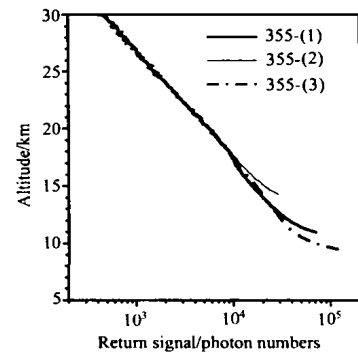


Fig.2 Three signal profiles with different altitudes at which PMT starts to work

表 1 三组回波信号在不同高度上的平均单个激光脉冲的回波强度 (相当于光子数)

	355-(1)	355-(2)	355-(3)
光电倍增管开始工作的高度 (km)	9.45	10.95	14.25
9.45 km 高度的回波强度	19.727		
10.95 km 高度的回波强度	7.489	11.850	
14.25 km 高度的回波强度	3.260	3.147	4.087
18.00 km 高度的回波强度	1.494	1.502	1.499

### 3 光子并合现象对臭氧探测结果的影响及采取的措施

#### 3.1 波长 308 nm 通道回波信号的光子并合现象对臭氧测量的影响

光电倍增管接收强回波信号后, 系统的非线性响应引起的光子数减少可延迟数公里, 对数据处理结果产生较大影响。如忽略臭氧吸收截面随大气温度变化引起的臭氧测量误差, 那么, 根据臭氧浓度计算公式<sup>[5]</sup>, 臭氧浓度与回波光子的关系可简化为如下关系:

$$NO_3^{(z)} \propto \frac{d}{dz} [\ln P_{on}(z)] - \frac{d}{dz} [\ln P_{off}(z)],$$

$NO_3^{(z)}$  为臭氧数密度,  $P_{on}(z)$  和  $P_{off}(z)$  分别为强吸收波长和弱吸收波长的回波强度。上式可以看出, 臭氧的浓度与回波光子的对数梯度成比例。这是一个复杂的关系。为说明 308 nm 波长的光子并合现象对臭氧测量的影响, 在 308 nm 波长通道的光电倍增管和滤光片之间, 加装了中性衰减片, 以减少光电倍增管的时间分辨率内的光子数。图 3(a) 给出的 308 nm 波长的两组回波信号和 355 nm 波长的回波信号。308 nm 波长激光脉冲数累计均为 25000 个, 355 nm 波长激光脉冲数累计为 10000 个。308-(1) 组的光电倍增管的开始工

作高度为 11.55 km，通道中未加中性衰减片；308-(2) 组光电倍增管的开始工作高度为 7.0 km，通道中加了中性衰减片，衰减片的透过率约为 8%；LL 信号是 308-(2) 组的回波信号进行了衰减片透过率订正后所得的分布。从图中可以看到，在 11.55 km 处，由于 308-(2) 组平均每个脉冲的回波信号强度相当于 0.31 个光子，可以不考虑光子并合作用。在 12~16 km 高度区间，308-(1) 组的光子数比 LL 分布的光子数小一些。可见，308-(1) 组的信号存在着光子并合的影响。

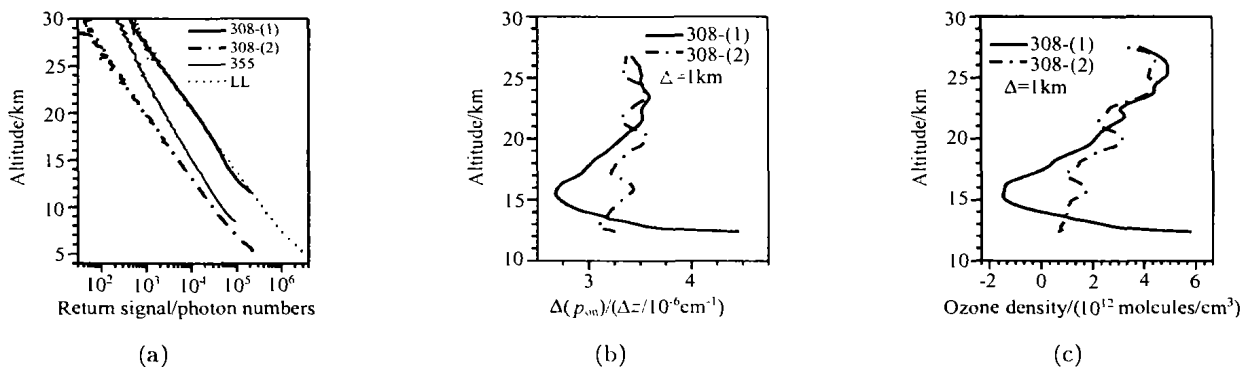


Fig.3 (a) return signal profiles, (b) signal logarithmic grads profiles, (c) ozone profiles

我们对图 3(a) 的信号进行了计算，计算结果如图 3(b) 和图 3(c) 所示。图 3(b) 为 308-(1) 和 308-(2) 回波信号的对数梯度分布。说明了 12~17 km 回波光子数的对数梯度的分布受影响很大。虚线代表加了衰减片的 308-(2) 组信号与 355 nm 波长差分的结果。实线代表未加衰减的 308-(1) 组与 355 nm 波长差分的结果，实线表示的臭氧浓度在 15 km 还出现了负值，这显然是不合理的，同时也说明了图 3(a) 中 308-(1) 表示的回波信号是不正确。两者的结果在 12~17 km 高度区间差别很大，这说明光子并合作用对精确测量臭氧影响很大。计算的臭氧数密度结果在 12~13.6 km 高度区间内 308-(1) 组的臭氧数密度大于 308-(2) 组；在 13.6~17 km 高度区间内，308-(1) 组的臭氧数密度小于 308-(2) 组，甚至出现负值。12~17 km 高度区间的分布反映了 308 nm 波长通道光子并合作用对臭氧测量的影响过程。即随着高度的增加，臭氧浓度先是偏大，逐渐减小，继而偏小，然后缓慢地恢复到正常。

### 3.2 波长 355 nm 通道回波信号的光子并合作用对臭氧测量的影响

波长 355 nm 回波信号的光子并合作用对臭氧测量影响过程正与波长 308 nm 的影响相反。图 4(a) 中，A 为 308 nm 波长回波信号，累计的脉冲数为 15000 个；B 为 355 nm 波长未加中性衰减片时回波信号，累计

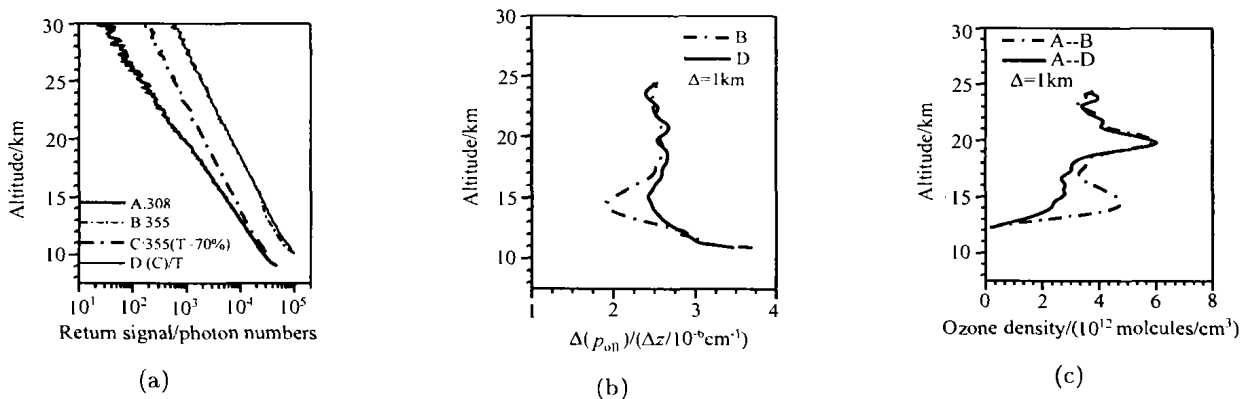


Fig.4 (a) return signal profiles, (b) signal logarithmic grads profiles, (c) ozone profiles

脉冲数 14000 个；C 为 355 nm 波长加了透过率为 70% 的中性衰减后采集的 7000 个激光脉冲的回波信号。D 分布是 C 信号经过衰减片透过率订正后的分布。B 和 D 组分布在 15 km 以下差别较大。图 4(b) 是 B 和 D 组的回波光子数的对数梯度分布，在 17 km 以下两者的臭氧浓度相差较大。将 B 和 D 组的回波信号分别与

A 进行差分计算, 得到臭氧分布如图 4(c) 所示。12~17 km 高度区间的计算结果的分布反映了 355 nm 波长通道的光子并合作用对臭氧测量的影响过程。在数据处理时, 一般都要对原始回波信号进行扣背景和平滑, 然后, 反演臭氧浓度和对结果再平滑。原始回波信号平滑方式是采用 1 km 的滑动平均平滑, 反演臭氧的距离分辨率取 1 km, 即  $z$  公里高度的臭氧浓度是由高度  $z-0.5$  公里和高度  $z+0.5$  公里两处的回波信号强度计算得到的。因此, 使得图 4(a) 中的  $B$  曲线和 4(b) 中的  $B$  曲线的光子并合作用影响不对应, 一般有 0.5~1.0 km 的错位。

### 3.3 降低光电倍增管的增益克服光子并合的影响

除了采用在接收光路上加装中性衰减片之外, 我们还采用了降低光电倍增管增益和分段测量的方法来克服光子并合现象的产生。图 5(a) 中的 308 H 和 355 H 代表高层的回波信号, 光电倍增管开始工作高度在 15 km 以上; 308 m 和 355 m 代表的低层的回波信号, 光电倍增管开始工作高度较低, 约在 10 km。与高层信号相比, 降低了光电倍增管的电压, 低层信号的光电倍增管的增益比高层信号的增益低。由这两组信号计算的臭氧分布如图 5(b) 所示。由高低层信号计算得到的臭氧分布在衔接区间, 趋势基本相同。高层臭氧分布与高低层臭氧的平均值的相对误差如图 5(c) 所示。在 21~28 km 区间, 相对误差小于 10%。该区间臭氧测量结果的一致性表明, 高层回波信号不存在失真。当光电倍增管接收强信号时, 降低光电倍增管的增益也是克服光子并合现象的有效措施之一。在 21 km 以下, 随高度下降, 臭氧浓度逐渐降低, 因此, 相对误差则逐渐增大。图 6 给出了 2000 年 7 月 30 日晚测量的结果。在臭氧分布衔接区间, 至少有 5 km 以上的范围不仅趋势相同而且相对误差小于 10%。

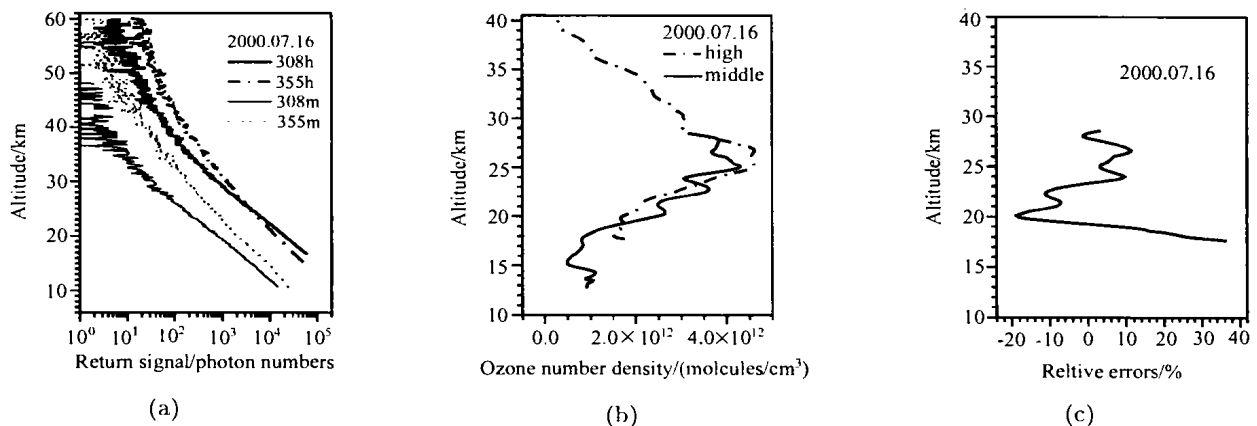


Fig.5 (a) return signal profiles, (b) ozone profiles, (c) ozone relative errors

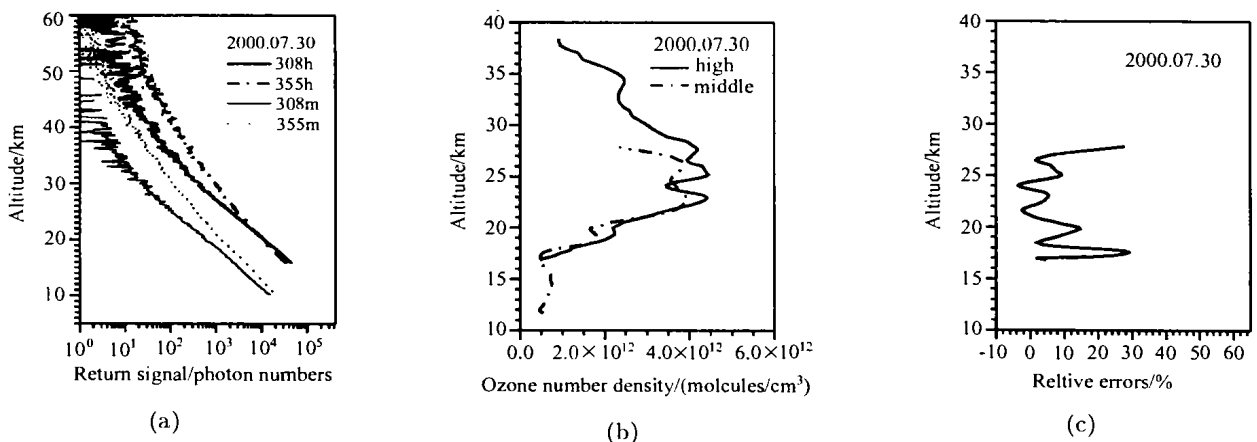


Fig.6 (a) return signal profiles, (b) ozone profiles, (c) ozone relative errors to mean

## 4 结 论

通过以上的实验和分析, 我们可以得到以下结论:

1) 差分吸收激光雷达测量平流层下部臭氧时, 如果光电倍增管接收到较低高度很强的大气后向散射回波信号, 会产生光子并合现象, 会引起信号失真。信号失真的过程比较复杂, 会给臭氧测量造成很大的误差。强吸收波长 308 nm 通道出现光子并合时, 测量的臭氧分布随着高度的增加, 臭氧浓度先是偏大, 逐渐减小, 继而偏小, 然后缓慢地恢复到正常。弱吸收波长 355 nm 通道出现光子并合时, 测量的臭氧分布随着高度的增加, 臭氧浓度先是偏小, 逐渐增大, 继而偏大, 然后缓慢地恢复到正常。

2) 为克服光子并合现象的产生, 可采用在接收光路上加装中性衰减片, 利用 PMT 的电子门控分段测量和改变光电倍增管的增益等措施来提高臭氧的测量精度。

## 参 考 文 献

- 1 宋正方编著. 应用大气光学基础 [M]. 气象出版社, 1990. 157-170
- 2 Hunt W H, Poultney S K. Testing the linearity of response of gated photomultipliers in wide dynamic range [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1975, NS-22: 116-120
- 3 Bristow M P. Lidar-signal compression by photomultiplier gain modulation: influence of detector nonlinearity [J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(27): 6468-6479
- 4 Whiteman D N, Melfi S H, Ferrare R A. Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere [J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31(16): 306-308
- 5 Hiroshi Shimizu, Yasuhiro Sasano, Hideaki Nakane *et al.* Large scale laser radar for measuring aerosol distribution over a wide area [J]. *Appl. Opt.*, 1985, 24(5): 617-626

# Analysis of Effects of Photon Overlap on Lidar Measurement of Ozone

Hu Shunxing, Hu Huanling, Wu Yonghua, Zhou Jun

( Atmospheric Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,

Hefei 230031 China )

**Abstract** In lidar measurements of ozone in lower stratosphere, the phenomena of photon overlap are found when PMT receives the stronger signals from lower altitude. Data processing and analyses show that photon overlap effect greatly on lower stratospheric ozone measurements. To avoid the phenomena of photon overlap, many measures such as neutral optical attenuator, gate switch and reducing the gain of PMT, are taken to enhance accuracy of ozone measurements.

**Key words** lidar; photon overlap; ozone

胡顺星 (1966 -), 男, 博士生, 现从事激光雷达大气探测研究工作。