激光雷达探测水云退偏振比的敏感性研究

孙贤明,万 隆,王海华

(山东理工大学 电气与电子工程学院,山东 淄博 255049)

摘 要:利用激光雷达探测水云微物理特性时,雷达回波信号中会出现退偏振信息,这是由激光与云层的多次散射造成的,利用这些退偏振信息可以反演云层特性。利用半解析蒙特卡罗方法研究了波长为 0.532 μm 激光雷达后向散射退偏振比对云底高度、云滴大小以及消光系数的敏感性。计算结果表明,对于相同的接收视场角,激光雷达与云层的距离越远,退偏振比越高;消光系数越大,退偏振比越大;雷达接收视场角越大,被接收器捕获的多次散射信息越多,因此退偏振比越大。当穿透深度较小时,云滴尺寸较小的云层退偏比更高,随着穿透深度的增加,云滴尺寸更大的云层退偏振比更大。

关键词:激光雷达; 退偏振比; 多次散射; 蒙特卡罗

中图分类号:O436 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.0906001

Sensitivity study on lidar detection of the depolarization ratio of water clouds

Sun Xianming, Wan Long, Wang Haihua

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, ZiBo 255049, China)

Abstract: The polarization lidar returns exist a depolarization signal due to the occurrence of multiple scattering when detecting the microphysics characteristics of liquid water clouds by using lidar. The depolarization information can be used to quantitatively retrieve the clouds characteristics. The semi-analytic Monte Carlo simulation was used to study the backscattering depolarization ratio of polarization lidar with the wavelength of 0.532 μm to the height of clouds base, size of the clouds droplets and the extinction coefficient. From the results, if the receiving angle of field remains constant, the depolarization ratio increases with the increase of the distance between the lidar and the clouds and the increase of the extinction coefficients. The impacts of multiple scattering increase with the increase of the receiver field of view angles, so a bigger receiver field of the angle will generate a bigger depolarization ratio. The depolarization ratio is bigger for the clouds with a smaller clouds droplets when the penetration depth is small, but it will be bigger for the clouds with a bigger clouds droplets when the penetration depth is more deeply.

Key words: lidar; depolarization; multiple scattering; Monte Carlo method

收稿日期:2016-01-11; **修订日期**:2016-02-14

基金项目:国家自然科学基金(61205191);山东省自然科学基金(ZR2013FL023)

作者简介:孙贤明(1979-),男,副教授,博士,主要从事光散射和激光雷达遥感气溶胶特性方面的研究。Email:xmsunsdut@163.com

0 引 言

Liou 等人最早于 1971 年发现[1]：由于多次散射的影响，水平线性偏振激光雷达在水云中会探测到垂直偏振信号。近年来，偏振激光雷达被广泛应用于云层和气溶胶的观测中[2]，2006 年 NASA 发射了带有偏振通道的 Calipso 星载激光雷达，很多研究者利用其产品对云和气溶胶特性进行了研究[3-6]，但是利用偏振通道信息对云层特性进行遥感反演尚不成熟，主要原因有：第一，真实云层的结构，如数密度、云滴尺寸等特性，时空性变化很大；第二，尽管考虑二阶散射的快速算法已经建立，但是考虑更高次散射的精确算法仍然受限于蒙特卡罗方法的计算速度。

针对以上问题，文中利用半解析蒙特卡罗方法模拟云层对激光的后向散射退偏振[7]，分析了退偏振比随云滴有效半径和消光系数的变化。由于激光雷达观测视场角小，且与云层距离远，因此利用传统蒙特卡罗方法模拟，光子很难进入激光雷达的探测器，半解析蒙特卡罗方法的基本原理为光子在云层中随机游走时，每次与粒子碰撞都有一部分能量按照一定的统计概率散射到雷达接收器上，相比于传统的蒙特卡罗方法，半解析蒙特卡罗方法在保证了精度的前提下使计算速度大幅提高。

1 考虑偏振的半解析蒙特卡罗方法

光的偏振特性通常由斯托克斯(Stokes)矢量来描述，即(I,Q,U,V)四个参量，对于水平线偏振光，斯托克斯矢量为$(1,1,0,0)$，对于垂直线偏振光，斯托克斯矢量为$(1,-1,0,0)$，在蒙特卡罗模拟过程中需要对光子散射方向和游走步长进行抽样，同时，在每一步游走过程中需要对光子的偏振状态进行跟踪。

光子入射方向和偏振状态初始化以后，首先需要对光子随机游走步长进行抽样，其概率为 $s=-\ln\xi/\sigma_{ext}$，其中 s 为步长，ξ 为[0,1]直接的均匀随机数，σ_{ext} 为消光系数。进入云层后的光子将与云滴进行弹性碰撞，假设一个光子的能量为 1，则此时一部分光子能量 ε 被直接散射进雷达接收器，其概率为[8]：

$$\mathrm{Prob}=\begin{cases}(-\hat{n}_r\cdot\hat{n}_{cr})\dfrac{A}{\pi L^2}P(t,R_c;\hat{n}_r,\hat{n}_{cr})\times\exp\left[-\displaystyle\int_0^L\sigma_{ext}(t,R_r-x\hat{n}_{cr})\mathrm{d}x\right] \\ 0 \quad \mathrm{if}(-\hat{n}_r\cdot\hat{n}_{cr})\geqslant\cos\Theta \\ \quad \mathrm{if}(-\hat{n}_r\cdot\hat{n}_{cr})<\cos\Theta\end{cases} \tag{1}$$

式中：R_r 为接收器的位置矢量；R_c 为碰撞点位置矢量；$\hat{n}_r$ 为垂直于接收器孔径的单位矢量；$\hat{n}_{cr}$ 为碰撞点指向接收器的单位矢量$\hat{n}_{cr}=(R_r-R_c)/|R_r-R_c|$，$\hat{n}_c$ 为碰撞前光子的传播方向；A 为接收器孔径面积；L 为碰撞点和接收器之间的距离；$L=|R_r-R_c|$；Θ 为接收视场半角；P 为单次散射相函数。

剩余部分光子能量$(1-\varepsilon)$继续进行散射，散射方向抽样按照 Mie 相函数进行抽样，对于偏振入射光来说：

$$P(\alpha,\beta)=P_{11}(\alpha)I_0+P_{12}(\alpha)[Q_0\cos(2\beta)+U_0\sin(2\beta)] \tag{2}$$

式中：$P(\alpha,\beta)$为单次散射相函数；$P_{11}(\alpha)$和 $P_{12}(\alpha)$为单次散射相矩阵的元素；α 为散射角；β 为旋转方位角。

将每一步碰撞后散射进接收器的能量相加作为激光雷达接收的后向散射信号，而不是按照传统蒙特卡罗方法统计经过多次散射后散射进接收器的光子数[9-10]。

光子在随机游走过程中，其偏振状态也在发生变化，因此每一步散射过程都需要对其偏振状态进行跟踪，对每一次散射过程来说，出射斯托克斯矢量和入射斯托克斯矢量之间的关系为[11-12]：

$$\begin{pmatrix}I\\Q\\U\\V\end{pmatrix}=L(-i_2)P(\alpha)L(i_1)\begin{pmatrix}I_0\\Q_0\\U_0\\V_0\end{pmatrix} \tag{3}$$

式中：$L(-i_2)$和 $L(i_1)$为旋转矩阵；i_1 和 i_2 为旋转角。如图 1 所示，可由球面几何学推导得到：

$$\cos i_1=\frac{-\mu+\mu'\cos\alpha}{\pm(1-\cos^2\alpha)^{1/2}(1-\mu'^2)^{1/2}} \tag{4}$$

$$\cos i_2=\frac{-\mu'+\mu\cos\alpha}{\pm(1-\cos^2\alpha)^{1/2}(1-\mu^2)^{1/2}} \tag{5}$$

假设 S_1 为入射斯托克斯矢量，S_2 为出射斯托克斯矢量，由于斯托克斯矢量为参照子午面的矢量，需要首先将入射斯托克斯矢量乘以 $L(i_1)$，将 S_1 从所在的入射子午面旋转到散射平面，然后乘以 $P(\alpha)$，在散射面上得到散射的斯托克斯矢量，最后乘以 $L(-i_2)$，将散射面上的斯托克斯矢量旋转到 S_2 所在的子午面。

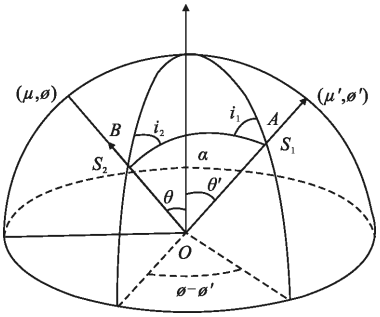


图 1 子午平面几何图

Fig.1 Meridian planes geometry

2 数值结果及分析

文中采用的云层中云滴的尺寸分布为 Gamma 分布[13],即

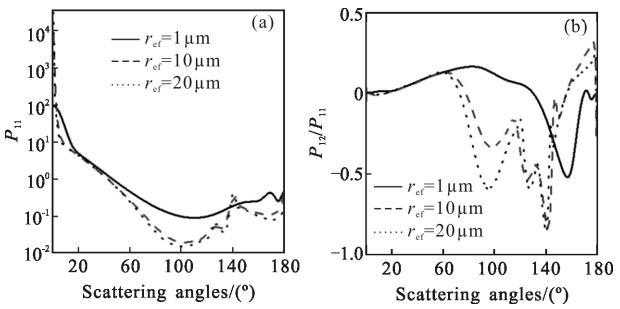
$$n(r)=N_0 r^{\mu} e^{-\mu\frac{r}{a_0}} \tag{6}$$

式中:N_0 为归一化常数,定义为 $N_0=\frac{\mu^{\mu+1}}{\Gamma(\mu+1)a_0^{\mu+1}}$,为 Gamma 函数;$\mu$ 为形状参数;a_0 为模半径。利用有效半径和有效方差两个重要参数来定义云滴的尺寸分布,分别定义为:

$$r_{ef}=\frac{\int_0^{\infty} r\pi r^2 n(r)\mathrm{d}r}{\int_0^{\infty}\pi r^2 n(r)\mathrm{d}r} \tag{7}$$

$$v_{ef}=\frac{\int_0^{\infty}(r-r_{ef})^2\pi r^2 n(r)\mathrm{d}r}{r_{ef}^2\int_0^{\infty}\pi r^2 n(r)\mathrm{d}r} \tag{8}$$

图 2 给出了水云有效半径分别为 1 μm,10 μm 和 20 μm、有效方差为 1/9 时其单次散射相矩阵元素。假设云滴为球形,因此单次散射相矩阵只有四个非独立元素,即 P_{11}、P_{12}、P_{33}、P_{43}。从图中可以看出,粒子有效半径越大,单次散射相函数的前向性越强,有效半径越小,前向性越小,因此越趋近于各向同性,这是因为粒子尺寸越大其衍射越强。



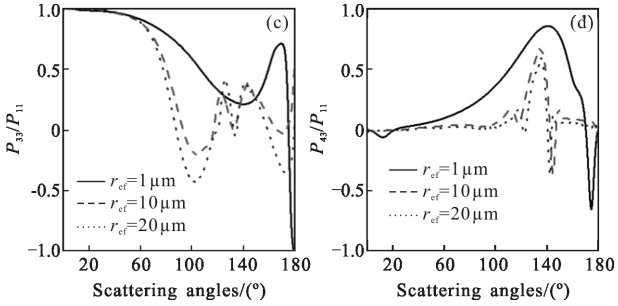


图 2 单次散射相矩阵随散射角的变化

Fig.2 Single scattering phase matrix varying with the scattering angles

图 3 给出了消光系数为 0.017 5 m^{-1}、几何厚度为 200 m 的水云对 0.532 μm 激光雷达的后向散射退偏振比,激光雷达视场角为 10 mrad。从图中可以看出:(1) 随着穿透深度的增加,雷达退偏振比升高,这是因为随着穿透深度的增加,多次散射增强,光子偏离

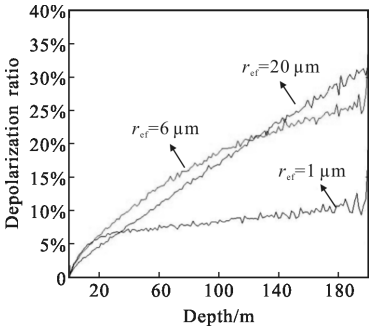


图 3 退偏振比随有效半径和穿透深度的变化

Fig.3 Depolarization ratio varying with the depth and effective radius

后向方向,但仍在视场角范围内;(2) 当穿透深度很浅时,云滴尺寸越小退偏振比越高,随着穿透深度的增加,尺寸大的退偏振比更高,这是因为云滴的尺寸越大,其前向散射越强,尺寸越小,越趋向于各向同性散射,当光子在云滴尺寸更大的云层传输时,由于多次散射造成的激光发散更小,而对于云滴尺寸更小的云层来说,当穿透深度较小时,激光已经足够发散,因此其退偏振比也更高;(3) 当穿透深度更深时,云滴尺寸更小的云层退偏振比增长变的缓慢,这是因为虽然其对激光的散射更为发散,但是由于视场角的限制,视场角外的光子已经逃离了雷达接收器的探测范围,而云滴尺寸更大的云层退偏振比增长更快,这是因为尽管尺寸更大的云滴前向散射性更

强,但是随着穿透深度的增加,在视场角范围内激光束的发散程度也更大。

图 4 给出了云滴有效半径为 10 μm、云层几何厚度为 200 m、消光系数为 0.017 5 m^{-1},雷达接收视场半角分别为 1 mrad,5 mrad 和 10 mrad 时, 雷达退偏振比随穿透深度的变化。从图中可以看出,雷达接收视场角越大,退偏振比越高,这是因为对于更大的视场角, 能够被雷达接收的多次散射信息越多,因此造成退偏振比越高。图 5 给出了云滴有效半径为10 μm、雷达接收视场角为 10 mrad 时,消光系数分别为 0.013 3 m^{-1} 和 0.01 m^{-1} 的云层对激光雷达的退偏振比。从图中可以看出,消光系数越大,退偏振比越高,这是因为消光系数越大,光子在云层中随机游走时步长越短越容易和云滴碰撞, 激光发散程度也越高,因此退偏振比也越高。

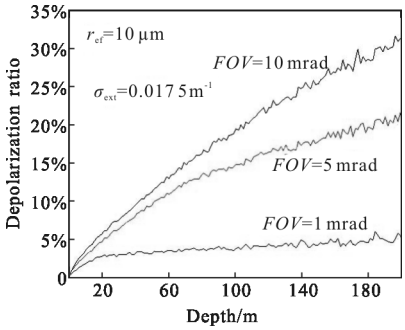


图 4 退偏振比随接收视场角和穿透深度的变化

Fig.4 Depolarization ratio varying with the depth and field of view angles

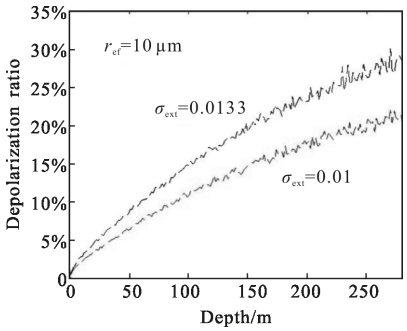


图 5 退偏振比随消光系数和穿透深度的变化

Fig.5 Depolarization ratio varying with the depth and extinction coefficients

图 6 给出了云滴有效半径为 10 μm、雷达接收视场角为 5 mrad、消光系数为 0.017 5 m^{-1}、云层厚度为 200 m 时,雷达退偏振比随穿透深度的变化曲线,激光雷达与云层的距离分别为 1 000 m 和 3 000 m。从图中可以看出,激光雷达与云层的距离越大,雷达退偏振比越高,这是因为对于相同的接收视场角,距离越远视场角内涵盖的云层范围越宽, 因此经历多次散射后回到探测器的光子越多, 从而造成退偏振比更高。

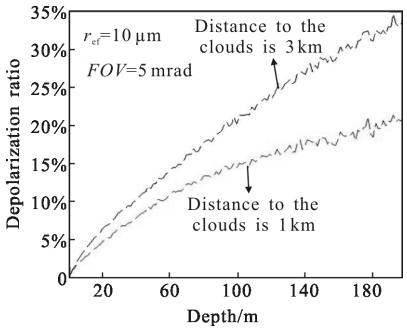


图 6 退偏振比随穿透深度和云层与雷达间的距离变化

Fig.6 Depolarization ratio varying with the depth and distance between clouds and lidar

3 结 论

利用蒙特卡罗方法模拟了雷达退偏振比对云滴有效半径、消光系数、雷达接收视场角以及雷达与云层之间距离的敏感性。从计算结果可以看出,对于较大的雷达视场角, 多次散射对利用激光雷达遥感反演云层微物理特性的影响必须加以考虑。对于云滴形状为球形的水云来说,随着穿透深度的增大,多次散射的影响也随之提高, 造成雷达退偏振比快速增大, 雷达退偏振比对云滴有效半径表现出很强的敏感性,当穿透深度较小时,云滴较小的云层退偏振比更高,随着穿透深度的增大,云滴更大的云层退偏振比更高。激光雷达与云层之间的距离越远,则视场角内涵盖的范围更广, 激光雷达能够捕获的多次散射信息越多,因此退偏振比也更高。

参考文献:

[1] Liou K N, Schotland R M. Multiple backscattering and depolarization from water clouds for a pulsed lidar system [J]. ***J Atmos Sci***, 1971, 28(5): 772-784.

[2] Liu Dong, Qi Fudi, Jin Chuanji, et al. Polarization lidar observations of cirrus clouds and Asian dust aerosols over

Hefei[J]. ***Chinese Journal of Atmosphere Science***, 2003, 27 (6): 1093-1100. (in Chinese)
刘东, 戚福弟, 金传佳, 等. 合肥上空卷云和沙尘气溶胶退偏振比的激光雷达探测[J]. 大气科学, 2003, 27(6): 1093-1100.

[3] Bissonnette L R, Roy G, Roy N. Multiple-scattering-based lidar retrieval: method and results of cloud probings[J]. ***Appl Optics***, 2005, 44(26): 5565-5581.

[4] Liu D, Wang Z E, Liu Z Y, et al. A height resolved global view of dust aerosols from the first year CALIPSO lidar measurements [J]. ***Journal of Geophysical Research: Atmospheres***, 2008, 113(D16): D16214.

[5] Donovan D P, Apituley A. Practical depolarization-ratio based inversion procedure: lidar measurements of the Eyjafjallajküll ash cloud over the Netherlands[J]. ***Appl Optics***, 2013, 52 (11): 2394-2415.

[6] Kim D, Lee J. Measuring cloud droplet effective radius and liquid water content using changes in degree of linear polarization along cloud depth [J]. ***Optics Letters***, 2014, 39 (12): 3378-3381.

[7] Ramella-Roman J, Prahl S, Jacques S. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: part I[J]. ***Optics Express***, 2005, 13(12): 4420-4438.

[8] Weitkamp C. Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere[M]. Heidelberg: Springer, 2005: 321.

[9] Sun Xianming, Xiao Sai, Wan Long, et al. Monte Carlo simulation of polarization lidar multiple scattering by multi-layer discrete random media [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2015, 42(12): 1213001. (in Chinese)
孙贤明, 肖赛, 万隆, 等. 蒙特卡罗方法模拟多层离散随机介质对偏振激光雷达的多次散射 [J]. 中国激光, 2015, 42 (12): 1213001.

[10] Sun Xianming, Xiao Sai, Wan Long, et al. Monte Carlo simulation of polarization lidar multiple scattering depolarization by water cloud[J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2015, 42(11): 1113005. (in Chinese)
孙贤明, 肖赛, 万隆, 等. 蒙特卡罗方法模拟水云对偏振激光雷达的多次散射去极化 [J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1113005.

[11] Hu Y X, Yang P, Lin B, et al. Discriminating between spherical and non-spherical scatterers with lidar using circular polarization: a theoretical study [J]. ***JQSRT***, 2003, 79-80: 757-764.

[12] Hu Y X, Winker D, Yang P, et al. Identification of cloud phase from PICASSO-CENA lidar depolarization: a multiple scattering sensitivity study[J]. ***JQSRT***, 2001, 70(4-6): 569-579.

[13] Deirmendjian D. Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions[M]. Amsterdam: Elsevier, 1969: 218.