

# 复杂大气背景下机载通信终端与无人机目标之间的激光传输特性研究\*

王明军<sup>†</sup> 魏亚飞 柯熙政

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 西安 710048)

(2018年11月19日收到; 2019年3月7日收到修改稿)

云层、气溶胶和大气分子是大气环境的主要组成部分. 本文基于逐次散射法求解辐射传输方程, 建立了复杂大气背景下机载无线光通信终端与地空无人机目标之间的激光传输模型. 考虑真实大气背景中卷云、大气分子和气溶胶存在的情况下, 数值计算了  $1.55\ \mu\text{m}$  激光经机载通信终端发出后通过大气背景的直接传输和一阶散射传输后接收功率随无人机目标高度的变化关系, 分析了飞机在云上、云中和云下以及卷云冰晶粒子有效半径、飞机与无人机之间的水平距离对接收激光信号传输功率的影响. 数值结果表明: 激光通过卷云传输的功率很大程度上取决于飞机在云上、云下或云中的位置; 飞机与无人机目标之间的水平距离和卷云冰晶粒子的有效半径对激光直接传输和一阶散射传输影响较大; 与云上大气相比, 云下的大气分子和气溶胶对激光有较大的衰减. 本文工作可为进一步开展地空链路上复杂大气背景对机载与低空无人机目标激光通信实验、无人机编队、指挥和组网技术的研究提供理论支撑.

**关键词:** 卷云, 气溶胶, 大气分子, 激光传输, 无人机

**PACS:** 42.25.Dd, 42.68.Ge, 42.68.Jg

**DOI:** 10.7498/aps.68.20182052

## 1 引言

地空链路上的大气成分主要是云层、气溶胶以及大气分子, 它们对激光有吸收与散射作用<sup>[1-3]</sup>, 研究机载激光在复杂大气背景下的传输与散射特性对目标探测、大气环境探测、无线光通信以及遥感等方面具有重要意义<sup>[4-7]</sup>.

云层作为背景干扰之一, 对地基、天基观测或者通信工程应用的影响较大, 很早就备受关注<sup>[8-10]</sup>. 早在 20 世纪 70 年代, Hovis 等<sup>[11]</sup>研究了卷云、卷层云和尾迹云在  $0.68\text{--}2.4\ \mu\text{m}$  波段内的光谱反射特征, 并根据机载光谱仪测得的数据来分析自然冰

云与尾迹云之间的差异. 1990 年, Liou<sup>[12]</sup>给出了红外激光 ( $3.7\ \mu\text{m}$  和  $10\ \mu\text{m}$ ) 通过卷云背景下的目标探测几何模型, 并得出  $3.7\ \mu\text{m}$  激光波长受背景辐射的影响相对较小, 因此在薄卷云存在的情况下可使用该波长检测空中、地面上的目标, 使用该几何模型, 则可以有效评估激光通过卷云的传输特性. 1998 年, Uthe 等<sup>[13]</sup>在 SUCCESS 实地运动期间采用机载激光雷达观测尾迹云和卷云, 可根据由激光雷达生成的实时图像来判断得出冰云是否在飞机的上方、前方或下方. Liou 等<sup>[14]</sup>建立了近红外激光通过薄卷云的机载传输模型, 计算了  $1.315\ \mu\text{m}$  激光通过卷云模型的传输特性, 并得到了高于一阶散射的传输能量很小, 可以忽略不计. Kolb 等<sup>[15]</sup>

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61771385, 61377080, 60977054) 和陕西省重点产业创新项目 (批准号: 2017ZDCXL-GY-06-01) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [wmjxd@aliyun.com](mailto:wmjxd@aliyun.com)

认为激光在卷云中的传输对各种激光雷达系统以及美国空军机载激光系统的影响有着不可忽视的作用, 根据区域大气建模系统 (RAMS) 的数据对卷云进行一维 (1D) 建模, 并计算了  $1.315\ \mu\text{m}$  激光通过该 1D 卷云的传输特性. Norquist 等 [16] 的研究表明高空激光系统会受到卷云的影响, 将激光传输模型应用于测量和反演卷云的特性可以确定卷云对目标或接收器上的功率的影响.

针对大气气溶胶和大气分子对激光传输特性的研究, 王红霞等 [17] 基于 Mie 理论计算了  $1.06\ \mu\text{m}$  和  $10.6\ \mu\text{m}$  激光在沙尘性、水溶性、海洋性和煤烟性四种不同类型气溶胶的传输特性, 表明煤烟性气溶胶对  $1.06\ \mu\text{m}$  激光的传输衰减影响最大, 而沙尘性气溶胶对  $10.6\ \mu\text{m}$  激光的传输衰减影响最大. Hess 等 [18] 开发了可用于计算典型 10 种不同类型的气溶胶粒子在波长  $0.25\text{--}40\ \mu\text{m}$  之间的消光系数、吸收系数、相函数等特性的软件包 OPAC (optical properties of aerosols and clouds), 使用该软件包可计算出任意类型、任意混合比气溶胶的光学特性. Koepke 等 [19] 计算了不同轴比的椭球形沙尘气溶胶的消光系数、单次散射反照率等光学特性, 并比较了椭球形气溶胶与球形气溶胶光学特性的差异. 杨玉峰等 [20] 利用 Mie 理论和 Monte Carlo 法研究了激光通过沙尘气溶胶条件下的传输特性, 表明  $10.6\ \mu\text{m}$  激光受到的衰减较小. 石广玉 [1]、廖国男 [7]、饶瑞中 [21] 详细综述了使用逐线积分法 (line-by-line)、相关  $k$  分布法、带模式 (band mode) 等计算大气分子的吸收特性. 赵少卿和张维 [22] 研究了  $1.54\ \mu\text{m}$  与  $1.06\ \mu\text{m}$  两种激光的大气传输特性, 表明大气分子对  $1.54\ \mu\text{m}$  与  $1.06\ \mu\text{m}$  激光的衰减基本可以忽略不计.

本文主要将卷云冰晶粒子、大气气溶胶等对激光散射特性与云层的辐射传输理论相结合, 建立激光通过复杂大气背景下飞机机载终端与无人机目标之间的激光传输特性模型. 数值计算了波长为  $1.55\ \mu\text{m}$  激光通过云层模型的直接传输和一阶散射传输, 分别得到了在考虑、不考虑真实大气分子和气溶胶两种模式下无人机目标接收到的信号光功率. 详细讨论了飞机在云上、云下以及云中三种情况下, 激光的直接传输、一阶散射功率传输随无人机目标高度的变化关系, 分析了卷云粒子、飞机与

目标之间的水平距离对激光传输功率的影响.

## 2 复杂大气背景下两种激光传输模式及散射特性

### 2.1 卷云中激光直接传输模式

对于高空卷云而言, 激光的直接传输服从指数衰减 [4,7,14–16], 传输功率  $F$  可表示为

$$F = F_0 \exp(-\beta_{\text{tot}}s) = F_0 \exp[-(\beta_m + \beta_a + \beta_c)s], \quad (1)$$

式中  $F_0$  为激光功率, 单位为 mW;  $\beta_{\text{tot}}$  为总消光系数,  $\beta_m$  为大气分子 (水汽、二氧化碳、臭氧等) 的消光系数,  $\beta_a$  为气溶胶的消光系数,  $\beta_c$  为卷云冰晶粒子的消光系数;  $s$  为激光传输路径中的云顶与云底之间的斜程距离, 如图 1 所示.

$$s = \frac{h_t - h_b}{\eta}, \quad (2)$$

其中,  $\eta = \sin \gamma$ ;  $\gamma = \arctan[(h_a - h_{\text{UAV}})/d]$ ;  $h_a$ ,  $h_t$ ,  $h_b$ ,  $h_{\text{UAV}}$  分别为飞机高度、云顶高度、云底高度和无人机目标高度;  $d$  为机载通信终端与无人机目标之间的水平距离. 若考虑云上、云下的大气分子和气溶胶的衰减, 则 (1) 式变为

$$\begin{aligned} F &= F_0 \exp(-\beta_{\text{tot}}s) \times \exp[-(\beta_{nc,a}m + \beta_{nc,b}n)] \\ &= F_0 \exp[-(\beta_{\text{tot}}s + \beta_{nc,a}m + \beta_{nc,b}n)], \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\beta_{nc,a}$  和  $\beta_{nc,b}$  分别为云上、云下的大气分子和气溶胶的消光系数;  $m = (h_a - h_t)/\eta$  为  $OP$ , 表示飞机与云顶之间的斜程距离;  $n = (h_b - h_{\text{UAV}})/\eta$  为  $QN$ , 表示云底与目标之间的斜程距离. 图 1 中

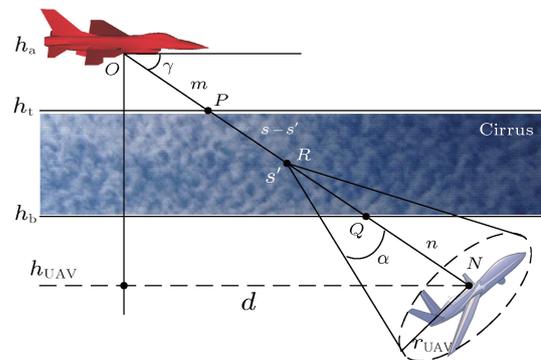


图 1 飞机对无人机目标的几何模型中激光通过卷云的直接传输、一阶散射传输的示意图

Fig. 1. Laser direct transmission, first order scattering transmission through cirrus clouds in aircraft-UAV targets geometric model.

给出了激光扫描角  $\gamma$  和云中斜程路径  $s$  的定义; 其中  $s' = RQ$ ,  $s - s' = PR$ ,  $n = QN$ ,  $m = OP$ .

## 2.2 考虑卷云冰晶粒子一阶散射的激光传输模式

在直接传输模式的基础上, 本节将给出云层中冰晶粒子对激光一阶散射传输模式, 并将其应用于机载通信终端-无人机目标系统. 考虑漫射光的基本辐射传输方程为<sup>[1,2,16-19]</sup>,

$$\frac{dF(s, \Omega)}{\beta_e ds} = -F(s, \Omega) + J(s, \Omega), \quad (4)$$

式中源函数  $J(s, \Omega)$  为

$$J(s, \Omega) = \frac{\varpi}{4\pi} \int_{4\pi} F(s, \Omega') P(\Omega', \Omega) d\Omega' + (1 - \varpi) B(T), \quad (5)$$

其中  $s$  表示沿激光传输方向的路径长度,  $\varpi$  为单次散射反照率, 对于入射波长小于  $4 \mu\text{m}$  时可以忽略 Planck 函数  $B(T)$ <sup>[2,5,9,15,23-25]</sup>, 散射相函数  $P(\Omega', \Omega)$  是入射立体角  $\Omega'$  和出射立体角  $\Omega$  的函数, 微分立体角  $d\Omega' = d\mu' d\phi'$ , 这里  $\mu' = \cos \theta'$ ,  $\theta'$  为入射天顶角,  $\phi'$  为入射方位角.

由 (4) 式可得  $s = 0$  处的解为

$$F(0, \Omega) = F(s, \Omega) \exp(-\beta_e s) + \int_0^s J(s', \Omega) \exp(-\beta_e s') \beta_e ds', \quad (6)$$

等式右边第一项为激光的直接传输, 右边第二项为多次散射光分量. 采用逐次散射法求解 (6) 式多次散射的问题, 则 (6) 式可写为

$$F^{(n)}(0, \Omega) = \int_0^s J^{(n)}(s', \Omega) \exp(-\beta_e s') \beta_e ds', \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (7)$$

式中  $n$  表示多次散射的阶数,  $n = 1$  表示一阶散射,  $n = 2$  表示二阶散射;  $J^{(n)}(s', \Omega)$  为  $n$  阶源函数, 可写为

$$J^{(n)}(s', \Omega) = \frac{\varpi}{4\pi} \int_{\Delta\Omega} F^{(n-1)}(s', \Omega') P(\Omega', \Omega) d\Omega', \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (8)$$

其中  $P(\Omega', \Omega)$  为卷云冰晶粒子云层的散射相函数. 由 (1) 式可得

$$F^{(0)}(s', \Omega') = F_0 \exp[-\beta_e (s - s')], \quad (9)$$

其中  $s'$  为图 1 所示的  $RQ$ , 表示为沿激光传输路径中卷云中  $R$  点与云底之间的斜程距离. 又由 (7) 式

可得一阶源函数为

$$J^{(1)}(s', \Omega) = \frac{\varpi}{2} F^{(0)}(s', \Omega') \int_0^\alpha P(\theta) \sin \theta d\theta, \quad (10)$$

其中,  $P(\theta)$  为云的相函数, 是散射角  $\theta$  的函数; 当从  $R$  点观测时,  $\alpha$  与无人机目标的有效半径  $r_{\text{UAV}}$  有关, 定义为

$$\alpha = \arctan[r_{\text{UAV}} / (n + s')]. \quad (11)$$

结合 (3) 式可得一阶散射传输的功率为

$$F^{(1)}(0, \Omega) = \exp[-(\beta_{nc,a} m + \beta_{nc,b} n)] \times \int_0^s J^{(1)}(s', \Omega) \exp(-\beta_e s') \beta_e ds'. \quad (12)$$

与 (3) 式同理, (12) 式同样也考虑了云外非云物质的指数衰减.

## 2.3 复杂大气背景下激光在卷云和气溶胶中的传输与散射特性

本节将在第 2.1 和 2.2 节给出的激光传输模式基础上, 给出一种复杂大气背景中包括卷云、大气分子和气溶胶的激光传输与散射特性. 当激光在复杂大气背景下传输时, 首先需要知道卷云冰晶粒子层的消光系数  $\beta_e$ 、相函数  $P(\Theta)$ 、单次散射反照率  $\varpi$  等散射特性, 其次得到气溶胶和大气分子的消光系数. 卷云的消光系数  $\beta_e$ 、散射系数  $\beta_s$ 、单次反照率  $\varpi$  分别为<sup>[1, 7]</sup>

$$\beta_e = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \sigma_{\text{ext}}(r) n(r) dr, \quad (13)$$

$$\beta_s = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \sigma_{\text{sca}}(r) n(r) dr, \quad (14)$$

$$\varpi = \beta_s / \beta_e, \quad (15)$$

其中,  $r_{\min}$ ,  $r_{\max}$  分别为卷云中冰晶粒子的最小、最大尺度;  $\sigma_{\text{ext}}$ ,  $\sigma_{\text{sca}}$  分别为冰晶尺度为  $r$  时的消光截面和散射截面. 为了与 (10) 式的定义保持一致, 采用  $P(\Theta)$  表示卷云的平均相函数,

$$P(\Theta) = \frac{2\pi}{k^2 \beta_s} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} (|S_1|^2 + |S_2|^2) n(r) dr, \quad (16)$$

其中  $n(r)$  为粒子尺度谱. 现有卷云粒子的尺度谱比较多, 有 gamma 分布、对数正态分布、双峰伽玛分布、幂指数分布等. 本文采用最常用的 gamma 分布<sup>[25-30]</sup>,

$$n(r) = N_0 r^{(1-3b)/b} \cdot \exp\left(-\frac{r}{ab}\right), \quad (17)$$

式中  $N_0$  是单位体积内的粒子总数;  $a$  为有效半径

$r_{\text{eff}}$ , 一般小于  $100 \mu\text{m}$ ;  $b$  为有效方差, 典型卷云  $b$  值在 0 到 0.5 之间<sup>[27–30]</sup>, 本文选取  $b$  值为 0.25.

图 2(a) 和图 2(b) 分别给出了  $1.55 \mu\text{m}$  激光入射时, 卷云的平均消光系数、单次散射反照率随卷云有效半径的变化. 由图 2(a) 可知, 卷云的平均消光系数随卷云中冰晶粒子的有效半径的增大而增大. 由图 2(b) 可知,  $1.55 \mu\text{m}$  激光入射下卷云单次散射反照率的值均大于 0.998, 这是由于该波长所对应的冰晶折射率的虚部较小<sup>[31]</sup>, 说明冰晶粒子的吸收作用很小, 衰减主要由散射造成的.

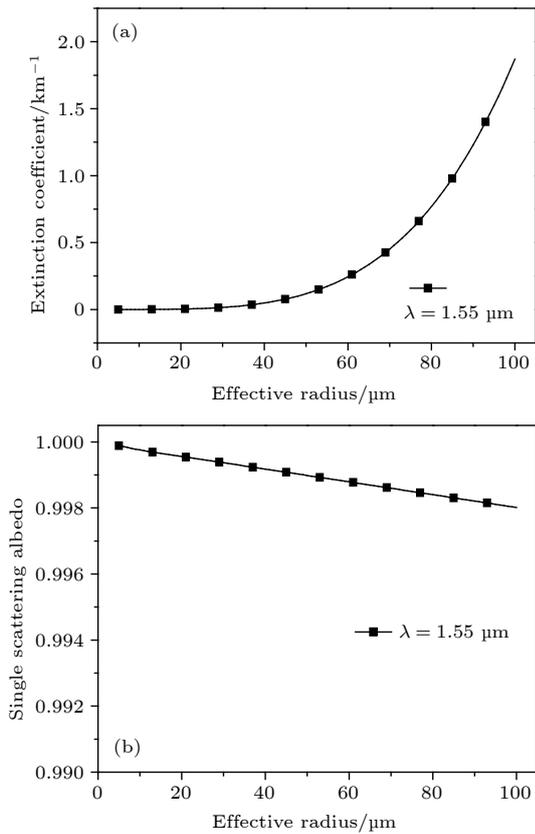


图 2 卷云的消光系数、单次散射反照率随卷云有效半径的变化

Fig. 2. (a) Average extinction coefficient, (b) single scattering albedo of cirrus clouds vs. effective radius at  $1.55 \mu\text{m}$  wavelength.

图 3 为卷云的平均相函数随散射角的变化, 可以看出, 卷云的平均相函数具有强前向衍射峰, 且随有效半径的增大, 则卷云相函数的前向峰值越大.

根据文献<sup>[32]</sup>所给出的常用激光波长在 6 种大气模式下大气分子与气溶胶吸收和散射系数, 图 4(a) 给出了美国标准大气模式下  $1.55 \mu\text{m}$  激光所对应的大气分子的散射系数  $\sigma_m$ 、消光系数  $\beta_m$  随

海拔高度的变化, 可以看出低层大气中, 衰减主要由吸收造成的, 且随海拔高度的增加, 大气分子的吸收作用越来越小; 散射作用则反之变得越来越强. 图 4(b) 为乡村型、能见度为 23 km 的气溶胶的散射系数  $\sigma_a$ 、消光系数  $\beta_a$  随海拔高度的变化, 可以看出  $1.55 \mu\text{m}$  激光下气溶胶的散射系数和消光系数的曲线很接近, 说明气溶胶的吸收作用很小.

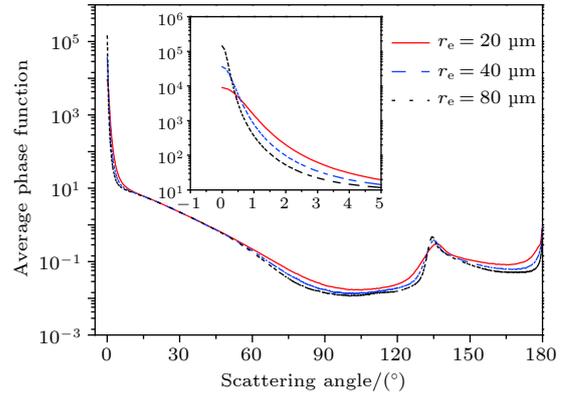


图 3 卷云的平均相函数随散射角的变化

Fig. 3. Average phase function of cirrus clouds vs. scattering angle.

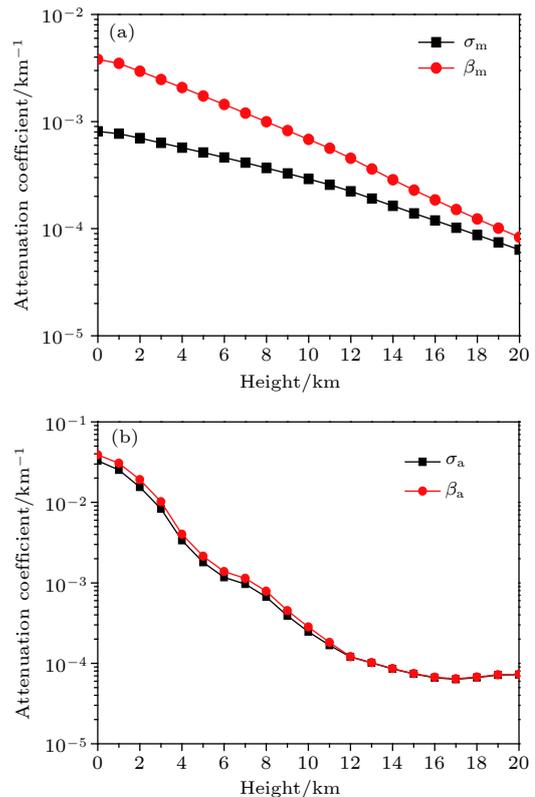


图 4 (a) 大气分子、(b) 气溶胶的散射和消光系数随海拔高度的关系

Fig. 4. Scattering and extinction coefficient of (a) atmospheric molecules, (b) aerosol vs. altitude.

### 3 数值结果与分析

根据第 2.2 节、2.3 节给出物理模型, 数值计算的参数如下: 云顶  $h_t$  为 8 km, 云底  $h_b$  为 7 km, 激光功率  $F_0$  为 100 mW, 无人机目标的有效半径  $r_{UAV}$  为 3 m, 飞机与无人机目标之间的水平距离  $d$  为 100 km.

当飞机高度  $h_a$  为 9 km, 图 5(a) 和图 5(b) 分别为 1.55  $\mu\text{m}$  激光通过卷云的直接传输功率、一阶散射传输功率随无人机目标高度  $h_{UAV}$  的变化. 不考虑大气分子和气溶胶的衰减时, 激光的直接传输功率随无人机目标高度的增大而减小. 这是由于无人机上升的过程中, 激光在云中的斜程路径  $s$  逐渐增大. 考虑大气分子和气溶胶作用时, 近地大气分子和气溶胶使得激光的直接传输功率进一步衰减, 这是由于近地大气中分子和气溶胶的消光系数较

大. 当无人机高度  $h_{UAV}$  大于云顶高度  $h_t$  时, 激光功率的衰减仅由大气分子和气溶胶造成的, 由于高大气层中其消光系数较小, 从而使两条曲线非常接近. 对比 5(a) 和图 5(b) 两幅图可知, 一阶散射的传输功率远远小于比激光的直接传输功率.

飞机在云下时, 即当  $h_a$  设为 6 km, 其余参数与图 5 一致. 图 6(a) 和图 6(b) 分别为 1.55  $\mu\text{m}$  激光通过卷云的直接传输、一阶散射传输功率随无人机高度  $h_{UAV}$  的变化. 不考虑分子和气溶胶的衰减时, 云底  $h_b$  以下范围, 激光的直接传输功率不受任何衰减; 而考虑分子和气溶胶的衰减时, 激光的直接传输功率随无人机高度的上升而单调递增, 这是由于分子和气溶胶的衰减系数随着海拔高度的增加而减小, 与真实大气层相符. 一旦无人机进入云中, 激光功率的衰减急剧增大, 无人机飞离云顶  $h_t$  时, 直接传输功率又逐渐增大. 这是由于随着无人机高度上升, 激光在云中的斜程路径  $s$  逐渐减小.

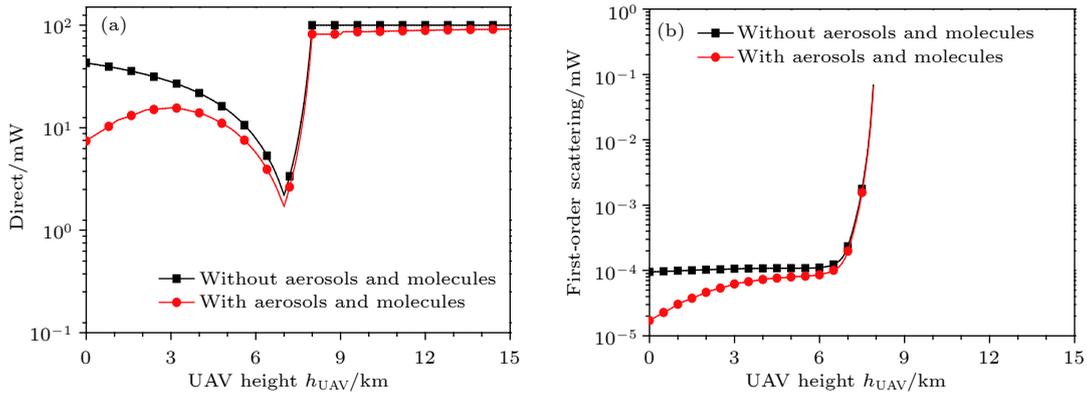


图 5 当飞机高度为 9 km 时, 激光通过卷云的 (a) 直接传输功率、(b) 一阶散射传输功率随无人机目标高度的变化

Fig. 5. (a) Direct transmission, (b) first-order scattering transmission through cirrus clouds vs. UAV target height when aircraft's height is 9 km.

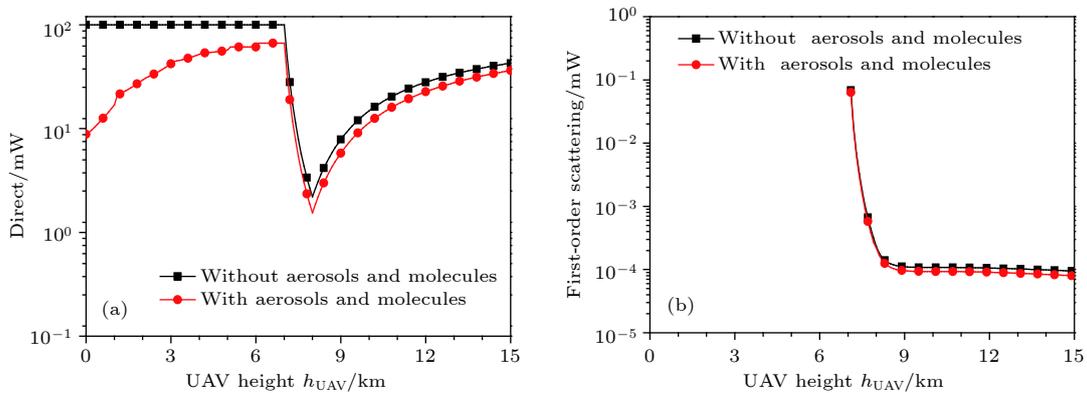


图 6 当飞机高度为 6 km 时, 激光通过卷云的 (a) 直接传输功率、(b) 一阶散射传输功率随无人机目标高度的变化

Fig. 6. (a) Direct transmission, (b) first-order scattering transmission through cirrus clouds vs. UAV target height when aircraft's height is 6 km.

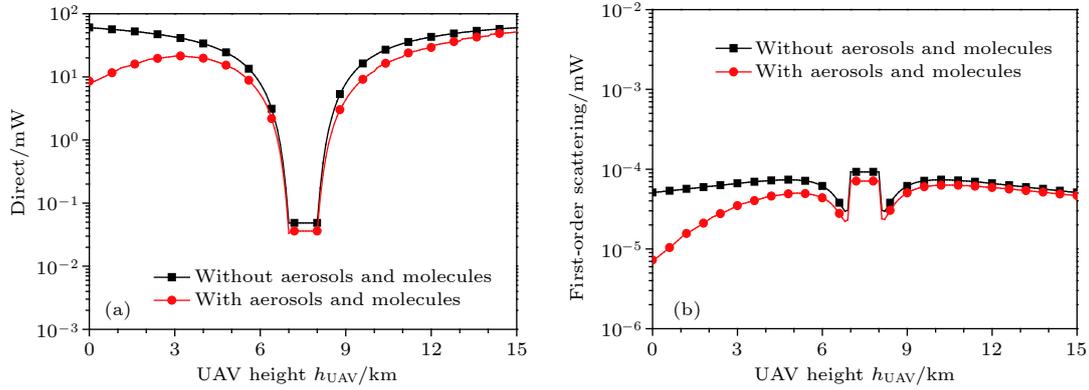


图 7 当飞机高度为 7.5 km 时, 激光通过卷云的 (a) 直接传输功率、(b) 一阶散射传输功率随无人机目标高度的变化

Fig. 7. (a) Direct transmission, (b) first-order scattering transmission through cirrus clouds vs. UAV target height when aircraft's height is 7.5 km.

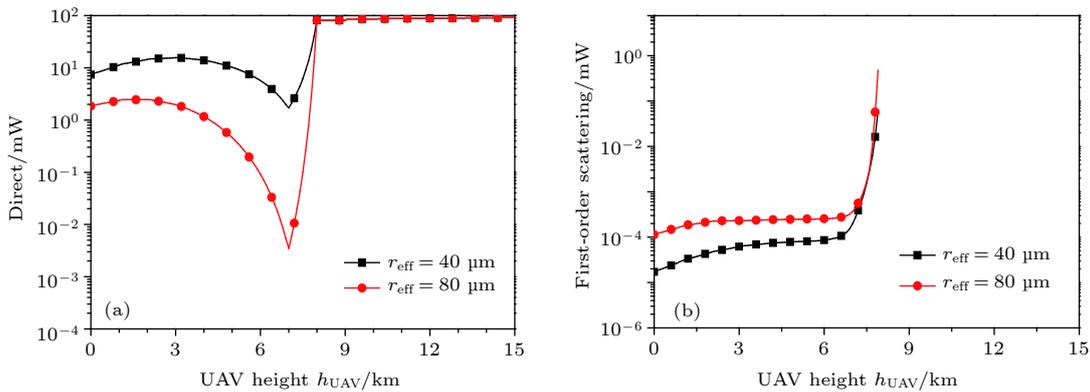


图 8 卷云冰晶粒子的有效半径  $r_{\text{eff}}$  不同时, 激光通过卷云的 (a) 直接传输功率、(b) 一阶散射传输功率随无人机目标高度的变化  
Fig. 8. (a) Direct transmission, (b) first-order scattering transmission through cirrus clouds vs. UAV target height for different effective radius  $r_{\text{eff}}$ .

对比图 5(b) 和图 6(b) 可以看出, 不考虑分子和气溶胶的衰减时, 飞机在云下时的一阶散射功率与飞机在云上时的一阶散射功率关于云层对称.

当  $h_a$  设为 7.5 km, 即飞机在云中时, 1.55  $\mu\text{m}$  激光通过卷云的直接传输功率、一阶散射传输功率随着无人机目标高度  $h_{\text{UAV}}$  的变化如图 7 所示. 由图 7(a) 可知, 当无人机高度  $h_{\text{UAV}}$  在云底  $h_b$  以下时, 激光的直接传输功率急剧下降, 这是由于云层的消光系数远大于近地大气中分子和气溶胶的消光系数, 且激光在云中的斜程距离  $s$  增大, 从而使得激光能量有较大的衰减. 当无人机上升至 7—8 km (云层) 范围内时, 由于激光在云层的斜程路径  $s$  变化很小, 从而激光传输功率在云层范围内趋于平稳, 由 (1) 式可证. 当不考虑分子和气溶胶的衰减时, 激光的直接传输功率、一阶散射传输功率关于  $h_{\text{UAV}} = 7.5$  km 对称, 从另一方面也验证了本模型结果的正确性. 对比图 6(b)、图 7(b) 和图 8(b) 可

知, 飞机在云中时的一阶散射的传输功率比其他情况下要小, 这是由于云的消光系数远大于大气分子和气溶胶的消光系数.

图 8(a) 和图 8(b) 分别给出了当考虑气溶胶和大气分子的衰减时, 卷云中冰晶粒子有效半径  $r_{\text{eff}}$  对激光通过卷云直接传输功率、一阶散射传输功率的影响, 其余的计算参数与图 6 一致. 由图 8(a) 和图 8(b) 可知, 激光的直接传输功率随着卷云冰晶粒子有效半径  $r_{\text{eff}}$  的增大而减小, 这是由于  $r_{\text{eff}}$  越大对应的卷云消光系数越大. 而一阶散射的传输功率则与激光直接传输功率相反, 这是由于  $r_{\text{eff}}$  越大对应的卷云相函数的强前向峰值越大, 从而激光的一阶散射传输功率随着  $r_{\text{eff}}$  的增大而增大, 这一结果由图 3 可以看出, 也由 (10) 和 (16) 式可证.

图 9(a) 和图 9(b) 分别给出了当考虑气溶胶和大气分子的衰减时, 飞机与无人机目标之间的水平距离  $d$  对 1.55  $\mu\text{m}$  激光通过卷云的直接传输、一阶

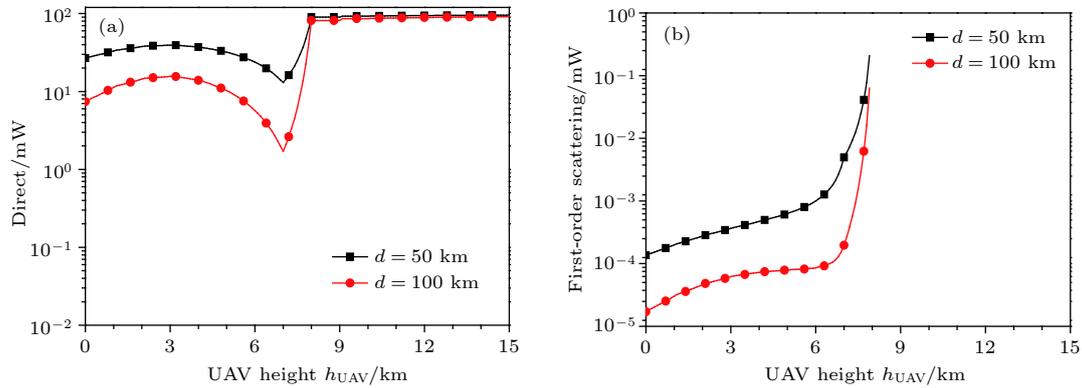


图9 水平距离  $d$  不同时, 激光通过卷云的 (a) 直接传输功率、(b) 一阶散射传输功率随无人机目标高度的变化

Fig. 9. (a) Direct transmission, (b) first-order scattering transmission through cirrus clouds vs. UAV target height for different  $d$ .

散射传输功率的影响. 由图 9(a) 和图 9(b) 可知, 激光的直接传输、一阶散射功率随着飞机与无人机目标之间的水平距离  $d$  的增大而减小, 与实际情况相符.

## 4 总结

本文根据复杂大气背景下激光通过卷云的机载传输模型, 分别考虑与不考虑真实大气分子和气溶胶衰减的两种情况下, 数值计算并分析了飞机在云上、云下、云中以及卷云冰晶粒子的有效半径、飞机与无人机目标之间的水平距离对激光的直接传输功率、一阶散射传输功率的影响. 结果表明:

1) 当无人机目标靠近地面时, 由于近地大气中气溶胶和大气分子的消光系数较大, 从而导致传输的激光功率衰减较大;

2) 激光通过卷云的传输功率是多个参数因子的函数, 如与相对于卷云的飞机位置、无人机的高度、飞机与无人机目标之间的水平距离、卷云粒子的有效半径, 以及大气分子和气溶胶的消光系数有关;

3) 无论飞机在云上、云下还是云中, 一旦无人机目标上升至云层 (7—8 km) 范围内时, 一阶散射传输的功率都较大, 这是源于光的衍射效应.

综上, 本文构建了大气云层背景下机载通信终端与地空无人机目标之间激光传输模型, 详细分析了卷云和大气分子、气溶胶对机载激光传输功率的影响. 本文工作可进一步推广应用于地基通信终端与临近空间无人机的无线光通信信道、地空链路上激光雷达的目标探测, 同时也可为基于机载平台的

低空无人机通信、组网和编队的实验研究提供预先理论支持.

## 参考文献

- [1] Shi G Y 2007 *Atmospheric Radiation* (Beijing: Science Press) pp1–157 (in Chinese) [石广玉 2007 大气辐射学 (北京: 科学出版社) 第1—157页]
- [2] Yang P, Hong G, Dessler A E, Ou S S C, Liou K N, Mimmis P, Harshvardhan 2010 *Bul. Amer. Meteor. Soc.* **91** 473
- [3] Baran A J 2012 *Atmos. Res.* **112** 45
- [4] Ke X Z, Deng L J 2016 *Optical Wireless Communication* (Beijing: Science Press) pp98–151 (in Chinese) [柯熙政, 邓丽君 2016 无线光通信 (北京: 科学出版社) 第98—151页]
- [5] Wang M J 2008 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [王明军 2008 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [6] Liu D, Liu Q, Bai J, Zhang Y P 2017 *Infrared. Laser Eng.* **46** 1202001 (in Chinese) [刘东, 刘群, 白剑, 张与鹏 2017 红外与激光工程 **46** 1202001]
- [7] Liou K N (translated by Guo C L, Zhou S J) 2004 *An Introduction to Atmospheric Radiation* (Beijing: Meteorological Science Press) pp5–10 (in Chinese) [廖国男 (郭彩丽, 周诗健 译) 2004 大气辐射导论 (北京: 气象科学出版社) 第5—10页]
- [8] Arnon S, Sadot D, Kopeika N S 1994 *J. Mod. Opt.* **41** 1591
- [9] Li Y Y, Sun D S, Wang Z Z, Shen F H, Zhou X L, Dong J J 2008 *Laser Technology* **32** 611 (in Chinese) [李颖颖, 孙东松, 王珍珠, 沈法华, 周小林, 董晶晶 2008 激光技术 **32** 611]
- [10] Hu X H, Zhou T H, Zhu X L, Chen W B 2015 *Infrared* **36** 8 (in Chinese) [胡秀寒, 周田华, 朱小磊, 陈卫标 2015 红外 **36** 8]
- [11] Hovis W A, Blaine L R, Forman M L 1970 *Appl. Opt.* **9** 561
- [12] Liou K N, Takano Y, Ou S C, Heymsfield A, Kreiss W 1990 *Appl. Opt.* **29** 1866
- [13] Uthe E E, Nielsen N B, Osberg T E 1998 *Geophys. Res. Lett.* **25** 1339
- [14] Liou K N, Takano Y, Ou S C, Johnson M W 2000 *Appl. Opt.* **39** 4886
- [15] Kolb I L, Cheng W Y Y, Cotton W R 2001 *Proc. SPIE* September 4–7, 2001 p124
- [16] Norquist D C, Desrochers P R, Mcnicholl P J, Roadcap J R 2008 *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **47** 1322
- [17] Wang H X, Zhu Y Z, Tian T, Li A J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62**

- 024214 (in Chinese) [王红霞, 竹有章, 田涛, 李爱君 2013 物理学报 **62** 024214]
- [18] Hess M, Koepke P, Schult I 1998 *Bul. Amer. Meteor. Soc.* **79** 831
- [19] Koepke P, Gasteiger J, Hess M 2015 *Atmos. Chem. Phys.* **15** 5947
- [20] Yang Y F, Qin J H, Li T, Yao L 2017 *Infrar. Laser Eng.* **46** S106006 (in Chinese) [杨玉峰, 秦建华, 李挺, 姚柳 2017 红外与激光工程 **46** S106006]
- [21] Rao R Z 2012 *Modern Atmospheric Optics* (Beijing: Science Press) pp113–215 (in Chinese) [饶瑞中 2012 现代大气光学 (北京: 科学出版社) 第113—215页]
- [22] Zhao S Q, Zhang C 2013 *Laser Optoelectron. Prog.* **50** 110101 (in Chinese) [赵少卿, 张维 2013 激光与光电子学进展 **50** 110101]
- [23] Coakley J, Yang P (translated by Liu C, Yin Y) 2017 *Atmospheric Radiation: A Primer with Illustrative Solutions* (Beijing: Higher Education Press) pp97–101 (in Chinese) [Coakley J, Yang P (刘超, 银燕 译) 2017 大气辐射: 含典型案例的入门教程 (北京: 高等教育出版社) 第97—101页]
- [24] Wendisch M, Yang P (translated by Li Z C, Li L, Hou Z W, Xu H) 2014 *Theory of Atmospheric Radiative Transfer* (Beijing: Higher Education Press) pp172–175 (in Chinese) [Wendisch M, Yang P 著 (李正强, 李莉, 侯伟真, 许华 译) 2014 大气辐射传输原理 (北京: 高等教育出版社) 第172—175页]
- [25] Liou K N, Yang P 2016 *Light Scattering by Ice Crystals: Fundamentals and Applications* (Cambridge: Cambridge University Press) pp1–5, 269–273
- [26] Emde C, Schnell R B, Kylling A, Mayer B, Gasteiger J, Hamann U, Kylling J, Richter B, Pause C, Dowling T, Bugliaro L 2015 *Geosci. Model. Dev.* **8** 10237
- [27] Yi B Q, Yang P, Liu Q F, Delst P V, Boukabara S A, Weng F Z 2016 *Geosci. Model Dev.* **121** 13577
- [28] Hansen J E, Travis L D 1974 *Space Sci. Rev.* **16** 527
- [29] Mishchenko M I, Yang P 2018 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **205** 241
- [30] Petty G W, Huang W 2011 *J. Atmos. Sci.* **68** 1460
- [31] Warren S G, Brandt R E 2008 *J. Geophys. Res. Atmos.* **113** D14220
- [32] Wang Y J, Fan C Y, Wei H L 2015 *Laser Beam Propagation and Applications Through the Atmosphere and Sea Water* (Beijing: National Defence Industry Press) pp282–327 (in Chinese) [王英俭, 范承玉, 魏合理 2015 激光在大气和海水中的传输及应用 (北京: 国防工业出版社) 第282—327页]

# Laser propagation transmission properties characteristics between airborne communication terminal and unmanned aerial vehicle target in complex atmospheric background\*

Wang Ming-Jun<sup>†</sup> Wei Ya-Fei Ke Xi-Zheng

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

( Received 19 November 2018; revised manuscript received 7 March 2019 )

## Abstract

Clouds, aerosols and atmospheric molecules are major components of the atmosphere. In the fields of atmospheric physics such as target detection, wireless optical communication and remote sensing, these atmospheric components have a strong attenuation effect on laser transmission. Based on the successive scattering method for solving the radiative transfer equation, the laser transmission model between airborne wireless optical communication terminal and ground-to-air unmanned aerial vehicle (UAV) target in complex atmospheric background is established in this paper. Considering the fact that cirrus cloud, atmospheric molecules and aerosols exist in the real atmospheric background, the variations of direct transmission power, first-order scattering transmission power of 1.55  $\mu\text{m}$  laser emitted by the airborne wireless optical communication terminal with UAV target height are calculated numerically under complex atmospheric background. The effects of the aircraft located at different locations, effective radius of ice crystal particles in cirrus cloud, as well as the horizontal distance between the aircraft and UAV target on received laser transmission power are also analyzed. In the first three examples (i.e., aircraft is above, below, and inside cirrus cloud), laser direct transmission power (LDTP) is much larger than first-order scattering transmission power (FSTP); when the UAV target rises into the cloud, the FSTP is significantly enhanced as a result of the effect of diffraction light. The fourth example is for calculating the variations of LDTP and FSTP with UAV target height for different effective radii of ice crystals. The results show that the LDTP decreases with the increase of effective radius, whereas the FSTP presents an opposite scenario. The fifth example is for calculating the variations of LDTP and FSTP with UAV target height for different horizontal distances. The results show that the LDTP and FSTP decrease with the increase of the horizontal distance, which is obviously realistic. In summary, it is concluded that the laser transmitted power through cirrus clouds is strongly dependent on aircraft position: above, below, or inside cirrus cloud; the horizontal distance between the aircraft and UVA target, and effective radii of ice crystals have great influences on LDTP and FSTP. Compared with the atmosphere above the clouds, the molecules and aerosols below the clouds make the laser power have a strong attenuation. The results given in this paper provide theoretical support for further studying the laser communication experiment in ground-to-air links, UAV formation, command and networking technology in complex atmospheric background.

**Keywords:** cirrus cloud, aerosols, atmospheric molecules, laser propagation, unmanned aerial vehicle

**PACS:** 42.25.Dd, 42.68.Ge, 42.68.Jg

**DOI:** 10.7498/aps.68.20182052

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61771385, 61377080, 60977054) and the Key Industry Innovation Chain of Shaanxi Province, China (Grant No. 2017ZDCXL-GY-06-01).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [wmjxd@aliyun.com](mailto:wunjxd@aliyun.com)