

文章编号: 1672-8785(2015)02-0008-05

云对激光下行传输影响的仿真研究

胡秀寒^{1,2} 周田华^{1*} 朱小磊¹ 陈卫标¹

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800 ;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 激光在云中传输时会出现能量降低、角度弥散、时间展宽和空间分散等现象。利用蒙特卡洛法研究了云的高度和厚度对激光下行传输的影响。在云厚度固定、云高度变化和云高度固定、云厚度变化两种情况下, 分别仿真了激光透过云下行传输到海平面时的能量、角度、时域和空域分布。结果表明, 当云厚度固定时, 随着云高度的增加, 到达海平面的激光脉冲半峰全宽和光斑尺寸明显增加, 但是能量和角度分布基本保持不变; 当云高度固定时, 随着云厚度的增加, 到达海平面的激光脉冲能量降低, 角度分布先弥散后趋于稳定, 半峰全宽增加, 光斑尺寸先增大后趋于稳定。该研究为评价光通信系统的性能提供了一定的参考。

关键词: 光通信; 蒙特卡洛法; 云高度; 云厚度

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.02.002

Simulation of Downward Laser Pulse Propagation through Clouds

HU Xiu-han^{1,2}, ZHOU Tian-hua^{1*}, ZHU Xiao-lei¹, CHEN Wei-biao¹

(1. Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: When a laser pulse propagates through a cloud, the phenomena such as energy decay, angle diffusion, temporal broadening and spatial dispersion may occur for it. The Monte Carlo method is used to study the effect of cloud altitude and thickness on laser downward transmission. The energy, angular, temporal and spatial distribution values of a laser pulse after it transmits downward to the sea level through a cloud are simulated respectively in both a situation that the cloud thickness is fixed while the cloud altitude is changing and a situation that the cloud altitude is fixed while the cloud thickness is changing. The result shows that when the cloud thickness is fixed, the Full Width Half Maximum (FWHM) and spot size of the laser pulse at sea level increase obviously with the increase of the cloud altitude. However, its energy and angular distribution values remain unchanged. When the cloud thickness is increasing while the cloud altitude is fixed, the energy of the laser pulse at sea level decreases, its angular distribution firstly diffuses and then trends to be stable, its FWHM increases and its spot size firstly increases and then trends to be stable. This research is of a referential value to the performance evaluation of optical communication systems.

收稿日期: 2014-12-18

基金项目: 国家“863”计划项目(2014AA093301); 国家自然科学基金青年基金项目(61205214)

作者简介: 胡秀寒(1989-), 男, 山东曲阜人, 博士研究生, 主要从事蓝绿激光通信方面的研究。

* 通讯作者: E-mail: gietzth@163.com

Key words: optical communications; Monte Carlo method; cloud altitude; cloud thickness

0 引言

由于具有通讯速率快、体积小、保密性好等优点, 激光通信已经得到了越来越多的关注^[1]。但是, 云的存在会对激光传输造成影响, 引起激光能量减小、角度弥散、时间展宽和空间分散等现象^[2]。Bucher E A^[3] 和 Mooradian G C^[4] 等人通过实地试验给出了激光透过云进行传输之后的信号波形。Ciervo A P^[5] 和 Hajjarian Z^[10] 等人采用仿真分析研究了各种云对激光的影响。狄凌峰等人^[6] 通过实验计算了波长为 532 nm 的激光在近地大气中的散射相位函数和气溶胶分布。甄洁等人^[7] 计算了云层能量传输率与云层光学厚度及天顶角之间的关系。

本文利用蒙特卡洛法重点研究云的高度和厚度对激光传输的影响。首先对大气信道进行说明, 然后详细介绍用蒙特卡洛法对激光传输进行仿真的过程, 最后在考虑大气分子散射和

气溶胶散射的情况下, 分别考察云的厚度和高度对激光脉冲到达海面之后的能量、角度分布、空间分布和时间分布的影响。

1 仿真介绍

1.1 信道参数

大气的光学性质由大气中的各种成分决定。大气中对激光传输有影响的物质成分主要包括大气分子、气溶胶和云。

大气由多种气体组成, 其主要成分为氮气和氧气。大气分子对激光的散射是瑞利散射(属于弹性散射), 其散射系数与波长的四次方成反比。由于 532 nm 绿光激光广泛应用于大气光通信, 我们选取 532 nm 激光作为光源, 并针对 532 nm 激光选取各种大气成分的光学参数。在 0 ~ 10 km 范围内, 各海拔高度上的大气分子散射系数见表 1^[8]。10 km 以上的大气分子散射可以忽略不计。

表 1 在 0 ~ 10 km 范围内, 各海拔高度上的大气分子散射系数

海拔高度 /km	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
b_m/km^{-1}	0.112	0.0486	0.0207	0.0097	0.0062	0.0045	0.0036	0.0036	0.0035	0.0034	0
c_a/km^{-1}	0.384	0.1324	0.0457	0.0145	0.0026	0	0	0	0	0	0

气溶胶是一种由固体或液体的小质点分散并悬浮在气体介质中而形成的胶体分散体系, 其成分和性质变化很大, 且主要分布在大气层底部。需要注意的是, 由于需要单独考察云的影响, 此处的气溶胶不包括云。气溶胶对激光的作用包括吸收和散射两方面。吸收系数和散射系数分别用 a_a 和 b_a 表示。气溶胶对激光的散射是弥散射(也属于弹性散射)。吸收系数与散射系数之和即为衰减系数:

$$c_a = a_a + b_a \quad (1)$$

在 0 ~ 10 km 范围内, 各海拔高度上的气溶胶衰减系数见表 1^[8]。10 km 以上的气溶胶散射可以忽略不计。

云是停留在大气层上的水滴或者冰晶胶体的混合物, 可分为高云族、中云族和低云族三种。其中, 低云族属于雨云, 对激光传输具有显著影响。本文以低云族中的积云为例, 分别考察云高度和云厚度对激光大气传输的影响。云对激光的作用也包括吸收和散射, 其吸收系数和散射系数分别用 a_c 和 b_c 表示。云对激光的散射也是弥散射(属于弹性散射)。同样, 云的衰减系数为

$$c_c = a_c + b_c \quad (2)$$

为方便起见, 我们假定云是均匀的, 且覆盖整个天空; 云的上界面和下界面都是平面。积云的衰减系数选取为 $53.9/\text{km}$ ^[9]。

1.2 蒙特卡洛法

蒙特卡洛法广泛应用于激光在大气中的仿真研究^[5,10]。简单来讲,蒙特卡洛法就是将激光当作一系列光子包,并逐个追踪光子包的状态,最后利用光子包的统计分布来表征激光的分布情况。将激光与大气中物质的相互作用当作是一种存在能量损耗的散射。图 1 所示为光子包的追踪过程。为方便起见,以激光发射位置作为原点,以激光传输方向为 z 方向建立全局坐标系 $O-xyz$ 。由于研究的是激光的下行传输过程,我们将竖直向下的方向设为 z 方向。

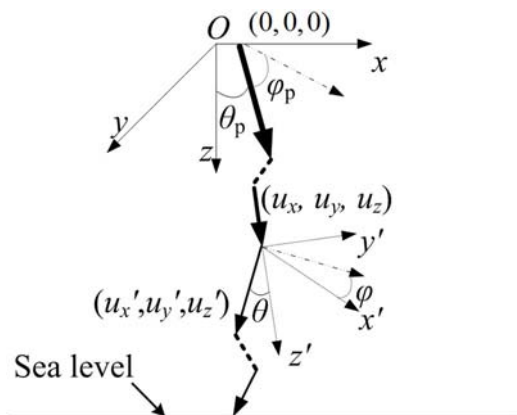


图 1 光子包的追踪过程

光子包的追踪过程可以分为以下三步:

(1) 初始化。光子包的初始化参数包括初始能量、初始位置、初始传输方向和发射时间。所有光子包具有相同的初始能量:

$$E_p = E_s / N \quad (3)$$

式中, E_s 为激光脉冲的单脉冲能量; N 为仿真的光子包个数。 N 越大, 仿真结果越精确, 但耗时也越长。综合考虑速度和精度, 将 N 选取为 10^6 。光子包的初始位置分布满足 $n(0, \omega_0^2)$, 初始传输方向分布满足 $n(0, \theta_0^2/4)$, 发射时间分布满足 $n(0, \tau_0^2/4)$ 。其中, ω_0 、 θ_0 和 τ_0 分别为光斑半径、远场发散角和激光脉冲的初始宽度; $n(\mu, \sigma^2)$ 为均值为 μ 、方差为 σ^2 的高斯分布。仿真时, 将激光的发射位置设在海拔 600 km 处, 并以海平面作为接收面。

(2) 散射。在传输一定距离(可称为随机步长) l_R 之后, 光子包达到散射点。

$$l_R = -\frac{1}{c} \ln(R_{UD}) \quad (4)$$

式中, R_{UD} 为一个满足 $0 \sim 1$ 均匀分布的随机量; c 为衰减系数。衰减系数为大气分子、气溶胶和云的衰减系数的总和。

光子包到达散射点之后, 首先根据大气散射、气溶胶衰减系数和云的衰减系数的比例进行抽样, 确定所发生的散射类型。散射后, 光子包的能量会按照单次反照比产生衰减。单次反照比的定义为散射系数与衰减系数的比值。当发生分子散射、气溶胶散射和云散射时, 反照比分别取 1、0.88 和 0.98^[9]。

在能量产生衰减的同时, 光子包的传输方向也会发生变化。光子包在散射前后的传输方向余弦分别为 (u_x, u_y, u_z) 和 (u'_x, u'_y, u'_z) , 如图 1 所示。根据光子包在散射前的传输方向, 建立局部坐标系 $O'-x'y'z'$ 。其中, z' 为光子包的传播方向。在局部坐标系中, 光子包发生碰撞之后的传输方向的极化角 θ 即为散射角。散射角的分布称为散射相函数。大气分子散射属于瑞利散射, 其相函数为^[11]

$$P_m(\theta) = \frac{1}{3\pi} [1 + \cos^2(\theta)] \quad (5)$$

而气溶胶和云的散射属于米散射。常用 Henyey-Greenstein (HG)^[12] 函数作为散射相函数的近似, 其抽样函数为^[11]

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{1}{2g} \left[1 + g^2 - \left(\frac{1 - g^2}{1 + g - 2gR_{UD}} \right)^2 \right] \right\} \quad (6)$$

式中, g 为不对称因子, 其定义为散射角余弦的平均值。气溶胶和云的不对称因子分别取 0.72 和 0.868^[9]。散射之后的方位角 φ 满足 $0 \sim 2\pi$ 之间的均匀分布。

(3) 停止。按照第 (2) 步中的“随机步长传输-散射”过程循环进行, 直至光子包满足以下两种情况之一: (a) 吸收。如果光子包的能量降到

阈值以下, 则认为光子包已被吸收, 停止追踪。在此, 能量阈值选为光子包初始能量的 1%。(b) 到达海平面。此时认为光子包被有效接收, 停止追踪。

针对每个光子包逐一实施以上追踪过程, 最后统计所有到达接收面的光子包的总能量, 并按照能量加权的方式统计到达接收面的光子的角度分布、时域分布和角度分布。

在仿真过程中, 由于不同位置上的大气分子散射系数与气溶胶衰减系数之间存在较大差异, 需要对大气进行分层。因此, 我们将大气分为 11 层, 0 ~ 10 km 范围内每隔 1 km 取一层, 其参数数据见表 1; 10 ~ 600 km 范围内取一层, 这一层近似为没有散射和吸收的真空区域。

仿真时, 采用远场发散角为 6 mrad 且具有单位能量的激光脉冲。由于激光传输距离达到 600 km, 纳秒量级的激光初始脉冲宽度和毫米

量级的光斑尺寸对结果的影响可忽略不计。本文取激光的初始脉冲宽度为 0 (即 δ 脉冲), 光斑尺寸为 0 (即所有光子包都从原点发出)。

2 仿真结果

2.1 云高度的影响

图 2 所示为云厚度固定为 400 m、云高度为 2 ~ 9 km 时的能量、角度分布、时域分布和空域分布。由图 2(a) 可知, 随着云高度的增加, 到达海平面的能量略有上升, 但效果不明显。由图 2(b) 可知, 云的高度对角度分布的影响也不明显。由图 2(c) 可知, 随着云高度的增加, 激光脉冲的时域展宽增大。由图 2(d) 可知, 随着云高度的增加, 激光脉冲的空域展宽增大。表 2 列出了不同云高度时的能量值、半峰全宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 和光斑半径 (包含 85.7% 能量的范围)。根据图 2 和表 2 可知,

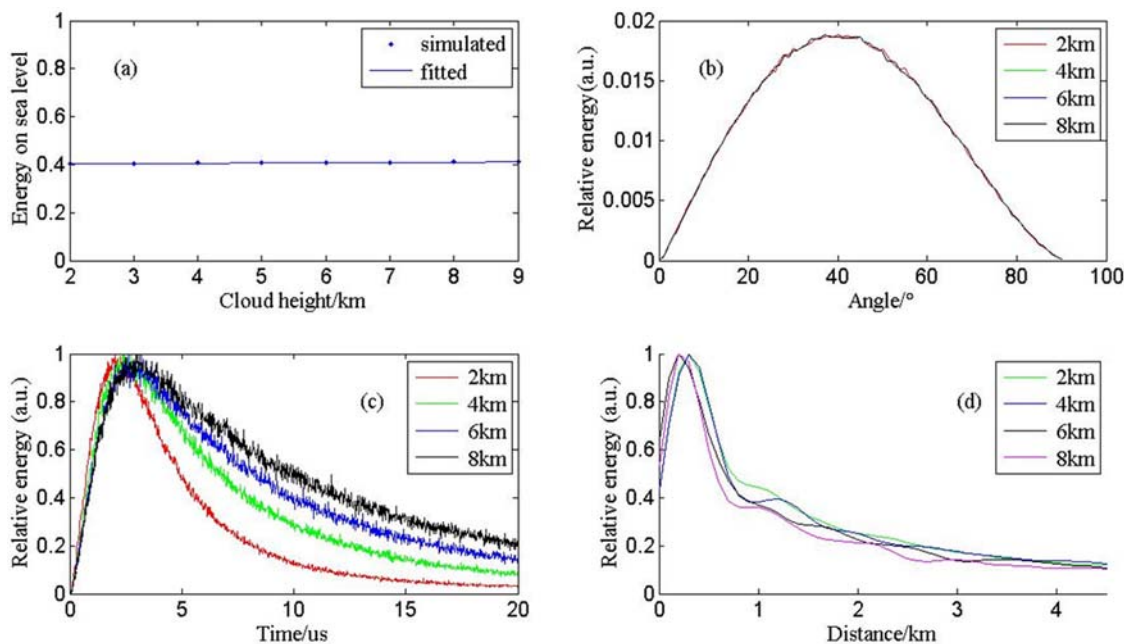


图 2 相同云厚度、不同云高度时的能量、角度分布、时域分布和空域分布: (a) 能量; (b) 角度分布; (c) 时域分布; (d) 空域分布

表 2 不同云高度时的能量、FWHM 和光斑半径

高度 /km	2	3	4	5	6	7	8	9
能量	0.403	0.405	0.406	0.407	0.408	0.409	0.411	0.412
FWHM/ μ s	4.14	5.18	6.16	6.84	7.96	8.52	9.54	10.4
光斑半径 /km	4.98	6.09	6.95	7.56	7.99	8.28	8.51	8.67

云高度对时域和空域展宽具有明显影响,但对能量和角度分布影响不大。

2.2 云厚度的影响

图 3 所示为云高度固定为 2 km、云厚度为 50 ~ 500 m 时的能量、角度分布、时域分布和空域分布。由图 3(a) 可知,随着云厚度的增加,到达海平面的能量呈线性减小。由图 3(b) 可知,当云的厚度增加时,角度更加弥散;但是当云的厚度增至 250 m 并继续增加时,角度分布不再改变,而是趋于稳定;当云厚度较小 (小于 50 m) 时,可以清楚地看到到达海平面的光子包中的直透部分。由图 3(c) 可知,随着云厚度的增加,激光脉冲的时域展宽增大。由图 3(d) 可知,随着云厚度的增加,激光脉冲的光斑尺寸有所增大。但是当云的厚度增至 250 m 并继续增加时,空间分布不再改变,趋于稳定。需要说明的是,

为了便于比较不同厚度时的时域和空域分布,我们对各个曲线都进行了不同程度的缩放。因此,在图 3(c) 和图 3(d) 中比较不同曲线的相对高度并没有意义。表 3 列出了不同云厚度时的能量值、FWHM 和光斑半径 (包含 85.7% 能量的范围)。根据图 3 和表 3 可知,云厚度对到达海面的激光脉冲能量、角度、时域和空域分布均有明显影响,但当云层厚度超过 250 m 之后,角度分度和光斑尺寸的变化不再明显。

3 结束语

利用蒙特卡洛法分别研究了云高度和云厚度对激光下行传输的影响。结果表明,云高度对激光脉冲到达海平面的能量和角度分布影响不大,但会明显增大 FWHM 和光斑尺寸。云高度

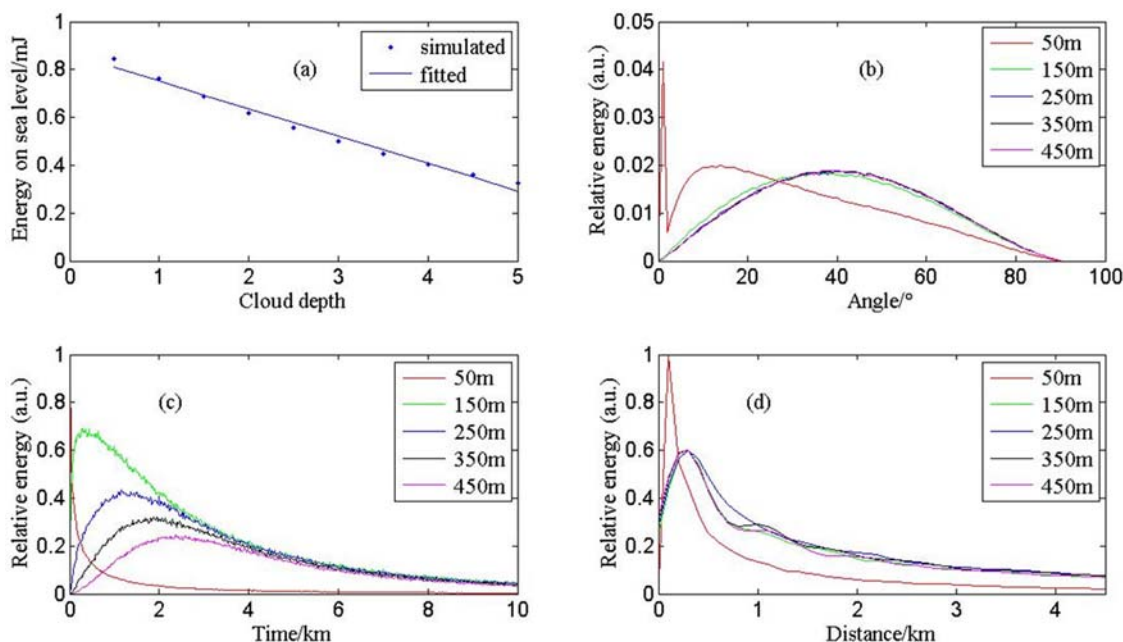


图 3 相同云高度、不同云厚度时的能量、角度分布、时域分布和空域分布: (a) 能量; (b) 角度分布; (c) 时域分布; (d) 空域分布

表 3 不同云厚度时的能量、FWHM 和光斑半径

厚度 /m	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
能量	0.844	0.763	0.687	0.618	0.556	0.499	0.448	0.403	0.362	0.325
FWHM/ μ s	0.02	0.88	2.52	3.26	3.64	3.85	4.02	4.14	4.26	4.56
光斑半径 /km	4.16	4.68	4.88	4.93	4.96	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98

(下转第 24 页)