

文章编号: 1001-3806(2008)05-0477-03

激光在云层中传输的特性分析及蒙特卡罗模拟

杨虹¹, 杨小丽^{1*}, 田永洪²

(1. 电子科技大学 物理电子学院, 成都 610054; 2. 电子科技大学 计算机科学与工程学院, 成都 610054)

摘要: 为了研究激光在云层中传输的多次散射特性, 分析了传输过程中的功率损耗, 并采用蒙特卡罗法模拟传输过程, 得出时间展宽后的脉冲波形。结果表明, 时间展宽后的脉冲具有陡峭的上升沿和指数形式的收尾; 非对称因子、云层物理厚度、消光系数、接收视场角等对时间展宽都有影响, 其中, 非对称因子、云层物理厚度对时间展宽及时间延迟影响较大。

关键词: 大气与海洋光学; 散射; 时间展宽; 蒙特卡罗模拟; 云层介质

中图分类号: O436.2 **文献标识码:** A

Analysis of characteristics of light propagation through clouds and Monte Carlo simulation

YANG Hong¹, YANG Xiao-li¹, TIAN Yong-hong²

(1. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 610054, China)

Abstract: In order to study the multiple scattering characteristics of light propagation through clouds, received power was analyzed, the laser transferring process in clouds was simulated with Monte Carlo method, and the waveform broadened temporal signal was obtained. Results illustrate the broadened signal has a steep rise edge followed by an exponential tail, and that the broadened shape is affected by some parameters such as asymmetry factor, clouds thickness, extinction coefficients, receiver field of view, especially strongly by asymmetry factor and clouds thickness.

Key words: atmospheric and ocean optics; scattering; temporal broadening; Monte Carlo simulation; clouds medium

引 言

光通过厚云层是一个多次散射过程, 其研究方法主要有两种: 分析法和数值模拟法(蒙特卡罗法)。由于信道中传输介质的复杂性和时变性, 利用传统的分析法来描述光在多散射介质中的传播, 必须做大量简化假设, 以致对要估计的结果影响很大; 蒙特卡罗法已经成为研究光与强散射介质相互作用的常用方法和非实验检验标准, 越来越广泛地应用于光在水下和生物组织中的传输领域。

已有研究表明, 云对激光传输衰减的影响非常严重, 不仅对脉冲信号的能量衰减有影响, 而且信道散射特性也导致光脉冲信号时间、空间、角度扩展^[1]。其中, 云层信道对光脉冲时间扩展影响很大。因此, 针对云层介质对激光传输有较强散射作用, 较大地影响了激光通信等问题, 作者对云层光信道的时展宽效应

进行了理论分析和蒙特卡罗模拟。

1 云层信道分析

1.1 接收光功率分析

光通过云层后接收到的光功率为:

$$P_r = P_t (G_t \eta_t) (G_r \eta_r) L_a L_c \quad (1)$$

式中, P_t 为发射光功率, G_t 和 G_r 分别是发射端和接收端天线有效增益, η_t 和 η_r 分别为发射效率和接收效率, L_a 为光束扩散损耗, L_c 为云层传输损耗。

发射端和接收端天线有效增益表示为:

$$G_t = (\pi D_t / \lambda)^2, G_r = (\pi D_r / \lambda)^2 \quad (2)$$

式中, D_t 和 D_r 分别是发射端和接收端光孔径。

云层传输损耗表示为:

$$L_c = \left(\lambda / 4\pi R \right)^2 \exp(-\mu_c R) \quad (3)$$

式中, R 为链路距离, μ_c 为云层消光系数。未涉及光的退偏振效应, 因此把云滴视为均匀球形粒子, 其消光系数为:

$$\mu_c = \int_0^{\infty} r^2 Q_c n(r) dr \quad (4)$$

式中, Q_c 为消光效率因子, $n(r)$ 为云滴谱分布。由于云滴尺寸分布变化较大, 根据实测滴谱分布的不同, 采用不同模型来描述云雾滴谱, 被广泛采用的一种模型

作者简介: 杨虹 (1983-), 女, 硕士研究生, 现主要从事无线光通信的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yxiaoli@uestc.edu.cn

收稿日期: 2007-06-06; 收到修改稿日期: 2007-09-19

为 Khragian-Mazin分布^[2]模型:

$$n(r) = a r^2 \exp(-br) \quad (5)$$

式中, r 为云滴半径, a , b 为云滴尺寸分布参量。考虑到光束在发射器前端会进行准直,且探测器装置的接收视场角远大于激光器的光束发散角 β ,最后得出接收光功率为:

$$P_r = P_t (G_t \eta_t) (G_r \eta_r) \times \frac{\exp\left[-2\left(\frac{D_t}{R\beta}\right)^2\right] - 1}{e^{-2} - 1} \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 e^{-\sigma R} \quad (6)$$

计算参量选取如下: $P_t = 1\text{W}$, $\lambda = 532\text{nm}$, $D_t = 0.35\text{m}$, $D_r = 0.5\text{m}$, $\eta_t = 0.75$, $\eta_r = 0.5$, $\beta = 1\text{mrad}$ 。

由图1可知,随着传输距离的增加,接收端功率迅速下降,最后变得平缓,信道能量衰减严重。有云天气会降低接收光功率和通信质量,甚至可以中断光通信。

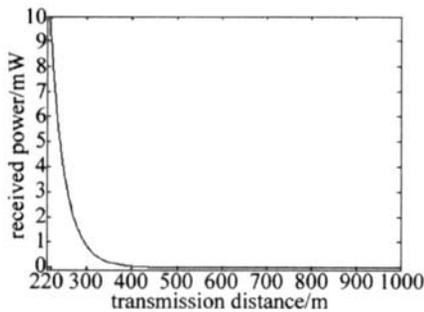


Fig 1 The received power for different transmission distance

1.2 散射特性分析

云是常见的自然现象,其结构复杂、种类繁多,每一种云的高度、厚度及粒子大小、消光系数、含水量等也不一样。云层中粒子对光的散射作用,取决于其浓度、折射率及形状大小的分布。由于上述条件复杂,且云层散射主要是由粒子散射决定,主要体现在前向散射上,因此采用等效的米氏理论^[3]来描述。对于米氏散射,采用的相函数解析表达式为 Henyey-Greenstein^[4]:

$$P(\theta) = (1 - g^2) / (1 + g^2 - 2g\cos\theta)^{3/2} \quad (7)$$

式中, g 是非对称因子,表征散射函数的不对称性,反映散射的各向异性程度。散射的方向选择取决于非对称因子, g 越接近 -1,介质的后向散射越强烈; g 越接近于 0,散射的介质越接近于各向同性; g 越接近于 1,介质的前向散射越强烈。

云的种类和结构比较复杂,使其特性不稳定,因此,光传输过程中涉及的许多环境参量具有很大的随机性。基于此,采用蒙特卡罗法模拟光子在不同条件下的运动情况对通信系统进行后期分析具有一定的理论和实用价值。

2 蒙特卡罗模拟模型^[5-8]

云是非均匀分布的,不同部分的散射和吸收不一

样,只有忽略某些不同点才能易于模拟。模拟时设定的条件:(1)散射、吸收介质为统计均匀的;(2)散射运动是各自独立的;(3)光束是一个垂直入射的准直细光束;(4)模拟时采用的光子数是 106 个,统计误差是由于计算中只使用了有限量的光子。

2.1 光子自由路径长

$$L = -\ln \varepsilon / \mu_c \quad (8)$$

式中, ε 为 $[0, 1]$ 间均匀分布的随机数, μ_c 为云层消光系数,等于吸收系数 μ_a 与散射系数 μ_s 之和。

2.2 碰撞后空间散射角的方向 (,)

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi = 2\pi \varepsilon \\ \theta = \arccos \frac{1}{2g} \left((1+g^2) - (1-g^2)^2 \varepsilon \right) \end{array} \right. \quad (9)$$

式中, θ 为散射角, ϕ 为方位角。

2.3 碰撞与吸收

在计算中,给每个光子赋一个初值为 1 的权值。当光子在云层中发生碰撞时,权值减少。此时权值 w_n 为:

$$w_n = w_{n-1} (\mu_a / \mu_c) = w_{n-1} w_0 = (w_0)^n \quad (10)$$

式中, w_{n-1} 是碰撞前的权值; w_0 是单次散射反照率, $w_0 = \mu_s / \mu_c$; n 是光子碰撞次数。

2.4 接收机接收光子概率

$$P = P(\theta) \Delta\Omega \exp(-\mu_c d) T \quad (11)$$

式中, $P(\theta)$ 是归一化标量相位函数; d 是入射点到接收点的距离; T 是云层透过率; $\Delta\Omega$ 是接收机视场角。

2.5 光子终止条件

(1)当光子权重 w_n 小于某一阈值时,认为光子消亡而不再跟踪;(2)当光子发散到介质外就不再追踪其轨迹;(3)光子经碰撞被云层吸收,终止对其跟踪。

3 模拟结果及分析

图2是不同非对称因子 g 对应的时间响应曲线。

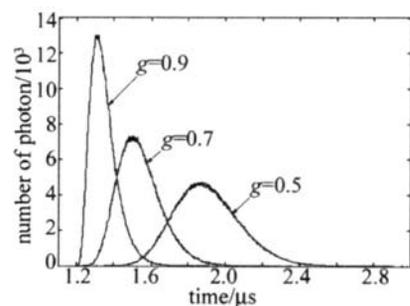


Fig 2 Time broadening pulse shapes for different asymmetric factor ($w_0 = 0.7$, $S = 300\text{m}$, $\mu_c = 0.1\text{m}^{-1}$)

由图可知, g 较小时,脉冲具有较低的峰值、较宽的宽度,峰值功率向后移动,到达峰值所用的时间增加。意味着光子经历的散射次数较多,到达接收器所用时间更长。 g 的变化不仅影响了时间的延迟也影响了峰值

功率及到达峰值所用的时间。因此,选一个适合实际情况的相函数非常重要。

图 3 是不同云层厚度 S 对应的时间响应曲线。由

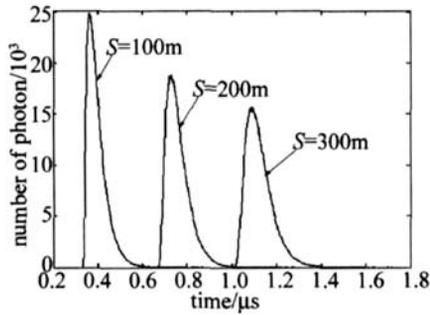


Fig 3 Time broadening pulse shapes for different transmission distance ($g=0.9, \mu_c=0.1m^{-1}, w_0=0.7$)

图可知,由于光通过高散射介质时产生多次散射,几乎所有的光子都要经历大量的碰撞,并且与初始脉冲相比到达时间延迟,因此,云层越厚,光子到达的时间延迟得越厉害,峰值功率明显后移。云层物理厚度对时间延迟影响最大,对峰值大小影响次之,对时脉展宽影响相对而言更小。

图 4 为不同消光系数 μ_c 对应的时间响应曲线。

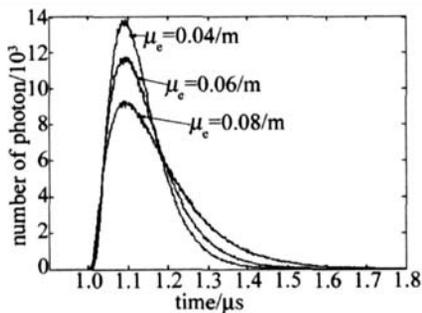


Fig 4 Time broadening pulse shapes for different extinction coefficients ($w_0=0.7, S=300m, g=0.9$)

由图可知,随着消光系数的增大,峰值不断下降,脉冲有一定的展宽。消光系数的增加,意味着光子在模拟中的平均前进步长减小,到达接收器需要经过的碰撞次数增多,传输相同的距离碰撞次数多的到达接收机所需时间更多。

图 5 是不同接收机视场角 $\Delta\Omega$ 对应的接收光子概

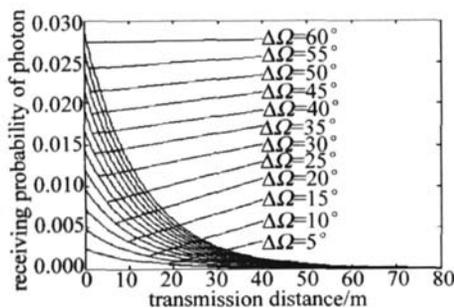


Fig 5 The receiving probability of photon for different $\Delta\Omega$ ($g=0.8, S=100m, \mu_c=0.1m^{-1}$)

率。由图可知,随着 $\Delta\Omega$ 的增加,系统接收概率增加,当 $\Delta\Omega$ 在 45° 以内时,接收概率变化比较明显,超过 45° 后变化逐减变小而且当传输距离超过 $60m$ 之后,接收概率也渐渐趋于相同。接收视场角的增加,有利于接收光子数的增加和脉冲峰值功率的增加,但相应的背景噪声也会急剧增加。因为当 $\Delta\Omega$ 较小时,接收到的光子主要是那些历经散射次数较少,对理想传输路径偏离不那么厉害的光子,而 $\Delta\Omega$ 增加时,散射次数多的光子进入到接收系统的可能性也更大。视场角越大,噪声越大,当视场角大于某一值后,接收概率变化基本趋于稳定,若再继续增加 $\Delta\Omega$,只会降低系统的信噪比。因此,为了提高信噪比,系统设计时除了考虑增加发射机脉冲能量外,还应设法提高接收机的灵敏度。

激光在云层中传输的散射会改变信号的时间特性,峰值有明显的降低,脉冲上升时间会推迟,产生总的时间展宽效应。时间展宽从几十纳秒到 $3000ns$,这样大的动态范围为接收机的信号检测带来困难,大大地降低了通信系统的信噪比;同时,激光穿过云层的能量损失在 $-2dB \sim -14dB$ 之间,这些对通信系统影响都比较大。

利用时间展宽特性一方面可以为确定散射信道的相带宽提供依据,还可以确定信道相关带宽的具体量值。另一方面可以根据时间展宽和延迟特性采取相应的方法来抑制多次散射比重,从而提高通信系统的信噪比。因此,为满足激光对潜通信系统设计、研制和实验的要求,研究激光束经过云层后能量的衰减、脉冲特性变化等非常必要。

4 结 论

(1) 云层对光通信的信号能量及波形都有较大的影响。特别是非对称因子、云层物理厚度、接收机视场角对脉冲峰值和时间展宽及延迟影响很大。在系统设计时,要重点考虑这几方面的影响。

(2) 对于光通信而言,如何有效地抑制时间脉冲展宽, TAN 等人^[9]给出自适应滤波和脉宽稳定技术等相关的方法,但是这些方法都有一定的局限性,因此,结合系统参量来改进这些方法从而获得最优的信噪比是下一步重点考虑的问题。

参 考 文 献

- [1] SUN X M, HAN Y P. Absorption and scattering of light by ice-water mixed clouds [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55 (2): 682-687 (in Chinese).
- [2] SALONEN E. New prediction method of cloud attenuation [J]. Electron Lett, 1991, 27 (12): 1106-1108.
- [3] YONG J F, STEVEN L J. Monte Carlo simulation study on phase function [J]. Proc SPIE, 2006, 6084: 81-87.

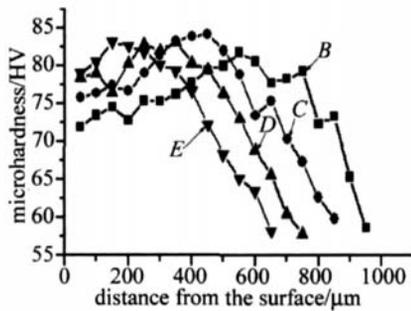


Fig 3 The microhardness distribution curves of the cross section of samples treated with different laser parameter

熔凝过程中,由于激光熔凝的快速加热和冷却作用,使材料表面产生细晶强化,同时随着激光扫描速度的加快使得硬度有所提高,使熔凝层硬度相对于基体的硬度有明显的提高,符合 Hall-Petch 公式。由于熔池亚表层与基体接近其散热速度相对于表层的散热速度较快,因此亚表层的晶粒细化的效果更为明显,从而使不同扫描速度下激光熔凝区的最高显微硬度位于亚表层。

图 3 所示的硬度变化趋势与 Hall-Petch 公式相符,根据 Hall-Petch 公式:

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{1/2} \quad (1)$$

式中, σ_s 为屈服强度, σ_0 是单晶屈服强度, d 是平均晶粒尺寸, K 为 Hall-Petch 常数, K 值随 Taylor 因子的增加而变大, Taylor 因子的大小与滑移系的数量有关,密排六方结构的滑移系有限,其 Taylor 因子大于面心和体心立方结构的 Taylor 因子,故密排六方结构金属材料的强度受晶粒尺寸的影响较大,纯镁及常规镁合金的 Hall-Petch 常数 $K = 280 \text{MPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$ [31]。因此与铝合金相比,镁合金的晶粒细化对改善强度和延展性来说更加有效。Hall-Petch 关系是建立在位错塞积理论基础上,经过大量试验的证实,总结出来的多晶材料的屈服应力(或硬度)与晶粒尺寸的关系,如用硬度来表示则为: $H_v = H_0 + Kd^{1/2}$ 。

3 结 论

激光表面熔凝技术是一种新型的金属材料表面改性技术,作者利用其快速加热和冷却的特性对 AZ91

镁合金进行了表面熔凝处理,得到了晶粒明显细化的表面组织。晶粒细化是提高镁合金铸件性能的重要途径,镁合金晶粒越细小,其力学性能和塑性加工性能越好。此外,镁合金经过晶粒细化处理后铸件中的金属间化合物相更细小且分布更均匀,由实验数据得出其晶粒尺寸降低了一个数量级,由显微硬度的测量结果显示细晶强化的效果比较明显,并且有新相弥散在晶粒内部,这也是提高其硬度的另一因素,同时第 2 相的消失能减轻其电偶腐蚀,也就是使其耐腐蚀性能提高。

参 考 文 献

- [1] LEIM K, LIP, YANG H G, *et al* Wear and corrosion resistance of Al-ion implanted AZ31 magnesium alloy [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201 (9/11): 5182-5185.
- [2] ABBAS G, LIU Z, SKELDON P. Corrosion behavior of lasermelted magnesium alloys [J]. Applied Surface Science, 2005, 247 (1/4): 347-353.
- [3] GAO Y L, WANG C Sh, LIU H B, *et al* Grain refinement of AZ91HP magnesium alloy treated by vacuum laser melting [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27 (1): 92-95 (in Chinese).
- [4] LIU Zh, ZHANG K, ZENG X Q. Theoretical basis and application of magnesium-based alloy [M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 1-14 (in Chinese).
- [5] CHEN Zh H. Magnesium alloys [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 203-204 (in Chinese).
- [6] ZHANG H Y, LI H L, GUO Y N. Study of corrosion resistance of chemical conversion coatings on magnesium alloys substrate [J]. Materials Protection, 2007, 40 (1): 10-12 (in Chinese).
- [7] QIAN J G, LI D, WANG Ch, *et al* EIS study on corrosion process of anodized film on AZ91D magnesium alloy [J]. Raremetal Materials and Engineering, 2006, 35 (8): 1280-1284 (in Chinese).
- [8] MAO Y J, SHEN Ch J, LIU J J. Corrosion resistance of ceramic layer on AZ91D magnesium alloy formed by micro-arc oxidation [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2006, 34 (10): 43-46 (in Chinese).
- [9] GUO H F, AN M Zh. Electroplating and electroless plating on magnesium and its alloys [J]. Electroplating & Pollution Control, 2004, 24 (2): 1-5 (in Chinese).
- [10] WANG X F, LÜ X D, CHEN G N, *et al* Simulation and verification of the temperature field in laser hardening [J]. Laser Technology, 2004, 28 (2): 162-165 (in Chinese).
- [11] LI H Q, XING D M, TONG J W, *et al* Relationship between yield stress and microscopic structure of nanostructured material [J]. Journal of Tianjin University, 2000, 33 (5): 671-674 (in Chinese).
- [7] YAN X G, PENG F Y, XU G H, *et al* Analysis of temporal and frequency characteristics of fore-scattered laser in ocean channel [J]. Laser Technology, 2005, 29 (3): 267-269 (in Chinese).
- [8] ARNDAM B, AN L A O, KUNAL M. Experimental simulation of lightning optical emissions in clouds [J]. J Phys, 2006, D39 (3): 575-583.
- [9] TAN X Q, CHEN R. A study for pulse width stabilization technique used in underwater laser pulse position modulation communication [J]. Opto-electronic Engineering, 2002, 29 (1): 23-25 (in Chinese).

(上接第 479 页)

- [4] ADRIAN C S. Attenuation and impulse response for multiple scattering of light in atmospheric clouds and aerosols [J]. Appl Opt, 2006, 45 (13): 2842-2844.
- [5] XIA M, YANG K Ch, XU D Sh, *et al* Monte Carlo simulation of depolarization during laser transferring in the water [J]. Laser Technology, 2005, 29 (1): 24-27 (in Chinese).
- [6] DU Zh F, LU Y M, YANG Zh K, *et al* Monte Carlo calculations of the received oceanic lidar signals [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26 (1): 52-56 (in Chinese).