

文章编号 1004-924X(2007)01-0040-05

单次散射近似研究非视线光传输中的误差

贾红辉,常胜利,杨建坤,兰 勇,邵铮铮,季家镛
(国防科技大学,湖南长沙 410073)

摘要:基于蒙特卡罗(Monte Carlo)方法建立了非视线光传输多次散射模型,引入大气光传输系统脉冲响应峰值大小,定量计算了单次散射近似研究非视线光传输时的误差大小。结果表明:大气吸收系数 k_a 对误差影响较小,误差随大气散射系数 k_s 和非视线传输光程 S 的增大而增大;当 P 值($k_s \times S$) >3 时,由于多次散射作用明显,误差 $>80\%$;当 $P < 3$ 时,误差随 P 值减小而减小, $P < 0.3$ 时,误差 $<10\%$,此时单次散射近似可用来研究散射大气中非视线光传输问题。

关键词:大气光学;单次散射;蒙特卡罗法;非视线光传输

中图分类号:TN 929.1 文献标识码:A

Study on error of non-line-of-sight light propagation by single-scattering model

JIA Hong-hui, CHANG Sheng-li, YANG Jian-kun, LAN Yong, SHAO Zheng-zheng, JI Jia-rong

(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The Non-Line-of-Sight (NLOS) light propagation model based on Monte Carlo (MC) method was described. Comparing with the pulse response function simulated by MC method, the error of NLOS light propagation based single-scattering approximating model was analyzed. The results show that the influence of the scattering coefficient k_s and NLOS light propagation path S on the error is larger than that of absorption coefficient k_a ; when P ($k_s \times S$) is greater than 3, as the multiple-scattering effect is in the primary place, the error is greater than 80%; the error decreases with the decreasing P when P is littler than 3, especially, the error is below 10% when P is litter than 0.3, and then single-scattering model is suitable for studying NLOS light propagation in scattering atmosphere.

Key words: atmosphere optics; single-scattering; Monte Carlo method; Non-Line-of-Sight (NLOS) light propagation

1 引言

随着紫外光学技术的发展,紫外光学诊断技术和紫外光学通信技术已经成为国内外短波光学

中的研究热点之一,部分成果已经开始在国防和工业等相关领域进行应用。特别是紫外光通信作为一种新兴自由空间光通信技术,基于波长较短(250 nm 附近)紫外光波在大气中的强烈衰减和散射作用,其系统具有局域保密性高、全方位性好

及绕障能力强的优点,在局域保密通信领域有很好的应用前景^[1-4]。非视线(Non-Line-Of-Sight)传输、绕障能力强是其通信技术的最大特点,这使得系统能克服其他光通信(如激光通信^[5])必须工作于视线(Line Of Sight)的缺点,由于大气粒子对较短波光的强烈散射,建立非视线光传输散射模型是紫外光通信技术中关键问题之一。

目前的大气辐射传输模型(如 Lowtran、Modtran、UVSPEC 等)能定量地得出光在大气中视线传输能量透过率的大小^[6],还能得出在特定大气环境中的精确吸收和散射截面,但不能直接解决非视线光传输时能量衰减和时间调制等问题。针对非视线传输问题,1979年,David M. Reilly 等建立了基于单次散射近似解析模型^[7],并引入了椭球坐标系从而使其计算非常简便;1991年,Mark R. Luetggen 等人运用该单次散射近似模型进行了非视线光传输脉冲响应函数、全方位传输能量等多个参数的计算^[8],较好地解决了非视线光传输时能量衰减和时间调制问题。与其他模拟方法(如 Monte Carlo 多次散射模拟)相比,单次散射具有计算速度快、操作性强等优点,但在传输距离较远或复杂天气传输条件下,单次近似模拟计算结果误差很大。针对单次散射的误差,Mark 引用了单次散射近似条件^[9],即 $P < 0.1$ 。

当前美国 MIT 等实验室^[4]仍然采用单次散射近似来研究紫外光非视线传输,由于他们主要研究短距离紫外光非视线传输系统,误差不是很大。在非视线光传输中,接收器实际接收到的信号是发射信号经过单次、两次或多次散射作用后到达探测器的累加结果,单次散射近似忽略了其他多次散射作用的影响,必然会带来误差。为定量计算单次散射近似研究非视线光传输模拟时的误差大小,分析误差大小与传输条件的关系,本文在介绍了单次散射近似模型基础上,建立了基于 Monte Carlo 方法的非视线光传输散射模型,引入脉冲响应函数的幅值峰值的变化,进一步定量分析该误差与吸收系数和 $P(k_s \times S)$ 值等之间的关系。

2 单次散射近似模型

紫外光非视线传输单次散射近似示意图(见图1), F_1 和 F_2 分别为接收器和发射器的位置,

在 F_1 与 F_2 之间没有视线光传输信道, θ_R 、 θ_T 、 β_R 和 β_T 分别为接收器、发射器的视场半角和仰角, O 点为接收与发射视场中心轴线的交点。单次散射近似就是假定光在大气介质中传输(从发射器到接收器)的过程中只经过一次散射,图1中阴影部分为单次散射所发生散射的有效体积 V , ξ_{\max} 和 ξ_{\min} 分别为有效散射体的上下界,非视线传输光程 S 为 F_1 和 F_2 与 O 点距离之和,在建立椭球坐标系后,这种方法研究非视线光传输时间特性变得比较简便。在椭球坐标系上, F_1 和 F_2 分别为椭球面上的两焦点,同一椭球面上的任意点到两焦点距离之和为常数,光从发射源经过同一椭球面散射到接收器所用时间就为定值,通过计算经不同椭球面薄层散射到接收器的光强,很快得到大气散射系统的脉冲响应函数等参量,具体公式推导及计算方法见参考文献^[7]和^[8]。

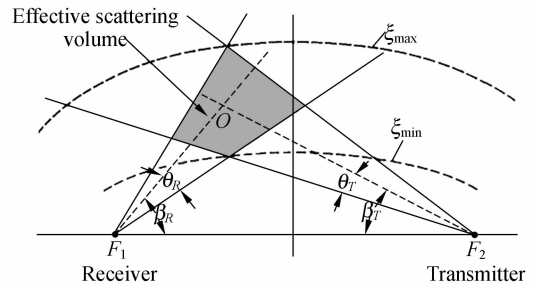


图1 紫外光非视线传输单次散射近似示意图

Fig. 1 Single-scattering model of NLOS UV propagation

3 蒙特卡罗多次散射模型

蒙特卡罗(Monte Carlo)是通过相应的概率模型和产生随机数来模拟单个光子在介质中的随机行走过程。在光源发射光子后,第一步确定随机步长和随机行走方向,光子在每一个随机位置会发生散射和吸收作用,这由光子的权重来决定。重复以上行走和作用的过程直到满足某种终止条件而使光子消亡,通过对大量光子追踪得到光子在介质中传输行为的统计结果。该方法常用来研究光在复杂几何形状和非均匀媒介多次散射的传输问题^[10-12]。

光子在随机介质(低空大气)中的非视线传输过程主要由四个参量决定: k_s (散射系数)、 k_a (吸收系数)、 r (分子散射比)和 g (散射余弦角平均

值)。特定气象条件下的散射系数、吸收系数和分子散射比可以从视线传输模拟软件 Modtran 得到,散射平均自由程是两次散射间的平均距离, g 反映了散射的各向异性度,消光系数 k 是散射和吸收系数之和。

蒙特卡罗方法中非视线光传输模拟时其随机行走算法步骤如下^[10-13]:

(1) 作用中光子的随机步长由 Beer's Law 确定。

(2) 每次作用中被吸收的概率为 $1-a$, a 是单个粒子的反照率,权重迭代: $w = w \times a$ 。

(3) 光子散射方向性与散射类型有关,发生分子散射时,符合瑞利散射分布,发生米散射时,由 Henyey-Greenstein 函数确定,与余弦平均值 g 有关。

(4) 光子的终止条件:光子权重的大小来决定,当光子权重小于某一值时可以认为光子消亡而不再跟踪,这主要由所考虑的具体问题和探测器的灵敏度来决定;目标介质的几何限制所决定,当光子发散到介质外则不再跟踪;目标介质内部特性所决定,如存在吸收体(如障碍物等),则当光子撞到吸收体上时,认为光子消亡而不再跟踪等。

应用 MC 方法随机产生紫外光子的出射方位、自由程和散射相位,可以很好记录光子在大气

中的非视线传输的随机运动过程。为模拟出大气散射系统的脉冲响应曲线,运用 Fortran 编写了相应算法实现程序,程序流程图如图 2 所示^[14]。选取以下参量:发射源的仰角 $\beta_T = 45^\circ$ 、发散半角 $\theta_T = 15^\circ$ 、接受仰角 $\beta_R = 45^\circ$ 、接收半角 $\theta_R = 15^\circ$,光从发射到达接受器非视线传输光程为 S 、发生分子散射比 0.5(Rayleigh 散射和 Mie 散射的几率相等)、单脉冲的能量为 1 J。模拟了 1 亿个光子在不同衰减系数 k 和不同光程 S 下的单次散射与 MC 模拟多次散射结果比较曲线如图 3 中(a)、(b)、(c)所示。分别对比(a)和(b)、(b)和(c)图,可以看出,随着衰减系数 $k(K_a + K_s)$ 和非视线传输光程 S 增大,单次散射近似结果偏离 MC 多次散射模拟值也越大。

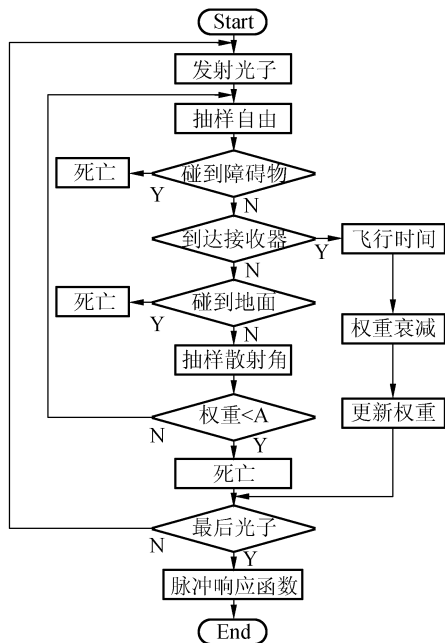
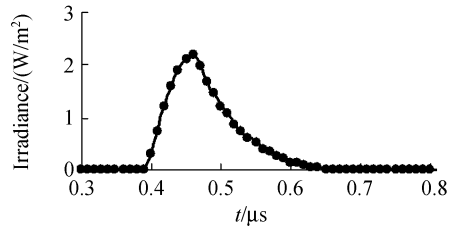
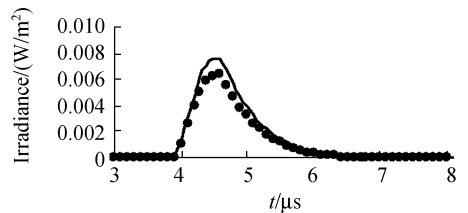


图 2 非视线光传输的程序流程图

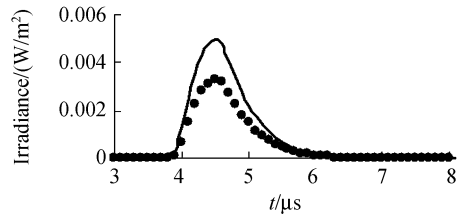
Fig. 2 Program framework of NLOS light propagation



(a) $k_s = k_a = 0.5 \text{ km}^{-1}$, $S = 100 \text{ m}$



(b) $k_s = k_a = 0.5 \text{ km}^{-1}$, $S = 1000 \text{ m}$



(c) $k_s = k_a = 0.5 \text{ km}^{-1}$, $S = 1000 \text{ m}$

图 3 不同条件下脉冲响应曲线(实线为多次散射模拟结果,虚线为单次散射模拟结果)
Fig. 3 Pulse response curve of different conditions (the real line is multiple-scattering simulation and the broken one is single-scattering calculation result)

4 单次散射近似的误差分析

脉冲响应函数是散射大气系统的传递函数,在大气光散射通信系统中,任何到达接收点的光信号都可以由发射点的信号与脉冲响应的卷积得到。为了定量分析单次散射近似的误差大小,引入脉冲响应函数的幅值峰值变化相对误差 E ,其大小定义为:

$$E = \frac{I_M - I_S}{I_M} \times 100\%, \quad (1)$$

式(1)中 I_M 和 I_S 分别为多次散射和单次散射模拟脉冲响应函数幅值的峰值大小。

4.1 误差大小与吸收系数的关系

为分析引起单次散射近似出现误差的主要原因,首先讨论误差与吸收系数的关系。图 4 为不同吸收系数、不同传输光程下的误差值比较图,模拟时散射系数均为 $k_s = 1 \text{ km}^{-1}$,其他初始不变的参量与图 3 中参量一致。由图中可以看出,误差值随传输光程增大而增大,当光程不变时,误差不随吸收系数变化而变化。其主要原因是吸收作用的影响只与光程有关,所以不会使得单次散射近似引入误差。

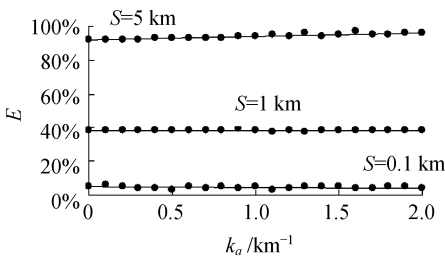


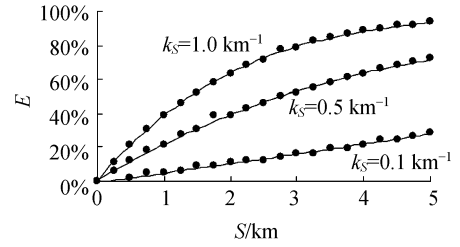
图 4 不同吸收系数 k_a 、不同传输光程下 S 的误差

Fig. 4 Error of different k_a and S

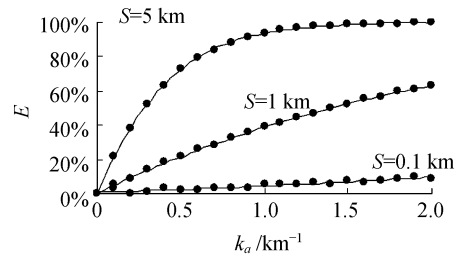
4.2 误差大小与 P 值的关系

误差与非视线传输光程 S 、散射系数 k_s 的关系如图 5(a)和 5(b)所示,从图 5(a)和图 5(b)都可以看出误差随着非视线传输光程 S 、散射系数 k_s 的增大而增大,当 S 和 k_s 无限增大时,误差值接近于 1。比较图 5 中(a)和(b)图,很容易看出当 $P(k_s \times S)$ 为定值时,其误差大小唯一确定;当 $P > 3$ 时,误差 $> 80\%$;当 $P < 3$ 时,误差随

P 值减小而减小,当 $P < 0.3$ 时,误差 $< 10\%$ 。



(a) $k_s = 1.0 \text{ km}^{-1}$, 0.5 km^{-1} , 0.1 km^{-1}



(b) $S = 5 \text{ km}$, 1 km , 0.1 km

图 5 误差与散射系数 k_s 、非视线传输光程 S 的关系图
Fig. 5 Relation of error with k_s (a) and error with S (b)

5 结 论

在介绍非视线传输的单次散射模型基础上,建立了基于 MC 方法非视线光传输散射模型,定量计算了单次散射近似的误差大小。

结果表明,单次散射近似的误差随散射系数和非视线传输光程增大而增大,与吸收系数无关;当 $P(k_s \times S) > 3$ 时,单次散射误差 $> 80\%$,多次散射作用显著;当 $P < 3$ 时,误差随 P 值减小而减小,当 $P < 0.3$ 时,误差 $< 10\%$,此时单次散射模型由于具有形式简单、操作性强等优点,可以较好地用来研究非视线光传输问题。

另外,在粗略估算复杂天气、远距离传输时,可结合定量分析的误差大小,将单次散射近似模拟结果在不同传输条件下进行误差修正,得到较为接近实际传输情况的参数,从而扩展了单次散射近似研究非视线光传输问题的应用。

参考文献:

- [1] GRAY A S, MELISSA N, MRINAL I, *et al.*. NLOS UV communication for distributed sensor systems [J]. *SPIE*, 2000, 4126:83-97.
- [2] CHANG SH L, YANG J K, YANG J C, *et al.*. The experimental research of UV communication [J]. *SPIE*, 2004, 5284:344-348.
- [3] JIA H H, YANG J K, CHANG SH L, *et al.*. Study and design on high data rate UV communication system [J]. *SPIE*, 2005, 6021:440-446.
- [4] GRAY A S, SIEGEL A M, MODEL J, *et al.*. Recent progress in short-range ultraviolet communication [J]. *SPIE*, 2005, 5796:214-225.
- [5] 徐晓静,元秀华,黄德修. 影响激光大气通信距离的诸因素分析[J]. 光学精密工程, 2002, 10(5):493-495.
XU X J, YUAN X H, HUANG D X. Analysis of the parameters influencing on distance of free-space laser communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(5):493-495. (in Chinese)
- [6] 蓝天,倪国强. 紫外通信的大气传输特性模拟研究[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(4):419-423.
LAN T, NI G Q. Simulation research on ultraviolet atmospheric transmission in UV communication [J]. *Trans. Beijing Inst. Technol.*, 2003, 23(4):419-423. (in Chinese)
- [7] DAVID R M, CARDINAL W. Temporal characteristics of single-scatter radiation [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, 69(3):464-470.
- [8] MARK M R, JEFFREY H S, J H, DAVID R M. Non-line-of-sight single-scatter propagation model [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1991, 18(12):1964-1972.
- [9] VAN DE HULST H C. *Light scattering by small particles* [M]. (the first edition). New York: Wiley, 1957.
- [10] BRUSCAGLION P, ZACCANTI G, BIANCO S D. Monte Carlo for multiple scattering and non-spherical particles [J]. *SPIE*, 2004, 5237:223-227.
- [11] CLAIRE L, ANTONIE R, PATRICK C, *et al.*. Experimental and theoretical studies of the aureole about a point source that is due to atmospheric scattering in the middle ultraviolet [J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(7):1250-1261.
- [12] 胡海峰,姚建铨,张帆. 利用 Monte Carlo 模拟技术研究 OCT 图像对比度[J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 94-98.
HU H F, YAO J Q, ZHANG F. Application of Monte Carlo simulation technology in OCT imaging contrast [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1):94-98. (in Chinese)
- [13] 张逸新. 随机介质中光的传播与成像[M]. 北京:国防工业出版社, 2002.
ZHANG Y X. *The light propagation and imaging in the random media* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [14] 贾红辉,常胜利,杨建坤,等. 非视线光传输模拟与实验比较[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 1311-1312.
JIA H H, CHANG SH L, YANG J K, *et al.*. Comparison of experiment and simulation of NLOS light propagation [J]. *Chinese J. Sci. Instrum.*, 2006, 27(6): 1311-1312. (in Chinese)

作者简介:贾红辉(1979—),男,贵州人,国防科技大学在读博士生,主要研究方向为紫外光大气传输技术。E-mail:jiahonghui@nudt.edu.cn; jiahonghui_9013@yahoo.com.cn

常胜利(1970—),男,河南人,博士,副教授,主要研究方向为紫外光学技术及信息光学。E-mail:slchang@nudt.edu.cn