

文章编号 1004-924X(2009)02-0246-05

## 多次散射情况下非视线光传输的模拟

何 新, 贾红辉, 常胜利, 尹红伟, 杨俊才  
(国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 基于蒙特卡罗方法, 对两种典型的接收与发射无公共视场的情况进行了仿真模拟, 解决了单次散射近似不适用的传输问题。对于 1 W 的光源, 大气吸收系数  $k_a = 1.2 \text{ km}^{-1}$ 、散射系数  $k_s = 1.5 \text{ km}^{-1}$  时, 对于收发器背向情况, 信号能量在距离为 50 m 处约为 0.27 nW, 其随距离增大呈指数衰减; 对于接收视场受限情况, 200 m 远处信号能量约 0.23 nW, 并随距离增大迅速增强。实验测试结果验证了模拟结果的正确性, 表明该方法适用于较复杂地形条件, 为发射和接收无公共散射体情况下的光传输提供了一种理论模拟方法。

**关键词:** 短波光学; 多次散射; 光传输; 蒙特卡罗法; 有效散射体

中图分类号: O43; TN929.12 文献标识码: A

## Simulation of non-line-of-sight light propagation for multiple-scattering instance

HE Xin, JIA Hong-hui, CHANG Sheng-li, YIN Hong-wei, YANG Jun-cai

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

**Abstract:** The multiple-scattering theory based on Monte Carlo (MC) method is described in detail to calculate two typical multiple-scattering instances. With atmospheric absorption coefficient in  $1.2 \text{ km}^{-1}$ , scattering coefficient in  $1.5 \text{ km}^{-1}$  and for a 1 W source, the signal energy is close to 0.27 nW at the distances of 50 m away and it decreases in exponential decay with increasing distance, when the detector and emission are in opposite directions; the signal energy is 0.23 nW at distances of 200 m away and it increases greatly with increasing distance, when the visual angle of the detector is limited by obstacles. Accordingly, a solution is presented to simulate the light propagation when the detector and emission do not have mutual scattering-substance. Experimental results show proposed simulation is correct and it is very practicable in complicated conditions.

**Key words:** short-wave optics; multiple-scattering; light propagation; Monte Carlo method; effective scattering-substance

收稿日期: 2008-05-27; 修订日期: 2008-07-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60607013)

## 1 引言

由于短波光(如紫外光)在近地大气中传输时,大气中的分子、粒子、气溶胶颗粒对其具有强烈的散射作用,因此可以实现非视线传输。这是目前国内外短波光学中的研究热点之一<sup>[1-3]</sup>,已经在传输理论计算及实验器件研究上有较大进展<sup>[4]</sup>,部分成果已可投入实用。

目前,国内外常用单次散射模型进行非视线大气散射通信信道特性的研究<sup>[5-6]</sup>,它具有模型简明、计算速度快的优点。但该模型仅考虑经公共大气区域散射一次后进入探测器的光能量,即要求发射源和探测器必须拥有公共的视场,当收发视场不相交时得不到计算结果。然而实际情况下,若发射视场角与接收视场角没有公共区域(比如发射源辐射方向与探测器接收方向相反,或者城市环境下建筑物造成阻挡的情况),此时光子必须经历两次或两次以上散射才能到达探测器,单次散射近似正确运行所需的前提条件已经不具备。因此,建模分析多次散射情况下非视线光传输的特性是必要的,适用于复杂地形条件下的光信号传输模拟,可以较全面地定量分析光散射传输规律,指导实验研究。

## 2 多次散射模拟近似

### 2.1 蒙特卡罗光子散射近似方法

基于蒙特卡罗方法的 NLOS 光散射传输模型以抽样的方法解决光子与大气中的粒子发生作用的效果,已经被理论验证<sup>[7-8]</sup>,利用它可以直接模拟光子传输的过程。该模型从光源发出的光脉冲出发,先以散射自由程确定光子的出射点和出射方向,确定光子第一个碰撞点;再根据大气粒子对光子的散射(碰撞)和吸收作用,分别运用 Rayleigh 散射和 Mie 散射相函数,确定碰撞后光子的出射方向,依次计算下一个碰撞点;以光子经历一定次数碰撞后到达探测面的概率为结果,对大量随机样本做统计。

本文针对单次散射模型不能解决的情况,即光子从辐射源开始,仅经过一次散射不能到达探测端的情形,建立普遍适用的多次散射近似方法,

并在收发装置视场不相交的条件下,对探测功率进行理论模拟。多次散射光传输模拟主要考虑:

- (1) 计算光子各次碰撞后射进探测器的概率,多次散射效果叠加;
- (2) 考虑粒子散射的随机性,多次模拟结果逼近真实值;
- (3) 假定 1 W 点光源以一定立体角均匀辐射,辐射源指向自由大气区域;
- (4) 收发视场角无公共散射体情形建模,考虑典型情况。

### 2.2 几何模型示意图

单次散射模型可以较好地解决短距、天气状况好、发射和接收有公共区域的情形<sup>[5]</sup>,但当光子只经过大气粒子的一次散射作用不能到达探测器时,单次散射模型没有计算结果。由于光子在大气中传输时,发生散射作用(与大气粒子碰撞)的概率很小<sup>[9]</sup>,因此多次散射模型精度要求较高,所考虑的因素更复杂。为简化起见,设发射与接收无公共区域情形有两种典型情形,如图 1 和图 2。假定辐射源的发射角与探测器接收视角相同,根据几何关系,可令辐射仰角与接收仰角的取值满足一定条件,使发射与接收没有公共区域。

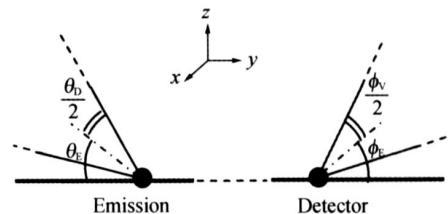


图 1 收发视场背向情形

Fig. 1 Detector and emission in opposite directions

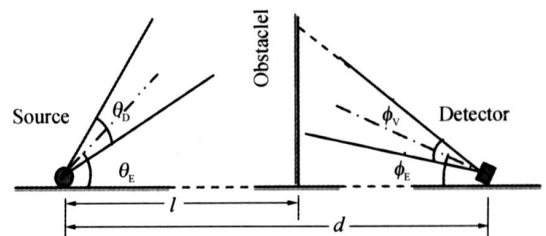


图 2 接收视场受限情形

Fig. 2 Visual angle of detector limited by obstacle

### 2.3 模型定量

模型考虑的辐射源恒定功率为 1 W,发射源

和探测器均位于地面。发射源仰角和发散角分别为  $\theta_E$  和  $\theta_D$ , 取探测器单位面积 ( $m^2$ ) 接收到的功率为计算结果, 模拟次数为  $n$  次,  $\phi_v$  和  $\phi_E$  分别是探测器视场角和仰角。

大气散射系数和吸收系数分别为  $k_s$  和  $k_a$ 。散射权重设为  $sw$ , 用于描述光子与大气中的粒子碰撞时, 分别发生 Rayleigh 散射或 Mie 散射的概率。取非对称因子  $g$  来描述粒子的散射特性, 它与大气中粒子的尺度参数  $x = 2\pi r/\lambda$  有关,  $x$  越小  $g$  越小。

坐标轴的选定: 源点与接收点连线定义为  $y$  轴,  $z$  轴与地面垂直方向朝上,  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴满足右手定律。阻挡建筑物距离发射源, 位于发射与接收器之间, 探测器件距离发射源为  $d$ 。

模拟时参数取值如表 1:

表 1 模拟参数取值

Tab. 1 Values of parameters in simulation

$n$	$k_s$	$k_a$	$\theta_D$	$\phi_v$	$g$	$sw$	$h/m$	$l/m$
$10^7$	1.5	1.2	/6	/6	0.7	0.523	50	100

其中,  $k_s$ 、 $k_a$ 、 $g$  和  $sw$  可根据一般城市大气条件 (气象视距 3 km 左右) 确定取值, 本文中假设它们不变;  $n$  为模拟次数, 其取值决定所考查的样本数量, 值越大模拟结果越接近真实值; 发射视场角与接收视场角均取定为  $30^\circ$ , 暂不考虑它们的变化。

### 3 模拟分析与实验

#### 3.1 实验系统

实验系统基于锁相放大检测技术, 其原理框图如图 3 所示。发射光源采用 9W H 形低压汞灯<sup>[10]</sup>, 以 8 kHz 信号触发控制光源闪烁频率, 利用内壁贴附铝箔纸的反光罩对出射光波进行发散; 接收系统采用透紫外滤光片和紫外光电倍增管, 经光电转换后的信号由锁相放大器检测出发射信号的相对强弱。

依据上述实验系统分别对收发背向及接收视场受限情况进行对比实验。模拟得到脉冲响应曲线后卷积再进行傅里叶变换可得到 8 kHz 信号的相对大小值。由于定量模拟出实验系统的输

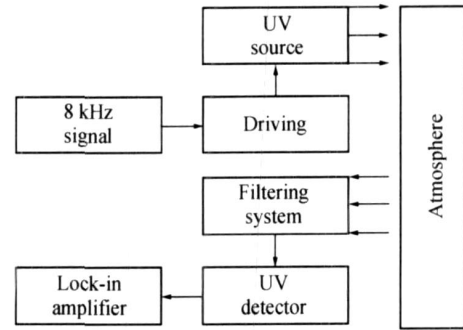


图 3 实验系统原理框图

Fig. 3 Schematic diagram of experiment system

出结果十分困难, 因此只考虑探测信号相对大小, 通过比较模拟结果与实验数据在不同传输距离下的变化趋势来验证模拟结果的正确性。

对比实验条件为: 时间 2008 年 7 月 10 日晚 20:00-23:00, 地点在校内 (长沙), 大气参量为城市消光系数, 能见度 3 km, 发射器和接收器视场角都为  $30^\circ$ , 仰角取值与模拟时取值相同。设定发射器位置不变, 改变接收器位置, 测试不同传输距离时 8 kHz 信号的相对电压值。

#### 3.2 收发视场背向情形模拟与实验

考虑第一种传输几何模型 (图 1), 此种情况单次散射模型完全不能解决。

若令发射仰角  $\theta_E$  和接收仰角  $\theta_E$  均为  $75^\circ$ , 根据简单的几何关系可知, 此时光子经过单次散射不能进入探测器。在表 1 所给条件下, 模拟给出不同传输距离时探测端的接收功率, 并设定实验系统发射器与接收器仰角也都为  $75^\circ$ , 则模拟与实验数据对比曲线如图 4 所示。

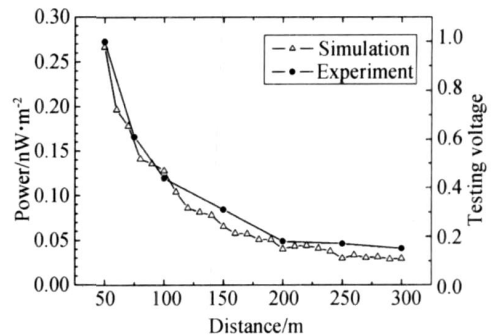


图 4 收发视场背向时探测能量变化曲线

Fig. 4 Energy curves of detector and emission in opposite directions

对于 1 W 的信号, 传输 50 m 信号能量约为

0.27 nW,距离由 50 m 增大至 300 m,探测能量将减小一个量级。这是由于距离的增大导致光子到达探测器需要经历的路程变长,将使光子被吸收和散射的概率增大。因此可知,多次散射情况在短距时效果较好,探测功率将随着距离增大而减小,其变化趋势越来越缓慢。远于 250 m 所接收到的光功率总体变化不大,此时提高光辐射源的功率才可以比较有效地增强接收信号。

### 3.3 接收视场受限情形模拟与实验

对于图 2 所示情形,障碍物高度确定为 (50 m),不考虑其长宽对光传输的影响,发射源仰角选取一定角度,使光辐射越过障碍物,若接收视场受外界条件限制指向阻挡建筑物,则它们的视场不相交。

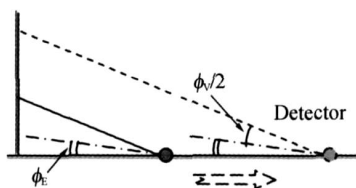


图 5 几何推算示意图

Fig. 5 Geometrical calculation

若发射仰角为  $45^\circ$ ,接收仰角为  $5^\circ$ ,根据图 5 所示几何关系推算,则满足接收视场被全部阻挡的最大距离:

$$d_{\max} = l + h / \tan(\phi_e + \phi_v / 2) \quad 237.4 \text{ m} .$$

图 6 给出了 110 m  $d$  230 m 时,分别通过模拟计算及实验测试得到的信号能量随距离的变化关系。

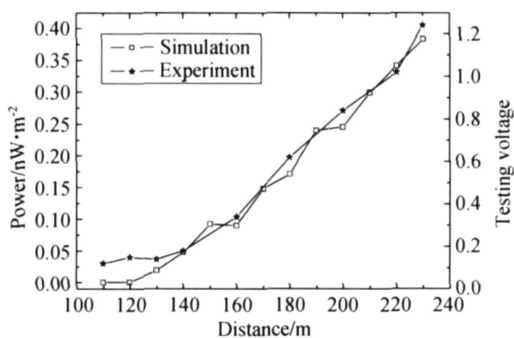


图 6 接收视场受限时探测能量与距离的关系

Fig. 6 Relation of energy and distance when the visual angle of detector is limited

探测器与阻挡建筑物的距离决定了探测功率的大小;传输距离为满足视场受阻条件的最大距离时可达极大值。

因此可得,当发射源条件不变时,接收能量的大小依赖于接收视场内所包含大气区域的体积,称为“有效散射体积”。随着该体积的增大,光子经散射后到达该区域的概率变大,在该区域内发生散射而进入探测器的光子数量也将增多,由此造成探测能量增强。

对于图 2 所示地形条件,探测器与阻挡建筑物之间所夹的接收视场即是“有效散射体积”,它与阻碍建筑物的几何参数、探测仰角及探测器视场角相关,如图 7 中阴影部分所示。探测器远离障碍物的过程中,有效散射体积增加,从而多次散射后光子进入探测器的概率变大,信号传输效率增强。

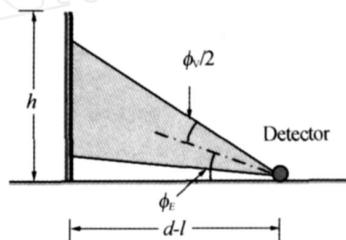


图 7 有效散射体积

Fig. 7 Effective scattering-volume

### 3.4 模拟与实验结果误差分析

根据图 4 和图 6 所示结果,在误差允许情况下,模拟计算结果与实验结果一致;同时引起实验测试与模拟结果有部分偏差的主要原因为:

- (1) 模拟选取的大气描述参量取值与实际大气条件有一定误差;
- (2) 当信号较微弱时,环境干扰光(如路灯光)影响系统输出相对强度;
- (3) 当探测信号较微弱时,探测系统自身噪声造成的输出误差,即系统自身的“本底信号”。

## 4 结 论

本文针对多次散射情况下的大气光传输,定量研究了两种典型收发无公共散射大气的情形,

并基于蒙特卡罗模拟方法计算光子经多次散射进入探测器的概率。结果表明,大气吸收系数取  $1.2 \text{ km}^{-1}$ , 散射系数取  $1.5 \text{ km}^{-1}$  时,对 1 W 的辐射源,在收发器背向情况下,信号能量在距离为 50 m 时约为 0.27 nW,200 m 时减小到 0.05 nW,随距离增大呈指数减小;对于接收视场受限情况,

传输距离为 200 m 时信号能量约为 0.23 nW,并随距离增大(有效散射体积增大)迅速增强。在所述系统条件下,实验验证了模拟结果的有效性。模拟结果解决了单次散射近似不能适用的情况,在一定程度上为相应的实践研究提供了理论分析方法。

### 参考文献:

- [1] DAVID M R, DANIEL T M, MODEL J. Unique properties of solar blind ultraviolet communication systems for unattended ground sensor networks [J]. *SPIE*, 2004, 5611: 244-254.
- [2] GARY A S, ANDREW M S, MODEL J. Extending the range and performance of non-line-of-sight ultraviolet communication links [J]. *SPIE*, 2006, 62310C-1-12.
- [3] 张静, 廖云, 武保剑, 等. 紫外光通信大气信道模型研究[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(2): 199-202. ZHANG J, LIAO Y, WU B J, *et al.*. Research on atmospheric channel model of ultraviolet communication systems[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2007, 36(2): 199-202. (in Chinese).
- [4] GARY A S, ANDREW M S, MODEL J, *et al.*. Recent progress in short-range ultraviolet communication [J]. *SPIE*, 2005, 5796: 214-225.
- [5] MARK R L, JEFFREY H S, DAVID M R. Non-line-of-sight single-scatter propagation model [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1991, 8(12): 1964-1972.
- [6] DAVID M R, CARDINAL W. Temporal characteristics of single-scatter radiation [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, 69(3): 464-470.
- [7] 贾红辉, 常胜利, 兰勇, 等. 大气光通信中基于蒙特卡罗方法非视线光传输模型[J]. 光电子·激光, 2007, 18(6): 690-693. JIA H H, CHANG S L, LAN Y, *et al.*. Non-line-of-sight light propagation model based on monte carlo method[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*. 2007, 18(6): 690-693. (in Chinese)
- [8] 贾红辉, 常胜利, 杨建坤, 等. 单次散射近似研究非视线光传输中的误差[J]. 光学精密工程. 2007, 15(1): 40-44. JIA H H, CHANG S L, YANG J K, *et al.*. Study on error of non-line-of-sight light propagation by single scattering model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 40-44. (in Chinese)
- [9] E.J. 麦卡特尼著. 潘乃先, 毛节泰, 等译. 大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 1988. MCCARTNEY E J. Translated by PAN N X, MAO J T, *et al.*. *Optics of the Atmosphere* [M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese)
- [10] CHANG S L, YANG J K, YANG J C, *et al.*. The experimental research of UV communication [J]. *SPIE*, 2004, 5284: 344-348.

### 作者简介:



何新(1984-),男,安徽淮北人,在读博士研究生,主要从事大气光通信技术的研究。E-mail: pc19840907@yahoo.com.cn

贾红辉(1979-),男,贵州松桃人,工学博士,讲师,主要从事大气光散射通信技术和微弱光电信号检测的研究。E-mail: jiahh@nudt.edu.cn 或 jiahonghui\_9013@yahoo.com.cn

常胜利(1970-),男,河南许昌人,工学博士,教授,主要从事紫外光学和信息光学研究。E-mail: slchang@nudt.edu.cn

尹红伟(1981-),男,河南中牟人,理学硕士,讲师,主要从事信息光学与非成像光学方面的研究。E-mail: yinhongwei@nudt.edu.cn

杨俊才(1956-),男,陕西人,教授,主要从事光信息处理和光学检测方面的研究。E-mail: yangjuncai@nudt.edu.cn