

文章编号: 0253-2239(2010)11-3148-05

紫外光非视距单次散射链路模型的研究

何 华 柯熙政 赵太飞

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 为了详尽而深刻地研究紫外光在大气中的非视距散射传输机制,以数学中的椭球坐标系为基础,分析了紫外光非视距单次散射链路模型中光子从发射端到接收端经历的散射过程及其间光子能量的变化;着重研究了与紫外光非视距散射通信密切相关的有效散射体的体积分,并对决定体积分的三组积分限进行了重点分析与计算,得到了各组积分限准确的取值公式。研究结果对紫外光的通信机制与接收能量给予了完整的分析与准确的定量,为将来实现紫外光通信的组网和进一步研究紫外光通信打下了坚实的基础。

关键词 光通信;单次散射;非视距;椭球坐标系;有效散射体积分

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103011.3148

Research of Ultraviolet Non-Line-of-Sight Single Scattering Link Model

He Hua Ke Xizheng Zhao Taifei

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

Abstract In order to profoundly study the mechanism of ultraviolet non-line-of-sight scattering transmission, based on ellipsoidal coordinate, the scattering process of photons from transmitter to receiver and energy change in the process are analysed; Furthermore, the study of the effective scattering volume integral is mainly investigated due to the dose relation with the ultraviolet communication, and the three groups of integral limits which determine the volume integral is analysed and calculated. Integral limit formulas of each group are achieved. The results give the integrated explanation and exact quantification of ultraviolet communication mechanism and receiving power. It builds a solid foundation for the ultraviolet network and the future study.

Key words optical communication; single scattering; non-line-of-sight; ellipsoidal coordinate; effective scattering volume

1 引 言

无线光通信系统^[1]利用光波(波长范围覆盖红外光、可见光与紫外光)来传输信息。与射频系统相比,无线光通信有其自身的优势,例如拥有宽广的无需授权频段、可使用低功耗和小型化收发器、抗干扰能力强等^[2~4]。丰富且无需授权的带宽资源与多接入干扰的自由性在商业上非常具有吸引力,而其固有的安全特性又成为军事领域看重的特点。

无线光通信中的红外光和紫外光都是非常宝贵的载波资源^[5]。红外光通信对于激光的对准与捕获要求非常严苛,即只能在视距(LOS)条件下进行通信。而实际中不少情况下并不能满足LOS条件,比如高楼林立的街区、杂物丛生的野外等,所以利用红外光进行通信具有一定的局限性。在所有的光学领域中,只有紫外光在大气传输中具有特殊的强散射性能^[6],能够通过大气中的不同成份(大气分子、气

收稿日期: 2010-01-11; 收到修改稿日期: 2010-02-03

基金项目: 国家863计划(2008AAJ159)、国家自然科学基金(60977054)和中国博士后科学基金(20080441179)资助课题。

作者简介: 何 华(1982—),女,博士研究生,主要从事光通信与无线通信网络等方面的研究。

E-mail: hantwoxin@hotmail.com

导师简介: 柯熙政(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事大气激光通信与信号处理等方面的研究。

E-mail: xzke@263.net

溶胶等)对其散射来完成非视距(NLOS)通信。近地大气中的紫外光经过单次散射或者多次散射之后到达接收端。Van de Hulst 提出,当光深度 $\tau < 0.1$ 时(光深度定义为散射系数与传输距离的乘积,当物体远离时,光深度将会增加),单次散射传输占主要方面^[7]。对于短距离的紫外传输,接收端接收到的主要是光子单次散射之后的能量。因此,紫外光非视距单次散射通信系统是非常值得研究的课题。

紫外光非视距^[8]散射通信的核心在于发射端与接收端虽然没有对准,但是发射发散角能够与接收视场角在空中交叠而形成有效散射体,使得发射端发出的能够到达有效散射体的光子经过散射之后可以到达接收端。因此,有效散射体的体积大小与接收端收到的光能量成正比趋势。文献[9]中对于散射体体积积分中方位角这个积分变量的积分限取为 2π ,其取值范围过大,不够准确。文献[10]中对全向接收、全向发射和通用模型分别推导散射体体积积分中三组积分上下限的取值,但过于复杂,不便于理解与使用。本文基于 Reilly^[9]提出的紫外光单次散射链路模型,利用数学中的椭球坐标系,分析了紫外光非视距单次散射链路模型中光子从发射端到接收端经历的散射过程及其间光子能量的变化;重点研究了有效散射体的体积积分,并着重对径向坐标 ξ 、角坐标 η 和方位角坐标 ϕ 这三组积分的积分限进行了详细的讨论与计算,尤其对于方位角的积分限给予了简洁与清晰的讨论。

2 大气成分对紫外光的散射

大气可以被看作是其中悬浮着固体和液体分子的气体。在某个确定的地点和时间,大气的组成物确切地说是一个关于地理位置、海拔、一天中的时间、一年中的时间、天气状况(湿度、风力、温度等)和人类活动(农业、城市、工业)等一系列参数的函数。大气中的气体分子与气溶胶粒子对紫外光传输的影响最大。

1) 气体分子

气体分子的半径远远小于紫外波长,它对紫外光的散射由瑞利散射的四次定律来解释。瑞利散射相函数(标量)描述了气体分子散射辐射的空间分布,定义如下:

$$p(\cos \theta_s) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2 \theta_s), \quad (1)$$

式中 θ_s 为散射角,由光波的前向后向射点与观察方向来确定。瑞利散射相函数 $p(\cos \theta_s)$ 关于 $\theta_s = 90^\circ$

对称,当发生前向和后向散射时相函数达到最大值^[11]。

2) 气溶胶粒子

气溶胶代表了多分散悬浮粒子及变尺寸的悬浮粒子,其半径与光波长相比拟,可由米氏散射理论来解释。但米氏散射理论非常复杂,不便于直接使用。Henyey-Greenstein(HG)方程与散射相函数方程极为相似,因此,实际中经常使用 HG 方程来定义气溶胶单次散射相函数,表达式定义为

$$p(\cos \theta_s) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta_s)^{3/2}}, \quad (2)$$

式中 $g = \overline{\cos \theta_s}$,是散射角取余弦之后的平均值,代表前向散射与后向散射的比率。随着 g 的增加,前向散射增强。一般情况下 g 取 $0.7^{[12]}$ 。

3 椭球坐标系

紫外光单次散射链路模型的分析以椭球坐标系为基础,椭球坐标系如图 1 所示,椭球表面由椭圆围绕其主轴旋转一周得到,椭球上任意一点的坐标由径向坐标 ξ 、角坐标 η 和方位角坐标 ϕ 唯一确定。直角坐标系 $x-y-z$ 转化到椭球坐标系的参数定义如下^[10]:

$$r_1 = [x^2 + y^2 + (z + r/2)^2]^{1/2}, \quad (3)$$

$$r_2 = [x^2 + y^2 + (z - r/2)^2]^{1/2}, \quad (4)$$

$$\xi = (r_1 + r_2)/r \quad (1 \leq \xi \leq \infty), \quad (5)$$

$$\eta = (r_1 - r_2)/r \quad (-1 \leq \eta \leq 1), \quad (6)$$

$$\phi = \arctan(x, y) \quad (-\pi \leq \phi \leq \pi), \quad (7)$$

$$\theta_s = \phi_1 + \phi_2, \quad (8)$$

式中两焦点 F_1 与 F_2 分别位于 z 轴上距 $r/2$ 处, ϕ_1 , ϕ_2 是椭球的两个焦角, θ_s 为散射角, r 是两焦点之间的距离, r_1 与 r_2 分别是椭球面上某点到两焦点的焦半径。当 $\xi \rightarrow \infty$ 时,椭球成为一个圆;当 $\xi \rightarrow 1$ 时,椭球成为连接两焦点的线段。由(3)~(6)式和(8)式

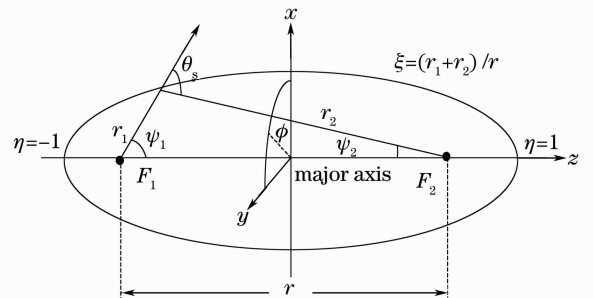


图 1 椭球坐标系

Fig. 1 Ellipsoidal coordinate

可以推出:

$$\cos \psi_1 = (1 + \xi\eta)/(\xi + \eta), \quad (9)$$

$$\cos \psi_2 = (1 - \xi\eta)/(\xi - \eta), \quad (10)$$

$$\cos \theta_s = (2 - \xi^2 - \eta^2)/(\xi^2 - \eta^2). \quad (11)$$

4 紫外光散射通信的过程

把椭球坐标系应用到紫外光单次散射通信链路上来,在两个焦点上分别放置发射装置与接收装置,则紫外光通信过程中的许多计算都可以直接使用椭球坐标系中已经定义好的公式,极大地降低了对通信过程分析与研究的难度。基于椭球坐标系的紫外光单次散射链路模型如图 2 所示。

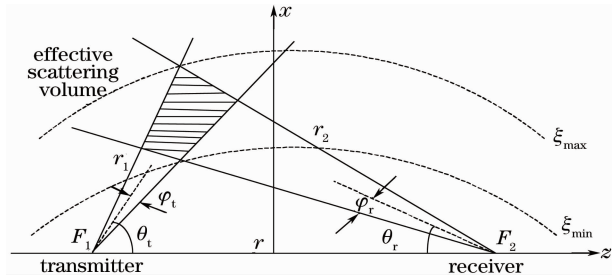


图 2 紫外光单次散射通信链路模型

Fig. 2 Ultraviolet single scattering communication link model

在 $t = 0$ 时刻,总能量为 E_t 的紫外光以发散角 $2\phi_t$ 离开发射端[每单位立体角的发射能量为 $\frac{E_t}{\Omega}$, 立体角 $\Omega = 4\pi\sin^2(\phi_t/2)$], 沿着发射角为 θ_t 的方向在 $t = r_1/c$ 时刻到达距离发射端为 r_1 的有效散射体, 此时的能量密度为 $\frac{E_t}{\Omega} \frac{\exp(-kr_1)}{r_1^2}$, 其中 k 是消光系数, $\exp(-kr_1)$ 是紫外光在大气中传输 r_1 与在真空

中传输 r_1 之后能量的比率。

有效散射体的体微分 dv 可看作是一个二级球点光源,是由紫外光与所传媒质之间相互作用产生的,在整个球面上的立体角为 4π 。因此,此二级点光源的能量密度为 $\left[\frac{E_t}{\Omega} \frac{\exp(-kr_1)}{r_1^2}\right] \frac{k_s}{4\pi} p(\cos \theta_s) dv$, k_s 为大气散射系数, $p(\cos \theta_s)$ 为单次散射相函数。 $p(\cos \theta_s)$ 并不总是相同的,应根据当时的大气状况选择合适的单次散射相函数。

二级点光源中的部分能量将沿着能够到达接收端的方向传输,在 $t = (r_1 + r_2)/c$ 时刻到达接收端,接收端接收到的来自于二级点光源的能量密度为

$$\delta E_r = \left[\frac{E_t}{\Omega} \frac{\exp(-kr_1)}{r_1^2}\right] \left[\frac{k_s}{4\pi} p(\cos \theta_s) dv\right] \frac{\exp(-kr_2)}{r_2^2}. \quad (12)$$

根据椭球坐标系中的 ξ, η, ϕ 和焦距 r ,可以得到散射体微分的表达式:

$$dv = (r/2)^2 (\xi^2 - \eta^2) d\xi d\eta d\phi, \quad (13)$$

又因为 $r_1 = \frac{r}{2}(\xi + \eta)$ 与 $r_2 = \frac{r}{2}(\xi - \eta)$, 接收端接收到的来自于二级点光源的能量密度为

$$\delta E_r = \frac{E_t k_s}{4\pi\Omega} \frac{\exp(-kr\xi) p(\cos \theta_s)}{(r/2)(\xi^2 - \eta^2)} d\xi d\eta d\phi. \quad (14)$$

因为 $\xi = (r_1 + r_2)/r$ 即 $\xi = ct/r$, 所以 $d\xi = cdt/r$ 即 $\frac{d\xi}{dt} = \frac{c}{r}$, 则接收端的瞬时微分体积接收功率密度为

$$\delta P_r = \frac{cE_t k_s}{2\pi\Omega r^2} \frac{\exp(-kr\xi)}{(\xi^2 - \eta^2)} p(\cos \theta_s) d\eta d\phi. \quad (15)$$

最后,通过对各个参数进行积分,得到接收端总的接收功率为

$$P_r(\xi) = \begin{cases} 0, & \xi < \xi_{\min} \\ \int_{\eta_1(\xi)}^{\eta_2(\xi)} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{cE_t k_s}{2\pi\Omega r^2} \frac{\exp(-kr\xi)}{(\xi^2 - \eta^2)} p(\cos \theta_s) d\eta d\phi, & \xi_{\max} < \xi < \xi_{\min} \\ 0, & \xi > \xi_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

至此,紫外光单次散射通信的整个过程分析完毕。简单的说,此过程分为两个子过程:从发射端到有效散射体的传输和从有效散射体到接收端的传输。但实际过程中光能量的损耗程度还需对三组积分限 $(\eta_1, \eta_2; \xi_{\min}, \xi_{\max}; \phi_1, \phi_2)$ 做认真的分析与推导才能最终得到完整的结论。

5 三组积分限的分析与推导

5.1 角坐标积分限 $\eta_1(\xi), \eta_2(\xi)$

从椭球坐标系中可以看出, $\eta_1(\xi)$ 是关于 ξ 与 ϕ_1 的函数, $\eta_2(\xi)$ 是 ξ 与 ϕ_2 的函数。根据(9)式与(10)式可分别得到

$$\eta_1(\xi) = \frac{\xi \cos \psi_1 - 1}{\xi - \cos \psi_1}, \quad (17)$$

$$\eta_2(\xi) = \frac{1 - \xi \cos \psi_2}{\xi - \cos \psi_2}, \quad (18)$$

式中 $\psi_1 = \theta_t + \varphi_t, \psi_2 = \theta_r + \varphi_r$ 。

5.2 径向坐标积分限 ξ_{\min}, ξ_{\max}

当 ξ 取最小值 ξ_{\min} 时, $\eta_1(\xi) = \eta_2(\xi)$, 令(17)式与(18)式相等, 其中 $\psi_1 = \theta_t - \varphi_t, \psi_2 = \theta_r - \varphi_r$, 得到

$$\xi_{\min} = \left[\frac{1 + \cos(\theta_t - \varphi_t) \cos(\theta_r - \varphi_r)}{\cos(\theta_t - \varphi_t) + \cos(\theta_r - \varphi_r)} \right] + \sqrt{\left[\frac{1 + \cos(\theta_t - \varphi_t) \cos(\theta_r - \varphi_r)}{\cos(\theta_t - \varphi_t) + \cos(\theta_r - \varphi_r)} \right]^2 - 1}. \quad (19)$$

当 ξ 取最大值 ξ_{\max} 时, $\eta_1(\xi) = \eta_2(\xi)$, 令(17)式与(18)式相等, 其中 $\psi_1 = \theta_t + \varphi_t, \psi_2 = \theta_r + \varphi_r$, 得到

$$\xi_{\max} = \left[\frac{1 + \cos(\theta_t + \varphi_t) \cos(\theta_r + \varphi_r)}{\cos(\theta_t + \varphi_t) + \cos(\theta_r + \varphi_r)} \right] + \sqrt{\left[\frac{1 + \cos(\theta_t + \varphi_t) \cos(\theta_r + \varphi_r)}{\cos(\theta_t + \varphi_t) + \cos(\theta_r + \varphi_r)} \right]^2 - 1}. \quad (20)$$

5.3 方位角坐标积分限 ϕ_1, ϕ_2

因为发射光锥与接收光锥关于 xz 平面对称, 所以它们交叠部分产生的有效散射体也关于 xz 平面对称, 因此可以得到

$$\phi_2 = -\phi_1, \quad (21)$$

(7)式定义了方位角坐标 ϕ 为光锥上某一点的 y 轴坐标与 x 轴坐标的反正切。图3所示为三维坐标系中发射光锥从发射点到与接收光锥交叠的部分, A 与 D 为光锥在 y 轴方向正负两侧最远处的交点, 且 AD 平行于 y 轴, 因此可以得到

$$\phi_2 = \arctan(x_A, y_A), \quad (22)$$

$$\phi_1 = \arctan(x_D, y_D). \quad (23)$$

根据(21)式, 则

$$\phi_2 = \arctan(x_A, y_A) = -\arctan(x_D, y_D) = -\phi_1, \quad (24)$$

式中 (x_A, y_A) 是点 A 的坐标, (x_D, y_D) 是点 D 的坐标。图3中,

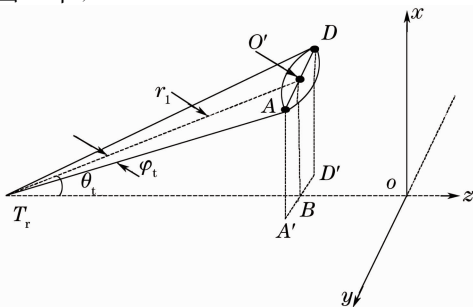


图3 发射光锥分析图

Fig.3 Analysis of the transmitting cone

$$x_A = AA' = O'B = r_1 \sin \theta_t, \quad (25)$$

$$y_A = A'B = AO' = r_1 \tan \varphi_t. \quad (26)$$

因此,

$$\phi_2 = \arctan[r_1 \sin \theta_t, r_1 \tan(\varphi_t)] = -\phi_1. \quad (27)$$

上述过程的推导建立在发射光锥与接收光锥的交叠处在 y 轴方向正负两侧最远两点之间的距离(图3中的 AD)为发射光锥小于等于接收光锥的基础之上。反之, 利用同样的计算方法对接收光锥进行分析亦可得到需要的结果。

6 结 论

本文以数学中的椭球坐标系为基础, 详细分析了紫外光非视距单次散射链路模型中光子从发射端到接收端经历的不同过程、各过程中光子能量的变化以及散射体的积分计算; 最后, 对三组积分的积分限进行了详细的讨论与计算, 对紫外光通信的全过程做了清晰与详细的分析。

参 考 文 献

- Li Mingqiu, Li Hongzuo, Jiang Huilin. Study on fine tracking robust control technology of space laser communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 87~91
李明秋, 李洪祚, 姜会林. 空间激光通信精跟踪系统稳健控制技术[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 87~91
- Liu Ye, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan. Study on the transport model based on atmosphere scattering theory in ultraviolet communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 62~67
刘 晔, 徐智勇, 汪井源. 紫外光通信中基于大气散射理论的传输模型[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 62~67
- Wang Xi, Xiao Shali, Zhao Ming *et al.*. Short-wavelength ultraviolet communication transceiver system based on field programmable gate array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 272~276
王 玺, 肖沙里, 赵 明等. 基于现场可编程门阵列的短波紫外光通信发射系统[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2): 272~276
- Feng Tao, Chen Gang, Fang Zujie. Atmospheric propagation model in non-line-of-sight optical scattering communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1522~1526
冯 涛, 陈 刚, 方祖捷. 非视线光散射通信的大气传输模型[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1522~1526
- Zhengyuan Xu, Gang Chen, Feras Abou-Galala *et al.*. Experimental performance evaluation of non-line-of-sight ultraviolet communication system [C]. *SPIE*, 2007, **6709**: 67090Y
- Jia Honghui, Zhang Hailiang, Yin Hongwei *et al.*. The experimental research of NLOS UV propagation channel in the atmosphere based on LIA technology[C]. *SPIE*, 2007, **6783**: 67833B
- Haipeng Ding, Gang Chen, Arun K. Majumdar *et al.*. A parametric single scattering channel model for non-line-of-sight ultraviolet communications[C]. *SPIE*, 2008, **7091**: 70910M
- Tang Yi, Ni Guoqiang, Lan Tian *et al.*. Simulation and evaluation of transmission distance in solar-blind UV communication systems[J]. *Laser Technology*, 2007, **33**(1): 27~30
唐 义, 倪国强, 蓝 天等. “日盲”紫外光通信系统传输距离的

- 仿真计算[J]. 激光技术, 2007, **33**(1): 27~30
- 9 D. M. Reilly. Atmospheric Optical Communications in the Middle Ultraviolet[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology. 1976. 54~65
- 10 Mark R. Luetzgen, Jeffrey H. Shapiro, David M. Reilly. Non-line-of-sight single-scatter propagation model[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1991, **8**(12): 1964~1972
- 11 Chen Junhong, Yang Xiaoli. Research of the atmospheric factors of solar blind ultraviolet communication [J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(4): 38~39
- 陈君洪, 杨小丽. 非视线“日盲”紫外通信的大气因素研究[J]. 激光杂志, 2008, **29**(4): 38~39
- 12 Tang Yi, Wu Zhongliang, Ni Guoqiang *et al.*. NLOS single scattering model in digital UV communication[C]. *SPIE*, 2008, **7136**: 713615