

文章编号: 1001-3806(2011)04-0495-04

基于高度的紫外光 NLOS 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, 西安 710048)

摘要: 为了更精确、更全面地研究紫外光的通信性能,使之更适合于实际空间中的3维应用,在2维紫外光单次散射链路模型的基础上融入高度信息,并利用仿真计算了在添加高度信息与否的两种情况下接收功率误差的大小。结果表明,高度对于发射仰角和接收仰角潜在的影响直接引起接收功率的改变,甚至在某些情况下不能进行通信。高度信息的考虑对通信设备在实际空间中的应用给予了正确的指导。

关键词: 光通信;紫外光通信;单次散射;高度;非视距

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.04.014

Research of NLOS ultraviolet single scattering link model with height information

HE Hua, KE Xi-zheng, ZHAO Tai-fei

(Automation & Information School, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to study the ultraviolet communication characteristics accurately and comprehensively so that it can be adopted in actual 3-D space application, with the height information synthesized in the single scattering link model, the error was computed with the height information or not. The result shows that potential interference of height on the transmitting angle and receiving angle will lead to receiving power changes, even lead to communication failure under some circumstances. Thus, it provides a good guideline to real application of the ultraviolet communication settings.

Key words: optical communication; ultraviolet communication; single scattering; height; non-line-of-sight(NLOS)

引 言

无线光通信利用波长范围从红外光、可见光到紫外光范围内的光波进行信息传输。与射频通信相比,它具有无可替代的优势,例如:宽广的无需授权频带、低功率小型化收发机、更高的功率密度、抗干扰性强和数据率高等等^[1]。在无线光通信领域,红外光和紫外光是非常宝贵的载波资源。红外光通信可用于室内和室外,许多现有的通信系统都采用红外激光器作为光源。但是红外光非常容易被障碍物阻挡且没有可替代的路径,因此,它在复杂的室外环境下无法通信,具有其局限性。而紫外光在大气中传输主要依靠大气分子和气溶胶的散射作用,使得紫外光从发射端到接收端的过程中能够历经不同光路,因此,非视距(non-line-of-sight, NLOS)通信变得可能^[2]。

人们对紫外光通信的研究可以追溯到20世纪60

年代^[3],但那时它还不是通信领域的主要研究方向。近年来,由于半导体光源和探测器的快速发展^[4]、紫外光独特的大气散射非视距工作方式以及军队等领域的不需求,紫外光通信系统越来越受到人们的关注,并对其进行了一系列的研究、实验和报道^[5],其涉及的研究内容广泛,包括信道建模、信道特性、系统设计和网络组建等等。

信道建模无疑是无线紫外光通信中基础而重要的一个研究内容,其通信的机制和特点皆由此体现。在紫外光通信发展的历史过程中,很多研究者对它的散射通信机制进行了信道建模。1968年, SUNSTEIN^[6]为了寻找一种低功率通信方式,将单次散射信道模型应用到具有较短波长的紫外光传输上,肯定了大气对紫外光波的散射效应,而不是依靠电离层的反射进行通信,启发了后人对紫外光通信的研究。1976年, REILLY^[7]详细阐述了紫外光单次散射通信的各个过程,以及各过程中光能量的变化等,对紫外光通信研究起着良好的指导作用。1991年, LUETTGEN等人^[8]利用椭圆坐标系对紫外光单次散射模型进行了有序的公式计算和参量设定,并对发射机和接收机分别处于全向工作时给出了通用的解决办法。近些年,还有很多学者承继着这些研究成果继续对其进行探索,但是都

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61001069; 60977054);西安市科技计划资助项目(CXY1012(2))

作者简介:何 华(1982-),女,博士研究生,主要从事紫外光通信方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xzke@263.com

收稿日期:2010-10-27;收到修改稿日期:2010-11-16

只考虑了发射机和接收机处于同一平面时的情况。然而,在实际的空间应用中,发射机与接收机常常处于不同的高度,例如将它们置于不同高度的两幢楼的楼顶,此时若仍按照同平面下的信道模型进行计算,势必会引起较大的误差。作者提出了一种基于发射机与接收机高度信息的紫外光单次散射链路模型,精确计算了在非同一平面时接收机接收到的功率大小,为实际中的应用提供了良好的指导。

1 紫外光通信链路模型

1.1 紫外光的通信因素

紫外光通信以低空大气为传输媒介,其传输性能与传输范围内大气的成分和紫外光的工作波长密切相关,主要体现为对紫外光的散射作用。大气成分对紫外光的散射成就了紫外光非视距通信的工作方式。当散射粒子的直径远小于紫外波长时发生瑞利(Rayleigh)散射,而当散射粒子的直径和紫外波长可相比拟时发生米氏(Mie)散射。一般来说,与紫外光波长越接近的大气粒子对其散射强度越大。

1.1.1 气体分子 气体分子的半径远远小于紫外波长,对紫外光的散射由瑞利散射的4次方定律来解释。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,由下式定义为:

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

式中, θ_s 为散射角,由光波的前向、散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^[9]。

1.1.2 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 $0.7^{[10]}$ 。

紫外光非视距散射通信根据其传输距离的远近可以发生单次散射和多次散射,由于本文中所研究的是近距离通信(不大于1km),因此,单次散射起主要作用。

1.2 基于高度信息的紫外光非视距散射链路模型

紫外光非视距单次散射链路模型如图1所示,它

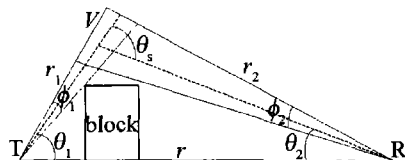


Fig. 1 Single scattering link model of NLOS UV communication

可以被看作是两段视距通信,即从T至V,V再至R,不能到达V的光子将无法被R接收到^[11]。图中,T是发射机,R是接收机,V是发射仰角和接收仰角交叉部分的有效散射体体积, θ_1 是发射机的仰角, θ_2 是探测接收机的仰角, ϕ_1 发射光束孔径角, ϕ_2 是接收视场角, r 是T到R的距离, r_1 是T到V的距离, r_2 是R到V的距离。散射角 θ_s 是 θ_1 与 θ_2 的夹角 ($\theta_s = \theta_1 + \theta_2$)。非视距紫外光单次散射链路的接收功率按下式^[12]定义为:

$$P_r = \frac{P_t A_r K_s p_s \phi_2 \phi_1^2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{32\pi^3 r \sin\theta_s \left(1 - \cos\frac{\phi_1}{2}\right)} \times \exp\left[-\frac{K_e r (\sin\theta_1 + \sin\theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}\right] \quad (3)$$

式中, P_r 是R端的接收功率, P_t 是T端的发送功率, p_s 是散射相函数, A_r 是接收孔径面积, K_e 是大气消光系数,由Rayleigh散射系数 $K_{s,R}$, Mie散射系数 $K_{s,M}$ 和大气吸收系数 K_a 组成 ($K_e = K_{s,R} + K_{s,M} + K_a$)。

而当发射端与接收端处于不同平面时,如图2所示,T是位于高度 H_t 上的发射机,R是位于高度 H_r 上

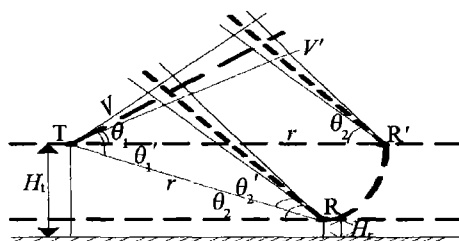


Fig. 2 NLOS UV single scattering link model with height

的接收机,发射机仰角为 θ_1 ,接收机仰角为 θ_2 ,两者相距 r 。此时,若利用(3)式直接来估算接收机R上的功率,由于T与R不处在同一高度,它们之间的连线与水平面不平行,此时的发射仰角 θ_1 与接收仰角 θ_2 已经发生了变化,如图2所示,它们分别变成了 θ_1' 与 θ_2' 。因此,接收功率的计算结果并不属于R,而属于位于以T为圆心, r 为半径并与T等高的圆上一点,即图2中的 R' ,称此时的接收功率为 P_r' 。

而R的接收功率 P_r 中的参量应与T,R之间连线的所在平面为参考,在图2中,发射仰角由 θ_1 增加到 θ_1' ,变化量记为 $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_1 = \theta_1' - \theta_1$;接收仰角由 θ_2 减小到 θ_2' ,变化量记为 $\Delta\theta_2$,而 $\Delta\theta_2 = \Delta\theta_1$ 。

$$\Delta\theta_1 = \arcsin\left(\frac{H_t - H_r}{r}\right) \quad (4)$$

$$\Delta\theta_2 = \Delta\theta_1 \quad (5)$$

$$\theta_1' = \theta_1 + \Delta\theta_1 = \theta_1 + \arcsin\left(\frac{H_t - H_r}{r}\right) \quad (6)$$

$$\theta_2' = \theta_2 - \Delta\theta_2 = \theta_2 - \arcsin\left(\frac{H_t - H_r}{r}\right) \quad (7)$$

综上公式,可以得到带有高度信息的紫外光非视距单次散射链路的接收功率,如下式所示:

$$P_r' = \frac{P_t A_r K_s p_s \phi_2 \phi_1^2 \sin(\theta_1' + \theta_2')}{32\pi^3 r \sin\theta_1' \left(1 - \cos\frac{\phi_1}{2}\right)} \times \exp\left[-\frac{K_e r (\sin\theta_1' + \sin\theta_2')}{\sin(\theta_1' + \theta_2')}\right] \quad (8)$$

2 仿真与分析

本文中采用波长为 250nm 的“日盲”紫外光,分别得到了在一定高度 $H_t = 0.1\text{km}$, $H_r = 0.04\text{km}$ 和 $H_t = 0.2\text{km}$, $H_r = 0.05\text{km}$ 情况下修正之后的接收功率 P_r' , 并与利用(1)式得到的 P_r 进行比较,结果如图 3 和图 4 所示。其中,其它参量的设定如下所述:根据表 1 可

Table 1 Scattering, absorption and extinction coefficients for molecular, aerosol and their combinations^[1]

λ/nm	$K_{s,m}$	$K_{a,m}$	K_m	$K_{s,ae}$	$K_{a,ae}$	K_{ae}	K_s	K_a	K_e
200	0.95	7.2	8.12	1.6	0.49	2.1	2.6	7.7	10.2
250	0.34	0.79	1.12	1.5	0.24	1.7	1.8	1.0	2.8
300	0.15	0.02	0.17	1.4	0.10	1.5	1.6	0.12	1.7

以得到散射系数 $K_s = K_{s,m} + K_{s,ae} = 0.34 + 1.5 = 1.84$ (km^{-1}), 吸收系数 $K_a = K_{a,m} + K_{a,ae} = 0.79 + 0.24 = 1.03$ (km^{-1}), 消光系数 $K_e = K_a + K_s = 2.8\text{km}^{-1}$, 表 1 中 $K_{a,ae}$ 为气溶胶吸收系数。发射功率 P_t 设定为 5W, 接收孔径面积 $A_r = 1.77\text{cm}^2$, 发射发散角 $\phi_1 = 10^\circ$, 接收视场角 $\phi_2 = 20^\circ$, $r = 0.2\text{km}$, $H_t = 0.1\text{km}$, $H_r = 0.04\text{km}$ 。

从以上两组不同高度差下的仿真结果中可以得到以下启示:(1)原算法与新算法存在明显的差异,当接收仰角固定在比较大的角度时,发射仰角在由小变大的过程中, P_r 与 P_r' 之间的差异逐渐减小,这是由于当两个角度都很大时,变化量 $\Delta\theta_1$ 与 $\Delta\theta_2$ 对 θ_1 和 θ_2 的影响较小,因此总的接收功率变化不大;(2)从图 3 ~ 图 6 中可以发现,一般情况下, P_r 好于 P_r' 。因此,当紫外光通信设备进行组网时,各节点在路由过程中应尽量寻找高度差小的节点进行转发;若周围没有高度差小的节点,则通信时尽量使发射仰角降低,并适当增大接收仰角,这样接收功率较高;(3)当 $H_t > H_r$, $\theta_2 - \Delta\theta_2 < 0$ 时,收发两端在空中几乎不能形成共同散射体,因而无法通信,如图 4 和图 6 中 no communication 所指的线。当 $H_t < H_r$, 通信条件的限制转移到 θ_1 上。在实际的应用中,应该根据收发机的高度信息,尽量避开这些无法形成共同散射体的仰角,这样通信才变

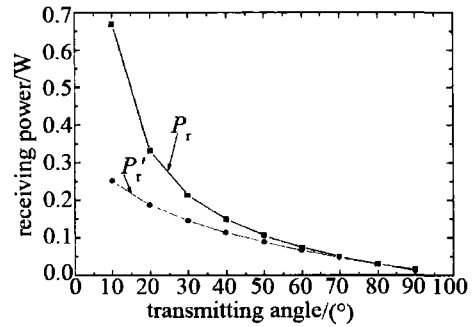


Fig. 3 Receiving power comparison with $\theta_2 = 60^\circ$ ($H_t = 0.1\text{km}$, $H_r = 0.04\text{km}$)

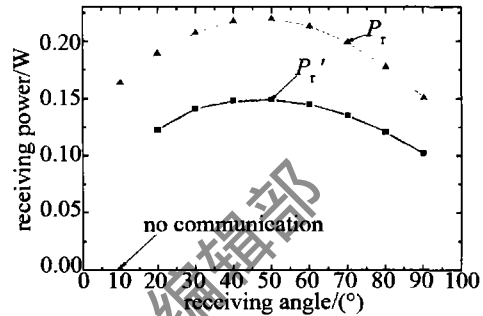


Fig. 4 Receiving power comparison with $\theta_1 = 30^\circ$ ($H_t = 0.1\text{km}$, $H_r = 0.04\text{km}$)

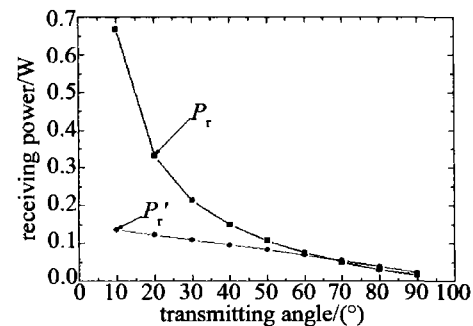


Fig. 5 Receiving power comparison with $\theta_2 = 60^\circ$ ($H_t = 0.2\text{km}$, $H_r = 0.05\text{km}$)

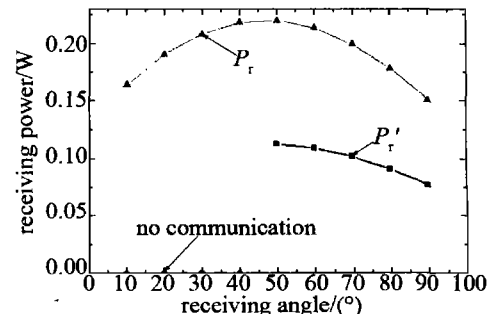


Fig. 6 Receiving power comparison with $\theta_1 = 30^\circ$ ($H_t = 0.2\text{km}$, $H_r = 0.05\text{km}$)

成可能。

3 结论

随着社会在经济与科技方面不断的发展,灵活、便捷、易于安装的通信设备越来越受到人们的喜欢,因此

光通信成为现今人们研究的重点。而紫外光具备了其它光载波难以具备的优势,紫外光通信的研究变得更加有意义。作者在紫外光单次散射链路模型的基础上融入高度信息,通过分析与推导,得到了与收发机所在高度信息相关的紫外光单次散射链路模型,利用仿真方法证明了两种算法之间的差异,并获得了3点启示,对实际工程中的应用提供了较好的指导。

参 考 文 献

- [1] XU Zh Y, CHEN G, ABOU-GALALA F, *et al.* Experimental performance evaluation of non-line-of-sight ultraviolet communication system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6709: 67090Y/1-67090Y/12.
- [2] FENG T, XIONG F, YE Q, *et al.* Non-line-of-sight optical scattering communication based on solar-blind ultraviolet light[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6783: 67833X/1-67833X/7.
- [3] CHEN G, ABOU-GALALA F, XU Zh Y, *et al.* Experimental evaluation of LED-based solar blind NLOS communication links[J]. *Optics Express*, 2008, 16(9): 15059-15068.
- [4] LUO Z P, HUANG Z H, TANG Zh L. Measurement of spectral response of ultraviolet detector using photoacoustic spectroscopy[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5): 453-459 (in Chinese).
- [5] CHEN G, XU Zh Y, DING H P, *et al.* Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications[J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3929-3940.
- [6] SUNSTEIN D E. A scatter communications link at ultraviolet frequencies[D]. Boston, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1968: 8-13.
- [7] REILLY D M. Atmospheric optical communications in the middle ultraviolet[D]. Boston, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1976: 54-65.
- [8] LUETTGEN M R, SHAPIRO J H, REILLY D M. Non-line-of-sight single-scatter propagation model[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1991, 8(12): 1964-1972.
- [9] CHEN J H, YANG X L. Research of the atmospheric factors of solar blind ultraviolet communication[J]. *Laser Journal*, 2008, 29(4): 38-39 (in Chinese).
- [10] TANG Y, WU Zh L, NI G Q, *et al.* NLOS single scattering model in digital UV communication[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7136: 713615/1-713615/10.
- [11] XU Zh Y, DING H P, SADLER B M, *et al.* Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(16): 1860-1862.
- [12] XU Zh Y. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links[C]//Acoustics, Speech and Signal Processing, 2007, IEEE International Conference. Tashkent, Uzbekistan: IEEE, 2007: 577-579.

· 简 讯 ·

请向邮局订阅 2012 年度《激光技术》!

国内邮发代号:62-74;国内统一刊号:CN51-1125/TN