

文章编号: 1001-3806(2010)03-0309-04

非视线单次散射大气传输模型研究

王巨胜, 侯天晋*, 周鼎富, 兰戈
(西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 为了研究波长为 $1.06\mu\text{m}$ 的红外激光散射通信系统各种几何参量对系统性能的影响, 利用非视线单次散射大气传输模型分析了接收机、发射机的收发视场、俯仰角以及传输距离等几何参量对接收机接收功率和路径传输损耗的影响。结果表明, 增大接收机的视场可以提高探测到的散射光信号功率, 而增加发射机的发散角则基本不影响接收到的信号功率; 在其它参量不变的情况下, 增大接收机或者发射机的仰角都减小了接收机的探测到的信号功率; 在散射角和传输距离一定的情况下, 适当地降低发射机的仰角可以提高接收机探测到的散射光信号功率。这些结果对系统设计有一定的参考价值。

关键词: 光通信; 散射通信; 单次散射; 大气传输; 米氏散射

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.007

Study on non-line-of-sight single-scatter atmospheric propagation model

WANG Ju-sheng, HOU Tian-jin, ZHOU Ding-fu, LAN Ge
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to study the impact of geometry of the transceiver in the non-line-of-sight system working at the wavelength of $1.06\mu\text{m}$, based on a single-scatter atmospheric propagation model, the impact of the field-of-view (FOV) of the transceiver, pitching angle and transmitting distance on the received signal power and path loss was studied by means of numerical calculation. It is shown that a larger FOV may significantly enhance the detected laser power, while the increase of transmitter beam divergence does not make any difference. It is also indicated that decreasing either the apex angle of the transmitter or receiver makes the detection of the weak scattering signal more difficult while other parameters remain the same. It is shown that decreasing the apex angle of the transmitter appropriately helps the signal detection for a certain scattering angle and transmitting distance. These results are valuable in system design.

Key words: optical communication; scattering communication; single-scatter; atmospheric propagation; Mie scattering

引言

早在20世纪六、七十年代, 人们就提出了非视线光散射通信的概念, 并进行了初步地探究^[1-2]。但由于当时光源和探测器件的限制, 发展一直不如人意。近年来, 随着大功率激光器和高灵敏度探测器技术的不断进步, 非视线光散射通信技术又逐渐开始受到人们的关注^[3-9]。除了将大气对激光的散射应用于通信领域外, 人们又将其进行扩充研究, 运用到了无线传感器网络系统^[10-12], 作为替代目前的无线射频传感器网络的选择之一。由于大气臭氧层对紫外线的强烈吸收, 到达地面的紫外线极弱, 有利于系统信噪比的提高; 加之紫外线波长较短, 近地面大气对其散射强烈, 有利于

信号的探测接收。因此, 通常人们研究的都是基于紫外光波的非视线散射通信系统。但近地面大气对紫外线的衰减强烈, 使得紫外线传输距离非常有限。 $1.06\mu\text{m}$ 的近红外光位于大气吸收窗口, 在相同功率条件下, 可以传输更远的距离。此外, 波长为 $1.06\mu\text{m}$ 的红外激光器和探测器件都比较成熟, 为系统的设计带来方便。本文中研究了波长为 $1.06\mu\text{m}$ 的非视线激光大气散射通信系统接收机、发射机的收发视场、俯仰角以及传输距离等几何参量对接收机接收功率和路径传输损耗的影响, 为系统设计提供参考。

1 基本模型与计算方法

光在大气中的传输涉及到一系列复杂的现象, 如大气中分子对激光的吸收和散射, 气溶胶对激光的吸收和散射, 大气折射率的微小偏移 (10^{-6} 量级) 引起的大气湍流等。对于点对点的视线大气通信系统来说, 恶劣天气引起的大气对激光的衰减是极为重要的不利

作者简介: 王巨胜(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光技术。

* 通讯联系人。E-mail: tianjinhou@gmail.com

收稿日期: 2009-05-20; 收到修改稿日期: 2009-06-18

因素。但对于非视线激光散射通信,散射却是一个基本前提。目前,研究光在大气中散射传输最常用的模型是 LUETTGEN 等人提出的单次散射模型^[13]。研究激光大气散射传输常采用长球面坐标系。如果将发射机和接收机分别置于长球面的两个焦点 F_2 和 F_1 上,则位于长球面上的散射体内的任意一点与两个焦点之间的距离之和为一常数,从而,从发射机发出的光到达此长球面,再从长球面传输到接收机所消耗的时间是相同的。因此,这个长球面可以看作一个等时延面。长球面坐标 (ξ, η, φ) 的定义如图 1 和图 2 所示。

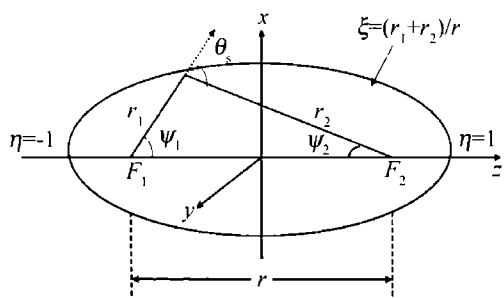


Fig. 1 Prolate-spheroidal coordinates

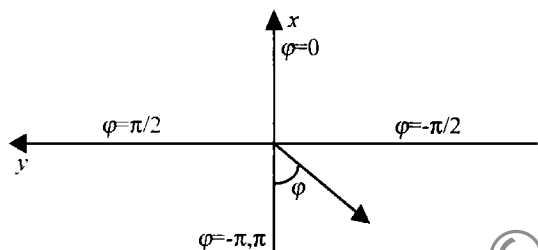


Fig. 2 Definition of φ in prolate-spheroidal coordinates

图 3 为非视线激光散射通信系统链路示意图。发射机发出的激光束和接收机的接收视场在空间中汇合形成一块交叠区域,由这一区域中的大气组成的散射体就会对发射的激光脉冲产生散射作用,调整接收机以适当的俯仰角和视场进行接收,就可以探测到经大气散射微弱的散射信号。这样就实现了光信号的非视线散射传输。图中, ξ_{\max} 和 ξ_{\min} 分别为交叠区域的径向最大值和最小值,它们由接收机和发射机的收发视场、俯仰角、传输距离等几何参量确定。

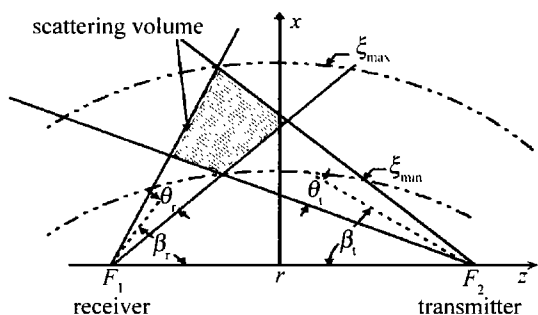


Fig. 3 A non-line-of-sight communication link

为了方便讨论,将发射机和接收机分别置于长球面坐标系的两个焦点 F_2 和 F_1 上。定义发射机和接收

机的仰角分别为 β_t 和 β_r ,发射机的发散(半)角为 θ_t ,接收机的视场(半)角为 θ_r , Ω_t 为发射光束的立体角, V 为发射机和接收机交叠区域的体积, r 为发射机和接收机间的水平距离, r_1 和 r_2 分别为散射体中一点 P 到接收机和发射机的距离, k_e 为大气消光系数, k_s 为大气散射系数, k_a 为大气吸收系数(三者满足关系式: $k_e = k_s + k_a$)。长球面 ξ 上的一个体积微元在接收机上产生的辐照度为^[13]:

$$\delta E(\xi) = \frac{Q_t c k_s \cos \zeta \exp(-k_e r \xi)}{2\pi \Omega_t r^2 (\xi^2 - \eta^2)^2} P(\theta_s) \delta \eta \delta \varphi \quad (1)$$

式中, Q_t 为发射的激光脉冲能量, c 为光速, ζ 为接收孔径的中心轴线与从接收机指向散射体微元的向量的夹角, θ_s 为散射角, $P(\theta_s)$ 为散射相函数,它与散射角(光的散射方向与光入射方向的夹角)密切相关。在交叠情况良好的情况下,可以利用参考文献[9]中的方法对(1)式进行简化,近似得到接收机接收到的光功率为:

$$P_r \approx \frac{P_t k_s P(\mu) A_r V \sin^4 \theta_s \exp\left[-\frac{k_e r}{\sin \theta_s} (\sin \beta_t + \sin \beta_r)\right]}{8\pi^2 r^4 \sin^2 \beta_t \sin^2 \beta_r (1 - \cos \theta_s)} \quad (2)$$

式中, P_t 为发射激光脉冲的功率, $\mu = \cos \theta_s$, A_r 为接收孔径的面积。对于 $1.06 \mu\text{m}$ 的红外激光,大气消光系数 k_e 为^[14]:

$$k_e = 2.7/R \quad (3)$$

式中, R 为大气能见度,单位是 km , k_e 的单位为 km^{-1} 。工程上,常用下面的经验公式来估算大气散射系数 k_s ^[15-16]:

$$k_s = \frac{3.912}{R} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^q \quad (4)$$

式中, λ 为波长,单位为 μm , k_s 的单位为 km^{-1} 。 q 为与波长有关的常数,对近红外和中红外波段,取下列数据^[15-16]:

$$q = \begin{cases} 1.6, & (\text{能见度很大时}) \\ 1.3, & (\text{中等能见度时}) \\ 0.585R^{1/3}, & (\text{当能见度不大于 } 6\text{km} \text{ 时}) \end{cases} \quad (5)$$

对于近地面 $1.06 \mu\text{m}$ 的红外激光传输, Rayleigh 散射不重要,只考虑 Mie 散射。Mie 散射相函数没有精确的解析解,这里采用 Henyey-Greenstein 函数表示^[17]:

$$P_{\text{Mie}}(\mu) = \frac{1-g^2}{4\pi} \left[\frac{1}{(1+g^2-2g\mu)^{3/2}} + f \frac{0.5(3\mu^2-1)}{(1+g^2)^{3/2}} \right] \quad (6)$$

式中, g, f 都是模型中的参量。根据参考文献[3]中提供的参量,取 $g = 0.72, f = 0.5$ 。

定义路径传输损耗(单位: dB):

$$L = 10 \lg(P_r/P_t) \quad (7)$$

式中, P_r 为接收机接收到光功率, P_t 为发射机发射的光功率。将(2)式代入, 得:

$$L \approx \frac{12\pi r \sin\beta_t \sin^2\beta_r (1 - \cos\theta_t) \exp\left[-\frac{k_e r}{\sin\theta_s} (\sin\beta_t + \sin\beta_r)\right]}{k_s P(\mu) A_r \theta_t^2 \theta_r \sin\theta_s (3\sin^2\beta_r + \theta_r^2 \sin^2\beta_t)} \quad (8)$$

2 计算结果与讨论

利用数值计算方法计算了系统发射机和接收机取不同的几何参量时, 接收机接收到的散射光功率随传输距离的衰减情况。计算中, 激光波长为 $1.06\mu\text{m}$, 发射机发射的激光脉冲能量为 100mJ , 脉宽 15ns , 取大气能见度为 15km 。图4为接收机接收到的散射光功率随传输距离的变化情况, 图5为按(7)式定义的激光的路径传输损耗随传输距离的变化情况。

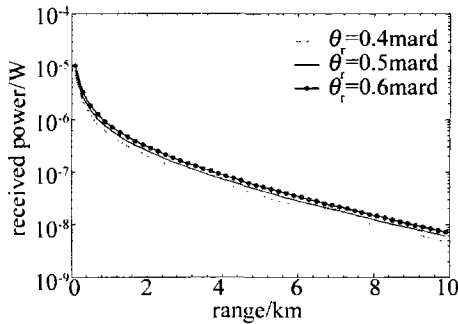


Fig. 4 Received power versus range for different θ_t .

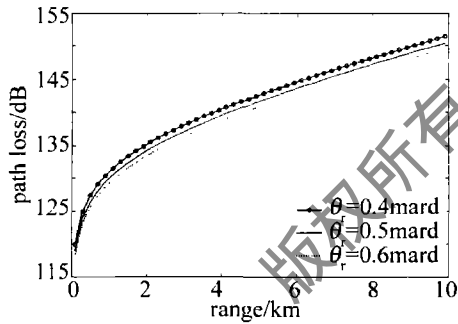


Fig. 5 Path loss versus range for different θ_t .

图4、图5中, 发射机发散(全)角都为 0.3mrad , 接收孔径为 100mm , 发射机仰角为 5° , 接收机仰角为 10° , 散射角为 15° 。从图4可以看出, 随着传输距离的增加, 接收机接收到的信号光功率急剧减小。当传输距离达到 10km 时, 接收机接收到的散射光功率已下降到 10^{-8} 量级。与此对应, 路径传输损耗达到了 160dB 。这对微弱信号的探测提出了苛刻的要求。从图中还可以看出, 增加接收机的视场, 可以提高接收机的信号功率。但在实际的工程应用中, 增加接收机视场的同时也会增加背景噪声, 在系统设计时需要综合考虑。

图6是发射机采用不同发散角时接收机接收到的

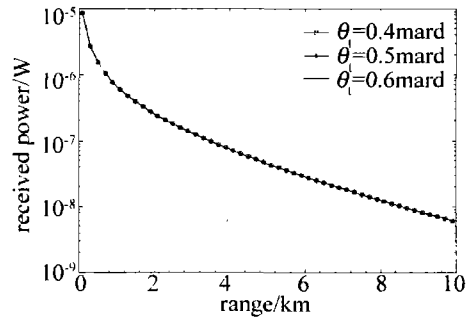


Fig. 6 Received power versus range for different θ_r .

信号光功率随传输距离的变化情况。计算中接收机视场取 0.5mrad , 其它参量不变。可以看出, 在接收机几何参量不变的情况下, 增大发射机的发散角对接收机接收到的信号光功率几乎没有影响。这是因为增加发射机的发散角可以增加发射机和接收机的交叠区域, 从而增加了散射体的体积, 但同时, 散射信号的功率密度却降低了。这说明增加发射机的发散角对提高接收机的信号响应没有帮助。

图7是接收机取不同仰角时, 接收到的信号光功率随传输距离的变化情况。计算中, 发射机发散(全)角为 0.4mrad , 接收机视场(全)角为 0.5mrad , 发射机仰角为 5° , 其它参量不变。可以看出, 接收机的仰角越大, 接收到的信号光功率越小。这是因为在发射机几何参量不变的情况下, 提高接收机的仰角导致散射角变大的缘故。

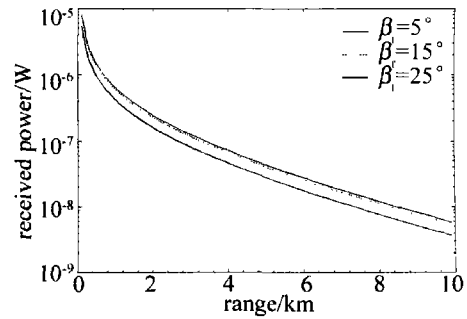


Fig. 7 Received power versus range for different β_r .

图8是发射机取不同仰角时, 接收机接收到的信号光功率随传输距离的变化情况。计算中, 发射机发散(全)角为 0.4mrad , 接收机视场(全)角为 0.5mrad , 接收机仰角为 10° , 其它参量不变。可以看出, 在接收

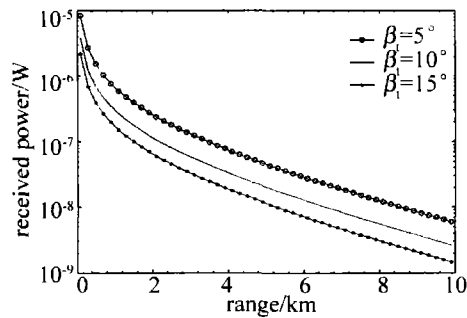


Fig. 8 Received power versus range for different β_t .

机几何参量不变的情况下,发射机的仰角变化对接收机接收到的信号功率的影响较为显著。

图9是在散射角一定的情况下,发射机取不同的仰角时,接收机接收到的信号光功率随传输距离的变化情况。计算中,散射角固定为 20° ,发射机发散(全)

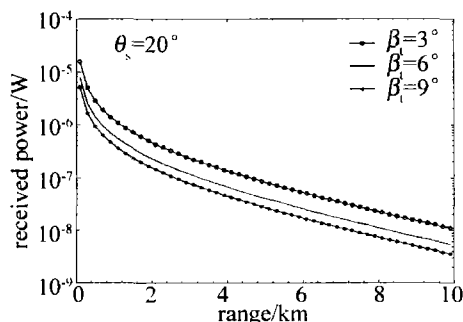


Fig. 9 Received power versus range for different β_t at $\theta_s = 20^\circ$

角为 0.4mrad ,接收机视场(全)角为 0.5mrad ,与发射角的仰角相对应,接收机仰角分别为 17° , 14° 和 11° 。可以看出,在接收机几何参量一定的情况下,减小发射机的仰角有利于提高接收机的信号响应,但还应根据实际情况进行优化。

3 结论

利用非视线散射通信的基本模型,通过数值计算方法计算了 $1.06\mu\text{m}$ 的红外非视线单次散射传输模型中各种几何参量对系统性能的影响,详细讨论了系统接收机与发射机的仰角变化,收发视场以及散射角对接收机接收到信号功率的影响。结果表明,增大接收机的视场可以提高探测到的散射光信号功率,而增加发射机的发散角则基本不影响接收到的信号功率。在其它参量不变的情况下,增大接收机或者发射机的仰角都减小了接收机探测到的信号功率。在散射角和传输距离一定的情况下,适当地降低发射机的仰角可以提高接收机探测到的散射光信号功率。本文中采用的是单次散射模型,以后的研究中考虑多次散射的作用将更接近实际情况。由于散射信号极微弱,全方向接收天线的设计和合理探测方式的进一步研究是非常必要的。此外,研究适用于非视线散射通信系统的信号编码技术对工程应用也是非常有意义的。

参考文献

- [1] LERNER M, HOLLAND E A. The optical scatter channel[J]. Proc IEEE, 1970, 58(10): 1547-1563.
- [2] REILLY M D, WARDE C. Temporal characteristics of single-scatter radiation[J]. J O S A, 1979, 69(3): 464-470.
- [3] SHAW A G, NISCHAN M. Short-range NLOS ultraviolet communication test bed and measurements[J]. Proc SPIE, 2001, 4396: 31-40.
- [4] SHAW A G, SIEGEL M A, MODEL J, et al. Recent progress in short-range ultraviolet communication[J]. Proc SPIE, 2005, 5796: 214-225.
- [5] CHEN Y B, SUN X Q, ZHAO M H, et al. Analysis of the signal detection of laser scattering in the air[J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 277-279 (in Chinese).
- [6] FENG T, CHEN G, FANG Z J. Atmospheric propagation model in non-line-of-sight optical scattering communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(11): 1522-1526 (in Chinese).
- [7] TANG Y, NI G Q, ZHANG L J, et al. Study on single scatter model in NLOS UV communication[J]. Optical Technique, 2007, 33(5): 759-765 (in Chinese).
- [8] XU Zh Y, CHEN G, CALALA A, et al. Experimental performance evaluation of non-line-of-sight-ultraviolet communication systems[J]. Proc SPIE, 2007, 6709: 1-12.
- [9] XU Zh Y, DING H P, SADLER M B, et al. Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links[J]. Opt Lett, 2008, 33(16): 1860-1862.
- [10] SHAW A G, NISCHAN M, LYENGAR M, et al. NLOS communication for distributed sensor systems[J]. Proc SPIE, 2000, 4126: 83-96.
- [11] KEDAR D, ARNON S. Non-line-of-sight optical wireless sensor network operating in multiscattering channel[J]. Appl Opt, 2006, 45(33): 8454-8461.
- [12] BUSHUEV D, ARNON S. Analysis of the performance of a wireless optical multi-input to multi-output communication system[J]. J O S A, 2006, A23(7): 1722-1730.
- [13] LUETTGEN R M, SHAPIRO H J, REILLY M D. Non-line-of-sight single-scatter propagation model[J]. J O S A, 1991, A8(12): 1964-1972.
- [14] ZHANG S Q. The analysis of scattering effect for the transform of $1.06\mu\text{m}$ laser in lower altitude atmosphere[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, 28(6): 491-497.
- [15] DAI Y J. The principle of lidar[M]. Beijing: Defence Industry Press, 2002: 44-45 (in Chinese).
- [16] WU J, YANG C P, LIU J B. Theories of light propagation in the atmosphere[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005: 36-37 (in Chinese).
- [17] CORNETTE M W, SHANKS G J. Physically reasonable analytic expression for the single-scattering phase function[J]. Appl Opt, 1992, 31(16): 3152-3160.