

文章编号: 0258-7025(2006)11-1522-05

非视线光散射通信的大气传输模型

冯 涛, 陈 刚, 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 利用大气对光的散射作用可以实现非视线通信。在单次散射假定下,研究了非视线光散射通信系统的大气传输模型。利用该模型分析了光源发散角、接收视场和收发仰角等系统几何参数与接收散射光能量之间的关系;重点讨论了大气分子散射和气溶胶散射各自对接收散射光能量的贡献。结果表明当系统的收发仰角较大时,接收光能量主要来自大气分子散射;反之,气溶胶散射则成为接收光能量的主要部分。对于工作在日盲紫外光谱区的非视线通信系统,增加接收视场可以有效地增大系统的信噪比。发现在两种典型的收发仰角情况下,接收散射光能量随光源发散角的变化趋势是相反的,这说明光源发散角要根据实际的应用场合设计确定。

关键词 光通信;光散射通信;非视线;大气传输;单次散射

中图分类号 TN 929.12 **文献标识码** A

Atmospheric Propagation Model in Non-Line-of-Sight Optical Scattering Communication

FENG Tao, CHEN Gang, FANG Zu-jie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Based on the assumption of single-scattering, atmospheric propagation model of non-line-of-sight optical scattering communication system is studied. The model is used to analyze the correlations between received scattered energy and parameters of system, including source divergence angle, receiver field of view, and apex angles of transmitter and receiver in an optical scattering communication system. Contribution of atmospheric molecular scattering and aerosol scattering of received scattered energy is discussed. The results show that received scattered energy is attributed to molecular scattering at larger transmitter and receiver apex angles, but with the decrease of apex angles, aerosol scattering will be dominant in received scattered energy. Enhancing of the receiver field of view can effectively improve the signal noise ratio for communication systems operating in the solar-blind ultraviolet (UV) spectral region. In addition, the evolution tendency of received scattered energy versus the source divergence angle is inverse for two typical transmitter and receiver apex angles. This result suggests that divergence angle of source should be designed according to specified situation.

Key words optical communication; optical scattering communication; non-line-of-sight; atmospheric propagation; single-scattering

1 引 言

近年来,自由空间光通信(FSO)技术^[1]得到迅速发展,目前已进入商用阶段。自由空间光通信是一种视线(line-of-sight)通信技术,在发射和接收端之间存在障碍物或者收发光学系统偏离对准时,链

路就会中断。如果利用大气对光波的散射来进行信号传送,就可以实现非视线通信,20世纪70年代,人们就对大气光散射信道进行了初步研究并预测了光散射通信的潜在应用价值^[2,3]。相对于红外和可见光波段,紫外光的波长较短,因而具有更强的大气散射效应,特别是在日盲紫外光谱区,近地面大气中

收稿日期:2006-04-24;收到修改稿日期:2006-05-23

作者简介:冯涛(1979—),男,河南三门峡人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事无线激光通信技术研究。E-mail:tfeng@siom.ac.cn

导师简介:方祖捷(1942—),男,浙江宁波人,中国科学院上海光学精密机械研究所研究员,博士生导师,目前主要从事光电子器件和光通信技术方面的研究。E-mail:zjfang@siom.ac.cn

几乎不存在这一波段的太阳辐射,大大有利于微弱的散射光信号的接收。由于大气对紫外光的衰减较强,有限的传输距离有利于实现短程保密通信,不易被干扰和截获。正是由于这些特点,日盲紫外波段是实现非视线光散射通信的最佳选择,随着紫外波段光电器件的迅速发展和成熟,非视线紫外通信技术越来越引起人们的兴趣^[4~6]。

相对于视线光通信技术,非视线光散射通信系统通常采用较大发散角的光源和大视场的接收器,传统的光传输模型不适用于分析这种非视线的情况^[7],Luettgen 等发展的一种非视线单次散射模型^[7]非常适用于分析大气中光的非视线传输。2000年,Shaw 等^[5]利用该模型研究了短距离非视线紫外通信,并提出将这一技术用于分布式传感器网络节点间的通信。但是,上述研究中仅仅考虑了大气中分子散射对通信系统接收光能量的贡献,并且进一步地将分子散射简化为各向同性散射。事实上,大气中的气溶胶散射也会影响到接收光能量。此外,非视线光散射通信一般用于低速通信,其受大气湍流的影响不像高速视线光通信那么严重。通过改变发射光源和接收装置的仰角、光源发散角等系统几何参数,非视线光散射通信可以灵活地部署以满足各种实际需求。可见,深入研究非视线光散射通信系统接收散射光能量的机制,研究大气分子散射和气溶胶散射各自对系统接收光能量的贡献以及系统各几何参数的影响,对于评估和设计非视线光散射通信系统是非常必要的。

文中将忽略大气散射粒子的随机性,在单次散射假定下研究非视线光散射通信的大气传输模型,利用该模型对光在大气中的非视线传输进行模拟计算,讨论大气分子散射和气溶胶散射对非视线光通信系统的作用,以及光源和接收端各几何参数对接收光能量的影响。

2 大气传输模型

图 1 所示为光散射通信系统。发射端光源以发散角 $2\theta_T$ 向空间发出光信号,接收器的视场角为 $2\theta_R$,发射与接收仰角分别为 β_T 和 β_R ,发射光束与接收视场在空间的重叠区域的大气形成一个收发连接的散射体。发射光信号经过大气的衰减到达散射体,接收器收集来自该散射体对光信号的散射,这样就完成了信号的非视线传送。由于散射光通常都很微弱,人们一般通过增大接收视场以接收到更多的

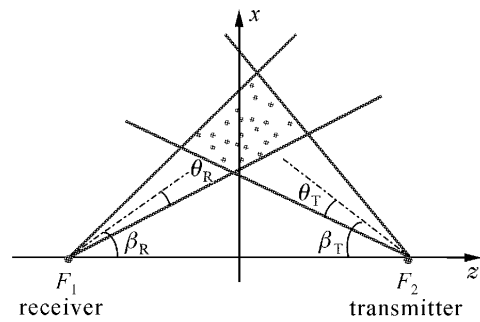


图 1 散射光通信链路的收发示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scattering communication link

散射光。

假设 $t = 0$ 时刻一个能量为 Q_t (单位为 J) 的激光脉冲向空间发射,考查在图 1 所示的几何关系下接收端的光能量。在满足单次散射的基础上,利用长球面坐标系研究非视线光传输是很方便的^[7]。在这种坐标系中,空间中的每个点可由径向分量 ξ ,角坐标 η 和方位坐标 ϕ 唯一确定(如图 2 所示)。若发射端和接收端分别位于长球面的两个焦点上,则某一给定长球面 ξ 上的任意一点与两个焦点之间的距离之和为一常数,从而这个长球面就可以看作是一个等时延面。

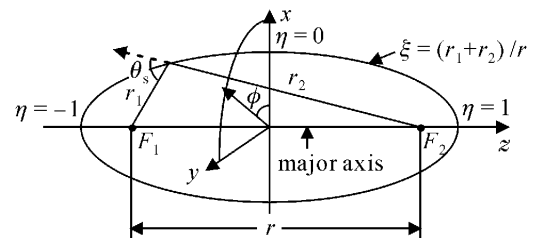


图 2 长球面坐标系

Fig. 2 Prolate-spheroidal coordinates

考查有效散射体内的任一点 $P(\xi, \eta, \phi)$,则包含 P 点的体积元 δV 可看作一个二次辐射源,它向整个空间辐射出的总能量为

$$\delta Q_P = \frac{k_s Q_T \exp(-k_e r_2)}{\Omega_T r_2^2} \delta V, \quad (1)$$

式中 $\Omega_T = 4\pi \sin^2(\theta_T/2)$ 表示光源发射立体角, k_s 为大气散射系数(单位为 m^{-1}), k_e 为大气消光系数(等于吸收系数与散射系数之和,单位为 m^{-1}), r_2 表示光源与 P 点之间的距离(单位为 m)。

该二次源在接收端单位面积上的散射能量可以表示为

$$\delta H_R = \frac{Q_T k_s \cos(\zeta) \exp[-k_e(r_1 + r_2)]}{4\pi \Omega_T (r_1 r_2)^2} p(\theta_s) \delta V, \quad (2)$$

式中 r_1 表示二次源与接收端之间的距离(单位为 m), $p(\theta_s)$ 为散射相函数,表示散射强度随散射角的依赖关系, ζ 为接收视场轴线和二次源与接收端连线之间的夹角, $\cos(\zeta)$ 是考虑接收器的有效接收面积而引入的。

长球面坐标系中的体积元可以表示为

$$\delta V = \frac{r^3}{8}(\xi^2 - \eta^2)\delta\xi\delta\eta\delta\phi, \quad (3)$$

式中的 r 表示光源与接收端的间距。将 r_1 和 r_2 用长球面坐标表示,并利用(3)式,(2)式就可重写成

$$\delta H_R = \frac{Q_T k_s \cos(\zeta) \exp(-k_e r \xi)}{2\pi\Omega_T r (\xi^2 - \eta^2)} p(\theta_s) \delta\xi\delta\eta\delta\phi. \quad (4)$$

由于长球面 $\xi = (r_1 + r_2)/r$ 表示一个等时延面,它散射的能量在 $t = (r_1 + r_2)/c$ 时刻到达接收端,因此有如下关系式

$$\xi = ct/r, \quad (5)$$

$$\delta\xi = c\delta t/r, \quad (6)$$

将(5),(6)式代入(4)式,两端同时除以 δt 并令 δt 趋于零,即得到长球面 ξ 上的一个微分面积元在接收端处产生的辐照度(单位为 $W \cdot m^{-2}$)

$$\delta E(\xi) = \frac{Q_T c k_s \cos(\zeta) \exp(-k_e r \xi)}{2\pi\Omega_T r^2 (\xi^2 - \eta^2)} p(\theta_s) \delta\phi\delta\eta, \quad (7)$$

将(7)式对由 ξ 确定的长球面积分就得到在 $t = \xi r/c$ 时刻接收到的辐照度

$$E(\xi) = \frac{Q_T c k_s \exp(-k_e r \xi)}{2\pi\Omega_T r^2} \times \int_{\eta_1(\xi)}^{\eta_2(\xi)} \int_{\phi_1(\xi,\eta)}^{\phi_2(\xi,\eta)} \frac{\cos(\zeta) p(\theta_s)}{(\xi^2 - \eta^2)} d\phi d\eta, \quad (8)$$

若将(8)式再对时间 t 进行积分,即可得到接收端的能量密度(单位 $J \cdot m^{-2}$)

$$H_R = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} E(ct/r) dt, \quad (9)$$

这里的积分限是由空间有效散射体所决定的,有效散射体的范围依赖于光源发散角、接收视场以及系统的几何关系等参数。

3 接收散射能量的分析

从上一部分的结果可以看到,只要通信系统各参数和大气对光的消光与散射特性确定,就可以对系统进行计算分析了。光信号经光源发出后,在大气中经过大气分子和气溶胶的散射到达接收端。前者属于瑞利散射,而后者需用 Mie 散射理论处理。由于大气中的散射现象满足独立散射和非相干散射的条件^[8],这两种散射可以分别进行处理,接收端总

散射能量密度可表示成

$$H_R = H_{RR} + H_{RM}, \quad (10)$$

式中右边的第一项表示大气分子散射的贡献,第二项表示气溶胶散射的贡献。

光信号在传输过程中受到的大气衰减可用消光系数来表示,消光系数可写为

$$k_e = k_a + k_{sR} + k_{sM}, \quad (11)$$

式中 k_a 表示大气吸收系数, k_{sR} 表示大气分子的瑞利散射系数, k_{sM} 表示气溶胶散射系数。

非偏振光的瑞利散射相函数具有很简单的表达式,可写为

$$P_R(\theta_s) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2\theta_s). \quad (12)$$

而 Mie 散射相函数却没有精确的解析解,这里拟采用 Cornette 等^[9]提出的一种相函数表达式

$$p_M(\mu, g) = \frac{3}{2} \frac{1-g^2}{2+g^2} \frac{1+\mu^2}{(1+g^2-2g\mu)^{3/2}}, \quad (13)$$

式中 $\mu = \cos\theta_s$, g 称为非对称因子,可表示为

$$g = \frac{5}{9}\langle\mu\rangle - \left(\frac{4}{3} - \frac{25}{81}\langle\mu\rangle^2\right)x^{-1/3} + x^{1/3}, \quad (14)$$

式中 $\langle\mu\rangle$ 表示散射角余弦的平均值, x 可写为

$$x = \frac{5}{9}\langle\mu\rangle + \frac{125}{729}\langle\mu\rangle^3 + \left(\frac{64}{27} - \frac{325}{243}\langle\mu\rangle^2 + \frac{1250}{2187}\langle\mu\rangle^4\right)^{1/2}, \quad (15)$$

非对称因子 g 表征了前向散射与后向散射的比例关系,当 $g \rightarrow 0$ 时(13)式就退化为瑞利散射相函数,随着 g 的增大前向散射将随之增强。图 3 为计算得到的一些给定非对称因子的散射相函数。

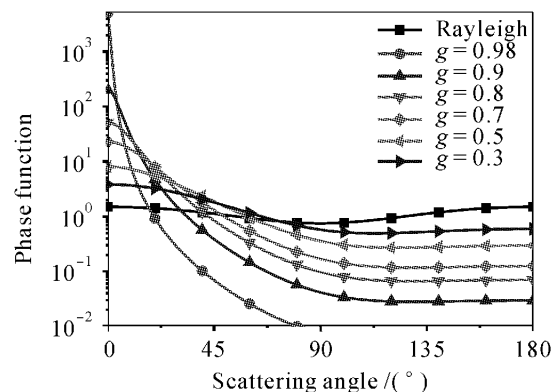


图 3 单次散射相函数

Fig. 3 Single-scattering phase function

大气对光辐射的吸收和散射特性与辐射波长和天气状况(如霾、雾、雨等)密切相关,以中紫外波段日盲光谱区 266 nm 的辐射波长为例进行分析,并设大气能见度为 20 km。根据文献数据报道,在此能见度

下该波长的大气消光系数 $k_e = 1.45 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ [10], 瑞利散射系数 $k_{\text{SR}} = 0.257 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ [11]。该波段的吸收主要是由近地面大气中少量臭氧引起的, 取臭氧的体积分数为 27×10^{-9} [12], 则吸收系数 $k_a = 0.67 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ [13]。由 (11) 式可得, $k_{\text{SM}} = 0.523 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 。图 4 给出了对于不同的接收视场, 接收端单次散射能量密度随发射和接收仰角(为简单起见, 假定接收和发射仰角相等)变化的计算结果。计算中所取的参数为: $r = 500 \text{ m}$, $Q_T = 1 \text{ mJ}$, $\theta_T = 45^\circ$, $\langle \mu \rangle = 0.8$ 。从图中可以看到, 随着收发仰角的增大, 接收到的散射能量逐渐减小, 特别是当仰角等于接收视场半角的时候, 散射能量开始显著减小。另外, 仰角较小时, 接收到的能量主要来自气溶胶的 Mie 散射, 这是由于此时散射角较小, Mie 前向散射很强的缘故。随着仰角的逐步增大, 能够到达接收端的光能量主要来自后向散射, 此时大气分子的瑞利散射能量就成为接收光能量的主要贡献。对比图 4 中不同接收视场的三种情况, 发现增加接收视场可以增大接收的散射能量。对于实际

的通信系统, 通过增加接收视场来增大接收光能量的同时, 也增大了由背景辐射所引起的系统噪声, 这也正是选择日盲紫外光谱区作为光散射通信工作波长的原因。

对于不同的应用场合, 系统的收发仰角应当合理取值以建立合乎要求的非视线通信链路。这里就两种情况作为例子进行分析: 1) 仰角 $\beta_T = \beta_R = 90^\circ$, 即发射和接收轴线互相平行, 这种情况适用于短距离内分布式的非视线通信; 2) 仰角 $\beta_T = \beta_R = 45^\circ$, 例如收发端之间存在障碍物时的点对点非视线通信。两种情况下的半视场角均取 $\theta_R = 22.5^\circ$, 其余参数和大气传输特性参数与上述的取值相同, 并在计算中令 $\theta_T < \beta_T$ (非视线传输), 计算结果分别如图 5(a), (b) 所示。在发射光信号能量不变的前提下, 发散角增大将导致信号强度的降低, 同时也会增大空间的有效散射体, 前者导致散射能量密度减小, 后者则导致散射能量密度增加, 两者的综合作用决定了接收散射能量的变化。从图中可以看到, 两种情况下接收的散射光能量随光源发散角的变化趋势是相反的, 随着光源发散角的增大, 无论接收散射能量增加还是减小, 其变化幅度并不大。在设计实际系统时, 当发射信号功率一定的情况下, 光源的发散角要根据应用场合设计确定。

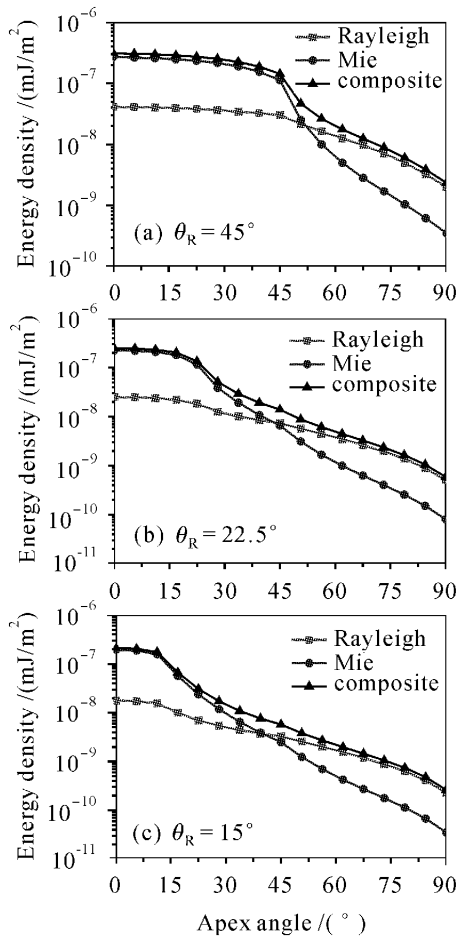


图 4 接收端单次散射能量密度随收发仰角的变化

Fig. 4 Evolution of received single-scattering energy densities versus transmitter and receiver apex angles for different receiver half-field of view

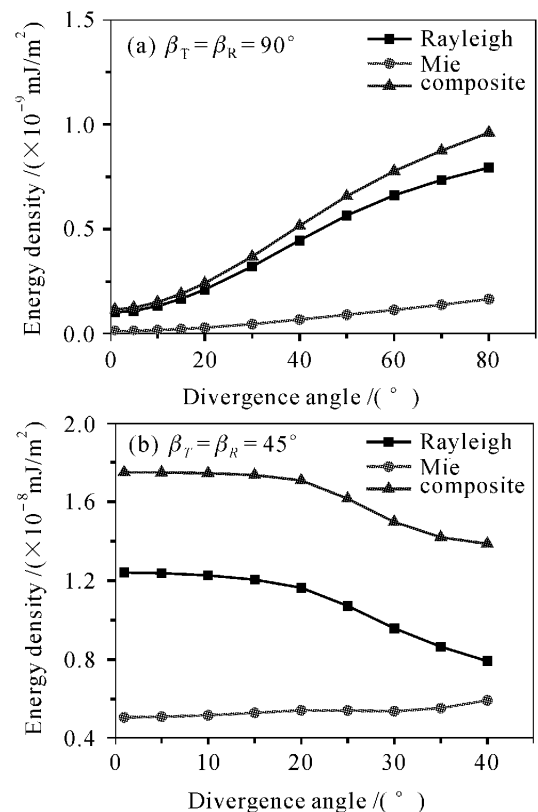


图 5 接收端单次散射能量密度随光源发散角的变化
Fig. 5 Evolution of received single-scattering energy densities versus divergence angle of source

4 结 论

研究了非视线光散射通信的大气传输模型,确定了系统接收端散射光能量密度与系统各参数和大气传输参数之间的联系,详细讨论了系统的收发仰角、接收视场和光源发散角对接收散射光能量的影响,对于实际系统的设计具有一定的指导意义,所提供的分析方法可用于评估实际通信系统的路径损耗和功率预算。散射光通信是靠接收大气分子和气溶胶对光信号的散射来工作的,大气状况会直接影响通信系统的性能,如大气能见度的降低会引起消光系数的增加从而限制系统的最大通信距离,因此进一步研究各种大气状况特别是低能见度时的系统工作特性是非常必要的。此外,在信号传送过程中存在多径传输现象,这就会导致光信号脉冲展宽,从而限制了系统的最大可用带宽。在今后的工作中将就上述问题进行更深入的研究。

参 考 文 献

- 1 Chen Gang, Dong Zuoren, Geng Jianxin *et al.*. 155/622 Mb/s multiple transmitter laser communication systems [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5):583~587
陈 刚,董作人,耿建新等. 155/622 Mb/s 多发射器激光通信系统[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5):583~587
- 2 R. S. Kennedy. Communication through optical scattering channels: An introduction [J]. *Proc. IEEE*, 1970, **58**(10):1651~1665
- 3 R. M. Lerner, A. E. Holland. The optical scatter channel [J]. *Proc. IEEE*, 1970, **58**(10):1547~1563
- 4 R. D. Shute. Electrodeless ultraviolet communications system [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1995, **10**(11):2~7
- 5 G. A. Shaw, M. Nischan, M. Iyengar *et al.*. NLOS UV communication for distributed sensor systems [C]. *SPIE*, 2000, **4126**:83~96
- 6 Shengli Chang, Jiankun Yang, Juncai Yang *et al.*. The experimental research of UV communication [C]. *SPIE*, 2004, **5284**:344~348
- 7 M. R. Luetngen, J. H. Shapiro, D. M. Reilly. Non-line-of-sight single-scatter propagation model [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1991, **8**(12):1964~1972
- 8 E. J. McCartney. Translated by Pan Naixian, Mao Jietai *et al.*. Optics of the Atmosphere [M]. Beijing: Science Press, 1988. 25
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. 25
- 9 W. M. Cornette, J. G. Shanks. Physically reasonable analytic expression for the single-scattering phase function [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(16):3152~3160
- 10 W. A. Baum, L. Dunkelmann. Horizontal attenuation of ultraviolet light by the lower atmosphere [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1955, **45**(3):166~175
- 11 R. Penndorf. Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20.0 μm and their application to atmospheric optics [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1957, **47**(2):176~182
- 12 E. Trakhovsky. Ozone amount determined by transmittance measurements in the solar-blind ultraviolet spectral region [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(21):3519~3522
- 13 Edward C. Y. Inn, Y. Tanaka. Absorption coefficient of ozone in the ultraviolet and visible regions [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1953, **43**(10):870~873