

文章编号: 1001-3806(2014)06-0854-05

基于非视线红外激光大气散射通信技术研究

刘兵¹, 王巨胜², 杨泽后³, 李晓峰³, 樊冬³, 任鹏³, 李斌³, 罗雄³, 冯力天³

(1. 中国人民解放军驻第二〇九所军事代表室, 成都 610041; 2. 博彦科技(上海)有限公司, 上海 201204; 3. 西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 为了实现非视线激光大气散射通信, 根据米氏散射理论, 建立了非视线通信链路模型, 研究了 1.06 μm 激光的大气散射通信技术, 分析了激光接收功率、激光发射功率、激光发散角、接收视场、探测器灵敏度、发射机倾角、接收机倾角、大气衰减和通信距离的关系, 并搭建了试验原理系统, 进行了 1km 距离的散射通信试验, 获得了激光散射信号。结果表明, 在一定的天气条件下, 采用波长为 1.06 μm 的红外激光进行信号传输, 有望实现远距离的大气散射通信。

关键词: 大气光学; 非视线; 大气散射通信; 米氏散射; 红外激光

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.06.028

Study on non-line-of-sight infrared laser scattering communication in atmosphere

LIU Bing¹, WANG Jusheng², YANG Zehou³, LI Xiaofeng³, FAN Dong³,
REN Peng³, LI Bin³, LUO Xiong³, FENG Litian³

(1. Military Deputy Room of Chinese People's Liberation Army in No. 209 Institute, Chengdu 610041, China; 2. Beyondsoft(Shanghai) Co. Ltd., Shanghai 201204, China; 3. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to realize non-line-of-sight (NLOS) laser scattering communication in atmosphere, the NLOS communication link model was founded according to Mie scattering theory and 1.06 μm laser scattering communication in atmosphere was studied. The relationship of laser receiving power, laser transmitting power, laser beam divergence angle, receiver field of view, detector sensitivity, emission inclination angle, receiver inclination angle, atmosphere attenuation and communication distance were analyzed. After establishing the experimental system, an experiment of 1km scattering communication was taken on and laser scattering signal was gotten. The experimental result shows that atmosphere scattering communication at long distance can be realized by choosing 1.06 μm laser for signal communication under a certain weather condition.

Key words: atmospheric optics; non-line-of-sight; scattering communication in atmosphere; Mie scattering; infrared laser

引言

目前通信方式主要有无线电通信、光纤通信及点对点视线激光通信等方式。传统的无线电通信技术已经发展得非常成熟,且种类繁多、技术完备,但这种通信方式容易受到干扰、隐蔽性差,在复杂电磁环境下使用会受到很大的限制;光纤通信抗电磁干

扰能力强、传输速率高、保密性好,但需要预先铺设好光缆通信线路,这使其在海上通信、野外应急通信等不能快速铺设光缆或者根本无法铺设光缆的特殊情况下的应用受到很大限制;点对点视线激光大气通信相对灵活、机动性强、传输速率很高,保密性也好,但对精确对准的要求极高,且只能进行点对点之间的通信,若通信节点间传输路径被阻挡,接收方将接收不到信号。因此,上述几种通信方式在一些紧急特殊情况下的应用受到一定的限制。非视线(non-line-of-sight, NLOS)激光大气散射通信是利用大气中气溶胶粒子对光的散射作用实现光信号异地

作者简介:刘兵(1968-),男,工程师,主要研究方向为激光技术、电视跟踪和激光制导。

E-mail:229817210@qq.com

收稿日期:2013-12-31;收到修改稿日期:2014-02-20

传输。通信途径是在发射端将待传输的信息进行编码,再将其加载调制到待发射的激光脉冲序列中,然后利用大气低层气溶胶粒子对激光的前向散射来建立信息传输链路,在接收端进行信号的解调、解码,恢复出发送的信息。由于大气粒子对激光的散射具有一定的方向性,因此,将信息加载到激光脉冲串中并向目标区域上空进行大致的定向发射,相对于无线电的广域发射,具有一定的定向保密优点。这种非视线激光散射通信既具备了点对点激光通信机动性强、布置灵活的特点,又具有不需要精确对准的优点,甚至可以实现点-点、点-多点甚至多点-多点的网络式通信,故该通信方式收到了越来越多的关注^[1-13]。因此,在灾难抢险应急通信、海面军舰通信、直升机编队协作通信,在山区、沙漠、草原、沼泽等地区的紧急通信等场合,非视线激光大气散射通信都可以发挥特殊作用,实现紧急情况下的“最低通信保障”功能。

1 基本原理

非视线激光大气散射通信系统属于双工通信,通信双方可同时向对方发射激光信号并接收对方的信息。其工作原理是利用气溶胶粒子对激光的前向米氏散射效应,来实现激光信息传输通信。如图1所示,将待发射的信息加载到激光脉冲串中进行信号编码调制,该激光脉冲信号经气溶胶粒子的前向散射后而被接收机接收,接收机根据约定的编码协议进行快速信息解码,还原出有用信息,实现非视线激光通信。

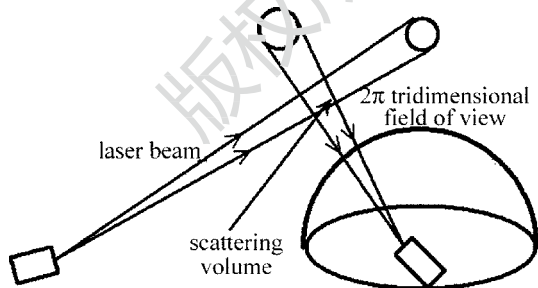


Fig. 1 Schematic diagram of NLOS laser scattering communication

通信时,发射机和接收机朝向一定的空域进行信号发射和接收,该通信方式不需要精确对准,以实现最低的应急通信保障目标。使用时,可以调节发射机、接收机激光发射/接收方向,利用地物目标、云团、人工散射体等物体实现更远距离的散射通信。

2 理论计算

非视线激光大气散射通信系统的几何链路示意图如图2所示^[14-15]。定义发射机(Tx)和接收机(Rx)的仰角分别为 β_T 和 β_R ,它们分别满足条件 $0 \leq \beta_T \leq \pi$ 和 $0 \leq \beta_R \leq \pi$;发射机的发散(半)角为 θ_T ,接收机的视场(半)角为 θ_R ,它们分别满足条件 $0 \leq \theta_T \leq \frac{\pi}{2}$ 和 $0 \leq \theta_R \leq \frac{\pi}{2}$; Ω_T 为发射光束的立体角,它满足条件: $\Omega_T = 4\pi \sin^2(\frac{\theta_T}{2})$; V 为发射机和接收机视场交叠区域的体积; r 为发射机和接收机之间的水平距离, r_1 和 r_2 分别为散射体 V 中点 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 $k_e = k_s + k_a$,其单位为 km^{-1} 。

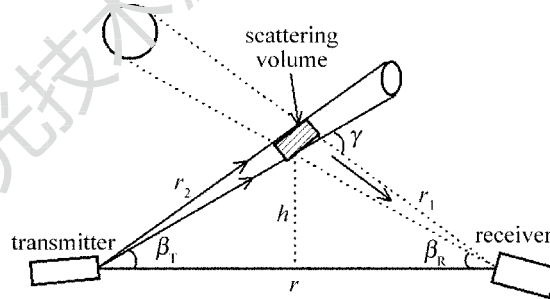


Fig. 2 Geometry link of NLOS scattering transmission

在空间交叠情况良好的情况下,近似得到接收机接收到的光功率为^[14-16]:

$$P_R \approx \frac{P_T k_s P(\mu) A_r V \sin^4 \theta_s \tau_1 \tau_2 \eta_r}{8\pi^2 r^4 \sin^2 \beta_T \sin^2 \beta_R (1 - \cos \theta_T)} \quad (1)$$

式中, P_T 为发射激光脉冲的功率, P_R 为接收机接收到的散射激光功率, r 为发射机和接收机间的水平距离, A_r 为接收孔径的面积, V 为散射体的体积, θ_s 为入射光传播的方向和接收机观察方向的夹角($\theta_s = \beta_T + \beta_R$),Mie散射相函数没有解析解,采用HENYHEY和GREESTEIN提出的经验公式(H-G相函数)可将散射相函数 $P(\mu)$ 表示为^[17]:

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

根据相关文献^[18-21]中提供的参量, $g = 0.72$, $f = 0.5$, $\mu = \cos \theta_s$, τ_1 为散射体到接收机间大气的透过

率, τ_2 为发射机到散射体间的大气透过率, η_r 为接收机的光学效率。根据(1)式, 计算发射机和接收机在不同的系统参量下, 接收机接收到的散射信号光功率随传输距离的变化关系。

激光波长为 1064nm, 发射激光脉冲功率为 10MW, 接收光学孔径为 80mm, 水平传输距离 $r = 3\text{km}$, 大气能见度取 5km, 大气散射系数取 $8.54 \times 10^{-4}\text{km}^{-1}$, 大气透过率取 99.9%。接收视场角 θ_R 取不同数值情况下, P_R 随传输距离变化情况。取激光发射束散角 $\theta_T = 0.4\text{mrad}$, 发射机仰角 $\beta_T = 5^\circ$, 接收机仰角 $\beta_R = 10^\circ$ 。 θ_R 分别取 0.5mrad, 2.5mrad, 5mrad 和 10mrad 时, 计算出接收散射激光功率随传输距离的变化情况, 计算结果见图 3。从图 3 可以看出, 随着传输距离增加, 接收功率急剧降低。原因在于随着传输距离增加, 大气对激光的衰减也不断增加。由图 3 还可看出, θ_R 参量对接收功率的影响较大, 随着接收机视场角的增大, 接收机散射激光功率变大。因此, 在接收视场角参量选取时, 要尽量选择大的视场角, 以提高散射激光功率的接收能力, 但接收机视场增加时会导致背景噪声变大, 故进行通信系统的设计时需要考虑背景噪声的影响。

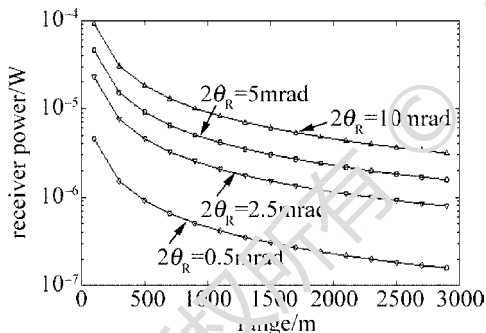


Fig. 3 Receiver power vs. range at different receiving field of view

图 4 中发射机的激光束散角 θ_T 取不同数值情况下, P_R 随传输距离变化情况。接收视场角 θ_R 取 0.5mrad, 其它参量不变, θ_T 分别取 0.5mrad, 2.5mrad, 5mrad 时, 计算出接收散射激光功率随传

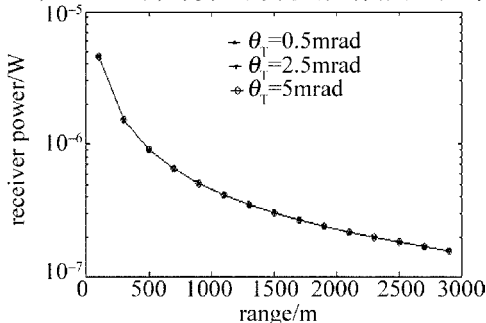


Fig. 4 Receiver power vs. range at different transmitting field of view

输距离的变化情况。可以看出, θ_T 选取不同数值时, 计算得到的接收功率曲线基本重合, 说明发射机的束散角参量对激光的接收功率影响较小。原因在于增加发射机束散角虽然可以增大发射机与接收机视场的空间交会区域, 但降低了激光的功率密度。因此在系统设计时, 可适当增大发射机的束散, 以增加散射体体积, 有利于接收机的方位调整。

图 5 为接收机仰角 β_R 取不同数值情况下, P_R 随传输距离变化情况。取 $\theta_T = 0.4\text{mrad}$, $\theta_R = 0.5\text{mrad}$, $\beta_T = 5^\circ$, β_R 分别取 5° , 15° 和 20° 时, 计算出接收散射激光功率随传输距离的变化情况。从图 5 中可以看出, 接收机的仰角越大, 接收到的光信号功率越小。原因在于发射机几何参量不变的情况下, 接收机仰角变大导致激光散射角变大, 接收方向上的激光散射信号变弱。

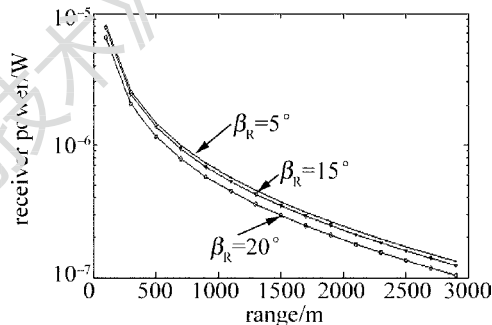


Fig. 5 Receiver power vs. range at different receiver elevation

图 6 为发射机仰角 β_T 取不同数值情况下, P_R 随传输距离变化情况。取 $\theta_T = 0.4\text{mrad}$, $\theta_R = 0.5\text{mrad}$, $\beta_R = 10^\circ$, β_T 分别取 5° , 15° 和 20° 时, 计算出接收散射激光功率随传输距离的变化情况。从图 6 可以看出, 减小发射机的仰角可以提高接收机收到的激光功率。原因在于发射机仰角增加会导致激光的散射角变大。根据米氏散射理论, 在激光传输方向上的激光散射最强, 在偏离传输方向的角度上, 散射信号随角度变大而减弱。与图 5 比较可以看出, 接收机仰角的变化对系统的影响较发射机要小,

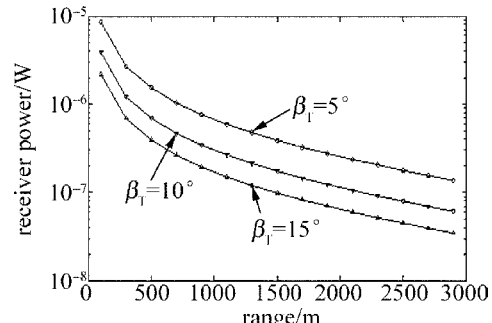


Fig. 6 Receiver power vs. range at different transmitter elevation

因此可以在通信时根据地形等情况灵活布局接收机的位置,实现通信系统的快速建立。

3 试验及结果分析

为了研究低空气溶胶对激光的非视线散射传输情况,为激光大气散射通信系统的设计及指标选取提供依据,在一个开阔地面进行了外场实验。试验布局示意图见图2。发射机与接收机相距放置约3km。发射机的仰角为 β_T ,接收机的仰角为 β_R ,则散射角 $\gamma = \beta_T + \beta_R$ 。 r_1 和 r_2 分别为散射体 V 中点 P 到接收机和发射机的距离, h 为散射体距地面的高度, V_s 为接收到的信号电压。发射的激光波长为 $1.06\mu\text{m}$,激光脉冲能量约为80mJ,脉冲宽度约为12ns,束散为2.5mrad,接收机视场为3mrad,接收光学系统孔径为100mm,接收机的光学效率约为80%。当天的大气能见度约为10km,接收机采用雪崩管探测器。根据(1)式,计算得出接收机的接收功率 P_R ,见表1。

Table 1 Data of laser receiver parameters in theory and in experiment

No.	r/m	r_1/m	r_2/m	$\beta_T/(\circ)$	$\beta_R/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$	P_R/W	V_s/V
1	3050	617	2450	3	12	15	1.3×10^{-6}	2.7
2	3050	728	2314	4	14	18	8.2×10^{-7}	1.8

试验中,调整发射机和接收机俯仰位置,以确保接收机与发射机空间交汇。在发射机和接收机不同仰角情况下,利用示波器记录散射回波脉冲信号,见图7和图8。

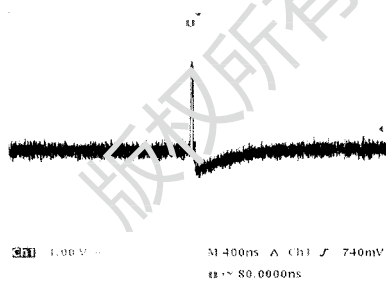


Fig. 7 Scattering pulse signal when $\beta_T = 3^\circ, \beta_R = 12^\circ$

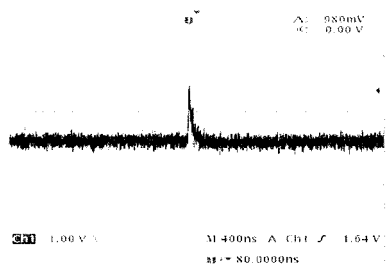


Fig. 8 Scattering pulse signal when $\beta_T = 4^\circ, \beta_R = 14^\circ$

从示波器信号幅度来看,第2组试验信号要弱

于第1组试验信号。原因是第1组参量的发射机仰角及散射角参量都要小,根据前面理论分析,原因是偏离传输方向的角度越小,接收到散射回波相对较强。

4 结论

非视线激光大气散射通信系统在军事和民用上具有迫切的应用需求和巨大的应用前景。但由于系统的研制难度大,仍然需要通过技术的进一步发展才能够实现工程化和实用化的技术目标。由于其发展状况与激光器件技术、探测接收技术及微弱信号的处理技术等的发展密切相关,因此目前仍然应该关注相关单元技术的进展,在相关技术发展的基础上不断完善非视线激光散射通信系统,尽快达到实用化水平。

参考文献

- [1] SHAW G A, NISCHAN M, LYENGAR M, et al. NLOS UV communication for distributed sensor systems[J]. Proceedings of the SPIE, 2000, 4126: 83-96.
- [2] KEDAR D, ARNON S. Non-line-of-sight optical wireless sensor network operating in multiscattering channel[J]. Applied Optics, 2006, 45(33): 8454-8461.
- [3] 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).
- [4] TANG Y, NI G Q, ZHANG L J. Study on single scatter model in NLOS UV communication[J]. Optical Technique, 2007, 33(5): 759-765 (in Chinese).
- [5] WANG J Sh, HOU T J, ZHOU D F, et al. Study on non-line-of-sight single-scatter atmospheric propagation model[J]. Laser Technology, 2010, 34(3): 309-312 (in Chinese).
- [6] YAO M, ZHANG L, XU Ch W, et al. Modeling and simulation of slant path scattering of $1.064\mu\text{m}$ laser in atmosphere[J]. Laser Technology, 2012, 36(3): 394-397 (in Chinese).
- [7] ZHAO H P, LEI P, YAO M. Atmospheric scattering model of $1.06\mu\text{m}$ laser[J]. Electro-optic Technology Application, 2009, 24(2): 6-9 (in Chinese).
- [8] SONG J Zh, WANG L F, LIANG D, et al. Analysis of the off-axis detection of laser in atmospheric scattering[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(6): 1030-1033 (in Chinese).
- [9] WANG H X. Technology of laser communication in atmosphere[J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(2): 45-49 (in Chinese).
- [10] JIA H H, CHANG Sh G, LAN Y, et al. Non-line-of-sight propagation model based on monte carlo method[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2007, 18(6): 690-697 (in Chinese).
- [11] CHENG 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).
- [12] WU J. Theory of light propagation in atmosphere[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005:

- 1-57 (in Chinese).
- [13] ZHAO T F, KE X Zh, HOU Zh M, *et al.* Link performance analysis of wireless ultraviolet network [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(6):828-832 (in Chinese).
- [14] WANG J Sh, HOU T J, ZHOU D F. Simulation research on non-line-of-sight atmospheric propagation [J]. *Laser Journal*, 2010, 31(3):46-47 (in Chinese).
- [15] 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, A8(12):1964-1972.
- [16] 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):1806-1862.
- [17] CORNETTE M W, SHANKS G J. Physically reasonable analytic expression for the single-scattering phase function [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(16):3152-3160.
- [18] HUANG Ch J, WU Zh S, LIU Y F. Numerical calculation of phase function of atmospheric aerosol particles [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3):580-585 (in Chinese).
- [19] SHAW A G, NISCHAN M. Short-range NLOS ultraviolet communication test bed and measurements [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2001, 4396:31-40.
- [20] YUAN Y J, REN D M, HU X Y. Computing scattering phase function by recursive fomula of mie theory [J]. *Chinese Journal of Light Scattering*, 2006, 17(4):366-371 (in Chinese).
- [21] LIU J B, WU J. Study of scattering property of spherical particle in atmosphere [J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, 26(2):31-33 (in Chinese).

《激光技术》编辑部

版权所有 ©