

doi: 10.7690/bgzdh.2023.10.008

基于空心光锥技术的非视线红外激光大气散射通信技术

张欣, 周进良, 王黎黎

(成都西南信息控制研究院有限公司智能研究所, 成都 611700)

摘要: 为减少激光探测接收背景噪声的影响, 针对非视距(non-line-of-sight, NLOS)激光远程通信问题, 提出一种扇形和空心光锥压缩接收激光的前向散射信号的新方法。根据非视线散射通信原理, 介绍其计算方法, 并通过非视线激光大气散射通信数据测试和外场试验, 实现便携式、低功率的 1.1 km 激光大气散射通信距离。验证结果表明: 在非视线激光大气散射通信接收机中使用空心光锥能有效地提高通信能力, 为战场上部队在受敌方电磁干扰或电磁静默时提供通信保障。

关键词: 非视线; 激光大气散射通信; 大视场大口径; 扇形; 空心光锥

中图分类号: TN248.1; TJ810.3⁺⁵ **文献标志码:** A

Non-line-of-sight Infrared Laser Atmospheric Scattering Communication Technology Based on Hollow Cone Technology

Zhang Xin, Zhou Jinliang, Wang Lili

(Intelligent Research Institute, Southwest Research Institute of Information Control Co., LTD, Chengdu 611731, China)

Abstract: In order to reduce the influence of background noise in laser detection receiver, a new method of compressing and receiving the forward scattering signal of laser is proposed for the problem of "non-line-of-sight" laser telecommunication. According to the principle of NLOS laser atmospheric scattering communication, the calculation method is introduced. Through the data test and outfield experiment of NLOS laser atmospheric scattering communication, the portable and low power communication range of 1.1 km is realized. The results show that the use of hollow light cone in the NLOS laser atmospheric scattering communication receiver can effectively improve the communication capability, and provide communication support for the troops in the battlefield when they are subjected to enemy electromagnetic interference or electromagnetic silence.

Keywords: non-line-of-sight (NLOS); laser atmospheric scattering communication; wide field of view (WFOV) big bore; fan-shaped; hollow cone

0 引言

目前在实际战场中, 军队常用的无线电通信、光纤通信和视线激光通信等手段在紧急情况、电磁静默或电磁干扰等条件下存在一定的使用限制。非视线(NLOS)激光大气散射通信是在这些特殊条件下解决该难题的一种非常有效的方式, 满足其“最低通信保障”能力^[1]。

从 20 世纪 60 年代开始, 美国、俄罗斯、以色列等开始致力于大气散射通信研究。早期采用紫外激光波段, 取得了一定的进展。2001 年, 美国林肯实验室采用 250~300 nm 的紫外光, 通过对接收进行圆锥扫描的方式, 实现了对数百米范围内的“非视距”通信^[2]。2008 年, 美国加州大学简化了 NLOS 单次散射模型, 研究了误码率小于 10^{-3} , 传输距离小于 1 km 时的紫外光传输模型^[3]。选择紫外光作为

传输信号有 2 个优点: 1) 地面底层空间的紫外辐射很微弱, 使用该波段可以极大地提高探测的信噪比, 容易实现高信噪比的接收; 2) 短波长的紫外光在大气中散射较强, 短距离内有益于系统接收。紫外光在大气中传输时衰减严重, 致使通信距离不远, 另外紫外激光器体积大、输出能量低导致野外或战场使用困难。目前, 大功率的红外激光器和相应波长的高灵敏度探测器相对容易获得, 因此, 如果采用合理的降噪和信号放大技术, 将红外波段的激光应用于大气散射通信可能获得更远的传输距离。近年来, 国内外对于红外光尤其是近红外光大气散射通信这一新领域开展了很多研究, 利用气溶胶对红外波段激光的米氏散射效应进行通信, 实现了“电磁静默”或者特殊战场条件下的应急通信需要。2006 年, 合肥电子工程学院进行了 1.06 μm 的激光信号大气散射探测实验研究, 利用米氏

收稿日期: 2023-06-11; 修回日期: 2023-07-05

作者简介: 张欣(1984—), 男, 山东人。

散射理论^[4]，对在低空大气中传输的激光散射辐照度的分布进行了理论分析和数值计算。随后，中国科学院上海光机所提出了一种红外激光大气散射通信的方法和装置^[5]，利用发射机发射 1.06 μm 的激光信号，该信号经大气散射后，被光接收机接收，经放大整形和电信号处理从而实现非视线光通信^[6]。

随着电子对抗的快速发展，在无线通信受干扰中断，无法架设有线通信线路的情况下，非视线激光大气散射通信成为了有效通信手段。近些年，采用波长 λ=1.06 μm 的近红外光作为非视距激光散射大气通信系统的载波，具备难截获、保密性高、抗干扰强，且在电磁干扰或电磁静默等复杂环境下迅速、精准、可靠地传输各种数据和信息，实现有效地通信。非视线激光大气散射通信中接收机的大视场大口径要求，是实现复杂环境下远程通信的关键问题。进而接收机大视场大口径技术则是解决该问题的关键手段^[7-8]。

笔者提出接收激光的前向散射信号以接收视场设计成扇形和空心光锥压缩的新方法，并通过非视线激光大气散射通信数据测试和外场试验。结果表明：该方法能够实现接收机的大视场大口径，具有提高非视线激光大气散射通信的能力，能在受敌方电磁干扰或电磁静默环境条件下提供远程通信。

1 原理

非视线散射通信原理如图 1 所示。激光的传播是直线的，如果接收机视场与发射机发散全角没有完全重合，那么散射体积会缩小，相应散射信号辐照度也会降低。当接收机视场与发射机发散全角完全不重合时，接收机将接收不到任何散射信号^[9]；因此，接收机视场范围越大，不仅可以降低发射/接收机空中指向的精度要求，而且可以提高接收机接收信号的功率^[10-11]。

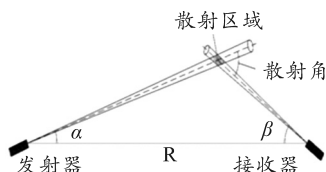


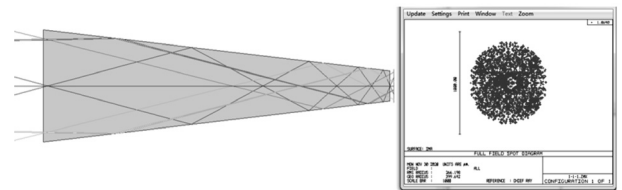
图 1 非视线散射通信原理

采用大视场的接收机对散射信号进行接收，其接收视场越大，背景噪声干扰信号对系统探测性能的影响也越大^[12]；因此，需在探测器前安装 1.06 μm 的干涉滤光片和空心光锥^[13]来降低背景噪声，以实现接收机的大视场大口径。

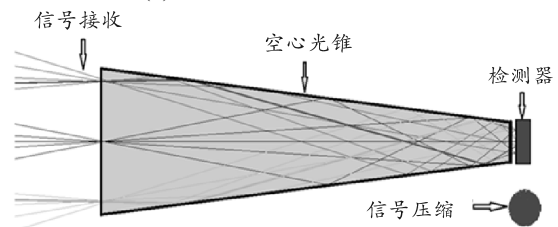
理论分析计算表明发射机散射角太大，其散射

光相对就较弱，可将接收大视场设计为扇形^[14]，大大降低一方向上的散射角，这样既能够降低对空中指向的精度要求，又能够减小背景噪声的影响。

考虑到扇形接收视场在另一个方向上视场较大，通过接收机物镜聚焦到探测器上会造成背景噪声较大，将严重影响系统探测性能，所以在探测器上采用雪崩管与空心光锥结合的模式，如图 2 所示。通过空心光锥将接收信号进行压缩，在尽量不损耗太多接收功率的情况下，降低背景噪声的影响^[15]。



(a) 光学软件 Zemax 仿真结果



(b) 光路

图 2 空心光锥反射光路

空心光锥一般由光洁度较好的抛光金属面或镀有全反膜的玻璃面拼接而成，加工便宜、易组合，可很好地调整输入输出口径，如图 3 所示。空心光锥主要有以下 4 方面优点：

- 1) 空心光锥通过内表面的全反射约束光线，保证光线不会从内表面透过；
- 2) 光线通过空心光锥后不会折射，可避免能量的损失和发散角的增大，有利于实现对介质的高效抽运^[16]；
- 3) 相对于实心光锥，空心光锥中光线不用在玻璃材料中的传输，可增加光线一定的透过率；
- 4) 利用空心光锥，使得接收光路在不减小接收视场的情况下，可大大缩小视场光阑的大小(即空心光锥入射端和出射端的口径变化)，从而降低背景噪声的影响^[17]。

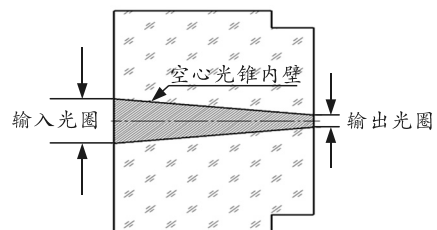


图 3 空心光锥 3 维剖面

采用空心光锥虽然压缩了接收信号，但还是会导致传输能量损失，这跟压缩信号的比例 β (即入射端口口径和出射端口口径比值) 有关^[18-19]，其关系如图 4 所示。

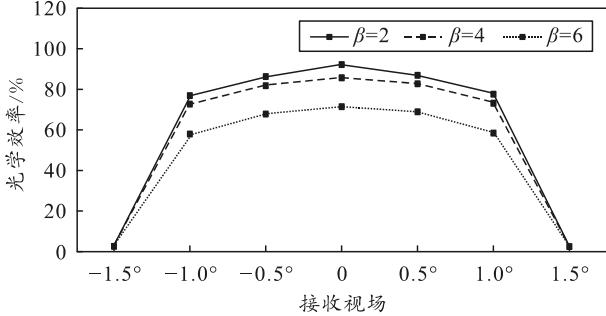


图 4 对于同样的接收视场，接收机光学效率随 β 的变化

由上图可知，虽然压缩信号的比例 β 越大，背景噪声对接收机的影响会越小，但其接收机光学效率也会下降，所以需根据具体情况来选择压缩信号的比例 β 。

2 计算

非视线激光散射通信系统发射端和接收端的几何关系如图 5 所示。从光功率的角度考虑，可以得到散射体积微元 δV 散射的光到达接收机的光功率为

$$\delta P_R = \frac{P_T K_S P(\mu) A_r \delta V \cos \zeta \exp[-k_e(r_1 + r_2)]}{4\pi \Omega_T r_1^2 r_2^2} \quad (1)$$

式中： P_T 为发射机发出的激光脉冲功率； $P(\mu)$ 为散射相函数； $\mu = \cos \theta_S$ ($\theta_S = \beta_T + \beta_R$ 是发射光传播的方向和接收机接收 1 方向的夹角)； A_r 为接收孔径的面积； V 为散射体积。

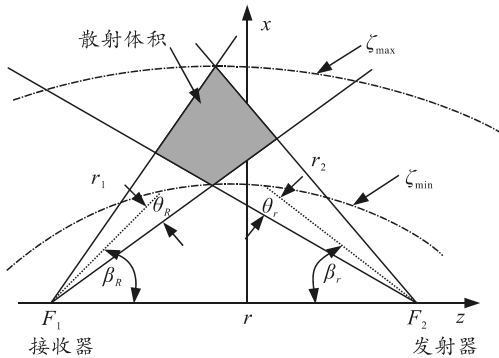


图 5 非视线散射传输几何链路

对于低空的红外激光散射传输情形，可只考虑米氏散射^[20]，采用 Henyey-Greenstein 函数近似表示为

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

式中 g 、 f 均为 NLOS 单次散射模型中的参数，这里选取 $g = 0.72$ ， $f = 0.5$ 。

在椭球面坐标系下，将 δP_R 进行对整个散射体的积分可以得到到达接收机的总散射光功率。利用简化方法，将 $\Omega_T = 4\pi \sin^2(\theta_T/2)$ 、 $r_1 = r \sin \beta_T / \sin \theta_S$ 和 $r_2 = r \sin \beta_R / \sin \theta_S$ 代入式(1)，可得接收机的总散射光功率近似为

$$P_R \approx \frac{P_T K_S P(\mu) A_r V \sin^4 \theta_S \exp\left[-\frac{k_e r}{\sin \theta_S} (\sin \beta_T + \sin \beta_R)\right]}{8\pi r^4 \sin^2 \beta_T \sin^2 \beta_R (1 - \cos \theta_T)} \quad (3)$$

对于窄束散光源，散射体积 V 可以较好近似为以接收机为顶点(或以发射机为顶点)的 2 个锥体交叠部分的体积，则

$$V = \frac{1}{3} \pi (D_1^2 h_1 - D_2^2 h_2) \quad (4)$$

式中： $h_1 = r_1 + r_2 \theta_T$ ， $D_1 = h_1 \theta_R$ 分别为较大锥体的高度和半径； $h_2 = r_1 - r_2 \theta_T$ ， $D_2 = h_2 \theta_R$ 分别为较小锥体的高度和半径。

利用大气的透过率计算公式： $\tau(\lambda) = I(\lambda)/I_0(\lambda) = \exp(-k_s(\lambda)L)$ ，对式(3)进行化简，容易得到接收机接收到的总散射光功率近似为

$$P_R \approx \frac{P_T K_S P(\mu) A_r V \sin^4 \theta_S \tau_2 \tau_1 \eta_r}{8\pi r^4 \sin^2 \beta_T \sin^2 \beta_R (1 - \cos \theta_T)} \quad (5)$$

式中： τ_2 为发射端与散射体之间的大气透过率； τ_1 为接收端与散射体之间的大气透过率； η_r 为接收机的光学效率。

为满足非视线通信距离 ≥ 1 km 的要求，通信两端的视场必须在空间形成交叠，为快速建立通信链路，尽可能的采用大视场的接收天线接收激光的前向散射信号，为此设计了接收扇形水平视场为 2° (约为 34.9 mrad)，计算表明接收机的位置偏差 34 m 左右，发射机与接收机视场仍能有效交汇；而 10 m 左右的定位精度在目前的技术水平下是容易实现的。同时，在通常指标要求的散射通信范围 $\geq 20^\circ$ 情况下，减小发射机的仰角有利于提高接收机的信号响应^[21]，因此取发射机的激光发射角 β_T 为 5° ，接收机的接收角 β_R 为 15° ，这样通信的散射角度刚好满足 20° 的指标要求。此外，为扩大激光散射区域，发射激光的束散角不宜设计得过小。在非视线通信时，较大的激光束散也能够降低对准精度的要求。综合考虑，通过发射天线对激光束散进行调节，实现 3 mrad 的激光发散角度输出。将上述参数代入

式(4)计算, 得到计算结果如表 1 所示。

表 1 非视线激光散射传输计算值

参数	值	参数	值
r_1/m	255.0	D_1/m	0.40
r_2/m	757.3	D_2/m	0.36
h_1/m	268.2	V/m^3	12.10
h_2/m	241.8		

由上表可知, 接收机的位置偏差 26 m 左右时, 发射机与接收机视场仍能有效交汇, 其定位精度满足散射通信的要求。同时, 考虑到 APD 探测器光敏面尺寸的限制以及散射通信的能力和条件, 接收机的接收口径应尽量采用大口径, 在进行设计时, 也需要结合应用场合和气象条件来综合考虑。有激光大气散射通信方案参数如表 2 所示。

表 2 激光大气散射通信方案参数

参数	值	参数	值
波长/ μm	1.06	视场角/($^\circ$)	2×0.072
散射通信角/($^\circ$)	20	接收角/($^\circ$)	15
激光功率/mW	1	接收光学效率/%	65
激光脉宽/ns	10	感光面/mm	$\Phi 3$
发散总角度/mrad	3	能见度/km	5
发射角/($^\circ$)	5	通信距离/km	1

根据理论分析, 对接收口径与接收光功率进行计算。有大气散射系数计算公式为:

$$K_s = \frac{3192}{R_v} \times \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q \quad (6)$$

式中 R_v 为能见度, $\lambda_0 = 0.55 \mu m$, $q = 1.14$ ^[22]。通过上述可得出 $K_s = 0.3$ 。将以上参数代入式(5)计算, 有接收机接收口径与接收功率的关系曲线如图 6 所示。

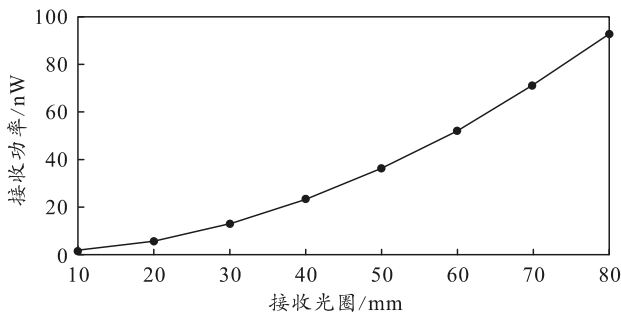


图 6 接收口径与接收功率的关系

由上图可知, 在接收口径 $D = \Phi 60 \text{ mm}$ 时, 接收功率 P_R 为 $5.2 \times 10^{-8} \text{ W}$ 。采用国内研制的硅光电雪崩管, 实现 $5.2 \times 10^{-8} \text{ W}$ 有效探测, 在工程上是完全能够实现的。

3 结果与分析

如图 7 所示, 接收机光学系统主要由干涉滤光片、接收物镜和空心光锥组成。设计原理: 在接收机中, 一般接收机的焦距与接收口径的比值 α 应至

少不小于 $1:1$ ^[23], 但视场角越大, 要求探测器的感光面就越大, 其相对应的接收信号信噪比就越差。针对此情况, 通过接收物镜采用单片的非球面镜保证接收光斑的像质, 可在设计中取 $\alpha = 1:1$ 。在接收口径 $D = \Phi 60 \text{ mm}$ 时, 有接收系统焦距 $f = 60 \text{ mm}$, 对于接收扇形水平视场 2° 可计算得出探测器感光面 $d \geq \Phi 3 \text{ mm}$, 但是这样大的感光面直接接收回波信号会受到大气中杂散光的影响^[24]。为了避免此情况, 在接收机中采用了以下手段:

1) 在接收机外端面加干涉滤光片(光透过率 $\geq 90\%$), 如图 7 所示。

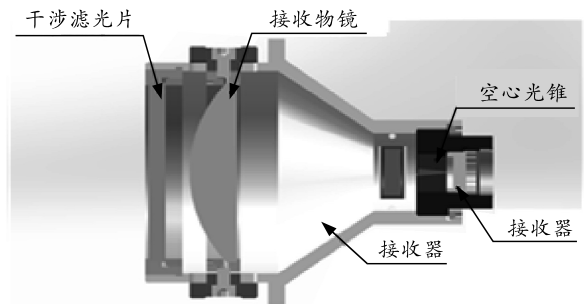
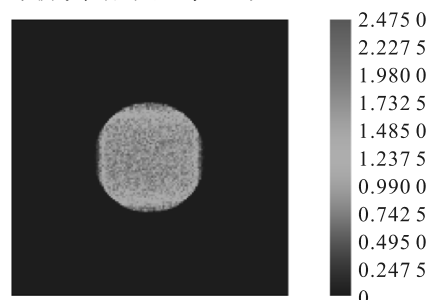
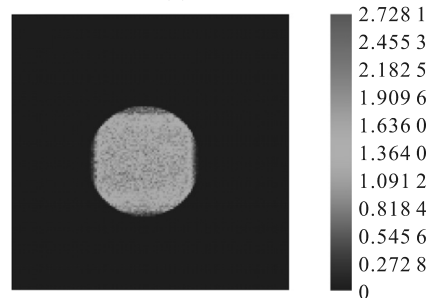


图 7 空心光锥和接收机 3 维剖面

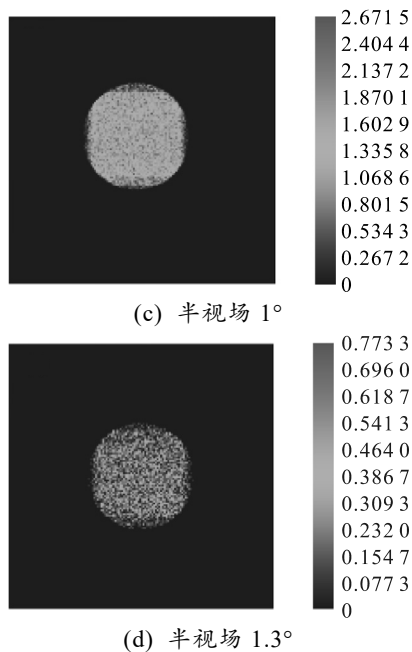
2) 在接收系统中增加空心光锥, 其空心光锥入射端口径为 $3 \times 0.7 \text{ mm}$, 根据图 5 可取压缩信号的比例 $\beta = 4.3$, 有出射端口径为 $0.7 \times 0.7 \text{ mm}$ 。其缺点: 会造成接收机损失一定的接收能量, 用光学软件 Zemax 仿真结果如图 8 所示。同时, 根据此情况还进行了实验测试, 得出了接收视场与接收机的光学效率 η_r (含干涉滤光片和接收物镜) 的关系曲线如图 9 所示, 与仿真结果基本一致。



(a) 0 视场



(b) 半视场 0.5°



(c) 半视场 1°

(d) 半视场 1.3°

图 8 光学软件 Zemax 模拟计算不同接收视场内接收机光学效率的结果

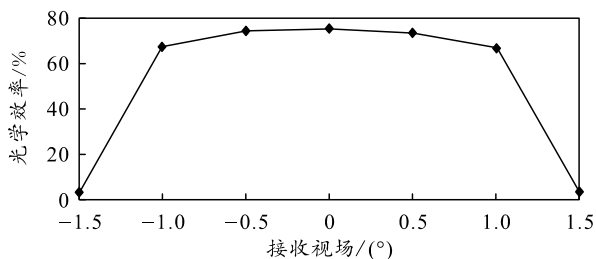


图 9 接收视场与接收机光学效率的关系

通过上述数据分析表明，当接收口径为 $\Phi 60$ mm 时，激光接收机扇形水平视场 2° 范围内，接收机的光学效率 $\eta_r \geq 65\%$ (含干涉滤光片和接收物镜)。同时，通过实测得到的接收功率 P_R ，实现了便携式、低功率的“非视距”1.1 km 通信距离的激光大气散射通信，图 10 为现场试验。由此可见，接收机在通过空心光锥牺牲一定的接收能量下，既实现了接收机大视场大口径，也通过空心光锥入射端口径和出射端口径的变化较大地减小了背景噪声的影响，使其接收功率 P_R 满足国内硅光电雪崩管的探测，如图 11 所示。

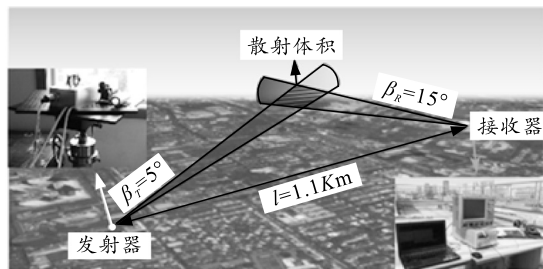
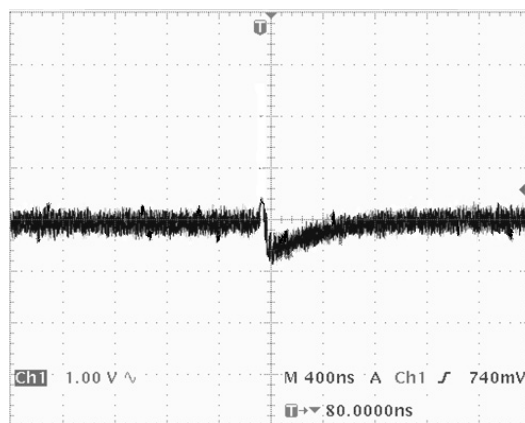
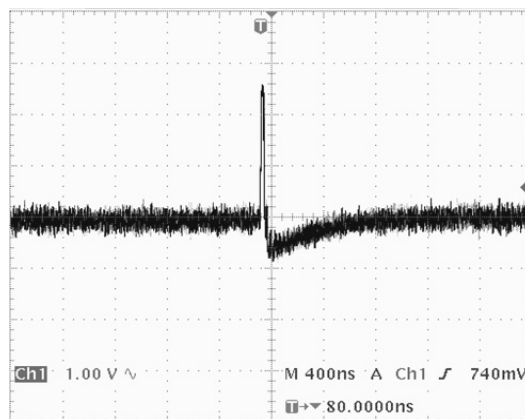


图 10 1.1 km 激光大气散射现场试验



(a) 无空心光锥



(b) 有空心光锥

图 11 接收机改用空心光锥前后探测器输出的信号对比。

4 结束语

空心光锥在非视线激光大气散射通信的应用，解决了非视线激光大气散射通信中接收机的大视场大口径问题。通过模拟设计带空心光锥的接收机，进行接收机的光学效率 η_r 测试实验。实验证明，带空心光锥的大口径接收机，不仅接收视场可以做大，且光学效率 η_r 最大能达到 70% (含干涉滤光片和接收物镜) 以上，比不带空心光锥的接收机接收能力更强。通过合理设计的空心光锥可以将非视线激光大气散射通信中接收机的接收视场扩大，且背景噪声低，不影响系统接收性能，是一种非常适合非视线激光大气散射远程通信的光学器件。

参考文献：

[1] YANG ZH, ZHOU D F, LI X F, et al. The infrared laser atmosphere scattering communication study based on “Non-line-of-sight”[J]. Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 2013, 8906: 89061V-89061V-6.

[2] SHAW G A, NISCHAN M, IYENGAR M, et al. NLOS UV Communication for Distributed Sensor Systems[C]. SPIE, 2000, 4126: 83-96.

[3] 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.

[4] 宋鹏. 无线紫外光移动自组网信道传输特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.

[5] 冯涛, 方祖捷, 陈刚, 等. 红外激光大气散射通信的方法和装置 200610117161. 4[P]. 2007-3-21.

[6] 冯涛, 陈刚, 方祖捷, 等. 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.

[7] 赵太飞, 柯熙政, 梁薇, 等. 紫外光散射通信中一种二级光学接收系统设计[J]. 压电与声光, 2011, 33(2): 310-319.

[8] 徐瑞雄. 基于脉冲激光的散射通信系统[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.

[9] 宋鹏, 柯熙政, 熊扬宇, 等. 非直视紫外光在非共面通信系统中的脉冲展宽效应[J]. 光子学报, 2016, 36(11): 1106004.

[10] 王巨胜, 侯天晋, 周鼎富. 非视线大气散射传输仿真研究[J]. 激光杂志, 2010, 31(3): 46-47.

[11] 林勇, 徐智勇, 汪井源, 等. 雾环境下非视距散射光通信最佳链路分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 705-710.

[12] 陈胜石, 欧秋晔, 高玮, 等. 大视场激光接收机设计[J]. 应用光学, 2009, 30(6): 1051-1055.

[13] RAYMOND J. Beach. Hollow lensing duct: US006160934A[P]. Unite States Patent, 2000.

[14] 高洁, 张大庆, 陆长平, 等. 激光引信大视场小型化发射光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(5): 0518001.

[15] 沈振民, 蓝天, 刘国彦, 等. 包含非视距链路的室内可见光通信倾角式光学接收端的设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2783-2788.

[16] 贾伟, 胡永明, 李明中, 等. 空心透镜导管的模拟与设计[J]. 中国激光, 2004, 31(8): 939-942.

[17] 付兴虎, 付广伟, 高飞龙, 等. 球面型大端面特种光锥的空间光信号接收研究[J]. 燕山大学学报, 2017, 41(2): 171-176.

[18] 贾文武, 汪岳峰, 雷呈强, 等. LD 阵列封装误差对空心导管均匀性的影响[J]. 激光技术, 2012, 36(1): 93-98.

[19] EICHHORN M. Theory and optimization of hollow ducts[J]. Applied optics, 2008, 47(11): 1740-1744.

[20] YI N T, XIE X P, ZHAO W. Simulation Research of Short Range Non-line-of-sight Ultraviolet Communication Performance[C]// International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. IEEE, 2012.

[21] 李斌. 非视线激光通信接收系统的设计和实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.

[22] 李春艳. 近红外光大气散射通信关键技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

[23] 杨晖, 郑刚, 李孟超, 等. 动态光散射系统最佳光接收孔径比研究[J]. 光子学报, 2008, 37(8): 1539-1543.

[24] 徐晓静, 元秀华, 黄德修, 等. 影响激光大气通信距离的诸因素分析[J]. 光学精密工程, 2002, 10(5): 493-496.

(上接第 24 页)

4 结束语

笔者通过对国内外数据处理模块的热插拔控制方法的分析, 结合火炮电气控制系统的要求, 设计了一种基于电压反馈法的火炮数据处理模块的热插拔电路。通过仿真验证表明, 该系统能够实现火炮数据处理模块的热插拔功能, 并且能够在主备电源切换过程中生效, 维持系统的稳定工作。

该方法解决了火炮数据处理模块带电插拔以及冗余电源切换时浪涌电流过大的问题, 降低了电路复杂度与成本, 提高了系统的可靠性与可维护性; 并且该方法具有适应性, 通过对电路参数进行微调, 可适应火炮控制系统中不同模块的电压变化。接下来会将此方法应用于火炮数据处理模块进行试验验证。

参考文献:

[1] 韩崇伟, 张志鹏, 王天石, 等. 现代火炮网络化综合电子系统[D]. 北京: 兵器工业出版社, 2021.

[2] 李希农, 贾志远. 线膛火炮炮弹适配性试验技术[J]. 兵工自动化, 2022, 41(1): 18-22.

[3] 薛滨, 何永, 蒋鑫. 某小口径火炮多功能膛口装置流场数值仿真[J]. 兵工自动化, 2022, 41(12): 83-87.

[4] 李丹, 胡晓光. 武器装备紧凑型 PCI 总线测控系统热插拔冗余容错技术研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(7): 1247-1255.

[5] 赵继成. 电源热插拔技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.

[6] 宋飞, 姚信安, 胡世平. 刀片式插件板热插拔控制策略研究[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(8): 93-98.

[7] LI Y T, LIU K B, NSRRC C Y L, et al. INRUSH CURRENT SUPPRESSION SCHEME OF HOT SWAP POWER MODULES[C]//6th International Particle Accelerator Conference. IEEE, 2005.