



空间目标单光子探测光纤接收方式的研究

许中园, 孙胜利, 陆卫

中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

中国科学院研究生院, 北京 100049

E-mail: niitopper@hotmail.com

2009-04-06 收稿, 2009-06-05 接受

摘要 空间目标探测中常常遇到极微弱光回波的探测问题, 望远镜接收到的光信号仅有很少的光子数, 甚至单光子。我们把单光子探测器运用在空间目标探测中, 一方面光纤接收方式具有若干潜在优势, 另一方面由于目前所用的单光子探测器的光纤接收模式的限制, 决定了在空间目标的单光子探测中应用光纤接收方式。对于回波的光纤接收方式的研究将有力促进空间目标单光子探测技术的发展。

关键词
光纤光学
单光子探测
回波耦合
目标探测

在空间目标单光子探测等空间目标探测系统中, 发射机和目标、目标和接收机之间为了建立一条有效的探测线路, 往往需要将二者进行精确的追踪。由于探测距离的不确定性, 而且易受强辐射(宇宙辐射和太阳光)和基座振动等影响, 其研究主要集中在光谱滤波技术(如带宽极窄的原子滤波器等), 以及复杂的捕获、跟踪和瞄准系统。然而在探测距离相对短的情况下, 人们发展了漫射光回收探测方案。漫射光回收探测方案采取窄角发射、目标漫反射和广角接收技术, 在激光探测领域具有创新性。

回波能量接收的多少主要由两方面决定, 一方面是出射激光的扩散程度(有没有高度的方向性), 另一方面是接收机的视场角大小^[1]。因此, 扩展接收机的视场角是很有意义的。而漫射光回收探测方案为了尽可能多地搜集被目标反射的漫射光, 也要求接收机的视场角尽量宽。出于成本和安全的考虑, 激光功率也不可能做到非常高, 这要求接收机的灵敏度也应尽可能地高。

提高接收机灵敏度最直接、最简单和最有效的方案是采用高灵敏度的光电探测器, 我们的思路是运用量子通讯中广泛运用的高灵敏度的单光子探测器。然而, 探测器的灵敏度是受器件水平限制的。在此限

制条件下, 人们试图通过对空间光接收部分进行合理设计, 以同时提高其灵敏度和视场角。目前, 我们所应用的单光子探测器是采用光纤耦合接收方式, 本文分析了光纤接收方式在空间目标单光子探测中的潜在优势, 介绍了空间目标回波耦合入光纤的方案概况和光纤接收方式的研究现状, 分析了其中存在的困难和原因, 并对其应用前景进行了展望。

1 应用光纤接收方式的潜在优势

光纤作为空间目标单光子探测接收机的组成部分, 最早应用于天文中的恒星探测, 随后被广泛用于激光雷达、光无线通信等探测和通信系统中, 主要还只是起引导光传输的作用。随着光纤通信的发展, 其中许多成熟技术, 如光纤光栅滤波技术和光放大技术等, 不断地被应用于空间光光纤接收方式中。

例如, De Young^[2]将光纤布拉格光栅(FBG)滤波器引入激光雷达的接收方式(图 1), 发现可极大地降低背景噪声的影响, 使激光雷达在白天也能取得良好性能。这种滤波器的通带范围(FWHM)可达几十皮米, 比干涉滤波器(其FWHM一般为纳米量级)要窄 100 倍左右; 最大反射率可达 91%以上(干涉滤波器的透过率一般小于 90%), 并且易于与光纤连接。

引用格式: 许中园, 孙胜利, 陆卫. 空间目标单光子探测光纤接收方式的研究. 科学通报, 2009, 54: 2467~2471

Xu Z Y, Sun S L, Lu W. Research of receiving modes by fibers of single-photon detection for the space targets (in Chinese). Chinese Sci Bull (Chinese Ver), 2009, 54: 2467-2471, doi: 10.1360/972009-501

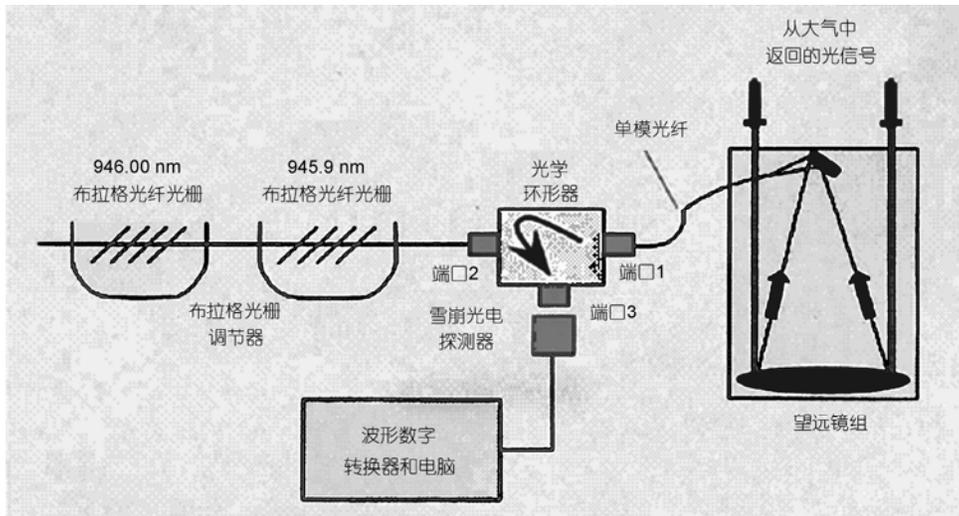


图1 光纤光栅滤波的光纤接收方式

由此可见, 光纤接收方式可望利用光纤光栅等窄带光谱滤波技术和光放大技术来提高接收性能. 这种光滤波器能实现高透过率的超窄带滤波, 而且置于耦合光纤之后, 不会对接收方式的视场角增加额外的限制, 从而能解除传统光学滤波器的角度敏感性对视场角的束缚; 采用光放大技术, 通过对信号光进行放大而不是通过提高光学系统的收集能力来提高信号光强度, 必将减小对光学系统入瞳孔径的要求, 从而有利于增大光学系统的接收视场角. 因此, 如果将光纤接收方式应用于空间目标单光子探测中, 有望解除光学系统和传统滤波器对视场角的限制, 真正实现对微弱空间光信号的非扫描式接收. 而且在量子通讯领域快速发展起来的单光子探测技术中, 基本都是用光纤作为接收端的, 因此随着光纤技术的发展, 使空间目标单光子探测越来越成为可能.

2 应用方案限制简况

单光子探测器的核心器件是雪崩光电二极管(APD). 根据灵敏响应波段不同, 雪崩二极管主要由三种半导体材料构成: 硅(Si)、锗(Ge)、铟镓砷(InGaAs). Si雪崩光电二极管(Si-APD)在 0.83 μm 波长可达到 70% 以上的光子探测效率, Ge-APD 在 1.3 μm 波段的光子探测效率为 15%. 在我们课题中所使用的 InGaAs/InP-APD 单光子探测器在 1.5 μm 波段的光子探测效率有 10%. 为了在空间探测中做到能与成熟的红外被动探测技术相复用, 我们选取 1310 nm, 1550 nm 近红外波段进行讨论.

现阶段, 我们所使用的单光子探测器是广泛应用在量子通讯中的, 光纤接收技术和雪崩光电二极管(APD)的结合非常成熟; 但是目前 8/10 μm 的商用单模光纤与所用的 20 μm 左右的 APD 光敏面无法很好地匹配(数据由华东师范大学提供); 随着空间目标单光子探测的研究发展, 完全针对这个领域的单光子探测器和与其配套的光纤将进入人们的视野.

在光纤通讯量子保密通讯中, 1310 nm 和 1550 nm 是常用的波段, 对于这两个波段, 不管是光纤技术还是单光子灵敏度的探测器技术, 都是成熟而且可靠的. 在空间目标探测中, 在近红外波段能够与红外被动探测相结合, 达到目标探测的目的, 而空间探测常选取的红外波段是 2.7 和 4.3 μm , 显然还做不到主动单光子探测与红外被动探测的完美结合, 但是随着科技的进步, 光纤技术和探测器技术(长波长的 APD 正在研究中)的发展, 将量子通讯中的单光子探测器应用于空间目标探测是具有可行性和应用前景的. 本文的研究仅是建立在现有的 1310 和 1550 nm 波段的单光子探测器的基础上, 因此下面仅对 1310 和 1550 nm 波段进行光纤耦合方案理论分析.

3 空间目标回波光纤耦合方案

3.1 空间光-多模光纤

多模光纤中模式较多, 可将众多的分立模式近似为连续变化的光线, 因此采用几何光学考虑, 近似程度比较高.

当焦点不在纤芯轴线就会有斜光线入射芯径. 斜光线入射光纤端面时具有更大的数值孔径, 因此耦合效率随入射点到纤芯中心轴径向距离变化可不考虑. 多模光纤耦合损耗主要考虑菲涅尔反射和对准偏差. 多模光纤较单模光纤容易做到较高的耦合效率, 因此随着单光子探测器的发展和探测器致冷技术的提高, 多模光纤将更多地替代数值孔径较小的单模光纤.

3.2 空间光-单模光纤

光波长与纤芯直径处于可比的量级, 使用几何光学考虑耦合问题的结果与实际情况相差较远, 应使用电磁场理论考虑.

实现单模光纤高效耦合条件最重要的是满足注入条件(或称为模场匹配). 注入条件说明, 耦合进入单模光纤的激光与单模光纤出光纤电磁场分布(幅度和相位)相同时, 将能获得最高的耦合效率(此时仍有菲涅尔反射等损耗存在), 较高的水平为 85%左右的耦合效率(半导体激光器-单模光纤耦合). 工程上将光耦合进入单模光纤是比较困难的, 光纤通信中遇到的耦合问题一般是半导体激光器到光纤、光纤连接、定向耦合等, 光纤传感器中也遇到空间光-单模光纤的耦合, 但是大孔径接收远距离传输光耦合进入单模光纤似乎是自由空间光通信所特有的问题, 有国外专家(从事光纤应用光学系统设计制作)认为是可实现的工程. 现在空间目标单光子探测的研究中, 也遇到以上类似的问题.

() 单模光纤出纤光电场分布. 纤端面上电磁场分布为零阶贝塞尔函数, 而一般以高斯分布来近似^[3].

$$\Psi(r) = \exp\left[-\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中 r_0 为单模光纤模场半径, 对 1310 nm 波长取值 $(9.2 \pm 0.4) \mu\text{m}$, 对 1550 nm 波长取值 $(10.4 \pm 0.8) \mu\text{m}$. r_0 是光纤端面上任一点到中心的径向距离.

() 经过远距离真空传输的光波在圆形孔径接收镜焦点的电磁场分布. 焦点上电磁场分布为^[4]

$$U(r) = \frac{\exp(ikf)}{i\lambda f} \exp\left(ik \frac{r^2}{2f}\right) \pi a^2 \frac{2J_1\left(\frac{2\pi ar}{\lambda f}\right)}{\frac{2\pi ar}{\lambda f}}, \quad (2)$$

式中 f 为耦合透镜焦距, λ 为波长, 分别为 1310 nm 和 1550 nm, $2a$ 为耦合透镜孔径光阑, k 为波数.

() 满足注入条件(模场匹配)的方案. 采用特

殊的曲面反射可以将平面光束变换为准高斯光束, 让其几乎完全满足注入条件, 但是受到光学加工技术的制约, 这样的做法尚不可行, 恰当的做法是对焦点艾里光斑和光纤端面模场进行比较, 选取适当透镜参数, 使得艾里光斑与光纤端面模场的差异最小. 此时光纤端面在焦点上, 透镜的焦距应远大于出光纤高斯光的准直距离, 这个条件在一般情况下是满足的(图 2).

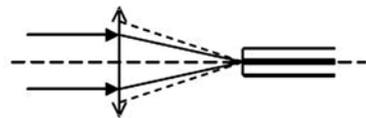


图 2 单模光纤耦合方法示意图
虚线为出光纤高斯光束光腰

单模光纤耦合效率为^[3]

$$\eta = \frac{\iint U^*(r)\Psi(r)rdrd\theta}{\sqrt{\iint U(r)U^*(r)rdrd\theta} \sqrt{\iint \Psi(r)\Psi^*(r)rdrd\theta}}. \quad (3)$$

将(1)和(2)式代入(3)式, 那么能量耦合效率为

$$T = \eta\eta^* = |\eta|^2 = \frac{\left[\int_0^{+\infty} \exp\left[-\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right] \exp\left(-ik \frac{r^2}{2f}\right) \frac{2J_1\left(\frac{2\pi ar}{\lambda f}\right)}{\frac{2\pi ar}{\lambda f}} r dr \right]^2}{\int_0^{+\infty} \exp\left[-2\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right] r dr \int_0^{+\infty} \frac{2J_1\left(\frac{2\pi ar}{\lambda f}\right)}{\frac{2\pi ar}{\lambda f}} r dr} \quad (4)$$

从(4)式可以看出, 当选定单模光纤和光波长的時候, 可以通过改变 $f/2a$ 的值(相对孔径倒数 $1/F_{\#}$)改变能量耦合效率, 由于解析表达式的复杂性, 最高耦合效率的寻找用计算机数值计算来完成, 通过计算, 我们做出 $f/2a$ 与能量耦合效率 T 的关系曲线.

从图 3 中分别读出在 1310 和 1550 nm 波长时耦合效率的最大值以及相对应的耦合透镜相对孔径倒数 $1/F_{\#}$ (表 1).

表 1 最大耦合效率及相应数值孔径倒数 $1/F_{\#}$

波长/nm	最大耦合效率/%	对应 $1/F_{\#}$
1310	82.54	0.203
1550	82.69	0.211

因此, 在选取前置望远镜接收系统时, 应选取 $1/F_{\#}$ 为 0.2 左右的值, 波长选为 1550 nm 时, 耦合效率也能达到可观的 82%.

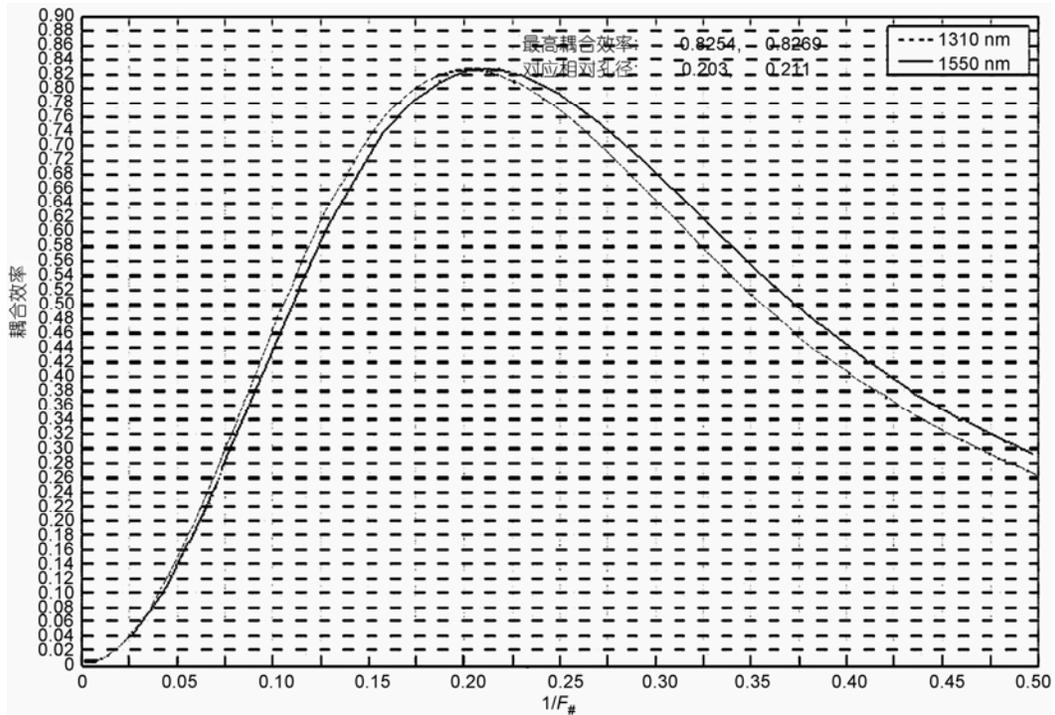


图3 空间光-单模光纤耦合效率与耦合透镜 $1/F_{\#}$ 关系曲线

3.3 光纤接收方式研究现状

由于光纤接收方式的诸多潜在优势，国内外许多学者对此开展了大量的基础研究，目前主要集中于光纤接收耦合效率方面，而对接收视场角的关注较少。

光纤接收耦合效率是决定光纤接收方式的效率和灵敏度的关键参数，直接决定了方案的可行性，因而从最早的光纤接收方式研究开始，就一直受到人们的重视。由前面分析，将单模光纤放置于大口径望远镜的焦平面中心时，光纤接收耦合效率在理论上最大可达到 80%左右(即-1 dB)，其损耗是由望远镜焦平面处的场和光纤端面的场不匹配而导致的^[5]。1998年，Winzer和Leeb^[6]将光纤接收方式引入激光雷达中，发现随机光信号耦合进入单模光纤的最大效率仅为 42%(即-3.8 dB)。为了进一步提高光纤接收耦合效率，增大方式的可行性，相干光纤束、少数模光纤、光子晶体光纤等也相继被用于光纤接收方式中。

近年来，随着空间光通信和目标激光探测系统对大视场角的需求，人们开始研究如何在兼顾光纤接收耦合效率的情况下增大视场角。Guyon^[7]提出了一种增大接收视场角的方法：将大口径的光学系统分成 n 个分别耦合进入光纤的小孔径子系统(图 4)，

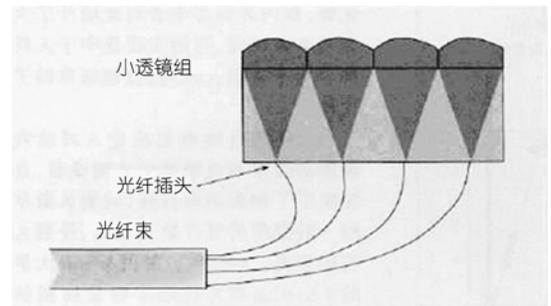


图4 多个小孔径接收的光纤接收方式示意图

即减小前述立体角 $\Omega \approx \lambda^2/A$ 中的 A 以增大视场角。这种结构本质上仍类似于角度分集技术，在不损失耦合效率的情况下确实增大了视场角，但是由于子系统的接收视场角仍然过小，要实现广角接收所需要子系统的数目过多，实现起来十分困难。

在空间目标单光子探测中，由于接收光纤的芯径和数值孔径都很小(典型单模光纤的芯径为 6~10 μm ，数值孔径为 0.1~0.2)，为提高接收回波的能量，需要增大接收孔径以提高光学增益，从而导致接收视场角极小。这也说明，如果仅仅是增加进入光纤过程，而前面的集光系统仍然采用传统的光学系统设计，光纤接收方案将无法大幅度增加其接收视场角。因此，要发挥光纤接收方式广角接收的潜在优势，应

当在前面的耦合部分下功夫,如引入一些新的物理效应或器件,这方面有待进一步的发展。

4 结论

空间回波光纤接收方式将有力促进现有空间光通信技术和空间目标单光子探测技术的发展。接收灵敏度的提高,将有助于提高有效距离;而视场角的增大将加快探测系统的对准、追踪过程。对空间光的广角接收,将有可能克服光的强方向性束缚,使探测范围大幅度增加

此外,空间光纤接收方式在双(多)基地激光雷达

和激光告警等目标探测系统中也有广泛的应用。在这类系统中,到达光接收机的空间光信号往往非常微弱,而且信号光的入射方向常常是无法预知的^[8]。高灵敏度的广角光纤接收则可无扫描式接收空间光信号,从而适应对快速运动目标的有效探测,并实现对多个目标的同时跟踪探测。

总之,空间目标单光子探测广角光纤接收是一个很有潜力的发展方向,将对民用和军用相关通信和探测技术的发展产生不可估量的影响,值得大力加强这方面的研究^[9,10]。

参考文献

- 1 Bloom S, Korevaar E, Schuster J, et al. Understanding the performance of free-space optics. *J Opt Network*, 2003, 2: 178—200
- 2 De Young R J. A narrow band fiber Brag grating filter for lidar receivers. In: *Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'01)*. Baltimore, MD, USA, 2001. 494—495
- 3 Simon T, Jean L. Advanced fiber coupling technologies for space and astronomical applications. *Proc SPIE*, 2004, 5578: 40—51 [\[DOI\]](#)
- 4 朱自强, 王仕藩, 苏显渝. 现代光学教程. 成都: 四川大学出版社, 1990. 62
- 5 Shaklan S, Roddier F. Coupling starlight into single-mode fiber optics. *Appl Opt*, 1988, 27: 2334—2338 [\[DOI\]](#)
- 6 Winzer P J, Leeb W R. Fiber coupling efficiency for random light and its applications to lidar. *Opt Lett*, 1998, 23: 986—988 [\[DOI\]](#)
- 7 Guyon O. Wide field interferometric imaging with single-mode fibers. *Astron Astrophys*, 2002, 387: 366—387 [\[DOI\]](#)
- 8 毛登森, 张记龙. 微弱激光辐射探测技术在激光告警设备中的应用. *测试技术学报*, 2004, 18: 373—376
- 9 李光元, 徐安士. 空间光通信广角接收馈源研究进展. *中兴通讯技术*, 2008, 2: 44—48
- 10 邓科, 王秉中. 空间光-光纤耦合技术研究. 硕士学位论文. 成都: 电子科技大学, 2007

Research of receiving modes by fibers of single-photon detection for the space targets

XU ZhongYuan^{1,2}, SUN ShengLi¹ & LU Wei¹

¹ Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

The problem of detecting very weak echo often troubles the detection for the space targets. The signals which the telescopes receive are very small, even the power is equivalent of single-photon. Therefore we develop the single-photon detection for the space targets. On the one hand, receiving modes by fibers has a number of potential advantages. On the other hand, the existing single-photon detectors use the receiving modes by fibers. This determines that single-photon detection for the space targets uses the receiving modes by fibers. Then, the research of receiving modes by fibers for echo will promote strongly the development of the single-photon detection for the space targets.

fiber optics, single-photon detection, echo coupling, target detection

doi: 10.1360/972009-501