一种应用于深空探测的弱信号探测技术

林栩凌,邬志强,杨 颂,张 智,毕思文,张 璇,杜雨洁

(北京空间机电研究所,北京 100094)

摘 要: 深空探测对于人类开发利用太空资源、探索宇宙起源具有重要意义。作为深空探测的一个重要组成部分,遥感载荷起着无法替代的作用。由于深空探测作用距离远,导致遥感载荷的信噪比很低,因此如何有效地从弱信号中检测出有用信号是深空探测技术中必需解决的关键技术。根据未来深空探测对低于散粒噪声的超微弱信号探测的需求, 基于量子压缩态光场的散粒噪声小于标准量子极限的特点,提出一种基于量子压缩态光场的弱信号探测技术,给出了原理探索实验验证的结果。由于压缩光的量子特性会随着作用距离的增加而衰减,为了更贴近应用,设计了在接收端进行压缩光注入的新型激光雷达载荷方案,并给出了仿真的结果。

关键词: 深空探测; 弱信号; 量子; 压缩态

中图分类号: V11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0913002

A weak signal detection technique applied in deep space exploration

Lin Xuling, Wu Zhiqiang, Yang Song, Zhang Zhi, Bi Siwen, Zhang Xuan, Du Yujie

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: Deep space exploration has great significance for human being to develop and utilize space resources. Remote sensing payload is a very important part of deep exploration. Since the detection distance in the deep space exploration mission is very far, the SNR of the received signals is very low, the capture of extremely weak signals from deep space is a key technology. Based on the requirement of future deep space exploration for ultra weak signal detection, a week signal detection method was given. The method was based on quantum squeezed states, whose shot-noise was less than the standard quantum limit, and some experimental results were given. The result shows that this technique was a promising technology in future deep space exploration. Because the quantum properties of squeezed light is attenuated as the distance increases, in order to be closer to the application, a new laser radar scheme was designed which injected squeezed light at the receiving end, and simulation results were given.

Key words: deep space exploration; week signal; quantum; squeezed states

收稿日期: 2017-01-05; **修订日期:** 2017-02-10

基金项目: 民用航天资助项目(2013669)

作者简介: 林栩凌(1982-),高级工程师,博士,主要从事新型遥感器论证方面的研究。Email:gezila@sina.cn

0 引 言

深空探测是指对太阳系内除地球之外的行星及其卫星、小行星和彗星以及太阳系外的星球进行探测的航天活动[1]。深空探测相对于对地观测距离更远,因此在同等条件下载荷的信噪比更低,如何对弱信号进行有效的提取是深空探测必须解决的关键技术[2-3]。

通常,提高深空探测载荷获取能量的方式,一方面是增大系统的口径,然而受光学系统材料、加工工艺、加工成本以及运载能力等因素的限制,系统的口径不能无限制增大;另一方面采取技术手段抑制器件的各种经典噪声(热噪声、电路噪声等),当各种经典噪声及空间背景噪声等被抑制到极限时,量子噪声(散粒噪声)成为主要的噪声源。此时,如果信号的功率低于量子噪声功率,则信号将被淹没而不能被提取。由此可见,量子噪声的存在限制了未来深空探测遥感载荷对超弱目标信息的获取。文中根据未来深空探测对低于散粒噪声的微弱信号探测的需求,提出一种基于量子压缩态(挤压态)光场的弱信号探测技术。

1 基本原理

量子噪声是入射到器件光场中的固有噪声,利用经典的手段无法将其减小,是入射光场的涨落引起的噪声,光场噪声限制着信息的传输和提取,在理想情况下,原则上可消除系统所有的经典噪声,达到最大信噪比,但随着探测信号功率的减小,散粒噪声所占入射光的比重增加,限制了对超微弱信号的测量及信噪比的提高[4-6]。因此,需要从基础理论层面上突破提高信噪比的瓶颈,用新的理论指导提高信噪比方法的研究。

压缩态光场是一种非经典光场,在不违背海森堡不确定原理的条件下,它的某个分量的散粒噪声可以小于标准量子极限 (SQL)。相干光场的散粒噪声称为标准量子噪声极限。

设单模光场的光子产生算符和湮灭算符分别为$\hat{a}^+$和$\hat{a}$,两个正交相位厄密共轭算符$\hat{X}_1$和$\hat{X}_2$分别定义为[5]:

$$\hat{X}_1=1/2(\hat{a}^++\hat{a}) \tag{1}$$

$$\hat{X}_2=i/2(\hat{a}^+-\hat{a}) \tag{2}$$

由于$\hat{a}^+$和 $\hat{a}$满足对易关系$[a,a^+]=1$,那么,可以知道光场的第一和第二正交相位分量$\hat{X}_1$和$\hat{X}_2$满足对易关系

$$[\hat{X}_1,\hat{X}_2]=i/2 \tag{3}$$

对于相干态光场和真空光场而言,它们各自的两个正交相位分量具有相同的量子起伏,即

$$\langle\Delta\hat{X}_1^2\rangle=\langle\Delta\hat{X}_2^2\rangle=1/4 \tag{4}$$

根据量子力学中测不准关系,这就是量子光场的标准量子噪声极限。如果某个光场的某一个正交相位分量压缩到标准量子噪声极限值以下,即满足下式:

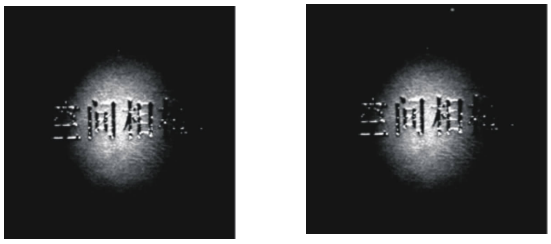
$$\langle\Delta\hat{X}_1^2\rangle<1/4 \text{ 并且} \langle\Delta\hat{X}_2^2\rangle> 1/4 \tag{5}$$

或者 $$\langle\Delta\hat{X}_1^2\rangle > 1/4 \text{ 并且} \langle\Delta\hat{X}_2^2\rangle< 1/4 \tag{6}$$

则称光场的第 i 个正交分量处于压缩态[6]。

2 原理验证实验

原理验证实验是通过对同等功率条件下压缩态光场和相干光场对同一目标进行成像,由于压缩光的散粒噪声低于相干光的散粒噪声,因此理论上压缩光成像图像质量要优于相干光成像图像质量(图 1)。实验中压缩光源的噪声压缩度为 6 dB,谱段 1 064 nm,压缩光源功率与相干光源功率同为 15 μW。



(a) 激光成像 (b) 压缩光成像

(a) Laser imaging (b) Squeezed light imaging

图 1 激光与压缩光成像对比图

Fig.1 Compared graph of laser imaging and squeezed light imaging

通过对比激光成像图像与压缩光成像图像在图像均值、整图信噪比、对比度及信息熵方面的评价指标(表 1),可知压缩光成像图像质量要优于激光成像质量,但是压缩光成像质量提高的并不明显,原因有以下几个方面:首先,制备的压缩态光场噪声压缩度不够高;其次,功率为 15 μW 时,散粒噪声所占噪声的比重很小;在次,成像探测方案还未优化到最佳。

表 1 激光与压缩光成像图像质量对比

Tab.1 Image quality comparison between laser imaging and squeezed light imaging

Item	Mean of image	SNR	Contrast	Information entropy
Laser imaging	1.025 7	0.219 2	0.913 9	1.051 9
Squeezed light imaging	1.083 7	0.223 8	0.953 7	1.077 8

3 远距离探测技术方案及模拟分析

在实验过程中，笔者发现压缩态光场是一种十分脆弱的光，它的量子特性会随着作用距离的增加而衰减,从而限制了其在远距离遥感上的应用。为了更贴近应用，设计了在接收端进行压缩光注入的新型激光雷达载荷方案，即在经典的相干测量雷达的接收光学系统和探测器之间插入量子成像增强模块来实现远距离的探测。量子成像增强模块包含两部分:压缩态注入装置和相位敏感放大装置。压缩态注入装置的作用是恢复进入光学口径的高频信息;相位敏感放大装置的作用是提高平衡零拍测量探测器的探测效率。新型激光雷达载荷的组成如图 2 所示,包含发射系统、接收光学系统、量子增强模块、探测系统和控制系统等。

发射系统的激光器采用经典光源，与传统激光雷达一致,发射的激光可以近似看作是相干态,到达接收系统的光信号也是经典电磁场。与传统激光雷达相区别的是探测部分采用的是平衡零拍探测器,读出信号不是信号光场的辐亮度，而是信号光的正交分量;在探测部分加入了量子增强模块,它包含两个部分,一个部分是真空压缩态光场注入装置,一个部分是位相敏感放大装置。

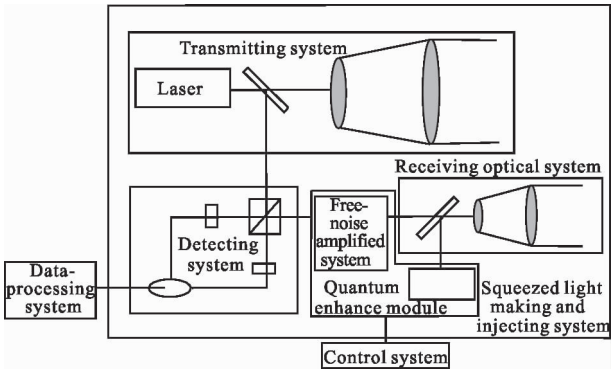
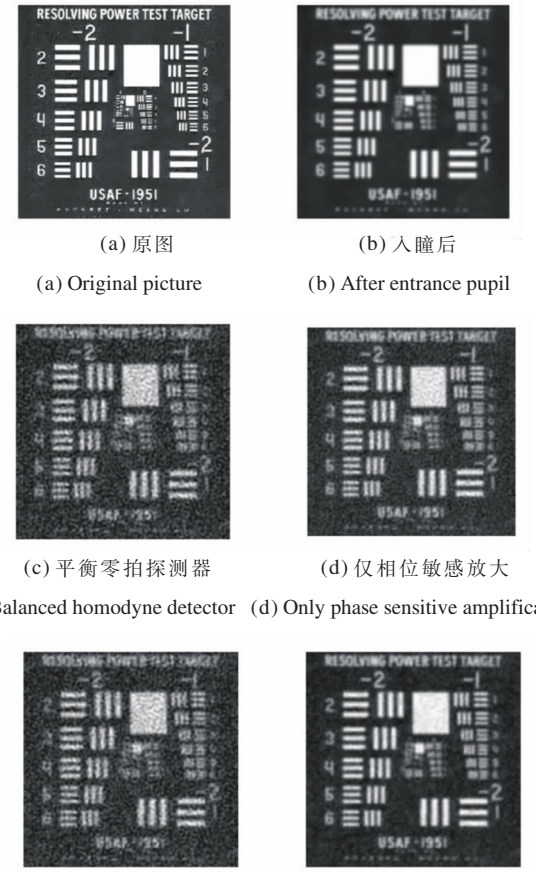


图 2 载荷系统组成框图

Fig.2 Schematic diagram of payload system

对 USAF 军用靶标进行了模拟,见图 3,分别对经过高斯型软变光阑后的图像、传统平衡零拍探测图像、仅考虑真空压缩光注入的图像、仅考虑位相敏感放大



(a) 原图 (a) Original picture

(b) 入瞳后 (b) After entrance pupil

(c) 平衡零拍探测器 (c)Balanced homodyne detector

(d) 仅相位敏感放大 (d) Only phase sensitive amplification

(e) 仅压缩光注入 (e) Only squeezed light injecting

(f) 相位敏感放大+压缩光注入 (f) Phase sensitive amplification and squeezed light injecting

图 3 对 USAF 军用靶标成像的仿真模拟结果

Fig.3 Simulation imaging result of USAF army target

的图像，和同时考虑真空压缩光注入及位相敏感放大的图像进行了仿真。结果表明，真空压缩光注入配合位相敏感放大，可以提高性噪比，提升图像质量。

4 结 论

深空探测技术发展所面临的关键问题之一是在满足应用的技术要求下，如何尽可能地获得更远的作用距离和更高的测量精度，影响探测距离和测量精度的一个核心指标是系统的信噪比。文中针对由于光的离散性引入的散粒噪声，采用压缩态光场技术使其低于标准量子噪声极限，并利用此光场进行了成像对比实验。此外，针对量子光场在远距离遥感应用上存在的瓶颈，提出一种基于量子压缩态(挤压态)光场的弱信号探测技术，为量子技术在遥感领域的应用提供了一种新的解决途径。

参考文献：

[1] Ye Peijian, Deng Xiangjin, Peng Jing. Features of deep space explor-ation in other countries(part 1)[J]. ***Spaceraft Environment Engineering***, 2008, 25(5): 401-415. (in Chinese)
叶培建，邓湘金，彭兢.国外深空探测态势特点与启示(上)[J].航天器环境工程，2008，25(5)：401-415.

[2] Wang Weibing, Wang Tingfeng, Guo Jin. Orbit determination for space target based on opto -electrical imaging, tracking and ranging on satellite[J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2015, 23(2): 528-539. (in Chinese)
王卫兵，王挺峰，郭劲. 基于星载光电成像跟踪测距的空间目标定轨[J]. 光学 精密工程，2015, 23(2): 528-539.

[3] Yang Fan, Xuan Yimin, Han Yuge. Analysis of SNR for ground based infrared detection of space object [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(11): 2879-2885. (in Chinese)
杨帆，宣益民，韩玉阁. 空间目标红外地基探测的信噪比分析[J]. 红外与激光工程，2012, 41(11): 2879-2885.

[4] Sun Chengming, Yuan Yan, Zhao Fei. Analysis of SNR for spacebased imaging detection of space object [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(5): 1654-1659. (in Chinese)
孙成明，袁艳，赵飞. 空间目标天基成像探测信噪比分析 [J]. 红外与激光工程，2015, 44(5): 1654-1659.

[5] Li Song, Zhou Hui, Shi Yan, et al. Theoretical model for return signal of laser altimeter [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2007, 15(1): 33-39. (in Chinese)
李松，周辉，石岩，等. 援激光测高仪的回波信号理论模型[J]. 光学 精密工程，2007, 15(1): 33-39.

[6] Abshire J B, Sun X L, Afzal R S. Mars orbiter laser altimeter: receiver model and performance analysis [J]. ***Applied Optics***, 2000, 39(15): 2449-2460.

[7] Peng Kunchi. Generation and application of squeezed state light sub -shot noise limit optical measurement and quantum information[J]. ***Physics***, 2001, 30(5): 300-305. (in Chinese)
彭堃墀. 光场压缩态的产生及其在亚散粒噪声光学测量和量子信息中的应用[J]. 物理，2001，30(5): 300-305.

[8] Yang Bojun. Elements of Quantum Optics [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 1996. (in Chinese)
杨伯君. 量子光学基础 [M]. 北京：北京邮电大学出版社，1996.