

基于单微波量子探测器的微波信号量子二阶相干性实验研究

严会玲¹, 吴养曹^{1*}, 赵军民¹, 尤立星², 赵卫岗³, 李桂红¹, 王平¹, 段可欣¹

¹ 中国电子科技集团公司第三十九研究所陕西省天线与控制技术重点实验室, 陕西 西安 710065;

² 中国科学院上海微系统与信息技术研究所信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050;

³ 西安交通大学电子科学与工程学院电子器件与材料研究所, 陕西 西安 710049

摘要 通过对单载波信号和热噪声信号的单微波量子探测研究, 验证了基于微波光学上转换的单微波量子探测器对弱微波信号的响应能力。基于量子光学理论, 开展了微波信号二阶相干度特性的实验研究, 实验证明了微波波段的单载波信号和热噪声的二阶量子相干度具有与光学波段的相干光源和热光源相同的量子特性。

关键词 成像系统; 微波量子; 单微波量子探测; 微波信号二阶量子相干度

中图分类号 O455+.4; O441.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011028

Experimental Study on Second-Order Quantum Coherence Characteristics of Microwave Signals Based on Single Microwave Quantum Detectors

Yan Huiling¹, Wu Yangcao^{1*}, Zhao Junmin¹, You Lixing², Zhao Weigang³, Li Guihong¹, Wang Ping¹, Duan Kexin¹

¹ The 39th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shaanxi Key Laboratory of Antenna and Control Technology, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

² State Key Laboratory of Information Functional Materials, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

³ Institute of Electronic Devices and Materials, School of Electronic Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract Through the study of single microwave quantum detection of single carrier signal and thermal noise signal, the response ability of single microwave quantum detector based on microwave optical upconversion to weak microwave signals is verified. Based on the quantum optical theory, the second-order coherence properties of microwave signals are studied experimentally. It is proved that the second-order quantum coherence of single carrier signal and thermal noise in microwave band has the same quantum properties as the coherent light source and thermal light source in optical band.

Key words imaging systems; microwave quantum; single microwave quantum detection; second-order quantum coherence of microwave signals

OCIS codes 110.1650; 030.5260; 040.5570; 120.1880

1 引言

在量子理论中, 波粒二象性是所有物质都具备

的性质。因此, 电磁波也呈现粒子特性, 在光学频段表现为光子, 在微波频段则表现为微波量子。

单微波量子探测器基于微波量子技术, 包括超

收稿日期: 2021-04-07; 修回日期: 2021-05-09; 录用日期: 2021-05-12

E-mail: wuyangcao_cetc39@163.com

导约瑟夫森结探测器、回音壁和微波光学上转换探测等^[1-13]。其中,超导约瑟夫森结探测需要较高的半导体制程以及 10 mK 左右的超低温环境来屏蔽微波的热噪声^[2-3,14];回音壁借助于超高光学质量的环形谐振腔来实现高密度光学模式场,从而增强微波对光的调制效果^[15];基于微纳光机的微波上转换装置^[16-17]需要较高的制备工艺,需要极低温环境或隔离环境扰动,这不利于实际的应用。

因此,本文提出了基于波导型电光调制器和超导纳米线单光子探测器的微波光学上转换单微波量子探测器结构,其不需要极低温(mK)环境,光学系统全部由光纤连接实现,集成方便,且容易实现。

在成功研制了基于微波光学上转换的单微波量子探测器后,本文通过类比量子光学理论和技术^[1,6-8],

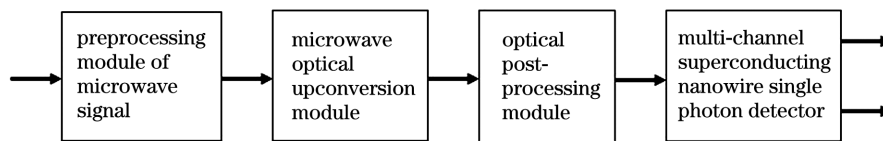


图 1 基于微波光学上转换的单微波量子探测器系统示意图

Fig. 1 Schematic of single microwave quantum detection system based on microwave optical upconversion

微波信号预处理模块对输入信号特性进行放大和滤波等预处理,当来波为信号源(相干光源)时,不进行处理;当来波为外部天线输入信号(相干光源+热噪声)时,则通过放大和滤波来实现滤噪,以满足微波光学上转换时信号信噪比的要求。

微波光学上转换模块的功能是完成微波到光学频段的转换,主要包含高性能窄线宽激光器和高性能电光调制器等。

光学后处理模块的功能是抑制载波信号与其他高阶谐波,包含极窄带光学滤波器(0.03 nm 线宽)、光纤衰减器和光纤偏振调节器等,因为超导纳米线探测器存在偏振依赖性,所以需要保证被探测信号的偏振统一。

2.2 微波信号的单微波量子探测实验结果

我们利用单微波量子探测器开展了不同类型的微波信号的探测实验。图 2 和图 3 分别为单载波信号和微波噪声的量子数探测结果。

实验结果表明,所搭建系统对微波信号具有单微波量子响应能力。由图 2、3 可以看出,单载波微波光子呈现离散分布,热噪声微波光子呈现聚束特性,这基本与光子分布的粒子特性一致,实验结果符合微波量子探测器的要求。

开展了微波信号二阶量子相干度的实验研究^[5-6,18],以为后继微波量子探测器信号的处理提供参考。

2 基于微波光学上转换的单微波量子探测器技术

2.1 单微波量子探测器方案

基于微波光学上转换的单微波量子探测器方案如图 1 所示,系统由微波信号预处理模块、微波光学上转换模块(波导型电光调制器,带宽为 0~15 GHz)、光学后处理模块及多通道超导纳米线单光子探测器(中国科学院上海微系统与信息技术研究所研制)等组成。由于采用了微波光学上转换模块与多通道超导纳米线单光子探测器级联的方式,能够实现较高的光子计数效率,继而保证了单微波量子探测器的高探测效率和低暗计数。

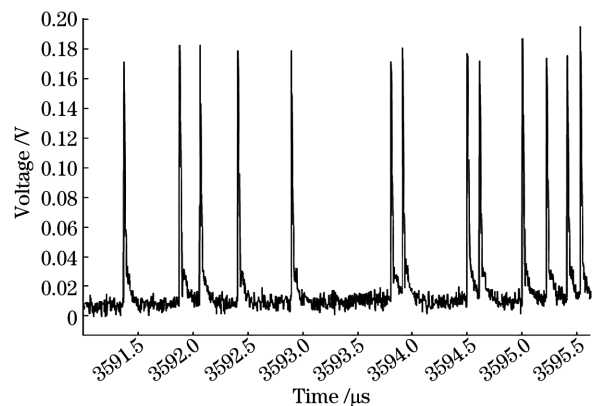


图 2 单载波信号的量子数探测结果

Fig. 2 Quantum number detection results of single carrier wave signals

3 微波信号的二阶量子相干性实验

3.1 微波信号的二阶量子相干性理论

二阶量子相干性是在二阶经典相干性的基础上,基于量子光学理论得到的处理结果。

二阶相干函数为

$$g^{(2)}(t) = \frac{\langle E^{(-)}(t)E^{(-)}(t+\tau)E^{(+)}(t)E^{(+)}(t+\tau) \rangle}{\langle E^{(-)}(t)E^{(-)}(t+\tau) \rangle \langle E^{(+)}(t)E^{(+)}(t+\tau) \rangle}, \quad (1)$$

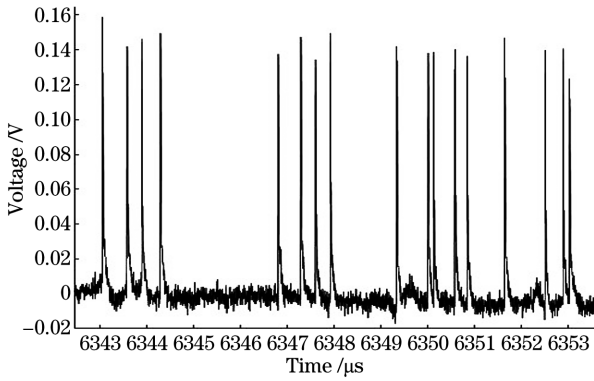


图 3 微波热噪声信号的量子数探测结果

Fig. 3 Quantum number detection results of microwave thermal noise signals

式中： $g^{(2)}(t)$ 为 t 时刻的二阶相干性； $E^{(-)}(t)$ 为 t 时刻电场算符的负频部分； $E^{(+)}(t)$ 为 t 时刻电场算符的正频部分； τ 为时间窗口； $\langle \cdot \rangle$ 表示对时间求平均。

单模光场的相干态满足

$$g^{(2)}(0) = 1. \quad (2)$$

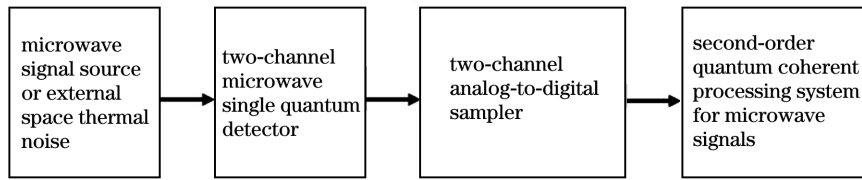


图 4 微波信号的二阶相干性实验系统示意图

Fig. 4 Schematic of experimental system of second-order coherence of microwave signals

3.3 微波信号的二阶相干性实验结果

3.3.1 微波热噪声信号的量子二阶相干性实验结果

微波热噪声的二阶相干性实验结果如图 4 所示，微波上转换后的光学信号分为两路，每一路对应两路单量子探测器中的一路。在实验过程中，调节噪声强度和量子探测系统的衰减器，使得每一通道的微波量子在采样期间得到尽可能多的计数，这样可以保证二阶相干度数据的稳定性。实验在 32 ms 内测量到的量子数约为 9×10^4 ，计数率约为 $2.7 \times 10^6/s$ ，符合量子二阶相干度实验所需的大样本数要求。实验得到的数据经过处理，得到 $g^{(2)}$ 约为 1.4。其原因是由于微波噪声信号的带宽 (MHz) 远小于光学热噪声信号 (THz)，因此其 $g^{(2)}$ 的值趋向于赝热光的值，低于热光的 $g^{(2)} = 2$ ，高于相干光的 $g^{(2)} = 1$ 。实验结果如图 5 所示，结果表明，二阶相干度大于 1 的时间约为 50 ns，这与噪声带宽 20~40 MHz 吻合。

3.3.2 单载波微波信号的量子二阶相干性实验结果

单载波信号的量子二阶相干性实验流程与热噪

单模光场的热光场满足

$$g^{(2)}(0) = 2. \quad (3)$$

(2)、(3) 式是量子光学理论在光学频段得到的二阶相干度结果。微波和光学信号相比，频率低 5 个数量级，但根据量子理论，二者的量子统计特性应该一致。

3.2 微波信号的二阶相干性实验

在光学频段，由于量子光学技术的发展，光学信号的量子特性研究相对完善，相干光的二阶相干度 ($g^{(2)}$) 等于 1，热光的二阶相干度大于 1，后者在理想情况下等于 2。由于微波的单量子探测难度大，微波信号的二阶相干度研究相对很少。本文在单微波量子探测实验基础上，开展了微波信号的二阶相干性实验工作。实验系统示意图如图 4 所示，分为微波热噪声二阶量子相干度测试系统和微波单载波信号二阶量子相干度测试系统。热噪声源是天线接收的空间噪声的直接放大滤波，单载波信号源采用微波信号源。

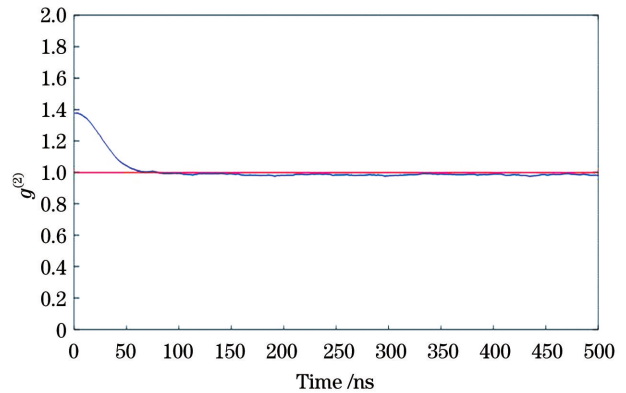


图 5 热噪声的二阶相干度测量结果

Fig. 5 Measurement results of second-order coherence of thermal noises

声实验一致，使用频率为 10 GHz 的单载波信号。本次实验在 32 ms 时间段内测量到的量子数约为 9×10^4 ，计数率约为 $2.7 \times 10^6/s$ ，量子数较多，符合量子 $g^{(2)}$ 实验所需的样本数要求。实验结果如图 6 所示，对于单载波信号， $g^{(2)}$ 约为 1 ± 0.03 ，符合微波单载波对应相干光源的理论设定。

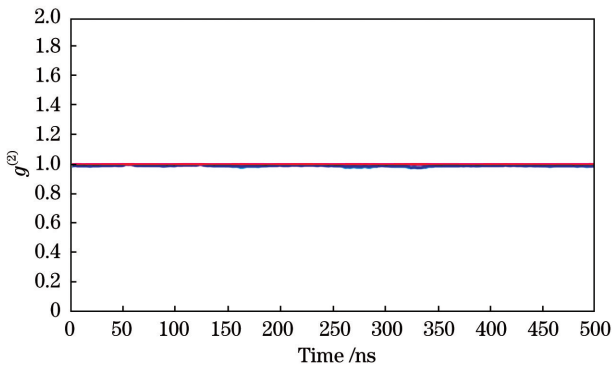


图 6 单载波信号的量子二阶相干性实验结果

Fig. 6 Experimental results of second-order coherence of single carrier wave signals

4 结 论

利用基于微波光学上转换的单微波量子探测器,开展了微波单载波和热噪声信号的二阶相干性实验研究,实验结果和理论预期一致,对于后继开展微波信号量子特性研究和微波量子探测的理论研究有较大意义。

致谢 感谢西安电子科技大学许定国老师,感谢西安交通大学的周宇、郑怀斌、刘建彬、陈辉和庄永勇老师,感谢西南交通大学韦联福老师和中国科学院西安光学精密机械研究所张同意老师等的指导和帮助,感谢中国电子科学研究院的陆军、张雪松和栾添等对本工作的帮助和支持。

参 考 文 献

- [1] Guo G C. Quantum optics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990.
郭光灿. 量子光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [2] Beltran C, Angel M. Development of a Josephson parametric amplifier for the preparation and detection of nonclassical states of microwave fields [D]. Colorado: University of Colorado, 2010: 1-281.
- [3] Chen Y F, Hover D, Sendelbach S, et al. Microwave photon counter based on Josephson junctions [J]. Physical Review Letters, 2011, 107(21): 217401.
- [4] Wasilousky P A, Smith K H, Glasser R, et al. Quantum enhancement of a coherent lidar receiver using phase-sensitive amplification [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8163: 816305.
- [5] Glauber R J. The quantum theory of optical coherence [J]. Physical Review, 1963, 130(6): 2529-2539.
- [6] Lahiri M. Coherence and statistical optics [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.
- [7] Barzanjeh S, Abdi M, Milburn G J, et al. Reversible optical-to-microwave quantum interface [J]. Physical Review Letters, 2012, 109(13): 130503.
- [8] Lanzagorta M. Quantum radar [M]. Zhou W X, Wu M Y, Hu M C, et al. Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
Marco Lanzagorta. 量子雷达 [M]. 周万幸, 吴鸣亚, 胡明春, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [9] Jin S Q. Quantum control physics [M]. Beijing: Science Press, 2015.
金石琦. 量子调控物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [10] Zhang Z M. Quantum optics [M]. Beijing: Science Press, 2015.
张智明. 量子光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [11] Nair R, Yen B J, Shapiro J H, et al. Quantum-enhanced lidar ranging with squeezed-vacuum injection, phase-sensitive amplification, and slow photodetectors [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8163: 816310.
- [12] Besse J C, Gasparinetti S, Collodo M C, et al. Single-shot quantum nondemolition detection of individual itinerant microwave photons [J]. Physical Review X, 2018, 8(2): 021003.
- [13] Lei Y T. Photoelectric detection technology [M]. 2nd ed. Beijing: China Measurement Press, 2009.
雷玉堂. 光电检测技术 [M]. 2 版. 北京: 中国计量出版社, 2009.
- [14] Piedjou Komnang A S, Guarcello C, Barone C, et al. Analysis of Josephson junctions switching time distributions for the detection of single microwave photons [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2021, 142: 110496.
- [15] Rueda A, Sedlmeir B, Michele C, et al. Efficient microwave to optical photon conversion: an electro-optical realization [J]. Optica, 2016, 3(6): 597-604.
- [16] Peterson R W, Purdy T P, Kampel N S, et al. Laser cooling of a micromechanical membrane to the quantum backaction limit [J]. Physical Review Letters, 2016, 116(6): 063601.
- [17] Lehnert K W, Regal C A, Peterson R W, et al. Photon efficient electro-optic conversion via a micromechanical oscillator [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, June 5-10, 2016, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2016: SW4Q.5.
- [18] Gatti A, Brambilla E, Bache M, et al. Correlated imaging, quantum and classical [J]. Physical Review A, 2004, 70: 013802.