

# 基于量子压缩感知的宽带射频信号测量\*

韩彦睿<sup>1)2)</sup> 李伟<sup>1)2)</sup> 臧延华<sup>1)2)</sup> 杨昌钢<sup>1)2)</sup> 陈瑞云<sup>1)2)</sup> 张国峰<sup>1)2)</sup>  
秦成兵<sup>1)2)</sup> 胡建勇<sup>1)2)†</sup> 肖连团<sup>1)2)</sup>

1) (山西大学激光光谱研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

2) (山西大学极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2023年3月16日收到; 2023年6月12日收到修改稿)

随着雷达、电子战和5G通信等无线射频技术的快速发展,对宽带射频信号的测量和实时频谱表征变得越来越重要.传统射频信号实时测量技术受模数转换器采样率和数字信号处理能力的限制,存在测量带宽窄、数据量大、易受电磁干扰等问题.本文提出一种基于量子压缩感知的射频信号测量技术,使用集成电光晶体作为射频传感,通过被测射频信号调制光子波函数构建压缩感知机,实现对宽带射频信号的压缩测量,显著提升了频谱感知带宽.实验演示了工频和中频高压信号的长时间频谱监测,以及高频射频信号的实时频谱测量.在傅里叶极限频谱分辨率下,实现了GHz量级的实时频谱分析带宽,数据压缩率达到 $1.7 \times 10^{-5}$ ,可以满足5G无线通信、认知无线电等应用对宽带射频信号频谱测量的需求,为发展下一代宽带频谱感知技术提供了新的技术路径.

**关键词:** 宽带频谱测量, 量子压缩感知, 射频传感, 实时分析带宽

**PACS:** 03.67.-a, 42.50.-p, 67.10.Fj

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230398

## 1 引言

实现宽带射频频谱实时测量是开展射频相关技术测试和性能表征的关键,在雷达、通信和电子战<sup>[1-6]</sup>等领域具有广泛的应用,并且随着5G无线通信等技术的发展,对射频信号测量的实时分析带宽和分辨率都有了更高的要求.根据信号处理方式的不同,传统的频谱分析技术可以分为扫描调谐频谱分析和实时频谱分析<sup>[7]</sup>.扫描调谐频谱分析具有较大的频谱测量范围,但是谱分辨率较差,且难以捕获偶发信号,无法适用于宽带实时测量应用.传统实时频谱分析技术可以实时捕获被测信号频谱,但受限于模数转换器采样速率、数据存储空间以及电子学数字信号处理能力等,存在实时分析带宽

小、数据量大等问题,现有的先进商用实时频谱分析仪实时分析带宽被限制在1GHz以内<sup>[8]</sup>,难以满足5G无线通信等应用对宽带射频信号频谱测量的需求.

压缩感知由David等<sup>[9-11]</sup>在信号逼近和稀疏分解等理论的基础上建立,能够通过亚奈奎斯特采样率恢复变换域稀疏信号,具有实现高效、快速和宽带信号测量的潜力.目前已有大量文献<sup>[12-14]</sup>报道基于传统电子学的压缩感知系统,其通过产生伪随机数触发采样或随机混频等方式进行亚奈奎斯特采样并恢复变换域稀疏信号.然而基于传统电子学的压缩感知体系受限于随机数的生成速率和系统时间抖动,其实时分析带宽仍限制在1GHz.近年来基于微波光子学的实时频谱测量技术在一定程度上拓展了实时分析带宽<sup>[15-20]</sup>,但是现有技

\* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 62105193)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jyhu@sxu.edu.cn

术通常只能对单一频率信号进行测量,且频谱分辨率一般在 MHz 量级,尚无法满足现实环境对复杂频谱信号的全频段监测需求<sup>[21,22]</sup>.量子力学在精密测量领域的应用已经带来了诸多益处,利用量子资源和效应可以实现超越经典方法的测量精度、测量动态范围等.2020年,美国加利福尼亚大学、加州理工学院和麻省理工学院联合报道了一种基于微波光子技术的宽带微波信号时域采样示波器<sup>[23]</sup>.2021年中国科学院半导体研究所利用低抖动超导纳米线单光子探测器和时间相关单光子计数模块展示了 8 GHz 的微波信号波形测量<sup>[24]</sup>,表明了量子技术在微波测量领域应用的可行性.

本文提出一种基于量子压缩感知的宽带射频信号频谱测量技术,通过被测射频信号调制光子波函数以及量子态测量塌缩等量子物理过程构建压缩感知机,实现宽带、高分辨射频信号频谱测量.实验使用电光晶体作为射频信号传感器,利用电效应的宽带频谱响应特性实现射频信号对相干光子波函数的宽带调制.利用相干光子波函数测量塌缩的随机性,构建量子压缩感知体系,结合最优化数据恢复算法实现对射频信号频谱的宽带测量.本工作弥补了传统电子学和微波光子学射频信号测量的缺陷,显著提升了频谱测量带宽、分辨率和数据压缩率,实验演示了从低频(Hz量级)射频信号到 GHz 量级的宽带频谱测量,频谱分辨率达到傅里叶极限分辨率,数据压缩率达到  $1.7 \times 10^{-5}$ ,在应用上满足 5G 通信等对宽带射频信号频谱测量需求.

## 2 实验原理

### 2.1 量子压缩感知原理

采样定理要求在信号采样时采样率大于被测信号带宽的 2 倍,才可从采样信号中正确恢复被测信号.压缩感知指出只要信号是可压缩的或者在某个变换域内是稀疏的,就可以用一个与变换基不相关的观测矩阵将高维信号投影到一个低维空间,然后通过求解一个最优化问题从少量投影中重构原始信号.

利用压缩感知理论的前提是信号是稀疏的或者可压缩的,设  $\mathbf{X}$  是长度为  $L$  的离散信号,  $\psi$  是选取的  $L \times L$  规范正交基,  $\mathbf{X}$  在  $\psi$  上的稀疏表示为

$$\mathbf{X} = \psi\beta, \quad (1)$$

式中  $\beta$  和  $\mathbf{X}$  是  $L \times 1$  维矩阵,如果  $\beta$  中仅有  $K(K \ll L)$  个非零系数,则  $\mathbf{X}$  为  $\psi$  域上的  $K$  稀疏信号.

设  $\Phi$  是  $M \times L$  维观测矩阵,则压缩感知测量过程可表示为

$$\mathbf{y} = \Phi\mathbf{X} = \Phi\psi\beta, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{y}$  是  $M \times 1$  维矩阵.如果原始信号  $\mathbf{X}$  的正交基和观测矩阵  $\Phi$  具有非相干性,同时乘积矩阵  $\Phi\psi$  满足有限等距条件时,则系统测量得到的观测值能通过恢复算法求出  $\beta$  的唯一解<sup>[25,26]</sup>.

本文提出的量子压缩感知是一种全新的压缩感知实现方式,与传统基于电子学搭建的压缩感知系统的不同之处在于,其通过量子物理的过程实现对被测信号的压缩测量,利用信号稀疏性从少量投影信息中重构被测信号信息,被测物理量可以为经典的物理量,如射频信号频率等.本文利用相干光子波函数在测量时塌缩的随机性,满足压缩感知所要求的基不相关条件.事实上,随机观测矩阵是压缩感知中最常见的观测矩阵.本文通过被测射频信号调制到光子波函数,并通过时间相关单光子计数技术实现量子压缩感知过程,完成对射频信号的压缩采样.

相干态  $|\alpha\rangle$  的时域光子计数统计服从泊松分布,在频域内表现为白噪声分布<sup>[27-29]</sup>.通过射频信号调制光子波函数,同时也调制了光子在某一时刻被探测的概率.假设被测射频信号为正弦波,被调制后的相干光子,在  $t$  时刻被探测到的概率为

$$p = \sum_{n=0}^{\infty} p_n \cdot \frac{\mu}{2} \cdot [1 + \cos(2\pi ft + \varphi)], \quad (3)$$

式中  $\varphi$  为射频信号的初始相位,  $\mu$  为平均光子数,  $P_n$  为探测时隙出现  $n$  个光子的概率.实验中通过记录每个光子达到时间,结合离散傅里叶变换算法实现稀疏频谱信号恢复<sup>[29]</sup>.

### 2.2 射频信号传感基本原理

利用电光效应实现对射频信号的传感,在射频信号的作用下,晶体介电特性的变化使晶体折射率发生改变,其变化量与电场的大小成正比<sup>[30]</sup>.实验中选择铌酸锂晶体作为射频信号传感元件,采用  $z$  轴加外加电场的调制方式.电光效应引起的  $o$  光和  $e$  光产生的折射率差为

$$\Delta n = n_1 - n_2 = (n_o - n_e) + \frac{1}{2}(n_e^3 r_2 - n_o^3 r_1) E, \quad (4)$$

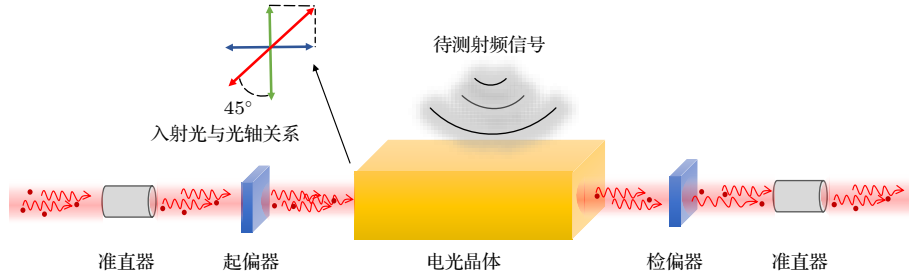


图 1 射频信号传感结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of radio frequency signal sensing structure.

其中  $n_o$  和  $n_e$  为双折射晶体的折射率;  $r_1$  和  $r_2$  为晶体的线性电光系数,  $E$  为电场强度. 通过长度为  $L$  的晶体两束光波产生的相位差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L = \frac{2\pi L}{\lambda} \cdot (n_o - n_e) + \frac{\pi L}{\lambda} \cdot (n_e^3 r_2 - n_o^3 r_1) E, \quad (5)$$

式中  $\lambda$  表示光波长. 由 (5) 式可以看出, 双折射  $o$  光和  $e$  光之间的相位差与外加电场强度成正比. 经过检偏器后, 输出光强为

$$I_o = I_i \sin^2(\delta/2) = I_i \sin^2 \left[ \frac{\pi}{\lambda} (n_o - n_e) + \frac{\pi L}{2\lambda} (n_e^3 r_2 - n_o^3 r_1) E \right], \quad (6)$$

式中  $I_o$  表示输出光强度,  $I_i$  表示输入光强度. 设计的射频信号传感结构如图 1 所示, 通过保偏光纤准直器耦合进行光输入, 输入的光经过起偏器后转变为线偏振光, 入射光偏振方向与晶体快慢轴呈  $45^\circ$  夹角. 经过电光效应的作用传输到检偏器, 最后通过光纤耦合器进行输出, 所施加电场强度与输出光强成正比例关系.

### 3 实验系统

基于量子压缩感知的宽带射频信号测量系统如图 2 所示, 系统由两部分组成, 即射频信号传感单元和时间相关单光子计数单元. 在射频信号传感单元, 连续激光器发射波长为 633 nm 的激光, 射频信号传感将待测射频信号频率信息加载到激光上, 将射频信号转换成了比较容易观测的光信号. 电光晶体作为射频信号传感, 在电场作用下能够通过电光效应改变出射光的波函数几率幅, 从而改变光子在时域被探测到的概率.

在时间相关单光子计数单元, 射频信号传感输出的光经过衰减器衰减到单光子量级, 衰减到单光子量级的光具有明显的粒子性, 可以避免背景噪声

的干扰, 提升系统探测的灵敏度, 提高系统的信噪比. 衰减到单光子量级的光被单光子探测器探测, 这里选用 Becker&Hickl GmbH 公司生产的可见光单光子探测器, 目的是为了尽可能降低死时间和时间抖动, 单光子探测器以一定概率响应光子信号, 并将探测到的光子信号转化为脉冲信号由时间间隔分析仪记录每个光子的绝对到达时间. 光子在时域中随机出现, 利用光子波函数测量随机塌缩的性质, 实现了量子压缩感知测量. 光子到达时间测量的准确性决定了本系统的实时分析带宽. 本实验为了保证记录时间的准确性, 将时间间隔分析仪参考时钟锁定到 GPS 上, GPS 信号通过 GPS 天线获取, 最后通过对光子到达时间进行离散傅里叶变换数据后处理进行射频信号频谱恢复 [29].

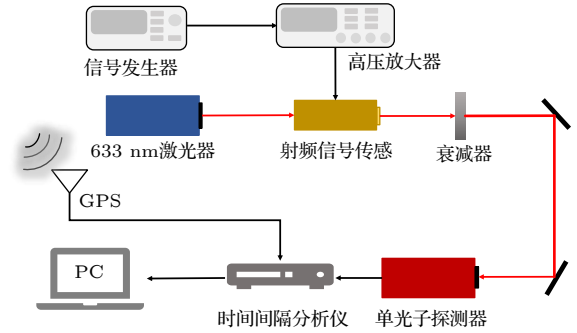


图 2 基于量子压缩感知的宽带射频信号测量系统示意图  
Fig. 2. Schematic diagram of broadband radio frequency signal measurement system based on quantum compressed sensing.

### 4 测量结果与分析

在完成射频信号传感研制和系统搭建后, 为了测试和校准射频信号传感的实际性能, 首先将射频信号传感输出直接接到光电探测器和示波器, 测试了射频信号传感的输入输出特性. 采用信号发生器产生工频正弦信号, 经过高压放大器后施加到平行

板电极上, 平行板电极正负极分别置于传感晶体上下表面. 图 3 为被测射频信号为工频正弦信号时传感输出响应, 射频信号传感输出与施加电压两者具有相同的变化趋势.

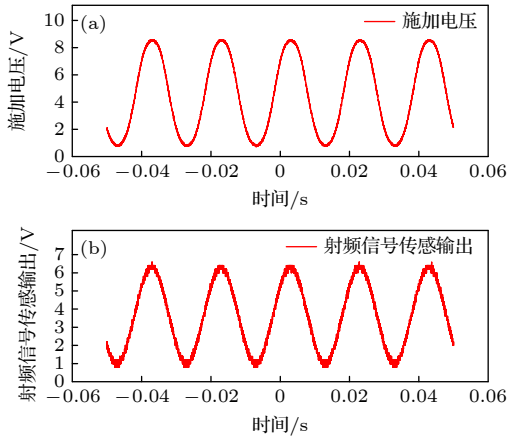
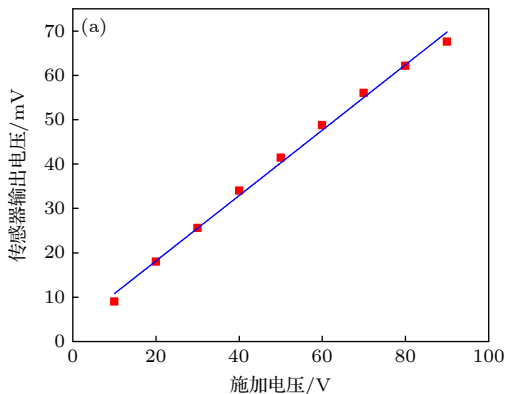


图 3 工频电场作用下射频信号传感响应

Fig. 3. Sensor response under the action of power frequency electric field.

为了测试传感器的电压响应, 实验中保持输入信号频率 50 Hz 不变, 在平行板电极上施加振幅为 10—90 V 的工频正弦电压, 分别记录每个输入振幅所对应的传感器输出幅值大小, 以施加信号幅值为横坐标, 射频信号传感输出信号幅值为纵坐标, 做线性拟合曲线如图 4(a) 所示. 从图 4 可以看出, 在 10—90 V 内存在良好的线性输入输出关系. 对测量数据点进行线性拟合, 获得线性拟合方程截距  $C$ , 斜率  $K$  和线性拟合度  $R$ . 如表 1 所列, 参数  $C$ ,  $K$  和  $R$  拟合值分别为 3.41944 mV, 0.73717 mV 和 0.99611.

拟合数据中, 线性拟合度越接近于 1 表示线性



拟合度越好, 斜率的标准差实际表明斜率的变化程度. 斜率标准差较小, 表明拟合曲线在不同位置处的变化率比较稳定. 截距标准差是对截距项进行标准化处理后的标准差, 表示自变量与因变量之间的相关性强弱, 拟合结果的截距标准差较大, 主要由于射频信号传感受到外部环境温度、电磁干扰等的影响, 系统受到较多的噪声和干扰. 总体上从实验数据和数值分析可以看出, 本文设计的射频信号传感的输出电压与施加电压在一定范围内呈良好的线性关系.

表 1 线性拟合分析结果

Table 1. Linear fitting analysis results.

截距 $C$		斜率 $K$		线性拟合度 $R$
参数值/mV	标准差	参数值/mV	标准差	
3.41944	0.98036	0.73717	0.01742	0.99611

为了测试传感的频率响应, 实验中保持施加电场场强 1000 V/m 不变, 信号频率从 50 Hz 逐渐增大到 2 kHz, 得到射频信号传感的频率响应曲线如图 4(b) 所示. 可以看出, 随着频率增大, 射频信号传感输出电压呈现非线性下降, 这主要是由于平行板电极自身响应频率的限制. 针对高频、低振幅射频信号的测量需要对电光晶体采用波导结构设计.

高电压领域电场波形复杂多变, 测试校准了在正弦波、三角波和方波电场三种典型电场信号作用下, 射频信号传感时域响应特性, 如图 5 所示. 测试结果表明, 射频信号传感能够很好地跟随不同形状的标准电场, 并且在加大外加电压的频率后, 射频信号传感仍然能够按照线性关系输出对应波形.

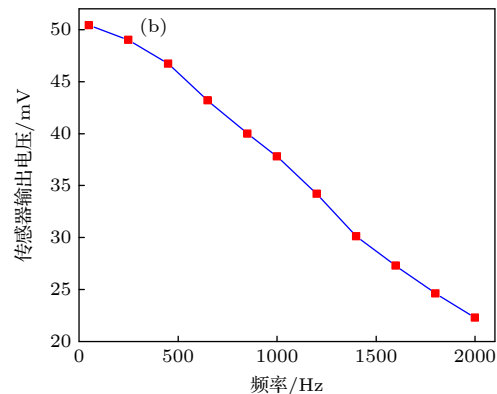


图 4 射频信号传感特性 (a) 输入输出振幅特性; (b) 频率响应曲线

Fig. 4. Radio frequency signal sensing characteristics: (a) Input and output characteristics; (b) frequency response curve.

测试与校准完射频信号传感后, 利用图 2 所示基于量子压缩感知的射频信号传感实验系统进行射频信号频谱测量. 首先针对工频 (50 Hz) 与中频 (1 kHz) 进行频谱监测, 采用信号发生器与高压放大器组合模拟产生待测射频信号施加到射频信号传感上, 对采集到的光子到达时间, 利用离散傅里叶变换算法进行频谱重构. 测量结果如图 6 所示.

可以看出该射频信号传感可以很好地恢复出工频 (50 Hz) 信号与中频 (1 kHz) 信号的频谱. 同时针对现在对于射频信号测量的新要求, 对被测射频信号进行长时间记录与监测, 本实验针对工频 (50 Hz) 信号与中频 (1 kHz) 信号进行 1 h 的记录和监测, 测量结果见图 7. 可以看出在射频信号传感可以很好地恢复出工频和中频信号的频谱信息.

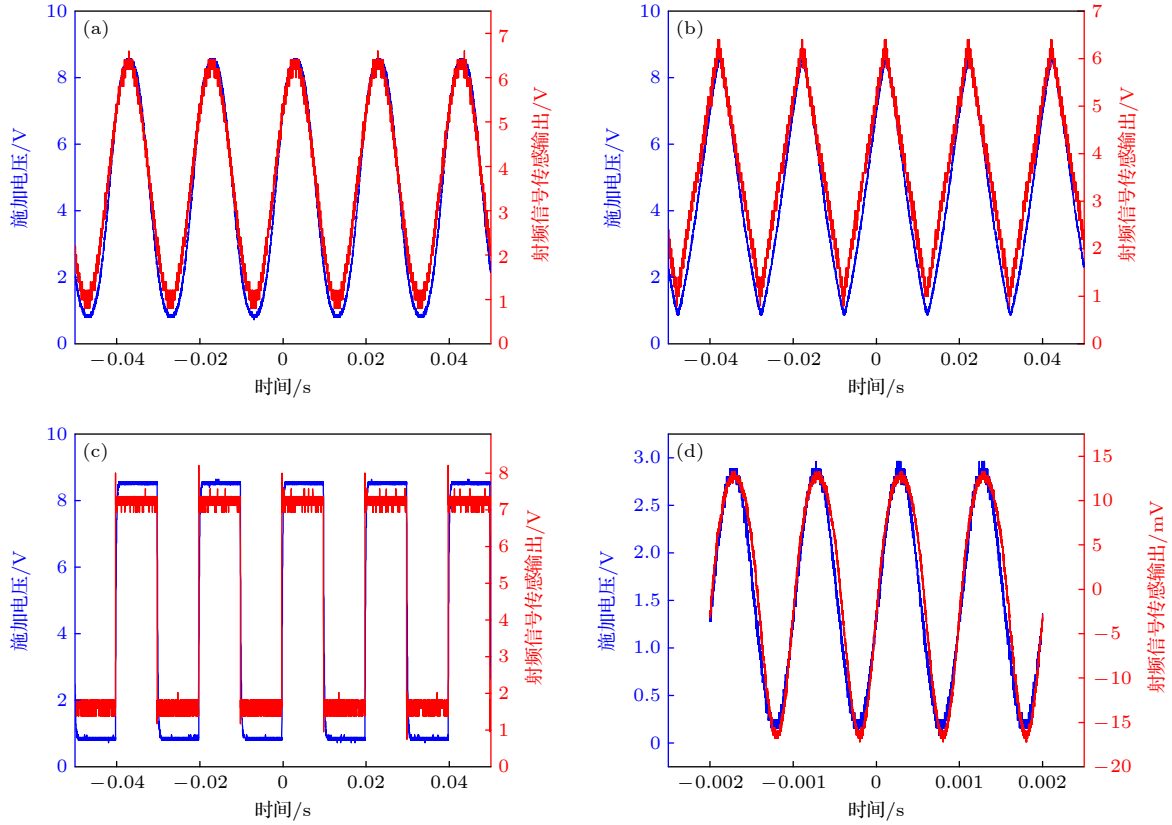


图 5 施加电场波形及射频信号传感响应 (a) 50 Hz 正弦波电场响应; (b) 50 Hz 三角波电场响应; (c) 50 Hz 方波电场响应; (d) 1 kHz 正弦波电场响应

Fig. 5. Applied electric field waveform and radio frequency signal sensing response: (a) 50 Hz sine wave electric field response; (b) 50 Hz triangle wave electric field response; (c) 50 Hz square wave electric field response; (d) 1 kHz sine wave electric field response.

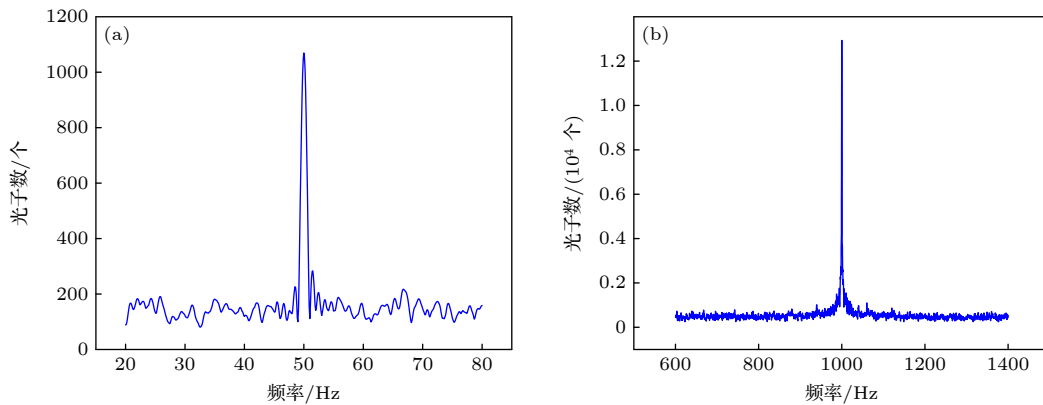


图 6 短时低频频谱感知 (a) 工频频谱感知结果; (b) 中频频谱感知结果

Fig. 6. Short-term low-frequency spectrum perception: (a) Power frequency spectrum perception results; (b) intermediate frequency spectrum perception results.

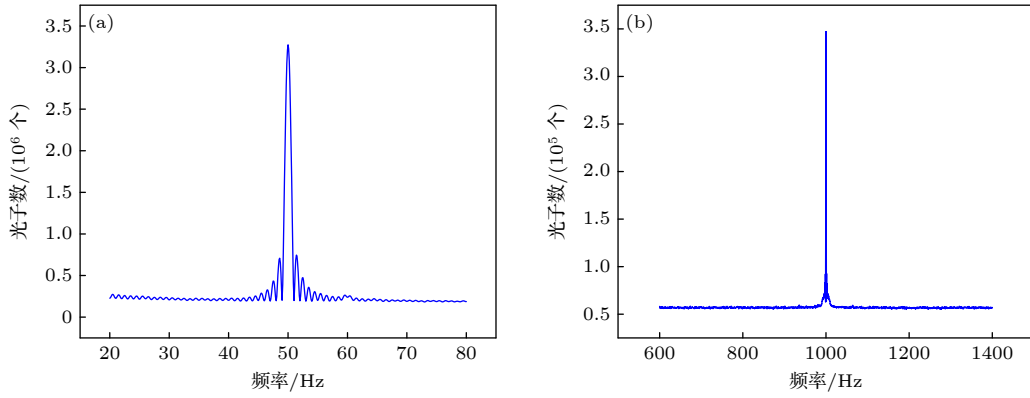


图 7 长时监测频谱感知 (a) 工频频谱测量结果; (b) 中频频谱测量结果

Fig. 7. Long-term monitoring spectrum perception: (a) Power frequency spectrum perception results; (b) intermediate frequency spectrum perception results.

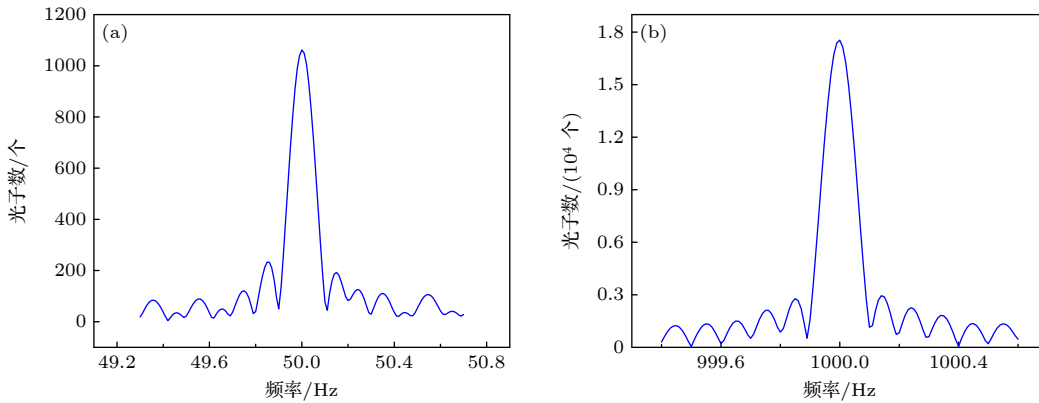


图 8 短时频谱感知线宽分析 (a) 工频频谱线宽; (b) 中频频谱线宽

Fig. 8. Linewidth analysis of short-time spectrum sensing: (a) Power frequency spectrum linewidth; (b) intermediate frequency spectrum linewidth.

之后对实验系统的频率分辨率进行测试. 首先针对短时 (10 s) 数据进行线宽分析, 从图 8 可得出特征峰的半高宽为 0.1 Hz, 这就表明系统具有傅里叶极限的频率分辨率. 之后又分析了长时间 (1 h) 监测的线宽, 从图 9 可知特征峰半高宽约为  $2.7 \times 10^{-4}$  Hz, 可知该系统满足傅里叶极限的频谱分辨率. 这里测量结果中心频率与设置频率存在微小偏差, 这是由于被测信号和测试系统采用不同时钟源导致的频率差.

该射频信号传感系统的频谱测量带宽受限于光子到达时间测量的时间抖动. 本系统中影响光子到达时间测量的时间抖动的因素有两个, 一个是单光子探测器的时间抖动参数, 另一个是时间间隔分析仪的时间抖动参数. 单光子探测器的时间抖动以及时间间隔分析仪的测量抖动会降低对光子到达时间的测量精确度, 从而限制整个系统的工作带宽. 本实验中采用的可见光单光子探测器时间抖动

为 40 ps, 理论模拟显示其实时分析带宽可达 GHz 量级. 实验对高频射频电场频谱进行实时测量, 通过高频信号源模拟待测射频电场, 利用搭建的量子压缩感知系统实现了 2 GHz 的宽带信号频谱感知, 测量结果如图 10 所示.

根据奈奎斯特采样定理要求, 正确恢复频谱信号需要采样率是信号带宽  $B$  的二倍以上, 假设单点采样需要用 12 bits 表示, 则奈奎斯特采样恢复 1 s 的信号频谱需要采集的数据量至少为  $C = 2 \cdot B \cdot 12$ . 本实验中如图 10 所示, 信号带宽为 2 GHz, 光子计数率为  $S = 26$  kc/s, 每个光子到达时间使用 32 bits 表示, 则数据压缩率  $C_r$  可表示为

$$C_r = \frac{S \cdot 32}{2 \cdot B \cdot 12}. \quad (7)$$

经过计算可知实验系统的数据压缩率为  $1.7 \times 10^{-5}$ , 并且系统的压缩率与实时性是两个不可兼得的量, 压缩率提升, 实时性会变差. 在本工作中, 探测的

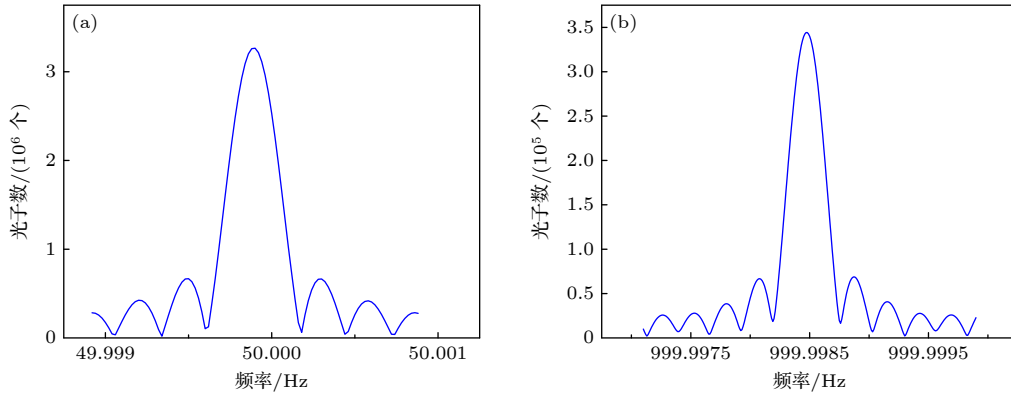


图 9 长时监测频谱感知线宽分析 (a) 工频频谱线宽; (b) 中频频谱线宽

Fig. 9. Long-term monitoring spectrum perception linewidth analysis: (a) Power frequency spectrum linewidth; (b) intermediate frequency spectrum linewidth.

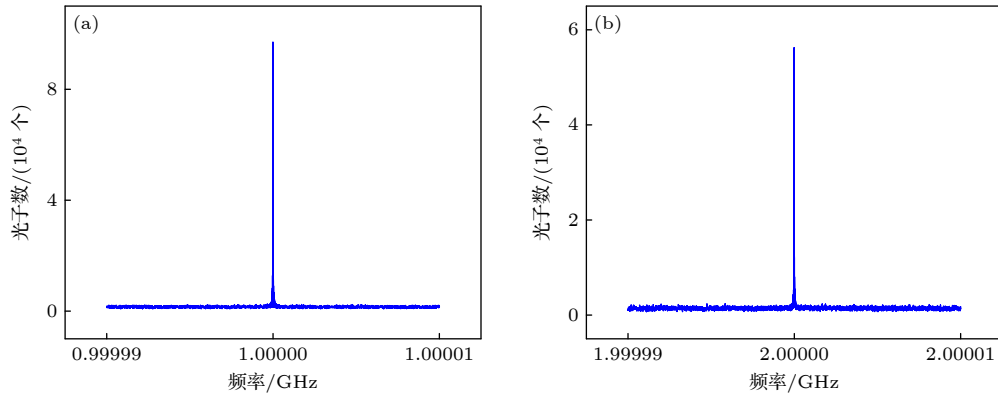


图 10 宽带信号频谱恢复结果 (a) 1 GHz 信号频谱; (b) 2 GHz 信号频谱

Fig. 10. Broadband signal spectrum recovery result: (a) 1 GHz signal spectrum; (b) 2 GHz signal spectrum.

实时性与光子计数率、单光子探测器的最大光子计数率等因素有关, 当光子计数率超过单光子探测器的最大光子计数率时, 探测器就无法准确地探测所有的光子信号, 从而可能导致数据的丢失或误差增大. 如果光子计数率很高, 单光子探测器的最大光子计数率却比较低, 那么在单位时间内处理的数据量就会受到限制, 导致实时性变差.

## 5 结 论

本文提出一种全新的量子压缩感知宽带射频信号频谱测量技术, 通过将量子力学基本原理与压缩感知相结合, 实现射频信号频谱的宽带测量. 利用电光晶体作为传感, 通过射频信号调制光子波函数, 利用相干光子波函数测量塌缩的随机性结合数据恢复算法实现对射频信号频谱的压缩感知. 通过高精度时间相关单光子计数技术记录每个光脉冲的达到时间. 通过 GPS 时钟晶振锁定技术为系统

提供了长期稳定的时钟参考, 保证了系统长期频谱感知的稳定性和精确度. 实验中对射频信号进行了长时间稳定监测, 结果表明, 基于量子压缩感知的射频信号传感能够实现 GHz 量级的宽带频谱测量, 数据压缩率达到  $1.7 \times 10^{-5}$ , 频谱分辨率达到傅里叶极限分辨率. 该项技术为宽带射频信号频谱感知提供了全新的技术路径, 其宽带测量特性可以满足 5G 无线通信、认知无线电等应用对宽带射频信号频谱测量的需求.

## 参考文献

- [1] Lu H H, Li C Y, Tsai W S, Lin R D, Tang Y S, Chen Y X, Lin Y S, Fan W C 2022 *J. Lightw. Technol.* **40** 7790
- [2] Qi Y H, Yang G, Liu L, Fan J, Antonio O, Kong H W, Yu W, Yang Z P 2017 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **59** 1661
- [3] William B, Elias A, Aboulnasr H 2022 *IEEE Trans. Signal Process.* **70** 729
- [4] Gupta M S, Kumar K 2019 *J. Netw. Comput. Appl.* **143** 47
- [5] Chen L, Liu Y 2016 *International Conference on Information*

- Science and Control Engineering* Beijing, China, July 8–10, 2016 p1379
- [6] Shi J Z, Zhang F Z, Ben D, Pan S L 2020 *J. Lightw. Technol.* **38** 2171
- [7] Zou X H, Lu B, Pan W, Yan L S, Stohr A, Yao J P 2016 *Laser Photonics Rev.* **10** 711
- [8] Murat T, Won N 2021 *IEEE Access* **9** 30060
- [9] David L D 2006 *IEEE Trans. Inf. Theory* **52** 1289
- [10] Candes E J, Romberg J 2006 *Found. Comput. Math.* **6** 227
- [11] Candes E J, Tao T 2006 *IEEE Trans. Inf. Theory* **52** 5406
- [12] Ragheb T, Kirolos S, Laska J, Gilbert A, Strauss M, Baraniuk R, Massoud Y 2007 *50th Midwest Symposium on Circuits and Systems Montreal QC, Canada, August 5–8, 2007* p325
- [13] Qin Z J, Fan J C, Liu Y W, Gao Y, Li G Y 2018 *IEEE Signal Processing Mag.* **35** 40
- [14] Shin H, Harjani R 2017 *IEEE J. Solid-State Circuits* **52** 1753
- [15] Shindo D, Tanigaki T, Park H S 2017 *Adv. Mater.* **29** 1602216
- [16] Zhang J Y, Li X Z, Du C H, Jiang Y, Ma Z G, Chen H, Jia H Q, Wang W X, Deng Z 2022 *IEEE Photon. J.* **14** 1
- [17] Fang Y T, Wang Y Y, Xia J 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 194201 (in Chinese) [方云团, 王誉雅, 夏景 2019 物理学报 **68** 194201]
- [18] Seng F, Stan N, King R, Josephson C, Shumway L, Hammond A, Velasco I, Johnston H, Schultz S M 2017 *J. Lightw. Technol.* **35** 669
- [19] Li Y S, Gao L, Wan J, Liu J 2020 *Appl. Opt.* **59** 6237
- [20] Zhu B B, Xue M, Yu C Y, Pan S L 2021 *Chin. Opt. Lett.* **19** 101202
- [21] Shi D F, Li G Y, Jia Z Y, Wen J, Li M, Zhu N H, Li W 2021 *Opt. Express* **29** 19515
- [22] Luo M D, Yang F, Dong F N, Chen N, Liao W 2022 *J. Lightw. Technol.* **40** 2577
- [23] Wang X X, Korzh B A, Weigel P O, Nemchick D J, Drouin B J, Becker W, Zhao Q Y, Zhu D, Colangelo M, Dane A E, Berggren K K, Shaw M D, Mookherjea S 2019 *J. Lightw. Technol.* **38** 166
- [24] Hao T F, Yang Y, Jin Y Q, Xiang X, Li W, Zhu N H, Dong R F, Li M 2022 *J. Lightw. Technol.* **40** 6616
- [25] Zhu L, Wang G J, Huang F M, Li Y, Chen W, Hong H Y 2022 *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **19** 1
- [26] Baraniuk R G 2007 *IEEE Signal Processing Mag.* **24** 118
- [27] Hu J Y, Yu B, Jing M Y, Xiao L T, Jia S T, Qin G Q, Long G L 2016 *Light Sci. Appl.* **5** 16144
- [28] Hu J Y, Jing M Y, Zhang G F, Qin C B, Xiao L T, Jia S T 2018 *Opt. Express* **26** 20835
- [29] Hu J Y, Liu Y, Liu L L, Yu B, Zhang G F, Xiao L T, Jia S T 2015 *Photon. Res.* **3** 24
- [30] Li C S 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 074207 (in Chinese) [李长胜 2014 物理学报 **63** 074207]

# Broadband radio frequency signal measurement based on quantum compression sensing\*

Han Yan-Rui<sup>1)2)</sup> Li Wei<sup>1)2)</sup> Zang Yan-Hua<sup>1)2)</sup> Yang Chang-Gang<sup>1)2)</sup>  
Chen Rui-Yun<sup>1)2)</sup> Zhang Guo-Feng<sup>1)2)</sup> Qin Cheng-Bing<sup>1)2)</sup>  
Hu Jian-Yong<sup>1)2)</sup>† Xiao Lian-Tuan<sup>1)2)</sup>

1) (*State Key Laboratory of Quantum Optics and Optical Quantum Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

2) (*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

( Received 16 March 2023; revised manuscript received 12 June 2023 )

## Abstract

With the rapid development of radio frequency technology such as radar, electronic warfare and 5G communication, the measurement and real-time spectrum characterization of broadband radio frequency signals become increasingly important. The traditional radio frequency signal real-time measurement technology is limited by the sampling rate of analog-to-digital converter and the ability to process digital signals, and encounters the problems of narrow measurement band, large data volume, and susceptibility to electromagnetic interference. This work is to study a radio frequency signal measurement technology based on quantum compression sensing, which uses integrated electro-optical crystal as radio frequency sensor, and constructs a compression sensing machine by modulating the photon wave function of the measured radio frequency signal to realize the compression measurement of broadband radio frequency signal, significantly improving the spectrum sensing bandwidth. The experiment demonstrates the long-term spectrum monitoring of power frequency and intermediate frequency high voltage signals, and the real-time spectrum measurement of high frequency radio frequency signals. Under the Fourier limit spectrum resolution, the real-time spectrum analysis bandwidth of GHz magnitude is realized, and the data compression rate reaches  $1.7 \times 10^{-5}$ , which can meet the needs of 5G wireless communication, cognitive radio and other applications for broadband radio frequency signal spectrum measurement, and provide a new technical path for developing the next-generation broadband spectrum sensing technology.

**Keywords:** broadband microwave spectrum measurement, quantum compressive sensing, radio frequency sensing, real-time analysis bandwidth

**PACS:** 03.67.-a, 42.50.-p, 67.10.Fj

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230398

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62105193).

† Corresponding author. E-mail: [jyhu@sxu.edu.cn](mailto:jyhu@sxu.edu.cn)



## 基于量子压缩感知的宽带射频信号测量

韩彦睿 李伟 臧延华 杨昌钢 陈瑞云 张国峰 秦成兵 胡建勇 肖连团

## Broadband radio frequency signal measurement based on quantum compression sensing

Han Yan-Rui Li Wei Zang Yan-Hua Yang Chang-Gang Chen Rui-Yun Zhang Guo-Feng Qin Cheng-Bing Hu Jian-Yong Xiao Lian-Tuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 160301 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230398

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230398>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于量子增强型光纤马赫-曾德尔干涉仪的低频信号测量

Measurement of low-frequency signal based on quantum-enhanced fiber Mach-Zehnder interferometer

物理学报. 2018, 67(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181335>

基于Rydberg原子的超宽频带射频传感器

Broadband Rydberg atom-based radio-frequency field sensor

物理学报. 2018, 67(7): 073201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172636>

基于卷积高斯混合模型的统计压缩感知

Statistical compressive sensing based on convolutional Gaussian mixture model

物理学报. 2019, 68(18): 180701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190414>

基于多模光纤散斑的压缩感知在光学图像加密中的应用

Application of compressive sensing based on multimode fiber specklegram in optical image encryption

物理学报. 2020, 69(3): 034203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191143>

多模光纤中基于压缩传感的光谱探测

Spectrum detection based on compressive sensing inside multimode fibers

物理学报. 2020, 69(13): 134204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200014>

基于两级压缩感知的脉冲星时延估计方法

Pulsar time delay estimation method based on two-level compressed sensing

物理学报. 2018, 67(9): 099701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172100>