

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.11.006

应用于金刚石 NV 色心磁测量的微波多频点 跳频调制与解调系统研究

程路珩¹, 徐南阳^{2,3}, 田宇³

(1. 合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601; 2. 浙江大学 光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027; 3. 之江实验室 量子传感研究中心, 浙江 杭州 311000)

摘要: 金刚石氮空位(nitrogen-vacancy, NV)色心磁探测系统由于固态自旋的方向性以及超精细分裂, 通常需要多台微波源协同工作来激发多达 24 个不同的共振频点, 从而造成系统复杂、成本居高不下。基于此, 文章设计一种全新的多频点跳频调制解调系统, 基于直接数字频率合成技术(direct digital synthesis, DDS)的单个集成化微波源, 以 ZYNQ-7010 芯片作为核心控制器件、现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)与 ARM 内核为基本架构, 采用串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)通信协议控制, 实现对 2.5~3.0 GHz 频段内任意数目共振频点的跟踪, 且微波跳频过程无死时间、延时低至约百纳秒量级。该系统实际运用于 NV 系综实验平台, 结合光探测磁共振实验得到的频谱完成对微波信号的调制与荧光信号的解调。

关键词: 现场可编程门阵列(FPGA); 调制解调系统; 金刚石氮空位色心; 光探测磁共振

中图分类号: TN761.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)11-1472-06

Research on multiple microwave frequencies hopping modulation and demodulation system for magnetic sensing based on NV centers in diamond

CHENG Luheng¹, XU Nanyang^{2,3}, TIAN Yu³

(1. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Research Center for Quantum Sensing, Zhejiang Lab, Hangzhou 311000, China)

Abstract: The magnetic sensing system based on nitrogen-vacancy(NV) centers in diamond usually requires multiple microwave sources to work together to excite up to 24 different resonance frequencies due to the directionality of solid-state spin and ultra-fine splitting, resulting in complex systems and high costs. This paper presents a new multi-frequency hopping modulation and demodulation system, which is based on a single integrated microwave source using direct digital synthesis(DDS) technology. The ZYNQ-7010 chip is used as the core control device, and based on the basic architecture of field programmable gate array(FPGA) and ARM core, serial peripheral interface(SPI) communication protocol control is adopted to realize tracking of any number of resonance frequencies within the range of 2.5 GHz to 3.0 GHz, with no dead time and a trigger delay as low as about hundred nanoseconds during microwave frequency hopping. Finally, the system was applied to the NV ensemble experimental platform, combined with the spectrum obtained from optically detected magnetic resonance(ODMR) experiments, to achieve modulation of microwave signals and demodulation of fluorescence signals.

Key words: field programmable gate array(FPGA); modulation and demodulation system; nitrogen-vacancy

收稿日期: 2024-03-04; 修回日期: 2024-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(92265114)

作者简介: 程路珩(1999—), 男, 湖北荆州人, 合肥工业大学硕士生;

徐南阳(1983—), 男, 安徽淮南人, 博士, 浙江大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: nyxu_physics@zju.edu.cn.

(NV) center in diamond; optically detected magnetic resonance(ODMR)

0 引言

近年来,金刚石晶体中的氮空位(nitrogen-vacancy, NV)色心成为量子计算、量子模拟以及量子精密测量^[1]等领域的研究热点。NV 色心是指晶体中的一种晶格缺陷,由一个氮原子取代碳原子,并和邻近一个空位组成,由于金刚石中碳原子为正四面体结构分布,因此一块金刚石晶体中理论上存在最多 4 种不同轴向的 NV 色心。目前,基于 NV 色心的精密测量技术被广泛应用于测量磁场、电场、温度等多种物理场,其中在磁测量领域发展迅速。不同于单个 NV 色心自旋体系的磁测量技术,基于系综 NV 色心的磁测量通常面向的是宏观磁场,此处“系综”的含义是样品中数量众多的色心集合。金刚石系综 NV 色心磁力计是近年来非常有前景的一种固态自旋量子传感器,被运用于核磁共振^[2]、基础物理^[3-4]、生物大分子探测^[5-7]、地磁场探测^[8]等实际领域,其核心测量技术主要包含光探测磁共振(optically detected magnetic resonance, ODMR)技术与锁相放大技术^[9](lock-in amplifier, LIA),通过采集 532 nm 激光激发系综 NV 色心产生的荧光信号并进行锁相放大处理,得到 ODMR 频谱和一阶微分频谱,最终可以得到系统测量灵敏度指标以及待测微弱磁场的变化信息。由于所需商用仪器体积庞大、价格昂贵,量子磁力计进一步便携化与实用化受到较大限制。

本文设计一种全新的微波多频点跳频调制系统,基于直接数字频率合成技术(direct digital synthesis, DDS)与现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)芯片自行开发的集成化微波源,能够以较小的体积和较低的成本实现对任意多个频点的循环输出,且最短切频时间远小于 1 ms。而以往在金刚石色心系综磁场测量^[10]中,选用如 Rigol DSG3065B 的商用型号微波源,其频率切换固有延时达到 4.5 ms,无法满足对多频点高速切换的需求。对于单微波源跳频调制的方式,该系统能够避免原先多个微波源测量时引入的不同频率调制信号合路后互相串扰的情况。

1 基本原理

金刚石 NV 色心的电子基态是一个自旋三重

态,由 3 个能级态 $|m_s=0\rangle$ 和 $|m_s=\pm 1\rangle$ 组成,当基态能级 3A_2 的电子受到 532 nm 激光激发后能跃迁到激发态能级 3E ,随后通过直接方式或者通过中间态能级 1E 、 1A_1 方式回到基态,这个过程发出 637~800 nm 的荧光。当微波频率与 $|m_s=0\rangle$ 和 $|m_s=\pm 1\rangle$ 能级基态之间的塞曼劈裂能级差匹配时, $|m_s=\pm 1\rangle$ 的自旋布居度达到最大;当 $|m_s=0\rangle$ 与 $|m_s=\pm 1\rangle$ 之间能级差发生变化,微波频率和基态塞曼劈裂能级差出现不匹配,称为共振偏移, NV 色心基态布居度会随着偏共振变化而变化,导致样品被激光激发并退激发时发出的荧光强度变化。

NV 色心能级结构与实验中微波相关功能示意图如图 1 所示。

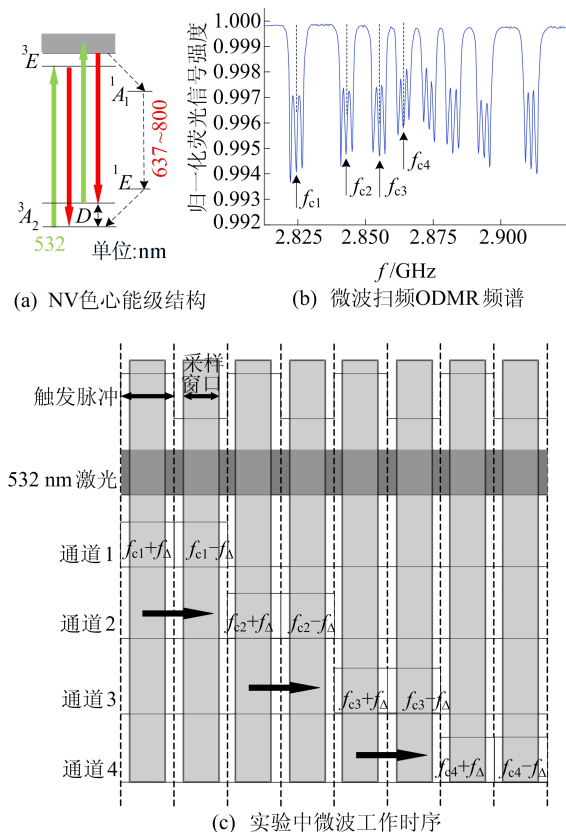


图 1 NV 色心能级结构与实验微波功能示意图

当包含色心系综的样品置于某一方向的偏置静磁场中时,微波源对样品施加扫频微波,得到图 1c 中所示 ODMR 频谱上相互分离的 8 个共振吸收峰(洛伦兹线型),3 个小峰结构是由于 ^{14}N 核自旋耦合形成的超精细结构。在微波扫频基础上加入频率调制(frequency modulation, FM),收集

的荧光信号经过锁相放大处理得到光探测磁共振一阶微分谱^[11],随后在跟踪测量磁场时微波源输出频率需要锁定在微分谱线斜率最大点处,而对于系综色心磁测量实验,需要输出的频点往往不止一个。

以往的方法是通过使用多个商用微波源同时提供多路不同频率的调制信号对微波进行频率调制,实现过程相当复杂,本文提出一种新的多频点调制方法。在使用集成化微波源时,为简化硬件端 FPGA 的开发复杂度,首先将原来用正弦信号调频替换成由 ZYNQ-7010 芯片提供方波触发信号的频移键控(frequency shift keying, FSK)调制模式。

从图 1 可以看出,选取每个输出频点 f_{ci} ($i=1,2,3,4$) 作为中心频点,选取跳频步长 f_{Δ} 进行上下跳频, f_{Δ} 称为调制深度。触发脉冲信号为 50% 占空比的方波,而 ZYNQ FPGA 当中同步数据采集模块会在触发脉冲高低电平期间分别累加采集荧光信号并取平均值,图 1c 中每个灰色方框代表采样窗口,采样率为 125×10^6 次/s。规定在脉冲高电平时间内微波源输出频率为 $f_{ci} + f_{\Delta}$,此时累加采集通道 A 的数据;在低电平时间内输出频率为 $f_{ci} - f_{\Delta}$,同理累加采集作为通道 B 的数据,以此循环。因此每个触发脉冲周期可以得到 2 组数据,随后对 2 组数据进行差分 and 归一化运算,通过这种频率解调过程便能光探测磁共振信号的一阶微分谱。

若要实现对多个频率微波信号的高速切换输出,则系统离不开直接数字频率合成技术,采用数字化方法直接产生高分辨率正弦波信号。DDS 发生器的基本结构主要包括相位寄存器、波形存储器、数模转换器和低通滤波器。波形存储器由只读存储器查找表组成,存储正弦波信号对应相位下的幅度数据。假设相位累加器是 N 位,1 个周期波形被均分为 2^N 个数据点,每 2 个相邻数据点间相位差计算公式为:

$$\Delta\varphi = 2\pi/2^N \quad (1)$$

相位宽越大,相位分辨率越高,最终输出的波形越接近理想状态下的信号。若 DDS 的输入工作时钟为 f_{clk} ,则形成的正弦波频率计算公式为:

$$f = f_{\text{clk}}/2^N \quad (2)$$

式(2)为顺序读取每个最小相位间隔点产生的信号频率,即能够输出的最小频率,因此也称为 DDS 频率分辨率。若每次读取最小相位间隔数为 F_{cw} ,则正弦波频率计算公式为:

$$f = F_{\text{cw}} f_{\text{clk}}/2^N \quad (3)$$

从式(3)可以看出,在给定时钟信号与相位字位宽后,合成的信号频率完全由 F_{cw} 决定,通常称 F_{cw} 为 DDS 的频率控制字。为了满足多频率点切换同时的上下跳频调制功能,本文在存储器中事先预设频率偏移控制字,方便在后续磁场测量实验中根据需求更改跳频步长值,并且系统中设计的相位累加器位宽是 32 位,系统频率控制字可以由式(4)计算结果配置,即

$$F_{\text{cw}} = 2^{32} \frac{f}{f_{\text{clk}}} \quad (4)$$

考虑频率偏移控制字 F_{offset} 时,式(4)可以改写为:

$$F_{\text{cw}} + F_{\text{offset}} = 2^{32} \frac{f + f_{\Delta}}{f_{\text{clk}}} \quad (5)$$

在本系统的微波源模块中, F_{cw} 、 F_{offset} 均存储在 FPGA 开发板的块状随机存储器(block random access memory, BRAM)资源中,根据配置参数进行相应地址查找输出,需要说明的是,因为查找表地址数量有限,所以能够输出的频率点是离散化的。

2 系统结构设计

2.1 总体结构

本文设计的系统包含集成化微波系统、ZYNQ-7010 开发板硬件系统以及自行搭建的金刚石系综 NV 色心光学平台,实验平台结构如图 2 所示。

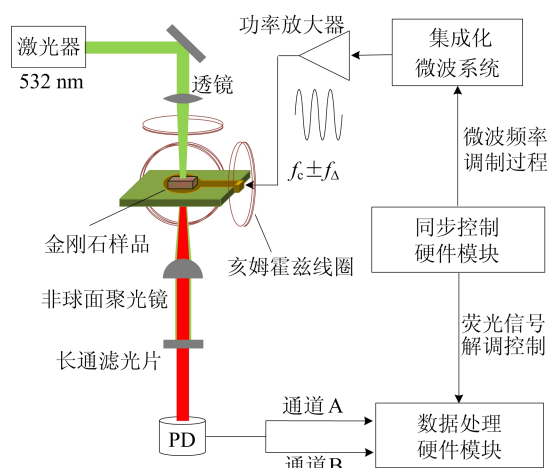


图 2 金刚石系综 NV 实验平台

硬件系统包括同步控制硬件模块和数据处理模块,其中同步控制模块控制微波系统与数据处理模块。实验所需 532 nm 激光由光纤激光器产

生,在光路中通过一个连续可调滤光片调整照射样品激光功率;连续激光通过透镜聚焦在样品表面激发 NV 系综,样品选用 Element Six 公司提供的边长为 3.0 mm 的方形块状金刚石,其中氮-空位浓度为 4.5×10^{-6} 。532 nm 激光激发样品 NV 色心产生的 637~800 nm 荧光通过非球面聚光镜收集后,再经过长波通二向色镜由光电探测器(photoelectric detector, PD)检测。样品被固定在双开口谐振环中央,谐振环接收经过功率放大器放大后的微波源信号,产生用于自旋量子态操控的交变磁场。

辐射结构与样品放置在由亥姆霍兹通电线圈提供的任意方向偏置磁场下。

2.2 集成化微波系统设计

本系统集成化微波系统基于直接数字频率合成技术设计,并由同步控制硬件模块通过串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)通信协议配置集成化微波系统^[12],包括 AD9914 型号 DDS 芯片和负责提供参考时钟的锁相环(phase-locked loop, PLL)芯片 MAX2870,在接收到 100 bit 位长度配置指令后,微波源可以选择扫频、定频和频移键控 3 种输出模式,本系统的多频点微波输出属于频移键控模式。频率控制字与频率偏移字等配置参数转化为二进制数后存于 FPGA 的 BRAM。系统运行后微波源进入准备状态,等待触发脉冲信号,当上位机发送启动指令后,每当触发信号上升沿或者下降沿到达时便根据设定的频点依次循环输出。

集成化微波系统 DDS 模块设计架构如图 3 所示,由 Xilinx Artix-7 系列 FPGA 实现。

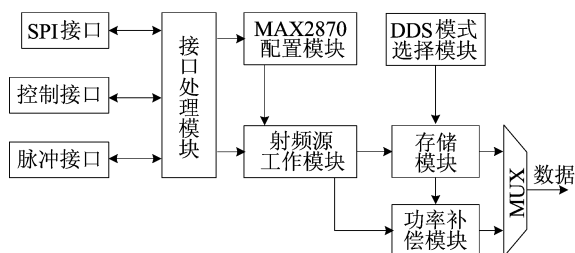


图 3 集成化微波系统 DDS 模块设计架构

工作时由接口处理模块向射频源模块与 MAX2870 配置模块发送工作使能信号,射频源工作模块包含解码、握手信号以及射频模式模块。握手模块负责决定系统当前应该执行的操作;解码模块负责接收 SPI 指令并解码,发送给射频模式模块;射频模式模块是设计的核心,决定微波频

率输出的模式与工作逻辑,其中包含定时器、计数器、边缘检测等功能子模块;存储模块负责保存频率控制字和频偏控制字等参数;而功率补偿模块主要用于解决不同输出频率时功率偏差问题。在微波源中共使用 2 个锁相环,一个负责为 DDS 芯片提供参考时钟信号,另一个产生 3.5 GHz 信号通过混频器下变频,最终得到 2.5~3.0 GHz 频段微波信号。

2.3 硬件端数据采集与控制模块设计

作为整套硬件控制系统的核心,选用 STWMLab125-14 型号商用开发板,板上搭载 1 块 ZYNQ-7010 芯片和分辨率为 14 位的双路模数转换器(analog to digital converter, ADC)、双路数模转换器(digital to analog converter, DAC)以及 1 块存储空间为 512 MiB 的第 3 代双倍速率同步动态随机存储器(third generation of double-data-rate synchronous dynamic random-access memory, DDR3 SDRAM)作为开发板外设。

硬件部分根据功能可以分为同步控制模块、通信模块、数据采集与处理模块以及存储模块,硬件系统数据采集与控制模块如图 4 所示。

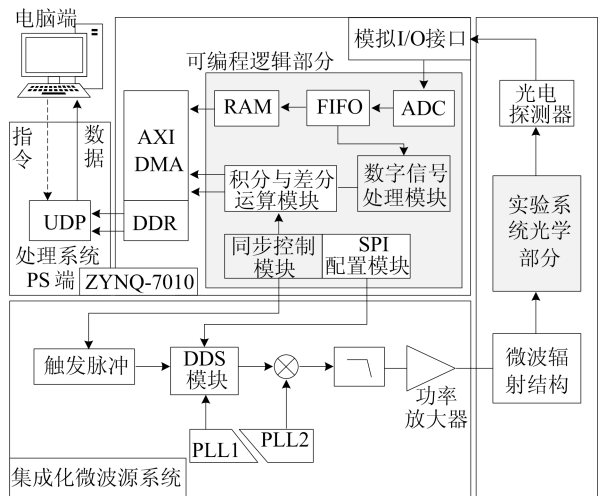


图 4 硬件系统数据采集与控制模块

硬件端同步控制模块通过产生设定频率占空比的周期触发脉冲信号,负责硬件系统中数据采集模块和微波源模块同步。SPI 配置模块用于每次测量前配置微波源中直接数字频率合成器所需参数,包含输出微波功率、跳频偏移频率、频率控制字和相位控制字等参数。通信模块主要有通过先进可拓展接口(advanced extensible interface, AXI)的通用输入输出端口(general purpose input output, GPIO)作为连接桥梁,上位机通过更

改 GPIO 寄存器参数实现对 FPGA 内部逻辑部分的控制。而 FPGA 中可编程逻辑部分(programmable logic, PL)与可编程系统部分(process system, PS)之间大量数据传输通过 AXI 直接内存访问(direct memory access, DMA), DMA 常用于硬件存储器与存储器之间或者存储器与 I/O 口设备之间进行高速数据传输。首先在 PL 端调用 AXI-DMA IP 核并配置为 Direct Register DMA 模式。该过程涉及 AXI4-Lite、AXIS-S2MM、AXI4-S2MM 3 种总线接口。AXI4-Lite 总线用于 PL 端寄存器配置;AXIS-S2MM 接口属于 AXI4-Stream 总线,适合大量数据高速连续传输;AXI4-S2MM 接口用于存储器对外设进行读操作。

积分与差分运算模块作为本方案核心运算模块,接收经过 ADC 模块转换的 14 位数字信号进行积分累加运算,累加速率取决于模拟信号输入采样率,本方案固定为最大值 125×10^6 次/s,由板载最高时钟频率决定。考虑到数据传输速率问题,ADC 模块与后续数字信号处理模块之间设置先进先出缓冲模块(first input first output, FIFO)。数据存入 DDR3 SDRAM 后,在 PS 端通过轻量化网络协议(light weight internet protocol, LWIP)实现用户数据报协议(user datagram protocol, UDP),打包好发送给上位机,上位机每次接收到 512 组、128 bit 位实验数据,高 64 位包含通道 A 数据信息,低 64 位包含通道 B 数据信息。而累加数据寄存器由其中 48 位组成,经过 ADC 转化后的单次采集数据是 14 位,因此可以计算一次最大能够存储 $2^{34} \times 8$ ns 时间窗口的信息,完全能够满足后续实验需求。

系统开始运行前先配置集成化微波源模块,在同步触发脉冲的每个周期中,微波源检测脉冲上升沿、下降沿进行扫频和跳频输出,作为微波信号的调制过程;同时,在每个触发脉冲高电平时间窗口内连续采集 PD 输出作为通道 A 信号输入 FPGA 处理,低电平时间窗口内采集作为通道 B 输入。两路信号各自经过积分与滤波处理后进行差分运算,作为荧光信号的解调处理。

3 测试结果

测试时,首先在搭建的 NV 系综实验平台上进行微波扫频的 ODMR 实验,根据频谱使用洛伦兹线型拟合方法得到系综 NV 色心 8 个峰的共振频点,选取其中 4 个频点作为输出微波跳频的中

心频点,频率分别为 2 824. 42、2 843. 08、2 855. 09、2 864. 65 MHz,跳频步长即调制深度 f_{Δ} 为 400 kHz,随后通过上位机配置给集成化微波源进行循环跳频输出。通过 Rigol DS70504 高频示波器记录的触发脉冲信号、微波输出信号如图 5 所示,该型号示波器支持最高 20×10^9 次/s 的采样率。从图 5 可以看出 8 个不同频率组成的循环周期,并且每个频率输出时间符合测试前设置的时长,在本次测试中为 0. 025 ms,表明微波系统功能符合实验要求。

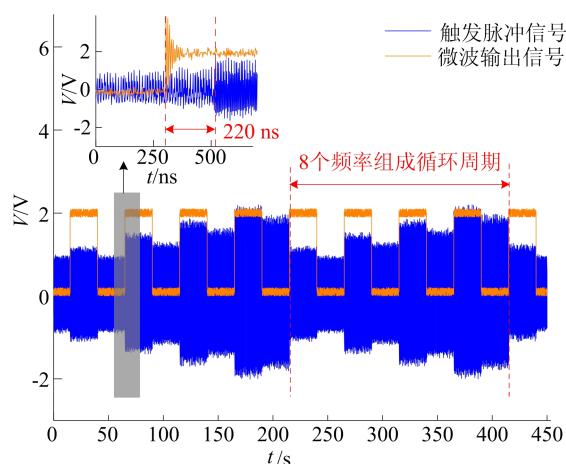


图 5 系统微波多频点跳频调制测试结果

测量微波频率切换相对于触发脉冲上升沿的固定延时时间,延时时间直接决定微波输出切换频率的速度上限。以往商用微波源如 Rohde&Schwarz SMIQ03B 型号的微波源延时为 $480 \mu\text{s}$,而另一种 Rigol DSG3065B 型号的微波源延时达到 4.5 ms,显然无法支持实验中对多频点之间高速切换的需求。

图 5 中局部放大图展示了本系统集成化微波源的延迟时间,经过测算为 220 ns,且能够稳定循环输出设定频率微波,表明本系统硬件的优越性能。

测试中光电探测器采集的荧光信号由采集系统 14 bit 位 ADC 转换为二进制数据,打包为一组 128 bit 位数据发送给上位机电脑,按照本文设计的解调协议对每组数据进行差分解调处理,中心频点位于 2 824. 42 MHz 处的共振峰荧光信号的解调测试结果如图 6 所示,其图像是原 ODMR 频谱的一阶微分频谱,后续对磁场的探测离不开一阶微分谱对荧光信号与频率偏移量关系的标定,由此可见本文设计的系统对调制微波信号以及解调荧光信号是有效的。

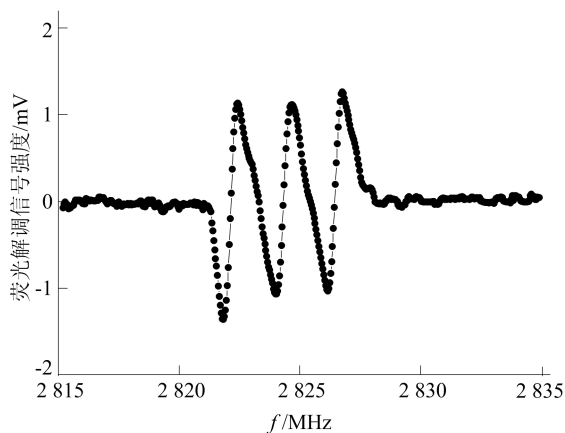


图 6 系统荧光信号解调测试结果

4 结 论

本文设计了一套全新的应用于金刚石 NV 色心磁测量的微波多频点跳频调制系统,为后续实验运用 NV 色心跟踪探测微弱磁场变化提供了一种新的思路,对未来发展便携式金刚石 NV 系综磁力计具有一定的应用价值。该系统的核心是基于 FPGA 技术的实验数据同步采集和处理系统以及基于直接数字频率合成技术的自制集成化微波源。同步数据采集系统能够以纳秒量级的速度采样实验数据,通过电脑端实现对系统的实时控制;集成化微波源相较于以往商用微波源,切换输出频率时延迟时间仅为 220 ns,满足测量时对 ODMR 实验频谱中多个共振频点的高速切换输出。整套系统相较于以往使用锁相放大技术与多台微波源同时测量的方法,最大程度简化了硬件资源和复杂度,便于后续实验系统的集成化。

[参 考 文 献]

[1] MÜLLER C, KONG X, CAI J M, et al. Nuclear magnetic resonance spectroscopy with single spin sensitivity[J]. Na-

- ture Communications, 2014, 5(1): 4703.
- [2] ZHANG J, HEGDE S S, SUTER D. Efficient implementation of a quantum algorithm in a single nitrogen-vacancy center of diamond[J]. Physical Review Letters, 2020, 125(3): 030501.
- [3] WU Y, LIU W, GENG J, et al. Observation of parity-time symmetry breaking in a single spin system [J]. Science, 2019, 364(6443): 878-880.
- [4] RONG X, WANG M, GENG J, et al. Searching for an exotic spin-dependent interaction with a single electron-spin quantum sensor[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 739.
- [5] SCHIRHAGL R, CHANG K, LORETZ M, et al. Nitrogen vacancy centers in diamond; nanoscale sensors for physics and biology[J]. Annual Review of Physical Chemistry, 2014, 65(1): 83-105.
- [6] SHI F, KONG F, ZHAO P, et al. Single DNA electron spin resonance spectroscopy in aqueous solutions [J]. Nature Methods, 2018, 15(9): 697-699.
- [7] SHI F, ZHANG Q, WANG P, et al. Single protein spin resonance spectroscopy under ambient conditions[J]. Science, 2015, 347(6226): 1135-1138.
- [8] GLENN D R, FU R R, KEHAYIAS P, et al. Micrometer-scale magnetic imaging of geological samples using a quantum diamond microscope[J]. Geochem Geophys Geosyst, 2017, 18(8): 3254-3267.
- [9] XIE Y, GEND J, YU H, et al. Dissipative quantum sensing with a magnetometer based on nitrogen-vacancy centers in diamond [J]. Physical Review Applied, 2020, 14(1): 014013.
- [10] SCHLOSS J M, BARRY J F, TURNER M J, et al. Simultaneous broadband vector magnetometry using solid-state spins[J]. Physical Review Applied, 2018, 10(3): 034044.
- [11] BARRY J F, TURNER M J, SCHLOSS J M, et al. Optical magnetic detection of single neuron action potentials using quantum defects in diamond[J]. Proc Nat Acad Sci, 2017, 114(32): E6730.
- [12] LIU Y, YE R, HU Q, et al. A DDS-based integrated microwave source for fast frequency sweeping in quantum magnetic-resonance systems[J]. AIP Advances, 2023, 13(1): 015009.

(责任编辑 张 镅)