

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.12.005

用于金刚石 NV 色心多频点实时调控的电子学系统设计与实现

胡启迪¹, 徐南阳^{2,3}, 刘玉山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 量子传感中心, 浙江 杭州 311000)

摘要: 文章设计一种基于直接数字频率合成(direct digital synthesis, DDS)与频移键控(frequency-shift keying, FSK)的电子学测量系统, 实现对金刚石氮空位(nitrogen-vacancy, NV)色心的多频点实时调控和信号采集。该系统使用 DDS 技术实现数字信号到模拟信号的转换, 输出带宽可达 1.4 GHz, 输出延时仅为 245 ns; 在现场可编程阵列(field programmable gate array, FPGA)内部设计脉冲同步功能, 实现信号采集模块等各内部模块之间的时序同步, 同时预留多种接口以增强系统的扩展性; 使用混频器、滤波器、功率放大器等微波器件, 满足了系统在不同频段的工作需求。性能测试结果表明, 文章设计的系统具有输出延时短、信号连续、功率稳定、体积小等优点。

关键词: 现场可编程门阵列(FPGA); 直接数字频率合成(DDS); 扫频; 频移键控(FSK); 基带信号源

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)12-1610-05

Design and implementation of electronic system for real-time control of multi-points of NV centers in diamond

HU Qidi¹, XU Nanyang^{2,3}, LIU Yushan³, 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: This paper designs an electronic measurement system based on direct digital synthesis(DDS) and frequency-shift keying(FSK), which enables real-time control and signal acquisition of multi-points of nitrogen-vacancy(NV) centers in diamond. Based on the DDS technology, the conversion of digital signal to analog signal is achieved in sub-microseconds, with an output bandwidth of up to 1.4 GHz and an output delay of only 245 ns. A pulse synchronization function is designed inside the field programmable gate array(FPGA) for timing synchronization among internal modules including the signal acquisition module. At the same time, some interfaces are reserved to enhance the expandability of the system. Microwave devices such as mixers, filters, and power amplifiers are also utilized, which can meet the system's operational requirements across different frequency bands. The performance test results show that the system designed in the paper has the advantages of short output delay, continuous signal, stable power and small size.

Key words: field programmable gate array(FPGA); direct digital synthesis(DDS); frequency sweep; frequency-shift keying(FSK); baseband signal source

收稿日期:2024-03-05;修回日期:2024-04-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(92265114)

作者简介:胡启迪(1998—),男,江苏无锡人,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.

0 引言

随着现代量子物理的发展,一些新兴的领域得到快速发展,氮空位(nitrogen-vacancy, NV)色心由于其优秀的量子特性,已经成为近年来的研究热点,而量子传感^[1]是 NV 色心的一种重要应用。利用磁共振技术来实现对量子态的操作是现代量子研究的一种基本方法,例如在基于金刚石 NV 色心的系综实验中,通过微波源产生微波脉冲并作用于微波辐射结构,使微波辐射产生交变的磁场,进而调控量子的自旋状态^[2-3],同时对 NV 色心产生的荧光信号进行监控。

传统的微波源系统多以压控振荡器^[4-5](voltage-controlled oscillator, VCO)为核心,通过改变输入电压从而改变振荡器输出的信号频率^[6],常见的振荡器类型有 RC 振荡器、LC 振荡器以及石英晶体压控振荡器等。压控振荡器的优势体现在输出信号的带宽高且频率稳定性好,但其劣势同样突出,这是由于 RC 或 LC 类型的振荡器在切换频率时,电容充放电过程中容易信号输出不稳定或延时大,导致输入与输出同步困难。

本文设计一种基于直接数字频率合成^[7-8](direct digital synthesis, DDS)与频移键控(frequency-shift keying, FSK)的电子学系统。该系统利用内部存储单元存储频率配置信息,实现微波源在多个频率间的快速切换,并配置一个与微波跳频同步的数据采集卡,便于数据处理;其独特的设计可以满足输入、输出等多个模块间的同步需求,同时输出延时固定且时延小。系统以现场可编程阵列(field programmable gate array, FPGA)作为主控板,一方面可以根据使用场景,对微波源系统进行灵活扩展;另一方面,凭借 FPGA 的高工作主频,能够实时采样同步输入信号并实时控制 DDS 输出信号。本文设计将 FPGA 与 DDS 芯片相结合,实现了快速同步扫频和高带宽特性,极大地提高了系统的灵活性和集成度,同时缩短了设计周期并降低了成本。

1 基本原理

本文设计的电子学系统结构框图如图 1 所示。该系统主要由 2 个部分组成:第 1 个部分为主控 FPGA,其主要组件包括 1 个处理器(ARM Cortex A9)、1 个核心芯片(Xilinx Zynq XC7Z010)、1 个采样率高达 125 MS/s 的 14 位双 ADC(LTC2145CUP-14)和 DAC(AD9767)芯片;

第 2 部分是基于 DDS 的自制微波源,所有组件集成在 1 个印刷电路板(printed circuit board, PCB)上,包括 1 个 DDS 芯片(AD9914)、1 个从属 FPGA(Xilinx Artix-7)、宽带锁相环(Max2870)。在 DDS 输出端外接了频率混频器、功率放大器和频率滤波器,用于调整输出频率、维持输出功率稳定和滤除信号中的噪声。

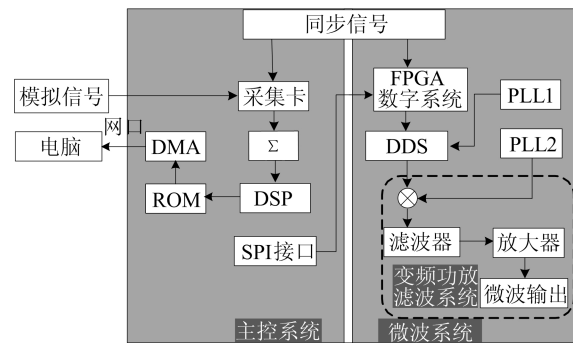


图 1 电子学系统结构框图

主控 FPGA 系统又可以细分为以下几个部分:数据采集(data acquisition, DAQ)旨在对由荧光二极管(photo-diode, PD)产生的模拟信号进行采样;数字信号处理(digital signal process, DSP)器用于编码和处理数据;嵌入式系统构成硬件、电脑主机与采样模块之间的连接环节。最后,由电脑负责分析数据。

微波系统由 FPGA 数字系统、驱动模块(负责初始化 AD9914、产生频率调谐谐字(frequency tuning word, FTW)并配置锁相环)、变频功放滤波系统 3 个部分组成。

FPGA 数字系统主要负责与主控系统的通信及同步,它通过串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)接收本地主机发送给微波系统的配置数据,主要包括初始化 DDS 和驱动 DDS 的数据,如频率调谐字 FTW、幅度比例因子(amplitude scale factor, ASF)和微波源工作模式等。同步系统的设计主要用于检测本地主机发送的同步触发脉冲、外部输入的同步时钟信号以及主机对微波系统的复位信号;此外在设计数字系统时,微波系统会输出 2 个握手信号与主机进行交互,保证微波信号有序输出。

变频功放滤波系统包含混频器、滤波器和功率放大器。DDS 输出的基带信号(baseband)和锁相环输出的本振信号(local oscillator, LO)经过微波模块混频、滤波、功率放大等处理后,输出微波(microwave, MW)信号。

DDS技术的核心在于波形数据存储在ROM中,通过改变ROM地址增加的步长和初始相位来调整输出频率的大小及初始相位。因此每个频率对应一个地址增长的步长,该步长数据经转换后得到FTW数据。但如果每次频率更新都需要主机通过SPI发送FTW,再经过FPGA内部处理,那么无疑增加主机的负担和时间开销,极大地降低了工作效率。为此,本文设计了一套配置信息的编码。

微波源系统的同步配置命令及同步设计如图2所示。

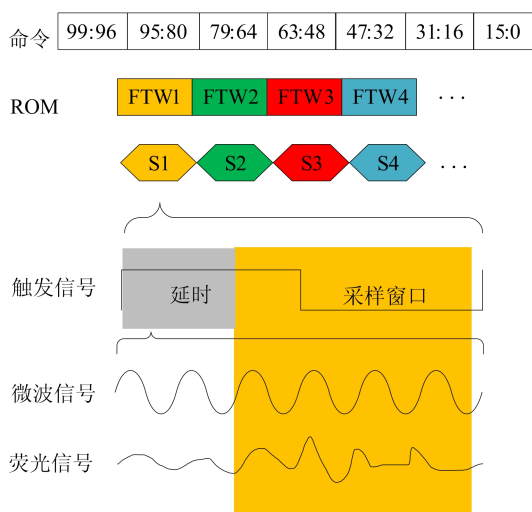


图2 微波源系统同步配置命令及同步设计

图2中命令字段的具体信息见表1所列。

表1 命令功能配置信息

命令字段	功能
15:0	起始频率/FTW1
31:16	终止频率/FTW2
47:32	频率增长步长/FTW3
63:48	调制深度/FTW4
79:64	信号驻留时间(FSK功能需配置)/FTW5
95:80	信号幅度(低12位)
	4'h0:定点
	4'h1:扫频
99:96	4'h2:FSK
	4'h4:自定义跳频
	其他:保留

从图2可以看出,当主机发送触发脉冲信号后,微波信号将会同步更新。即在同步设计中,当微波信号输出完序列中的最后一个信号后,若再次检测到一个脉冲,微波信号将输出其第1个信号,开始新一轮的循环。

显然在自定义跳频模式下,如果FTWs的映射不规则排列,那么输出的微波频率将在频谱上跳跃。

图2中:触发信号的灰色部分代表延迟窗口,这是因为微波在2个频率间切换时存在一定延迟,在这段延迟时间内微波输出的频率与功率并不稳定,会导致PD采集到的荧光信号存在误差,所以将这段时间内采集到的信号舍去;黄色框表示积分窗口,在此期间ADC每8ns对信号进行采样并累积14位数据。需要注意的是,延迟和采样窗口的持续时间是可调的,但它们的总和最大值应小于触发信号的周期。

微波源系统的配置通过SPI协议完成,由2个握手信号保证本地主机对微波源系统的初始化以及触发输出的可靠性。

首先,本地主机发送一个复位信号脉冲,FPGA内部采用混合模式时钟管理器(mixed mode clock manager,MMCM)生成工作时钟,为了保证系统在时钟稳定后才开始工作,FPGA会向主机发送握手信号1,表示FPGA内部工作时钟已经稳定。

然后,本地主机以SPI的通信协议向FPGA发送100位的配置信息;FPGA在接收完数据后,对内部功能寄存器进行配置,并依次驱动外部锁相环MAX2870和初始化AD9914;完成数据配置后,FPGA向主机发送握手信号2,主机在收到该信号后可以发出触发脉冲;当FPGA检测到触发脉冲时,微波源输出微波信号。

微波源具备定点频率输出、扫频输出、FSK跳频及自定义跳频等功能。定点输出的频率大小通过配置命令字段[15:0]确定;扫频功能的频率信息通过命令字段[47:0]进行配置;FSK的频率输出信息通过命令字段[79:0]进行配置;自定义跳频模式下频率输出信息通过命令字段[79:0]配置输出频点。输出的幅度通过命令字段[95:80]进行配置,有效数据为该数据段的低12位。

命令字段各数据计算方法见表2所列。

表2 命令字段各数据计算方法

命令字段	计算方法
15:0	$(\text{起始频率} - 500) \times 100$
31:16	$(\text{终止频率} - 500) \times 100$
47:32	频率增长步长/10
63:48	调制深度/10
79:64	驻留时间/调制信号周期
95:80	$(\text{输出幅度} / \text{参考幅度}) \times 2^{12}$

从表 2 可以看出:在计算起始频率和终止频率时先减 500 再与 100 相乘;频率增长步长和调制深度除以 10 是由于该系统将 DDS 输出信号频率大小的 FTW 数据存储在 ROM 中,并且这些数据使得 DDS 输出的信号在 500~1 000 MHz,此外其频率的分辨率为 10 kHz;驻留时间需根据系统所需的驻留时长,结合调制信号的具体参数进行计算确定。由于 DDS 的芯片幅度的分辨率为 12 位,因此设置信号的幅度数据乘以 2^{12} 。

需要另外说明的是,当微波源设置为自定义跳频模式时,计算每个 FTW 的方法与在扫频模式下计算起始频率或终止频率对应的 FTW 方法相同。

2 微波源性能测试

2.1 基本性能测试

由于微波源的定点输出、扫频输出以及 FSK 输出本质大致相同,这里主要以扫频功能为例进行介绍。

将微波源系统工作在扫频模式下,利用 RIGOL 频谱分析仪 DSA875 测量对应频点的功率,从整体上分析系统的功率变化情况。DDS 微波源功率如图 3 所示。

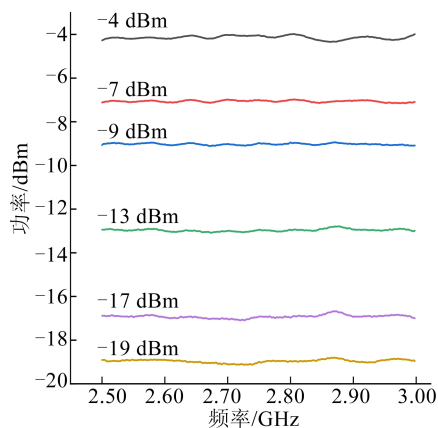


图 3 DDS 微波源功率

将微波源输出频率设为 2 500~3 000 MHz,利用本团队设计的纳秒级高分辨率脉冲发生器进行触发输出,并利用 DSA875 进行各频点下的功率测量。

从图 3 可以看出,整体上设置的输出功率与实际测量的功率之间有一定的波动,但波动范围较小,少于 1 dBm;并且从图 3 还可以看出,在设置输出功率 -7~-17 dBm 之间,功率输出的波动最小。

同样使用 RIGOL 数字示波器 MSO8204 测量微波信号的输出延时。利用纳秒分辨率的脉冲发生器产生用于微波源的触发信号。微波源工作在单个频点下的频谱图如图 4 所示。

本文调研了 2 款常用微波信号源(即 Rohde&Schwarz 型号为 SMIQ03 的微波源和 RIGOL 型号为 DSG3065B 的微波源)的输出延时、相邻频点切换是否连续(即有无死时间)。并与 DDS 微波源系统进行对比,结果见表 3 所列。

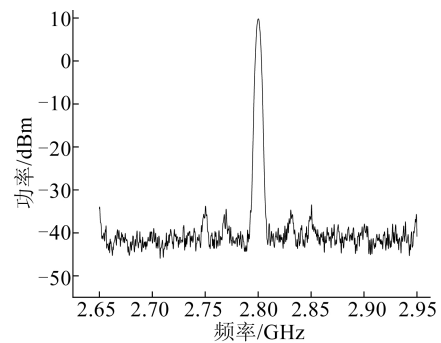


图 4 单频点频谱图

表 3 3 种微波源的输出延时和相位连续情况

型号	输出延时/ns	相位连续
DDS 微波源	245	连续
SMIQ03B	4.8×10^5	不连续
DSG3065B	4.5×10^6	不连续

从表 3 可以看出:在输出延时上,本文提出的 DDS 微波源与 SMIQ03B 相比快了 3 个数量级,与 DSG3065B 相比提升更为显著,达 6 个数量级;在相位连续上,除了 DDS 微波源的输出连续无死时间外,其余 2 款微波源输出均不能连续输出且具有死时间。

2.2 光探测磁共振实验测试

在基于 NV 的固态自旋体系中,光探测磁共振^[9](optically detected magnetic resonance, ODMR)实验是一项通过扫频寻找共振频率的基础实验。通过 ODMR 实验可以进行弱磁场、电子自旋、核自旋等探测。

将本文设计的系统制作应用在基于 NV 固态系统^[10]实验平台上,通过 DDS 波源的扫频功能进行 ODMR 实验,结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,本文设计的系统通过光探测磁共振成功实现了金刚石 NV 色心多频点实时调控,在 2.80~2.92 GHz 这个频段内清晰地扫出 8 个共振峰,同时由于金刚石内存在氮-14 造成的超精细相互作用,每个共振峰由一个中心

位置的主峰和 2 个位于两侧的侧峰构成^[11]。ODMR 实验结果验证了本文设计系统功能的可靠性。

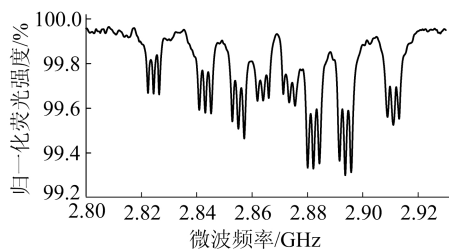


图 5 NV 固态自旋 ODMR 实验结果

3 结 论

本文设计并实现了用于金刚石 NV 色心多频点实时调控的电子学系统。该系统实现了微波源的集成化设计,整体结构清晰,以 FPGA 作为核心,采用 SPI 通讯方式,上位机可实时配置 DDS 参数、同步触发输出,并预留了可配置接口,方便未来功能拓展;系统体积小,易于与其他系统集成设计;依靠内部时钟触发信号,系统能够使采集端与微波源在时序上保持同步。NV 固态自旋实验平台的性能测试和功率输出、输出延时、信号输出、多点调控连续等一系列基本测试结果表明,该 DDS 微波源系统具有输出延时长(最大输出延时仅为 245 ns)、信号连续、功率稳定、体积小等优点。

[参 考 文 献]

- [1] BARRY J F, SCHLOSS J M, BAUCH E, et al. Sensitivity optimization for NV-diamond magnetometry[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2020, 92(1): 015004.
- [2] KANEKO T, KATO H, YAMADA H, et al. Functional nitrogen science based on plasma processing: quantum devices, photocatalysts and activation of plant defense and immune systems[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2021, 61: SA0805.
- [3] BAI R, ZHU X, YANG F, et al. A novel demodulation method for transmission using nitrogen-vacancy-based solid-state quantum sensor [J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(7): 074203.
- [4] MANSOUR I, MANSOUR M, ABOUALALAA M, et al. A multiband VCO using a switched series resonance for fine frequency tuning sensitivity and phase noise improvement [J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2021, 29(12): 2163-2171.
- [5] GAO Y, ZENG Y, CUI M, et al. Diamond NV centers based quantum sensor using a VCO integrated with filtering Antenna[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-12.
- [6] HUANG J W, SUN B, LI J W, et al. A low phase noise K-band VCO with a threshold voltage-based current source [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2022, 32(8): 995-998.
- [7] CHEKKA A B, AGGALA N J. High frequency chirp signal generator using multi DDS approach on FPGA[C]//2021 5th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). [S. l.]: IEEE, 2021: 137-142.
- [8] JAHANGIR M Z, SEKHAR P C, SIKANDER M, et al. Design and implementation of FPGA based DDS-ADPLL for resonant frequency tracking in sensors[C]//2022 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT). [S. l.]: IEEE, 2022: 9865678.
- [9] 姜海峰. 基于 NV 色心的宽场成像系统[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
- [10] 李中豪, 王天宇, 郭琦, 等. 基于磁集聚效应的系综 NV 色心磁检测增强[J]. *物理学报*, 2021, 70(14): 147601.
- [11] WANG N, LIU C F, FAN J W, et al. Zero-field magnetometry using hyperfine-biased nitrogen-vacancy centers near diamond surfaces [J]. *Physical Review Research*, 2022, 4: 013098.

(责任编辑 胡亚敏)