

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416088

金刚石 NV 色心磁力仪测磁性能优化*

耿佳琪¹ 赵龙¹ 仇如嘉¹ 柯艳国² 赵博文³(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院 合肥 230601; 2. 国网安徽省电力有限公司 合肥 230061;
3. 安徽省国盛量子科技有限公司 合肥 230088)

摘要: 金刚石 NV 色心以其高磁场灵敏度、常温工作等优势成为一种非常有前景的磁场传感器。本文介绍了 NV 色心测磁原理,设计并搭建了基于 NV 色心的磁测量系统,通过激光-荧光差分光路将噪声降低至约 1/8,使用微波混频调制方法将 ODMR 谱线斜率提升 2.5 倍左右,最终基于 NV 色心浓度 <300 ppb 的金刚石样品实现了 0.934 nT/Hz^{1/2} 的磁场测量灵敏度。同时设计了基于双微波调制解调的 NV 测磁系统,并在 10 kHz 采样率下实现了 1.76×10^{-4} 的测量不确定度,基于阿伦方差分析方法,在 0.2 s 统计时间条件下测量不确定度达到 10 ppm。

关键词: 金刚石 NV 色心;灵敏度;磁力仪

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.50

Optimization of magnetic properties measured by diamond nitrogen-vacancy color-centered magnetometer

Geng Jiaqi¹ Zhao Long¹ Qiu Rujia¹ Ke Yanguo² Zhao Bowen³

(1. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China;

2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230061, China;

3. China Prosp & Quantumtech Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: The diamond nitrogen-vacancy center has become a very promising magnetic field sensor with its advantages of high sensitivity, sensitivity to external magnetic field, and detectability at room temperature. In this paper, we introduce the principle of magnetic measurement by nitrogen-vacancy center, and a magnetic measurement system based on nitrogen-vacancy center is designed and constructed, in which the noise is reduced to about 1/8 by the laser-fluorescence differential optical path, and the microwave mixing modulation method can enhance the slope of the ODMR spectral line by about 2.5 times, and the sensitivity of magnetic field measurement of 0.934 nT/Hz^{1/2} is finally realized based on the diamond samples with the concentration of nitrogen-vacancy center <300 ppb. Meanwhile, the NV magnetometry system based on dual microwave modulation and demodulation was designed, and a measurement uncertainty of 1.76×10^{-4} was achieved at a sampling rate of 10 kHz, and a measurement uncertainty of 10 ppm was achieved at a statistical time of 0.2 s based on the Allen variance method.

Keywords: diamond nitrogen-vacancy color-centered; sensitivity; magnetometer

0 引言

金刚石作为一种优秀的材料,具有硬度高、热导率好、化学稳定性强等优良特性,因而在各个领域都有着广泛的应用^[1]。其中,金刚石 NV (nitrogen-vacancy, NV) 色心因其独特的电子能级结构和磁性质,被广泛应用于量子信息处理、生物医学成像、磁共振成像等精密测量领域^[2]。相比于其他量子体系磁强计,例如原子/光泵浦磁强计^[3]、超导

量子干涉仪^[4]等,金刚石 NV 色心磁力仪,具有快速响应、空间分辨率可达数十纳米、宽频测量范围、常温下稳定工作等优异特性^[1-2],同时还有着与其他量子体系磁强计一样的高理论灵敏度指标^[5]。因此金刚石 NV 色心磁力仪在磁场的测量中具有很大的潜力。

金刚石 NV 色心作为磁探针实现磁场测量最早是由 Taylor 等^[5]提出。随后,人们基于金刚石 NV 色心测磁技术进行了广泛的研究^[6-10]。2011 年, Schoenfeld 等^[11]首次

收稿日期:2024-05-21

* 基金项目:国网安徽省电力有限公司科技项目(52120523000W)资助

提出利用 CW-ODMR 技术结合微波调制解调技术实现高精度微弱磁场检测。磁灵敏度是反应磁力仪磁场跟踪性能优劣的重要参数,因此许多学者针对 NV 色心磁测量灵敏度的提升展开了研究。张卫东等^[12]基于 NV 色心磁传感器,研究了灵敏度与调制频率之间的关系,将灵敏度优化了 12.2 倍;王肖成设计了脉冲双频微波全轴激发 NV 色心系统,通过实验验证了到拉比振荡信号与自旋回波信号的与传统方案荧光对比度提升了 2.83 倍和 3.81 倍^[13]。

上述的研究中仍存在一些不足,例如光学系统复杂、不利于工程应用、灵敏度较低等,无法完全体现 NV 色心的优势。因此,本文将基于 NV 色心的磁测量原理采用全光纤光路方案设计基于 NV 色心的磁测量系统,搭建了实验系统,验证了激光差分降噪方法与混频方法对灵敏度的提升,在 NV 色心浓度大约 300 ppb(CVD 金刚石)的条件下得到的 0.934 nT/Hz^{1/2} 磁场测量灵敏度。同时为了实现高采样率搭建了双微波调制磁测量系统,实现了 10 kHz 采样频率下 1.76×10^{-4} 的测量不确定度,基于阿伦方差分析方法,在 0.2 s 统计时间条件下测量不确定度达到 10 ppm。

1 测量原理

1.1 金刚石 NV 色心

NV 色心是金刚石中最常见的一种缺陷^[1],如图 1 所示,其中金刚石晶体中的一个碳原子被一个氮原子替代,由于碳原子和氮原子的最外层电子数不一样,替换后会多一个空穴,氮原子和空穴共同构成了 NV 色心,碳原子和空位的连接轴称为 NV 轴。

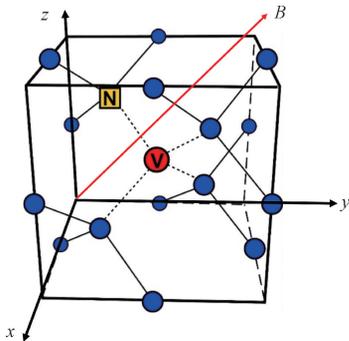


图 1 金刚石晶体结构
Fig. 1 Crystal structure of diamond

NV 色心的电子能级结构如图 2 所示。在 NV 色心能级结构中,主要分为基态³A₂和激发态³E,基态和激发态均为三重态,由 $|m_s=0\rangle$ 、 $|m_s=+1\rangle$ 、 $|m_s=-1\rangle$ 3 个能级组成。对于基态³A₂来说,在无外界磁场时, $|m_s=+1\rangle$ 和 $|m_s=-1\rangle$ 为简并的二重态 $|m_s=\pm 1\rangle$,此时基态 $|m_s=0\rangle$ 与 $|m_s=\pm 1\rangle$ 之间的零场劈裂 $D=2.87$ GHz,若有外界磁场时,则 $|m_s=\pm 1\rangle$ 会发生劈裂,劈裂成 $|m_s=+1\rangle$ 和 $|m_s=-1\rangle$ 两个能级。而电子自

旋和¹⁴N核自旋之间的超精细作用会使 $|m_s=+1\rangle$ 态和 $|m_s=-1\rangle$ 态能级分别劈裂成 $|m_s=0\rangle$ 、 $|m_s=+1\rangle$ 和 $|m_s=-1\rangle$ 3个能级。此外,在基态³A₂与激发态³E之间还有两个自旋单重态的亚稳态¹A₁和¹E,它们的存在对 NV 色心的荧光特性有着重要的意义。

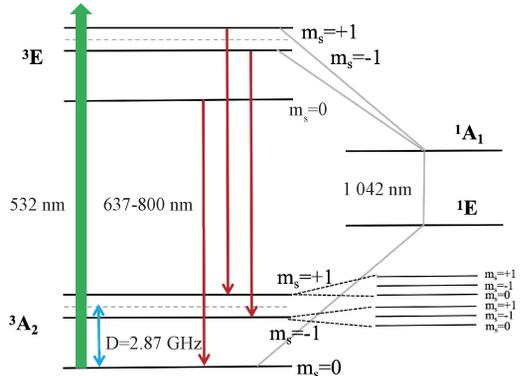


图 2 NV 色心电子能级结构示意图

Fig. 2 Electronic energy level structure diagram of NV color center

NV 色心被 532 nm 的激光从基态³A₂激发到激发态³E,然后退激发回³A₂态。其中处于 $|m_s=0\rangle$ 态的 NV 色心被激发后会直接跃迁回到基态并释放荧光,发射的荧光波长为 637~800 nm,而处于激发态 $|m_s=\pm 1\rangle$ 的 NV 色心有两种主要的退激发路径,一是发射荧光回到基态,二是通过系间窜越(inter-system crossing, ISC)机制,经由单态¹A₁和¹E回到基态 $|m_s=0\rangle$,这一过程会发出 1 042 nm 的红外光,后者发生的概率占 70%。因此,可根据荧光的强弱来判断 NV 色心所处的能级,这是 NV 色心进行磁场测量和量子调控的基础。

1.2 金刚石 NV 色心测磁原理

NV 色心通过光探测磁共振技术(optical detected magnetic resonance, ODMR)来测量磁场强度。通常,利用激光对 NV 色心进行一个长时间的激发,可使 NV 色心自旋极化到基态 $|m_s=0\rangle$ 态,极化率可达 90%^[14-15],此时荧光强度保持在极大值;微波场会与 NV 色心自旋产生共振,当满足微波频率与 $|m_s=0\rangle$ 与 $|m_s=\pm 1\rangle$ 的能级差值相等时,可以使 NV 色心在基态 $|m_s=0\rangle$ 与 $|m_s=\pm 1\rangle$ 之间翻转,表现为荧光强度的减弱。而外界磁场会导致 $|m_s=+1\rangle$ 态和 $|m_s=-1\rangle$ 态之间产生劈裂,劈裂大小与磁场强度有关。因此,通过扫频的方式改变微波频率,并测量不同微波场频率对应的荧光强度,便可得到 NV 色心的 ODMR 谱。图 3 所示为无磁场时有与外部磁场时,金刚石 NV 色心的 ODMR 荧光光谱及对应电子能级结构。

常温情况下无磁场时由于金刚石内部存在应力,因此 ODMR 光谱会分裂成两个峰。由图 3 可知当 NV 色心的电子发生共振时,外磁场与微波频率之间应当满足公式^[16-17]:

$$\Delta f = 2\alpha\gamma_e B_z \quad (1)$$

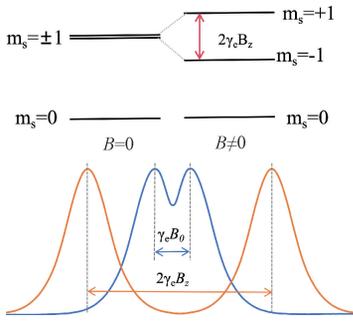


图 3 NV 色心测磁原理图

Fig. 3 NV color center magnetic principle diagram

式中： γ_e 为 NV 色心电子旋磁比，其值为 2.8 MHz/Gs， B_z 为外部磁场大小， α 为测试 NV 主轴与磁场之间的夹角的余弦 $\cos\theta$ 。根据式(1)可计算出磁场强度为：

$$B_z = \Delta f / 2\alpha g \gamma_e \quad (2)$$

金刚石是一个正四面体结构，因此有 4 个不同的 NV 主轴，每个主轴与磁场方向都有不同的角度，每个轴所受到的磁场分量也不同，因此 ODMR 谱通常有 8 个峰。若存在 ^{14}N 的精细分裂，每个峰会与 ^{14}N 相应的 3 个共振峰。图 4 所示为外磁场下实际测量的 ODMR 谱。

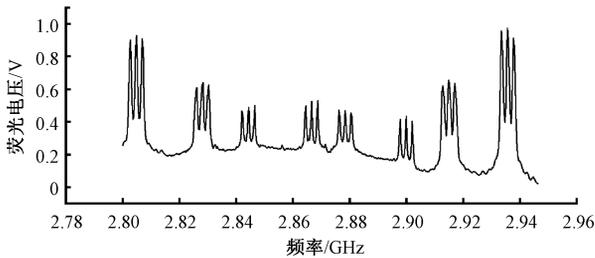


图 4 外磁场下实际测量 ODMR 谱

Fig. 4 The actual measurement of ODMR spectrum under external magnetic field

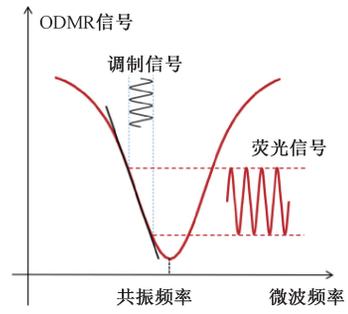
为了准确测量 NV 色心基态能级共振频率，一般采用微波频率调制的方式，原理如图 5(a) 所示，在微波频率上施加一个调制频偏为 f_{dev} 、调制频率为 f_c 的参考信号作用于 NV 色心，由于微波频率呈正弦振荡的形式，在共振吸收峰附近，NV 色心所产生的荧光也会发生相应频率的振荡，通过解调即可获得相应的 ODMR 解调信号。由图 5(b) 可知解调后的信号有一段线性区间，对该区间进行线性拟合便可得到共振频率，即线性区间的过零点。

若将微波频率固定在斜率最大点处，此时外磁场变化时会导致共振频率的变化而引起荧光强度的变化，基于此可实现磁场的测量。

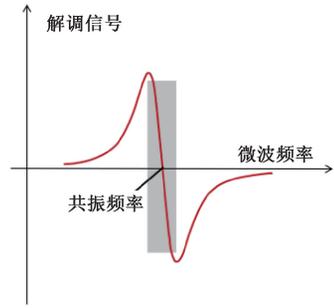
磁灵敏度是磁场测量精度的一个核心指标，基于 NV 色心的磁测量灵敏度可由以下公式表示^[16]：

$$\eta = \frac{ASD}{\gamma_e g k} \quad (3)$$

式中： ASD 为解调信号的幅度谱密度，即单位频率下的系



(a) 连续共振波吸收谱以及微波频率调制示意图
(a) Schematic of continuous resonant wave absorption spectrum and microwave frequency modulation



(b) 连续波一阶微分谱曲线示意图
(b) Schematic of continuous wave first-order differential spectral profile

图 5 微波频率调制方法原理图

Fig. 5 Principle diagram of microwave frequency modulation method

统噪声， k 为解调信号最大斜率。

由灵敏度公式可知，降低系统噪声、提高解调信号斜率可以提升灵敏度。

2 系统设计与优化方法

2.1 基于 NV 色心的磁测量系统

基于 NV 色心的磁测量系统，主要有光路部分，微波部分、探头部分以及数据采集与处理部分，如图 6 所示。

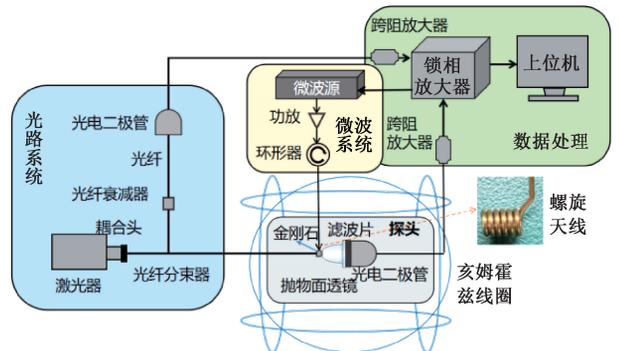


图 6 基于 NV 色心磁测量系统示意图

Fig. 6 The schematic diagram of magnetic measurement system based on NV color center

作为 NV 测量系统的前端部分，光路部分有着及其重要

的作用。为了便于系统的工程应用,本系统采用全光纤的光路来实现,主要由 532 nm 激光器、耦合头、光纤分束器、光纤衰减器以及光电二极管组成。激光器作为光路部分的核心组件,对整个系统的磁测量性能有着重要影响,本文选用长春新产业的固态 532 nm 低噪声激光器,其输出功率最大为 300 mW,功率稳定性为 0.28%。为避免激光功率抖动引起的噪声,选用分束器将光路分为两部分来进行差分抑制共模噪声。激光器发出的光经过耦合头耦合进 99:1 的光纤分束器,金刚石 NV 色心受激发光激发后产生的红色荧光较弱,且荧光强弱与激发光功率有关,因此所需激光功率强;差分端信号需要通过光纤衰减器衰减后与荧光信号做差分,受光纤衰减器的衰减范围限制,因此所需激光功率弱,分光比为 99:1 的光纤分束器较合适。光纤分束器将激光分为 99:1 的两束光,其中较强的一束光接入探头部分实现金刚石的激发,较弱的一束光通过光纤衰减器后被光电二极管 (Thorlabs, SM05PD1A) 探测,用作光路差分。

如图 7 所示,探头部分通过机械结构将光纤、天线、金刚石、抛物面透镜、滤光片以及光电二极管组装在一起。本文中使用的金刚石为元素 6 公司 CVD 金刚石,尺寸为 $0.8\text{ mm} \times 0.8\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$,其 ^{14}NV 浓度 $< 300\text{ ppb}$,通过光学胶粘在抛物面透镜前端。分束器中的光束经由光纤后照射在金刚石上,微波频率通过天线作用在金刚石上,抛物面透镜用于金刚石产生荧光的收集,通过 640 nm 的滤光片将绿光与杂光滤除,使 640~800 nm 的红光被光电二极管探测到。

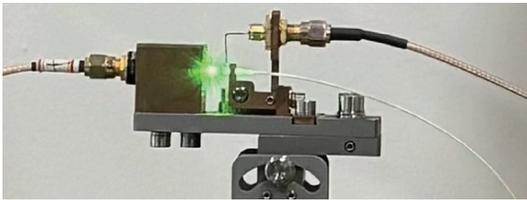


图 7 探头实物图

Fig. 7 Probe physical

微波系统主要由微波源 (RIGOL DSG365B)、功率放大器 (Mini-Circuits ZHL-16W-43+) 和微波环形器组成。利用微波调控 NV 色心需要较大的功率,因此采用微波功率放大器将微波源输出的信号进行放大后再通过环形器到达天线,环形器的作用是防止天线反射的微波功率损坏链路。

数据采集与处理系统由跨组放大器、锁相放大器、上位机组成。跨组放大器用于将光电二极管探测到的光信号进行光电转换与放大,再接入锁相放大器进行信号的调制解调,解调是为了避免 $1/f$ 噪声,可以最大程度减小激光器低频噪声。上位机主要用来控制微波源、设置锁放参数并读取解调信号以及显示测试磁场强度。

本文中测试磁场由三轴亥姆霍兹线圈 (JZM688-3, 磁场扰动 $< 1\text{ pT}$) 提供,三轴正交磁场可以分别独立控制,线圈供电采用高精度的程控电流源 (JCP-14/110SA, 稳定度

优于 $\pm 0.01\%$), 可提供单轴最大均匀磁场 60 Gs。

搭建实验系统如图 8 所示, NV 探头置于三轴亥姆霍兹线圈中心,通过高精度电流源给三轴亥姆霍兹线圈的 Y 轴供电。通过上位机设置与下发微波扫频参数,并同时读取对应微波频率的解调荧光电压信号,得到解调信号随微波频率变化的 ODMR 谱线。

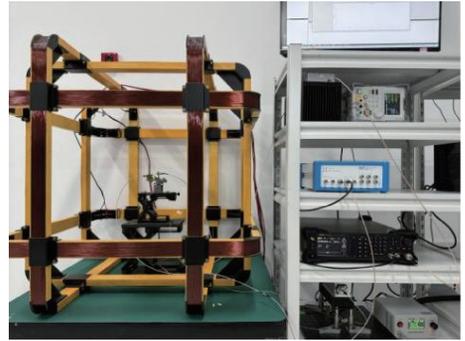


图 8 系统实物图

Fig. 8 System physical diagram

解调信号谱线如图 9 所示,共产生 4 对共振峰,24 个共振点。最外侧一对共振峰的 NV 主轴受到的磁场分量最大,因此选取最外侧一对共振峰实现磁场的测量。

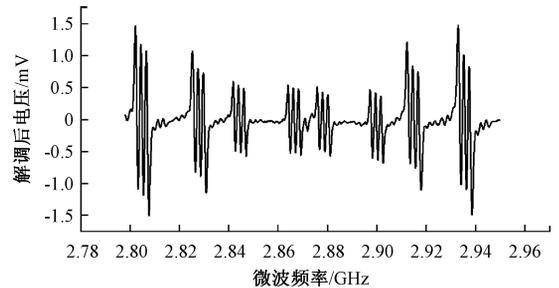


图 9 外磁场下解调信号谱线

Fig. 9 Demodulation signal spectrum under external magnetic field

2.2 磁场灵敏度优化方法

本文通过优化光学系统设计并结合激光差分降噪方法来降低系统噪声,同时结合微波混频技术提高解调信号斜率,实现对磁场测量的灵敏度的提升。

系统噪声主要由激光振幅噪声、微波频率与功率噪声、磁场噪声、电子学噪声、光子散粒噪声组成,其中激光器的噪声是主要噪声之一^[16]。

荧光信号的调制解调可以有效的抑制激光器的低频噪声。对于激光器的高频噪声,通过将激光器的输出光通过光纤分束器一分为二,保证两束光经传输后的各项参数一致,再利用光电二极管将光信号转换为电信号后进行相减,便可有效的去除激光器的高频噪声,通过信号的幅度谱密度判断噪声是否被消除。

根据 ODMR 谱的测量原理可知,微波调制信号对谱线最大斜率有着直接的影响。微波调制频率的频率偏移、功率大小都会对解调信号的幅度与斜率产生影响,因此本研

究通过设置不同功率与频偏来优化 ODMR 谱斜率,得到最佳的微波工作参数。

除了对微波源输出调制信号参数进行调试以外,还可以施加信号与微波频率进行混频后再调制,混频调制原理如图 10 所示。

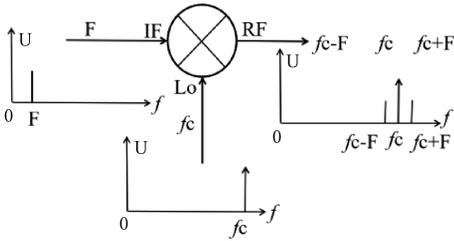


图 10 混频调制原理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of mixing modulation principle

理论上¹⁴NV 的轴向超精细常数 $f_{\parallel} = 2.16 \text{ MHz}$ ^[17],将微波扫频信号和 2.16 MHz 信号混频后,微波频率由单频 f_c 变为 3 个频率 $f_c + 2.16, f_c, f_c - 2.16$,作为 3 个等振幅频率的扫描微波驱动器,同时激发所有 3 个超精细峰,可将两侧频率的贡献加在中间峰上。

3 实验结果与讨论

3.1 解调信号噪声优化

基于所搭建系统,首先验证激光信号与荧光信号差分对激光噪声降低的有效性,为了更好地展现噪声抑制效果,将荧光信号端与差分端的跨组放大器的放大倍数保持一致。测试中激光器输出光功率为 80 mW,此时荧光电压为 1 V 左右,通过调节光纤衰减器,使差分端电压尽量等于 1 V,保证差分后信号幅值在 10 mV 以内,测试差分前后荧光信号的幅度谱密度。

测试结果如图 11 所示,对差分降噪前后的斜率进行线性拟合,差分前斜率为 3.313 V/GHz,差分后斜率为 3.32 V/GHz,并根据图中差分前后数据吻合程度来看,差分前后解调信号幅度并无明显变化。如图 12 所示,在 100 Hz 处的噪声谱密度由原来的 $1.76 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ 变为 $224.39 \text{ nV}/\text{Hz}^{1/2}$,约降低为原来的 1/8。

3.2 ODMR 谱线斜率优化

实验中,通过高精度电流源给三轴亥姆霍兹线圈的 Y 轴供电 8.5 A,产生一个强度为 30 Gs 的均匀磁场。微波源功率设置为 -2 dBm,频率频偏为 500 kHz、调制频率为 10.33 kHz。

为了验证微波混频调制对 ODMR 谱解调信号斜率的提升效果。本文将微波源输出信号接入混频器(SHWFM-01360S)的 LO 端,用信号发生器产生一个一系列不同幅度与频率的正弦信号接入混频器的 IF 端,将 RF 端的输出接入至功率放大器传输至天线,对金刚石进行辐射。对图 8 中最左侧一个峰进行扫频,表 1 列出了所接入的正弦信号不同幅度与频率时 ODMR 谱线斜率值,结果表明当 $V_{pp} =$

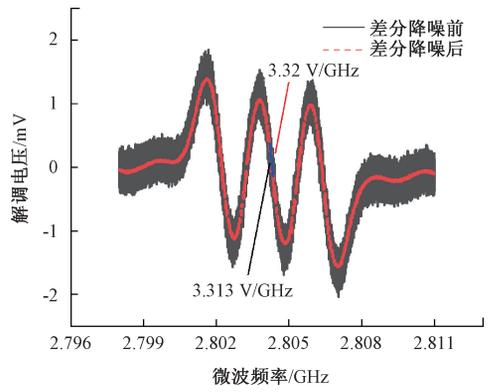


图 11 降噪前后解调信号值

Fig. 11 Demodulation signal values before and after noise reduction

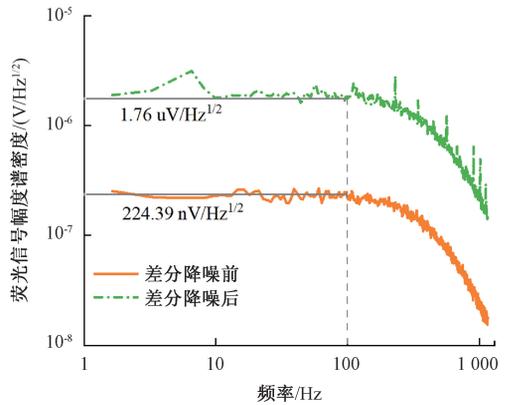


图 12 降噪前后荧光信号幅度谱密度

Fig. 12 Fluorescence signal amplitude spectral density before and after noise reduction

1.4 V,频率为 2.16 MHz 时斜率最优。图 13 对比了单微波调制与微波混频调制的解调信号大小,由图 13 可知最中间峰过零点的斜率是最倾斜的,混频后斜率由 3.3 V/GHz 变为 8.5 V/GHz,提升了 2.5 倍左右。计算混频前后的灵敏度,其结果如图 14 所示,结果表明:混频后,灵敏度由 $2.67 \text{ nT}/\text{Hz}^{1/2}$ 提升到 $0.943 \text{ T}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

表 1 不同幅度与频率的混频信号下斜率值

Table 1 Slope values of mixing signals with different amplitudes and frequencies.

幅度 V_{pp}/V	频率/MHz	斜率/ $(\text{V} \cdot \text{GHz}^{-1})$
1.2	2.140	6.55
1.2	2.150	7.12
1.2	2.155	7.73
1.2	2.160	7.96
1.2	2.165	7.67
1.3	2.160	8.19
1.4	2.160	8.50
1.5	2.160	8.37

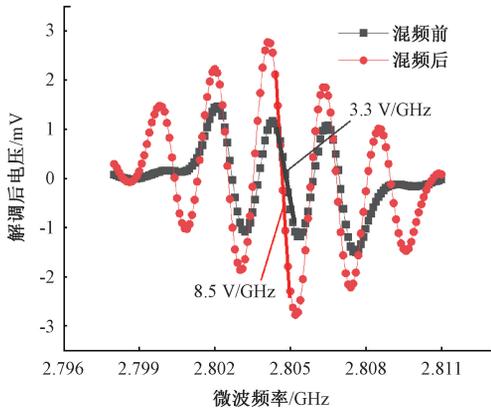


图 13 混频调制前后 ODMR 谱线图

Fig. 13 ODMR spectrum before and after mixing modulation

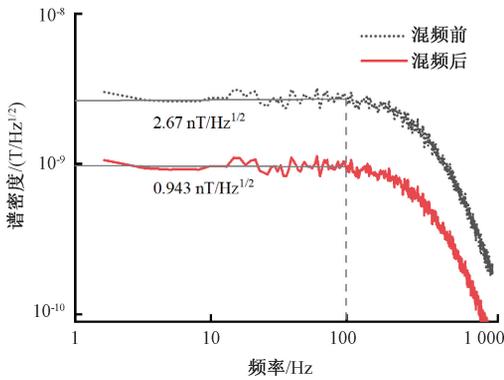


图 14 混频前后磁噪声谱

Fig. 14 Magnetic noise spectrum before and after mixing

3.3 基于双微波解调的高速采样技术

本研究搭建了如图 15 所示的双微波调制解调系统,用于解决单微波扫频调制解调系统测试时间久、采样率低等问题。通过两台微波源与两台锁相放大器设置不同的调制频率同时测量 ODMR 谱线中受到磁场分量最大的一对峰,来实现双微波调制解调,两台微波源的输出通过合路器合成一路。

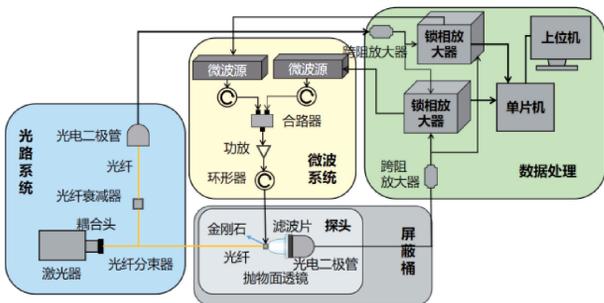


图 15 基于双微波调制解调 NV 系统示意图

Fig. 15 The schematic diagram of NV system based on dual microwave modulation and demodulation

单片机中的高精度 ADC 采集模块同时从两台锁放读取解调信号,同时上位机向单片机下发微波频率,单片机根

据微波频率对应的电压计算共振频率点,并向上位机传输频率差值 Δf 。

为了测试搭建系统的稳定性,三轴亥姆霍兹线圈的 Y 轴供电电流设置为 6.5 A,连续采集 20 min 的频率差值 Δf ,结果如图 16 所示,对数据进行统计分析,得到其平均值为 99.076 MHz,标准差为 0.017 5 MHz,故计算测量不确定度为 1.76×10^{-4} 。

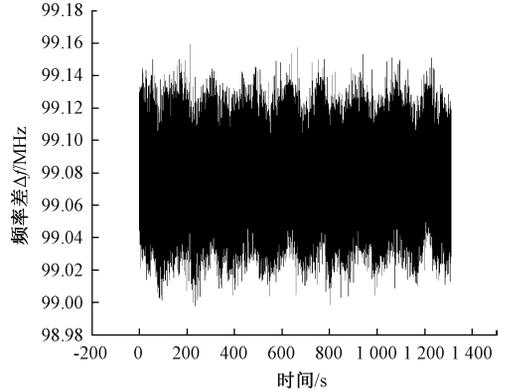


图 16 频率差值 Δf 随时间变化曲线

Fig. 16 The curve of frequency difference Δf changing with time

对数据进行艾伦方差分析,结果如图 17,在统计时间为 0.2 s 时,艾伦方差值为 0.000 93 MHz,此时的测量相对不确定度约 1×10^{-5} 。

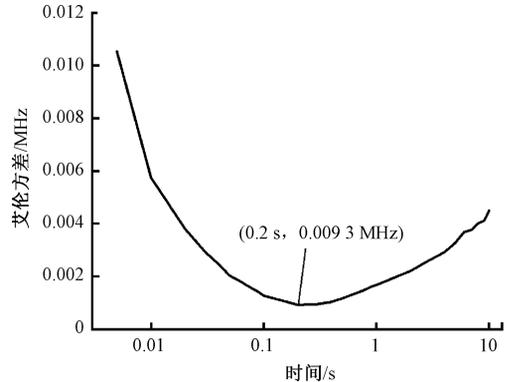


图 17 艾伦方差数据处理图

Fig. 17 Allen variance data processing diagram

通过测试,验证了搭建的双微波调制解调磁测量系统在实现高采样率的同时测量不确定度达到了 1.76×10^{-4} ,对数据进行艾伦方差分析,统计时间为 0.2 s 时测量相对不确定度为 10 ppm。结果表明,双微波解调方案具有高采样率,实时消除金刚石 NV 传感器的温漂影响等优势。

4 结 论

本文主要设计了基于 NV 色心的磁测量系统,研究了激光差分降噪与微波混频调制两种灵敏度优化方法,通过实验验证了激光荧光差分降噪可实现噪声降低约 1/8,微波混频调制方法可将斜率提升 2.5 倍左右,最终实现在

NV 色心浓度大约 300 ppb 的条件下 $0.934 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ 的磁场测量灵敏度。搭建了基于双微波调制解调的 NV 测磁系统,在 10 kHz 采样率下实现了 1.76×10^{-4} 的测量不确定度,基于阿伦方差分析方法,在 0.2 s 统计时间条件下测量不确定度达到 10 ppm,同时消除了 NV 测磁系统的温漂影响。

本文的工作对促进基于金刚石 NV 色心的磁传感器在实际工程应用中起到了重要的指导作用,该系统除了可以用于测量磁场,在电力系统中的电流测量中也有着潜在的应用场景,可以通过测量电流产生的磁场来间接实现电流的测量。

参考文献

- [1] 赵博文. 金刚石 NV 色心的制备以及在量子测量领域的应用[D]. 合肥:中国科学技术大学,2021.
ZHAO B W. Preparation of NV color center in diamond and its applications in quantum sensing[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [2] 马宗敏,郭卫军,郑斗斗,等. NV 色心磁测量研究现状及发展趋势[J]. 微纳电子技术, 2020, 57(9): 754-762.
MA Z M, GUO W J, ZHENG D D, et al. Current status and development trend of NV color core magnetic measurement research [J]. Micronanoelectronic Technology, 2020, 57(9):754-762.
- [3] 郑梦羚,宋欣达,周斌权,等. SERF 原子磁强计自适应参数标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 1-9.
ZHEN M L, SONG X D, ZHOU B Q, et al. Research on adaptive parameter calibration method of SERF atomic magnetometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 1-9.
- [4] 郑东宁. 超导量子干涉器件[J]. 物理学报, 2021, 70(1):170-183.
ZHEN D N. Superconducting quantum interference devices[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(1):170-183.
- [5] TAYLOR J M, CAPPELLARO P, CHILDRESS L, et al. High-sensitivity diamond magnetometer with nanoscale resolution[J]. Nature Physics, 2008, 4(10): 810-816.
- [6] 秦岳,王志斌,郭浩,等. 金刚石氮空位色心自旋传感技术[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(9): 55-69.
QIN Y, WANG ZH B, GUO H, et al. Diamond nitrogen vacancy color-centered spin sensing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(9): 55-69.
- [7] 张家璇,刘鑫,张立婷,等. 快速响应的 NV 色心微波传感器实现及测量[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(5): 158-160.
ZHANG J X, LIU X, ZHANG L T, et al. Fast response NV color-centered microwave sensor implementation and measurement [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(5):158-160.
- [8] 赵龙,王鑫,罗大程,等. 基于金刚石氮-空位色心的裂纹无损检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7): 239-246.
ZHAO L, WANG X, LUO D CH, et al. Nondestructive crack detection based on diamond nitrogen-vacancy centers [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2022, 36(7):239-246.
- [9] ZHAO B W, DONG Y, ZHANG SH CH, et al. Improving the NV generation efficiency by electron irradiation[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(8): 44-48.
- [10] 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.
- [11] SCHOENFELD R S, HARNEIT W. Realtime magnetic field sensing and imaging using a single spin in diamond [J]. Physical Review Letters, 2010, 106(3):030802.
- [12] 张卫东,邓胜礼,郭浩,等. 基于金刚石 NV 色心磁传感器微波调制频率优化的高灵敏度磁传感方法[J]. 微纳电子技术, 2020(3):204-208,215.
ZHANG W D, DENG SH L, GUO H, et al. A high-sensitivity magnetic sensing method based on microwave modulation frequency optimization for diamond NV color-centered magnetic sensors [J]. Micronanoelectronic Technology, 2020(3):204-208,215.
- [13] 王孝成,赵俊枝,王雪敏,等. 全轴激发提升系综金刚石 NV 色心磁灵敏度[J]. 电子测量技术, 2022, 45(10): 20-25.
WANG X CH, ZHAO J ZH, WANG X M, et al. All-axis excitation enhances magnetic sensitivity of diamond NV color centers in tethered systems [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(10): 20-25.
- [14] GRAHAM S M, RAHMAN A, MUNN L, et al. Fiber-coupled diamond magnetometry with an unshielded sensitivity of 30 pT/Hz [J]. Physical

- Review Applied, 2023, 19(4): 044042.
- [15] LIU X Y, ZHENG D D, ZHAO J ZH, et al. Improvement of excitation and collection efficiency simultaneously with integrated Au coatings for chip-scale NV magnetometer[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 352: 114206.
- [16] 赵锐, 赵彬彬, 王磊, 等. 金刚石 NV 色心磁力计极限灵敏度优化方法[J]. 微纳电子技术, 2018, 55(9): 683-687, 699.
- ZHAO R, ZHAO B B, WANG L, et al. Optimization of the limiting sensitivity of a diamond NV color-centered magnetometer [J]. Micronanoelectronic Technology, 2018, 55(9): 683-687, 699.
- [17] EL-ELLA H A R, AHMADI S, WOJCIECHOWSKI A M, et al. Optimised frequency modulation for continuous-wave optical magnetic resonance sensing

using nitrogen-vacancy ensembles[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14809.

作者简介

耿佳琪, 博士, 工程师, 主要研究方向为量子精密测量。

E-mail: ahqi0816@mail.ustc.edu.cn

赵龙, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为通信与量子传感技术。

E-mail: longzhao@ustc.edu.cn

仇茹嘉, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向量子传感技术。

E-mail: Lena-2002@163.com

柯艳国, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为变电设备运维专业管理和新技术应用。

E-mail: keyg051x@ah.sgcc.com.cn

赵博文(通信作者), 博士, 工程师, 主要研究方向为量子精密测量。

E-mail: 18295739442@163.com