

doi: 10.11720/wtyht.2023.1261

邓肖丹,李学砚,周锡华,等.基于 DDS 的氦光泵磁力仪射频场智能调频研究[J].物探与化探,2023,47(2):464-469. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1261>

Deng X D, Li X Y, Zhou X H, et al. DDS-based intelligent modulation of the radio frequency field of helium optically pumped magnetometers[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(2): 464-469. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1261>

基于 DDS 的氦光泵磁力仪射频场智能调频研究

邓肖丹^{1,2}, 李学砚^{1,2}, 周锡华^{1,2}, 段乐颖^{1,2}, 何辉^{1,2}

(1. 自然资源部 航空地球物理与遥感地质重点实验室, 北京 100083; 2. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 地磁场测量在基础地质研究、矿产资源勘查和军事探测等领域得到广泛应用, 作为磁场测量核心之一的氦光泵磁力仪探头, 其射频场调频精度是决定其磁测精度的重要影响因素。为实现易调节、高精度、高可靠性的调频信号, 本文利用直接数字频率合成器(DDS)与微控制器(MCU)相结合方式, 研究了磁力仪探头射频场智能精密调频技术, 可灵活、实时、自动、精密地对磁力仪探头射频场进行调频。调频信号加载到氦光泵磁力仪系统的联调试验表明, 磁力仪获得了稳定精密的磁共振信号, 从而保证了磁力仪实现高精度的磁场测量。

关键词: 直接数字频率合成; 氦光泵磁力仪; 调频

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2023)02-0464-06

0 引言

光泵磁力仪是国内外应用于航空和地面磁法测量最多的磁力仪器^[1], 在地磁场测量等领域得到广泛应用, 发挥了重要作用。但随着磁场测量领域的不断发展和新应用的出现, 对氦光泵磁力仪性能提出了更高的要求^[2-3], 尤其是光泵磁力仪的测量精度。影响氦光泵磁力仪测量精度的因素很多, 例如氦灯、氦气室制作工艺, 射频场调频和光电检测精度等^[3-5], 其中射频场调频精度是影响氦光泵磁力仪精度的重要因素, 本文对氦光泵磁力仪的射频场调频技术进行研究, 形成易调节、高精度、高可靠性的调频信号, 实现对磁力仪射频场的智能精密调频, 增强抗干扰能力, 提高氦光泵磁力仪的测量精度, 对于实现小型化、智能化、高精度氦光泵磁力仪的研制具有重要意义。

传统磁力仪采用压控振荡器(VCO)产生射频场, 这种方式基于变容二极管, 系统的噪声抑制能力

与磁场的测量范围有限, 频率稳定度不高, 电路设计复杂, 调频参数调节困难, 指标难以控制^[6-7]。随着数字集成电路和微电子技术的发展, 直接数字频率合成(direct digital frequency synthesis, DDS)具有频率分辨率高且输出频率稳定、控制方便等优点^[8-9], 在射频场调频方面得到广泛应用。本文采用 DDS 新技术实时跟踪被测磁场的变化, 产生精确的射频场信号, 实现磁场的精密测量。与模拟调频相比, DDS 能够对调频参数与指标进行智能调节, 改变仪器量程, 提高测量精度, 具有良好的抗干扰能力。

1 研究原理

氦光泵磁力仪是以惰性气体氦原子(⁴He)的光泵作用和磁共振为基本原理研制的磁场测量仪器^[4-5]。氦光泵磁力仪包括 3 部分: 氦光泵磁力仪探头(图 1)、信号检测控制以及人机交互。

在磁力仪探头中, 氦吸收室中的氦原子在外磁场中产生塞曼效应, 利用氦灯产生的光束以实现光

收稿日期: 2022-05-26; 修回日期: 2022-09-06

基金项目: 中国自然资源航空物探遥感中心青年创新基金(2020YFL01); 国家重点研发计划专项课题“航空重磁综合观测系统集成与飞行验证”(2021YFB3900205)

第一作者: 邓肖丹(1990-), 女, 工程师, 研究生, 主要研究领域为电路设计与航磁仪器研发工作。Email: 1533996470@qq.com

通讯作者: 李学砚(1984-), 男, 高级工程师, 研究生, 主要研究领域为光电传感器与航磁仪器研发工作。Email: leexy2604911@163.com

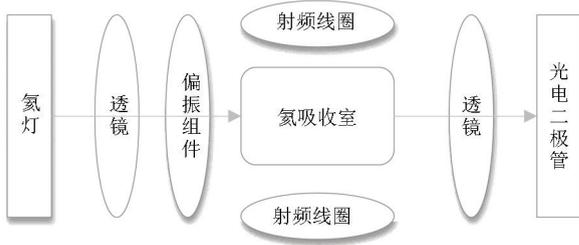


图 1 氦光泵磁力仪探头结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of helium optical pump magnetometer probe

泵作用,让氦原子重新进行光学取向,使得透过氦吸收室的光最强,而在射频场的作用下,磁共振作用使原子的去取向作用增强,使透过氦吸收室的光强变弱,当光线达到最弱时,此时发生磁共振,射频场的频率正比于外磁场值。通过测量此时射频场的频率即可获得磁场的大小^[4-5]。共振时射频场频率 f 与被测外磁场 B 之间的计算公式:

$$B = 0.0356843f, \quad (1)$$

式中: f 为共振频率, Hz; B 为外磁场强度, nT。

共振时射频场频率精度直接关系到磁力仪的测量精度。因此,通过对氦光泵磁力仪射频场(图 1 所示射频线圈)的智能调频研究,实时跟踪被测磁场的变化,自动迅速地改变射频场的频率,使之始终维持透过吸收室的光线最弱,以获取到准确的磁场数据。

2 关键器件选择

本文研究的氦光泵磁力仪的测量范围为 10 000 ~ 100 000 nT,灵敏度 5 pT,采样时间 0.1 s。通过式 (1) 可得,射频场的调频范围应为 280 KHz ~ 2.8 MHz,在此范围内快速地改变射频场频率以寻找磁共振点,通过智能精密调频实现快速锁定和维持磁共振状态。

调频是在扫频过程中对单点进行的频率调制,以当前的扫频频率为中心频率,按照设置的调制深度与频率进行摆动。根据采样时间,充分考虑极限情况,射频场频率以三角波的形式由高到低再由低到高完成一次全幅变化(即为扫频)的时间为 0.1 s,扫频步进设置为 10 Hz,对应的扫频速率应能达到 504 kHz。为保证调制波形完整,调制频率应能达到 1.1 MHz。根据灵敏度要求,频率分辨率应能达到 0.1 Hz。

通过研究分析,选取 ADI 公司生产的具备较好

无杂散动态范围(80dB@100MHz(± 1 MHz))的专用 DDS 单片电路芯片 AD9854。AD9854 输出的最高频率信号达 150 MHz,具有 12 位可编程幅度控制寄存器及 48 位可编程频率控制寄存器^[9],在 300 M 系统时钟下,频率分辨率可达 1 μ Hz,可按需求设定输出信号的频率、幅度和相位等特性,输出频率 f_{out} 与频率控制字 K 、系统时钟 f_c 的关系式为: $f_{out} = K \times f_c / 2^N$, N 是相位累加器位数 48,在系统时钟 20 MHz 的情况下,频率分辨率为 70 nHz^[10-11]。具备并行和串行两种通信方式,串行通信速度可达 10 MHz,并行通信的速度高达 100 MHz;具备一个内部高速比较器,可输出同频率的方波信号。各项指标均优于氦光泵磁力仪在射频场调频中对测量范围、频率分辨率、调频速率的要求。

DDS 芯片通信控制采用基于 Cortex-M3 内核的 32 位微控制器 STM32f103,其具有高达 72 MHz 工作频率,兼备 CAN、ADC、SPI、I2C、USB、UART 等多种外设,易于开发改进^[12]。

3 电路设计与实现

3.1 系统整体设计

系统以微控制器 STM32103 与 DDS 芯片 AD9854 为核心,STM32103 作为核心处理器进行数据处理与上位机通信,智能控制 AD9854 输出的调频信号,AD9854 输出的调频信号经过滤波与调理放大输出到氦光泵磁力仪探头的射频线圈作用于氦吸收室,实现磁共振,获取磁场值。为检测调频信号是否正确输出,单独加入解调电路进行检测。总体设计如图 2 所示。

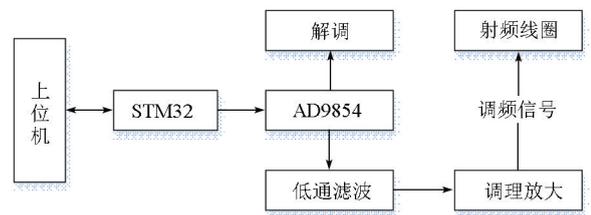


图 2 总体设计框

Fig. 2 Overall design block diagram

3.2 高速通信电路设计

高速通信电路的设计是为了保证系统能按要求实时输出调频信号。DDS 芯片 AD9854 输出信号的幅值、频率以及相位等信息取决于其内部的功能寄存器上存储的数值,而寄存器的值需通过根据地址总线和数据总线接收到的微控制器 STM32f103 输出的二进制数据进行设置。

STM32f103 通过 IO 口与 AD9854 连接,如图 3 所示。AD9854 的 6 位地址总线和 8 位数据总线分别与 STM32 的 PB 和 PD IO 口连接,在相应的地址上写入数据。I/O UD CLK 接口从高电平到低电平的跳变实现对数据的更新;WR 是写入并行数据的控制信号;RD 是读取寄存器数据的控制信号,用于软件调试优化中;MASTER RESET 作为芯片复位信号,每次需保持 10 个系统时钟以确保系统成功复位。

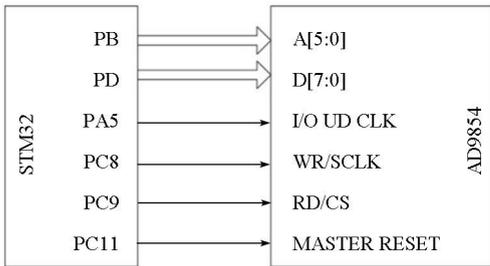


图 3 STM32 与 AD9854 连接示意

Fig. 3 Schematic diagram of connection between STM32 and AD9854

3.3 精密调频电路设计与实现

通过 STM32f103 对 AD9854 的控制能初步实现调频信号的输出,但为了获取到高精度、低噪声、稳定以及能够快速变化的方波与正弦波的调频信号,需要对 AD9854 的管脚进行设置以及输出信号进行

处理。

将 AD9854 芯片的 SPSELECT 管脚接高电平,采用 AD9854 的并行通信模式,速度可达 100 MHz。外接具有温度补偿的 20 M 晶振提供系统时钟,以便提高系统的稳定性和精度,减少由温度产生的漂移。AD9854 芯片涉及到数字地与模拟地通过 0 Ω 电阻进行单点连接,有效限制环路电流,抑制噪声。AD9854 最大输出电流为 20 mA,为获得较好的无杂散动态范围,将 DAC-RSET 的管脚连接 3.9 kΩ 电阻,输出电流为 10 mA。

AD9854 内部具有两路 DAC-IDAC 和 QDAC,其中 Q 通道对应的一对正交正弦波输出管脚,通过连接输出负载,电压范围可从 +0.5 ~ +1.0 V 进行调节。为保证芯片正常工作,波形不失真,连接的负载电阻取值 50 Ω,输出电压峰值约为 +0.5 V。

系统中对 AD9854 的内部 DAC 输出信号采用无源 120 MHz 7 阶椭圆低通滤波器进行低通滤波,可有效滤除高频谐波以及减少信号毛刺。为获得 50% 占空比的方波,使用 AD9854 内置高速比较器,VINP 和 VINN 作为比较器的两端输入,分别与输出管脚 IOUT2 和 /IOUT2 连接,从 Vout 输出占空比为 50% 的频率随正弦波变化而变化的方波,电路连接如图 4 所示。

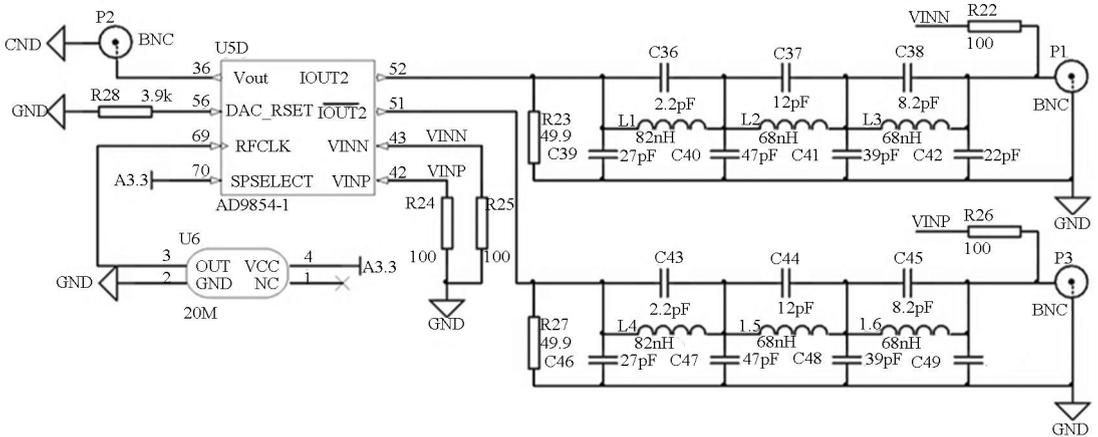


图 4 AD9854 电路连接示意

Fig. 4 Schematic diagram of circuit connection of AD9854

3.4 不失真解调电路设计与实现

由于示波器无法捕捉到调频信号的调制指标,为检测这些信息,引入了解调电路,将获得的方波经过信号调理放大,输出至以 AD650 芯片为核心的 F/V 频率电压转换电路,对调频信号进行解调。AD650 是一款高精度电压频率 (V/F) 转换器,工作频率高达 1 MHz,满刻度为 1 MHz 时其非线性度小

于 0.07%,既能用作电压频率转换器,又可用作频率电压转换器,作为 F/V 模式,转换输出电压范围为 0~10 V,输出电流为 10 mA,转换精度最高可达 0.001 5%,一般为保证设计的安全性及允许的元件公差,输入的最高频率应不大于 3 MHz^[13-14]。本系统将其作为频率电压转换器使用,解调电路连接如图 5 所示。

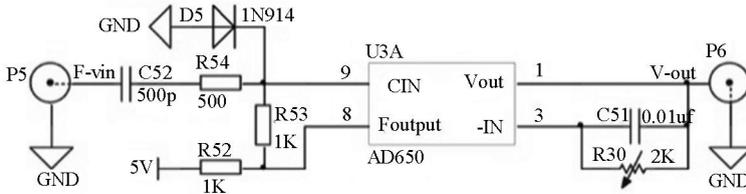


图 5 解调电路连接示意

Fig. 5 Schematic diagram of demodulation circuit connection

4 实时控制软件设计

系统以 STM32f103 作为核心处理器,串口接收上位机指令,根据系统前端数据中基波与二次谐波的幅值检测结果,利用 PID(比例积分微分)算法,通过比例控制快速调节偏差,积分控制消除偏差,微分控制对偏差的趋势进行超前控制,调整扫频范围、调频频率对应的调制深度和调制步进,控制 AD9854 的正弦波和方波的输出,产生射频场调频信号,实现对基波信号幅值的零点跟踪,从而达到跟踪外磁场变化的目的。

程序中,对系统中涉及到的接口、定时器、中断以及 AD9854 寄存器等进行初始化和参数设定。进入主程序 while 循环,根据前端数据处理结果利用 PID 算法与串口接收数据灵活自动的对扫频范围、速率与步进,以及调频信号对应的调制频率与深度进行实时设置。扫频速率与调频速率由程序中的扫频与调频两个定时器中断控制。系统程序流程示意如图 6 所示。

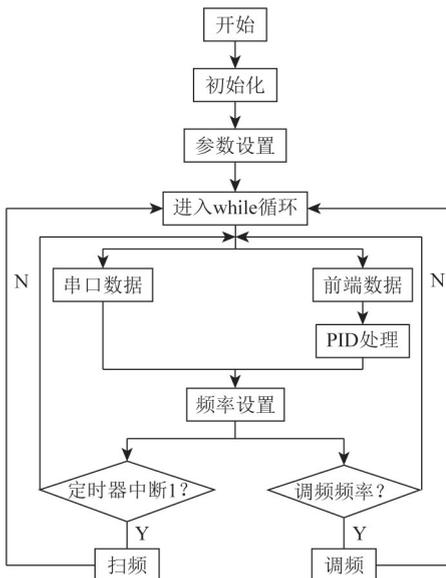


图 6 系统程序流程

Fig. 6 System flow chart

5 测试结果与分析

在完成调频电路与实时控制软件设计的基础上,集成出磁力仪射频场智能调频系统,开展系统的测试与分析,以验证系统的功能和性能指标。使用示波器扫频信号输出的正弦波和方波进行观测,并对其中的正弦波进行频谱分析。在整个调频范围 280 KHz~2.8 MHz 内,设置不同扫频范围、速率与步进参数进行测试,测试结果均与设计相符。选取其中扫频范围为 1~2 MHz,速率为 100 Hz,步进为 100 Hz 的测试结果进行分析,其输出波形与频谱分析如图 7 所示。

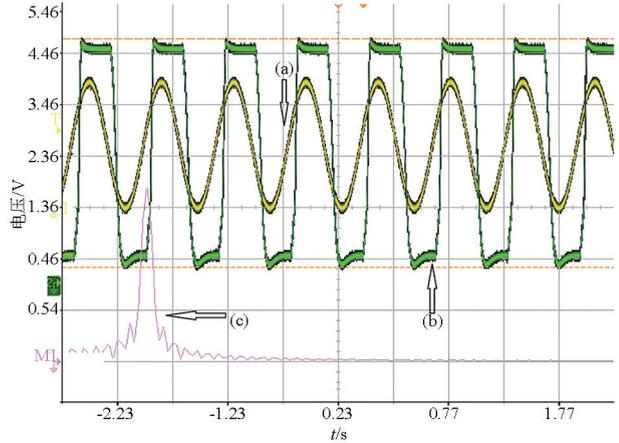


图 7 扫频信号输出波形与频谱分析

Fig. 7 Diagram of frequency sweep signal output waveform and spectrum analysis

波形 7a 是输出的正弦波,当前的扫频频率是 1.528 MHz,电压峰峰值为 515 mV;波形 7b 是通过调理放大输出的方波,扫频频率是 1.528 MHz,电压峰峰值为 4.45 V;波形 7c 是输出的正弦波的频谱分析结果,当前扫频的中心频率是 1.5 MHz。可看出输出的正弦波与方波波形稳定,无毛刺,对应关系好,实际测量结果与设计相符。

利用示波器对解调电路输出的调频信号波形进行观测。在频率范围 280 KHz~2.8 MHz 内,分别以 280 KHz、500 KHz、1 MHz、1.5 MHz、2 MHz、2.5 MHz、

2.8 MHz 等多点为中心频率进行了不同调制深度与调制频率的测试试验,均能获取到对应的解调信号。分别选取调频信号的中心频率 1 MHz、调制频率 500 Hz、调制深度 500 KHz 以及中心频率为 2.8 MHz、调制频率 500 Hz、调制深度 100 KHz 进行分析,经过示波器的数字低通滤波,解调出的调制信号如图 8 所示。

图 8 中,解调出的频率均为 500 Hz 的三角波,在中心频率为 1 MHz 的情况下,三角波的形状非常规则,峰峰值为 2.06 V;在中心频率为 2.8 MHz 的情况下,三角波略微失真,峰峰值为 25.098 mV;它们都与系统所加的调制波形一致,实际测量结果与当前设计相符。

为测试获取到的磁共振信号,在确保调频信号的正确输出后,将经过调理放大的调频信号加载到氦光泵磁力仪探头的射频线圈上,进行联调试验。在实验室环境下,通过外部恒流源作用于屏蔽筒内的线圈使得屏蔽筒内产生恒定磁场进行实验,磁力仪探头放置在磁屏蔽筒内。

在磁力仪的测量范围 10 000 ~ 100 000 nT 之间,利用屏蔽筒产生多个恒定磁场,进行试验,均能

获取到对应的磁共振信号。图 9 所示为屏蔽筒内产生 50 000 nT 的磁场,通过对氦光泵磁力仪的射频场调频,测得的磁共振信号。从图 9 可看出,获取的磁共振信号非常稳定,满足氦光泵磁力仪的测量要求。

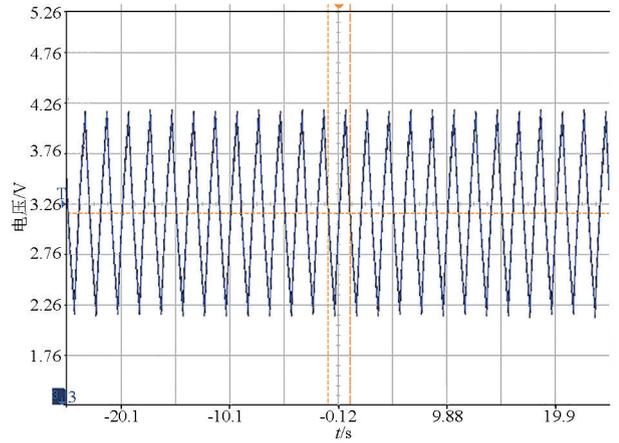


图 8 调制信号解调波形(左:中心频率 1 MHz;右:中心频率 2.8 MHz)

Fig. 8 Demodulate waveform of modulating signal (left: center frequency 1 MHz; right: center frequency 2.8 MHz)

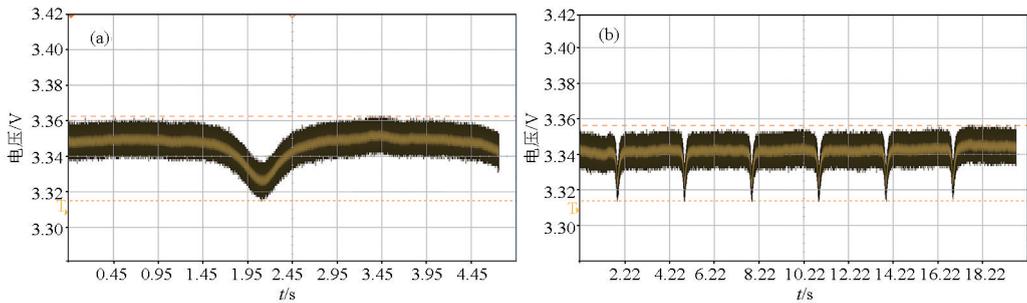


图 9 单调频(a)、连续调频(b)磁共振信号

Fig. 9 Magnetic resonance signal of single modulation (a) and continuous modulation (b)

6 结论

本文开展了磁力仪射频场的智能调频研究,利用 DDS 技术与微处理器结合的方式,开发出可智能调节且高精度的调频系统,获得了稳定的磁力仪磁共振信号,优于现有氦光泵磁力仪的指标。该系统具有如下显著特点:

- 1) 可输出高精度、高可靠性的正弦波与方波,系统结构简单可靠,且抗干扰能力强。
- 2) 可实时调节扫频范围、速率、步进以及调频信号的调制速率与调制深度,实现了对磁力仪探头射频场的智能精密调频,调制灵活方便。
- 3) 可为磁力仪提供稳定的磁共振信号,提升了磁力仪的性能指标。

总之,通过基于 DDS 的氦光泵磁力仪射频场智能调频的研究,实现了既简单可靠,又智能精密的调频,对于提高氦光泵磁力仪的测量精度具有重要意义。

参考文献 (References):

[1] 黄成功,顾建松,宗发保,等. 氦光泵磁力仪探头设计和环路数字化研究[J]. 地球物理学报,2019,62(10):3675-3685.
Huang C G, Gu J S, Zong F B, et al. Design of helium optical-pumping magnetometer probe and digital loop electronics circuit[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(10): 3675-3685.

[2] 吕庆田,张晓培,汤井田,等. 金属矿地球物理勘探技术与设备:回顾与进展[J]. 地球物理学报, 2019, 62(10): 3629-3664.
Lyu Q T, Zhang X P, Tang J T, et al. Review on advancement in technology and equipment of geophysical exploration for metallic deposits in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62

- (10):3629-3664.
- [3] 吴文福,袁皓. 氦光泵磁力仪的应用与发展研究综述[J]. 声学
与电子工程,2016,4(4):1-5,9.
Wu W F, Yuan H. Review on application and development of heli-
um photopump magnetometer[J]. Acoustics and Electronics Engi-
neering,2016,4(4):1-5,9.
- [4] 胡睿帆. 数字式氦光泵磁力仪的工程样机设计[D]. 长春:吉
林大学,2017.
Hu R F. Design of engineering prototype for digital Helium optical-
ly pumped magnetometer[D]. Changchun:Jilin University,2017.
- [5] 张振宇. 氦光泵磁测技术研究[D]. 长春:吉林大学,2012.
Zhang Z Y. Research on optically pumped Helium magnetic mea-
surement technology[D]. Changchun:Jilin University,2012.
- [6] 连明昌,程德福,周志坚,等. 光泵磁敏传感器中 FPGA 调频器
设计与实现[J]. 传感技术学报,2012,25(11):1618-1622.
Lian M C, Cheng D F, Zhou Z J, et al. Design and realization of
frequency modulator with FPGA for optically pumped magneto-de-
pendent sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,
2012,25(11):1618-1622.
- [7] 张正,张延华,温晓伟,等. 采用可调谐高 Q 有源电感的高价值
VCO 的研究[J]. 电子器件,2021,44(2):272-277.
Zhang Z, Zhang Y H, Wen X W, et al. A high figure-of-merit
VCO using tunable and high Q active inductor[J]. Chinese Journal
of Electron Devices,2021,44(2):272-277.
- [8] 沈辉,薛兵,唐朝阳,等. 基于 DDS 技术的信号发生器设计
[J]. 电子测量技术,2020,43(20):160-164.
Shen H, Xue B, Tang C Y, et al. Design of signal generator based
on DDS technology[J]. Electronic Measurement Technology,
2020,43(20):160-164.
- [9] 童建平,杨建武. DDS 在光泵磁力仪频率锁定中的应用[J]. 浙
江工业大学学报,2019,47(4):448-452,468.
Tong J P, Yang J W. The application of DDS in the frequency loc-
king of optical pump magnetometer[J]. Journal of Zhejiang Univer-
sity of Technology,2019,47(4):448-452,468.
- [10] 王浩军. 基于 AD9854 的信号源设计[J]. 舰船电子工程,2018,
38(9):175-178.
Wang H J. Design of signal source based on AD9854[J]. Ship E-
lectronic Engineering,2018,38(9):175-178.
- [11] 崔永俊,杨卫鹏,刘阳,等. MIMO 雷达正交线性调频信号源系
统的设计[J]. 仪表技术与传感器,2018(7):107-110.
Cui Y J, Yang W P, Liu Y, et al. Design of orthogonal linear fre-
quency modulation signal source system for MIMO radar[J]. In-
strument Technique and Sensor,2018(7):107-110.
- [12] 邹彬,董军堂,杨延宁,等. 基于云平台的温室大棚管理系统
[J]. 传感器与微系统,2021,40(12):112-114,118.
Zou B, Dong J T, Yang Y N, et al. Greenhouse management sys-
tem based on cloud platform[J]. Transducer and Microsystem
Technologies,2021,40(12):112-114,118.
- [13] 万天才. AD650 电压频率与频率电压转换器[J]. 国外电子元
器件,1999(7):1-3.
Wan T C. AD650 voltage frequency to frequency voltage converter
[J]. International Electronic Elements,1999(7):1-3.
- [14] 朱亚朋,李鸿鹏,霍德强,等. 基于 AD650 的模拟信号光纤传输
系统的设计[J]. 计算机测量与控制,2012,20(6):1662-1664,
1668.
Zhu Y P, Li H P, Huo D Q, et al. Design of analog signal trans-
mission system based on AD650[J]. Computer Measurement &
Control,2012,20(6):1662-1664,1668.

DDS-based intelligent modulation of the radio frequency field of helium optically pumped magnetometers

DENG Xiao-Dan^{1,2}, LI Xue-Yan^{1,2}, ZHOU Xi-Hua^{1,2}, DUAN Le-Ying^{1,2}, HE Hui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology, MNR, Beijing 100083, China; 2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Geomagnetic field surveys have been widely applied in the fields such as basic geological study, mineral resource exploration, and military detection. A key tool for geomagnetic field surveys is helium optically pumped magnetometer probes. The frequency modulation precision of the radio frequency field used in the probes is an important factor affecting geomagnetic survey precision. To achieve frequency modulation signals featuring easy modulation, high precision, and high reliability, this study proposed an intelligent frequency modulation technology for the radio frequency field of the magnetometer probes by combining the direct digital frequency synthesizer (DDS) and the microcontroller unit (MCU). This technology can achieve flexible, real-time, automatic, and precise frequency modulation of the radio frequency field of the magnetometer probes. As revealed by the integration tests in which frequency modulation signals were loaded into the helium optically pumped magnetometer system, the magnetometer can obtain stable and precise magnetic resonance signals, thus ensuring high-precision geomagnetic field surveys.

Key words: direct digital frequency synthesis; helium optically pumped magnetometer; frequency modulation