

1 bit Sigma-Delta 数字磁通门磁强计仿真*

吕 尚^{1,2} 王劲东^{1,2} 张艺腾¹

1(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 设计了一种基于 1 bit Sigma-Delta 调制技术的数字磁通门磁强计, 并利用 Matlab Simulink 工具对其进行仿真建模与分析, 获得了系统在噪声、线性度、动态响应速度以及频率响应等方面的性能参数. 在 ± 1000 nT 量程范围内, 该磁强计系统在 1 Hz 处的噪声为 $0.17 \text{ pT}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 最大线性误差为 1.04 pT, 动态响应速度为 $1.07 \times 10^3 \text{ nT}\cdot\text{s}^{-1}$, 频率响应带宽超过 30 Hz. 仿真结果证实, 采用 1 bit Sigma-Delta 调制技术显著提高了数模转换器 (Digital-to-Analog Converter, DAC) 的转换精度, 有效降低了数字磁强计系统的本底噪声和非线性误差, 显著提升了数字磁强计的性能. 基于 1 bit Sigma-Delta 调制技术的数字磁通门磁强计性能指标能够满足高精度磁场探测任务的要求, 为空间磁场探测领域提供了一种高精度、高可靠性的探测手段, 在深空探测及空间科学领域具有广泛的应用前景.

关键词 数字磁通门磁强计, 1 bit DAC, Sigma-Delta 调制器, Simulink 工具

中图分类号 V447

Simulation of 1 bit Sigma-Delta Digital Fluxgate Magnetometer

LÜ Shang^{1,2} WANG Jindong^{1,2} ZHANG Yiteng¹

1(State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract A high-resolution digital fluxgate magnetometer is designed based on the 1 bit sigma-delta modulation technique with 24 bits measurement resolution. By using Matlab Simulink tool kits, the digital fluxgate magnetometer system was simulated and analyzed, the performance parameters of the system in terms of noise, linearity, dynamic response speed and frequency response are obtained. The simulation result shows that, in the range of ± 1000 nT, the magnetometer system has a noise floor of $0.17 \text{ pT}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ at 1 Hz, a maximum linearity error of 1.04 pT, a dynamic response speed of $1.07 \times 10^3 \text{ nT}\cdot\text{s}^{-1}$, and a -3 dB bandwidth of more than 30 Hz. The use of a 1 bit Sigma Delta modulator, significantly improves the conversion accuracy of the DAC (Digital-to-Analog Converter), reduces the noise level and non-linearity of the magnetometer system, and significantly improves the overall performance

* 民用航天技术预先研究项目资助 (D050103)

2024-04-22 收到原稿, 2024-12-12 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

of digital fluxgate magnetometer. This system is able to meet the requirements of long life, high precision and high reliability of space magnetic field exploration tasks, provides a high-precision and high-reliability detection means for the field of space magnetic field detection, showing its wide application prospects in the field of deep space exploration and space science.

Key words Digital fluxgate magnetometer, 1 bit DAC, Sigma-Delta modulator, Simulink

0 引言

空间磁场作为关键参数之一, 在空间天气、天体起源与演化、环境预警以及基础科学等多个研究方向中扮演着至关重要的角色, 是空间科学研究的重要基本物理量. 磁通门磁强计基于法拉第电磁感应定律的原理^[1], 以其高分辨率、高稳定性、小型化、高灵敏度、轻量化以及良好的线性度等特性, 在空间磁场测量领域得到了广泛应用^[2].

根据传感器信号处理方式的不同, 磁通门磁强计主要分为模拟式和数字式. 模拟式磁通门磁强计采用多级模拟电路进行信号处理, 但这种设计存在体积大、结构复杂、易老化、受环境温度影响较大等缺陷^[3]. 随着数字信号处理技术的进步, 高精度、高可靠性、低功耗的数字式磁通门磁强计逐渐取而代之, 成为该领域的发展趋势.

在国际上, 2007 年发射的 THEMIS 星座采用了数字磁通门磁强计来探测空间磁场, 以研究磁层亚暴的触发机制. 该系统的测量精度为 20 bit, 系统噪声为 $0.01 \text{ nT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ^[4]. 此外, 一些任务中还采用了 1 bit 数字磁通门磁强计, 如金星快车卫星搭载的 1 bit 数字磁通门磁强计, 具有低质量、低功耗、低噪声和高稳定性等特点, 能在 $-160 \sim 120^\circ\text{C}$ 的温度范围内工作, 系统噪声低于 $0.01 \text{ nT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ^[5]. 2015 年美国国家航空航天局 (NASA) 启动的“磁层多尺度探测” (Magnetospheric Multiscale, MMS) 任务中, 每颗卫星均搭载了 1 bit 数字磁通门磁强计, 其分辨率达到 24 bit, 在 $\pm 10500 \text{ nT}$ 的测量范围内噪声水平仅为 $0.008 \text{ nT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ^[6]. 2021 年发射的风云三号 05 星搭载的数字磁强计在中国首次采用多 bit Sigma-Delta 调制技术, 其在 $\pm 64000 \text{ nT}$ 的测量范围内实现了 0.007 nT 的分辨率, 噪声水平仅为 $0.005 \text{ nT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ^[7]. 同样, 空间科学先导专项 SMILE 科学卫星的磁强计也采用了数字信号处理方案, 通过多 bits Sigma-Delta 调制将系统噪声降至 $0.005 \text{ nT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 显著降

低了功耗和质量, 并提高了抗辐射能力. 文中提及的磁通门磁强计性能参数详见表 1.

目前中国在基于 1 bit Sigma-Delta DAC 的数字磁通门磁强计方面的研究尚属起步阶段, 有待开展更多相关研究工作.

1 工作原理

磁通门磁强计作为一种测量恒定和低频微弱磁场的矢量磁场测量仪器, 主要包括两个系统组成部分, 即磁通门传感器和信号处理单元.

以单磁芯型磁通门传感器为例, 单磁芯探头主要由软磁芯、激励线圈和信号线圈组成. 激励线圈在磁芯中产生饱和交变磁场, 通过信号线圈输出感应电压 U_0 , 其表达式为

$$U_0 = N S H_0 \omega \sum_{i=1}^{\infty} 2 \mu_i \sin 2i \omega t - N S H_m \sum_{i=1}^{\infty} i \mu_i [\cos(2i + 1) \omega t - \cos(2i - 1) \omega t] - \frac{1}{2} N S H_m \sum_{i=1}^{\infty} \mu_i [\cos(2i - 1) \omega t - \cos(2i + 1) \omega t] - N S H_m \mu_d \cos \omega t. \quad (1)$$

其中, N 为信号线圈匝数, S 为磁芯横截面积, H_0 为待测环境磁场强度, ω 为激励信号的频率, μ_i 为磁芯磁导率的各次谐波分量幅值, H_m 为激励磁场的磁场强度, μ_d 为磁导率直流分量^[8].

当环境磁场 H_0 为零时, 输出电压只含有激励磁场信号的奇次谐波 $(2i-1)$, 这是变压器效应产生的感应电压, 也是磁通门传感器的噪声来源之一; 当环境磁场 H_0 不为零时, 输出的电压信号中既包含激励磁场信息, 也包含环境磁场信息的偶次 $(2i)$ 谐波, 其中二次谐波幅值最大, 因此通过提取磁通门传感器输出信号中的二次谐波分量^[9], 并测量其大小, 可得到待测环境磁场的强度.

数字磁通门磁强计的实现依赖于先进的数字信号处理技术, 该技术能够将模拟信号转化为数字信

号,并在数字领域内完成信号处理.这一转化不仅极大地增强了设备的抗干扰能力,而且有效降低了功耗,同时提升了处理速度^[10].数字磁强计的性能在很大程度上受限于DAC的性能.传统的奈奎斯特型DAC虽然具有较高的转换速度,但精度不足,难以同时满足高速转换、高分辨率和低功耗的需求^[11].为解决这一问题,引入了Sigma-Delta调制技术,利用较低精度的转换器即可实现高有效位数的量化输出,同时具备出色的动态范围和信噪比,尤其在处理低速、高动态范围信号时表现卓越^[12].Sigma-Delta DAC结构如图1所示,包括数字插值滤波器、Sigma-Delta调制器、低精度DAC和模拟低通滤波器.数字信号首先经过数字插值滤波器过采样处理,随后通过Sigma-Delta调制器进行噪声整形,再由DAC将数字信号转换为模拟信号,最终通过模拟低通滤波器滤除噪声并实现无损输出^[13].

根据调制器量化位数的不同,可以将Sigma-Delta DAC分为1 bit和多bit两种类型^[14].多bit Sigma-Delta DAC能够提供更精细的量化位数,具有更好的系统稳定性,因此常被应用在高分辨率的场景中.然而,这种高精度也往往伴随着系统复杂度的提升、功耗的增加以及成本的上升.

相比之下,1 bit DAC结构更容易实现,对硬件设计要求较低,能够显著降低系统的复杂性和功耗需求,同时减少对高精度模拟元件的依赖.但是,想要得

到较高的信噪比往往需要非常大的过采样率和调制器阶数,这会影响系统的稳定性.所以,在设计过程中对于过采样率和调制器阶数以及结构参数的确定需要进行更准确地计算,以达到预期的设计目标^[15,16].图2给出了1 bit数字磁通门磁强计典型的信号处理流程.

2 仿真模型

基于Simulink仿真平台,构建了1 bit数字磁通门磁强计仿真系统.该模型采用理想磁强计传感器,以排除噪声、线性度和温度特性等非理想因素的影响.仿真系统包括1 bit模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)、相敏检波器、积分器、1 bit Sigma-Delta调制器、1 bit数模转换器DAC、模拟低通滤波器、反馈回路和数字信号处理单元.磁通门传感器模拟信号由1 bit ADC量化,并通过相敏检波、积分和1 bit Sigma-Delta调制处理后,再经1 bit DAC转换后反馈至磁通门传感器,构成闭环磁场测量系统.1 bit Sigma-Delta调制信号经积分梳状滤波器(Cascade-Integrator Comb Filter, CIC)降采样处理后,输出磁场测量值.

2.1 磁通门传感器

根据磁通门探头工作原理,在Simulink仿真环境中构建了磁通门传感器输出信号仿真模型.该模型

表 1 数字磁强计的性能参数
Table 1 Performance parameters of digital magnetometer

探测任务	测量范围/nT	噪声/(nT·Hz ^{-1/2})	分辨率/bit	采样率/Hz
风云三号05星	±65000	0.01	24	50
SMILE	±64000/±12800	0.005	24	40
金星快车卫星	±262/±524	0.01	20	1, 32, 128
THEMIS	±25000	0.01	20	128
MMS	±10500/±650	0.008/0.001	24	128

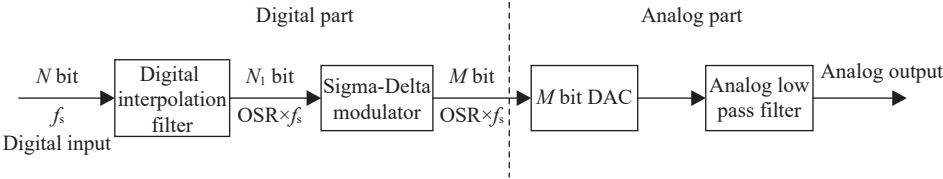


图 1 Sigma-Delta DAC 结构
Fig. 1 Sigma-Delta DAC block diagram

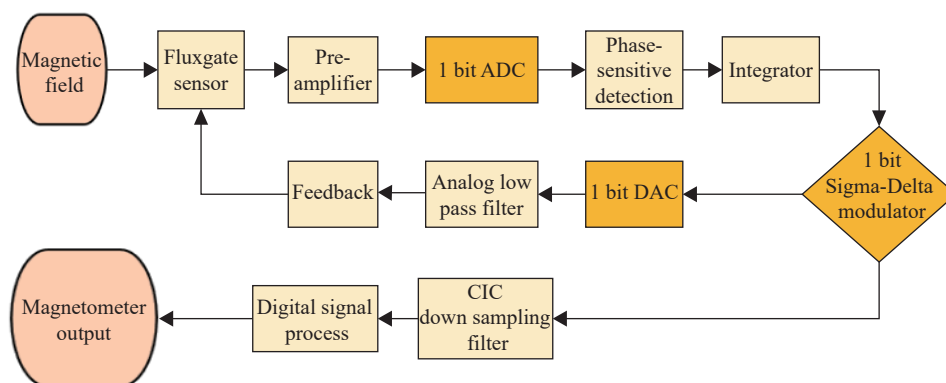


图 2 数字磁通门磁强计结构

Fig. 2 Digital fluxgate magnetometer block diagram

中, 激励信号频率 ω 为 10 Hz, 使用其 1~10 次谐波数据进行建模, 图 3 给出的是磁通门传感器模型仿真输出波形。

2.2 1 bit A/D 转换器

仿真模型采用了 Mash2-1 级联结构的 1 bit ADC, 以 1.024 MHz 的频率进行采样, 运用了三阶 Sigma-Delta 调制技术, 并具备 24 bit 的量化能力。仿真分析表明, 该模块能够实现 151.2 dB 的信噪比^[2], 为后续高精度数字磁通门磁强计系统的性能分析奠定了坚实的基础。

2.3 相敏检波模块

相敏检波模块负责分离感应信号中的二次谐波分量并确定其相位, 该模块的输入信号表示为

$$V_{IN} = V_m \cdot H_0 \sin 2\omega t. \quad (2)$$

其中, V_m 表示二次谐波的幅值, H_0 代表外部磁场, ω 为激励信号的频率。通过傅里叶级数分解, 该信号可表示为

$$V_{SQ} = \frac{4}{\pi} V_1 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin[(2n+1)2\omega t]. \quad (3)$$

相敏检波模块输出的信号则为

$$V_{PSD} = V_m H_0 \sin 2\omega t \cdot \frac{4}{\pi} V_1 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin[(2n+1)2\omega t]. \quad (4)$$

输入信号经过相敏检波及低通滤波处理后, 保留直流分量 ($n=0$), 滤除高频分量 ($n>0$), 从而获得包含磁场信息的直流信号。进一步处理该信号, 即可提取待测磁场数据^[17]。在数字磁通门磁强计的仿真系统中, 相敏检波模块采用与磁通门传感器激励信号同源的 20 kHz 方波信号作为参考, 以满足后续信号处

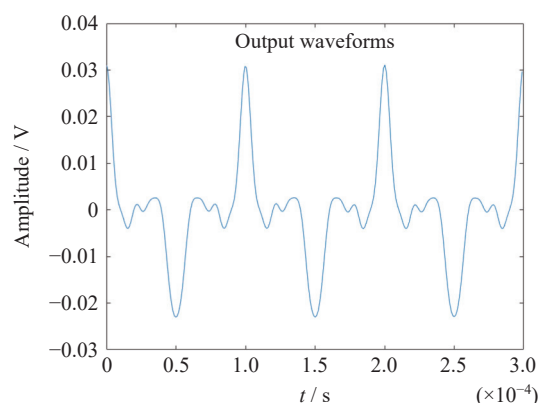


图 3 磁通门探头仿真波形

Fig. 3 Simulation waveform of fluxgate probe

理与分析的需求。

2.4 转换器

磁通门磁强计采用闭环反馈结构将测量值转换为电流输出至探头的反馈线圈抵消被测磁场, 以确保探头工作在接近零磁场状态^[18], 从而提升系统的灵敏度、动态范围和稳定性^[19]。在数字磁通门磁强计的仿真系统中, 1 bit Sigma-Delta DAC 负责将数字信号转换为模拟电平, 并通过模拟低通滤波器消除高频噪声对输出信号的干扰, 使得输出信号更加平滑和稳定^[20]。本文设计了 1 bit Sigma-Delta DAC, 其由一个三阶 128 倍过采样数字插值滤波器和五阶单环 1 bit Sigma-Delta 调制器组成, DAC 部分的结构如图 4 所示。

2.4.1 数字插值滤波器

数字插值滤波器的作用是在采样点间插入零值, 以消除频谱镜像、平滑信号波形, 并提升采样率, 确保系统在超过奈奎斯特频率的情况下稳定运行^[21]。设计并实现的一个三级 128 倍插值滤波器如图 5 所示,

该滤波器的前两级使用半带滤波器实现 4 倍插值, 第三级则采用 CIC 滤波器实现 32 倍插值, 从而达到 128 倍的总插值效果. 这种级联设计相较于单级滤波器, 简化了设计复杂性, 降低了计算负荷, 并减少了电路面积和功耗^[22]. 通过 Filter Designer 工具对滤波器进行分析, 结果显示三级滤波器在阻带的抑制均超过了 80 dB, 且在各频率瓣内具有线性的相频特性, 满足了设计需求.

2.4.2 调制器

图 6 给出了所设计的 5 阶单环 1 bit Sigma-Delta 调制器结构. 该调制器利用噪声整形技术降低带内噪声, 从而增强系统的动态范围和信噪比. 通过采用 1 bit 量化器, 该设计简化了硬件结构, 减少了功

耗, 同时提升了工作效率. 此外, 高阶调制策略有效降低了数据传输与存储的需求, 提高了带宽利用率, 并确保了优异的抗混叠性能. 最后, 该设计采用脉冲宽度调制技术完成数模转换, 并通过模拟低通滤波器消除高频调制噪声, 以获得高精度的反馈模拟信号.

2.4.3 DAC 性能

将数字插值滤波器与 1 bit Sigma-Delta 调制器级联, 并在 128 倍过采样率下对频率为 500 Hz、幅值为 0.5 的正弦信号进行了功率谱密度分析. 如图 7 所示, 仿真结果表明, 输出信号的信噪比 (SNDR) 达到了 144.2 dB, 有效位数 (ENOB) 为 23.7 bit.

2.5 CIC 降采样滤波器

在数字磁通门磁强计的电子学系统中, 滤波器扮

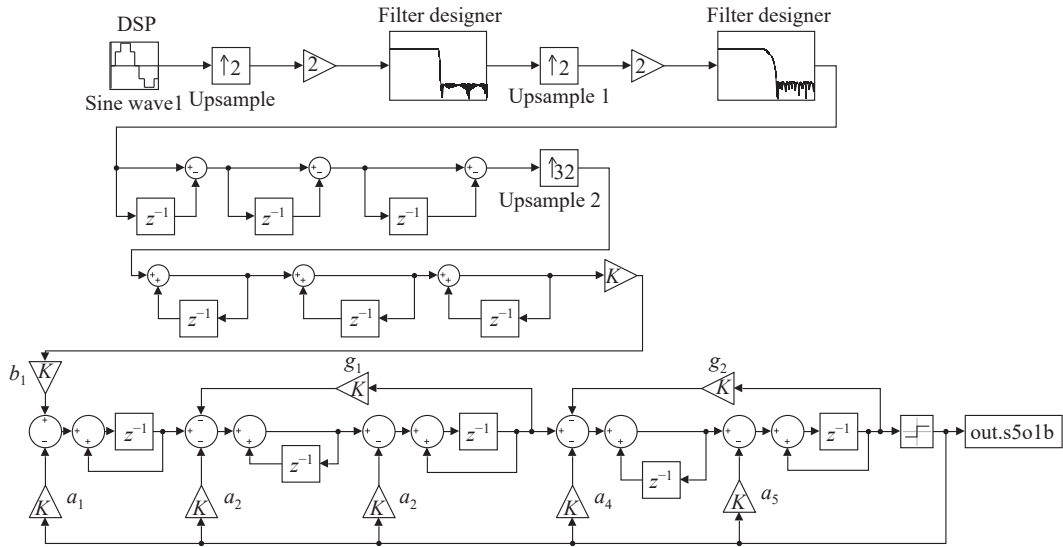


图 4 1 bit Sigma-Delta DAC 结构

Fig. 4 1 bit Sigma-Delta DAC structure

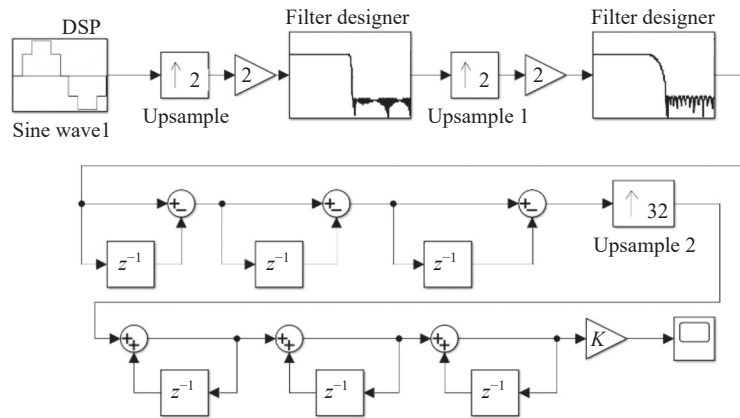


图 5 三级插值滤波器

Fig. 5 Three-stage interpolation filters

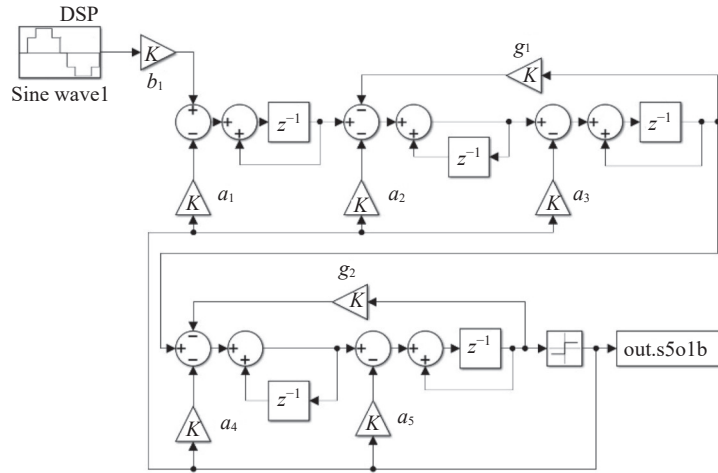


图 6 1 bit 5 阶单环 Sigma-Delta 调制器

Fig. 6 1 bit 5-order single loop Sigma-Delta modulator

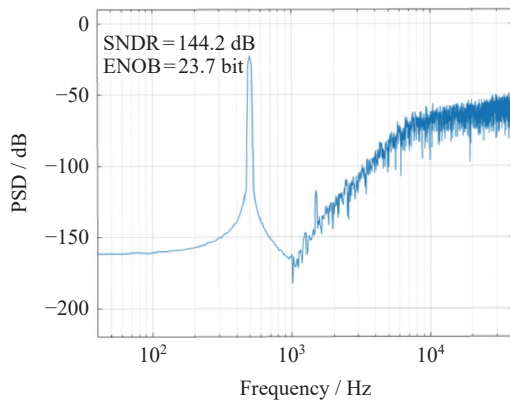


图 7 1 bit Sigma-Delta DAC 数字部分输出信号功率谱密度

Fig. 7 Power Spectral Density (PSD) of 1 bit Sigma-Delta DAC digital section output signal

演着至关重要的角色. 其核心功能在于滤除带外的高频噪声, 并对信号执行降采样处理, 将高速数据流的频率降至奈奎斯特率. CIC 滤波器以其简洁的结构和统一的系数 (均为 1) 而著称, 仅需加法器、积分器和寄存器即可实现信号的抽取^[14]. 通过设计, 两级 CIC 降采样滤波器共实现了 8000 倍降采样率, 在有效实现信号降采样的同时, 避免了带内信号的不必要衰减.

3 系统性能仿真

利用 Simulink 仿真工具对 1 bit 数字磁通门磁强计系统进行建模, 基于理想传感器模型 (即线性度

100%, 带宽无限制, 动态响应无延迟) 开展对其噪声、线性度、动态响应和频率响应等特性的分析, 重点研究 1 bit Sigma-Delta 数字磁强计电路对上述性能的影响. 仿真模型中磁强计各模块的参数详见表 2.

3.1 噪声特性

在进行恒定磁场仿真的基础上, 进一步深入分析系统的噪声特性. 其中噪声的有效均方根 (Root Mean Square, RMS) 值为 3.9 pT. 图 8 表明了系统在 1 Hz 频率处的噪声功率谱密度为 $0.17 \text{ pT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. 仿真分析结果表明, 系统噪声主要归因于 ADC 的量化噪声. 因此, 提高 ADC 的分辨率是降低系统噪声的有效途径之一.

磁通门磁强计系统的噪声主要来源于传感器噪声和电子学噪声. 传感器噪声涉及多个因素, 包括磁芯的物理参数和在感应信号中构成干扰的奇次谐波分量, 其中磁芯的物理参数包括激励线圈匝数和磁芯尺寸^[23]. 特别是磁芯材料的巴克豪森噪声是传感器噪声的主要来源之一, 这种噪声是材料固有的, 无法通过电路设计消除^[24].

电子学噪声则是在数字信号处理中电路引入的噪声, 包括信号放大器放大微弱信号时的结构噪声, 以及 ADC 和 DAC 在信号转换中引入的量化噪声、采样噪声和非线性噪声等. 在传统磁通门磁强计系统中, 模拟电路在 1 Hz 处的噪声功率谱密度可达 $4.7 \text{ pT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ^[8].

对比发现, 尽管传感器噪声在数字磁通门磁强计系统中占有一定比例, 但在本文的仿真系统中, 由于

表 2 1 bit 数字磁通门磁强计参数
Table 2 Parameters of modules in 1 bit digital fluxgate magnetometer

磁通门模块	参数
输入信号频率/Hz	10
输入信号量程/nT	± 1000
1 bit ADC采样频率/MHz	1.024
相敏检波参考频率/kHz	20
积分器采样频率/MHz	1.024
Sigma-Delta调制器位数/bit	1
反馈模拟滤波器通带/Hz	5000
输出CIC降采样滤波器抽取率	8000
输出信号频率/Hz	128

采用了理想的磁通门传感器模型, 电子学噪声成为主要噪声源. 为了降低电子学噪声的影响, 本文采用了高分辨率的 ADC 和 DAC, 并在过采样频率下运行. 同时, 对 Sigma-Delta 调制器进行了仿真验证, 确保系统整体噪声保持在较低水平. 图 8 所示的噪声功率谱密度表明, 在 1 Hz 处, 系统的整体噪声功率谱密度为 $0.17 \text{ pT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$.

3.2 线性度特性

在固定步长为 200 nT 的恒定环境磁场下, 在 $\pm 1000 \text{ nT}$ 范围内开展了仿真实验, 旨在探究系统的线性度特性. 利用最小二乘法对仿真数据进行线性回归分析, 计算系统的最大线性度误差, 从而评估系统的线性度. 图 9 给出了线性拟合曲线和线性拟合误差. 1 bit 数字磁通门磁强计系统的最大线性误差为 1.04 pT, 线性度为满量程的 $5.21 \times 10^{-7} \%$, 这一结果表明该系统在给定范围内展现了优异的线性度性能.

3.3 动态响应速度特性

动态响应速度特性是衡量系统对输入信号变化响应快慢的关键指标, 其描述了系统从初始状态过渡到稳定状态所需的时间. 将幅值为 1000 nT、频率为 1 Hz 的方波磁场信号输入至 1 bit 数字磁通门磁强计仿真模型, 通过分析输出响应曲线的斜率, 计算得出系统的动态响应速度为 $1.07 \times 10^3 \text{ nT} \cdot \text{s}^{-1}$. 仿真结果如图 10 所示.

3.4 频率响应特性

根据仿真结果, 系统的频率响应特性如图 11 所示. 将幅值为 1000 nT、频率在 10~60 Hz 范围内变化的正弦磁场信号输入 1 bit 数字磁通门磁强计仿真

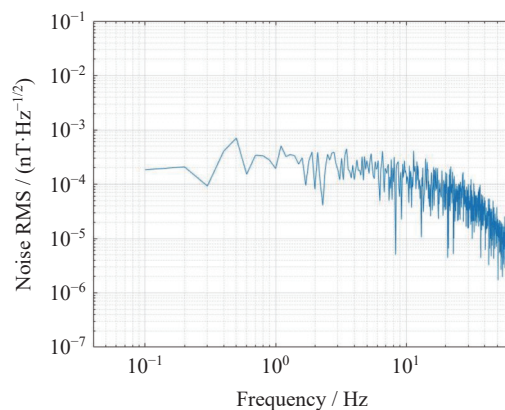


图 8 系统噪声功率谱密度

Fig. 8 Power Spectral Density (PSD) of system noise

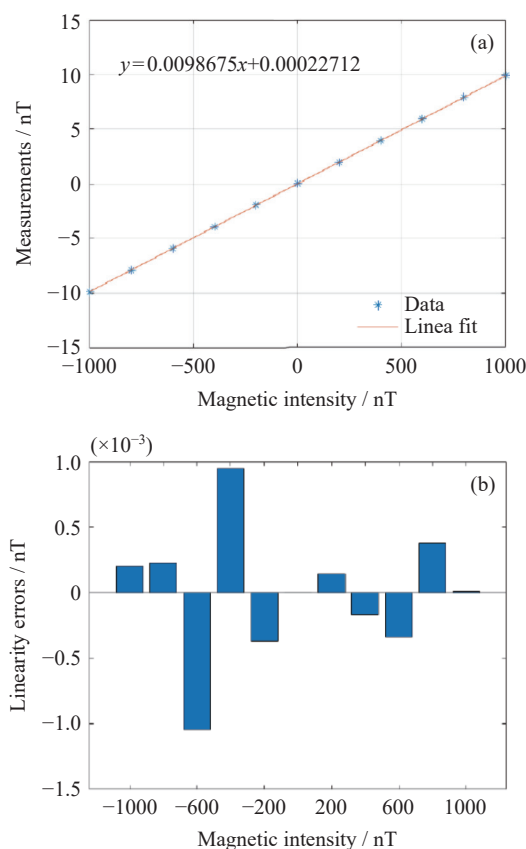


图 9 线性拟合结果 (a) 与误差 (b)

Fig. 9 Results of linear fitting (a) and error (b)

模型, 计算输出信号与输入信号均方根之比 (以分贝 dB 表示), 得到系统的频率响应特性. 结果表明, 系统的 -3 dB 带宽为 32.79 Hz. 该系统的带宽受到 CIC 降采样滤波器的倍数和低通滤波器性能参数的影响, 通过调整降采样率或截止频率, 可以有效扩展系统的有效带宽.

4 仿真结果对比

为研究不同量化位数 ADC 对数字磁通门磁强计系统性能的影响, 进行仿真对比实验. 将 1 bit ADC 替换为不同量化位数的 ADC, 同时保持其他模块不变. 通过对比分析, 研究了在不同量化位数

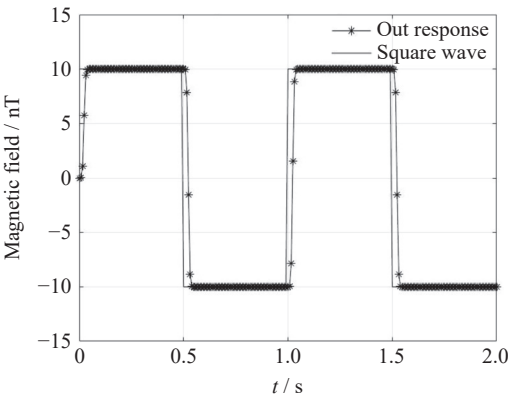


图 10 系统动态响应速度仿真

Fig. 10 System dynamic response speed

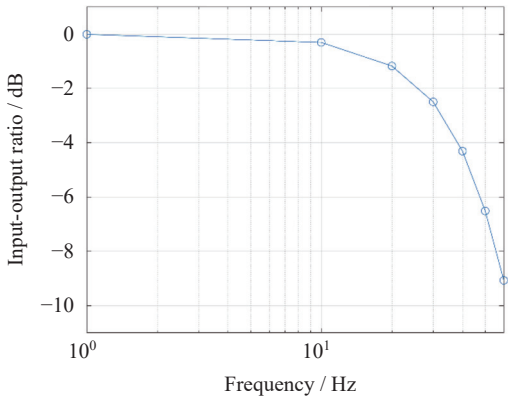


图 11 1 bit 系统频率响应特性

Fig. 11 1 bit system frequency response

ADC 条件下数字磁通门磁强计的性能, 包括噪声、线性度、动态响应速度和频率响应. 实验结果见表 3.

图 12 和图 13 给出了 1 bit 数字磁通门磁强计系统与多 bit 系统在噪声和频率响应方面的性能差异. 结果表明, 与 20 bit 磁强计系统相比, 1 bit 系统在有效带宽内的噪声水平更低, 在 1 Hz 处的噪声功率谱密度降低了 59.65%, 线性度降低了 97.32%. 同时, 系统的 -3 dB 带宽基本保持不变. 在排除模拟电路噪声和传感器噪声影响的前提下, 1 bit 数字磁通门磁强计系统在噪声性能、线性度指标上具有一定优势.

5 结论

基于 1 bit Sigma-Delta 机制, 设计了一种高分辨率 24 bit 数字磁通门磁强计, 并搭建了 MATLAB 仿真模型. 仿真分析表明, 在 ± 1000 nT 的量程范围内, 该数字磁强计噪声水平为 $0.17 \text{ pT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ (1 Hz 条件下), 最大非线性误差为 1.04 pT, 动态响应速度为 $1.07 \times 10^3 \text{ nT} \cdot \text{s}^{-1}$, 且有效带宽超过 30 Hz. 在排除传感器本底噪声和模拟电路噪声的条件下, 该 1 bit Sigma-Delta 数字磁通门磁强计系统在噪声和线性度方面均优于多 bit 系统, 显著提高了数字磁通门磁强计的整体性能.

与传统模拟磁通门磁强计相比, 该 1 bit 数字磁通门磁强计采用数字信号处理技术, 去除了信号处理电路中的模拟开关、移相器、积分器和滤波器等模拟器件, 简化了模拟信号处理流程. 这一改进确保了系统在恶劣环境下的稳定性和目标探测能力, 满足了空间磁场探测任务对长寿命、高精度和高可靠性的需求, 有望在深空探测等空间科学领域获得广泛的应用.

表 3 不同量化位数的数字磁通门磁强计仿真系统性能对比

Table 3 Performance comparison of digital fluxgate magnetometer simulation systems with different quantization bits

仿真AD位数/bit	噪声功率谱密度/(Hz·pT ⁻¹ ·Hz ^{-1/2})	线性度/(%)	动态响应速度/(nT·s ⁻¹)	频率响应(-3 dB带宽)/Hz
1	0.17	5.21×10^{-7}	1.068×10^5	32.79
8	1.40	5.70×10^{-5}	1.399×10^5	35.60
12	0.98	4.33×10^{-5}	1.396×10^5	35.40
16	0.73	2.40×10^{-5}	1.385×10^5	35.32
20	0.42	1.95×10^{-5}	1.343×10^5	34.90

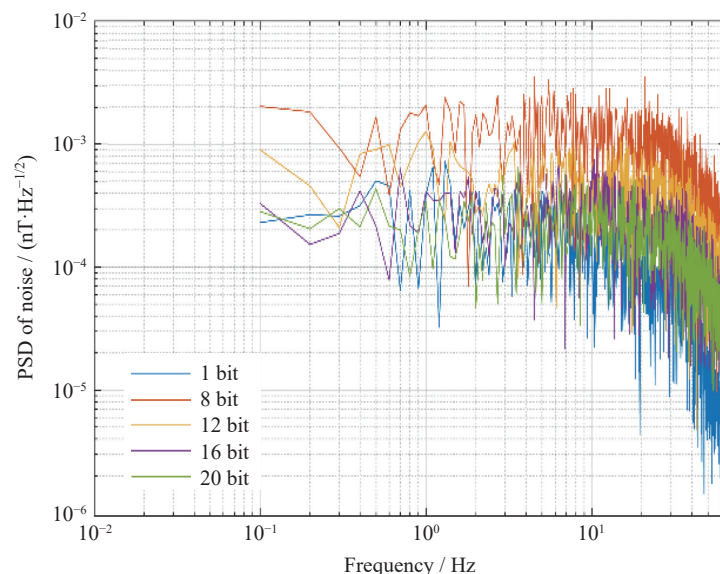


图 12 不同量化位数的传感器噪声影响对比

Fig. 12 Noise of different quantization bits

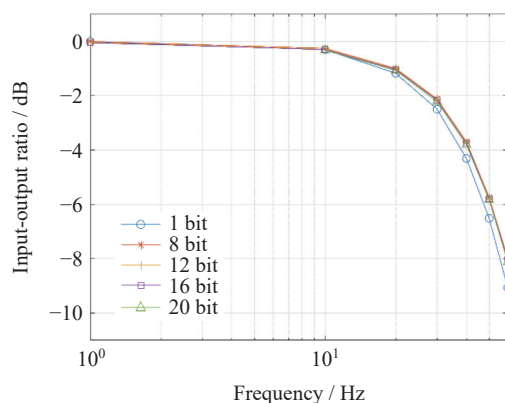


图 13 不同量化位数的传感器频率影响对比

Fig. 13 Frequency response of different quantization bits

参考文献

- [1] LI Lei, WANG Jindong, ZHOU Bin, *et al.* Application of fluxgate magnetometer in deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(6): 529-534 (李磊, 王劲东, 周斌, 等. 磁通门磁强计在深空探测中的应用 [J]. 深空探测学报, 2017, 4(6): 529-534)
- [2] CHEN Wuxiang. Research on Precision Digital Fluxgate Magnetometer Based on Sigma-Delta Modulation Technology[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2022 (陈武祥. 基于 Sigma-Delta 调制技术的高精度数字磁通门磁强计研究 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院国家空间科学中心), 2022)
- [3] GAO Shuang, ZHAI Lin. Design of digital fluxgate magnetometer[J]. *Mechanical and Electrical Equipment*, 2011, 28(3): 27-29 (高双, 翟琳. 数字式磁通门磁强计设计 [J]. 机电设备, 2011, 28(3): 27-29)
- [4] RUSSELL C T, CHI P J, DEARBORN, D J, *et al.* THEMIS ground-based magnetometers[J]. *Space Science Reviews*, 2008, 141(1/2/3/4): 389-412
- [5] ZHANG T L, G BERGHOFFER G, MAGNES W, *et al.* MAG: The Fluxgate Magnetometer of Venus Express[J]. *ESA Special Publication*, 2007, SP 1295: 1-10
- [6] RUSSELL C T, ANDERSON B J, BAUMJOHANN W, *et al.* The magnetospheric multiscale magnetometers[J]. *Space Science Reviews*, 2016, 199(1/2/3/4): 189-256
- [7] SHEN Guohong, HUANG Cong, ZHANG Pengfei, *et al.* Comprehensive detection payload technology for space environment of FY-3E satellite[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2024, 60(1): 145-156 (沈国红, 黄聪, 张鹏飞, 等. 风云三号 E 星空间环境载荷综合探测技术 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2024, 60(1): 145-156)
- [8] CHEN Wuxiang, WANG Jindong, LÜ Shang, *et al.* Simulation research on precision digital fluxgate magnetometer based on sigma-delta modulation technology[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(2): 284-293 (陈武祥, 王劲东, 吕尚, 等. 基于 Sigma-Delta 调制技术的高精度数字磁通门磁强计仿真 [J]. 空间科学学报, 2022, 42(2): 284-293)
- [9] ZHI Menghui. Research on High Precision Digital Fluxgate Sensor[D]. Suzhou: Soochow University, 2017 (支萌辉. 高精度数字磁通门传感器研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2017)
- [10] FENG Wenguang. Study on Three-Axis Digital Fluxgate Sensor and its Intelligent Calibration Method[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019 (冯文光. 三轴数字磁通门传感器及其智能化误差补偿方法研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2019)

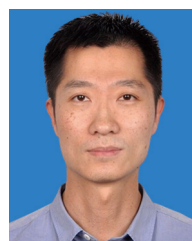
- [11] MA Xun, WANG Yao, SUN Yukai. Sigma-delta ADC design using over-sampling and noise shaping techniques[J]. *China Integrated Circuit*, 2022, **31**(4): 59-63 (马迅, 王尧, 孙宇凯. 应用过采样与噪声整形技术的 Sigma-Delta ADC 设计 [J]. *中国集成电路*, 2022, **31**(4): 59-63)
- [12] DONG Lijun. Design of 18-Bits Sigma-Delta DAC[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 (董丽军. 18 bits Sigma-Delta DAC 的设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014)
- [13] ZHU Guoliang. Research and Design of Sigma-Delta DAC Digital Circuits[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021 (朱国良. Sigma-Delta DAC 数字部分的研究与设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021)
- [14] ALLEN P E, HOLBERG D R. CMOS Analog Circuit Design[M]. 2nd ed. New York: Publishing House of Electronics Industry, 2007 (ALLEN P E, HOLBERG D R. CMOS 模拟集成电路设计 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2007)
- [15] ZARE-HOSEINI H, WILLIAMS P. Multi-bit digital to analogue converter and a delta-sigma analogue to digital converter: US, 8537042 B2[P]. 2013-07-17
- [16] WANG Jindong, ZHOU Bin, ZHAO Hua, *et al.* Development of fluxgate magnetometer for YH-1 mars probe[J]. *Aerospace Shanghai*, 2013, **30**(4): 174-178 (王劲东, 周斌, 赵华, 等. 萤火一号火星探测器磁通门磁强计研制 [J]. 上海航天, 2013, **30**(4): 174-178)
- [17] CERMAN A, KUNA A, RIPKA P, *et al.* Digitalization of highly precise fluxgate magnetometers[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, **121**(2): 421-429
- [18] ZHOU Lingli. Research on Sigma-delta Modulator and Modeling in Simulink[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007 (周伶俐. Sigma-delta 调制器的研究及其在 SIMULINK 环境下建模 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007)
- [19] ZHANG Yuhao. Research and Design of Digital Fluxgate Sensor Based on FPGA[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020 (张宇豪. 基于 FPGA 的数字式磁通门传感器的研究与设计 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020)
- [20] WANG Yingying. Research on Digital Technology of Three-Axis Magnetic Fluxgate Sensor[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019 (汪莹莹. 三轴磁通门传感器数字化技术研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2019)
- [21] WANG Hanguo. Research of 3-axis Fluxgate Magnetometer Based on STM32[D]. Suzhou: Soochow University, 2018 (汪汉国. 基于 STM32 的三轴磁通门磁强计研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2018)
- [22] TANG Liejuan. Study of Magnetic Field Feedback Fluxgate Magnetometer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2006 (唐列娟. 磁场反馈式磁通门磁强计研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006)
- [23] STUPAKOV A, PEREVERTOV A. Analog of the induction law for the magnetic Barkhausen noise[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, **498**: 166238
- [24] CUI Zhijun, LIU Chen. Study on performance of fluxgate based on striped array iron core[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2023, **36**(11): 1701-1705 (崔智军, 刘琛. 长条形阵列铁芯磁通门性能研究 [J]. *传感技术学报*, 2023, **36**(11): 1701-1705)

作者简介



吕 尚 男, 1995 年 3 月出生于吉林省吉林市, 现为中国科学院国家空间科学中心博士生, 主要研究方向为地球与空间探测技术。

E-mail: lvshang18@mailsucas.ac.cn



王劲东 (通信作者) 男, 研究员, 博士生导师, 现为中国科学院国家空间科学中心天气室太阳系探测组主任, 主要研究方向为高精度空间磁场探测技术及应用。

E-mail: wjd@nssc.ac.cn