

## علمی-پژوهشی

## طراحی و ساخت سیستم دیجیتالی اندازه‌گیری دقیق میدان مغناطیسی سه جهته با استفاده از نمونه بردار سرعت بالای ۲۴ بیتی با نمایش زمان واقعی

لقمان نعمت‌زاده<sup>\*</sup>، محسن داودی<sup>۲</sup>، عارف شاه منصوریان<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی برق، ۲ و ۳- استادیار گروه مهندسی برق- کنترل، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

(دریافت: ۹۸/۰۹/۳۰، پذیرش: ۹۹/۰۳/۲۵)

## چکیده

در این مقاله فرایند نمونه‌برداری دقیق و سرعت بالا، شبیه‌سازی و چالش‌های طراحی و ساخت سامانه اندازه‌گیری دقیق میدان مغناطیسی با استفاده از مجموعه‌ای از حسگرهای مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. فرآیند طراحی و ساخت سامانه اندازه‌گیری مزبور شامل طراحی مفهومی، انتخاب حسگر حساس، ساخت سامانه نمونه‌برداری سرعت بالا منطبق بر حسگرهای مغناطیسی، کاهش سیگنال ناخواسته مغناطیسی و الکتریکی، انتقال داده پرحجم بدون از دست دادن داده به رایانه، برنامه‌سازی جهت دریافت داده‌های خام و محاسبات اولیه و برنامه‌نویسی گرافیکی جهت نمایش و مقایسه نمودارها می‌باشد. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده برای حالت‌های مختلف میدان مغناطیسی با نتایج مقالات قبلی مقایسه شده است. در پیاده‌سازی سخت‌افزار سامانه اندازه‌گیری دقیق از قطعات الکترونیکی با میزان سیگنال ناخواسته پایین شامل تقویت‌کننده‌های عملیاتی با پهنای باند بالا و دریافت بسیار کم، رگولاتورهای با سیگنال ناخواسته بسیار کم، مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال ۲۴ بیتی با سرعت ۲/۵ MS/s FPGAهای مدل اسپارتمان III و پردازنده مبتنی بر ARM Cortex M4 استفاده گردیده است. در نرم‌افزار این سامانه اندازه‌گیری از الگوریتم لونبرگ-مارکوارد و الگوریتم‌های میانگین‌گیری به‌منظور واسنجی و نمایش زمان-واقعی داده‌های دریافت شده از حسگرهای فلاکس گیت بهره گرفته شده است. ویژگی خاص سامانه اندازه‌گیری طراحی شده در این مقاله، بومی‌سازی فناوری ساخت سامانه‌های دیجیتال ساز اندازه‌گیری دقیق میدان مغناطیسی است که در سامانه‌های تله‌متری و زیرسامانه‌های فضاپیماها کاربرد فراوانی دارند. همچنین از برتری این سامانه نسبت به نمونه‌های مشابه خارجی، دقت بسیار بالا در دیجیتال‌سازی داده‌های آنالوگ با دقت ۲۴ بیت و خطای پایین این سامانه در حدود  $182/5 \mu V$  و انتقال و نمایش زمان-واقعی این داده‌ها در رایانه است.

**کلیدواژه‌ها:** اندازه‌گیری میدان مغناطیسی، حسگر فلاکس گیت، نمونه‌برداری سرعت بالا، جمع‌آوری داده

## ۱. مقدمه

همچنین فناوری موقعیت‌یابی مغناطیسی با دارا بودن ویژگی‌هایی از جمله قابلیت عملکرد در تمامی شرایط آب و هوایی، تجهیزات حسگری ساده، پردازش سیگنال مناسب و قابل‌اطمینان و بسیاری ویژگی‌های دیگر در زمینه گسترده‌ای از زمین‌شناسی، درمان زیست پزشکی و کاربردهای نظامی مانند اکتشافات مین‌های عمل‌نکرده و مهمات منفجرنشده به کار گرفته می‌شود [۱۱].

آرایش حسگرهای مغناطیسی به‌طور رایج در تخمین موقعیت اشیاء فرو مغناطیسی در حال حرکت استفاده می‌شوند. در سال ۱۹۷۵، از گرادئومترهای ابرسانا<sup>۲</sup> در آزمایشگاه تحقیقاتی ناوال در ایالات متحده جهت تعیین موقعیت منبع دوقطبی مغناطیسی در حال حرکت استفاده شده است. وین [۱۲] از داده‌های تانسور گرادئان مغناطیسی جهت ردیابی دوقطبی مغناطیسی استفاده کرده است و ردیابی حرکتی دوقطبی مغناطیسی را با استفاده از

مطالعات مربوط به اندازه‌گیری سیگنال‌های آنالوگ و تبدیل آن به داده‌های دیجیتال یکی از مهم‌ترین عناوین مورد بررسی و پژوهش در مهندسی کنترل و ابزار دقیق است. عملکرد حسگرها در اندازه‌گیری پارامترهای مختلف فیزیکی، شیمیایی و... و همچنین تبدیل پارامترها به سیگنال‌های الکتریکی و قابلیت اتصال آن‌ها به سامانه‌های جمع‌آوری داده (DAQ<sup>۱</sup>) باعث شده است که سامانه‌های دقیق اندازه‌گیری بخش مهمی از اجزای جدانشدنی سامانه‌های کنترل باشند. به‌طور کلی زمانی که بخواهیم کمیت‌های فیزیکی مانند جهت، حضور یا عدم حضور، جریان، چرخش و زاویه را اندازه‌گیری کنیم و از حسگرهای مغناطیسی استفاده کنیم.

\* رایانامه نویسنده پاسخگو: L.nematzadeh@edu.ikiu.ac.ir

<sup>۱</sup> Data Acquisition<sup>۲</sup> Superconducting gradiometer

مشکل از بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) روش بهینه‌سازی نیوتن طراحی کرد. در سال ۲۰۱۷، نویسندگان [۲-۱] روشی برای موقعیت‌یابی هدف با استفاده از میدان مغناطیسی متناوب بر پایه توزیع یکپارچه<sup>۶</sup> ارائه دادند، اما دوقطبی مغناطیسی متناوب تنها، هیچ چرخش و حرکتی در سرعت ثابت ندارد.

در ادامه به چهار نمونه سامانه تله‌متری که این‌گونه سامانه‌ها و حسگرهای مغناطیسی ماهواره‌ای تحقیقات فضایی در آنها استفاده شده اشاره شده است:

#### • ماهواره دیامورگس

حسگر سه جهته مغناطیسی جهت تحقیقات فضایی برای مطالعه روی میدان مغناطیسی بادهای خورشیدی، یونیسفر، و لایه‌های مگنتوسفر در بین سیاره‌های طراحی شده است. در ساختار این نوع از حسگرها نیز از تراشه FPGA استفاده شده است، مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) این سامانه دارای تفکیک‌پذیری ۱۶ بیت است که از مدل AD7621 است [۲۳].

#### • ماهواره ACE

هدف از طراحی این نوع از حسگرهای مغناطیسی جهت تحقیقات فضایی هم برای اندازه‌گیری جهت و شدت میدان مغناطیسی در فضای مابین سیاره‌ها است. این ماهواره دارای دو حسگر فلاکس گیت دیجیتالی است. مبدل به کار گرفته شده در این سامانه ۱۲ بیت بوده و دارای میکروپروسسور و زیر بخش‌های کنترلی و پردازشی است [۲۴].

#### • ماهواره تِمیس

در این ماهواره نیز از دو حسگر مغناطیسی فلاکس گیت دیجیتال استفاده شده است. در ساختار سامانه اندازه‌گیری مغناطیس این ماهواره از تراشه FPGA مدل RT56SX32 جهت پردازش استفاده شده است. مبدل ADC استفاده شده در این سامانه نیز ۱۲ بیتی است [۲۵].

#### • ماهواره ونوس اکسپرس

در این ماهواره برای بررسی محیط پلاسمای سیاره ونوس و تعیین کنش‌های بادهای خورشیدی از دو حسگر مغناطیسی فلاکس گیت سه جهته استفاده شده است. مبدل ADC استفاده شده در این سامانه نیز ۱۴ بیتی است [۲۶].

به‌طور کلی پیشرفت‌های علمی و فناورانه با اصلاح تجهیزات موجود و ساخت ابزارهای جدید با حساسیت و دقت بالاتر ارتباطی تنگاتنگ دارند. در این میان، ابزارهایی که برای

داده اندازه‌گیری شده پیوسته و اندازه‌گیری استاتیک<sup>۱</sup> استخراج کرده است. روش‌های زیادی جهت تعیین موقعیت هدف با استفاده از آرایش حسگرهای مغناطیسی ارائه شده است. در سال ۲۰۰۳، هیث [۱۳] الگوریتمی را با استفاده از متلب جهت تبدیل سه‌بعدی داده تانسور میدان پتانسیل با استفاده از روش‌های مونت کارلو<sup>۲</sup> و سیمپلکس دانهیل<sup>۳</sup> طراحی کرده است که این الگوریتم‌ها دارای ناسازگاری در تعیین هدف بوده و مدل‌های زمین‌شناسی نهایی در سه بعد نمایش داده می‌شوند. در سال ۲۰۰۶، نارا [۱۴] یک فرمول ساده بازسازی شده برای موقعیت‌یابی دوقطبی مغناطیسی نمایش داد. علاوه بر این او از یک حسگر توسعه‌یافته واحد با اندازه‌گیری سه مؤلفه میدان مغناطیسی و شش مؤلفه تانسور گرادیان فضایی هم‌زمان برای موقعیت‌یابی در یک مکان خاص استفاده کرده است. در سال ۲۰۰۷، آری شرینگر [۱۵] مسئله‌ای را تحت عنوان معادله غیرخطی غیرقابل تعیین مدل دوقطبی مغناطیسی جهت تعیین هدف فرموله کرد و برای تسریع در پیدا کردن یک تقریب خوب از بهینه‌سازی کلی معادلات، آن را شبیه‌سازی کرد. در سال ۲۰۰۹، وی [۱۶] یک روش جدید موقعیت‌یابی مغناطیسی تک جزئی را با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی هیبریدی ارائه داد که در آن یک تابع هدف جدید برای استفاده در میدان مغناطیسی عمودی در یک کشتی استفاده شده است. در سال ۲۰۱۰، اوروک [۱۷] بیشینه دامنه مؤلفه‌های بردار مغناطیسی و سیگنال‌های تحلیلی تانسور گرادیان مغناطیسی منتهجه از نقطه دوقطبی<sup>۴</sup> و خط منابع دوقطبی در تعیین مکان‌های افقی مورد استفاده قرارداد. در سال ۲۰۱۱، تانگ [۱۸] یک الگوریتم برای تبدیل مسئله برآورد آزیموت<sup>۵</sup> به مسئله اندازه‌گیری مستقیم میدان مغناطیسی هدف و انحراف آن از آزیموت را پیشنهاد کرد. به‌منظور دست‌یابی بهتر به تشخیص زمان واقعی هدف مغناطیسی زیر آب، یو [۱۹] یک روش نوین جهت استفاده از آرایش مغناطیس‌سنج‌ها برای تعیین موقعیت هدف زیر آب را پیشنهاد کرد که این مدل دارای ساختار عملکرد ساده و تشخیص زمان واقعی بسیار قوی است. در سال ۲۰۱۴، والستروم [۲۰] نشان داد که مدل‌های حسگر می‌تواند با یک مدل حرکتی استاندارد و یک فیلتر غیرخطی استاندارد جهت ردیابی اشیاء فلزی در یک شبکه مغناطیس‌سنج ترکیب شوند. در سال ۲۰۱۵، روگر آلیمی [۲۱] یک الگوریتم ژنتیک اختصاصی برای تعیین موقعیت مسیر اشیاء در حال حرکت فرو مغناطیسی با محیط محدود توسعه داد. به‌منظور حل مسئله تبدیل پارامتر هندسی مدل ریاضی گرادیان مغناطیسی، هان [۲۲] الگوریتمی

<sup>1</sup> Static measuring station

<sup>2</sup> Monte Carlo

<sup>3</sup> Downhill Simplex

<sup>4</sup> Point-dipole

<sup>5</sup> Azimuth estimation

<sup>6</sup> Coherent demodulation

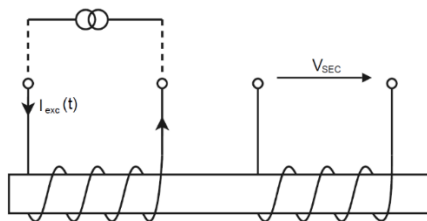
توسط سامانه‌های رایانه‌ای نیاز است. در این راستا چندین روش متفاوت وجود دارد که به آن‌ها اشاره خواهد شد. کلیت این پروژه نیز بر پایه آشکارسازی اطلاعات میدان مغناطیسی خواهد بود.

از این‌رو، در این مقاله سعی شده است که چالش‌های طراحی و ساخت چنین سامانه اندازه‌گیری دقیق مورد بحث قرار گرفته تا به کمک آن بتوان با دقت و سرعت بالا میدان مغناطیسی را اندازه گرفته، با تفکیک‌پذیری بالا دیجیتال‌سازی کرده و اطلاعات دریافتی را به‌صورت زمان واقعی در محیط نرم‌افزاری در رایانه نشان داد.

در فصل اول این مقاله به‌صورت کلی به نحوه عملکرد حسگرهای مغناطیسی فلاکس گیت<sup>۱</sup> پرداخته شده است. در فصل دوم کلیت سامانه طراحی شده مورد بحث قرار گرفته شده، در فصل سوم نیز به اساس عملکرد سامانه و روش‌های دیجیتال‌سازی سیگنال‌های دریافتی از حسگرها پرداخته شده و بهترین روش توضیح داده شده است. در فصل چهارم به نحوه طراحی سامانه‌های نمونه‌بردار سرعت بالا و در فصل پنجم به حسگر مغناطیسی فلاکس گیت سه جهته پرداخته شده است. در فصل‌های بعدی به بررسی خطاهای موجود و وارد شده به سامانه حسگرهای غیرخطی فلاکس گیت و بررسی روش خطی سازی توسط روش لونبرگ مارکوارد و همچنین نحوه پیاده‌سازی و نتایج آزمایش‌های عملی انجام‌شده و تحلیل آن پرداخته شده است.

## ۲. اساس عملکرد مغناطیس‌سنج فلاکس گیت

عموماً مغناطیس‌سنج فلاکس گیت شامل یک هسته فرومغناطیسی و سیم‌پیچ (کویل)‌های تحریک و Pickup مطابق شکل (۱) است. هندسه هسته در طراحی‌های مختلف متفاوت است.



شکل (۱): اساس حسگر مغناطیس‌سنج فلاکس گیت [۱۰].

با اعمال جریان AC به سیم‌پیچ تحریک، هسته مغناطیسی در جهات مثبت و منفی به اشباع می‌رود. تغییرات فلوی مغناطیسی گذرنده از کویل Pickup، ولتاژ  $V_{sec}$  را در آن القاء می‌کند که به هنگام اشباع (مثبت و منفی) صفر خواهد بود

اندازه‌گیری پارامترهای میدان‌های مغناطیسی طراحی شده‌اند، از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. این ابزارها در اکتشاف منابع معدنی (مانند نفت، گاز و میعانات گازی)، مطالعه ساختار زمانی و مکانی میدان مغناطیسی زمین و سایر سیارات، جهت‌یابی و تعیین موقعیت اجسام متحرک مختلف در میدان زمین، کنترل کیفیت فولادهای الکتریکی، مواد و محصولات مختلف و موارد دیگر کاربرد دارند. همچنین از کاربردهای دیگر این خاصیت می‌توان به بررسی خصوصیات الکترومغناطیسی نانوکامپزیت‌ها اشاره شده در مقاله [۲۷] با استفاده از این سامانه و آشکارسازی اهداف متحرک دریایی با استفاده از تشعشعات ماهواره‌ای اشاره شده در مقاله [۲۸] که می‌توان با استفاده از این روش و استفاده از میدان مغناطیسی زیر دریا اشاره کرد. در این راستا عموماً حسگرهای مغناطیسی فلاکس‌گیت از کاربرد بیشتری برخوردار بوده و علاوه بر آن که حساسیت و دقت بالایی دارند، قادر به اندازه‌گیری مستقیم مؤلفه‌های میدان مغناطیسی نیز می‌باشند (بنابراین اطلاعات کاملی از ساختار میدان‌های مغناطیسی و منابع تولید آن را در اختیار قرار می‌دهند). این حسگرهای مغناطیسی برای اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی بسیار ضعیف در یک محدوده دمایی ضعیف و حتی در حضور سیگنال‌های ناخواسته الکترومغناطیسی نیز مناسب می‌باشند. از دیگر خصوصیات حسگرهای مغناطیسی فلاکس گیت می‌توان به قابلیت اطمینان بالا، طول عمر زیاد و مقرون‌به‌صرفه بودن آن‌ها به لحاظ اقتصادی اشاره داشت. از این‌رو، ساخت سامانه اندازه‌گیری دیجیتال جهت امکان جایگزینی روش پردازش سیگنال دیجیتال به جای کنترل سیگنال آنالوگ در حسگرهای مغناطیسی فلاکس گیت امری اجباری است که کمک شایانی به بهبود عملکرد این حسگرها خواهند کرد.

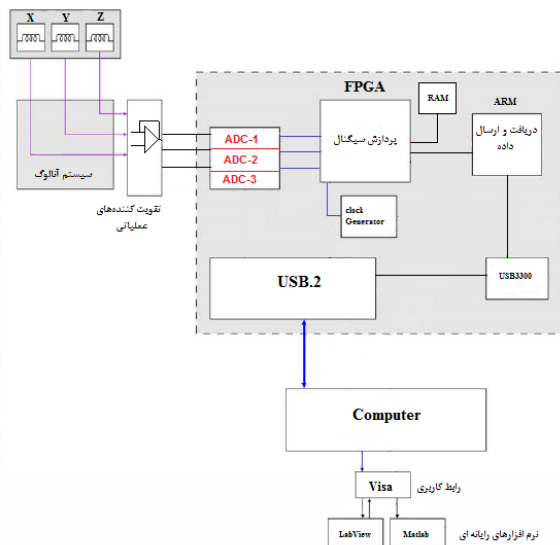
به‌منظور آزمایش سامانه اندازه‌گیری دقیق میدان مغناطیسی و دست‌یابی به اهداف مورد نظر می‌بایست پس از طراحی و ساخت سامانه اندازه‌گیری، یک میدان مغناطیسی کنترل‌شده را به وجود آورد و یا تغییری نسبی در میدان مغناطیسی یا در خصوصیات مغناطیسی حسگر ایجاد نمود تا در نهایت حسگر این تغییر را احساس نموده و نتایج آن با یک سامانه مرجع تطبیق داده شود.

در سامانه اندازه‌گیری طراحی شده، حسگرهای فلاکس گیت اندازه میدان احساس شده را با یک مدار به‌سازی به جریان الکتریکی یا ولتاژ مناسب تبدیل می‌کنند. برای دست‌یابی به خروجی دیجیتال به سامانه‌ی دقیق و سیگنال ناخواسته کم جهت تبدیل سیگنال‌های آنالوگ به دست‌آمده و تبدیل آن‌ها به داده‌های دیجیتال یا دیجیتال‌سازی<sup>۱</sup> و امکان تجزیه و تحلیل

<sup>۱</sup> Fluxgate

<sup>۱</sup> Digitize

سپس از طریق یک لینک داده موازی<sup>۲</sup> به پردازنده Cortex M4 که یک میکروکنترلر به شماره فنی STM32f407 انتقال داده می‌شود تا از طریق درگاه USB2.0 High Speed در اختیار رایانه قرار می‌گیرد. میکروکنترلر مزبور از نوع ARM ۳۲ بیتی بوده دارای سرعت کلاک 168MHz و 1MB حافظه فلش و 192kB حافظه SRAM است. قابلیت اتصال این میکروکنترلر به چیپ‌های USB ULPI (من جمله چیپ USB3300) به‌منظور برقراری لینک USB2.0 HS مورد توجه این سامانه اندازه‌گیری بوده است. زیرا با نمونه‌برداری همزمان از ۳ کانال ADC و تفکیک‌پذیری ۲۴ بیتی با سرعت بالا، حجم زیادی داده در هر ثانیه تولید می‌گردد که لینک‌های USB معمول توانایی انتقال این حجم از داده به رایانه را ندارند.

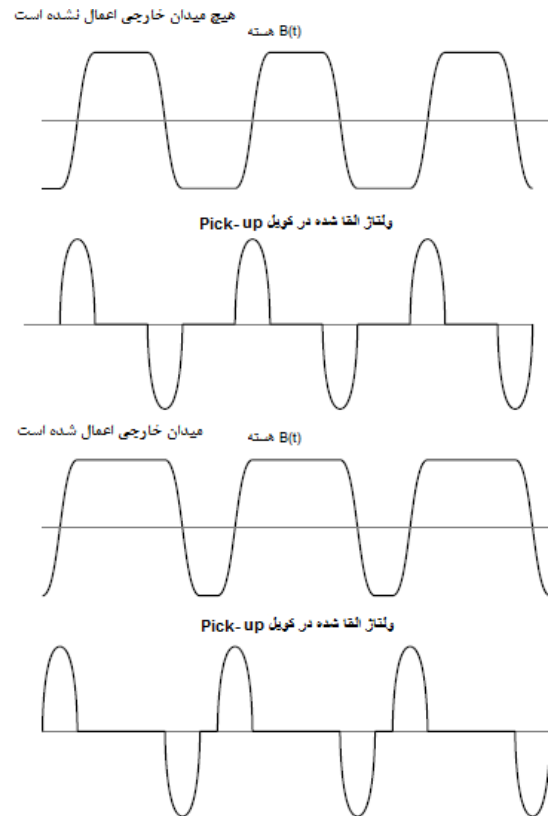


شکل (۳): مرور کلی سامانه حسگر فلاکس گیت.

به‌طور کلی بخش سخت‌افزاری سامانه اندازه‌گیری دقیق میدان مغناطیسی به چهار قسمت عملکردی تقسیم می‌گردد:

- بخش مدارهای آنالوگ (شامل حسگر، آپ‌امپ‌های میدل سیگنال Single ended به Differential، ADC، فیلترها و تغذیه با کمترین سیگنال ناخواسته).
- بخش دیجیتال (شامل FPGA برای راه‌اندازی و درایو ADCها و پردازش و دسته‌بندی داده‌ها برای انتقال داده).
- بخش ارتباطات پرسرعت داده (شامل میکروکنترلر STM32F407 و رابط USB3300 که با سرعت 480Mb/s قابلیت انتقال داده به رایانه را دارد).

(شکل ۲).  $V_{sec}$  در محاسبه مشخصات میدان مغناطیسی خارجی توسط پردازشگر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹].



شکل (۲): سیگنال کوپل Pick-up [۹].

### ۳. اساس عملکرد کلی سامانه

در راستای کاهش اثرگذاری سیگنال‌های ناخواسته مغناطیسی و الکترومغناطیسی، کاهش ابعاد مدارهای نمونه‌برداری از حسگرهای سه‌گانه فلاکس گیت و سامانه دیجیتالی انتقال به رایانه صورت پذیرفته است مستلزم این امر استفاده از FPGA به جای استفاده از چیپ‌های متعدد دیجیتالی است. همچنین به دلیل اهمیت نمونه‌برداری همزمان از سیگنال‌های حسگرهای فلاکس گیت در هر سه محور، فقط امکان استفاده از FPGA با سرعت کلاک بالا می‌تواند با دقت حدود 10 ns، نمونه‌برداری همزمان را تضمین نماید.

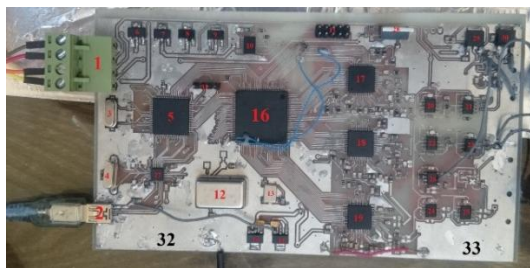
شکل (۳) بلوک دیاگرام کلی سامانه اندازه‌گیری میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. مطابق این بلوک دیاگرام، مازول کنترل سیگنال تحریک با استفاده از سوئیچ‌های آنالوگ، جریان تحریک به کوپل تحریک را کنترل می‌کند (مدار پوش-پول<sup>۱</sup>). سیگنال کوپل Pickup با استفاده از ADC دیجیتالی‌زده شده و

<sup>۲</sup> Parallel Digital Link

<sup>۱</sup> Push-Pull

#### ۴. طراحی سامانه اندازه‌گیری دقیق میدان مغناطیسی

در طراحی مورد الکترونیکی این سامانه از تراشه‌هایی با سرعت بالا، سیگنال ناخواسته پایین و مصرف توان کم جهت انتقال سریع اطلاعات به صورت آنلاین به رایانه استفاده شده است. در شکل (۴) نمای واقعی مورد الکترونیکی سامانه جمع‌آوری داده (DAQ) و سامانه اندازه‌گیری دقیق میدان مغناطیسی سه کاناله که توسط نرم‌افزار آلتیوم<sup>۲</sup> طراحی شده است، نشان داده شده و اجزای آن در جدول (۱) شرح داده شده است.



شکل (۴): برد اصلی نمونه‌بردار سرعت بالا ۲۴ بیتی ۳ کاناله و انتقال داده به رایانه

جدول (۱): معرفی قطعات اصلی به کار رفته در برد

کانکتور فونیکس (تغذیه ورودی)	۱
کانکتور mini USB	۲
کریستال 8MHz, 24MHz	۳ و ۴
ARM Cortex M۳	۵
رگولاتور خطی ولتاژهای مختلف	۶ و ۷ و ۸ و ۹
FPGA ROM	۱۰
کانکتور پروگرامر FPGA	۱۱
اسیلاتور 40MHz, 100MHz	۱۲ و ۱۳
رگولاتورهای خطی	۱۴ و ۱۵
FPGA SPARTAN III	۱۶
AD7760	۱۷ و ۱۸ و ۱۹
اپ امپ AD8021	۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵
تولیدکننده ولتاژ رفرنس ADR4540	۲۶
چیپ رابط USB3300	۲۷
رگولاتور خطی	۲۸
رگولاتور خطی ولتاژ $\pm 1.2$ ولت	۲۹ و ۳۰
کانکتور پروگرامر ARM Cortex M4	۳۱
زمین دیجیتال (Digital Ground)	۳۲
زمین آنالوگ (Analog Ground)	۳۳

اصلی‌ترین تراشه استفاده شده در این سامانه اندازه‌گیری مبدل آنالوگ به دیجیتال AD7760 است که تک کاناله بوده و

بخش نرم‌افزار رایانه (شامل درایورهای تحت ویندوز برای دریافت داده پرسرعت و برنامه گرافیکی جهت دیکود و نمایش و ذخیره داده‌ها).

برای دیجیتال‌سازی خروجی حسگرهای مغناطیسی فلاکس‌گیت چندین روش وجود دارد که در ادامه به سه روش دیجیتال‌سازی اشاره می‌گردد:

- بهره‌گیری از روش مدولاسیون سیگما-دلتا<sup>۱</sup> درون حلقه فیدبک حسگرهای مغناطیسی فلاکس‌گیت آنالوگ
- بهره‌گیری از مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال در خروجی حسگرهای مغناطیسی فلاکس‌گیت آنالوگ
- بهره‌گیری از روش‌های پردازش سیگنال دیجیتال و الگوریتم‌های ریاضی برای آشکارسازی اطلاعات میدان مغناطیسی

حسگرهای مغناطیسی فلاکس‌گیت که بیشتر در صنایع هوافضا و تعیین موقعیت ماهواره‌ها و صنایع دیگر نظامی کاربرد دارند، دارای ویژگی اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین می‌باشند. از جمله ویژگی‌های این نوع از حسگرها می‌توان به مصرف توان پایین آن‌ها، قابلیت اطمینان بالا و وزن کم آن اشاره کرد که یکی از دلایل استفاده از آن‌ها در کاربردهای فضایی است. همان‌طور که در فصل دوم اشاره شد، این حسگرها دارای دو دسته سیم‌پیچ و یک هسته فرو مغناطیسی می‌باشند. به یکی از این سیم‌پیچ‌ها یک جریان متناوب اعمال شده که با توجه به قانون القای فارادی، ولتاژی متناسب با میدان مغناطیسی خارجی القا شده، در خروجی ظاهر می‌گردد. بر این اساس که هارمونیک‌های درجه ۲ در این ولتاژ خروجی متناسب با میدان مغناطیسی خارجی است، می‌توان به گرفتن خروجی دیجیتال با استفاده از آشکارسازهای هارمونیک‌های زوج اقدام نمود.

در نتیجه، برای این‌که خروجی آنالوگ حسگرهای مغناطیسی را به صورت دیجیتال در اختیار زیرسامانه‌های تله‌متری و یا سایر سامانه‌های زیرین جهت کاربردهای گوناگون همچون ماهواره‌های فضایی قرار داد به این نتیجه خواهیم رسید که بهتر است که حسگرهای مغناطیسی فلاکس‌گیت به صورت مستقل دارای خروجی دیجیتال باشند به طوری که تغییری در ساختار و تضعیف مشخصات فنی و دقت آن صورت نپذیرد. بدین منظور، در این مقاله از سه روش بالا که به آن اشاره شد استفاده شده است.

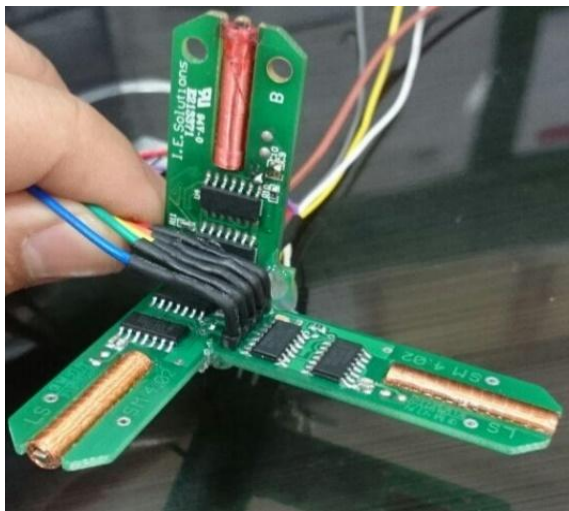
<sup>۲</sup>Altium Designer

<sup>۱</sup>Sigma-Delta

زبان C روی میکروکنترلر نوشته شده تا واسط USB2.0 HS راه اندازی شود. جهت جلوگیری از Data Loss در این تبادل داده، دو بافر ۴۰۹۶ بیتی در حافظه میکروکنترلر تعریف شده تا در زمانی که یکی از بافرها توسط FPGA پر می‌شوند (توسط DMA) بافر بعدی در اختیار واحد USB قرار گیرد تا با یک DMA جداگانه به درگاه USB انتقال یابد. در تئوری این لینک قادر به انتقال داده ۴۸۰ Mb/s (یا ۶۰ MB/s) است ولی در کاربرد فعلی سرعت انتقال داده ۲۲/۵ MB/s است. داده‌های انتقال یافته به رایانه در محیط‌های برنامه‌نویسی شده نرم‌افزارهای LabVIEW و MATLAB قرار می‌گیرند.

### ۵. سامانه فلاکس گیت سه جهته

بخش حسگری سامانه اندازه‌گیری دقیق میدان مغناطیسی از سه حسگر فلاکس گیت که دقیقاً عمود بر هم قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. در شکل (۵) نمایی از سامانه فلاکس گیت سه جهته نمایش داده شده است. این حسگرها پس از قرارگیری دقیق عمودی نسبت به هم، توسط چسب محکم کاری شده و قابل حرکت نسبت به هم نیستند. یک پایه از جنس ABS توسط چاپگر سه‌بعدی ساخته شده تا برای آزمایش‌های بعدی مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه بحث به واسنجی<sup>۱</sup> خطاهای موجود نحوه حذف آن‌ها خواهیم پرداخت.



شکل (۵): نمایی از سامانه فلاکس گیت سه جهته

برای واسنجی حسگرهای عمود بر هم فلاکس گیت از روش IGRF [۴] و شدت میدان مغناطیسی در موقعیت و جهت مورد نظر استفاده شد. ولتاژ خروجی هر سه محور حسگر مغناطیسی فلاکس گیت با توجه به مقادیر ارائه شده توسط روش IGRF و ولتاژ خروجی طی یک دوره ۱۰ ثانیه‌ای در محیط باز و بدون

دارای تفکیک‌پذیری ۲۴ بیت، سرعت نمونه‌برداری ۲/۵ MS/s، فناوری ساخت دلتا-سیگما و رنج دینامیکی 100dB در سرعت نمونه‌برداری حداکثر است. یک تقویت‌کننده عملیاتی (اپ امپ) هم در این چیپ موجود است تا امکان تقویت سیگنال‌های ضعیف Single ended ورودی را فراهم آورد. عملیات آماده‌سازی سیگنال هر حسگر توسط اپ امپی به شماره فنی AD8021 انجام شده است. پهنای باند تقویت سیگنال برای بهره ۱۰ حدود ۱۹۰ dB و دارای سیگنال ناخواسته یا سیگنال ناخواسته بسیار کم nV/√Hz است. برای تغذیه قطعات برد از رگولاتور دقیق TPS7A85 که توانایی جریان دهی تا ۴ آمپر و سیگنال ناخواسته بسیار کم ۸/۴ μV در خروجی 5V است. داده‌های خروجی ADC ها توسط تراشه SPARTAN III به صورت موازی و با دقت و سرعت بالا از ADCها دریافت شده و به تراشه ARM Cortex M4 فرستاده می‌شود.

از این تراشه در داخل سامانه به جهت انتقال داده از FPGA به درگاه USB 2.0 HS استفاده شده است. پکت‌های دیتای آماده شده توسط FPGA به صورت موازی و دو عدد پکت ۱۶ بیتی برای تراشه ARM ارسال می‌گردد. برخی از ویژگی‌های STM32F407 به صورت زیر ارائه شده است:

- رابط موازی ۸ تا ۱۴ بیت با قابلیت انتقال تا ۵۴ مگابایت در ثانیه در این میکروکنترلر تعبیه شده است
- سه عدد تبدیل‌کننده آنالوگ به دیجیتال ۱۲ بیتی تا ۲/۴ مگا سمبل در ثانیه که در حالت در هم‌گذاری شده سه‌تایی کار کنند و به نرخ نمونه‌برداری ۷/۲ مگا سمبل در ثانیه می‌رسند. (این مبدل‌های داخلی به دلیل تفکیک‌پذیری پایین مورد استفاده در این سامانه اندازه‌گیری دقیق قرار نگرفتند)
- دو عدد مبدل دیجیتال به آنالوگ ۱۲ بیتی
- ۱۷ عدد تایمر مختلف ۱۶ و ۳۲ بیتی تا سرعت ۱۸۰ مگاهرتز و امکانات مختلف
- ۱۶۸ پایه با امکان وقفه تا سرعت ۹۰ مگاهرتز
- امکانات مختلف مانند SPI, CAN, UART, I2C
- درگاه USB پرسرعت تا ۴۸۰ مگابایت در ثانیه با به کارگیری چیپ لایه PHY بیرونی (USB3300)
- درگاه ارترن MAC ارترن ۱۰/۱۰ با DMA اختصاصی
- ساعت زمان-واقعی

این میکروکنترلر رابط بین FPGA و USB3300 جهت انتقال داده‌های حجیم به رایانه است. بیش از ۳۰۰۰ خط کد برنامه به

<sup>1</sup> Calibration

می‌گذارد، معادله (۴) به اندازه زیر اشاره دارد:

$$H_m = H_e + H_0 \quad (۵)$$

#### ۴-۵. خطای غیر متعامد بودن

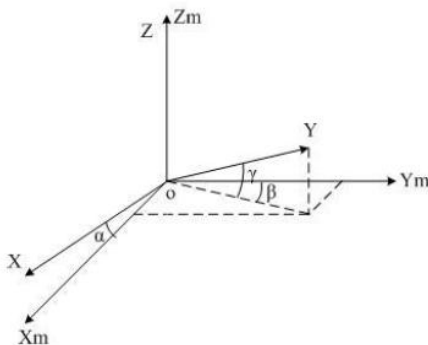
خطای غیرمتعامد بودن ناشی از محدودیت ساخت است که باعث می‌شود که محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  به‌طور کامل به یکدیگر عمود نشوند. در شکل (۷) نشان داده شده است، فرض کنید که محور  $z$  از حسگر کاملاً با محور  $z$  از سامانه مختصات عمودی  $T_m$  تطابق دارد:

$$K_{nor} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ \sin\beta\cos\gamma & \cos\beta\cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۶)$$

اگر خطای غیرمتعامد تنها خطایی باشد که روی حسگر تأثیر می‌گذارد، معادله (۶) به اندازه زیر اشاره دارد:

$$H_m = K_{nor} \cdot H_e \quad (۷)$$

این خطا در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶): خطای غیر متعامد بودن سامانه حسگر مختصات.

#### ۵-۵. خطای ناهماهنگی

در هنگام نصب حسگرها، حسگر محور  $x$  ممکن است، همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، به‌طور کامل بر محور عمودی منطبق نباشد. بردار ماتریس انتقال (ماتریس چرخش) چرخش حسگر بین سامانه مختصات متعامد و سامانه مختصات بدنه باعث ایجاد یک زاویه کوچک در اطراف محور  $x$ ، محور  $y$  و محور  $z$  می‌شود که به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$T_m^b = \begin{bmatrix} t_{xx} & t_{xy} & t_{xz} \\ t_{yx} & t_{yy} & t_{yz} \\ t_{zx} & t_{zy} & t_{zz} \end{bmatrix} \quad (۸)$$

اگر خطای ناهماهنگی تنها خطای مؤثر بر روی حسگر باشد می‌توان آن را به‌صورت رابطه (۹) نمایش داد:

دخالته امواج مغناطیسی خارجی توسط سامانه DAQ اندازه‌گیری شده است. سپس مقادیر میانگین در نرم‌افزار MATLAB با استفاده از روش الگوریتمی Levenberg-Marquardt به دست آمده است [۷].

#### ۵-۱. مدل‌سازی خطا حسگر مغناطیسی سه جهته

به علت تأثیر فرآیندهای تولید و اثرات محیطی، یک مغناطیس‌سنج سه محور دارای خطاهای تولید، نصب و اثرات محیطی است. خطای تولید شامل انحراف صفر  $H_0$  و خطای حساسیت  $K_s$  است؛ خطای نصب شامل خطاهای غیر متعامد بودن حسگرها  $K_{nor}$  و خطای ناهماهنگی  $T_m^b$  است. خطای محیطی شامل خطای آهن نرم  $C_s$  و خطای آهن سخت  $H_p$  است. با توجه به خطاهایی که در بالا ذکر شد، رابطه بین میدان مغناطیسی واقعی  $H_e$  و خروجی مغناطیس‌سنج سه محور  $H_m$  در معادله (۱) نشان داده شده است. در این معادله  $H_n$  سیگنال ناخواسته سفید با میانگین برابر با صفر و انحراف استاندارد آن  $\sigma$  می‌باشد [۳]:

$$H_m = K_s \cdot K_{nor} \cdot T_m^b \cdot C_s (H_e + H_p) + H_0 + H_n = M(H_e + H_p) + H_0 + H_n \quad (۱)$$

#### ۵-۲. خطای حساسیت

حساسیت نشان دهنده رابطه متناسب بین ورودی و خروجی مغناطیس‌سنج است. خطای حساسیت ناشی از ناسازگاری بین تقویت مدار الکترونیکی اندازه‌گیری و مقدار نامی آن است که می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$H_m = K_s \cdot K_{nor} \cdot T_m^b \cdot C_s (H_e + H_p) + H_0 + H_n = M(H_e + H_p) + H_0 + H_n \quad (۲)$$

اگر حساسیت تنها خطایی باشد که روی حسگر تأثیر می‌گذارد، معادله (۲) به اندازه زیر اشاره دارد:

$$H_m = K_s \cdot H_e \quad (۳)$$

#### ۵-۳. انحراف صفر

اغلب یک ولتاژ کوچک در سیگنال خروجی حسگر وجود دارد، حتی زمانی که شدت مغناطیسی وجود ندارد. در چنین شرایطی، حسگر خروجی غیر صفر تولید می‌کند که می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$H_0 = [H_{0x} \ H_{0y} \ H_{0z}] \quad (۴)$$

اگر انحراف صفر تنها خطایی باشد که روی حسگر تأثیر

هر سه محور حسگر مغناطیسی فلاکس گیت در جهت F معادل ۵۲ درجه به طرف محور عمود Z و ۵ درجه در جهت شرق E چرخیده شده است و ولتاژ خروجی در بازه زمانی ۱۰ ثانیه و محیط آزاد بدون دخالت امواج مغناطیسی خارجی توسط دستگاه داده بردار اندازه گیری شده است. مقدار میانگین در محیط نرم افزاری MATLAB و دستورات Curve Fitting و با استفاده از روش الگوریتمی Levenberg-Marquardt به دست آمده است. مقدار میانگین در این بازه با استفاده از ۶۰۰۰ داده اندازه گیری شده، مقدار ۲,۶۷۸۷۸۵ است که در روش IGRF که در جدول ۲ آورده شده است معادل ۴۸۴۶۴ nT است. با توجه به اینکه ولتاژ مقیاس در این حسگر 5.15V است و مقدار 10<sup>4</sup>nT و مقدار 0V معادل 0nT است با آن فیت شده است می توان یک رابطه بین ولتاژ و میدان مغناطیسی اندازه گیری شده به دست آورد [۲۹].

معادله به دست آمده به صورت رابطه (۱۰) به دست آمده است.

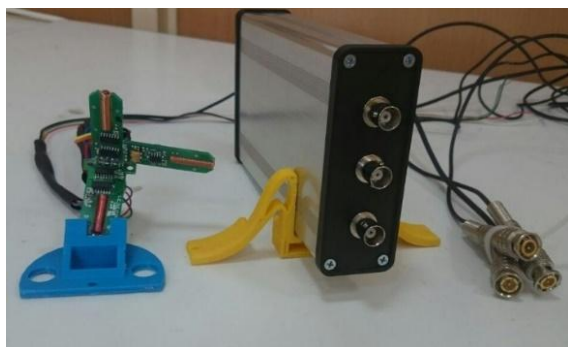
$$y(nT) = 536.45x(V)^2 + 16655x(V) + 1.0799e^{-11} \quad (10)$$

جدول (۲): داده های محاسبه شده مؤلفه های مغناطیسی زمین در نقطه

محاسبه شده [۲۹]

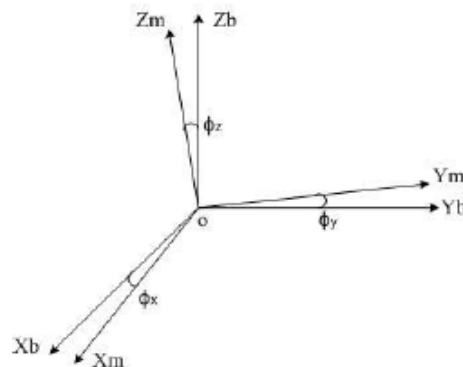
D(°)	I(°)	H(nT)	Z(nT)	F(nT)	X(nT)	Y(nT)
۵/۰۹۱	۵۵/۲۶۰	۲۷۶۱۷	۳۹۸۲۶	۴۸۴۶۴	۲۷۵۰۸	۲۴۵۱

یک نمای کلی از سامانه پیاده سازی شده در شکل (۸) نشان داده شده است. جهت جلوگیری از سیگنال های ناخواسته الکترومغناطیسی برد نمونه بردار سرعت بالا در یک قاب آلومینیومی شیلد شده قرار گرفته که از یک سمت سه سیگنال آنالوگ حسگرهای فلاکس گیت از طریق کانکتور BNC وارد می گردد. سمت دیگر دستگاه شامل ورودی تغذیه و درگاه USB است.



شکل (۸): نمای کلی از سامانه اجرا شده

$$H_m = T_m^b \cdot H_e \cdot H \quad (9)$$



شکل (۷): سامانه مختصات متعامد عمود بر هم و سامانه مختصات متعامد بدنه

خطاهای اشاره شده و سایر خطاهای محیطی باعث ایجاد یک غیرخطیگی<sup>۱</sup> در حسگر مغناطیسی فلاکس گیت می گردد. به منظور حذف این غیرخطیگی و هر کدام از خطاهای خروجی این حسگرها اقدامات متقابلی انجام می گیرد. که مهم ترین آن ها به نحوه طراحی حسگر مغناطیسی فلاکس گیت برمی گردد. استفاده از الگوریتم بهینه سازی لونیبرگ- مارکوارد نیز تا حدود زیادی این غیرخطیگی را رفع می کنند که در این مقاله استفاده شده است و در فصل نتایج شرح داده خواهد شد.

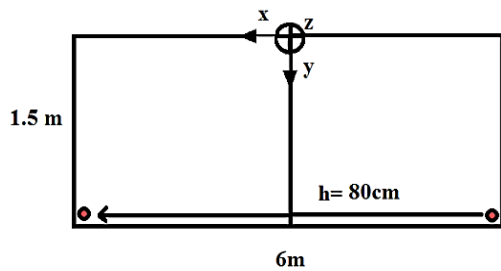
## ۵-۶. واسنجی

جهت واسنجی حسگر مغناطیسی فلاکس گیت سه جهته، از چند روش می توان استفاده کرد، روش اول کالیبره کردن با استفاده از حسگرهای دقیق فلاکس گیت استاندارد کالیبره شده است، روش دوم از طریق ایجاد یک میدان مغناطیسی ثابت در محیط مخصوص در پژوهشگاه های مخصوص واسنجی هوافضای کشور است و روش آخر که حسگرهای مغناطیسی در این تحقیق بر اساس آن کالیبره شده است استفاده از روش IGRF و روش WMM است که از در نتایج این تحقیقات برای هر نقطه از زمین با استفاده از موقعیت زمانی، مکانی و ارتفاع از سطح دریا در هر نقطه از کره زمین در محیط اینترنت منتشر شده است. اطلاعات مربوط به شهرستان قزوین و موقعیت مکانی دانشگاه با مختصات بین ۴۸ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۱ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ و ۳۵ درجه ۲۴ دقیقه تا ۳۶ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی نسبت به خط استوا قرار دارد. بر اساس این روش ها و مقادیر جدول (۲) و قرار دادن حسگر در جهت بردار F و خواندن ولتاژ حسگر شروع به کالیبره کردن حسگر می کنیم.

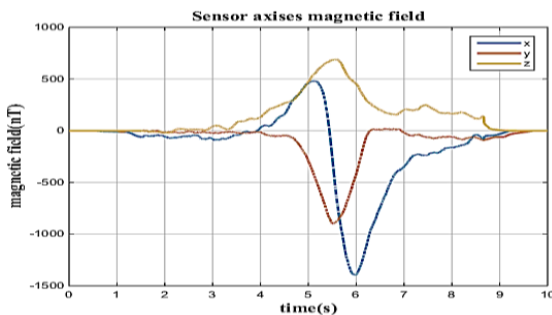
<sup>۲</sup> در نتیجه انجام محاسبات مؤلفه های مغناطیسی در نقطه مورد نظر در تاریخ 23/05/2019 به صورت جدول (۲) به دست آمده است.

<sup>۱</sup> nonlinearity

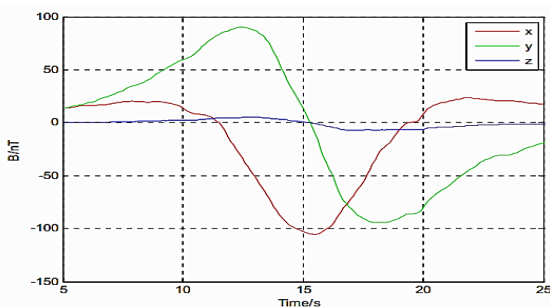




شکل (۹). شماتیک حرکت جسم مغناطیسی در اطراف حسگر مغناطیسی سه محوره با حذف آفست زمین در آزمایش اول



شکل (۱۰): سیگنال‌های ذخیره شده از حسگرها در هنگام حرکت جسم مغناطیسی در اطراف حسگر مغناطیسی سه محوره با حذف آفست زمین در مقاله حاضر



شکل (۱۱). سیگنال‌های گراف شده جسم مغناطیسی در اطراف حسگر مغناطیسی سه محوره با حذف آفست زمین در مقاله GAO 2017[1,2]

همان‌طور که در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) مشاهده می‌گردد، شکل کلی سیگنال‌های ذخیره شده توسط سامانه ساخته‌شده این مقاله با مقالات قبلی تطابق دارد. تفاوت‌ها در دامنه سیگنال‌ها به نحوه قرارگیری جسم نسبت به حسگرها در هر لحظه از حرکت بر می‌گردد. با توجه به نرخ نمونه‌برداری بالا و تفکیک‌پذیری و دقت بالاتر سامانه اندازه‌گیری مقاله حاضر، سیگنال‌ها دارای دامنه‌های بالاتر و دارای پهنای باند بیشتری هستند.

شکل (۱۲) ترجمه سه‌بعدی حرکت جسم از سیگنال‌های حسگرهای مغناطیسی در سه جهت X، Y و Z است که در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. این نمودار با از بین بردن اثر میدان مغناطیسی زمین با استفاده از الگوریتم‌های ذکر شده رسم شده است.

برخی از ویژگی‌های فنی سامانه طراحی و ساخته‌شده به شرح زیر است [۸]:

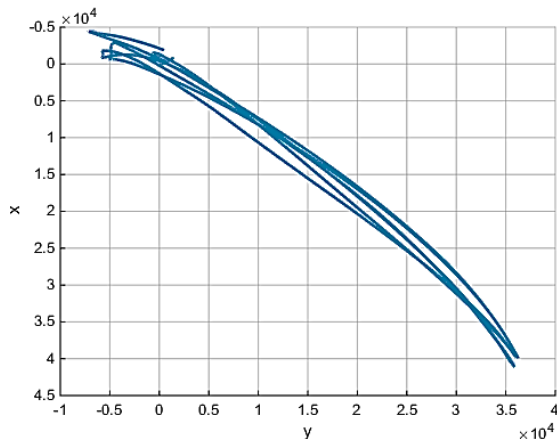
- Working Temperature = 25 °C
- Sampling Resolution =  $5 \text{ V} \div 2^{24} = 0.29 \mu\text{V}$
- Dynamic Range = 100dB
- Sampling Rate: 2.5MS/s
- Sensitivity =  $0.29 \mu\text{V} \times 1.07 \text{ LSB rms} = 0.3188 \mu\text{V rms}$
- Gain Error:  $0.0016\% \times 5\text{V} = \pm 80.0 \mu\text{V}$
- Offset Error =  $\pm 24.5 \mu\text{V}$
- Linearity Error = 0.0076% of range =  $38.0 \mu\text{V}$
- Total Error =  $80.0 \mu\text{V} + 24.5 \mu\text{V} + 38.0 \mu\text{V} = 182.5 \mu\text{V}$
- Precision =  $\pm 100 \text{ ppm}$
- Sensitivity =  $7 \mu\text{T/V}$
- Nonlinearity < 0.01%

## ۶. نتایج آزمایش‌ها

برای آزمایش صحت عملکرد اندازه‌گیری میدان مغناطیسی بیش از ۱۱ آزمایش طراحی و انجام گردیده که نتایج آن در [۲۹] موجود است. برخی از نتایج آزمایش‌های صورت گرفته در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرد. عموماً حرکت جسم مغناطیسی (آهنربا) در دو مقیاس مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در مرحله اول، جسم در فواصل نزدیک که در کاربردهای خاص مانند انتقال دارو استفاده می‌شود، نشان داده شده است و در مرحله دوم با فاصله حدود یک متر از حسگر، جسم به حرکت در آورده شده است. برخی از این آزمایش‌ها مطابق با آزمایش‌های موجود در مقالات معتبر در [۱] و [۲] انجام شده است و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند و تعدادی دیگر از آزمایش‌ها در مورد رفتار حسگرها با شرایط حرکتی منبع میدان مغناطیسی بررسی شده است.

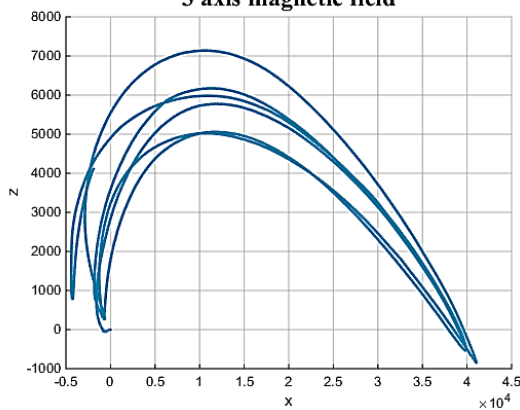
در این مدل، برای انجام آزمایش‌ها یک سایت آزمایشگاهی در یک محیط باز و بدون سیگنال ناخواسته مغناطیسی انتخاب شده است، که در آزمایش اول یک ماده مغناطیسی توسط یک تخته کوچک توسط یک شخص کشیده می‌شود. حرکت هدف و چرخش حسگر باید با سرعت ثابت انجام شود. مؤلفه‌های مغناطیسی آهنربا در سه جهت حدود ۰٫۸ متر از نقطه (-۰٫۳، ۱٫۵، ۰٫۸) تا نقطه (۰٫۸، -۱٫۵، ۰٫۳) با سرعت در حدود ۰٫۱ متر بر ثانیه و فاصله عرضی ۱/۵ متر کشیده شده است. مختصات وضعیت بین آهنربا و حسگر مغناطیسی در شکل (۹) نشان داده شده است.

3 axis magnetic field



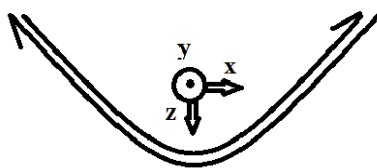
شکل (۱۵): نمای بالای تغییرات میدان مغناطیسی حاصل از تغییر جسم مغناطیسی در مسیر مشخص شده در آزمایش دوم.

3 axis magnetic field



شکل (۱۶): نمای بغل تغییرات میدان مغناطیسی حاصل از تغییر جسم مغناطیسی در مسیر مشخص شده در آزمایش دوم.

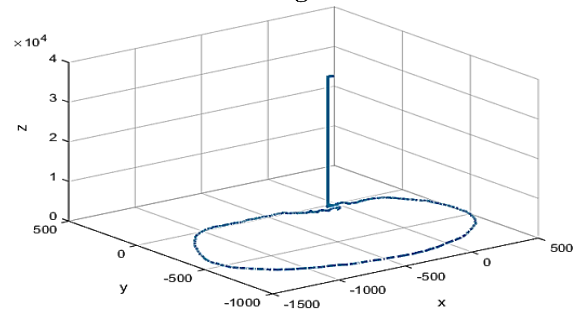
آزمایش سوم مربوط به حرکت پاندولی جسم مغناطیسی در اطراف حسگر مغناطیسی سه جهته است. شکل (۱۷) شماتیک حرکت پاندولی جسم حول محور Y را نشان می‌دهد. سیگنال‌های ذخیره شده از حسگرهای فلاکس گیت سه محور در اثر تغییرات سینوسی جسم در شکل (۱۸) و نمای سه‌بعدی این حرکت در شکل (۱۹) نشان داده شده است.



Oscillation

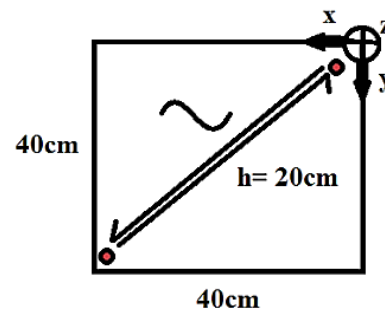
شکل (۱۷): شماتیک حرکت پاندولی آهنربا در اطراف حسگرها در آزمایش سوم.

3 axis magnetic field

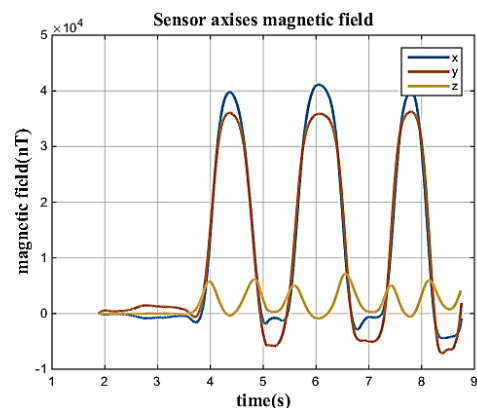


شکل (۱۲): نمای سه‌بعدی به دست آمده از حرکت جسم مغناطیسی در اطراف حسگر مغناطیسی سه محوره با از بین بردن جبران میدان مغناطیسی زمین در مقاله حاضر.

آزمایش دوم مربوط به حرکت رفت و برگشت مداوم در سه سیکل مداوم با سرعت ثابت است. تغییرات میدان مغناطیسی بر حسب nT در این آزمایش نیز در شکل (۱۴) و نماهای کناری این تغییرات متناوب در شکل‌های (۱۵ و ۱۶) نشان داده شده است.



شکل (۱۳): شماتیک حرکت جسم مغناطیسی حول حسگر مغناطیسی سه جهته با حذف آفست زمین بر حسب تغییرات شدت میدان مغناطیسی در آزمایش دوم.



شکل (۱۴): تغییرات میدان مغناطیسی حاصل از تغییر جسم مغناطیسی در مسیر مشخص شده در آزمایش هفتم.

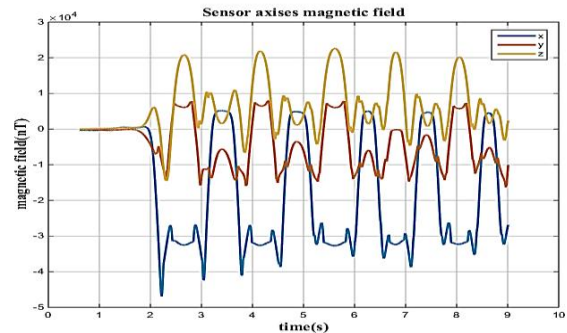
نمای بیضوی نمودارهای مطابق تئوری ارائه شده در مقاله [۱۶] مشاهده می‌شود. همچنین نوسانات ایجاد شده در مسیر توسط جسم مغناطیسی نیز در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود.

استفاده بسته به نوع و کیفیت آن از ۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دلار متغیر است و سامانه جمع‌آوری داده‌های سه کانال این حسگرها با قابلیت انتقال داده به صورت آنلاین به رایانه به ارزش ۴ تا ۲۰ هزار دلار است.

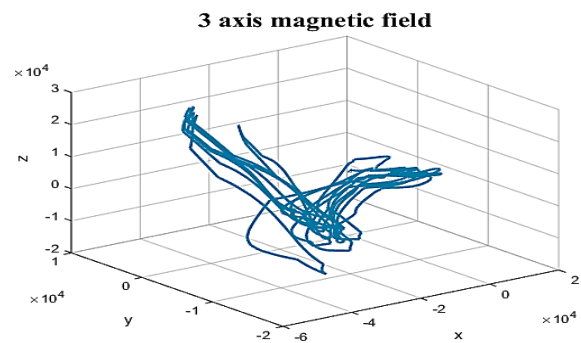
با مقایسه مختصری بین سامانه‌های طراحی شده با سامانه‌های خارجی، به اختلاف قیمت بالایی پی خواهیم برد. سامانه نمونه‌برداری داخلی ۲۴ بیتی با وضوح بالا برای ساخت حدود ۲۰۰ دلار و برای سامانه سه محور فلاکس گیت نیز کمتر از ۷۰ دلار هزینه دارد. طراحی و ساخت این سامانه دقیق اندازه‌گیری طی پایان‌نامه ارشد نویسنده به انجام رسیده و ارزش افزوده فعالیت دوساله به ارتقاء سطح کیفی ساخت چنین نیازی در کشور منجر شده است. ضمن این‌که ساخت نسخه‌های پیشرفته‌تر با کسب دانش فنی کسب شده و قابلیت اختصاصی سازی<sup>۱</sup> محصول به سادگی امکان‌پذیر است. صرفه اقتصادی بالا، ممانعت از خروج ارز از کشور و اتکا به تکنولوژی داخلی- ایرانی با توجه به لزوم اقتصاد مقاومتی در انجام این طرح مشاهده می‌گردد.

### ۸. نتیجه‌گیری

فن‌آوری طراحی سامانه‌های دیجیتالی‌زده کننده سیگنال‌های آنالوگ حسگرهای مغناطیسی فلاکس گیت جهت تشخیص میدان مغناطیسی به طور گسترده در صنایع نظامی و فضایی مورد توجه است. در این مقاله فرایند طراحی و چالش‌های پیاده‌سازی سامانه اندازه‌گیری دقیق میدان مغناطیسی که سیگنال‌های آن با سرعت و دقت بالاتر از نمونه‌های مشابه نمونه‌برداری شده است، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر دقت و پهنای بالای سیگنال‌های دریافتی، از جمله تمایزهای این سامانه، تشخیص و اندازه‌گیری میدان مغناطیسی به صورت آنلاین و تبدیل سریع آن به داده‌های دیجیتال و ارسال آن به رایانه است. در این پروژه یک روش موقعیت‌یابی هدف برای یک هدف متحرک با سه حسگرهای مغناطیسی طراحی، پیاده‌سازی، آزمایش و مقایسه شده است. آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌ها نشان داد که سرعت موقعیت‌یابی میدان مغناطیسی این سامانه به خاطر زمان واقعی بودن و شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزاری LabVIEW سریع‌تر از سایر نمونه‌ها است که بهبود قابل توجهی نسبت به نمونه‌های مشابهی دارد که داده‌ها را به محیط MATLAB انتقال می‌دهند. حسگر استفاده شده سه



شکل (۱۸): تغییرات سینوسی حرکت در آزمایش سوم.



شکل (۱۹): نمای سه‌بعدی از حرکت آزمایش سوم.

آزمایش حرکت پاندولی در فضای آزمایشگاهی غیر ایده آل و آهنربای معمولی انجام پذیرفته که اغتشاشات مغناطیسی بر اثر حرکت‌های ناخواسته آهنربا حول محول X و Z بر اثر اینرسی حرکتی پاندول بر نتیجه آزمایش اثرگذار بوده‌اند. با این وجود حرکت کلی پاندولی در شکل (۱۹) قابل مشاهده است.

### ۷. تحلیل هزینه

هدف از تحلیل قیمت سامانه اندازه‌گیری دقیق میدان مغناطیسی در این مقاله این است که مشخص گردد با هزینه بسیار کمتر از محصولات تجاری و نظامی اندازه‌گیری دقیق میدان مغناطیسی، می‌توان سامانه‌ای به مراتب دقیق‌تر طراحی و پیاده‌سازی نمود. در طراحی سامانه‌های اندازه‌گیری دقیق یکی از گلوگاه‌هایی که موجب کاهش دقت می‌گردد بحث دقت نمونه‌برداری و ورود سیگنال‌های ناخواسته تماسی، الکتریکی، مغناطیسی و الکترومغناطیسی به سامانه اندازه‌گیری است. با پیشرفت فناوری الکترونیک در ساخت ADC ها و تنظیم‌کننده‌های ولتاژ و به‌کارگیری این ادوات در کنار حسگرهای حساسی چون حسگر فلاکس گیت، دقت‌های اندازه‌گیری بهبود قابل توجهی خواهند یافت. قیمت این مدل از مغناطیس‌سنج فلاکس گیت مورد

<sup>1</sup> Customization

- [5] L. Merlat, and P. Naz, "Magnetic localization and Identification Of Vehicles," Unattended Ground Sensor Technologies and Applications V, 5090, p. 174, 2003.
- [6] N. Wahlström, and F. Gustafsson, "Magnetometer modeling and validation for tracking metallic targets," IEEE Transactions on Signal Processing, 62(3), pp.545-556, 2013.
- [7] A. Ranganathan, "The levenberg-marquardt algorithm," Tutorial on LM algorithm, 11(1), pp.101-110, 2004.
- [8] F. B. Diagram and Description, G Data Sheet, "Sigma-Delta ADC with On-Chip Buffer AD7760," PRODUCT PAGE QUICK LINKS, 2006.
- [9] C.C. Lu, W.S. Huang, Y.T. Liu, and J.T. Jeng, "Design, fabrication, and characterization of a 3-D CMOS fluxgate magnetometer," IEEE Transactions on Magnetics, 47(10), pp.3752-3755, 2011.
- [10] A. Grosz, J. Michael, H. Sheikh, and S.C. Mukhopadhyay, "High sensitivity magnetometers"; Switzerland, Springer, p. 567, 2017.
- [11] L. Merlat, and P. Naz, "Magnetic localization and identification of vehicles," Unattended Ground Sensor Technologies and Applications V, 5090, p. 174, 2003.
- [12] W. Wynn, C. Frahm, P. Carroll, R. Clark, J. Wellhoner, & M. Wynn, "Advanced superconducting gradiometer/magnetometer arrays and a novel signal processing technique," IEEE Transactions on Magnetics, 11(2), 701-707, 1975.
- [13] P. Heath, G. Heinson, and S. Greenhalgh, "Some comments on potential field tensor data," Exploration Geophysics, 34(2), pp. 57-62, 2003.
- [14] T. Nara, S. Suzuki and S. Ando, "A closed-form formula for magnetic dipole localization by measurement of its magnetic field and spatial gradients," IEEE transactions on magnetics, 42(10), pp.3291-3293, 2006.
- [15] A. Sheinker et al, "Localization and magnetic moment estimation of a ferromagnetic target by simulated annealing," Measurement Science and Technology, 18(11), pp. 3451-3457, 2007.
- [16] Y. L. Wei, C. H. Xiao, J. C. Chen, & J. H. XIE, "A new magnetic localization method based on vessel's vertical magnetic field," Journal of naval. University of Engineering, 21, 20-25, 2009.
- [17] B. Oruç, "Location and depth estimation of point-dipole and line of dipoles using analytic signals of the magnetic gradient tensor and magnitude of vector components," Journal of Applied Geophysics, 70(1), 27-37, 2010.
- [18] L.L. Tang et al, "A novel localization algorithm for mobile magnetic targets," Chin. J. Sens. Actuators, 24, 996-1000, 2011.
- [19] Z.T. Yu, J.W. Lv and B.T. Zhang, "A method to localize magnetic target based on a seabed array of magnetometers," Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Journal of Wuhan University of Technology), 34(6), pp.131-135, 2012.
- [20] N. Wahlström, and F. Gustafsson, "Magnetometer modeling and validation for tracking metallic targets," IEEE Transactions on Signal Processing, 62(3), pp.545-556, 2013.
- [21] R. Alimi, E. Weiss, T. Ram-Cohen, N. Geron and I. Yogev, "A dedicated genetic algorithm for localization of moving magnetic objects," Sensors, 15(9), pp.23788-23804, 2015.
- [22] J. Han, G.T. Jiao, Y.J. Zhang, Z.Q. Di, "Test and calculating method for motion parameters of underwater project based on magnetic gradient model," J. N. Univ. China, 2015.

فلاکس گیت دارای ویژگی‌های نظیر دقت بالا، نصب آسان و هزینه کم است که می‌تواند به طور گسترده‌ای در برنامه‌های کاربردی مهندسی مانند زیرسامانه‌های ماهواره‌های صنایع هوافضا، صنایع راداری، مکانیزه کردن وسایل نقلیه زیرزمینی با استفاده از الکترومغناطیسی و کاربرد در زمینه‌های زمین‌شناسی و زیست پزشکی مورد استفاده قرار گیرد. میدان مغناطیسی زمین در محیط نرم‌افزاری لب ویوو از داده‌های دریافت شده حسگرها به طور کامل حذف شده است. غیرخطی بودن این حسگرها یک محدودیت برجسته برای عملکرد واسنجی مغناطیس‌سنج سه محور است که در روش‌های واسنجی سنتی نادیده گرفته شده است. در این تحقیق، با توجه به محدودیت‌های موجود از نظر طراحی حسگر فلاکس گیت و همچنین امکان واسنجی دقیق این حسگرها و همچنین عدم وجود مرجعی جهت مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر دقیق، از روش مقایسه با سایر کارهای انجام‌شده در این زمینه استفاده شده است که نتایج قابل قبول و کاملاً مشابهی به دست آمده است. در نهایت امکان بومی‌سازی این تکنولوژی انحصاری در کشور به وجود آمده که نمونه مشابهی در این زمینه بالا وجود ندارد و باعث صرفه‌جویی ارزی و حتی ارزی و صرفه اقتصادی بسیار بالا است.

## ۹. سپاسگزاری

از شرکت دانش‌بنیان توسعه فناوری وپایش هوشمند (اینتلیکو) که کلیه تجهیزات و قطعات الکترونیکی مورد نیاز جهت طراحی و ساخت سامانه اندازه‌گیری مورد نیاز این مقاله را فراهم نمودند تشکر می‌نماییم. از آقای مهندس سعید فیروز بهرفاضل و حمید فیروز بهرفاضل برای همکاری در مونتاژ قطعات، آموزش‌های نرم‌افزاری، چاپ سه‌بعدی قطعات و انجام آزمایش‌ها در این پروژه تشکر و قدردانی می‌گردد.

## ۱۰. مراجع

- [1] X. Gao, S. Yan, and B. Li, "A Novel Method of Localization for Moving Objects with an Alternating Magnetic Field," Sensors, 17(4), p.923, 2017.
- [2] X. Gao, S. Yan, and B. Li, "Localization of Ferromagnetic Target with Three Magnetic Sensors in the Movement Considering Angular Rotation," Sensors, 17(9), p.2079, 2017.
- [3] Y. Liu, X. Li, X. Zhang, and Y. Feng, "Novel calibration algorithm for a three-axis strapdown magnetometer," Sensors, 14(5), pp.8485-8504, 2014.
- [4] F.J. Lowes, "The international geomagnetic reference field: A "health" warning. IAGA Division V-MOD Geomagnetic fieldmodeling: IGRF proper use," <http://ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod.html>, 2010.

- magnetometer of Venus express,” ESA Special Publication, 1295, 1-10, 2007.
- [27] K. Janghorban, R. Aghrae, H. Daneshmanesh, H. Obeiri, “Investigation of electromagnetic properties of epoxy-graphene nanocomposites,” Journal of Radar Imam Hossein University, p 1-8, 1393. (in Persian)
- [28] S. Hajisadeghian, A. Sheikhi, “Detecting offshore targets using satellite radiation using weights of adaptive filters,” Journal of Radar Imam Hossein University, p35-47, 1392. (in Persian)
- [29] L. Nemat Zadeh, “Prototyping of a 3-axis Accurate Magnetic Field Digital Measurement System Using a High-speed 24-bit ADC with Real-time Monitoring”, Msc. Thesis, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, 2020. (in Persian)
- [23] G. Dekoulis, “Novel digital magnetometer for atmospheric and space studies (DIMAGORAS),” In Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [24] C.W. Smith, J. L’Heureux, N.F. Ness, M.H. Acuna, L.F. Burlaga and J. Scheifele, “The ACE magnetic fields experiment,” In The advanced composition explorer mission (pp. 613-632). Springer, Dordrecht, 1998.
- [25] H.U. Auster, K.H. Glassmeier, W. Magnes, O. Aydogar, W. Baumjohann, D. Constantinescu, D. Fischer, K.H. Fornacon, E. Georgescu, P. Harvey and O. Hillenmaier, “The THEMIS fluxgate magnetometer,” Space Science Reviews, 141(1-4), pp.235-264, 2008.
- [26] T. L. Zhang, G. Berghofer, W. Magnes, M. Delva, W. Baumjohann, H. Biernat, & K. H. Fornacon, “The fluxgate

---

**Prototyping of a 3-axis Accurate Magnetic Field Digital Measurement System Using a High-speed 24-bit ADC with Real-time Monitoring**

**L. Nematzadeh<sup>1\*</sup>, M. Davoudi<sup>2</sup>, A. Shahmansoorian<sup>3</sup>**

**Electrical and computer Department, International Imam Khomeini university of Qazvin,, Iran**

(Received: 21/12/2019; Accepted: 14/06/2020)

**Abstract**

*In this paper, a precise measurement system is designed and implemented to measure the magnetic field from a flux gate magnetic sensor. The design procedure includes the conceptual design, selection of sensitive sensors, high speed sampling compatible to the fluxgate sensors, data-loss free transfer, programming for data decode, analysis and presentation in graphs. The proposed system uses low-noise 24-bit ADCs with 2.5MS/s sample rate, SPARTAN III FPGA and ARM Cortex M4 processor. The Levenberg–Marquardt algorithm and averaging algorithms are used in the software for calibration, compensation and data representation. The outstanding feature of this article is the development of a technology in precision magnetic field measurement systems, which are widely used as telemetry systems and subsystems of spacecrafts. An advantage of the proposed system is the high-speed sampling of flux gate sensor signals in 24-bit resolution, the precision of 182.5  $\mu$ V and real-time transmission and display of this data on the computer.*

**Keywords:** Magnetic Field Measurement, Fluxgate Sensor, High speed Sampling, Data Acquisition

---

\* Corresponding author E-mail: l.nematzadeh@gmail.com