

РЕВОЛЮЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ



Общепризнанный коммерческий магнитометр



Сенсорный блок с использованием технологии MFAM.

Компания Geometrics недавно анонсировала новую революционную линию магнитометров, основанных на последних исследованиях в области миниатюризации атомных генераторов и магнитометров. Достижения компании Geometrics позволяют в 10 раз уменьшить размер и энергопотребление без ущерба для производительности. Новые устройства, которые появились на рынке, имеют размер всего около 15 см³ и требуют всего 2 Вт на датчик. Теперь доступны производственные технологии для дополнительного 10-кратного уменьшения габаритов и энергопотребления.

Последние достижения в лазерных технологиях и технологиях изготовления MEMS, поддерживаемые Агентством перспективных оборонных исследовательских проектов (Defense Advanced Research Projects Agency - DARPA) и Программой стратегических исследований и разработок в области окружающей среды (Strategic Environmental Research and Development Program - SERDP), привели к созданию миниатюрных компонентов для атомных генераторов и магнитометров. Используя свой многолетний опыт в создании полевых магнитометров, компания Geometrics недавно достигла прорывов, необходимых в разработке датчиков и электроники, и ввела на рынок рентабельные и надежные продукты.

Этот прогресс в технологии сенсоров окажет огромное влияние на приложения для исследований и обнаружения. Многие применения могут выиграть от более дешевых датчиков с меньшей мощностью.

Некоторые приложения будут использовать относительно небольшое количество датчиков, а другие создадут спрос на огромное количество датчиков. Эти возможности и необходимая производственная технология будут тщательно продуманы для успешного запуска новой технологии.

Как работают атомные магнитометры

Атомные магнитометры работают, измеряя частоту прецессии определенных атомов в магнитном поле. Атомы с магнитным моментом можно представить как волчки. Угловой момент волчка прецессирует вокруг вектора гравитационного поля. Точно так же магнитный момент атома прецессирует вокруг вектора магнитного поля с частотой, пропорциональной измеряемому магнитному полю. Поскольку частота - это величина, которую легко измерить с очень высокой точностью, частота прецессии атомов и, следовательно, магнитное поле могут быть определены с очень высокой точностью.

Прецессирующие атомы модулируют интенсивность светового луча. Это основной принцип работы атомного магнитометра.

Синяя стрелка представляет магнитное поле, а желтая стрелка - магнитный момент. Вверху слева момент параллелен световому лучу и не поглощает свет. Когда момент прецессирует или вращается вокруг стрелки магнитного поля, он поглощает различное количество света, тем самым модулируя амплитуду луча.

Отдельные атомы щелочных металлов обладают собственными магнитными моментами из-за их неспаренного электрона. Однако в газе все эти моменты случайным образом выровнены и поэтому компенсируют друг друга на макроскопическом уровне.

Поэтому в магнитометре первым необходимым шагом является создание макроскопического магнитного момента с помощью механизма оптической накачки. Направляя поляризованный свет через газ, магнитные моменты отдельных атомов стремятся выровняться в одном направлении (вдоль светового пути), и, следовательно, получается измеримый магнитный момент.

Прецессия этого магнитного момента вокруг магнитного поля, в свою очередь, влияет на поглощение света, проходящего через газ. По мере того, как моменты удаляются от направления света, они, как правило, поглощают больше света. Таким образом, частота атомной прецессии может быть измерена по ее влиянию на интенсивность света, проходящего через газ.

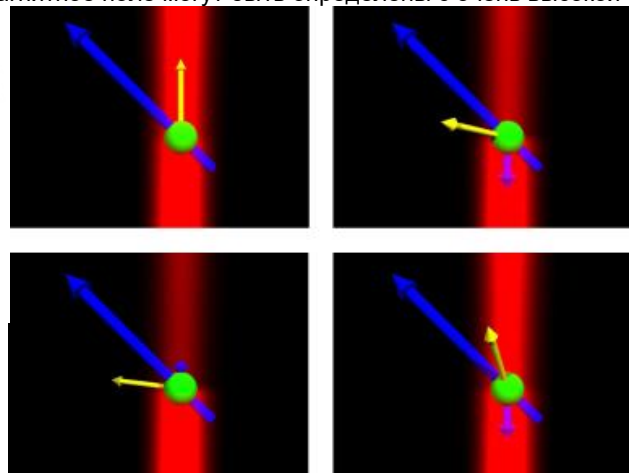
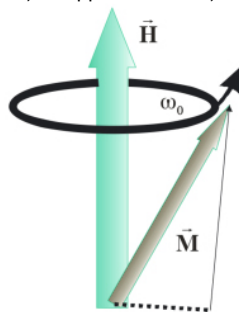
$$\frac{d\vec{A}}{dt} = \vec{T}$$

$$\vec{T} = \vec{M} \times \vec{H}$$

$$\vec{M} = \gamma \vec{A}$$

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma [\vec{M} \times \vec{H}]$$

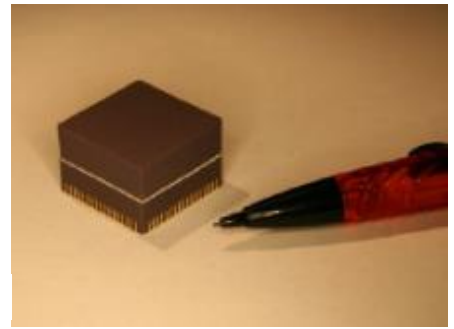
$$\omega_0 = \gamma H_0$$



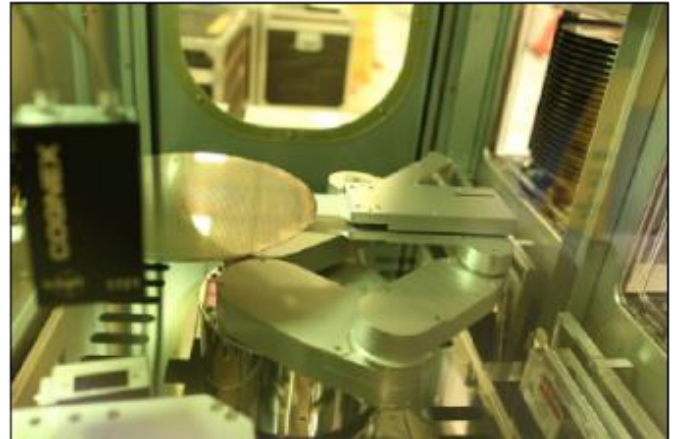
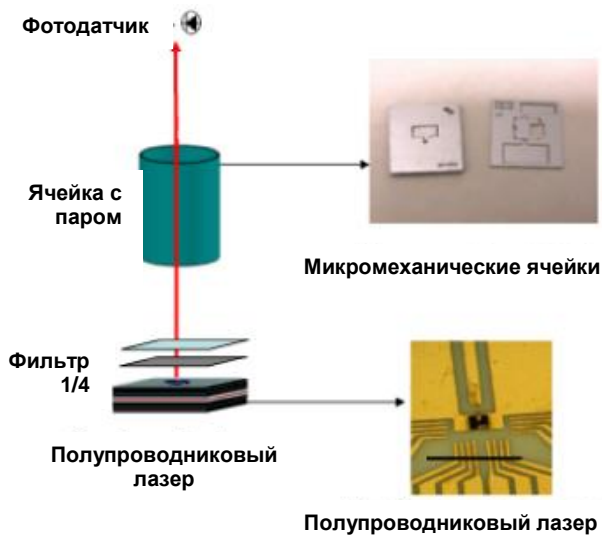
Технология MEMS

Компоненты атомного магнитометра состоят из ячейки, содержащей щелочной элемент, например цезий, источника света с соответствующей длиной волны и фотоэлемента для определения интенсивности света. Достижения в области изготовления MEMS привели к возможности недорого создавать 1 миллиметровый кубический объем цезиевого газа.

Технология лазерных диодов использовалась для создания устройств, эффективно излучающих свет нужной длины волны. Методы упаковки MEMS могут привести эти компоненты в требуемое расположение с небольшими затратами в больших объемах.



Прототип MFAM



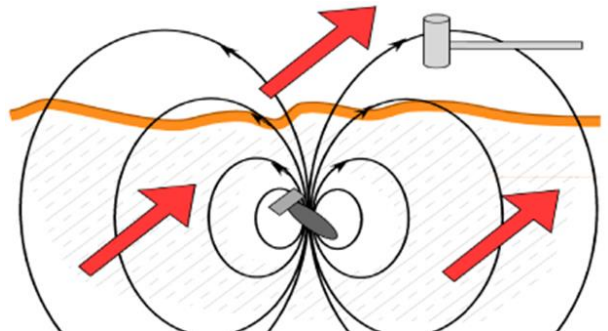
Обработка пластин

Фотографии любезно предоставлены Texas Instruments

Почему атомные магнитометры?

Магнитометры имеют важное применение в геофизике и обнаружении объектов. Железные объекты или минеральные тела могут быть пассивно обнаружены благодаря их влиянию на магнитное поле Земли.

Магнитные поля имеют как величину, так и направление. Атомные магнитометры чувствительны только к величине магнитного поля. Другие магнитные датчики, такие как феррозондовые или магнито-ограничительные датчики, также чувствительны к направлению магнитного поля. Из этих устройств получают хорошие компасы, но они не подходят для измерения мельчайших разностей магнитного поля от движущейся платформы. Атомные магнитометры, также известные как магнитометры с оптической накачкой, используются почти исключительно тогда, когда требуется высокая чувствительность при измерениях на движущихся платформах. Сама Земля фактически является передатчиком при зондировании магнитометром. Магнитное поле изменяется из-за присутствия металлов. Эти изменения или аномалии обнаруживаются магнитометром.



Приложения

Автономные наземные датчики

Автономные наземные датчики - это системы, используемые военными для целей мониторинга. Такие системы могут содержать камеру, сейсмические датчики, магнитометры и другие устройства для обнаружения движения. Для этих устройств требуются датчики с очень низким энергопотреблением, поскольку они могут работать в течение длительного периода времени. Системы связи и обработки могут потреблять немного больше энергии, так как они могут быть переведены в спящий режим при отсутствии активности. Однако сами датчики должны работать непрерывно и поэтому требуют очень низкого энергопотребления. По мере развития возможностей связи и обработки данных предполагается, что эти устройства могут транслироваться с бортовых платформ в больших количествах для наблюдения за потенциально опасной территорией. Это обеспечило бы рынок для огромного количества датчиков, что снизило бы стоимость их производства.

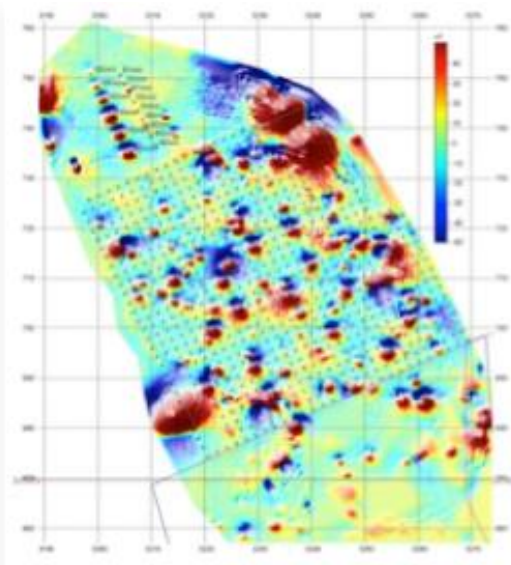
Обнаружение неразорвавшихся боеприпасов

Старые артиллерийские полигоны и прибрежный шельф в США и других странах содержат неразорвавшиеся боеприпасы, которые были выпущены для стрельбы по мишеням или неправильно утилизированы. Традиционный подход к обнаружению таких предметов известен как «Mag and Flag», когда операторы, использующие грубые магнитометры, перемещаются по территории, обнаруживая аномалии по звуку, издаваемому прибором, и устанавливают флажок в месте аномалии.

Более современным является метод «цифровой геофизики», при котором данные измеряются на площади, сохраняются, а затем анализируются. В результате составляются карты и таблицы местоположений аномалий.

Хотя цифровая геофизика обеспечивает более точное и полное картирование целей, ее недостатком является то, что процесс занимает несколько дней. Инструмент реального времени может точно определять аномалии сразу, но при этом быть таким же легким и маломощным, как простые устройства «Mag-and-Flag».





Обнаружение туннелей и безопасность периметра

Еще одна проблема, которую можно решить с помощью магнитометров, - туннели, пересекающие национальные границы или периметр охраняемых сооружений. Сами туннели трудно обнаружить, но активность внутри туннелей часто создает или нарушает магнитное поле и может быть легко обнаружена. Для этого приложения требуются протяженные группы магнитометров, чтобы покрыть весь периметр установки или вдоль границы. Очевидно, что устройства должны быть небольшими, с низким энергопотреблением и дешевыми для этого приложения.



Развертывание на беспилотных средствах

Растет интерес к платформам беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для переноса датчиков над районами исследований. Такие средства обладают потенциалом для высокой производительности, большей безопасности и значительно более низкой стоимости по сравнению с другими методами обследования. Ясно, что датчики MFAM значительно увеличат практичность платформ БПЛА из-за их меньшего размера, вызывая меньшее влияние на аэродинамику летной платформы и их более низкое энергопотребление, что значительно уменьшит размер и вес батареи.

Измерение вихревых токов

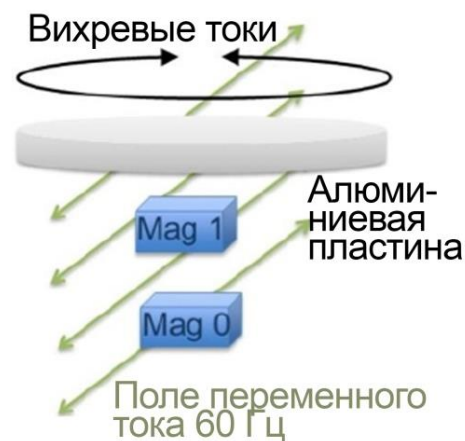
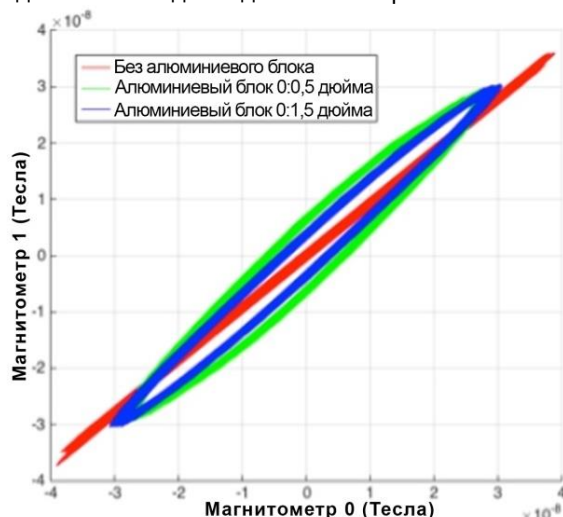
Датчики MFAM также обеспечивают исключительное пространственное и временное разрешение. Эта технология, делает революцию в магнитных исследованиях. Вот несколько примеров удивительных преимуществ в производительности благодаря небольшому размеру датчиков. Эти датчики измеряют поле с частотой 1000 Гц, что приводит к некоторым интересным наблюдениям. Например, формы сигналов от линий электропередач можно полностью наблюдать и при желании фильтровать, а не просто переходить на более низкую частоту. Такое наложение обычно вызывает странные артефакты и шум. Мы даже можем измерять вихревые токи в немагнитных материалах, используя вездесущий шум 60 Гц в качестве

передатчика.

Изменяющиеся магнитные поля индуцируют вихревые токи в проводящих объектах. Эти индуцированные токи создают магнитные поля, которые не совпадают по фазе с полем, вызывающим их. Измеряя противофазную составляющую магнитного поля, мы можем измерить вихревой ток. Это позволяет обнаруживать даже проводники из цветных металлов, что обычно не делают магнитометры.

График слева показывает выходной сигнал одного датчика по горизонтальной оси, а другого датчика по вертикальной оси. Это создает паттерны

Лиссажу в соответствии с относительной частотой и фазой двух показаний. В этом случае частоты совпадают, поэтому мы получаем круговую диаграмму, если два сигнала совершенно не совпадают по фазе, и линию, если они совпадают по фазе. Эллиптические кривые - это результат чего-то среднего. Мы можем ясно видеть эффект, когда разность фаз между двумя сигналами (вызванная вихревыми токами) увеличивается.



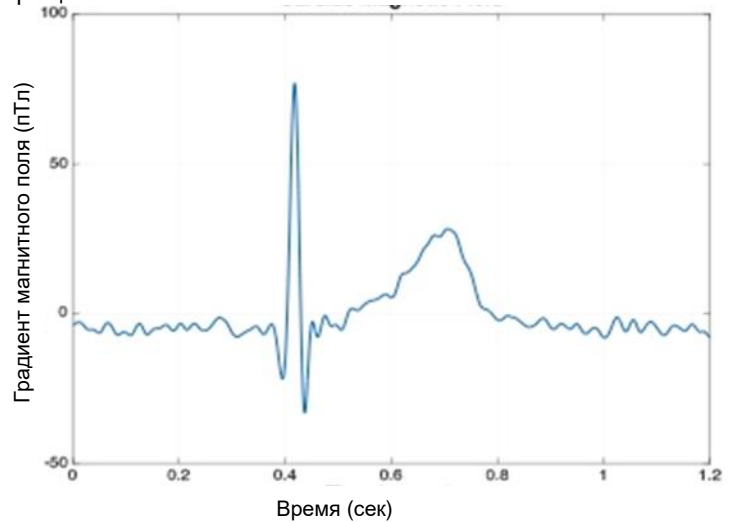
Шумоподавление в неэкранированной среде

Два датчика можно расположить как можно ближе друг к другу. Это стало возможным благодаря небольшому размеру датчиков и полному отсутствию перекрестных помех между ними. Такое близкое расположение позволяет измерять и вычитать фоновый шум до невиданных ранее уровней. Вы можете уменьшить фоновый шум и проводить измерения до уровня 1 рТ даже без магнитного экранирования!



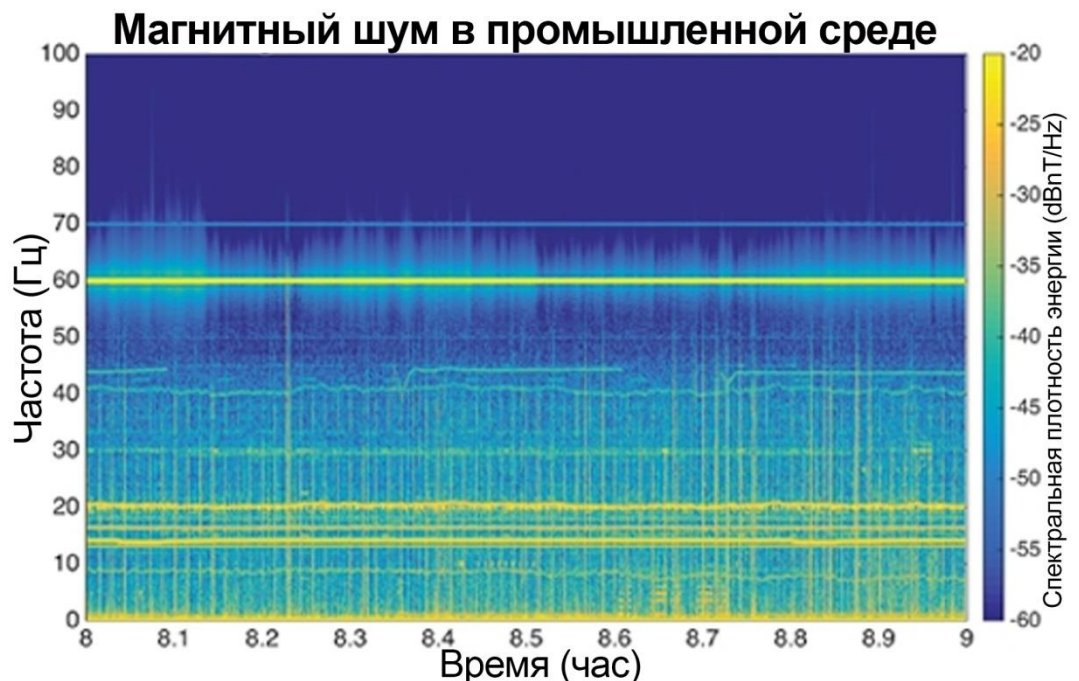
Измерение сигнала MCG

Одно из удивительных применений этого метода - измерение сигналов MCG сердца. Были продемонстрированы измерения собственных сигнатур сердцебиения. Просто поместив один датчик рядом с сердцем, а другой датчик поверх первого для вычитания фона, можно измерить магнитные поля от сердца. Лучшее соотношение сигнал / шум достигается путем суммирования данных примерно по 100 сердечным сокращениям.

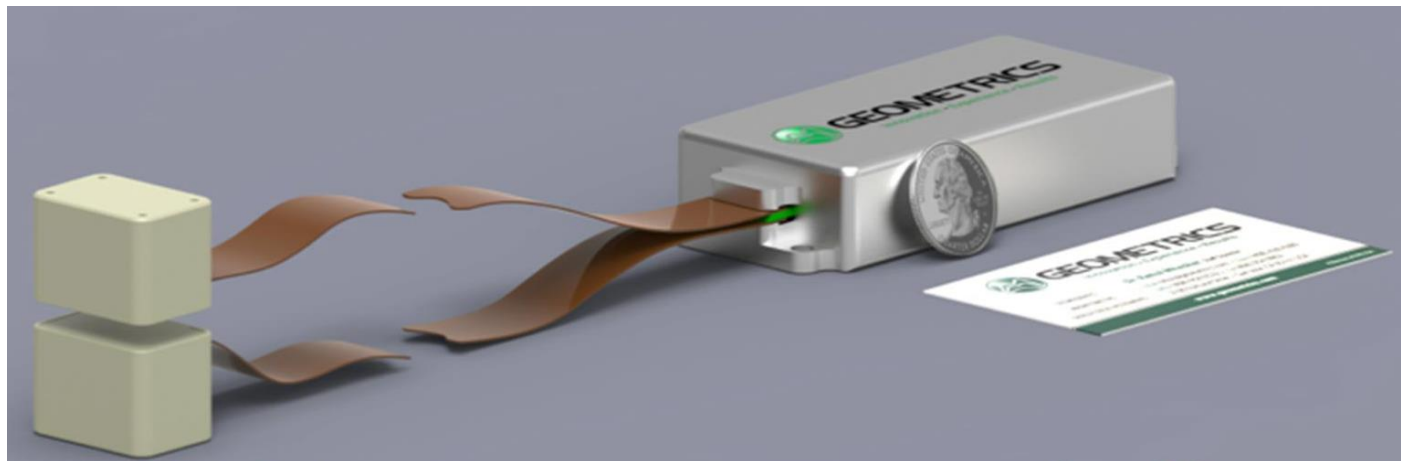


Мониторинг инфраструктуры

Другой пример измерений, которые могут быть выполнены по-новому с помощью миниатюрных датчиков полного поля, - это определение характеристик зданий и инфраструктуры. Окружающая среда зданий богата магнитными полями. Эти поля меняются при перемещении лифтов, систем отопления, вентиляции и кондиционирования, освещения и даже при перемещении дверей и мебели. Из исследований в здании мы можем сделать удивительные выводы. Построение БПФ длинного временного ряда данных дает практически «отпечаток пальца» здания.



Комплект MFAM Developer Kit

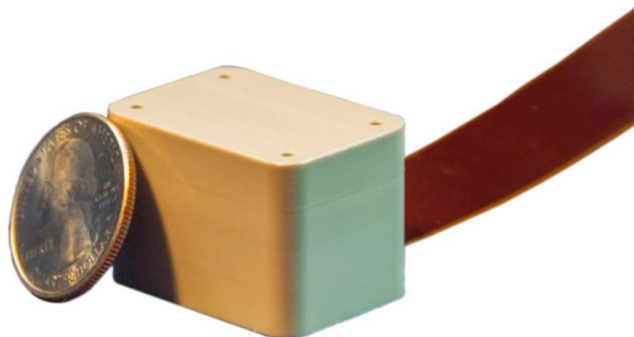


МОДУЛЬ MFAM

- **Модуль с двумя датчиками:** два датчика позволяют проводить индивидуальные или градиентные измерения. Изменение конфигурации датчиков обеспечивает работу без мертвых зон в любой точке мира, а также позволяет компенсировать девиационную ошибку.
- **Малый размер:** без значительного увеличения веса при добавлении к существующим инструментам или системам.
- **Работа с низким энергопотреблением:** сокращение времени простоя за счет более продолжительной работы от батареи меньшего размера.
- **Модульная архитектура:** интеграция модуля MFAM в существующие инструменты и расширение линейки услуг.
- **Высокая производительность.** Высокая частота измерений и низкий уровень шума позволяют использовать его в различных приложениях, включая геофизику, неразрушающую оценку, магнитную кардиографию и области структурного состояния.

КОМПЛЕКТ ДЛЯ РАЗРАБОТЧИКА MFAM

Geometrics MFAM - это модуль цезиевого магнитометра с лазерной накачкой, который измеряет модуль общей напряженности магнитного поля, с цифровым интерфейсом для легкой интеграции с модульными измерительными платформами. В модуле есть два датчика, которые можно использовать независимо или как собственный градиентометр. Датчики также могут быть расположены так, чтобы компенсировать ошибку направления или исключить мертвую зону. Технические характеристики малошумящего датчика MFAM показаны ниже. Чтобы увидеть спецификации для MFAM, Super-MFAM или SX-MFAM с малой девиационной ошибкой, см. Спецификацию.



- **Четыре аналоговых входных канала:** дифференциальные и масштабируемые входы для универсальной интеграции.
- **Поддержка Power over Ethernet (PoE):** одно соединение для питания и загрузки данных.
- **Встроенный GPS:** GPS определяет положение, а 1PPS контролирует время измерения.
- **Датчик температуры / давления / влажности:** понимание условий окружающей среды.
- **10 МГц Вход синхронизации:** Позволяет контролировать основные системные часы.
- **Предоставлены схемы и пример исходного кода:** измените код по мере необходимости в соответствии с требованиями интерфейса и используйте схемы для запуска пользовательского макета платы.

СПЕЦИФИКАЦИЯ

	Режимы работы			
	Малошумящий	Низкая ориентационная ошибка	Без мертвой зоны, низкий уровень шума	Без мертвой зоны, Низкая ориентационная ошибка
Обычный модуль	√			
Модуль низкой ориентационной ошибки	√	√		
Супер модуль	√	√	√	√
Показания выходного поля	2	2	1	1
Чувствительность (типичная)	2 пТл/√Гц	5 пТл/√Гц	2 пТл/√Гц	5 пТл/√Гц
Ориентационная ошибка (типичная)	±25 нТл	±5 нТл	±10 нТл	±5 нТл
Мертвая зона (типичная)	±30°	±30°	Нет мертвой зоны	Нет мертвой зоны

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ

- **Напряжение питания:** Vin относительно GND. минимум 9,5 вольт, типичное 12 вольт, максимум 16 вольт
- **Среднее потребление тока:** Vin = 12 В, температура окружающей среды 25°C, типично 0,4 А, макс. 0,6 А.
Vin = 12 В, температура окружающей среды -35°C, типично 0,65 А, макс. 0,85 А.
- **Средняя потребляемая мощность:** температура окружающей среды 25°C, типично 5 Вт, макс. 7 Вт.
температура окружающей среды -35°C, типовая 8 Вт, макс. 10 Вт.

ХАРАКТЕРИСТИКИ

- **Диапазон поля:** полная шкала, мин. 20 мкТл, макс. 100 мкТл.
- **Минимальный уровень шума:** Магнитное поле, перпендикулярное оптической оси датчика, обычно 2 пТл/√Гц, макс. 3 пТл/√Гц
- **Мертвая зона:** только полярная, включая угол. Тип 60 градусов, максимум 70 градусов.
- **Ошибка направления:** измерено при напряженности поля 50 мкТл, типично 25 нТл-пик, макс 40 нТл-пик.
- **Цифровое разрешение:** 32-битный выход магнитометра. Типичное значение 0,05 пТл / LSB.
- **Скорость вывода данных:** непрерывное измерение. 1000 Гц.

ВНЕШНИЕ УСЛОВИЯ

- **Рабочая температура:** Окружающая среда, мин. -35°C, макс. 50°C.
- **Температура хранения:** Окружающая среда, мин. -40°C, макс. 70°C.
- **Рабочая высота:** 10000 футов.
- **Высота хранения:** 45000 футов.

Конфигурация выводов MFAM

Pin	Сигнал	Описание
1	CHASSIS	Заземление
2	GND	Заземление источника питания
3	Vin	Источник питания (от 9,5 В до 16 В)
4	Vin	Источник питания (от 9,5 В до 16 В)
5	GND	Заземление источника питания
6	GND	Заземление источника питания
7	MSPI_DOUT	Вывод данных (TX), протокол SPI, блок является ведущим
8	DNC	Не подключен, открытый контакт.
9	MSPI_DIN	Ввод данных (RX), блок протокола SPI является ведущим
10	DNC	Не подключен, открытый контакт.
11	MSPI_SCLK	Тактовый выход, протокол SPI, устройство является ведущим
12	DNC	Не подключен, открытый контакт.
13	MSPI_CSB	Выбор микросхемы, активный низкий сигнал, протокол SPI, устройство является ведущим
14	DNC	Не подключен, открытый контакт.
15	CTS	Очистить для отправки сигнала подтверждения, INPUT в модуль MFAM (не реализовано)
16	REF10M	10 МГц опорный вход синхронизации, ФАКУЛЬТАТИВНО
17	RTS	Готов к отправке сигнала подтверждения, ВЫХОД из модуля MFAM (не реализовано)
18	1PPS	1 импульс в секунду на входе, запуск по положительному фронту
19	GND	Заземление источника питания
20	GND	Заземление источника питания

Вес и размеры комплекта MFAM Developer Kit в упаковке

Состав	Размеры (ДхШхВ)	Вес
Case 1 - MFAM Development Kit	20 дюймов x 15 дюймов x 13 дюймов (51см x 38см x 33см)	10 фунтов (4,5 кг)

ТИПИЧНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

- **Новые приложения БПЛА:** определение местоположения устья скважины, отслеживание трубопроводов, геодезия и многое другое.
- **Приложения безопасности и обнаружения:** небольшой размер устройства, низкое энергопотребление и высокая чувствительность позволяют использовать приложения для мониторинга периметра.
- **Исследования морской магнитометрии:** настраиваемая архитектура позволяет интегрировать с автономными или пилотируемыми подводными аппаратами.

Видео <https://youtu.be/JqBKpvsqCCE>

www.geometrics.com



GEOMETRICS INC. 2190 Fortune Drive, San Jose, California 95131, USA Tel:
408-954-0522 • Fax: 408-954-0902 • Email: sales@geometrics.com



АГТ Системс

РОССИЯ 125445, Москва,
ул. Смольная 24а,
офис 1420,
тел (495) 232-07-86
e-mail: sales@agtsys.ru
web-site: www.agtsys.ru