

Реальные показатели мультикоптерной системы Pentamag

Йоханнес Б. Штоль
Mobile Geophysical Technologies, GmbH Целле,
Германия
jstoll@mgt-geo.com

Томас Кордес
Aerialis GbR Bremerhaven, Германия
info@aerialis.de

Рольф Ноелленбург
Aerialis GbR Bremerhaven, Германия
info@aerialis.de

Андерс Джепсен
Exploration For Humanity Walnut Creek,
Калифорния, США
jepesen@explorationforhumanity.org

Абстракт

Система Pentamag - это следующее поколение датчиков магнитного поля, разработанных немецкой компанией Mobile Geophysical Technologies для съемки близко к поверхности земли на специально сконструированном октокоптере. Основное назначение - обнаружение и точное определение местонахождения небольших металлических объектов, например неразорвавшихся боеприпасов (НРБ). Эта система включает в себя пять расположенных линейно магнитных датчиков. Более ранняя система с магнитометра с двумя феррозондами датчиками уже была показана как инструмент, который может быть полезен для обнаружения и точного определения местоположения неразорвавшихся боеприпасов. Система Pentamag специально разработана с учетом точности определения местоположения в режиме RTK и для работы вблизи земли для обнаружения небольших металлических предметов. Система магнитометра интегрирована в специально разработанный октокоптер, который может работать в режиме съемки до 25 минут. Стандартная рабочая процедура состоит в том, чтобы указать ряд местоположений GPS для представления регулярной съемки, включая местоположение и высоту над уровнем земли, на основе лидарной системы для управления высотой. Проверка работоспособности этой системы проводилась на военном полигоне в Северной Германии, на котором более 50 металлических предметов (боеприпасов) были закопаны в известных местах и на известных глубинах. Размер участка около 1 га. Время, необходимое для проверки этой области, составляло около 20 минут. Полевые испытания показали, что прототип системы полностью работоспособен в операционной среде. В результате система Pentamag, устанавливаемая на мультикоптер, способна обнаруживать и обнаруживать объекты размером не менее 3,7 см.

Вступление

Мультикоптерная геомагнитная съемка обладает большим потенциалом для эффективного и действенного охвата больших площадей и обширных территорий с целью проверки и выявления участков, потенциально содержащих неразорвавшиеся боеприпасы (НРБ). Во многих странах большие территории потенциально загрязнены неразорвавшимися боеприпасами, причем некоторые районы охватывают от десятков до сотен тысяч гектаров. В конечном счете, безопасное разминирование загрязненных территорий требует возможности нейтрализации или дистанционного обнаружения без участия человека из-за небезопасного характера неразорвавшихся боеприпасов. Необходимы технологии, которые позволят экономически эффективно сканирование большой площади с почти 100% охватом и почти 100% обнаружением подземных боеприпасов. Но современные сенсорные системы имеют очень ограниченные возможности отличать помехи от неразорвавшихся боеприпасов. В результате почти каждую аномалию необходимо раскопать, чтобы определить, действительно ли это неразорвавшийся боеприпас.

Современные технологии, ни прогулка по земле, ни пилотируемый вертолет, не могут удовлетворить эти требования. За последние десятилетия в США были разработаны две пилотируемые вертолетные системы: система ORAGS (воздушная геофизическая система Окриджа), разработанная Окриджской национальной лабораторией (Долл и др., 2001; Гейми и др., 2003), и система обнаружения на основе мультисенсорной буксируемой решетки Multisensor Towed Array Detection System (MTADS), разработанная Лабораторией военно-морских исследований (Нельсон и др., 2004). Обе системы схожи по конструкции и состоят из стингера, оснащенного рядом Cs магнитометров, установленных в передней части пилотируемого вертолета. Но эти системы нерентабельны, опасны в эксплуатации, а связанные с этим экономические факторы не позволяют потенциальным клиентам универсальное применение.

Для эффективного обнаружения небольших неразорвавшихся боеприпасов, высота обнаружения при исследовании магнитных объектов должна быть порядка 1–2 метров. Платформа магнитометра на БПЛА - очевидная альтернатива наземным магнитным измерениям или пилотируемым вертолетам. Мотивация, стоящая за такой системой, заключается в том, что она более безопасна для операторов, дешевле по начальным и эксплуатационным затратам и более эффективна с точки зрения характеристики площади. Ключевые особенности предлагаемой нами системы:

1. Наличие специализированной платформы - октокоптера с возможностью автономного полета, грузоподъемностью и выносливостью.
2. Установка на этот октокоптер пяти феррозондовых магнитометров вместо одного или двух датчиков, что значительно повышает разрешающую способность и позволяет обнаруживать мелкие объекты.
3. Ничтожно маленькое по сравнению с номинальной мощностью октокоптера, энергопотребление пяти датчиков и вспомогательных систем.

Система Pentamag: автономная система UAV-Mag

X810 ОКТОКОПТЕР

Система Pentamag позволяет эффективно и с высокой степенью достоверности обнаруживать опасные НРБ. Используя 5 феррозондовых датчиков в одной линии, Pentamag получает регулярно разнесенные значения магнитного поля, максимально приближенные к интересующим объектам. Но измеренное и зарегистрированное магнитное поле обычно отличается от истинного магнитного поля из-за множества факторов, в том числе:

1. Ошибка позиционирования (т.е. сообщение о данных в точке, отличаются от того места, где они действительно записаны)
 2. Эффекты, связанные с датчиком, в частности девиационная ошибка
 3. Магнитные помехи, создаваемые мультикоптером.
- Система требует установки и интеграции магнитометра на БПЛА. Компанией Aerialis GbR, Бремерхафен/Германия специально был разработан и произведен октокоптер (8 двигателей). На рис. 1 показана полная система, состоящая из октокоптера с GPS-приемником наверху и сборкой из пяти магнитометров, установленных на горизонтальной штанге, подвешенной на 1,50 м ниже.



Рис. 1. Октокоптер с пятью феррозондовыми магнитометрами. Вертикальная полоса длиной 1,50 м. Горизонтальная стрела шириной 2 метра. Датчики равномерно разнесены на 50 см.

| | |
|------------------------|---|
| Тип БПЛА | Octocopter X810 (8 электродвигателей), соосная конфигурация X4 |
| Автопилот | а) ручной режим, б) удержание позиции по GPS, в) автономная навигация. Режим отслеживания местности, защита от низкого напряжения, функция самонаведения и автоматическая посадка |
| Максимальная скорость | По вертикали: 2-5 м/с по горизонтали: 15 м/с |
| Пустой вес | 4,1кг (2 батареи 4,4кг) |
| Максимальная нагрузка | 6,5кг (при взлетной массе 15,0кг) |
| Полетное время | 25 мин при полезной нагрузке 3,3 кг (система Pentamag) |
| персонал | 1-2 оператора |
| температура, влажность | От -5°C до +50°C, 0% - 90% относительной влажности (без |

4. Система позиционирования RTK для точного определения местоположения объектов.
5. Лазерный высотомер, контролирующий высоту полета, позволяющий выполнять полеты с около 1 м над поверхностью. Эта способность является ключевой особенностью, обеспечивающей поддержание постоянной и малой высоты полета над землей.

Идеальная система магнитометра для дрона должна обеспечивать эффективное и надежное обнаружение интересующих металлических предметов. Выполнение полетов следует производить путем получения регулярно разнесенных значений магнитного поля как можно ближе к земле. Здесь мы демонстрируем, что Pentamag владеет этими возможностями. В частности, мы приложили много усилий, чтобы:

- 1) улучшить разрешение и стабильность температуры, а также уменьшить вес датчиков
- 2) спроектировать и построить октокоптер, оптимизированный для установки пяти магнитометров с максимальным временем полета.
- 3) использовать лазерный высотомер для размещения в БПЛА.
- 4) общий вес октокоптера, включая датчики, систему сбора данных и аккумуляторы, не должен превышать 10 кг. В этой конфигурации эта система очень гибкая и может использоваться по всему миру. Эта категория БПЛА требует меньше усилий для успешной подачи заявки на разрешение на полет и получения разрешения на экспорт для большинства стран.
- 5) Система сбора данных должна обеспечивать синхронизацию позиционирования магнитных данных с частотой не менее 100 Гц.

Обнаружение и обезвреживание неразорвавшихся боеприпасов предъявляет высокие требования к измерительной системе:

Идеальная система должна демонстрировать почти 100% обнаружение на любой местности с очень ограниченным количеством ложных срабатываний. Это технически невыполнимая цель даже для наземных систем. Поэтому будет установлен ряд пороговых значений и требований, чтобы продемонстрировать скачок в возможностях и производительности по сравнению с текущими возможностями.

| | |
|--------------------|---|
| Порог обнаружения | определить минимальный размер объекта, который может быть четко обнаружен бортовой системой БПЛА. В этом исследовании мы доказываем, что можем обнаруживать металлические предметы величиной 3,7 см. |
| Точность | Возможности RTK обеспечивают точность 0,1 м, это точность, которая должна быть достижима для повторного сбора данных. |
| Затраты | В зависимости от дневной производительности можно достичь уровня затрат в несколько центов за м ² . |
| Производительность | В зависимости от местности возможна суточная производительность до 10 гектаров. Межпрофильный интервал составляет 2 м, а плотность данных - 5 магнитных дорожек на 2 м. Это соответствует 75 точкам данных на квадратный метр |
| Доступность | Получение доступа ко всем сценариям, встречающимся на сайтах |
| Селективность | на сегодняшний день различие типов НРБ вряд ли возможно для магнитных измерений в условиях эксплуатации |

ветер <8 м/с (17,9миль/ч/28,8км/ч)
 расстояние дальность передачи данных: ≤1км (на частоте 2,4 ГГц, в пределах прямой видимости)
 максимальная высота взлета ~2.500м (в стандартной комплектации)

Полетное время - важный вопрос в коммерческих приложениях. Срок службы зависит от потребляемой мощности двигательной установки, а время полета ограничено из-за ограниченной емкости накопителя энергии. Помимо силовой установки, на время полета сильно влияют лобовое сопротивление и вес мультикоптера. На рис. 2 показана зависимость выносливости от полезной нагрузки, полученная на основе синтетической модели мультикоптера для заданных компонентов (характеристики и разряд аккумулятора, потребляемая мощность, двигателя и лопасти).

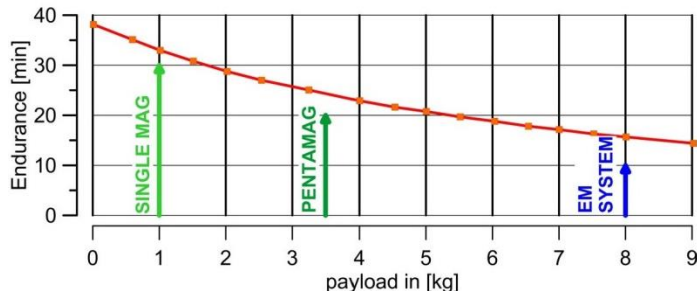


Рис. 2: Расчетное полетное время и грузоподъемность октокоптера X810 (8 двигателей). X810 был специально разработан для установки системы Pentamag. Датчики весят около 3,3 кг. В этой конфигурации время полета составляет 25 мин. Система SingleMag весит около 1 кг.

ФЕРРОЗОНДОВЫЙ МАГНИТОМЕТР

Цифровой феррозондовый магнитометр в системе Pentamag, представляет собой трехкомпонентный высокоточный векторный магнитометр с низким уровнем шума (Рис.3). Малогабаритный и легкий датчик магнитного поля с векторной компенсацией состоит из специальных малозумящих кольцевых сердечников и самонесущей системы катушек Гельмгольца. Тщательно продуманная конструкция печатных плат и кольцевых сердечников снижает шум и температурный дрейф до минимума и улучшает стабильность.

Таблица 2: Технические характеристики феррозондового магнитометра.

| | |
|-----------------------|---|
| Диапазон измерений | ± 65 мкТл |
| АЦП | 2x 16 бит |
| разрешение | 10 пТл |
| источник питания | 5 В постоянного тока |
| Потребляемая мощность | Минимум: 1,4 Вт (1 датчик) при 5 В постоянного тока |
| Дискретизации | 1, 10, 50, 100 Гц |
| хранилище данных | SD-карта (4 Гбайт) |
| Формат данных | ASCII, двоичный |
| Вес | ок. 220 г |
| Размеры | 16смХ6смХ3см (ДШВ) |
| Время и положение | GPS-приемник |
| Синхронизация | Внутренние высокоточные часы |
| Конструкция датчика | самонесущая система катушек Гельмгольца |
| Размер сенсора | Высота 40 мм |
| Разъем кожух | Ø 50 мм / Ø 67 мм |
| Вес датчика | 105 г |
| Шум | <10рТ / VHz |
| Стабильность | <10 нТл / в год |
| Ориентация | X, Y, Z |
| Ортогональность | <0,02° |
| диапазон температур | От -20 до +75°C |



Рисунок 3: Трехкомпонентный феррозондовый магнитометр и система сбора данных.

В магнитометре используется GPS-приемник ublox NEO-M8N, который выводит данные о широте, долготе, высоте и времени UTC. Частота дискретизации 1, 5, 10, 50 и 100 Гц.

Точность определения местоположения во многом зависит от количества спутников, доступных одновременно. Несколько тестов показывают, что абсолютная точность горизонтального положения, полученного из GPS, составляет порядка 1,5 м и около 2 м для вертикального положения. Мы внедрили устройство GPS, которое позволило бы достичь RTK-точности (кинематика в реальном времени). Алгоритм применяется для обработки измерений, сделанных с помощью спутниковых навигационных систем, для вычисления дифференциального позиционирования с использованием измерений фазы несущей посредством постобработки спутниковых данных.

КОМПЕНСАЦИЯ ЭФФЕКТОВ, ВЫЗВАННЫХ ДВИЖЕНИЕМ

Феррозондовые магнитометры широко используются во многих приложениях из-за их низкой номинальной мощности, малых размеров и небольшого веса. Поэтому этот датчик лучше всего подходит для использования на дронах. Если на мультикоптере одновременно должны быть развернуты несколько датчиков, ключевыми являются общий вес и потребляемая мощность всей системы. Основная причина использования пяти датчиков - значительно повысить обнаружение мелких металлических объектов в почве. Ожидается, что набор из пяти датчиков повысит разрешение и значительно повысит производительность.

Однако феррозондовые магнитометры значительно отличаются от других магнитометров, используемых в геофизических исследованиях, например магнитометров с оптической накачкой. Феррозондовые магнитометры не могут измерять абсолютное магнитное поле. Поэтому требуется калибровка с использованием магнитометра полного поля, например Cs или протонного магнитометра. Феррозондовые магнитометры измеряют магнитное поле, используя три его компоненты. Сложность состоит в том, что даже небольшие различия в физическом устройстве трех компонент вызывают значительную направленную зависимость общей напряженности магнитного поля. Эти различия необходимо устранить, чтобы получить значения магнитного поля, не зависящие от движения датчика. Эта процедура калибровки отличается от общего метода, введенного Лелиаком (1960). В своей хорошо известной работе Лелиак разрабатывает метод идентификации и оценки магнитных источников, связанных с самолетом, оснащенным магнитным детектором. Получены математические формулы для компенсации магнитного шума, связанного с

маневрами летательного аппарата. Выполняется так называемое испытание «коробочка», цель которого - продемонстрировать, что самолет и система не оказывают значительного влияния на разных курсах. Эффект девиации означает, что магнитное поле показывает разные значения в данном месте в зависимости от направления, в котором это место пролетели.

Компенсация за эффект девиации включает критерий «добротности» (FOM). Обычно это достигается за счет выполнения определенных маневров на большом расстоянии над землей (2000–3000 м) в каждом из четырех основных направлений и компенсации различий. Для беспилотных мультикоптеров максимальная высота полета обычно ограничивается примерно 100 м над землей.

Затем самолет поворачивается и снова летит над той же точкой в восточном направлении, затем в южном направлении, в западном направлении и, наконец, снова в северном направлении, чтобы проверить любые суточные колебания с момента первого пролета. Благодаря улучшенной компенсации эта разница была уменьшена до доли 1 нТл. Современные бортовые магнитные системы (например, магнитометры с оптической накачкой) на пилотируемых самолетах достигают разрешения 0,2 нТл после компенсации и лучше.

Этот процесс отличается для феррозондовых магнитометров.

Существует два различных принципа калибровки феррозондового магнитометра: при векторной калибровке выходной сигнал векторного магнитометра сравнивается с известным вектором магнитного поля, который прикладывается к прибору. В скалярной калибровке используется только напряженность магнитного поля, но не его направление.

Очевидно, что векторная калибровка превосходит скалярную калибровку, если известен вектор магнитного поля. Если это аппроксимировано моделью магнитного поля Земли, скалярная калибровка, вероятно, будет лучшим выбором. Калибровка феррозондовых магнитометров требует исправления ошибок масштабирования и смещения каждого компонента и преобразования компонентов в ортогональную систему отсчета для компенсации неортогональности между двумя осями.

В случае векторной калибровки необходимо знать углы Эйлера для выравнивания каждого компонента относительно системы отсчета. Однако измерение углов Эйлера требует чрезвычайно высокой угловой точности (порядка 1/100 градуса). Мы воздерживаемся от этого, потому что нас интересует только отображение общей магнитной напряженности вдоль линий полета.

Предполагая линейную передаточную функцию между магнитным полем и выходным сигналом магнитометра, вращения датчика вокруг по крайней мере двух осей магнитометра достаточно для выполнения скалярной калибровки (Auster et al., 2002). Следовательно, в принципе калибровка может выполняться и во время полета, потому что в этом случае в геомагнитном поле вращаются в основном горизонтальные компоненты. На объекте сила поля известна либо по абсолютным показаниям магнитометра (магнитометр с оптической накачкой), либо по данным IGRF для этого объекта. Разница между «истинной» скалярной напряженностью

магнитного поля и выходным сигналом затем минимизируется путем настройки девяти коэффициентов, представляющих смещение, коэффициент масштабирования каждого компонента и неортогональность.

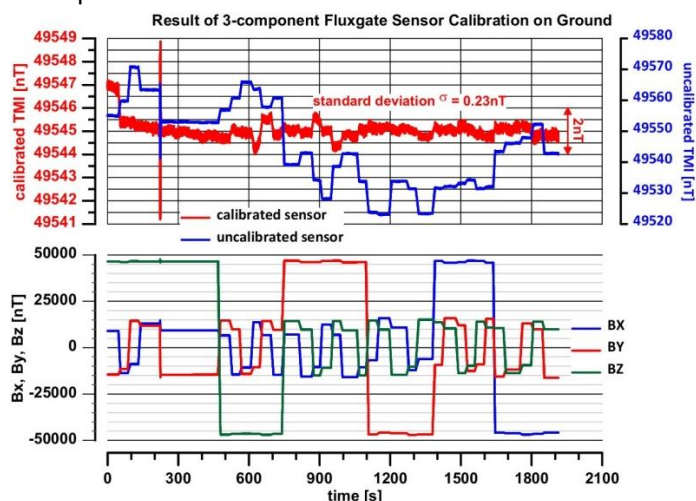


Рис. 4: Результат скалярной калибровки индукционного датчика на земле. Калибровка на земле позволяет избежать воздействия на датчик электромагнитных помех от электродвигателей и других магнитных компонентов, встроенных в мультикоптер. Нижняя панель показывает магнитную напряженность трех компонент B_x , B_y и B_z . Во время процесса калибровки на земле датчик магнитного поля поворачивается вокруг осей X , Y и Z на 360° . Затем оси магнитного датчика поворачиваются в противоположном направлении, и процесс вращения вокруг трех осей повторяется. Всего выполнено 24 оборота. Обратите внимание, что несколько поворотов повторяются. На верхней панели показаны неоткалиброванная (синяя линия) и откалиброванная общая магнитная напряженность (красная линия) после применения 9 коэффициентов и компенсации масштабирования, ошибок смещения и неортогональности. После калибровки датчик магнитного поля слабо зависит от направления ориентации. Стандартное отклонение составляет 0,23 нТл. Размах ошибки составляет 1,5 нТл. Полная магнитная напряженность некалиброванного датчика имеет гораздо более высокий уровень шума, что не позволяет использовать его в геофизических исследованиях.

Предполагая линейную передаточную функцию между магнитным полем и выходным сигналом магнитометра, вращения датчика вокруг по крайней мере двух осей магнитометра достаточно для выполнения скалярной калибровки (Auster et al., 2002). Следовательно, в принципе калибровка может выполняться и во время полета, потому что в этом случае в геомагнитном поле вращаются в основном горизонтальные компоненты. На объекте сила поля известна либо по абсолютным показаниям магнитометра (магнитометр с оптической накачкой), либо по данным IGRF для этого объекта. Разница между «истинной» скалярной напряженностью магнитного поля и выходным сигналом затем минимизируется путем настройки девяти коэффициентов, представляющих смещение и коэффициент масштабирования каждого компонента и неортогональности.

Обычно калибровка проводится на земле без присутствия дрона. Магнитометр пошагово вращается вокруг оси каждого компонента (X , Y , Z) на 360° . Затем общая магнитная напряженность оценивается с помощью теоремы Пифагора.

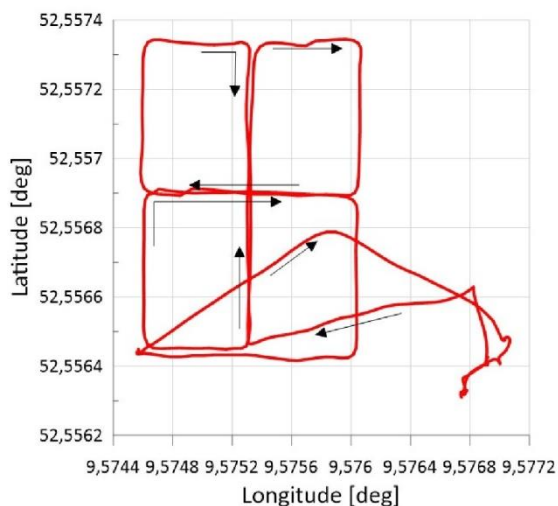


Рисунок 5А: Схема полета октокоптера «коробочка», выполняющего калибровку в полете.

Пример с военного полигона показан на рисунке 4. Разница между откалиброванным и некалиброванным датчиком очевидна. После применения 9 коэффициентов нет зависимости датчика от направления. Независимо от положения, магнитный датчик регистрирует почти одинаковую общую магнитную напряженность в любом направлении. Полученное стандартное отклонение составляет 0,23 нТл.

Чтобы учесть шум и магнитную сигнатуру дрона, мы разработали процедуру калибровки в полете. Это включает в себя выполнение летных испытаний на «добротность» (FOM). Рисунок имеет форму коробочки и пролетается на высоте около 40 м над землей (рис. 5). Эта схема полета систематически генерирует повороты горизонтальных компонент индукционных датчиков, в то время как вертикальная составляющая отклоняется лишь незначительно. В отличие от калибровки на земле, которая обычно выполняется в магнитно-тихом месте, электромагнитные помехи и все магнитные компоненты, встроенные в октокоптер, накладываются на показания магнитного поля. Таким образом, при калибровке также учитываются особые магнитные характеристики мультикоптера.

На рисунке 6 показаны результаты теста FOM. Это было выполнено в тот же день, когда проводилась тестовая съемка на обнаружение объектов. FOM был поднят на высоте около 40 метров над землей. Этот шаблон в основном вызывает изменения в горизонтальных компонентах, но лишь немного отклоняет вертикальные компоненты. В результате теста FOM практически исключается зависимость общей напряженности магнитного поля от направления. Стандартное отклонение остаточного шума и зависимость октокоптера от ориентации составили 1,09 нТл. Следует отметить, что все данные не фильтруются. Остаточный шум создается восемью электродвигателями октокоптера.

Результаты теста Pentamag на полигоне Luttmersen

В 2016 году федеральные власти Германии создали испытательный полигон на военном полигоне в Латтмерзене недалеко от Ганновера в Северной Германии.



Рисунок 5В: 3D-график теста «коробочка»

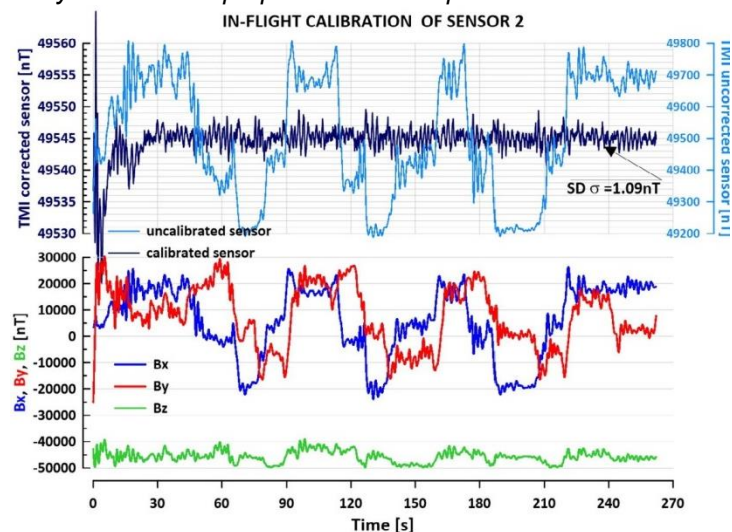


Рисунок 6: Результат теста «коробочка». Испытание проводилось на высоте около 40 метров над землей. На нижней панели показаны три компоненты индукционного датчика во время полета. Изменение направления полета также меняет знак горизонтальных составляющих. Верхняя панель показывает общую магнитную интенсивность нескорректированных данных феррозонда (голубой) и после калибровки (темно-синий). Без калибровки TMI сильно зависит от ориентации датчика и направления полета. TMI коррелирует с изменением направления полета. После калибровки TMI показывает прямую линию и более или менее не зависит от направления полета и ориентации индукционного датчика. Данные не фильтруются. Частота дискретизации 100 Гц. Размах амплитуды шума составляет около 5 нТл. Стандартное отклонение составляет 1,09 нТл.

Он был выбран для геофизических сравнительных испытаний. 53 объекта (боеприпасы, неразорвавшиеся боеприпасы) разного калибра от 2 см до 500 фунтовых бомб были закопаны в грунт на разной глубине и в разных направлениях. Площадь участка составляет около 1 га и включает равнинные луга. Нет кустов или других препятствий, которые делают его идеальным местом для этого теста (рис. 7). Поскольку этот полигон до сих пор используется немецкой армией, в земле закопано много других объектов.

На горизонтальной штанге на равном расстоянии 50 см было установлено пять феррозондовых датчиков. Они расположены в белых полистирольных сферах. Этот массив создает 5 магнитных треков вдоль линии полета.



Рисунок 7: Испытания на военном полигоне в Северной Германии недалеко от Ганновера. Размер участка около 1 га. В 2016 году было захоронено 53 объекта известных размеров.

Предположим, что скорость 4м/с и частота дискретизации 100 Гц, такая конфигурация дает 250 значений ТМІ на единичной площади 2мХ2м. Полеты были выполнены 8 октября 2019 года. Частота дискретизации составила 100 Гц, что соответствует пространственной частоте дискретизации 4см при скорости 4м/с.

Таблица 3: План полета и высота полета

| 8 октября 2019 г. | Начало | Конец | Время операции | Высота датчика над землей |
|-------------------|----------|----------|----------------|---------------------------|
| Рейс 1 | 11:59:29 | 12:22:16 | 00:22:47 | 1.50m |
| Рейс 2 | 13:03:00 | 13:22:46 | 00:19:46 | 1.20m |
| Рейс 3 FOM | 13:33:22 | 13:52:43 | 00:19:21 | 40-50m |
| Рейс 4 | 14:08:43 | 14:29:33 | 00:20:50 | 1.20m |

Базовая станция была настроена для регистрации вариаций геомагнитного поля во время полетов (рис. 8). В день испытательного полета существенных изменений не наблюдалось. Временные интервалы каждого полета показаны в Таблице 3. Интересно, что общая магнитная напряженность магнитного поля Земли отклоняется от значения, полученного от IGRF, примерно на 16 нТл.

Дрон был запрограммирован на выполнение автономных полетов по прохождению путевых точек, определенных перед вылетом. Маршруты полета ориентированы с севера на юг. Межпрофильный интервал составлял 2,0 м, а длина линий составляла 80 м. Ширина зоны полета 60 м. Было проложено 30 профилей, чтобы покрыть территорию и собрать магнитные данные. Этот размер соответствует полгектара.

Скорость была 4 м/с. Расстояние между датчиком и землей между полетами уменьшено с 1,5м до 1,2м. Чтобы покрыть этот район, требовался один полет. Над этим районом было выполнено два повторных полета. После второго полета было проведено испытание FOM.

Мы используем устройства GPS (NEO ublox M8N) с единственной частотой, которые выводят необработанные измерения (фаза несущей и код псевдодальности), которые затем обрабатываются для получения координат с поправкой на RTK. Он обеспечивает позиционирование с точностью до сантиметра. На рис.9 показаны нескорректированные линии полета и скорректированные по RTK. Фактически поправка RTK вызывает смещение линий полета примерно на 1м.

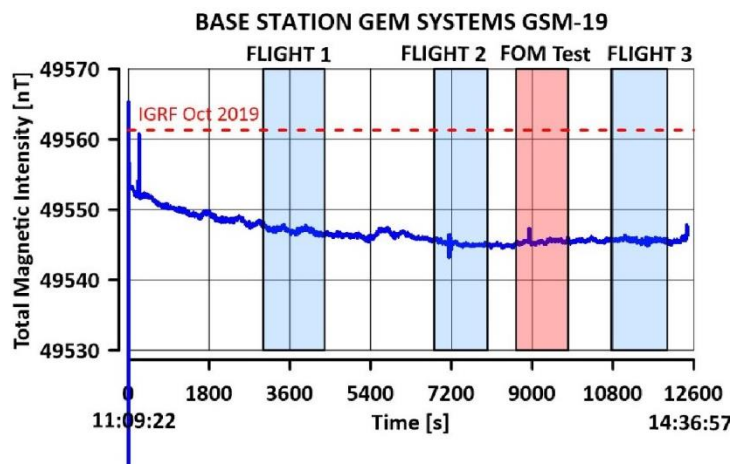


Рисунок 8: Данные базовой станции: показания временных изменений напряженности магнитного поля, записанные в фиксированном месте рядом с испытательной площадкой. Использовалась система GEM GSM-19. Никаких значительных изменений во время работы, за исключением небольшого тренда менее 5 нТл, не наблюдалось. Синие прямоугольники указывают временные интервалы времени работы 3 полетов. Красный квадрат указывает на критерий добротности (FOM). Пунктирная красная линия указывает на суммарную интенсивность геомагнитного поля Reference (IGRF), полученного на месте для октября 2019 года.

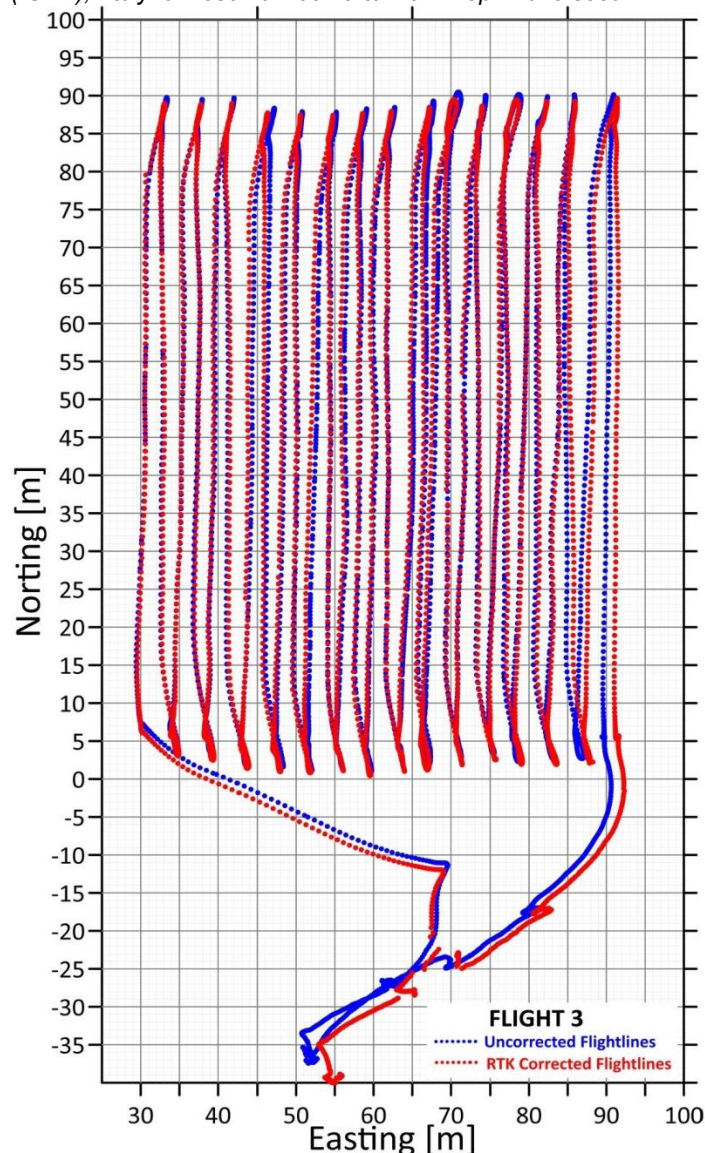


Рисунок 9: Некорректированные GPS-координаты линий полета (синие точки) и откорректированные RTK положения GPS (красные точки)

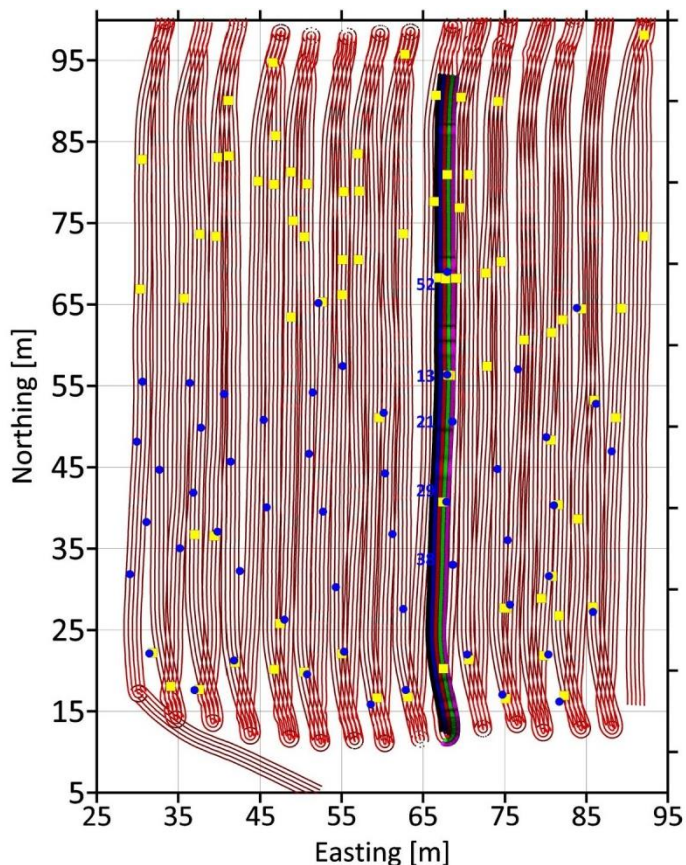


Рис. 10: 30 линий проложены с интервалом 2м, покрывают всю площадь. Каждая линия полета создает 5 магнитных дорожек. Линии ориентированы на NS. Расстояние между датчиком и землей составляло около 1,2 м и контролировалось лазерным высотомером. Синие точки указывают известные местоположения захороненных объектов. Желтыми точками обозначены местоположения магнитных аномалий, четко обнаруженных системой Pentamag. Жирными линиями обозначены магнитные треки полетной линии 18, увеличенной на рис.12.

В некоторых местах также наблюдаются смещения координат, которые возникают при недостаточном качестве данных GPS.

Для получения остаточной напряженности магнитного поля применялась следующая процедура (Рис.10):

- Шаг 1 Применение калибровочных коэффициентов к необработанным магнитным данным для устранения эффектов движения из показаний феррозондового датчика.
- Шаг 2 Оценка общей магнитной напряженности по трем компонентам V_x , V_y , V_z от каждого из пяти датчиков
- Шаг 3 Введение поправки за вариации магнитного поля
- Шаг 4 Синхронизация магнитных данных с данными GPS
- Шаг 5 Применение поправки RTK и расчет положения каждого из пяти датчиков для создания пяти магнитных треков для каждой линии полета
- Шаг 6 Расчет грида магнитного поля. Построение изолинии локальной составляющей магнитного поля

На двух следующих рисунках показаны магнитные треки системы Pentamag (Рис.10) и результаты обработки данных Pentamag в виде 2D-графика изолинии.

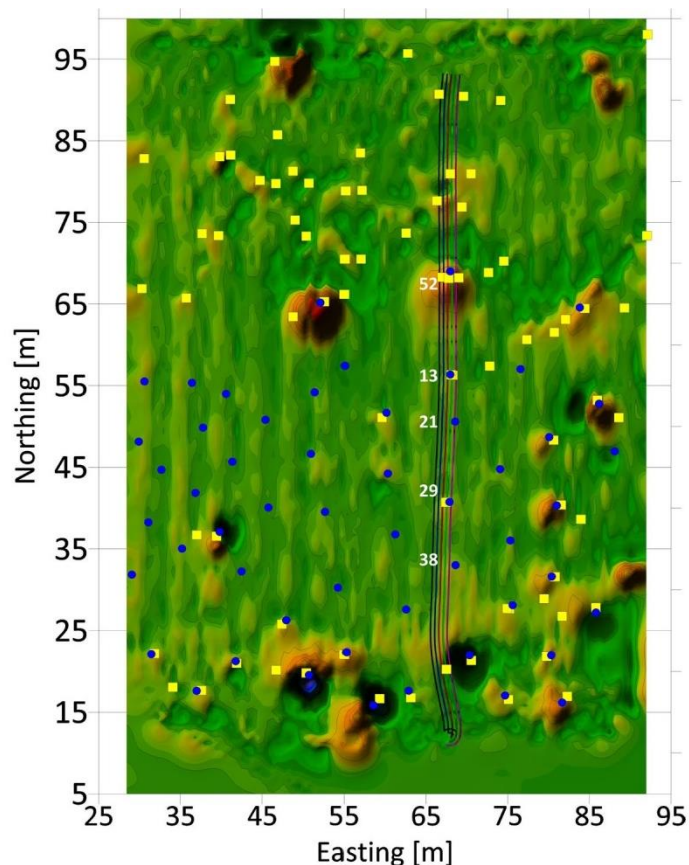


Рис.11: График 2D-изолинии TMI в [нТл]. В этом районе наблюдается большое количество магнитных аномалий, которые указывают на существование целой группы металлических объектов на маленькой глубине. Сравнение мест захоронения известных объектов и мест, обнаруженных системой Pentamag, показывает хорошую корреляцию. Однако были обнаружены только объекты выше определенного размера и на определенной глубине. Результат теста на локализацию и обнаружение представлен на Рис.13.

Синие точки указывают на расположение металлических предметов, закопанных в почву. Желтые точки указывают расположение магнитных аномалий, полученных от системы Pentamag.

Плотность сети измеряемой области довольно высока, но мы не достигли 100% покрытия. По-прежнему есть места без низкой плотностью данных. Из-за порывистого ветра дрон отклонился от заданной траектории полета. Из-за ограниченной точности устройства GPS (около 1,5 м) расстояние между линиями полета 2 м находится в пределах точности устройства GPS. Таким образом, меньшие расстояния между линиями вряд ли реальны для одной системы GPS, но потребуют использования возможностей RTK во время полета.

В таблице 4 перечислены размеры и глубина 53 объектов, закопанных в землю.

Оценка результатов измерений показывает, что объекты калибра 3,7см и на глубине менее 0,3м можно обнаружить. Более крупные объекты калибра 10см можно локализовать на глубине до 2м. Результаты представлены на Рис.13.

На Рис.12 показаны пять магнитных треков линии 18 полета. Пять объектов в известных местах были облетены. Три из них были четко определены. Размеры и глубина указаны в таблице 5. На рис.13 представлены результаты испытаний Pentamag на военном полигоне. 53 объекта закопаны в грунт в известных местах и на известных глубинах.

Таблица 4: Список объектов, закопанных в землю в известных местах и на известной глубине.

| № объекта | Величина (см) | Глубина (м) |
|-----------|---------------|----------------|
| 12 | 2 | 0.03m – 1.27m |
| 13 | 3.7 | 0.1m – 0.95m |
| 7 | 7.5 | 0.3m – 1.8m |
| 7 | 8.8 | 0.26m – 1.94m |
| 6 | 10 | 0.72m – 2.13m |
| 2 | 12.8 | 0.85m – 1.9m |
| 3 | 15 | 1.06m – 1.62m |
| 1 | 250 фунтов | 1.9m |
| 2 | 500 фунтов | 1.13m – 2.145m |

Таблица 5: Результат теста Pentamag на линии 18.

| № об | Величина /вес | глуби на | ориентация | |
|------|---------------|----------|----------------|-----------|
| 52 | 500 фунтов | 2,0 | горизонтальная | обнаружен |
| 13 | 3.7 см | 0,1 | вертикальная | обнаружен |
| 21 | 3.7 см | 1,0 | горизонтальная | нет |
| 29 | 7.5 см | 1,0 | вертикальная | обнаружен |
| 38 | 8.8 см | 2,0 | вертикальная | нет |

Тест ясно показывает, что объекты калибром 3,7см и больше обнаруживаются. Однако обнаруживаемость быстро уменьшается с глубиной. Более мелкие объекты можно обнаружить на глубине до 30см. Металлические предметы калибром от 10см и больше могут находиться на глубине до 2м. Металлические предметы весом в несколько сотен килограммов могут находиться на глубине нескольких метров.

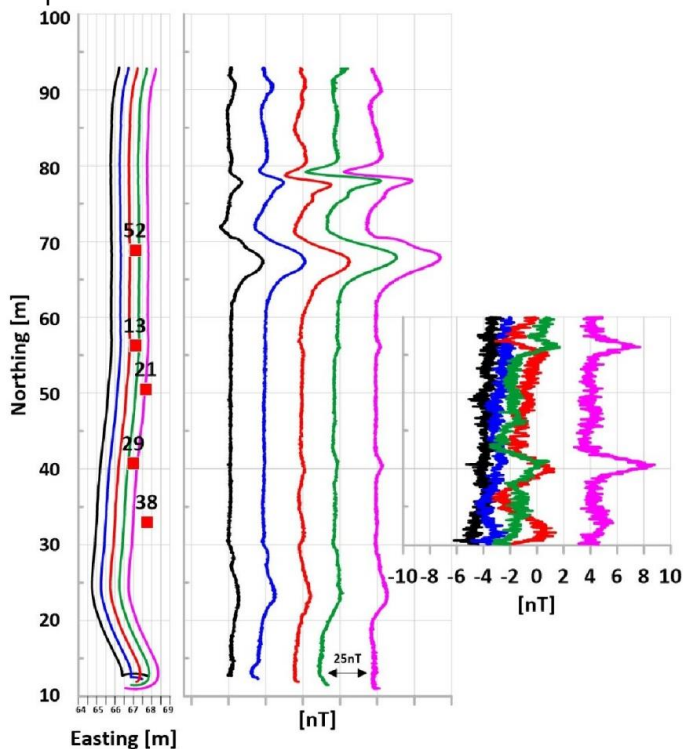


Рис.12: Расположение пяти магнитных дорожек линии 18 (левая панель) и TMI пяти магнитных дорожек (правая панель).

Выводы

В этой статье мы продемонстрировали, что система Pentamag способна обнаруживать объекты размером 3,7см. Особенности этой системы можно резюмировать следующим образом:

1. Мы смогли спроектировать и интегрировать необходимые элементы полезной нагрузки, связанные с такой системой. Очевидно, что это связано с ограничениями по мощности, размеру и весу, налагаемыми как БПЛА, так и

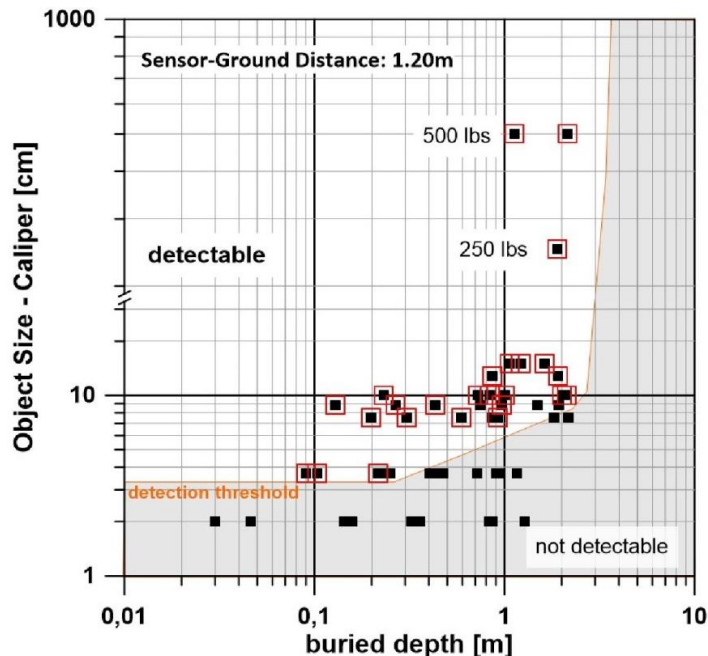


Рис.13: График зависимости размера объекта от глубины заглубления. График суммирует пределы обнаружения объектов системой PENTAMAG, протестированные в реальных условиях. Серая область указывает предел обнаружения металлических предметов разного размера и глубины. Обратите внимание, что этот предел был определен для высоты полета датчиков 1,2м над землей. Меньшая или большая высота полета значительно сместит этот предел.

эксплуатационными потребностями. Элементы полезной нагрузки включают магнитометры, инфраструктуру хранения данных и связи, а также инфраструктуру питания (батареи). Бортовая выработка электроэнергии или какое-либо гибридное решение не приветствуются, поскольку требуют дополнительной нагрузки и являются еще одним источником шума.

2. Кроме того, система Pentamag включает в себя GPS с точностью RTK, лазерный высотомер для точного определения положения полета. Системы лазерного предотвращения столкновения станут частью следующего поколения. Планируется создать возможность предотвращения столкновений таким образом, чтобы мультикоптер мог летать на высоте около 1,5м со скоростью около пяти-десяти метров в секунду.
3. Мы спроектировали и построили оптимизированный мультикоптер, который может работать автономно и может нести эту полезную нагрузку в течение соответствующего времени полета.
4. Сбор высококачественных магнитных данных на этой платформе требовал а) разумного размещения магнитометра, б) минимизации компонентов, генерирующих шум, и устранения шума после сбора данных, и в) калибровки в полете, которая устраняет магнитные сигнатуры, присущие мультикоптеру.
5. Техническая готовность этого прототипа проверена в эксплуатационных условиях. Этот тест показывает, что обнаруживаются металлические предметы размером 3,7 см.

Благодарности

Мы благодарны всем помощникам в этой области и техническому персоналу, который участвовал в

тестовых исследованиях и технических разработках. Мы благодарим доктора Хольгера Преца (Niedersächsisches Landesamt für Bau und Liegenschaften в Ганновере (NLBL)) за его постоянный интерес к нашей методологии. Он предоставил возможность провести это испытание на военном полигоне. В частности, мы благодарим доктора Кристофера Вергилия и Кристиана Кулуеке и профессора Андреаса Хёрдта (Брауншвейгский институт геофизики) за их постоянный интерес и помощь в этой области. Мы благодарны за их техническую поддержку, в частности за интеграцию и развертывание двух феррозондовых магнитометров.

Ссылки

Auster, H.U., Fornacon, K H, Georgescu, E., Glassmeier, K H and Motschmann, U, 2002. Calibration of fluxgate magnetometers using relative motion. Measurement Science and Technology, 13(7), 1124-1131.

Авторы



Johannes B. Stoll
Mobile Geophysical Technologies, GmbH
 Celle, Germany
jstoll@mgt-geo.com

Доктор Иоханнес Б. Штоль имеет опыт работы в области геофизики и электрохимии и занимал должности в нефтегазовой отрасли и исследовательских учреждениях. Основатель и генеральный директор Mobile Geophysical Technologies GmbH. Имеет 25-летний опыт работы в качестве активного геофизика-разведчика.



Rolf Noellenburg
Aerialis GbR
 Stresemann Str. 46
 27570 Bremerhaven, Germany
 +49(0)471-140 500
info@aerialis.de

Рольф Нолленбург, аэрокосмический инженер, пилот БПЛА и соучредитель aerialis. Занимается проектированием, разработкой и эксплуатацией БПЛА с неподвижным крылом и дронов для исследовательских и коммерческих целей с 2004 года. В сотрудничестве с MGT интегрировал геофизические сенсорные системы в несколько БЛА в течение последних 7 лет. Он имеет большой опыт в адаптации и модификации БПЛА, а также в разработке программного и аппаратного обеспечения систем управления полетом. Приобрел большой опыт работы в международных проектах.

Gamey, T. J., W. E. Doll, L. P. Beard and D. T. Bell (2003). Analysis of noise coherence in airborne magnetic gradients for UXO detection. 2003 SAGEEP Meeting, San Antonio, TX.

Leliak, P. 1961. Identification and evaluation of magnetic field sources of magnetic airborne detector equipped aircraft. IRA Transactions on airspace and navigational electronics, 8, 95-105.

Munsch, M., et al., 2007. Magnetic mapping for the detection and characterization of UXO: Use of multi-sensor fluxgate 3-axis magnetometers and methods of interpretation, J. App. Geophys. 61 pp. 168-183.

Nelson, H. H., D. L. Wright, T. Furuya, J. R. McDonald, N. Khadr and D. A. Steinhurst (2004). MTADS Airborne and Vehicular Survey of Target S1 at Ileta Pueblo, Albuquerque, NM, 17 February - 2 March 2003, Naval Research Laboratory.

Doll, W. E., T. J. Gamey and J. S. Holladay (2001). Current Research into Airborne UXO Detection. SAGEEP Annual Meeting, Oakland, CA.



Thomas Kordes
Aerialis GbR
 Stresemann Str. 46
 27570 Bremerhaven, Germany
 +49(0)471-140 500
info@aerialis.de

Доктор Томас Кордес, аэрокосмический инженер, оператор БПЛА и соучредитель aerialis. Имеет большой опыт в управлении международными аэрокосмическими проектами и командами. Помимо управленческой работы, имеет 20-летний профессиональный опыт и отвечал за проектирование, разработку и эксплуатацию многих типов БПЛА в международных проектах.



Anders Jepsen
 Founder
 Exploration For Humanity
 1300 Oakmont Drive #4
 Walnut Creek,
 California 94595, USA
 +1-925-330-9753
jepsen@explorationforhumanity.org

Доктор Джепсен имеет 45-летнюю карьеру в различных областях геофизической разведки полезных ископаемых, энергетики и экологической инженерии. Он является основателем некоммерческой организации Exploration For Humanity, занимающейся объединением дронов и технологий интеллектуальных датчиков для обнаружения скрытых угроз, таких как мины и неразорвавшиеся боеприпасы.



ООО АГТ СИСТЕМС

Россия 125445 г Москва, ул. Смольная д. 24А офис 1420

Тел 8(495)232-07-86

e-mail sales@agtsys.ru

www.agtsys.ru