Semi-Airborne EM Полу-Аэроэлектромагнитная система для использования на дроне

Johannes B. Stoll Mobile Geophysical Technologies GmbH, Celler Str. 13, 29229 Celle, Germany, +49 (0)5141 - 88 93 551 (corresponding author) jstoll@mgt-geo.com

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

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

Абстракт

Аэромагнитные методы (АЕМ) являются эффективным работ способом геологоразведочных и широко используются при разведке полезных ископаемых и мониторинге окружающей среды. Большинство методов ЭМ, используемых в настоящее время при разведке месторождений, относятся к типу подвижного источника; то есть первичный источник поля перемещается одновременно и в фиксированной конфигурации с приемником.

В этой статье мы представляем альтернативную конфигурацию измерений AEM, в которой фиксированный излучатель находится на земле, а приемник - на беспилотном летательном аппарате (БПЛА). Эта конфигурация называется полу-аэро-электромагнитным (semi-airborne electromagnetic) методом.

Использование беспилотных летательных аппаратов в аэро-электромагнитных методах - новинка. Устройства были слишком тяжелыми, чтобы их можно было поднять с помощью небольших БПЛА. За последние 10 лет были предприняты большие усилия, чтобы сделать электромагнитные датчики доступными для использования на малогабаритных БЛА. В 2018 году компания MGT GmbH миниатюрную Германии впервые представила в электромагнитную систему, оптимизированную для установки на 20-килограммовый октокоптер.

В этой статье мы описываем концепцию полу-аэроэлектромагнитного метода на базе октокоптера и показываем результаты полевых испытаний в Северной Германии. Этот тест показывает, что концепция полу-аэроэлектромагнитного метода с БПЛА очень хорошо подходит для проведения геофизических исследований в масштабах разведки. Эта система более безопасна для операторов, дешевле по начальным и эксплуатационным затратам и более эффективна с точки зрения характеристики объекта. Дальнейшие усилия будут включать в себя конфигурации с несколькими датчиками для новаторских концепций увеличения разрешения структуры проводимости на глубине.

Вступление

Активные системы AEM разрабатывались С использованием в качестве источника токоведущей петли или катушки, транспортируемой или буксируемой самолетом. В первых разработках АЕМ в некоторых системах использовались источники, расположенные на земле (например, Bosschart & Seigel, 1966; Elliot, 1998). Использовались заземленные кабели или петли, а геофизические профили облетались перпендикулярно этим источникам. Эта конфигурация называется полуаэро «ЕМ», поскольку в ней используется наземный источник, а приемник переносится самолетом. В 2001 году Smith et al. (2001) сообщили о сравнительном испытании, направленном на изучение преимуществ полу-аэро-ЭМ по сравнению с наземными импульсными электромагнитными (ТЕМ) и стандартными аэро-ЭМ методами. Авторы пришли к выводу, что концепция полу-аэро-ЭМ сочетает в себе особенности преимущества наземных и аэро методов с точки зрения эффективности времени и глубины проникновения. В разных странах есть несколько рабочих групп, работающих над методологией полу-аэро-ЭМ. Рабочие группы в Японии и Китае (Ito et al., 2014, Fubo et al., 2016, Liu et al., 2018) доработали этот метод и представили его применимость в полевых условиях. В 2016 году в Германии был основан совместный исследовательский проект DESMEX (Deep Electromagnetic Soundings for Mineral EXploration) для полу-аэро-системы электромагнитной разработки разведки с управляемым источником для разведки глубоких залежей полезных ископаемых на глубине до 1 км (Nittinger et al., 2017, Becken et al., 2020, Steuer et al., 2020). Полная измерительная система состоит из нескольких магнитных датчиков. Он включает 3компонентную систему индукционных катушек, 3компонентный феррозондовый магнитометр и SQUID магнитометр. Датчики установлены в гондоле и подвешены под тяжелым вертолетом. Чтобы привязать датчики к неподвижной системе координат, движение гондолы регистрируется во время полета. Лазерные гироскопы используются для точного определения движения гондолы и компенсации положения датчика. Система и результаты нескольких полевых исследований описаны Becken et al. (2020) и Steuer (2020). Поскольку вес системы составляет около 250 кг, в проекте DESMEX для транспортировки измерительной системы используется тяжелый вертолет.

В последние годы надежность технологий дронов и их портативность значительно выросли при одновременном снижении затрат. Датчики становятся меньше, а программное обеспечение становится доступнее. Правила меняются быстро. В большинстве стран национальные авиационные администрации и органы управления воздушным пространством выпустили правила для полетов малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), включая сертификацию пилотов. Со временем правила были смягчены, чтобы охватить широкий спектр коммерческого использования менее 25 КΓ. дронов весом Таким образом, использование дронов для геофизических измерений и получение разрешений на полеты стало формальностью и регулируется в большинстве стран. Насколько нам известно, первая электромагнитная система на беспилотном летательном аппарате была описана Кипфингером (1998) из Геологической службы США. Он использовал небольшую по размеру, легкую и маломощную систему VLF. Он был в первую очередь разработан для сбора данных VLF во время наземных

съемок на небольших участках. Он модифицировал его

для установки на беспилотный летательный аппарат (БПЛА), который был поставлен BAI AEROSYSTEMS, Inc. Испытания проводились в 1996 и 1997 годах.

B сотрудничестве с Aerialis GbR MGT GmbH спроектировал, разработал и испытал октокоптер. Основываясь на предыдущих испытательных полетах с использованием 75-килограммового беспилотного вертолета, существующая электромагнитная система от Metronix GmbH в Брауншвейге, Германия, была октокоптер для установки миниатюрна на и оптимизирована с точки зрения полезной нагрузки и продолжительности полета. Общий вес намного меньше кг и позволяет использовать систему на 10 мультикоптерах небольшого размера с аналогичной грузоподъемностью. Наибольшее внимание было уделено минимизации электромагнитных помех от мультикоптера и уменьшению перемещений датчиков во время полетов. В следующих разделах будет описана концепция нашей бортовой электромагнитной системы на базе октокоптера.

Методология аэро ЭМ с использованием фиксированного излучателя

Несмотря на их разнообразие, системы АЕМ имеют схожий принцип работы. Активные системы используют искусственный источник для генерации первичного изменяющегося во времени электромагнитного поля, которое вызывает вихревые токи, протекающие в породах. Вторичное электромагнитное поле создается токами в земле, и его поле измеряется индукционными катушками. Методики можно классифицировать по типу приемника, который изпучателя и измеряет электромагнитное поле. Большинство активных систем разработаны AFM были для использования токоведущей петли, буксируемой самолетом. Только в начале разработки АЕМ в некоторых системах использовались источники, расположенные на земле. В бортовом эквиваленте TURAM использовался незаземленный контур для генерации первичного поля. Для достижения глубокого проникновения желательно значительное расстояние между передатчиком и приемником. Одно из решений - установить передатчик в одном самолете, а приемник - в другом.

Здесь мы придерживаемся другой концепции: полу-аэро электромагнетизм сочетает в себе преимущества мощных передатчиков, расположенных на земле, со съемкой отклика электромагнитного поля с вертолета. Наземный источник управляет исходным сигналом и применяемой частотой таким образом, что позволяет превысить глубину проникновения стандартных аэро ЭМ систем. Можно комбинировать низкие частоты и большие смещения передатчика-приемника.

Метод полу-аэро электромагнетизма - это метод электромагнитного зондирования в частотной области, в котором в качестве искусственного источника сигнала используется фиксированный заземленный диполь или Источник горизонтальная петля. обеспечивает стабильный, надежный сигнал, что приводит к более точным и более экономичным измерениям, чем обычно можно получить с помощью измерений естественного источника в тех же спектральных диапазонах. Он состоит из заземленного электрического диполя. Обычно измерения производятся в диапазоне частот от 1 Гц до 10 кГц. Глубина исследования во многом зависит от расстояния между диполем передатчика и приемником. Поперечное разрешение контролируется

длиной электрического диполя, которая обычно составляет 100-1000 м.

Для расстояний, превышающих 45, где 5 является глубиной скин-слоя электромагнитного поля для данной частоты, глубина исследования примерно соответствует $\delta/\sqrt{2}$. Область, электрически удаленная от диполя, известна как зона «дальнего поля» или «плоская волна» характеризующаяся большими зона, числами индукции. Индукционное число является безразмерным параметром и характеризует реакцию электромагнитной индукции. Для одномерной слоистой модели земли число индукции определяется расстоянием между источником и приемником. Разделение намного больше глубины скин-слоя $r >> \delta$, а глубина проникновения не зависит от геометрии решетки. Для данной полосы частот и типичных значений электропроводности самой верхней части земной коры глубина исследования ограничена 2-3 км.

Область вблизи передающего диполя характеризуется небольшими числами индукции, где расстояние намного меньше глубины скин-слоя $r \ll \delta$. Глубина зондирования и измеренное удельное сопротивление зависят от совокупной геометрии и частоты. Область между этими зонами называется «переходной» зоной, где наблюдается умеренная кривизна волны.

По профилю полета дрон постоянно приближается и удаляется от источника электрического поля и переходит из ближней зоны в переходную зону и дальнюю зону по отношению к используемому разделению и частоте.

В методе электромагнитного излучения с управляемым источником (CSEM) в частотной обпасти электромагнитный диполь используется для создания поля источника, которое измеряется в приемниках, размещенных на беспилотном летательном аппарате (БПЛА). Это поле диполя источника взаимодействует с окружающими материалами, и измеренное поле рассматривается как линейная свертка источника с ослабляющей диффузной землей (Ward & Hohmann, 1987). Частотная характеристика передаточной функции Земли (ТF) варьируется в зависимости от проводимости, дальности действия источник-приемник и множества других факторов, в результате чего метод CSEM чувствителен к изменениям электропроводности на глубине. Таким образом, метод CSEM стал важным методом геофизического зондирования и картирования при разведке полезных ископаемых и разведке углеводородов. частотная Поскольку пиковая чувствительность объекта разведки априори не известна, обычно передается исходная форма волны, что позволяет одновременно транслировать множество частот.

Классическим примером такой формы волны является прямоугольная волна, которая обеспечивает набор частот на нечетных гармониках основной частоты передачи. Однако амплитуда его гармоник уменьшается как 1/n, где n - номер гармоники. Поля затухают экспоненциально в зависимости от диапазона и частоты, многие гармоники прямоугольной волны падают ниже уровня шума в полезных диапазонах.

Отношение сигнал/шум (SNR) измеренного сигнала CSEM напрямую связано с дипольным моментом источника (SDM) передатчика. Существующие передатчики выдают до нескольких десятков ампер. Длина диполей передатчика до 1000 м является обычной, но из-за возрастающей сложности логистики более длинные диполи нецелесообразны.

Источник сигнала - это временной ряд электрического тока, генерируемого передатчиком.



100 10000 Полу-аэро электромагнитный Рисунок 1: метод источник электричества земле использует на (заземленный провод или контур), который передает набор частот в одном месте (место передатчика) и измеряет магнитные поля в интересующей области, на самолете на котором установлен приемник (индукция катушки). На этом рисунке показаны синтетические результаты сигнала. генерируемого длинным заземленным проводом, и отклики, измеренные индукционными катушками во временной и частотной области А) классический пример прямоугольной волны, генерируемой передатчиком, В) частотный спектр сигнала источника, С) синтетический временной ряд В-поля вертикальной составляющей первой и производной dH/dt рассчитанной для однородного полупространства, D) частотного спектра В-поля. Индукционные катушки выводят магнитное поле вместо первой производной Hz/dt.

В CSEM обычно применяется прямоугольная волна (рис. 1а). Исходный сигнал, а также реакция среды представляют собой линейчатый спектр. На рисунке 1 показан пример прямоугольной волны во временной области и ее амплитудный спектр (рисунок 1b). Основная волна и большое количество гармоник генерируются на частоте до 10 кГц и обеспечивают ряд оценочных частот, которые задают передаточную функцию. Временной ряд отклика показан на рисунке 1с, а его амплитудный спектр - на рисунке 1d. Здесь мы подчеркиваем, что индукционные катушки. использованные в этом тестовом обзоре, выводят магнитное поле, но не первую производную dH/dt. Общеизвестно, что в приближении ближнего поля нельзя разделить первичное и вторичное поля. Кроме того, следует подчеркнуть, что магнитное поле не чувствительно к проводимости земли в ближнем поле передатчика. Это предполагает использование другого сигнала с рабочим циклом 50%, что источника электромагнитный позволяет снимать сигнал во временной области отключения BO время электрического источника.



Рисунок 2: Octocopter X825. На стержне, подвешенном под октокоптером, установлено несколько систем: система с 3-компонентными индукционными катушками, 3компонентный феррозондовый датчик, инерциальный измерительный блок и система сбора данных.

Полу-аэро ЭМ-система на базе мультикоптеров

Был подготовлен октокоптер (8 двигателей), специально разработанный и изготовленный компанией Aerials GbR в Бремерхафене/Германия. Технические характеристики перечислены в таблице 1. На рис. 2 показана полная система, состоящая из октокоптера с GPS-приемником наверху дрона и трехкомпонентного датчика С индукционной катушкой, помещенного в легкую коробку. Датчик установлен на штанге и подвешен на 2,0 м ниже октокоптера. Ha вертикальной штанге также установлены дополнительные датчики, феррозондовый магнитометр и инерциальный измерительный блок. Эта новая система сочетает в себе мощный горизонтальный электрический дипольный передатчик на земле с малошумными трехосными магнитометрами С индукционной катушкой, трехосным феррозондовым магнитометром и блоком инерциального измерения лазерного гироскопа, встроенным в буксируемую дроном бортовую платформу.

Таблица 1: Технические ха	рактеристики	октокоптера
---------------------------	--------------	-------------

Тип БПЛА	Octocopter X825 (8
	электродвигателей), соосная
	компоновка
Автопилот	Мультикоптер может работать в различных режимах: а) ручной режим, б) удержание позиции по GPS, в) автономная навигация. Режим отслеживания местности, защита от низкого напряжения, функция самонаведения и
	автоматическая посадка
максимальная	По вертикали: -2 - 5 м / с По
скорость	горизонтали: 15 м / с
Пустой вес	7,1 кг (2 батареи 4,4 кг)
максимальная полезная нагрузка	9,1 кг (при взлетной массе 25,0 кг)
Продолжительность полета	35 мин при полезной нагрузке 6 кг
температура, влажность	От -5 ° С до + 50 ° С, 0% - 90% относительной влажности (без конденсации)
ветер	<8 м / с (17,9 миль / ч / 28,8 км / ч)
расстояние	дальность передачи данных: ≤ 1 км (на частоте 2,4 ГГц, в пределах прямой видимости)



Рисунок 3: Расчетное полетное время и грузоподъемность октокоптера X825 (8 двигателей). X825 был специально разработан для установки электромагнитной системы. Система EM весит около 8,0 кг. В этой конфигурации время полета составляет 25 минут.

Полетное время - важный вопрос в коммерческом приложении. Это зависит от потребляемой мощности двигательной установки и время полета ограничено емкостью батарей. Помимо силовой **vстановки**. сопротивление и вес мультикоптера сильно влияют на время полета. На рис. З показано полетное время октокоптера в зависимости от полезной нагрузки, полученной на основе синтетической модели компонентов мультикоптера для заданных (характеристики и разряд батареи, потребляемая мощность, двигатели и пропеллеры).

Результаты полевых испытаний в Северной Германии

В этом разделе мы представляем результаты полу-аэро испытания, проведенного на равнинных лугах в Северной Германии. Мы кратко опишем настройку поля, шаги для оценки передаточной функции и, наконец, представим цифровую модель, которая интерпретирует передаточную функцию в одной точке измерения.

ПОЛЕВЫЕ УСТАНОВКИ И ОПИСАНИЕ ПОЛЕТНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Полу-аэро ЭМ-испытания проводились 15 и 16 ноября 2018 года. В ходе полевых работ был разложен длинный электрический заземленный провод длиной несколько сотен метров. Испытательный полигон находится примерно в 10 км к востоку от Бремерхафена в Северной Германии. На рис. 4 показано положение электродов, направление кабеля и линии полета. В день полета температура окружающего воздуха была около 5 ° С. Погода стояла туманная, но ветра почти не было.

Всего было выполнено четыре полета. В каждом полете было выполнено 4 профиля со скоростью 2 м/с. Рядовые профили были направлены на восток-запад. Контрольный полет выполнялся в направлении северюг. Средняя высота полета составляла 25 м над уровнем земли. Длина профилей 950 м. Расстояние между профилями 50м.

Электрический провод был проложен и подключен к генератору. Чтобы обеспечить большие расстояния между передатчиком и приемником, мы использовали от Zonge Engineering. генератор GGT30 30 кВт Контактное сопротивление электродов, токовых закопанных в грунт, было оптимизировано с помощью металлических сеток металлических кольев. И Максимальное выходное напряжение генератора 1кВ. Благодаря низкому контактному сопротивлению, преобладающему на этом участке, могут быть реализованы амплитуды тока до 25 Ампер. Однако, чтобы избежать насыщения датчика во время кроссовера линейного источника, сила была тока уменьшена до менее 10 ампер.



Рисунок 4: Испытательный полигон в Доннерне, Северная Германия. Участок расположен примерно в 10 км к востоку от Бремерхафена. Размер 1 км на 0,5 км. Выполнено 10 параллельных профилей в направлении восток-запад (красные линии). Восемь контрольных профилей пролетели в направлении север-юг (желтые линии). Расстояние между профилями 50 метров. Провод длиной 500 м был проложен и заземлен в точках A и B. Передатчик мощностью 30 кВт (GGT30 от Zonge) был развернут для генерации электромагнитного поля.

Рабочий цикл был установлен на 100%, а основные частоты были выбраны примерно на 10 Гц в двух полетах и около 100 Гц в других полетах. Система работала в частотной области. Временной ряд тока синхронизировался с помощью метки времени GPS с позволяет осуществлять передатчиком, что последующее суммирование и обработку данных в виде окон. Индукционные катушки подключены к трехканальному приемнику. Инерциальный измерительный блок (IMU) определяет ориентацию (компас) тройной катушки относительно системы координат Земли, чтобы обеспечить последующую коррекцию движения датчика.

Примерно в 250 м к западу от электрического диполя была установлена наземная ЭМ-станция для записи временных рядов трех компонентов Нх, Ну и Нz в фиксированной точке на земле. Это позволяет сравнивать реакцию бортовой ЭМ системы БПЛА с показаниями этой станции на земле, когда октокоптер летит над ней. Второй блок ЭМ был установлен для регистрации электрического тока во время полета. Все измерительные системы синхронизированы с точностью GPS. Скорость полета на всех рейсах составляла 2 м/с. Мультикоптер эксплуатировался в автономном режиме. Потребовалось три полета, каждый по 20 минут, чтобы покрыть площадь 950 х 500 метров.

Датчик тока был встроен вокруг электрического провода для записи временного ряда тока. Это простое измерение передаваемого тока без необходимости физического контакта с ним. Устройство позволяет измерять электрический ток в диапазоне от 50 мА до 100 А в диапазоне частот от постоянного тока до 100 кГц. Записи тока необходимы в качестве эталона для нормализации магнитного поля, измеренного с помощью катушек приемника, к току. Синхронизация временных рядов электрического тока и магнитного поля требует высокоточной синхронизации. Системы сбора данных, используемые в этом обзоре, обеспечивают точность синхронизации лучше 50 нс.

На рис. 5 показаны временные ряды трех магнитных компонентов вдоль одной линии полета. На графиках показана огибающая прямоугольного сигнала вдоль линии полета во время полета над передатчиком. Максимум магнитного поля хорошо виден в Нхкомпоненте. Компонента Нz показывает пересечение нуля и изменение знака на кабеле передатчика.



Рисунок 5: Измеренные временные ряды трех компонент Hx, Hy и Hz полу-аэро измерений. На графике поле вдоль линии полета, перпендикулярной линейному источнику. Применялась прямоугольная волна с длительностью импульса 12 мс (83,33 Гц). Переход через нуль в компоненте Hz и максимум в Hx компоненте четко указывают на пролет дрона над кабелем передатчика.



Frequency [Hz] Рисунок 6: На верхней панели показан сигнал источника, переданный на 2-й день (16.11.2018) во время полета 4. Волна импульса имеет период 12 мс (~ 83,33 Гц). Частота дискретизации 65536 Гц. Сила тока была около 7,5 А. На нижней панели показан амплитудный спектр электрического тока, полученный С временного интервала 1 с. Основная частота соответствует периоду импульсной волны 12 мс. Прямоугольная волна содержит много нечетно-целых гармонических частот, которые можно проследить в спектре до 30 кГц. Основная частота и гармоники определяют частоты оценки, используемые для оценки передаточных функций.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ И ОЦЕНКА ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ

Временные ряды тока и магнитных полей анализируются в частотной области. В этом разделе мы анализируем полет 4 от 16 ноября. На рисунке 6 показан временной разрез текущих измерений и амплитудный спектр. Длительность импульса составляла 12 мс, что соответствует основной частоте 83,33 Гц. Частота дискретизации составляла 65536 Гц, а гармоники генерировались до 30 кГц. Прямоугольная волна содержит компоненты нечетно-целых гармонических частот формы $2\pi(2n-1)/f$.

Процедура обработки включает анализ данных в частотной области и оценку передаточной функции для выбранных частот. По сути, анализируется передаточная функция между показаниями вертикальной компоненты магнитного поля Вz и сигнала электрического тока.

FLUG 4: Messungen im Senderbereich - Pulslänge: 12ms



Рисунок 7: Две верхние панели отображают показания вертикальной составляющей магнитного поля Hz для интервала времени 4 секунды и спектр составляющей Нг. Траектория полета составляет около 100 м от передатчика. По показаниям видно, кабеля что амплитуда магнитного поля постоянно уменьшается, поскольку мультикоптер удаляется от передатчика. Спектр показывает основную частоту и сотни гармоник, которые доступны для оценки передаточной функции. На двух нижних панелях отображаются значения угла крена, тангажа и рыскания, которые были сняты инерциальным измерительным блоком. Он прикреплен к стержню, на котором установлены индукционные катушки. Полоса составляет около двух метров в длину и показывает собственную частоту в несколько секунд. Демпфирующие элементы дополнительно уменьшают маятниковые движения во время полета. Следовательно, этот временной интервал наблюдалось R не значительных движений. Ожидаемый период движения почти на два порядка меньше основной частоты 83,33 Гц. В это время наблюдались только небольшие колебания угла крена и тангажа менее 5° с периодом 3-4 с. Самая нижняя панель отображает показания 3-компонентного магнитометра. Известно. феррозондового что феррозондовые датчики чрезвычайно чувствительны к движениям в магнитном поле. Наблюдаемые долгопериодные mpex компонентах изменения в соответствуют угловым изменениям, наблюдаемым инерциальным измерительным блоком. Частота дискретизации феррозондового датчика составляет 100 Гц. Поэтому никакой магнитный сигнал не мог быть принят от передатчика.



Рисунок 8: Передаточная функция для четырех разносов *TX-RX.* В пределе постоянного тока действительная часть приближается к конечному значению и находится в фазе с током передатчика. Мнимая часть достигает минимума и сходится к нулю в пределе постоянного тока.

Функция передачи
$$T(\omega_{n_eval}) = \frac{B_Z(\omega_{n_eval})}{I(\omega_{n_eval})}$$

 $\omega_{n_eval} = 4acmoma$ дискретизации evaluation frequencies $n=1....N$

На рис. 7 показаны временные ряды вертикальной составляющей Вz для временного окна 4c и амплитудный спектр для этого временного интервала на двух верхних панелях. Интервал данных был записан во время полета 4 и расположен примерно в 100 м к западу от кабеля передатчика. Показания показывают уменьшение амплитуды магнитного поля при удалении от передатчика.

На двух нижних панелях показаны углы Эйлера, измеренные инерциальным измерительным блоком, а также горизонтальная и вертикальная составляющие магнитного поля, полученные С помощью 3магнитометра. феррозондового компонентного магнитометры Известно, феррозондовые что чрезвычайно чувствительны к движению. Показания указывают лишь на небольшое перемещение электромагнитного приемника во время полета. Амплитуда мала (<5°), период почти а монохроматический - около 3 с.

Передаточная функция оценивалась для всех гармоник амплитудного спектра. Он показан на рисунке 8 для четырех различных отделений от электрического диполя. Передаточная функция - это сложная величина. Он оценивается в диапазоне частот от 100 Гц до 8 кГц и состоит из 300 частот. Действительная часть (синие точки) постоянно растет и приближается к конечному значению в пределе постоянного тока. Мнимая часть (красные точки) достигает минимального значения и уменьшается до нуля в пределах постоянного тока. На низких частотах передаточная функция содержит только действительную часть и синфазна с сигналом передатчика. Каждая точка измерения на профиле зондирования. соответствует точке в которой электропроводность может быть определена как функция расстояния и частоты. В последнем разделе модель проводимости построена на расстоянии 325 м от диполя передатчика. Результат численного моделирования показан на рисунке 10.

Численное моделирование

AC/DC Comsol Multiphysics® Module от это программное обеспечение для моделирования, низкочастотных. предназначенное для решения электромагнитных квазистатических электромеханических задач. В сочетании с модулем оптимизации может использоваться для решения обратных задач.

В частности, мы стремимся определить значения набора параметров и вычислить синтетические данные, чтобы они соответствовали наблюдаемым данным.



Рисунок 9: Кубическая модель среды 1кмХ1кмХ1км для отклика бесконечной электрической линии. оџенки Модель cocmoum из трех слоев и воздушного пространства над поверхностью. Пакет программного COMSOL Multiphysics®, обеспечения позволяющий проводить численное моделирование электромагнитных откликов в трехмерном пространстве, был применен для аппроксимации моделирования и полу-аэро электромагнитных данных. Измерительная плоскость была определена на высоте 25 м над уровнем земли. Это соответствует средней высоте полета датчика над землей. Модель это слой высокой электропроводности мощностью 50м на глубине 100м. Фоновая проводимость составляет 0,05 См/м, а проводимость проводящего слоя принимается равной 4 См/м. График передаточных функций для трехслойной модели был рассчитан для заданного расстояния между передатчиком и приемником (350 м), а также варьировалась глубина проводящего слоя и проводимость. Таким образом, исходная модель искалась как входная модель для задачи оптимизации. Затем был использован модуль оптимизации COMSOL Multiphysics®, который предоставляет интерфейс для расчета оптимальных решений. Мы использовали алгоритм Марквардта-Левенберга, чтобы итеративно сопоставить синтетические данные с записанными данными. Результат процесса оптимизации показан на



Рисунок 10: Реальная и мнимая части наблюдаемой и синтетической передаточной функции. Синтетическая передаточная функция (пунктирные линии) лучше всего соответствует данным наблюдений с использованием трехслойной модели земли, изображенной на правой панели. Слой с высокой проводимостью на глубине 125м и толщиной 50м зажат между верхним слоем и однородным полупространством ниже, имеющим проводимость 0,05 См/м. Наличие солевого диапира в 2км к северу от испытательного полигона предполагает наличие высоко проводящего слоя, состоящего из растворенной соли.

Здесь мы приводим пример того, как этот модуль может быть применен для подбора передаточной функции полуавтоматических ЭМ измерений, оцененных для одной точки и с использованием простой трехуровневой модели.

Исследования местной геологии предполагают слоистое полупространство. Испытательная площадка расположена в Северо-Западной Германии бассейна, который состоит из третичных и четвертичных отложений.

Параметры трехслойной модели определены на рисунке 9. Модель представляет собой большое кубическое тело размером 1кмХ1кмХ1км. По сути, он состоит из одного высокопроводящего слоя 4 См/м, который зажат между

верхним слоем и однородным полупространством ниже и имеет фоновую проводимость 0,02 См/м. Верх поверхности проводящего слоя находится на глубине 100м, но изменяется в процессе инверсии. Толщина токопроводящего слоя 50м. Применяется бесконечный линейный источник электромагнитного поля, который располагается в центре плоскости поверхности земли. воздушным Поверхность покрыта пространством высотой 500м. На высоте 25м над уровнем земли определяется план измерений, соответствующий средней высоте полета. Передаточная функция была оценена для точки 325м от кабеля передатчика и показана на рисунке 10.

На рисунке 10 показаны результаты процесса оптимизации. Чтобы не усложнять задачу, диапазон глубин варьировался только от 50 до 350 метров. Электропроводность установлена на уровне 1 См/м. Толщина слоя также была зафиксирована на 50м. Это соответствует проводимости 50 Сименс.

Методом проб и ошибок была выбрана исходная модель из таблицы синтетических передаточных функций. В этом процессе инверсии использовалось только 30 выбранных частот из 300. Эта диаграмма модельных кривых была создана для предварительного выбора одной передаточной функции в качестве исходной входной модели, которая близка к наблюдаемой передаточной функции. На последнем этапе был применен алгоритм Марквардта-Левенберга для настройки синтетической передаточной функции. Окончательный результат показан на рисунке 10.

Испытательный полигон расположен в Северо-Западном германском бассейне, который известен своей соляной тектоникой пермских соляных диапиров. Испытательная площадка расположена примерно в 2км к югу от соляного подгузника «Брамель». Он покрыт четвертичными третичными И отложениями. купол обладает Нижележащий соляной высоким сопротивлением, но растворяется при контакте с пресной водой. Рассолы обладают высокой проводимостью, а соленость вызывает зону высокой проводимости в более глубоких водоносных горизонтах.

Выводы

В 2018 году на испытательном полигоне в Северной Германии были проведены первые полу-аэро электромагнитные измерения на базе БПЛА.

На этом участке за один рейс выполнены 4 профиля длиной 1 км. Время полета составило менее 20 минут. Возможна суточная производительность 3-5 квадратных километров в день. Таким образом, аэро ЭМ-система на базе БПЛА является наиболее подходящей для перспективных проектов.

Логистика минимальна по сравнению со стандартными аэрогеофизическими методами. Для выполнения этого метода полу-аэро ЭМ требуется 2 пилота и 1 геофизик. Суточная производительность составляет от 2 до 5 квадратных километров. Однако для установки передатчика на земле необходима дополнительная наземная группа.

Подвешивание ЭМ-приемника под октокоптером вызывает лишь незначительные перемещения индукционных катушек и находится намного ниже частотного диапазона, используемого в этом обзоре.

Во время полетов мультикоптер переходит из ближней зоны в зону действия передатчика. Даже для простой геометрии многоуровневой модели требуется задействовать возможности комплексного численного моделирования для учета геометрии передатчика.

Полу-аэро метод на основе БПЛА имеет большой потенциал для значительного улучшения разрешения

структур проводимости при использовании нескольких источников.

Полу-аэро ЭМ на базе БПЛА заполняют пробел между наземными и стандартными аэро ЭМ-методами.

Благодарности

Мы благодарны всем помощникам в этой области и техническому персоналу, которые внесли свой вклад в тестовое обследование и технические разработки в ноябре 2018 года. Это первое испытательное полу-аэро исследование на базе БПЛА стало возможным только при поддержке многих коллег. В частности, я хотел бы поблагодарить Ульриха Мацандера из Metronix GmbH за огромную приверженность подготовке проекта его испытаний. Мы благодарны Бернхарду Фридрихсу и Мартину Вильде (Metronix GmbH) за их постоянный интерес и предоставление измерительных приборов.

Я также хочу поблагодарить моих коллег из Института геофизики Мюнстерского университета, Михаэля Беккена, Джулиана Весселя, Александра Вейера, Янника Польковски, Филиппа Котовски за их помощь в настройке измерительных устройств и регистрации электрического тока. Я также хотел бы поблагодарить Райнера Бергерса, Андреаса Буссе и Бюлента Тезкана, Притама Йогешвара (Институт геофизики, Университет Кельна), а также Томаса Гюнтера, Майка Мюллер-Петке и Роберта Мейера из Центра прикладной геофизики Лейбница, Ганновер, за обеспечение двумя источниками питания.

Ссылки

Baldschuh,R., Binot,F., Fleig, S., und Kockel, F., 2001. Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. Geolog. Jahrbuch A 153 S 95 Stuttgart (Schweizerbart). Aus: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Referat Bergbau und Energie. Referat Digitale Kartographie, 3D Modellierung

M. Becken, , C. G. Nittinger, , M. Smirnova, , A. Steuer, , T. Martin, , H. Petersen, , U. Meyer, , W. Mörbe, , P. Yogeshwar, , B. Tezkan, , U. Matzander, , B. Friedrichs, , R. Rochlitz, , T. Günther, , M. Schiffler, , and R. Stolz. 2020. DESMEX: A novel system development for semi-airborne electromagnetic exploration. (accepted for publication)

Bosschart, A.R.& H.O.Seigel, 1966. Some Aspects of the Turam Electromagnetic Method. Transactions, Volume LXIX, 1966, pp. 156-1 61

COMSOL MULTIPHYSICS: https://www.comsol.com/

Elliott, P., 1998, The principles and practice of FLAIRTEM: Expl Geophys, 29, 58–60.

L. Fubo, L., Huang, L. Lihua, L. Jutao, G. Zhi, Z. Qimao & G. Fang. (2016). A New Semi-airborne Transient Electromagnetic System and Application of Detecting Underground Conductor in East Ujimqin Banner, China. 10.2991/iceeg-16.2016.113.

H. Ito, H. Kaieda, T. Mogi, A. Jomori. 2014. Grounded electricalsource airborne transient electromagnetics (GREATEM) survey of Aso Volcano, Japan. Exploration Geophysics 45(1) April 2014, DOI: 10.1071/EG12074

R.P. Kipfinger Jr. 1998. Unmanned airborne vehicle (UAV): Flight testing and evaluation of two channel E-field very low frequency (VLF) instrument. USGS, DOE/OR/22398-TI

F. Liu, Z. Qimao, G. Zhi, P. Yuxi, L. Yang. G. Fang. (2018). Application of grounded electrical source airborne TEM system in Changyi BIF deposit, Jiaodong Peninsula of eastern China. Annals of Geophysics. 61. 10.4401/ag-7457.

C. Nittinger, M. Cherevatova, M. Becken, A. Steuer, R. Rochlitz, DESMEX Working Group Airborne induction coil and fluxgate measurements above a grounded electric dipole, 23rd Electromagnetic Induction Workshop (EMIW2016), 14.-20.08.2016 Chiang Mai, Thailand.

R.S. Smith, A.P. Annan, & P.D. McGowan, 2001. A comparison of data from airborne, semi-airborne, and ground electromagnetic systems. Geophys, 66, 5; pp. 1379–1385.

Ward S.H. and Hohmann, G.W., 1987. Investigations in Geophysics Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 1, Theory Editor Misac N. Nabighian, Society of Exploration Geophysicists Steuer, A., M. Smirnova, M Becken, M Schiffler, Th. Günther, R. Rochlitz, P Yogeshwar, W Mörbe, B. Siemon, S. Costabel, B. Preugschat, M. Ibst von Seht, L.S. Zampa, Franz Müll. 2020. Comparison of novel semi-airborne electromagnetic data with multi-scale geophysical, petrophysical and geological data from Schleiz, Germany. J. Appl. Geophys 182 (2020) 104172, https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104172

Авторы



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

Д-р Йоханнес Б. Штоль имеет опыт работы в области геофизики и электрохимии и занимал несколько должностей в нефтегазовой промышленности и исследовательских учреждениях. Является основателем и генеральным директором 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 Нёлленбург, аэрокосмический инженер, пилот БПЛА и соучредитель aerialis. Он занимается проектированием, разработкой и эксплуатацией БПЛА с неподвижным крылом И винтокрылом для исследовательских и коммерческих целей с 2004 года. В сотрудничестве с MGT он интегрировал геофизические сенсорные системы в несколько БПЛА 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. Он также приобрел большой опыт работы во многих международных проектах.



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. Доктор Кордес имеет большой опыт в управлении международными аэрокосмическими проектами и командами. Помимо управленческой работы, он имеет 20-летний профессиональный опыт и отвечал за проектирование, разработку и эксплуатацию многих типов БПЛА в международных проектах.



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