

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.14>

УДК: 621.37

МАЛОГАБАРИТНЫЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЙ ЦИФРОВОЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ НОДАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ С БПЛА

И.В. Горчаков¹, А.В. Неешпапа², А.Н. Антонов²,
С.Ю. Авдюхина², А.И. Савельев³, С.Н. Сергеев⁴

¹ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. 9

² «Р-сенсор»
141701, Московская обл. г. Долгопрудный, проезд Лихачевский, д. 4, стр. 1

³ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
199178, г. Санкт-Петербург, 14 линия В.О., д. 39

⁴ Научно-исследовательский институт прикладной информатики
и математической геофизики Балтийского федерального университета
им. Иммануила Канта
236041, г. Калининград, ул. А. Невского, 14, корп. 10

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2023 г.

Аннотация. Цифровые автономные сейсмические системы (ноды) получили в последние годы существенное распространение. Недостатком таких систем является невозможность контроля качества получаемых данных. Совместное использование нодальной системы с беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) позволяет выполнить контроль качества данных, одновременно сохраняются присущие нодальным системам достоинства, такие как гибкость в использовании и надежность. В работе представлен результат создания специализированного цифрового нода, предназначенного для совместного использования с БПЛА. В качестве первичного чувствительного элемента использован молекулярно-электронный геофон с расширенной рабочей полосой частот 1-250 Гц, цифровая система обеспечивает автономную высокоразрядную

регистрацию сейсмических данных, передачу блоков данных для контроля их качества на БПЛА и автоматическую калибровку регистрирующих каналов.

Ключевые слова: сейсмические системы, БПЛА.

Финансирование: Работа поддержана РФФ, проект №22-69-00231.

Автор для переписки: Горчаков Иван Владимирович,
gorchakov.iv@phystech.edu

Введение

В последние десятилетия прогресс электроники в сочетании с современными информационно-коммуникационными технологиями стал драйвером развития для многих высокотехнологичных отраслей промышленности. К таким отраслям, безусловно, относится и сейсморазведка. Современные наземные и морские сейсморазведочные системы являются сложными электронно-программными комплексами, построенными на самой современной электронной базе и передовых разработках в программном обеспечении [1, 2].

При этом, если в первое десятилетие XXI века в наземной сейсмике развивались, преимущественно, кабельные телеметрические системы, то в последние 10 лет прогресс в этой области больше связан с бескабельными решениями. При этом, современная тенденция состоит в переходе к автономно функционирующим цифровым нодам, в едином устройстве, объединяющем первичный сейсмический датчик с системой регистрации. Преимущество нодов состоит в более простом развертывании и в «робастности», выражающейся в независимости их функционирования от состояния подсистемы передачи данных к центральному компьютеру системы. Недостаток – отсутствие информации о качестве данных. Как следствие – нет возможности в реальном времени вносить изменения в сейсмический эксперимент, адаптируя его проведение к изменяющимся условиям проведения.

Представляется возможным устранить указанный недостаток нодальных систем, если объединить их гибкость и надежность с возможностями технологий

беспилотных летательных аппаратов и искусственного интеллекта, обеспечив, с помощью БпЛА оперативный контроль качества данных и быструю адаптацию сейсморазведочной системы к конкретным ситуациям, возникающим при проведении эксперимента.

В данной работе представлен результат разработки сейсмического нода, адаптированного для совместной работы с роем БпЛА, функционирующим в районе проведения экспериментов. Роль БпЛА в такой системе состоит в оперативном сборе информации о состоянии нодов и об уровне помех в различных точках проведения эксперимента, что в терминологии, принятой в сейсморазведки характеризуется как «качество данных», а также в оперативном размещении, перестановке и сборе приемников, прежде всего, на удаленных участках профиля. Управление системой может осуществляться на основе самообучающегося искусственного интеллекта, обеспечивающего оптимизацию схем расстановки датчиков и приемников и полетных заданий БпЛА с учетом анализа состояния системы и качества данных. Для особо сложных и труднодоступных участков применение такой технологии может оказаться наиболее эффективным подходом для надежного получения качественных сейсмических данных.

В данной работе представлен результат разработки электронного измерительного устройства, представляющего собой сейсмический нод, обладающий следующими ключевыми характеристиками: широкая полоса регистрации (1-300 Гц), высокий коэффициент преобразования первичного датчика 250 В/м/с, динамический диапазон цифровой системы >130 дБ, малое потребление <0.5 Вт, механическая прочность модуля и отсутствие жестких требований к условиям его установки, небольшой вес и габариты. Указанный набор параметров можно рассматривать как наиболее полно соответствующий требованиям для использования в составе системы совместно с беспилотными летательными аппаратами.

Состав и функционирование сейсмического нода для совместной работы с БпЛА

Представляемая система состоит из трех ортогонально установленных активных линейных молекулярно-электронных геофонов MTSS-1001 [3, 4] с рабочей полосой в базовой конфигурации от 1 до 300 Гц. Линейные геофоны MTSS сочетают малые габариты и вес – не более 65 грамм с высокой чувствительностью – до $250 \frac{\text{В}}{\text{м/с}}$. Ключевой отличительной особенностью геофонов MTSS является широкая рабочая полоса частот до 1 Гц, что больше, чем у других типов приборов, что является особенно важным для работы на сложных территориях, содержащих труднодоступные участки, ограничивающие возможности для создания плотных расстановок сейсмодатчиков. Кроме того, приборы устойчивы к вибрациям и ударам при транспортировке, а также сохраняют работоспособность при любой ориентации относительно вертикали, что значительно снижает требования по точности выставления вертикали при использовании неподготовленной площадки. Более того, ошибки, связанные с неточной установкой прибора относительно вертикали, могут быть в дальнейшем скорректированы на основании показаний встроенного в цифровую плату трехкомпонентного акселерометра-магнитометра. Усилители, примененные в геофонах, характеризуются малым собственным шумом и небольшим энергопотреблением – не более 30 мВт на компоненту. Вместе с тем, путем перенастройки параметров цепей обратной связи и выходного фильтра, имеется возможность расширить рабочую полосу прибора в сторону низких частот вплоть до 0,1 Гц (10 секунд), что недоступно существующим электродинамическим геофонам даже при применении схем активного демпфирования. Полученные в этом случае низкочастотные компоненты спектра позволяют проводить широкополосную обработку и дополнительно увеличить глубину, для которой могут быть получены геологические данные [5].

Блок схема устройства представлена на рисунке 1. Аналоговые напряжения от активных геофонов А6..А8 через платы усилителей А3..А5

поступают на плату оцифровки сигнала А2. Для оцифровки сигнала датчиков применена микросхема ADS131E04 [6], содержащая 4 синхронных независимых 24-разрядных аналогово-цифровых преобразователя, работающих на частоте опроса 1000 Гц и характеризующиеся отношением сигнал/шум -122 дБ, что дает 20,5 эффективных разряда без шума. Выходные сигналы с частотами ниже 1000 Гц формируются посредством децимации, сопровождающейся антиалиазинговой фильтрацией высоких частот. В результате децимации с выполнением 32-разрядных вычислений число эффективных разрядов без шума возрастает. В частности, при частоте отсчетов 100 Гц число эффективных разрядов без шума составляет уже 22, что обеспечивает динамический диапазон входного сигнала в 131,8 дБ. Дальнейшее снижение частоты опроса дает возможность еще большего увеличения динамического диапазона, но сказывается на полосе пропускания, которая в зависимости от применяемых коэффициентов фильтров составляет 0,4 – 0,45 от конечной частоты опроса.

В качестве опорного применен прецизионный источник напряжения (ИОН) ADR444 [7] с плотностью шумового напряжения в $78,6 \frac{\text{нВ}}{\sqrt{\text{Гц}}}$ на частоте 1 кГц, что дает оценку величины с.к.з шума в полосе 0,1 – 500 Гц на уровне 0,56 мкВ или $-134,3$ дБ от с.к.з. максимального входного сигнала, составляющего 2,896 В. Применение одного источника опорного напряжения для всех четырех каналов АЦП и счетверенного интегрального АЦП позволило минимизировать общее потребление тракта АЦП до 50 мВт.

Синхронизация отсчетов и привязка данных по координате производятся при помощи спутникового приемника GloNASS/GPS MAX-M8Q A1.4 [8] и термокомпенсированного подстраиваемого кварцевого генератора TG-2016 [9], расположенного на плате АЦП. При наличии сигналов точного времени микроконтроллер измеряет частоту опорного генератора относительно истинного времени GPS и выдает команду на коррекцию частоты. Система подстройки обеспечивает точность привязки отсчета к точному времени не хуже 1 мкс. В отсутствие сигналов подстройки точность системных часов определяется стабильностью термокомпенсированного кварцевого генератора

и относительный уход не превышает $0.5 \cdot 10^{-6}$ на всем температурном диапазоне от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$.

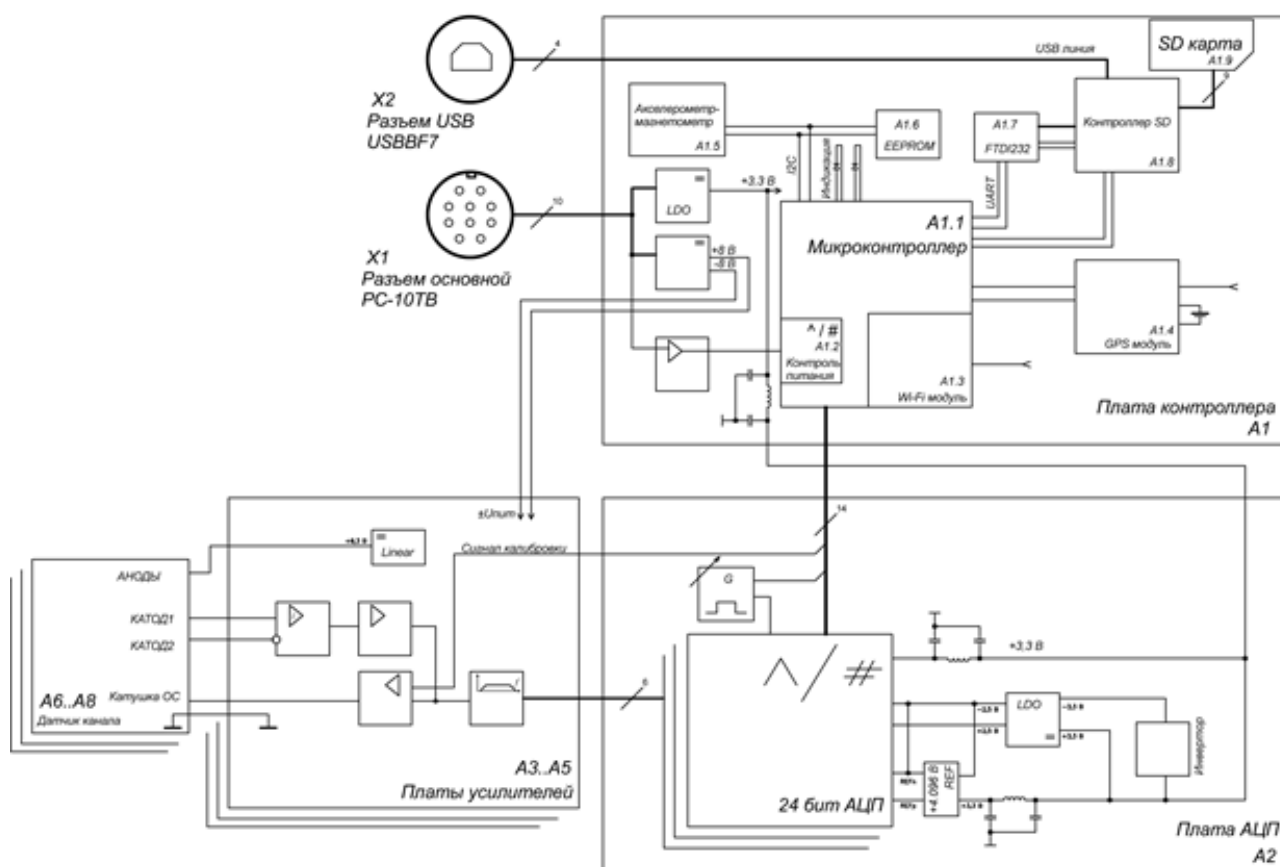


Рис. 1. Блок схема цифрового сейсмического нода.

На плате контроллера A1 установлен микроконтроллер A1.1 типа CC3200R1M2RGC с архитектурой ARM Cortex-M и встроенным интерфейсом Wi-Fi A1.3. [10]. На контроллере производится прием оцифрованных данных от АЦП, их последующая фильтрация с децимацией, снабжение метками точного времени и дальнейшая запись на SD карту, либо передача по каналам связи. Кроме того, контроллер осуществляет контроль напряжения питания с помощью встроенного 12-разрядного АЦП A1.2 и осуществляет выдачу калибровочных сигналов на платы усилителей для контроля работоспособности и характеристик активных геофонов.

Хранение данных осуществляется на энергонезависимую флэш-память A1.9 типоразмера microSD емкостью до 32 Гбайт. Для хранения данных применяется файловая система FAT32, что позволяет дальнейшее их считывание

с карты без применения специальных программных средств. Блоки записанных данных содержат чередующиеся значения компонентов сигнала и минутные заголовки метаданных, в которых содержатся информация о координате установке, времени отсчета, показания встроенных датчиков – температура внутри прибора, показания магнитометра и акселерометра. Чтение данных может осуществляться либо по беспроводному интерфейсу Wi-Fi с помощью FTP, либо с использованием контроллера SD карты A1.6 типа MAX14502 [11] по проводному соединению стандарта USB 2.0. Данные сохраняются в специализированном формате SIVY и могут в дальнейшем конвертироваться в общепринятые форматы представления сейсмических данных – 32-разрядные бинарные отсчеты, miniSEED, SEG Y и другие. Также по интерфейсу USB с помощью преобразователя интерфейсов A1.7 типа FT232 [12] возможно чтение телеметрических данных с выхода UART микроконтроллера. Текущие настройки прибора и системная информация, необходимая для работы, сохраняется в энергонезависимой памяти A1.6 типа 24LC256. [13]

Для определения текущего режима эксплуатации прибора применяются термометр, встроенный в микросхему АЦП, а также интегральный шестикомпонентный магнитометр-акселерометр A1.5 типа LSM303. В микросхеме магнитометр-акселерометра имеется трехкомпонентный линейный акселерометр со входным диапазоном $\pm 2g$ и спектральной плотностью шума $220 \frac{\text{мкг}}{\sqrt{\text{Гц}}}$ и трехкомпонентный магнетометр со входным диапазоном $\pm 1,3 \text{ Гс}$ и разрешением 2 мГс . Применение шестикомпонентного магнитометра-акселерометра позволяет производить последующую компенсацию неточности расположения осей прибора относительно вертикали и направления на географический Север при установке посредством пост-обработки данных на основании значений проекций ускорения свободного падения и линий магнитного поля Земли на оси прибора.

Программное обеспечение ноды.

Программное обеспечение состоит из загрузчика и основной прошивки микроконтроллера. Загрузчик выполняется до момента запуска основной прошивки и предназначен для обновления прошивки и проверки ее целостности перед запуском. Основная прошивка основана на операционной системе реального времени (RTOS), в которой параллельно выполняется несколько подпрограмм: опрос АЦП с последующей серией каскадов децимации с антиалиазинговой фильтрацией, сохранение данных на внутреннюю SD карту, выдача калибровочного сигнала, подстройка кварцевого генератора по часам приемника GNSS.

В прошивке реализован также ряд сетевых серверных приложений – HTTP сервер для отображения веб-интерфейса модуля, FTP сервер для скачивания файлов, хранящихся на SD карте, а также сервер для обмена данными и командами с внешней системой управления посредством специализированного протокола прикладного уровня, реализованного поверх сетевого протокола UDP. Передача команд и запрос состояния системы происходит по принципу запрос-ответ. Передача данных выполняется асинхронно – модуль отправляет пакеты с данными по мере их формирования, принимающая сторона отправляет подтверждение приема. В случае отсутствия подтверждения модуль высылает пакет повторно, таким образом обеспечивается целостность потока данных.

Описанный протокол использован для автоматизированного обмена командами и данными с БПЛА. Дальность действия Wi-Fi позволяет БПЛА установить связь с модулем, находясь на высоте до ста метров. Компьютер БПЛА, после установки беспроводного соединения, может запросить состояние модуля, изменить параметры регистрации, произвести тестовую запись сигнала или подать команду на подачу калибровочного сигнала.

Механическая конструкция и сборка нода

Конструкция устройства изображена на рисунке 2, представляет собой систему из трех ортогонально направленных геофонов 3, закрепленных на кронштейне 4 и основании 5, на котором также установлена на стойках 8 цифровая плата 7 и аккумулятор 9. Основание с датчиками и платами размещается в корпусе 1 для радиоэлектронной аппаратуры типа G139, доработанном на станке механообработки для установки разъемов USB, GPS, WiFi. Для установки к корпусу крепления к БПЛА предназначена площадка 2, которая крепится к корпусу 1 при помощи винтов.

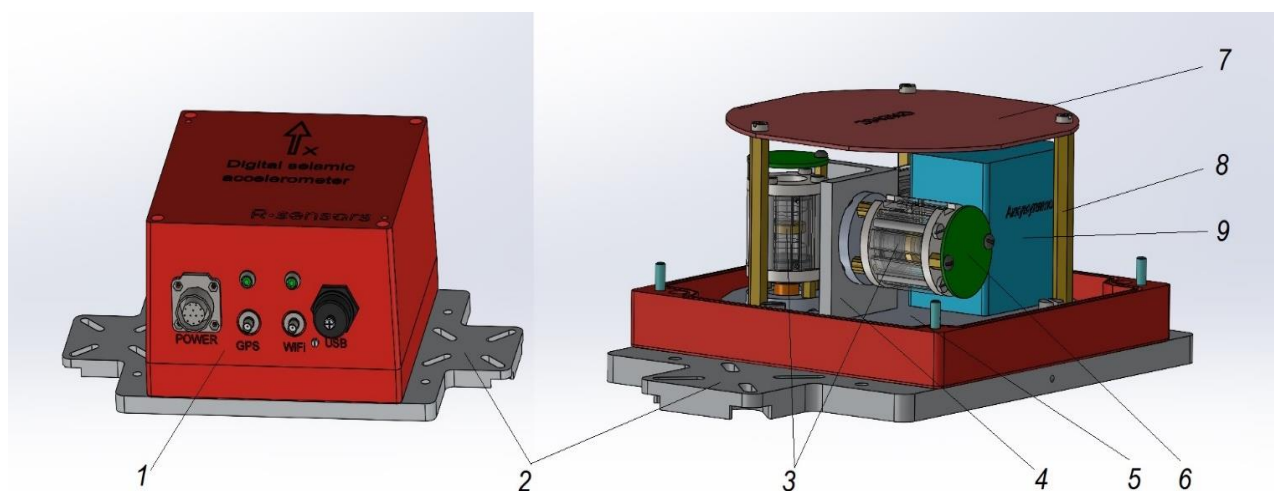


Рис. 2. Модель устройства, разработанная с помощью программы 3D-моделирования: 1 – корпус устройства, 2 – площадка для установки крепления к БПЛА, 3 – молекулярно-электронный датчик – геофон, 4 – кронштейн, 5 – основание, 6 – плата усилителя сигнала, 7 – плата оцифровки сигнала, 8 – межплатная стойка.

Внешний вид устройства иллюстрирует фотография, показанная на рисунке 3.

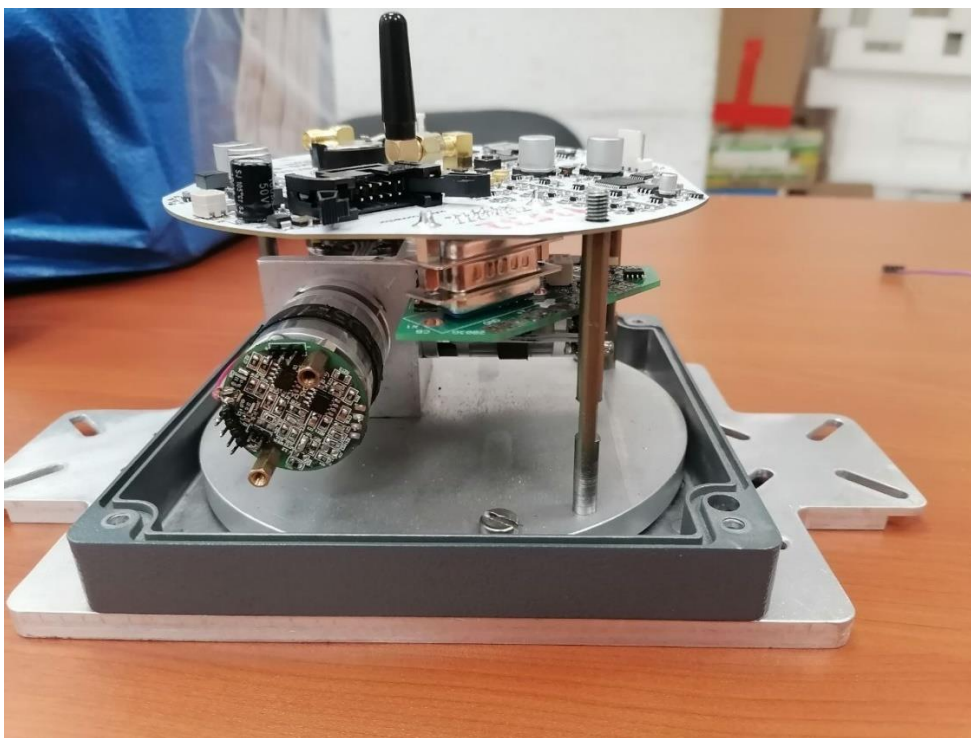


Рис. 3. Внешний вид цифрового модуля без внешнего корпуса.

Исследование характеристик модуля в лабораторных условиях.

Наиболее критическими характеристиками для сейсмических систем в целом и, в частности, в случае ее построения на основе нодов, взаимодействующих с БПЛА, являются рабочая полоса частот первичных датчиков, собственные шумы аналого-цифрового преобразователя, наличие и функционирование устройства для тестирования и калибровки датчиков непосредственно в полевых условиях, а также возможность оперативного получения блоков данных, характеризующих качество получаемой сейсмической информации.

Измерение частотных характеристик датчика.

Использованные датчики были предварительно откалиброваны и исследованы на вибростенде. Полученная при этом полоса рабочих частот соответствует 1-300 Гц по уровню -3 дБ относительно коэффициента преобразования на частоте 10 Гц. Здесь представлены результаты исследования характеристик с помощью встроенной калибровочной катушки методом

сканирования по исследуемому частотному диапазону. Для исследования амплитудно-частотной характеристики датчика, подключим к нему двухполярное питание и универсальный цифровой блок NI-6205 (National instruments), включающий аналого-цифровой (АЦП) и цифро-аналоговый (ЦАП) преобразователи. Сигналы, получаемые в процессе калибровки, соответствуют реальным сейсмическим сигналам с той же частотой [3], что позволяет получать частотные характеристики приборов.

Принципиальная схема подключения к калибровочной катушке показана на рисунке 4. Сигнал с выхода ЦАП поступает на буфер, а затем на вход источника тока, ток в котором может быть рассчитан по формуле:

$$I = \frac{U_{DAC}}{R1 + \frac{R2}{1 + i\omega * R2 * C12}},$$

где $C12 = \frac{C1 * C2}{C1 + C2}$.

Из представленного выражения следует, что $I \approx i\omega U_{DAC} C12$, т.е. ток в катушке пропорционален производной от входного сигнала.

Таким образом, если на вход схемы подается некоторый сгенерированный ЦАП входной сигнал, то выходной тока, поступающий в калибровочную катушку будет пропорционален производной от входного сигнала. Ток в катушке пропорционален силе, с которой катушка, взаимодействует с магнитом, закрепленном на инерционной массе датчика. Далее, учитываем, что датчик измеряет силу инерции, которая, в свою очередь, пропорциональна измеряемому ускорению. В итоге, можно ожидать, что измерения с помощью калибровочной катушки и представленной схемы позволяют получить частотные характеристики датчика по скорости.

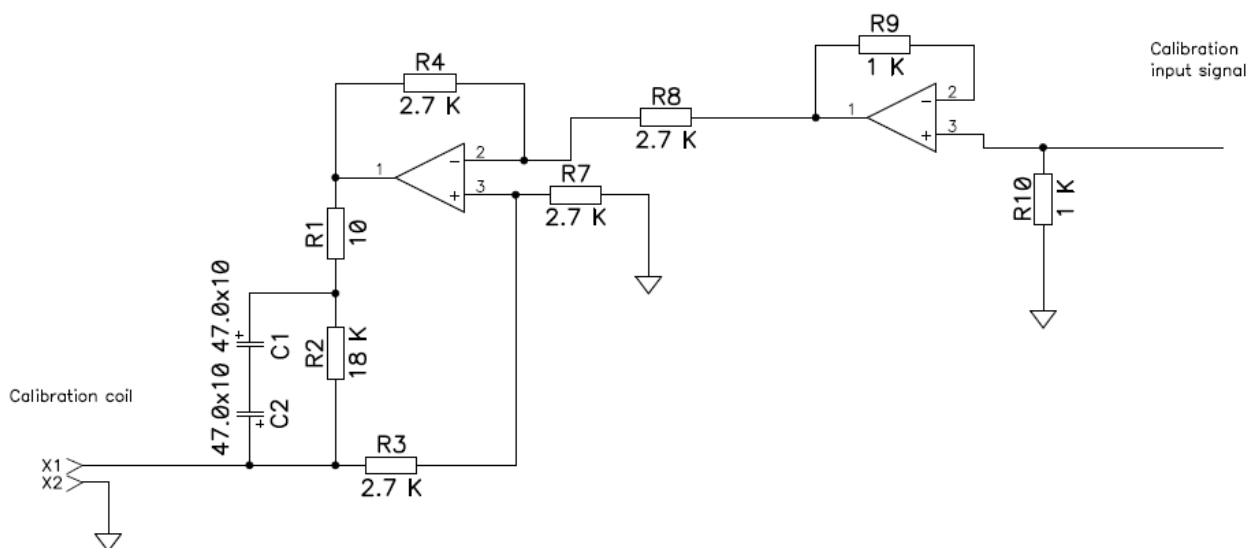


Рисунок 4. Принципиальная схема устройства для калибровки сейсмодатчика.

Обработка результатов измерений проводилась в программе DADiSP строились спектры полученных сигналов, а затем вычислялись отношения значений спектров на частоте воздействия для выходного и входного сигналов. Результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Зависимость отношений пика выходного сигнала к пику входного.

Частота, Гц	1-ый датчик	2-ой датчик	3-ий датчик
1	0,072	0,075	0,073
2	0,094	0,096	0,096
8	0,098	0,107	0,110
32	0,101	0,107	0,112
128	0,092	0,095	0,092
200	0,086	0,077	0,078
300	0,098	0,056	0,061

Таким образом, полученная частотная характеристика соответствует заявленному частотному диапазону 1-300 Гц. Отметим, что данный метод не позволяет получить абсолютное значение коэффициента преобразования в В/м/с, в отличие от методов, связанных с использованием вибростенда или сличением

спектров выходных сигналов с референсным датчиком. Преимуществом метода является его применимость в полевых условиях.

Выполнение функции контроля характеристик датчиков и качества сейсмических данных при совместной работе с БПЛА.

Метод, сканирования по частотам, использованный в предыдущем разделе обладает высокой точностью, поскольку использует гармонические сигналы, которые могут быть исследованы с применением спектральных методов и получением крайне высокого отношения сигнал/шум на выделенных дискретах. Более удобным в полевых условиях является методом калибровки с применением в качестве входного импульсного сигнала или функции Хевисайда.

В данной системе указанная функция реализована следующим образом. На борту беспилотного летательного аппарата (БПЛА) установлен одноплатный компьютер Raspberry Pi. Взаимодействие с сейсмическими нодами построено следующим образом. Каждый сейсмический нод создает свою Wi-Fi сеть, название которой соответствует серийному номеру нода. При приближении БПЛА на достаточное для беспроводной передачи данных расстояние, Raspberry Pi подключается к сети прибора и подает команды на выполнение тестирования.

В данный момент реализованы следующие команды:

1) Контроль качества данных. Компьютер на борту БПЛА подает команду на передачу данных с указанием длительности передаваемых данных. Данные передаются в текущем времени, сохраняются в памяти компьютера без обработки. Обработка проводится оператором. Целью обработки является контроль качества принимаемых сигналов, вычисление отношения сигнал/шум для точки приема, выявление точек, в которых не обеспечивается надлежащий контакт датчика с грунтом.

2) Для проверки частотных характеристик датчика и исправности регистрирующего тракта с встроенного в БПЛА Raspberry Pi подается команда о запуске калибровочного сигнала в качестве которого применяется

десятисекундный импульс заданной амплитуды. После считывания отклика датчиков, данные по wi-fi отправляются обратно на Raspberry Pi. Пример такого отклика показан на рисунке 5:

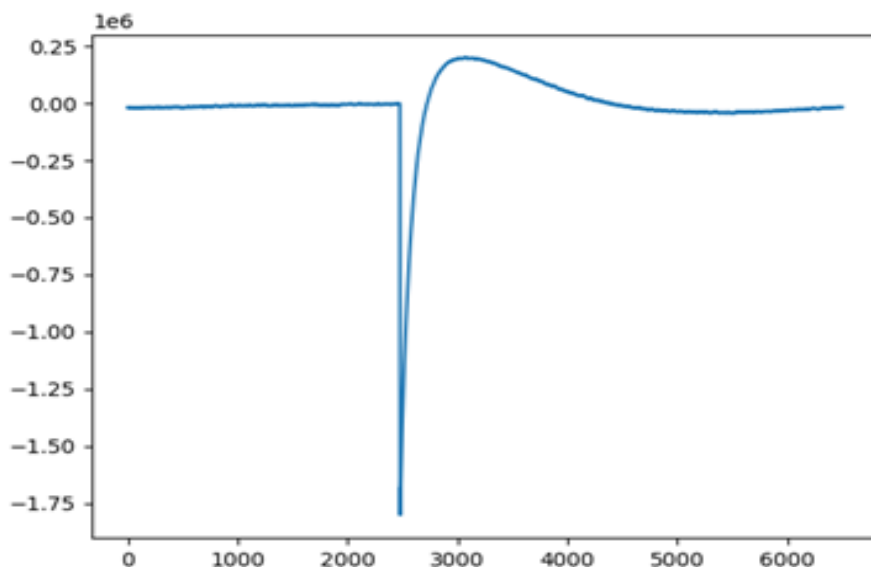


Рис. 5. Отклик датчика на тестирующее воздействие.

Далее на одноплатном компьютере запускается программа, которая находит минимум и максимум сигнала. Вычисляя между ними разницу по вертикали – величину отклика, а также разницу по оси времени – его длительность, сравнивает полученные значения с соответствующими эталонными величиной (2 Вольта) и длительностью отклика (0,6 секунды). Допустимое отклонение могут быть выставлены в программе. Обычно, приемлемым считается отклонение в пределах $\pm 5\%$. В зависимости от результата проверки выводится сообщение об исправности или неисправности датчиков.

По завершении взаимодействия с нодом, в зависимости от пилотного задания, БПЛА либо перемещается к следующему устройству, повторяя описанный выше алгоритм, либо возвращается на командный пункт для просмотра и обработки собранных данных.

Характеристики аналого-цифрового преобразователя

Тестирование аналогово-цифрового преобразователя платы заключается в проверке коэффициента преобразования, амплитуды напряжения максимального неискаженного входного гармонического сигнала и измерения с.к.з. шума, приведенного ко входу.

Для первого измерения применяется калиброванный источник сигнала и высокоточный вольтметр постоянного тока, считываются показания АЦП и вычисляется фактический коэффициент преобразования. Номинальное значение этого параметра определяется, как $\frac{4,096}{2^{31}} \frac{\text{В}}{\text{отсчет}}$ и составляет $1,907 \frac{\text{нВ}}{\text{отсчет}}$.

Границы максимального входного напряжения определяются величиной опорного источника и составляют $\pm 4,096\text{В}$. Методикой проверки допускается ухудшение величины любой из границ вследствие смещения нуля на 50 мВ.

Измерение уровня собственных шумов производится путем длительной (2-4 часа) записи отсчетов АЦП, нагруженного на эквивалент выходного сопротивления геофона – металлопленочный резистор сопротивлением 1 кОм. Полученная при этом запись разбивается на 12-16 отрезков, для каждого из которых производится взятие амплитудного спектра по мощности (квадрата амплитуды напряжения). Далее итоговое значение шумовой спектральной плотности по мощности для каждой точки берется, как средневзвешенное значение шумовых спектральных плотностей каждого из отрезков. Применяемое усреднение позволяет ослабить вклад случайных импульсных помех в шумовом спектре и сделать его более монотонным [14]. Среднеквадратичное значение шумового напряжения может быть получено путем интегрирования значений шумовой спектральной плотности напряжения в рабочем диапазоне частот.

На рисунке 6 приведены шумовые спектры АЦП, полученные для двух разных частот опроса – 100 Гц и 1000 Гц. Для облегчения понимания масштабов сигналов спектры приведены к значениям амплитуд входного напряжения и затем пересчитаны ко входным скоростям через типовой коэффициент преобразования активного геофона 250 В/м/с. На этот же рисунок нанесены

модельные кривые естественного шума Земли NLNM и NHNM Петерсона [15], применяемые в качестве референсных в сейсмологии и пересчитанные ко входным скоростям для согласования масштабов графиков.

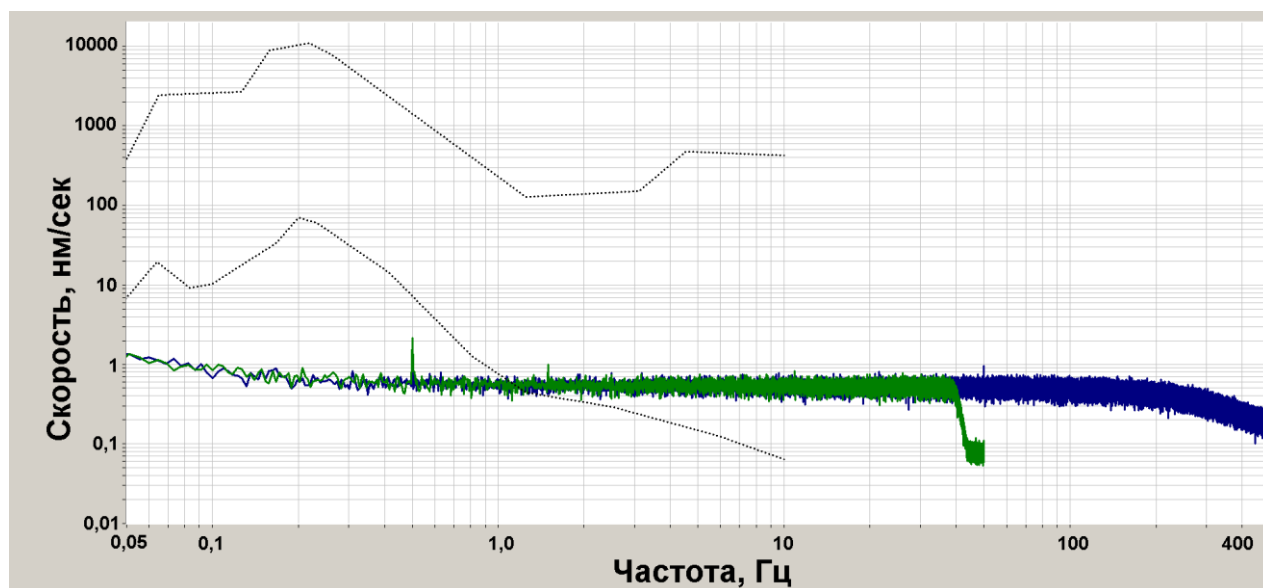


Рис. 6. Спектры шумов АЦП в диапазоне 0,05-500 Гц, приведенные к чувствительности $250 \frac{\text{В}}{\text{м/с}}$, при частотах опроса 1000 Гц (синий) и 100 Гц (зеленый). Черным – модельные кривые Петерсона NHNM (сверху) NLNM (снизу).

Из представленного графика видно, что в большей части спектра собственный шум лежит ниже Low-Noise Model, что означает достаточно низкий для большинства применений уровень шума. Отметим, что данный результат соответствует определенному типу использованного датчика. В частности, при использовании стандартного электродинамического геофона эквивалентный шум вырастет на порядок за счет более низкого коэффициента преобразования и, дополнительно будет возрастать в области низких частот обратно пропорционально квадрату частоты, начиная с 10 Гц.

Проработка конструкции для доставки, установки и возврата модуля с помощью БпЛА

Задачей проектирования конструкции являлось создание электромеханической части устройства захвата груза, в качестве которого выступает описанный выше модуль, масса которого составляет 1.6 кг.

Обобщенное описание принципа эксплуатации разрабатываемого устройства следующее. Перед посадкой выполняется идентификация и определение положения модуля. Если модуль идентифицирован выполняется процесс посадки. В процессе посадки, на основе данных с камеры технического зрения осуществляется позиционирование БПЛА. В случае успешной посадки модуль попадает в зону функционирования устройства захвата. После успешного захвата, модуль фиксируется захватным устройством, и БПЛА может покинуть зону установки груза. Процесс съема груза с БПЛА в аналогичен установке, с той разницей, что в месте посадки устройство захвата раскрывается и БПЛА покидает место установки.

Были проработаны несколько вариантов устройства захвата. В результате, выбор был сделан в пользу захвата с вращательным движением губок захвата, как показано на рисунке 7. По сравнению с другими вариантами, данная кинематическая схема характеризуется минимальным весом, обеспечивая при этом необходимое усилие захвата.

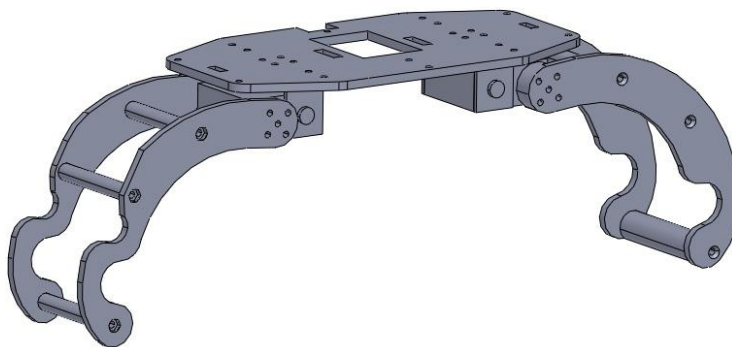


Рис. 7. Модель захвата с вращательным движением губок.

На рисунке 8 показана выбранного БПЛА-носителя в сборе с захватом и разработанным сейсмическим модулем.



Рис. 8. Модель БПЛА-носителя в сборе с захватом и сейсмическим модулем.

Конструкция обладает легкостью и надежностью за счет использования композитных материалов при проектировании, и проста в изготовлении, поскольку все детали могут быть изготовлены методом аддитивной 3Д-печати, лазерной резки и фрезеровки.

Заключение

В результате разработки, представленной в данной работе, изготовлена компактная мобильная сейсмическая станция, обеспечивающая автономную регистрацию широкополосных ЗС данных с высокой разрядностью, а также взаимодействие с БПЛА по беспроводному каналу. Найденные технические решения позволяют обеспечить захват и транспортировку модулей с помощью БПЛА. Информация, передаваемая на БПЛА позволяют оператору в реальном времени режиме контролировать техническое состояние сейсмической системы и качество получаемых данных.

Финансирование: Работа поддержана РФФ, проект №22-69-00231

Литература

1. Z. Zhu, Z. Wu, Z. Deng, H. Qin and X. Wang, “An Ocean Bottom Flying Node AUV for Seismic Observations”, 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV), Porto, Portugal, 2018, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/AUV.2018.8729726>
2. <https://www.sercel.com/en/products/wing><https://www.sercel.com/ene>
3. V.M. Agafonov, I.V. Egorov, and A.S. Shabalina, “Operating principles and technical characteristics of a small-sized molecular-electronic seismic sensor with negative feedback,” Seism. Instruments, vol. 50, no. 1, pp. 1–8, 2014.
4. <http://r-sensors.ru/ru/products/geophones/MTSS-1001-rus/> Доступ проверен 25.11.2023.
5. F. ten Kroode, S. Bergler, C. Corsten, J. W. de Maag, F. Strijbos, and H. Tijhof, “Broadband seismic data – The importance of low frequencies,” GEOPHYSICS, vol. 78, no. 2, pp. WA3–WA14, Mar. 2013.
6. ADS131E04. <https://www.ti.com/lit/gpn/ads131e04> Доступ проверен 24.11.2023
7. ADR444. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adr440_441_443_444_445.pdf Доступ проверен 24.11.2023
8. MAX-M8Q A1.4. https://www.u-blox.com/sites/default/files/MAX-M8-FW3_DataSheet_%28UBX-15031506%29.pdf Доступ проверен 24.11.2023
9. TG-2016
https://support.epson.biz/td/api/doc_check.php?dl=app_TG2016SMN&lang=en
Доступ проверен 24.11.2023
10. Microcontroler CC3200. <https://www.ti.com/lit/gpn/CC3200> Доступ проверен 24.11.2023
11. MAX14502. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max14502.pdf> Доступ проверен 24.11.2023
12. FT232. https://ftdichip.com/wp-content/uploads/2020/08/DS_FT232R.pdf
Доступ проверен 24.11.2023.

13. 24LC256.

<https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MPD/Product Documents/DataSheets/24AA256-24LC256-24FC256-256K-I2C-Serial-EEPROM-DS20001203.pdf> Доступ проверен 24.11.2023

14. Д. В. Пономаренко *et al.*, “Диагностика методом естественных полей.pdf,” *Приборы и системы разведочной геофизики*, no. 2(77), pp. 81–92, 2023.

15. Peterson, J. (1993) Observations and Modeling of Seismic Background Noise. U.S.G.S, Open File Report, 93-322, 95 p.

Для цитирования:

Горчаков И.В., Нешпапа А.В., Антонов А.Н., Авдюхина С.Ю., Савельев А.И., Сергеев С.Н. Малогабаритный радиоэлектронный цифровой модуль для построения нодальной сейсмической системы, взаимодействующей с БПЛА. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.14>