

УДК 550.8.072

*А.У. Касимова, adina.kasimova.99@mail.ru**С.Н. Верзунов, verzunov@hotmail.com**Институт машиноведения и автоматизации НАН КР***РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ РАДИОСИСТЕМЫ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЕОМАТЕРИАЛОВ**

В работе рассмотрен способ измерения физических свойствах горных пород, основанный на использовании программно-определяемой системы (SDR). Разработана установка, основанная на двух синхронизированных устройствах Hack RF One и двух микрополосковых антеннах. По параметрам ЭМ волны, прошедшей через образец горной породы можно судить о физических свойствах исследуемых образцов, так как от них зависят параметры прошедшей через материал волны.

Ключевые слова: микрополосковая антенна, SDR, диэлектрическая проницаемость, HackRF, GNU Radio.

Введение

Радиоволны широко используется для исследования и определения внутренней структуры различных материалов. Основной принцип работы таких устройств заключается в пропускании электромагнитной (ЭМ) волны через материал и анализ сигнала, полученного за счет рассеивания на ЭМ волны на его неоднородностях [1]. В результате такого процесса можно получить сведения о свойствах материала. Конечно, точные результаты могут быть получены только после соответствующей алгоритмической обработки из-за влияния окружающей среды и других помех [2].

Однако закрытая архитектура и высокая стоимость коммерческих устройств подобного типа, требует наличия специального обслуживающего персонала, что делает практическое применение весьма сложным, и приводит к росту числа исследовательских прототипов подобных устройств. Среди различных возможных аппаратных реализаций [3] все чаще используется программно-определяемые радиосистемы (SDR) из-за их гибкости и доступности. Ettus Research является одним из самых популярных в мире поставщиков SDR и предлагает универсальные программные платформы для периферийных устройств (USRP). Тем не менее, цена наиболее часто используемого устройства [3] - USRP x310 с двумя картами UBX160 остается на уровне 7872 долларов США [5]. Пример использования самого дешевого USRP (1216 долларов США), например, в качестве георадара можно найти в работе [6].

Настоящая статья посвящена созданию недорогого устройства, для определения диэлектрической проницаемости и проводимости горных пород с непрерывной постоянной частоты. При этом ставится цель минимизировать стоимость устройства, так что общие затраты составляли менее нескольких сотен долларов США.

Сейчас на рынке доступно несколько SDR-приемопередатчиков, которые удовлетворяют поставленной цели, и работают в широком диапазоне частот. Некоторые параметры часто доступных, дешевых и готовых к использованию SDR приведены в таблице 1. Если исходить исключительно из цены, видно что HackRF One является хорошей основой для достижения поставленной цели.

Таблица 1. Сравнение выбранных параметров дешевых SDR [3].

	USRP B210	BladeRFx40	HackRF
Price [USD]	1216	420	99
Bandwidth [MHz]	30/56	40	20
Freq. range [MHz]	70-6000	350-3800	1-6000
DAC/ADC res. [bit]	12	12	8
T _x max. power [dBm]	10	6	15
Mode	2 x duplex	duplex	Half-duplex

HackRF One поставляется с полностью открытым исходным кодом прошивок и открытой архитектурой, поэтому некоторые производители предлагают его за цену менее 100 долларов США. Охват частот и максимальная мощность передатчика достаточны для нашего устройства, однако для полнодуплексной работы требуется два устройства HackRF. Но покупка двух таких устройств по-прежнему является самым дешевым решением на данный момент.

Предлагаемая конфигурация радиосистемы и ее обоснование

Ранее в работе [1] был предложен метод свободного пространства, как наиболее подходящий метод измерения, позволяющий получить наиболее достоверные и полные результаты измерения физических свойств горных пород. Метод свободного пространства в нашем случае основан на регистрации амплитуды и фазы прошедших через образец радиоволн. В качестве антенн используются предложенные нами в работе [2] микрополосковые антенны. На основании всего этого, а также проанализировав результаты, полученные в работе [3], нами была собрана установка (рис.1) и проверен данный способ измерения на пяти различных образцах горных пород с целью получения данных о физических свойствах образцов, выполненных в виде кернов.

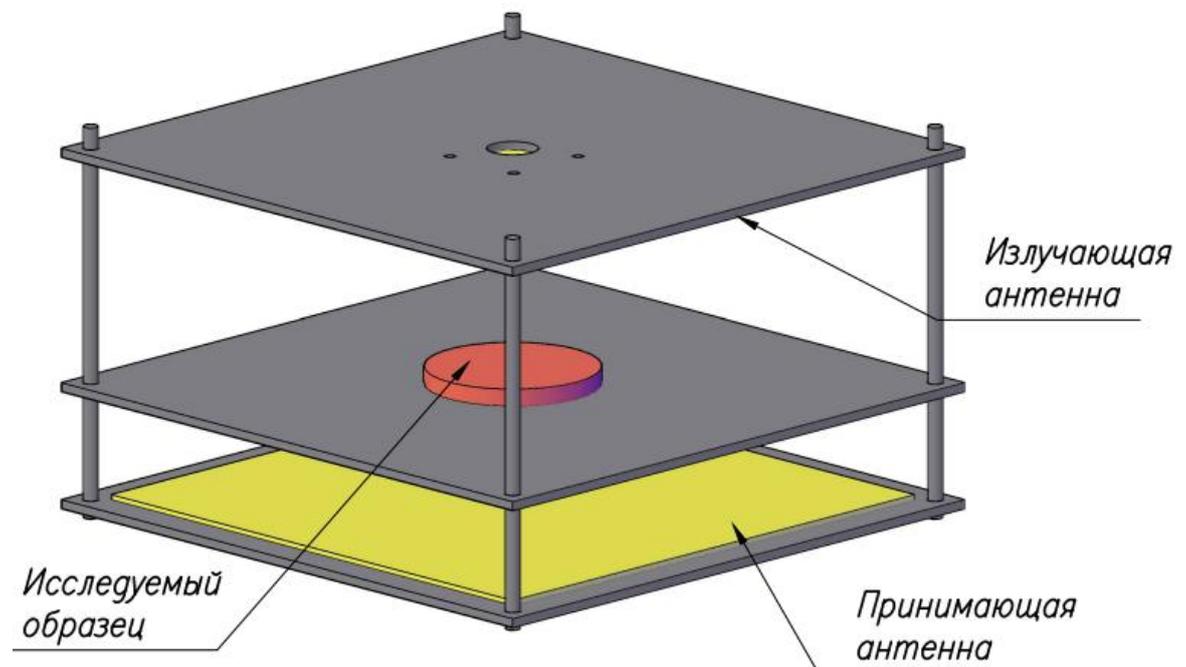
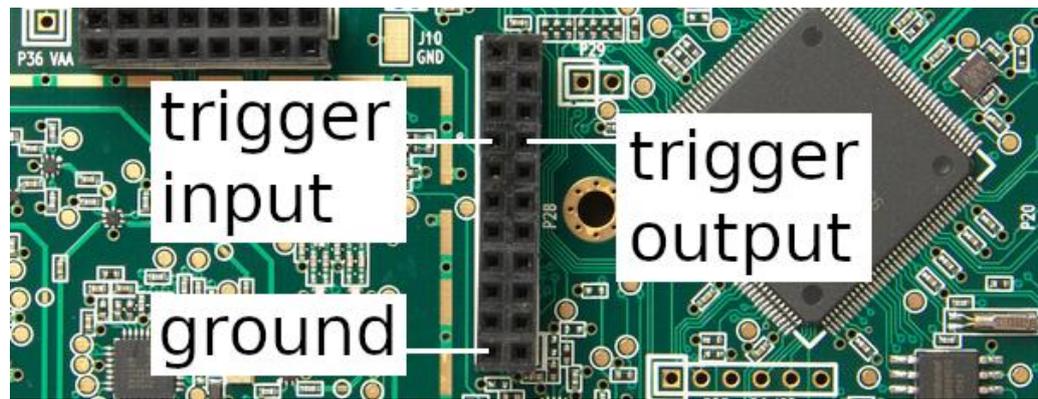


Рисунок 1 – Схема конструкции предлагаемой радиосистемы

Аппаратная реализация предлагаемой программно-определяемой радиосистемы основана на двух взаимно синхронизированных HackRF One и двух противоположно расположенных микрополосковых антеннах. Большинство рассмотренных выше SDR программно обеспечивают одинаковую несущую частоту для двух устройств Tx (передатчика) и Rx (приемника), но достичь фазовой когерентности могут только дорогие SDR. Так как предлагается использовать HackRF One, операции передачи и приема можно синхронизировать с другим HackRF One или с любым внешним оборудованием с помощью триггерного входа и выхода на контактом разъеме P28 (рис. 1). Такой запуск обеспечивает требуемую временную синхронизацию с ошибкой менее одного периода дискретизации.



a)

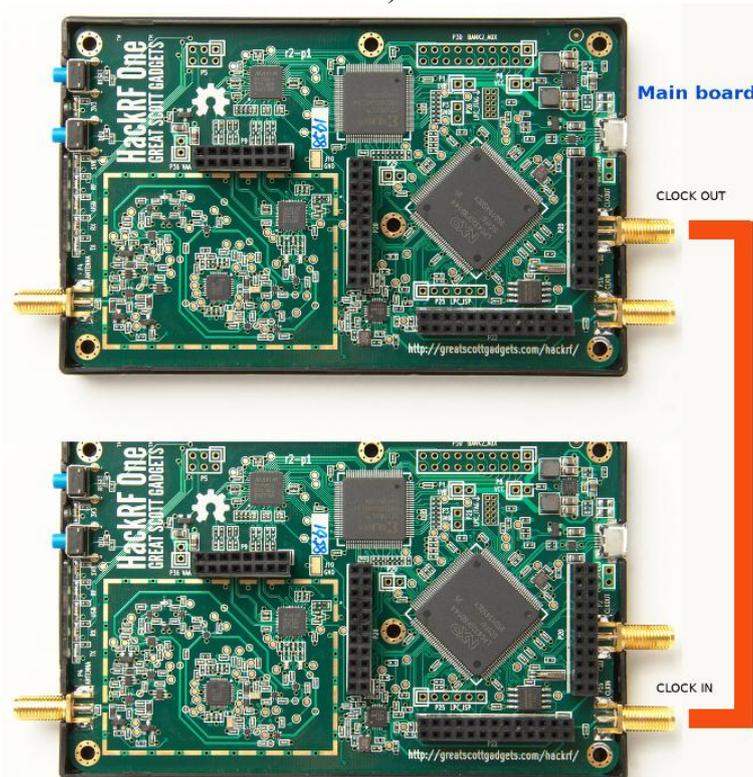


Рисунок 2 – Разъёмы синхронизации HackRF One: а – разъёмы синхронизации запуска; б – разъёмы синхронизации опорной частоты

При запуске одного HackRF One от другого необходимо чтобы два устройства имели общую опорную частоту. Это дает дополнительное преимущество, заключающееся в заземлении HackRF друг на друга, исключая один из проводов, необходимых для запуска. При этом любой HackRF One может служить источником синхронизации для другого, независимо от того, какой из них обеспечивает выход триггера. Общую землю можно получить, подключив вход CLKIN одного устройства к выходу CLKOUT другого устройства, как показано на рис. 2б. В качестве альтернативы можно соединить переключкой контакт 2 P28 на одном HackRF One с контактом 2 P28 на другом HackRF One. Затем с помощью переключки нужно соединить контакт 15 P28 (выход триггера) на одном HackRF One с контактом 16 P28 (вход триггера) на другом HackRF One рис. 2а [9].

HackRF T_x подключен с помощью короткого кабеля к T_x – антенне, HackRF R_x – соответственно с R_x антенне, как это показано на рис. 3. Основной функционал устройства, как и следует из названия работы, был реализован программно.

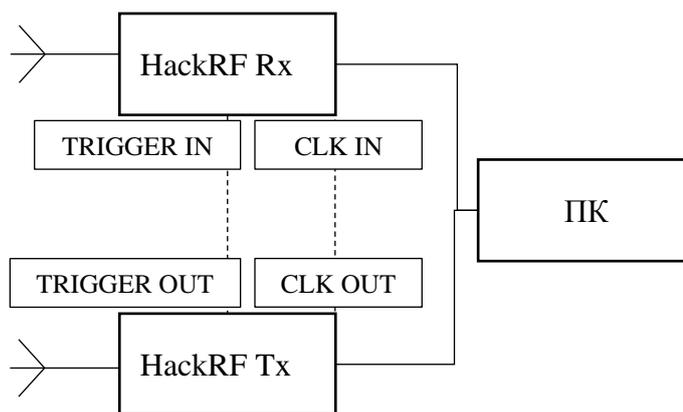


Рисунок 3 – Схема аппаратной реализации радиосистемы

Программная часть устройства, разработанная в пакете GNU Radio Companion, показана на рис. 4 в виде графа. GNU Radio Companion (GRC) – это инструмент для создания графических отображений потоков вычислений и генерации исходного кода из графической схемы и, кроме того, бесплатный набор программных модулей с открытым исходным кодом [8].

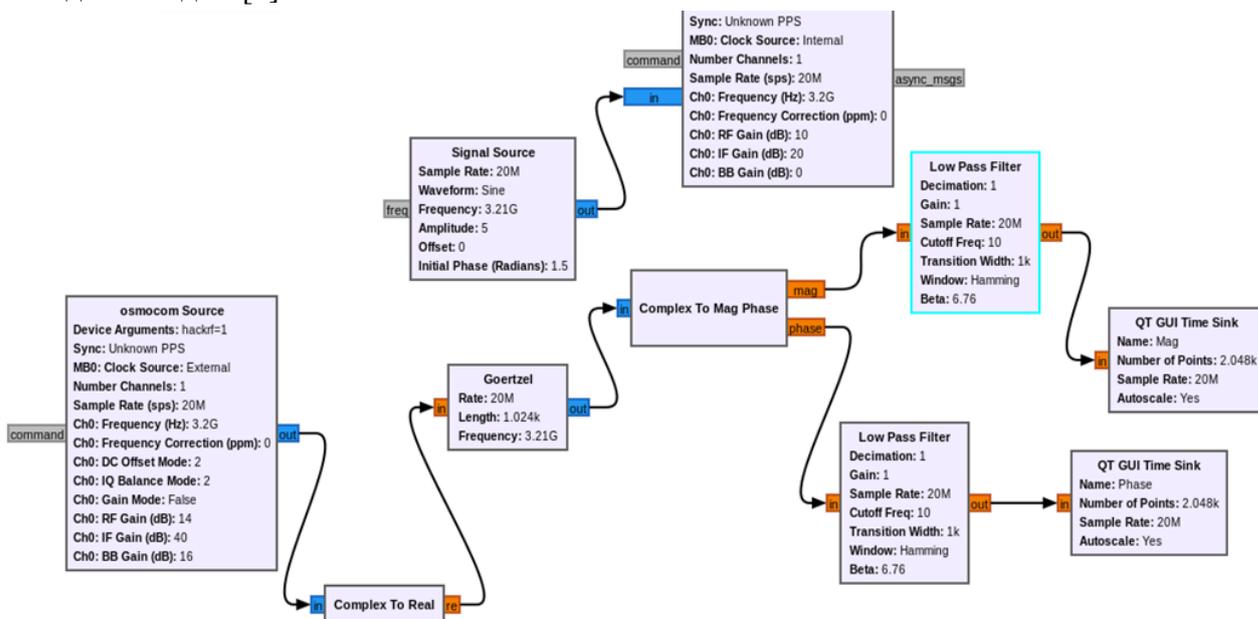


Рисунок 4 – Блок-схема устройства в программе GNU Radio Companion

Блок приемника соединен с источником гармонического сигнала с частотой 3.21 ГГц. Для вычисления амплитуды и фазы используется алгоритм Гёрцеля и фильтр низких частот

Результаты и обсуждение

На рисунке 5 показаны результаты измерения без образца. Пример измерения свойств образца мрамора показан ниже, на рисунке 6. Амплитуда и фаза электромагнитной волны, проходящей через образец горной породы, зависят от ее свойств, таких как его проводимость, магнитная и диэлектрическая проницаемость. Амплитуда и фаза волны так будут зависеть от разности данных параметров в образце и в воздухе.

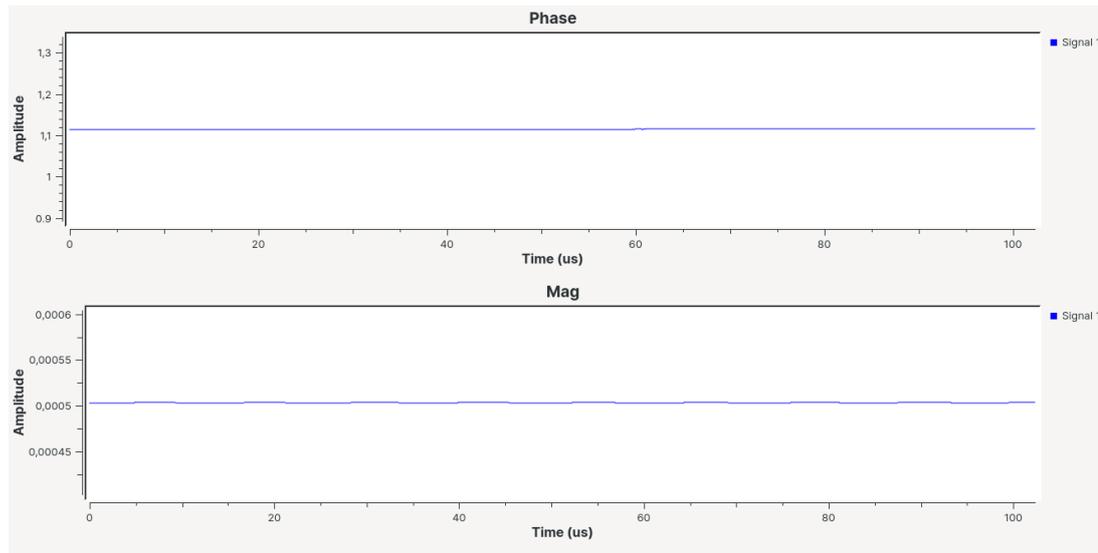


Рисунок 5 – Измерения без образца

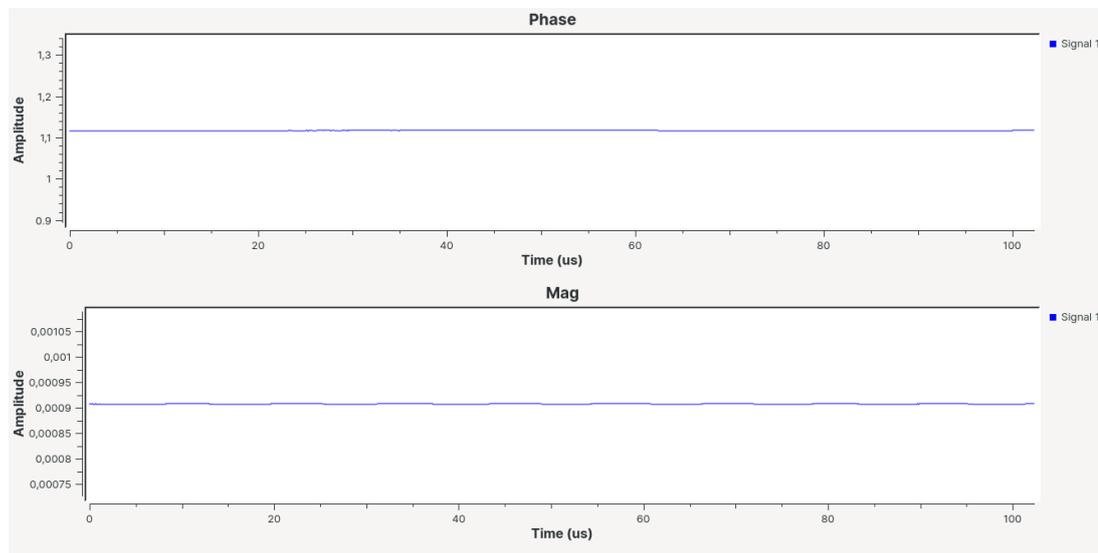


Рисунок 6 – Измерения образца горной породы

Заключение

Данная разработка, основанная на недорогой программно-определяемой радиосистеме, позволит проводить быстрый анализ горных пород по параметрам ЭМ волны, прошедшей через материал. По полученным параметрам ЭМ волны можно будет судить о физических свойствах исследуемых образцов таких, как диэлектрическая и магнитная проницаемости, и проводимость.

Литература

1. Касимова, А. У. Обзор и анализ современных методов измерения диэлектрической проницаемости горных пород / А. У. Касимова, С. Н. Верзунов // Проблемы автоматки и управления. – 2022. – № 1(43). – С. 33–49. – EDN BLNKOG
2. Верзунов С.Н. Способ оптимизации конструктивных параметров ячеек-резонаторов микрополосковых антенн на основе интеллектуального анализа данных // Электротехнические системы и комплексы.– 2022.– № 3(56).– С. 54–64. URL: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3\(56\)-54-64](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-54-64)

3. Jendo, J. Ground penetrating radar prototype based on a low-cost software defined radio platform / J. Jendo, M. Pasternak // *Przegląd elektrotechniczny*. – 2019. URL: <http://pe.org.pl/articles/2019/9/7.pdf>
4. Касимова А.У. Сравнительный анализ моделирования микрополосковой антенны в программах CST Microwave Studio и Matlab Antenna Toolbox // *Проблемы автоматки и управления*. – 2022. – № 3(45). – С. 31-41. URL: <http://pau.imash.kg/index.php/pau/article/view/386/285>
5. Pasternak M. et al., Stepped frequency continuous wave GPR unit for unexploded ordnance and improvised explosive device detection, 2011 12th International Radar Symposium (IRS), 105–109.
6. Прокофьев Иван Валерьевич, Марков Максим Алексеевич, Пуртов Антон Игоревич, Шебалкова Любовь Васильевна, Ющенко Валерий Павлович Влияние свойств грунта на дальность зондирования в геолокации // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2019. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-svoystv-grunta-na-dalnost-zondirovaniya-v-geolokatsii> (дата обращения: 07.04.2023).
7. <https://habr.com/ru/articles/499376/> (дата обращения: 07.04.2023).
8. <https://habr.com/ru/articles/453454/> (дата обращения: 07.04.2023).
9. Программно определяемая радиосистема основана на двух взаимно синхронизированных HackRFs One и двух противоположно расположенных микрополосковых антеннах, предложенных в работе [10].
10. Певнева Н.А., Гурский А.Л., Кострикин А.М. Метод свободного пространства с использованием векторного анализатора цепей для определения диэлектрической проницаемости материалов на сверхвысоких частотах // *Доклады БГУИР*. 2019. №4 (122). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-svobodnogo-prostranstva-s-ispolzovaniem-vektornogo-analizatora-tsepey-dlya-opredeleniya-dielektricheskoy-pronitsaemosti> (дата обращения: 01.05.2023).