



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-28-4-62-71>

Оригинальная статья  
*Original paper*

УДК 004.056.53

## ПРИМЕНЕНИЕ SDR-ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКОВ В СИСТЕМАХ ДЛЯ ПОИСКА ЗАКЛАДНЫХ РАДИОУСТРОЙСТВ

М. А. БУНЕВИЧ, А. И. МАЙОРОВ, И. А. ВРУБЛЕВСКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 01.11.2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** В рамках статьи рассмотрены вопросы построения и проектирования устройств, работающих по методу резонансно-рефлектометрической локации для поиска закладных радиоустройств. Описаны основные этапы проектирования прототипа устройства, работающего по методу резонансно-рефлектометрической локации. Представлены материалы анализа современных типов SDR-приемопередатчиков и их основных характеристик. Обоснован выбор типа SDR-приемопередатчика по технологии DDC (direct down conversion), в которой задачу по оцифровке сигнала с антенны выполняет ФЦП с большой частотой дискретизации. Приведены результаты исследований работы прототипа устройства на основе SDR-приемопередатчиков для поиска закладных радиоустройств. Полученные экспериментальные данные подтвердили, что характеристики современных SDR-приемопередатчиков, такие как быстродействие, чувствительность и рабочая полоса частот, полностью соответствуют требованиям, предъявляемым для проектирования резонансно-рефлектометрического локатора.

**Ключевые слова:** резонансно-рефлектометрическая локация, закладное радиоустройство, SDR-приемопередатчик, поисковое устройство, имитатор.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Работа выполнена при поддержке стипендии Президента (Распоряжение Президента Республики Беларусь от 21.02.2022 № 32рп).

**Для цитирования.** Буневич М. А., Майоров А. И., Врублевский И. А. Применение SDR-приемопередатчиков в системах для поиска закладных радиоустройств. *Цифровая трансформация*. 2022; 28 (4): 62–71.

## THE USE OF SDR TRANSCEIVERS IN SYSTEMS FOR SEARCHING COVERT RADIODEVICES

MIKHAIL A. BUNEVICH, ANDREY. I. MAYOROV, IGOR A. VRUBLEVSKY

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 01.11.2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** The paper deals with the construction and design of devices operating by the method of resonance-reflectometric location to discover covert radio devices. The main stages of designing a prototype device operating by the method of resonance-reflectometric location are described. The materials of the analysis of modern types of SDR receivers and their main characteristics are presented. The choice of the SDR transceiver type based on the DDC technology (direct down conversion with frequency) is substantiated, in which the task to digitize the signal from the antenna is performed by the FTP with a high sampling rate. The results of the prototype device studies

based on the SDR transceivers to search for covert radio devices are presented. The experimental results confirmed that the characteristics of modern SDR transceivers such as speed, sensitivity, and operating frequency bandwidth is fully consistent with the requirements for the design of resonant-reflectometer locator.

**Keywords:** resonant-reflectometric location, covert radio device, SDR transceiver, search device, simulator.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Gratitude.** The work was sponsored by the President's scholarship (order of the President Republic of Belarus from 21.02.2022 No 32rp).

**For citation.** Bunevich M. A., Mayorov A. I., Vrublevsky I. A. The Use of SDR Transceivers in Systems for Searching Covert Radiodevices. *Digital Transformation*. 2022; 28 (4): 62–71.

## Введение

В настоящее время для негласного получения коммерческой информации применяются закладные радиоустройства, скрытно устанавливаемые в местах нахождения объектов наблюдения. Современные передающие и регистрирующие устройства имеют малые размеры, что позволяет прятать их практически в любом месте с помощью маскирования в различные бытовые приборы и предметы интерьера. При этом элементы питания с повышенным сроком службы гарантируют им работу на протяжении длительного времени. Массовый выпуск и значительное снижение стоимости обеспечивают широкую доступность таких устройств. Поэтому противодействие утечке конфиденциальной информации как в государственных, так и в частных организациях является актуальной задачей. Кроме того, большая мощность излучения нелинейных радиолокаторов может создавать помехи системам связи, находящимся в зоне действия локатора. С учетом того, что работа нелинейного локатора осуществляется в области СВЧ, большая мощность излучения оказывает вредное воздействие на оператора. Для решения таких задач ведется разработка новых поисковых методов [1]. Один из них – метод резонансно-рефлектометрической локации.

Метод резонансно-рефлектометрической локации предложен для решения задач по обнаружению закладных радиоустройств. Основная идея резонансно-рефлекторной локации состоит в следующем: облучать окружающее пространство зондирующими сигналами в диапазоне частот работы закладных радиоустройств 100 МГц–6 ГГц и принимать отраженные сигналы. Большинство закладных радиоустройств работают на фиксированной частоте или в узком частотном диапазоне. Как правило, антенные системы таких устройств имеют высокую добротность. При облучении зондирующим сигналом устройств с высокодобротным контуром с частотой, равной резонансной частоте контура, амплитуда наведенных токов в контуре увеличится пропорционально добротности контура. Это, в свою очередь, приводит к резкому увеличению мощности принятого сигнала на определенной частоте работы передатчика локатора, что свидетельствует о нахождении радиотехнического средства в области излучения [2].

В статье рассмотрены возможности технологии программно-определяемых систем (Software-defined radio (SDR)) для реализации на ее базе прототипа устройства, работающего на принципах резонансно-рефлектометрической локации для поиска закладных радиоустройств.

## Анализ современных SDR-приемопередатчиков и их основные характеристики

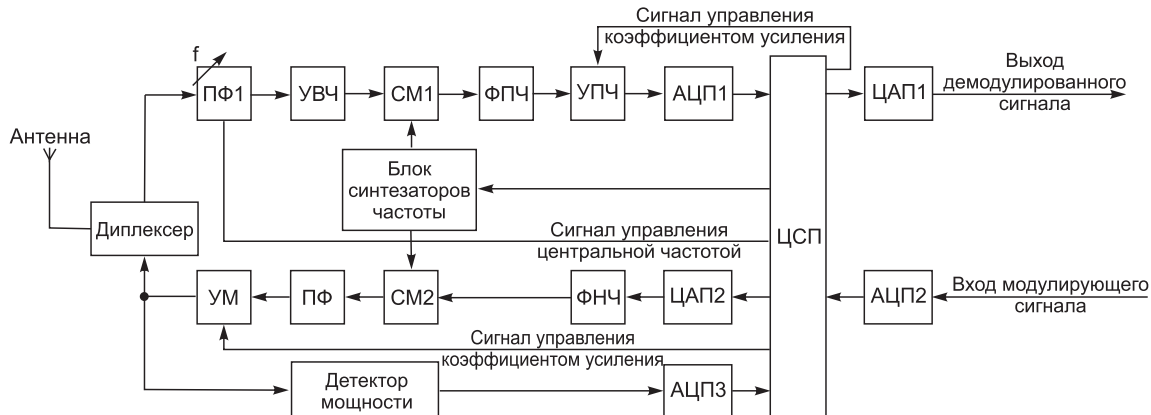
В настоящее время активно развиваются различные SDR-системы благодаря большому спросу на современное телекоммуникационное оборудование, имеющее широкие возможности настройки. Технология SDR позволяет программно устанавливать и изменять рабочие радиочастотные параметры оборудования, такие как диапазон частот, тип модуляции и др. Она характеризуется следующими возможностями: визуализация спектра принимаемого сигнала в реальном времени, применение различных программных настраиваемых фильтров в радиосистеме, реализация функционала для измерений уровня сигнала, настройка приема/передачи разных модуляций в одной радиосистеме без внесения конструктивных изменений. Однако основное преимущество SDR-системы – ее универсальность.

По принципу работы среди различных SDR-приемопередатчиков можно выделить три основных типа:

– устройства SDR, в которых цифровая обработка сигнала происходит не за счет ресурсов устройства, а на стороннем средстве вычислительной техники (ПК, ПЛИС, микроконтроллер и т. д.). Задача таких устройств – выполнить перенос нулевой частоты входного сигнала, а затем

передать такой сигнал по интерфейсам связи на вычислительное устройство. В настоящее время этот тип устройств практически не применяется;

– SDR-приемопередатчики с интегрированной микросхемой АЦП. Передача сигнала на средство вычислительной техники в таких устройствах осуществляется в цифровом виде. Устройства имеют архитектуру супергетеродинного приема сигнала с полосой пропускания до 20 МГц. Обобщенная функциональная схема этого типа устройств представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Функциональная схема SDR-приемопередатчика супергетеродинного типа  
**Fig. 1.** Functional scheme of SDR superheterodyne transceiver

Основной недостаток таких приемопередатчиков связан с появлением зеркального канала из-за аналоговых компонентов в фильтрах. Также в этих приемниках мощные сигналы излучения, находящиеся поблизости от приемника, могут оказывать негативное влияние на прием сигнала, что проявляется в виде помех. Однако соотношение цена/функциональность – основное преимущество устройств данного типа.

Наиболее современной технологией является DDC (direct down conversion) SDR. Основное ее отличие от других SDR-приемопередатчиков заключается в отсутствии аналогового генератора для подстройки на частоту приема. Задачу по оцифровке сигнала с антенны берет на себя АЦП с большой частотой дискретизации. Цифровая обработка сигнала с АЦП выполняется в быстродействующей ПЛИС прямо на плате устройства, и нужный частотный канал (обычно до 6 МГц) передается на средство вычислительной техники. У такого типа устройства отсутствуют недостатки, характерные для предыдущих типов, однако их стоимость остается высокой [3]. Основные параметры наиболее распространенных SDR-приемопередатчиков приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Основные параметры SDR-приемопередатчиков  
**Table 1.** Basic parameters of SDR transceivers

Наименование приемопередатчика / Transceiver name	Разрядность АЦП, бит / ADC digit capacity, bits	Частота дискретизации, МГц / Sampling frequency, MHz	Количество каналов передачи / Number of transmission channels	Количество каналов приема / Number of receiving channels	Режим связи / Communication mode	Открытый исходный код / Open source code
HackRF One	8	20	1	1	Полудуплекс	Полностью
Ettus B200	12	61,44	1	1	Дуплекс	Схема, прошивка
Ettus B210	12	61,44	2	2		
BladeRF x40	12	40	1	1	Симплекс	Нет
RTL-SDR	8	3,2	0	1		
Lime SDR	12	61,44	2	2	Дуплекс	Полностью

Для реализации прототипа поискового устройства, работающего по методу резонансно-рефлектометрической локации, был выбран SDR-приемопередатчик HackRF One, как наиболее подходящий по параметрам и с лучшим соотношением цена/функциональность.

## Структурная схема прототипа поискового устройства, работающего по методу резонансно-рефлектометрической локации

Принцип работы резонансно-рефлектометрической локации так же, как и в случае нелинейной локации, имеет вещественный характер. Поэтому более детально следует рассмотреть особенности работы метода нелинейной локации.

Анализ конструктивно-технологических особенностей нелинейных локаторов, как наиболее близких с разрабатываемым устройством, показал, что по принципу работы можно выделить два основных типа нелинейных локаторов: импульсного и непрерывного излучения.

С учетом конструктивных особенностей HackRF One, а также характера его применения для разрабатываемого поискового устройства, работающего по методу резонансно-рефлектометрической локации, не нужно производить селекцию движущихся целей и определение расстояния до цели, в отличие от задач классической радиолокации. Для упрощения конструкции и интерпретации данных предлагается в качестве зондирующего сигнала выбрать немодулированный непрерывный сигнал – монохроматический. Особенность такого сигнала связана с автокорреляционной функцией, которая не зависит от временного сдвига  $t$  и обращается в ноль всюду, кроме плоскости  $F = 0$  [4]. Поскольку HackRF One работает в полудуплексном режиме, было принято решение выполнить устройство на основе двух SDR-приемопередатчиков HackRF One, структурная схема которых представлена на рис. 2.

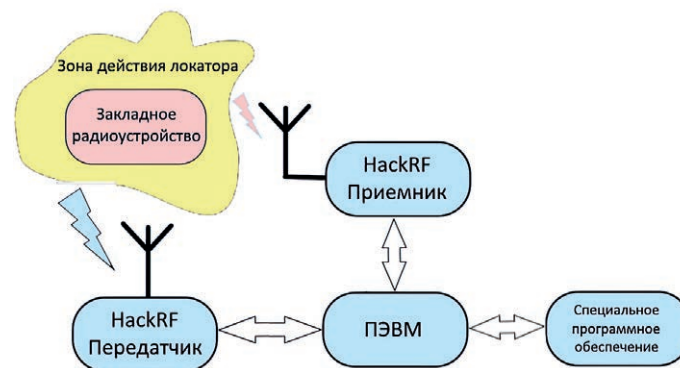


Рис. 2. Структурная схема прототипа устройства

для отработки принципов работы резонансно-рефлектометрической локации

Fig. 2. Block scheme of the proposed prototype device for testing the principles of resonance-reflectometry location

Составной частью разрабатываемого прототипа устройства является специальное программное обеспечение (СПО). СПО позволяет сконфигурировать SDR-приемопередатчик для излучения зондирующих сигналов или обработки принятых отраженных сигналов. При разработке СПО использовалась среда GNU Radio. SDR-трансивер предназначен для формирования зондирующих сигналов, а также приема и обработки отраженных сигналов.

СПО прототипа устройства состоит из двух отдельных программ (flow graph). Один из flow graph служит для первоначальной настройки трактов приемника и передатчика. Схема flow graph приведена на рис. 3. Передающая часть устройства представлена блоками Signal Source, генерирующими сигнал с постоянной амплитудой, и Soapy HackRF Sink, который отвечает за излучение немодулированного высокочастотного (ВЧ) колебания в радиоэфир. Приемная часть представлена блоками Soapy HackRF Source, преобразующими принятый приемной антенной радиосигнал в цифровые отсчеты I- и Q-составляющей. Блоки Qt GUI Frquency Sink и QT GUI Time Sink – это спектроанализатор и осциллограф соответственно.

В верхней части рис. 3 представлены блоки переменных для настройки трактов передатчика и приемника. Переменные определяют параметры ВЧ-трактов SDR-приемников HackRF One, используемых в качестве приемника и передатчика. Функциональная схема HackRF One приведена на рис. 4.

В программе настройки используются блоки переменных трех видов: переменных, не изменяющихся в процессе выполнения программы; логических переменных, которые могут быть изменены в процессе программы; числовых переменных, которые могут меняться при выполнении программы в заданном диапазоне с заданным шагом. К первому типу блоков относится переменная `samp_rate`, задающая частоты дискретизации приемника и передатчика.

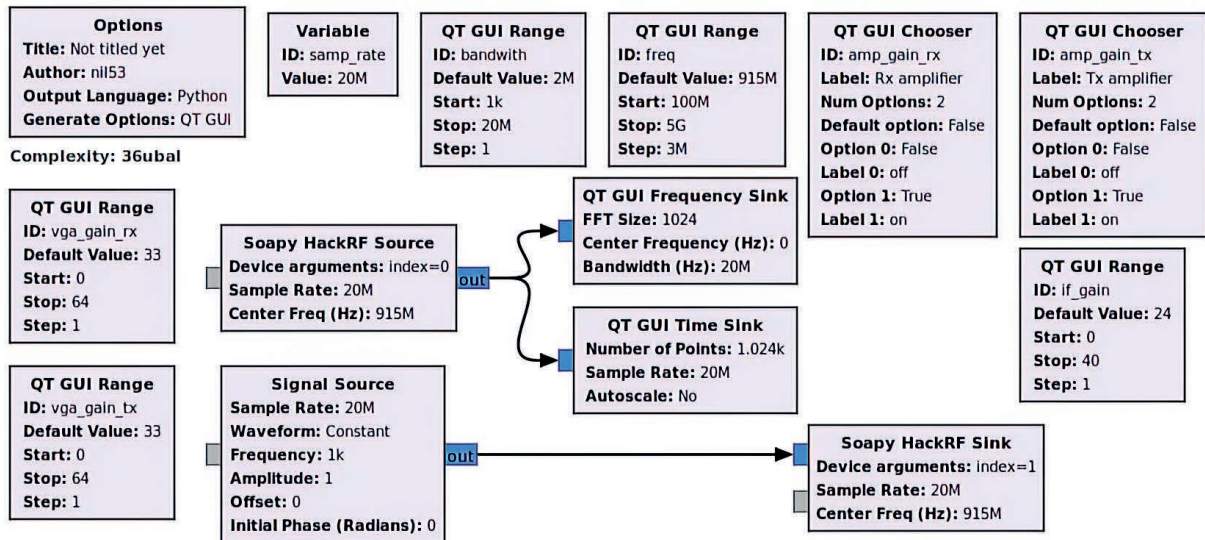


Рис. 3. Программная реализация настройки разрабатываемого прототипа устройства для отработки принципов работы резонансно-рефлектометрической локации  
Fig. 3. Software implementation of the developed prototype of the device for testing the principles of resonance-reflectometric location

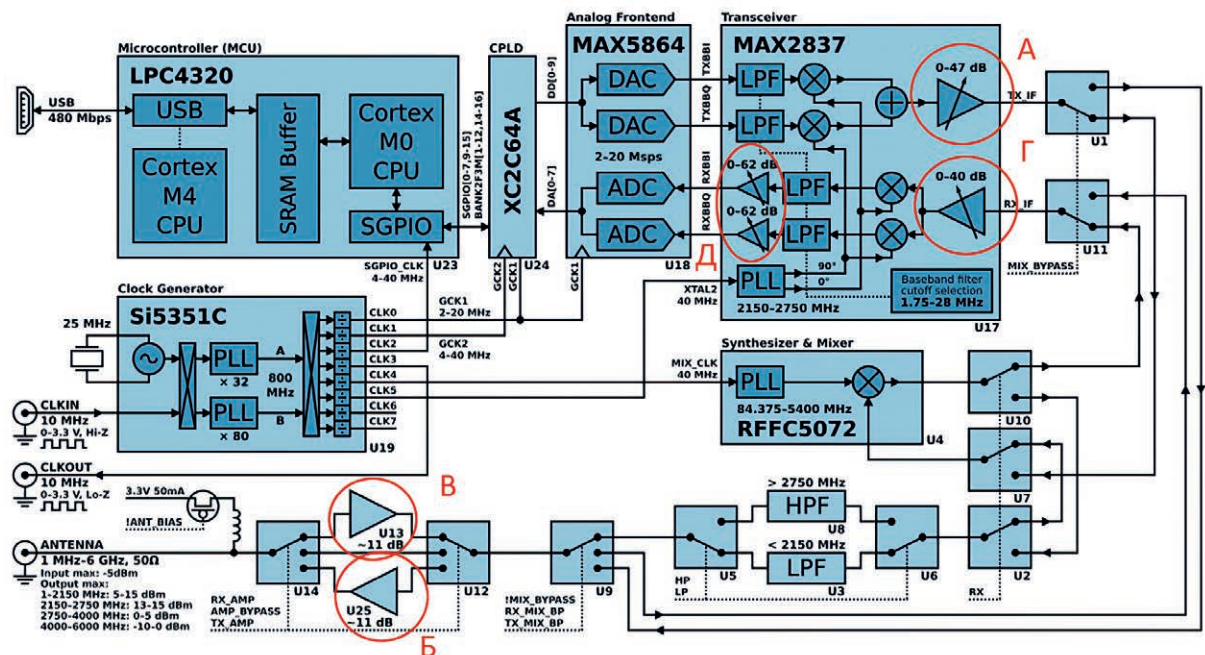


Рис. 4. Функциональная схема HackRF One  
Fig. 4. Functional scheme of HackRF One

За конфигурацию усиления в тракте передатчика отвечают численная переменная  $vga\_gain\_tx$ , которая задает коэффициент усиления в усилителе, управляемом напряжением трансивера MAX2837 (рис. 4, «А»), и логическая переменная  $amp\_gain\_tx$ , включающая или выключающая маломощный усилитель на выходе передающего тракта (рис. 4, «Б»). Остальные переменные служат для конфигурации приемника. Логическая переменная  $amp\_gain\_rx$  включает или выключает маломощный усилитель на входе приемного тракта (рис. 4, «В»). Переменная  $vga\_gain\_rx$ , аналогично  $vga\_gain\_tx$ , задает коэффициент усиления в усилителе (рис. 4, «Г»). Также в тракте приемника непосредственно перед модулем АЦП установлен еще один маломощный усилитель с переменным коэффициентом усиления, который конфигурируется численной переменной  $if\_gain$ . Полосу пропускания приемника задает переменная  $bandwidth$ . На рис. 5 процесс работы программы изображен в виде диаграмм.

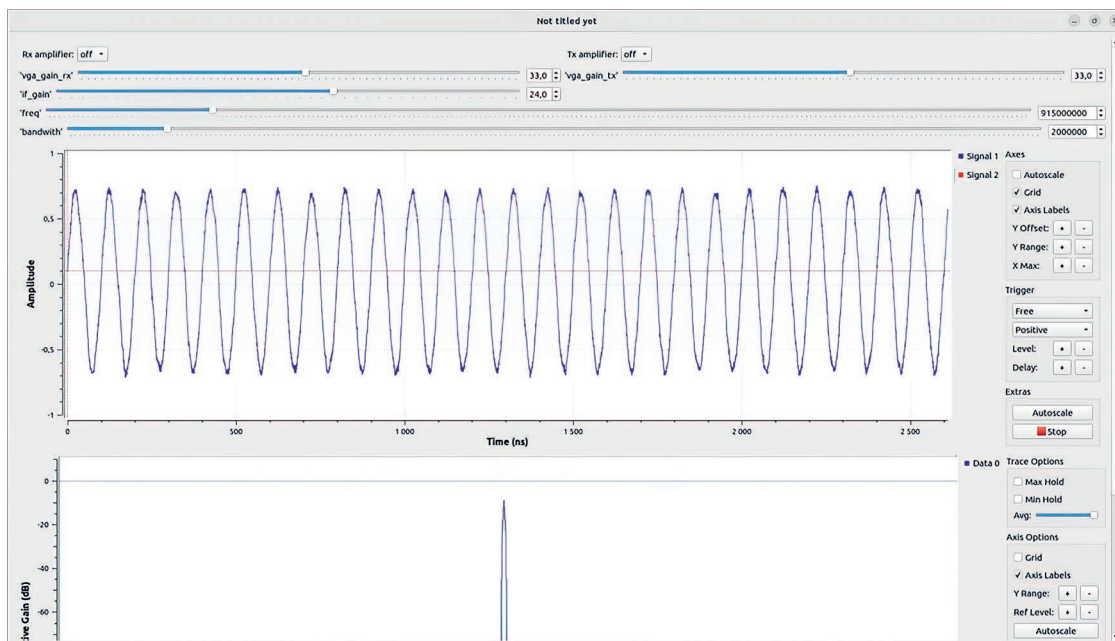


Рис. 5. Процесс работы программы настройки  
Fig. 5. Diagrams showing the process of program tuning

Как видно из рис. 5, все описанные выше переменные представлены в виде интерактивных элементов, позволяющих изменять значения вручную в процессе выполнения программы.

### Описание прототипа закладного радиоустройства

Для проведения исследований по обнаружению изготовили имитатор закладного радиоустройства. Имитатор реализован на базе передатчика T5750 компании Atmel. Из-за низкого тока потребления он может быть востребован в устройствах негласного съема информации. Передатчик содержит блок фазовой автоподстройки частоты, усилитель мощности, кварцевый генератор и предварительный делитель частоты. Также на плате расположены радиоэлементы, согласно схеме включения передатчика, представленной на рис. 6.

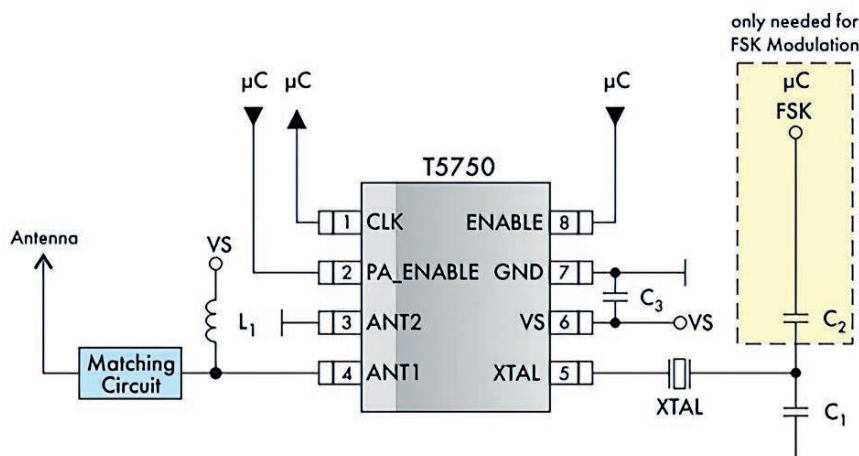
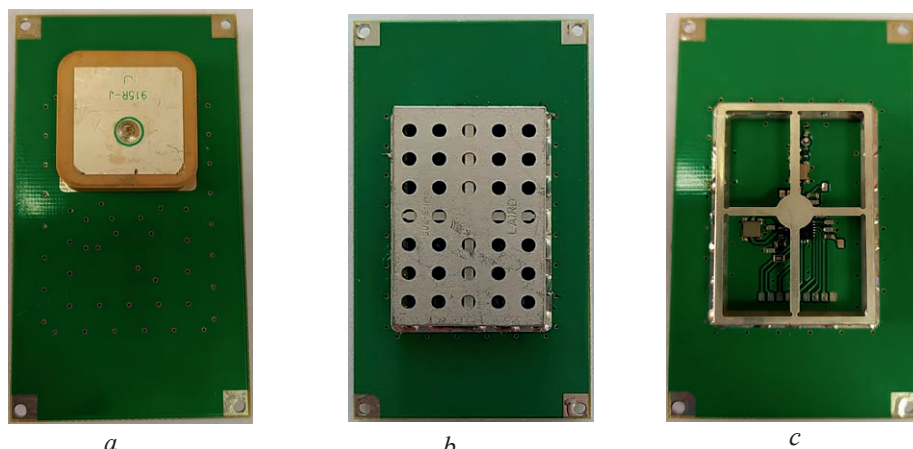


Рис. 6. Упрощенная схема включения передатчика T5750  
Fig. 6. Simplified scheme for turning on the T5750 transmitter

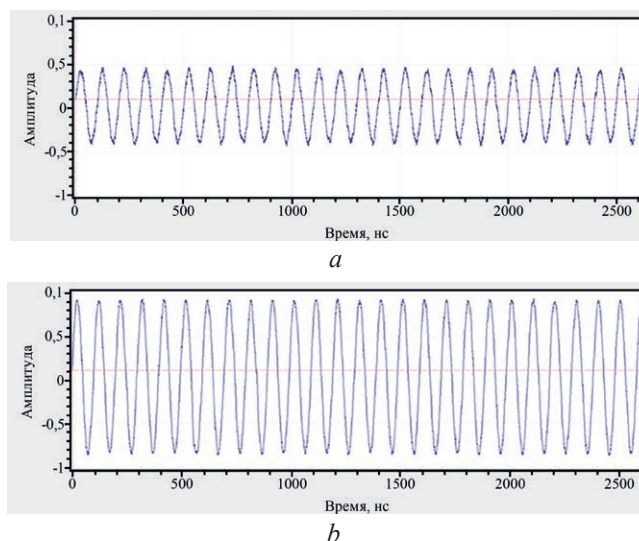
В качестве рабочей выбрана частота имитатора 915 МГц. Для этого, согласно data sheet, используется внешний резонатор на 14,296875 МГц. В качестве антенны – диэлектрическая патч-антенна FA915.254. Для затруднения обнаружения имитатора все компоненты (кроме антенны) размещались под электромагнитным экраном ВМІ-S-205-F 38×25×6 мм со съемной перфорированной крышкой. Внешний вид имитатора показан на рис. 7.



**Рис. 7.** Вид имитатора закладного радиоустройства, работающего на частоте 915 МГц, со стороны:  
*a* – антенны; *b* – элементов с экраном; *c* – элементов со снятым экраном  
**Fig. 7.** Appearance of the covert radio device simulator operating at 915 MHz:  
*a* – antenna side view; *b* – side view of the element with shield; *c* – side view of the element without shield

### Описание работы прототипа устройства, работающего по методу резонансно-рефлектометрической локации

Настройка прототипа устройства заключалась в максимизации разницы амплитуд на входе приемника при внесении имитатора в зону действия локатора и при его отсутствии. Процесс настройки представлен в виде диаграмм на рис. 8. Значения переменных, при которых разница амплитуд максимальна, фиксируются и переносятся в рабочую программу макета.



**Рис. 8.** Диаграммы, показывающие амплитуду сигнала:  
*a* – на входе приемника при отсутствии имитатора; *b* – при внесении имитатора в зону действия локатора  
**Fig. 8.** Diagrams showing the signal amplitude:  
*a* – at the receiver input without simulator; *b* – the same view with simulator

В результате экспериментов установлено, что при частоте дискретизации 20 МГц удается достичь полосы пропускания приемника 16 МГц. Также на основе данных по широкополосному синтезатору RFFC5071, используемому в HackRF One, и результатов экспериментов определенно, что время перестройки частоты в приемопередатчиках HackRF One составляет порядка 70 мкс.

На основе полученных данных выбран следующий алгоритм работы программы. Приемник перестраивается в заданном диапазоне частот с шагом центральной частоты 16 МГц. Одновременно с приемником перестраивается передатчик на частоту  $f_0 - 8$  МГц. Происходит пауза на 70 мкс, необходимая для перестройки трактов приемника и передатчика. После этого на протяжении 100 мкс передатчик излучает сигнал на заданной частоте, после чего перестраивается

с шагом 0,5 МГц. Происходят пауза 70 мкс и период излучения 100 мкс. Так продолжается, пока передатчик не перестроится на частоту  $f_0 + 8$  МГц. После излучения на этой частоте осуществляется синхронная перестройка частоты приемника и передатчика, и перестройка частоты передатчика продолжается в новом диапазоне полосы пропускания приемника по описанному выше алгоритму. Проведенный анализ показывает, что для сканирования устройством диапазона частот 300–3000 МГц необходимо около 0,8 с. Программная реализация алгоритма в среде GNU Radio представлена на рис. 9.

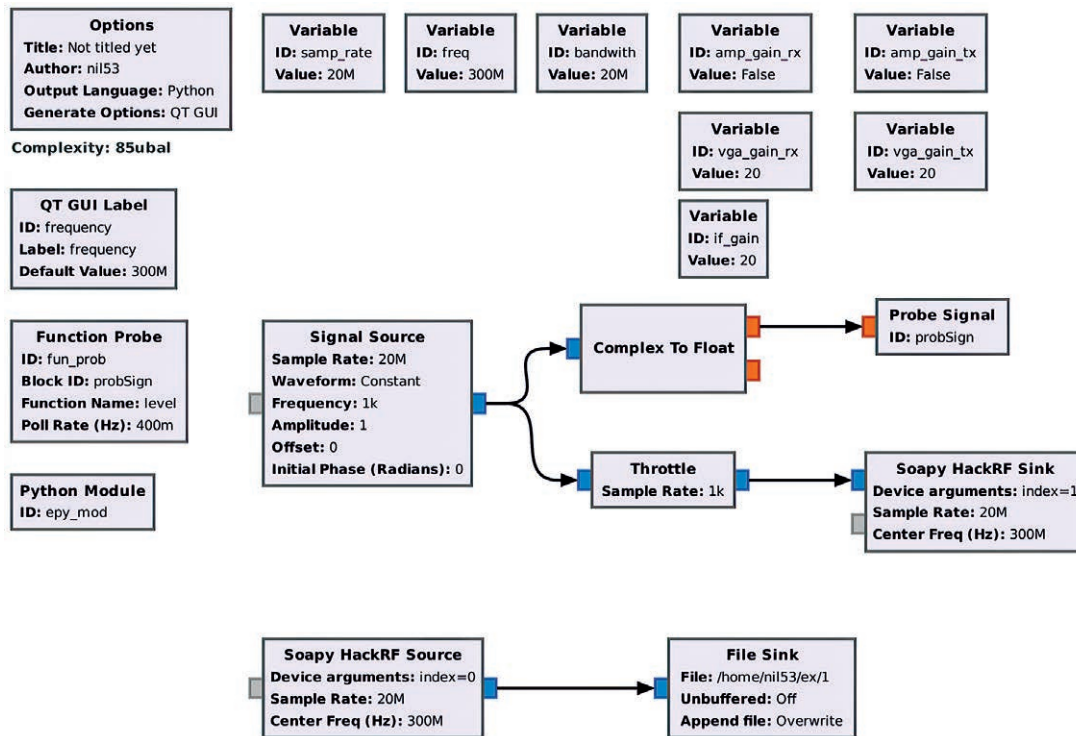


Рис. 9. Структурная схема рабочей части специального программного обеспечения в среде GNU Radio  
Fig. 9. The structure scheme of the working part of the special software in the GNU Radio environment

В рабочей части СПО все переменные задаются без возможности изменения их оператором. Частота приемника и передатчика меняется автоматически с помощью скрипта, написанного на языке Python. Скрипт смены частоты реализован в блоке Python module. Запускает скрипт совокупность блоков Function Probe, Complex to Float, Probe Signal.

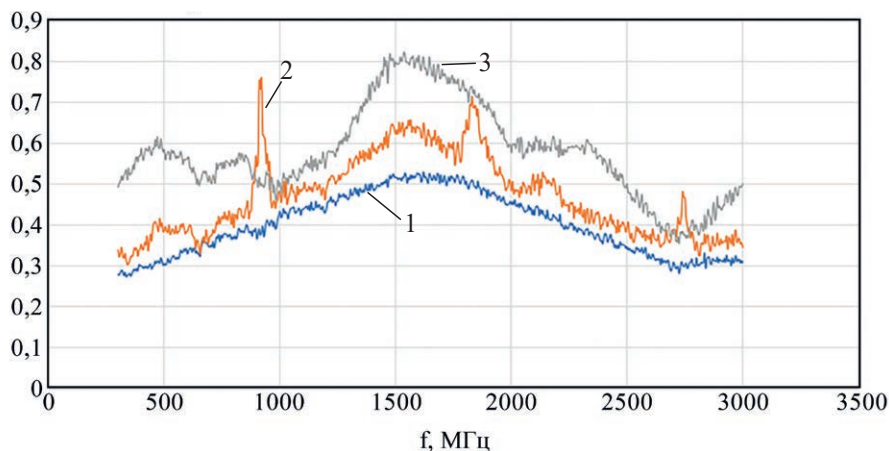
Как и в предыдущей части СПО, блок Signal Source служит для генерации сигнала с постоянной амплитудой, а Soapy HackRF Sink – для генерации ВЧ-колебания, с тем лишь отличием, что амплитудой блока Signal Source и частотой Soapy HackRF Sink управляет не оператор, а скрипт, находящийся в блоке Python module.

Приемная часть представлена блоками Soapy HackRF Source и File Sink. Soapy HackRF Source – как в предыдущей части СПО. Параметры усиления блока Soapy HackRF Source задаются по результатам работы программы настройки, частотой управляет скрипт, находящийся в блоке Python modul. Блок File Sink служит для сохранения 8-битных отсчетов I- и Q-компоненты принятого сигнала в файл на управляющей ПЭВМ.

Использование рабочей части СПО, представленной на рис. 9, позволило получить бинарные файлы со значениями амплитуды сигнала на различных частотах работы приемника и передатчика при наличии и отсутствии имитатора в зоне действия локатора.

Для обработки полученных данных и разметки их по частоте использовали специальную программу, написанную на языке Python. Эксперимент с внесением имитатора в зону действия устройства повторяли более 20 раз. Также более 20 раз выполняли сканирование при отсутствии в зоне действия имитатора. Проводили эксперимент с внесением в зону действия вещей, не имеющих в своем составе радиочастотных элементов, но с хорошими отражающими свойствами в исследуемом радиодиапазоне. Результаты экспериментов в виде диаграмм представлены на рис. 10.





**Рис. 10.** Диаграмма относительного уровня амплитуды принятого сигнала на различных частотах во время работы прототипа устройства: 1 – при отсутствии в области действия локатора посторонних устройств; 2 – при внесении в область действия имитатора закладного радиоустройства 915 МГц; 3 – при внесении в область действия локатора металлического предмета

**Fig. 10.** Diagram of the relative amplitude level of the received signal at different frequencies during the operation of the device prototype: 1 – in the absence of extraneous devices in operation zone of the locator; 2 – when introducing the simulator of convert radio device on 915 MHz into the zone; 3 – when introducing a metal object into the zone

Из рис. 10 видно, что амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) системы имеет неравномерный вид. Такая особенность АЧХ связана с параметрами антенн и радиоприемных, радиопередающих устройств, которые являются неоптимальными из-за применения широкополосных и универсальных антенных и радиоустройств.

При внесении в зону действия локатора имитатора закладного радиоустройства наблюдались ярко выраженные всплески амплитуды принятого сигнала на частотах в окрестностях рабочей частоты имитатора (915 МГц) и ее гармоник. Полученные результаты подтверждают сделанные выше предположения. При внесении в зону действия локатора металлического предмета уровень амплитуды принятого сигнала возрастал. Однако резких всплесков, как в случае с имитатором, не было отмечено. Данная особенность позволит проводить селекцию целей по методу резонансно-рефлектометрической локации.

### Заключение

1. Рассмотрены вопросы построения и проектирования устройств, работающих по методу резонансно-рефлектометрической локации для поиска закладных радиоустройств.

2. Эксперименты показали, что амплитуда отраженного сигнала от имитатора закладного радиоустройства имела ярко выраженные всплески на рабочей частоте имитатора и ее гармониках. В то же время при внесении других типов целей (металлических предметов, электронных устройств без антенного контура и т. д.) такого эффекта не наблюдалось. Полученный результат подтверждает возможность проводить селекцию отраженных сигналов от закладного радиоустройства. Установлено, что на определенных частотах отраженные сигналы от различного типа целей значительно отличаются по амплитуде. Планируется продолжить исследование пространства признаков отраженных сигналов, полученных при внесении разных типов целей, чтобы оценить возможность применения технологий машинного обучения для решения задачи распознавания отраженных сигналов от различных закладных радиоустройств.

3. Результаты испытаний подтвердили, что характеристики современных SDR-приемопередатчиков, такие как быстродействие, чувствительность и рабочая полоса частот, полностью соответствуют требованиям, предъявляемым для проектирования резонансно-рефлектометрического локатора.

### Список литературы

1. Торокин, А. А. Инженерно-техническая защита информации / А. А. Торокин. М.: Гелиос АРВ, 2005.
2. Bunevich, M. A. The Use of Search Technology Based on Resonant Reflectometric Location for the Detection of Embedded Radio Devices / M. A. Bunevich, A. I. Maiorov, I. A. Vrublevskii // Journal of Radio Electronics. 2021. No 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.12.5>.

3. Liu, B. Software-defined Radar and Waveforms for Studying Micro-Doppler Signatures / B. Liu, R. Chen // Proc. SPIE 9077, Radar Sensor Technology XVIII, 907718, 29 May 2014. <https://doi.org/10.1117/12.2051044>.
4. Майоров, А. И. Оптимизация зондирующего сигнала резонансно-рефлектометрической локации при работе в условиях промышленных помех / А. И. Майоров, М. А. Буневич, И. А. Врублевский // Технические средства защиты информации: тезисы докл. XX Белор.-Рос. науч.-техн. конф., 2022. 69 с.

### References

1. Torokin A. A. (2005) *Engineering and Technical Protection of Information*. Moscow, Gelios ARV Publ. (in Russian).
2. Bunevich M. A., Maiorov A. I., Vrublevskii I. A. (2021) The Use of Search Technology Based on Resonant Reflectometric Location for the Detection of Embedded Radio Devices. *Zhurnal Radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics]. (12). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.12.5>.
3. Liu B., Chen R. (2014) Software-defined Radar and Waveforms for Studying Micro-Doppler Signatures. *Proc. SPIE 9077, Radar Sensor Technology XVIII, 907718, 29 May 2014*. <https://doi.org/10.1117/12.2051044>.
4. Maiorov A. I., Bunevich M. A., Vrublevskii I. A. (2022) Optimization of the Probing Signal of Resonant Reflectometric Location when Operating under Conditions of Industrial Interference. *Tekhnicheskie Sredstva Zashchity Informacii: Tezisy Dokl. XX Belor.-Ros. Nauch.-Tekhn. Konf. = Technical Means of Information Protection: Abstracts of the XX Belarusian-Russian Scientific and Technical Conference*. 69 (in Russian).

### Вклад авторов

Буневич М. А. осуществил постановку задачи для проведения исследования, подготовил рукопись статьи.

Майоров А. И. провел исследования и визуализацию полученных результатов.

Врублевский И. А. осуществил контроль проводимых исследований, предоставил материалы и оборудование для измерений.

### Authors' contribution

Bunevich M. A. carried out the problem statement for the study, prepared the manuscript of the article.

Mayorov A. I. made samples and visualized the results obtained.

Vrublevsky I. A. supervised the research, provided materials and equipment for measurements.

### Сведения об авторах

**Буневич М. А.**, научный сотрудник лаборатории «Материалы и элементы электронной и сверхпроводниковой техники» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Майоров А. И.**, мл. научный сотрудник лаборатории «Материалы и элементы электронной и сверхпроводниковой техники» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Врублевский И. А.**, к. т. н., доцент, заведующий лабораторией «Материалы и элементы электронной и сверхпроводниковой техники» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел. +375 17 293-89-40  
E-mail: vrublevsky@bsuir.edu.by  
Врублевский Игорь Альфонсович

### Information about the authors

**Bunevich M. A.**, Researcher at the Laboratory “Materials and Components of Electronics and Superconducting Equipment” of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Mayorov A. I.**, Junior Researcher at the Laboratory “Materials and Components of Electronics and Superconducting Equipment” of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Vrublevsky I. A.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Laboratory “Materials and Components of Electronics and Superconducting Equipment” of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel. +375 17 293-89-40  
E-mail: vrublevsky@bsuir.edu.by  
Vrublevsky Igor Alphonsovich