



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.8.10>

УДК: 621.396.62

СИГНАЛЬНАЯ АЛГОРИТМИСТИКА ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОГО МОДУЛЯ РАДИОМОНИТОРИНГА С ЧАСТОТНО-СКАНИРУЮЩЕЙ РАЗВЕРТКОЙ

А.К. Никашин, А.С. Корчагин, Ю.А. Полевода, М.С. Костин

«МИРЭА - Российский технологический университет»
119454, Москва, проспект Вернадского, д. 78

Статья поступила в редакцию 6 июня 2023 г.

Аннотация. В работе представлен анализ научно-практической разработки программно-конфигурируемого модуля радиомониторинга на базе тюнера RTL2832U в среде Simulink с целью сканирования заданного ультракоротковолнового (УКВ) диапазона частот и выполнения автоматического поиска, подсчета и вывода количества станций вещания. Приведена структурная и принципиальная схема модернизированного SDR-приемного (Software Defined Radio) устройства с включением балансного смесителя, расширяющего частотный диапазон SDR-приемника с 1,8 ГГц до 4,6 ГГц. Разработан алгоритм управления программной архитектуры сканирующего модуля радиомониторинга, выполняющий поиск радиосигналов в заданной полосе обзора, расчетную оценку спектральной мощности радиосигналов, подсчет числа обнаруженных радиоканалов.

Ключевые слова: радиомониторинг, радиочастотное сканирование, полоса обзора, SDR-технологии, сигнальная алгоритмистика, тюнер RTL2832U, помехоустойчивость, интерференционные помехи.

Автор для переписки: Полевода Юрий Александрович, polevoda@mirea.ru

Введение

Пространственное уплотнение радиочастотного эфира в УКВ-диапазоне, в т.ч. обусловленное увеличением спектральной плотности каналов цифрового телерадиовещания, беспроводных стандартов скоростной передачи данных, а также телеуправления беспилотными средствами, гаджетами и иными автономными радиосистемами, служит одной из причин формирования перекрестных и интерференционных помех, что приводит к неустойчивому режиму работы приемопередающих систем в заданной геолокации [1]. Одним из методов контроля помехоустойчивости при взаимном функционировании средств радиосвязи, устройств дистанционного радиоуправления и телеметрии, а также независимого анализа радиочастотной обстановки является автоматизированный радиомониторинг со следящим шаговым сканированием. При этом современные системы радиомониторинга имеют ряд обязательных к исполнению радиотехнических требований, таких как усовершенствование технологий программно-аппаратной реализации алгоритмов сканирования в заданной полосе обзора, эффективное распознавание типов модуляции принимаемых сигналов, повышение чувствительности и скорости при одновременном расширении полосы обнаружения за счет использования многоканального режима сканирования и т.д. [1].

Сигнальный радиомониторинг, как правило, состоит из трех основных этапов: сканирование – поисковый или мгновенный радиоконтроль трафика, а также пространственного уплотнения (по распределению спектральной плотности мощности) радиоэфира в широком диапазоне частот; обнаружение – идентификация и анализ новых каналов радиоизлучения; распознавание – определение типа модуляции сигналов связи и их декодирование [1].

В работе рассматривается создание программно-конфигурируемой архитектуры и алгоритма управления SDR-модулем поискового радиоприемника, построенного на базе цифрового тюнера RTL2832U, позволяющего выполнение автоматического сканирования и определения числа

радиоканалов в заданной спектральной полосе УКВ-диапазона с быстрым или средним радиообзором (для обнаружения кратковременных финитных сигналов в заданной полосе частот за один период или несколько временных проходов сканирования, соответственно), а также с медленным радиообзором (для обнаружения условно стационарных сигналов). При этом, использование поискового приемника с узконаправленной сверхширокополосной антенной линейной поляризации, обеспечивает его функционирование в пеленгационном режиме – возможностью определения направления радиосигнального излучения, а также анализа распределения электромагнитного поля в заданном пространстве от различных источников.

Обратимся к рассмотрению предложенной программной архитектуры, алгоритму управления SDR-модулем радиомониторинга, а также анализу экспериментальных данных, полученных при помощи построенного поискового радиомодуля УКВ-диапазона на базе тюнера RTL2832U в среде Simulink.

1. Описание архитектуры, построение визуально-графической модели и алгоритма управления SDR-модулем радиомониторинга

Для выполнения программного автоматического сканирования и определения числа радиоканалов в заданной спектральной полосе УКВ-диапазона проведем анализ модернизированного решения SDR-модуля с верхней границей частотного диапазона, расширенной до 4,6 ГГц на базе цифрового тюнера RTL2832U. Структурная схема SDR-приемника приведена на рис. 1.

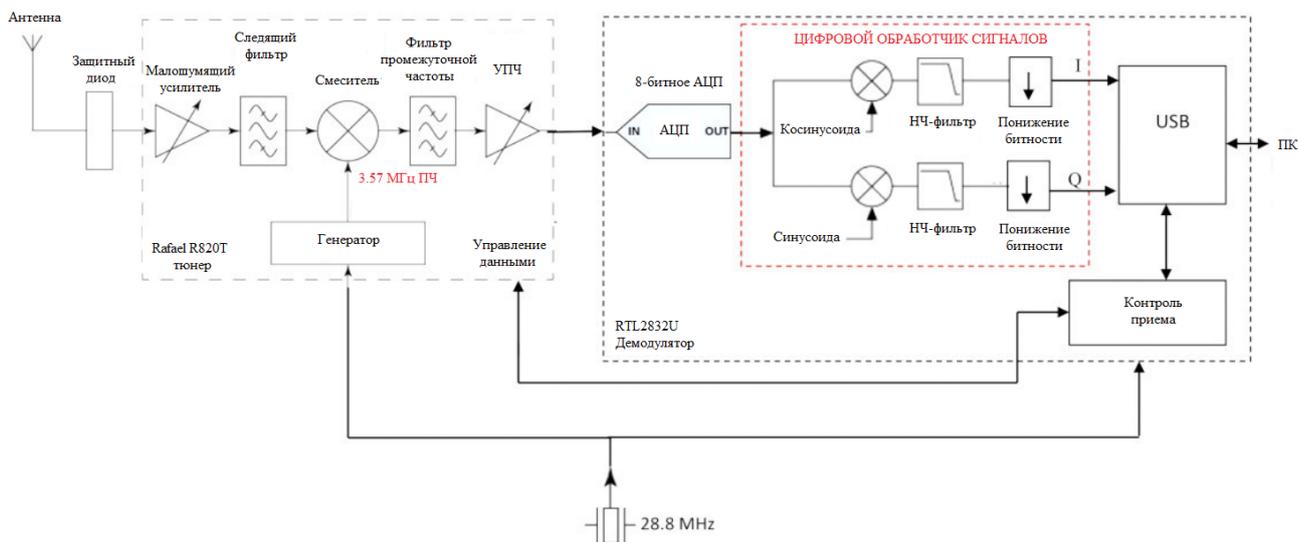


Рис. 1. Структурная схема SDR-приемника

Согласно структурной схеме (рис. 1), принимаемый антенной радиосигнал поступает на вход радиотракта, построенного на базе тюнера R820T с последующим преобразованием частоты в промежуточную и подавление фильтрами зеркальной частоты. Далее отфильтрованный сигнал поступает на 8-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), где происходит повторное программное преобразование частоты, при помощи квадратурного гетеродина, программно-реализуемого как скалярное произведение входного и опорного сигналов. В данном же случае, в качестве опорных сигналов используются два ортогональных сигнала. Последовательно включенные низкочастотные фильтры отсекают сигнал с удвоенной опорной частотой. На выход поступают два сигнала: I – синфазный и Q – квадратурный, с пониженным битрейтом для дальнейшей передачи по USB-шине. Квадратурный гетеродин, используемый в данной схеме, позволяет, исходя из теории цифровой обработки сигналов, имея только I и Q сигналы, декодировать сигнал с любым видом модуляции [2]. SDR-приемник работает на основе цифровой обработки сигналов, и позволяет получать и обрабатывать радиосигналы на основе программного обеспечения [1]. После АЦП полученный цифровой сигнал передается в компьютерное устройство через USB-интерфейс в среду Simulink, где с применением специализированной библиотеки Communications Toolbox происходит обработка сигналов на базе разработанной архитектуры.

Принципиальная схема разработанного SDR-приемника приведена на рис. 2.

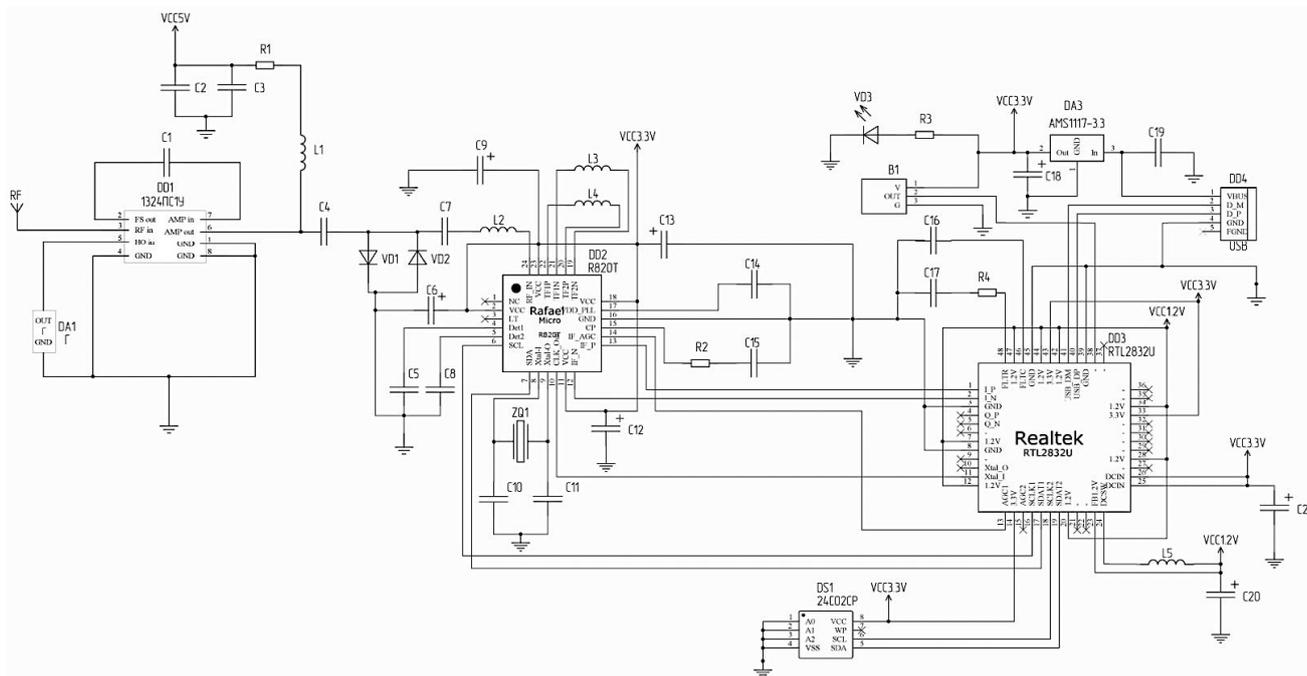


Рис. 2. Принципиальная схема разработанного SDR-приемника

Входная цепь SDR-приемника (рис. 2) состоит из двух диодов VD1 и VD2, номинальная емкость которых 2 пФ, конденсатора C3, емкостью 330 пФ, и катушки индуктивности L1, имеющую индуктивность в 8,2 нГн и входной емкости R820T равной 3 пФ. Разделительный конденсатор создает спад АЧХ ниже 10 МГц, катушка индуктивности L1 вместе со входной емкостью тюнера образуют фильтр нижних частот (ФНЧ) с частотой среза около 1.2 ГГц. В качестве генератора тактовой частоты микроконтроллера R820T выступает кварцевый генератор ZQ1, частота резонанса которого 28,8 МГц. Данный резонатор имеет два фильтрующих конденсатора C6 и C7 емкостью 27 пФ. Микроконтроллер подключен к источнику питания 3.3 В 150 мА. Каждый пин питания имеет фильтрацию, выполненную в виде танталовых конденсаторов C2, C5, C8 и C9 емкостью 0,47 мкФ. Устройство имеет слот памяти DS1, выполненный на микросхеме 24C02CP, с объемом памяти в 2 Кбайт, предназначенный для хранения данных о последних настройках. Оцифровка сигнала и дальнейшая подготовка к передаче по USB-шине DD3 осуществляется с помощью демодулятора DD2, выполненного на микросхеме RTL2832U. Данная

цифровая микросхема имеет две шины питания 3.3 В и 1.2 В, которые также имеют фильтрацию в виде катушки индуктивности L4 и конденсаторов C16 и C17. Для регуляции питания используется микросхема DA1 AMS1117, которая обеспечивает стабильное фиксированное напряжение в 3.3 В. Для дистанционного управления устройством в данной схеме присутствует датчик инфракрасного излучения В1 [3]. Для улучшения характеристик разрабатываемого устройства предлагается на входе схемы установить балансный смеситель (БС) Пульсар 1324ПС1У [4], в целях увеличения верхнего диапазона принимаемых частот до 4,6 ГГц. Широкополосный двойной БС с усилителем промежуточной частоты, обеспечивающим положительный коэффициент преобразования. БС согласован по входу и выходу волновым сопротивлением 50 Ом, требует стабилизированного питания 5 В, что обеспечивается USB-шиной. На данной схеме также установлен блок гетеродина DA1, не входящий в базовую конфигурацию устройства [4].

Визуально-графическая модель в среде Simulink приведена на рис. 3.

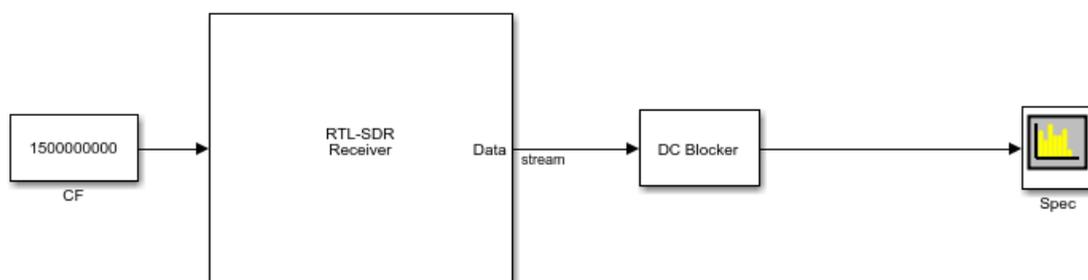


Рис. 3. Визуально-графическая модель приемного устройства

Блок RTL-SDR Receiver (рис. 3) имеет несколько параметров (рис. 4), из которых необходимыми для осуществления поставленной задачи являются: центральная частота, частота дискретизации и количество отсчетов в одном фрейме.

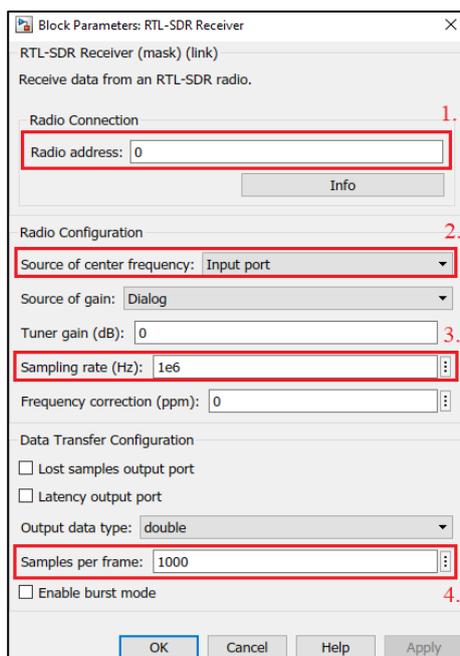


Рис. 4. Параметры блока RTL-SDR Receiver: 1 – Адрес радиоприемника; 2 – Установка центральной частоты приемника; 3 – Установка частоты дискретизации; 4 – Установка количества отсчетов в одном фрейме

Адрес радиоприемника – это адрес приемного устройства в системе. При наличии нескольких устройств, устанавливается соответствующий номер адреса подключенного радиомодуля. Центральная частота задается через внешний блок константы CF, подключенный к входному порту RTL-SDR блока. Установка частоты дискретизации производится в зависимости от заданной полосы обзора. Для удобства последующих расчетов частота дискретизации выбрана 1 МГц, количество отсчетов в одном фрейме 1000. Принятый сигнал в виде массива передается на блок DC Blocker, представляющий собой фильтр высоких частот и служащий для отсекающей постоянной составляющей, которая создает дополнительные помехи [7]. Далее обработанный массив поступает на вход анализатора спектра Sрес для трансляции данных на экран в виде водопадной и спектральной диаграмм.

Для управления архитектурой поискового радиомодуля необходимо осуществлять перестройку частоты в реальном времени. Для автоматической перестройки частоты разработан программный код в среде Matlab, управляющий схемой, считывающий данные с блока приема и выполняющий их обработку. Блок-схема алгоритма работы программного кода приведена на рис. 5.

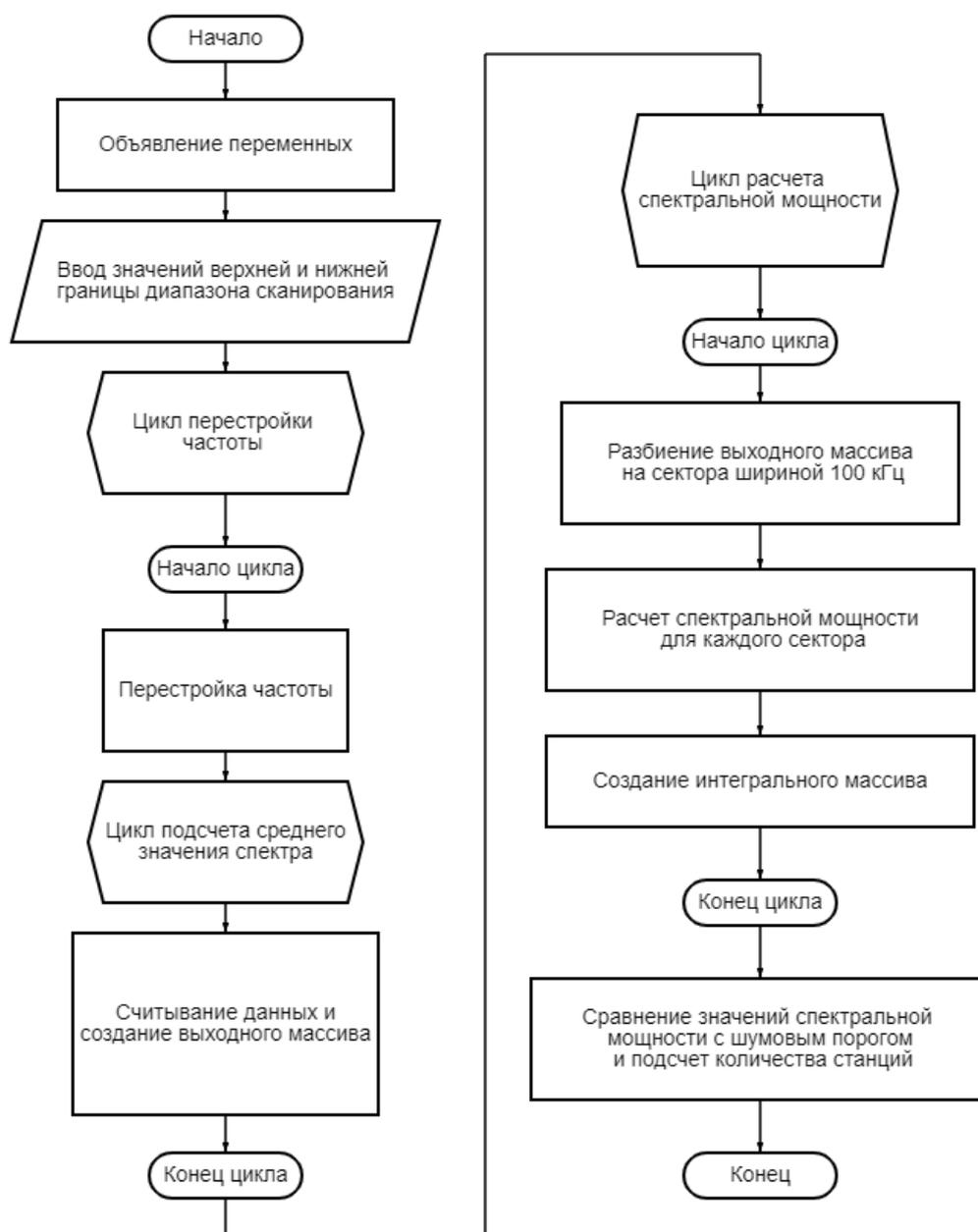


Рис. 5. Блок-схема кода программного управления сигнальной архитектурой SDR-устройства

Перестройка частоты сканирования осуществляется посредством изменения значения блока константы CF специальной командой «set_param». Данная команда позволяет принудительно изменять один или несколько параметров заданного объекта. Команда «set_param» имеет три входных аргумента: Object, Parameter Name и Value – имя объекта, параметр, который требуется изменить и значение, которое следует присвоить параметру соответственно (рис. 6).

```
set_param('const', 'value', 15);
```

Рис. 6. Команда «set_param» с заданными аргументами

Командой «set_param» можно запускать, ставить на паузу или останавливать симуляцию путем присвоения виртуальной модели определенного состояния, как это показано на рис. 7 [8].

```
1.set_param('model_name', 'SimulationComand', 'Start');
2.set_param('model_name', 'SimulationComand', 'Pause');
3.set_param('model_name', 'SimulationComand', 'Continue');
4.set_param('model_name', 'SimulationComand', 'Stop');
```

Рис. 7. Установка состояний симуляции: 1 – Запуск; 2 – Пауза; 3 – Продолжение симуляции после паузы; 4 – Полная остановка

Установка нижней и верхней частот полосы сканирования предоставляется пользователю через ввод с клавиатуры. Для предотвращения установки полосы сканирования выше максимальной или ниже минимальной частоты приема устройства, реализована проверка (рис. 8). При удовлетворении данного условия выполнение программы прекратится, и будет продемонстрировано диалоговое окно, оповещающее об ошибке.

```
if f_min<24
disp('error');
return
end
```

Рис. 8. Проверка полосы сканирования

Перестройка частоты осуществлена в виде цикла, где количество итераций численно соответствует увеличенной на единицу ширине полосы сканирования. Приняв частоту дискретизации, a , следовательно, и ширину фрейма, за 1 МГц, имеем возможность установить шаг перестройки равным единице.

Получения данных о сигналах реализовано путем получения данных со спектроанализатора во время симуляции и считывание информации непосредственно с дисплея. Данный метод обеспечивает гарантированное получение одного и того же количества отсчетов каждую итерацию перестройки. Для реализации данного метода, создана переменная объекта реального времени спектроанализатора, при помощи команды «get_param», которая позволяет

получить любой существующий параметр указанного объекта. Команда «get_param» имеет два входных аргумента: Object и Parameter Name [9].

Параметр «Spectrum» представляет собой массив отсчетов, соответствующих мощности спектра в каждой точке. Чтобы обратиться к параметру «Spectrum» с целью получения информации, выбранной переменной «output» присвоено значение, получаемое при помощи обращения к переменной «spectrum» командой «getSpectrumData», а затем выбран необходимый пакет данных командой «output=getSpectrumData(spectrum)». Данные операции, реализованные в программном коде, приведены на рис. 9 [5].

```
spectrum=get_param('sdr_f/SpectrumAnalyzer','ScopeConfiguration');
output=getSpectrumData(spectrum);
output=output.Spectrum;
```

Рис. 9. Команды получения данных о спектре

Так как мгновенные значения спектра в одном фрейме не до конца достоверно отражают настоящую картину, принято решение считывать один и тот же фрейм не менее 50 итераций. Меньшие значения давали сильный разброс по значениям спектра, большие же замедляли работу системы.

Для того, чтобы сохранить полученные данные о спектре для дальнейшей обработки их необходимо записать в массив. Эти действия производятся при помощи команды «out1=out1 + (output{1})'», где out1 – пустой массив, который каждую итерацию цикла перестройки заполняется данными о считываемом фрейме из окна спектроанализатора.

После получения данных рассчитывается спектральная мощность для подсчета количества станций в заданном диапазоне. Для выполнения этой задачи, полученный массив разделен на отдельные сектора, по 100 кГц каждый, и посчитан от каждого интеграл методом трапеций. Данный метод интегрирования реализуется с помощью исполнения команды «trapz()». Использование метода трапеций для расчета спектральной мощности приведено на рис. 10 [10].

```

for i=1:(f_max-f_min)
    for j=1:19
        intg(j+L)=trapz(U(1,x+h));
        h=h+76;
    end
    L=L+20;
end
end

```

Рис. 10. Оценочный расчет спектральной мощности при помощи метода трапеций

Далее производится подсчет количества станций, реализованный путем установки определенного порога мощности, ниже которого находится только шум. Таким образом, все, что превышает установленный порог, является обнаруженным каналом радиосвязи. Подсчет обнаруженных каналов выполняется с помощью оператора сравнения «if» (рис. 11).

```

if intg(i)>1.1
    kolvo=kolvo+1;
end

```

Рис. 11. Подсчет количества станций

2. УКВ-радиомониторинг, обработка и анализ полученных данных

Для проведения радиомониторинга и подсчета обнаруженных каналов радиосвязи в заданной полосе обзора, визуально-графическая модель приводится в действие по заданному циклу трансляционной командой «Run», выполняющей радиочастотное сканирование, а также анализ параметров радиоэфира, преобразуя данные с RTL-SDR приемника в спектр и водопадную диаграмму (рис. 13).

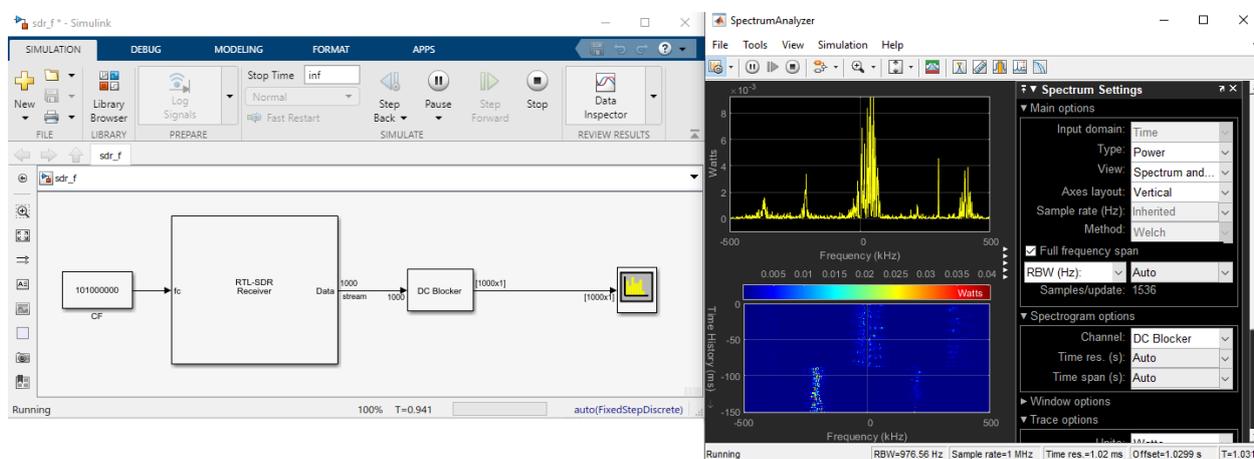


Рис. 13. Запуск моделирования в программной среде Simulink

После окончания цикла сканирования выводится сообщение о численности обнаруженных станций (рис. 14) и график рассчитанной спектральной мощности сигналов в заданном частотном диапазоне (рис. 15).

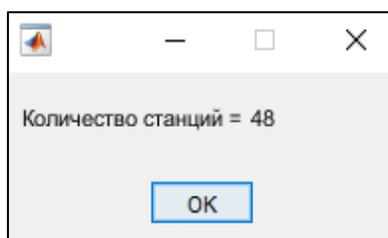


Рис. 14. Результат расчета числа обнаруженных радиостанций

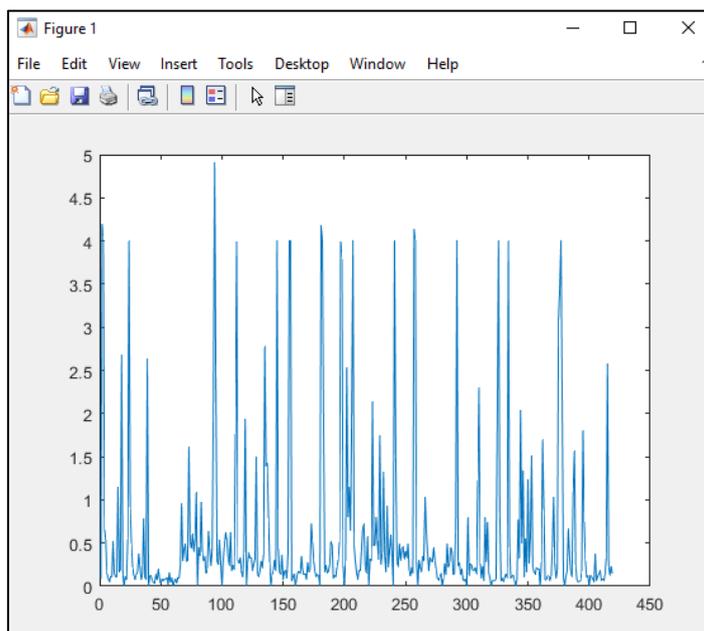


Рис. 15. Графическое изображение рассчитанной спектральной мощности

Для оценки воспроизводимости и адекватности работы алгоритма, эксперимент проводился за 8 циклов (рис. 16).

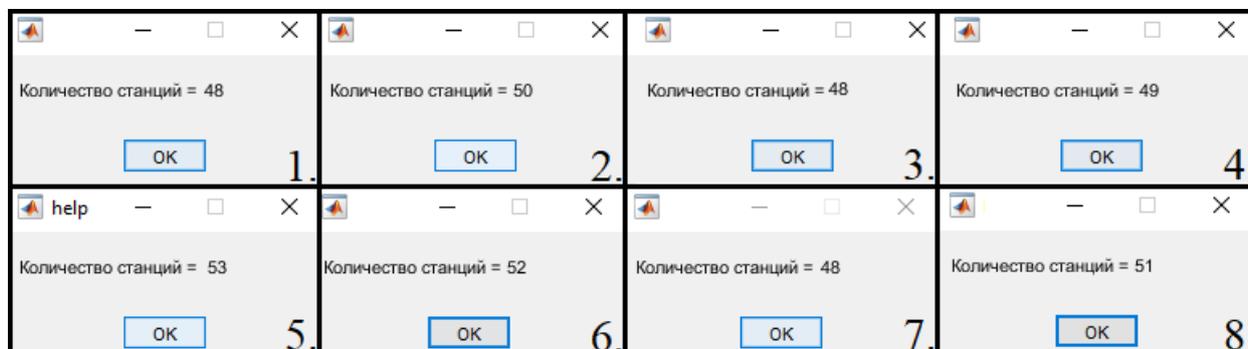


Рис. 16. Результаты эксперимента

Исходя из проведенных экспериментов, можно сделать вывод, что алгоритм обработки отличается воспроизводимостью не менее 0,87 при

отношении сигнал/шум 30 дБм, однако нуждается в дополнительной калибровке БС.

Для непрерывного сканирования полосы радиобзора необходимо ввести часть кода в бесконечный цикл «while», как показано на фрагменте листинга (рис. 17). В таком режиме система будет каждую итерацию сканирования выводить число зафиксированных радиоканалов.

```

while 1
    set_param('sdr_f', 'SimulationCommand', 'Start')
    for i = f_min:1:f_max
        set_param('sdr_f/CF', 'Value', num2str(i*k));
        out1=0;
        for j=1:50
            output=0;
            spectrum=get_param('sdr_f/SpectrumAnalyzer', 'ScopeConfiguration');
            output=getSpectrumData(spectrum);
            output=output.Spectrum;
            out1=out1 + (output{1})';
            pause(0.001)
        end
        U=[U, (out1/50)];
        pause(0.1)
    end
end

```

Рис. 17. Фрагмент листинга переключение режима сканирования с одиночного на непрерывный

Заключение

Анализ научно-практической разработки программно-конфигурируемого модуля радиомониторинга на базе тюнера RTL2832U показал возможность реализации системы сканирования радиоканалов в заданной полосе обзора в целях обеспечения контроля помехоустойчивости при взаимном функционировании средств радиосвязи, устройств дистанционного радиоуправления и телеметрии в УКВ-диапазоне, что необходимо для оценки радиочастотной обстановки в условиях влияния интерференционных (многолучевых) помех. Применение БС в схеме универсального SDR-модуля позволило расширить верхнюю границу радиосигнального обзора до 4,6 ГГц, обеспечив характеристики, соответствующие специализированным поисковым приемникам пеленгационного обнаружения. При этом разработанный алгоритм

управления SDR-модулем радиочастотного сканирования в режиме реального времени обеспечивает возможность идентификации каналов радиосвязи в заданной полосе обзора с воспроизводимостью не менее 0,87 при отношении сигнал/шум 30 дБм.

Литература

1. Костин М.С., Ярлыков А.Д. *Архитектурно-конфигурируемые SDR-технологии радиомониторинга и телеметрии: учебное пособие*. Москва, Вологда, Инфра-Инженерия. 2021. 148 с.
2. SDR-приемник своими руками. Как работает SDR [web]. *TECH-GEEK*. Дата обращения 10.04.2021). URL: <https://tech-geek.ru/sdr-receiver/>
3. Схема RTL-SDR | Blog RadioSpy [web]. *BLOG RADIOSPY*. Дата обращения: 12.04.2021. URL: <http://blog.radiospay.ru/obzory/sxema-rtl-sdr.html>
4. СВЧ МИС широкополосного двойного балансного смесителя с диапазоном рабочих частот 0,8 – 4,6 ГГц [web]. *Пульсар 1324ПС1У*. Дата обращения: 12.04.2021. URL: <http://www.gz-pulsar.ru/images/imagespulsar/centrproektirovania/1324ps1.pdf>
5. Receive data from RTL-SDR device – Simulink [web]. *Mathworks*. Дата обращения: 25.04.2021. URL: <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/rtlsdradio/ug/rtlsdrreceiver.html>
6. Generate constant value – Simulink [web]. *Mathworks*. Дата обращения: 25.04.2021. URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/constant.html>
7. Block DC component – Simulink [web]. *Mathworks*. Дата обращения: 25.04.2021. URL: <https://www.mathworks.com/help/dsp/ref/dcblocker.html>
8. Set system and block parameter values - MATLAB set_param [web]. *Mathworks*. Дата обращения: 25.04.2021. URL: https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/set_param.html
9. Get parameter names and values - MATLAB get_param [web]. *Mathworks*. Дата обращения: 08.05.2021. URL: https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/get_param.html

10. Интегрирование в Matlab [web]. *CodeTown.ru*. Дата обращения: 15.04.2021.

URL: <https://codetown.ru/matlab/integrirovanie/>

Для цитирования:

Никашин А.К., Корчагин А.С., Полевода Ю.А., Костин М.С. Сигнальная алгоритмистика программно-конфигурируемого модуля радиомониторинга с частотно-сканирующей разверткой. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.8.10>