Вестник Сыктывкарского университета.
Серия 1: Математика. Механика. Информатика. 2023.
Выпуск 2 (47)
Bulletin of Syktyvkar University.
Series 1: Mathematics. Mechanics. Informatics. 2023; 2 (47)

Научная статья

УДК 517.9, 539.3
https://doi.org/10.34130/1992-2752_2023_2_56

О ПРИМЕНЕНИИ УСТРОЙСТВ SDR В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ВУЗА

Владимир Александрович Устюгов[1], **Иван Иванович Лавреш**[1], **Юрий Николаевич Истомин**[1], **Павел Андреевич Макаров**[2]
[1]Сыктывкарский государственный
университет им. Питирима Сорокина, kib@syktsu.ru
[2]ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, makarovpa@ipm.komisc.ru

Аннотация. В статье рассмотрены принципы работы современных программно конфигурируемых радиоприемников (software defined radio, SDR). Интерес к таким устройствам обусловлен невысокой стоимостью определенных моделей, а также широким спектром задач по поиску и цифровой обработке электромагнитных сигналов в контексте технической защиты информации, исследования распространения цифровых и аналоговых сигналов в городской среде, построения новых цифровых систем связи. Рассмотрены конкретные примеры определяемых сигналов и программный инструментарий для разработки конфигураций радиоприемника в контексте обучения студентов технических специальностей.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, программно-управляемое радио

Для цитирования: Устюгов В. А., Лавреш И. И., Истомин Ю. Н., Макаров П. А. О применении устройств SDR в образовательном процессе для технических специальностей вуза // *Вестник Сыктывкарского*

© Устюгов В. А., Лавреш И. И., Истомин Ю. Н., Макаров П. А., 2023.

университета. Сер. 1: Математика. Механика. Информатика. 2023. Вып. 2 (47). С. 56–68. https://doi.org/10.34130/1992-2752_2023_2_56

Article

The use of SDR devices in the educational process for technical specialties of universities

Vladimir A. Ustyugov[1], Ivan I. Lavresh[1], Yuriy N. Istomin[1], Pavel A. Makarov[2]
[1]Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, kib@syktsu.ru
[2]Federal Research Centre Komi Science Centre, Ural Branch, RAS, makarovpa@ipm.komisc.ru

Abstract. The article deals with the principles of modern software defined radio (SDR). Interest in such devices is due to the low cost of certain models, as well as a wide range of tasks in the search and digital processing of electromagnetic signals in the context of technical protection of information, the study of the spread of digital and analog signals in urban environments, construction of new digital communication systems. Specific examples of defined signals and software tools for developing radio receiver configurations are considered.

Keywords: digital signal processing, software-defined radio

For citation: Ustyugov V. A., Lavresh I. I., Istomin Yu. N., Makarov P. A. The use of SDR devices in the educational process for technical specialties of universities. *Vestnik Syktyvkarskogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Mekhanika. Informatika* [Bulletin of Syktyvkar University, Series 1: Mathematics. Mechanics. Informatics], 2023, no 2 (47), pp. 56–68. https://doi.org/10.34130/1992-2752_2023_2_56

1. Введение

В настоящее время развитие беспроводных систем связи диктует необходимость разработки и развития инструментов для изучения, контроля (мониторинга) и администрирования беспроводных сетей.

Важной особенностью беспроводных сетей является их существенный разброс по территориальному охвату. Существуют так называемые персональные беспроводные сети (технологии группы Bluetooth,

пространственный охват до 10 м), микролокальные беспроводные сети (например, строящиеся на чипах компании Nordic Semiconductors, позволяющие строить сети с охватом до десятков метров), ячеистые сети ZigBee, «обычные» локальные беспроводные сети Wi-Fi (охват до десятков метров), сети уровня муниципалитета (технология LoRa), глобальные сети операторов сотовой и спутниковой связи [1; 2].

Отметим, что широкий ассортимент сетевых беспроводных технологий обусловливает богатые возможности для построения несанкционированных каналов передачи данных. В связи с этим естественным образом возникает задача обнаружения таких каналов (и дальнейшей их блокировки).

Особенно подчеркнем бурное развитие технологий Индустрии 4.0 и интернета вещей (работающих в том числе с использованием вышеперечисленных технологий), с которыми связаны новые задачи администрирования и защиты информационных систем от несанкционированного вмешательства.

Также с использованием SDR можно проводить и фундаментальные исследования, например в области распространения цифровых радиосигналов в городской среде, их взаимного влияния, исследование и разработку новых методов цифровой модуляции (манипуляции) и помехозащищенного кодирования [3].

Всё вышеперечисленное обусловливает растущий интерес к обозначенной сфере знания в контексте высшего образования (отдельно выделим потенциально заинтересованные укрупненные группы специальностей и направлений «10.00.00. Информационная безопасность» и «03.00.00. Физика и астрономия») и среди отдельных технических энтузиастов. Появляется специализированная литература (в том числе русскоязычные книги), выпускается специализированное программное и аппаратное обеспечение. Недорогим, но эффективным программно-аппаратным решением в этой области является программно-конфигурируемое радио (англ. software-defined radio), технология которого зародилась в первой половине 1980-х гг. На сегодняшний день электронная промышленность выпускает такие устройства стоимостью от 10 долларов США, что делает такие радиоприемники не только востребованными, но и доступными. Описанию принципа работы и сценариев использования, в том числе в образовательном процессе вуза, радиоприемников SDR посвящена настоящая статья.

2. Материалы и методы

2.1. Аппаратная платформа SDR

Сегодня в среде технических энтузиастов и инженеров-специалистов различных профилей (в том числе по информационной безопасности) набирают популярность программируемые цифровые радиоприемники (SDR, Software Defined Radio, в русскоязычном Интернете часто переводится как «программно-определяемое радио») [4; 5]. Яркими примерами SDR могут служить:

- известное устройство Flipper Zero, проект российских разработчиков, собравший на сайте Kickstarter 4.8 миллионов долларов за 30 дней;
- исключительно популярный (тысячи позиций на популярных торговых площадках) благодаря низкой стоимости, подключающийся к компьютеру в стиле Flash-накопителя прибор класса RTL-SDR (то есть построенный на базе микросхемы RTL2832U);
- приемно-передающее устройство с открытой принципиальной электрической схемой и программным обеспечением HackRF One, рассматриваемое в рамках настоящей работы. Внешний вид устройства приведен на рис. 1.

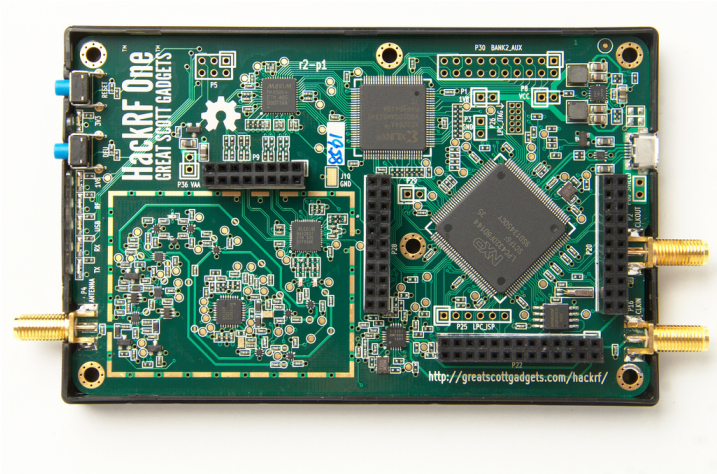

Рис. 1. Внешний вид печатной платы HackRF One (фото предоставлено разработчиком на официальной странице устройства https://github.com/greatscottgadgets/hackrf)

С точки зрения конструирования средств связи цифровые радиоприемники SDR представляют собой портативные подключаемые к персональному компьютеру аналого-цифровые преобразователи. Неотъемлемым компонентом такой радиосистемы является программное обеспечение персонального компьютера, средствами которого производятся стандартные операции формирования и обработки радиосигналов аналоговых и цифровых систем связи: модуляция/демодуляция, канальное кодирование/декодирование и другие [6].

Существуют программные конструкторы, такие как GnuRadio Companion, позволяющие формировать тракты (приемные и передающие) обработки сигналов в виде графических схем, в которых за различные стадии преобразований отвечают стандартные блоки с настраиваемыми параметрами, а также существует возможность соединения блоков в единый конвейер обработки.

В рамках настоящей работы мы рассматриваем радиоприемник HackRF One. Его основной разработчик Майкл Оссманн инициировал разработку (согласно истории проекта на официальном репозитории на https://github.com/greatscottgadgets/hackrf) в начале 2012 г., проект развивается до сих пор (на момент написания статьи последний коммит датирован 5 февраля 2023 г.).

Согласно официальной документации, прибор имеет следующие характеристики:

- устройство является полудуплексным приемопередатчиком;
- рабочие частоты: от 1 МГц до 6 ГГц;
- скорость работы АЦП: от 2 до 20 Мсемплов/с;
- разрешение АЦП 8 бит;
- интерфейс связи с персональным компьютером — USB, питание также по этой шине;
- SMA-разъем (импеданс 50 Ом) для подключения антенны;
- SMA-разъемы для входного и выходного сигналов синхронизации;
- микроконтроллер LPC43xx семейства ARM Cortex-M4;

- контактные колодки для подключения внешних устройств (среди них имеются входные и/или выходные линии интерфейсов I2S, SPI, I2C, UART, обычные цифровые порты ввода/вывода, АЦП, ЦАП, часы реального времени).

Таким образом, помимо применения HackRF One как непосредственно радиоприемника, с его помощью можно конструировать автономные измерительные/управляющие устройства в рамках практических занятий по дисциплинам, например, связанным с телекоммуникационными системами или технической защитой информации.

2.2. Программное обеспечение SDR

Как было указано ранее, программное обеспечение (ПО) является неотъемлемой частью радиосистемы SDR. Существующее ПО можно разделить на два класса:

- программные продукты, предназначенные для конечного пользователя, предоставляющие доступ к фиксированному множеству функций, таких как визуализация сигналов, декодирование сигналов популярных систем связи (например, демодуляция сигналов FM-радиостанций с последующим выводом информации на звуковую карту компьютера), фильтрация с определенным набором параметров;

- программные продукты, ориентированные на разработчиков, позволяющие самостоятельно строить тракты обработки сигналов произвольной сложности.

Примером программы первого класса может служить SDRSharp, поддерживающая работу с популярными устройствами SDR: Airspy, HackRF One, RTL-SDR. Внешний вид рабочего экрана программы приведен на рис. 2.

На рис. 2 можно видеть мгновенный слепок участка спектра излучения, поступающего на антенну радиоприемника, в данном случае представлена область частот 92—110 МГц, что соответствует участку работы городских вещательных радиостанций, передающих сигналы с частотной модуляцией (FM-радио). По изображению можно измерить мощность принимаемых сигналов и занимаемые ими полосы частот.

В нижней части экрана отображается так называемая «водопадная» диаграмма, представляющая собой развернутый во времени спектр, где

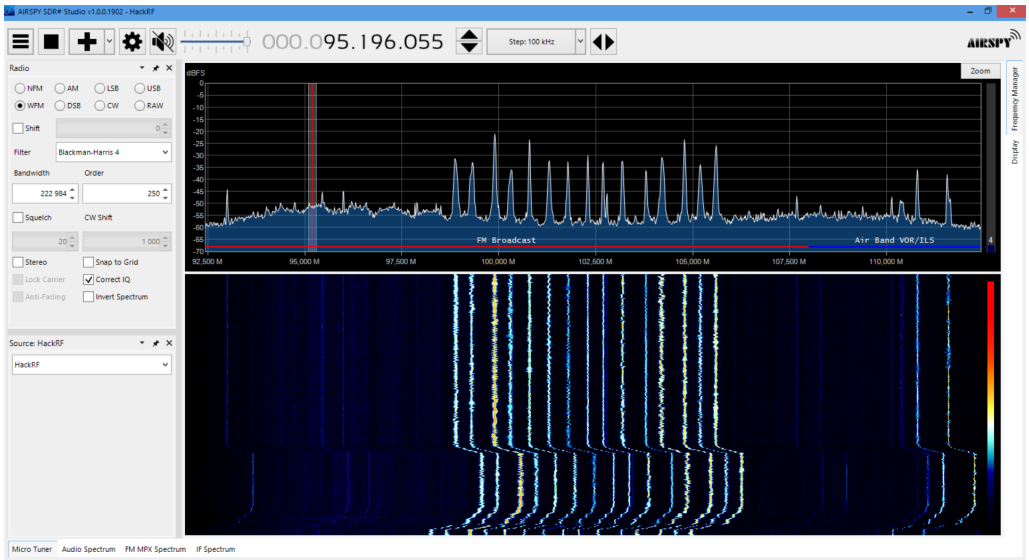

Рис. 2. Внешний вид рабочего экрана программы SDRSharp

амплитуда сигнала на малом частотном отрезке кодируется цветом. По такой диаграмме можно судить, например, о периодичности следования импульсов прерывистых сигналов.

Программное обеспечение SDRSharp имеет возможность применения нескольких программных демодуляторов для сигналов, что ярко отражает специфику концепции SDR, когда сигнал подвергается цифровой обработке со стороны программного обеспечения, а не электронных компонент. Это дает возможность без изменения электронной схемы устройства строить радиоприемные устройства, работающие, например, с разными типами модуляции сигналов. В данном случае доступна демодуляция сигналов с частотной, амплитудной (и, в частности, SSB) модуляцей, телеграфных сигналов. Из сигналов частотной модуляции выделяется и выводится на звуковую карту компьютера передаваемый аудиосигнал.

Отметим, что с использованием HackRF уверенно определяются следующие сигналы (разумеется, возможности прибора этими сигналами не ограничиваются):

- аудиодорожки телевизионных каналов;
- сигналы передатчиков базовых станций систем сотовой связи 2, 3, 4 поколений [7];

- сигналы точек доступа Wi-Fi, работающих в различных частотных диапазонах;
- сигналы различных систем связи, работающих на частоте 2.4 ГГц.

В этом контескте видится ценной возможность для студентов выйти за пределы исключительно теоретического изучения принципов работы цифровых систем связи (путем изучения научной литературы или компьютерного моделирования) и сопоставить измеренные параметры реальных сигналов (например, форму сигнала GMSK систем связи GSM, ширину занимаемой каналом связи полосы частот) со справочными данными.

Также существует специализированное программное обеспечение, позволяющее извлекать из потока данных систем сотовой связи 2-го поколения служебный канал, содержащий общую информацию о базовой станции (идентификатор, принадлежность к оператору сотовой связи и др.).

В качестве примера ПО второго класса приведем бесплатный программный комплекс GNU Radio. В составе комплекса поставляется программа GNU Radio Companion, позволяющая в графическом режиме разрабатывать тракты обработки радиосигналов. Интерфейс программы представлен на рис. 3.

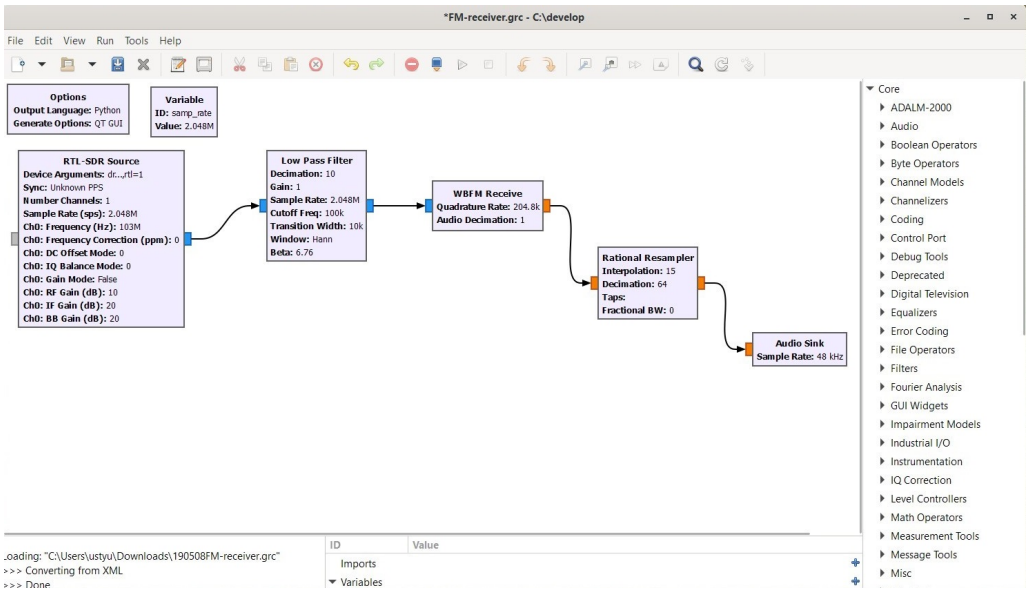

Рис. 3. Внешний вид рабочего экрана программы GNU Radio Companion

Тракт обработки сигнала формируется из связанных функциональных блоков, реализующих такие функции, как фильтрация, канальное кодирование, эквалайзинг, модуляция или демодуляция, скремблирование или дескремблирование и т. д. Функционал блоков реализован в основном на языках Python и C++, также предоставляется прикладной интерфейс программирования (application programming interface, API) для разработки программ на языке Python вне среды Companion.

В качестве примера на рис. 3 приведена программная схема радиоприемного устройства, работающего с FM-радиостанцией. Блок RTL-SDR Source связан с драйвером используемого SDR устройства и является источником потока отсчетов оцифрованного сигнала с антенны приемника. Можно видеть, что приемник настроен на частоту 103M, т. е. 103 МГц, входящую в диапазон частот работы городских FM-радиостанций. Сигнал из рассмотренного блока передается в блок Low Pass Filter (фильтр низких частот), отсекающий от сигнала ненужные части спектра. Следующий за ним блок WBFM Receive — демодулятор сигналов FM, в данном случае извлекающий из принятого сигнала аудиопоток.

Разработанные подобным образом схемы автоматически преобразуются в код на языке Python, фрагмент порожденного кода приведем ниже.

Листинг

Описание класса top_block

```
from gnuradio import qtgui

class top_block(gr.top_block, Qt.QWidget):

    def __init__(self):
        gr.top_block.__init__(self, "Top Block",
         catch_exceptions=True)
        Qt.QWidget.__init__(self)
        self.setWindowTitle("Top Block")

        ....
```

```
##################################################
# Blocks
##################################################

self.rtlsdr_source_0 = osmosdr.source(
    args="numchan=" + str(1) + " " + 'driver=rtlsdr,rtl=1'
)
self.rtlsdr_source_0.set_sample_rate(samp_rate)
self.rtlsdr_source_0.set_center_freq(103e6, 0)
self.rtlsdr_source_0.set_bandwidth(0, 0)

self.low_pass_filter_0 = filter.fir_filter_ccf(
    10,
    firdes.low_pass(
        1,
        samp_rate,
        100000,
        10000,
        window.WIN_HANN,
        6.76))
self.audio_sink_0 = audio.sink(48000, '', True)
self.analog_wfm_rcv_0 = analog.wfm_rcv(
 quad_rate=(samp_rate/10),
 audio_decimation=1,
)
```

Можно видеть, что работа с программными сущностями (такими, как источник сигнала RTL-SDR Source или фильтр низких частот) осуществляется предсказуемым образом в стиле объектно-ориентированного программирования. Отметим, что библиотеку GNU Radio можно использовать в разрабатываемых программах напрямую, не используя конструктор Companion.

4. Заключение

Исходя из вышесказанного можно отметить ключевые особенности, обусловливающие эффективность применения устройств SDR в учебном процессе для студентов, обучающихся по специальностям, входящим в укрупненные группы специальностей и направлений «10.00.00. Информационная безопасность» и «03.00.00. Физика и астрономия»:

- возможность удовлетворения интереса студентов в работе с современными физическими устройствами, выход за пределы исключительно теоретических обсуждений без использования дорогостоящего оборудования;
- возможность развития творческих способностей в технической области: используя устройства SDR с возможностью передачи сигналов, можно разрабатывать собственные системы цифровой связи;
- возможность построения технических экспериментов с действующими системами связи: GSM, 3G, LTE, Bluetooth, GPS и др.;
- возможность иллюстрации работы методов цифровой обработки сигналов;
- инструментарий конфигурирования (в частности, GnuRadio) позволяет строить тракты цифровой обработки сигналов в отрыве от SDR как такового;
- применение языка Python позволяет встраивать устройства SDR в проекты, посвященные технической защите информации или цифровой обработке сигналов, а также в бытовые проекты, использующие те или иные каналы цифровой связи.

Список источников

1. **Биккенин Р. Р., Чесноков М. Н.** Теория электрической связи. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 336 с.
2. **Гепко И. А.** Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. Киев: ЭКМО, 2009. 672 с.
3. **Скляр Б.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. 1104 с.
4. **Галкин В. А.** Основы программно-конфигурируемого радио. М.: Горячая линия – Телеком, 2020. 372 с.
5. **Фокин Г. А.** Технологии программно-конфигурируемого радио. М.: Горячая линия – Телеком, 2023. 316 с.

6. **Хелд Г.** Технологии передачи данных. СПб.: BHV, 2003. 720 с.

7. **Ратынский М. В.** Основы сотовой связи. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 2000. 248 с.

References

1. **Bikkenin R. R., Chesnokov M. N.** *Teoriya elektricheskoj svyazi* [The theory of electrical communication]. Moscow: Akademia, 2010. 336 p. (In Russ.)

2. **Gepko I. A.** *Sovremennye besprovodnye seti: sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Modern Wireless Networks: Status and Prospects of Development]. Kiev: «EKMO», 2009. 672 p. (In Russ.)

3. **Sklyar B.** *Cifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie* [Digital communication. Theoretical foundations and practical applications]. Moscow: Wiljams, 2007. 1104 p. (In Russ.)

4. **Galkin V. A.** *Osnovy programmno-konfiguriruemogo radio* [Fundamentals of reconfigurable radio]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2020. 372 p. (In Russ.)

5. **Fokin G. A.** *Texnologii programmno-konfiguriruemogo radio* [Software-configurable radio technologies]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2023. 316 p.(In Russ.)

6. **Kheld G.** *Texnologii peredachi dannyx* [Data transmission technologies]. SPb.: BHV, 2003. 720p. (In Russ.)

7. **Ratynskij M. V.** *Osnovy sotovoj svyazi* [Cellular basics]. Moscow: Radio i svyaz, 2000. 248p. (In Russ.)

Сведения об авторах / Information about authors
Устюгов Владимир Александрович / Vladimir A. Ustyugov
к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой информационной безопасности / Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of the Information Security Department

Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина / Pitirim Sorokin Syktyvkar State University
167001, Россия, г. Сыктывкар, Октябрьский пр., 55 / 167001, Russia, Syktyvkar, Oktyabrsky Ave., 55

Лавреш Иван Иванович / Ivan I. Lavresh
к.т.н., доцент кафедры информационной безопасности / Ph.D. in Technics, Associate Professor of the Information Security Department
Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина / Pitirim Sorokin Syktyvkar State University
167001, Россия, г. Сыктывкар, Октябрьский пр., 55 / 167001, Russia, Syktyvkar, Oktyabrsky Ave., 55

Истомин Юрий Николаевич / Yuriy N. Istomin
к.п.н., доцент кафедры технологического и профессионального образования / Ph.D. in Pedagogical sciences, Associate Professor of Technological and Professional Education Department
Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина / Pitirim Sorokin Syktyvkar State University
167001, Россия, г. Сыктывкар, Октябрьский пр., 55 / 167001, Russia, Syktyvkar, Oktyabrsky Ave., 55

Макаров Павел Андреевич / Pavel A. Makarov
к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник / Ph.D. in Physics and Mathematics, senior researcher
Физико-математический институт ФИЦ Коми НЦ УрО РАН / Institute of Physics and Mathematics, Federal Research Centre Komi Science Centre, Ural Branch, RAS
167001, Россия, г. Сыктывкар, ул. Оплеснина, 4 / 167001, Russia, Syktyvkar, Oplesnin str., 4

Статья поступила в редакцию / The article was submitted 06.02.2023
Одобрено после рецензирования / Approved after reviewing 10.02.2023
Принято к публикации / Accepted for publication 01.03.2023