

УДК 621.396

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-73-85

## Разработка стенда для анализа работы радиостанций в стандартах связи APCO P25, DMR и TETRA на основе широкополосных программно определяемых радиоприемников и программного инструментария GNU RADIO\*

**А. В. Коробейников**, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия  
**М. А. Бояршинов**, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Рассматриваются вопросы разработки инструментального комплекса (стенда) для анализа функционирования радиостанций в стандартах цифровой радиосвязи APCO P25, DMR и TETRA на основе технологий программно определяемых радиосистем (SDR) в голосовом режиме. В основу стенда положен широкополосный SDR-приемопередатчик HackRF One и открытый программный инструментарий GNU Radio. Совместно с SDR-приемопередатчиком HackRF One предложено использовать SDR TV-тюнер AstroMeta Digital TV Dongle в качестве доступного приемника. Предложена структура аппаратной и программной частей стенда. Программная реализация указанных стандартов цифровой радиосвязи выполнена на основе открытых библиотек проекта Osmocom – VoadBot OP25 и TETRA Live Monitor. При практической проверке функционирования стенда использовалась операционная система Linux Debian 10 и программный инструментарий GNU Radio 3.7. Приведены результаты практической апробации разработанного стенда как при взаимодействии в голосовом режиме с радиостанциями указанных стандартов радиосвязи, так и между SDR-передатчиком HackRF One и SDR TV-тюнером AstroMeta Digital TV Dongle. Для стандартов радиосвязи APCO P25 и DMR на разработанном стенде практически апробированы режимы приема и передачи речевого сигнала, а для стандарта радиосвязи TETRA – режимы сканирования радиосферы и приема речевого сигнала. В качестве подтверждения работоспособности стенда для перечисленных стандартов радиосвязи приведены экранные формы программ, реализующих указанные режимы взаимодействия между аппаратными компонентами стенда. Предлагаемая архитектура стенда позволяет расширять список поддерживаемых стандартов радиосвязи. Разработанный стенд может быть использован: 1) в учебных целях при изучении стандартов радиосвязи; 2) при разработке и отладке разрабатываемых систем радиосвязи; 3) для контрольного тестирования при выпуске радиосистем.

**Ключевые слова:** SDR, GNU Radio, Osmocom, HackRF One, AstroMeta Digital TV Dongle, APCO P25, DMR, TETRA.

### Введение

Разработка средств радиосвязи, совместимых с современными стандартами цифровой радиосвязи, является актуальной задачей [1]. Наиболее распространенными современными стандартами цифровой радиосвязи являются стандарты APCO P25 [2] (<https://project25.org/>), DMR [3, 4] (<http://dmrassociation.org/>), TETRA [5, 6] (<https://tcca.info/>). По причине наличия целого ряда стандартов цифровой радиосвязи существуют попытки реализации радиостанций, поддерживающих несколько стандартов связи [7].

SDR (Software-defined radio, SDR, программно определяемая радиосистема) – это радиосистема, использующая программное обеспечение (ПО) в процессе формирования и обработки радиосигналов с заданными характеристиками [8]. Благодаря применению технологий SDR возможно достичь большей гибкости при коди-

ровании/декодировании радиосигналов по сравнению с аппаратными устройствами. Платформа SDR предоставляет широкие возможности по заданию параметров и режимов работы радиосистем.

При сложности функционирования и наличия большого числа режимов и параметров протоколов радиосвязи [9] существует потребность в инструментальных комплексах поддержки анализа работы радиостанций в стандартах цифровой радиосвязи [10, 11]. Такой комплекс может использоваться при изучении особенностей устройства стандартов связи и при проверке правильности функционирования (совместимости со стандартом) вновь разрабатываемых радиосистем.

Цель работы – создание стенда для анализа функционирования радиостанций в стандартах цифровой радиосвязи APCO P25, DMR и TETRA,

в котором в качестве аппаратной части будут использованы доступные SDR-приемопередатчики, а в качестве программной части – открытые библиотеки ПО.

Авторами статьи предлагается к использованию разработанный стенд для анализа работы радиостанций в стандарта цифровой радиосвязи APCO P25, DMR и TETRA основанный на технологии SDR. В качестве аппаратной части предлагается использовать недорогой широкополосный SDR-приемопередатчик HackRFOne [12, 13], а в качестве программной части – открытый инструментарий ПО GNU Radio [14, 15].

### Программное обеспечение SDR

#### *Программный инструментарий GNU Radio*

Работа с SDR производится с помощью специализированных программных инструментов. В качестве программной части радиосистемы была выбрана наиболее популярная на данный момент для применения в SDR библиотека ПО GNU Radio [14, 15] (<https://www.gnuradio.org/>).

GNU Radio – это набор инструментов на основе открытого ПО, который предоставляет блоки обработки сигналов для реализации SDR. GNU Radio может использоваться с внешним радиочастотным оборудованием для создания SDR или без оборудования в имитационной среде. GNU Radio широко используется в любительской, академической и коммерческой среде для поддержки как ис-

следований беспроводной связи, так и реальных радиосистем.

Программа GNU Radio Companion предоставляет графический интерфейс пользователя к библиотекам GNU Radio. Порядок функционирования радиосистем задается путем создания потоковой диаграммы в формате grc-файла (GNU Radio Companion Flow Graph File). Потоковая диаграмма представляет собой серию блоков обработки сигналов, соединенных вместе и описывающих таким образом поток операций над сигналами. После проверки правильности сформированной диаграммы необходимо компилировать grc-файл. В результате компиляции формируется файл, содержащий программу на языке Python или C++, которую возможно выполнять в пользовательской SDR отдельно от среды GNU Radio Companion. (Пример интерфейса программы GNU Radio Companion представлен на рис. 12.)

Ядро ПО GNU Radio разработано на языке C++, а многие пользовательские инструменты, в том числе GNU Radio Companion, – на языке Python. Все исходные тексты программ проекта GNU Radio открыты.

### Аппаратное обеспечение SDR

Основные технические характеристики некоторых популярных SDR-приемопередатчиков представлены в таблице [16]: HackRF One (<https://greatscottgadgets.com/hackrf/one/>), Blade RF (<https://www.nuand.com/bladerf-1/>), USRPB 200 (<https://www.ettus.com/all-products/ub200-kit/>).

### Технические характеристики SDR-приемопередатчиков

#### Technical specification of the SDR transceivers

Характеристика	Модель SDR-приемопередатчика		
	HackRF One	Blade RF	USRPB 200
Диапазон рабочих частот	1 ГГц ... 6 ГГц	300 МГц ... 3.8 ГГц	70 МГц ... 6 ГГц
Диапазон частот дискретизации	до 20 МГц	до 40 МГц	до 56 МГц
Разрядность АЦП	8 бит	12 бит	12 бит
Интерфейс	USB 2.0	USB 3.0	USB 3.0
Ориентировочная стоимость	75 \$	400 \$	1 550 \$

#### *SDR-приемопередатчик HackRF One*

В качестве аппаратной части радиосистемы был выбран широкополосный SDR-приемопередатчик HackRF One [12, 13], внешний вид которого представлен на рисунке 1. Устройство является полудуплексным приемопередатчиком. Выбор SDR-приемопередатчика HackRF One для стенда обусловлен сочетанием относительной дешевизны и широкого спектра возможностей.

#### *SDR-приемник TV-тюнер Astro Meta Digital TV Dongle*

Для приема радиосигналов совместно с SDR-приемопередатчиком Hack RF One возможно использование простых и дешевых SDR-приемников. На данный момент наиболее популярным для таких целей является использование SDR-приемника TV-тюнера на основе микросхемы серии RTL2832U [17, 18]. В этом случае вместо двух устройств SDR-приемопередатчиков

HackRF One (приемник и передатчик) используется одно устройство SDR-приемопередатчик HackRF One (передатчик) и одно устройство SDR TV-тюнера

ний вид которого представлен на рис. 2. В качестве недостатка выбранного SDR TV-тюнера нужно отметить погрешность при задании частоты приема радиосигнала.



Рис. 1. Внешний вид SDR-приемопередатчика HackRF One

Fig. 1. Appearance of the HackRF One SDR transceiver

В составе разработанного стенда был использован SDR TV-тюнер AstroMeta Digital TV Dongle (DVB-T2, DVB-T, DVB-C) ([http://www.astrometa.com.tw/integrated\\_en.html](http://www.astrometa.com.tw/integrated_en.html)) на основе микросхемы серии RTL2832P, внеш-



Рис. 2. Внешний вид SDR TV-тюнера Astro Meta Digital TV Dongle

Fig. 2. Appearance of the AstroMeta Digital TV Dongle SDR TV Tuner

**Описание стенда**

На рисунках 3 и 4 представлены предлагаемые архитектуры аппаратной и программной частей предлагаемого стенда.

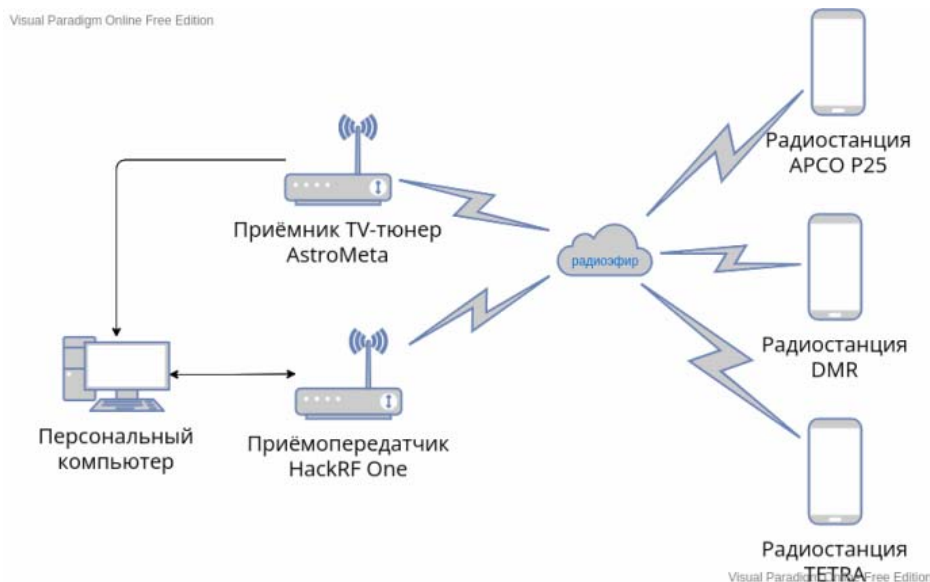


Рис. 3. Архитектура аппаратной части стенда

Fig. 3. Architecture of the bench hardware

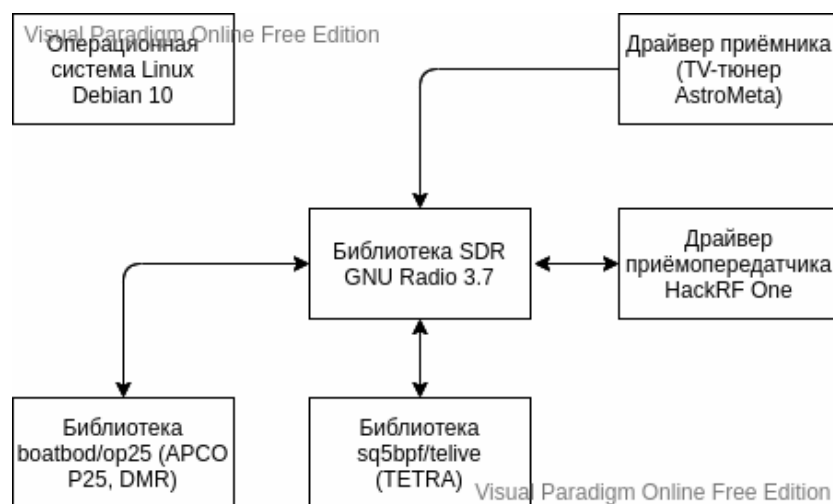


Рис. 4. Архитектура программной части стенда

Fig. 4. Architecture of the bench software

### Структура стенда

Предлагается следующий состав частей программно-аппаратного стенда.

1. SDR-приемопередатчик HackRF One – широкополосный SDR-приемопередатчик полудуплексного типа, подключаемый по интерфейсу USB.
2. SDR TV-тюнер AstroMeta Digital TV Dongle (DVB-T2, DVB-T, DVB-C) – широкополосный SDR-радиоприемник, подключаемый по интерфейсу USB.
3. Персональный компьютер.
4. Радиостанции, поддерживающие стандарты APCO P25, DMR, TETRA.
5. Операционная система (ОС) Linux Debian 10 (<https://www.debian.org/>).
6. Драйверы аппаратных устройств: SDR-приемопередатчик HackRF One и SDR TV-тюнера AstroMeta Digital TV Dongle.
7. Библиотека SDR GNU Radio 3.7.
8. Osmocom – открытый проект ПО, реализующий несколько стандартов мобильной связи, включая GSM, DECT, GPRS, TETRA, APCO P25, DMR и другие [19, 20] (<https://www.osmocom.org/>). Имеются в открытом доступе тексты программ на C++ и Python.

### Практические результаты

Разработанный инструментальный комплекс (стенд) является основной для реализации SDR,

совместимой с радиосистемами, поддерживающими радиосвязь на основе различных стандартов цифровой радиосвязи.

Приведем практические результаты реализации в рамках предлагаемого стенда цифровой радиосвязи по стандартам APCO P25, DMR, TETRA.

#### Стандарт APCO P25

Для реализации взаимодействия по стандарту APCO P25 выбрана библиотека BoatBod OP25 (boatbod/op25) (<https://github.com/boatbod/op25>), являющаяся частью проекта Osmocom (<https://www.osmocom.org/projects/op25>). Выполнена установка, компиляция и запуск прототипа ПО конвенционального режима стандарта APCO P25 (Phase 1) на стенде в варианте точка-точка. Проверены режимы приема и передачи при голосовом обмене на оборудовании: SDR-приемопередатчик HackRF One, SDR TV-тюнер AstroMeta Digital TV Dongle, радиостанция Motorola APX 2000 P25 Portable Radio ([https://www.motorolasolutions.com/en\\_xu/products/project-25-systems/project-25-radios/portable-radios/apx-2000.html](https://www.motorolasolutions.com/en_xu/products/project-25-systems/project-25-radios/portable-radios/apx-2000.html)).

На рисунке 5 показан пример работы программы передатчика APCO P25.

На рисунках 6 и 7 показаны пример работы и спектрограмма программы приемника APCO P25.

Команды запуска программы передатчика стандарта APCO P25:

```
$ cd ~/op25/op25/gr-op25_repeater/apps/tx
$ python2 dv_tx.py -p p25 --args hackrf -q 0 -Q 450000000 -f ~/fspeech.wav -r
```

Команды запуска программы приемника стандарта APCO P25:

```
$ cd ~/op25/op25/gr-op25_repeater/apps
$ python2 ./rx.py --args 'rtl' -N 'LNA:49' -s 2000000 -o 25000 -U -f 450.0204e6 -q -4
```

```

kav@kav-debian10: ~/op25/op25/gr-op25_repeater/apps/tx
Файл Правка Вид Поиск Терминал Справка
kav@kav-debian10:~$ cd ~/op25/op25/gr-op25_repeater/apps/tx
kav@kav-debian10:~/op25/op25/gr-op25_repeater/apps/tx$ python2 dv_tx.py -p p25
--args hackrf -q 0 -Q 450000000 -f ~/fspeech.wav -r
Multiprotocol Digital Voice TX (C) Copyright 2017 Max H. Parke KA1RBI
op25 audio::hostname_to_ip() getaddrinfo: Name or service not known
Project 25 IMBE Encoder/Decoder Fixed-Point implementation
Developed by Pavel Yazev E-mail: pyazev@gmail.com
Version 1.0 (c) Copyright 2009
This program comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY.
This is free software, and you are welcome to redistribute it
under certain conditions; see the file ``LICENSE'' for details.
#####rate_multiplier=rate_multiplier 4800
gr-osmosdr 0.1.4 (0.1.4) gnuradio 3.7.13.4
built-in sink types: uhd hackrf bladerf soapy redpitaya freesrp file
Using HackRF One with firmware 2018.01.1
gain: name: RF range: start 0 stop 14 step 14
gain: name: IF range: start 0 stop 47 step 1

```

Рис. 5. Пример работы программы передатчика APCO P25

Fig. 5. Instance of the APCO P25 transmitter program operation

```

kav@kav-debian10: ~/op25/op25/gr-op25_repeater/apps
Файл Правка Вид Поиск Терминал Справка
OP25
NAC 0x293 WACN 0x-1 SYSID 0x-1 0.000000/0.000000 tsbks 94293
python version detected: 2.7.16 (default, Oct 10 201
9, 22:02:15)
[GCC 8.3.0]
Allocating 15 zero-copy buffers

-200) Frequency 450.020400(0)
(f)req (h)old (s)kip (l)ock (W)list (B)list (q)uit (1-6)plot (.,<)>tune

```

Рис. 6. Пример работы программы приемника APCO P25

Fig. 6. Instance of the APCO P25 receiver program operation

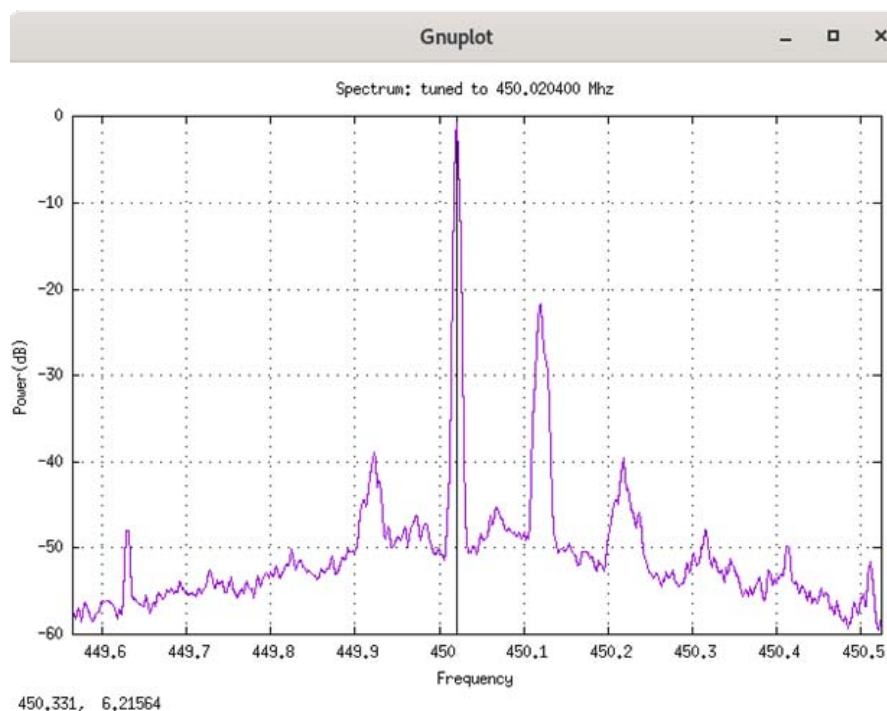


Рис. 7. Пример спектрограммы программы приемника APCO P25

Fig. 7. Instance of the APCO P25 receiver program spectrogram

#### Стандарт DMR

Для реализации взаимодействия по стандарту DMR выбрана библиотека BoatBod OP25 (boatbod/op25), являющаяся частью проекта Osmocom. В данной библиотеке имеется экспериментальная реализация стандарта DMR. Выполнена установка, компиляция и запуск прототипа программного обеспечения конвенцио-

нального режима стандарта DMR (Tier 2) на стендовом варианте точка-точка. Проверены режимы приема и передачи при голосовом обмене на оборудовании: SDR-приемопередатчик HackRF One, SDR TV-тюнер AstroMeta Digital TV Dongle, радиостанция Motorola DP1400 ([https://www.motorolasolutions.com/ru\\_ru/products/mototrbo/dp1400.html](https://www.motorolasolutions.com/ru_ru/products/mototrbo/dp1400.html)).

Команды запуска программы передатчика стандарта DMR:

```
$ cd ~/op25/op25/gr-op25_repeater/apps/tx
$ python2 dv_tx.py -p dmr --args hackrf -q -21 -Q 146000000 -c dmr-cfg.dat -f
~/fspeech.wav -F ~/fspeech.wav -r
```

Файл dmr-cfg.dat определяет параметры передатчика DMR.

Команды запуска программы приемника стандарта DMR и сервера воспроизведения аудио:

```
$ cd ~/op25/op25/gr-op25_repeater/apps
$ ./multi_rx.py -v 10 -c dmr_rtl_example.json
$ ./audio.py -u 23466
```

Файл dmr\_rtl\_example.json определяет параметры приемника DMR.

На рисунке 8 показан пример работы программы передатчика DMR, на рисунках 9 и 10 – пример работы и спектрограмма приемника DMR.

#### Стандарт TETRA

Для реализации режима выбрана библиотека TETRA Live Monitor (sq5bpf/telive) (<https://github.com/sq5bpf/telive>), являющаяся частью проекта Osmocom (<https://www.osmocom.org/projects/tetra>). Данная библиотека реализует толь-

ко режим приема для голосового обмена. Программного обеспечения, реализующего режим передачи по стандарту TETRA, в открытом доступе не обнаружено. Выполнена установка, компиляция и запуск прототипа ПО приемника в режиме прямой связи TETRA (DMO, Direct Mode Operation) на стенде в варианте точка-точка. Проверен режим сканирования эфира и приема при голосовом обмене на оборудовании: приемник – SDR TV-тюнер AstroMeta Digital TV Dongle; пе-

редатчик – радиостанция Motorola MXP600 Portable Radio ([https://www.motorolasolutions.com/en\\_xu/products/tetra/terminals/portable-terminals/mxp600-tetra-portable-radio.html](https://www.motorolasolutions.com/en_xu/products/tetra/terminals/portable-terminals/mxp600-tetra-portable-radio.html)).

На рисунке 11 представлена схема, раскрывающая взаимодействие программных модулей библиотеки TETRA Live Monitor. На схеме:

- gnuradio receiver – скрипт, выполняющий чтение со стороны аппаратной части SDR дис-

кредитированного радиосигнала с определенными параметрами;

- receiver\_ludr – скрипт, выполняющий демодуляцию и декодирование радиосигнала в соответствии со стандартом TETRA;

- telive – интерфейс библиотеки TETRA Live Monitor, который выполняет сканирование эфира с нужными параметрами и воспроизводит речевой сигнал.

```

kav@kav-debian10: ~/op25/op25/gr-op25_repeater/apps/tx
Файл Правка Вид Поиск Терминал Справка
kav@kav-debian10:~$ cd ~/op25/op25/gr-op25_repeater/apps/tx
kav@kav-debian10:~/op25/op25/gr-op25_repeater/apps/tx$ python2 dv_tx.py -p dmr
--args hackrf -q -21 -Q 146000000 -c dmr-cfg.dat -f ~/fspeech.wav -F ~/fspeech.
wav -r
Multiprotocol Digital Voice TX (C) Copyright 2017 Max H. Parke KA1RBI
Project 25 IMBE Encoder/Decoder Fixed-Point implementation
Developed by Pavel Yazev E-mail: pyazev@gmail.com
Version 1.0 (c) Copyright 2009
This program comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY.
This is free software, and you are welcome to redistribute it
under certain conditions; see the file `LICENSE' for details.
gr-osmosdr 0.1.4 (0.1.4) gnuradio 3.7.13.4
built-in sink types: uhd hackrf bladerf soapy redpitaya freesrp file
Using HackRF One with firmware 2018.01.1
gain: name: RF range: start 0 stop 14 step 14
gain: name: IF range: start 0 stop 47 step 1

```

Рис. 8. Пример работы программы передатчика DMR

Fig. 8. Instance of the DMR transmitter program operation

```

kav@kav-debian10: ~/op25/op25/gr-op25_repeater/apps
Файл Правка Вид Поиск Терминал Справка
05/30/22 14:39:12.019932 [-1] AMBE c8 11 1c 0f 6f 31 80 errs 6 err_rate 0.039937
05/30/22 14:39:12.021090 [-1] AMBE b8 2a d7 c6 ae 62 80 errs 3 err_rate 0.041132
05/30/22 14:39:12.022683 [-1] Slot(1), CC(0), BS VOICE
05/30/22 14:39:12.022719 [-1] AMBE c8 2d 20 26 6c 5a 00 errs 4 err_rate 0.032597
05/30/22 14:39:12.026322 [-1] AMBE b8 22 8c cf 8c 5d 00 errs 6 err_rate 0.037352
05/30/22 14:39:12.027296 [-1] AMBE c8 22 73 11 c9 ee 80 errs 6 err_rate 0.041868
05/30/22 14:39:12.028147 [-1] Slot(0), CC(0), PI(0), EMB lcss(0), qr_errs=0
05/30/22 14:39:12.028171 [-1] Slot(0), CC(0), BS VOICE
05/30/22 14:39:12.028186 [-1] AMBE c8 2d 20 27 fc 58 00 errs 2 err_rate 0.041203
05/30/22 14:39:12.029246 [-1] AMBE b8 26 bf cb a8 dd 00 errs 5 err_rate 0.044463
05/30/22 14:39:12.030801 [-1] AMBE c8 22 27 12 d9 a6 00 errs 5 err_rate 0.047560
05/30/22 14:39:12.032515 [-1] Slot(1), CC(0), BS VOICE
05/30/22 14:39:12.032684 [-1] AMBE b8 2a 43 2a 04 87 80 errs 1 err_rate 0.040839
05/30/22 14:39:12.033497 [-1] AMBE c8 27 d8 81 6c 10 80 errs 3 err_rate 0.041989
05/30/22 14:39:12.034308 [-1] AMBE c8 2a dd 10 c3 eb 00 errs 5 err_rate 0.045209
05/30/22 14:39:12.055705 [-2] rx_sync::sync_timeout: protocol NONE
05/30/22 14:39:12.137326 [-1] Slot(0), CC(0), BS VOICE
05/30/22 14:39:12.137388 [-1] AMBE b8 2a 43 62 00 84 80 errs 1 err_rate 0.046246
05/30/22 14:39:12.141415 [-1] AMBE cd 76 18 c7 7f 00 00 errs 6 err_rate 0.050318
05/30/22 14:39:12.142792 [-1] AMBE dd 5a 8d 1a 82 05 00 errs 9 err_rate 0.057378
05/30/22 14:39:12.143829 [-1] Slot(1), CC(0), BS VOICE
05/30/22 14:39:12.143953 [-1] AMBE 6e 63 84 5c 40 b1 80 errs 8 err_rate 0.051461
05/30/22 14:39:12.144912 [-1] AMBE c5 1d 1d 7a c8 d3 80 errs 9 err_rate 0.058464
05/30/22 14:39:12.145795 [-1] AMBE db 42 62 aa a0 ec 00 errs 8 err_rate 0.064053

```

Рис. 9. Пример работы программы приемника DMR

Fig. 9. Instance of the DMR receiver program operation

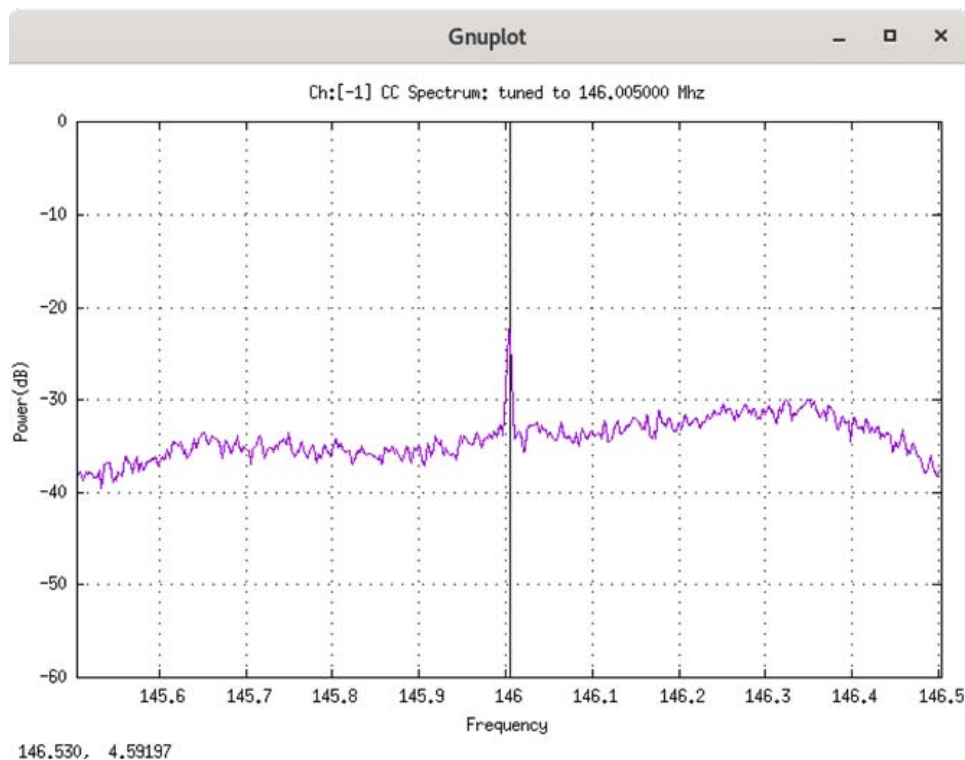


Рис. 10. Пример спектрограммы программы приемника DMR

Fig. 10. Instance of the DMR receiver program spectrogram

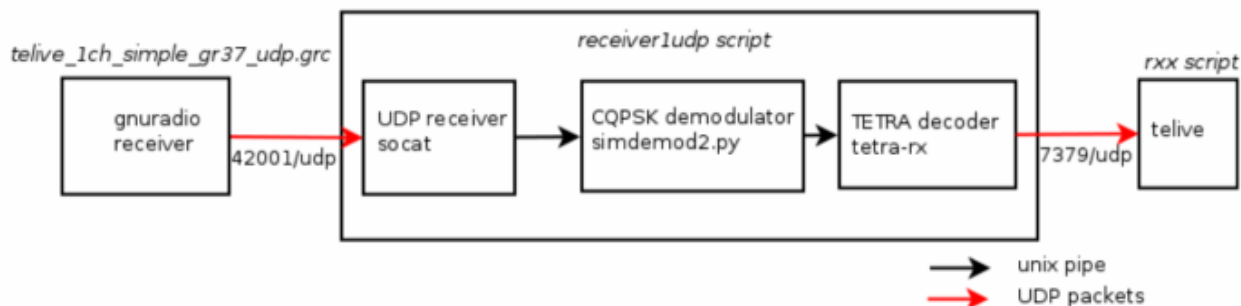


Рис. 11. Взаимодействие программных модулей библиотеки TETRA Live Monitor

Fig. 11. Interaction of software modules of the TETRA Live Monitor library

Команды запуска программы приемника стандарта TETRA:

```
$ cd ~/osmo-tetra-sq5bpf/src
$ ./receiver1udp 1
```

Команды запуска программы TETRA Live Monitor:

```
$ /usr/bin/xterm -font fixed -bg black -fg white -geometry 203x60
$ cd ~/telive
$ ./rx_xmlrpc_example
```

Для выполнения скрипта `gnuradio receiver`, в среде GNU Radio Companion необходимо скомпилировать потоковую диаграмму `grc`-файла: `telive_1ch_simple_gr37_udp_xmlrpc.grc`. Внешний вид данной потоковой диаграммы в среде GNU Radio Companion представлен на рисунке 12. Используется протокол вызова уда-

ленных процедур (XML-RPC), который позволяет управлять скриптом `gnuradio receiver` со стороны программы `telive`.

На рисунках 13, 14, 15 показаны примеры работы программ библиотеки TETRA Live Monitor на стенде в режиме прямой связи при голосовом обмене.



```

kav@kav-debian10: ~/telive
SQUIFF TETRA Monitor 1.9
0: 13: 26: 39: 52:
1: 14: 27: 40: 53:
2: 15: 28: 41: 54:
3: 16: 29: 42: 55:
4: 17: 30: 43: 56:
5: 18: 31: 44: 57:
6: 19: 32: 45: 58:
7: 20: 33: 46: 59:
8: 21: 34: 47: 60:
9: 22: 35: 48: 61:
10: 23: 36: 49: 62:
11: 24: 37: 50: 63:
12: 25: 38: 51:

Message window
Signal found
Signal lost
Signal found
Signal lost
Signal found
Signal lost
Signal found
Signal lost

```

Рис. 12. Пример работы программы `telive` (TETRA Live Monitor)

Fig. 12. Instance of the `telive` program operation (TETRA Live Monitor)

```

kav@kav-debian10: ~/osmo-tetra-sq5bpf/src
Файл Правка Вид Поиск Терминал Справка
### AFC: -0.009916
### AFC: 0.005014
### AFC: -0.002211
### AFC: -0.005169
### AFC: -0.008209
### AFC: -0.002153
### AFC: -0.190085
found SYNC training sequence in bit #3978
BURST
#### could not find successive burst training sequence
### AFC: -0.263774
### AFC: -0.213129
### AFC: -0.205641

```

Рис. 13. Пример работы программы `receiverludp` (TETRA Live Monitor)

Fig. 13. Instance of the `receiverludp` program operation (TETRA Live Monitor)

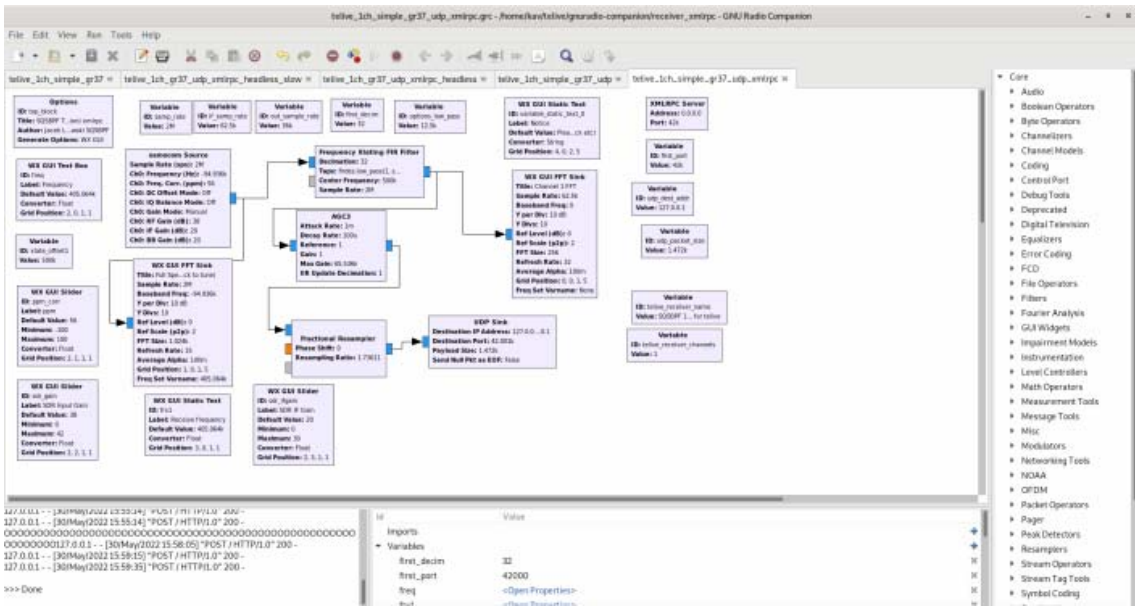


Рис. 14. Пример потоковой диаграммы (grc) в среде GNU Radio Companion  
Fig. 14. Instance of a flow graph (grc) in the GNU Radio Companion environment

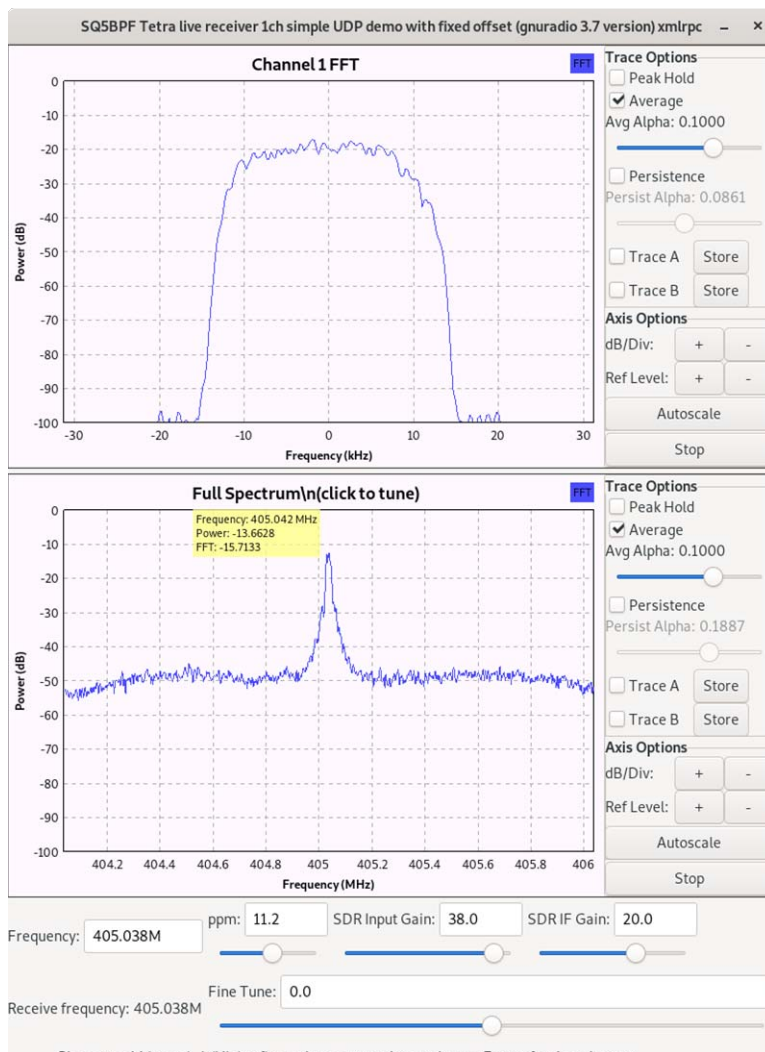


Рис. 15. Пример работы программы gnuradio receiver (TETRA Live Monitor)  
Fig. 15. Instance of the gnuradio receiver program operation (TETRA Live Monitor)

## Выводы

Предложен и разработан инструментальный комплекс (стенд) для исследования стандартов цифровой радиосвязи на основе технологий программно определяемых радиосистем. Стенд практически апробирован при взаимодействии с радиостанциями, работающими в стандартах APCO P25, DMR, TETRA. Стенд имеет доступную аппаратную часть и открытое ПО и может использоваться при взаимодействии с существующими промышленными радиостанциями или только в рамках взаимодействия SDR-приемопередатчиков. Стенд построен на основе развитой программной библиотеки GNU Radio, предоставляющей в открытом доступе тексты программ. Достоинством предлагаемой архитектуры является возможность расширения списка поддерживаемых стандартов радиосвязи.

Разработанный стенд может быть использован:

- 1) в учебных целях при изучении стандартов радиосвязи;
- 2) при разработке и отладке разрабатываемых систем радиосвязи;
- 3) для контрольного тестирования при выпуске радиосистем.

## Библиографические ссылки

1. *Ulema M.* Introduction to technologies and standards for Critical Communications. Fundamentals of Public Safety Networks and Critical Communications Systems, 2018, pp. 55-64. <https://doi.org/10.1002/9781119369554.ch4>
2. *Ulema M.* Project 25 (P25). Fundamentals of Public Safety Networks and Critical Communications Systems, 2018, pp. 65-85. <https://doi.org/10.1002/9781119369554.ch5>
3. *Ulema M.* Digital Mobile Radio (DMR). Fundamentals of Public Safety Networks and Critical Communications Systems, 2018, pp. 107-120. <https://doi.org/10.1002/9781119369554.ch7>
4. *Nikitin A., Manakov A., Kushpil I., Kostrominov A., Osminin A.* On the issue of using digital radio communications of the DMR standard to control the train traffic on Russian Railways. 2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2020, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ewdts50664.2020.9224707>
5. *Ulema M.* Terrestrial trunked radio (TETRA). Fundamentals of Public Safety Networks and Critical Communications Systems, 2018, pp. 87-106. <https://doi.org/10.1002/9781119369554.ch6>
6. *Svrzić S.* 25 years of the Tetra Standard and technology for contemporary digital trunking systems of Professional Mobile Radio Communications. *Vojnotehniki Glasnik*, 2021, no. 69 (2), pp. 426-460. <https://doi.org/10.5937/vojtehg69-29340>
7. *Savelli P., Savaux V., Desnos P., Zeineddine A., Kanj M., Delacourt C.* Flexible multi-standard digital front-end for LPWA Technologies, 2020. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.11961264>
8. *Kaidenko M. M., Roskoshnyi D. V.* Software defined radio in communications. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2019, pp. 227-238. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-16770-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-16770-7_11)
9. *Thangadurai N., Chetna Kh.* A Review on Recent Trends in Software Defined Radio Design and Applications. International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE), 2017, no. 6, pp. 1021-1025.
10. *Delahaye J.-P., Ribault A., Kirsch O.* CERTIF: conformity tests on software defined radio platforms. Wireless Innovation Forum Summit on Wireless Communications Technologies. La Jolla Amago, 2019.
11. *Roenvkov D.N., Plekhanov P.A.* On the assessment of the reliability of the Train Radio Communication Channel. Journal of Physics: Conference Series, 2021, no. 2131 (4), p. 042096. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/4/042096>
12. *Gummineni M., Polipalli T.R.* Implementation of reconfigurable transceiver using GNU Radio and hackrf one. Wireless Personal Communications, 2020, no. 112 (2), pp. 889-905. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07080-0>
13. *Martoyo I., Setiasabda P., Kanalebe H.Y., Uranus H.P., Pardede M.* Software defined radio for education: Spectrum analyzer, FM receiver/transmitter and GSM sniffer with hackrf one. 2018 2nd Borneo International Conference on Applied Mathematics and Engineering (BICAME), 2018, pp. 188-192. <https://doi.org/10.1109/bicame45512.2018.1570509150>
14. *Sheybani E.* Universal Software Radio Peripheral/GNU Radio-based implementation of a software-defined radio communication system. Strategic Innovations and Interdisciplinary Perspectives in Telecommunications and Networking, 2019, pp. 227-240. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-8188-8.ch012>
15. *Fuhrmann T., Farmbauer M., Niemetz M.* Integrating GNU radio into a virtual course about communication systems. 44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), 2021, pp. 1565-1570. <https://doi.org/10.23919/mipro52101.2021.9596700>
16. *Molla D., Badis H., George L., Berbineau M.* Software defined radio platforms for Wireless Technologies. IEEE Access, 2022, no. 10, pp. 26203-26229. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3154364>
17. *Aguilar-Gonzalez R., Prieto-Guerrero A., Ramos V., Santos-Luna E., Lopez-Benitez M.* A comparative study of RTL-SDR dongles from the perspective of the final consumer. 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2020, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/icce46568.2020.9043161>
18. *Yagoub R., Benadda B., Benaissa M., Taleb-Ahmed A., Lahouel A., Zane F.* Low cost SDR receiver implementation using RTL-SDR Dongle. Telecommunications and Radio Engineering, 2019, no. 78 (8), pp. 691-705. <https://doi.org/10.1615/telecomradeng.v78.i8.50>
19. *Falih M. D., Hafidudin, Ramadan D.N., Hadiyoso S.* Implementation of GPRS service on mobile network based OSMOCOM. 2019 IEEE Conference on Sustain-

able Utilization and Development in Engineering and Technologies (CSUDET), 2019, pp. 276-280. <https://doi.org/10.1109/csudet47057.2019.9214748>

20. Xia Y., Ma Z., Huang Z. Radar waveform recognition based on a two stream convolutional network and software defined radio. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2022, no. 16 (5), pp. 837-851. <https://doi.org/10.1049/rsn2.12224>

### References

1. Ulema M. Introduction to technologies and standards for Critical Communications. *Fundamentals of Public Safety Networks and Critical Communications Systems*, 2018, pp. 55-64. <https://doi.org/10.1002/9781119369554.ch4>

2. Ulema M. Project 25 (P25). *Fundamentals of Public Safety Networks and Critical Communications Systems*, 2018, pp. 65-85. <https://doi.org/10.1002/9781119369554.ch5>

3. Ulema M. Digital Mobile Radio (DMR). *Fundamentals of Public Safety Networks and Critical Communications Systems*, 2018, pp. 107-120. <https://doi.org/10.1002/9781119369554.ch7>

4. Nikitin A., Manakov A., Kushpil I., Kostrominov A., Osminin A. On the issue of using digital radio communications of the DMR standard to control the train traffic on Russian Railways. 2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2020, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ewdts50664.2020.9224707>

5. Ulema M. Terrestrial trunked radio (TETRA). *Fundamentals of Public Safety Networks and Critical Communications Systems*, 2018, pp. 87-106. <https://doi.org/10.1002/9781119369554.ch6>

6. Svrzić S. 25 years of the Tetra Standard and technology for contemporary digital trunking systems of Professional Mobile Radio Communications. *Vojnotehnicki Glasnik*, 2021, no. 69 (2), pp. 426-460. <https://doi.org/10.5937/vojtehg69-29340>

7. Savelli P., Savaux V., Desnos P., Zeineddine A., Kanj M., Delacourt C. Flexible multi-standard digital front-end for LPWA Technologies, 2020. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.11961264>

8. Kaidenko M.M., Roskoshnyi D.V. Software defined radio in communications. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2019, pp. 227-238. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-16770-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-16770-7_11)

9. Thangadurai N., & Chetna Kh. A Review on Recent Trends in Software Defined Radio Design and Applications. *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE)*, 2017, no. 6, pp. 1021-1025.

10. Delahaye J.-P., Ribault A., Kirsch O. CERTIF: conformity tests on software defined radio platforms. *Wireless Innovation Forum Summit on Wireless Communications Technologies*. La Jolla Amago, 2019.

11. Roenkov D.N., Plekhanov P.A. On the assessment of the reliability of the Train Radio Communication Channel. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 2131 (4), p. 042096. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/4/042096>

12. Gummineni M., Polipalli T.R. Implementation of reconfigurable transceiver using GNU Radio and hackrf one. *Wireless Personal Communications*, 2020, no. 112 (2), pp. 889-905. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07080-0>

13. Martoyo I., Setiasabda P., Kanalebe H.Ya., Uranus H.P., Pardede M. Software defined radio for education: Spectrum analyzer, FM receiver/transmitter and GSM sniffer with hackrf one. 2018 2nd Borneo International Conference on Applied Mathematics and Engineering (BICAME), 2018, pp. 188-192. <https://doi.org/10.1109/bicame45512.2018.1570509150>

14. Sheybani E. Universal Software Radio Peripheral/GNU Radio-based implementation of a software-defined radio communication system. *Strategic Innovations and Interdisciplinary Perspectives in Telecommunications and Networking*, 2019, pp. 227-240. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-8188-8.ch012>

15. Fuhrmann T., Farmbauer M., & Niemetz M. Integrating GNU radio into a virtual course about communication systems. 44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), 2021, pp. 1565-1570. <https://doi.org/10.23919/mipro52101.2021.9596700>

16. Molla D.M., Badis H., George L., Berbineau M. Software defined radio platforms for Wireless Technologies. *IEEE Access*, 2022, no. 10, pp. 26203-26229. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3154364>

17. Aguilar-Gonzalez R., Prieto-Guerrero A., Ramos V., Santos-Luna E., Lopez-Benitez M. A comparative study of RTL-SDR dongles from the perspective of the final consumer. 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2020, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/icce46568.2020.9043161>

18. Yagoub R., Benadda B., Benaissa M., Taleb-Ahmed A., Lahouel A., Zane F. Low cost SDR receiver implementation using RTL-SDR Dongle. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019, no. 78 (8), pp. 691-705. <https://doi.org/10.1615/telecomradeng.v78.i8.50>

19. Falih M.D., Hafidudin, Ramadan D.N., Hadiyoso S. Implementation of GPRS service on mobile network based OSMOCOM. 2019 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technologies (CSUDET), 2019, pp. 276-280. <https://doi.org/10.1109/csudet47057.2019.9214748>

20. Xia Y., Ma Z., Huang Z. Radar waveform recognition based on a two stream convolutional network and software defined radio. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2022, no. 16 (5), pp. 837-851. <https://doi.org/10.1049/rsn2.12224>

## Development of a Bench for Analyzing the Radio Station Operation in the APCO P25, DMR and TETRA Communication Standards Based on Broadband Software-Defined Radios and GNU Radio Software Toolkit

A.V. Korobeynikov, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

M.A. Boyarshinov, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*The article discusses the development of an instrument complex (bench, stand) for the study of digital radio communication standards: APCO P25, DMR and TETRA, based on software-defined radio systems (SDR) technologies in voice mode. The bench is based on the HackRF One broadband SDR transceiver and the GNU Radio open software toolkit. Along with the SDR transceiver HackRF One, it is proposed to use the SDR TV tuner AstroMeta Digital TV Dongle as an available receiver. The structure of the hardware and software parts of the bench is proposed. The software implementation of listed digital radio communication standards is based on the open libraries of the Osmocom project: the BoadBot OP25 and TETRA Live Monitor libraries. The operating system Linux Debian 10 and the software toolkit GNU Radio 3.7 were used for practical testing of the bench functioning. The practical testing results of the developed bench are presented both when interacting in voice mode with radio stations of the specified radio communication standards, and between the SDR transmitter HackRF One and the SDR TV tuner AstroMeta Digital TV Dongle. For the radio communication standards APCO P25 and DMR, the receiving and transmission modes of the speech signal have been practically tested on the developed bench, and for the radio communication standard TETRA, the modes of scanning the radio broadcast and receiving the speech signal have been tested. As a bench operability confirmation for the listed radio communication standards, the screenshots of programs implementing the specified modes of interaction between the bench hardware components are given. The proposed bench architecture allows to expand the list of supported radio standards. The developed bench can be used: 1) for educational purposes in the study of radio communication standards; 2) in the development and debugging of radio communication systems under development; 3) for control testing during the release of radio systems.*

**Keywords:** SDR, GNU Radio, Osmocom, HackRF One, AstroMeta Digital TV Dongle, APCO P25, DMR, TETRA.

Получено 24.10.2022

### Образец цитирования

Коробейников А. В., Бояришинов М. А. Разработка стенда для анализа работы радиостанций в стандартах связи APCO P25, DMR И TETRA на основе широкополосных программно определяемых радиоприемников и программного инструментария GNU RADIO // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 4. С. 73–85. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-73-85.

### For Citation

Korobeynikov A.V., Boyarshinov M.A. [Development of a Bench for Analyzing the Radio Station Operation in the APCO P25, DMR and TETRA Communication Standards Based on Broadband Software-Defined Radios and GNU Radio Software Toolkit]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 4, pp. 73-85 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-73-85.