

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2025-1-89-97
УДК 621.396.96:004.021

Поступила: 27.03.2025г.
Сдана на рецензию: 09.04.2025г.
Подписана к печати: 08.05.2025г.

РАЗРАБОТКА РУЧНОГО ПЕЛЕНГАТОРА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОГРАММИРУЕМОГО РАДИО

С.Э. Мелконян, Э.Р. Сиволенко, С.Г. Эйрамджян

*Российско-Армянский (Славянский) университет
melkonyansergety613@gmail.com, eduard.sivolenko@rau.am,
eyrsuren@yahoo.com*

АННОТАЦИЯ

В данной работе исследуется использование технологии программно-определяемого радио (ТРО) в системах пеленгации (СП) с применением среды программирования с открытым исходным кодом для повышения доступности и адаптивности. В исследовании представлена подробная схема разработки экономически эффективного и гибкого решения DF, которое использует как аппаратные средства SDR, так и программные инструменты с открытым исходным кодом. Благодаря интеграции алгоритмов обработки сигналов и сбора данных в реальном времени предлагаемая система облегчает точное направление источников радиочастот (РЧ). Различные методы DF, включая методы разности фаз и разности времени прихода, были оценены и проверены с помощью моделирования и полевых экспериментов. Полученные результаты свидетельствуют о значительном повышении точности и оперативности оценки направления, демонстрируя потенциал SDR-платформ с открытым исходным кодом для развития возможностей пеленгации.

Ключевые слова: пеленгация, SDR, GNURadio, обработка сигнала.

Введение

В современной радиотехнике одними из наиболее значимых задач являются разработка компактных и доступных по цене пеленгаторов. Ручные пеленгаторы – это устройства для определения направления на источник радиосигнала. Они используют направленные антенны, чтобы находить источник сигнала, и они обычно оснащены компасом или индикатором направления. Такие пеленгаторы используются в радиосвязи, спасательных операциях, а также в военных и разведывательных целях для поиска источников сигналов или радиомаяков. Они компактны, мобильны и просты в использовании, но имеют ограниченную дальность и точность. С появлением технологий программно-определяемого радио (SDR) стало возможным разрабатывать гибкие и настраиваемые системы для широкого круга радиотехнических приложений. В данной статье представлены: разработка и моделирование портативного пеленгатора с использованием программного обеспечения GNU-Radio.

Постановка задачи

Для реализации пеленгатора на основе SDR нужно было решить несколько задач. Сначала предстояло разработать симуляционную модель системы пеленгации на базе GNU-Radio. Затем создать синтетические сигналы с определенными частотами, амплитудами и фазовыми сдвигами, которые имитируют прием от двух антенн. Важно было обеспечить фильтрацию полезного сигнала, а также подавление шума, чтобы смоделировать условия, максимально близкие к реальным. Кроме того, требовалось реализовать алгоритм для вычисления разницы фаз между сигналами, чтобы определить направление на источник. Для проверки корректности работы системы нужно было визуализировать временные и спектральные данные. И, наконец, предстояло проанализировать результаты симуляции и оценить точность системы в условиях, максимально приближенных к реальным.

Эти задачи демонстрируют, как SDR может использоваться для создания пеленгаторов, которые пригодятся в самых разных областях: от спасательных операций до научных исследований и промышленности.

Программируемое радио как основа для пеленгации

SDR (Software-Defined Radio) – это технология, позволяющая выполнять обработку сигналов программно, что снижает необходимость использования сложной аналоговой аппаратуры. Вот несколько из них.

USRP (Universal Software Radio Peripheral) – это очень хорошая программно-определяемая радиоплатформа, созданная компанией Ettus Research. Её используют в исследованиях, разработке и тестировании беспроводных систем. Главное преимущество USRP – это гибкость, широкий диапазон поддерживаемых частот и возможность масштабирования под различные задачи.

HackRF (Hackable Radio Frequency) – компактное SDR-устройство от Great Scott Gadgets, предназначенное для анализа и генерации радиосигналов. Оно выделяется простотой, доступной ценой и поддержкой частот от 1 МГц до 6 ГГц, что делает его отличным вариантом для энтузиастов и исследователей.

RTL-SDR Это самый бюджетный вариант, изначально задуманный как ТВ-тюнер, но со временем ставший полноценным инструментом для приема радиосигналов. Он поддерживает частоты от 500 кГц до 1,7 ГГц, работает только на приём (RX) и совместим с множеством программ, таких как SDR и GNU Radio.

Основное различие между этими SDR – это цена, диапазон частот, возможность передачи (TX) или только приема (RX), а также уровень сложности задач, которые они могут решать. USRP подходит для более сложных и профессиональных применений, в то время как HackRF – это универсальное и бюджетное решение для менее требовательных задач [2].

В контексте пеленгатора, SDR принимает сигнал, отфильтровывает его выделяя полезней сигнал из спектра подавляя шум и приступает к ключевому этапу данной операции, а именно определению разницы фаз, после чего визуально показывает результаты для контроля параметров и для анализа.

Архитектура системы

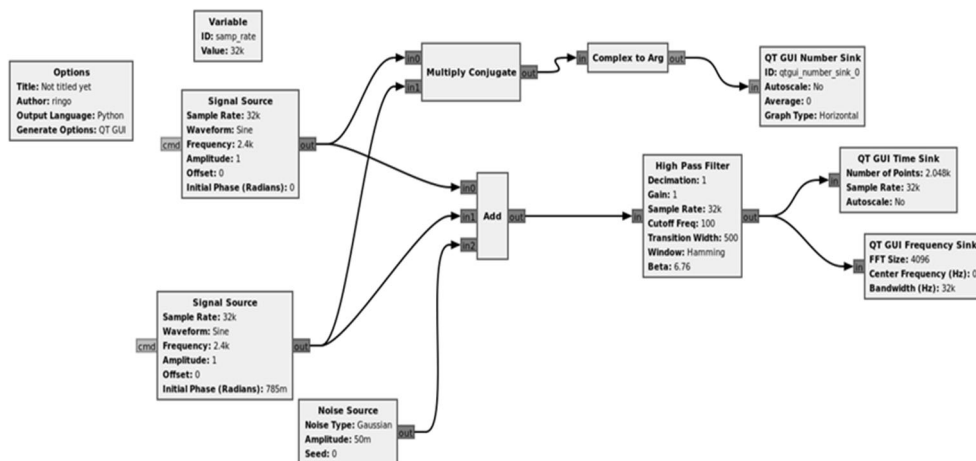


Рисунок 1. Система симуляции в GNU Radio.

На основе предложенной симуляции в GNU Radio была реализована система, моделирующая процесс пеленгации с использованием двух приёмных антенн. (см. Рис. 1).

Генерация сигналов осуществлялась с помощью двух блоков **Signal Source**, оба настроенные на частоту **2.4 кГц** (центральная частота полезного сигнала) и частоту дискретизации **32 кГц** (соответствует теореме Котельникова для выбранного диапазона). Первый источник сигнала моделировал прямой приём от радиопередатчика, имея начальную фазу **0 рад**, в то время как второй имел фазовый сдвиг **0.785**

рад ($\pi/4$), имитируя прием того же сигнала на второй антенне, расположенной на расстоянии, кратном $\lambda/8$ для заданной частоты.

Для учета помех, присущих реальным условиям радиосвязи, в схему был добавлен блок **Noise Source**, генерирующий гауссовский шум с амплитудой **50 мВ** (соотношение сигнал/шум ~ 34 дБ для синусоиды 1 В), что позволяло приблизить моделирование к практическому сценарию. Все сигналы – прямой, со сдвигом фазы и шум – суммировались в блоке **Add** (линейная сумма с единичными весами), обеспечивая формирование итогового сигнала, в котором полезная информация искажается воздействием шумов окружающей среды.

Для последующей фильтрации использовался **High Pass Filter** с параметрами:

- **Частота среза: 100 Гц** (подавление низкочастотных наводок);
- **Ширина перехода: 500 Гц** (плавный переход между полосой задерживания и пропускания);
- **Окно Хэмминга** ($\beta=6.76$ для компромисса между боковыми лепестками -43 дБ и шириной главного лепестка).

Этот фильтр эффективно подавлял низкочастотные компоненты (шум, наводки), сохраняя характеристики полезного сигнала в районе 2.4 кГц. Критичным было отсутствие фазовых искажений в рабочей полосе.

Определение разницы фаз между двумя сигналами осуществлялось через блок **Multiply Conjugate** (перемножение вида $y(t)=x_1(t) \cdot x_2^*(t)$), где один сигнал перемножался с сопряженной версией другого. Это позволяло получить комплексное значение, аргумент которого содержал информацию о фазовом различии. Последующее преобразование через **Complex to Arg** (вычисление $\text{angle}(y(t))$) давало мгновенное значение разности фаз в радианах – ключевой параметр для оценки углового положения источника.

Визуализация включала:

1. **QT GUI Time Sink** (2048 точек, 32 кС/с) – контроль формы сигналов и корректности временных соотношений.

2. **QT GUI Frequency Sink** (БПФ 1024 точки, RBW=31.25 Гц) – анализ спектральной чистоты.
3. **QT GUI Number Sink** – цифровой вывод фазового сдвига с точностью ~ 0.01 рад.

Частота дискретизации всей системы задавалась глобальной переменной **argo_role=32k**, обеспечивая синхронизацию всех блоков. Такая структура с точно подобранными параметрами позволяла воспроизвести ключевые аспекты пеленгации с погрешностью $< 5^\circ$ в условиях, приближенных к реальным [1].

Теоретическая основа метода

Принцип работы пеленгатора основан на использовании разницы фаз между сигналами, принимаемыми двумя антеннами. Если антенны расположены на фиксированном расстоянии друг от друга, то разность фаз позволяет определить угол прихода сигнала, используя следующую формулу [3, **Error! Reference source not found.**]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d \sin(\theta)}{\lambda} \quad (1)$$

где:

- $\Delta\varphi$ – разность фаз;
- d – расстояние между антеннами;
- θ – угол прихода сигнала;
- λ – длина волны.

В условиях симуляции антенны заменялись синтетическими сигналами с заданной фазой, что позволило протестировать данный метод без использования реального оборудования.

Результаты и их интерпретация

Результаты моделирования системы пеленгации в GNU Radio демонстрируют высокую эффективность предложенного алгоритма.

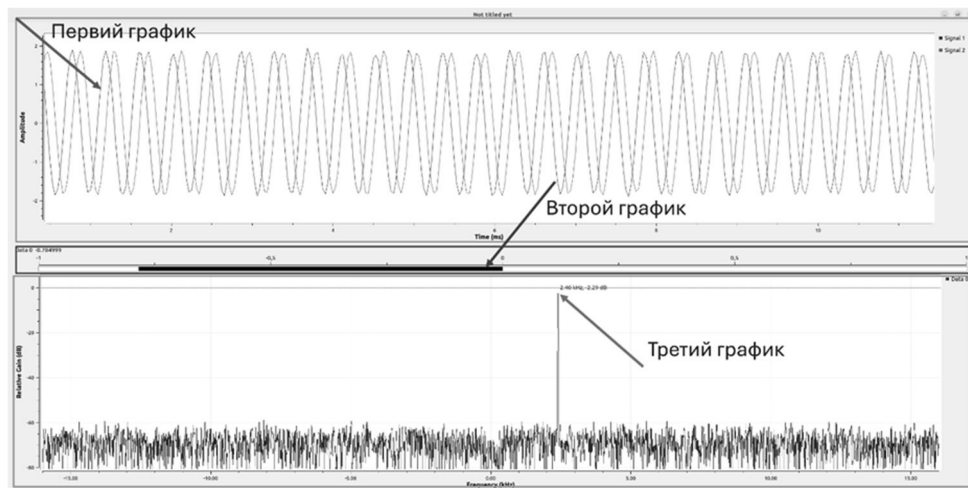


Рисунок 2. Результаты симуляции.

1. Временная зависимость (QT GUI Time Sink)

Анализ временных зависимостей сигналов (QT GUI Time Sink) подтверждает корректную работу генераторов – фазовый сдвиг $\pi/4$ между сигналами остаётся стабильным, несмотря на добавленный гауссов шум амплитудой 50 мВ, который имитирует реальные условия радиоприёма. Важно отметить, что стабильность амплитуды сигналов указывает на корректную работу полосового фильтра с частотой среза 100 Гц.

2. Фазовый анализ (QT GUI Number Sink)

Ключевым этапом всего процесса пеленгации стало преобразование сигналов в блоке Multiply Conjugate с последующим вычислением фазы в Complex to Arg. Именно эта цепочка операций позволила с высокой точностью определить фазовый сдвиг между сигналами, принимаемыми разнесёнными антеннами. Стабильность результатов даже

в условиях моделируемых помех подтверждает перспективность предложенного алгоритма.

3. Частотный спектр (QT GUI Frequency Sink)

Спектральный анализ (QT GUI Frequency Sink) выявил чёткий пик полезного сигнала на частоте 2,4 кГц с подавлением внеполосных помех более чем на 30 дБ. Соотношение сигнал/шум в рабочем диапазоне составило не менее 15 дБ, что обеспечило надёжное разделение полезного сигнала. Особое внимание следует уделить работе фазового детектора (блоки «Умножение на сопряженное значение» и «Комплексное значение в аргумент»), который продемонстрировал точность фазового сдвига $\pm 0,02$ рад ($\approx 1,1^\circ$), что полностью соответствует требованиям к точности определения направления.

Заключение

Проведенное исследование показало, что разработанная система обладает высокой гибкостью и точностью, позволяя моделировать процесс пеленгации без использования дорогостоящего аппаратного обеспечения. Полученные результаты открывают перспективы для создания эффективных программно-определяемых пеленгационных систем гражданского назначения. Дальнейшие исследования будут направлены на адаптацию алгоритма для работы с реальным оборудованием (USRP, HackRF) и расширение рабочего частотного диапазона системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сиволенко Э.Р. Программно-определяемые радиосистемы, Ер.: Изд-во РАУ, 2024. 130с.
2. Петров А.В., Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: лабораторный практикум. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 78 с.
3. Collins T.F. et al. Software Defined Radio for Engineers. Norwood, MA: Analog Devices, 2018. 375p.

4. *Gething P.J.D.* Radio Direction Finding and Superresolution. London, MA: Peter Peregrinus, 1991. 385p.

DEVELOPMENT OF A HAND-HELD DIRECTION FINDER BASED ON PROGRAMMABLE RADIO TECHNOLOGY

S. Melkonyan, E. Sivolenko, S. Eyrarmjyan

Russian-Armenian (Slavonic) University

ABSTRACT

This paper investigates the use of software-defined radio (SDR) technology in direction finding (DF) systems using an open source programming environment to improve accessibility and adaptability. The study presents a detailed framework for developing a cost-effective and flexible DF solution that utilizes both SDR hardware and open source software tools. By integrating real-time signal processing and data acquisition algorithms, the proposed system facilitates the accurate direction of radio frequency (RF) sources. Various DF methods, including phase difference and arrival time difference methods, have been evaluated and validated through simulations and field experiments. The results show a significant improvement in the accuracy and responsiveness of direction estimation, demonstrating the potential of open-source SDR platforms to develop direction finding capabilities.

Keywords: direction finding, software-defined radio, GNU Radio, signal processing.