

# ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.396.67

## СИНХРОНИЗАЦИЯ SDR-ПРИЕМНИКОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЕЛЕНГАЦИИ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

*Нгуен Ван Хай**к.т.н, Технический университет им. Ле Куи Дона,  
Социалистическая Республика Вьетнам**Нгуен Тьен Тхай**к.т.н, Технический университет им. Ле Куи Дона,  
Социалистическая Республика Вьетнам*

## SYNCHRONIZATION OF SDR-RECEIVERS FOR SOLVING THE PROBLEM OF DIRECTION FINDING OF RADIO EMISSION SOURCES

*Nguyen Van Hai**PhD, Le Quy Don Technical University, Ha Noi, Vietnam**Nguyen Tien Thai**PhD, Le Quy Don Technical University, Ha Noi, Vietnam**DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.94.1616*

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрен алгоритм синхронизации независимых SDR-приемников, предназначенных для пеленгации источников радиоизлучения. Реализовано устройство и проверен алгоритм синхронизации.

### ABSTRACT

The algorithm of synchronization of independent SDR-receivers intended for direction finding of radio emission sources is considered. The device has been implemented and the synchronization algorithm has been tested.

**Ключевые слова:** пеленгация, SDR-приемник, синхронизация.

**Key words:** Direction finding, SDR-receiver, synchronization.

### 1. Введение

Для решения задачи пеленгации источников радиоизлучения возможно использовать многоканальный приемник [1, 2]. Для обеспечения его работы необходимо синхронизировать каналы приемника. Потребность в создании недорого когерентного многоканального приемника, используемого в лаборатории, привела к идее использования нескольких дешевых программно-определяемый радиоприемник (SDR) на базе RTL2832u. Система приемников будет работать фазово-когерентной и предоставит пользователю доступ к нескольким радиоканалам. Эти когерентные приемники будут использованы в последующих алгоритмах обработки сигналов, требующих многоканальные данные, в том числе доступ к нескольким независимым радиоканалам одновременно.

В данной работе представлен модульный и доступный по цене когерентный многоканальный программно-определяемый радиоприемник для оценки направления прихода (DOA) сигналов. Разреженные массивы SDR-приемников могут достигать решения круг задач дорогостоящего массива, например, антенные решетки, с уменьшенным количеством элементов, что позволяют снижать требуемую структурную сложность разрабатываемого устройства. Кроме того, разреженные массивы SDR-приемников

способствуют значительному снижению стоимости, поскольку требуется меньше дорогостоящих входных каскадов RF-IF. Так же, представлены метод и схематическая реализация устройства синхронизации каналов.

### 2. Анализ литературы по теме исследования

Многоканальные когерентные приемопередатчики, основанные на коммерческих SDR-приемопередатчиках, обычно дороги для малобюджетных и лабораторных исследований [3]. В связи с этим для разработки многоканального приемника была идея его создания на основе недорого и легкодоступного приемника RTL-SDR. RTL-SDR, первоначально является тюнером USB DVB-T приемника, имеет квадратурный АЦП с частотой дискретизации до 2,56 МГц и 8-битным разрядом, небольшую полосу пропускания. С другой стороны, стоимость RTL-SDR в разы меньше по сравнению с платформами USRP или WARP [4], [5].

Разработанный многоканальный приемник позволяет реализовать многоканальные алгоритмы с большим количеством каналов (больше 4-х каналов), которые обычно доступны только в коммерческих SDR.

В области обработки сигналов массив датчиков позволяет разработать разные методы оценки направления прихода сигнала. Однако

разрешение по углу прихода сигнала и количество одновременно обнаруженных источников зависят от количества датчиков в массиве [6], [7].

RTL-SDR представляет собой архитектуру с низкой промежуточной частотой (ПЧ), состоящую из демодулятора RTL2832U и тюнера R820T/2. Хотя устройство выпускается с различными тюнерами от разных производителей, все из которых обычно называются RTL-SDR, предлагаемая конструкция работает только с моделями тюнеров R820T/2. Это связано с тем, что

тюнер R820T/2 позволяет отключить синтезатор частоты, который имеет решающее значение для синхронизации работы по фазе.

Как уже говорилось, многоканальный когерентный приемник основан на массиве приемников RTL-SDR, которые изначально являются отдельными модулями. Поэтому, приемники в многоканальной системе модифицированы для управления общим тактовым сигналом и подключены к эталонному генератору шума, как показано на рис. 1.



Рис.1. Структурная схема многоканального приемника на основе SDR-приемников

Основной целью работы является реализация устройства синхронизации каналов и эталонного генератора шума.

### 3. Устройство синхронизации, генератор шума

Насколько известно, первые успешные попытки достижения фазовой когерентности для нескольких RTL-SDR были представлены в работе над недорогим пассивным радаром [8]. При этом у одного из приемников был удален кристалл. Контакт входа тактирования этого приемника был подключен через емкостную связь к выходу тактирования кристалла ведущего приемника. Как только приемники синхронизировались от общего источника тактирования, их потоки также синхронизировались с общим опорным сигналом тактирования. Данный подход удовлетворен для массива из нескольких приемников (небольше 3), поскольку кристалл ведущего приемника не может

подавать необходимый ток для управления входной емкостью, возникающей из-за массива параллельных ведомых устройств без буферизации.

Для достижения большего числа подключения параллельных ведомых устройств был добавлен буфер выходного сигнала тактирования от главного кристалла с логическими инверторами серии 74 [9]. В его работе общий эталонный шумовой сигнал передавался через индуктивную связь на ведомые приемники, а на ведущий поступал напрямую.

Предлагаемая здесь конструкция продолжается в том же направлении, с отдельными генератором тактовых импульсов и эталонного генератора шума. Кристаллы всех SDR-приемников будут удалены и подключены к общему генератору тактовых импульсов. Концепция построения устройства синхронизации и генератора шума изображена на рис. 2.

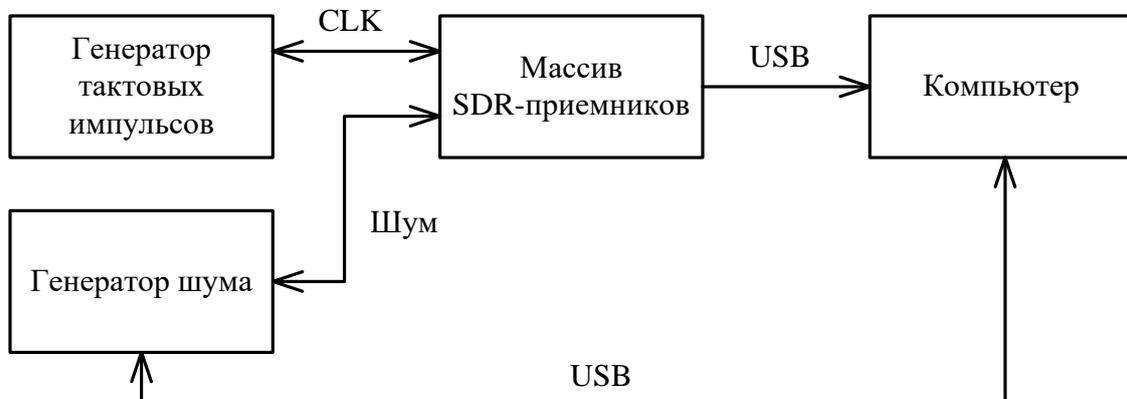


Рис.2. Концепция построения устройства синхронизации и генератора шума

Шум распространяется на приемники с помощью направленных ответвителей на антенные

линии. Это позволяет выравнивать потоки отсчетов сигналов по времени и фазе использованием

взаимной корреляции. Мы просто находим максимум кросс-корреляционной оценки для каждого сигнального вектора  $x$ . Чтобы ограничить вычислительную нагрузку на хост-компьютер, выполняющий обработку, сдвиг синхронизации потока сигнала выполняется путем настройки аппаратного передискретизатора RTL-SDR, изначально предназначенного для исправления смещения несущей частоты. Чтобы еще больше снизить нагрузку на обработку, расчет корреляции отключается, как только данный сигнальный канал считается синхронизированным по времени.

#### 4. Реализация генератора тактовых импульсов

Все RTL-SDR приемники тактируются от одинакового кристалла с частотой 28,8 МГц. Было

несколько методов генерации тактовых импульсов – усиление сигнала от одного кристалла 28,8 МГц [9] или создание генератора на основе микросхемы Si5351 [10]. Локальный генератор 28,8 МГц [10] имеет низкое качество, значительный сдвиг частоты и температурный дрейф. Для исправления этого, генератор синхроимпульсов можно заменить на более качественный, например генератор на основе Si5351 [10]. Микросхема Si5351 представляет собой схему генератора тактовых импульсов, которая способна генерировать практически любую частоту до 200 МГц со смещением 0 ppm от кристалла TCXO 25 МГц. Для подключения платы Si5351 к RTL-SDR используется разъем SMA, установленный на краю с конденсатором 10 нФ.

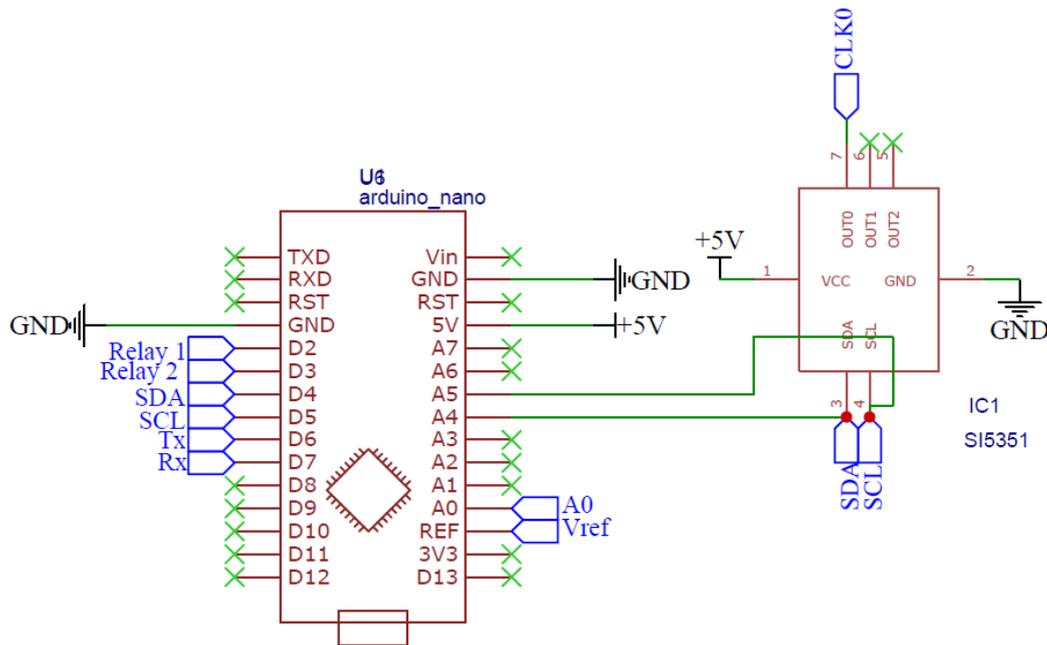


Рис. 3. Принципиальная схема генератора тактовых импульсов 28,8 МГц

В разработанной системе генератор тактовых импульсов полностью отделен от массива приемников. У всех приемников будет удален кристалл и они будут тактироваться отдельным

генератором на микросхеме Si5351, принципиальная схема которого показана на рис.3, а его плата на рис. 4, осциллограмма тактового сигнала на рис.5.

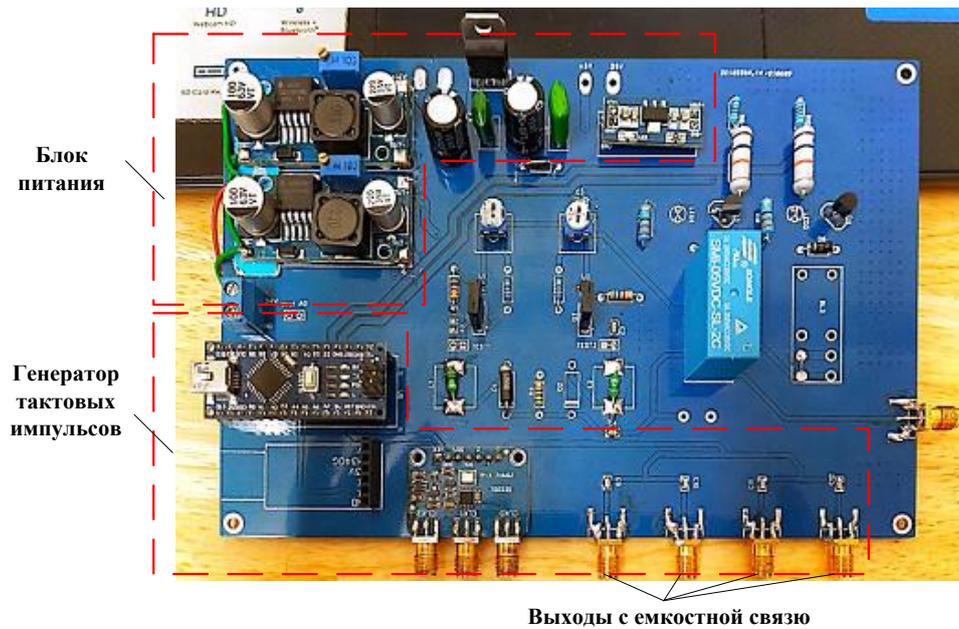


Рис.4. Плата генератора тактовых импульсов

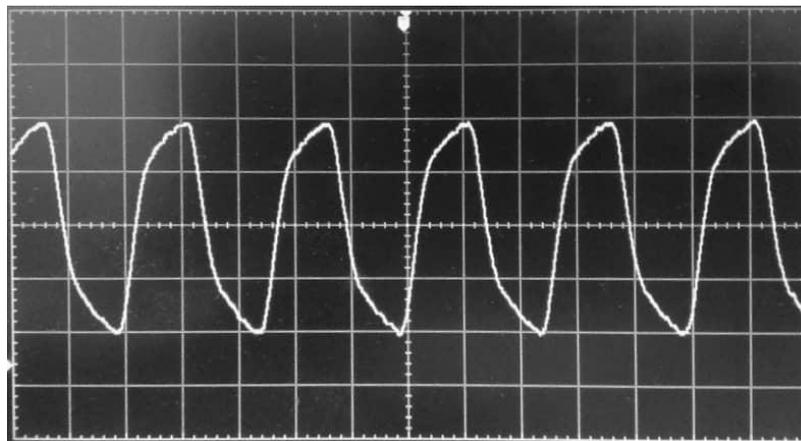


Рис.5. Осциллограмма тактового сигнала с частотой 28,8 МГц

### 5. Реализация генератора шума

Общий опорный сигнал, используемый при синхронизации, должен иметь низкую временную автокорреляцию. Для идеального процесса белого шума  $W(t)$  автокорреляцией является дельта-функция Дирака.

Известно, что диод Зенера производит шум при обратном смещении. То есть превышено напряжение пробоя стабилитрона и ток течет от катода к аноду. На рис. 6 показан принцип работы схемы генератора шума на стабилитроне.

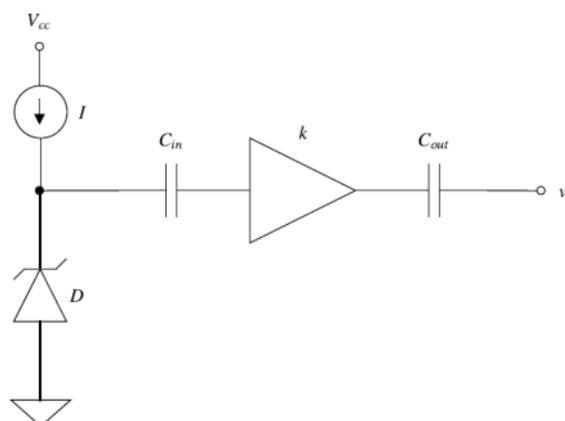


Рис.6. Принцип работы схемы генератора шума на стабилитроне

Емкость  $C_{in}$  предотвращает поступление напряжения смещения постоянного тока на вход усилителя,  $C_{out}$  блокирует потенциальное смещение постоянного тока на выходном каскаде усилителя. В конструкции прототипа, основанной на [11], 24-вольтовый стабилитрон создает слабое шумовое

напряжение, которое затем усиливается цепочкой из трех широкополосных усилителей ММІС. В данной работе используются 3 широкополосные усилители ММІС. Плата генератора белого шума представлена на рис.7, а на рис.8 осциллограмма выходного шума.

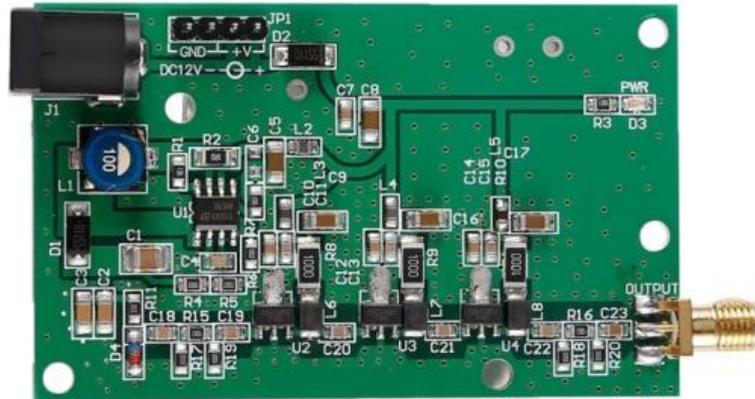


Рис.7. Плата генератора шума

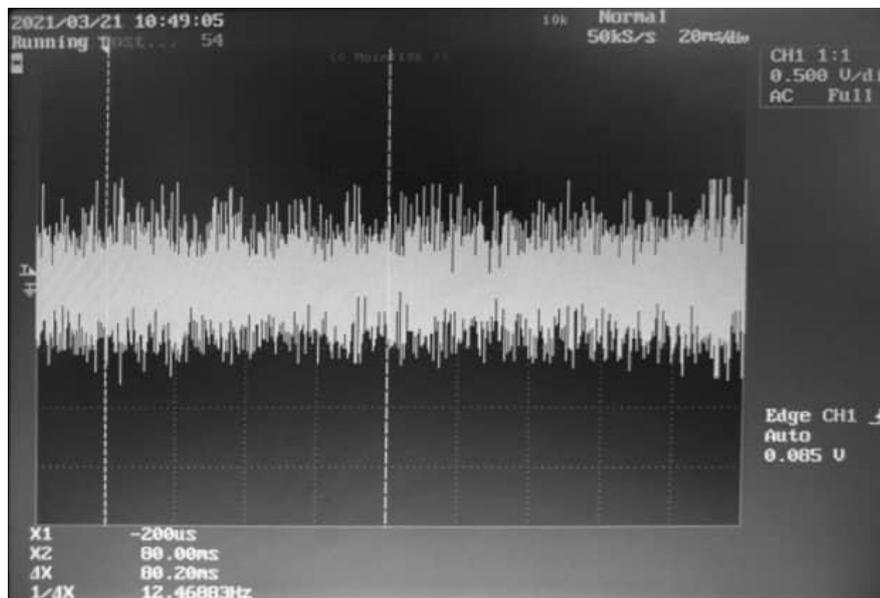


Рис.8. Осциллограмма выходного шума

### Заключение

Работа проводилась с использованием весьма неидеального перепрофилированного радиооборудования. Несмотря на это, массив недорогих SDR был успешно доведен до фазовой когерентности. Тесты показали, что реализация работает, несмотря на недостатки источника шума. Созданный здесь приемник использовался в экспериментах по оценке направления прихода сигнала.

### Список литературы

- [1] Лиепинь У.Р., Головина Л.В., Куприй В.М. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках, работающих в среде с флуктуирующими электродинамическими параметрами // Радиоэлектроника (Изв. высш. уч. завед.). – 2001. – № 2. – С. 25 – 32.
- [2] Solomon I S.D., Gray D.A., Abramovic

Y.M., Anderson S.I. Receiver Array calibration using disparate sources // IEEE Trans. Sign. Proc. – 1999. – Vol. 47, № 3. – P. 496 – 505.

[3] S. Malkowsky et al., "The World's First Real-Time Testbed for Massive MIMO: Design, Implementation and Validation," in IEEE Access, vol. 5, pp. 9073-9088, 2017.

[4] P. Murphy, A. Sabharwal and B. Aazhang, "Design of WARP: A wireless open-access research platform," 2006 14th European Signal Processing Conference, Florence, 2006, pp. 1-5.

[5] M. Laakso, "Multichannel coherent receiver on the RTL-SDR," M.Sc. Thesis, Sch. of Electrical Engineering, Aalto Univ., Espoo, 2019. Available: <https://aalto.fi/aalto/doc/aalto.fi/handle/123456789/37163>

[6] C. Liu and P. P. Vaidyanathan, "Super Nested Arrays: Linear Sparse Arrays With Reduced Mutual Coupling—Part I: Fundamentals," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 64, no. 15, pp.

3997-4012, 1 Aug.1, 2016.

[7] R. Rajamaki and V. Koivunen, "Comparison of Sparse Sensor Array Configurations with Constrained Aperture for Passive Sensing," 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf), Seattle, WA, 2017, pp. 0797- 0802.

[8] J. Vierinen, "Passive radar with \$16 dual coherent channel rtl-sdr dongle receiver." Internet: <http://kaira.sgo.fi/2013/09/passive-radar-with-16-dual-coherent.html>, Sep. 26, 2013 [Jan. 13, 2019].

[9] T. Peltola, "Synchronized RTL-SDR Receivers." Internet:

[https://github.com/tejeez/rtl\\_coherent](https://github.com/tejeez/rtl_coherent), Jul. 6, 2016 [Sep. 29, 2018].

[10] Noori BniLam; Dennis Joosens; Jan Steckel; Maarten Weyn, "Low Cost AoA Unit for IoT Applications", 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)

[30] L. Sliwczynski, "Zener diode and MMICs produce true broadband noise." Internet: <https://www.edn.com/design/test-and-measurement/4358938/Zener-diode-and-MMICs-produce-true-broadband-noise>, Oct. 14, 1999 [Oct. 3,2018].

УДК 621.396.67

---

## МЕТОДЫ ПЕЛЕНГАЦИИ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В МНОГОКАНАЛЬНОМ SDR-ПРИЕМНИКЕ

---

*Нгуен Тьен Тхай*

*к.т.н, Технический университет им. Ле Куи Дона,  
Социалистическая Республика Вьетнам*

*Нгуен Ван Хай*

*к.т.н, Технический университет им. Ле Куи Дона,  
Социалистическая Республика Вьетнам*

---

## DIRECTION FINDING METHODS FOR RADIO EMISSION SOURCES IN A MULTI-CHANNEL SDR RECEIVER

---

*Nguyen Tien Thai*

*PhD, Le Quy Don Technical University,  
Ha Noi, Vietnam*

*Nguyen Van Hai*

*PhD, Le Quy Don Technical University,  
Ha Noi, Vietnam*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.94.1617

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрены методы пеленгации источников радиоизлучения, используемые в многоканальном SDR-приемнике. Для проверки работоспособности методов были реализованы алгоритмы пеленгации в средах GNUradio.

### ABSTRACT

The methods of direction finding of radio emission sources used in a multichannel SDR receiver are considered. To test the performance of the methods, DOA algorithms were implemented in the GNU radio and Matlab environments.

**Ключевые слова:** пеленгация, SDR-приемник, синхронизация.

**Key words:** Direction finding, SDR-receiver, synchronization.

### 1. Введение

Сегодня беспроводная технология находит все более широкое применение во многих областях, от военных до гражданских. Это затрудняет контроль источников радиоизлучения. Поэтому потребность в создании оборудования для разведки, пеленгации и местонахождения источников радиоизлучения возрастает, особенно в конкретных областях, таких как военной и безопасности [1, 2].

Одним из актуальных новых направлений в области радиосвязи является разработка оборудования на базе технологии SDR (Software-Defined Radio). Под SDR понимается программно определяемое радио, т.е. структура, параметры радиоприемника или передатчика изменяются программно. Преимуществом этой технологии

является ее высокая адаптивность, реагирующая на быстро меняющиеся электронные ситуации [2].

В настоящее время, исследование приемников пеленгации на основе технологии SDR является новым направлением во Вьетнаме. С такими приемниками можно решить множество различных задач, таких как: приемники панорамной разведки; пеленгание и местонахождения источников радиоизлучения; измерение, анализ параметров сигнала и т. д. В данной работе представлены современные методы пеленгации источника радиоизлучения, которые могут быть использованы в приемниках пеленгации мягкой конфигурации на технологии SDR.

### 2. Обзор литературы по теме

В настоящее время, в приемниках пеленгации используется множество различных методов