

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; пеленгование 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

определения направления источника радиоизлучения. Некоторые из популярных методов включают [2]:

**-методы, которые реализуются на основе механически подвижных, вращающихся антенн:**

- + пеленгаторы по максимуму сигнала;
- + пеленгаторы по минимуму сигнала;
- + доплеровские пеленгаторы;
- двухканальное автоматическое пеленгование (пеленгаторы Edcock/Watson-Wat);
- квазидоплеровское пеленгование;
- фазовые интерферометры;
- корреляционные интерферометрические измерители;
- алгоритмы высокого разрешения Bartlett, Capon, MUSIC, ESPRIT vv.

В приведенных методах широко используются алгоритмы MUSIC, Capon, ESPRIT, Bartlett... благодаря их высокой избирательности. Они легко реализуются на цифровых микросхемах или компьютерах. Поэтому, эти алгоритмы подходят для решения задачи пеленгования в SDR-приемниках. Ниже приводится обзор некоторых из вышеперечисленных методов: MUSIC, Root-MUSIC.

### 3. Математическая модель сигнала

Схема многоканального устройства представлена на рис. 1 [2, 3], на котором показаны  $M$  источников радиоизлучения с  $M$  разных направлений прихода  $\theta_m, (m = 1, 2, \dots, M)$  и линейная антенная решетка с  $N$  одинаковыми элементами, распределенными друг от друга на расстояние  $d$ .

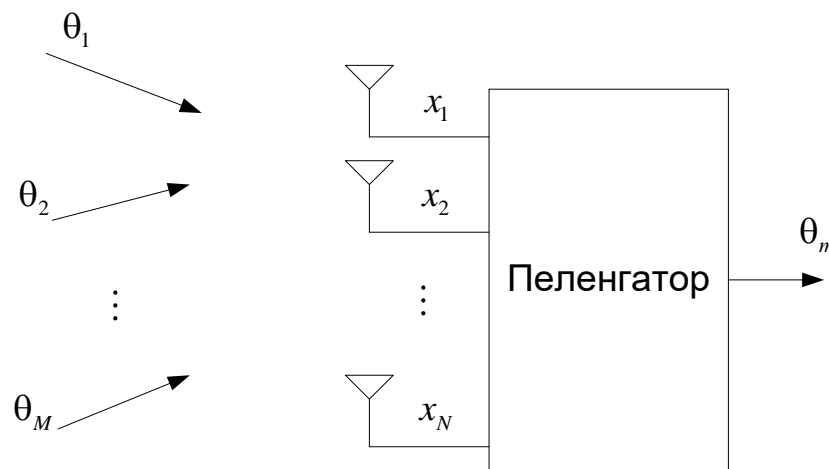


Рис.1. Схема многоканального устройства пеленгации

Эта решетка принимает сигнал дальнего поля, падающий на решетку под углом  $\theta$  к оси решетки. Принимая первый элемент в качестве эталона. Если приемный сигнал в первом элементе  $x_1(t) = s(t)$ , то в  $i$ -ом элементе он задерживается на величину:

$$\tau_i = \frac{(i-1)d \sin \theta}{c} \tag{1}$$

Тогда сигнал в  $i$ -ом элементе:

$$x_i(t) = x_1(t)e^{-j2\pi f \tau_i} = s(t)e^{-jkd(i-1) \sin \theta} = s(t)e^{-j(i-1)\psi} \tag{2}$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\psi = 2kd \sin \theta$ . Сигналы принимаются в  $N$  элементах антенной решетки:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j\psi} \\ \vdots \\ e^{-j(N-1)\psi} \end{bmatrix} s(t) = \mathbf{a}(\theta)s(t) \tag{3}$$

где  $\mathbf{a}(\theta)$  с – сканирующий вектор.

Если имеется  $M$  источников излучения, то модель сигнала, принятого в антенной решетке:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(\theta)s(t), \tag{4}$$

где  $\mathbf{A}$  – матрица сканирующих векторов,  $\mathbf{A} =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{-j2\psi_1} & e^{-j2\psi_2} & \dots & e^{-j2\psi_M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j(N-1)\psi_1} & e^{-j(N-1)\psi_2} & \dots & e^{-j(N-1)\psi_M} \end{bmatrix} \tag{5}$$

### 4. Методы пеленгации

#### 4.1. MUSIC

MUSIC (Multiple Signal Classification) – популярный алгоритм высокого разрешения, основанный на методе собственных структур. Основная идея этого алгоритма DOA заключается в выполнении декомпозиции по собственным значениям корреляционной матрицы [3], [4], разделяющей ее на два подпространства: подпространство сигналов и подпространство шума.

Основным подходом этого алгоритма является разложение матрицы ковариации принятого сигнала на собственные значения. Поскольку этот алгоритм учитывает некоррелированный шум, порожденная ковариационная матрица имеет

диагональный вид. Здесь подпространства сигнала и шума вычисляются с использованием линейной алгебры, и являются ортогональными друг другу. Поэтому алгоритм использует свойство ортогональности для выделения сигнальных и шумовых подпространств [5].

Путь принятый сигнал в антенной решетке с шумом:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (6)$$

Вычисление ковариационной матрицы:

$$\mathbf{R}_{xx} = \varepsilon\{\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)\} = \mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H + \sigma_0^2\mathbf{I} \quad (7)$$

где  $\mathbf{R}_{ss} = \varepsilon\{\mathbf{s}(t)\mathbf{s}^H(t)\} = \text{diag}\{\sigma_1^2, \dots, \sigma_M^2\}$ .

$\mathbf{R}_{xx}$  имеет  $N$  собственных значений  $[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N]$  и  $N$  собственных векторов, образующих подпространство  $\bar{\mathbf{E}} = [\bar{\mathbf{e}}_1, \bar{\mathbf{e}}_2, \dots, \bar{\mathbf{e}}_N]$ . Сортируя  $N$  собственных значений от наименьшего к наибольшему, подпространство  $\bar{\mathbf{E}}$  можно разбить на два подпространства:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{E}} &= \underbrace{[\bar{\mathbf{e}}_1, \bar{\mathbf{e}}_2, \dots, \bar{\mathbf{e}}_M]}_{\mathbf{E}_N} , \underbrace{[\bar{\mathbf{e}}_{M+1}, \dots, \bar{\mathbf{e}}_N]}_{\mathbf{E}_S} \\ &= [\bar{\mathbf{E}}_N \ \bar{\mathbf{E}}_S] \end{aligned} \quad (8)$$

$\bar{\mathbf{E}}_N$  – шумовое подпространство  $N \times (N - M)$ , состоящее из собственных векторов, связанных с шумом,  $\bar{\mathbf{E}}_S$  – сигнальное подпространство  $N \times M$ , состоящее из собственных векторов, связанных с поступающим сигналом.

Из-за ортогональности шумового подпространства и сканирующих векторов антенной решетки при углах прихода  $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M\}$ , матричное произведение  $\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{E}_N\mathbf{E}_N^H\mathbf{a}(\theta)$  равно нулю для этих углов. Обратная величина этого матричного произведения дает острые пики для углов прихода. Таким образом, псевдоспектр MUSIC задается как

$$P(\theta) = \left| \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{E}_N\mathbf{E}_N^H\mathbf{a}(\theta)} \right| \quad (9)$$

#### 4.2. Root-MUSIC

Метод *MUSIC* является предельным случаем метода *Capon* при стремящемся к бесконечности отношении сигнал/шум. Но появляется необходимость предварительной оценки размерности сигнального и шумового подпространств. Он критичен к неопределенностям параметров математической модели и величине соотношения сигнал/шум, когда источники близко расположены. Отметим большую вычислительную

сложность метода, определяемую вычислением сингулярного разложения ковариационной матрицы выходов элементов антенной решетки. Метод не дает результатов для коррелированных источников сигналов. *Root-MUSIC* позволяет осуществлять пеленгацию когерентных сигналов [5].

Алгоритм метода *Root-MUSIC* для оценки угловых координат следующий:

1. оценить корреляционную матрицу  $\mathbf{R}$  используя формулу (7);

2. оцениваются матрицы собственных векторов и собственных значений корреляционной матрицы  $\mathbf{R} = \mathbf{E}\mathbf{L}\mathbf{E}^H$ . Операция выполняется сингулярным разложением корреляционной матрицы сигнала;

3. разделяется  $\mathbf{E}$  так, чтобы получить  $\mathbf{E}_N$ . Для этого из матрицы  $\mathbf{E}$  выбрасывают первые  $M$  столбцов, которые соответствуют сигнальному подпространству;

4. получить  $\mathbf{C}_l$  путём суммирования  $l$ -ой диагонали  $\mathbf{C} = \mathbf{E}_N\mathbf{E}_N^H$ ,

5. найти нули полученного полинома в количестве  $(N-1)$  пар;

6. из  $(N-1)$  корней внутри единичной окружности выбрать  $M$  расположенных наиболее близко к самой линии окружности;

7. получить оценку угловых координат цели, используя выражение (10)

$$\theta_m = \cos^{-1} \left( \frac{1 \ln(z_m)}{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)d} \right), m = 1, \dots, M \quad (10)$$

где  $z_m$  –  $m$ -ый найденный корень.

#### 5. Результаты моделирования

Моделирование приводится в среде GNU-radio [6], которая будет использоваться для разработки пеленгатора на основе приемниках RTL-SDR. Данный алгоритм в GNU-radio также используется в пеленгатора с данными, полученными в каналах приемника.

В работе реализуется пеленгатор с 4 каналами. В качестве входные данные используются сигналы, сгенерированные в среде Matlab и сохраненные в файлах, сигнал в каждом канале задержан на соответствующее время (соответственно угол прихода сигнала). Коррелятор реализуется на основе использования БПФ, схема которого представлена на рис. 2. Схема пеленгатора приведена на рис. 3, блоки реализации алгоритмов MUSIC и Root-MUSIC были написаны в языке python затем преобразованы в блоки среды GNU-radio. Пример результат определения угла прихода приведен на рис.4.

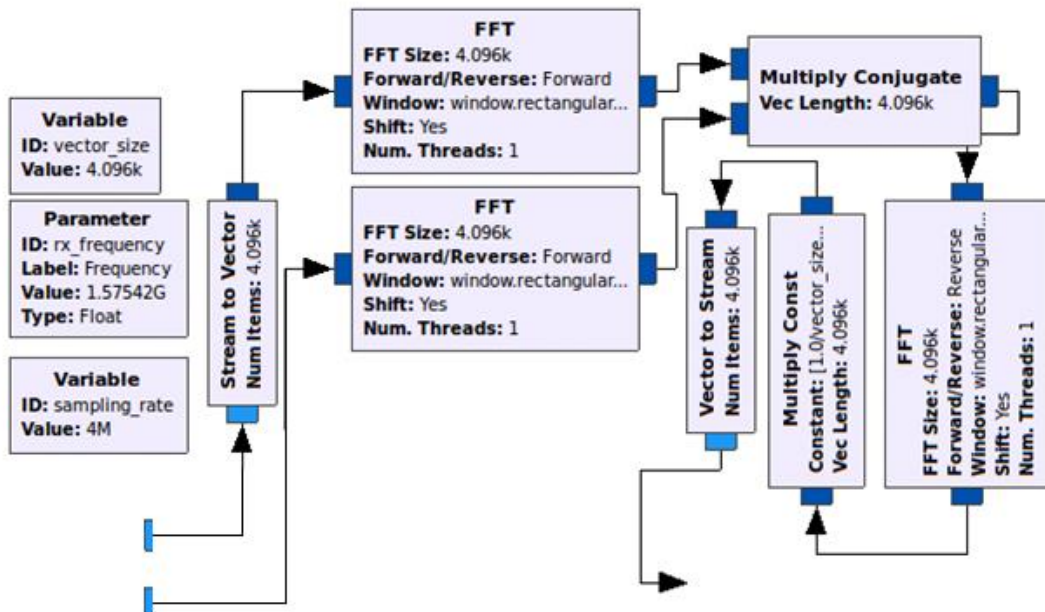


Рис.2. Схема реализации блока взаимнокорреляции на основе БПФ

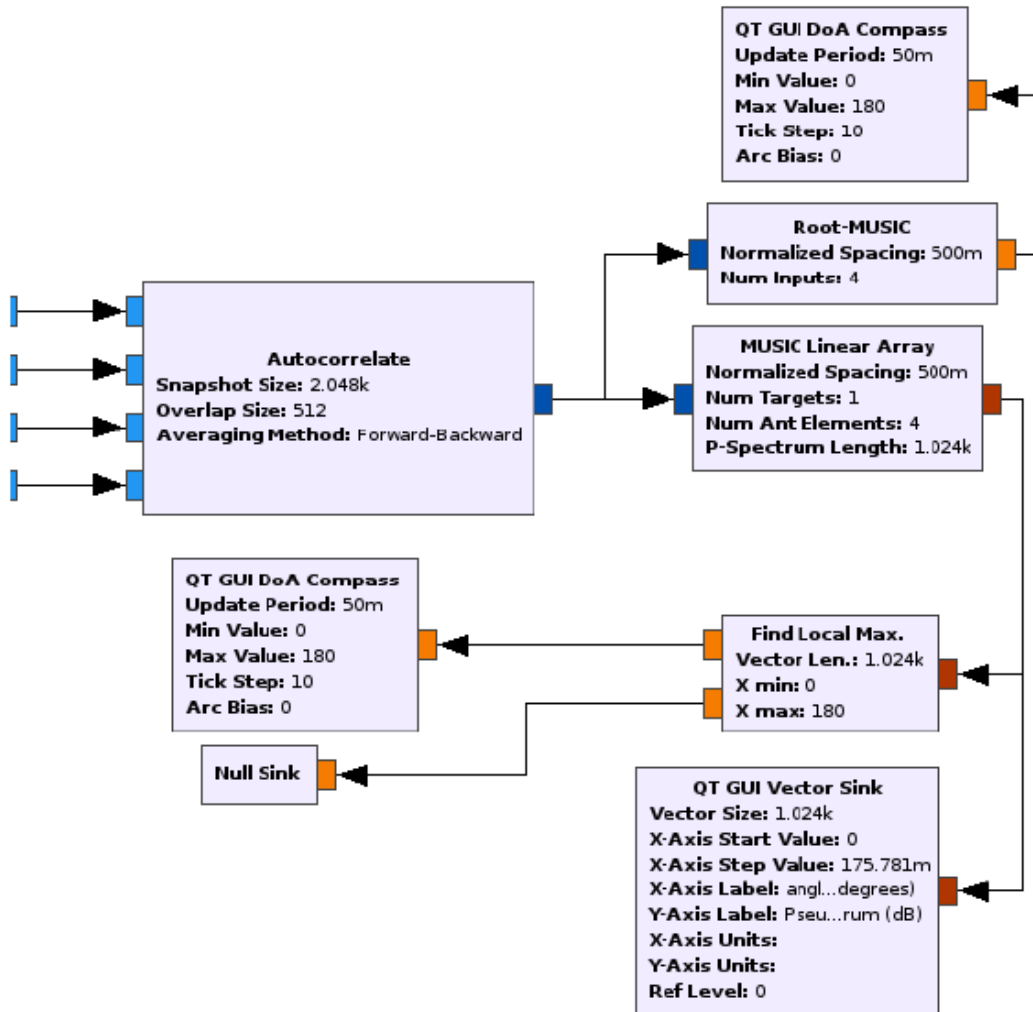


Рис.3. Схема реализации пеленгатора в среде GNU-radio

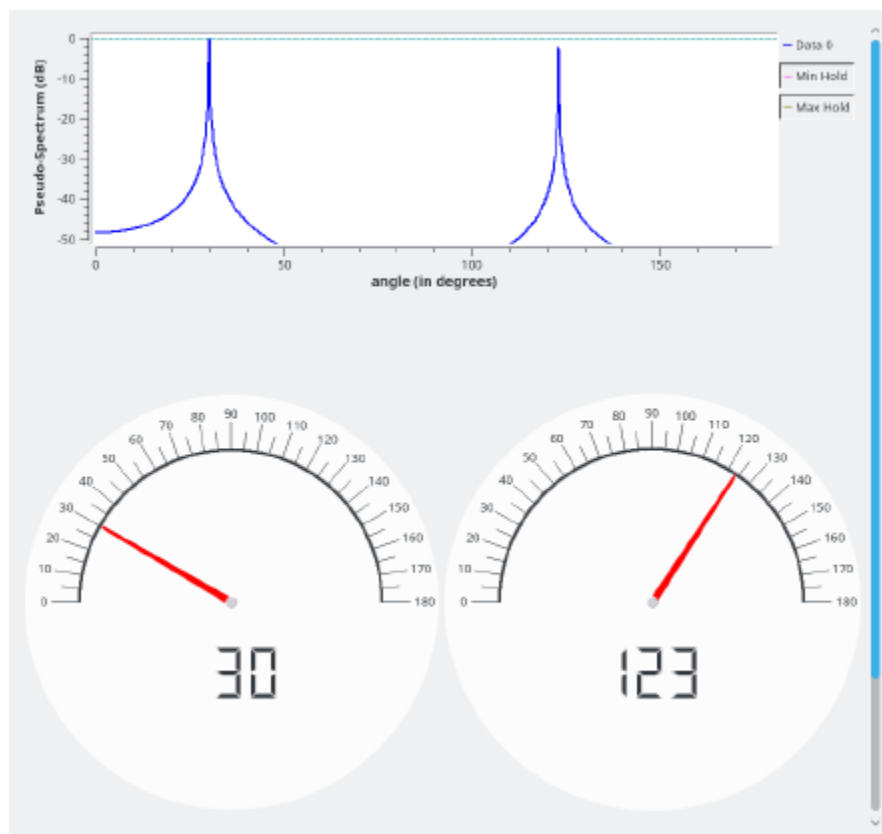


Рис.4. Пример результата определения угла прихода сигнала

### Заключение

В практике пеленгования наиболее часто используются методы MUSIC (а также его разновидность ROOT-MUSIC) и ESPRIT. При этом разрешающая способность методов ROOT-MUSIC превосходит разрешающую способность метода MUSIC, однако методы параллельного анализа требуют значительных вычислительных затрат.

### Список литературы

[1] Ашихмин, А. В.; Козьмин, В. А.; Негроров, В. В., Пастернак, Ю. Г.; Рембовский, Ю. А. Анализ перспективных направлений развития методов оценки угловых координат источников радиоизлучения. Вестник Воронежского государственного технического университета, Т. 5, № 9, 2009. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-perspektivnyh-napravleniy-razvitiya-metodov-otsenki-uglovyh-koordinat-istochnikov-radioizlucheniya>.

[2] Рембовский А.М., Лшихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства/Под редакцией А.М. Рембовского. - М: Горячая линия-Телеком. 2006. -492 с.

[3] A. Vesa, "Direction of arrival estimation using music and root-music algorithm," in 18th Telecommunication forum TELFOR, November 2010.

[4] X. Gu and Y. H. Zhang, "Resolution threshold analysis of music algorithm in radar range imaging," Progress In Electromagnetics Research B, vol. 31, pp. 297–321, 2011.

[5] Москалец Н. В. Сравнительный анализ методов оценки направления прихода сигналов / Н. В. Москалец // Радиотехника: Всеукраинский межведомственный науч.-техн. сборник № 188 / Харьков, 2017.

[6] Blossom E. GNU Radio: Tools for Exploring the Radio Frequency Spectrum. Linux Journal. URL: <http://www.linuxjournal.com/article/7319> (дата обращения 20.09.2018).