



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-64-73>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.396.969.1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ НА ИСТОЧНИК РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В РАДИОПЕЛЕНГАТОРЕ С ПЯТИЭЛЕМЕНТНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ И СУММАРНО-РАЗНОСТНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Е. Н. БУЙЛОВ<sup>1</sup>, А. С. СОЛОНАР<sup>2</sup>, П. В. БОЙКАЧЕВ<sup>1</sup>, И. А. ДУБОВИК<sup>1</sup>, И. Б. КОЖАБАЕВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Военная академия Республики Беларусь (г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>3</sup>Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева  
(г. Алматы, Республика Казахстан)

Поступила в редакцию 13.11.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

**Аннотация.** Предложен один из способов измерения направления прихода электромагнитной волны от источника радиоизлучения автоматическим радиопеленгатором с малой антенной базой и ограниченным количеством каналов радиоприемного тракта. Перечислены проблемы, возникающие при реализации данного способа, представлены предложения по их решению. Получена структурная схема и создан макет радиопеленгатора, в котором устройство обработки реализовано с помощью двухканального приемника LimeSDR. Приведены результаты испытания радиопеленгатора по обнаружению и оценке направления на беспилотный летательный аппарат.

**Ключевые слова:** радиопеленгатор с малой антенной базой, амплитудная модуляция сигнала, беспилотный летательный аппарат, источник радиоизлучения, кольцевая антенная решетка, оценка пеленга.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Определение направления на источник радиоизлучения в радиопеленгаторе с пятиэлементной кольцевой антенной решеткой и суммарно-разностной обработкой / Е. Н. Буйлов [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 1. С. 64–73. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-64-73>

## DETERMINATION OF THE DIRECTION TO THE SOURCE OF RADIO EMISSION IN A RADIO DIRECTION FINDER WITH A FIVE-ELEMENT RING ANTENNA ARRAY AND TOTAL DIFFERENCE PROCESSING

YAUHENI N. BUILOU<sup>1</sup>, ANDREY S. SOLOMAR<sup>2</sup>, PAVEL V. BOYKACHEV<sup>1</sup>,  
ILYA A. DUBOVIK<sup>1</sup>, INDIRA B. KOZHABAEVA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>2</sup>JSC “KB Radar” – Managing Company of “Radar Systems” Holding (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>3</sup>Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev  
(Almaty, Republic of Kazakhstan)

Submitted 13.11.2023

**Abstract.** One of the methods for measuring the direction of arrival of an electromagnetic wave from a radio source by an automatic direction finder with a small antenna base and a limited number of channels of the radio receiving path is proposed. The problems that arise during the implementation of this method are listed, and suggestions for their solution are presented. A block diagram has been obtained and a layout of a radio direction

finder has been created, in which the processing device is implemented using a two-channel LimeSDR transceiver. The results of the radio direction finder test for detecting and evaluating the direction of an unmanned aerial vehicle are presented.

**Keywords:** radio direction finder with a small antenna base, amplitude modulation of the signal, unmanned aerial vehicle, radio source, annular antenna array, bearing estimation.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Builou Y. N., Solonar A. S., Boykachev P. V., Dubovik I. A., Kozhabaeva I. B. (2024) Determination of the Direction to the Source of Radio Emission in a Radio Direction Finder with a Five-Element Ring Antenna Array and Total Difference Processing. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 64–73. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-64-73> (in Russian).

## Введение

В современном быстро развивающемся мире неуклонно растет количество источников радиоизлучения (ИРИ), решающих различного рода задачи, связанные, например, с передачей информации, управлением, контролем и др. Из всего разнообразия ИРИ ключевое место в жизнедеятельности человека занимают беспилотные летательные аппараты (БЛА), которые находят широкое применение в отраслях, связанных с наблюдением за ответственным участком территории, доставкой товаров в отдаленные места, а также в медицине и сельском хозяйстве. Помимо этого, БЛА применяются в военной сфере для наблюдения (разведки, слежения, наведения), нанесения ударов (рис. 1), транспортировки вооружения и медикаментов, целеуказания средствам поражения, ретрансляции данных при их дистанционном управлении оператором, либо автономно по заранее заложеной программе [1, 2].



**Рис. 1.** Примеры объектов прикрытия, на которые может воздействовать беспилотный летательный аппарат  
**Fig. 1.** Examples of cover objects that can be affected by an unmanned aerial vehicle

В ряде случаев возникает необходимость оперативно и с высокой точностью в условиях априорно неопределенной сигнально-помеховой обстановки определить направление воздействия ИРИ, что, в свою очередь, зависит от технических характеристик радиопеленгаторов. Очевидно, что каждый из традиционных методов пеленгования (например, фазовый, амплитудный и др.) имеет как положительные, так и отрицательные свойства. Поэтому при выборе метода необходимо руководствоваться требованиями к точности, дальности действия (или чувствительности), быстродействию, массогабаритным характеристикам, энергопотреблению, разрешающей способности и помехоустойчивости [3, 4]. Безусловно, потребность в обеспечении тех или иных свойств будет определять облик разрабатываемого радиопеленгатора.

Цель исследований авторов статьи – разработка облика радиопеленгатора с малой антенной базой, с низкими энергопотреблением и стоимостью, простого в реализации и обеспечивающего

требуемую точность оценки пеленга ИРИ. В качестве ИРИ рассмотрены сигналы передатчиков БЛА и пульта управления.

### Основные предпосылки по разработке радиопеленгатора

При разработке радиопеленгатора использовали двухканальный приемник LimeSDR (рис. 2), обладающий надежностью и малым энергопотреблением (5 В), простой в реализации, с низкой стоимостью. Данное устройство работает в частотном диапазоне 100 кГц–3,8 ГГц и содержит встроенные аналого-цифровые преобразователи [5]. Эти достоинства определили основные предпосылки по созданию устройства обработки радиопеленгатора, основанного на использовании LimeSDR [4].



Рис. 2. Внешний вид приемника LimeSDR  
Fig. 2. Appearance of the LimeSDR receiver

Из всего многообразия устройств определения направления прихода электромагнитной волны от ИРИ широкое использование на практике получил автоматический радиопеленгатор с малой антенной базой благодаря простоте технической реализации, малым весу и габаритам. Его классическая структура содержит антенную систему (АС), многоканальный приемник с общим гетеродином, блоки цифровой обработки и индикации [2]. Наиболее простой вариант АС представляет собой кольцевую антенную решетку (АР), включающую две пары идентичных противофазно соединенных вертикальных вибраторов (пеленгационная пара, ПП) с взаимно перпендикулярными базами ( $2d$ ), которые меньше длины волны  $\lambda$ , т. е.  $2d < \lambda / 2$  (антенна Эдкока) [2]. В каналах приемника должны быть обеспечены одинаковые амплитудно-фазовые характеристики. Для устранения неоднозначности пеленга применяется ненаправленная антенна, сигнал с которой находится в фазе (или в противофазе) с сигналом одного из вибраторов ПП, например, ориентированного на север [2]. Однако главным недостатком данного типа радиопеленгаторов является сложность реализации идентичных по амплитудно-фазовым характеристикам трактов приема. Кроме того, точность определения направления на ИРИ зависит от используемого количества ПП, что будет влиять на массогабаритные свойства АС. Таким образом, совокупность перечисленных выше недостатков и ограниченность количества каналов приемника LimeSDR при разработке перспективного радиопеленгатора требует решения двух задач:

- 1) определение способа обзора пространства и расчет характеристик АС Эдкока;
- 2) разработка алгоритма определения направления прихода электромагнитной волны от ИРИ.

### Способ обзора пространства и расчет характеристик антенной системы

Минимальных массогабаритных характеристик рассмотренной выше АС можно достигнуть за счет использования двух ПП. Как правило, в этой системе антенные элементы (АЭ) расположены так, что базы ПП ориентированы ортогонально, например, в направлениях сторон света – север, юг, запад, восток ( $N_{АЭ} = 4$  – количество АЭ) [2]. Амплитуда разностного напряжения ПП  $\xi_{\Delta 13(24)}$  (рис. 3) пропорциональна косинусу (синусу) угла прихода волны от ИРИ  $\theta_{ИРИ}$  [2]. Следовательно, АС, состоящая из двух ПП с взаимно перпендикулярными базами и вычитающего устройства, имеет диаграмму направленности (ДН) в форме двух ортогональных восьмерок. Суммирование разностного сигнала ПП  $\xi_{\Delta 13(24)}$  с сигналом центрального ненаправленного АЭ  $\xi_{A0}$  обеспечивает формирование кардиоиды  $g_{\Sigma}(\theta)$  (рис. 3) [2]. Результатом поочередного дискретного подключения разностных сигналов ПП к радиоприемному устройству (с частотой  $\Omega_A$ ) является амплитудная модуляция результирующего сигнала  $\xi_{\Sigma} = \xi_{A0} + 0,5\xi_{\Delta 13(24)}$  (рис. 3).

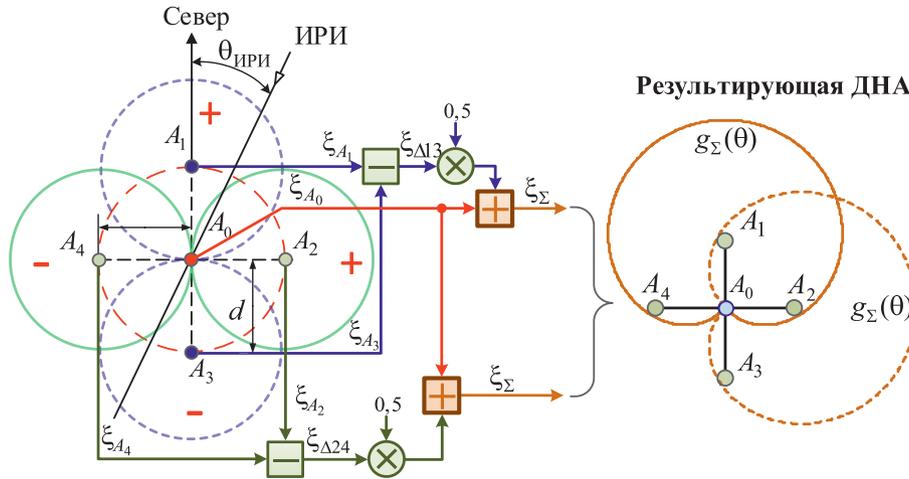


Рис. 3. Диаграмма направленности антенных элементов антенной системы радиопеленгатора  
Fig. 3. Radiation pattern of antenna elements of the antenna system of the direction finder

При формировании ДН в виде кардиоиды (направление на север) [2–4]:

- обеспечиваются амплитудно-фазовые идентичности ДН АЭ;
- расстояние между АЭ ПП –  $2d \approx \lambda/2$  (рис. 3);
- амплитуды сигналов АЭ  $A_0, A_1, A_3 - \xi_{A0} = \xi_{A1} = \xi_{A3}$ ;
- разность фаз сигналов АЭ  $A_0$  и  $A_1 - \varphi_{A0} - \varphi_{A1} = 0$  рад, а фаз сигналов АЭ  $A_0$  и  $A_3 - \varphi_{A0} - \varphi_{A3} = \pi$ .

В качестве АЭ, обладающего малыми габаритами и обеспечивающего изменение характеристик направленности в рабочей полосе частот  $f_0 = 2,4-2,6$  ГГц, выбрана биконическая антенна (рис. 4, с). Для вычитания сигналов ПП на высокой частоте использовалась пара кольцевых мостов [4, 6]. С учетом выбранной геометрии расположения и типа изготовления АЭ взаимовлияние оказалось несущественным. Величина коэффициента стоячей волны в полосе 2,4–2,6 ГГц изменялась в диапазоне 1,4–1,6. При этом степень соответствия результатов моделирования (с использованием программного пакета CST Studio) и натурных испытаний АЭ (биконической антенны) составила 95 % [4, 7].

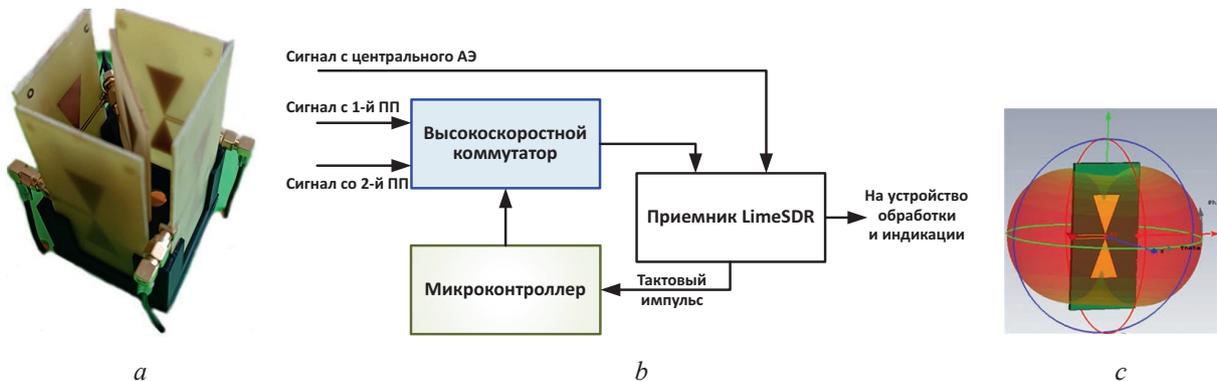


Рис. 4. Пятиэлементная кольцевая антенная решетка: а – внешний вид; б – структура подключения сигналов с решетки к LimeSDR; в – антенный элемент и его диаграмма направленности

Fig. 4. Five-element ring antenna array: а – appearance; б – structure of connecting signals from the grid to LimeSDR; в – antenna element and its radiation pattern

Следует отметить, что в зависимости от используемого типа АЭ и диапазона рабочих частот могут наблюдаться искажения кардиоиды  $g_{\Sigma}(\theta)$ , которые в дальнейшем могут компенсироваться за счет использования весовых коэффициентов, рассчитанных для различных угловых направлений ИРИ. Ограничения, вызванные количеством каналов приемника LimeSDR, требуют поочередного дискретного подключения к его входу разностных напряжений ПП. В таком случае сигнал АЭ  $A_0$  (центрального) поступает на вход 1-го канала приемника LimeSDR, который применяется для формирования кардиоиды и решения задачи обнаружения ИРИ (рис. 4, б). Ко второму каналу

подключаются разностные сигналы ПП с помощью высокоскоростного коммутатора, управляемого микроконтроллером по тактовым импульсам, поступающим с LimeSDR (рис. 4, б) [4, 7].

Выбор скорости переключения ПП обусловлен характеристиками сигналов каналов управления и передачи видео малоразмерных БЛА. В результате их анализа получены следующие показатели: минимальная длительность сигналов канала управления и передачи видео  $T_{0\text{кy}} = 500$  мкс и  $T_{0\text{в}} = 2\text{--}3$  мс соответственно; ширина спектра сигналов канала управления и передачи видео  $\Delta f_{0\text{кy}} = 0,3\text{--}2,0$  МГц и  $\Delta f_{0\text{в}} = 10$  (20 и 40) МГц соответственно; полоса сетки псевдослучайной перестройки частоты сигнала канала управления  $\Delta F_{\text{кy}} = 80$  МГц.

Исходя из наихудших условий наблюдения ИРИ (минимальная длительность сигнала 500 мкс и необходимость формирования не менее пяти оценок пеленга для исключения аномальных измерений и обеспечения требуемой точности), разработана пятиэлементная кольцевая АР (рис. 4, а) радиопеленгатора со следующими характеристиками: время приема сигнала одним АЭ – 50 мкс; частота переключения АЭ – 20 кГц; полный оборот ДН в горизонтальной плоскости (поочередное ориентирование максимума ДН в направлениях сторон света за счет изменения фазы разностных сигналов ПП на  $180^\circ$  [2, с. 373]) – 200 мкс. Таким образом, использование разработанной АР в радиопеленгаторе, позволяет:

- реализовать суммарно-разностную обработку принятых электромагнитных излучений от ИРИ за счет суммирования сигнала центрального ненаправленного АЭ  $\xi_{\Delta 0}$  с поочередно подключаемыми разностными сигналами ПП  $\xi_{\Delta 13(24)}$ . В качестве АЭ применялась биконическая антенна с коэффициентом стоячей волны 1,4–1,6, работающая в диапазоне частот 2,4–2,6 ГГц;

- определить частоту переключения АЭ ( $\Omega_A = 20$  кГц), обеспечивающую формирование не менее пяти оценок углового направления прихода электромагнитной волны от ИРИ при его минимальном времени наблюдения (500 мкс).

#### Алгоритм определения направления прихода сигнала от источника радиоизлучения

После аналого-цифрового преобразования в LimeSDR осуществляли расчет мгновенного спектра результирующего сигнала  $\xi_{\Sigma}(\theta_{\text{ИРИ}})$  для угла прихода волны  $\theta_{\text{ИРИ}}$  (банк узкополосных фильтров, УПФ), который может быть реализован с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) с последующим статистическим усреднением (метод периодограмм) [2–4, 7]. Алгоритм определения мгновенного спектра сигнала при настройке приемника LimeSDR на одну из фиксированных частот имеет вид

$$G(\theta_{\text{ИРИ}})_{i,s} = \frac{1}{N_{\text{БПФ}}} \sum_{k=0}^{N_{\text{БПФ}}-1} \left[ w_k \xi_{\Sigma}(\theta_{\text{ИРИ}})_{k+s(N_{\text{БПФ}}/2)} \exp(-j2\pi k i / N_{\text{БПФ}}) \right], \quad (1)$$

где  $N_{\text{БПФ}}$  – размер окна БПФ (количество частотных каналов);  $s$  – номер сдвига («скольжения» по оси времени) окна БПФ;  $i = 0 \dots N_{\text{БПФ}} - 1$  – номер отсчета частоты;  $w$  – весовая функция [8].

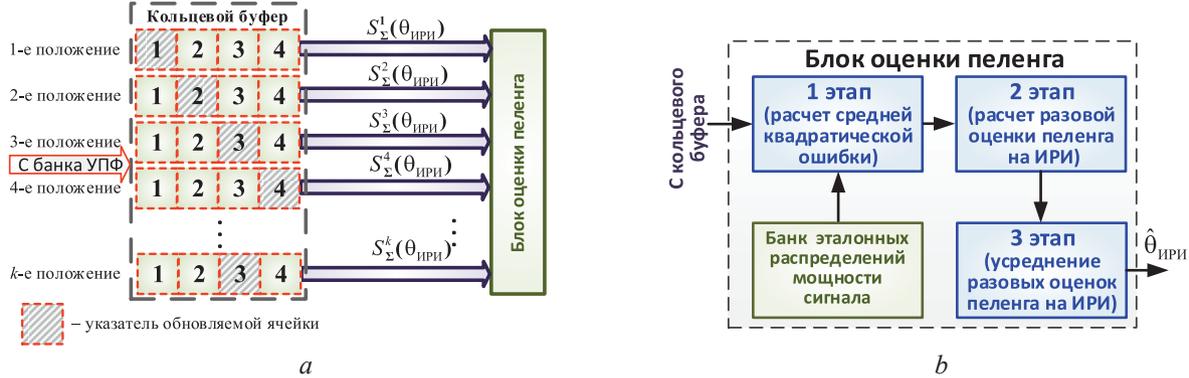
Спектральная плотность мощности (СПМ) определяется за счет усреднения мгновенного спектра сигнала за время его приема одним АЭ ( $T_{\text{АЭ}}$ ) (метод периодограмм)

$$S_{\Sigma}(\theta_{\text{ИРИ}})_i = \frac{1}{L} \sum_{s=0}^{L-1} |G(\theta_{\text{ИРИ}})_{i,s}|^2, \quad (2)$$

где  $L = \text{floor}\{T_{\text{АЭ}} / (N_{\text{БПФ}} t_d)\}$  – количество выборок мгновенного спектра сигнала;  $t_d$  – шаг дискретизации по времени;  $\text{floor}(\ )$  – функция округления до целого наименьшего числа.

Наиболее сложная задача, решаемая при разработке радиопеленгатора, заключалась в выборе алгоритма определения направления прихода электромагнитной волны от ИРИ. Ее особенность состоит в том, что ДН может принимать всего лишь четыре пространственных положения с шагом  $90^\circ$ . При этом необходимо принять решение о наличии ИРИ и оценить его пеленг с сохранением требуемой точности по отношению к существующим радиопеленгаторам. Целесообразно формировать не менее пяти-семи оценок пеленга. Для решения данной задачи предлагается использовать кольцевой буфер, в котором хранятся значения СПМ-сигналов, принятые АЭ двух ПП  $S_{\Sigma}(\theta_{\text{ИРИ}})$  (рис. 5, а). В момент включения радиопеленгатора в первую ячейку буфера записывается значение СПМ сигнала за время приема его первым АЭ ( $T_{\text{АЭ}}$ ) (рис. 5, а, 1-е положение). За время четырех дискретных переключений ДН (рис. 5, а, 4-е положение) кольцевой буфер

заполняется полностью. В дальнейшем ячейка буфера, в которой записано самое «старое» значение, обновляется «новым» со смещением указателя последующей обновляемой ячейки вправо (рис. 5, а,  $k$ -е положение). При каждом переключении АЭ-вектор, состоящий из четырех значений СПМ сигнала  $S_{\text{буф}}(\theta_{\text{ИРИ}})$ , поступает на блок оценки пеленга ИРИ. Следует отметить, что при каждом переключении АЭ требуется корректировка пеленга. Так, например, от второй оценки пеленга необходимо вычесть  $90^\circ$ , от третьей –  $180^\circ$  и т. д.



**Рис. 5.** Схема:  $a$  – кольцевого буфера, пример реализации;  $b$  – блока оценки пеленга  
**Fig. 5.** Scheme:  $a$  – ring buffer, example implementation;  $b$  – bearing estimation block

Решение об обнаружении ИРИ принимается только при условии, что порог обнаружения превышен за время совершения не менее четырех дискретных переключений ДН. Здесь полученная оценка направления прихода электромагнитной волны от ИРИ поступает потребителю, в противном случае она не формируется. Сохранение точности оценки пеленга (ввиду ограниченного числа пространственных положений ДН) обеспечивается использованием банка эталонных распределений мощности сигнала на приемном канале (рис. 5,  $b$ ), принимаемого с различных направлений ИРИ  $\theta_{\text{ИРИ\_var}} = 0^\circ - 359^\circ$  (рис. 6,  $a$ ):

$$S_{\text{эт}}(\theta_{\text{ИРИ\_var}})_n = \frac{w_{\text{кор}}(\theta_{\text{ИРИ\_var}})_n \eta(\theta_{\text{ИРИ\_var}})_n}{\sum_{r=0}^{N_{\text{АЭ}}-1} \eta(\theta_{\text{ИРИ\_var}})_r} \text{ при условии, что } \sum_{r=0}^{N_{\text{АЭ}}-1} S_{\text{эт}}(\theta_{\text{ИРИ\_var}})_r = 1, \quad (3)$$

где  $w_{\text{кор}}(\theta_{\text{ИРИ\_var}})_n$  – весовой коэффициент, обеспечивающий коррекцию искажений результирующей ДН (вызванных неидентичностью АЭ и их взаимовлиянием) для различных угловых направлений ИРИ, может рассчитываться на этапе калибровки АС;  $\eta(\theta_{\text{ИРИ\_var}})_n = [1 + \cos([n\pi / 2] - \theta_{\text{ИРИ\_var}})]^2$  – значение ненормированного эталонного распределения мощности сигнала;  $n = 0 \dots N_{\text{АЭ}} - 1$  – номер АЭ, в направлении которого ориентирован максимум ДН.

Алгоритм оценки пеленга ИРИ включает следующие этапы.

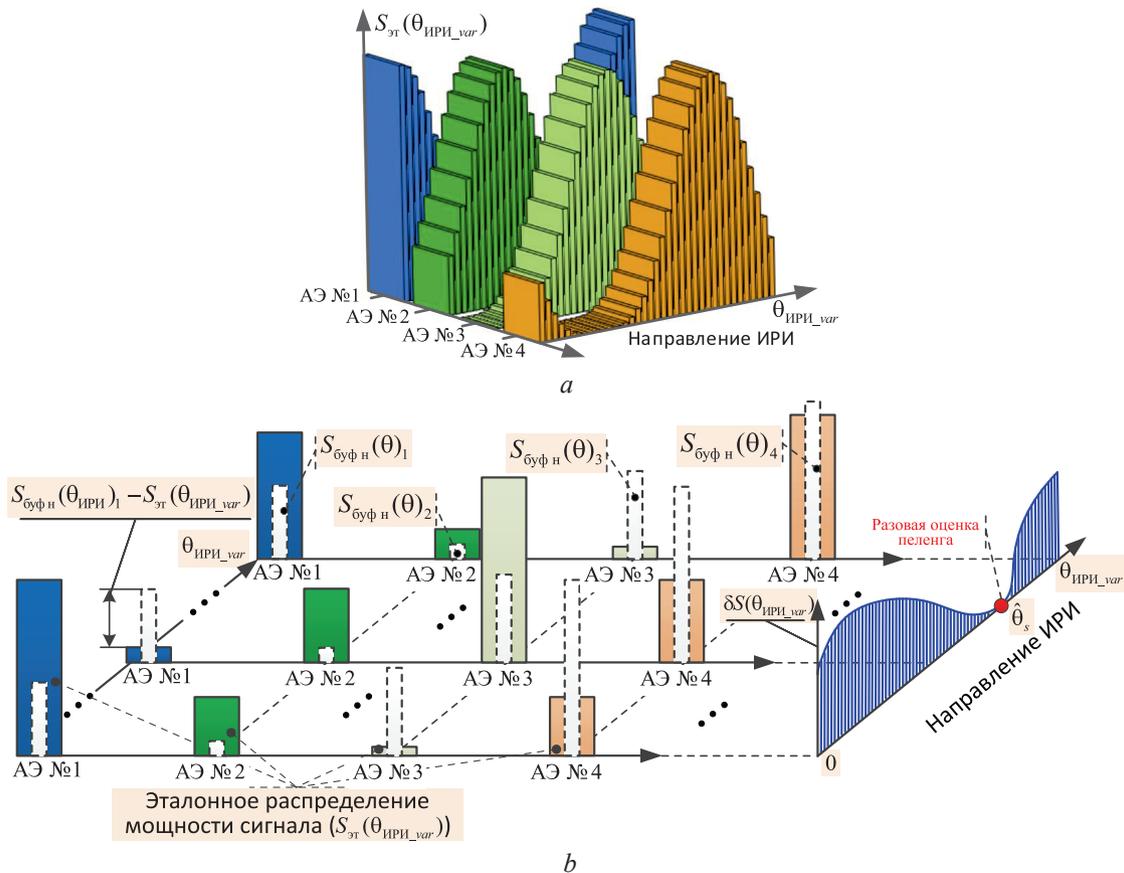
1. Нормировка текущего значения СПМ  $S_{\text{буф}}(\theta_{\text{ИРИ}})$  к суммарному значению плотностей, записанных в ячейках кольцевого буфера

$$S_{\text{буф}}(\theta_{\text{ИРИ}})_n = \frac{S_{\text{буф}}(\theta_{\text{ИРИ}})_n}{\sum_{r=0}^{N_{\text{АЭ}}-1} S_{\text{буф}}(\theta_{\text{ИРИ}})_r} \text{ при условии, что } \sum_{r=0}^{N_{\text{АЭ}}-1} S_{\text{буф}}(\theta_{\text{ИРИ}})_r = 1. \quad (4)$$

Данный подход позволяет устранить неопределенность, вызванную незнанием квадрата модуля амплитуды принимаемого сигнала от ИРИ.

2. Определение средней квадратической ошибки (СКО)  $\delta S(\theta_{\text{ИРИ\_var}})$  (рис. 6,  $b$ ), равной сумме квадратов разностей значений текущей СПМ  $S_{\text{буф}}(\theta_{\text{ИРИ}})$  и эталонного распределения мощности сигнала  $S_{\text{эт}}(\theta_{\text{ИРИ\_var}})$  [3, 7, 8]:

$$\delta S(\theta_{\text{ИРИ\_var}}) = \sum_{n=0}^{N_{\text{АЭ}}-1} |S_{\text{буф}}(\theta_{\text{ИРИ}})_n - S_{\text{эт}}(\theta_{\text{ИРИ\_var}})_n|^2. \quad (5)$$



**Рис. 6.** Эталонное распределение мощности сигнала (а) и пояснение принципа оценки пеленга на источник радиоизлучения (b)

**Fig. 6.** Reference distribution of capacity of a signal (a) and explanation of the principle of estimating the bearing on the source of radio emission (b)

3. Определение разовой оценки пеленга ИРИ (рис. 6, b) по критерию минимума СКО

$$\hat{\theta} = \arg \left[ \min_{\theta_{\text{ИРИ\_var}}} (\delta S(\theta_{\text{ИРИ\_var}})) \right]. \quad (6)$$

4. Усреднение разовых оценок пеленга за время наблюдения  $T_n$

$$\hat{\theta}_{\text{ИРИ}} = \frac{1}{M_{T_n}} \sum_{q=0}^{M_{T_n}-1} \hat{\theta}_q, \quad (7)$$

где  $M_{T_n}$  – количество оценок пеленга ИРИ.

Таким образом, полученный алгоритм определения направления прихода электромагнитной волны от ИРИ (4)–(7) позволяет сохранить требуемую точность оценки пеленга при использовании пятиэлементной кольцевой АР по отношению к существующим радиопеленгаторам.

### Результаты исследований и их обсуждение

По результатам проведенных исследований разработана структурная схема радиопеленгатора (рис. 7), соответствующая требованиям, предъявляемым к современным средствам радиоэлектронной разведки [3, 4, 7]. Внешний вид макета радиопеленгатора представлен на рис. 8, а. Оценку его характеристик выполняли в результате проведения математического моделирования, полунатурного и натуральных испытаний в соответствии со схемой, показанной на рис. 8, b.

Условия проведения испытаний: ИРИ – передатчик малоразмерного БЛА; расстояние до ИРИ –  $r = 0,5\text{--}1,0$  км; влияние переотражений принятого сигнала от ИРИ минимизировалось; ошибку оценки направления на ИРИ определяли по результатам проведения 600 опытов,

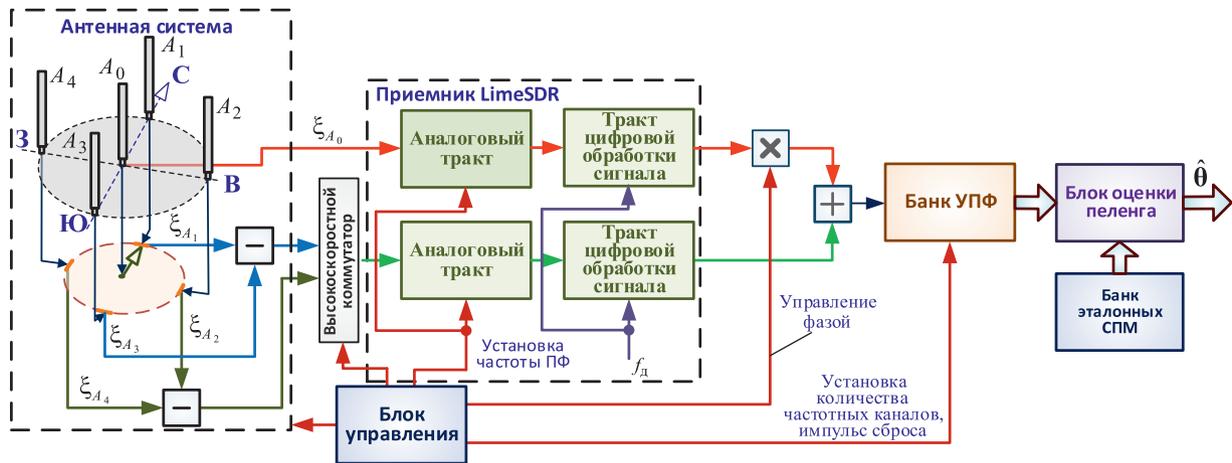


Рис. 7. Структурная схема разработанного радиопеленгатора  
Fig. 7. Block diagram of the developed direction finder



Рис. 8. Радиопеленгатор: *a* – внешний вид; *b* – схема проверки показателей качества  
Fig. 8. Radio direction finder: *a* – appearance; *b* – scheme of checking quality indicators

соответствующим доверительной вероятности 0,9 и погрешности измерений не более 10 % [9]. По результатам испытаний получены следующие показатели:

- дальность обнаружения ИРИ (малоразмерного БЛА) достигала 1 км;
- при оценке направления на ИРИ аномалий не наблюдалось;
- в зависимости от условий наблюдения и типа БЛА СКО оценки пеленга не превышала 5°.

### Заключение

1. В макете малогабаритного радиопеленгатора устройство обработки реализовано с использованием двухканального приемника LimeSDR. Антенная система радиопеленгатора состояла из двух взаимно ортогональных пеленгационных пар, центрального антенного элемента и двух кольцевых мостов, что позволило реализовать суммарно-разностную обработку принятых электромагнитных излучений от источника радиоизлучения за счет суммирования сигнала центрального ненаправленного антенного элемента с поочередно подключаемыми разностными сигналами пеленгационных пар. В качестве антенного элемента использовалась биконическая антенна с коэффициентом стоячей волны 1,4–1,6, позволяющая принимать сигналы на частотах от 2,4 до 2,6 ГГц.

2. Алгоритм определения направления прихода электромагнитной волны от источника радиоизлучения включал следующие этапы: расчет средней квадратической ошибки  $\delta S(\theta_{ИРИ})$ , равной сумме разностей текущего значения спектральной плотности мощности и эталонного распре-

ления мощности сигнала (формула (5)); определение разовой оценки пеленга источника радиоизлучения (6); усреднение разовых оценок пеленга за время наблюдения (7). Данный алгоритм позволяет сохранить требуемую точность оценки пеленга источника радиоизлучения при использовании пятиэлементной кольцевой антенной решетки по отношению к существующим радиопеленгаторам.

3. По результатам проведенных исследований на расстоянии до 1 км ошибка оценки пеленга малоразмерного беспилотного летательного аппарата не превышала 5°.

### Список литературы

1. Макаренко, С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам / С. И. Макаренко. СПб.: Научно-технологические, 2020.
2. Рембовский, А. М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства. 3-е изд., перераб. и доп. / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин. М.: Горячая линия – Телеком, 2012.
3. Алгоритм определения направления на источник радиоизлучения в двухканальном фазовом радиопеленгаторе [Электронный ресурс] / Е. Н. Буйлов [и др.] // Журнал радиоэлектроники. 2023. № 10. Режим доступа: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.7>. Дата доступа: 09.10.2023.
4. Буйлов, Е. Н. Предложения по разработке двухканального фазового радиопеленгатора с амплитудной модуляцией сигнала / Е. Н. Буйлов, А. С. Солонар, А. А. Свириденко // Памятные даты – дни воинской славы России, посвящ. 80-летию Курской битвы и 210-летию Битвы народов: матер. Междунар. науч.-практ. конф., г. Омск, 13 октября 2023 г. Омск, 2023. С. 241–250.
5. LimeSDR-USB User Guide [Electronic Resource]. Mode of access: [https://wiki.myriadrf.org/LimeSDR-USB\\_User\\_Guide](https://wiki.myriadrf.org/LimeSDR-USB_User_Guide). Date of access: 27.06.2023.
6. Определение направления на источник радиоизлучения в двухканальном фазовом радиопеленгаторе с амплитудной модуляцией сигнала / Е. Н. Буйлов [и др.] // MILEX.INNOVATIONS – 2023: сб. науч. ст. 10-й Междунар. науч. конф. по воен.-техн. проблемам, проблемам обор. и безопас., использ. технол. двойного назн., г. Минск, 18–19 мая 2023 г. Минск, 2023. С. 31–34.
7. Солонар, А. С. Основы радиопеленгации. Основы теории измерения параметров сигналов / А. С. Солонар, В. В. Латушкин, С. А. Габец. Минск: Военная академия, 2023.
8. Марпл, С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл. М.: Мир, 1990.
9. Косачев, И. М. Методики расчета показателей достоверности и точности оцениваемых тактико-технических характеристик вооружения, военной и специальной техники / И. М. Косачев, Д. С. Неведов // Вестник Военной академии Республики Беларусь. 2015. Т. 46, № 1. С. 107–134.

### References

1. Makarenko S. I. (2020) *Countering Unmanned Aerial Vehicles*. St. Petersburg, Science-Intensive Technologies (in Russian).
2. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V. A. (2012) *Radio Monitoring: Tasks, Methods, Tools*. 3<sup>rd</sup> ed. Moscow, Hotline – Telecom (in Russian).
3. Buylov E. N., Solonar A. S., Boykachev P. V., Liakh B. A., Kozhabaeva I. B. (2023) Algorithm for Determining the Direction to the Source of Radio Emission in a Two-Channel Phase Direction Finder. *Journal of Radio Electronics*. (10). Available: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.7> (Accessed 9 October 2023) (in Russian).
4. Buylov E. N., Solonar A. S., Sviridenko A. A. (2023) Proposals for the Development of a Two-Channel Phase Direction Finder with Amplitude Modulation of the Signal. *Memorable Dates – Days of Military Glory of Russia, Dedicated to the 80<sup>th</sup> Anniversary of the Battle of Kursk and 210-to the Anniversary of the Battle of the Peoples: Mater. of the Inter. Sci. and Pract. Conf., Omsk, Oct. 13, 2023*. Omsk. 241–250 (in Russian).
5. *LimeSDR-USB User Guide*. Available: [https://wiki.myriadrf.org/LimeSDR-USB\\_User\\_Guide](https://wiki.myriadrf.org/LimeSDR-USB_User_Guide) (Accessed 27 June 2023).
6. Buylov E. N., Solonar A. S., Boykachev P. V., Dubovik I. A., Lyakh B. A. (2023) Determination of the Direction to the Radio Source in a Two-Channel Phase Direction Finder with Amplitude Modulation of the Signal. *MILEX.INNOVATIONS – 2023: Sat. Sci. Art. of the 10<sup>th</sup> Inter. Sci. Conf. on Milit.-Tech. Probl., Probl. of Defen. and Secur., the Use of Dual-Use Techn., Minsk, May 18–19, 2023*. Minsk. 31–34 (in Russian).
7. Solonar A. S., Latushkin V. V., Gabets S. A. (2023) *Fundamentals of Radio Direction Finding. Fundamentals of the Theory of Measuring Signal Parameters*. Minsk, Military Academy (in Russian).
8. Marple S. L. (1990) *Digital Spectral Analysis and Its Applications*. Moscow, Mir Publ. (in Russian).
9. Kosachev I. M., Nefedov D. S. (2015) Methods for Calculating the Reliability and Accuracy of the Estimated Tactical and Technical Characteristics of Weapons, Military and Special Equipment. *Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*. 46 (1), 107–134 (in Russian).

### Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

#### Сведения об авторах

**Буйлов Е. Н.**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр. науч.-исслед. лаб. науч.-исслед. части, Военная академия Республики Беларусь

**Солонар А. С.**, канд. техн. наук, доц., вед. науч. сотр., ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»

**Бойкачев П. В.**, канд. техн. наук, доц., нач. каф. тактики и вооружения радиотехнических войск, Военная академия Республики Беларусь

**Дубовик И. А.**, канд. техн. наук, ст. преп. каф. автоматизации, радиолокации и приемо-передающих устройств, Военная академия Республики Беларусь

**Кожобаева И. Б.**, ст. преп., Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева

#### Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,  
г. Минск, просп. Независимости, 220  
Военная академия Республики Беларусь  
Тел.: +375 29 852-99-82  
E-mail: lerka.by@mail.ru  
Буйлов Евгений Николаевич

#### Information about the authors

**Builou Y. N.**, Cand. of Sci., Leading Researcher of the Scientific Research Laboratory of the Scientific Research Part, Military Academy of the Republic of Belarus

**Solonar A. S.**, Cand. of Sci., Leading Researcher, JSC “KB Radar” – Managing Company of “Radar Systems” Holding

**Boykachev P. V.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of Tactics and Armament of Radio Engineering Troops, Military Academy of the Republic of Belarus

**Dubovik I. A.**, Cand. of Sci., Senior Lecturer at the Department of Automation, Radar and Receiving and Transmitting Devices, Military Academy of the Republic of Belarus

**Kozhabaeva I. B.**, Senior Lecturer, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev

#### Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosti Ave., 220  
Military Academy of the Republic of Belarus  
Tel.: +375 29 852-99-82  
E-mail: lerka.by@mail.ru  
Builou Yauheni Nikolaevich