

## *Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования*

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621

doi:10.30987/2658-6436-2022-2-4-12

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ СО СЛОЖНЫМИ СИГНАЛАМИ МАТРИЧНЫМ ПРИЕМНИКОМ С АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫМ АЛГОРИТМОМ НА ВЫХОДЕ**

**Чонг Нхан Нгуен** <sup>1✉</sup>, **Алексей Сергеевич Подстригаев** <sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> 10th20th30th@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6626-893X>

<sup>2</sup> ap0d@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4144-222X>

**Аннотация.** *Оценены среднеквадратичные ошибки линий положения при использовании пеленгационного и разностно-дальномерного методов на основе матричного приемника с автокорреляционным алгоритмом на выходе. Проведено сравнение точности определения местоположения источников радиоизлучений с линейно-частотно-модулированными и фазо-кодо-манипулированными сигналами матричным приемником с автокорреляционным алгоритмом на выходе и матричным приемником с детекторным алгоритмом на выходе. Выполнен сравнительный анализ расчета соотношения между среднеквадратичными ошибками местоположения источников радиоизлучений при использовании матричного приемника с подключением разных алгоритмов на выходе. Установлена целесообразность использования матричного приемника с автокорреляционным алгоритмом на выходе и матричного приемника с детекторным алгоритмом на выходе для различных методов определения местоположения источника радиоизлучения. Представлены результаты исследований.*

**Ключевые слова:** матричный приемник, автокорреляционный алгоритм, детекторный алгоритм, точность определения местоположения, пеленгационный метод, разностно-дальномерный метод, среднеквадратичная ошибка местоположения

**Для цитирования:** Нгуен Ч.Н., Подстригаев А.С. Исследование точности местоположения источников радиоизлучений со сложными сигналами матричным приемником с автокорреляционным алгоритмом на выходе // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №2 (16). С. 4-12. doi: 10.30987/2658-6436-2022-2-4-12.

Original article

Open Access Article

### **STUDYING THE ACCURACY OF DETERMINING THE LOCATION OF RADIO EMISSION SOURCES WITH COMPLEX SIGNALS WHEN USING A MATRIX RECEIVER WITH AN AUTOCORRELATION ALGORITHM AT THE OUTPUT**

**Chong N. Nguyen** <sup>1✉</sup>, **Aleksey S. Podstrigaev** <sup>2</sup>,

<sup>1, 2</sup> St. Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V.I. Ulyanov (Lenin), St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup> 10th20th30th@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6626-893X>

<sup>2</sup> ap0d@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4144-222X>

**Abstract.** *The root-mean-square errors of the position lines are estimated when using direction-finding and difference-range methods based on a matrix receiver with an autocorrelation algorithm at the output. The study compares the accuracy of determining the location of radio emission sources with linear-frequency-modulated and phase-code-shifted signals by a matrix receiver with an autocorrelation algorithm at the output and a matrix receiver with a detector algorithm at the output. A comparative analysis of calculating the ratio between the root-mean-square errors of locating radio emission sources is performed using a matrix receiver with the connection of different algorithms at the output. The study establishes the expediency of using a matrix receiver with an autocorrelation algorithm at the output and a matrix receiver with a detector algorithm at the output for various methods of determining the location of a radio emission source. Findings are given.*

**Keywords:** matrix receiver, autocorrelation algorithm, detector algorithm, location accuracy, direction-finding method, difference-range method, root-mean-square positioning error

**For citation:** Nguyen Ch.Nh., Podstrigaev A.S. Studying the accuracy of determining the location of radio emission sources with complex signals when using a matrix receiver with an autocorrelation algorithm at the output. Automation and modeling in design and management, 2022, no. 2 (116). pp. 4-12. doi: 10.30987/2658-6436-2022-2-4-12.

## Введение

Важной составляющей в современных информационно-управляющих системах, особенно между подвижными объектами является определение их положения в пространстве [1, 2]. Это особенно важно в случае отсутствия прямой связи между двумя объектами, так как необходимо определить оптимальное число промежуточных станций и обеспечить максимальную эффективность передачи информации [3, 4]. Для повышения помехозащищенности и скрытности работы в последнее время все чаще для передачи информации используются сложные сигналы (линейно-частотно-модулированные (ЛЧМ) и фазо-кодо-манипулированные (ФКМ) сигналы) [5 – 8]. Их использование создает ряд сложностей при решении задач определения координат источника радиоизлучения (ИРИ).

При приеме и обработке таких сигналов на промежуточной частоте (ПЧ) могут использоваться автокорреляционный [9 – 11] и детекторный [12, 13] алгоритмы. Поэтому целесообразно для их решения в широкополосных средствах анализа радиоэлектронной обстановки использовать комбинированный метод, например, использование матричного приемника с подключением автокорреляционного алгоритма или детекторного алгоритма на выходе.

Так, матричный приемник содержит несколько ступеней. При попадании в первую ступень входной сигнал разделяется по частоте на несколько каналов и преобразуется в единый для всех каналов первой ступени диапазон ПЧ. Далее сигнал в диапазоне ПЧ поступает на следующую ступень, в которой снова разделяется по частоте и переносится во второй диапазон ПЧ (единый для всех каналов второй ступени) и так далее до последней ступени. Поэтому можно определить частоту сигнала с точностью до половины ширины канала последней ступени по набору сработавших индикаторов каждого частотного канала во всех ступенях. На практике часто используется матричный приемник с двумя ступенями, и он будет рассмотрен в настоящей статье.

Далее, для обработки сигналов на ПЧ предлагается подключить на выходе (на второй ступени) матричного приемника автокорреляционный или детекторный алгоритмы: автокорреляционный алгоритм, основанный на сравнении амплитуды каждого из четырех амплитудно-частотных спектров (на низкочастотных и высокочастотных составляющих после автокорреляции сигнала на принятой и удвоенной частотах) с пороговыми значениями, позволяющий анализировать тип принятого простого, ЛЧМ- и ФКМ-сигналов; а детекторный алгоритм, основанный на определении по ширине и характеру изменения формы низкочастотной детектированной составляющей, позволяющий определить тип принятого сложного сигнала, как ЛЧМ- и ФКМ-сигналов.

Задача определения местоположения ИРИ радиотехническими методами на плоскости или в пространстве сводится к измерению геометрических величин, однозначно характеризующих искомое местоположение. Однако отличие реальных условий

распространения радиоволн от идеальных и инструментальные погрешности измерений, обусловленные типом приемника, приводят к ошибкам в определении линий местоположения [14 – 16].

Цель работы – исследование точности определения местоположения ИРИ со сложными сигналами матричным приемником с автокорреляционным алгоритмом на выходе и матричным приемником с детекторным алгоритмом на выходе, и сравнение полученных результатов.

### Описание пассивной многопозиционной системы определения местоположения ИРИ на основе матричного приемника с подключением разных алгоритмов на выходе

При определении местоположения на плоскости необходимо найти две пересекающиеся линии положения. Тогда точка пересечения линий положения и дает искомое местоположение (засечку). При этом могут быть использованы линии положения различных типов [14 – 16]: при пеленгационном методе (рис. 1) – прямая, при разностно-дальномерном методе (рис. 2) – гипербола.

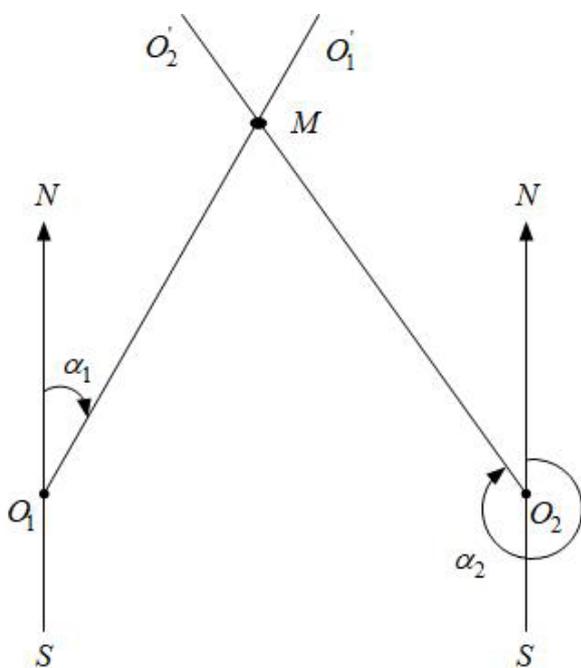


Рис. 1. Пеленгационный метод определения местоположения ИРИ

Fig. 1. Angular method for locating a target

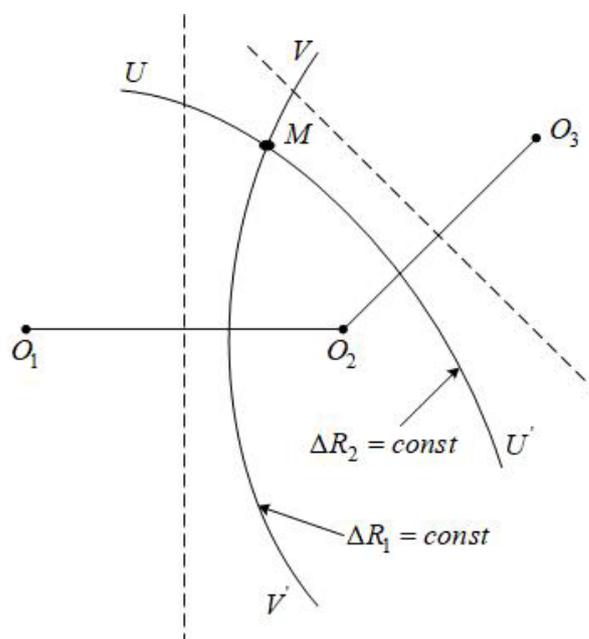


Рис. 2. Разностно-дальномерный метод определения местоположения ИРИ

Fig. 2. Range-difference method for locating a target

В рамках исследования данной работы рассмотрена система пеленгаторов (см. рис. 1), состоящая из двух пеленгаторов. Точка пересечения двух прямых совпадает с местоположением ИРИ  $M$ .

Разностно-дальномерный метод (см. рис. 2) требует наличия на плоскости двух пар опорных пунктов  $O_1, O_2$  и  $O_2, O_3$ . Один из них обычно общий ( $O_2$ ). Каждая пара станций используется для получения линий положения в виде гипербол с фокусами в опорных пунктах. Эти линии строятся как геометрические места точек с постоянной разностью расстояний:  $\Delta R_1 = \text{const}$  от  $O_1$  и  $O_2$ ;  $\Delta R_2 = \text{const}$  от  $O_2$  и  $O_3$ . Точка пересечения гипербол совпадает с местоположением ИРИ  $M$ .

## Оценка среднеквадратичных ошибок линий положения разных методов определения местоположения при использовании матричного приемника с автокорреляционным алгоритмом на выходе

Как написано выше, автокорреляционный алгоритм обладает рядом преимуществ [6], поэтому вызывает практический интерес к исследованию среднеквадратичных ошибок (СКО) линий положения пеленгационного и разностно-дальномерного методов, построенных на основе матричного приемника с автокорреляционным алгоритмом на выходе.

Среднеквадратичная ошибка определения прямой (пеленга) оценивается как:

$$\sigma_{lp\Pi} = R\sigma_{\theta}, \quad (1)$$

где  $R$  – расстояние от ИРИ до приемника;  $\sigma_{\theta} = \theta_{0,5}/\sqrt{\pi q_{\text{ВЫХ}}^2}$  – СКО пеленга в радианах;  $\theta_{0,5}$  – ширина диаграммы направленности по половинной мощности в радианах;  $q_{\text{ВЫХ}}$  – отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе приемника.

Среднеквадратичная ошибка гиперболической линии положения рассчитывается следующим образом:

$$\sigma_{lpPD} = \frac{R\sigma_{\Delta R}}{d\cos(\alpha)} \quad (2)$$

где  $\sigma_{\Delta R} = c\sigma_{\tau}$  – СКО разности расстояний;  $c$  – скорость света;  $\sigma_{\tau} = 1/(\pi\sqrt{q_{\text{ВЫХ}}^2}\Delta f_c)$  – СКО оценивания времени задержки;  $\Delta f_c$  – ширина спектра сигнала;  $\alpha$  – угол между нормалью к середине базы и радиус-вектором  $R$ .

Значение выходного ОСШ  $q_{\text{ВЫХА}}$  матричного приемника с автокорреляционным алгоритмом на выходе определяется по формуле:

$$q_{\text{ВЫХА}} = \frac{K_u m_1 m_2 q_{\text{ВХ}}^2}{\sqrt{1+2q_{\text{ВХ}}^2}} \sqrt{\frac{\Delta f_{\text{ВЧ}}}{\Delta f_{\text{НЧ}}}}, \quad (3)$$

где  $K_u$  – коэффициент усиления маломощных усилителей;  $m_1$  и  $m_2$  – количество каналов I и II ступени, которое определяется требованием к точности определения частоты сигналов ИРИ;  $\Delta f_{\text{ВЧ}}$  – полоса пропускания высокочастотного фильтра;  $\Delta f_{\text{НЧ}}$  – полоса пропускания низкочастотного фильтра;  $q_{\text{ВХ}}$  – ОСШ на входе.

С учетом (3) выражения (1) и (2) можно переписать как:

– СКО определения прямой (пеленга):

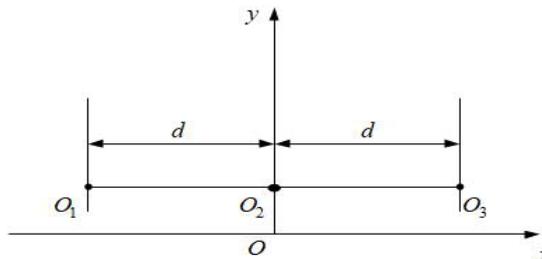
$$\sigma_{lp\Pi} = \frac{R\theta_{0,5}\sqrt{1+2q_{\text{ВХ}}^2}}{\sqrt{\pi}K_u m_1 m_2 q_{\text{ВХ}}^2} \sqrt{\frac{\Delta f_{\text{НЧ}}}{\Delta f_{\text{ВЧ}}}}. \quad (4)$$

– СКО гиперболической линии положения:

$$\sigma_{lpPD} = \frac{Rc\sqrt{1+2q_{\text{ВХ}}^2}}{\pi K_u m_1 m_2 q_{\text{ВХ}}^2 d\Delta f_c \cos(\alpha)} \sqrt{\frac{\Delta f_{\text{НЧ}}}{\Delta f_{\text{ВЧ}}}}. \quad (5)$$

При использовании разностно-дальномерного метода расчет осуществлялся для случая размещения приемных позиций при использовании разностно-дальномерного метода на одной прямой (рис. 3). Поэтому, выражение (5) можно представить в виде:

$$\sigma_{lpPD} = \frac{Rc\sqrt{1+2q_{\text{ВХ}}^2}}{\pi K_u m_1 m_2 q_{\text{ВХ}}^2 d\Delta f_c \cos\left(2\arccos\left(\frac{R}{\sqrt{d^2+R^2}}\right)\right)} \sqrt{\frac{\Delta f_{\text{НЧ}}}{\Delta f_{\text{ВЧ}}}}. \quad (6)$$



**Рис. 3. Вариант размещения опорных приемных пунктов при использовании разностно-дальномерного метода**

*Fig. 3. The variant of placement of reference receiving points when using the range-difference method*

Далее, исследуем СКО линий положения для матричного приемника с автокорреляционным алгоритмом на выходе при использовании пеленгационного (4) и разностно-дальномерного (6) методов измерения при различных условиях наблюдения.

Зададим следующие исходные данные с учетом обоснованных параметров автокорреляционного алгоритма в [9, 10]:  $m_1 = 6$ ;  $m_2 = 10$ ;  $\Delta f_{\text{нч}} = 10$  МГц;  $\Delta f_{\text{вч}} = 500$  МГц. Также отметим, что высокая вероятность распознавания простых и сложных сигналов в автокорреляционном алгоритме обеспечивается при  $q_{\text{вх}}$  более  $-2$  дБ [11], поэтому целесообразно выполнить их обработку при следующих значениях  $q_{\text{вх}}$ :  $2$  дБ и  $8$  дБ.

Результаты расчетов ошибок линий положения при разных методах местоопределения ИРИ при использовании матричного приемника с подключением автокорреляционного алгоритма на выходе представлены в табл. 1 и 2.

СКО линий положения при пеленгационном методе

Таблица 1

*RMS error of targeting lines in the angular method*

Table 1

Расстояние до цели, км	10				150			
	-2		8		-2		8	
ОСШ на входе, дБ	$\pi/18$		$\pi/3$		$\pi/18$		$\pi/3$	
Ширина диаграммы направленности в радианах	7,8	46,8	0,5	3,1	117	703	7,8	47,1
СКО прямой, м								

Таблица 2

СКО линий положения при разностно-дальномерном методе

*RMS error of targeting lines in the range-difference method*

Table 2

Расстояние до цели, км	10				150			
	-2		8		-2		8	
Расстояние между приемными пунктами, км	1				5			
ОСШ на входе, дБ	$\pi/18$		$\pi/3$		$\pi/18$		$\pi/3$	
Ширина спектра сигнала, МГц	2,5	250	2,5	250	2,5	250	2,5	250
СКО гиперболы, м	3,1	0,03	0,2	0,002	9,1	0,09	0,6	0,006

Из табл. 1 и 2 следует, что разностно-дальномерный метод имеет выше точности определения местоположения ИРИ по сравнению с пеленгационным методом.

При одинаковых условиях наблюдения с увеличением расстояния до цели или уменьшением значения ОСШ на входе СКО линий положений разных методов увеличивается. Так, для пеленгационного метода при  $\theta_{0,5} = \frac{\pi}{18}$  и  $q_{\text{вх}} = -2$  дБ увеличение расстояния до цели с 15 до 150 км приводит к увеличению СКО пеленга с 7,8 до 117 м; а для разностно-дальномерного метода при  $q_{\text{вх}} = -2$  дБ и  $\Delta f_c = 2,5$  МГц СКО гиперболы увеличивается с 3,1 до 9,1 м; для пеленгационного метода при  $R = 10$  км и  $\theta_{0,5} = \frac{\pi}{18}$  уменьшение ОСШ на входе с 8 до  $-2$  дБ приводит к увеличению СКО пеленга с 7,8 до 117 м; а для разностно-дальномерного метода при  $R = 10$  км и  $\Delta f_c = 250$  МГц СКО гиперболы увеличивается с 0,002 до 0,03 м.

При использовании пеленгационного метода при фиксированных значениях ОСШ на входе и расстояния до цели увеличение ширины диаграммы направленности ведет к увеличению СКО пеленга, например, при  $q_{\text{вх}} = -2$  дБ и  $R = 10$  км увеличение  $\theta_{0,5}$  с  $\frac{\pi}{18}$  до  $\frac{\pi}{3}$  ведет к увеличению СКО пеленга с 7,8 до 46,8 м.

При использовании разностно-дальномерного метода при фиксированных значениях ОСШ на входе и расстояния до цели увеличение ширины спектра принятого сигнала ведет к уменьшению СКО гиперболы, например, при  $q_{\text{вх}} = -2$  дБ и  $R = 150$  км увеличение  $\Delta f_c$  с 2,5 до 250 МГц ведет к уменьшению СКО гиперболы с 9,1 до 0,09 м.

## Сравнение соотношений между средними квадратичными ошибками местоопределения ИРИ матричным приемником с автокорреляционным алгоритмом на выходе и матричным приемником с детекторным алгоритмом на выходе

Хотя наиболее полное представление о точности местоопределения на плоскости дает эллипс ошибок заданной вероятности, наряду с ним используют СКО местоопределения, равную корню квадратному из ковариационной матрицы ошибок определения местоположения [14 – 16].

При вычислении координат по двум линиям положения выражение для СКО местоопределения определяется [14 – 16]:

$$R_{sk} = \frac{\sqrt{\sigma_{lp1}^2 + \sigma_{lp2}^2 + 2\rho\sigma_{lp1}\sigma_{lp2}\cos(\gamma)}}{\sin(\gamma)}, \quad (7)$$

где  $\sigma_{lp1}$  и  $\sigma_{lp2}$  – СКО определения первой и второй линий положения;  $\rho$  – коэффициент корреляции ошибок определения линий положения;  $\gamma$  – угол засечки (угол между линиями положения).

Для сравнения СКО местоопределения пеленгационного (см. рис. 1) и разностно-дальномерного (см. рис. 2) методов при использовании матричного приемника с автокорреляционным алгоритмом на выходе  $R_{skA}$  и матричного приемника с детекторным алгоритмом на выходе  $R_{skД}$  будем полагать, что  $\rho = 0$ ,  $\sigma_{lp1} = \sigma_{lp2} = \sigma_{lp}$ ,  $q_{вх}$ ,  $K_u$  и  $\theta_{0,5}$  приемников одинаковы, приемники ведут поиск ИРИ с одинаковыми характеристиками на одинаковом расстоянии.

При пеленгационном методе СКО местоопределения определяется как:

$$R_{sk} = \frac{R\theta_{0,5}\sqrt{2}}{\sqrt{\pi q_{вх}^2 \sin(\gamma)}}. \quad (8)$$

При разностно-дальномерном методе СКО местоопределения вычисляется как:

$$R_{sk} = \frac{cR\sqrt{2}}{\pi\sqrt{q_{вх}^2}\Delta f_c d \cos(\alpha) \sin(\varphi)}. \quad (9)$$

Причем ОСШ на выходе матричного приемника с детекторным алгоритмом на выходе рассчитывается как:

$$q_{вхД} \approx K_u m_1 m_2 q_{вх}^2. \quad (10)$$

С учетом (3) и (10) соотношение  $R_{skA}/R_{skД}$  может оценено как:

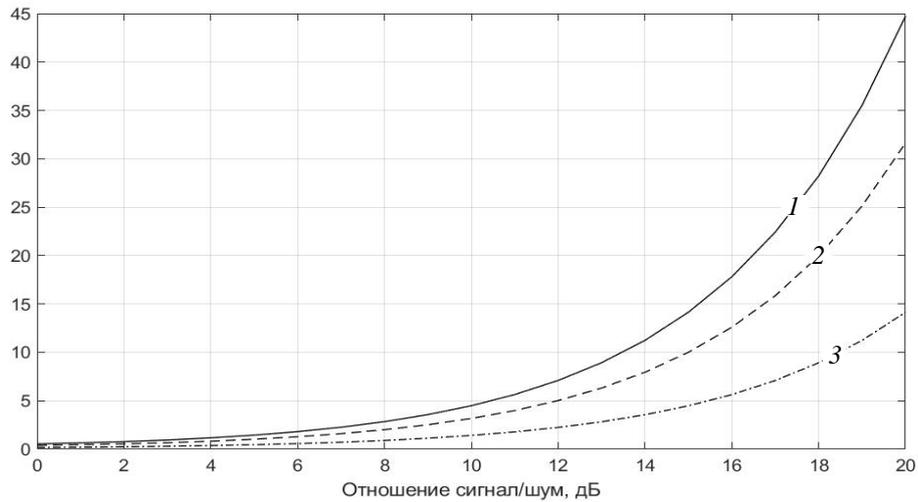
$$\frac{R_{skA}}{R_{skД}} = \frac{\sqrt{q_{вхД}^2}}{\sqrt{q_{вхA}^2}} = \sqrt{1 + 2q_{вх}^2} \sqrt{\frac{\Delta f_{нч}}{\Delta f_{вч}}}. \quad (11)$$

Учитывая обоснованные параметры автокорреляционного алгоритма в [9, 10] исследуем зависимость (11) при различных условиях наблюдения, обеспечивающих возможность обработки сигналов в матричных приемниках с подключением различных алгоритмов на выходе.

Зададим следующие исходные данные: для получения зависимости (рис. 4)  $q_{вх} = 0 \dots 20$  дБ,  $\Delta f_{вч} = 500$  МГц и  $\Delta f_{нч} = 5; 25; 50$  МГц, а для получения зависимости (рис. 5)  $q_{вх} = 0; 10; 20$  дБ,  $\Delta f_{вч} = 300 \dots 500$  МГц и  $\Delta f_{нч} = 5$  МГц.

Из рис. 4 следует, что при  $\Delta f_{вч} = 500$  МГц матричный приемник с автокорреляционным алгоритмом на выходе по сравнению с матричным приемником с детекторным алгоритмом на выходе обеспечивает улучшение точности определения местоположения в 2 раза при малых ОСШ  $q_{вх} = 0 \dots 4$  дБ. При увеличении  $q_{вх}$  с 4 до 20 дБ соотношение  $R_{skA}/R_{skM}$  увеличивается с 2 до 45 раз.

Полученная зависимость на рис. 5 показывает, что при уменьшении  $\Delta f_{вч}$  с 500 до 300 МГц ( $q_{вх} = 20$  дБ) обеспечивается увеличение соотношения  $R_{skA}/R_{skM}$  с 14 до 18,2 раз. При уменьшении  $\Delta f_{вч}$  до 300 МГц и  $q_{вх} = 10$  дБ соотношение  $R_{skA}/R_{skM}$  увеличивается с 1,4 до 2 раз.

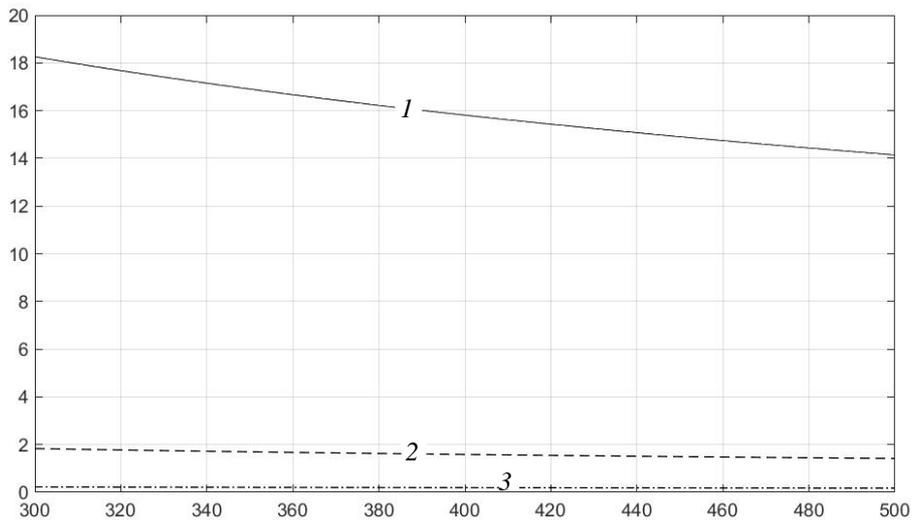


**Рис. 4. Зависимости соотношения  $R_{skA}/R_{skM}$  от  $q_{BX}$  при пеленгационном и разностно-дальномерном методах:**

$1 - \Delta f_{HЧ} = 50 \text{ МГц}; 2 - \Delta f_{HЧ} = 25 \text{ МГц}; 3 - \Delta f_{HЧ} = 5 \text{ МГц}$

**Fig. 4. Dependences of ratio  $R_{skA}/R_{skM}$  on  $q_{in}$  for angular and range-difference methods:**

$1 - \Delta f_{LF} = 50 \text{ MHz}; 2 - \Delta f_{LF} = 25 \text{ MHz}; 3 - \Delta f_{LF} = 5 \text{ MHz}$



**Рис. 5. Зависимости соотношения  $R_{skA}/R_{skM}$  от  $\Delta f_{BF}$  при пеленгационном и разностно-дальномерном методах:**

$1 - q_{BX} = 20 \text{ дБ}; 2 - q_{BX} = 10 \text{ дБ}; 3 - q_{BX} = 0 \text{ дБ}$

**Fig. 5. Dependences of ratio  $R_{skA}/R_{skM}$   $\Delta f_{HF}$  on for angular and range-difference methods:**

$1 - q_{in} = 20 \text{ dB}; 2 - q_{in} = 10 \text{ dB}; 3 - q_{in} = 0 \text{ dB}$

Также следует, что при  $q_{BX} = 0$  дБ соотношение  $R_{skA}/R_{skM}$  практически не изменяется. При этом матричный приемник с автокорреляционным алгоритмом на выходе по сравнению с матричным приемником с детекторным алгоритмом на выходе имеет в 4–5 раз худшую точность определения местоположения ИРИ.

Стоит отметить, что высокая достоверность распознавания сложных сигналов в детекторном алгоритме обеспечивается при ОСШ более 12 дБ [12, 13]. Поэтому при большом ОСШ, равном 12 дБ и более, соотношение  $R_{skA}/R_{skM}$  увеличивается в 1,5 раза и более.

### Заключение

Полученные результаты анализа расчетов и зависимостей позволяют сделать следующие выводы:

1. Матричный приемник с автокорреляционным алгоритмом на выходе с предложенными вариантами обработки сигналов пассивной многопозиционной системой обеспечивает все предпосылки для определения местоположения ИРИ с точностью при использовании пеленгационного метода от нескольких десятков метров до нескольких сотен метров, а при использовании разностно-дальномерного метода от единиц метров до десятков метров.

2. Матричный приемник с автокорреляционным алгоритмом имеет выше точности местоположения ИРИ по сравнению с матричным приемником с детекторным алгоритмом при использовании разных методов местоопределения при ОСШ на входе.

Таким образом, подключение автокорреляционного алгоритма на выходе матричного приемника позволяет улучшить характеристики приемника широкополосных сигналов, что рекомендует его использование в разработке комплекса радиотехнического мониторинга.

#### Список источников:

#### References:

1. Artes-Rodriguez A., Lazaro M., Tong L. Target location estimation in sensor networks using range information // Processing Workshop Proceedings Sensor Array and Multichannel Signal. 2004. P. 608-612. – DOI: 10.1109/SAM.2004.1503021.
2. Zemek R., Hara S., Yanagihara K., Kitayama K. A Joint Estimation of Target Location and Channel Model Parameters in an IEEE 802.15.4-based Wireless Sensor Network // IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2007. P. 1-5. DOI: 10.1109/PIMRC.2007.4394355.
3. Patwari N. Locationing the Nodes: Cooperative Localization in Wireless Sensor Networks / N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero III, R. L. Moses, N. S. Correal // IEEE Signal Processing Magazine. 2005. Vol. 22. No. 4. P. 54-69. DOI: 10.1109/MSP.2005.1458287.
4. Nowak M.J. Co-designed radar-communication using linear frequency modulation waveform / M. J. Nowak, Zhiping Zhang, Yang Qu, D. A. Dessorces, M. Wicks, Zhiqiang Wu // IEEE Military Communications Conference. 2016. P. 918-923. DOI: 10.1109/MILCOM.2016.7795447.
5. Jun S., Yu L. The Recognition of Hybrid Modulation Signal Combined with PRBC and LFM // Signal Processing (ICSP). 2012. Vol. 3. P. 1720-1723. DOI: 10.1109/ICoSP.2012.6491912.
6. Richter R., Coutinho O., Pereira T., Ivo F. Linear Frequency Modulation (LFM) Compression in Surveillance Radars: An Alternative for Target Discrimination in a Multi-Threat Scenario // IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference. 2018. P. 1-4. DOI: 10.1109/LAMC.2018.8699017.
7. Duong V.M. Detection and Parameters Estimation of Binary Phase Shift Keying Signals in Low Signal to Noise Ratio / V.M. Duong, J. Vesely, P. Hubacek, J. Premysl, N.G. Phan // 21st International Radar Symposium (IRS). 2021. P. 1-11. DOI: 10.23919/IRS51887.2021.9466208.
8. Eedara I.P., Amin M.G. Dual Function FH MIMO Radar System with DPSK Signal Embedding // 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). 2019. P. 1-5. DOI: 10.23919/EUSIPCO.2019.8902743.
9. Nhan N.T., Podstrigaev A.S., Nghi T.H. A Mathematical Model for Determining the Type of Signal Modulation in a Digital Receiver with Autocorrelation Processing // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2021. P. 1650-1654. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396097.
10. Nhan N.T., Podstrigaev A.S., Nghi T.H. Estimation of the Computational Complexity of the Algorithm for Determining the Type of Signal Modulation in the
1. Artes-Rodriguez A., Lazaro M., Tong L. Target location estimation in sensor networks using range information // Processing Workshop Proceedings Sensor Array and Multichannel Signal. 2004. P. 608-612. – DOI: 10.1109/SAM.2004.1503021.
2. Zemek R., Hara S., Yanagihara K., Kitayama K. A Joint Estimation of Target Location and Channel Model Parameters in an IEEE 802.15.4-based Wireless Sensor Network // IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2007. P. 1-5. DOI: 10.1109/PIMRC.2007.4394355.
3. Patwari N. Locationing the Nodes: Cooperative Localization in Wireless Sensor Networks / N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero III, R. L. Moses, N. S. Correal // IEEE Signal Processing Magazine. 2005. Vol. 22. No. 4. P. 54-69. DOI: 10.1109/MSP.2005.1458287.
4. Nowak M.J. Co-designed radar-communication using linear frequency modulation waveform / M. J. Nowak, Zhiping Zhang, Yang Qu, D. A. Dessorces, M. Wicks, Zhiqiang Wu // IEEE Military Communications Conference. 2016. P. 918-923. DOI: 10.1109/MILCOM.2016.7795447.
5. Jun S., Yu L. The Recognition of Hybrid Modulation Signal Combined with PRBC and LFM // Signal Processing (ICSP). 2012. Vol. 3. P. 1720-1723. DOI: 10.1109/ICoSP.2012.6491912.
6. Richter R., Coutinho O., Pereira T., Ivo F. Linear Frequency Modulation (LFM) Compression in Surveillance Radars: An Alternative for Target Discrimination in a Multi-Threat Scenario // IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference. 2018. P. 1-4. DOI: 10.1109/LAMC.2018.8699017.
7. Duong V.M. Detection and Parameters Estimation of Binary Phase Shift Keying Signals in Low Signal to Noise Ratio / V.M. Duong, J. Vesely, P. Hubacek, J. Premysl, N.G. Phan // 21st International Radar Symposium (IRS). 2021. P. 1-11. DOI: 10.23919/IRS51887.2021.9466208.
8. Eedara I.P., Amin M.G. Dual Function FH MIMO Radar System with DPSK Signal Embedding // 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). 2019. P. 1-5. DOI: 10.23919/EUSIPCO.2019.8902743.
9. Nhan N.T., Podstrigaev A.S., Nghi T.H. A Mathematical Model for Determining the Type of Signal Modulation in a Digital Receiver with Autocorrelation Processing // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2021. P. 1650-1654. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396097.
10. Nhan N.T., Podstrigaev A.S., Nghi T.H. Estimation of the Computational Complexity of the Algorithm for Determining the Type of Signal Modulation in the

Autocorrelation Receiver // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2021. P. 1655-1658. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396254.

11. Лихачев В.П., Веселков А.А., Нгуен Чонг Нхан Характеристики обнаружения линейно-частотно-модулированных, фазо-кодо-манипулированных и простых радиопульсов в автокорреляционном приемнике // Радиотехника. 2018. № 8. С. 71-76.

12. Wilson D.L., Wayman J. L. Signal detection by detecting departure from noise // IEEE Sixth SP Workshop on Statistical Signal and Array Processing. 1992. P. 118-121. DOI: 10.1109/SSAP.1992.246862.

13. Besson O., Scharf L.L., Vincent F. Matched direction detectors and estimators for array processing with subspace steering vector uncertainties // IEEE Trans. Signal Process. 2005. Vol. 53. No. 12. P. 4453-4463. – DOI: 10.1109/TSP.2005.859336.

14. Wang C., Liu W., Jiang M. A Unified Approach for Target Direction Finding Based on Convolutional Neural Networks // IEEE 30th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing. 2020. P. 1-6. DOI: 10.1109/MLSP49062.2020.9231787.

15. Liu M., Chen H., Qiu Z., Ren X. Moving Target Location Method Based on Euclidean Distance and Camshift Algorithm // Eighth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control. 2018. P. 558-563. DOI: 10.1109/IMCCC.2018.00123.

16. Lee J. Performance Verification of a Target Tracking System With a Laser Rangefinder / J. Lee, S. Lee, Y. Lee, Y. Kim, Y. Heo, T. Yoon // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 30993-31009. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3060061.

#### Информация об авторах

##### Чонг Нхан Нгуен

аспирант кафедры радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

##### Алексей Сергеевич Подстригаев

кандидат технических наук, доцент, докторант, доцент кафедры радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Autocorrelation Receiver // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2021. P. 1655-1658. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396254.

11. Likhachev V.P., Veselkov A.A., Nguyen Ch. Nh. Characteristics of Detecting Linear-Frequency-Modulated, Phase-Code-Shifted and Simple Radio Pulses in an Autocorrelation Receiver. Radiotekhnika. 2018;8:71-76.

12. Wilson D.L., Wayman J. L. Signal detection by detecting departure from noise // IEEE Sixth SP Workshop on Statistical Signal and Array Processing. 1992. P. 118-121. DOI: 10.1109/SSAP.1992.246862.

13. Besson O., Scharf L.L., Vincent F. Matched direction detectors and estimators for array processing with subspace steering vector uncertainties // IEEE Trans. Signal Process. 2005. Vol. 53. No. 12. P. 4453-4463. – DOI: 10.1109/TSP.2005.859336.

14. Wang C., Liu W., Jiang M. A Unified Approach for Target Direction Finding Based on Convolutional Neural Networks // IEEE 30th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing. 2020. P. 1-6. DOI: 10.1109/MLSP49062.2020.9231787.

15. Liu M., Chen H., Qiu Z., Ren X. Moving Target Location Method Based on Euclidean Distance and Camshift Algorithm // Eighth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control. 2018. P. 558-563. DOI: 10.1109/IMCCC.2018.00123.

16. Lee J. Performance Verification of a Target Tracking System With a Laser Rangefinder / J. Lee, S. Lee, Y. Lee, Y. Kim, Y. Heo, T. Yoon // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 30993-31009. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3060061.

#### Information about authors:

##### Chong Nhan Nguyen

Post-graduate student of the Department «Radio Electronic Facilities» of St. Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V.I. Ulyanov (Lenin)

##### Aleksey Sergeevich Podstrigaev

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral Candidate, Associate Professor of the Department «Radio Electronic Facilities» of St. Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V.I. Ulyanov (Lenin)

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 05.03.2022; одобрена после рецензирования 21.03.2022; принята к публикации 23.03.2022.**

**The article was submitted 05.03.2022; approved after reviewing 21.03.2022; accepted for publication 23.03.2022.**

**Рецензент** – Горбунов А.Н., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

**Reviewer** – Gorbunov A.N., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.