



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-8-84-91>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 519.615.5

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ЦЕЛЕЙ В УГЛОМЕРНО-РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ ЧИСЛЕННЫМИ ИТЕРАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

А. А. ДМИТРЕНКО¹, С. Ю. СЕДЫШЕВ²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²«МилитСофт Солюшенс» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 17.06.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Аннотация. В статье представлены результаты анализа использования итерационных численных алгоритмов вычисления корней систем нелинейных уравнений (Левенберга-Марквардта, алгоритм Ньютона, модифицированный алгоритм Ньютона, последовательных итераций и градиентного спуска), описывающих процесс вычисления пространственных прямоугольных координат источников радиоизлучения в угломерно-разностно-дальномерных комплексах пассивной локации с различной конфигурацией (содержащих в своем составе от двух до четырех приемников). Исследования включали в себя определение оптимального числа приемных пунктов и выбор наиболее эффективного способа преобразования координат вектора наблюдаемых параметров (совокупность оценок разностей дальности и угловых координат излучающих радиосигналы объектов в привязке к пространственному расположению приемников системы) в вектор измеряемых параметров (пространственные прямоугольные координаты объекта наблюдения). Критериями для последующего сравнения результатов использования анализируемых алгоритмов были определены следующие характеристики: рабочая зона комплекса пассивной локации (часть пространства, в пределах которой отклонение оценок координат целей от их истинных значений не превышает максимально допустимых значений); средняя ошибка вычисления пространственных координат целей в рабочей зоне; число этапов вычисления координат источников радиоизлучения в исследуемой части пространства. Результаты сравнительного анализа полученных численных значений выбранных критериев позволили сделать выводы о том, что оптимальными являются реализация угломерно-разностно-дальномерных комплексов пассивной локации в составе четырех приемных пунктов и применение для вычисления пространственных координат источников радиоизлучения алгоритма Левенберга-Марквардта.

Ключевые слова: угломерно-разностно-дальномерный комплекс пассивной локации, прямоугольные пространственные координаты, численный метод решения системы нелинейных уравнений.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Дмитренко, А. А. Вычисление пространственных координат целей в угломерно-разностно-дальномерных комплексах пассивной локации численными итерационными методами / А. А. Дмитренко, С. Ю. Седышев // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 8. С. 84–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-8-84-91>.

TARGETS SPATIAL COORDINATES CALCULATION IN ANGLE-DIFFERENCE-RANGEFINDER PASSIVE LOCATION COMPLEXES BY NUMERICAL ITERATIVE METHODS

ALES A. DMITRENKO¹, SERGEY Y. SEDYSHEV²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²“MilitSoft Solutions” (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 17.06.2022

Abstract. This paper presents the analysis results of the iterative numerical algorithms use for roots calculating of nonlinear equations systems (Levenberg-Marquardt, Newton’s algorithm, modified Newton’s algorithm, sequential iterations and gradient descent) describing the process of spatial rectangular coordinates calculating of radio emission sources in the angle-difference-rangefinder passive location complexes with different configurations (containing from 2 to 4 receivers). The main objectives of the work include determining optimal number of receiving points and choosing the most effective way to transform the coordinates of the observed parameters vector (a set of range differences and angular coordinates estimates of objects emitting radio signals in relation to the receiver spatial location of the system) into a measured parameters vector (spatial rectangular coordinates of the observation object). The criteria for further comparison of the using analyzed algorithms results were determined by the following characteristics: working area of the passive location complex (the part of the space within which the targets coordinates estimates deviation from their true values does not exceed the maximum allowable values); average error of calculating the target spatial coordinates in the working area; number of coordinate calculating stages of radio sources in the studied part of the space. The results of a comparative analysis of the obtained numerical values by the selected criteria allowed us to conclude that the optimal implementation is the implementation of the angle-difference-rangefinder passive location complexes consisting of four receiving points and the use of the Levenberg-Marquardt algorithm for calculating the spatial coordinates of radio emission sources.

Keywords: angle-difference-rangefinder passive location complex, rectangular spatial coordinates, numerical method for nonlinear equations system solving.

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

For citation. Dmitrenko A. A., Sedyshev S. Y. (2022) Targets Spatial Coordinates Calculation in Angle-Difference-Rangefinder Passive Location Complexes by Numerical Iterative Methods. *Doklady BGUIR*. 20 (8), 84–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-8-84-91> (in Russian).

Введение

В комплексах пассивной локации (КПЛ) координаты целей определяются путем обработки совокупности первичных измеряемых параметров: угловых направлений (азимут, угол места) или разностей дальности прохождения радиосигналов от цели до распределенных в пространстве приемных пунктов (ПП) системы. По сравнению с активной локацией необходимым условием является наличие на борту цели излучающих радиосигналы систем.

В зависимости от первоначально определенного набора исходных измеряемых параметров могут быть реализованы следующие типы комплексов пассивной локации:

- угломерный (при использовании только оценок угловых направлений на источники радиоизлучения (ИРИ));
- разностно-дальномерные (при использовании только оценок разностей дальности);
- угломерно-разностно-дальномерный (УРД) (при использовании оценок как угловых направлений на ИРИ, так и оценок разностей дальности между ИРИ и соответствующими парами приемных пунктов комплекса) [1].

Анализируемый в статье угломерно-разностно-дальномерный способ обладает, по сравнению с другими, следующими преимуществами [2–4]:

- а) высокая потенциальная точность определения пространственных координат ИРИ;
- б) направленная антенная система необходима только на одном приемном пункте (в сравнении с угломерным комплексом);
- в) отсутствие необходимости сложной системы координации обзора пространства системой направленных антенн (в сравнении с угломерным комплексом);

г) для оценки разностей времени запаздывания сигналов ИРИ базово-корреляционной обработки отсутствует необходимость в точной информации о параметрах и характеристиках обрабатываемых сигналов;

д) обеспечение наибольшей рабочей зоны [4].

Проведено математическое имитационное моделирование процесса вычисления прямоугольных пространственных координат ИРИ путем решения различными численными итерационными способами систем нелинейных уравнений, обеспечивающих преобразование вектора наблюдаемых параметров (совокупность оценок разностей дальности и угловых координат источников радиоизлучения) в вектор измеряемых параметров (пространственные прямоугольные координаты объекта наблюдения) с целью определения оптимального числа приемных пунктов УРД комплексов пассивной локации и выбора наиболее эффективного алгоритма координатных преобразований.

Постановка задачи

В угломерно-разностно-дальномерных комплексах пассивной локации непосредственно оцениваются следующие параметры: угловые направления на ИРИ и разности времени запаздывания сигналов ИРИ относительно определенных пар ПП, которые далее пересчитываются в разности дальностей. Конечному потребителю представление координатной информации необходимо в декартовой прямоугольной системе координат. Поскольку эти системы координат связаны между собой нелинейно, для преобразования координатной информации из одной системы в другую надо составить и решить соответствующие системы нелинейных уравнений (СНУ). Изначально известными параметрами в СНУ являются координаты приемных пунктов комплекса, значения оценок угловых координат (азимута) и разности дальностей ИРИ относительно соответствующих пар ПП. Для формирования соответствующих СНУ нужно принять решение о числе приемных пунктов, из которых будет состоять комплекс пассивной локации, а также о конкретном наборе первичных измеряемых координатных параметров на этих ПП. При принятии решения необходимо учитывать следующие возможные ограничительные факторы:

- для снижения сложности и уменьшения конечной стоимости комплекса целесообразно включить в его состав минимально необходимое число приемных пунктов;
- в определенных условиях взаимного расположения ИРИ и ПП КПЛ (например, при входе цели в рабочую зону КПЛ) часть первичных оценок измеряемых параметров являются недоступными.

С учетом вышеуказанных ограничений рассмотрены три возможные ситуации.

1. Комплекс пассивной локации состоит из двух приемных пунктов. Первичными измеряемыми параметрами являются один азимут и одна разность дальностей. Выходная координатная информация представляет собой две прямоугольные координаты ИРИ (X, Y). Система нелинейных уравнений в этом случае имеет вид:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \Delta r_{12} = 0; \\ \left(\operatorname{atan} \left(\frac{x - x_1}{y - y_1} \right) + \frac{\pi}{2} (2 - \operatorname{sign}(x - x_1) - \operatorname{sign}(x - x_1) \operatorname{sign}(y - y_1)) \right) - \beta_1 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

2. Комплекс пассивной локации состоит из трех приемных пунктов. Первичными измеряемыми параметрами являются один азимут и две разности дальностей. Выходная координатная информация представляет собой три прямоугольные координаты ИРИ (X, Y, Z). Система нелинейных уравнений в этом случае имеет вид:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \Delta r_{12} = 0; \\ \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} - \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} - \Delta r_{13} = 0; \\ \left(\operatorname{atan} \left(\frac{x - x_1}{y - y_1} \right) + \frac{\pi}{2} (2 - \operatorname{sign}(x - x_1) - \operatorname{sign}(x - x_1) \operatorname{sign}(y - y_1)) \right) - \beta_1 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

3. Комплекс пассивной локации состоит из четырех приемных пунктов. Первичными измеряемыми параметрами являются один азимут и три разности дальностей. Выходная координатная информация представляет собой три прямоугольные координаты ИРИ (X, Y, Z). Система нелинейных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} - \Delta r_{01} = 0; \\ \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \Delta r_{02} = 0; \\ \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} - \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} - \Delta r_{03} = 0; \\ \left(\operatorname{atan} \left(\frac{x - x_0}{y - y_0} \right) + \frac{\pi}{2} (2 - \operatorname{sign}(x - x_0) - \operatorname{sign}(x - x_0) \operatorname{sign}(y - y_0)) \right) - \beta_0 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

В формулах (1)–(3): x_i, y_i, z_i – координаты ПП КПЛ; x, y, z – вычисляемые координаты ИРИ; $\Delta r_{i,j}$ – оценки разностей дальности ИРИ; β_i – оценки азимута ИРИ.

Для вычисления корней представленных в (1)–(3) СЗУ не существует достаточно эффективных способов общего характера. При решении данных систем пригодны только приближенные численные методы, которые путем последовательных итераций при определенных условиях позволяют приблизиться к истинным значениям пространственных координат ИРИ: $\mathbf{X}_k = (x_k, y_k, z_k)$, $k = 0, 1, 2, \dots, n$. Если итерационный процесс сходится, то граничное значение является решением системы уравнений [5, 6].

Для решения сформированных систем нелинейных уравнений применяли следующие алгоритмы: Ньютона, модифицированный алгоритм Ньютона, градиентного спуска, последовательных итераций и Левенберга-Марквардта. Сравнительный анализ результатов их использования проводили на основании следующих критериев качества:

- рабочая зона КПЛ – область пространства, в пределах которой отклонение оценок координат целей от их истинных значений не превышает максимально допустимых значений;
- средняя ошибка вычисления пространственных координат в рабочей зоне КПЛ;
- число итераций вычисления координат ИРИ в анализируемой части пространства.

Исходные условия проведения исследований

В случае наличия в составе КПЛ двух или трех ПП они располагались на удалении 20 км от начала системы координат при угловых смещениях 120° относительно друг друга. При анализе работы КПЛ, в состав которого входили четыре приемных пункта, еще один центральный ПП находился в начале системы координат. Зона исследования представляла собой область пространства, ограниченную следующими параметрами: 400×400 км на плоскости при фиксированной высоте нахождения ИРИ 10 км. Внутри данной области плоскостные координаты ИРИ (X, Y) выбирались дискретно с шагом 10 км.

Для каждой из анализируемых точек пространственного расположения объекта наблюдения рассчитывали угловые координаты и разности дальностей (с учетом известных координат ПП КПЛ и ИРИ). После чего вычисляли пространственные координаты ИРИ путем расчета корней систем нелинейных уравнений каждым из анализируемых способов.

В состав рабочей зоны КПЛ включали лишь те точки анализируемой области пространства, в которых ошибки вычисления пространственных координат ИРИ не превышали 2 км. Далее производили оценку средней ошибки вычисления координат в точках, попавших в рабочую зону КПЛ. Для оценки вычислительной эффективности рассматриваемых алгоритмов фиксировали количество итераций расчета пространственных координат целей по всей области анализа.

Результаты исследований и их обсуждение

Отсутствие возможности обращения матрицы Якоби по причине ее вырожденности сделало применение алгоритмов Ньютона (как обычного, так и модифицированного) невозможным. При использовании алгоритма простых итераций было обнаружено отсутствие сходимости итерационного процесса поиска решения СЗУ. По этим причинам в дальнейшем в рассмотрении оставили только градиентный алгоритм и алгоритм Левенберга-Марквардта.

Зависимости величины ошибок вычисления плоскостных координат X , Y ИРИ от его пространственного расположения при наличии в составе КПЛ двух ПП приведены на рис. 1.

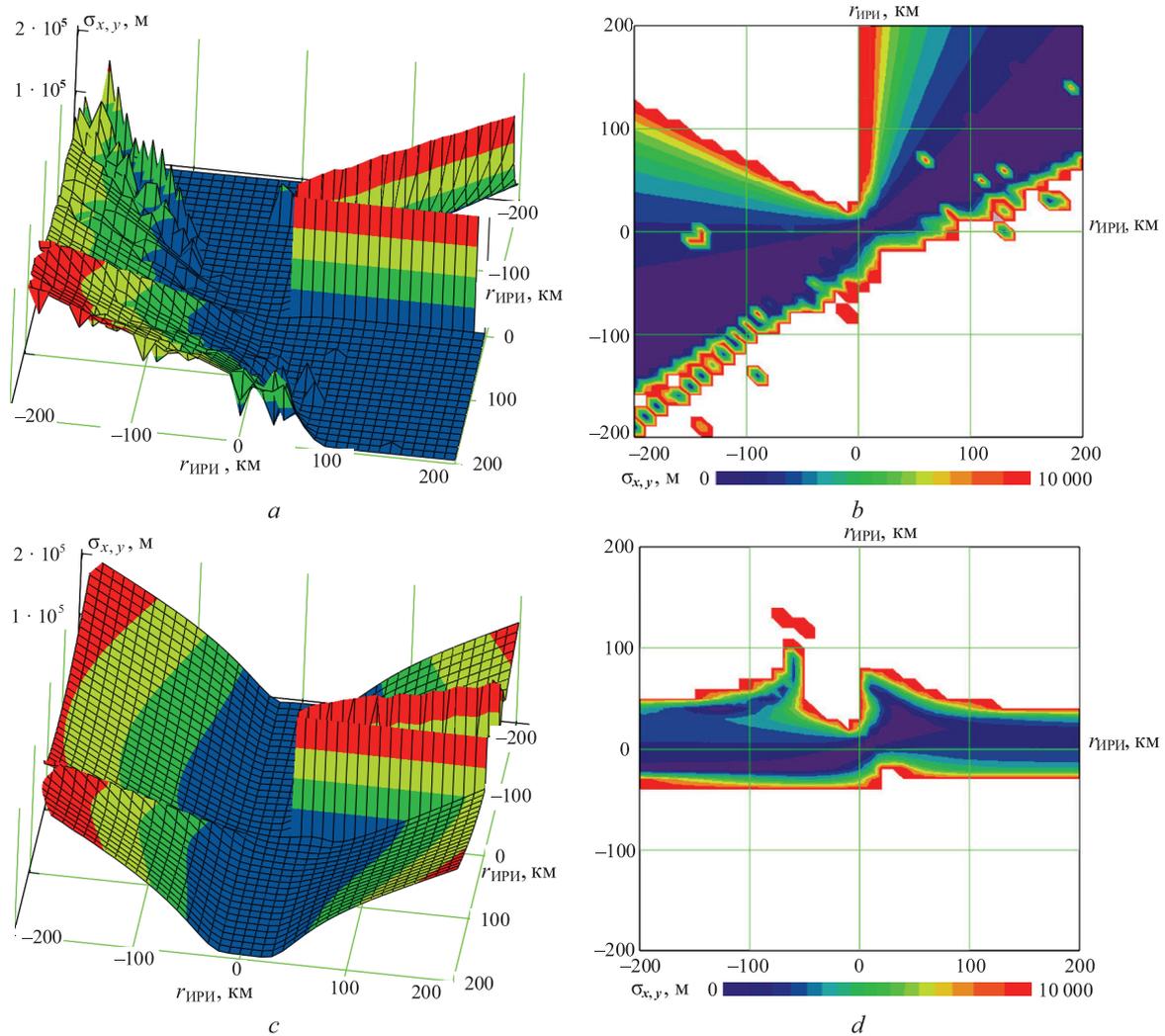


Рис. 1. Зависимость величины ошибок вычисления координат X , Y источника радиоизлучения от его расположения в пространстве при включении в состав комплекса пассивной локации двух приемных пунктов: a , b – метод градиентного спуска; c , d – метод Левенберга-Марквардта
Fig. 1. Dependence of radio source coordinates X , Y error value on its space location when 2 receivers are included in passive radar: a , b – gradient descent method; c , d – Levenberg-Marquardt method

Размеры рабочей зоны, значение средней ошибки вычисления координат в рабочей зоне, а также число итераций при вычислении координат в анализируемой области пространства при наличии в составе КПЛ двух ПП и определении двух пространственных координат X , Y ИРИ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Показатели качества комплекса пассивной локации (вычисление двух координат X , Y источника радиоизлучения, двух приемных пунктов в составе комплекса пассивной локации)
Table 1. Passive radar quality indicators (calculation of 2 coordinates X , Y of IRI, 2 receivers are included)

Критерий качества / Quality criterion	Метод градиентного спуска / Gradient descent algorithm	Метод Левенберга-Марквардта / Levenberg-Marquardt algorithm
Рабочая зона, % анализируемой зоны	25,8	7,5
Средняя ошибка вычисления координат в рабочей зоне, м	726	1095
Число итераций при вычислении координат в анализируемой зоне	$1,029 \cdot 10^7$	$1,588 \cdot 10^7$

Зависимости величины ошибок вычисления координат X, Y, Z ИРИ от его пространственного расположения при наличии в составе КПЛ трех ПП приведены на рис. 2.

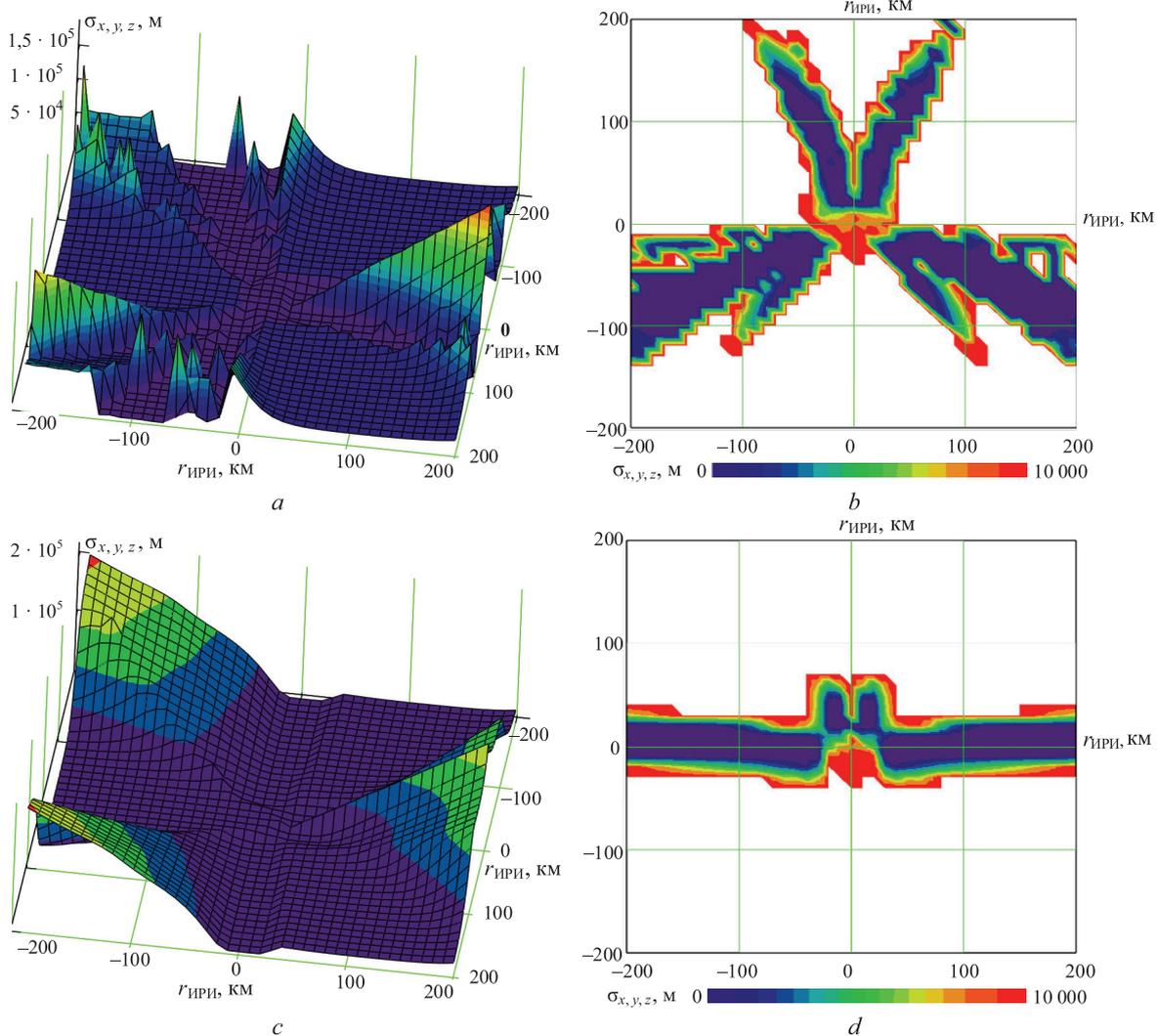


Рис. 2. Зависимость величины ошибок вычисления координат X, Y, Z источника радиоизлучения от его расположения в пространстве при включении в состав комплекса пассивной локации трех приемных пунктов: a, b – метод градиентного спуска; c, d – метод Левенберга-Марквардта
Fig. 2. Dependence of radio source coordinates X, Y, Z error value on its space location when 3 receivers are included in passive radar: a, b – gradient descent method; c, d – Levenberg-Marquardt method

Размеры рабочей зоны, значение средней ошибки вычисления координат в рабочей зоне, а также число итераций при вычислении пространственных координат в анализируемой зоне при наличии в составе КПЛ трех ПП и определении трех пространственных координат X, Y, Z ИРИ приведены в табл. 2.

Таблица 2. Показатели качества комплекса пассивной локации (вычисление трех координат X, Y, Z источника радиоизлучения, трех приемных пунктов в составе комплекса пассивной локации)

Table 2. Passive radar quality indicators (calculation 3 coordinates X, Y, Z of IRI, 3 receivers are included)

Критерий качества / Quality criterion	Метод градиентного спуска / Gradient descent algorithm	Метод Левенберга-Марквардта / Levenberg-Marquardt algorithm
Рабочая зона, % анализируемой зоны	18,4	8,9
Средняя ошибка вычисления координат в рабочей зоне, м	340	221
Число итераций при вычислении координат в анализируемой зоне	$1,378 \cdot 10^7$	$1,328 \cdot 10^7$

Зависимости величины ошибок вычисления координат X, Y, Z ИРИ от его пространственного расположения при наличии в составе КПЛ четырех ПП приведены на рис. 3.

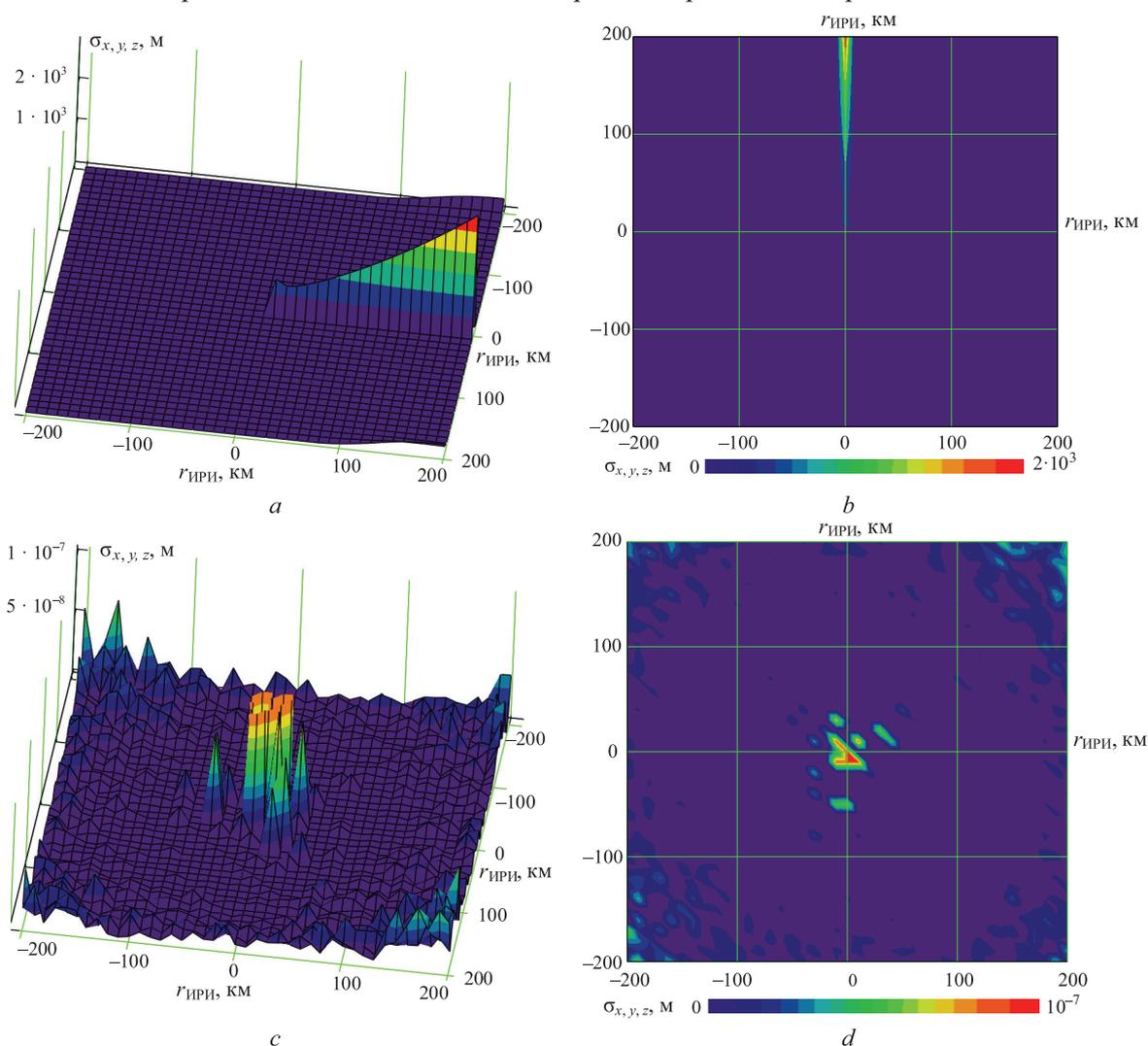


Рис. 3. Зависимость величины ошибок вычисления координат X, Y, Z источника радиоизлучения от его расположения в пространстве при включении в состав комплекса пассивной локации четырех приемных пунктов: a, b – метод градиентного спуска; c, d – метод Левенберга-Марквардта
Fig. 3. Dependence of radio source coordinates X, Y, Z error value on its space location when 4 receivers are included in passive radar: a, b – gradient descent method; c, d – Levenberg-Marquardt method

Размеры рабочей зоны, величина средней ошибки вычисления координат в рабочей зоне, а также число итераций при вычислении координат в анализируемой области пространства при включении в состав КПЛ четырех ПП и определении трех пространственных координат X, Y, Z ИРИ приведены в табл. 3.

Таблица 3. Показатели качества комплекса пассивной локации (вычисление трех координат X, Y, Z источника радиоизлучения, четырех приемных пунктов в составе комплекса)

Table 3. Passive radar quality indicators (calculation of 3 coordinates X, Y, Z of IRI, 4 receivers are included)

Критерий качества / Quality criterion	Метод градиентного спуска / Gradient descent algorithm	Метод Левенберга-Марквардта / Levenberg-Marquardt algorithm
Рабочая зона, % анализируемой зоны	99,6	100
Средняя ошибка вычисления координат в рабочей зон, м	15	$3,559 \cdot 10^{-9}$
Число итераций при вычислении координат в анализируемой зоне	$3,621 \cdot 10^6$	$2,152 \cdot 10^4$

Заключение

Согласно сравнительному анализу полученных характеристик и зависимостей, можно сделать следующие выводы. Методы Ньютона (в том числе модифицированный) и последовательных итераций оказались неприменимы во всех рассмотренных случаях. При наличии в составе комплексов пассивной локации двух и трех приемных пунктов размеры рабочей зоны не превысили 25,8 %, что нельзя назвать приемлемым результатом. В случае наличия в составе комплексов пассивной локации четырех приемных пунктов размеры рабочей зоны составили почти 100 % от анализируемой при использовании методов градиентного спуска и Левенберга-Марквардта. Причем второй метод оказался менее затратным в вычислительном плане (на два порядка), а также обеспечил более высокую точность (на девять порядков). Таким образом, оптимальным в рассмотренных условиях является включение в состав угломерно-разностно-дальномерных комплексов пассивной локации четырех приемных пунктов и использование для вычисления пространственных координат источников радиоизлучения метода Левенберга-Марквардта.

Список литературы

1. Черняк, В. С. Многопозиционная радиолокация / В. С. Черняк. М.: Радио и связь, 1993.
2. Дмитренко, А. А. Межпозиционное пространственно-временное отождествление сигналов в многопозиционных базово-корреляционных комплексах пассивной локации / А. А. Дмитренко, С. Ю. Седышев // Доклады БГУИР. 2016. № 99. С. 85–91.
3. Охрименко, А. Е. Основы обработки и передачи информации / А. Е. Охрименко. Минск: МВИЗРУ ПВО, 1990.
4. Дмитренко, А. А. Результаты анализа зон действия пассивных разностно-дальномерных систем обнаружения источников радиоизлучения с минимизацией интервала обзора по разности хода / А. А. Дмитренко, С. Ю. Седышев // Доклады БГУИР. 2014. № 84. С. 67–73.
5. Мышенков, В. И. Численные методы / В. И. Мышенков, Е. В. Мышенков. М., 2001.
6. Nocedal, J. Numerical Optimization / J. Nocedal, S. J. Wright. New York: Springer, 1999.

References

1. Chernyak V. S. (1993) *Multiposition Radiolocation*. Moscow, Radio i Svyaz' Publ. (in Russian).
2. Dmitrenko A. A., Sedyshev S. Y. (2016) Identification of Signals in Multi-Static Cross-Correlation Passive Radars. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. (99), 85–91 (in Russian).
3. Ohrimenko A. E. (1990) *Fundamentals of Information Processing and Transmission*. Minsk: MVIZRU PVO (in Russian).
4. Dmitrenko A. A., Sedyshev S. Y. (2014) Analysis of Operative Ranges of Passive Time Delay Estimation of Multi-Static Primary Surveillance Radar with Time Delay Sector Minimization. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. (84), 67–73 (in Russian).
5. Myshenkov V. I., Myshenkov E. V. (2001) *Numerical Methods*. Moscow (in Russian).
6. Nocedal J., Wright S. J. (1999) *Numerical Optimization*. New York, Springer.

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи / Authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Дмитренко А. А., к.т.н., доцент, начальник кафедры РЭТ ВВС и войск ПВО Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Седышев С. Ю., к.т.н., доцент, начальник научного отдела ООО «МилитСофт Солошнен».

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел. +375 17 293-80-83
E-mail: a.dmitrenko@bsuir.by
Дмитренко Аlesia Александрович

Information about the authors

Dmitrenko A. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of Air Force and Air Defense Electronic Equipment Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Sedyshev S. Y., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Scientific Department LLC "MilitSoft Solutions".

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel. +375 17 293-80-83
E-mail: a.dmitrenko@bsuir.by
Dmitrenko Alesia Alexandrovich