



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-35-43>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 519.615.5

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ЦЕЛЕЙ В РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ МЕТОДОМ ЛЕВЕНБЕРГА – МАРКВАРДТА

ДМИТРЕНКО А.А.¹, СЕДЫШЕВ С.Ю.², КУЛЕШОВ Ю.Е.¹, БОГАТЫРЕВ А.А.¹

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

²ООО «НТП РЭАТЕХНО» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 27 февраля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В статье проведено исследование и анализ результатов применения численных итерационных методов решения систем нелинейных уравнений (Ньютона, модифицированный метод Ньютона, градиентного спуска, последовательных итераций, Левенберга – Марквардта), составленных и используемых для вычисления прямоугольных пространственных координат источников радиоизлучения в разностно-дальномерных комплексах пассивной локации различной конфигурации (имеющих в своем составе от 3 до 4 приемных пунктов). Целью исследований явилось определение оптимального числа приемных пунктов и выбор наиболее эффективного алгоритма координатных преобразований вектора наблюдаемых параметров (совокупность оценок разностей дальности от источника радиоизлучения до соответствующих пар приемных пунктов) в вектор измеряемых параметров (прямоугольные пространственные координаты объекта наблюдения). В качестве критериев сравнения результатов использования рассматриваемых методов использовались следующие параметры: 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 итераций вычисления координат цели в анализируемой части пространства. Проведя сравнительный анализ полученных характеристик и зависимостей, был сделан вывод о том, что оптимальным является включение в состав разностно-дальномерных комплексов пассивной локации четырех приемных пунктов и использование для вычисления пространственных координат источников радиоизлучения метода Левенберга – Марквардта.

Ключевые слова: 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., Седышев С.Ю., Кулешов Ю.Е., Богатырев А.А. Вычисление пространственных координат целей в разностно-дальномерных комплексах пассивной локации методом Левенберга – Марквардта. Доклады БГУИР. 2020; 18(5): 35-43.

CALCULATION OF SPATIAL TARGET COORDINATES IN RANGE-DIFFERENCE PASSIVE RADARS BY THE LEVENBERG – MARQUARDT METHOD

ALES A. DMITRENKO¹, SERGEY Y. SEDYSHEV², YURI Y. KULESHOV¹,
ANATOLY A. BOGATYREV¹

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

² *NTP REATehno (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 27 February 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. This article studies and analyzes the results of applying numerical iterative methods for solving nonlinear equation systems (Newton, modified Newton's method, gradient descent, sequential iterations, Levenberg – Marquardt), compiled and used to calculate the rectangular spatial coordinates of radio emission sources in range-difference passive radars of various configurations (incorporating from 3 to 4 receiving points). The aim of the research was to determine the optimal number of receiving points and to select the most effective algorithm for coordinate transformations of the vector of observed parameters (a set of range difference estimates from radio emission sources to the corresponding pairs of receiving points) into the vector of measured parameters (rectangular spatial coordinates). The following parameters were used as comparison criteria: passive radar working area (a part of space where the deviation of target coordinate estimates from their true values does not exceed the maximum tolerable values); average error in calculating spatial coordinates in the working area; iterations number of coordinate calculation in the analyzed part of space. Upon completing a comparative analysis of obtained characteristics and dependencies, we concluded that it is optimal to include four receiving points in a range-difference passive radar and use the Levenberg – Marquardt method to calculate the spatial coordinates of radio emission sources.

Keywords: range-difference passive radar, rectangular spatial coordinates, numerical method for solving nonlinear equation systems.

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

For citation. Dmitrenko A.A., Sedyshev S.Y., Kuleshov Y.Y., Bogatyrev A.A. Calculation of spatial target coordinates in range-difference passive radars by the Levenberg – Marquardt method. Doklady BGUIR. 2020; 18(5): 35-43.

Введение

Снижение радиолокационной заметности средств воздушного нападения, интенсивное применение помех и противорадиолокационных ракет значительно снижают эффективность радиолокационных станций. Использование комплексов пассивной локации (КПЛ) позволяет повысить скрытность и выживаемость группировки противовоздушной обороны (ПВО), так как противорадиолокационные ракеты неприменимы против пассивных систем, а постановщики помех и другие излучающие радиоэлектронные системы служат источниками информации о своем местоположении.

Появление новых видов средств воздушного нападения, увеличение их количества при ведении боевых действий, расширение номенклатуры используемых бортовых радиоэлектронных систем обуславливают актуальность исследований, имеющих целью повышение эффективности работы комплексов пассивной локации.

Основу КПЛ составляют разнесенные в пространстве приемные пункты (ПП), объединяемые линиями связи. Измеряемыми параметрами при этом являются или угловые направления на источники радиоизлучения (ИРИ) (при наличии на ПП направленных антенных систем), или разности времени запаздывания между соответствующими парами ПП.

Координаты ИРИ определяются в результате применения одного из следующих способов: угломерного, разностно-дальномерного или различного рода их комбинаций [1].

Разностно-дальномерный (РД) способ, рассматриваемый в данной работе, имеет по сравнению с другими следующие преимущества [2, 3]: а) высокая потенциальная точность определения пространственных координат ИРИ; б) сравнительно невысокая стоимость ненаправленных антенн; в) отсутствие необходимости сложной системы координации обзора пространства системой направленных антенн; г) при использовании базово-корреляционной обработки сигналов ИРИ для оценки разностей времени запаздывания отсутствует необходимость в достоверной информации о параметрах и характеристиках обрабатываемых сигналов.

Процесс обработки радиолокационной информации в РД КПЛ представляет собой последовательное (на некоторых этапах параллельное) решение следующих задач [1–3]: обнаружение сигналов ИРИ на ПП, отождествление обнаруженных сигналов между ПП, оценку разностей дальности относительно пар ПП КПЛ, определение пространственных координат ИРИ. В настоящей статье проведено исследование и анализ результатов применения различных способов вычисления прямоугольных пространственных координат ИРИ путем обработки совокупностей оценок разностей дальности с целью определения оптимального числа ПП КПЛ и выбора наиболее эффективного алгоритма координатных преобразований.

Постановка задачи

Измеряемыми параметрами РД КПЛ являются разности дальностей. Выходная координатная информация представляется в прямоугольной системе координат. Взаимосвязь между этими системами координат является нелинейной. Математически преобразование координатной информации из одной системы в другую представляет собой решение системы нелинейных уравнений (СНУ), в которую в качестве известных значений входят координаты ПП системы и измеренные значения разности дальностей ИРИ относительно соответствующих пар ПП.

Для определения количественного состава КПЛ и составления соответствующих СНУ необходимо учитывать следующие факторы:

- с точки зрения минимизации сложности и стоимости системы естественным является включение в состав КПЛ минимально необходимого количества ПП;
- в определенных условиях обстановки часть необходимой совокупности измерений недоступна (например, когда сигналы ИРИ не обнаружены на одном из ПП КПЛ).

С учетом данных факторов в настоящей работе были рассмотрены три возможных ситуации:

1. В состав КПЛ входят четыре ПП, измеряются три разности дальностей относительно одного из ПП (центрального), вычисляются три прямоугольных координаты ИРИ (X, Y, Z). В этом случае СНУ имеет вид

$$\begin{cases} \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} - \Delta r_{01} = 0 \\ \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \Delta r_{02} = 0 \\ \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} - \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} - \Delta r_{03} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

2. В состав КПЛ входят три ПП, измеряются две разности дальностей, вычисляются две прямоугольных координаты ИРИ (X, Y). В этом случае СНУ имеет вид

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \Delta r_{12} = 0 \\ \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \Delta r_{13} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

3. В состав КПЛ входят три ПП, измеряются три разности дальностей, вычисляются три прямоугольных координаты ИРИ (X, Y, Z). В этом случае СНУ имеет вид

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \Delta r_{12} = 0 \\ \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} - \Delta r_{23} = 0 \\ \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} - \Delta r_{31} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Задача поиска решений данных СНУ не имеет достаточно эффективных методов общего характера. Их решения можно получить только приближенными, итерационными методами, которые позволяют получить последовательность приближений $\mathbf{X}_k = (x_k, y_k, z_k)$, $k = 0, 1, 2 \dots n$. Если итерационный процесс сходится, то граничное значение является решением системы уравнений [4–5].

Для вычисления корней СНУ в данной работе были исследованы наиболее распространенные на практике следующие методы: Ньютона, модифицированный метод Ньютона, градиентного спуска, последовательных итераций и Левенберга – Марквардта.

Для проведения сравнительного анализа рассматриваемых алгоритмов координатных преобразований были выбраны следующие критерии качества:

- рабочая зона КПЛ – часть 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.

Методика проведения эксперимента

При наличии в составе КПЛ трех ПП они располагались на удалении 20 км от начала системы координат при угловых смещениях в 120° относительно друг друга. При исследовании конфигурации КПЛ, состоящего из четырех ПП, еще один приемник располагался в начале системы координат.

Определялась зона исследования в виде квадрата размером 400×400 км. Плоскостные координаты ИРИ (X, Y) задавались последовательно с шагом 10 км. Высота ИРИ была принята равной 10 км. Для каждой анализируемой точки местонахождения ИРИ вычислялся соответствующий набор разностей дальности (с учетом известных координат ПП КПЛ и ИРИ), после чего путем решения системы нелинейных уравнений каждым из анализируемых методов вычислялись пространственные координаты ИРИ.

При оценке величины рабочей зоны КПЛ принималось, что ошибка вычисления пространственных координат ИРИ не должна превышать 2000 м. После определения пространственных координат ИРИ во всех возможных точках в пределах исследуемой зоны производилась оценка средней ошибки вычисления координат. Также фиксировалось число вычислительных операций, затраченных на анализ всей зоны.

Результаты и их обсуждение

Применение методов Ньютона и последовательных итераций оказалось невозможным по причине вырожденности матрицы Якоби в первом случае и отсутствии сходимости итерационного процесса поиска решения СНУ во втором для всех возможных ситуаций. По этим причинам данные два метода в дальнейшем не рассматривались.

Зависимости величины ошибок вычисления координат (X, Y, Z) ИРИ от его расположения в пространстве при включении в состав КПЛ четырех ПП (метод градиентного спуска, метод Левенберга – Марквардта, модифицированный метод Ньютона) приведены на рис. 1.

Зависимости величины ошибок вычисления координат (X, Y) ИРИ от его расположения в пространстве при включении в состав КПЛ трех ПП (метод градиентного спуска, метод Левенберга – Марквардта, модифицированный метод Ньютона) приведены на рис. 2.

Зависимости величины ошибок вычисления координат (X, Y, Z) ИРИ от его расположения в пространстве при включении в состав КПЛ трех ПП (метод градиентного спуска, метод Левенберга – Марквардта) приведены на рис. 3. Модифицированный метод Ньютона в данном случае оказался неприменим ввиду вырожденности матрицы Якоби.

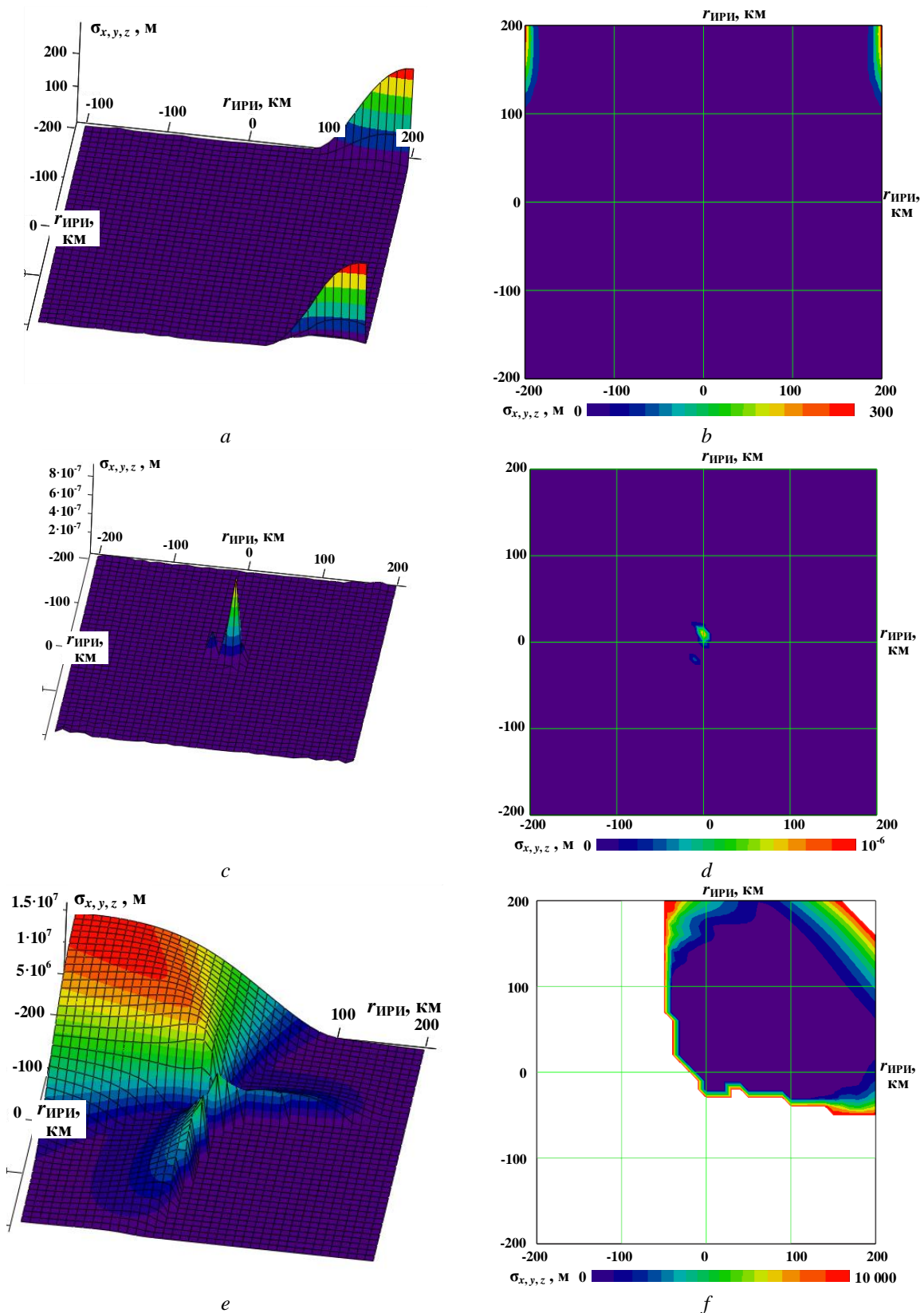


Рис. 1. Зависимость величины ошибок вычисления координат (X, Y, Z) ИРИ от его расположения в пространстве при включении в состав КПЛ четырех ПП: *a, b* – метод градиентного спуска; *c, d* – метод Левенберга – Марквардта; *e, f* – модифицированный метод Ньютона
Fig. 1. Dependence of the error magnitude of radio source coordinates (X, Y, Z) on its spatial location when 4 receivers are included in a passive radar: *a, b* – gradient descent method; *c, d* – Levenberg – Marquardt method; *e, f* – modified Newton's method

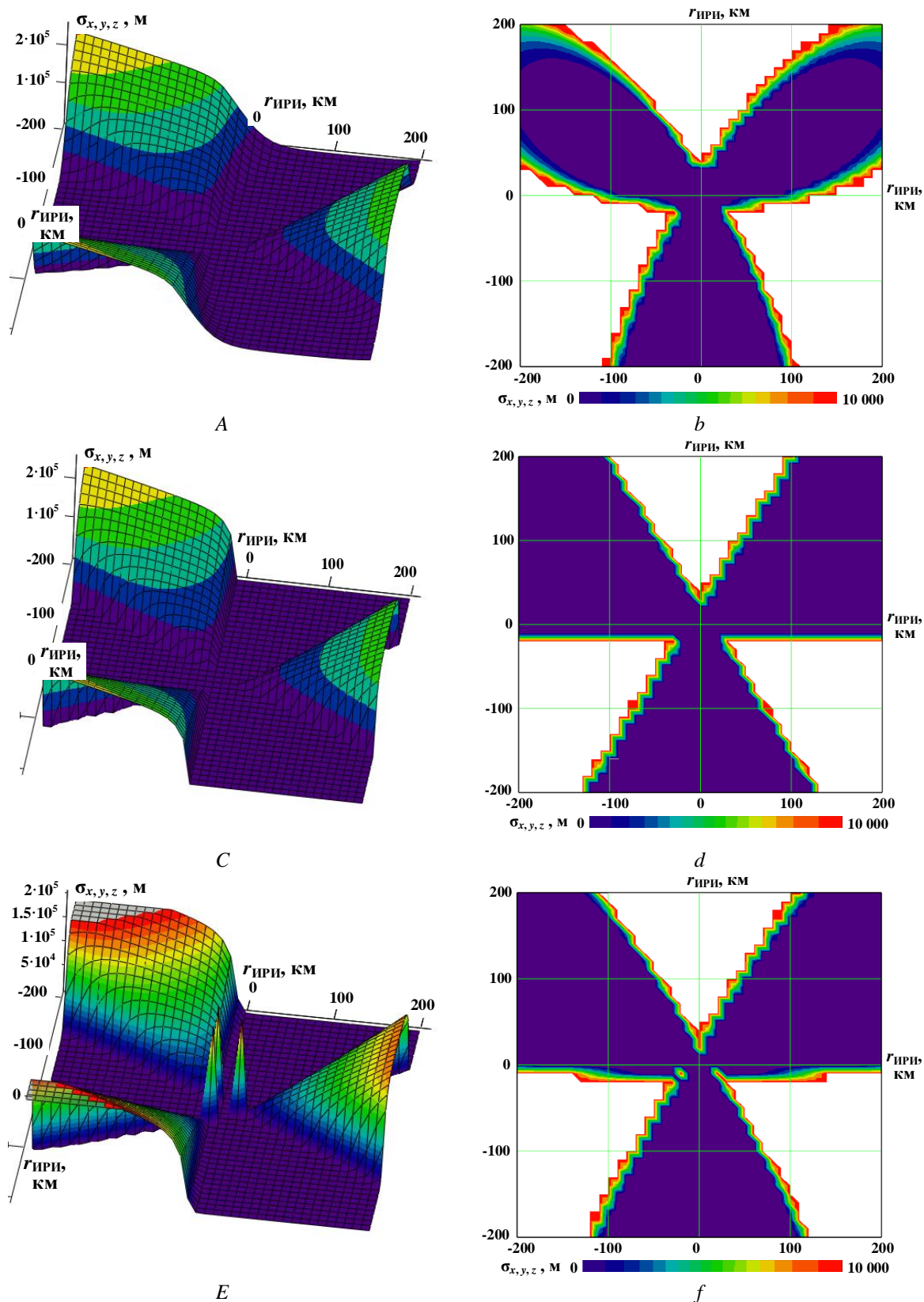


Рис. 2. Зависимость величины ошибок вычисления координат (X, Y) ИРИ от его расположения в пространстве при включении в состав КПЛ трех ПП: a, b – метод градиентного спуска; c, d – метод Левенберга – Марквардта; e, f – модифицированный метод Ньютона

Fig. 2. Dependence of the error magnitude of radio source coordinates (X, Y) on its spatial location when 3 receivers are included in a passive radar: a, b – gradient descent method; c, d – Levenberg – Marquardt method; e, f – modified Newton's method

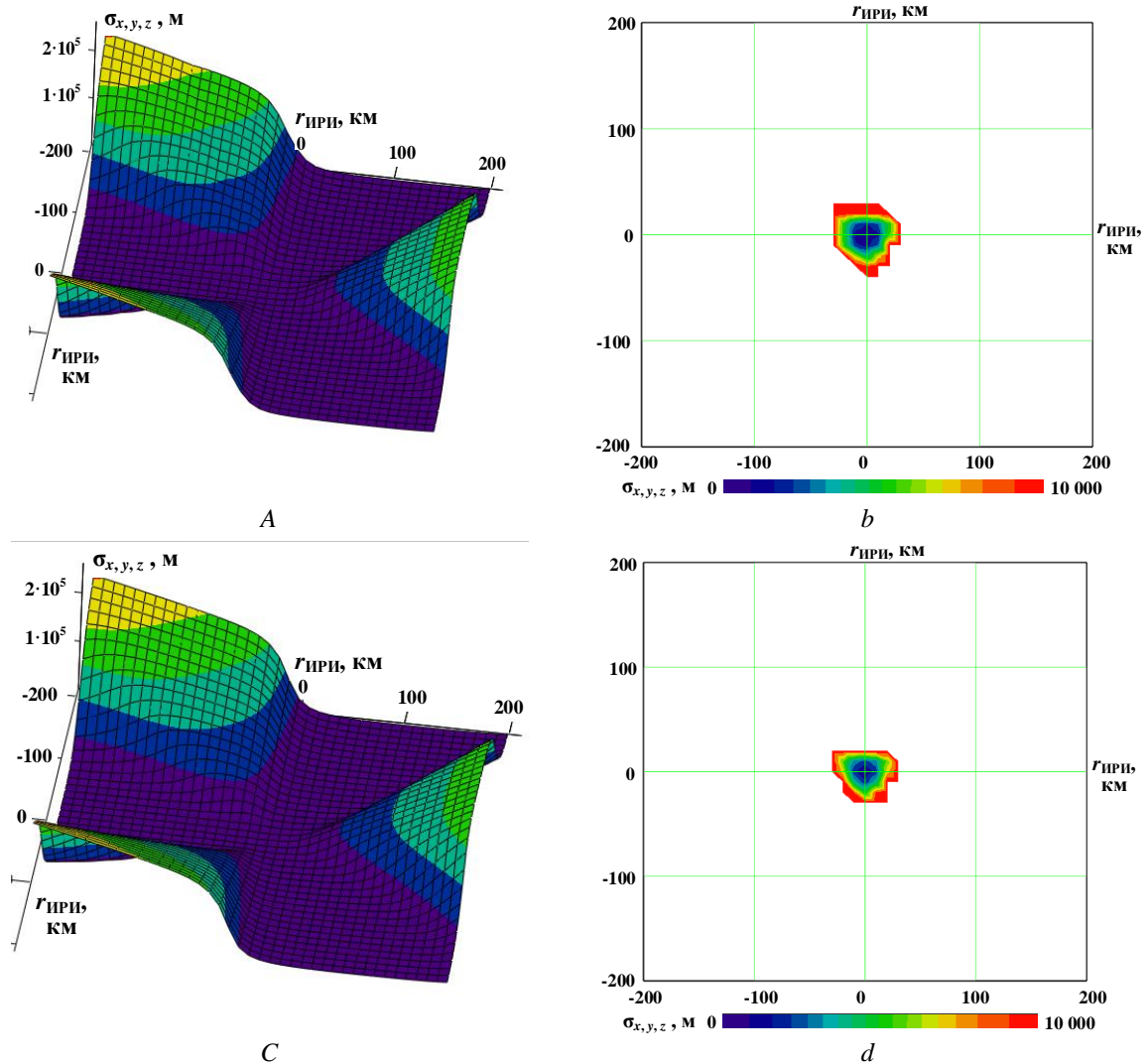


Рис. 3. Зависимость величины ошибок вычисления координат (X, Y, Z) ИРИ от его расположения в пространстве при включении в состав КПЛ трех ПП: *a, b* – метод градиентного спуска; *c, d* – метод Левенберга – Марквардта

Fig. 3. Dependence of the error magnitude of radio source coordinates (X, Y, Z) on its spatial location when 3 receivers are included in a 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 зоне при включении в состав КПЛ четырех ПП и определении трех пространственных координат (X, Y, Z) ИРИ приведены в табл. 1.

Размеры рабочей зоны, величина средней ошибки вычисления координат в рабочей зоне, а также число итераций при вычислении координат в анализируемой зоне при включении в состав КПЛ трех ПП и определении двух плоскостных координат ИРИ (X, Y) приведены в табл. 2.

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

Таблица 1. Показатели качества КПЛ (вычисление 3-х координат ИРИ (X, Y, Z), 4 ПП в составе КПЛ)
Table 1. Passive radar quality indicators (calculation of 3 coordinates of RFS (X, Y, Z), 4 receivers are included)

Критерий качества Quality criterion	Метод градиентного спуска Gradient Descent algorithm	Метод Левенберга – Марквардта Levenberg – Marquardt algorithm	Модифицированный метод Ньютона Modified Newton Algorithm
Рабочая зона, % анализируемой зоны	100	100	26,9
Средняя ошибка вычисления координат в рабочей зоне, м	4,91	$5,98 \cdot 10^{-9}$	304
Число итераций при вычислении координат в анализируемой зоне	$3,59 \cdot 10^6$	$2,11 \cdot 10^4$	$1,59 \cdot 10^6$

Таблица 2. Показатели качества КПЛ (вычисление 2-х координат ИРИ (X, Y), 3 ПП в составе КПЛ)
Table 2. Passive radar quality indicators (calculation of 2 coordinates of RFS (X, Y), 3 receivers are included)

Критерий качества Quality criterion	Метод градиентного спуска Gradient Descent algorithm	Метод Левенберга – Марквардта Levenberg – Marquardt algorithm	Модифицированный метод Ньютона Modified Newton Algorithm
Рабочая зона, % анализируемой зоны	42,7	58,8	55,4
Средняя ошибка вычисления координат в рабочей зоне, м	188	$2,07 \cdot 10^{-3}$	38
Число итераций при вычислении координат в анализируемой зоне	$8,23 \cdot 10^6$	$4,14 \cdot 10^4$	$4,87 \cdot 10^6$

Таблица 3. Показатели качества КПЛ (вычисление 3-х координат ИРИ (X, Y, Z), 3 ПП в составе КПЛ)
Table 3. Passive radar quality indicators (calculation of 3 coordinates of RFS (X, Y, Z), 3 receivers are included)

Критерий качества. Quality criterion.	Метод градиентного спуска Gradient Descent algorithm	Метод Левенберга – Марквардта Levenberg – Marquardt algorithm
Рабочая зона, % анализируемой зоны	0	0
Средняя ошибка вычисления координат в рабочей зоне, м	–	–
Число итераций при вычислении координат в анализируемой зоне	$6,78 \cdot 10^6$	$5,88 \cdot 10^6$

Заключение

Проведя сравнительный анализ полученных характеристик и зависимостей, можно сделать следующие выводы. Методы Ньютона и последовательных итераций оказались неприменимы во всех анализируемых случаях. При наличии в составе КПЛ трех ПП размеры рабочей зоны не превысили 58,8 %, что нельзя назвать удовлетворительным результатом. При наличии в составе КПЛ четырех ПП размеры рабочей зоны составили 100 % от анализируемой только при использовании методов градиентного спуска и Левенберга – Марквардта. Причем второй из данных методов оказался менее затратен в вычислительном плане, а также обеспечил значительно более высокую точность. Таким образом, оптимальным в данных условиях является включение в состав КПЛ четырех приемных пунктов и использование для вычисления пространственных координат ИРИ метода Левенберга – Марквардта.

Список литературы

1. Черняк В.С. *Многопозиционная радиолокация*. Москва: Радио и связь; 1993.
2. Дмитренко А.А., Седышев С.Ю. Межпозиционное пространственно-временное отождествление сигналов в многопозиционных базово-корреляционных комплексах пассивной локации. *Доклады БГУИР*. 2016;99:85-91.
3. Охрименко А.Е. *Основы обработки и передачи информации*. Минск: МВИЗРУ ПВО; 1990.
4. Мышенков В.И., Мышенков Е.В. *Численные методы*. Москва; 2001.
5. Noceda J. Wright S.J. *Numerical Optimization*. New York: Springer; 1999.

References

1. Chernyak V.S. [*Multiposition radiolocation*]. Moscow: Radio i svyaz';1993. (In Russ.)
2. Dmitrenko A.A., Sedyshev S.Y. [Identification of signals in multi-static cross-correlation passive radars]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2016;99:85-91. (In Russ.)
3. Ohrimenko A.E. [*Fundamentals of information processing and transmission*]. Minsk: MVIZRU PVO; 1990. (In Russ.)
4. Myshenkov V.I., Myshenkov E.V. [*Numerical methods*]. Moscow; 2001. (In Russ.)
5. Nocedal J. Wright S.J. *Numerical Optimization*. New York: Springer; 1999.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

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

Седышев С.Ю., к.т.н., доцент, заместитель директора ООО «НТП РЭАТехно» по научной работе.

Кулешов Ю.Е., к.в.н., доцент, начальник военного факультета Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Богатырев А.А., к.в.н., заместитель начальника военного факультета по учебной и научной работе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

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

Sedyshev S.Y., PhD, Associate Professor, Deputy Director for Scientific Work "NTP REATechno".

Kuleshov Y.E., PhD, Associate Professor, Head of the Military Faculty of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bogatyrev A.A., PhD, Deputy Head of the Military Faculty for Academic and Scientific work of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

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 Алесь Александрович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
тел. +375-17-293-80-83;
e-mail: a.dmitrenko@bsuir.by
Dmitrenko Ales Alexandrovich