

Труды МАИ. 2022. № 122
Trudy MAI, 2022, no. 122

Научная статья
УДК 621.396.378
DOI: [10.34759/trd-2022-122-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-10)

АЛГОРИТМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ ОЦЕНОК КООРДИНАТ

Владимир Анатольевич Маклашов¹, Михаил Николаевич Пиганов²✉

Самарский национальный исследовательский университет

имени академика С.П. Королева,

Самара, Россия

¹mg37@rambler.ru

²kipres@ssau.ru✉

Аннотация. Рассмотрена методология определения местоположения источника радиоизлучения в задачах радиотехнической разведки. Отмечено, что предложенная ранее модель позволяет определять местоположение источника. Однако при этом требуется проводить расчёт зон неопределённости.

Разработан алгоритм определения смещения оценок координат источника радиоизлучения относительно истинных значений для расчета зон неопределенности при использовании триангуляционного метода нахождения его местоположения. Проведено моделирование процесса определения местоположения источника радиоизлучения.

Для получения выходных данных предложено использовать базовый алгоритм TargetLocation. Он реализует метод триангуляции. При этом необходимо выполнить

следующие шаги: вычисление размера базы триангуляции; определение углов треугольника; вычисление относительных дальностей источника от точек пеленгации; определение координат цели.

Основные этапы моделирования проведены в среде MATLAB. При этом выполнялись следующие процедуры: вычисление коэффициента корреляции и среднего квадратичного отклонения координат цели; вычисление размеров полуосей эллипса ошибок и углов между осью X и главной осью эллипса; корректировка размеров эллипса ошибок. Проведён анализ результатов моделирования.

Проведенный анализ результатов моделирования показал, что метод, заключающийся в отбраковке измерений и корректировке размеров эллипсов ошибок на величину смещения, дает зону неопределенности, охватывающую истинное местоположение источника радиоизлучения. Установлено, что данный метод позволяет повысить точность определения местоположения.

Ключевые слова: пеленг, смещение оценок координат, зона неопределённости, алгоритм, эллипс ошибок, моделирование, источник радиоизлучения, местоположение

Для цитирования: Маклашов В.А., Пиганов М.Н. Алгоритм для определения смещения оценок координат // Труды МАИ. 2022. № 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-10)

ALGORITHM FOR DETERMINING THE BIAS OF COORDINATE ESTIMATES

Vladimir A. Maklashov¹, Michael N. Piganov²✉

Samara National Research University,

Samara, Russia

¹mg37@rambler.ru

²kipres@ssau.ru✉

Abstract. The article deals with the methodology for determining the radio emission source location in the tasks of electronic reconnaissance. To determine the radio emission source location, the azimuth direction finding from the aircraft is employed. It is noted that the previously proposed model allows determining the source location, however, it requires the zones of uncertainty calculating. The article shows that the need to calculate the uncertainty zones is associated with the fact that the error ellipse, calculated during models operation, requires an unbiased estimate of the source coordinates. The unbiased estimation obtaining while triangulation is possible only in symmetrical geometries, when the triangle formed while position determining is close to the equilateral one. In all other cases an estimation bias (the mean coordinates estimation value deflection from its true one) is being observed. As far as it is necessary to have bounded area of the most probable location of the radio emission source, the problem of this area plotting comes into being. The authors developed an algorithm for determining the radio emission source coordinates estimation bias relative to their true values for the uncertainty zones computing while using triangulation method for its location detection. Modeling of the radio emission

source location determining process was performed. It was suggested to employ the basic TargetLocation algorithm to obtain the output data. It realizes the triangulation method. With this, three steps should be performed. These are triangulation base size computing; determining angles of the triangle; computing the source relative distances from the bearing points; determining the target coordinates. Basic simulation stages were performed in MATLAB. The following procedures were executed herewith: computing correlation coefficient and mean square deviation of the target coordinates; computing semi-axes of errors ellipse and angles between the X axis and the main ellipse axis; correcting the errors ellipse sizes. Analysis of the simulation results was performed, which revealed that the method consisting in measurements sorting out and ellipse sizes correction by the bias value yields the uncertainty zone encompassing true position of the radio emission source. The authors established that the presented method allows increasing the location determining accuracy. The bias value largely depends on the tactical situation geometry. Thus, in practice, it is necessary to know either analytical dependence of this bias on the geometry and measurement errors, or possess the table of these values. To obtain the above said dependencies, a large series of experiments conducting is required.

Keywords: direction finding, radio emission source location, displacement of coordinate estimates, zone of uncertainty, algorithm, error ellipse, modeling

For citation: Maklashov V.A., Piganov M.N. Algorithm for determining the bias of coordinate estimates. *Trudy MAI*, 2022, no.122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-10)

Введение

При формировании облика современных бортовых радиоэлектронных средств (БРЭС): радиолокационных систем (станций) (РЛС) нового поколения, навигационных систем, средств управления оружием, систем связи и др. требуется не только количественное улучшение показателей эффективности, но и принятие новых конструктивных решений. Для систем пятого поколения характерным должно стать создание интегрированных БРЭС, в частности, БРЛС на основе принципа проектирования «сверху-вниз» [1-6]. В полной мере это относится и к бортовым комплексам обороны [7], средствам радиоэлектронной борьбы (РЭБ) [8] и входящим в их состав системам радиотехнической разведки (РТР) [9-11]. Важными задачами в этом случае являются совершенствование конструкции [12, 13], увеличение точности [14], быстродействия [15], эффективности [16], помехоустойчивости [17-22]. При этом эффективность средств РЭБ зависит от функциональной устойчивости и достоверности оперативной оценки возможностей средств РТР в сложной электромагнитной обстановке [23, 24], которые во многом определяют точность измерения координат источника радиоизлучения (ИРИ).

Для определения местоположения (ОМП) источника радиоизлучения (ИРИ) в задачах радиотехнической разведки обычно используется азимутальную пеленгацию с летательного аппарата (ЛА) [25]. В работе [26] предложена модель, которая позволяет определять местоположение ИРИ. При этом требуется проводить расчёт зон неопределённости.

Необходимость расчета зон неопределенности вытекает из следующих соображений:

1. Эллипс ошибок, который вычисляется при работе моделей РТР требует несмещенной оценки координат ИРИ. Получить несмещенную оценку при триангуляции возможно только в симметричных геометриях, когда получающийся при определении местоположения треугольник близок к равностороннему. В остальных случаях наблюдается смещение (отклонение среднего значения оценки координат от истинного) оценки.

2. Так как, необходимо иметь ограниченную область наиболее вероятного нахождения ИРИ, возникает проблема построения зоны неопределенности местоположения источника излучения.

В данной работе предложен алгоритм определения смещения оценок координат излучающей РЭС относительно истинных значений для расчета зон неопределенности при использовании триангуляционного метода нахождения ее местоположения и проведено моделирование ОМП ИРИ.

Получение выходных данных

Для получения выходных данных алгоритма TargetLocation , реализующего метод триангуляции, необходимо выполнить следующие шаги.

Шаг 1. Вычисляем размер базы триангуляции L:

$$L = \sqrt{(x_{c2} - x_{c1})^2 + (y_{c2} - y_{c1})^2}$$

Шаг 2. Вычисляем углы треугольника

$$\psi_1 = \pi - \operatorname{arctg} \frac{|x_{c2} - x_{c1}|}{|y_{c2} - y_{c1}|}$$

$$\alpha_1 = \psi_1 - \varphi_{m1},$$

$$\alpha_2 = \psi_1 - \varphi_{m2}.$$

Здесь φ_{m1} и φ_{m2} – азимуты РЭС, вычисленные путем добавления к истинным значениям ошибки, формируемой датчиком случайных чисел Normrnd.

Шаг 3. Вычисляем относительные дальности РЭС от точек пеленгации:

$$R_1 = \frac{L_1 \sin \alpha_2}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}, \quad R_2 = \frac{L_1 \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}.$$

Шаг 4. Вычисляем координаты цели, используя значения дальности и второго азимута на обрабатываемую цель.

$$x_{ц2} = x_{c2} + R_2 \sin \varphi_{m2}, \quad y_{ц2} = y_{c2} + R_2 \cos \varphi_{m2}.$$

Индекс 2 здесь подчеркивает тот факт, что координаты цели вычисляются только после получения второго азимута.

Данные вычисления повторяются 100 раз.

Моделирование в среде MATLAB и анализ результатов

Рассмотрим результаты моделирования для различного расположения РЭС относительно единичной базы триангуляции. Был получен график поведения отклонения оценок координат от истинного значения (рисунок 1).

На рисунке 1 приняты следующие обозначения:

sigmaU=1 – СКО измерения углов, в градусах;

rlsX=0.5; rlsY=0.1 – истинные координаты РЭС, в км;

$X(1)=0; X(2)=1; Y(1)=0; Y(2)=0$ – координаты точек пеленгации, в км;

$\gamma=157.4$ – угол под которым видна база пеленгации из точки расположения РЭС, в градусах.

Текущее отклонение по X показано синим цветом, а по Y – красным.

По оси X номер эксперимента.

$\Delta X = -0.0024$ – среднее значение отклонения (смещения) по X , в км;

$\Delta Y = -0.0005$ – среднее значение отклонения (смещения) по Y , в км;

$mX=0.497$ $mY=0.099$ – средние значения оценок координат РЭС.

Для этих же исходных данных на рисунке 2 показан эллипс ошибок, который вычисляется по следующей схеме.

Шаг 1. Вычислим коэффициент корреляции и СКО координат цели:

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_{ц2} - x_{ci})(y_{ц2} - y_{ci}) / R_i^4 \sigma_\alpha^2]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(x_{ц2} - x_{ci})^2 / R_i^4 \sigma_\alpha^2] \sum_{i=1}^n [(y_{ц2} - y_{ci})^2 / R_i^4 \sigma_\alpha^2]}}$$

$$\sigma_x^2 = \left((1 - \rho_{xy}^2) \sum_{i=1}^n [(y_{ц2} - y_{ci})^2 / R_i^4 \sigma_\alpha^2] \right)^{-1};$$

$$\sigma_y^2 = \left((1 - \rho_{xy}^2) \sum_{i=1}^n [(x_{ц2} - x_{ci})^2 / R_i^4 \sigma_\alpha^2] \right)^{-1};$$

где σ_α – СКО определения пеленга.

Вычислим суммы:

$$[aa] = \sum_{i=1}^n a_i^2; \quad a_i = \frac{(x - x_{ci})}{R_i^2};$$

$$[bb] = \sum_{i=1}^n b_i^2; \quad b_i = \frac{(y - y_{ci})}{R_i^2}.$$

$$[ab] = \sum_{i=1}^n a_i b_i;$$

Здесь (x, y) – координаты цели, полученные в шаге 4 ОМП, а $n = 2$ (количество точек).

С использованием полученных сумм, вычислим приведенные ранее параметры.

$$\rho_{xy} = \frac{[ab]}{\sqrt{[aa][bb]}};$$

$$\sigma_x^2 = \frac{\sigma_\alpha^2 [aa]}{[aa][bb] - [ab][ab]}; \quad \sigma_y^2 = \frac{\sigma_\alpha^2 [bb]}{[aa][bb] - [ab][ab]}.$$

Шаг 2. Полученные значения дисперсий ошибки оценки координат позволяют нам вычислить размеры полуосей эллипса ошибок и угол между осью X и главной осью эллипса.

Угол между осью X и главной осью эллипса определяется из выражения

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left[\frac{2\rho\sigma_x\sigma_y}{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)} \right].$$

Полуоси эллипса ошибок определяются по формулам:

$$D_B^2 = \sigma_x^2 \cos^2 \varepsilon + \rho_{xy} \sigma_x \sigma_y \sin 2\varepsilon + \sigma_y^2 \sin^2 \varepsilon,$$

$$D_M^2 = \sigma_x^2 \sin^2 \varepsilon - \rho_{xy} \sigma_x \sigma_y \sin 2\varepsilon + \sigma_y^2 \cos^2 \varepsilon.$$

$$D_B = \sqrt{D_B^2}; \quad D_M = \sqrt{D_M^2}.$$

Зададим вероятность нахождения несмещенной оценки координат РЭС

$P=0,99$, в этом случае, размеры полуосей нужно увеличить в три раза.

$$D_{B 0,99} = 3D_B; \quad D_{M 0,99} = 3D_M.$$



Рисунок 1 – График поведения отклонения оценок координат от истинного значения

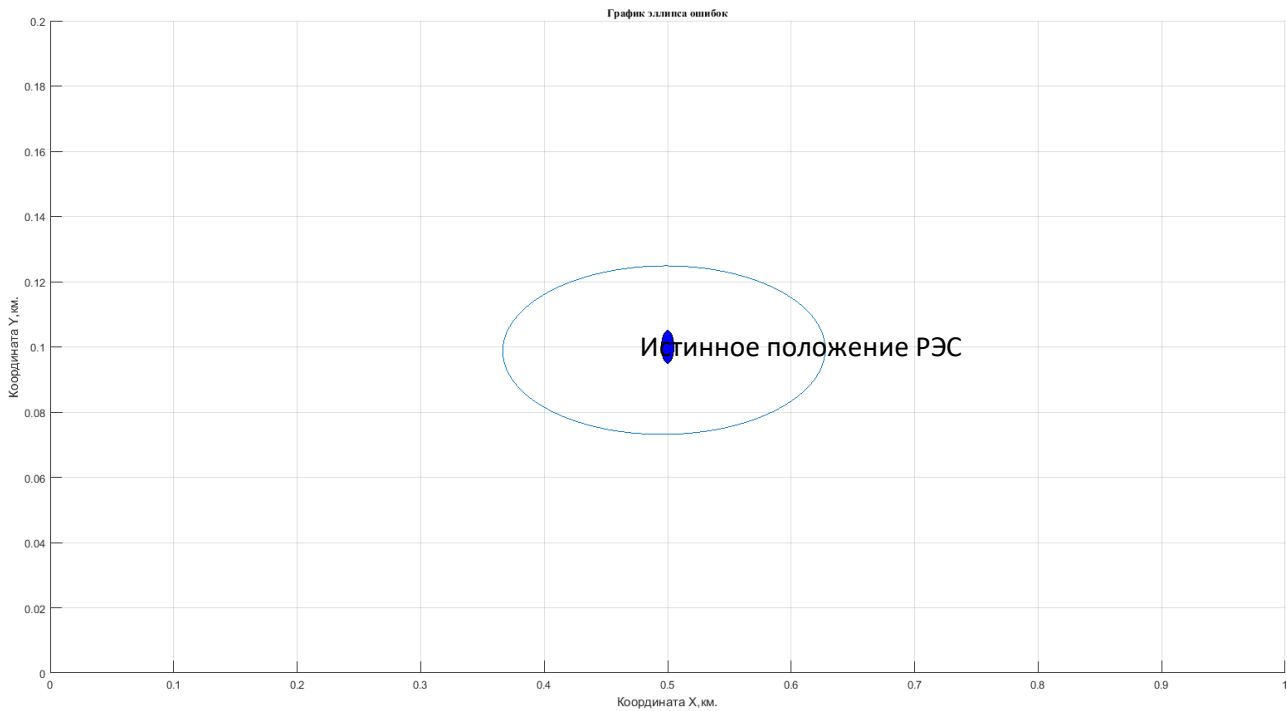


Рисунок 2 – Эллипс ошибок

Корректировка размеров осей эллипсов ошибок

Для исключения «плохих» ситуаций проверяем разность углов $(\alpha_2 - \alpha_1)$ на условие получения треугольника $(\alpha_2 - \alpha_1) \geq 3\sigma_\alpha$. Углы не отвечающие данному условию исключаем из вычисления статистических характеристик.

Используем вычисленные смещения для корректировки размеров эллипса ошибок. Результаты работы модели показаны на рисунке 3.

Корректировка размеров осей эллипса ошибок производится путем добавления к полученным на шаге 2 осям эллипса соответствующих смещений:

$$D'_B = D_B + \Delta X ;$$

$$D'_M = D_M + \Delta Y .$$

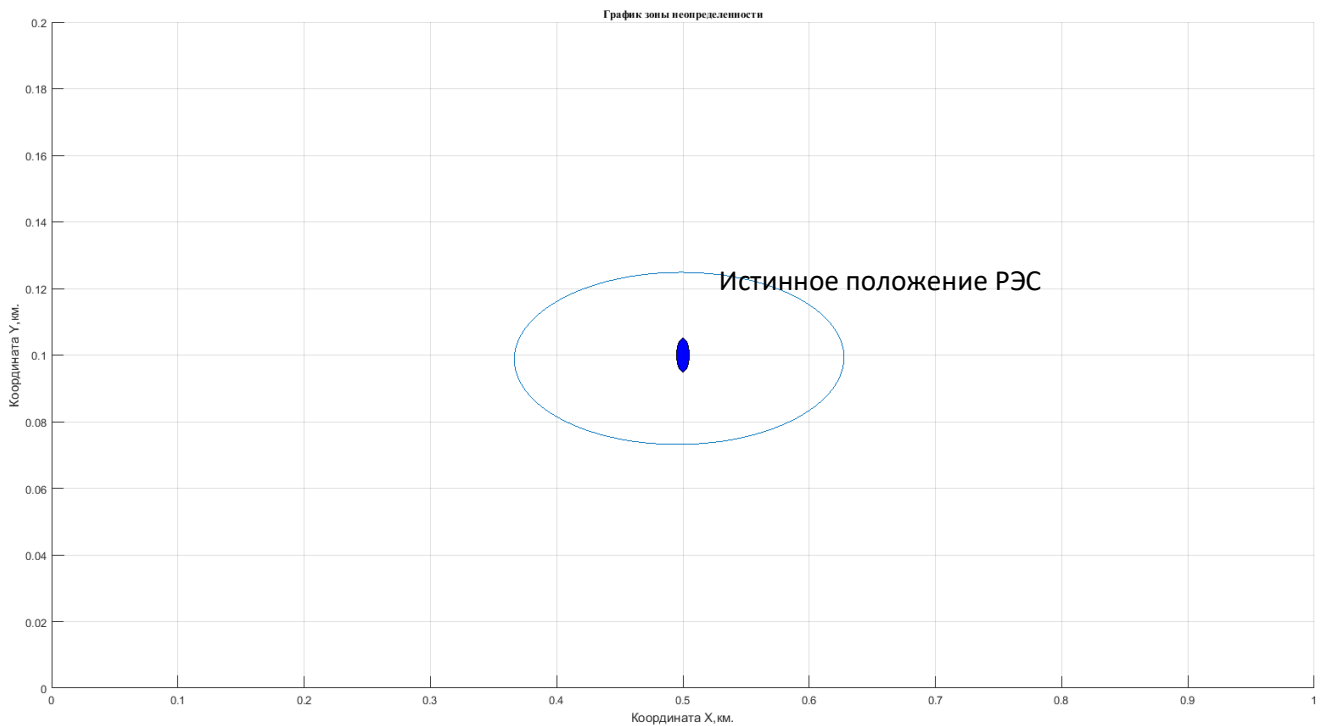


Рисунок 3 – Зона неопределенности местоположения РЭС

Откорректированный эллипс ошибок будем называть зоной неопределенности. Из сравнения рисунков 2 и 3 видно, что данная геометрия тактической ситуации близка к идеальной и влияние смещения незначительно.

Рассмотрим другую ситуацию, которая показывает получение зоны неопределенности в «плохих» условиях. Для этого помещаем РЭС в точку с координатами $X = 0,5$, $Y = 25$.

На рисунках 4–9 приведены результаты моделирования.

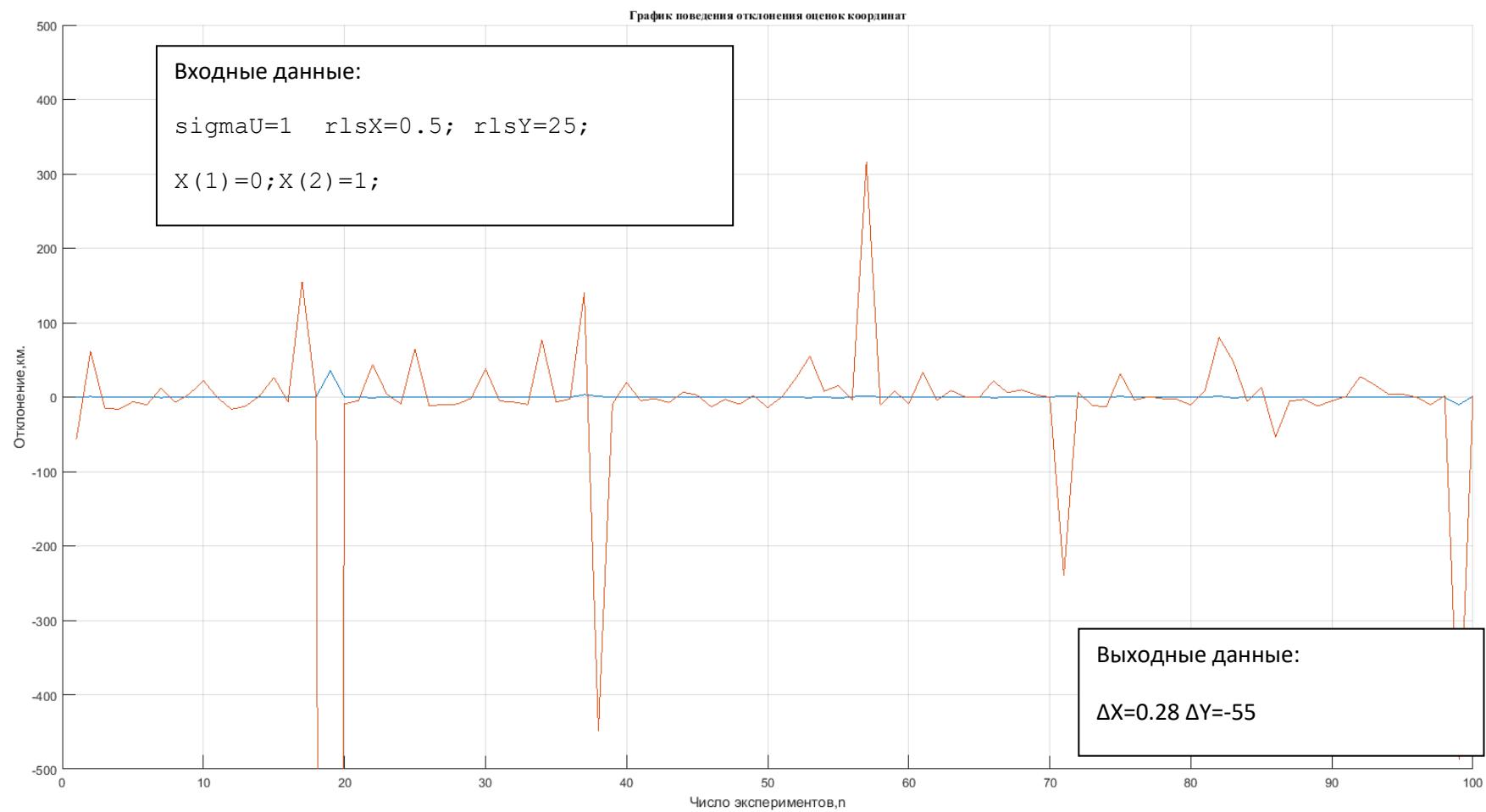


Рисунок 4 – График поведения отклонения оценок координат от истинного значения

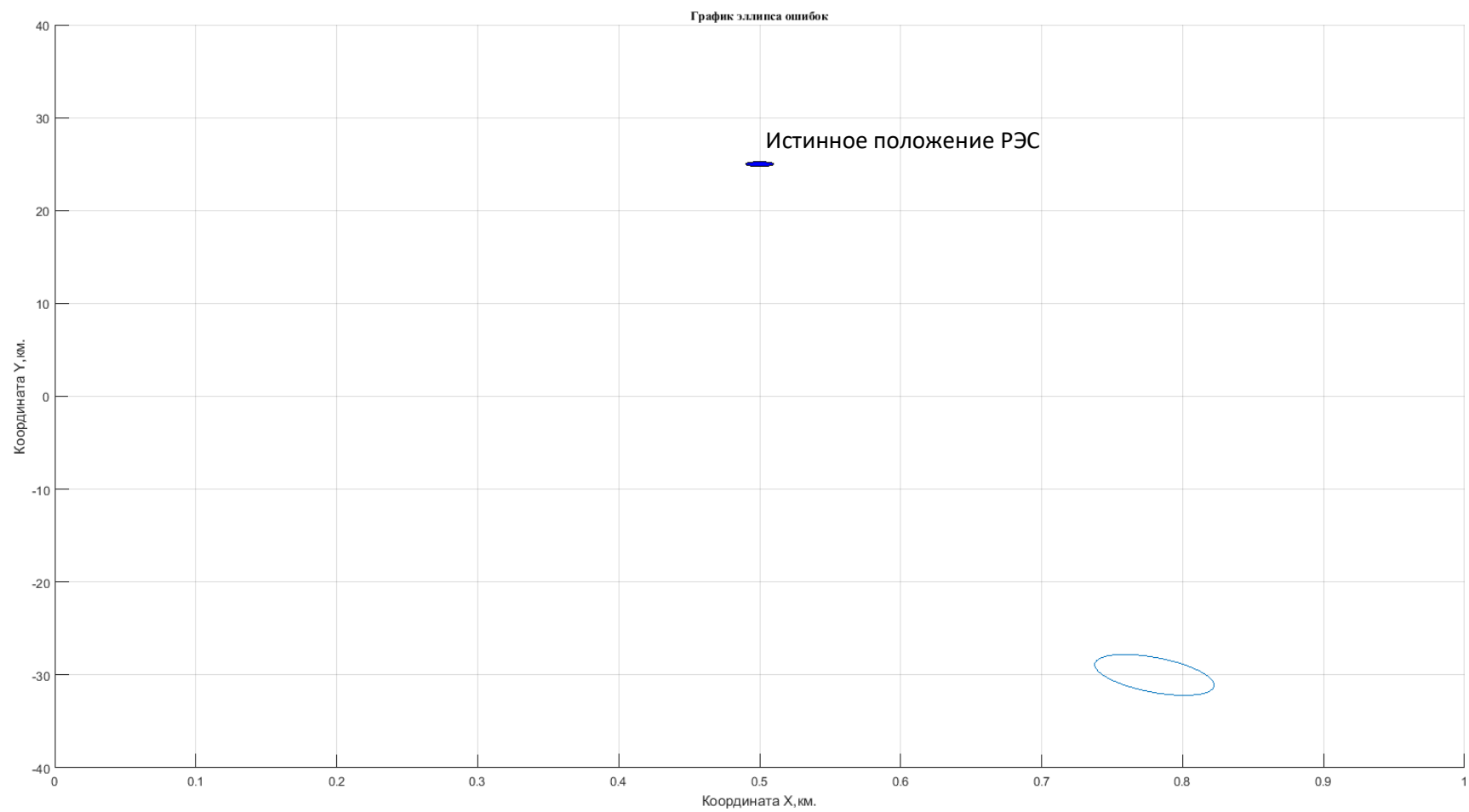


Рисунок 5 – Эллипс ошибок без отбраковки и корректировки

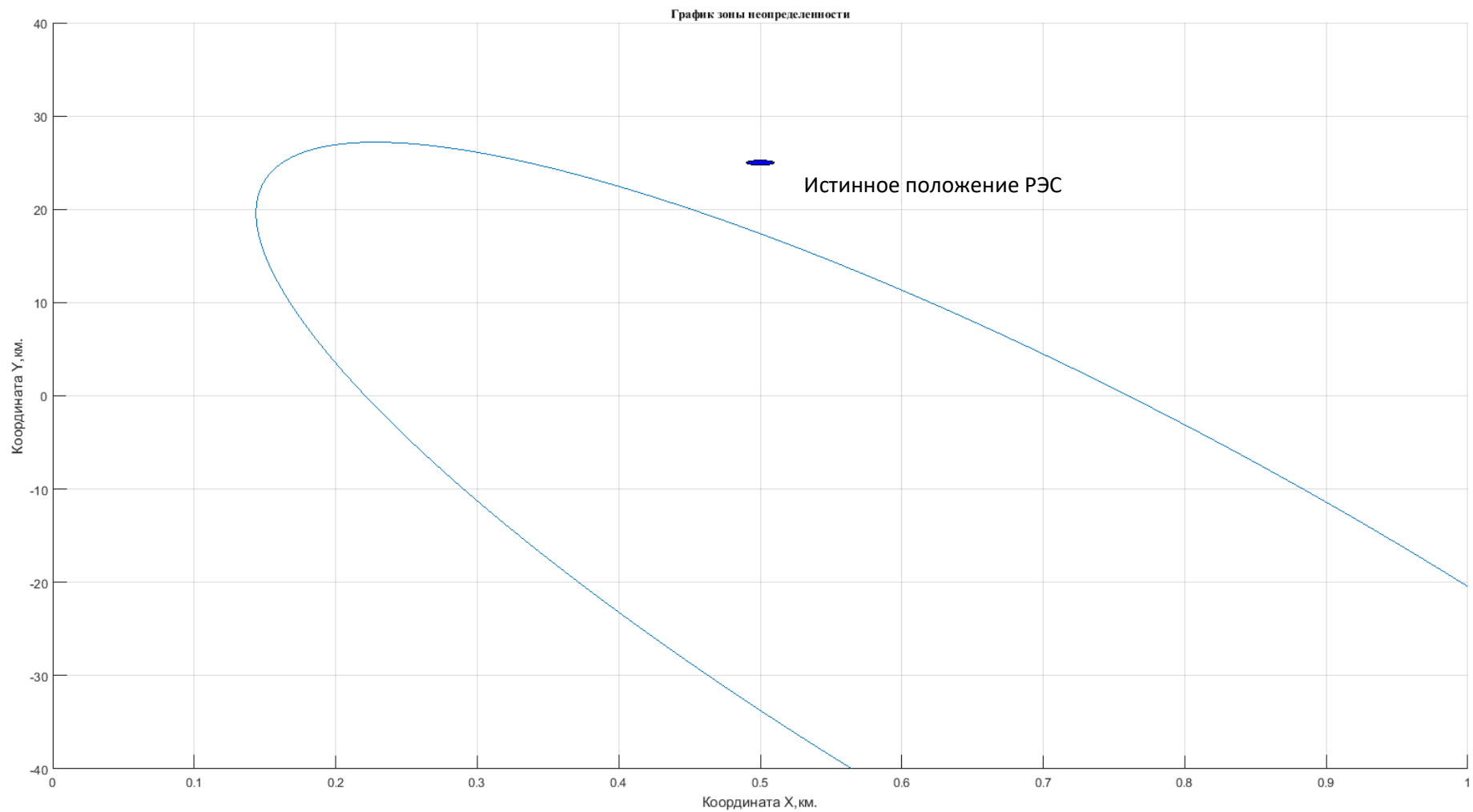


Рисунок 6 – Зона неопределенности (без отбраковки измерений)

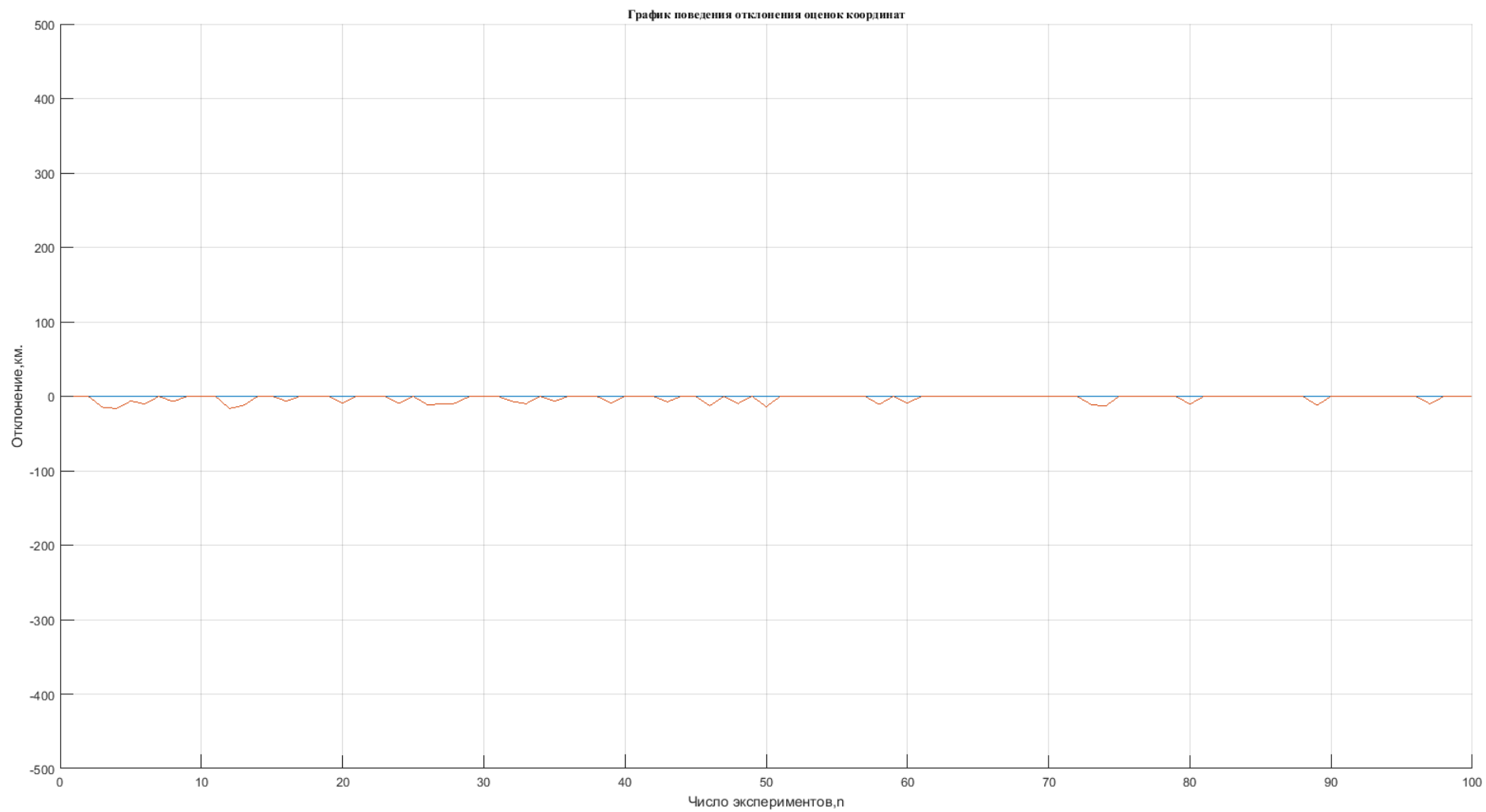


Рисунок 7 – График поведения отклонения оценок координат от истинного значения (с отбраковкой)

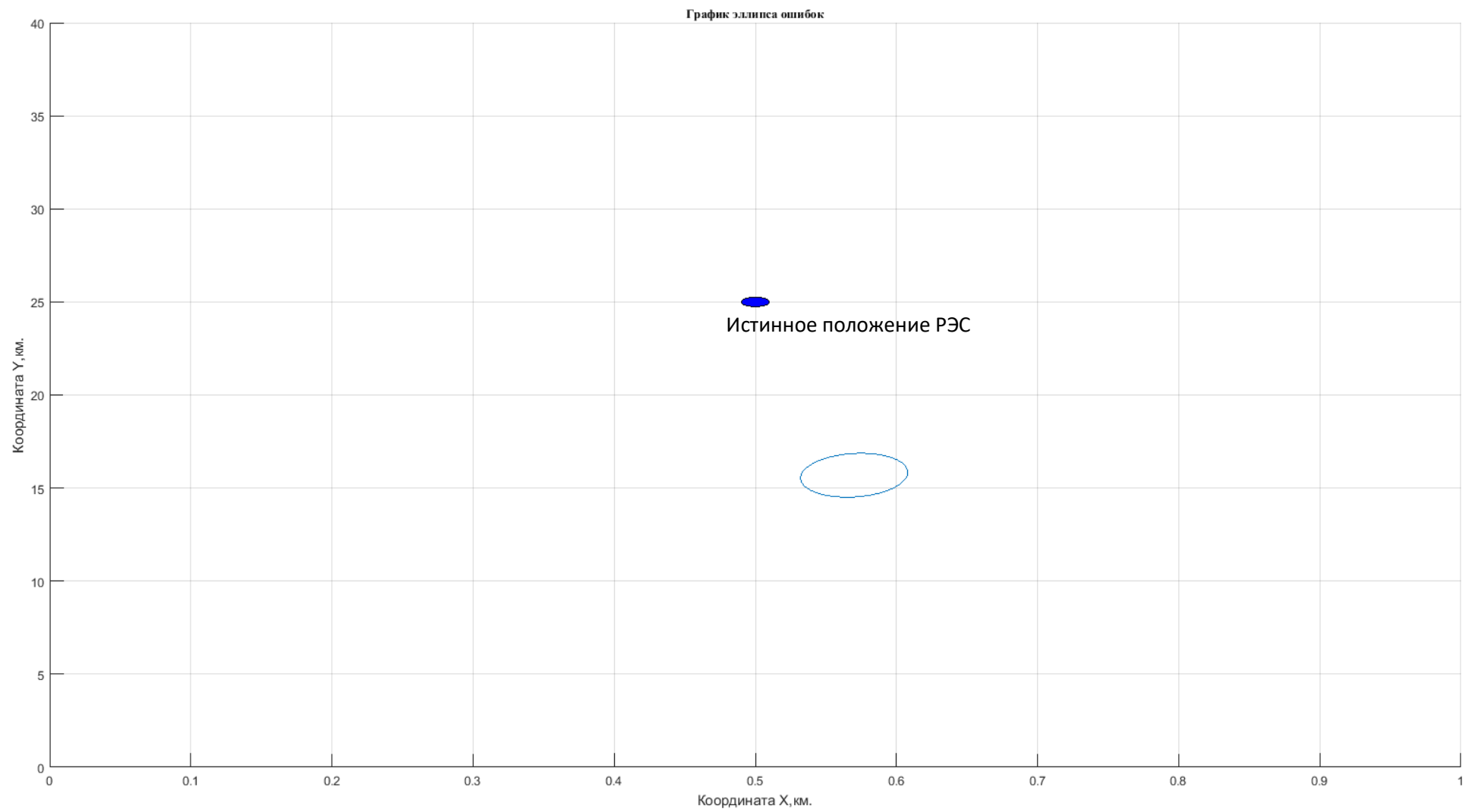


Рисунок 8 – Эллипс ошибок (с отбраковкой)

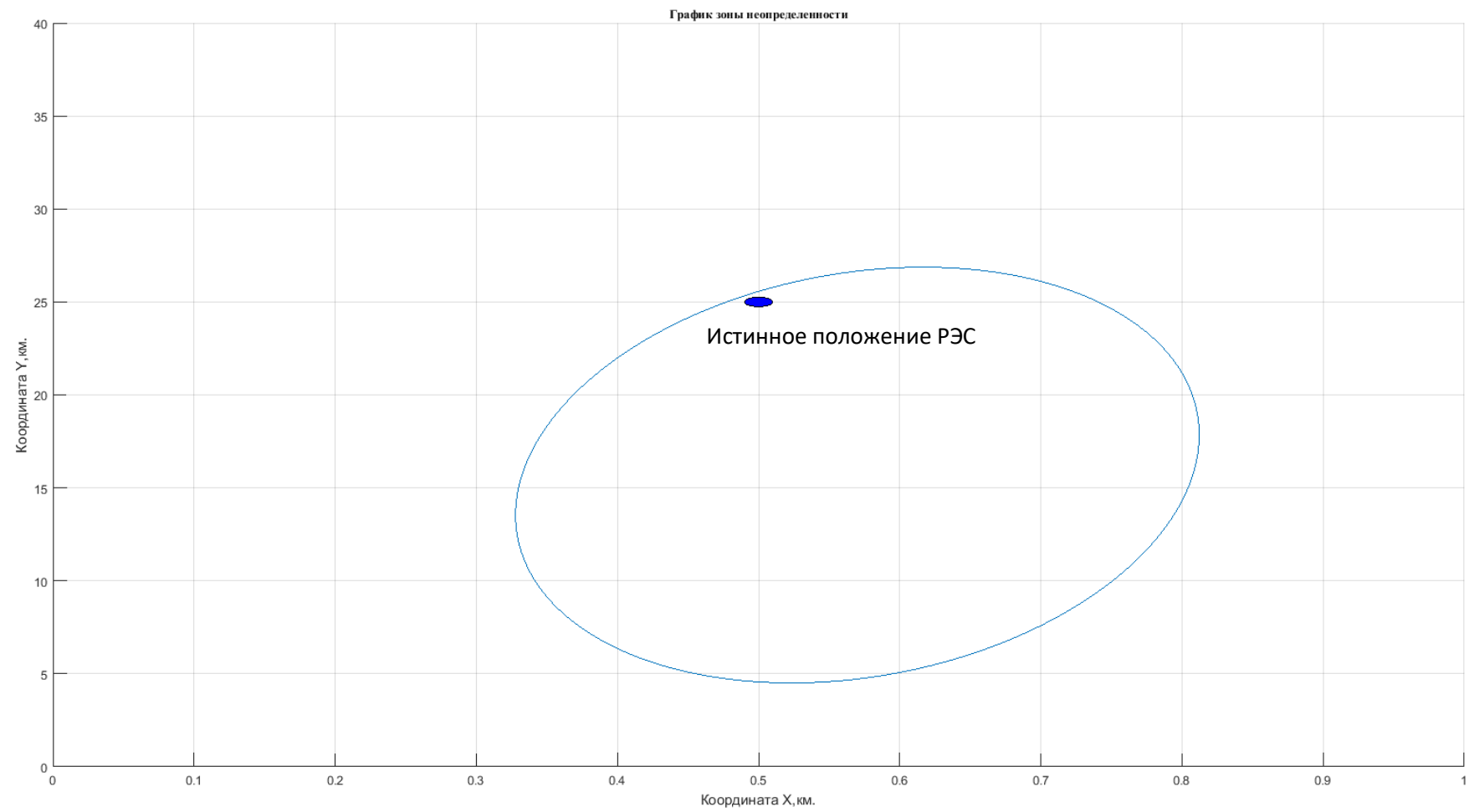


Рисунок 9 – Зона неопределенности с отбраковкой измерений и корректировкой осей

В данной ситуации угол, под которым видна база триангуляции, равен 2,29 градуса, что меньше чем $3\sigma_\alpha$ и поэтому на рисунке 4 мы видим большие величины смещения ошибок в отдельных экспериментах в ту и другую сторону. Среднее значение отклонения по оси Y равно 55 км, что в несколько раз превышает истинное значение этой координаты. Построение эллипса ошибок здесь не имеет смысла т.к. среднее значение координаты Y равно -30 км, что зеркально по отношению к истинному (см. рисунок 5). Корректировка осей эллипса на величину смещения увеличивает зону неопределенности, но полученный эллипс не покрывает истинное местоположение РЭС (см. рисунок 6).

На рисунке 7 показаны графики смещений по осям X и Y , которые вычислены с отбраковкой получающихся углов, а на рисунке 8 показан эллипс ошибок, полученный в этой ситуации. Смещение после отбраковки стало меньше и равно минус 9,3 км, среднее значение оценки координаты Y стало плюс 15,69, что значительно ближе к истинному значению (25 км). Таким образом, точность для данной геометрии улучшилась по оси Y примерно в 6 раз (с 55 км до 9,3 км). Но эллипс ошибок по прежнему не захватывает истинное местоположение РЭС (рисунок 8). И только лишь после корректировки размеров осей эллипса ошибок мы получаем зону неопределенности, включающую в себя истинное значение координат РЭС (рисунок 9).

Заключение

Проведенное моделирование показало, что метод, заключающийся в отбраковке измерений и корректировке размеров эллипсов ошибок на величину смещения, дает зону неопределенности, охватывающую истинное местоположение ИРИ. Данный метод позволяет повысить точность ОМП. Величина смещения в значительной степени зависит от геометрии тактической ситуации. Поэтому, на практике нам необходимо знать или аналитическую зависимость этого смещения от геометрии и ошибок измерения или иметь таблицу таких значений.

Список источников

1. Канащенков А.И., Новиков С.В. Основные методологические принципы проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов нового поколения // Надёжность и качество сложных систем. 2018. № 3 (23). С. 71-84. DOI: [10.21685/2307-4205-2018-3-10](https://doi.org/10.21685/2307-4205-2018-3-10)
2. Канащенков А.И., Гаврилов К.Ю., Новиков С.В. К вопросу формирования облика средств управления вооружением нового поколения // Вопросы обороны техники. Серия 16. 2018. № 5-6. С. 118-122.
3. Канащенков А.И. Гаврилов К.Ю., Новиков С.В. К вопросу формирования облика авиационных радиолокационных систем управления оружием // Вопросы оборонной техники. Серия 16. 2018. № 7-8. С. 91-96.
4. Канащенков А.И. Основные научно-технические направления снижения стоимости жизненного цикла радиолокационных систем управления летательных

аппаратов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. 2018. № 9-10 (123-124). С. 120-126.

5. Канащенко А.И., Матвеев А.М., Новиков С.В. Возможности применения малогабаритного цифрового радара в самолетной авиации // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=73354>

6. Канащенко А.И., Матвеев А.М., Минаев Э.С., Новиков С.В. Малогабаритные интегрированные радиолокационные системы нового поколения для летательных аппаратов // Известия вузов. Авиационная техника. 2017. № 4. С. 153-157.

7. Леньшин А.В., Зибров Г.В., Виноградов А.Д. Бортовые комплексы обороны воздушных судов. – Воронеж: Научная книга, 2013. - 309 с.

8. Вакин С.А., Шустов Л.Н. Основы радиоэлектронной борьбы. Ч.1: Справочник. - М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1998. - 434 с.

9. Михайлов Р.Л., Поляков С.Л. Состав и задачи перспективной автоматизированной системы управления средствами технической разведки и радиоэлектронной борьбы // Журнал i-methods. 2019. Т. 11. № 2. URL: <http://intech-spb.com/wp-content/uploads/archive/2019/2/Mikhailov-1.pdf>

10. Леньшин А.В., Кравцов Е.В. Функциональный метод обобщенных параметров для оперативной оценки возможностей технических средств разведки // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 3. С. 23-32.

11. Радзиевский В.Г., Сирота А.А. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. - М.: Радиотехника, 2004. - 432 с.

12. Маклашов В.А., Пиганов М.Н. Конструктивные особенности аппаратуры радиоэлектронного противодействия // Проектирование и технология электронных средств. 2021. № 4. С. 10-15.
13. Маклашов В.А., Пиганов М.Н. Выбор конструктивной реализации бортовых СВЧ устройств // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 4. С. 57-66.
14. Маклашов В.А., Мирзоев Р.М. Алгоритм вычисления пеленга на источник радиоизлучения // Надёжность и качество сложных систем. 2021. № 1 (33). С. 66-75.
DOI: [10.21685/2307-4205-2021-1-7](https://doi.org/10.21685/2307-4205-2021-1-7)
15. Цветнов В.В., Демин В.П., Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба. Радиоразведка и радиопротиводействие. – М.: МАИ, 1998. Т. 2. - 248 с.
16. Леньшин А.Д. Авиационные системы радиоэлектронного противодействия. - Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2012. - 284 с.
17. Rassel D.M. Tactical jamming aircraft increase power and frequency coverage // Defence Electronics, 1983, vol. 15, no. 4, pp. 78-86.
18. Josefson L. A broadband circularly polarized. phase steered array // Proceedings Military Electronics Defence Expo'79, September-25-27, 1979, pp. 273-284.
19. Звонарев В.В., Пименов В.Ф., Попов А.С. Моделирование влияния взаимно коррелированных помех на качество селекции сигнала в антенной решетке, оптимальной по критерию минимума среднеквадратического отклонения // Труды МАИ. 2020. № 111. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=115129>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-8](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-8)

20. Лихачев В.П., Сидоренко С.В. Помехоустойчивость алгоритма автофокусировки изображений по минимуму энтропии при сложной фоновой обстановке // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=92074>
21. Звонарев В.В., Попов А.С., Худик М.Ю. Методика расчета вероятности ошибки посимвольного приема дискретных сообщений при наличии помех // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=104213>
22. Шипко В.В. Помехоустойчивое комплексирование мульти- и гиперспектральных изображений в оптико-электронных комплексах информационного обеспечения современных и перспективных вертолетов // Труды МАИ. 2020. № 110. URL:<http://trudymai.ru/published.php?ID=112863>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-12](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-12)
23. Леньшин А.В., Кравцов Е.В. Функциональный метод обобщенных параметров для оперативной оценки возможностей технических средств разведки // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 3. С. 23-32.
24. Леньшин А.В., Кравцов Е.В. Разработка и исследование схем обработки сложных сигналов, обеспечивающих повышение функциональной устойчивости средств радиомониторинга в сложной электромагнитной обстановке // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2020. № 2. С. 5-13.
25. Абрамов П.Б. Леньшин А.В. Средства радиоэлектронного противодействия летательных аппаратов как систем массового обслуживания // Вестник Воронежского института МВД России. 2014. № 2. С. 122-131.

26. Маклашов В.А. Модель определения смещения оценок координат источника радиоизлучения // Радиоэлектронная техника. 2020. № 1 (13). С. 123-128.

References

1. Kanashchenkov A.I., Novikov S.V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system*, 2018, no. 3 (23), pp. 71-84. DOI: [10.21685/2307-4205-2018-3-10](https://doi.org/10.21685/2307-4205-2018-3-10)
2. Kanashchenkov A.I., Gavrilov K.Yu., Novikov S.V. *Voprosy oboronoi tekhniki. Seriya 16*, 2018, no. 5-6. pp. 118-122.
3. Kanashchenkov A.I. Gavrilov K.Yu., Novikov S.V. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16*, 2018, no. 7-8. pp. 91-96.
4. Kanashchenkov A.I. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16*, 2018, no. 9-10 (123-124), pp. 120-126.
5. Kanashchenkov A.I. Matveev A.M., Novikov S.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 89. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=73354>
6. Kanashchenkov A.I., Matveev A.M., Minaev E.S., Novikov S.V. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 2017, no. 4, pp. 153-157.
7. Len'shin A.V., Zibrov G.V., Vinogradov A.D. *Bortovye komplekсы oborony vozdukhnykh sudov* (Avionics for aircraft defense), Voronezh, Nauchnaya kniga, 2013, 309 p.
8. Vakin S.A., Shustov L.N. *Osnovy radioelektronnoi bor'by. Ch.1* (Electromagnetic warfare basics. Part 1): textbook. Moscow, VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 1998, 434 p.

9. Mikhailov R.L., Polyakov S.L. *Zhurnal i-methods*, 2019, vol. 11, no. 2. URL: <http://intech-spb.com/wp-content/uploads/archive/2019/2/Mikhailov-1.pdf>
10. Len'shin A.V., Kravtsov E.V. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, 2021, no. 3, pp. 23-32.
11. Radzievskii V.G., Sirota A.A. *Teoreticheskie osnovy radioelektronnoi razvedki* (Theoretical foundations of electronic intelligence), Moscow, Radiotekhnika, 2004, 432 p.
12. Maklashov V.A., Piganov M.N. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv*, 2021, no. 4, pp. 10-15.
13. Maklashov V.A., Piganov M.N. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, 2021, no. 4, pp. 57-66.
14. Maklashov V.A., Mirzoev R.M. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem*, 2021, no. 1 (33), pp. 66-75. DOI: [10.21685/2307-4205-2021-1-7](https://doi.org/10.21685/2307-4205-2021-1-7)
15. Tsvetnov V.V., Demin V.P., Kupriyanov A.I. *Radioelektronnaya bor'ba. Radiorazvedka i radioprotivodeistvie* (Radio-electronic Warfare. Radio-Reconnaissance and Radio-Counteraction), Moscow, MAI, 1998, vol. 2, 248 p.
16. Len'shin A.D. *Aviatsionnye sistemy radioelektronnogo protivodeistviya* (Aviation systems of radio electronic counter effort), Voronezh, IPTs VGU, 2012, 284 p.
17. Rassel D.M. *Tactical jamming aircraft increase power and frequency coverage*, Defence Electronics, 1983, vol. 15, no. 4, pp. 78-86.
18. Josefson L. A broadband circularly polarized. phase steered array. Proceedings Military Electronics Defence Expo'79, September-25-27, 1979, pp. 273-284.

19. Zvonarev V.V., Pimenov V.F., Popov A.S. *Trudy MAI*, 2020, no. 111. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115129>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-8](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-8)
20. Likhachev V.P., Sidorenko S.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 99. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=92074>
21. Zvonarev V.V., Popov A.S., Khudik M.Yu. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104213>
22. Shipko V.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 110. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=112863>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-12](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-12)
23. Len'shin A.V., Kravtsov E.V. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, 2021, no. 3, pp. 23-32.
24. Len'shin A.V., Kravtsov E.V. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, 2020, no. 2, pp. 5-13.
25. Abramov P.B. Len'shin A.V. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii*, 2014, no. 2, pp. 122-131.
26. Maklashov V.A. *Radioelektronnaya tekhnika*, 2020, no. 1 (13), pp. 123-128.

Статья поступила в редакцию 11.01.2022; одобрена после рецензирования 24.01.2022; принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted on 11.01.2022; approved after reviewing on 24.01.2022; accepted for publication on 21.02.2022.