

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY

УДК 621.396

doi:10.21685/2307-4205-2021-1-7

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПЕЛЕНГА НА ИСТОЧНИК РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

В. А. Маклашов¹, Р. М. Мирзоев²

^{1,2} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, Самара, Россия
^{1,2} kipres@ssau.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Пассивный метод пеленгации не позволяет измерять дальность до источника радиоизлучения (ИРИ) классическим однопозиционным способом. Одним из путей решения этой проблемы является использование многопозиционных пеленгующих станций. Однако при этом возникают сложности определения координат ИРИ, обусловленные следующими особенностями метода: станции пеленгования размещены на летательных аппаратах, а ИРИ – на земной поверхности; на борту летательного аппарата возможно разместить только линейные антенные решетки, которые позволяют определить фазовым способом пеленг ИРИ только в одной (горизонтальной) плоскости. Разность высот расположения объекта и ИРИ приводит к ошибкам измерения пеленга, что снижает точность определения координат ИРИ. При практическом использовании этого метода и построении соответствующей аппаратуры данные особенности необходимо учитывать. При этом необходимо вводить алгоритмы коррекции, компенсации, маневра для снижения влияния угла места визирования ИРИ на точность пеленгации. Цель данной работы – уменьшение погрешностей определения пеленга и координат ИРИ. *Материалы и методы.* Предложен алгоритм поправки пеленга. Проведено моделирование определения местоположения цели. Оценены погрешности определения пеленга и местоположения ИРИ. Определено влияние высоты на ошибку определения. Для получения координат цели использован алгоритм «Target Location». При этом учитывается дополнительный набег фаз. Разработан алгоритм поправки пеленга, который базируется на методе триангуляции. Проведено моделирование в среде MATLAB. *Результаты.* Моделирование алгоритма поправки на тестовой модели позволило уменьшить погрешность определения пеленга с $4,9^\circ$ до $0,1^\circ$. Ошибка азимута на цель уменьшилась с 15° до $0,3^\circ$. Погрешность определения местоположения уменьшалась с 3 км до нескольких десятков метров. *Выводы.* Путем моделирования доказана состоятельность алгоритма коррекции пеленга. В результате моделирования было установлено, что погрешность определения пеленга и координат ИРИ с использованием алгоритма коррекции уменьшается примерно в 50 раз. Полученные данные дают возможность разработать функциональное программное обеспечение систем радиоэлектронной борьбы.

Ключевые слова: алгоритм, пеленг, источник радиоизлучения, математическое моделирование, вычисление, эффективность

Для цитирования: Маклашов В. А., Мирзоев Р. М. Алгоритм вычисления пеленга на источник радиоизлучения // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 66–75. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-7

ALGORITHM FOR CALCULATING DIRECTIONS TO A RADIO SOURCE**V.A. Maklashov¹, R.M. Mirzoev²**^{1,2} Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, Russia
^{1,2}kipres@ssau.ru

Abstract. Background. The passive method of direction finding does not allow measuring the range to a radio emission source (RES) using the classical single-position method. One of the ways to solve this problem is to use multi-position direction finding stations. However, at the same time, difficulties arise in determining the coordinates of the RES, due to the following features of the method: direction finding stations are located on aircraft (AC), and RES – on the earth's surface; on board the aircraft it is possible to place only linear antenna arrays, which make it possible to determine by the phase method the bearing of the RES in only one (horizontal) plane. The difference in the heights of the location of the object and the RES leads to errors direction finding measurements, which reduces the accuracy of determining the coordinates of the RES. With the practical use of this method and the construction of equipment, these features must be met. For this, it is necessary to introduce algorithms for correction, compensation, and maneuver to reduce the influence of the angle of sight of the RES on the accuracy of direction finding. The purpose of this work is to reduce the errors in determining the direction finding and coordinates of the RES. *Materials and methods.* A direction finding correction algorithm is proposed. Simulation of target location is carried out. Estimates of the error in determining the bearing and position of the RES. The influence of altitude on the direction finding error is determined. To obtain the coordinates of the target, the "Target Location" algorithm was used. This takes into account the additional phase incursion. A bearing correction algorithm has been developed, which is based on the triangulation method. Simulation was carried out in the MATLAB environment. *Results.* Modeling the correction algorithm on a test model made it possible to reduce the bearing determination error from 4.9 to 0.1 degrees. The azimuth error to the target has decreased from 15 to 0.3 degrees. The position determination error decreased from 3 km to several tens of meters. *Conclusions.* The consistency of the correction algorithm was proved by modeling. As a result of the simulation, it was found that the error in determining the bearing and coordinates of the RES using the correction algorithm is reduced by about 50 times. The data obtained make it possible to develop functional software for electronic warfare (EW) systems.

Keywords: algorithm, direction finding, radio emission source, mathematical modeling, calculation, efficiency

For citation: Maklashov V.A., Mirzoev R.M. Algorithm for calculating directions to a radio source. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;1:66–75. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-7

Введение

Для определения местоположения ИРИ при проведении радиотехнической разведки во многих случаях используют пассивную радиолокацию. Однако она не позволяет измерять дальность до ИРИ классическим однопозиционным методом. Одним из путей решения этой проблемы является использование многопозиционных пеленгующих станций [1–5]. Однако при этом возникают сложности определения координат ИРИ, обусловленные следующими особенностями метода:

1) станции пеленгования размещены на летательных аппаратах (ЛА);

2) ИРИ расположен на земной поверхности;

3) на борту ЛА возможно разместить только линейные антенные решетки, с помощью которых можно определить фазовым способом пеленг ИРИ только в одной (горизонтальной) плоскости.

В связи с этим разность высот расположения объекта и субъектов пеленгования формирует искажения пеленгационных прямых. Это приводит к ошибкам пеленга (рис. 1, 2). Из данных графиков следует:

- точность местоопределения ИРИ напрямую зависит от величин ошибок пеленгования;
- разность высот расположения объекта и субъекта пеленгования оказывает существенное влияние на систематическую ошибку (отклонение) пеленга;
- рост данных отклонений значителен с ростом угла места визирования ИРИ;
- геометрическое смещение местоопределения ИРИ невозможно компенсировать только приближением к объекту.

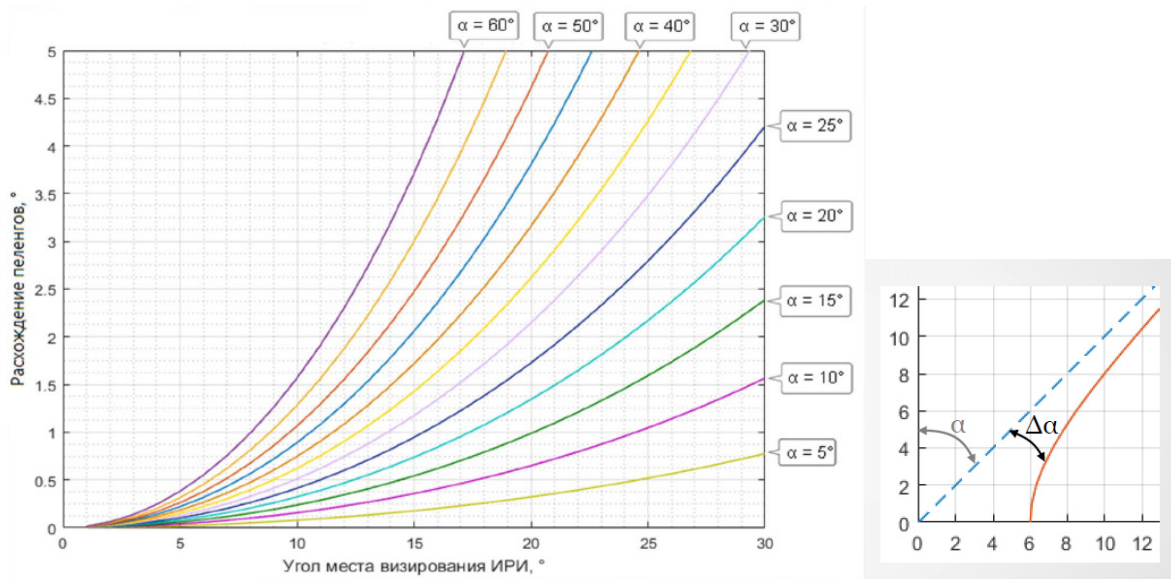


Рис. 1. Ошибка пленга в зависимости от истинного пленга и угла визирования по углу места

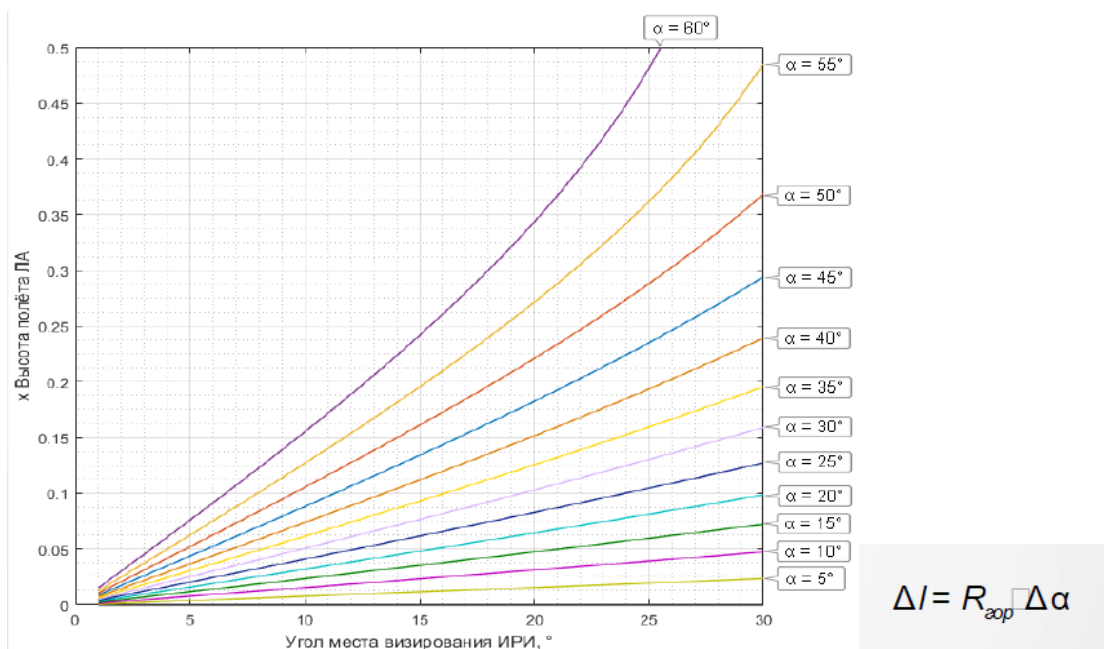


Рис. 2. Зависимость высоты полета от истинного пленга и угла визирования по углу места

В натурном применении и построении соответствующей аппаратуры необходимо учитывать вышеуказанные особенности. Для этого необходимо вводить алгоритмы коррекции, компенсации, маневра к снижению угла места визирования ИРИ. Это позволит уменьшить погрешность определения пленга и координат ИРИ. Кроме того, будет сделан следующий шаг в решении проблемы многофакторного обеспечения надежности [6], проведения моделирования катастрофических отказов [7] в системах радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

Цель работы – уменьшение погрешности определения пленга и координат ИРИ.

Разработка алгоритма поправки пленга

Обычный алгоритм вычисления пленга на ИРИ (цель) имеет следующий недостаток. Так как этот алгоритм подразумевает нахождение комплекса и источника излучения на одном уровне, то с увеличением высоты расположения комплекса будет возрастать погрешность определения пленга и, как следствие, погрешность определения местоположения цели.

Авторами были получены результаты моделирования определения местоположения цели на высоте 10 и 0 км, т.е. идеальные случаи нахождения комплекса и цели на одной высоте (рис. 3 и 4). Клетки поля моделирования имеют размеры 10×10 км.

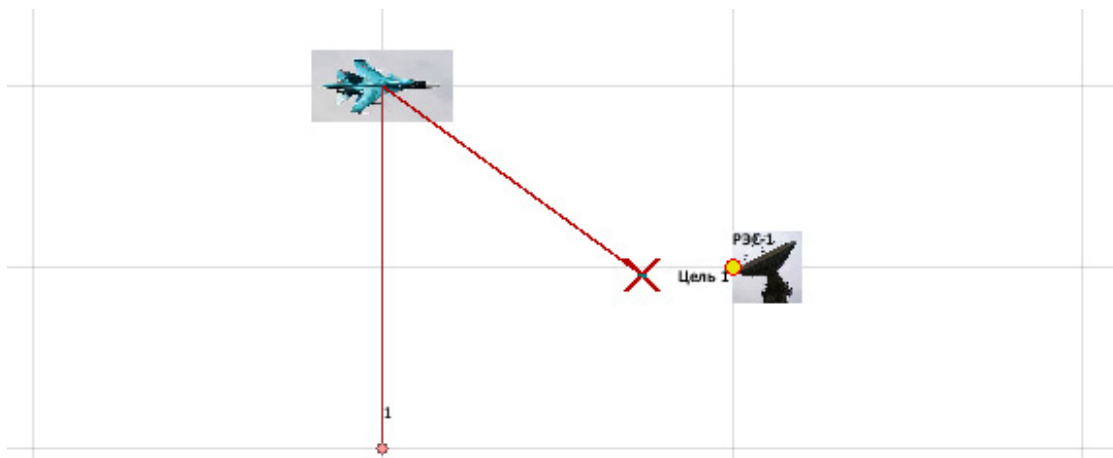


Рис. 3. Конечный результат определения местоположения цели при расположении ЛА на высоте 10 км

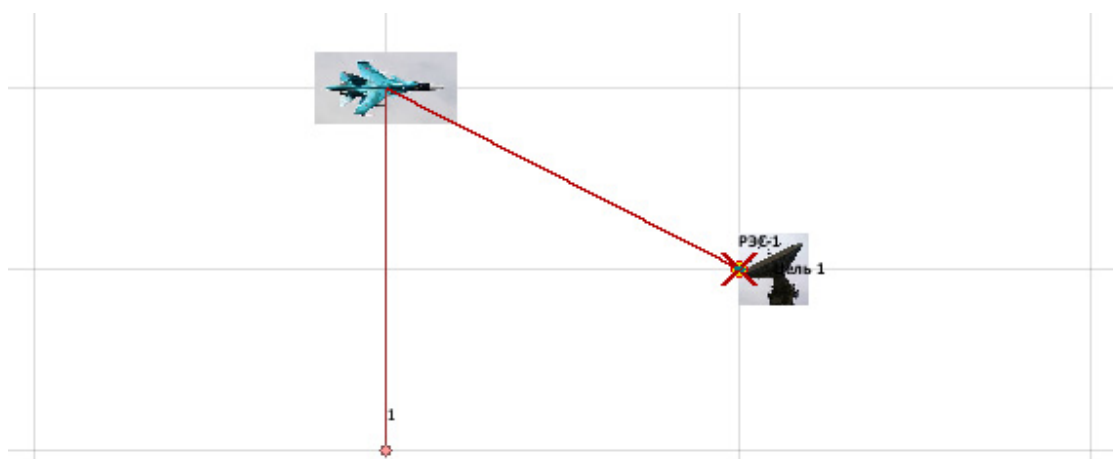


Рис. 4. Конечный результат определения местоположения цели при расположении ЛА на высоте 0 км

На рис. 5 и 6 приведены графики погрешностей определения пеленга и местоположения ИРИ.

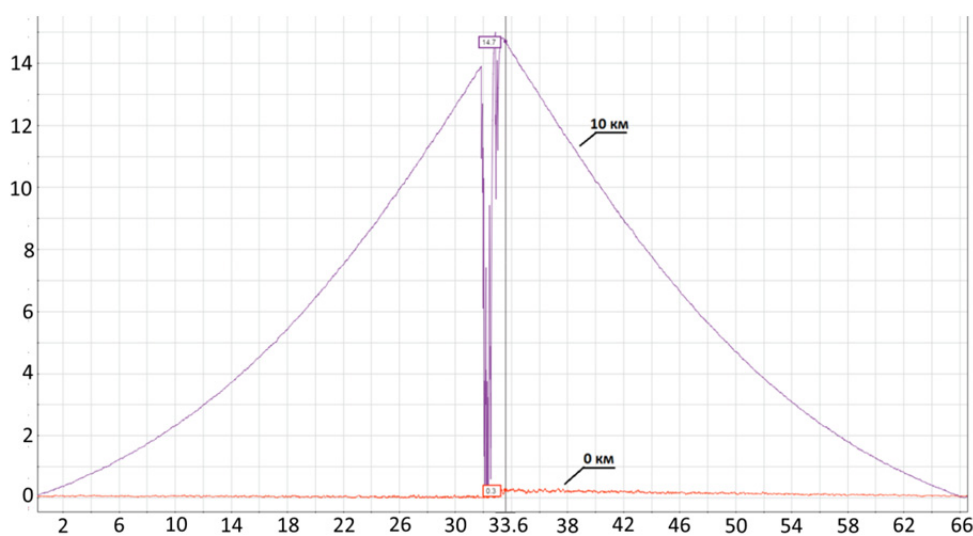


Рис. 5. Графики погрешности определения пеленга

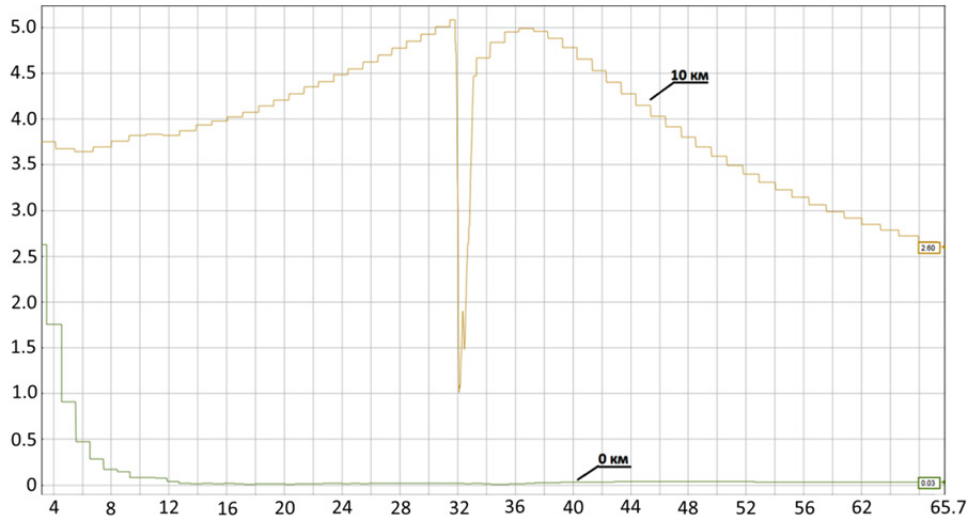


Рис. 6. Графики погрешности определения местоположения

Пиковые значения погрешностей составляют $14,8^\circ$ и $0,3^\circ$ для расположения ЛА на высоте 10 и 0 км соответственно. Данные графики позволяют количественно оценить существенное влияние высоты на ошибку определения пеленга и местоположения ИРИ. Проведенный анализ показывает, что причиной ошибки является увеличение расстояния от цели до ЛА на величину dL (рис. 7), которое тем больше, чем больше высота.

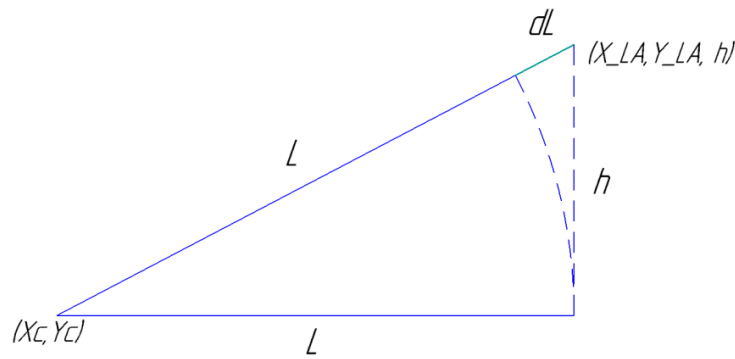


Рис. 7. Схема взаимного расположения цели и ЛА

Соответственно изменяется и фаза приходящего сигнала на величину

$$\Delta\varphi = 360dL / \lambda,$$

где λ – длина волны приходящего сигнала.

Чтобы уменьшить погрешность был разработан следующий алгоритм компенсирования ошибки:

- 1) получаем примерные координаты цели (X_c, Y_c) после выполнения алгоритма «Target Location»;
- 2) вычисляем приращение расстояния dL для каждой антенны:

$$dL = \sqrt{(x_{ant} - X_c)^2 + (y_{ant} - Y_c)^2 + h^2} - \sqrt{(x_{ant} - X_c)^2 + (y_{ant} - Y_c)^2};$$

- 3) вычисляем дополнительный набег фаз:

$$\Delta\varphi = 360dL / \lambda;$$

- 4) для каждой антенны соответственно вычитаем поправку $\Delta\varphi$ из фазы приходящего сигнала;
- 5) далее вычисляются разности фаз, пеленги и пересчитываются координаты цели. Получив новые координаты цели, повторяем данный алгоритм с первого шага.

Значения координат цели с каждой итерацией будут сходиться к некоторому числу. Ниже на рис. 8 и 9 представлены результаты моделирования алгоритма на тестовой модели.

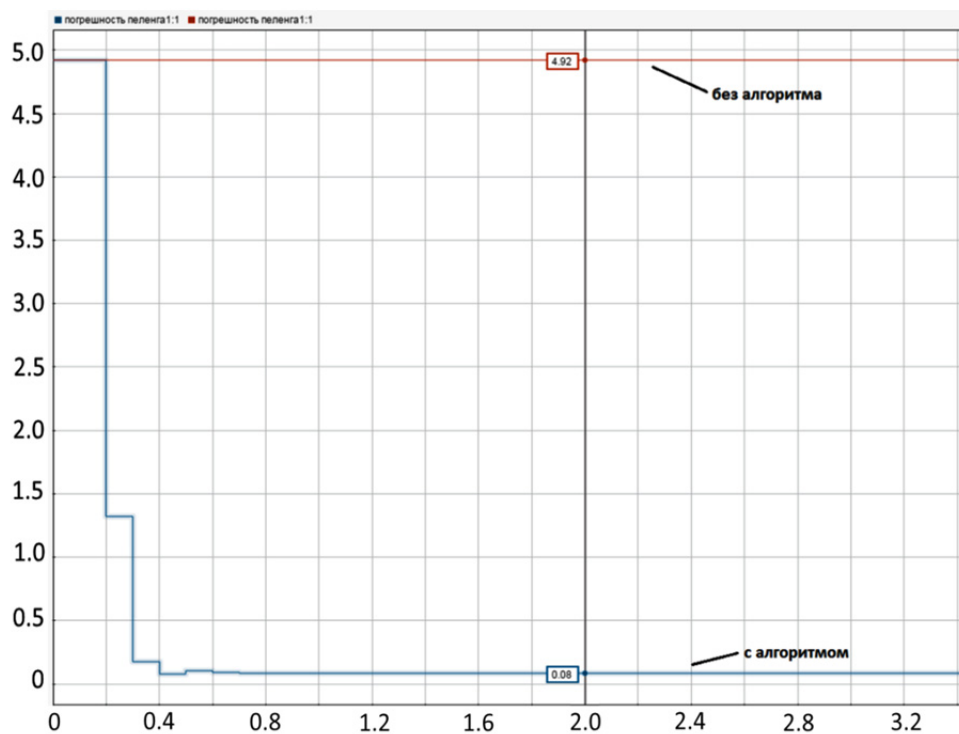


Рис. 8. Погрешности определения пеленга без поправки и с поправкой

В данном примере погрешность определения пеленга уменьшилась с $4,9^\circ$ до $0,1^\circ$.

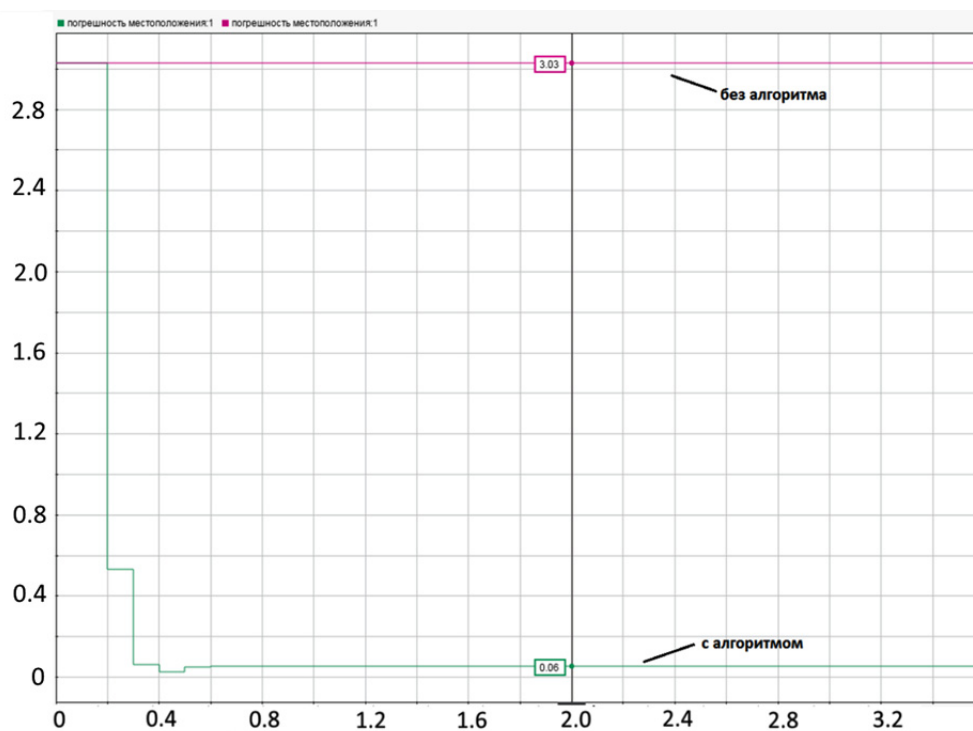


Рис. 9. Погрешности определения местоположения без поправки и с поправкой

Как видно из рис. 9, погрешность сократилась с 3 км до 60 м.

Алгоритм поправки пеленга

Алгоритм поправки пеленга имеет следующую последовательность:

1) после обнаружения цели вычисляется и запоминается пеленг (pel_0) в первой точке триангуляции, а также сохраняются длина волны (λ) и разности фаз (ph_{012_in} , ph_{023_in}) принятого сигнала на всех антенных базах, координаты антенн (x_{0i_ant} , y_{0i_ant} , z_{0i_ant} , $i = 1, 2, 3$), курс ($kurs$) и номер приемного модуля (ПМ) (Num_PM_0) (курс и номер ПМ сохраняются для вычисления азимута);

2) определяется пеленг (pel) во второй точке триангуляции;

3) вычисляются приблизительные координаты местоположения цели (X_c , Y_c) по алгоритму «Target Location»;

4) определяется пеленг в текущем местоположении ЛА:

– вычисляем приращения расстояний dL для каждой антенны:

$$dL_1 = \sqrt{(x_{1_ant} - X_c)^2 + (y_{1_ant} - Y_c)^2 + h^2} - \sqrt{(x_{1_ant} - X_c)^2 + (y_{1_ant} - Y_c)^2};$$

$$dL_2 = \sqrt{(x_{2_ant} - X_c)^2 + (y_{2_ant} - Y_c)^2 + h^2} - \sqrt{(x_{2_ant} - X_c)^2 + (y_{2_ant} - Y_c)^2};$$

$$dL_3 = \sqrt{(x_{3_ant} - X_c)^2 + (y_{3_ant} - Y_c)^2 + h^2} - \sqrt{(x_{3_ant} - X_c)^2 + (y_{3_ant} - Y_c)^2};$$

– вычисляем дополнительный набег фаз:

$$\Delta\phi_1 = 360dL_1 / \lambda; \quad \Delta\phi_2 = 360dL_2 / \lambda; \quad \Delta\phi_3 = 360dL_3 / \lambda;$$

– вычисляем разности набегов:

$$\Delta\phi_{12} = \Delta\phi_1 - \Delta\phi_2; \quad \Delta\phi_{23} = \Delta\phi_2 - \Delta\phi_3;$$

– вычитаем разности набегов из текущих разностей фаз:

$$ph_{12} = ph_{12_in} - \Delta\phi_{12}; \quad ph_{23} = ph_{23_in} - \Delta\phi_{23}.$$

– по разностям фаз ph_{12} , ph_{23} вычисляем пеленг в текущем местоположении ЛА по алгоритму «Target Peleng»;

5) выполняем все подпункты п. 4 для первой точки триангуляции, используя сохраненные входные данные: разности фаз (ph_{012_in} , ph_{023_in}), координаты антенн (x_{0i_ant} , y_{0i_ant} , z_{0i_ant} , $i = 1, 2, 3$). Таким образом получаем скорректированный пеленг в первой точке триангуляции;

6) имея два скорректированных пеленга, повторяем пункты 3–6.

Моделирование в среде MATLAB

Ниже представлены результаты моделирования. В поле моделирования была задана ситуация, показанная на рис. 10.

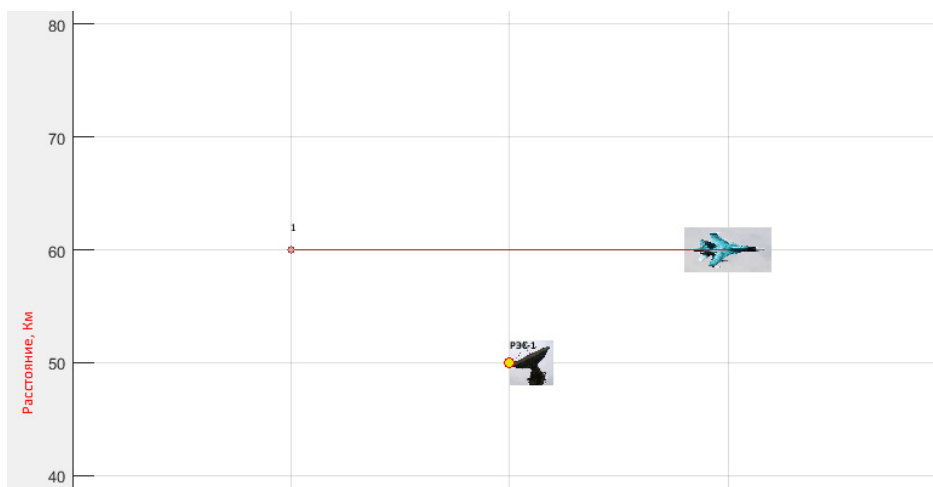


Рис. 10. Поле моделирования

На рис. 11 показаны графики азимутов на цель с использованием алгоритма коррекции и без него.

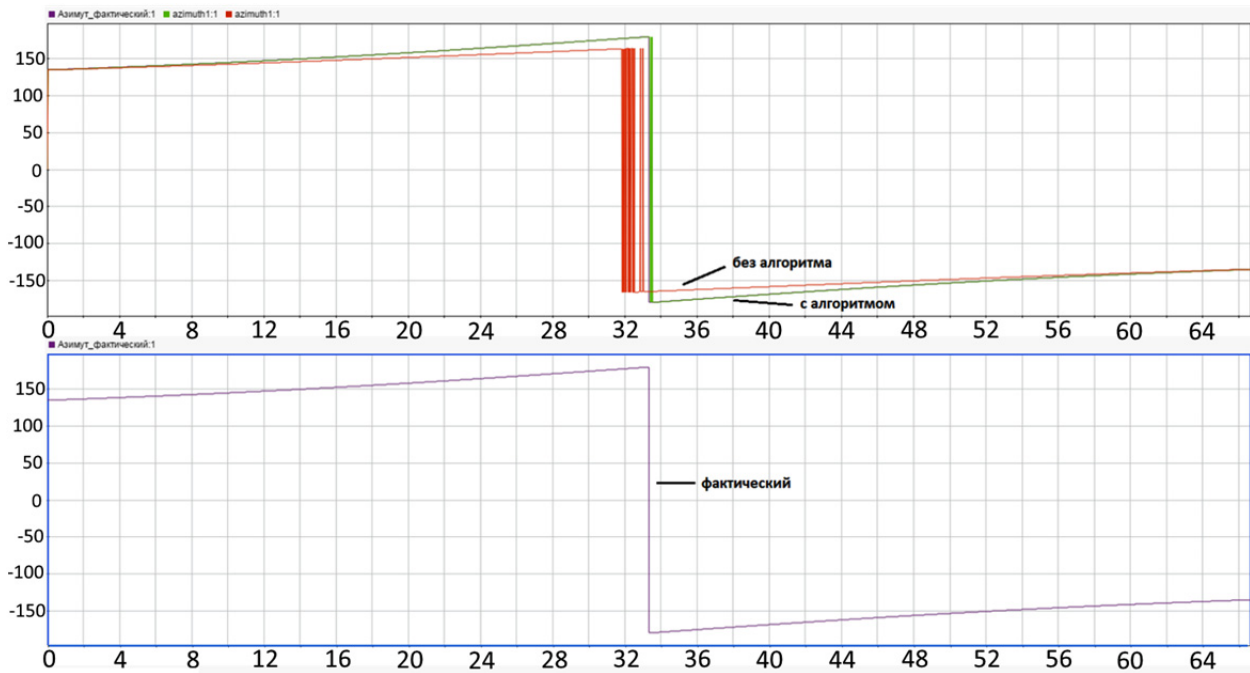


Рис. 11. Графики азимутов на цель без поправки и с поправкой

Из рисунков видно, что графики фактического азимута и азимута, полученного с коррекцией пеленга, практически идентичны.

На рис. 12 показаны графики ошибки азимутов на цель.

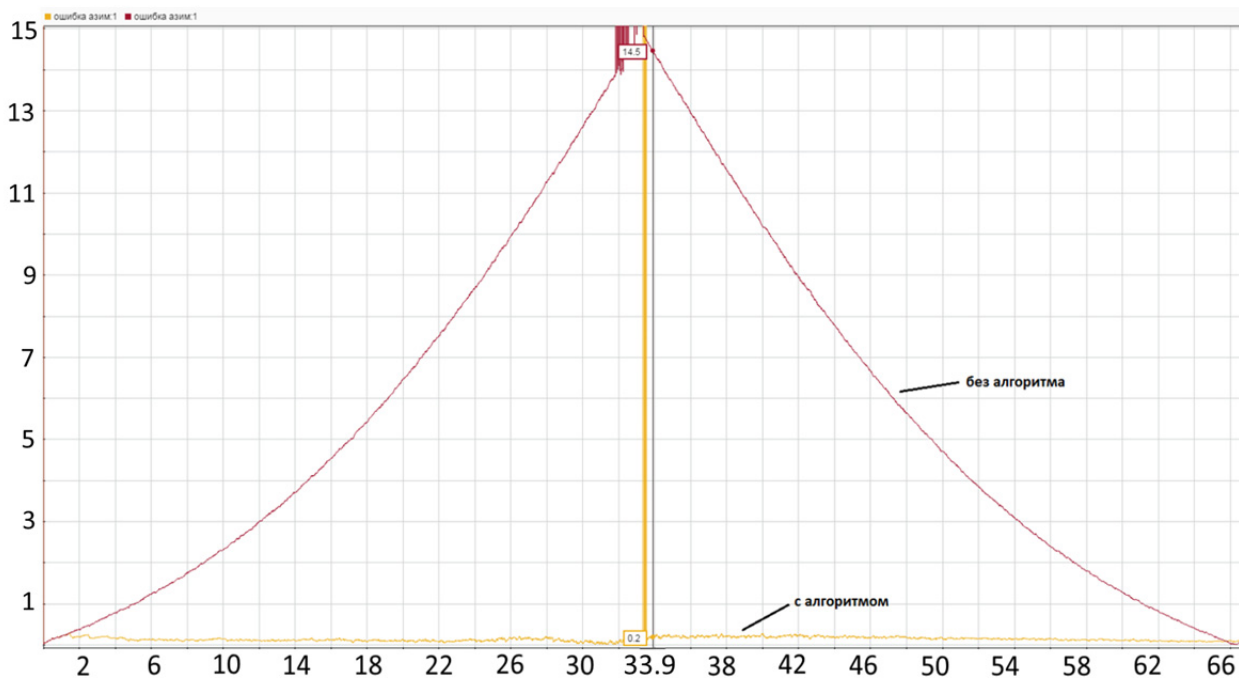


Рис. 12. Графики ошибок азимутов на цель без поправки и с поправкой

Погрешность после использования алгоритма поправки пеленга в данной ситуации не превышает $0,3^\circ$, в то время как без него ошибка доходит до 15° .

На рис. 13 показаны графики погрешностей местоположения.

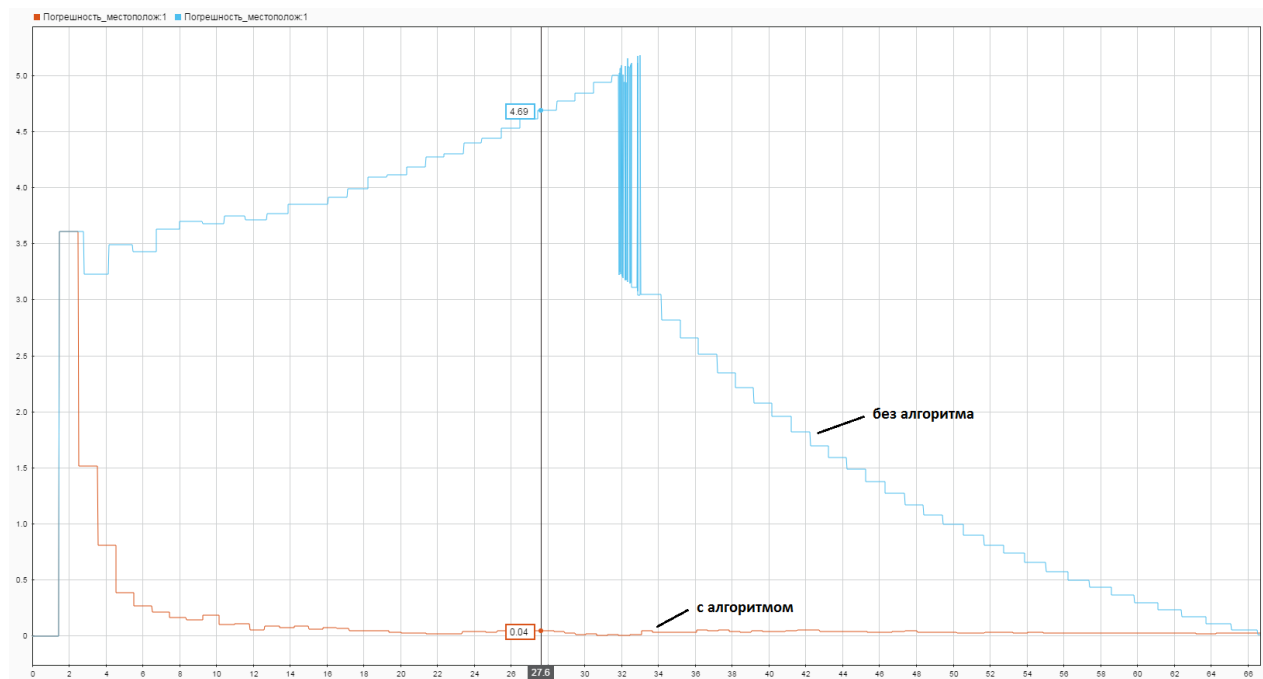


Рис. 13. Графики погрешностей местоположения без поправки и с поправкой

Как и в тестовой модели, погрешность определения местоположения сходится к нескольким десяткам метров. Без использования коррекции погрешность в среднем в данной ситуации составляет 3 км.

Заключение

Путем моделирования доказана состоятельность алгоритма коррекции пеленга. В результате моделирования было установлено, что погрешность определения пеленга и координат ИРИ с использованием алгоритма коррекции уменьшается примерно в 50 раз. Полученные результаты дают возможность разработать функциональное программное обеспечение систем РЭБ [8].

Список литературы

1. Шерстнев Д. В., Маклашов В. А., Мазуров Ю. В., Тезейкин В. К. Малогабаритный модульный комплекс РТР и РЭП индивидуальной защиты летательных аппаратов // Радиоэлектронная борьба в Вооруженных силах Российской Федерации. 2017. № 1. С. 172–173.
2. Справочник по радиолокации : в 4-х т. / под ред. М. Скольника. М. : Сов. радио, 1976. Т. 1. 456 с.
3. Черный Ф. Б. Распространение радиоволн. М. : Сов. радио, 1972. 463 с.
4. Перунов Ю. М., Фомичев К. Н., Юдин Л. Н. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием. М. : Радиотехника, 2003. 416 с.
5. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / под ред. Н. М. Царькова. М. : Радио и связь, 1985. 272 с.
6. Юрков Н. К., Затылкин А. В., Полесский С. Н. [и др.]. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 4. С. 74–79.
7. Юрков Н. К., Горячев Н. В., Кузина Е. А. Физические основы получения катастрофического отказа в электрорадиокомпонентах и системах // Надежность и качество сложных систем. 2018. Т. 1. С. 102–107.
8. Маклашов В. А., Пиганов М. Н. Методика унификации средств радиоэлектронной борьбы // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 3. С. 26–32.

References

1. Sherstnev D.V., Maklashov V.A., Mazurov Yu.V., Tezeykin V.K. Small-sized modular complex of RTR and REP individual protection of aircraft. *Radioelektronnaya bor'ba v Vooruzhennykh silakh Rossiyskoy Federatsii = Electronic warfare in the Armed Forces of the Russian Federation*. 2017;1:172–173. (In Russ.)

2. Skolnik M. (ed.) *Spravochnik po radiolokatsii: v 4-kh t. =* . Moscow: Sov. radio, 1976;1:456. (In Russ.)
3. Chernyy F.B. *Rasprostraneniye radiovoln = Handbook of radar: in 4 vols.* Moscow: Sov. radio, 1972:463. (In Russ.)
4. Perunov Yu.M., Fomichev K.N., Yudin L.N. *Radioelektronnoye podavleniye informatsionnykh kanalov sistem upravleniya oruzhiem = Electronic suppression of information channels of weapons control systems.* Moscow: Radiotekhnika, 2003:416. (In Russ.)
5. Tsar'kov N. M. (ed.) *Elektromagnitnaya sovместimost' radioelektronnykh sredstv = Electromagnetic compatibility of radio-electronic devices.* Moscow: Radio i svyaz', 1985:272. (In Russ.)
6. Yurkov N.K., Zatytkin A.V., Poleskiy S.N. [et al.]. Information technology for multi-factor reliability assurance of complex electronic systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2013;4:74–79. (In Russ.)
7. Yurkov N.K., Goryachev N.V., Kuzina E.A. Physical basis of catastrophic failure in electrical and radio components and systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2018;1:102–107. (In Russ.)
8. Maklashov V.A., Piganov M.N. Methods of unification of electronic warfare equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2019;3:26–32. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Анатольевич Маклашов

аспирант,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Рустам Музаффарович Мирзоев

аспирант,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Vladimir A. Maklashov

Postgraduate student,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)

Rustam M. Mirzoev

Postgraduate student,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)