

РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ С ПЕЛЕНГОВАНИЕМ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ

Босый Александр Сергеевич,
Череповецкое высшее военное инженерное ордена Жукова
училище радиоэлектроники (ЧВИИУРЭ), г. Череповец, Россия,
sanboss90@mail.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-1-4-8

Шлёнских Денис Александрович,
Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского (ВКА имени
А.Ф.Можайского), г. Санкт-Петербург, Россия, sshlyon@gmail.com

Овчаренко Константин Леонидович,
Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского (ВКА имени
А.Ф.Можайского), г. Санкт-Петербург, Россия, kostao@ya.ru

Тимошенко Александр Васильевич,
АО "Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца",
Москва, Россия; Национальный исследовательский университет
"МИЭТ", Москва, Россия, u567ku78@gmail.com

Ключевые слова: определение местоположения,
источник радиоизлучения, разностно-дальномерной
метод, пеленгование; нейронные сети.

Необходимость определения местоположения источников радиоизлучения (ИРИ) возникает при решении задач различных прикладных задач. Наиболее распространенными методами определения местоположения ИРИ являются разностно-дальномерные методы. Применение разностно-дальномерных методов на практике позволяет добиться довольно высокой точности определения местоположения ИРИ, находящегося в ближней зоне, то есть внутри области, ограниченной измерительными пунктами. Вместе с тем с удалением ИРИ от измерительных пунктов значительно увеличивается погрешность оценивания его координат. Представлен новый разностно-дальномерный метод определения местоположения ИРИ в дальней зоне с применением нейронной сети. В качестве дополнительной информации об ИРИ в дальней зоне, где погрешность оценок координат значительно превышает допустимые значения, предложено оценивать пеленг на ИРИ. В качестве искусственной нейронной сети выбрана двухслойная сеть с прямой связью, одним скрытым слоем из пятидесяти одного нейрона типа гиперболический тангенс и одним выходным слоем из трех нейронов с линейной функцией активации. В результате математического моделирования получены оценки точности вычисления координат ИРИ, находящегося в ближней зоне, а также оценки точности пеленгования ИРИ, находящегося в дальней зоне. Применение разработанного метода целесообразно при реализации программной части комплексов радиоэлектронного контроля для противодействия нелегитимному использованию частотно-временного ресурса систем связи коммерческого назначения. Другим преимуществом разработанного метода является то, что его реализация на практике не требует изменения аппаратной части существующих комплексов радиоконтроля и может быть выполнена путем обновления программного обеспечения.

Информация об авторах:

Босый Александр Сергеевич, Череповецкое высшее военное инженерное ордена Жукова училище радиоэлектроники (ЧВИИУРЭ), младший научный сотрудник, к.т.н., г. Череповец, Россия

Шлёнских Денис Александрович, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского (ВКА имени А.Ф.Можайского), начальник 321 лаборатории 32 кафедры, г. Санкт-Петербург, Россия

Овчаренко Константин Леонидович, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского (ВКА имени А.Ф.Можайского), старший научный сотрудник - старший бортовой оператор 462 лаборатории, г. Санкт-Петербург, Россия,

Тимошенко Александр Васильевич, АО "Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца"; Национальный исследовательский университет "МИЭТ", заместитель генерального конструктора, доктор технических наук, профессор, Москва, Россия,

Для цитирования:

Босый А.С., Шлёнских Д.А., Овчаренко К.Л., Тимошенко А.В. Разностно-дальномерной метод оценивания координат источников радиоизлучения на основе искусственных нейронных сетей с пеленгованием в дальней зоне // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №2. С. 4-8.

For citation:

Bosyy A.S., Shlyonskikh D.A., Ovcharenko K.L., Timoshenko A.V. (2020) Difference-range method of estimating coordinates of radio emission sources based on artificial neural networks with bearing in the distant zone. *T-Comm*, vol. 14, no.2, pp. 4-8. (in Russian)

Введение

Необходимость определения местоположения (ОМП) ИРИ возникает при решении задач радиолокационного наблюдения, радионавигации и радиоэлектронного контроля. Современные системы ОМП ИРИ гражданского назначения широко применяются для отыскания потерпевших в зонах стихийных бедствий и чрезвычайных ситуаций [1, 2], а также при мониторинге радиочастотного спектра на предмет его нелегитимного использования [3]. Так, например, несанкционированное использование ограниченного частотного ресурса приводит к возникновению помех и снижению качества функционирования системы связи в целом.

В настоящее время наиболее широкое распространение получили так называемые двухэтапные методы ОМП ИРИ, на первом этапе которых выполняется оценивание координатно-информативного параметра (КИП) [4], а вычисление оценок параметра положения (ПП) и оценивание координат ИРИ выполняется на втором этапе.

При радиоэлектронном контроле наиболее часто в качестве КИП используют взаимную задержку радиосигналов ИРИ. Для её измерения применяются методы корреляционной обработки принятых радиосигналов, где разность прихода радиосигналов определяется из положения максимума их взаимной корреляционной функции [5]. В этом случае для определения ПП используется разность дальности, а при оценивании координат ИРИ применяется разностно-дальномерный метод. Следует отметить, что для однозначного определения координат ИРИ требуется вычислить три разности дальности, соответственно в состав системы ОМП ИРИ необходимо включить как минимум четыре измерительных пункта.

Применение разностно-дальномерного метода на практике позволяет добиться довольно высокой точности ОМП ИРИ, находящегося в ближней зоне, то есть внутри области, ограниченной измерительными пунктами [6, 7]. Вместе с тем с удалением ИРИ от измерительных пунктов значительно увеличивается погрешность оценивания его координат. Известный способ разностно-дальномерного пеленгования позволяет вычислять пеленг на ИРИ, находящегося в дальней зоне [8], однако при данном способе погрешность пеленгования значительно возрастает при нахождении ИРИ в непосредственной близости от измерительных пунктов.

Таким образом, целью статьи является разработка разностно-дальномерного метода оценивания координат ИРИ с пеленгованием в дальней зоне.

Постановка задачи

Пусть измерительные пункты системы ОМП, а также ИРИ расположены на поверхности земли. Тогда, приняв допущение о том, что на некотором локальном участке земная поверхность представляет собой плоскость, можно ограничиться двумерным случаем решения задачи ОМП ИРИ

Исходными данными для решения задачи оценивания координат в этом случае будут выступать:

- координаты четырёх измерительных пунктов:

$$(X_i, Y_i), \text{ где } i = 1-4. \tag{1}$$

- три измеренные значения разностей дальности:

$$\begin{aligned} R_{12} &= R_{ИРИ1} - R_{ИРИ2} \\ R_{13} &= R_{ИРИ,1} - R_{ИРИ,3} \\ R_{23} &= R_{ИРИ,2} - R_{ИРИ,3} \end{aligned} \tag{2}$$

где R_{ij} – это величина евклидова расстояния от i до j .

Выходными данными будут являться координаты ИРИ (X, Y) при нахождении его в ближней зоне, и пеленг на ИРИ α , при нахождении его в дальней зоне.

Разностно-дальномерный метод оценивания координат ИРИ с пеленгованием в дальней зоне

В качестве математического аппарата для решения задачи ОМП ИРИ предлагается использовать искусственные нейронные сети (рис. 1). При таком подходе не требуется в явном виде воспроизводить логику процесса функционирования системы ОМП ИРИ или использовать сложные аналитические выражения. Необходимо лишь обеспечить выдачу требуемых выходных реакций при поступлении заданных воздействий на вход системы.

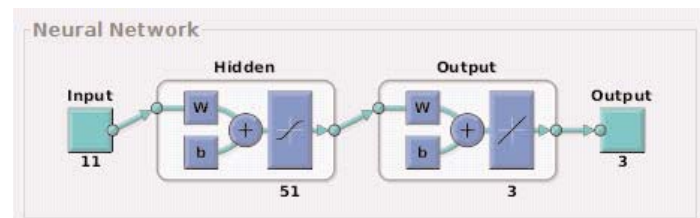


Рис. 1. Схема искусственной нейронной сети

На первом, предварительном этапе разработанного метода, происходит обучение искусственной нейронной сети. Обучающая выборка формируется только для участка ближней зоны. Координаты возможного расположения ИРИ (X, Y) принимают значения внутри указанной области с некоторым дискретным шагом. Разности дальности вычисляются по формулам (2), а пеленг определяется как угол между направлением на север и ИРИ. Следует отметить, что при стационарном положении измерителей достаточно однократного выполнения первого этапа. Искусственная нейронная сеть после обучения может применяться неограниченное число раз.

Второй этап включает в себя непосредственное вычисление координат и оценивание пеленга на ИРИ. Для этого на вход искусственной нейронной сети подаются координаты измерительных пунктов (X_i, Y_i) и оценки разностей дальности R_{12}, R_{13}, R_{23} .

На третьем этапе принимается решение о зоне, в которой располагается ИРИ и формируются выходные значения оценок. Так, например, при нахождении ИРИ в ближней зоне выходными данными будут являться координаты ИРИ (X_i, Y_i) . В случае расположения ИРИ в дальней зоне результатом применения метода будет являться оценка пеленга на ИРИ α .

Результаты имитационного моделирования

С целью иллюстрации результатов применения разработанного метода реализовано моделирование в среде Matlab. В качестве искусственной нейронной сети выбрана двухслойная сеть с прямой связью, одним скрытым слоем из пятидесяти одного нейрона типа гиперболический тангенс и одним выходным слоем из трех нейронов с линейной функцией активации.

Отдельно стоит уточнить, что формально выбранная нейронная сеть является трехслойной, но так как на входном слое не выполняется суммирование и к нему не применена никакая функция активации, нейроны в нем служат только в качестве разветвителя для входных весов скрытого слоя и не несут никакой вычислительной нагрузки. По этой причине входной слой не принимается во внимание при подсчете общего количества слоев и сеть считается двухслойной.

В качестве обучающего алгоритма для нейронной сети был выбран метод Левенберга-Марквардта, который, по сути, объединяет в себе метод градиентного спуска и метод Ньютона. Данный метод достаточно хорошо работает при задании согласованных данных и достаточном количестве нейронов в скрытом слое. Для первичной оценки производительности искусственной нейронной сети на этапе обучения применялась функция «mse» (mean squared error), которая обеспечивает вычисление среднеквадратичных ошибок для соответствующих эпох (рис. 2).

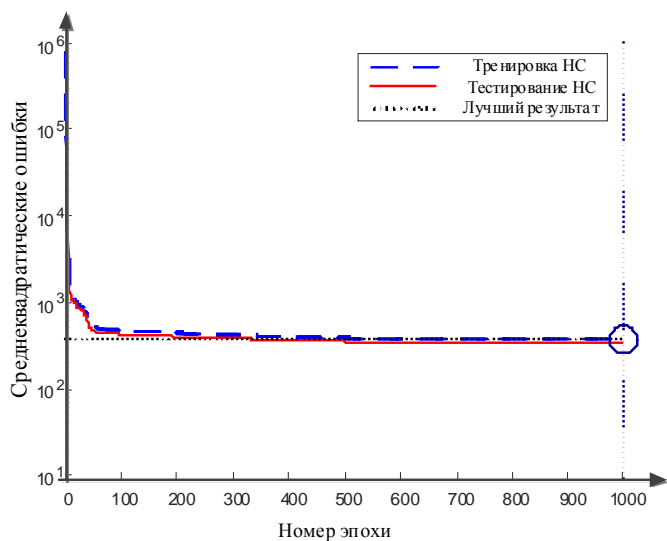


Рис. 2. Оценка производительности многослойной искусственной нейронной сети

В ходе моделирования было принято, что измерительные пункты расположены в точках с координатами (0;500); (500;0); (0;-500) и (-500;0) м. При этом размер ближней зоны ограничен по осям абсцисс и ординат следующим интервалом [-500;500] м. Шаг сетки координат для формирования обучающей выборки выбран равным 5 м.

Для имитации воздействия шумов при вычислении взаимной задержки была введена погрешность, представляющая собой случайную величину, распределенную по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением равным 0,29 мкс, что соответствует среднеквадратическому отклонению параметра положения, равному 89 м.

Оценивание координат для ИРИ, находящегося в ближней зоне и пеленга на ИРИ, находящегося в дальней зоне проводилось в нескольких точках при многократных измерениях. В качестве меры погрешности оценивания координат ИРИ использовалось декартово расстояние между истинным положением ИРИ и его оценкой. Погрешность оценивания пеленга на ИРИ вычислялась как модуль разности истинного и измеренного пеленгов.

Результаты ОМП ИРИ для серии из 100 статистических испытаний при истинном положении ИРИ в ближней зоне с координатами (90; -170) м представлены на рис. 3, а соответствующая им гистограмма погрешностей оценивания координат ИРИ на рис. 4.

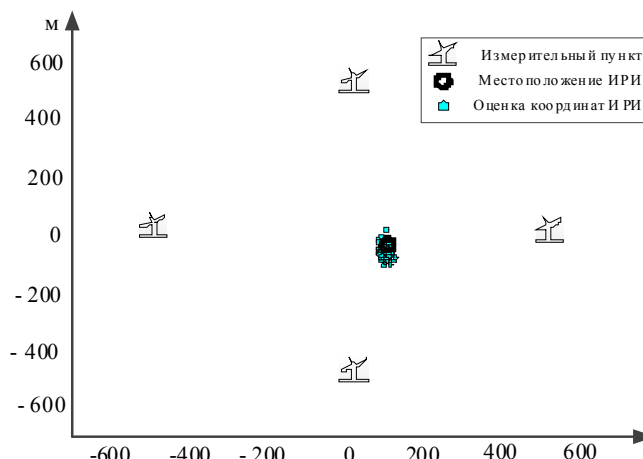


Рис. 3. Результаты ОМП при расположении ИРИ в ближней зоне

Как следует из рисунка 3, оценки координат ИРИ сгруппированы около истинного положения ИРИ и занимают область, ограниченную эллипсом, что хорошо согласуется с результатами применения методов ОМП ИРИ, базирующихся на решении аналитических выражений [9].

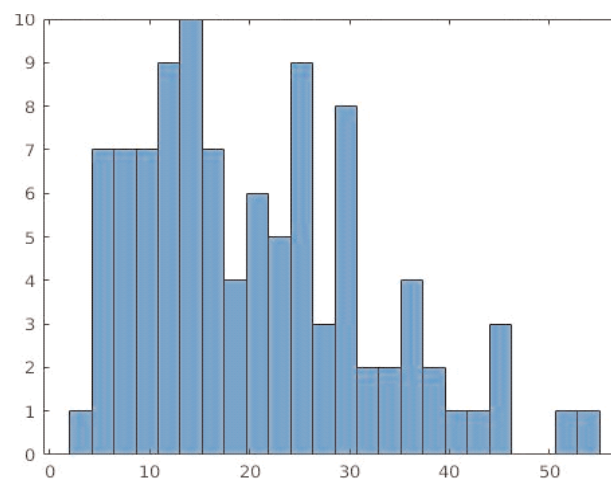


Рис. 4. Гистограмма погрешностей при оценивании координат ИРИ, находящегося в ближней зоне

Как следует из гистограммы, изображенной на рис. 4, погрешность оценивания координат ИРИ, находящегося в ближней зоне, с вероятностью 0,95 не превышает 46 м, что свидетельствует о достаточно высокой точности ОМП ИРИ, находящегося внутри ближней зоны.

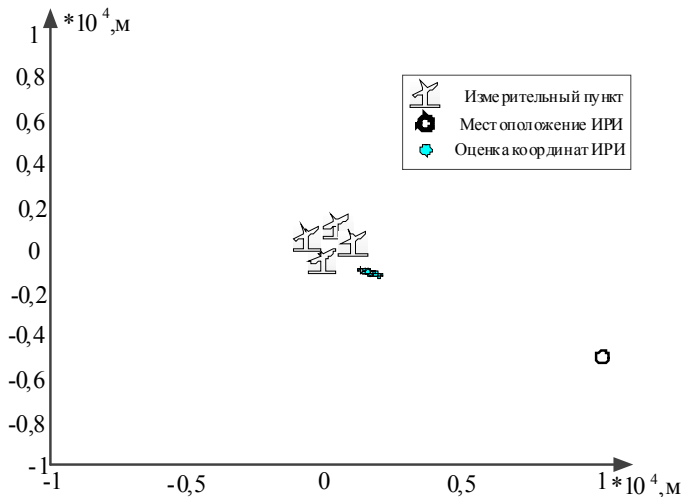


Рис. 5. Результаты ОМП при расположении ИРИ в дальней зоне

Результаты ОМП ИРИ для серии из 100 статистических испытаний при истинном положении ИРИ в дальней зоне с координатами (8033; -3707) м представлены на рис. 5, а соответствующая им гистограмма погрешностей оценивания пеленга на ИРИ представлена на рис. 6.

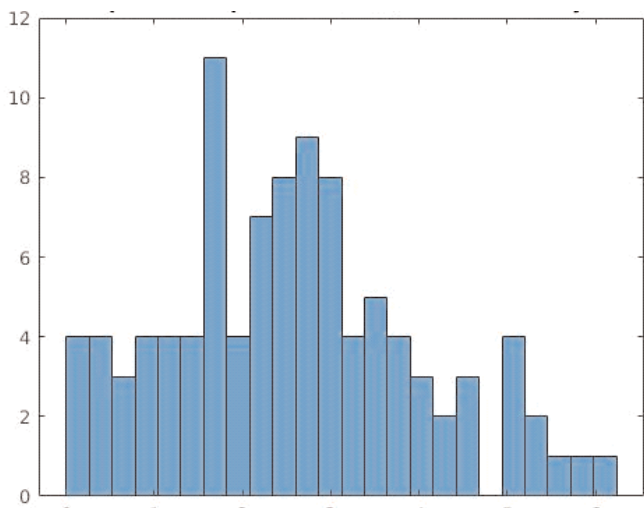


Рис. 6. Гистограмма погрешностей при оценивании пеленга на ИРИ, находящегося в дальней зоне

Как следует из гистограмм, изображённых на рис. 5, 6 оценивание координат ИРИ, расположенного в дальней зоне, выполняется с низким качеством, однако погрешность вычисления пеленга на ИРИ с вероятностью 0,95 не превышает 5 градусов, что соответствует типовым значениям угломерных комплексов ОМП ИРИ, применяемых на практике [10].

Заключение

Применение разработанного разностно-дальномерного метода оценивания координат ИРИ на основе искусственных нейронных сетей в отличие от известных методов позволяет решать задачи ОМП ИРИ, расположенного как в ближней, так и дальней зоне без необходимости воспроизведения в полном объёме достаточно сложной логики функционирующей рассматриваемых систем.

Результаты имитационного моделирования свидетельст-

вуют о том, что погрешность оценивания координат ИРИ, находящегося в ближней зоне, а также погрешность вычисления пеленга на ИРИ, находящейся в дальней зоне не превышает типовых значений.

Реализация данного метода на практике не требует изменения аппаратной части существующих комплексов радиоуправления и может быть выполнена путем обновления программного обеспечения.

Литература

1. Овчаренко К.Л. Алгоритм расчета координат источника радиоизлучения дальномерным методом при однопозиционных измерениях с систематической ошибкой // Телекоммуникации, 2014. № 6. С. 6-13.
2. Овчаренко К.Л. Определение координат источников радиоизлучения дальномерным методом на базе однопозиционного подвижного измерителя // Телекоммуникации, 2013. № 10. С. 27-34.
3. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / под ред. А. М. Рембовского. 2-е изд. М.: Горячая линия – Телеком, 2010. 624 с.
4. Аджемов С.С., Кленов Н.В., Терещинок М.В., Чиров Д.С. Использование искусственных нейронных сетей для классификации источников сигналов в системах когнитивного радио // Программирование. 2016. № 3. С. 3-11.
5. Еремеев И.Ю., Овчаренко К.Л. Метод вычислительно-эффективного оценивания взаимных временных задержек в условиях априорной неопределенности частотных сдвигов сигналов спутниковых терминалов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2016. № 651. С. 98-105.
6. Разностно-дальномерный метод определения местоположения земных станций спутниковых систем связи с применением ретранслятора на беспилотном летательном аппарате / К.Л. Овчаренко, И.Ю. Еремеев, К.В. Сазонов и др. // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18. № 1. С. 176-201.
7. Метод определения местоположения земных станций по ретранслированным сигналам в условиях неопределенности координат космического аппарата-ретранслятора с применением беспилотного летательного аппарата / А.С. Босый, И.Ю. Еремеев, К.Л. Овчаренко и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, 2019. № 657. С. 161-169.
8. Пат. на изобретение № 2204145. Разностно-дальномерный способ пеленгования источника радиоизлучения и реализующее его устройство / Сайбель А. Г. Приоритет от 28.11.2000.
9. Овчаренко К.Л., Еремеев И.Ю., Гайчук Ю.Н., Петухов П.Е. Методика построения эллипсоида ошибок для оценивания точности определения местоположения земных станций систем спутниковой связи с применением беспилотного летательного аппарата // Научно-технические технологии, 2017. Т. 18. № 11. С. 22-26.
10. Богдановский С.В., Овчаренко К.Л., Симонов А.Н. Метод определения координат источников радиоизлучения на основе поляризационных измерений // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, 2017. № 657. С. 38-43.

DIFFERENCE-RANGE METHOD OF ESTIMATING COORDINATES OF RADIO EMISSION SOURCES BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS WITH BEARING IN THE DISTANT ZONE

Alexander S. Bosyy, Cherepovets Higher Military Engineering Order of Zhukov School of Radio Electronics (CHVIIURE), Cherepovets, Russia, sanboss@mail.ru

Denis A. Shlyonskikh, A.F.Mozhaysky Military Space Academy (A.F.Mozhaysky VKA), St. Petersburg, Russia, sshlyon@gmail.com

Konstantin L. Ovcharenko, A.F.Mozhaysky Military Space Academy (A.F.Mozhaysky VKA), St. Petersburg, Russia, kostao@ya.ru

Alexander V. Timoshenko, JSC "Radiotechnical Institute named after academician A.L. Mints"; National Research University MIET, Moscow, Russia, u567ku78@gmail.com

Abstract

The need to determine the location of sources of radio emission (RES) arises when solving problems of various applied problems. The most common methods for determining the location of RES are differential-ranging methods. The use of difference-ranging methods in practice allows us to achieve a fairly high accuracy in determining the location of an RES located in the near zone, that is, inside an area bounded by measuring points. However, with the removal of the RES from the measuring points, the error in estimating its coordinates increases significantly. The article presents a new differential-ranging method for determining the location of RES in the far zone using a neural network. As additional information about RES in the far zone, where the error of coordinate estimates significantly exceeds the permissible values, it is proposed to evaluate the bearing on the RES. As an artificial neural network, a two-layer network with direct connection, one hidden layer of fifty-one neurons of the hyperbolic tangent type and one output layer of three neurons with a linear activation function was selected. As a result of mathematical modeling, we obtained estimates of the accuracy of calculating the coordinates of the RES located in the near zone, as well as estimates of the accuracy of direction finding of the RES located in the far zone. The application of the developed method is advisable when implementing the software part of electronic control systems to counter the illegitimate use of the time-frequency resource of commercial communication systems. Another advantage of the developed method is that its implementation in practice does not require changes in the hardware of the existing radio monitoring systems and can be performed by updating the software.

Keywords: positioning; radio emission source; differential and ranging method; bearing; neural networks.

References

1. Ovcharenko K.L. (2014). Algorithm for calculating the coordinates of the radio emission source using the rangefinder method for single-position measurements with a systematic error. *Telecommunications*. 2014. No. 6, pp. 6-13.
2. Ovcharenko K.L. (2013). Determination of coordinates of radio emission sources by a range-measuring method based on a single-position mobile meter // *Telecommunications*. 2013. No. 10, pp. 27-34.
3. Rembovsky A.M., Ashihmin A.V., Kozmin V.A. (2010). *Radio monitoring – problems, methods, means*, ed. by A. M. Tambovskogo. 2nd ed. Moscow: Hotline-Telecom. 624 p.
4. Adjemov S.S., Klenov N.V., Tereshonok M.V., Chirov D.S. (2016). The use of artificial neural networks for classification of signal sources in cognitive radio systems. *Programming and Computer Software*. Vol. 42. No. 3, pp. 121-128.
5. Ereemeev I.Yu., Ovcharenko K.L. (2016). The method of computationally efficient estimation of mutual time delays in conditions of a priori uncertainty of frequency shifts of satellite terminal signals. *Proceedings of the Military space Academy named after A. F. Mozhaysky*. No. 651, pp. 98-105.
6. Ovcharenko K.L., Ereemeev I.Yu., Sazonov K.V. (2019). Difference-distance method for determining the location of earth stations of satellite communication systems using a repeater on an unmanned aerial vehicle. *Proceedings of Spiiran*. Vol. 18. No. 1, pp. 176-201.
7. Bosyy A.S., Ereemeev I.Yu., Ovcharenko K.L. (2019). The method for determining the location of earth stations by retransmitted signals in the conditions of uncertainty of the coordinates of the relay spacecraft using an unmanned aerial vehicle. *Proceedings Of the military space Academy named after A. F. Mozhaysky*. No. 657, pp. 161-169.
8. The patent for the invention № 2204145. Difference-range-measuring method for bearing a radio source and its implementing device. Saybel A.G. Priority from 28.11.2000.
9. Petukhov P.E., Ovcharenko K.L., Ereemeev I.Yu., Gaichuk Yu.N. (2017). The method of constructing an ellipsoid of errors for estimating the accuracy of determining the location of earth stations of satellite communication systems using an unmanned aerial vehicle. *Science-Intensive technologies*. Vol. 18. No. 11, pp. 22-26.
10. Bogdanovsky S.V., Ovcharenko K.L., Simonov A.N. (2017). The method for determining the coordinates of radio emission sources based on polarization measurements. *Proceedings Of the military space Academy named after A. F. Mozhaysky*. No. 657, pp. 38-43.

Information about authors:

Alexander S. Bosyy, Cherepovets Higher Military Engineering Order of Zhukov School of Radio Electronics (CHVIIURE), Cherepovets, Russia

Denis A. Shlyonskikh, A.F.Mozhaysky Military Space Academy (A.F.Mozhaysky VKA), St. Petersburg, Russia

Konstantin L. Ovcharenko, A.F.Mozhaysky Military Space Academy (A.F.Mozhaysky VKA), St. Petersburg, Russia

Alexander V. Timoshenko, JSC "Radiotechnical Institute named after academician A.L. Mints"; National Research University MIET, Moscow, Russia