

Для цитирования: Бызов А. Н., Петров Ю. В., Рогожин В. А. Применение нейронных сетей для определения дальности до источника радиоизлучения // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 6. С. DOI
УДК 629.7.05

А. Н. Бызов¹, Ю. В. Петров¹, В. А. Рогожин¹

¹ БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДО ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ*

В статье предлагается новый метод определения местоположения источников радиоизлучения с борта летательного аппарата, отличающийся применением искусственной нейронной сети. Метод основан на использовании персептрона Румельхарта, представляющего собой многослойную сеть прямого распространения. Предложена структура построения персептрона, и определен набор входных параметров. Проведено обучение персептрона с помощью алгоритма обратного распространения ошибки на выбранном множестве обучающих примеров. Сравнение предложенного метода с двумя ранее известными показало, что его точностные возможности не уступают характеристикам известных методов, а в некоторых случаях превышают их при различных значениях среднеквадратического отклонения ошибки измерения пеленга. Новый метод требует значительных вычислительных затрат, однако может быть реализован в перспективных бортовых комплексах.

Ключевые слова: источник излучения, определение местоположения, искусственная нейронная сеть, персептрон Румельхарта

Введение

Из-за возросшей роли военной авиации в современных конфликтах способность противовоздушной обороны (ПВО) обеспечить ее уничтожение во всем диапазоне высот и скоростей во многом определяет национальную безопасность страны в целом. В системе ПВО особое место принадлежит подсистеме разведки воздушного пространства и ее основной составляющей – радиолокационным средствам [1]. Развитие радиолокационных средств ПВО способствовало повышению требований к системам радиоэлектронной разведки воздушного базирования, в первую очередь к своевременному определению местоположения этих средств задолго до входа в зону их поражения. На сегодня при решении задачи по определению местоположения источников радиоизлучения (ИРИ) бортовыми системами предпочтение отдается пассивным средствам радиолокации, поэтому применение дальномерных или угломерно-дальномерных методов определения местоположения ИРИ оказывается невозможным.

При определении местоположения ИРИ бортовыми средствами одного подвижного приемного пункта создается «база» разнесения точек приема

за счет собственного движения [2]. Использование данного метода имеет существенные недостатки: низкую точность и большое время достижения заданной точности.

В работе [3] предложен метод определения дальности до ИРИ, основанный на проверке статистических гипотез о начальной дальности до ИРИ, и алгоритм проверки таких статистических гипотез на основе этого метода. Суть метода состоит в следующем: выдвигается M гипотез о начальном значении дальности до цели; строится M одномерных калмановских фильтров для оценивания пеленга на цель, в каждом из которых используется своя гипотеза о начальном значении дальности до цели; текущая оценка дальности до цели, используемая в фильтрах, рассчитывается следующим образом:

$$D_i^m = D_{i-1}^m - V_{i-1} \cos \hat{\varphi}_{i-1} \Delta t, \quad (1)$$

где D_i^m – гипотеза по дальности на i -м шаге; V_{i-1} – горизонтальная скорость; $\hat{\varphi}_{i-1}$ – оценка азимутального пеленга; Δt – интервал измерения.

В качестве критерия при выборе гипотезы используется минимум суммы квадратов невязок. Оценки угла азимута и дальности до ИРИ

* Работа проведена в соответствии с постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 № 218 (ПРОЕКТ 218) в рамках НИОКТР, выполняемой ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 074-11-2018-025 от 13.07.2018).

на текущем шаге берутся из фильтра, соответствующего «победившей» гипотезе.

В связи с интенсивным развитием вычислительных средств появилась возможность использовать сложные, вычислительно ресурсоемкие методы и алгоритмы, в том числе построенные на базе нейронных сетей. Применение таких алгоритмов нашло широкое применение в различных областях: системах управления летательными аппаратами [4, 5], распознавании текстов и изображений [6], прогнозировании процессов в экономике, медицине и других сферах деятельности. Преимуществами данных алгоритмов являются решение задач при неизвестных закономерностях, устойчивость к шумам во входных данных, адаптация к изменениям «окружающей среды» и т.д. [7, 8].

Предлагается использовать искусственную нейронную сеть (ИНС) для решения задачи определения местоположения ИРИ бортовыми средствами одного подвижного приемного пункта. Метод основан на использовании персептрона Румельхарта. Такая модель ИНС представляет собой многослойную сеть прямого распространения, при этом обучение происходит с учителем с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. Каждый нейрон сети имеет нелинейную дифференцируемую функцию активации [7, 8].

Метод определения местоположения ИРИ с применением ИНС

На рис. 1 показана структура многослойного персептрона, имеющего n нейронов во входном слое, m нейронов в выходном слое и k_j нейронов в $(V - 1)$ скрытых слоях.

В качестве функции активации используется сигмоидальная функция:

$$y_l = \frac{1}{1 + e^{-v_l}}, \quad (2)$$

где v_l – взвешенная сумма всех синаптических входов плюс пороговое значение нейрона l ; y_l – выход нейрона.

Использование сигмоидальной функции позволяет усиливать слабые сигналы и при этом защититься от насыщения от сильных сигналов. Во время обучения использование сигмоидальной функции позволяет существенно снизить вычислительную сложность при применении метода обратного распространения ошибки за счет возможности легкого выражения производной через саму функцию.

Для определения оптимальной структуры нейронной сети можно воспользоваться общими положениями теоремы Колмогорова – Арнольда – Хехт-Нильсена [9]. Проблемой является определение числа нейронов в сети для конкретной выборки. Выбор структуры сети, количества скрытых слоев и остальных параметров осуществляется, как правило, на основе опыта разработчика. Для решения задачи определения местоположения ИРИ бортовыми средствами одного подвижного приемного пункта в качестве входной информации при построении ИНС предлагается использовать следующие данные: текущее значение времени с начала обнаружения ИРИ (начала решения задачи); текущую оценку азимутального пеленга на ИРИ; оценку изменения пеленга; текущий курс носителя; текущую скорость носителя; среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибки измерения пеленга; массивы сумм квадратов невязок; массивы сумм невязок.

Массивы сумм невязок и сумм квадратов невязок накапливаются в результате применения набора одномерных фильтров Калмана, описанных в [3]. При этом для каждого фильтра Калмана используется своя гипотеза о начальном значении дальности, рассчитываемая по следующему закону:

$$D^k = \begin{cases} D^{k-1} + 1, & D^{k-1} > 1 \\ D^{k-1} - 1, & D^{k-1} < 1 \end{cases} \quad (3)$$

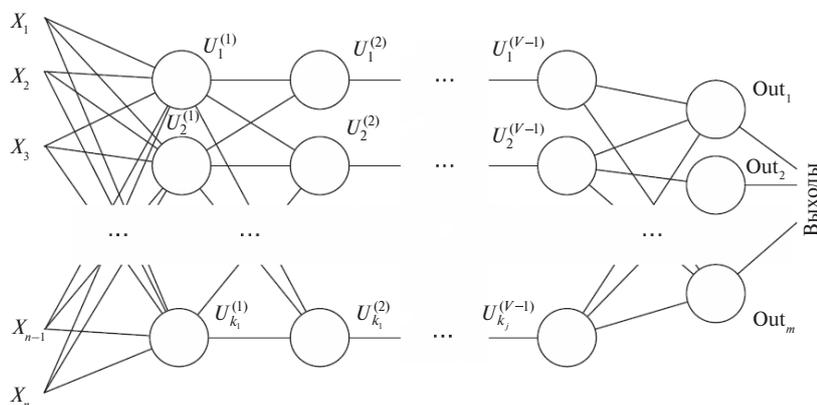


Рисунок 1. Структура многослойного персептрона Румельхарта: X_n – нейрон во входном слое; U_{kj}^{V-1} – нейрон в скрытом слое $(V - 1)$; Out_m – выходной нейрон

Текущая оценка дальности до цели, используемая фильтром:

$$D_i^k = D_{i-1}^k - V_{\text{гор},i-1} \cos(\hat{\Phi}_{\text{аз},i-1}^k) \Delta t. \quad (4)$$

Текущая оценка азимутального пеленга и его изменение определяются на основе анализа сумм квадратов невязок путем поиска минимального значения суммы квадратов невязок и соответствующего фильтра Калмана.

Как было сказано выше, выбор структуры ИНС и остальных параметров определяется разработчиком, поэтому для проведения исследований был создан и обучен перцептрон со следующими параметрами:

- входной вектор размерностью 70;
- первый слой с размерностью 160;
- второй слой с размерностью 80;
- третий слой с размерностью 40;
- четвертый слой с размерностью 20;
- пятый слой с размерностью 10;
- выходной слой с размерностью 1.

Обучение предложенного перцептрона производилось с помощью алгоритма обратного распространения ошибки на выбранном множестве обучающих примеров с начальной дальности до ИРИ в пределах от 10 до 120 км. Количество эпох обучения – 220 000. Во время обучения порядок представления примеров обучения для разных эпох подчинялся случайному закону, это позволило практически исключить возможность появления замкнутых циклов в процессе изменения синаптических весов.

Для оценки эффективности предложенного метода на основе многослойного перцептрона было проведено моделирование с помощью «Программы проведения исследований методов определения местоположения источника радиоизлучения»,

описанной в [10]. Предложенный метод рассматривался в сравнении с алгоритмом, описанным в [3], а также с триангуляционным методом (с предварительной экспоненциальной фильтрацией измерений пеленгов). Исследование проводилось при следующих параметрах:

- СКО ошибки измерения пеленгов – от 15 до 60 угл. мин;
- начальная дальность до ИРИ – от 10 до 120 км;
- скорость носителя – от 220 до 300 м/с;
- направление движения носителя относительно ИРИ – случайное;
- требуемая относительная ошибка оценивания дальности до ИРИ – 10% от истинного значения.

На рис. 2–4 показаны графики зависимости вероятностей оценивания дальности до ИРИ с требуемой точностью от времени для трех вышеописанных методов при различных СКО ошибок измерения пеленга.

Как видно из графиков, вероятность оценки с требуемой точностью для многослойного перцептрона незначительно превышает вероятность гипотезного фильтра (3–5%) и значительно превосходит триангуляционный метод с предварительной фильтрацией при различных СКО измерения ошибки пеленга.

Выводы

Предложен новый метод определения местоположения источника радиоизлучения по измерениям одного пассивного подвижного пеленгатора, основанный на использовании многослойного перцептрона. Его точностные характеристики не уступают характеристикам гипотезного фильтра, а в некоторых случаях превышают их. Новый метод требует значительных вычислительных затрат и может быть реализован в перспективных бортовых комплексах.

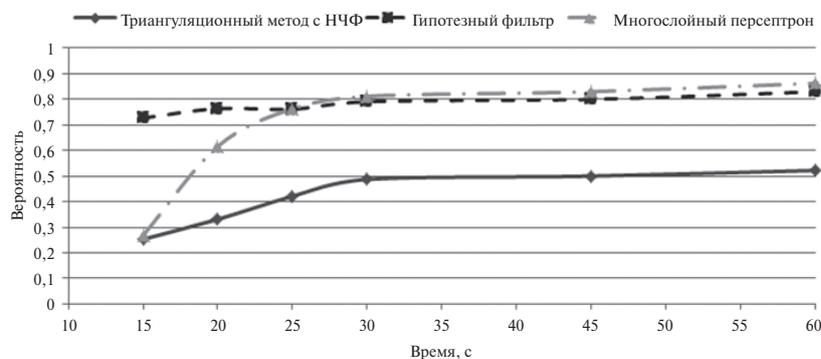


Рисунок 2. Вероятности оценивания дальности до источников радиоизлучения с требуемой точностью от времени для трех методов при среднеквадратическом отклонении ошибки пеленга 15 угл. мин

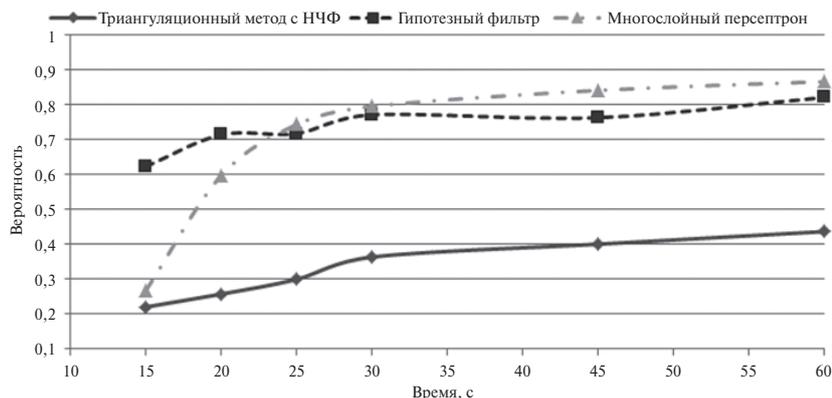


Рисунок 3. Вероятности оценивания дальности до источников радиоизлучения с требуемой точностью от времени для трех методов при среднеквадратическом отклонении ошибки пеленга 30 угл. мин

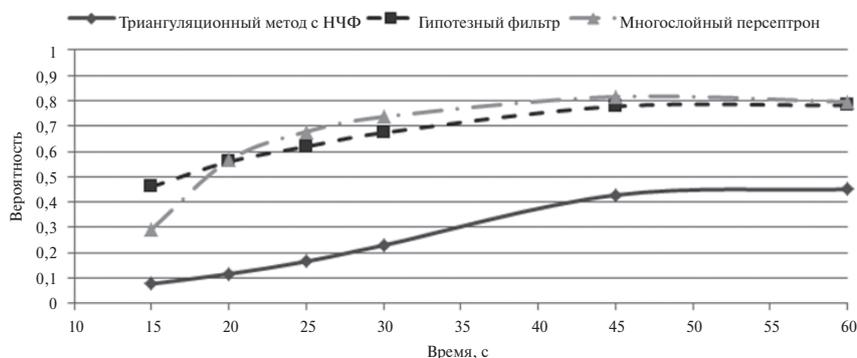


Рисунок 4. Вероятности оценивания дальности до источников радиоизлучения с требуемой точностью от времени для трех методов при среднеквадратическом отклонении ошибки пеленга 60 угл. мин

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корляков В. В. Радиолокация на современном этапе [Электронный ресурс] // Воздушно-космическая оборона. URL: <http://www.vko.ru/konsercii/radiolokaciya-na-sovremennom-etape> (дата обращения: 16.02.2019).
2. Мельников Ю. П., Попов С. В. О беспеленговых методах позиционирования летательных аппаратов относительно источников излучения // Успехи современной радиоэлектроники. 2002. № 12. С. 8–14.
3. Петров Ю. В., Бызов А. Н. Определение местоположения источника радиоизлучения пассивными средствами летательного аппарата // Вопросы радиоэлектроники. 2014. № 4. С. 47–56.
4. Суханов Н. В. Схема управления летательным аппаратом на основе нейронных сетей [Электронный ресурс] // Электронный журнал «Труды МАИ». № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=36013> (дата обращения: 16.02.2019).
5. Нейросетевая реализация автоматического управления безопасной посадкой беспилотного летательного аппарата / А. Ю. Кузин, Д. В. Курмаков, А. В. Лукьянов, Д. А. Михайлин [Электронный ресурс] // Электронный журнал «Труды МАИ». № 70. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=44540> (дата обращения: 16.02.2019).
6. Фаустова К. И. Нейронные сети: применение сегодня и перспективы развития // Территория науки. 2017. № 4. С. 83–87.
7. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
8. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
9. Лукичев Д. В., Усольцев А. А. Синтез оптимальной структуры нейросетевых устройств // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2005. № 20. С. 97–102.
10. Бызов А. Н. Программа проведения исследований методов определения местоположения источника радиоизлучения. Молодежь. Техника. Космос: труды VI Общероссийской молодежной научно-технической конференции. СПб.: БГТУ, 2014. С. 178–180.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бызов Алексей Николаевич, к.т. н, научный сотрудник, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, тел.: 8 (931) 207-92-31, e-mail: aleksey.bizov@yandex.ru.

Петров Юрий Витальевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры радиоэлектронных систем управления, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, тел.: 8 (921) 926-63-39, e-mail: petrov-i4@yandex.ru.

Рогожин Василий Александрович, к.т.н., доцент кафедры радиоэлектронных систем управления, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, тел.: 8 (921) 955-70-48, e-mail: rogozhin@mail.ru.

For citation: Byzov A.N., Petrov Yu. V., Rogozhin V.A. Application of neural networks for determining distance to radio source. Voprosy radioelektroniki, 2019, no. 6, pp. DOI

A.N. Byzov, Yu.V. Petrov, V.A. Rogozhin

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR DETERMINING DISTANCE TO RADIO SOURCE

This article contains a new method for determining the location of sources of radio emission from the aircraft. Unlike the known methods in the new is using artificial neural network. The method is based on using Rumelhart perceptron, which represents a multilayer network of direct distribution. For the task was offered perceptron building structure and was determined input parameter set. Perception training was also carried out using the back propagation of error algorithm for selected multitude of teaching example. This article compares the new method with two already know. Analysis of new method shows that its accuracy characteristics are not worse than in the known methods. In some cases accuracy characteristics of the new method are even better. Than known methods of different values of SD for bearing measurement error. However, the new method requires a lot of computational efforts. This method can be realized only for the advanced aircrafts.

Keywords: radiation source, location, artificial neural network, Rumelhart perceptron

REFERENCES

1. Korlyakov V.V. Radar at the present stage. *Vozdushno-kosmicheskaya oborona*. (In Russian). Available at: <http://www.vko.ru/koncepcii/radiolokaciya-na-sovremennom-etape> (accessed 16.02.2019).
2. Melnikov Yu. P., Popov S.V. On non-direction finding methods for positioning aircraft relative to radiation sources. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2002, no. 12, pp. 8–14. (In Russian).
3. Byzov A.N., Petrov Yu.V. Determination of the radio emission source location by passive tools of the aircraft. *Voprosy radioelektroniki*, 2014, vol. 2, no. 4, pp. 47–56 (In Russian).
4. Sukhanov N.V. Aircraft control scheme based on neural networks. *Trudy MAI*, no. 65. (In Russian). Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=36013> (accessed 16.02.2019).
5. Kuzin A.U., Kurmakov D.V., Lukyanov A.V., Mikhailin D.A. Neural network implementation of automatic control of the safe landing of an unmanned aerial vehicle. *Trudy MAI*, no. 70. (In Russian). Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=44540> (accessed 16.02.2019).
6. Faustova K.I. Neural networks: application today and development prospects. *Territoriya nauki*, 2017, no. 4, pp. 83–87 (In Russian).
7. Haykin S. *Neural networks: a comprehensive foundation*. 2nd ed. Prentice Hall, 1998, 842 p.
8. Osovsky S. *Neironnye seti dlya obrabotki informatsii* [Neural networks for information processing]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2002, 344 p. (In Russian).
9. Lukichev D.V., Usoltsev A.A. Synthesis of optimal structure of neural network devices. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2005, no. 20, pp. 97–102. (In Russian).
10. Byzov A.N. Programme for research on methods for determining the location of the source of radio emission. (Conference proceedings) Molodezh. Tekhnika. Kosmos: trudy VI Obshcherossiiskoi molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, 2014, pp. 178–180. (In Russian).

AUTHORS

Byzov Aleksei, Ph. D., research worker, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», 1, 1st Krasnoarmejskaja St., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, tel.: +7 (931) 207-92-31, e-mail: aleksey.bizov@yandex.ru.

Petrov Yuri, Ph. D., assistant professor, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», 1, 1st Krasnoarmejskaja St., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, tel.: +7 (921) 926-63-39, e-mail: petrov-i4@yandex.ru.

Rogozhin Vasilii, Ph. D., assistant professor, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», 1, 1st Krasnoarmejskaja St., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, tel.: +7 (921) 955-70-48, e-mail: rogozhin@mail.ru.

