

Научная статья

УДК 621.3.09

DOI: <https://doi.org/10.18127/j5604128-202405-08>

Использование нейронных сетей для дальнейшего развития программной части аппаратно-программных комплексов радиозондирования ионосферы

А.О. Щирий¹

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН им. Н.В. Пушкова (Москва, г. Троицк, Россия)

¹ andreyschiriy@gmail.com

Аннотация

Постановка проблемы. По данным радиозондирования ионосферы коротковолновыми сигналами (ионограмм) можно получить информацию о процессах в ионосферной плазме, о ее структуре и состоянии; эта информация также значима для радиотехнических систем, работающих в коротковолновом диапазоне. Важнейшая проблема при автоматической обработке ионограмм – выделение треков различных мод радиосигнала. Существующие методы выделения треков не обеспечивают приемлемое качество их выделения (особенно для ионограмм наклонного зондирования) по ряду причин. Поэтому применим полуавтоматический способ выделения сигнала на ионограмме.

Цель. Создание методики выделения треков мод радиосигнала на ионограмме, лишенного указанных недостатков.

Результаты. Предложена методика использования нейронных сетей для выделения треков мод радиосигнала на ионограммах, учитывающая специфику ионограмм: при построении обучающей выборки размеченных ионограмм, отбирают ионограммы радиозондирования ионосферы для нормальных условий распространения радиоволн в ионосфере (отсутствие солнечных и геомагнитных возмущений) и при разметке помечают их бинарным признаком «не-аномальна», дополнительно отбирают и добавляют в выборку ионограммы для аномальных условий распространения и на этапе разметки помечают их бинарным признаком «аномальна», а на стадии обучения модели в качестве признаков используют не только битовые маски выделенных треков, но и метаданные ионограмм.

Практическая значимость. Предложенная методика предназначена и может быть использована для реализации автоматической обработки ионограмм, причем выделение треков мод сигнала – это первый и совершенно необходимый этап. Для полноценной апробации и оценки эффективности и качества работы методики требуется построение больших обучающих выборок размеченных ионограмм.

Ключевые слова

Ионосферное распространение декаметровых волн, наклонное зондирование ионосферы, ионограмма, аномальные условия распространения радиоволн, выделение сигнала, глубокие нейронные сети

Для цитирования

Щирий А.О. Использование нейронных сетей для дальнейшего развития программной части аппаратно-программных комплексов радиозондирования ионосферы // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 5. С. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202405-08>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

Работа радиотехнических систем (РТС) декаметрового (ДКМ) диапазона, таких как системы коротковолновой (КВ) радиосвязи и загоризонтной (ЗГ) радиолокации, основана на способности КВ многократно отражаться от ионосферы и земной поверхности. Важнейшей задачей для обеспечения корректного функционирования таких РТС является адаптация к ионосферным условиям, для чего в составе этих РТС содержится РТС частотного обеспечения, включающая аппаратуру радиозондирования ионосферы и анализатор загруженности радиоканала. При этом возможна адаптация РТС ДКМ диапазона по рабочей частоте, мощности излучения, скорости передачи информации. Аппаратура радиозондирования ионосферы, как правило, обеспечивает диагностику в режимах наклонного зондирования ионосферы (НЗИ) и вертикального зондирования ионосферы (ВЗИ). В случае ЗГ радиолокационных станций (РЛС) обязателен также режим возвратно-наклонного зондирования [1]. Адаптация РТС требует автоматической обработки данных радиозондирования. При этом важнейшей задачей при такой автоматической

обработке является автоматическое выделение треков мод радиосигнала на ионограмме [2–5]. Ионограмма НЗИ представляет собой зависимость времени группового запаздывания и амплитуды каждой моды распространения радиосигнала от частоты излучения [6]. Ионограмма ВЗИ представляет собой зависимость амплитуды принятого сигнала от частоты и действующей высоты отражения, по трекам мод на ионограмме ВЗИ определяют действующие высоты ионосферных слоёв. Хотя интерпретация результатов НЗИ и ВЗИ существенно отличается, проблематика выделения треков мод сигнала на ионограммах подобна для обоих видов зондирования, с тем уточнением, что в случае НЗИ картина модовой структуры на ионограмме намного сложнее и богаче, поэтому далее речь пойдет в основном о выделении треков мод именно на ионограммах НЗИ, как более общем случае.

Для обработки ионограмм может применяться метод трафаретных масок [7, 8], когда для выделения сигнальных компонент на ионограммах применяются маски, полученные путем синтеза искусственных ионограмм на основе математических моделей распространения дециметровых радиоволн в ионосферной плазме, далее подгоняемые под исследуемую экспериментальную ионограмму какими-либо алгоритмами; такой метод обладает рядом недостатков: применяемые математические модели зачастую не обеспечивают приемлемую точность, особенно в условиях геомагнитных и солнечных возмущений, особенно в верхних широтах; при таком подходе невозможно выделение сигнальных компонент аномальных мод распространения.

Более примитивные пороговые методы [9], хоть и не подвержены ограничениям моделей распространения радиоволн, но существенно зависят от отношения сигнал/шум (или «качества ионограммы», другими словами).

Значительно более удачными стоит признать методы, основанные на статистических критериях обнаружения резко выделяющихся значений выборки («грубых промахов») [10, 11]; однако статистические характеристики сигнала в случае пересечения треков сигнала с сосредоточенными помехами, и в случае диффузности (размытости) сигнала существенно отличаются от характеристик сигнала сильных мод, что может приводить к ошибкам; также при этом не используется информация о протяженной по частоте зондирования структуре трека (из-за обработки ионограммы блоками, равными одной вертикальной линии ионограммы).

Невысокое качество алгоритмов автоматического выделения даже для более простых ионограмм ВЗИ отмечается многими авторами, например [12]: «существующие на данный момент алгоритмы имеют значительно меньшую эффективность, например, точность автоматической обработки, применяемой дигизондом Рейниша (DPS-4) в летний период не превышает 70%, а в зимний 50%». Хотя процитированные оценки [12] делались для ионограмм ВЗИ верхних широт, а для ионограмм средних широт эффективность автоматической обработки ощутимо выше, для многих практических применений она остается недостаточной, тем более, если речь идет об обработке ионограмм НЗИ, а не ВЗИ.

Ввиду недостатков автоматических способов выделения треков (особенно для ионограмм НЗИ), приходилось применять полуавтоматический способ выделения сигнала на ионограмме [2], заключающийся в том, что на ионограмме вручную оператор выделялись прямоугольные области, содержащие следы треков мод полезного сигнала, далее в выбранных областях спектральные отсчеты, превышающие заданный порог, относились к сигналу, далее находились аппроксимирующие полиномы для получения треков мод.

Делаются попытки применения методов теории обучения машин, а конкретно – нейронных сетей, для решения задач выделения треков на ионограммах, правда, в основном ВЗИ, и с неясной эффективностью и точностью [12–16]; при этом используются подходы и архитектуры, созданные для обработки изображений, и не учитывающие специфику ионограмм.

Ц е л ь р а б о т ы – создание методики выделения треков мод радиосигнала на ионограмме, лишенного указанных недостатков.

Методика использования нейронных сетей для выделения треков мод

Предлагаемая методика заключается в следующем [17]. Для выделения треков мод радиосигнала на ионограмме обучают статистическую модель (глубокую нейронную сеть), далее обученную модель многократно применяют для выделения треков мод радиосигнала на ионограммах, перед обучением модели

производится построение обучающей выборки размеченных ионограмм (разметка определяет треки на ионограммах).

В отличие от существующих работ [12–16], при построении обучающей выборки размеченных ионограмм, отбирают ионограммы радиозондирования ионосферы для нормальных условий распространения радиоволн в ионосфере (отсутствие солнечных и геомагнитных возмущений) и при разметке помечают их бинарным признаком «не-аномальна», дополнительно отбирают и добавляют в выборку ионограммы для аномальных условий распространения и на этапе разметки помечают их бинарным признаком «аномальна», а на стадии обучения модели в качестве признаков используют не только битовые маски выделенных треков, но и метаданные ионограмм (дату-время зондирования, координаты передающего и приемного пунктов).

Для практической реализации предлагаемой методики (и оценки её эффективности) необходимо разметить, вручную выделяя треки, весьма большие массивы ионограмм (десятки тысяч). Требование больших объемов обучающих выборок вызвано большим числом внутренних параметров моделей глубокого обучения (объектов в обучающей выборке должно быть гораздо больше, чем число параметров модели, иначе модель просто «переобучится» под конкретные данные).

Произведена предварительная апробация выделения треков радиосигнала на ионограмме НЗИ посредством сверточных нейронных сетей (CNN) – пока неглубоких, поскольку еще не размечены необходимые для глубоких сетей большие обучающие выборки; архитектура неглубокой сети: 5 сверточных слоев с функциями активации ReLU между ними и с сигмидой после последнего слоя. Пример предварительных результатов показан на рис. 1 (исходное изображение ионограммы, контуры автоматически выделенных треков мод, карта вероятностей выделения сигнальных компонент полученная с последнего слоя нейронной сети до функции активации; надписи по осям в условных единицах – номера пикселей).

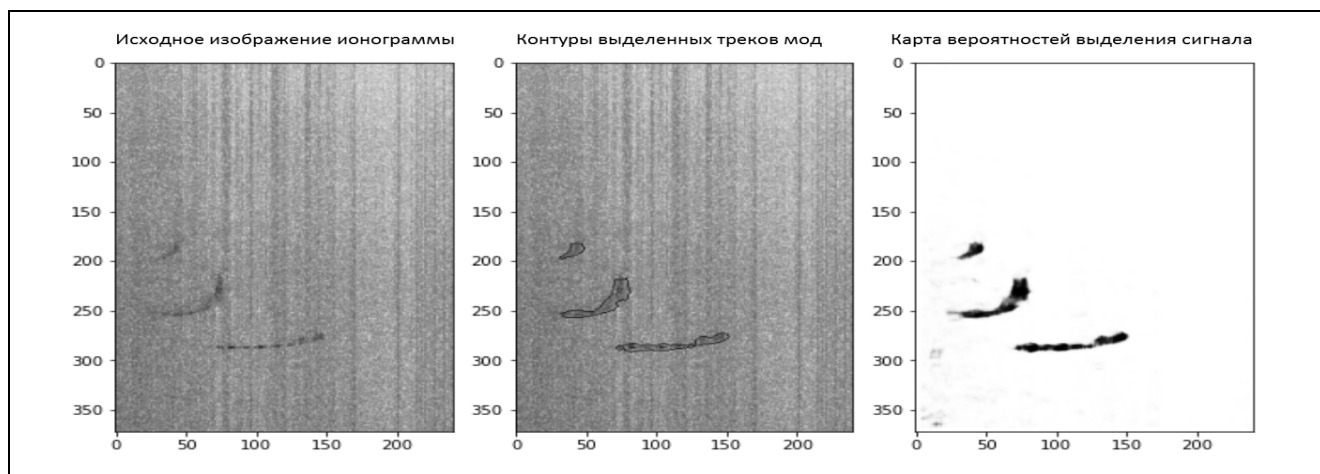


Рис. 1. Предварительные результаты предварительной апробации выделения треков мод на ионограмме НЗИ

Fig. 1. Preliminary results

Для более эффективной разметки, нами разрабатывается специализированное программное обеспечение выделения различных объектов на ионограммах. Отличие такого специализированного средства разметки от существующих программ разметки изображений (а ионограмму можно представлять как изображение, более того именно так она чаще и представлена) в том что должны быть реализованы средства не только выделения границ треков мод радиосигнала, но и возможность разметки всей той информации, которую «видит» человек (эксперт) по ионограмме: верхние и нижние лучи, магнитоионные расщепления, области повышенной диффузности, сосредоточенные (станционные) помехи, фоновые помехи и др. Треки могут сопровождаться дополнительными атрибутами разметки: верхний луч, магнитоионное расщепление, область диффузности, «Е или Es», спорный слабый сигнал, сбой аппаратуры. Кроме треков сигнала могут быть выделены и шумовые объекты с соответствующей разметкой: станционный шум и фоновый шум; причем для станционных помех реализован еще один способ выделения – целыми вертикальными линиями. Также будет реализована функция загрузки разметки ионо-

граммы соседнего по времени (но уже размеченного) сеанса, с тем, чтобы начинать разметку не «с чистого листа», а редактировать загруженную разметку (в спокойных геофизических условиях соседние ионограммы одной радиотрассы могут слабо отличаться).

Заключение

Итак, предложена методика использования нейронных сетей для выделения треков мод радиосигнала на ионограммах, учитывающая специфику ионограмм. Для полноценной апробации и оценки эффективности методики требуется построение больших выборок размеченных ионограмм, на что будет нацелена дальнейшая работа. Кроме того, дальнейшее развитие описанного средства разметки будет заключаться в добавлении функционала разметки следов ионосферных неоднородностей, а также перекрестного контроля за результатами сторонних разметчиков.

Список источников

1. Fabrizio G.A. High frequency over-the-horizon radar: fundamental principles, signal processing, and practical applications. McGraw-Hill Education. 2013.
2. Щирий А.О. Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолиний: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2007. 19 с.
3. Щирий А.О. Развитие средств автоматизации наземного радиозондирования ионосферы // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2014. Т. 14. № 5. С. 170–173.
4. Щирий А.О. Архитектура программной части аппаратно-программного комплекса дистанционного наземного радиозондирования ионосферы // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2015. № 18. С. 144–152.
5. Щирий А.О. Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний // Журнал радиоэлектроники. 2022. № 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.4>
6. Филипп Н.Д., Блаунштейн Н.Ш., Ерухимов Л.М., Иванов В.А., Урядов В.П. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере. Кишинев: Штиинца. 1991. 286 с.
7. Пономарчук С.Н., Грозов В.П., Котович Г.В., Михайлов С.Я. Обработка и интерпретация ионограмм вертикального и наклонного зондирования для диагностики ионосферы на базе ЛЧМ-ионозонда // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. 2013. № 5(51). С. 163–166.
8. Патент РФ №2697433. Цыбуля К.Г. Способ автоматического определения параметров ионосферных слоев по ионограммам. Дата заявки: 26.10.2018. Дата публикации: 14.08.2019.
9. Егшин А.Б. Автоматизированная система адаптивной обработки сигналов со сверхбольшой базой для радиозондирования ионосферных радиолиний. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Марийский гос. техн. ун-т. Йошкар-Ола, 2003. 25 с.
10. Колчев А.А., Щирий А.О. Алгоритм автоматического выделения спектральных компонентов сигнала на ионограмме / Матер. десятого научно-практ. семинара «Новые информационные технологии». М.: Московский гос. ин-т электроники и математики. 2007. С. 102–107.
11. Недопекин А.Е. Метод обнаружения сигнала ЛЧМ-ионозонда в частотной области с учетом уширения принимаемых мод ионосферного распространения // Журнал Радиоэлектроники: электронный журнал. 2015. № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct15/5/text.pdf>
12. Долгачева С.А., Макарова Л.Н., Николаев А.В. Обработка ионограмм высокоширотных станций вертикального зондирования с использованием нейронных сетей: Es и F2 слои // Physics of Auroral Phenomena. 2020. Т. 43. № 1. С. 105–108.
13. Guo L., Xiong J. Multi-Scale Attention-Enhanced Deep Learning Model for Ionogram Automatic Scaling // Radio Science. 2023. V. 58. № 3. p.e2022RS007566. <https://doi.org/10.1029/2022RS007566>
14. Lu Z., Hua C., Wei N., Feng J., Lou P., Liu W. Research on classification of vertical ionogram based on deep convolution neural network // Progress in Geophysics. 2022. V. 37. № 5. P. 1834–1839. doi: 10.6038/pg2022GG0073
15. Xiao Z., Wang J., Li J., Zhao B., Hu L., Liu L. Deep-learning for ionogram automatic scaling // Advances in Space Research. 2020. V. 66. № 4. P. 942–950. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.009>
16. De la Jara C., Olivares C. Ionospheric echo detection in digital ionograms using convolutional neural networks // Radio Science. 2021. V. 56. № 8. P. 1–15.
17. Заявка № 2023135724 на изобретение. Способ автоматического выделения полезного сигнала на ионограмме радиозондирования ионосферы, основанный на машинном обучении (варианты) / А.О. Щирий; Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН им. Н.В. Пушкова, Москва; Заявл. 26.12.2023.

Информация об авторе

Андрей Олегович Щирий – к.т.н., ст. науч. сотрудник

SPIN-код: 8078-9492

ORCID: 0000-0001-7312-4424

Статья поступила в редакцию 29.08.2024

Одобрена после рецензирования 06.09.2024

Принята к публикации 20.09.2024

Original article

Neural networks usage for upgrade of the software part of equipment for radio sounding of the ionosphere

A.O. Schiriy¹¹ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Troitsk, Russia)¹ andreyschiriy@gmail.com

Abstract

According to ionospheric radiosounding data, short-wave signals can provide information about the processes in ionospheric plasma, its structure and condition; these data are also extremely important for radio engineering systems operating in the short-wave range. The most important problem in the automatic processing of ionograms (results of ionospheric radiosounding) is the allocation of tracks of various modes of the radio signal. The existing methods of track selection do not provide an acceptable quality of selection (especially for inclined sensing ionograms). Therefore, it was necessary to use a semi-automatic method of isolating the signal on the ionogram. The paper proposes a method of using neural networks to isolate tracks of radio signal modes on ionograms, taking into account the specifics of ionograms: when constructing a training sample of labeled ionograms, ionospheric radio sounding ionograms are selected for normal conditions of radio wave propagation in the ionosphere (absence of solar and geomagnetic disturbances) and when marking them, they are marked with a binary sign "non-abnormal", additionally selected and ionograms for abnormal propagation conditions are added to the sample and marked with the binary sign "abnormal" at the marking stage, and at the stage of model training, not only the bit masks of the selected tracks are used as features, but also the metadata of the ionograms. To fully test and evaluate the effectiveness of the method, it is necessary to build large samples of labeled ionograms. The requirement for large volumes of training samples is caused by a large number of internal parameters of deep learning models (and there must be much more objects for training than the number of model parameters, otherwise the model will simply "retrain" for specific data). For more effective marking, we are developing specialized software for highlighting various objects on ionograms. The difference between such a specialized marking tool from existing image marking programs is that means must be implemented not only to highlight the boundaries of the radio signal mode tracks, but also the possibility of marking all the information that a person "sees" on an ionogram: upper and lower rays, magnetoion rays, areas of increased diffusivity, concentrated (station) interference, background interference, and others. Tracks can be accompanied by additional marking attributes: upper beam, magneto-ionic splitting, diffusivity region, equipment failure. In addition to signal tracks, noise objects with appropriate markings can also be highlighted: station noise and background noise; moreover, for station interference, another way of highlighting is implemented – with whole vertical lines. Also, the further development of the markup tool described above will consist in adding the functionality of marking traces of ionospheric inhomogeneities, as well as cross-monitoring the results of third-party markups. To fully test and evaluate the effectiveness of the method, it is necessary to build large samples of labeled ionograms, which will be the focus of further work.

Keywords

Ionospheric propagation of decameter waves, oblique ionospheric sounding, ionogram, abnormal conditions of radio wave propagation, signal isolation, deep neural networks

For citation

Schiriy A.O. Neural networks usage for upgrade of the software part of equipment for radio sounding of the ionosphere. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2024. V. 29. № 5. P. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202405-08> (in Russian)

References

1. Fabrizio G.A. High frequency over-the-horizon radar: fundamental principles, signal processing, and practical applications. McGraw-Hill Education. 2013.
2. Shchiryj A.O. Razrabotka i modelirovanie algoritmov avtomaticheskogo izmereniya xarakteristik ionosfernyx korotkovolnovyx radiolnij: Avtoref. dis. ... kand. texn. nauk. SPb., 2007. 19 c.
3. Shchiryj A.O. Razvitie sredstv avtomatizacii nazemnogo radiozondirovaniya ionosfery. Fundamentalnyye problemy radioelektronnogo priborostroeniya. 2014. T. 14. № 5. S. 170–173.
4. Shchiryj A.O. Arxitektura programnoj chasti apparatno-programmnogo kompleksa distancionnogo nazemnogo radiozondirovaniya ionosfery. Novye informacionnyye tekhnologii v avtomatizirovannyx sistemax. 2015. № 18. S. 144–152.
5. Shchiryj A.O. Algoritmy i programnoe obespechenie avtomatizacii processov izmerenij i obrabotki dannyx operativnoj diagnostiki ionosfery i ionosfernyx radiolnij. Zhurnal radioelektroniki. 2022. № 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.4>
6. Filipp N.D., Blaunshtejn N.Sh., Eruximov L.M., Ivanov V.A., Uryadov V.P. Sovremennyye metody issledovaniya dinamicheskix processov v ionosfere. Kishinev: Shtiintsa. 1991. 286 s.
7. Ponomarchuk S.N., Grozov V.P., Kotovich G.V., Mixajlov S.Ya. Obrabotka i interpretaciya ionogramov vertikal'nogo i naklonnogo zondirovaniya dlya diagnostiki ionosfery na baze LChM-ionozonda. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akad. M.F. Reshetneva. 2013. № 5(51). S. 163–166.
8. Patent RF №2697433. Cybulya K.G. Sposob avtomaticheskogo opredeleniya parametrov ionosfernyx sloev po ionogrammam. Data zayavki: 26.10.2018. Data publikacii: 14.08.2019.
9. Egoshin A.B. Avtomatizirovannaya sistema adaptivnoj obrabotki signalov so sverxbol'shoj bazoj dlya radiozondirovaniya ionosfernyx radiolnij. Avtoref. dis. ... kand. texn. nauk. Marijskij gos. texn. un-t. Joshkar-Ola, 2003. 25 c.
10. Kolchev A.A., Shchiryj A.O. Algoritm avtomaticheskogo vydeleniya spektral'nyx komponentov signala na ionogramme / Mater. desyatogo nauchno-prakt. seminarov «Novyye informacionnyye tekhnologii». M.: Moskovskij gos. in-t elektroniki i matematiki. 2007. S. 102–107.

11. Nedopekin A.E. Metod obnaruzheniya signala LChM-ionozonda v chastotnoj oblasti s uchetom ushireniya prinimaemy`x mod ionosfernogo rasprostraneniya. Zhurnal Radioelektroniki: e`lektronny`j zhurnal. 2015. № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct15/5/text.pdf>
12. Dolgacheva S.A., Makarova L.N., Nikolaev A.V. Obrabotka ionogramm vy`sokoshirotny`x stancij vertikal`nogo zondirovaniya s ispol`zovaniem nejronny`x setej: Es i F2 sloi. Physics of Auroral Phenomena. 2020. T. 43. № 1. S. 105–108.
13. Guo L., Xiong J. Multi-Scale Attention-Enhanced Deep Learning Model for Ionogram Automatic Scaling. Radio Science. 2023. V. 58. № 3. p.e2022RS007566. <https://doi.org/10.1029/2022RS007566>
14. Lu Z., Hua C., Wei N., Feng J., Lou P., Liu W. Research on classification of vertical ionogram based on deep convolution neural network // Progress in Geophysics. 2022. V. 37. № 5. P. 1834–1839. doi: 10.6038/pg2022GG0073
15. Xiao Z., Wang J., Li J., Zhao B., Hu L., Liu L. Deep-learning for ionogram automatic scaling. Advances in Space Research. 2020. V. 66. № 4. P. 942–950. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.009>
16. De la Jara C., Olivares C. Ionospheric echo detection in digital ionograms using convolutional neural networks. Radio Science. 2021. V. 56. № 8. P. 1–15.
17. Zayavka № 2023135724 na izobretenie. Sposob avtomaticheskogo vy`deleniya poleznogo signala na ionogramme radiozondirovaniya ionosfery`, osnovanny`j na mashinnom obuchenii (varianty`) / A.O. Shhiry`j; Institut zemnogo magnetizma, ionosfery` i rasprostraneniya radiovoln RAN im. N.V. Pushkova, Moskva; Zayavl. 26.12.2023.

Information about the authors

Andrey O. Schiriy – Ph.D. (Eng.), Senior Researcher

The article was submitted 29.08.2024

Approved after reviewing 06.09.2024

Accepted for publication 20.09.2024

ЖУРНАЛ «НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Главный редактор: док. техн. наук, профессор Владимир Петрович Марин

Международный научно-технический журнал, в котором публикуются статьи по технологии обзора Земли, дистанционному мониторингу околоземного и подземного пространства, прогнозированию природных катастроф, предупреждению пожарной опасности, наводнению, техногенным и конфликтным экологическим ситуациям, новым методам энергообеспечения, высокоточной пространственно-временной метрики, электронной памяти на молекулярном уровне, самоорганизующимся адаптивным и реконфигурируемым открытым системам, аэрокосмическим и радиоэлектронным технологиям.

Включен в Перечень ВАК

Издается с 2000 г.

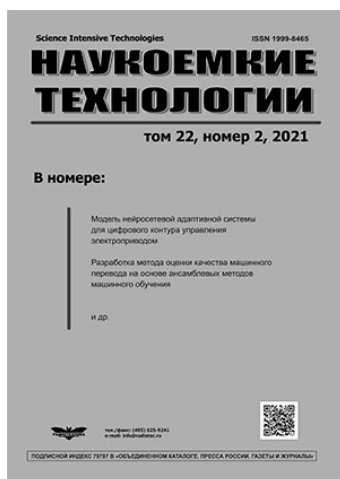
ISSN: 1999-8465

Периодичность – 8 номеров в год

«Пресса России» – индекс 83827

Научные специальности ВАК

- 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника
- 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств
- 2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники
- 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
- 5.12.1. Междисциплинарные исследования когнитивных процессов
- 5.12.4. Когнитивное моделирование
- 5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике
- 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика
- 5.2.6. Менеджмент



Подписаться на журналы, выпускаемые Издательством «Радиотехника» (см. 4-ю сторону обложки), можно с любого месяца и на любой срок непосредственно в Издательстве.

Адрес Издательства:

107031, г. Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6,

тел./факс: (495) 625-78-72, 621-48-37, 625-92-41

<http://www.radiotec.ru>, e-mail: info@radiotec.ru